微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

目录

除盐系列再生工艺优化实践 3
深度调峰与化学指标的关系 15
600MW湿冷机组利用热泵供热的应用与优化 23
超超临界汽轮机组串级供热灵活性改造 28
火电机组一次调频性能优化与EH油管振动综合治理的研究 33
浅谈630MW机组大流量抽汽改造的技术应用 44
燃煤电厂煤粉管道感温监测技术应用研究 48
燃煤机组启动过程中氮氧化物控制分析实践 52
燃煤机组自动发电量控制及一次调频应用与管理提升 61
“全关低压缸进汽蝶阀”在俄供320MW超临界直流定压机组上的应用 69
330MW机组中联门参调低负荷热再大抽汽量供热改造运行案例 77
PE-RT II型塑料热力管道架空敷设应用分析 82
基于大温差吸收式供热技术长输供暖项目应用 87
基于小区集中供热采用相变材料蓄热装置的系统经济性分析 92
空气源热泵技术应用及问题探讨 96
吸收式热泵技术在冷凝水余热回收中的应用 100
浅谈PE-RT Ⅱ管道在集中供热系统中的应用 106
武汉地区民用集中供热方案研究 114
660MW机组供热期间中排压力低限经验公式的应用 121
采暖季室内、外温度高低与相对湿度关联性的量化分析 127
城市供热系统管网蓄热潜力分析 133
低温多效海水淡化装置离子阱在线清洗控制技术的应用研究 137
高背压循环水供热与高低旁联合供热在辅助调峰中的应用 143
海水脱硫热电联产机组对海洋生态环境累积影响研究 148

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

基于趸售模式下多元化供热节能技术应用.....168
面向深度调峰的小机乏汽余热利用技术.....173
热电联产燃煤电厂废水处理系统改造技术路线探索.....177
热力站现状及节能分析.....183
数字化技术的智慧供热系统设计研究.....193
调节型喷射泵在供热系统中的应用.....200
提高阳床周期制水量的一个案例.....208
提高制水能力，满足对外供汽增长需求.....213
350MW超临界循环流化床机组深度调峰经济性分析.....220
630MW机组汽轮机超低背压供热改造和控制策略.....226
电站锅炉烟气的余热利用系统的研究.....231
某电厂350MW汽轮机组高中压缸提前预暖技术应用与研究.....242
浅析蒸汽管网的补偿设计.....247
供热机组热电解耦深度调峰技术分析.....258
关于深度调峰机组快速启动的分析研究.....262
汽轮机排汽余热的回收利用.....266
火电厂烟气余热利用系统的应用.....271
火力发电厂低碳运行的经济性研究.....279
面向大型蒸汽管网的智慧供热技术体系研究及应用.....282
旁路供热技术参与机组灵活性调峰分析.....288
热电机组旁路调峰收益分析与探讨.....294

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

除盐系列再生工艺优化实践

单晨曦 姜野 任延南 吴宜燃 杨舰 赵阳 鲁志军 于治 金全 金龙 许朕源
（华能丹东电厂 辽宁丹东 118300）

摘要：通过对离子交换系统再生设备的改进，再生过程中的酸碱用量、浓度、流量的推算、选择，小反洗、置换、正洗时间等参数的调试，使再生工艺得到优化、再生时间缩短、酸碱耗降低、制水能力得到提高，实现了节能减排，取得了良好的经济效益和社会效益。

关键词：流速 置换 浓度 再生时间 自用水率

1 设备简况

华能丹东电厂一期工程系Sargent&Lundy设计、整套引进的2X350MW燃煤机组，锅炉补给水系统由U.S.FILTER公司设计、制造；水源为铁甲水库，制水流程为预处理＋碳滤器＋一级复床＋混床；预处理为两台机械搅拌泥渣再循环型澄清池＋重力式滤池，一级除盐包括阳床、除碳器、阴床；为单元制，共两列。

除盐系列的床体为固定逆流再生；再生酸碱注入原设计使用计量泵，后酸注入改为喷射器；再生有关参数见表1。

2 存在的问题

2.1大阳床小阴床，周期制水量差距太大，不能同时再生，并且阴床周期制水量偏低。

2.2再生水泵出力低，管线沿途多处存在变径，再生水量不能满足阳床、阴床同时再生。

2.3 原设计再生工艺落后

原再生程序只是设有大反洗、静置、进酸碱、置换、正洗步骤，受再生水泵出力、沿途管线管径限制，稀释水供给能力非常低，阳床、阴床只能分别再生。

2.3.1 酸碱稀释水流量低，进酸碱，置换时间长，再生液流速低。

2.3.2 再生液浓度太高。

2.4 没有小反洗、小正洗工序。

表1 除盐系列再生系统有关参数

序号	设备	项目	单位	阳床	阴床
1		总高度	mm	3048	2438

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2	罐体	直径	mm	2286	2286
3		面积	m^2	4.10	4.10
4	树脂	层高	mm	1422	1041
5		装填体积	m^3	5.84	4.27
6	再生	稀释水流量	m^3/h	5.2	4.6
7		再生液浓度	%	5	4
8		再生水泵出力	m^3/h	18.5	
9	周期制水量（实际）		t	4438	2131

2.5 排气门等为手动操作，不能实现程序再生。

以上因素造成：再生效果不好，周期制水量偏低，酸碱耗偏高，除盐系列再生时间长达560min（9.32h），直接影响除盐系统制水能力和经济性。

2.6 2019年1–4月，酸碱耗分别是51.25g/moL、98.08g/moL，酸耗在标准范围，但是碱耗超过标准约50%。

3 技术改进路线

3.1 技术改进路线

3.1.1提高稀释水流量，

再生水泵出口，另加一条稀释水管线，两台再生水泵同时运行，两条管线分别供给阳床、阴床，以提高稀释水流量，降低酸碱浓度，提高再生效果和周期制水量。

3.1.2 增设小反洗，小正洗。

3.1.3 缩短再生时间，降低自用水率，提高制水能力。

3.1.3.1 缩短进酸碱、置换时间为合理数值。

3.1.3.2 阳床进酸、置换和阴床顶压、进碱、置换同时进行。

3.1.3.2 阳床、阴床小反洗同时进行。

3.1.3.2 阳床、阴床的小正洗同时进行。

3.1.4 进行优化再生工艺的调试。

3.1.5 周期制水量达到最高，降低阴床的再生用碱量，使阴床周期制水量为阳床的一半，实现：阴床再生两次、阳床再生一次。

3.2 设备、系统改进内容

表2 设备、系统改进内容

序号	改造内容	改造目的
1	阳床酸稀释水流量现在为5.2m3/h，需要提高到12-15m3/h。	1 提高再生效果，周期制水量上升，降低酸耗； 2 缩短再生时间，提高制水能力。
2	阳床、阴床空气门前加装电磁阀	为使除盐系列再生能够实现真正意义上的程序控制。
3	改进酸碱稀释水流量调节性能，	稳定稀释水流量。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4	两台阴床加装小正洗进水门	提高再生效果，阴床再生实现程控。
5	两台阳床加装小正洗进水门	提高再生效果，阳床再生实现程控。
6	饮用水泵出口母管与清水泵出口母管连接，加装气动隔离门。	节约用电，保护设备。
7	恢复远程操作的气动阀	除盐系列再生实现程控。
8	两台阴床顶压管线加装电磁阀	阴床再生实现程控。
9	两台阳床进行“顶压”改进	阳床再生实现顶压，阳床再生实现程控。
10	阳床、阴床联箱冲洗门改为小反洗进水门，两台阳床顶压门改为小正洗进水门。	功能改变
11	酸碱计量箱加装电子液位计	1 精确计量酸碱用量；2 除盐系列再生，实现程序控制。
12	除盐系列制水程序，可以选择清水泵或饮用水泵	可以省电，同时避免憋泵。
13	阳床、阴床、混床制水流量累计表，改为手动回零。	统计周期制水量
14	除盐系列制水时，若失效需要自动停运；	除盐系列制水，实现程序控制
15	设 A/B 阳床再生程序、A/B 阴床再生程序、A/B 除盐系列再生程序、A/B 混床再生程序、A/B 碳滤器反洗程序、A/B 除盐系列制水程序。	除盐系列，实现程序控制

4再生参数的确定

再生参数包括酸碱用量、酸碱浓度、稀释水流量、进酸碱时间、酸碱置换时间，如果按照正交试验法筛选，根据排列组合，那么将形成庞大的试验体系；因此，我们根据我们的树脂装填量和之前的实际周期制水量，依据再生规范，从酸碱用量开始，逐步推算。

4.1 酸碱用量的确定

根据当前的周期制水量，按照酸碱耗的标准，确定用碱量的范围，我们做出表3、4。

表3 确定阳床周期制水量，不同用酸量对应的酸耗

序号	项目		单位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	酸计量箱	液位	cm	32	33	34	35	36	37	38	39	40
2	酸用量	31%	t	1.29	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57	1.61
3		100%	t	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.49	0.50
4	周期制水量		t	4438	4438	4438	4438	4438	4438	4438	4438	4438
5	清水	碱度	mmol/L	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
6	阳床	酸度	mmol/L	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
7	酸耗		g/mol	44	46	47	48	50	51	53	54	55

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

从表3选出酸用量1.49t、1.45t（31%），每次再生对应的酸计量箱液位下降37、35cm；对应的酸碱耗分别是55、52g/mol。

从表4选出碱用量0.46t、0.41t、0.35t（42%），每次再生对应的碱计量箱液位下降9cm、8cm、7cm；对应的碱耗分别是80、71、62g/mol；碱耗比较高，因为，我们认为，2131t的周期制水量比较低，应该能够达到2500t以上，原因是阴树脂已经报废，交换容量已经明显下降。

4.2 稀释水流量

酸碱稀释水流量的选择，必须要满足流速的要求，原设计酸碱稀释水流速分别是5.2m3/h、4.6m3/h，酸碱稀释水流速分别是1.27m/h、1.12m/h；我们将不同流量、包括原设计、和准备选定的流量对应的流速做出表5。

表4 确定阴床周期制水量，不同用碱量对应的碱耗

序号	项目		单位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	碱计量箱	液位	cm	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	碱用量	42%	t	0.30	0.35	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.66	0.71
3		100%	t	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30
4	周期制水量		t	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131
5	阳床	酸度	mmol/L	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
6	清水	二氧化硅	mg/L	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
7	除碳器	二氧化碳	mg/L	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35
8	碱耗		g/mol	54	62	71	80	89	98	107	116	125

表5 稀释水流量的确定

序号	流量	面积	流速		说明
			阳床	阴床	
	m^3/h	m^2	m/h		
1	4.6	4.1		1.12	原设计
2	5.2	4.1	1.27		原设计
3	6	4.1	1.46		
6	12	4.1	2.93		无顶压再生
7	12.5	4.1		3.05	改进后的数值
9	15	4.1	3.66		顶压再生

根据“高流速、低浓度”的原则，我们已经实现两台再生水泵可以同时运行，碱稀释水流量已经能够达到12.5m3/h，对应的碱稀释水流速为3.05m/h；受现在使用的喷射器出力太低限制，酸稀释水流量只能达到6m3/h；待对酸稀释水流量提高的改进完成后再提高。

如果酸稀释水流量提高的改进能够完成，那么酸稀释水流量可以按照“顶压再生”（能够同时完成阳床顶压工艺的改造）15m3/h、(无顶压再生）12m3/h考虑，酸稀释水流速分别是

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.66m/h、2.93m/h。

4.3 酸碱浓度、进酸碱时间的确定

原设计酸碱浓度分别是5%、4%；根据“高流速、低浓度”的原则，综合考虑进酸碱时间：不低于30min，但也不能太长；做出表6，并进行如下选择:阴床再生用碱浓度为2%，进碱时间约为46-36min。

表6 酸碱浓度、进酸碱时间的确定

序号	项目	单位	顶压	顶压（无顶压再生）			无顶压（顶压再生）			顶压				
1	计量箱液位下降	cm	37	33	35	37	33	35	37	7	8	8	9	9
2	进酸量	t（31%）	1.49	1.33	1.41	1.49	1.33	1.41	1.49					
	进碱量	t（42%）								0.35	0.41	0.41	0.46	0.46
3	密度	t/m^3	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
4	再生液浓度	%	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2	2.5
5	稀释水流量	m^3/h	6	12	12	12	15	15	15	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
6	面积	m^2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
7	稀释水流速	m/h	1.46	2.93	2.93	2.93	3.66	3.66	3.66	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05
8	再生液量	m^3	11.5	20.6	21.8	23.0	20.6	21.8	23.0	7.4	8.5	6.8	9.6	7.7
9	进酸碱时间	min	115	103	109	115	82	87	92	36	41	33	46	37

阳床再生，同时考虑与“进碱时间、顶压升温”的匹配，在“顶压”、“无顶压”两种工况下，酸浓度都选择2%，相应的进酸时间分别约为82-115min；在酸稀释水流量只能是6m3/h的工况下，酸浓度选择4%，相应的进酸时间约为115min。

5 调整试验

5.1 小反洗流量、时间的确定

小反洗的目的是为了松动压脂层，避免其被压实；流量应该在19-38m3/h之间，我们选择24m3/h；通过试验，2min内，从窥孔看到压脂层已经松动，因此，时间定为5min。

5.2 阴床顶压、升温时间的确定

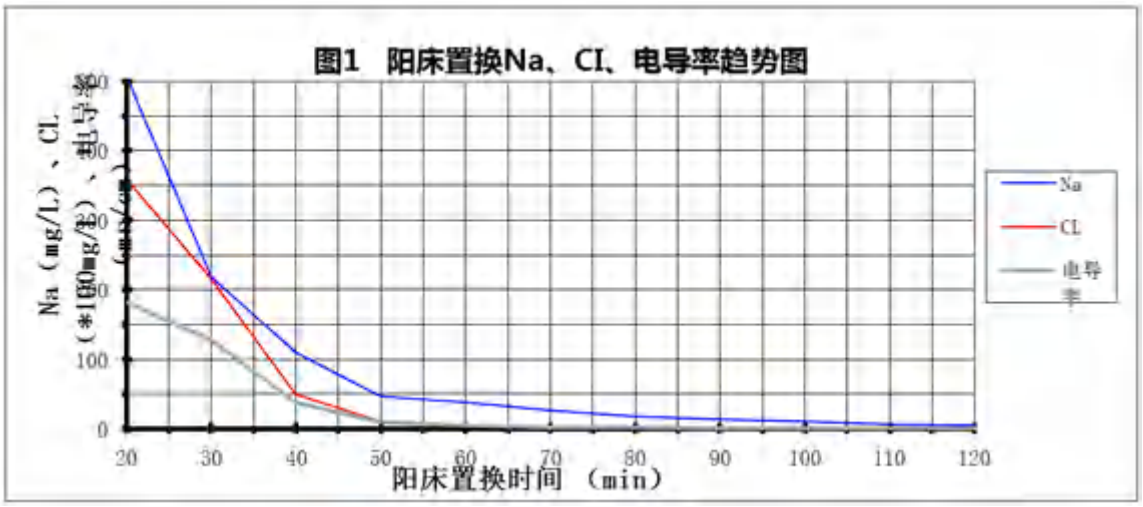
在顶压过程中，存在中排管以上空间存水的排出，为了节约再生时间，我们将顶压、排水、升温三个步序统筹考虑，以便在进碱之前，处于所有参数处于稳定的状态。

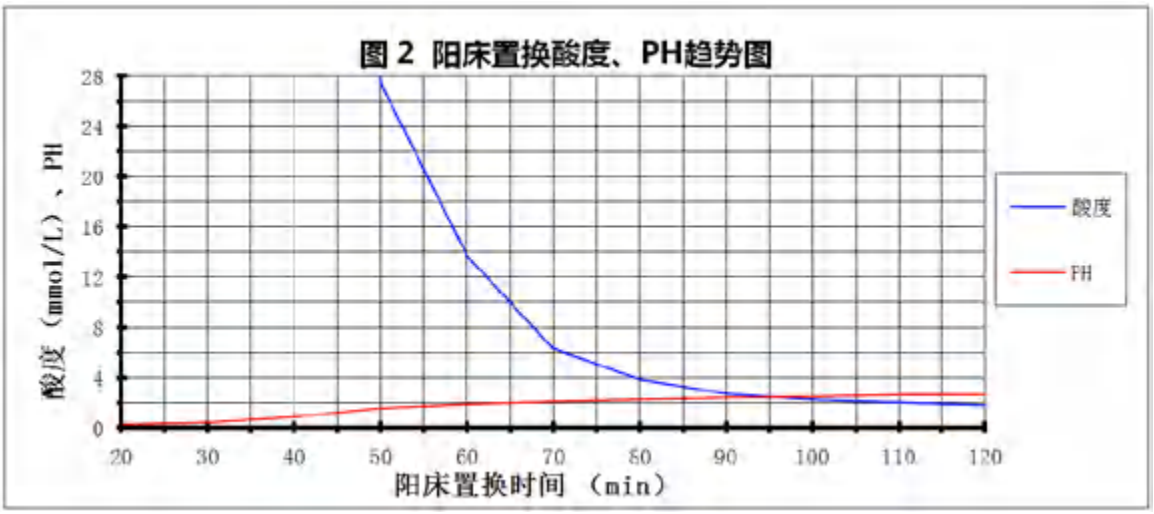
通过试验得出：在空气流量24.5m3/h 的情况下，需要20min将存水排出；在空气流量21.5m3/h 的情况下，顶压15min，开始升温，需要10min将存水排出；因此我们将顶压、升温时间分别选为15、20min。

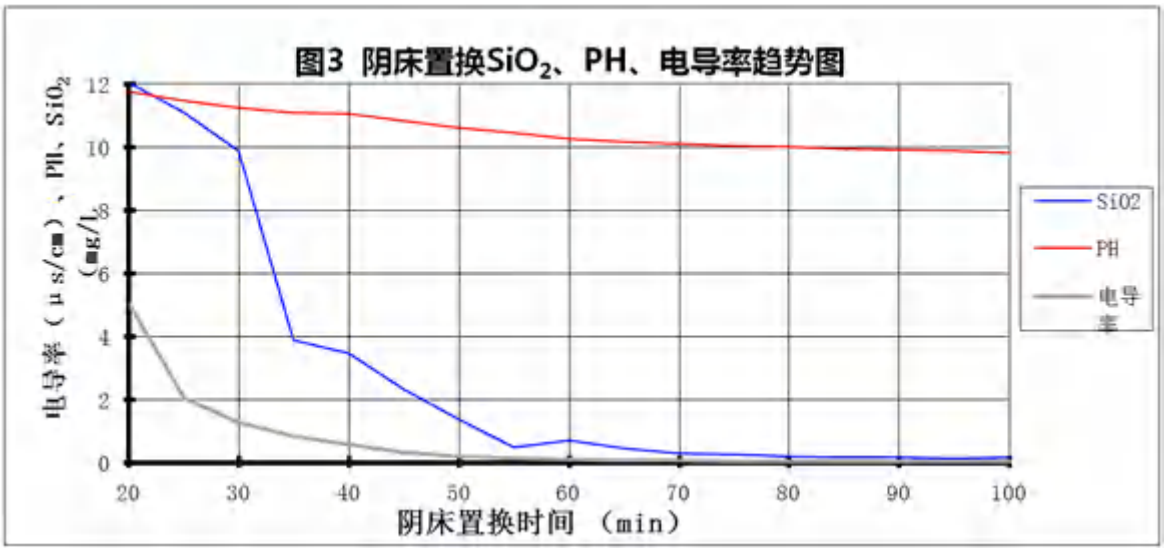
5.3 阳床置换时间的确定

7月31日，在进酸量1.41t、酸浓度4%、稀释水流量6m3/h、进酸时间109min的工况下，对B阳床进行了再生，在置换时间120min的时间里，每10min测量一次Na、CL、电导率，做出图1，酸度、PH，做出图2。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666







微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

从图1可以看出，在置换50min后，Na、CL、电导率都进入平缓状态，到100min时已经降至10.6mg/L、140mg/L、1160ms/cm，之后就下降非常缓慢；从图2可以看出，在置换70min后，酸度、PH都进入平缓状态，到100min时酸度已经降至2.28mg/L、PH已经升至2.52，之后就变化非常缓慢；因此，我们选定阳床置换时间为100min；置换冲洗水倍率为1.71。

5.4 阴床置换时间的确定

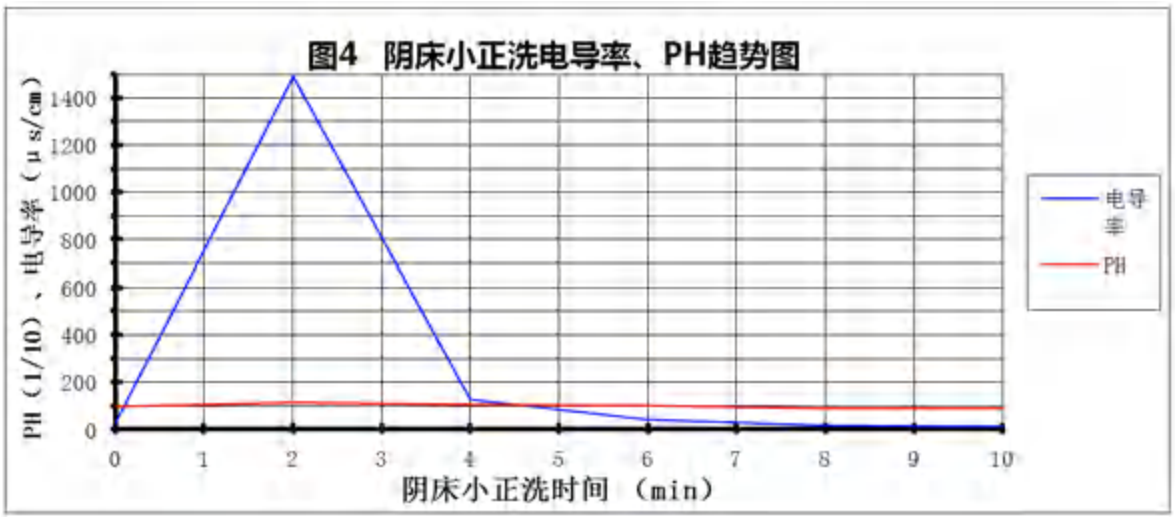
6月5日，在进碱量0.48t、碱浓度2%、稀释水流量12.5m3/h、进碱时间46min的工况下，对B阴床进行了再生，在置换时间100min的时间里，每5min测量一次电导率、SiO2、PH，做出图3。

我们看到，在置换50min时，电导率、SiO2下降到211μs/cm、1.375mg/L，PH下降到10.62，都进入平缓区域，因此，我们选定阴床置换时间为50min；置换冲洗水倍率为2.44。

5.5 阴床正洗时间的确定

5.5.1 小正洗时间

6月5日，在对A阴床进行10min的小正洗（流量60m3/h）时间里，每2min测量一次电导率、PH，做出图4。



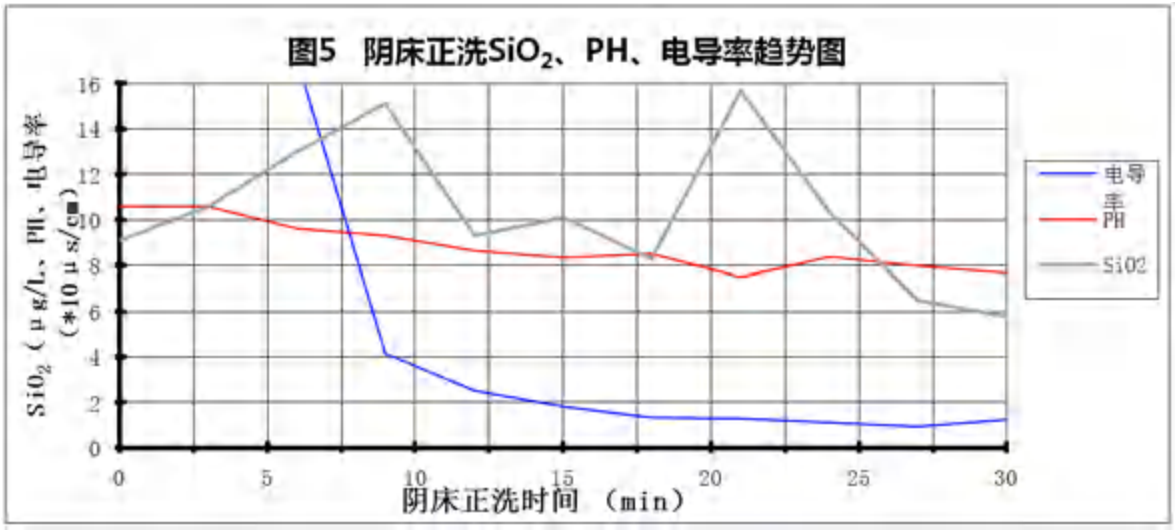
我们看到，在小正洗2min时，电导率从26.4μs/cm飙升到1490μs/cm，在4min时又下降到107.4μs/cm，这正是我们设置“小正洗的目的，就是为了将置换结束时残留于压脂层靠近中排管附件的碱液洗出去，因此，我们选定阴床小正洗时间为5min。

5.5.2 正洗时间

6月18日，在对B阴床进行30min的正洗时间（此前的置换时间为50min）里，每3min测量一次电导率、SiO2、PH，做出图5。

我们看到，在整个正洗过程中，PH平缓下降，SiO2一直处于合格状态，在正洗9min时，电导率下降到4.15μs/cm，我们明确阴床正洗时间在10min以内，因此将定值设置为5μs/cm。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



5.5.3正洗步骤

根据阴床置换后，存在卸压、充水步序，为了节约并合理，因此，我们对阴床设置了卸压、小正洗、充水正洗、正洗步序。

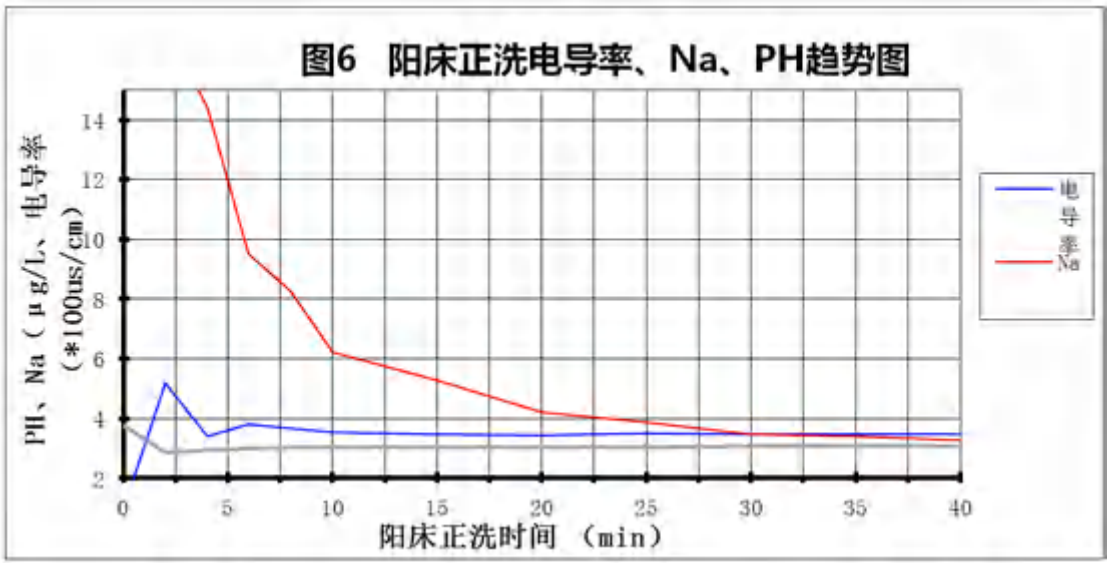
在首先开启空气门、确定“卸压”时间3min（卸压基本完成）的情况下，开启进水门、中排门进行“小正洗”5min；之后开启正排门、关闭中排门，进行“充水正洗”6min（约4.5min充水结束）；再关闭空气门，进入“正洗”步序，此步序结束时间由电导率控制，电导率定值设定为5μs/cm。

5.6 阳床正洗时间的确定

5.6.1 阳床小正洗

根据小正洗的目的，参照阴床小正洗，我们选定阳床小正洗时间也为5min。

5.6.2 阳床正洗



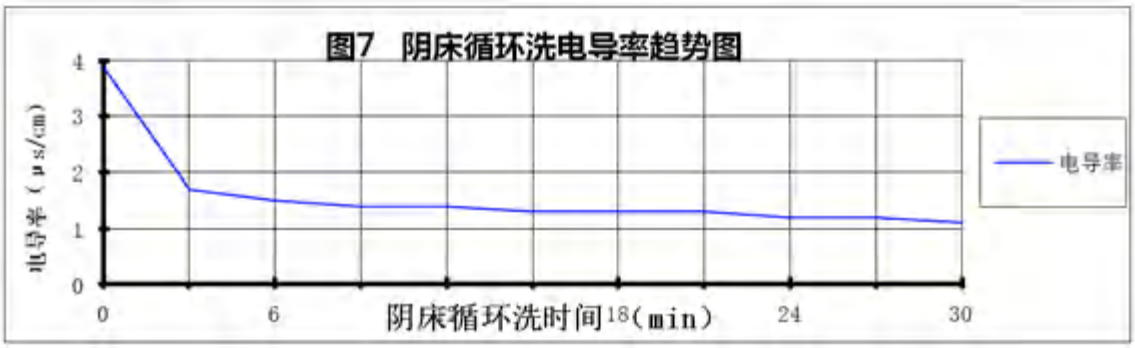
微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

9月4日，在对B阳床进行40min（此前的置换时间为100min）的正洗时间里，每2、5min测量一次电导率、Na、PH，做出图6。

我们看到，在正洗6min时，电导率已经降至380μs/cm，在正洗10min时，Na已经降至6.21μg/L，之后便都处于平缓下降状态；在正洗10min时，PH已经开始处于平稳状态；因此我们将阳床正洗时间由原设计30min改为20min。

5.7 循环洗时间

6月18日，在对B阴床进行30min的循环洗时间（此前的置换时间为50min、正洗时间为10min）里，每3min测量一次电导率，做出图7。



我们看到，在循环过程中，电导率一直低于5μs/cm，因此，我们明确阴床循环洗时间在5min以内，并将定值设置为2μs/cm。

为什么将循环洗结束的电导率定值设置为2μs/cm，而不是5μs/cm；因为，正洗合格后的一段时间内，水质不稳定，如果将定值设置为5μs/cm，那么“循环洗”步序可能会出现直接越过的现象，在进入制水阶段，可能有超过5μs/cm的时候；这样做就会避免制水时出现电导率超标报警。

5.8 除盐系列再生参数

表7 除盐系列再生参数

序号	项目	单位	阳床	阴床		
1	计量箱液位下降	cm	35	7	8	9
2	进酸量	t（31%）	1.41			
	进碱量	t（42%）		0.35	0.41	0.46
3	密度	t/m^3	1.15	1.45	1.45	1.45
4	浓度	%	4	2	2	2
5	流量	m^3/h	6	12.5	12.5	12.5
6	面积	m^2	4.1	4.1	4.1	4.1
7	流速	m	1.46	3.05	3.05	3.05
8	再生液量	m^3	10.90	7.45	8.61	9.58

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

9	进酸碱时间	min	109	36	41	46
10	树脂体积	m^3	5.84	4.27	4.27	4.27
11	置换时间	min	100	50	50	50
12	置换液体积	m^3	10.00	10.42	10.42	10.42
13	置换液/树脂体积比		1.71	2.44	2.44	2.44

5.9 整合阳床和阴床再生各个步骤，实现真正的程序控制

明确阳床、阴床再生程序后，需要对每个床体反洗、进酸碱、置换、小正洗、正洗等各再生步序进行整合，以便实现阳床、阴床同时再生。

小反洗步序，首先进行阴床，因为其水源使用阳床出水，需要阳床运行提供水源；

阴床的进碱、置换、卸压、小正洗的时间总和与阳床的进酸、置换时间相当，可以同时进行；阴床小正洗步序，使用中间水箱内存水，不需要阴床运行。

因为阴床正洗，使用阳床出水，要待阳床小正洗、正洗完成后再进行阴床的小正洗、正洗。

6 取得的效果

列出改进前后自用水率、再生时间，得表8、9。

6.1 自用水率降低、再生时间缩短

改进前再生时间是9.20h，改进后再生时间分别是6.63h（不同时再生）、4.82h（同时再生），缩短再生时间分别是2.73h（不同时再生）、4.82h（同时再生），此间每个周期可以多

表8 改进前再生时间、自用水率一览表

序号	步骤		时间(min)		流量	清水	中间水	除盐水	
								阳床	阴床
	阳床	阴床	阳床	阴床	m^3/h	t			
1		反洗		30	80	40.0			
2	反洗		30		80		40.0		
3	静置		10	10					
4	进酸		100		6			10.0	
		顶压		10					
		升温		20	12.5				4.2
		进碱		100	12.5				20.8
5	置换		100		6			10.0	
		置换		70	12.5				14.6
6	联箱冲洗		2		15	0.5			
7	正洗		30		80	40.0			
10		正洗		10	80		13.3		
11		循环洗		30					
合计			272	280	合计	80.5	53.3	20.0	39.6
			552		总计	193.4			

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表9 改进后再生时间、自用水率一览表

序号	步骤		时间(min)			流量	清水	中间水	除盐水	
			阳床	阴床	同时再生				阳床	阴床
	阳床	阴床				m3/h	t			
1		小反洗		5		24	2.0			
2	小反洗		5		12	24		2.0		
3	静置			2						
4	进酸		109			6			10.9	
		顶压排水		15						
		升温		20	109	12.5				4.2
		进碱		46		12.5				9.6
5	置换		100			6			10.0	
		置换		50		12.5				10.4
		卸压		3	100					
		充水		5		82		6.8		
6	小正洗		5		5	60	5.0			
7	正洗		20		30	82	41.0			
8		小正洗		5	5	60		5.0		
9		正洗		5	5					
10		循环洗		5	5	82		6.8		
11				5	5	82				
合计			249	166	276	合计	48.0	20.7	20.9	24.2
			415			总计	113.7			

制水224t（不同时再生）、359t（同时再生）。

改进前后除盐水自用水量分别是99.17、65.75t，每个运行周期节约除盐水33.42t；改进前后除盐水自用水率分别是2.48、1.64 %，下降0.84%

6.2酸碱耗降低，节约酸碱费用

改进后，阳床酸耗、阴床碱耗分别由51.25、98.08 g/mol降到了43.88、61.31 g/mol，降幅分别为14.58%、37.79%；每年节约酸碱费用分别是4.03、11.63万元，共15.66万元；如果考虑松原化工供汽，酸碱费用分别降低12.94、37.38万元，共50.33万元；见表10。

表10 节约酸碱费用一览表

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

序号	项目		单位	阳床		阴床		合计	备注
				改进前	改进后	改进前	改进后		
1	酸（碱）耗		g/moL	51.25	43.88	98.08	61.31		
2	吨水酸（碱）耗量		g/t	336	287	262	163		
3	吨水酸（碱）耗量下降		g/t	49	14.58%	99	37.79%		
4	供汽量	小时	t/h	60		60			松原化工用汽
5		年	t	518400		518400			
6	年用水量	2017-2018	t	234233		234233			
7		松原供汽后	t	752633		752633			
8	年酸（碱）耗量	100%	t	253	216	197	123		纯
9	年酸（碱）节约量	31、42%	t	118.96		177.41			工业品
10	酸（碱）单价		元/t	1088.1		2107.08			
11	年酸（碱）节约费用	2017-2018	万元	4.03		11.63		15.66	
12		松原供汽后		12.94		37.38		50.33	

参考文献

[1] 武哲，郭文志.补给水处理系统机械搅拌澄清池的特点及调试[J].东北电力技术，2000.07（21）：30-32.

[2] 范玉宝，吴贵德.华能丹东电厂锅炉补给水运行调试[J]. 东北电力技术，2008.08（29）:37-41.

[3] 吴贵德,等,澄清池优化运行实践[J].东北电力技术，2016.09（399，37）:45-48.

[4] 常仁杰，吴贵德，等.提高补给水制备能力的几个途径[C].发电行业水处理技术研讨会论文集 2018.04:230-233.

[5] DL5068－2014发电厂化学设计规范[S].

作者简介

单晨曦(1982-)，黑龙江望奎人，东北电力大学毕业，工程硕士，高级工程师；研究方向：火电厂经济运行。

通讯地址：辽宁省 东港市 华能丹东电厂

邮编：118300

E-mail：13904157770@139.com

手机：13904157770

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

深度调峰与化学指标的关系

伊福龙[1] 杨立永[2] 敖彬[2] 李飞[2] 吴宜燃[2] 张进[2] 姜宇[2] 任延南[2] 韦征[2] 张显铭[2] 赵芮宁[2]
（1华能东北分公司 辽宁沈阳 110167；2华能丹东电厂 辽宁丹东 118300）

摘要：对机组深调情况做了介绍，列出了锅炉垢量、氧化皮趋势，对机组深调时发生的水汽品质异常进行了分析，对深调影响凝结水氢电导率的机理进行了论述，得出了深调使凝结水浓缩导致氢电导率上升的结论；火电机组在深调工况下出现水汽指标异常现象，可以借鉴。

关键词：深调，氢电导率 浓缩倍率 杂质 垢量

1 设备简况

华能丹东电厂一期工程为Sargent&Lμndy 设计、整套引进的2×350 MW亚临界机组，配套的化学监督、处理设备分别由美国的Johnson March、U.S.FILTER公司制造，于九八年底投入商业运行；

锅炉由英国Babcock Energy CO制造；型式为亚临界、一次中间再热、自然循环、平衡通风、燃煤型；汽包压力：18.21Mpa；额定蒸发量：1061t/h；没有定期排污，其底部设有排水门，只是在锅炉点火前可以操作。汽轮发电机由美国West.Hous CO制造；型式为亚临界、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、反动凝汽式；主汽温度：538℃、压力：16.67Mpa。

给水采用AVT（O）处理方法，使用氨调节PH，炉内采用低磷酸盐处理［1］；两台机组分别于2014年12月5、23日改为NaOH处理［2］。

2 机组深调、水汽指标情况

2.1 机组达到的深调水平

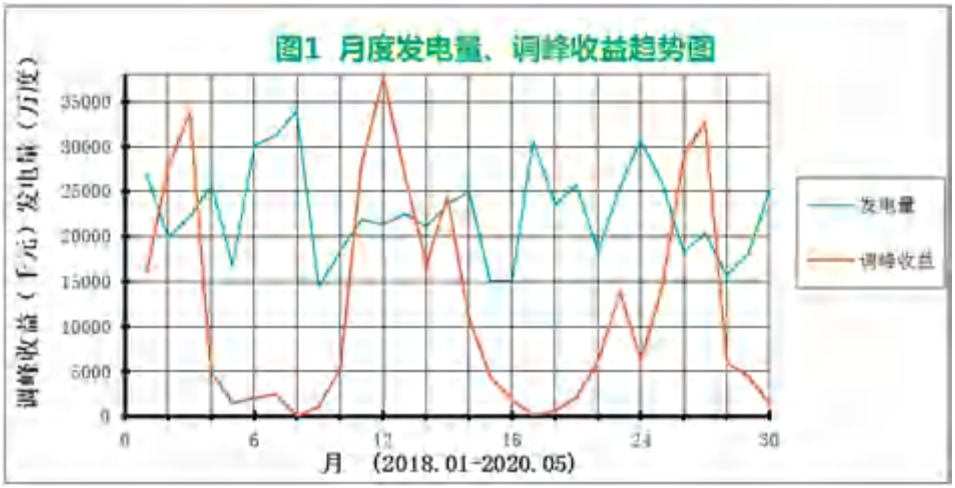
2016-2017年丹东电厂大胆尝试，积极推进灵活性改造相关工作，积极探索和参与深度调峰，实施可行的技术措施:锅炉稳燃、提高SCR入口烟温、脱硫吸收塔水平衡、给水控制优化、热控逻辑优化；制定针对性的安全措施，已取得一定效果：20%额定负荷试验的成功、供热期实现机组深度调峰运行、深调期间保证工业供汽参数、实现25%额定负荷深度调峰运行、挖掘深调运行节能潜力，调峰能力达到了比较高的水平，位于全国前列。

2018年1月到2020年6月间月度发电量、调峰收益进行统计，见表1 ；做出趋势，见图1，调峰取得了一定的经济效益。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表1 月度发电量、调峰收益统计表

统计	光伏发电量 万 KW.h	发电量 万 KW.h	调峰收益 万元
最低值	87.92	14496	0.15
平均值	118.46	22766	1212
最高值	161.18	33898	3773
年平均值	1421.47	278187	14538



2.2水汽品质存在异常现象

水汽品质异常，主要体现在氢电导率，在丹东电厂投产后的二十三年时间里，有几个案例：从投产开始的四年时间里，凝结水、给水、主汽氢电导率时有超标，我们通过优化锅炉补给水处理工艺，给予了很好的解决［3］［4］；2014年5月30日监测炉水氢电导率后两台机组的炉水氢电导率时有超标，我们做了很多工作［5］［6］；通过锅炉排污，可以降低炉水氢电导率，但是对凝结水、给水、主汽氢电导率的影响有限［7］；对一台汽泵检修过程中，存在单汽泵运行，此时水汽氢电导率也会发生异常、超标现象，我们制定了切实可行的防范措施［8］；深调时发生水汽品质异常，负荷率低、水汽流量也非常低，到现在，尚未发现有效的解决方法。

2.3 深调时的化学指标

根据在机组深调时，存在水汽氢电导率波动的现象；我们意识到，水汽指标异常可能与深调有关，过热器、再热器发生氧化皮的情况，也可能有深调的因素。

3 深调影响水汽品质的途径

3.1 深调时的水汽品质存在异常现象

3.1.1 整月调峰时水汽品质差异

对机组深调时机组负荷、深调时间、凝结水、主汽氢电导率差异进行统计，见表2。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表2 整月调峰时水汽品质差异

序号	1号				2号			
	调峰时间 h	机组负荷 MW	氢电导率 μs/cm 凝结水	主汽	调峰时间 h	机组负荷 MW	氢电导率 μs/cm 凝结水	主汽
最低值	4.25	45	0.17	0.14	4.28	42	0.21	0.11
最高值	23.98	165	0.46	0.44	21.28	162	0.51	0.28
上升值			0.29	0.3			0.3	0.17
占比			171%	214%			143%	155%

可以看出，调峰时，一个月中凝结水、主汽氢电导率，1号机组分别升高1.71倍、2.14倍，2号机组分别升高1.43倍、1.71倍。

3.1.2 调峰时整月水汽品质平均值差异

对机组深调时机组负荷、深调时间、凝结水、主汽氢电导率平均值差异进行统计，见表3（单位：μs/cm）。

表3 整月调峰时水汽品质平均值差异

水样	1号		2号	
	凝结水	主汽	凝结水	主汽
最低值	0.219	0.134	0.236	0.147
最高值	0.331	0.21	0.326	0.192
上升值	0.112	0.075	0.09	0.045
占比	51%	56%	38%	30%

可以看出，每次调峰时，凝结水、主汽氢电导率，1号机组分别升高51%、56%，2号机组分别升高38%、30%。

3.2 深调影响水汽品质的机理

深调是国策，深调时出现的问题，我们只能通过提高热力设备的健康水平来解决，提高水汽系统的严密性，减少杂质泄露，以保障水汽品质。

3.2.1 杂质的平衡

水汽系统受到污染、漏入杂质，是正常的，机组正常运行时，杂质的含量是稳定的，会达到一个平衡；只要漏量不大，水汽指标可以是合格的。

当机组进行深调时，整个水汽系统流量会降低，同样的杂质漏量，水汽中杂质的相对含量即杂质浓度就会升高。

3.2.2 杂质的相对含量

如机组深调至50--100MW时，汽包的蒸发量只有额定蒸发量1061t/h的14.29--28.57%，即151.57--303.14t/h，由于我们还要对外供汽，那么凝结水的流量只是额定负荷的三到七分之

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

一，甚至会更低；同样的杂质含量，杂质浓度就会增加三到七倍。

3.2.3 深调时水汽氢电导率的变化

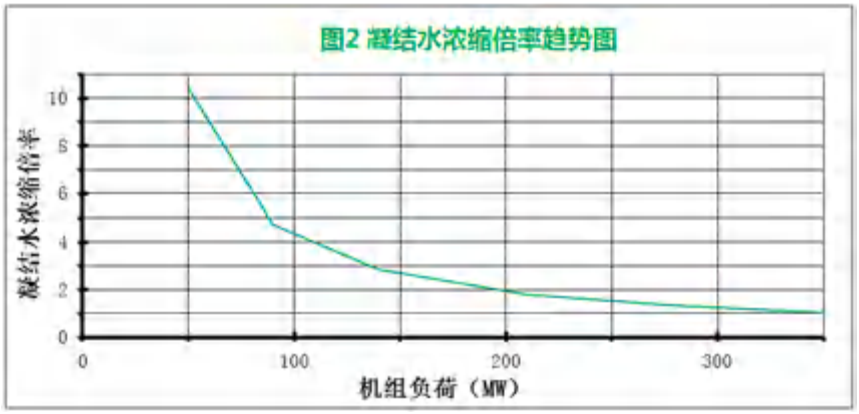
因为电导率标志着水汽杂质的含量，是一个综合指标，而氢电导率是为增加电导率敏感度而设立的指标，因此，深调时系统稍有波动，凝结水、给水、主汽、炉水等水汽样品的氢电导率相对来说比较敏感，就会有所反应，其中尤以凝结水为甚；事实上，近几年，每次深调时，都是凝结水氢电导率明显上升、甚至超标。

3.3 深调影响水汽品质程度的理论推算

供汽量按30t/h，根据机组负荷率，可以计算出凝结水在不同负荷时的流量及浓缩倍率，见表4；将凝结水浓缩倍率随机组负荷率变化，做出图2。

表4 调峰时凝结水浓缩倍率

序号	项目		单位	数值				
1	负荷	额定	MW	350	350	350	350	350
2		实际	MW	50	90	140	210	350
3	负荷率		%	14.29	25.71	40	60	100
4	供汽量		t/h	30	30	30	30	30
5	凝结水	额定流量	t/h	641	641	641	641	641
6		实际流量	t/h	61.57	135	226	355	611
7		浓缩倍率		10.41	4.75	2.83	1.81	1.05



可以看出在机组负荷率低于40%（90MW）后，凝结水浓缩倍率陡然上升，这就能够解释：当机组深调时，凝结水氢电导率会上升，并且是，深调程度越深、负荷越低，凝结水氢电导率升得越高，同时，给水、饱和蒸汽、主汽乃至炉水氢电导率都有所上升，只是较凝结水氢电导率上升幅度小一些。

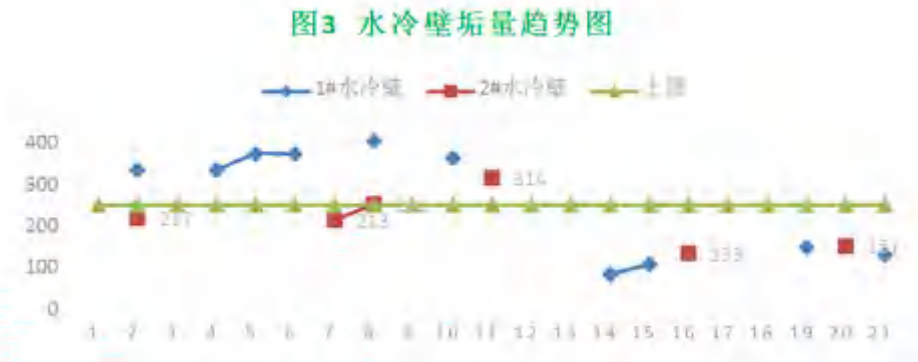
如某日，两台机组深调后，分别由0.173、0.254μs/cm上升至0.345、0.320μs/cm，上升幅度达到99.42%、25.98%。

4 锅炉垢量趋势［9］

4.1 水冷壁垢量

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

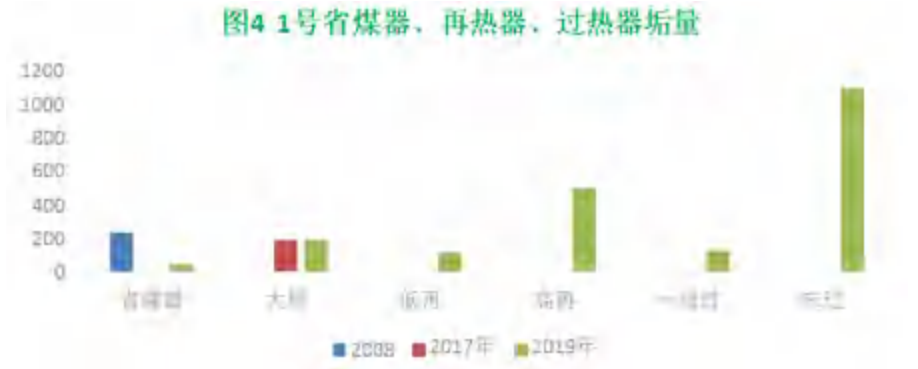
对两台机组水冷壁的垢量（g/m2）做出图3 水冷壁垢量趋势图（两台机组水冷壁垢量数据为从1998年开始，分别截止至2019年5月、2018年10月）。



图中，带有数据标记的红色正方形为2号水冷壁数据，蓝色菱形为1号水冷壁数据，绿色直线为垢量标准；初步看，机组深调后，水冷壁垢量没有明显变化。

4.2 过热器、再热器垢量情况

对两台机组省煤器、大屏、低再、高再、一级过、末过的垢量（g/m2）做出趋势图4、图5 。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4.2.1 1号机组

从2008年至2019年11年间，1号大屏垢量，没有明显增加，都低于200g/m2；1号高再、末过，从投产至今21年间，1号高再、末过垢量分别为497.3g/m2、1093.3g/m2，都已超标，特别是1号末过超标273%。

4.2.2 2号机组

2号大屏、高再，从2009年至2018年9年间，垢量增加明显，大屏由148.49g/m2增加到404.8g/m2，已经超标，2020年为303.5g/m2；高再由277.9g/m2增加到579.8g/m2，严重超标，2020年为431.0g/m2；2号末过，2009年，垢量为352.13g/m2，2020年垢量达到885.2g/m2，严重超标。

4.3 氧化皮情况

氧化皮问题，是近几年刚刚出现，主要出现在超临界以上机组；但是，我厂两台机组的末过、1号机组的高再都有氧化皮，特别是1号末过，已经超标，见表5。

表5 锅炉氧化皮厚度

序号	机组	部位	氧化皮 厚度 μm	标准	材质	脱落	检测时间
1		大屏	15-65	300	BS3059 611 490	基本未	
3	1号	高再	100-155	200	T91	基本未	2019年5月
5		末过	220-265	200	T91	严重	
6		大屏	27-66	300	BS3059 622-490	基本未	
7	2号	高再	33-85	300	BS3059 440	部分	2020年9月
8		末过	105-145	300	BS3059 622-490	部分	

4.4 垢量、氧化皮超标的解决办法

针对再热器、过热器垢量和氧化皮厚度超标的问题，目前有四种处理方法［10］，应根据具体情况选择：

• 割管清理

开展高温受热面弯头处氧化皮堆积检测，对于氧化皮堆积厚度超标的受热面管进行割管清理。

• 启炉吹扫

通过监视受热面壁温，并以此为依据，在启机并网前采用受热面蒸汽吹扫的办法，利用蒸汽动量将滞留在受热面管内的氧化皮通过机组旁路系统吹走，对于减小氧化皮剥落引起的受热面爆管问题起到一定作用；以监视过热器壁温改善情况判别吹扫效果。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

• 受热面材质升级和改造

随着机组运行参数的提高，对受热面材质有了更高的要求，原设计受热面材质等级存在偏低的问题，如有些电厂使用TP347HFG，存在抗蒸汽氧化性能不足的问题，发生了大面积氧化皮剥落；将其升级为Super304H，问题得到了解决。

• 化学清洗

化学清洗是用化学方法清除过热器、再热器的垢和氧化皮，可有效控制氧化皮的剥落，酸洗后要采取控制受热面壁温的措施。

5 结语

5.1 深调和水汽指标和锅炉垢量、氧化皮的关系

我们是从2017年下半年开始深调，两台机组的割管时间分别是2019年5月、2018年10月，1号高再垢量、2号大屏垢量超标，2号高再垢量、1号末过垢量严重超标，1号末过氧化皮，已经超标；垢量、氧化皮超标问题是否与深调有关，有待研究。

在火电机组进行深度调峰时，氢电导率等水汽指标出现异常，而此间再热器、过热器垢量、氧化皮厚度明显上升，这种现象，需要相关专业研究，以期得到解决。

5.2 能否消除深调对水汽指标的影响

调峰，机组能够稳定运行的负荷率越低，说明机组调峰能力越强，我厂350MW机组最低深调负荷为48MW，负荷率为13.71%；而调峰的一级值为175MW（供暖期）、168MW（供暖期），二级值为140MW，负荷率为40%；

由于火电机组是按30-40%额定负荷为最低负荷设计的，包括水汽系统的严密性、杂质泄漏量等相关性能，也只能在此时得到保障，也就是说，只能在这个负荷率以上，才能够保障水汽品质合格；深度调峰，调得越深，对水汽指标的影响就越大；因此，为保障发电机组水汽化学指标合格，我们需要提高水汽系统的严密性、提高设备的健康水平。

参考文献

[1] 吴贵德，黄飞，王显昌. 亚临界机组水处理设备与化学监督[J]. 东北电力技术，2003，6（6）:11-13.

[2] 常仁杰，吴贵德，张进，等. 炉水氢导超标的试验研究 [J]. 东北电力技术，2015，36（12）:16-19.

[3] 吴贵德，赵立伟，汪洋，等. 原水有机物影响水汽氢导的原因初探[J]. 华北电力技术，2004，17（2）:18-21.

[4] 郭志强，吴贵德，董玉斌，等. 丹东电厂控制水汽氢电导率的运行措施[J]. 中国电力，2005，38（2）:27-29.

[5] 吴贵德，王鑫，刘勇，等.凝汽器真空系统不严对炉水氢电导率的影响 [J]. 东北电力技术，2017，38（9）:47-50.

[6] 林安飞，吴贵德，姜宇，等.炉水氢电导率异常的分析方法[D].2020.12.

[7] 张凤涛，尹占成，吴贵德，等.锅炉排污对炉水氢电导率的影响 [J]. 电力科技通讯，2020，41（5）：60-62.

[8] 吴贵德，王鑫，曲锐，等. 单汽泵运行影响水汽氢电导率的一个案例[C]. 2017年电行业化学专业技术交流会论文集，2017.11:336-337.

[9] 张凤涛 ,林安飞 ,吴贵德，等.锅炉两个酸洗周期的结垢趋势[C].燃煤锅炉四管泄漏及防磨防爆综合治理专题交流研讨会 ，2021.01:105-109.

[10] 柯于进.华能集团公司超临界、超（超）临界机组锅炉氧化皮问题调研报告 [R].2019.03.

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

作者简介

伊福龙(1972—)，东北电力学院能源与动力工程专业，工程硕士，华能东北分公司安生部主管，高级工程师；研究方向：火电厂深度调峰技术方面。

通讯地址：辽宁省 沈阳市 浑南新区上深沟村861-11号沈阳国际软件园E11楼 华能东北分公司

邮编：118300

手机：13942514616

E-mail：hpiyfl@163.com

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

600MW湿冷机组利用热泵供热的应用与优化

周新乐
（华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司 包头 014013）

摘要：汽轮机排汽热损失占全厂各项损失的50%以上[1]，并且该热损失可以占到机组额定供热量的30%以上，合理利用该余热不仅可以有效的增加热电厂的供热量[2]，而且可以很好地降低供热机组的发电煤耗。吸收式热泵的特点正是可以从低温热源提取低品质能量并转化为较高品质能量，它仅消耗少量的逆循环净功，就可以得到较大的供热量[3]。可以有效地把汽轮机排汽的低品质热能进行部分或全部回收，从而达到提高热电厂供热能力和节能降耗的目的。我厂采用的溴化锂吸收式热泵，是在高温蒸汽驱动的条件下，提取凝汽器出口循环水的低温热能，输出中温热能供热的一种设备。它具有安全、节能、环保效益，是国家重点推广的高新技术之一。600MW机组负荷波动大，相关参数变化大，对于热泵运行参数的调整和运行方式的合理布置提出了新的要求。如何优化热泵供热系统运行方式、如何在供热初末期供热量小的情况下最大程度发挥热泵的节能效果是值得探讨和研究的问题。

关键词：热泵 余热 COP值 供热 循环水温度 机组背压 节能

0 引言

热泵是国家节能减排的推广项目，我厂是国内首家600MW湿冷机组热泵余热利用供热项目改造的电厂，项目投资1.2亿，装配6台60MW热泵，总功率360MW，热泵设计cop为1.7，利用热网抽汽降温后驱动热泵吸收凝汽器出口循环水余热量。总的吸收余热功率为148MW，热泵加热后的热网水经热网首站加热器进行二次提温后供给用户。热泵系统投运以来，因无太多热泵运行经验，热泵系统投运当年节能效果差，机组被背压高，真空耗差大，机组负荷波动大，余热水温度（凝汽器出口循环水温度）不易控制，热泵发生过结晶事故。供热初末期因供热量较小，热泵非满负荷运行，热泵节能效果越发减弱。如何利用现有系统参数条件下最大限度发挥热泵节能效果成了急需解决的问题。本文主要依据热泵系统实际运行调整情况，通过长时间数据统计整理和多次试验，结合热泵整体节能效果计算分析，给出热泵较为合理的运行节能调整手段和系统调整思路。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

1 热泵供热的应用与优化

1.1 溴化锂吸收式热泵工作原理

溴化锂吸收式热泵可以利用现有热网抽汽做为驱动热源，溴化锂浓溶液为吸收剂，溴化锂吸收式热泵水为蒸发剂，利用水在真空状态下低沸点蒸发吸热的特性，提取凝汽器出口低温循环水的余热热量，然后通过吸收剂回收热量并转移至热网水侧供热。溴化锂吸收式热泵由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和热交换器等主要部件及抽气装置、屏蔽泵（溶液泵和冷剂泵）等辅助设备组成，如图1。

注：（进入热泵的循环水简称为“余热水”）。

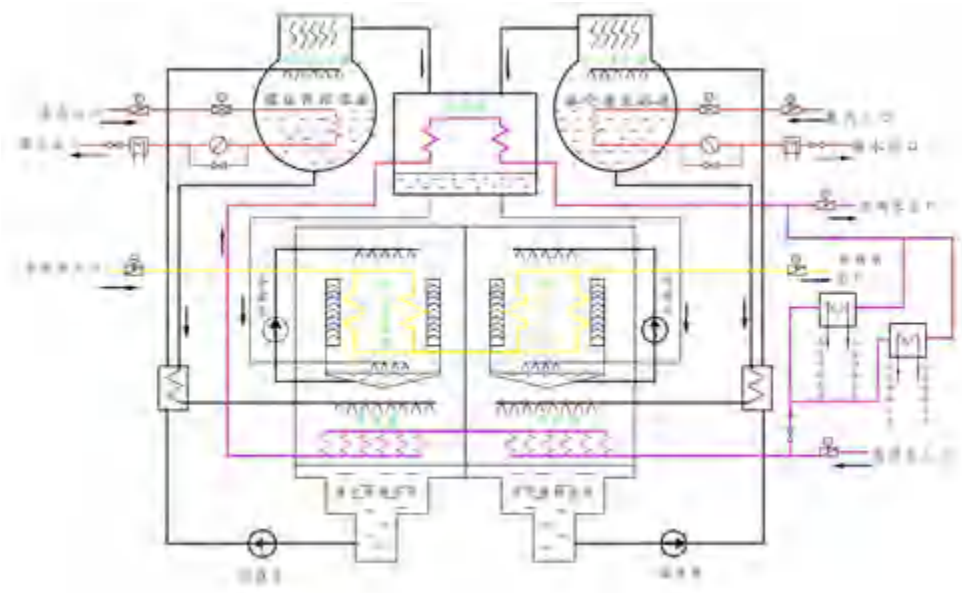


图1溴化锂吸收式热泵工作原理图

吸收式热泵的能效比COP值，即供热热网水吸收热量与为了维持热泵运行而需加入的高温驱动蒸汽热量的比值，按设计工况的不同可达1.7～2.2。而直接用常规加热器加热的热效率一般在90%，即COP值为0.9。而采用溴化锂吸收式热泵替代热网加热器加热在获得相同热量的情况下，可节约42%以上的供热燃料消耗量，节能效果显著。

1.2 600MW湿冷机组吸收式热泵解决方案

我厂单机额定抽汽流量400t/h，平均抽汽压力0.45MPa，平均抽汽温度：330℃。热网水流量为8000–9000t/h，尖寒期供热温度96℃，回水温度为50℃。依据这些条件参数，综合考虑我厂现有条件和经济效益，我厂选用单台容量为60MW溴化锂热泵，共6台，COP为1.7。热泵系统由#2机组来带，#2机热网抽汽用于热泵的驱动汽源282t/h，最大可回收#2机组的循环水余热功率148MW。热网水先进入热泵，由50℃最高加热至81℃，然后再进入热网首站由#1机热网加热器继续加热。热网水从81℃加热至所需的供热温度，如图2。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

冬季#2机凝汽器循环水系统是一台低速循泵运行，循环水流量33000t/h。部分循环水（21000t/h）进入热泵系统，温度从35℃（设计温度）下降到29℃，然后排至#2机凉水塔塔池，其余的循环水上#2机凉水塔进行冷却，如图2。按照进入热泵35℃的循环水要求，需要提高机组背压约1.8KPa。系统设计可降低机组全年耗煤量 7.13 万吨，并可减排NOX约500 吨、SO2约1700吨，具有良好的节能减排效益。

1.3 热泵系统运行调整方案

供热安全是保证供热量和实现供热经济性的前提，所以合理安排供热方式非常重要。若供热初末期全部由热泵来供热，一旦#2机故障停机，#1机热网系统因需要长时间的暖管疏水、冲洗、以及系统操作，会造成6–8小时的供热中断，尤其在供热尖寒期影响比较明显。所以#1机要尽可能带最少的供热负荷，从而保持#1机供热系统是热态，随时接带较大负荷供热。在此基础上优先保持热泵系统高负荷运行。在供热尖寒期，热泵为基础供热设备，只有在6台热泵全部投入运行，依然不能满足供热需求时，再增#1机热网加热器进汽量做为尖寒期调峰手段，维持供热温度稳定且符合要求。

600MW机组负荷波动大，凝汽器出口循环水温度也随之有较大变化。正常情况凝汽器循环水温升为10℃，而进入热泵的循环水温降仅有5℃，因而需要随时调整分配循环水上塔水量与进热泵水量，从而维持凝汽器出口循环水温度在热泵正常工作范围内。所以循环水上塔电动门和循环水进热泵电动门选择调节阀最为合适，这两个阀门协调配合来调整进入热泵循环水量和温度，循环水温度高时加大上塔水量，循环水温度低时加大进入热泵系统循环水量。同时要根据机组最低负荷（50%负荷）下循环水温度情况，合理增加或减少水塔挡风板数量。这样我们可以在550MW负荷（冬季供热机组负荷上限受限）时保证进入热泵循环水流量不低于60%额定流量，在机组低负荷时进入热泵的循环水温度不低于热泵安全带负荷率。

1.4 热泵系统运行调整优化

在整个供热初末期因供热需求量较少，热泵系统经常在低于50%额定负荷下运行。依然按照进入热泵额定的35℃循环水温度要求，机组背压增大约1.8KPa，对应汽轮机热耗增加值基本固定，但是热泵系统在低负荷运行时回收余热量至少下降50%，导致热泵与机组综合节能效果会大幅下降，甚至不节能。如果将进入热泵的热网水温度降低至28℃，就可以完全消除因热泵系统投运对#2汽轮机背压或热耗的影响。但是存在的风险是热泵容易因循环水温度过低造成热泵过负荷结晶，热泵结晶后需要熔晶处理，最少需要72小时。结晶和热泵的工作原理、溴化锂溶液的特性有关，也是热泵容易出现的故障。如何在进入热泵循环水温度大幅降低的条件下保证热泵安全稳定运行，需要有试验依据。因此进行了尝试性试验，最终成功地将凝汽器出口循环水温度降低至28℃，在不增加汽轮机热耗的基础上，完成热泵吸收循环水余热，而且热泵COP值没有明显下降，显著提高了热泵节能效果。经过较长时间的运行调整、数据记录，得出不同余热水温度对应的热泵安全带负荷率，如表1。

表1 不同余热水温度对应的热泵安全带负荷率

余热水温度℃	27	28	29	30	31	32	33	34	35

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

驱动蒸汽压力MPa	0.24	0.28	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35
热泵COP值	1.56	1.58	1.6	1.63	1.66	1.68	1.69	1.70	1.70
热泵稳定带负荷率%	68	74	79	84	88	92	95	98	100
安全运行负荷率%	60	66	72	78	83	87	92	98	100

依据以上数据，具体在调整过程中，按照供热需求，在保证热泵需要的负荷率条件下，调整凝汽器出口循环水温度至最低安全值，合理增减投入运行热泵的数量，从而控制热泵驱动蒸汽压力不超压，可以最大程度发挥热泵与机组综合节能效益。通过以上优化调整，热泵节能效益得到了更好的发挥，进一步降低全厂全年发电煤耗约1g/kw•h，节能效果逐年提升。

结束语（结论）

热泵在我厂600MW湿冷机组供热系统的应用总体是成功的，节能效果显著，增加了148MW的供热能力，可增加300万平米供热面积。但是因汽轮机循环水热量大，热泵无法全部吸纳，需要部分循环水上凉水塔冷却散热，部分循环水进热泵降温，那么如何在机组负荷大幅变化的情况下来平衡热泵余热水（循环水）流量与余热水温度是运行调整的关键。目前600MW大型火电厂的热泵系统的整体运行调整控制可参考经验是缺乏的，本文阐明了运行调整的关键原则：一是保证进入热泵循环水流量不低于60%额定流量，二是在机组低负荷时进入热泵的余热水温度（循环水温度）不低于热泵安全带负荷率。北方地区冬季有5~7个月供热期，但是只有2~3个月是高负荷供热期，其余3~4个月是低负荷供热期，供热初末期时长占整体供热期的一半以上。在供热初末期，供热需求大幅下降，热泵系统经常是达不到满负荷运行，如依然按照厂家给定的热泵设计参数运行，机组凝汽器背压高，真空耗差大，热泵在供热初末期的综合节能效果会大幅下降。本文阐明了如何在供热初末期更加合理的提高热泵与机组的综合节能效果。

冬季供热尖寒期，为了维持热泵余热水温度不低，只能加大进热泵水量，减少上凉水塔水量，带来的影响是凉水塔淋水密度不足，虽然凉水塔加装三层挡风板，水塔内部温度依然偏低，水塔填料下部结冰量大，内部收水器部分结冰。采取尖寒期水塔冲冰措施，基本可以控制水塔填料下部结冰，但水塔内部温度不易控制，收水器结冰问题无法得到解决，每年冬季凉水塔内收水器损坏较多。如何控制冬季#2机凉水塔内部结冰问题是今后需要深入研究的问题。

建议大型机组进行热泵供热改造时，要灵活调配两台机的循环水和热网抽汽，优化控制结构，采用智能化控制系统，实现系统最优配置运行，尖寒期实现“两机一塔”的运行方式，避免凉水塔内部结冰。

参考文献

[1]任泽霈等主编.热工手册[M].机械工业出社,2002(11).

[2]魏巍,韩淑秀.利用火电厂冷凝热集中供热的新思路[J].热机技术,2011,4(29):38-42.

[3]黄汉江. 建筑经济大辞典：上海社会科学院出版社，1990－08：588

[1] REN Zepei et al.thermal manual [M].Press of mechanical industry, 2002 (11).

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[2] WEI Wei, HAN Shuxiu.Using the new idea of condensing heat centralized heating in thermal power plants [J].Heat engine technology, 2011,4 (29) : 38−42.

[3] HUANG Hanjiang.Dictionary of Architectural Economy : Shanghai Academy of Social Sciences Press, 1990−08 : 588

（本文责编：xx）

作者简介

周新乐(1983—)，男（汉族），内蒙古包头市，工程师，学士，从事汽轮机、供热系统运行技术管理和能耗管理提升工作。

（E−mail:xinle8309@163.com）。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

超超临界汽轮机组串级供热灵活性改造

关红只　李静伟　刘林　姚照宇　张清宇　石小兴
（华润电力焦作有限公司　河南焦作　454000）

摘要：某厂配套建设2X660MW超超临界热电联产机组，汽轮机采用东方汽轮机有限公司自主创新研发的首台CC660/605-25/1.0/0.375/600/600型筒型缸双抽供热汽轮机。为满足市场和公司发展需求，已改造实施汽轮机二段抽汽工业供热。随着周边热用户的发展，公司现有供热能力不能满足市场需求，急需通过技术改造提高工业供热能力。项目公司通过调研和探索，总结得出一种通过不同压力供热系统串级补汽的供热方案，该方案通过高一级压力等级供热向第一级压力供热补汽的方法，有效提升工业供热能力，同时保证机组安全经济运行，提升公司盈利能力，多元化公司发展模式。方案实施后，大大争强了供热系统的灵活性，在一定程度上实现了热电解耦。

关键词：汽轮机　串级供热　灵活应用

1 引言

某厂配置2台660MW超超临界热电联产汽轮发电机组配置东方汽轮机厂生产的超超临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、抽汽凝汽式、双抽可调整式汽轮机。汽轮机型号CC660/605-25/1.0/0.375/600/600型，额定出力660MW，最大连续出力740MW，额定转速3000rpm。单台汽轮机共有八级回热抽汽，机组设计四段抽汽供工业蒸汽、五段抽汽供采暖蒸汽。经过中压联合汽阀改造后，实现了再热供热250t/h。机组各级供热参数见表1。

抽汽段	压力	温度	供热量	调节方式
	MPa	℃	t/h	
再热抽汽	2.5	350	250	中联阀
四段抽汽	1.0	350	300	旋转隔板
五段抽汽	0.375	280	200	液压蝶阀

工业热用户一般采用一定参数的蒸汽进行生产活动，所有要求供热参数稳定。随着近几年

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

电力供需的矛盾加剧，大型热电机组调峰运行已经成为常态。随着热电机组调峰的日益深化，热电机组的调峰与工业热用户之间的矛盾日益突出。如果在满足机组调峰情况下，保证供热用户参数的稳定就成为我们的研究方向。

2 方案选择

2.1 改造原则

2.1.1改造后机组30%电负荷能满足高压工业供汽参数及100t/h 的流量要求；

2.1.2 需利用目前机组供热能力进行小范围改造，确保改造后机组安全运行；

2.1.3 锅炉、发电机及回热系统原则上不改动；

2.1.4 改造后，应保持原机组的调峰能力和适应AGC 状态运行需要的能力；

2.1.5 尽量缩短改造周期，节省投资；

2.1.6 改造后工程设计、制造、调试、设备验收和性能等方面的技术要求，满足现行的国际、国家、电力行业标准、规程、规范，设计方案能保证改造后机组在凝汽及供热各工况下的安全运行。

2.2 改造方案确定

根据电厂供热能力及目前供热需求量，结合电厂已有供汽系统，确定机组低负荷时采用高一级抽汽向低压抽汽补汽的方案，来满足机组低负荷时保证工业用户的用汽参数。

2.2.1再热供热向四段抽汽供热补汽

再热抽汽向四段抽汽供热补汽的方案是通过高压供热联箱至低压供热供热联箱加装联络管道及相应的减压阀来实现，见图1。

补汽联络管道设计压力按照高压供汽压力设计，采用电动调节阀降压后进入低压工业供汽

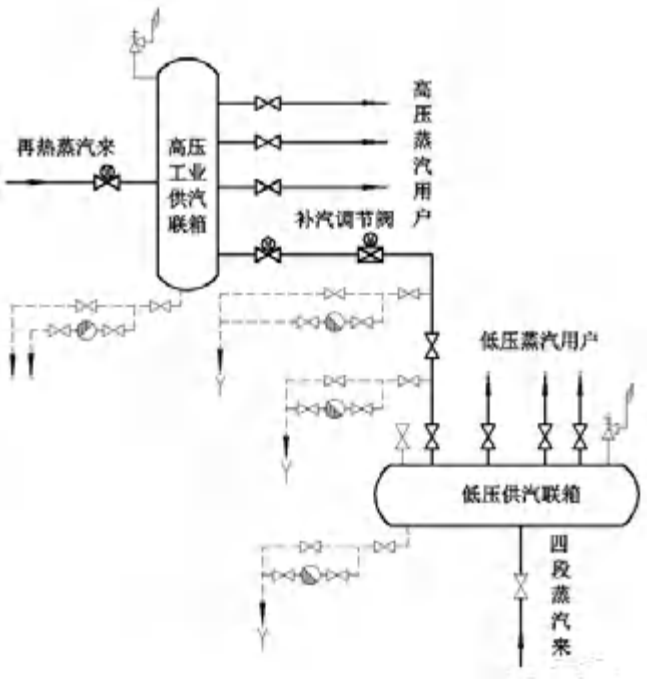


图1：高低压供汽联箱补汽

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

联箱，补汽容量设计100t/h。考虑高压工业共汽与低压工业供汽设计温度相当，补汽联络不设减温装置。

2.2.2低压工业供汽向采暖供汽补汽

机组承担部分城市民生采暖供热，单机设计容量200t/h，已经不能满足日益增长的民生采暖需求，加上机组调峰单机运行，矛盾更加突出。为了解决民生采暖和电网调峰的矛盾，我司在采暖季四段抽汽向五抽供热抽汽补汽的方案，通过设置联通管、减温降压阀来实现，见图2。

补汽联络管道设计压力按照四段供汽压力设计，采用电动调节阀降压后进入采暖供汽母管，补汽容量设计100t/h，减温水量设计5t/h，额定工况下，补汽容量105t/h。

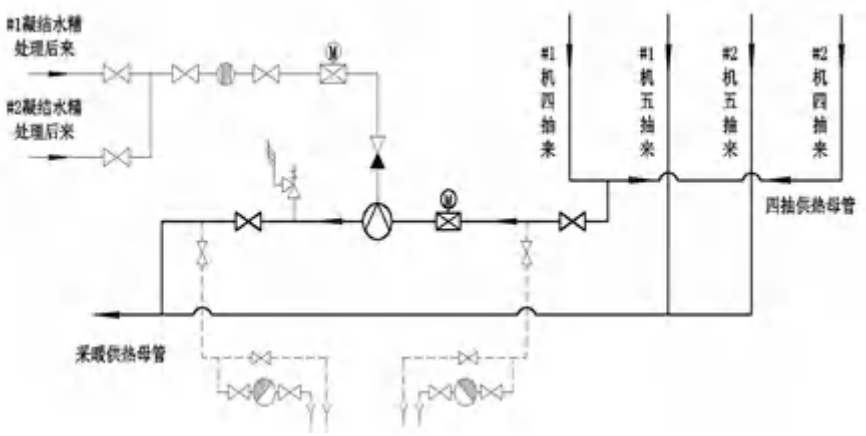


图2：采暖供热补汽

3 改造实施

2019年04月，电厂利用检修机会，实施了四抽至采暖补汽、高压供热联箱至低压供热联箱补汽的改造。设置了相应的热力管道、阀门以及控制系统，总工期60天。

4 灵活应用

4.1再热供热向低压工业供热补汽

双机运行时低压工业供热调整原则上#1机组供热，#2机组备用。

供热机组采用旋转隔板调节，随负荷的降低，旋转隔板逐渐关闭调整低压工业供汽压力不低于0.85Mpa。旋转隔板关闭时，因旋转隔板前压力升高，造成温度随之上升。运行中应监视四段抽汽温度不超过390℃，温度上升时采用降低再热蒸汽温度的方法控制四段抽汽温度不超过390℃；

当机组负荷较低，旋转隔板关至2%以下，扔不能满足四抽工业供汽用户需求时，应适当开启再热供汽联箱与四段抽汽供热联箱压力调整阀进行补汽。

运行实践中，机组负荷在50%以上时，通过关闭旋转隔板基本能满足0.85Mpa的供汽压力需求。负荷低于50%时，需要通过再热供汽联箱与四段抽汽供热联箱压力调整阀进行补汽。根据低压供汽量的不同，压力调整阀开度不同。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4.2低压工业供热向采暖补汽

双机运行时采暖供热根据机组负荷情况进行调节，原则上#1机组主带供热，#2机组热备用。热备用机组可以带部分供热，避免开启疏水。

采暖供热补充汽源调节门正常运行时，保持5%开度进行暖管，减温水开度12%左右，控制减温器后温度250℃左右保持热备用。

采暖供热通过供热蝶阀进行调节，关闭供热蝶阀时注意采暖供热蝶阀后压力≥0.13Mpa（a）以满足低压缸安全运行最小通流量160.4t/h的要求。当机组负荷降低，关闭旋转隔板调节四段抽汽供热时，应注意采暖供热蝶阀后压力应≥0.13Mpa（a），否则应升高机组负荷。

当机组采暖供热量小于400t/h时，由#1、#2机组接带。当机组采暖负荷大于400t/h时，通过采暖供热补充汽源管道进行补充。

4.3再热供热运行

再热供热系统包含冷再供热、热再供热两个系统。众所周知，采用冷再供热的经济性明显优于热再供热，因考虑锅炉再热器受热面安全，冷再供热流量设计为80t/h。所以再热供热系统运行时，优先冷再供热，当冷再流量超过80t/h时，投入热再供热。

再热供热时，根据机组负荷情况，适时投入中调阀参调，调节再热压力；

冷再单独投运时，采用压力调节。通过冷再供热压力调节阀，控制阀后压力不超过3.0MPa；

再热热段、再热冷段同时供热时，应保证再热热段流量调节阀开度不小于15% 进行小流量暖管；再热热段进行暖管时，应监视再热热段供热减温器后管道壁温差不超过100℃、监视再热热段流量调节阀后管道壁温不超过350℃。当再热热段供热减温器后管道壁温差超过100℃时应适当关小减温水调阀，减少减温水量或者开大再热热锻流量调节阀，增加再热热锻供热量，以减小再热热段供热减温器后管道壁温差。

4.4机组供热运行的参数限制

电厂供热系统较为复杂，机组供热工况下的汽机本体的应力变化随之复杂。为了保证机组供热时机组的安全性，对机组供热时的监视段压力、压差做了如下规定。

1）四段抽汽温度不超过390℃；

2）四段抽汽压力不高于1.396 MPa；

3）三、四段抽汽压差不大于1.432 MPa；

4）四、五段抽汽压差不大于0.76 MPa；

5）暖供热蝶阀后压力不小于于0.13 MPa；

5 结论

随着清洁能源装机容量迅速增长，火电机组调峰深度及频次明显增加， 660MW机组单机运行情况下调度负荷指令已低至200MW，导致供热系统参数不满足用户需求。经过供热系统串级灵活性改造后，低负荷时利用高压工业供热补偿低压工业供热压力、低压工业供热补偿采暖供热需求，减少合同索赔，保证了民生采暖需求，极大地增强了系统的灵活性。

参考文献

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[1] CC660/605−25/1.0/0.375/600/600型汽轮机说明书：东方汽轮机有限公司，2014.

[2] 曾军. CC660/605−25/1.0/0.375/600/600型汽轮机中压联合汽阀改造热力特性书:东方汽轮机有限公司，2018

投稿日期：2019−07−29,

作者简介

关红只（1972− ），男，工程师，从事电力工程汽轮机技术管理。Email: GUANHONGZHI@crpower.com.cn

李静伟（1986−），男，学士，助理工程师，从事电力工程汽轮机技术管理。Email: LIJINGWEI12@crpower.com.cn

刘林（1985−），男，学士，助理工程师，从事电力工程汽轮机技术管理。Email: LIULIN211@crpower.com.cn

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

火电机组一次调频性能优化与EH油管振动综合治理的研究

王俊贵
（陕西商洛发电有限公司 陕西商洛 726000）

摘要：随着国家双碳目标的逐步落实，新能源机组在电网中的高占比趋于常态化，电网系统频率调节能力不断下降问题日益凸出，火电机组对电网AGC及一次调频的响应能力面临重大考验。为了满足火电机组节能降耗的要求，消除汽机阀门极限开度下一次调频动作时带来的EH油管振动现象，采取特殊的一次调频控制策略，并同步优化EH油管敷设方案。经过综合治理后，解决了限制一次调频性能的瓶颈问题，使得机组一次调频合格率得到显著提升。本文介绍的方案在西北区域某厂得到成功应用，取得了明显的经济收益，具有较好的推广价值。

关键词：一次调频 振动 综合治理 经济收益

截止2020年底，全国新能源实际投产规模达到5.3亿kw，是规划目标的1.7倍，其中西北地区新能源发电机组装机容量达到1.29亿kW，已成为全国风电、光伏装机最大的区域。在“2030年碳达峰，2060年碳中和”承诺背景下，西北地区新能源将迎来新一轮爆炸式增长，新能源高占比趋于常态化，其间歇性、波动性等固有特性对电网频率的稳定带来较大冲击[1-3]，作为现阶段占比最高的火电机组仍然充当电网一次调频的主力军，按照GB/T303370-2013《火电发电机组一次调频试验及性能验收导则》要求，以及《西北区域发电厂并网运行管理实施细则》的规定，当电网频率超过（50±0.033）Hz范围，汽轮机调节系统将根据频差值快速改变汽机调阀开度[4]。目前，国内大型火力发电机组为了实现经济运行，通常采用高负荷、低负荷定压运行，中间负荷滑压运行的复合滑压运行方式，以达到节能降耗的目的[5-8]，额定工况下汽机阀门接近于全开或达到设定上限值。伴随网频常态化的小幅波动（50±0.1Hz）及汽机阀门的反复变动[9]，在EH油系统形成较大的冲击，油管出现强烈的振动现象，长期运行将造成管路泄漏，危及机组正常运行[10]。

有较多文献介绍了机组一次调频性能优化控制策略[11-14]，但是均未提及到EH油系统的情况。本文结合西北区域某超超临界机组实际情况，研究EH油管振动综合治理方案，解决限制一次调频性能的瓶颈问题。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

1 机组概况

1.1 EH油系统简介

某厂汽轮机为东方汽轮机有限公司生产的高效超超临界、一次中间再热、单轴、三缸二排汽、间接空冷凝汽式汽轮机，型号为CJK660/609-28/0.4/600/620。EH油系统设备由东汽供货，如图1所示。其中蓄能器共计6个，单个容积为40 L，组件集中安装在7.8米标高位置，至高、中压缸调阀的油管长度大约15米~20米，敷设路径存在多个弯头，固定管夹最大间距达3米，部分弯头处缺少固定管夹。

1.2 汽机控制方式

汽轮机采用中压缸启动方式，当DEH总指令达到28.9 %，中压调门（ICV）全开。切缸操作由运行人员择机完成，负荷区间为30MW~60 MW。切缸后高压调阀（CV1/CV2）控制负荷，当DEH总指令达到77.13%，补汽阀（CPV1/CPV2）参与负荷调节。DEH总指令为80%即达到设定上限值，高调阀和补汽阀开度分别对应为100%、27.9%。阀门流量函数见表1、表2，曲线如图2所示。

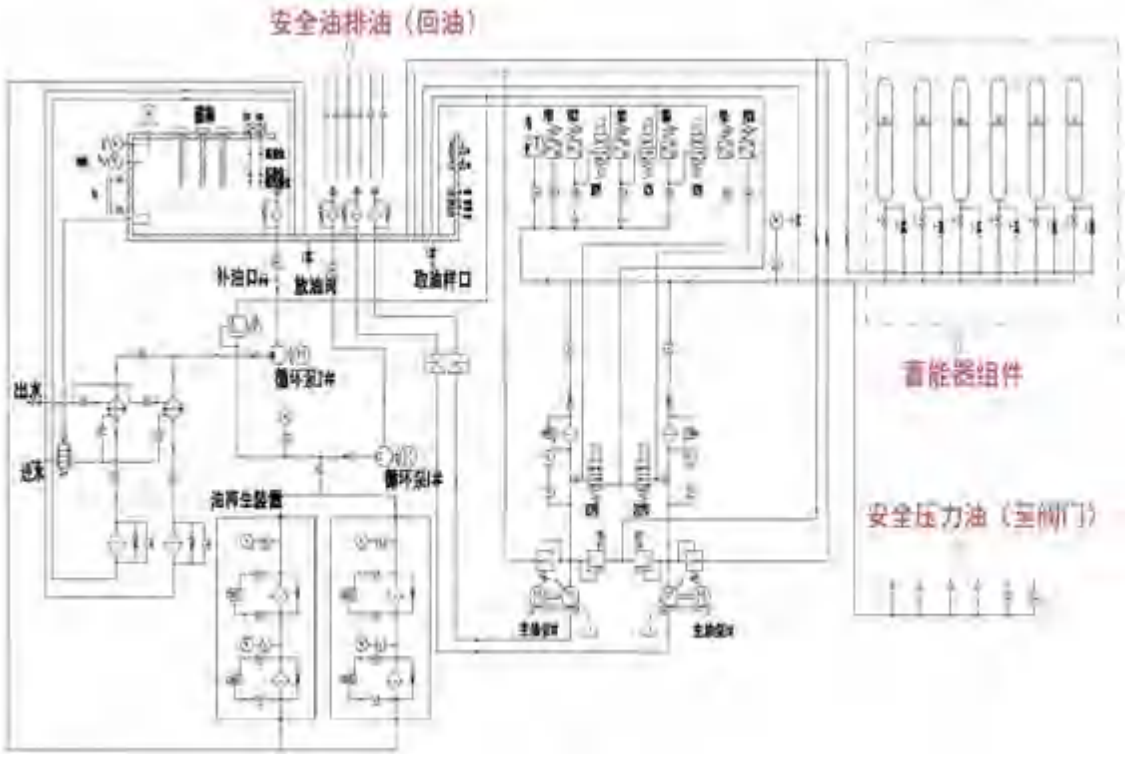


图1 EH油系统图

表1 汽机阀门流量函数1

DEH指令（%）	0	6.34	25.76	45.42	63.03	67.52	70.82	73.97	76.65	78.19	79.2	100
CV1/CV2（%）	-3	17.14	21.66	26.18	52.21	35.22	38.23	44.26	57.5	89.46	100	100

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表2 汽机阀门流量函数2

DEH指令/%	0	77.03	77.9	84.19	87.2	90.76	94.75	97.55	98.61	99.03	99.76	100
CPV1/CPV2/%	-5	0	23.8	36.22	43.13	51.41	61.07	77.5	90.4	87.3	96.96	100

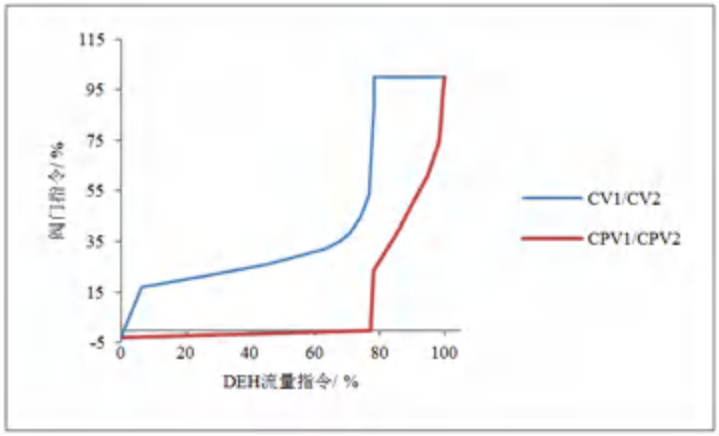


图2 汽机阀门流量曲线

1.3 一次调频性能

1.3.1 EH油管振动情况简介

为了响应AGC指令，机组维持额定参数运行（负荷660 MW，主汽压力28.0 MPa，主汽温度600 ℃）时，DEH指令长时间维持在上限值（80 %）附近，补汽阀和高调阀分别处于预启开度区间和微量节流区间（简称极限开度），当一次调频动作时，参与负荷调节的4个阀门同时出现较大幅度的变动（具体情况参见图2），在阀门开度剧烈变化过程中，伴随调门本体油缸反复充油、排油动作，与阀门本体相连的管道内抗燃油流速突变，且充油与泄油时流体方向相反，其作用力在弯管、三通、截止阀等处产生冲击，使得管道内流体压力的非均匀度增大，由于蓄能器远离阀门本体无法缓冲、消除抖动现象，最终导致油管出现剧烈振动，严重影响系统的安全。

1.3.2 EH油管振动原因分析

EH油管安装工艺存在问题。基建期间，设计院未对小直径管路进行布局设计。抗燃油管路的施工方案由安装单位根据现场情况自行决定，油管路部分位置未按照东方自控厂家《调节保安系统说明书》的要求布置管夹，存在施工缺陷。

1.3.3 一次调频性能原始状况

受制于EH油管振动的因素，一次调频性能受到影响，包括15 s调节幅度、45 s稳定电量、60 s电量贡献指数等多项指标，导致机组一次调频月度合格率不足70 %，不能满足《西北区域发电厂并网运行管理实施细则》的要求，长期遭受两个细则的处罚，影响到机组经济收益。

2 综合治理

2.1 EH油管路整改方案

2.1.1 增设高压蓄能器组件

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

根据一次调频的动作频率和幅度、油动机油缸容积以及场地实际情况，遵循就近原则在每个高调油动机旁布置一套2只25 L高压蓄能器组件。蓄能器通过其支架上的地脚螺栓进行固定。蓄能器的压力油口通过三通并联接入调阀压力油进油母管，尽可能靠近阀门本体且远离热源，回油口并联接入调门回油管至油箱。

2.1.2 油管路、管架布置优化

遵循下述原则对油管路、管架进行优化：

（1）管子的安装应尽量离开热源，严禁把管子包入保温层。管子布置要充分考虑回油通畅，检修方便。平台上布置管子时，应尽量沿直线敷设。

（2）考虑到蒸汽管道和阀门的热膨胀影响，应充分考虑油动机、油管终点、管夹间的位移量。垂直于运动方向的平面或偏离运动方向的平面中应有足够的直管长度，以防止管子应力过大。

（3）增加管夹，减少机组振动对管路的影响。管夹与管路的接触部位应采用有弹性的材料且能耐受100 ℃的高温。管路弯头、三通前后应尽可能安装管夹，管夹布置间距需满足表3的要求。

表3 管夹间距的要求

油管外径（mm）	14	20~32	32~38	48~57
管夹间距（M）	1.5	2	3	4

（4）与地面相连的固定支架采用#20槽钢，并在支架上固定管夹。支架的固定方式要考虑阀门的膨胀方向，必要时在膨胀方向上采用滑动支架固定。

（5）调整油管路滑动支撑底板尺寸。原始尺寸为150mm × 150mm，机组热态膨胀后，导致滑动支架与底板接触面积不足产生偏斜，将滑动支架底板尺寸变更为300mm × 300mm，以增大支撑面积。

2.2 一次调频控制策略优化方案

2.2.1 新增快调慢回功能

为了降低网频频繁小幅波动时汽机阀门的波动频次，对一次调频控制策略进行了优化，增加了快调慢回功能，具体逻辑见图3，效果见图4。下面详细介绍其控制功能

1）图3中，汽机实际转速对应的不等率函数（fx1）与主汽压力修正函数（fx2）的乘积，经过负荷高低限幅函数（fx3、fx4）运算后，输出原始的一次调频指令（对应图4中的曲线1）。

2）在原始的一次调频指令的基础上增加两级速率控制器，每一级速率控制器均设置了速率使能开关TR、速率发生器（由常数块A和函数fx5组成）。

3）当速率使能开关信号为“0”时，速率控制器生效，变化速率等于速率发生器的输出值；当速率使能开关信号为“1”时，速率控制器失效，输入/输出瞬时值相等。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

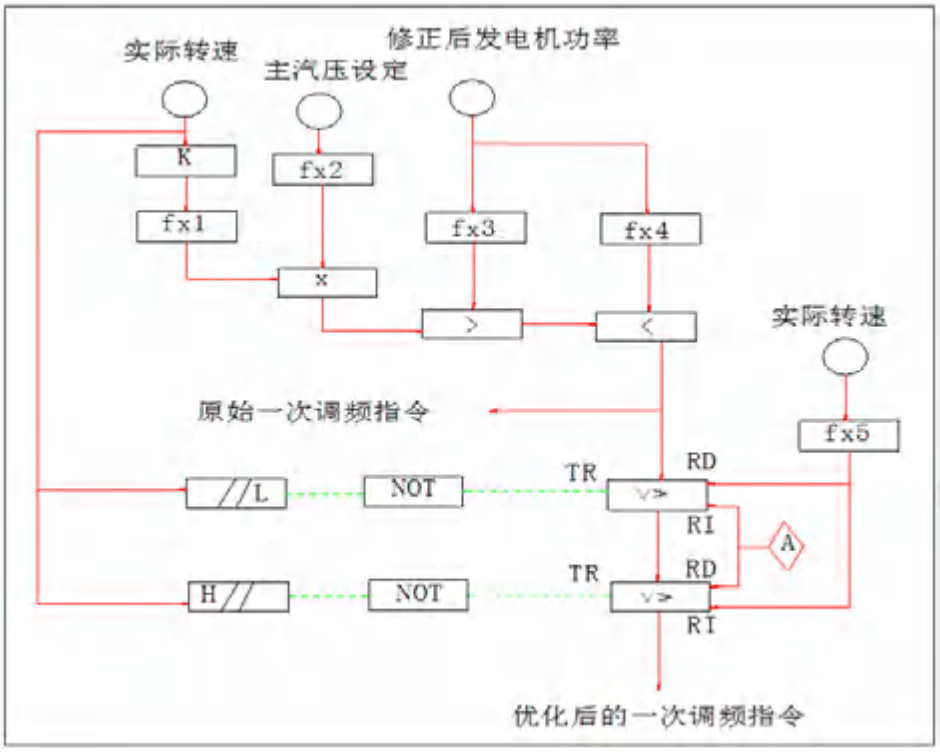


图3 快调慢回逻辑框图

4）速率控制器可以分别接受上升速率和下降速率，自动适应高频和低频期间一次调频指令的变化。一级速率限制器上升速率和二级速率限制器下降速率均设置为30MW/min；一级速率限制器下降速率和二级速率限制器上升速率均来自汽机转速变量函数（fx5），函数fx5内容见表4。

图4 快调慢回功能示意图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

5）经过两级速率限制器处理后输出具有“快调慢回”功能的一次调频指令（对应图4中的曲线2）。

6）设计函数fx5用于屏蔽大频差区间“快调慢回”功能，其目的是保证大频差区间负荷调节指令与网频的良好跟随性能，避免在高频/低频间大跨度切换时，因汽机阀门指令瞬时大幅变动对EH油管造成不必要的冲击。

表4 汽机转速变量函数

汽机转速（r·min^{-1}）	2 900	2 989	2 994	2 996	2 997.8	3 002.2	3 004	3 006	3 011	3 150
速率（MW·s^{-1}）	10	10	1	0.1	0.01	0.01	0.1	1	10	10

7）结合图4分解不同阶段“快调慢回”的功能。当电网频率越过低限死区（汽机转速<2998 r/min）后且持续处于低频阶段（对应图4左半边区域）：一级速率限制器生效，在负荷指令持续上升过程中，曲线1和曲线2完全重合，保持正常调节速率；在负荷指令回落过程中，曲线2变化速率小于曲线1；当负荷指令变向再次恢复上升状态时，曲线2快速靠近曲线1，回归正常调节速率。当网频回落到死区内，一次调频指令迅速回0。高频区间（对应图4右半边区域）一次调频动作过程等同于低频区间。

2.2.2 汽机前馈指令非线性化处理

一次调频功能的实现主要由汽轮机DEH系统与DCS协调控制系统共同完成，DEH侧的调频

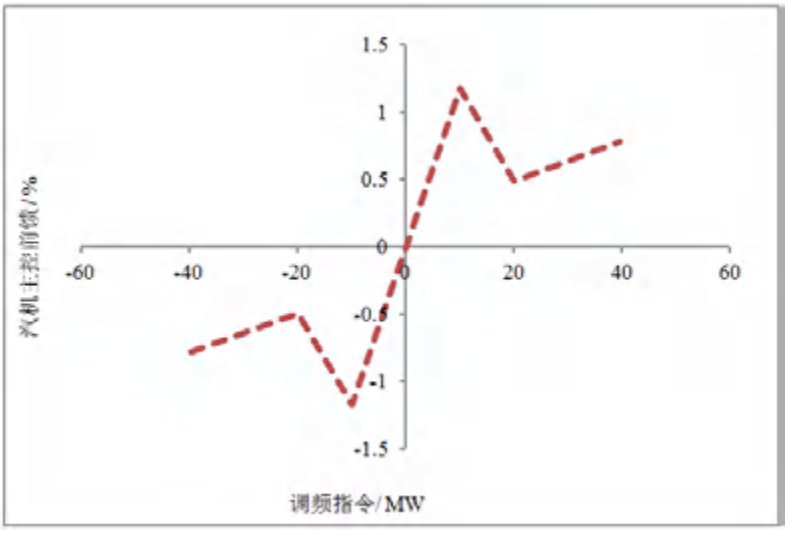


图5 汽机主控前馈量非线性化处理示意图

作用直接控制汽轮机调节汽阀开度，从而迅速改变机组功率；而CCS或功率回路侧的调频作用经PID控制器运算后对机组功率进行闭环调节，保证了机组稳态功率与调频目标功率一致。在DEH内部逻辑不便修改的情况下，为了加快一次调频15 s调节幅度，有必要在CCS侧汽机主控

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

回路中增加适当的前馈量[15–20]。

消除EH油管振动现象后，对汽机主控前馈指

令进行了非线性化处理。前馈量非线性函数见表5，处理效果见图5。图5显示，网频小幅波动期间（功率调节量为–10 MW ~ +10 MW），前馈量曲线斜率大于其他区间，大频差期间适量削弱前馈量，能够兼顾一次调频15 s调节幅度与EH油系统的稳定性能。

表5 汽机主控前馈量非线性函数

一次调频指令（MW）	-39.6	-20	-10	-1	0	1	10	20	39.6
前馈量（%）	-0.785	-0.489	-1.175	-0.117	0	+0.117	+1.175	+0.489	+0.783

3 治理效果

3.1 EH油管路优化效果

1）按照拟定的EH油管优化方案，在高调阀和补汽阀各增加一台蓄能器（如图6部件8所示），阀门极限开度下一次调频动作时EH油压变化曲线趋势平稳。

2）根据东汽安装指导书的内容，调整油管管夹间距，拐弯处、三通处增设管夹固定，部分支架采用浮动连接方式。整改后，一次调频动作时油管振动现象基本消除。

3.2 一次调频逻辑优化效果

3.2.1 汽机阀门动作情况

通过改良EH油管安装工艺消除了油管振动现象，解决了限制一次调频性能的瓶颈问题，

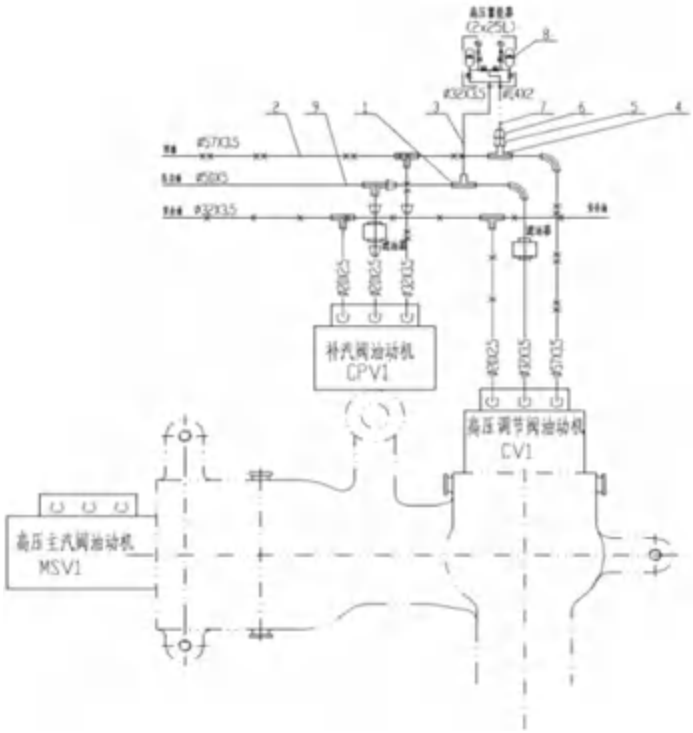


图6 高调阀蓄能器安装图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

同步优化一次调频控制逻辑后，汽机调阀的动作情况如图7、图8所示。

图7显示的为额定工况，高调阀（曲线1）和补汽阀（曲线9）均达到上限值，当网频（曲线5）越过死区后且小幅波动时，原始的一次调频指令（曲线7）呈现出高频波动趋势，优化后的一次调频指令（曲线8）则呈现相对平缓的变化趋势，有效地降低了高调阀和补汽阀的波动

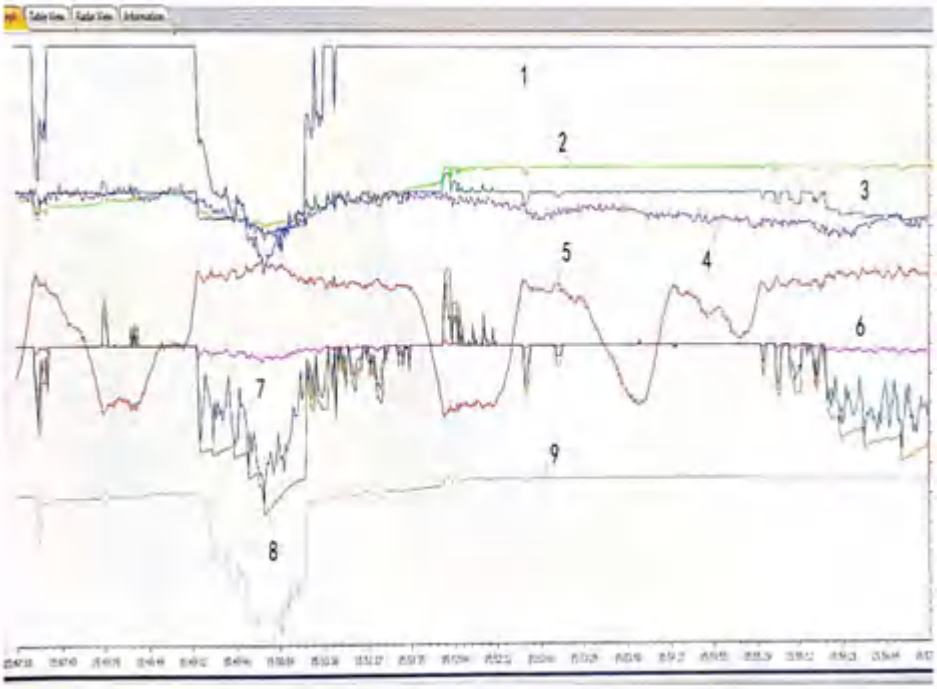


图7 一次调频优化效果1

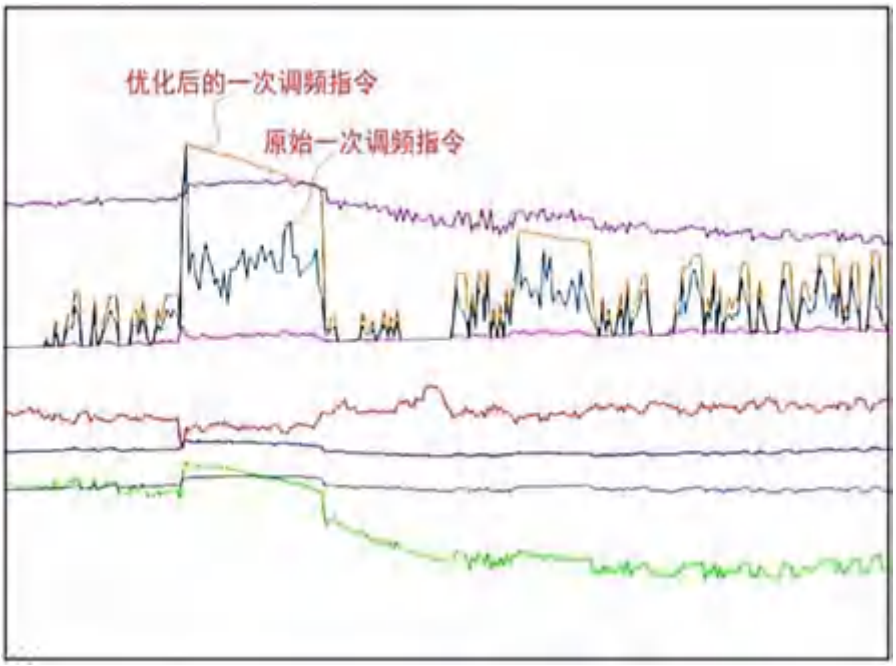


图8 一次调频优化效果2

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

频次。

图8显示的为非极限开度下的工况，图中优化后的一次调频指令曲线所包裹的面积远大于原始的一次调频指令曲线，有效提升一次调频动作期间的积分电量。

综上所述，优化方案实施后不但降低了汽机调阀波动频次和幅度，而且提高了一次调频电量贡献指数，有利于机组安全稳定运行。

3.2.2 一次调频合格率的提升

优化前后单机一次调频月度合格率统计数据见表6。表6显示，优化前机组一次调频月度合格率低于50 %，综合治理后机组一次调频月度合格率提升到125 %以上，月度平均提升幅度为85.03 %。

表6 一次调频合格率统计表

工况	日期	月度合格率（%）	平均值（%）
优化前	2020.8	54.19	48.33
	2020.11	50.18	
	2020.12	40.62	
优化后	2021.5	125.04	133.36
	2021.6	125.19	
	2021.7	143.33	
	2021.8	141.10	
月度平均提升幅度（%）		85.03	

4 结论

针对某火电机组汽机阀门极限开度下一次调频动作时EH油管剧烈振动的现象，制定EH油管改造方案，增加蓄能器，改良油管管夹的施工工艺，并同步优化一次调频控制策略，经过综合治理消除了油管振动现象，解决了限制一次调频性能的瓶颈问题，提高了机组一次调频月度合格率。文中所介绍的方案在该厂取得了明显的经济收益，具有较好的推广价值。

参考文献

［1］薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 网络首发, 2021-08-02.

Xue Chen, Ren Jing, Ma Xiaowei, et al. Market of Peak Regulation Auxiliary Electricity in the Presence of High-penetration Renewable Energy and its Practuce in Northwest China[J]. Electric power, network launch, 2021-08-02.

［2］李辉, 刘栋, 姚丹阳, 等. 面向碳达峰中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 网络首发, 2021-07-29.

Li Hui, Liu Dong, Yao Danyang, et al. Analysis and Reflection on the Development of Power System Towards the Goal of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, network launch, July 29, 2021..

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

［3］刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪, 等. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 网络首发, 2021-07-27.

Liu Yongqi, Chen Longxiang, Han Xiaoqi, e-t al. The Key Problem Analysis on the Alternative New Energy under the Energy Transition [J]. Proceedings of the CSEE, network launch, July 27, 2021.

［4］张小科, 郭辉, 刘恪, 等. 大型火电机组一次调频反调问题研究[J]. 电站系统工程, 2021,37(1): 69-73.

Zhang Xiaoke, Guo Hui, Liu Ke, et al. Rese-arch on Revers Regulation of Primary Frequecy Control of Power Plant [J]. Power System Engineering, 2021,37 (1): 69-73.

［5］董竹林, 牛玉广, 董恩伏, 等. 适应火电机组灵活运行的滑压曲线优化方法[J]. 动力工程学报, 2020,40(3): 256-264.

Dong Zhulin, Niu Yuguang, Dong Enfu, et al. Sling Pressure Curve Optimization of Thermal Power Units [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020,40 (3): 256-264.

［6］徐乃华, 王峰, 王安庆, 等. 超超临界1000MW节流配汽机组滑压运行曲线优化[J]. 热力发电, 2019,48(8): 116-121.

Xu Naihua, Wang Feng, Wang Anqing, et a-l. Optimization on sliding pressure operation curve of an ultra supercritical 1000MW unit with throttle governing steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 2019,48 (8): 116-121.

［7］范鑫, 秦建明, 李明, 等. 超临界600 MW汽轮机运行方式的优化研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(5):356-361.

Fan Xin, Qin Jianming, Li Ming, et al. Study on Opera-

tion Mode Optimization for a 600MW Supercritical Steam Turbine[J].Power Engineering, 2012, 32 (5): 356-361.

［8］周志平, 范鑫, 李明, 等. 超临界600 MW 机组滑压运行参数优化分析与试验[J]. 热力发电, 2011, 40(10): 50-54.

Zhou Zhiping, fan Xin, Li Ming, et al. Analysis and Test of Parameters' Optimization for Sliding Pressure Opera-

tion of Supercritical 600MW Unit[J]. Power Engineer-

ing, 2011, 40 (10): 50-54.

［9］郑熙. 火电机组一次调频控制策略优化及应用[J]. 电站系统工程, 2020,36(3): 7-10.

Zheng Xi. Optimization and Application of P-rimary Frequency Regulation Control Strategy for thermal power units [J]. Power System Engineering, 2020,36 (3): 7-10.

［10］李勇. 国产600 MW机组 EH油系统管路振动原因及

处理[J]. 东北电力技术, 2009,12: 45-48.

Li Yong. Cause Analysis and Treatment on EH oil system Pipeline Vibration[J]. North-east Electric Power Technology, 2009,12: 45-48.

［11］郭亦文, 刘茜, 刘畅, 等. 火电机组深度调峰一次调频优化控制策略[J]. 热力发电,2018,47(11): 135-139.

Guo Yiwen, Liu Qian, Liu Chang, et al. Contriol strategy optimization for primary frequency regulation in depth peak load cycling of thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2018,47 (11): 135-139.

［12］盛锴, 邹鑫, 邱靖, 等. 火电机组一次调频功率响应特性精细化建模[J]. 中国电力, 2021,54(06): 111-118+152.

Sheng Kai, Zou Xin, Qiu Jing, et al. Refined modeling for power response acteristic of thermal power unit under primary frequency control[J]. Electric Power, 2021,54 (06): 111-118 +152.

[13] 李健, 王瑞, 尚星宇. 考虑主蒸汽参数变化的火电机组一次调频综合优化[J]. 电站系统工程, 2020,36(06): 81-83+86.

Li Jian, Wang Rui, Shang Xingyu. Comprehensive Optimization of Primary Frequency Reg-ulation of Thermal Power Units Considering the Changes of Main Steam Parameters[J]. Power System Engineering, 2020,36(06):81-83 + 86

[14] 祝建飞, 沈丛奇, 姚峻, 等 汽轮机组经济运行方式下新型一次调频技术[J]. 中国电力, 2017,50(05): 144-150.

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

Zhu Jianfei, Shen Congqi, Yao Jun, et al. New primary frequency modulation technology under economic operation mode of steam turbine units[J]. China power, 2017,50 (05): 144−150

[15] 黄卫剑，张 曦，陈世和，等. 提高火电机组一次调频响应速度［J］. 中国电力，2011，44(1) : 73 − 77.

Huang Weijian，Zhang Xi，Chen Shi he，et al. Enhancing response speed of primary frequency regulation in thermal power unit［J］. Electric Power，2011,44(1): 73−77.

[16] 殳建军, 崔晓波, 罗凯明, 等 基于多模型预测控制的火电机组深度调峰一次调频控制策略[J]. 锅炉技术, 2020, 51(6): 2−17.

Chen Jianjun, Cui Xiaobo, Luo Kaiming, et al. Primary frequency modulation control strategy in deep peak load cycling state for thermal power units based on Multi−model predictive control[J]. Boiler Technology, 2020,51 (6): 2−17

[17] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(4): 974−984.

Wang Qi, Guo Yufeng, Wan Jie, et al. Primary Frequency

cy Regulation Strategy of Thermal Units for a Power System with high penetration Wind Power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38 (4): 974−984

[18] 陈洪兴，徐 琴, 影响火电机组一次调频性能的问题分析［J］. 华东电力,2014(12): 2939 −2942.

Chen Hongxing, Xu Qin. Influencing factors for primary

frequency regulation of thermal power unit East China Electric Power,2014,(12) : 299−2942.

[19] 张宝, 顾正皓, 应光耀, 等. 汽轮机转速不等率对机组一次调频能力的影响[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 78−83.

Zhang Bao, Gu Zhenghao, Ying Guangyao, et al. Influence of turbine Droop on the Primary Control Capacity of Steam Turbine Units [J]. Electric Power, 2018, 51 (7): 78−83.

[20] 于国强, 崔晓波, 史毅越, 等. 基于改进群优化算法的深度调峰机组一次调频建模[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 147−152.

Yu Guoqiang, Cui Xiaobo, Shi Yiyue, et al. Primary frequency Regulation Modeling of Deep Peak Regulation units Based on improved Group Optimization Algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53 (6): 147−152.

作者简介

王俊贵，（1984.03−），男，汉族，吉林松原，本科，高级工程师，热控专业主管，主要从事热工自动化系统检修运行维护工作，单位址：陕西省商洛市商洛发电有限公司，邮编：726000，联系电话：17734673811，E−mail：wjungui@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

浅谈630MW机组大流量抽汽改造的技术应用

王春亮
(国投钦州发电有限公司)

摘要：大型机组供热改造是火电行业转型的必然趋势。本文基于已稳定投运的成功案例，介绍供热改造工程的抽汽方式（中压联合汽阀前通过调节中调阀进行抽汽）,通过高中压缸通流、中压联合汽阀改造及DEH逻辑更改提供可靠稳定的抽汽汽源，并分析其优势和局限性。

关键词：供热改造　抽汽　节能降耗

引言

随着国家经济发展和节能减排的需要，火电机组利用小时持续下降，导致纯凝火电机组在供热期发电空间急剧减小，促使火电企业纷纷进行供热、供汽改造；热电联产、集中供热是国家提倡、鼓励的，是节约能源改善环境的重要措施，国家《节能中长期规划》中提倡采用高效、清洁发电技术，改造实施以大代小、上大压小，淘汰、退役小机组和分散小锅炉，发展热电联产；燃煤热电联产机组集中供热，相对于分散小锅炉供热，其锅炉热效率高兼顾环保，同时可以大大降低煤耗，节约大量煤炭资源，助力两碳目标的实现。

一、设备概述

某电厂#1、#2机组汽轮机为东方汽轮机厂引进日立技术生产的超临界、一次中间再热、冲动式、单轴、三缸四排汽、双背压、纯凝汽式汽轮机，汽轮机型号：N630-24.2/566/566型，额定出力630MW，最大连续出力670.566MW，额定转速3000rpm。汽轮机采用复合变压运行方式，具有八级非调整回热抽汽；锅炉为东方锅炉（集团）股份有限公司制造的超临界参数变压直流炉，一次再热、单炉膛、尾部双烟道、采用挡板调节再热汽温、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构Π型锅炉，额定蒸发量为1857t/h，最大蒸发量为1950 t/h。

二：供热改造的背景

某化工集团公司于2016年4月在开发区注册成立公司。该公司的一期项目规划产业链以进口煤为原料，采用先进的粉煤气化技术生产合成气。年需要的工业蒸汽参数：工业气体岛项目空分装置驱动用蒸汽参数为：4.0 MPaG，460 ± 10℃, 460 t/h，凝结水回收；工艺蒸汽分为开机

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

蒸汽和连续生产用汽：开机蒸汽参数为：5.0 MPaG，360 ± 10℃, 100t/h。正常运行后转为连续生产用汽参数为：4.0 MPaG，460 ± 10℃,100t/h，凝结水不回收。后期该化工集团二期需要4.0 MPaG，460 ± 10℃, 450 t/h仅该集团在园区所需的汽量达到1010t/h。后期还有园区其他用户预计总用汽量达到4000t/h，均由该电厂提供蒸汽。

三：供热改造方案

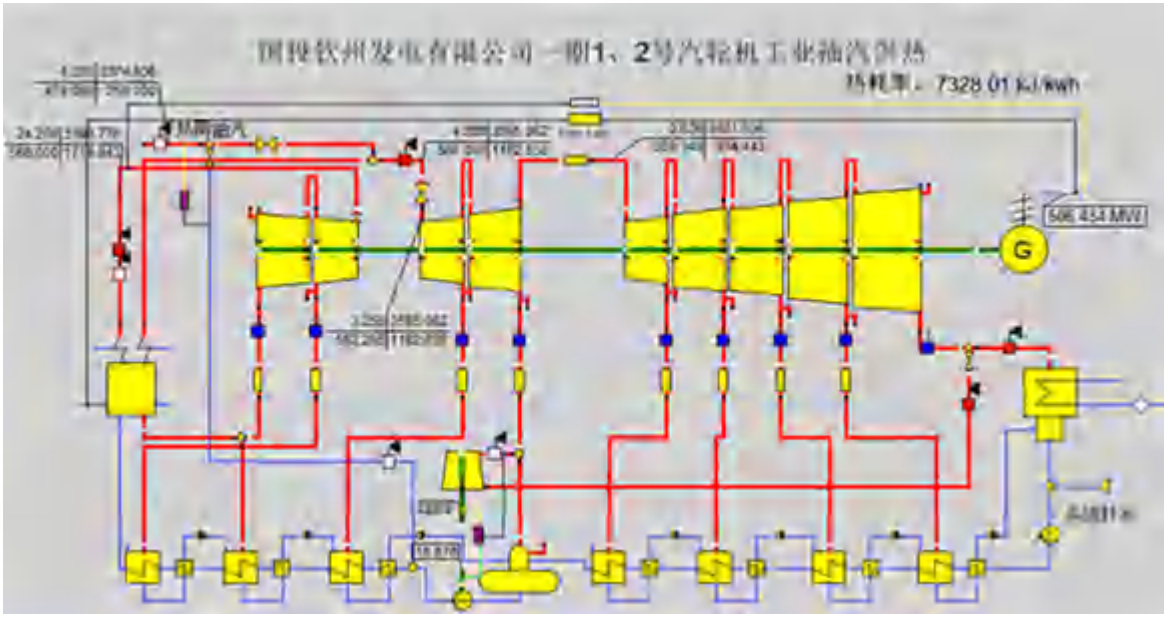
3.1汽轮机通流部分改造

因通过中压调节阀参调的形式进行抽汽，对高压缸末级存在安全隐患，所以对高中压缸进行改造。改造方案：高中压外缸保持不变，高中压转子、高中压内缸、高压喷嘴室、高压喷嘴组、高中压各级动叶和隔板、隔板套、隔板汽封、叶顶汽封、过桥汽封、轴封和轴封体，径向轴承和推力轴承、对轮螺栓连接结构进行改造，静叶和动叶全部更换为采用最先进技术设计制造的高效叶型；中压联合汽阀部分：原中压联合汽阀的主汽阀和调节阀位置不变，重新设计阀门的配合直径、喉部直径、阀门型线、预启阀配合直径、阀门行程、预启行程等。由于阀门的结构改造后，阀门启闭时蒸汽力增大很多，需要加强阀杆强度、配套油动机、弹簧、操纵座等部件进行改造以及控制逻辑的修改。

根据机组各负荷段设计阀门开关顺序及开度，优化阀门管理功能满足单阀、顺序阀以及各种阀点的滑压运行要求，提高机组经济性，并提供相关运行曲线；为了保证机组汽水平衡，需要向系统中补充足够的除盐水，根据补充除盐水的参数，一般在凝汽器补水。由于除盐水含氧量高，且其温度低于凝汽器凝结水温度，所以需要在凝汽喉部补水时采取必要的除氧技术，凝汽器补水增加了雾化补水装置。

3.2 供热管道的改造

630MW机组供热管道自热再管道距离中压导汽管前5米开三通引出供热管道，依次设置电动隔断阀、安全阀、液动快关阀、气动止回阀、减温装置、流量测量装置。管道规格



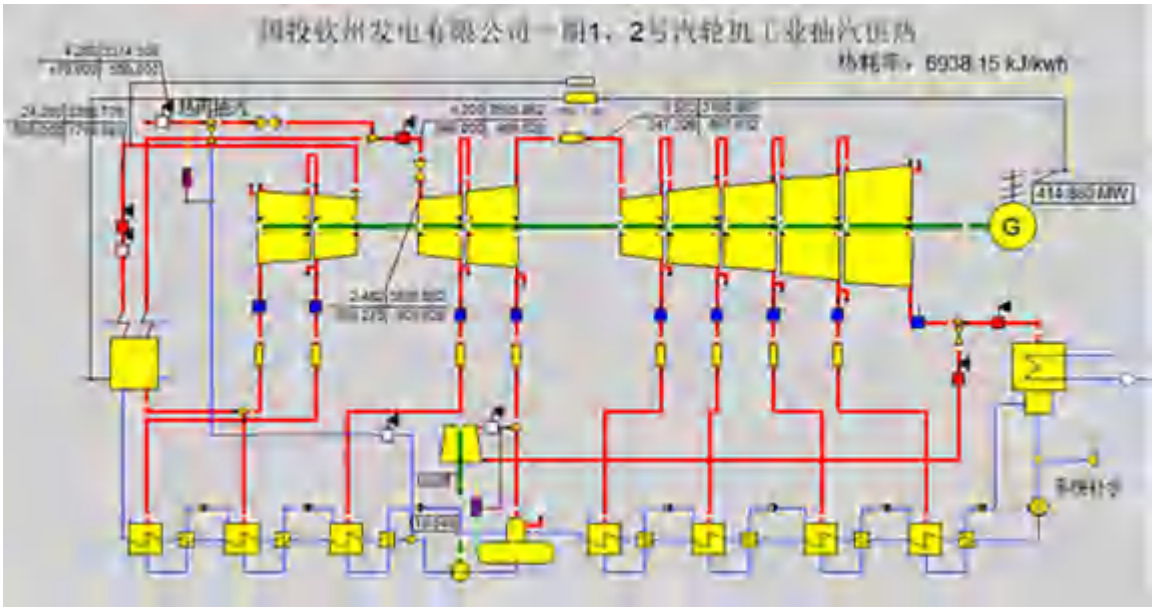
微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

ID559×23 材质 A335P91，减温装置后管道设计参数为5.4MPa 520℃ 603t/h，规格OD630×26 材质 12Cr1MoVG。机组的供热管道分别接至内径Di1700的1号中压供汽联箱的接口上。

3.3预计达到的效果，机组在390MW电负荷以上运行时，可抽取压力4.0MPa ，温度460℃，抽汽量560t/h高效蒸汽。

TMCR工况供250t/h工业蒸汽时，热再抽汽量为230.46t/h，减温水量为19.54t/h。供250t/h工业蒸汽后，THA工况下机组的热耗率为7292.11 kJ/kW.h，发电机出力为559.98MW，发电煤耗率为270.58g/kW.h。

供500t/h工业蒸汽时，热再抽汽量为461.66t/h，减温水量为38.34t/h。供500t/h工业蒸汽后，THA工况下机组的热耗率为6833.65 kJ/kW.h，发电机出力为468.07MW，发电煤耗率为253.57g/kW.h。



四：供热情况验证

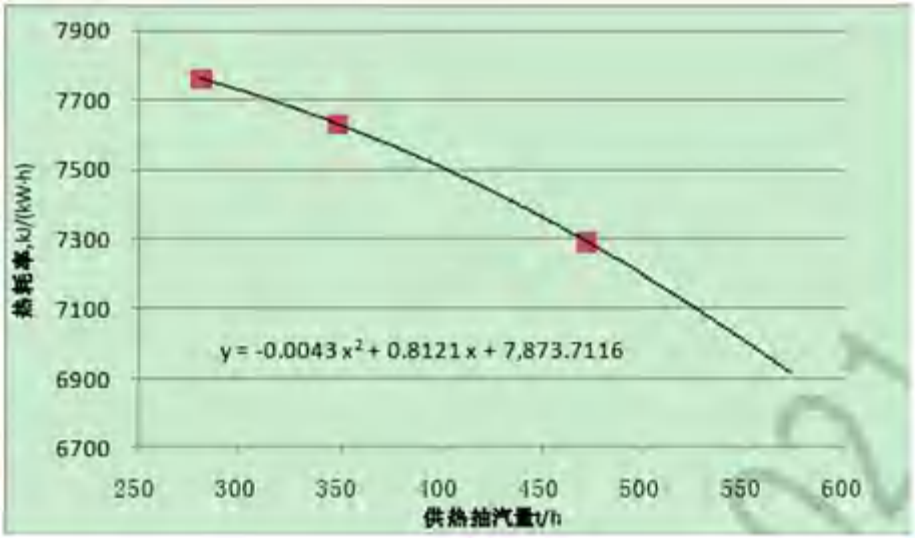
当主蒸汽流量达到 1950t/h 后，机组可以满足最大抽汽 560t/h 和 4.25MPa 抽汽能力；机组热再供热抽汽流量为 560t/h 时，热耗率约为 6980 kJ/(kW•h)。

机组对外供热流量 516.8t/h 时，机组负荷 447.9MW， 热再供热抽汽量472.7t/h， 高压缸效率 89.4%，中压缸效率 67.5%，热耗率为 7287.8 kJ/(kWh)，发电煤耗率为273 g/(kW•h)

机组对外供热压力流量 400t/h 时，机组负荷 436.68MW， 热再供热抽汽量382t/h， 高压缸效率 88.9%，中压缸效率 71.4%，热耗率为 7628.4 kJ/(kWh)，发电煤耗率为285.8 g/(kW•h)

机组对外供热压力流量 300t/h 时，机组负荷 461.39MW， 热再供热抽汽量281.3t/h， 高压缸效率 89.5%，中压缸效率 70.3%，热耗率为 7758.7 kJ/(kWh)，发电煤耗率为290.7 g/(kW•h)

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



最大负荷工况下热耗率与供热抽汽量的关系曲线

机组大量供热后问题：低压旁路原机组逻辑不适合供热工况需要手动设置至4.5MPa；因#1、#2抽疏水量大、除氧器水温低计三段抽汽压力降低导致#3高加水位无法维持，需要调整一二抽汽电动门开度及对三抽疏水电动门进行技改；抽汽量大时因四段抽汽压力降低导致小机进汽能力不足，汽泵组无法达到最大出力，限制机组负荷；中调阀参调时导致中压缸缸效大幅下降影响机组能效。

结束语

总之，该电厂采用中联门参调、高中压缸通流改造从热再抽汽的供热改造方案提高机组的供热能力，满足周边工业用户需求。机组达到了预期的工业抽汽量，而且运行平稳，大量供汽时煤耗下降。

参考文献

［1］付怀仁. 燃煤电厂供热改造技术浅析［区域供热 2019.2 期［2］罗方. 高效灵活 350 MW 供热机型方案探讨.东方电气评论，2019.

[3]胡玉清，马先才.我国热电联产领域现状及发展方向[J].

黑龙江电力，2008，30（1）：79-80.

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

燃煤电厂煤粉管道感温监测技术应用研究

蔡飞 张成林
（胜利发电厂）

摘要：本文在充分研究光纤感温材料和光纤感温硬件系统原理的基础上，优选出适合火力发电厂煤粉管道应用的材料，并从空间和测温精度及多通道三个方面提出了优化方案；“双绕线”敷设工艺的提出，有利于延长光缆的使用寿命，提高系统运行的稳定性。本文的研究应用成果具有一定的推广价值。

关键词：光纤感温 精度 敷设工艺

一、研究背景

胜利发电厂自掺烧高挥发分煤种以来，多次发生输粉管道超温自燃事件，喷燃器、输粉管道内部超温、管道烧损，出现燃烧火焰外燃，损坏附属设备，发生维修费逾五百万元，存在严重的安全隐患，影响机组运行的安全稳定性。

经分析，由于缺乏输粉管道温度监测进而采取措施进行控制，导致局部区域煤粉温度达到阈值后发生自燃现象。为了实现煤粉管道温度全天候无盲区监测，我们结合行业内温度测控前瞻技术进行了大量的探索试验，最终选择分布式光纤感温系统进行应用研究。

二、光纤选型

分布式光纤测温系统，采用光纤作为传感介质，具有本质安全防爆，抗干扰，具有远距离信息传输等一系列电测传感器所缺乏的独特优势，已逐步用于电缆测温、石油罐区测温等领域[1]。

目前，国际主流的耐高温光纤主要有：耐高温丙烯酸树脂涂层光纤、有机硅胶涂层光纤、聚酰亚胺涂层光纤以及金属涂覆光纤四种。

（一）耐高温丙烯酸树脂涂层光纤

耐高温丙烯酸树脂涂层光纤拥有优异的性能，可在85℃-150℃环境下长期稳定使用，同时其涂层可直接使用剥线钳进行涂层剥离。

（二）有机硅胶涂层光纤

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

目前，200℃温度段的耐高温光纤主要是有机硅胶涂层光纤。能够在200℃的环境下长期使用，且衰减附加值以及涂层失重率均较低。不过，有机硅胶涂层光纤的生产成本较高，效率较低，还需要后期涂层热处理。

（三）聚酰亚胺涂层光纤（PI）

有机硅胶与耐高温丙烯酸树脂涂层的最高使用温度为200℃，而聚酰亚胺涂层光纤是一种能够在更高温度下工作的光纤。理论上，其300℃的环境下长期使用，在350℃-400℃可短期使用，并拥有生物友好型。

（四）金属涂层光纤

金属涂层光纤将耐高温金属材料紧覆在裸光纤上，主要有化学镀、电镀法、熔融涂覆法与材料溅射薄膜法等制作方法，但镀出的光纤衣层薄膜均匀度差，难以满足高灵敏度传感器的需求，不适合发电行业推广应用。

经过检索与查新，我们选择了PI涂层光纤作为感温介质。

三、硬件系统研究

（一）测量原理

分布式测温系统依据后向散射原理可以分为三种：基于瑞利散射、基于拉曼散射和基于布里渊散射。目前发展比较成熟，且有产品应用于工程的是基于拉曼散射的分布式光纤测温系统[2]。它的传感原理主要依据的是光纤的光时域反射原理和光纤的后向拉曼散射温度效应。

1、光时域反射原理

光时域反射是用于检验光纤损耗特性和光纤故障的手段，同时也是分布式光纤传感器的基础。如图1所示，传播通道T和接收通道R为同一根光纤，图中表示成不同的两条通道。光纤总长为L，假设距离激光源长度为Z处的光纤（长度为ΔZ）。光源发射一个很窄的高强度激光脉冲并注入光纤，传播时会产生后向散射光。从光脉冲注入光纤时开始计时，当光到达Z处时散射光再返回到入射点，则光纤中产生散射的位置和该点散射光返回时所用的时间具有以下关系[2]：

$$Z=\frac{1}{2}vt=\frac{1}{2}\frac{c}{n}t \qquad (1)$$

$$\Delta Z=\frac{1}{2}\frac{c}{n}\Delta t \qquad (2)$$

式中：t为光脉冲从注入光纤到返回光发射点的时间；Z为光纤发生散射的位置；c为真空中的光速；v为光纤中的光速；n为光纤的折射率；Δt光脉冲持续时间。

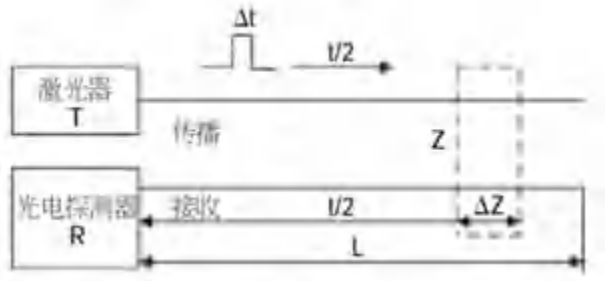


图1 光时域反射工作原理[2]

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2、拉曼分布式光纤测温技术温度解析方法

拉曼分布式光纤温度传感器采用的信号调制方法是以光纤中的反斯托克斯拉曼散射光为载波，对反斯托克斯拉曼散射光在传感光纤中传播过程中的温度信号进行调制。在实际测量时，可用光纤的斯托克斯散射曲线解调光纤的反斯托克斯散射曲线。利用T=T0作为被测光纤上各点的标定温度，得到光纤Z局域处的温度T为：

$$\frac{1}{T}=\frac{1}{T_0}-\frac{k}{h\Delta v}\left|\ln\frac{R_1(T)R_2(T_0)}{R_1(T_0)R_2(T)}\right| \qquad (3)$$

式中:驻Δv为拉曼声子频率；h为普朗克常量；k为玻耳兹曼常量。

在实际应用中，将对温度不敏感的斯托克斯光作为参考通道，采用双通道双波长光强度相比较的方法，以消除环境干扰、光纤受力与弯曲、接头损耗和光源漂移的影响。在测得后向散射光的光强后，由它们的比值可以推知相应的温度信息，再通过光时域反射技术，确定温度信息对应的位置，从而得到沿整条光纤的温度分布图。

（二）精度提升技术方案

为达到现场测温及定位精度要求，在硬件的选择提出优化，对精度影响较大的器件有光电转换及放大模块、采集卡、脉冲光源。

经过硬件提升，实现以下三个关键技术点：高空间精度、高温度精度、多通道拓展。

1、高定位精度技术研究

系统的空间精度主要取决于脉冲激光器的宽度、光电接收器的响应时间和放大器（主要是前置放大器）的带宽和信号采集系统的采样率。要提高空间精度，必须压缩探测激光脉宽，这必然减少了脉冲抽运激光的强度，也减弱了脉冲信号，降低了系统的信噪比。

根据上述光纤测温原理及实验室试验，此项目最终确定采集卡采用100MHz，其空间的定位精度达到±1m，脉冲光源的脉冲宽度达到8ns，其对应定位精度达到±0.8m，器件组合后，空间定位精度为±0.8m。

2、高精度测温技术研究

对温度精度影响较大的参数主要是系统的信噪比。系统的信号与脉冲宽度、峰值功率相关，系统的噪声主要与随机噪声与接收器光电雪崩管的噪声、前置放大器的带宽、噪声和信号采集与处理系统的带宽、噪声有关。但增加入射光纤的激光功率受到光纤产生非线性效应的阈值限制。

我们采用的是光电转换及放大模块—APD探测模组对散射光信号进行采集放大，大大提高系统的信噪比，并对APD的噪声进行严格控制，与其他器件参数综合评估要求其温度精度在±1℃范围内。

3、设备多通道拓展

由于现场环境的影响，设备的通道数要求可拓展。常见的通过时分的方式进行通道拓展，通道数量与探测时间成正比，但由于单通道一次探测时间为1s，在实际应用当中，温度刷新速度控制在10s内可以被现场使用接受，因此通道数可以进行大量拓展，且光开关技术成熟，通道兼容数量高达128。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

（三）光缆敷设工艺研究

感温光缆敷设是光纤系统精确运行的重点。光缆的敷设位置、敷设方式决定了该系统的使用寿命和后期的维护成本。

常规光缆敷设有平铺式、缠绕式等方式。由于现场空间不足，常规施工存在难度大、成本高等缺点；经过多次实践，在发生数次断纤返工后我们研究设计了新型敷设工艺，命名为“双绕线”敷设方法，并申请了实用新型专利。光缆敷设如图2所示：

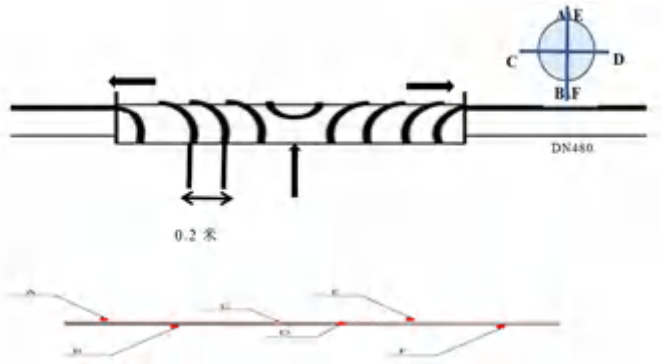


图2 敷设示意图

新的敷设方式的优势：一是有效降低了现场施工难度，提高了项目施工的安全性；二是降低了光缆故障率，提高了光纤测量的稳定性；三是可将管道一维平面温度测量，扩展为三维立体测量，提高了本光纤感温系统的精度。

四、结论

经过胜利发电厂四台锅炉输粉管道测温预警等方面的研究应用及调试，成功将PI耐高温涂层光缆测温技术应用于煤粉输送、油气输送等工业领域管道高温环境，结合全天候、无死角的监控预警系统，完全满足了对高温管道实时温度监测、异常预警等应用需求，有利于系统长期稳定运行，具有较强的推广价值。

参考文献

[1]蔡小舒,欧阳新等.电厂煤粉在线实测研究[J].工程热物理学报.2002.

[2]蔡小舒等.光脉动法煤粉实时在线监测技术进展[J].华北电力大学学报.2003

[3]赵 勇.光纤传感器原理与应用技术[M]. 北京：清华大学出版社，2001.

[4]陈瑞麟.分布式光纤拉曼测温系统的设计与优化[D].南昌：南昌航空大学，2018.

[5]景霞,刘爱莲等.分布式光纤测温系统的实时校准[J].化工自动化及仪表.2016.

作者简介

姓名：蔡飞； 职称：高级工程师； 从事专业：热能动力 工作单位：中国石化集团胜利石油管理局有限公司胜利发电厂 单位地址：山东省东营市东营区南二路205号 邮编：257087 Email地址：13963368118@163.com

联系电话：13963368118，0546-8594526

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

燃煤机组启动过程中氮氧化物控制分析实践

蔡飞　朱玉斌
（胜利发电厂）

摘要：为实现燃煤机组并网前NOx实现零超标,经过全面分析和实践探索,分析整理机组启动参数,采用机组启动分段控制,降低炉膛温度实现达到降低快速型Nox、燃料型NOx的目的,当炉膛温度升高时控制热力型NOx,这样就能够实现机组启动控制氮氧化物排放的最终目标,实现机组并网前投入SCR系统,以较低的成本开辟一条全新的技术路线,有效的解决了燃煤锅炉启动初期无法投运脱硝装置造成NOx超标的行业难题,对我国燃煤机组节能减排,对电力行业防止环境污染具有积极的作用,可以在燃煤发电行业全面推广。

关键词：燃料型NOx　快速型NOx　热力型NOx

一、课题背景

目前火电机组脱硝技术是采用选择性催化还原法(简称SCR),这种技术是通过催化反应促使烟气中的氮氧化物和氨气进行反应转变成氮气和水。目前大多数燃煤机组把氨气作为还原剂,氨气先与空气混合,再由稀释风机将混合氨气送入炉膛与氮氧化物反应。这一反应过程要经过充分混合,保证反应物的均匀分布和烟气温度厂分布平均。混合物进入催化剂活性区域,氨气进到催化剂的小孔中,在310~400℃时，随之发生反应。

随着日益严格环保形势,运行中超低排放已可以实现,但是保证燃煤机组并网前NOx实现零超标是环保攻坚战的薄弱环节和行业难题。在DCS中设置保护值烟气温度310℃之后才能投入SCR, 阻止生成的粘性附着物粘在催化剂表面上。参照空预器入口烟气温度,运行中班组人员要加强监视保证烟气温度不得低于最低运行温度。未防止催化剂永久性失效,运行中班组人员要防止烟气温度超过420℃。如果SCR内烟气的温度降最低310℃,则应立即采取相应措施提高烟气温度或者停止喷氨。当SCR显示脱硝效率降低时应该进行SCR吹灰并把SCR吹灰纳入到运行定期工作去。机组启动初期烟气温度过低,造成脱硝装置无法投入运行是制约启动初期氮氧化物零排放的主要问题。当今环保治理日趋严格,火力发电行业对NOX的控制要求也进一步升级,如何保证机组启动过程NOX不超标,是摆在我们面前的最紧迫任务。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

二、原理说明

火力发电的主要燃料是含碳氮化合物,这些化合物在燃烧过程中会释放含氮基团,这些含氮基团与炉膛中的氧气在高温下发生反应生成NOx。在炉膛内生成氮氧化物的多少与煤燃烧风粉配比是否合理、特别是主燃区的温度和燃烧过程过氧量系数的高低等燃烧必要条件都关系重大。

在炉内燃烧过程中,氮氧化物产生方式有三个:

热力型NOx(Thermal NOx)

热力型氮氧氧化物生成方式是炉膛内中的氮气在高温下和氧气发生反应而生成的。

燃料型NOx(Fuel NOx)

燃料型氮氧化物是燃料中含有的氮化合物在燃烧过程中受热分解而又接着和氧气发生反应而生成的NOx。

快速型NOx(Prompt NOx)

快速型氮氧化物是燃烧时燃料中的炭氢离子团如CH等和空气中的氮气反应生成的NOx,这部分的生成量较小。

在这三种氮氧化物生成方式中,燃料型氮氧化物生成方式的占比最高,其生成量大约占总生成量的80%以上。快速型氮氧化物这种生成方式在煤燃烧过程中也会生成但是其生成量很小,在燃煤机组可以忽略不计。热力型氮氧化物的生成主要影响因素是燃烧温度,当温度达到一定条件时,机组启动过程中热力型氮氧化物的生成量占比会不断升高,生成量可以占到总量的18%。与此同时,N2O也由会生成，它的生成方式和燃料型氮氧化物有着相似的过程。

被催化剂吸附的氨气和燃烧所生成NOx发生反应。其中 ,影响反应的主要因素为烟气温度和炉膛内部反应物浓度。其最主要的化学反应如下:

$4NO+4NH_3+O_2 \rightarrow 6H_2O+4N_2$,$NO+NO_2+2NH_3 \rightarrow 3H_2O+2N_2$。

三、影响因素分析

在锅炉中,含氮基团在炉内和氧成NOx,同时NOx也会发生还原反应生成N2,在这一过程中,所有参与氧化还原反应的因素都将影响到NOx的浓度。

首先基于我们对氮氧化物的影响因素进行了分析。

（一）燃料特性的影响

燃煤,所包含挥发分中会含有多种元素的各种元素，主要包括碳氮氧等元素，不同的元素占比会对NOx的生成难易有着较为明显影响。碳占氢的比例降低,则NO越难于被还原,NOx排放量会变多，当氮占氧比例越小,NOx排放量也会相应升高。

（二）过量空气系数的影响

降低氧量是降低NOx的排放量有效手段。目前主流火电厂都是限制炉膛内的氧量来限制热力型NOx和燃料型NOx的生成,采用这种方法取得效果较为明显。

（三）燃烧温度的影响

炉膛内温度对NOx的生成量有重大影响,随着炉内温度的提高,NOx的生成量随之升高。这样来看,我们就能用降低炉温实现控制NOx。但是,点火初期降低温度会带来一个不利的后果,延长点火到投入脱硝系统的这段时间,造成氮氧化物超标。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

四、具体案例分析

基于氮氧化物的生成方式和机组启动初期的运行特点我们全面分析,得出制约燃煤机组带脱硝并网苦难的行业难题在于:机组情动阶段锅炉燃烧强度弱,烟气流量小且温度低,无法满足催化剂投运条件,造成机组启动阶段脱硝装置无法投运,容易引起NOx超标排放。在次背景下,对机组热力系统进行改造,采用宽温催化剂、提高SCR反应器入口烟温或是提高催化剂低温活性是当前解决问题的主流路线,但是改造成本昂贵,需要耗费大量财力。基于以上因素立足提高脱硝入口烟温,结合机组特性,对机组启动的各个过程进行了深入分析。总结过往启动经验,查找NOx不合格原因

在二期机组历次启动中,始终将NOx的控制作为重点指标进行监视,但是由于启动初期升温升压过程中的炉膛温度影响,氮氧化物指标控制不是太理想。

下表是我厂二期运行部4月6日3号机组启动过程中，环保NOx分钟统计：

4月6日3号机组启动氮氧化物分钟统计如下表：

表格 1 3号机组启动氮氧化物分钟统表

机组名称	时间	氮氧化物	
		标准值	折算浓度
		(mg/M3)	(mg/M3)
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:53	50	4.78
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:54	50	5
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:55	50	5.25
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:56	50	5.35
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:57	50	5.44
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:58	50	38.8
山东某发电厂-3号	2020-4-6 8:59	50	37.1
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:00	50	36.4
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:01	50	36.1
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:02	50	38.7
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:03	50	37.7
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:04	50	33.2
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:05	50	33.9
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:06	50	31
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:07	50	33.3
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:08	50	38.8
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:09	50	44.4
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:10	50	48.5
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:11	50	49.5
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:12	50	50.7
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:13	50	51.5
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:14	50	52.9
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:15	50	53.7
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:16	50	53.2
山东某发电厂-3号	2020-4-6 9:17	50	52.8

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

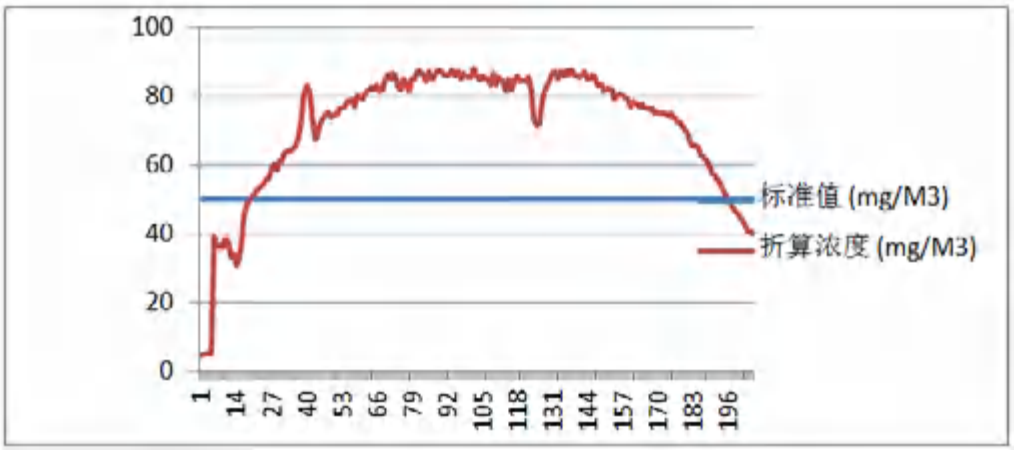


图1 3号机组启动氮氧化物分钟统图

4月6日3号机组启动氮氧化物分钟统计曲线，从表中可以看出，在此次启动中，3号机组从点火开始有长时间的超标现象，针对这一现象，在部门的帮助下，展开了分析，以下是此次启动的曲线：

图 2 3号机组启动数据汇总图

首先我们进数值模拟和脱硝装置流场CFD 仿真,根据《电厂#3炉脱硝技术协议和技术手册》,设计NOx和NH3的分布在5%算术平均值内,实测NOx和NH3的分布达9%算术平均值。

仿真条件：100%BMCR 负荷，省煤器入口烟气速度为均匀的5.69m/s，省煤器出口温度718.5K。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

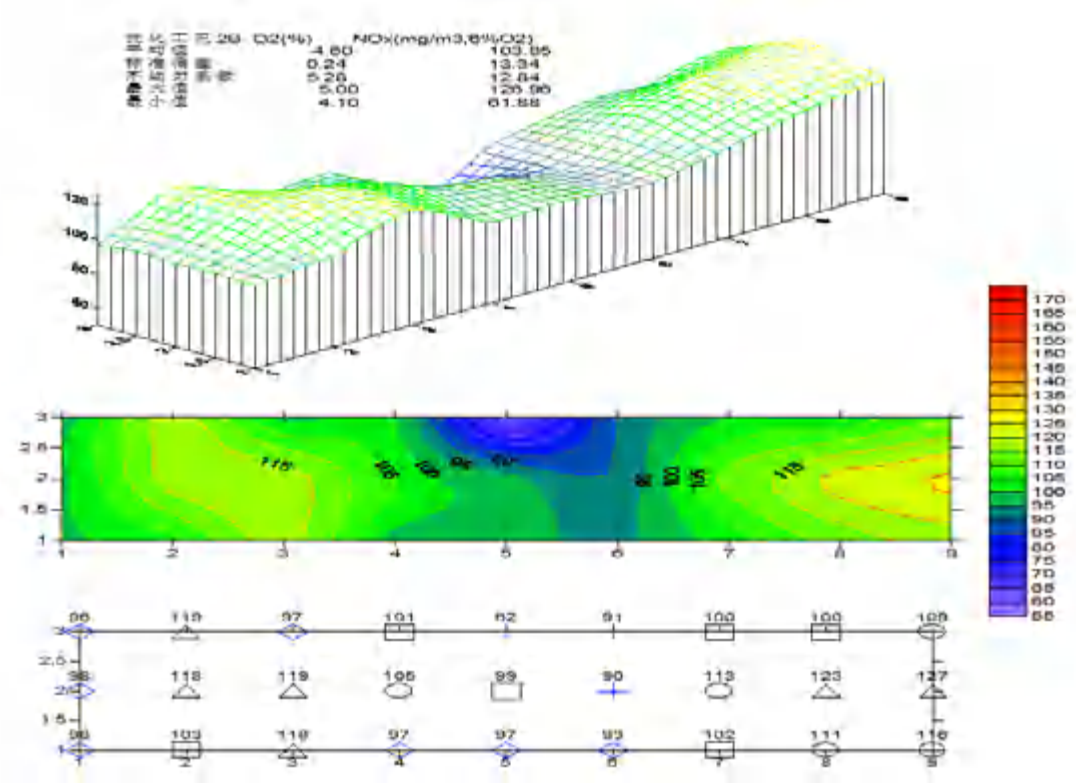


图 3 脱硝装置流场CFD 仿真

通过仿真和实验证明了SCR内部流场均匀性良好，能够达到设计要求。

通过分析得出以下两点结论：

1、机组升温升压过程中的停留时间过长。在燃煤机组机组启动初始阶段,在油枪投入后,热力型NOx生成的生成受到环境温度的制约,热力型NOx生成量较少,但是随着炉膛温度的升高,满足热力型热力型NOx的生成条件,随之热力型NOx大量生成,NOx开始超标。尽其所能的减少机组升温升压期间的停留时间,是有效降低NOx超标时间的有效手段。

2、点火初期,二次风量控制过大,燃料型和快速性NOx大量的生成。机组启动初期,大量的空气进入炉膛势必造成过多的NOx生成,从而引起机组环保NOx的超标。

五、技术准备

根据原因分析制定以下技术措施并制定相关注意事项：

（一）流程控制

1、提前点火前一天试验脱硝各速断门、调整门，点火后可提前恢复脱硝各手动门，防止异常发现不及时延误投入脱硝系统。

2、维护与调整锅炉稳步烟气调节挡板，优化锅炉尾部烟气挡板最小开度限制值，定期检查锅炉尾部烟气调节挡板，确保动叶同步、开关一致。

3、根据催化剂性能曲线，确定最低连续喷氨温度（MOT）。

4、对风道加热器进行定期维护，保证风道加热器的火检装置和雾化装置能够稳定运行。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

（二）提高锅炉水侧温度

1、锅炉上水过程中，逐步提升除氧器出口水温至最高允许温度。

2、尽早投入底部加热，当汽包壁温接近100℃时关闭空气门继续提高锅炉各部温度；

3、可通过逻辑优化、运行调整，在汽轮器挂闸前投入冷再供气的#2高加。

4、合理控制汽包水位，点火后不得以开启定排的方式控制汽包水位，小机冲转的时间可以适当延迟

（三）提高烟气温度

1、规范除尘器涂灰的过程，尽量缩短涂灰时间，正常涂灰时间应控制在两个小时以内；

2、涂灰结束应将风机出力尽量降低，重新投入底部加热；

3、为了控制热力型氮氧化物采用尽快提升烟气温度达到投入脱硝系统的方法，冬季可以在风机启动后投入暖风器。

4、调整锅炉尾部烟气挡板，增大低再区域的通烟量。

5、通过油枪切换、风量调整、燃烧器摆动提高火焰中心。

6、为了降低燃料型氮氧化物点火后在第一个小时可以投入四只油枪，此时炉膛温度较低热力型氮氧化物生成较少；

7、脱硝系统入口增设烟道加热器，利用微油系统尽快增加脱硝系统入口烟温，使得催化剂尽快达到投入条件。

（四）提高蒸汽温度

1、汽轮机定速阶段，可适当增加燃料量，开大高旁，提高低再入口蒸汽温度。

2、汽轮机冲转、暖机过程中，可以逐渐提高蒸汽温度。

3、尽量提高给水温度，检查过热器一级减温水和二级减温水再热器事故喷水和微量喷水调整门操作线性是否良好，尽量减少高旁减温水的用量。

（五）生成原理控制

1、为了降低燃料型氮氧化物和快速型氮氧化物启动用煤优化选择低硫、高挥发分的适烧煤种。

2、点火后第二小时需将油枪控制在三支，并随时查询环保排放数值，根据情况可以进行油枪换角等手段精细控制氮氧化物；通过燃烧控制氮氧化物，又要保证参数的提升，以尽早投入脱硝，环保排放值必须控制在50mg/m3附近，需要将环保网数值随时导出以计算小时均值；点火后第三小时烟温已经可以保证催化剂反应，根据参数可以投入脱硝。

3、点火时在确保油枪燃烧正常的前提下尽可能地减少风量。

4、在炉膛烟温达到700℃时利用分层配风降低热力型氮氧化物的生成。

六、实施及效果说明

（一）技术实施

基于以上措施，我们在2020年7月11日4号机组启动中做了以下调整。

1、尽早投入炉底部加热，当汽包壁温接近100度时，关闭空气门，减少热量损失，同时控制好汽包水位，不得开启定排以防造成热量流失。涂灰结束后，应该再次投入炉底部加热运行，维持炉内热量。大幅度缩短机组升温升压过程中的停留时间。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

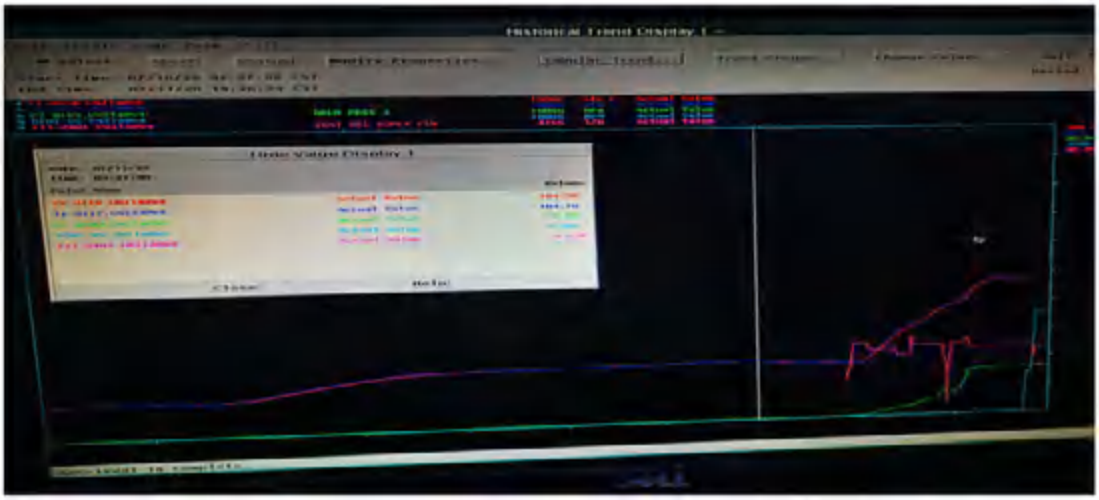


图 3 机组升温升压过程中的停留时间

2、点火后，在确保油枪正常燃烧的前提下，尽可能的降低风量运行。

图 4 低风量运行参数

3、点火后，由于热力型NOx生成较少可以4只油枪提参数，此时应随时查询环保数值，当环保NOx数值接近超标时，通过减少油枪运行，切换油枪等手段控制氮氧化物生成。

4、随着炉膛温度提升，大约在点火后的第三个小时烟温已经可以保证催化剂反应，此时应该尽早的投入脱硝系统运行，并随时监视环保NOx数值，以防超标。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图 5 参数提升过程

通过以上手段，在此次开机过程中，机组环保NOx有效降低，小时均值稳定在合格范围以内。

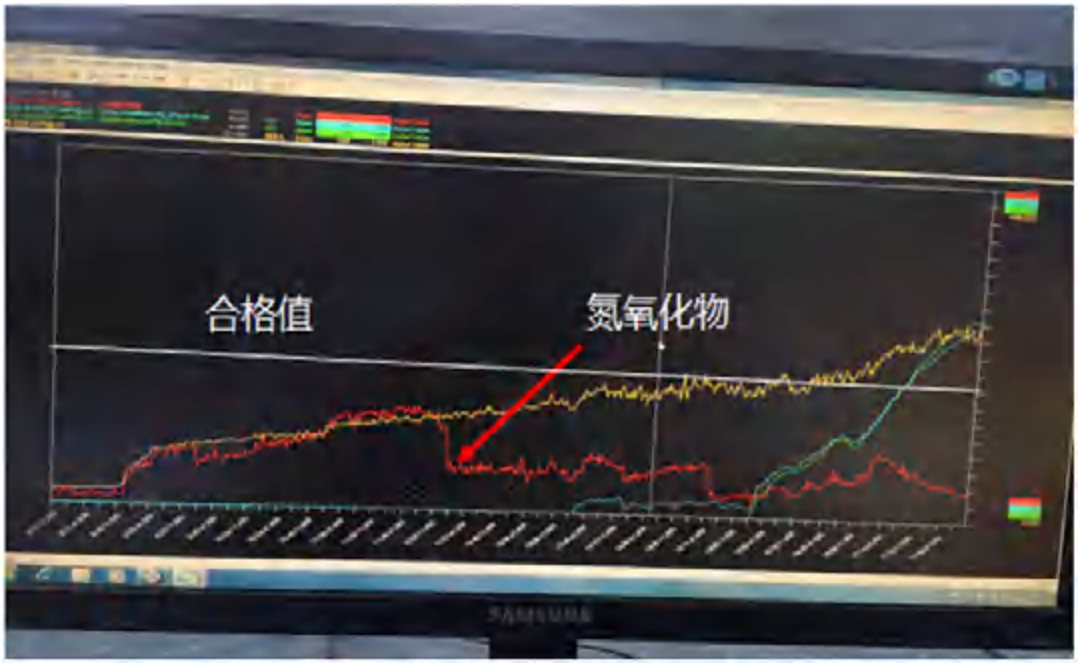


图 6 机组启动氮氧化物分钟统计曲线

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2020年7月11日4号机组启动氮氧化物分钟统计曲线

（二）效果说明

通过此次启动,杜绝了机组启动初期的NOx超标现象,为我厂在以后的机组启动取得了可靠的经验。

技术的先进性:该技术创新性强,在无重大改造的前提下运用运行调整,根本解决了燃煤机组初期启动时氮氧化物难以控制的行业难题。

技术的稳定性:自从#4机组根据技术实施后山东某发电厂四台机组均运用此技术实现了机组启动的小时均值零超标。

大气污染防止效果:采用该技术机组并网后,山东某发电厂没有发生因炉膛排烟温度低造成氮氧化物小时均值超标的现象。为电力行业打赢大气污染防治攻坚战作出了贡献。

技术安全性:在山东某发电厂推行3个多月来,未出现安全问题

七、技术推广前景描述

该大气污染防治技术应用成熟、稳定，基本无改造，适用性强，环保效益明显。主要通过运行调整及简单的技术变动即可得以实现，可以有效的解决机组锅炉启动初期因为炉膛排烟温度低，脱硝系统无法投运造成氮氧化物超标的事件发生，该技术措施在山东某发电厂一期#1机组#2机组得到推广应用，在不进行设备技术改造的前提下，通过优化经济结构运行操作，实现了机组并网前投入脱硝系统，以较低的成本开辟一条全新的技术路线，有效的解决了燃煤锅炉启动初期无法投运脱硝装置造成NOx超标的行业难题，对我国燃煤机组节能减排，助力电力行业打赢大气污染防治攻坚战具有积极的作用，可以在燃煤发电行业全面推广。

参考文献

[1]陈博. 600MW机组脱销改造后空预器堵塞原因及解决措施[J].浙江电力2016

[2]陶泽.SCR法烟气脱硝改造后基硫酸氢铵造成的空预器堵塞治理[J].山东工业2015

[3]杨彪. 氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M]. 北京：冶金工业出版社2007

[4]岑可法，周昊，池座和。大型电站锅炉安全及优化运行技术[M].北京：中国电力出版社2002

作者简介

姓名：蔡飞；

职称：高级工程师；

从事专业：热能动力

工作单位：中国石化集团胜利石油管理局有限公司胜利发电厂

单位地址：山东省东营市东营区南二路205号

邮编：257087

Email地址：13963368118@163.com

联系电话：13963368118，0546-8594526

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

燃煤机组自动发电量控制及一次调频应用与管理提升

王友权　杨立勇　包永胜　孙国辉　王华清　程庆辉　马丽丽　王文军
（华能伊敏电厂）

摘要：为满足《东北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《东北区域并网发电厂辅助服务管理办法实施细则》相关要求，提高机组AGC、一次调频指标。该文主要介绍了伊敏电厂自动发电量控制及一次调频应用工作的开展情况，从控制系统优化、管理、规范进行挖潜，管理水平不断提升。对存在的问题进行了分析，同时对现存的问题进行了系统优化解决。

关键词：AGC　一次调频　调节精度　响应时间

1 伊敏电厂各机组概况

华能伊敏发电厂现建有6台燃煤机组，总装机容量3400MW。一期为2*500MW超临界机组，二期为2*600MW亚临界机组，三期为2*600MW超临界机组，6台机组均采用风扇磨直吹式制粉系统，八角切园直吹式燃烧方式，6台机组的DCS控制系统全部采用ABB贝利公司的Symphony系列分散控制系统。

2 背景

2.1随着单元机组容量的不断增大，AGC、一次调频控制系统指标对于机组运行的安全性、经济性都有着直接的影响。同时由于电网频率控制水平的提高，保证并网运行发电机组的安全稳定运行，防止机组事故跳闸导致系统恶性频率事故发生。目前伊敏电厂#6机组AGC及一次调频满足不了《东北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《东北区域并网发电厂辅助服务管理办法实施细则》相关要求，提高机组AGC、一次调频调节品质迫在眉睫。

2.2东北调控中心2020年1月份执行《两个细则》为2010年标准，AGC 指标不进行考核。目前执行的《两个细则》为2019年标准新标准，要求标准提高，AGC 投入范围要求在50%Pe~100Pe。伊敏电厂各机组AGC、一次调频指标不达标，主要体现在可用率及响应时间两个方面。2020年一季度伊敏电厂AGC、一次调频受到电网考核350万元。

2.3 伊敏电厂AGC投入自动控制系统及设备存在很多问题。

2.3.1 自动方面问题：锅炉给水自动、燃料自动、减温水自动、送风自动、引风自动、

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

NOX喷氨自动、HEH自动、协调自动均不能够满足AGC自动投入指标的要求，另外调门流量特性不好影响AGC、一次调频指标，这些问题均需要进一步调整优化。

2.3.2 就地设备方面：我厂机组DCS中有功功率由三个有功变送器采用三取二确定，如果机组3个有功变送器误差大，影响我厂机组负荷调节精度。远动AGC及DCS指令通道或远动系统反馈给网调有功功率如果存在偏差，造成调节精度不准。远动系统#3-#6机组有功功率为不含励磁有功，而DCS调整有功功率含有励磁有功相差约6MW功率，造成调节精度不准。

2.4伊敏电厂从2020年3月末开始伊敏电厂AGC和一次调频优化及应用工作。

3 AGC及一次调频系统技术指标要求

3.1 AGC调节指标要求：

3.1.1 AGC机组的调节速率≥1%Pe；

3.1.2 AGC机组的调节精度≤±2%Pe；

3.1.3 AGC机组的响应时间≤60s。

3.2 一次调频指标要求：

3.1.1 机组调速系统的速度变动率4%--5%；

3.1.2 一次调频的最大调整负荷限幅≥额定负荷的±6%；机组一次调频的人工死区不大于±2r/min，调速系统的迟缓率<0.06%；

3.1.3 一次调频的响应特性规定：一次调频的负荷响应滞后时间(β1)应小于3s；一次调频的负荷调整幅度(β2)：机组在15s内负荷负荷调整幅度应达到15s内频率极值点对应的一次调频理论调整负荷的90%；调整幅度的偏差(β3)：在电网频率变化超过机组一次调频死区开始至60s 或至频率变化回到一次调频死区时止，机组实际与理论调整负荷之差绝对值的平均值应在理论调整负荷最大值的±25%内；调频响应指数(Bu)：在电网频率变化超过机组一次调频死区开始3s 至60s 或至频率变化回到一次调频死区时止，机组一次调频实际加权积分电量要达到期望积分电量90%以上。

4伊敏电厂AGC、一次调频应用

4.1 为了规范各机组AGC、一次调频工作管理，成立《伊敏电厂AGC、一次调频技术攻关组织机构》，明确各部门、单位的职责及工作流程，规范了定期工作便于统一协调管理，提高了工作效率。编制实施《伊敏电厂AGC及一次调频工作管理办法》落实各级人员责任，规定相关考核、奖励标准，提高了各级人员工作积极性。

4.2 组织对影响1-6号机组问题进行排查，编制伊敏电厂AGC、一次调频问题整改计划，定期对组织召开工作协调会，监督协调问题的落实、整改情况，共计解决一、二期脱硝喷氨自动时升降负荷时调整效果不好、#2机组协调未进行优化，AGC、协调下限为330MW，调整过程中主汽压力摆动大、三期机组氧量自动跟踪差等重要问题17项。

4.3 通过低负荷进行摸底调整实验确定深度调峰目标，通过优化调整试验实现#3、#4、#5、#6机组AGC自动调整范围由300MW-600MW调整至250MW-600MW ；#1机组AGC自动调整范围由原来330MW-500MW,调整至现在280MW-600MW；#2机组AGC自动调整范围由原来330MW-600MW,调整至现在260MW-500MW。

4.3.1 伊敏电厂AGC、一次调频优化内容

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

（1）锅炉主控逻辑优化

当前机组协调方式为炉跟机方式，锅炉主控采用IEB能量平衡，锅炉主控中引入DEB信号和主汽压力设定值的微分作为锅炉主控的前馈对入炉的风煤水量进行影响，机组变负荷过程中煤水配比不合适导致主汽压力偏差较大，中间点温度波动大，机组进入稳态后，中间点温度仍然不稳定。

优化内容：

1) 确定设定负荷与煤量的对应函数，保证不同负荷下，煤量基准值的准确性；

2) 重新构造变负荷前馈，根据变负荷速率、负荷变化幅度、负荷段及压力变化趋势确定前馈量，并根据压力偏差情况使该功能提前或延迟结束；

3) 在锅炉主控中引入主汽压力偏差的微分，并进行动稳态可变参数调整；

4) 根据间接能量平衡原理，构成锅炉主控的主调节回路，利用比例、积分、微分分离的控制结构，并采用运用变参数控制方法，以区分不同负荷段和动稳态调节过程。

5) 增加主汽压力设定值惯性环节，以适应锅炉响应特性偏慢的特点；

6) 滑压设定值变化率修改为负荷变化率的函数以匹配能量平衡关系；

7) 当燃料主控受限时，锅炉主控同步进行升降闭锁，以防止煤水失调，中间点温度失控。

8) 增加锅炉主控比例、积分、微分例外报告；

9) 增加燃料总指令例外报告；

（2）汽机主控逻辑优化

1) 功率设定增加压力拉回回路；

表1　压力拉回设定函数

项目	1	2	3	4	5	6
主汽压力偏差（SP-PV）MPa	-1.5	-1	-0.6	0.6	1	1.5
功率指令修正量（MW）	15	10	0	0	-10	-15

2) 增加AGC模式下压力拉回校正回路；

AGC模式下，为了保证功率调节的精度，弱化压力拉回回路的作用，在高负荷段保持压力拉回强度，防止机组超压情况的发生。

表2　AGC模式下拉回回路校正函数

项目	1	2	3	4	5	6
机组负荷设定（MW）	0	200	300	400	500	600
修正系数	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3) 增加一次调频动作时保持压力拉回输出不变逻辑，保证一次调频动作时，压力拉回修正量不变以保持功率调节精度，保证一次调频调节量；

4) 增加针对AGC方式下的控制参数及相应控制策略；

5) 增加一次调频指令优化回路。

（3）增加动态变负荷前馈

构造变负荷前馈，根据变负荷速率、负荷跨度及压力变化趋势确定变负荷过程的前馈量，并根据压力偏差情况可提前刹车或延迟结束；作用于煤、水、风等控制回路，加快锅炉动态调节特性。

根据不同负荷段，对前馈煤量进行不同设置，在低负荷工况，升负荷前馈煤量偏大，降负荷前馈煤量偏小；在高负荷工况，升负荷前馈煤量偏小，降负荷前馈煤量偏大。

对给水量前馈，采用4:1的前馈配比关系进行匹配，以适应动态工况的锅炉热量变化规律。

对风量前馈，除了匹配变负荷前馈煤量变化所提前变化的风量，针对变负荷时的氧量变化规律进行特殊匹配。

（4）增加BTU（燃料热值校正）回路

1) 将原有BTU断续控制修改为连续控制；

2) BTU输出范围（0–100）对应煤质校正系数（0.8–1.2），煤质越好，BTU 输出越大；煤质越差，BTU输出越小；

3) BTU × 实际煤量，作为燃料调节的反馈，锅炉主控的输出作为燃料调节的指令；

4) 当煤质变好时，BTU调节输出上升，燃料调节反馈上升，燃料调节回路输出下降，给煤机指令下降，锅炉煤量下调；当煤质变差时，BTU调节输出下降，燃料调节反馈下降，燃料调节输出上升，给煤机指令上升，锅炉煤量上升；

5) 变负荷时，BTU保持不变，停止调节；

6) 运行人员可在煤质变化大时，手动改变BTU输出以快速调节煤量；

7) 运行人员可在压力偏差大且持续时间长时，手动改变BTU以快速改变煤量，使协调控制快速收敛。

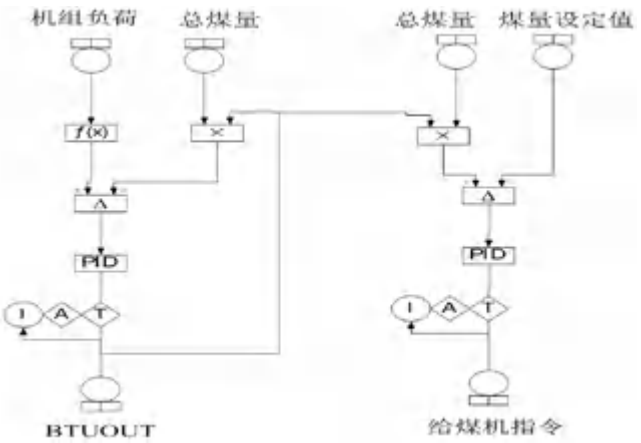


图1 BTU控制逻辑框图

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

（5） 主汽压力生成回路逻辑优化

1）增加滑压设定值的惯性环节逻辑；

2）增加滑压偏置设定逻辑，便于运行人员在滑压模式下调整主汽压力定值；

3）滑压速率采用机组变负荷率直接设定代替原有的固定速率。

表3 滑压速率匹配函数

项目	1	2	3	4
负荷变化率（MW/MIN）	0	5	10	20
压力变化率（MPa/MIN）	0	0.18	0.3	0.6

（6） 引风机控制系统逻辑优化

1）增加负压变化前馈，保证异常工况下炉膛负压的稳定；

2）优化送风对引风调节前馈，保证动态下炉膛压力的稳定；

3）修改调节参数，优化静态调节品质。

（7） 送风控制系统逻辑优化

原有的风量生成回路由锅炉主控输出经过函数转换和惯性、延时环节处理形成，在变负荷时由于延时时间长，造成氧量偏差大，氧量自动修正变化量非常大，导致锅炉内部热量变化太慢，影响主汽压力调节效果，并且由于机组经过多次改造风量测量数据相较于设计值想去甚远，达到200t/h的偏差，风量设定函数需进行校正并重新设定。

1）重新设计了风量设定函数，以煤量和煤量指令取大值作为风量设定函数的源头，并采取延时取大的处理方式，保证锅炉的富氧燃烧环境，并且采用单独的惯性环节匹配风煤的变化特性。

表4 风量设定函数

项目	1	2	3	4	5	6
煤量指令（t/h）	0	200	255	312	366	500
风量指令（t/h）	900	900	1157	1400	1670	2281

2）增加变负荷送风前馈，保证变负荷过程中风煤配比合适，氧量调节正常。

（8） 汽温控制系统控制逻辑优化

1）优化主副回路调节参数，改善汽温调节效果。

（9） 一次调频控制回路逻辑优化

原有控制回路的调频响应速度不够，不能满足电网对一次调频的性能要求，在不同负荷段、不同压力、不同阀位下机组一次调频响应能力存在差别，必须在控制回路中考虑不同参数下的控制效果。

优化内容：

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

1) 增加DEH侧主汽压力修正调频回路，修正不同主汽压力下阀门动作幅值；

表5 DEH侧主汽压力对一次调频动作阀位的修正函数

项目	1	2	3	4
主汽压力（MPa）	8	16.5	20	23
系数	0.3	0.3	-0.1	-0.2

2) 增加DEH侧汽门开度修正调频回路，修正不同综合阀位下阀门动作幅值；

表6 DEH侧综合阀位对一次调频动作阀位的修正函数

项目	1	2	3	4	5
调门开度（%）	0	85	90	92	100
系数	0	0	0.1	0.2	0.2

3) 增加DEH侧调频修正回路，修正不同转速差一次调频动作的的阀位幅值；

表7 负方向修正函数

项目	1	2	3	4	5	6
阀位变化量（%）	-6	-4	-1.5	-1.2	-0.6	0
修正后阀位变化量（%）	-6	-4	-2.5	-2	-1	0

表8 正方向修正函数

项目	1	2	3	4	5	6
阀位变化量（%）	0	0.6	1.2	1.5	4	6
修正后阀位变化量（%）	0	1.2	2.2	2.6	4	6

4.4 运行人员操作调整方面挖潜：

4.4.1制定了负荷速率控制措施后，负荷速率由原来的常态化3MW/min，根据不同负荷进行了增加负荷速率控制要求，整体AGC响应时间达到新的突破。#1机组280MW以上负荷时加减负荷速率负荷速率6MW/min。#2机组AGC负荷下限已修改至260MW，负荷300MW以上执行负荷速率5MW/min。#3、4机组负荷300MW～360MW分隔屏超温，加减负荷速率3～7MW/min，#3机组负荷360～600MW（包括360MW和600MW）区间负荷变化时，加减负荷速率按照7MW/min控制要求。#5、6机组负荷在300～540MW（包括300MW和540MW）区间负荷变化时，加减负荷执行负荷速率7MW/min控制要求。负荷540～600MW（包括600MW）加减负荷时，负荷速率执行3～5MW/min。

4.4.2 配合热工专业对#3、4、5、6炉协调进行优化，协调跟踪得到很大改善。二期滑压投

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

入条件改为240MW，在最低稳燃负荷至额定负荷实现全程投入。

4.4.3 宣贯了两个细则要求，值班员对退出AGC考核和AGC响应时间慢造成的考核，有了很大的改观，退出AGC次数明显降低。目前AGC退出次数部分机组达到0次。

4.5 伊敏电厂 AGC一次调频优化后效果展示（以号6机组为例）

机组变负荷曲线（见图2到图3）中各参数量程为：

图2 300MW−370MW−6MW/ min

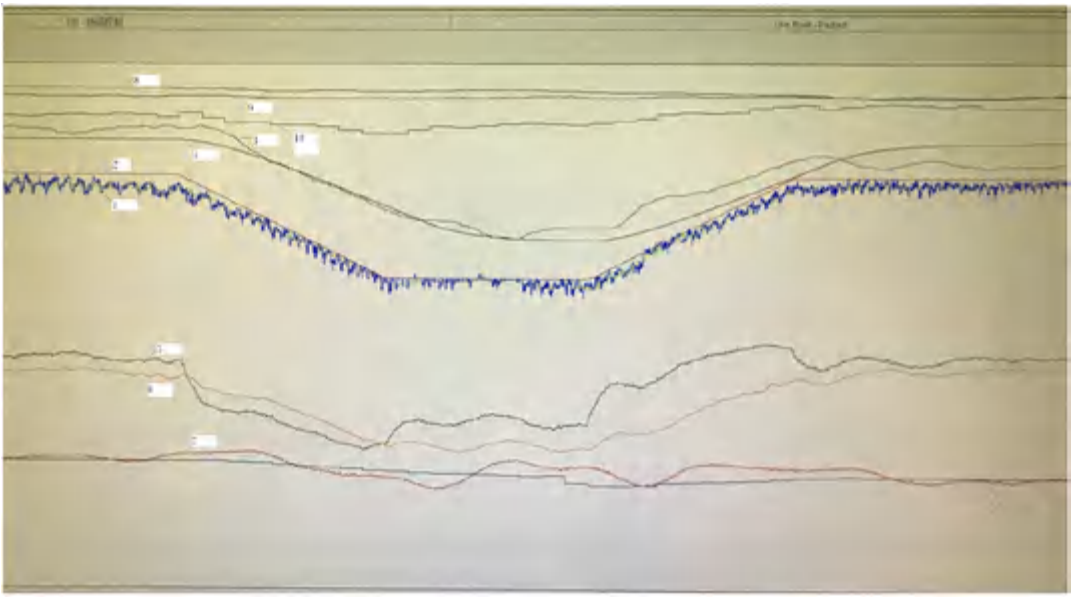


图3 450MW−540MW−9MW/ min

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

实发功率，2-负荷指令，量程范围： 0～600MW；3-主汽压力，4-主汽压力设定，量程范围：0～30MPa；5-燃料量，量程范围：200～700t/h；6-给水量，量程范围：800～2500t/h；7-中间点过热度，量程范围：0℃～100℃；8-主蒸汽温度，量程范围：400℃～600℃；9-再热蒸汽温度，量程范围：400℃～600℃；10-汽机主控指令，量程范围：0～100%。

负荷变动试验见图2、图3曲线。本机组的负荷变化率及主要运行参数满足机组运行的需求。试验过程中的实际负荷变化速率为1.3MW/min、负荷响应纯迟延时间不大于20s，满足要求。负荷偏差、主汽压力、主汽温度、再热器温度、炉膛压力、氧量等参数都达到了规程要求。

5 AGC、一次调频应用效果、效益

5.1伊敏电厂通过对AGC及一次调频应用的实施，伊敏电厂#1-6机组负荷摆动、煤量超调、负荷升速率、一次调频考核参数等方面均比优化前有所提高，一方面提高了各机组自动调节系统的调节品质，同时保证了机组对电网频率、负荷的响应能力及调整精度，同时为机组参与电网调峰调频运行打下了坚实的基础。

5.2 通过在运行方式上优化、系统设备及控制策略的优化，提高了设备的可靠性及检修运行人员的技术水平。

5.3 满足东北网调《两个细则》要求，提了伊敏电厂在东北网调的信誉及竞争力，为完成全年发电任务奠定良好的基础。

5.4 伊敏电厂从2020年3月末开始伊敏电厂AGC和一次调频优化及管理工作提升，2021年1月份至2021年7月份，AGC、一次调频得到东北调控中心奖励金额为：672.18万元，深度调峰得到东北调控中心奖励金额为：2388.03万元。

参考文献

[1] 华能伊敏煤电有限责任公司1-6号机组协调控制系统优化方案 2020

[2] 盛赛斌 600MW亚临界火力发电机组技术丛书-控制设备及系统 2007

[3] 火力发电厂热工自动化系统检修运行维护规程DLT774-2015yi

[4] 东北电力调控中心《东北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《东北区域并网发电厂辅助服务管理办法实施细则》2019年11月

[5]华能伊敏电厂《伊敏电厂AGC及一次调频工作管理办法》2021年2月

作者简介

王友权；1992年毕业至今从事电厂热工专业，学历本科，高级工程师，曾多次组织机组检修中的重大技术改造，在机组安全运行、降本增效、节能减排等方面取得了一些成绩；单位：华能伊敏电厂；职务：生技科热工专工；通讯地址：内蒙古呼伦贝尔市伊敏河镇华能伊敏电厂，邮编021134；联系电话：15332808396；邮箱：226370889@qq.com

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

“全关低压缸进汽蝶阀”在俄供320MW超临界直流定压机组上的应用

刘平升
（华能营口电厂 营口 115007）

摘要：本文针对华能某电厂一期两台俄供2*320MW超临界直流定压（23.5MPa）机组在供热期进行“全关低压缸供汽蝶阀”试验过程中体现出的灵活性深度调峰优势及试验过程中产生的安全问题进行阐述，并对蝶阀全关后供热蒸汽流量变化、“电热解耦”的可行性分析；华能某电厂一期俄供机组在进行“全关低压缸进汽蝶阀”试验后，深度调峰及供热工作取得了长足进步，收到了很好的经济效益与社会效益。希望通过对试验过程的分析，为国内超临界直流供热改造机组深度调峰提供参考，同时保障汽轮机在深度调峰过程中安全稳定运行。

关键词：低压缸进汽蝶阀 鼓风工况 供热

前言

国家能源局东北监管局2016年下发了《东北电力调峰辅助服务市场监管办法（试行）补充规定》，对有偿调峰基准机组补偿档次进行了修订，明显拉开了普通调峰与深度调峰的补偿差距。面对电网的发电形势，深度调峰已经是东北地区各火电企业的必然选择，同时深度调峰后对设备产生的安全隐患需要各厂精细分析，重点防控。华能某电厂立足现实，结合电厂自身情况，确定了“自主试验、自主完善”的做法，完成了一期两台俄供2*320MW超临界定压（23.5MPa）直流机组的“全关低压缸供汽蝶阀”试验，实现了机组供热期灵活性调峰最低至85MW长时间运行，并能够满足地方超过1286×104m2热网供热要求，为国内超临界直流供热改造机组深度调峰提供了很好的试验样板，各试验结果具备借鉴意义。

1.华能某电厂一期设备简介

华能某电厂一期锅炉是前苏联塔干罗哥“红色工人”锅炉制造厂制造，超临界参数压力、多次垂直上升定压直流锅炉，单炉膛前后墙对冲燃烧，π型布置；汽轮机是前苏联哈尔科夫汽轮机厂制造的K—320—23.5—4型、定压超临界参数、非调节抽汽、一次中间再热、单轴三缸双排汽凝汽式汽轮机；系统配有一台100%负荷的汽动给水泵和一台65%负荷的电动给水泵。

汽轮机由高压缸、中压缸和双流式低压缸组成，其中高、中压缸为双层缸，采用蒸汽反向

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

布置，低压缸采用双流式布置。高压缸有9级压力级，其中第一级为单列调节级，中压缸有10级，低压缸有2×5级为双流道，每一流道各有5级。

一期两台320MW机组采用中低压导汽管打孔抽汽方式进行了供热改造，在低压缸进汽口安装了进汽蝶阀，用以调节进入热网加热器的蒸汽量。供热改造后额定抽汽量450t/h，最大抽汽量500t/h，抽汽压力0.44MPa，抽汽温度257℃，地方集中供热面积达1500×104m2以上。

2.“全关低压缸进汽蝶阀”试验过程简述

定压超临界机组灵活性调峰一直是业界难点，因其相同负荷下小机耗汽量远大于滑压机组，小机供汽压力不足一直是深调面临的难题。但为了满足东北地区电网两个细则要求，满足本地区供热参数，同时将本厂机组经济效益最大化，某电厂在不借助外部技术力量的前提下，自主完成一期两台定压机组“全关低压缸进汽蝶阀”试验，以提高供热量、提高调峰深度，实现“电热解耦”。

华能某电厂组织各专业先后3次分别对两台机组进行了“全关低压缸进汽蝶阀”试验，第一次运行3小时后组织对各参数进行技术分析；第二次运行4小时；第三次运行6小时30分；经过三次试运，汽轮机TSI各参数运行平稳，机组负荷由之前的深调至115MW降至85MW，同时热网供热蒸汽流量从85MW负荷时设计的105t/h提高到205t/h。

3.“全关低压缸进汽蝶阀”试验现象与安全性分析

3.1低压缸各监视段压力下降明显

某电厂一期两台汽轮机设置九段非调节抽汽，1、2、3段抽汽分别向三台高加供汽，4段抽汽供小机，5段抽汽供除氧器，6、7、8、9段抽汽分别向四台低加供汽。高、低加疏水采用逐级自流方式。其中7段抽汽、8段抽汽、9段抽汽布置在低压缸。在关闭低压缸进汽蝶阀过程中，低压缸各监视段压力逐步下降，蝶阀全关后，低压缸一级动叶后压力降低至-90.0KPa（见表3-1），与凝汽器排汽压力逐步接近，低压缸除第一、二级动叶外，其它三级基本无有效焓降，均处于鼓风工况下运行。

低压缸进汽蝶阀开度	0%	10%	15%	30%
七抽压力(KPa)	-90.0	-83.8	-77.98	-32.3
八抽压力(KPa)	-92.5	-89.9	-86.4	-61.1
九抽压力(KPa)	-93.8	-93.7	-93.6	-93.5

表3-1 低压缸进汽蝶阀开度与各监视段压力参数表

3.2汽轮机轴向位移无明显变化

某电厂一期两台汽轮机推力轴承布置在高、中压缸之间，以汽轮机大轴推向发电机侧靠紧推力盘为零点，负方向跳闸值为-1.5mm，正方向跳闸值为+1.0mm；由于低压缸各级动叶对称布置，两侧产生的轴向推力相互抵消，因此在进行低压缸进汽蝶阀关闭试验过程中，低压缸进汽流量变化对机组整体轴向位移并没有太大影响（见表3-2）；在关闭低压缸进汽蝶阀过程

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

中，通过适当调整供热蝶阀，尽量将中压缸排汽压力控制在主蒸汽流量对应的中压缸排汽压力额定值，这样就保证了高、中压缸之间的轴向推力能够维持在设计水平，保证机组轴向位移平稳，推力瓦温正常。

低压缸蝶阀开度	40%	30%	20%	10%	0%
轴向位移 mm	-0.596	-0.613	-0.596	-0.559	-0.556
机组负荷 MW	191	190	150	125	85
供热蝶阀开度	64%	67%	41%	67%	40%

表3-2 低压缸进汽蝶阀开度与轴向位移参数表

3.3低压缸胀差缓慢上升，但在可控范围内。

在关闭低压缸进汽蝶阀后，低压缸末级、次末级叶片产生明显的鼓风现象，低压缸整体温度上升，由于转子膨胀系数大于汽缸，在产生鼓风效应后，低压缸胀差必然会出现一定程度的上升。某电厂一期两台汽轮机低压缸胀差保护定值为+8.8mm、-2.0mm，试验开始前低压缸胀差为5.67mm，试验持续6小时后，低压缸胀差上升至6.38mm（见表3-3），整体变化在可控范围内；低压缸零出力时间已经能够满足现阶段电网深度调峰时长要求。

蝶阀全关时间	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30
低缸胀差 mm	5.67	5.85	6.08	6.09	6.12	6.24	6.38

表3-3低压缸胀差随时间变化趋势

3.4对中压缸及小机供汽压力影响

某电厂一期两台机组为原苏联设计超临界定压方式运行，主汽压力要求稳定在23.5MPa，这就为小机出力提出了更高的要求。正常滑压运行机组，低负荷阶段小机供汽压力大于0.15MPa以上均能满足给水流量变化需求，但定压机组为了保证主汽压力稳定，汽泵需要克服相当大的流量阻力，小机耗汽量明显上升。试验表明，某电厂一期两台定压机组当小机进汽压力小于0.54MPa以下时，就无法满足汽泵出力要求，如果在深度调峰过程中采用电泵运行又得不偿失。这就要求在深调过程中中压缸不能偏离设计工况，而且还要通过适当关闭供热蝶阀的方式提高中压缸排汽压力，满足小机要求（见表3-5）。某电厂经过试验计算，得出主汽流量对应的中压缸排汽压力定值（见表3-4），叠加运行人员偏置设定，运行偏置范围±0.02MPa。

主汽流量	1050	1000	950	900	850	800	750
中排压力	0.285	0.27	0.255	0.24	0.2275	0.215	0.2

700	650	600	550	500	450	400
0.185	0.1725	0.16	0.145	0.13	0.115	0.1

表3-4主汽流量与中压缸排汽压力对应参数表（单位t/h、MPa）

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

主汽流量	低压蝶阀	供热蝶阀	中压压力	小机抽汽
301t/h	0%	40%	0.16MPa	0.55MPa

表3-5低压缸进汽蝶阀全关后对中压缸排汽压力的影响

全关低压缸进汽蝶阀同时控制热网供汽蝶阀开度后，必然导致中压缸排汽温度上升，在试验过程中，某电厂一期两台汽轮机中压缸排汽温度从试验前的247℃上升至299℃；经过与汽轮机厂家及热网设计单位沟通，确定中压缸排汽温度及热网供汽温度控制在350℃以下均能满足金属监督要求。

3.5各台低加负荷分配明显变化

某电厂一期两台汽轮机“中压缸6段抽汽、低压缸7段抽汽、低压缸8段抽汽”分别对应“四号低加、三号低加、二号低加”，这三台低加为立式正置方式布置，另外一号低加为混合式加热器。

从试验数据可以反映出，低压缸进汽蝶阀全关后，低压缸各段抽汽量大幅度下降，二号低加、三号低加温升明显不足，四号低加温升增大，由原来的17℃提高到56℃（见表3-6），低压缸零出力后，中压缸最后一级抽汽对应的低压加热器要加强监视，做到逢停必检，防止运行中出现加热器超负荷漏泄。

由于某电厂一期两台机组锅炉侧低低温省煤器出口接在三号低加出口，低省吸收锅炉排烟余热提高了凝结水温度，同时四号低加温升增大，凝结水出口温度未受明显影响。

	二号低加	三号低加	四号低加
实际温升	3℃	5℃	56℃
设计温升	6℃	17℃	17℃

表3-6低压缸进汽蝶阀全关后各低压加热器温升变化

3.6满足热网供热量要求

某电厂一期两台汽轮机经中压缸排汽导汽管中间打孔供热改造，供热面积已达1500万平以上，为满足地方供热需要，同时满足电网深调调峰要求，关闭低压缸进汽蝶阀也已经势在必行。在关闭低压缸进汽蝶阀过程中，85MW时热网供汽流量从设计的105t/h提高到205t/h，在热网一网循环水流量8100t/h条件下，热网一网供水温度能够达到88℃，热网一网回水温度达到46℃，能够满足地方供热要求（见表3-7）。

通过全关低压缸进汽蝶阀，机组灵活性调峰至最低85MW后，供热蒸汽量增加100t/h，实现了“电热解耦”要求。

85MW设计抽汽	供热蒸汽量	供水温度	回水温度	循环流量
105t/h	205t/h	88℃	46℃	8100t/h

表3-7全关低压缸进汽蝶阀后热网参数变化

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.7低压缸排汽、金属温度控制在45℃以下

某电厂一期两台汽轮机在低压缸两侧各布置一个排汽温度测点，低压缸四角各布置一个金属温度测点；在关闭低压缸进汽蝶阀后，低压缸进入小容积流量工况[1]，首先从末级、次末级开始产生鼓风效应，随着容积流量减小，鼓风现象逐步提前，末级、次末级由于鼓风效应温度上升，为防止低压缸排汽端温度超限，通过低压缸喷水减温装置降低排汽温度；某电厂低压缸减温水设计为电动截止阀，当低压缸金属温度超过60℃联锁开启，低于45℃联锁关闭。为保证在低压缸进汽蝶阀全关后，低压缸排汽端温度不大幅度变化，已将低压缸减温水电动门控制力逻辑进行修改，当负荷低于90MW时保持连续开启，设计为电动或气动调节阀的机组不必考虑修改控制逻辑。在低压缸进汽蝶阀全关后，通过喷水减温能够将低压缸排汽温度、低压缸四角金属温度控制在42℃—45℃之间（见表3-8），能够保证排汽缸不产生过热变形。

低压缸进汽蝶阀开度	低压缸左侧	低压缸右侧	低压缸东北角	低压缸东南角	低压缸西北角	低压缸西南角
0%	42	42	42.1	42.2	41.9	41.6
20%	40	40	41.6	40.9	40.6	40.7

表3-8低压缸排汽温度变化（单位℃）

3.8对低压缸末级、次末级叶片影响

某电厂为配合深度调峰需要，利用机组大修机会，在一期汽轮机低压缸次末级动叶后安装温度测点，以监视鼓风现象对低压缸内部影响。从整个试验过程中可以看出，低压缸次末级温度随零出力时间推移逐渐上升，6小时后从原来的73℃上升至103℃，变化30℃（见表3-9）；经过与汽轮机厂家沟通，低压缸次末级温度在进汽蝶阀全关后控制在不超120℃就能够保证末级、次末级安全。某电厂一期汽轮机全关低压缸进汽蝶阀后，能够将次末级温度控制在120℃以下（见图3-1），能够保证低压缸不出现过热运行，但仍无法避免水蚀问题，低压缸进入小容积流量后，末级、次末级动叶后产生脱流，叶片根部及叶顶出汽边背弧都会产生水蚀现象；经过2017至2018年一年多的时间深度调峰运行，某电厂一期两台汽轮机低压缸末级、次末级叶片并未出现严重的水蚀迹象，叶片没有出现深度锯齿状损伤。本次全关低压缸进汽蝶阀后，低压缸喷水量没有相应增大，对低压缸末级、次末级叶片的影响在可控范围内，但仍需要通过大修后进行检验分析。

对于低压缸在小容积流量工况运行后，叶片产生的颤振问题，由于某电厂全关低压缸进汽蝶阀过程为全程自主完成，因此对叶片颤振缺乏有效的试验检测手段；但叶片产生颤振后，振动会通过叶根传递到主轴上，在低压缸两侧轴振中有所体现；某电厂在全关低压缸进汽蝶阀后，三次试验过程中低压缸两侧轴振变化量均小于原始振动值的25%，轴振在可控范围内。有国内研究资料表明，在低压缸各级容积流量为额定流量的0.1~0.3范围内时，末级、次末级动叶颤振最强烈，某电厂经过计算控制低压缸进汽蝶阀尽量不在5%~10%之间停留，避开颤振对叶片损伤。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

时间	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30
次末级温度	73	89	95	98	101	102	103

表3-9低压缸次末级温度随时间变化趋势（单位℃）

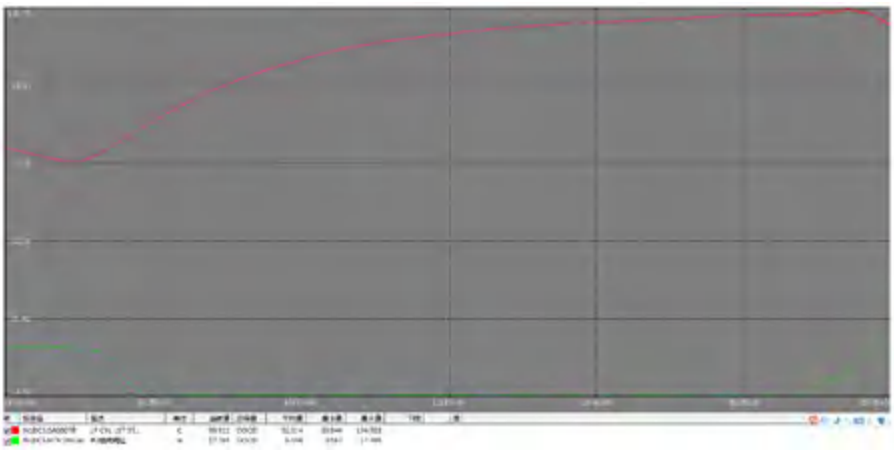


图3-1低压缸次末级温度随低压缸进汽蝶阀全关后持续时间变化曲线

3.9 “全关低压缸进汽蝶阀”后凝泵控制优化

一期机组进入深度调峰后，凝结水流量随之降低，尤其进入供热季，由于热网疏水进入#3低加出口，全关低压缸进汽蝶阀后，凝结水流量进一步减少，但由于主抽冷却水、轴抽冷却水、高压逆止门保护水等因素制约，凝结水流量不能无限制降低，需要确定凝结水深度调峰下限，优化一级凝泵出口调门控制方式；经过大量试验结论与定值调试，最终确定了一级凝泵出口调门优化方案与合理的#1低加水位设定值，使一级凝泵出口调门RM064a、b调节不出现滞后，同时防止PID积分饱和，保证了深度调峰期间（160MW—85MW）设备的安全稳定运行，以及机组出深调区后，一级凝泵迅速跟踪一号低加水位的能力，大幅度降低了一期机组一级凝泵耗电率，优化前后一级凝泵电流对比，见图3-2。

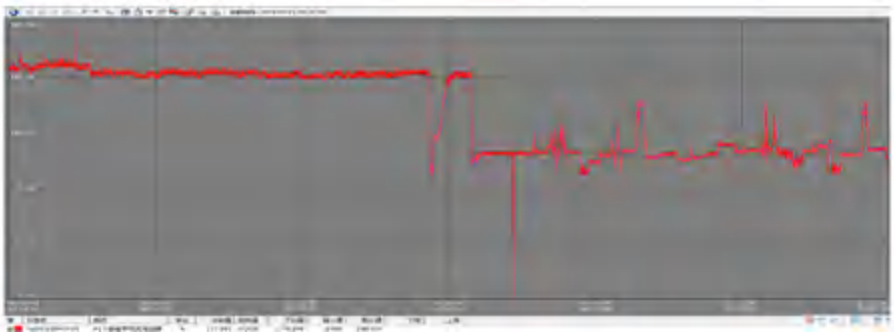


图3-2 凝泵控制优化后电流降低情况

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4.“全关低压缸进汽蝶阀”后安全预控措施

4.1.通过低压缸减温水控制低压缸两侧排汽温度、低压缸四角金属温度不超60℃；防止低压缸末级、次末级出现过热运行，防止排汽缸受热膨胀。但低压缸减温水在保证参数不超限的前提下，要尽量少开，防止末级叶片出现严重的水蚀现象，有条件的电厂可以选择在低压缸末级、次末级叶片镶焊硬质合金或对叶片表面镀耐磨涂层，以增加叶片抗水蚀能力。

4.2低压缸次末级温度按照不超120℃控制；当低压缸出现小容积流量工况，末级、次末级首先开始出现鼓风现象，随着容积流量进一步减小，鼓风现象提前，同时各级叶片摩擦损失也成比例上升，由于涡流作用，动叶顶部间隙温度会迅速攀升[2]，为防止出现叶片过热损坏，某电厂控制低压缸次末级温度不超120℃。有条件的情况下，低压缸应尽量增加各级温度测点，防止出现某一级动叶超温发现不及时问题。

4.3 监视各瓦轴振变化，当任一轴振超过125μm或任一轴振突变超过原始值的25%，申请停止切缸，开启低压缸进汽蝶阀10%以上；低压缸产生鼓风现象后，缸体受热膨胀，胀差上升，排汽缸受热变形等问题都会影响各瓦轴振变化，要加强监视。

4.4.低压缸进汽蝶阀全关运行期间，严禁进行“凝汽器半侧清扫、查漏”等工作，如必须进行的工作，应申请开启低压缸进汽蝶阀；在“全关低压缸进汽蝶阀”后，应控制凝汽器真空变化，严格控制排汽压力不超12KPa。

4.5 “低压缸进汽蝶阀全关”期间，应通过调整热网供汽蝶阀开度，控制中压缸排汽压力接近主蒸汽流量对应的额定值，控制中压缸排汽温度不超350℃，减少蝶阀全关对中压缸的影响。3.6.当机组出现异常情况时，立即增加机组负荷，开启低压缸进汽蝶阀。

4.7尽量避免低压缸进汽蝶阀在5%~10%开度之间长时间停留，减小颤振对低压缸叶片损害。

4.8严格按照“防止轴瓦损坏安全技术措施”要求，当出现瓦温或轴振超限时，立即打闸破坏真空停机。

5.产生的经济效益及可推广价值

某电厂一期两台汽轮机经低压缸进汽蝶阀全关后，85MW时单机供热蒸汽流量从原来的105t/h提高到205t/h，实现了“电热解耦”要求；蒸汽供热避免了大量的冷源损失，相同电负荷时的汽轮机热耗率大幅度下降。根据汽轮机热耗率供热修正公式计算，单纯从增加的供热量来看，降低机组热耗率约2000 kJ/kWh。通过“全关低压缸进汽蝶阀”某电厂一期机组灵活性深度调峰最低负荷从原来的115MW降低至85MW，全厂灵活性调峰收益单日收益就超360万元（包括二期600MW超超临界机组深调至90MW收益）。

华能某电厂立足现实，结合电厂自身情况，确定了“自主试验、自主完善”的做法，先后完成了一期两台俄供2*320MW超临界定压（23.5MPa）直流供热机组的“全关低压缸进汽蝶阀”试验，实现了机组供热期灵活性调整至最低85MW长时间运行，并能够满足地方超过1500×104m2热网供热要求，为国内超临界定压直流供热机组深度调峰提供了很好的试验样板，各试验效果具备借鉴意义，具有很高的推广价值。

参考文献

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[1]王伯博等.高背压小容积流量下汽轮机末级长叶片可靠性的试验研究[R].1987

[2]秦水才等.末级叶片流场、动应力测试及在小容积流量下叶片安全、经济性分析[R].1986

作者简介

刘平升（1985-），男，本科，工程师，现从事汽轮机运行管理工作。

工作单位：华能营口电厂

工作单位地址：辽宁省某市鲅鱼圈区华能营口电厂

邮编：115007

Email:277867565@qq.com

联系电话：15940741510

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

330MW机组中联门参调低负荷热再大抽汽量供热改造运行案例

王琦　吕景伟
（北京全四维动力科技有限公司　北京　100095）

摘要：本文以某电厂两缸两排汽330MW机组中压联合汽阀改造实现低负荷下热再大抽汽量供热的项目为案例，介绍其技术特点、改造范围和运行状况。

近年来因高参数工业用汽的需求，中联门参调技术在各电厂开始广泛使用，该技术通过对中联门开度的控制，在确保汽机安全运行要求前提下，实现冷再和热再的压力可调并满足工业供热需求，降低了年平均运行热耗。同时，改造后的机组具备了一定的灵活性深度调峰运行能力，可在40%负荷下满足较大的工业抽汽量。

某电厂3号和4号机组均为亚临界330MW机组，因外部热用户需求大幅增加，其单台机组低负荷下的热再最大抽汽量需达到300t/h的要求，原机组中联门设计不具备深度参与调节的能力。经分析论证，最终确定采用中联门整体更换的改造方案，解决了大抽汽量下可调中压阀门的关键技术难题，改造投运后中压联合汽门的一系列试验表明：改造后的阀门流量调节精准，运行稳定，达到了预期的改造目标和效果。

1.供热需求和中联门改造方案比选

某厂供热需求如下：

机组负荷	供热压力	供热量
56%THA	2.75MPa	0-300t/h
56%-40%THA	2.0MPa	0-180t/h

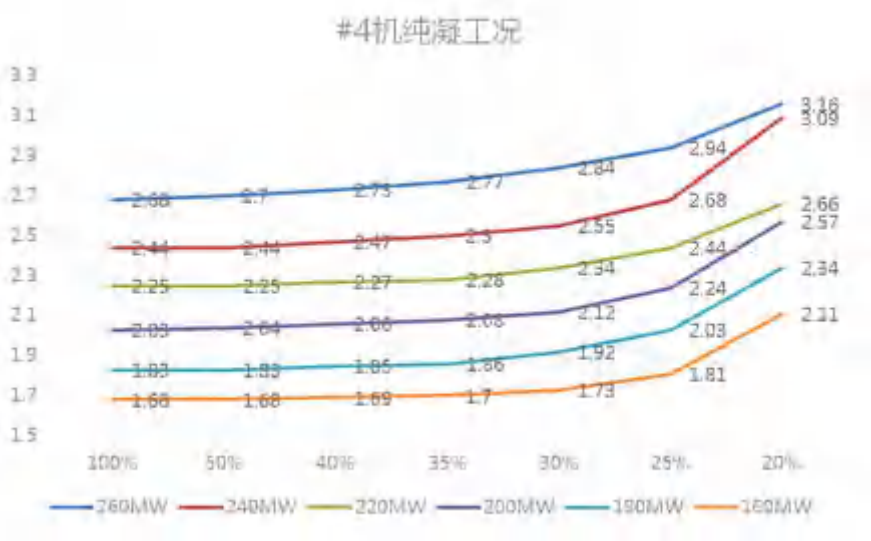
由于各厂工业抽汽和运行负荷的要求不同，目前中联门参调改造主要有以下几种技术路线：方案A中联门不改造仅运行调整，方案B中联门局部改造，以及方案C中联门整体更换。

方案A、B本质上的差别不大，均是在维持调门现有结构设计的框架下，通过对调门的调节特性试验来确定现有阀门的可调节范围。方案C则是根据特定的抽汽参数，对中联门进行定

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

制式的全新设计，以充分满足抽汽需求。

对于方案A，某厂经过调门性能测试获得数据如下：



图中调门开度--热再压力关系曲线

试验曲线均在机组的冷/热再不抽汽、仅调节的条件下完成的，当关小调门开度至20%左右时，阀门前后压差约为0.5MPa。在200MW负荷（60.6%THA）下，经中联门节流调节后的再热压力只能升压至2.57MPa，进一步减小阀门开度则出现阀杆剧烈抖动和压力波动大的情况。考虑实际运行的抽汽工况下阀门前后压差会进一步提高，因此方案A维持现有的中联门结构无法满足工业用汽需求。

对于方案B，结合国内的实施情况，以300MW机组为例，对于中联门参与热再抽汽调节的运行规程一般要求如下：

1) 中调门开度一般不得低于20%。

2) 机组负荷低于70%时采取措施并退出AGC。

3) 中调门前后压差大于1.3MPa则退出供热以保证机组安全运行。

上述运行限制表明，中联门局部改造后，在冷/热再抽汽运行工况下仍需保持在较高负荷下运行，同时对阀门前后压差也有较严格的限制，无法实现在低负荷大抽汽量下仍维持较高的抽汽压力。而根据相关厂家的实际运行试验结论，中联门升压能力普遍在0.5-1.0MPa范围内，与设计最大升压能力存在较大偏差。

对于方案C，对中联门实施整体更换改造，针对热再抽汽运行工况进行定制式设计，可实现宽负荷下的各种抽汽需求。

综合用户需求比较后，确定方案C为该供热改造的最终方案。

2.中联门改造方案

影响机组热再抽汽的因素主要包括中联门调节能力、小汽轮机出力、低压缸冷却流量等三个限制，因此中联门改造的主要目的是提高其升压能力和调节范围。对中联门进行整体更换改

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

造的主要原则如下：

1) 改造后机组在较大抽汽量工况下运行时，阀门的调压能力应保证未改造的高压末几级叶片的安全性。

2) 改造后机组轴系振动、瓦温、轴向推力基本不变或变化较小，在变化范围内不超过安全运行限值。

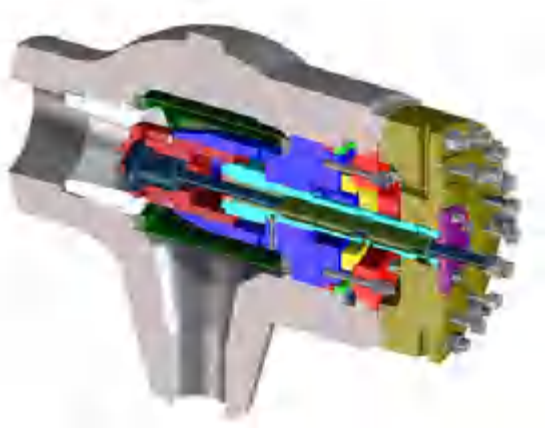
3) 改造后不影响汽轮机在无抽汽工况下运行的经济性。

4) 改造后的阀门应保持与原机组利旧部件的匹配性。

5) 尽量缩短改造周期。

依据以上原则，确定改造范围为中压联合调节汽阀阀壳、阀座、阀芯、阀杆以及密封套筒等阀门组件，同时对原中压联合调节汽阀液压操作机构以及油动机出力进行核算，并对控制系统的逻辑进行相应修改。

图改造后已投运中压联合汽阀



图中压联合汽阀主汽门结构示意图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

因低负荷下抽汽量过大，存在给水泵小汽轮机出力不足的情况，改造中为小汽轮机增加一路中压汽源。低压缸冷却流量需要保证低压缸进汽不低于220t/h，排汽不低于160t/h，对应的低压缸进汽监视段压力不应低于0.26MPa.a。此外，对工业抽汽后的凝汽器补水系统也进行了优化。

3.改造效果

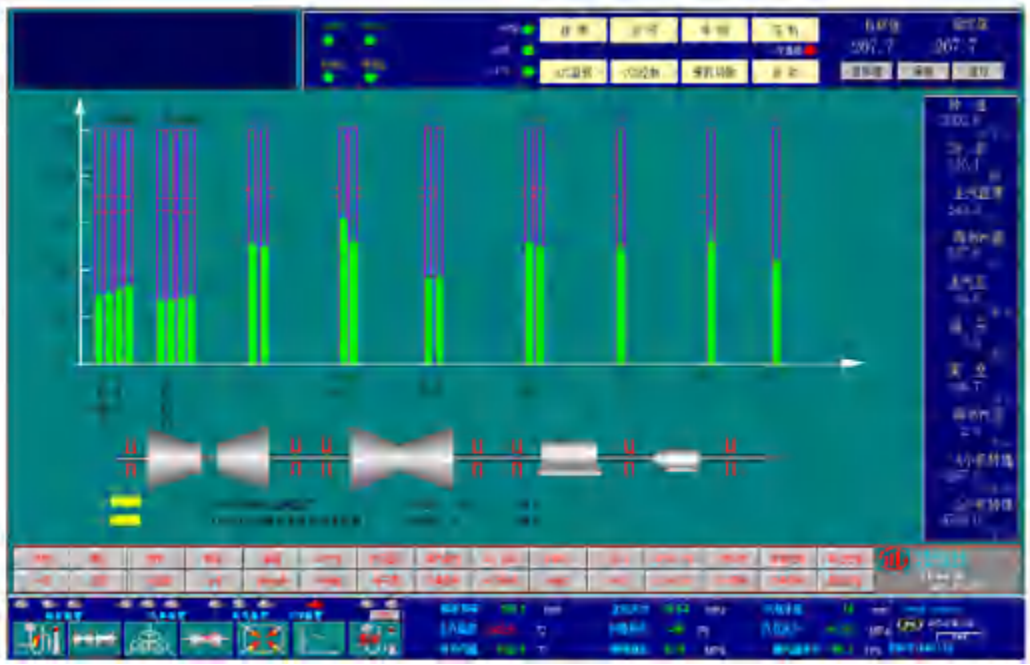
阀门整体更换后，通过中调门抽汽能力考核试验，对机组主要运行参数如汽机轴承振动、轴承温度、高排压比、高压缸排汽温度、中联门压力调节范围等多方面的进行了分析和校核，结论如下：

1) 汽轮机阀门活动试验：在机组带负荷运行过程中，控制系统置于阀门试验方式，逐个进行阀门活动试验，阀门机械部分动作正常且无卡涩现象，试验过程中引起的机组负荷扰动不大于额定负荷的3%；

2) 机组纯凝工况下中联门调节能力试验：机组负荷200MW，关闭中联门使热再压力稳定在2.75MPa，汽机各主要参数未见明显变化，中联门振动及噪音正常，在200MW负荷下关闭中联门控制再热汽压仍有较大裕度，且对机组安全性无影响。

3) 机组抽汽工况下中联门调节能力试验：分别在250MW、200MW、180MW、160MW负荷下通过关闭中联门，抽汽量在50~65t/h工况下，调节中联门前压力均可稳定维持在2.75MPa，阀门前后最大压差已达1.03MPa，充分说明了改造后中联门的压力调整能力。

目前因热用户需求限制，尚无法到达最大抽汽流量，后期待热用户需求增加后会逐步提高抽汽量到200~300t/h，根据目前运行状况，可判断完全能到达既定目标。



图供热工况160MW中联门调节试验主要运行参数截图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

结论

对中联门进行整体更换改造后，结合主蒸汽减温减压与热再抽汽组合的方式，机组可在最低40%负荷下实现高参数、大抽汽量的工业供热，满足深度调峰的要求。与目前热电机组主流的本体侧主流深度调峰技术相比，低压缸零出力技术适用于北方有较大采暖供热需求的地区和用户，且涉及原机组在远低于低压缸冷却流量下运行的安全性，旁路供热技术在较大抽汽量下容易产生管道噪声和振动问题；中联门参与调节的热再抽汽技术则适用于没有大量采暖供热需求、但有较大高参数工业抽汽需求的地区和用户，且不影响原机组低压缸部件的安全性，同时可避免出现在较大抽汽量下的管道噪声和振动问题，是对热电机组灵活性深度调峰改造技术的有力补充。

目前公司正在按照上述方案实施台州和汉川两个电厂的中联门参调改造项目。

作者简介

吕景伟，男，高级工程师，主要研究方向为汽轮机通流改造及新机设计开发，lvjingwei@4dpower.com.cn。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

PE-RT II型塑料热力管道架空敷设应用分析

张云
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：塑料管道自上世纪80年代进入我国以来发展迅速,现已广泛的应用于市政、建筑给排水、燃气输配等领域,“以塑代钢”逐渐成为行业的共识。在塑料直埋管道上，供热庭院管网已有完备的产品及设计标准体系，且有一定的规模的工程应用，现就PE-RT Ⅱ型热力管道在南方供暖上架空敷设中应用分析。

关键词：PE-RT II型热力管　架空敷设　供暖　支吊架　塑料管道

引言

目前我国供热管网中,无论是一级管网,还是二级管网,预制保温管的工作管一般都采用普通钢制管道。钢制管道具有耐温、耐高压的特点,但耐腐蚀性差,在运行一段时间后,管道易产生腐蚀,且在温度较高的情况下,加速腐蚀。短时间内的腐蚀会造成管道堵塞,导致输送能耗增加、采暖效果降低;随着锈蚀的发展,管道的跑、冒、滴、漏问题成为常态。

自1980年起,随着小区集中供暖的不断增加，欧洲的供热单位就开始寻求更经济的供热管道。

PE-RT ‖ 型工作管能在1MPa压力下长期输送75° 以下的热水且具有耐腐蚀、使用寿命长达50年、保温效果好，分子连接安全、施工方便等特点。自2011年起在我国北方的天津、山东、河南、吉林、河北、内蒙古等几十个城市小区热力管网改造工程、新建工程的试用，试点案例非常成功的，符合国家“十三五”规划“新材料、新能源”。现已广泛被推广，陆续发布了CJ/T480-2015《PERT-II预制直埋保温管》国家标准、T CDHA 501-2019《城镇供热直埋保温塑料管道技术标准》、GBT 38942-2020《压力管道规范》等一系列行标、国标还有地方标准。基本上在庭院埋地上已经形成了完备的产品及设计标准体系。

但因PE-RT II型管道的热膨胀系数较大，线性膨胀系数为1.2×10-4m/(m. K),约为钢管的10倍,此时，架空敷设产生的位移及管道热胀冷缩的热应力相对较大，现就以武汉地区某小区集中供暖架空敷设应用进行分析。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

为什么需求架空敷设，架空敷设的限制因素

供热管道敷设是指将供热管道及其附件,按设计条件组成整体并使之固定就位的工作。供热管道敷设方式可分为地上(架空)敷设和地下敷设。敷设的方式的选择应考虑当地气象、水文地质、地形、交通、施工技术、维修方便、投资等方面的因素。现在南方地区建筑一般设计有地下室，考虑节省投资、保证热网安全可靠地运行及施工维修方便等因素，一般采用更经济的地上（架空）敷设方式。

相同的应用条件下，PE-RT Ⅱ型塑料管材的膨胀力甚至不到钢管的1/100，膨胀力无风险。管道不会因热应力导致管道屈服，不影响各项力学性能，且粘弹性材料存在应力松弛。管道与土壤之间的摩擦力可克服管道热胀冷缩产生的热轴向力，形成管段固定。

武汉某小区小区供暖面积为35720㎡，层高6层，二次侧末端为散热器供暖及热水地面辐射供暖，散热器供暖供回水温度为70℃/50℃，通过混水系统混至地面辐射供暖供回水温度50℃/40℃，通过负荷计算软件模拟可知，小区集中供暖设计总热负荷为2320kW，拟采用市政热源作为供暖热源，且热力站位于地下二层，散热器供暖与热水地面辐射供暖经计算最大管径需De160,设计压力0.8MPa，符合PE-RT Ⅱ型热力管道的应用条件。

但塑料管道的线性膨胀系数相对钢管较大，架空敷设产生的位移及管道热胀冷缩的热应力相对较大，故支吊架间距、形式与管道位移补偿形式有着较大的不同。

PE-RT II型热力管支吊架间距及形式、管道补偿

根据《压力管道规范　公用管道》GB/T38942-2020规定计算不同公称管径测算在70℃与40℃条件下的强度与刚度的支吊架最大允许间距，如下表所示：

PE-RT II型热力管道70℃条件下的强度与刚度的支吊架最大允许间距

序号	名称	符号	数值	单位	数值	单位	数值	单位	数值	单位
一	按强度条件确定管道支架允许跨距		De160/De225		De110/De140		De75/De125		De50/De110	
1.1	管道外径	Dw	160	mm	110	mm	75	mm	50	mm
1.2	管道壁厚		14.6	mm	10	mm	6.8	mm	4.6	mm
1.3	管道内径	Di	130.8	mm	90	mm	61.4	mm	40.8	mm
1.4	管材密度		1010	kg/m³	1010	kg/m³	1010	kg/m³	1010	kg/m³
1.5	管材重量		6.74	kg/m	3.17	kg/m	1.47	kg/m	0.66	kg/m
1.6	保温厚度		30	mm	20	mm	17	mm	17	mm
1.7	保温材料密度		60	kg/m³	60	kg/m³	60	kg/m³	60	kg/m³
1.8	保温重量		1.05	kg/m	0.70	kg/m	0.62	kg/m	0.39	kg/m
1.9	介质密度		978	kg/m³	978	kg/m³	978	kg/m³	978	kg/m³
1.10	介质重量		13.14	kg/m	6.22	kg/m	2.90	kg/m	1.28	kg/m
1.11	保护层厚度		3.0	mm	3.0	mm	3.0	mm	3.0	mm
1.12	保护层密度		950	kg/m³	950	kg/m³	950	kg/m³	950	kg/m³
1.13	保护层重量		2.81	kg/m	1.50	kg/m	1.18	kg/m	0.95	kg/m
1.14	管道单位长度计算荷载	q	238	N/m	114	N/m	60	N/m	32	N/m
1.15	管道截面抗弯距	W	222.5	cm3	72.1	cm3	22.8	cm3	6.8	cm3
1.16	管材设计温度下作用应力	[σ]	4.02	Mpa	4.02	Mpa	4.02	Mpa	4.02	Mpa

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

1.19	管道支架最大允许跨距	L_{max}	5.71	m	2.99	m	1.40	m	1.12	m
二	**按刚度条件确定管道支架允许跨距**									
2.1	计算温度下钢材弹性模数	Et	206	MPa	206	MPa	206	MPa	206	MPa
2.2	管道放水坡度	i0	0.004							
2.3	管道截面惯性矩	I	1780	cm4	397	cm4	86	cm4	17	cm4
2.4	管道支架最大允许跨距	L_{max}	1.76	m	1.55	m	1.00	m	0.77	m

PE-RT II型热力管道40℃条件下的强度与刚度的支吊架最大允许间距

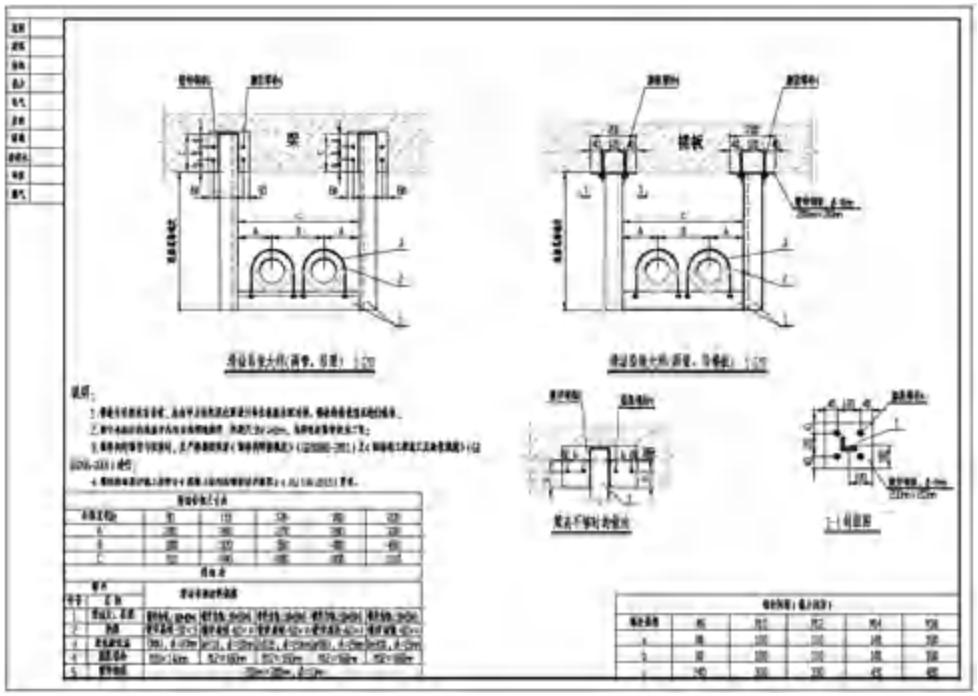
序号	名称	符号	数值	单位	数值	单位	数值	单位	数值	单位
一	**按强度条件确定管道支架允许跨距**		De160/De225		De110/De170		De75/De135		De50/De110	
1.1	管道外径	Dw	160	mm	110	mm	75	mm	50	mm
1.2	管道壁厚		14.6	mm	10	mm	6.8	mm	4.6	mm
1.3	管道内径	Dn	130.8	mm	90	mm	61.4	mm	40.8	mm
1.4	管材密度		1010	kg/m³	1010	kg/m³	1010	kg/m³	1010	kg/m³
1.5	管材重量		6.74	kg/m	3.17	kg/m	1.47	kg/m	0.65	kg/m
1.6	保温厚度		29	mm	27	mm	27	mm	27	mm
1.7	保温材料密度		60	kg/m³	60	kg/m³	60	kg/m³	60	kg/m³
1.8	保温重量		1.06	kg/m	0.70	kg/m	0.52	kg/m	0.38	kg/m
1.9	介质密度		992	kg/m³	992	kg/m³	992	kg/m³	992	kg/m³
1.10	介质重量		13.14	kg/m	6.31	kg/m	2.94	kg/m	1.30	kg/m
1.11	保护层厚度		3.50	mm	3.00	mm	3.00	mm	3.00	mm
1.12	保护层密度		950	kg/m³	950	kg/m³	950	kg/m³	950	kg/m³
1.13	保护层重量		2.31	kg/m	1.50	kg/m	1.16	kg/m	0.96	kg/m
1.14	管道单位长度计算荷载	q	226	N/m	115	N/m	60	N/m	32	N/m
1.15	管道截面抗弯距	W	222.5	cm3	72.1	cm3	22.9	cm3	6.9	cm3
1.16	管材设计温度下许用应力	$[\sigma]^t$	4.39	Mpa	4.39	Mpa	4.39	Mpa	4.39	Mpa
1.17	管道支架最大允许跨距	L_{max}	2.09	m	1.73	m	1.42	m	1.20	m
二	**按刚度条件确定管道支架允许跨距**									
2.1	计算温度下钢材弹性模数	Et	510	MPa	510	MPa	510	MPa	510	MPa
2.2	管道放水坡度	i0	0.004							
2.3	管道截面惯性矩	I	1790	cm4	397	cm4	96	cm4	17	cm4
2.4	管道支架最大允许跨距	L_{max}	2.33	m	1.69	m	1.26	m	0.90	m

根据上述计算，在强度条件下的最大允许间距是刚度条件下的2倍多，PE-RT II型塑料热力管道的支吊架间距受扰度影响较大；且随着管径的增大，支吊架间距相应增加；随着温度的降低，支吊架间距随之增大。

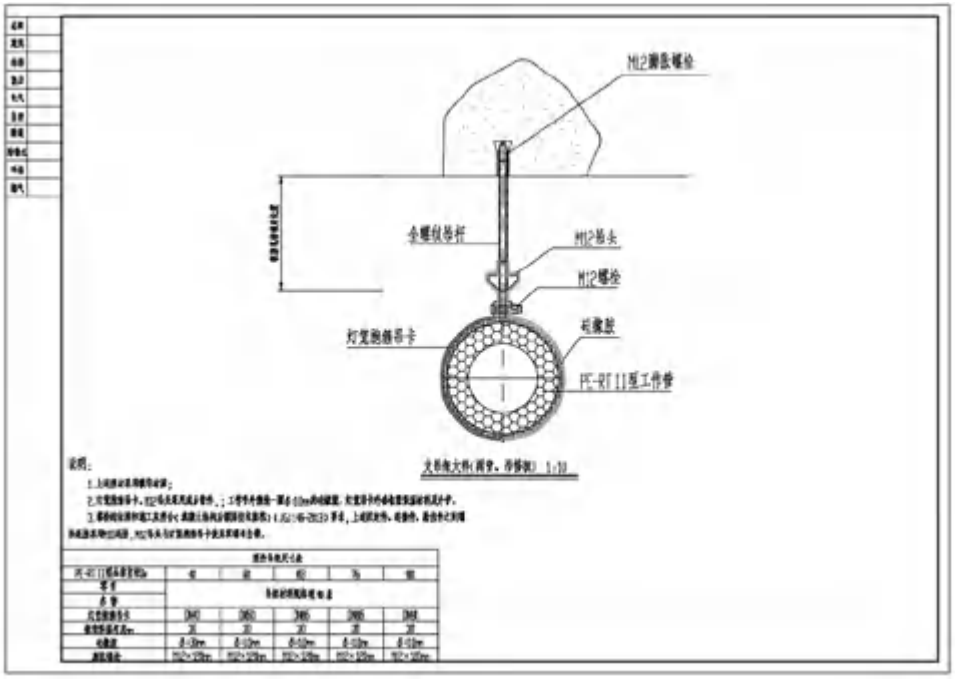
以上述计算管道单位长度计算荷载及材料重量、确定的管道支架允许的最大间距，支架

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

的轴向力与垂直承重相对较小，可以采用如下（参考05R417-1第107页与114页）的支吊架形式；



门型支架形式



吊架支架形式

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

当然，实际现场可以结合这两种或其它形式搭配进行PE-RT Ⅱ型热力管道的固定，本文主要对塑料热力管道提出一些建议，可为实际工程应用提供参考。

PE-RT II型热力管道庭院管道的补偿方法就是利用管道自身的折角变形来补偿温度变形，即较长的直线管段可环绕建筑的梁、柱布置，以自由臂补偿。其计算方式可参考CJJ/T98-2014 4.5.4规定。

结论

塑料管道自上世纪80年代进入我国以来发展迅速,现已广泛的应用于市政、建筑给排水、燃气输配等领域,“以塑代钢”逐渐成为行业的共识。耐热塑料材料的应用,使塑料管道应用由传统领域。水输送领域发展。目前在热水输送领域，虽然有着诸多限制，但耐热乙烯(PE-RT)等塑料热力管道及以这些材料的复合管道产品已成功并广泛应用。而目前PE-RT Ⅱ型热力管道是热力管道领域较为理想的一类材料。

在塑料热力管道地上（架空）敷设上，虽然塑料管道的线性膨胀系数相对较大，支吊架间距、形式及补偿相对复杂，但管道性能、使用寿命、相对的经济效益、还有施工及后期维修上，PE-RT Ⅱ型塑料热力管道逐渐越来越多，将会成为一种趋势。

作者简介

张云，1986年生，男，从事热能与动力工程专业设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。
单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26
邮编：430000
Email:547740539@qq.com
联系电话：13123825232

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

基于大温差吸收式供热技术长输供暖项目应用

程钊
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：针对城镇集中供热领域存在的热源供热管网扩容改造难的问题进行分析研究。认为大温差供热技术可以在不改造一级供热管网的条件下，通过大温差吸收式供热技术增大一级供热管网供回水温差，从热源管网中获取更多的热量输送给热用户，从而为社会增加经济效益。经分析提出了吸收式大温差换热技术，并在实际应用中得到推广。

关键词：集中供热　大温差换热　吸收式　热力站

1.引言

目前，城镇集中供热领域存在这样两个突出问题：一是集中供热项目供热管网既满足不了日益增加的用热负荷又难以扩容改造的问题；二是既有供热管网覆盖不到的区域需超远距离供热的问题。常规解决方案是对既有一级供热管网（以下简称一级网）进行改造，增加管网供热能力。虽然能够解决上述问题，但投资巨大且费时费力。本文针对上述问题进行分析研究。认为大温差供热技术可以在不改造一级网的条件下，通过探索技术路径增大一级网供回水温差，进而从一级网中获取更多的热量经由二级供热管网（以下简称二级网）输送至用户，降低管网投资成本提高经济效益的目的。有研究以溴化锂吸收式热泵为基础，提出了吸收式大温差换热技术，并在用户热力站中得到推广。

2.大温差吸收式供热技术特点

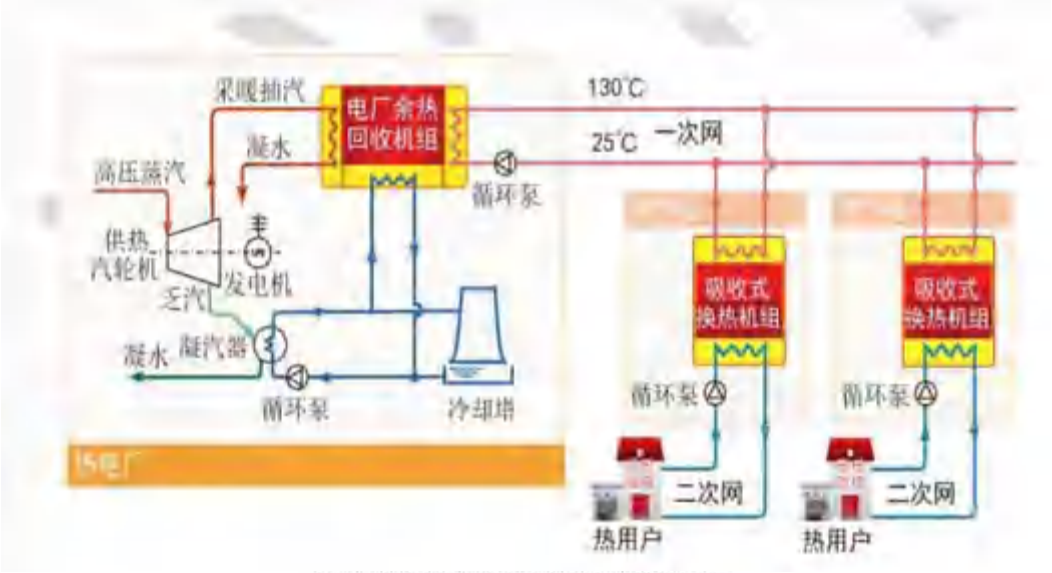
利用吸收式换热机组对集中供热系统一级网热量进行梯级利用，与常规换热装置相比可更大幅度地降低一级网的回水温度，从而增大一级网供回水温差，并在二级网产生更多的供热负荷，这种供热模式称为吸收式换热。

吸收式大温差换热系统，可在一级网供水温度为110℃、二级网回水温度为45℃的条件下，将一级网回水温度降低至35℃以下，将二级网供水温度提升至60℃。即在一级网水和二级网水之间存在温度交叉现象，这是常规换热设备与系统无法实现的热力过程，也是判定大温差换热过程是否实现的重要依据。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

基于吸收式大温差供热技术的热力站相比于常规换热器供热的热力站系统，经过相关案例测算分析，降低热源侧供热能耗40%，提高管网输配能力80%，增加管网供热能力30%以上，供热面积增加50%以上，可产生很好的经济效益。

3.大温差吸收式供热案例



基于吸收式换热的集中供热新技术

3.1.案例概况

以某长距离热水供暖输送项目（以下简称长输供暖）为例，热源为火力发电厂，热源距用户端约69km，现已投产2×300MW发电机组，进行抽汽改造后供热能力为92MW，理论最大供热能力为100MW。设计供热面积200万㎡，按照实际接入率55%计算，项目设计一级网供回水温度110/70℃（温差40℃），通过管网精细化调节，实际运行供回水温度在40℃左右，实际供热面积110万㎡，年供热量52万GJ。

对该项目进行大温差吸收式供暖项目改造后，项目设计一级网供回水温度110/25℃（温差85℃），采用吸收式大温差换热机组，实际运行供回水温差65℃左右，实际供热面积179万㎡，年供热量85万GJ。

本文以该项目为例，从工程经济角度对长输供暖项目的经济性进行分析和探讨。

3.2.大温差长输供暖项目的输热成本

(1)城市供热价格由供热成本（项目运行电费、水费、固定资产折旧费、修理费、工资以及其他应当计入供热成本的直接费用）、税金（增值税、城市维护建设税、教育费附加、企业所得税及地方性税费）和利润（企业的合理收益）构成。供热成本包括供热生产成本和间接费用（管理费用和财务费用）。

(2)以该项目为研究对象，从经济角度进行全寿命周期的价格测算和经济分析。以项目内部收益率为主要评判参数，参考供热行业基准收益率，确定以投资内部收益率为5.5%作为基准

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

值，项目投资折旧率5%，系统材料设备折旧年限30年。

(3)大温差长输供暖项目输热价格组成中的增值税（已做固定资产增值税抵扣处理）、税费和利润受财税政策与资本回报合规性的限制，基本没有调节优化空间。以本长输供暖项目为例，常规供暖系统和大温差供暖系统成本费用分析见下表：

表1 总成本费用明细

系统类别	常规	大温差
总成本费用（元/GJ）	26.14	10.07
1.生产成本（元/GJ）	21.74	7.87
1.1 能耗、材料（元/GJ）	6.41	1.55
1.1.1 电费（元/GJ）	6.34	1.51
1.1.2 水费（元/GJ）	0.04	0.02
1.1.3 运维材料费（元/GJ）	0.02	0.02
1.2 直接人工（元/GJ）	0.21	0.21
1.3 制造费用（元/GJ）	15.13	6.10
1.3.1 折旧费（元/GJ）	10.65	4.30
1.3.2 修理费用（元/GJ）	4.26	1.72
1.3.3 其它制造费用（元/GJ）	0.21	0.09
2.管理费用（元/GJ）	1.26	0.63
3.财务费用（元/GJ）	3.15	1.57

(4)输热价格分解为总成本费用、增值税（13%）、税费（地方税费及所得税6.8%）、利润（利润率按照17.5%）4个部分。计算参数中的耗电量与大温差长输供暖项目管网运行调节的原则和策略相关，依据安全节能的前提，选用以质调节为主、分阶段改变流量的调节策略，将输送单位热量的耗电量定为参数，再根据不同的年供热量，测算对应的输热价格（管网输送热量的价格，不包括电厂出厂热价及热损）。分析结果见下表：

表2 输热价格构成

系统类别	常规	大温差
总供热成本（元/GJ）	26.14	10.07
增值税（元/GJ）	3.27	1.26
税费（元/GJ）	1.78	0.68
利润（元/GJ）	4.58	1.76
输热价格（元/GJ）	35.76	13.77

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

该项目采用常规供暖系统对应的输热价格为35.76元/GJ，大温差供暖系统对应的输热价格为13.77元/GJ，相比节省61%。电厂热源出口热价为45元/GJ，再考虑1.2%的热损(按照每公里0.5℃自然温降)，得出常规供暖系统市区热网的接口价格为81.73元/GJ，大温差吸收式供暖系统接口价格为59.48元/GJ，相比节省27%，均低于采用区域天然气锅炉房供热的热价（90元/GJ）。项目实施后可以大幅降低供热企业的成本。

综上述分析发现，总成本费用在输热价格中所占比例约75%；其中电费、折旧费、修理费和财务费用4项之和在总成本费用中的占比达到90%以上，因此，可以确认电费、折旧费、修理费和财务费用是影响输热价格的核心要素。降低项目成本和提高赢利水平，需要对电费、折旧费、修理费和财务费用进行优化。

3.3.输热成本优化建议

(1)电费的优化首先注重安全节能的理念，优化工艺系统和运行参数，优化热水循环泵选型，选择节能设备。项目运行阶段要注重运行期间的精细化管理，从运行管理中挖潜增效，通过对历年运行数据的分析，总结经验，不断探索和挖掘更节能的运行策略和技术。

(2)折旧费是工程造价的财务分摊，应从源头对工程造价进行合理控制。首先，在工程设计阶段注重技术线路、工艺参数及设备材料的优选。其次，在工程建设阶段加强过程控制，防止随意变更，加强物资采购管理，降低资金占用，充分发挥财务的调控作用，降低资金使用成本。项目投产后，确定财务折旧年限时需注意初期项目财务利润的控制，建议尽量减少运营初期的账面利润，以降低初期所得税支出，利于项目初期留足还贷和运营所需的资金。

(3)修理费降费的关键在工程建设期间加强对工程和设备质量管理，在运行期间注重高质量的运行管理，减少供热设施的事故和磨损。

(4)财务费用涉及项目融资和运营期现金流分配的问题。建议优先匹配额度大、利率低、贷款期长的资金。

3.4.项目效益提升建议

热用户与热电厂的共同利益是高温热源的余热利用，余热利用为热用户提供了相对低成本的资源保障，而热电厂通过余热利用获得了增量收入、降低发电煤耗、增加发电量、提高系统运行效率和稳定性等利益，长输热网是二者的联系纽带，能较大程度发挥热电厂热电联产的社会经济效益。因此，共同利益的共识是理顺上下游关系的关键，是建立相互理解和相互妥协的合作基调的基础，更是推动形成多方利益均衡合作共赢机制的动力。

从财务角度，大温差长输供暖项目尽早达产有利于财务安全的保障和规模效益的发挥，热用户、长输热网和热电厂在此问题上利益高度一致。因此，建议大温差长输供暖项目热负荷应立足于既有负荷，合理确定发展负荷的规模和比例，开发推广应用大温差吸收式供暖方案优先接入替代燃煤和燃气锅炉房的现状热负荷。

大温差长输供暖上下游技术线路和参数的选择匹配问题，事关各方核心利益分配和成本分摊。从经济角度，建议以保证系统安全经济运行为原则，社会效益的最大化为目标，最大限度地发挥系统的整体效益，各方应合理分摊成本和分配利益。

结合当前供热企业增值税、房产税、城镇土地使用税优惠政策，长输供暖项目与现状供热企业为统一法人主体更有利于减少税费支出，有利于上下游资源统一协同的效率和效果最大

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

化，增强项目赢利能力和财务安全性。

4.结语

4.1.社会效益

大温差吸收式供热技术在长距离输送供暖项目建设实施中能更好发挥发挥热电协同效益，节约能源，提高效率，有效降低污染物排放总量。能有效缓解当前清洁供暖工作中天然气供应不足和加重财政负担的问题。

4.2.推广建议

大温差吸收式供热在供热能力、运营成本和节能减排方面都具有明显优势。但受制于融资难度，发展较为缓慢，融资难和融资贵同样困扰着财务效益低、但国民经济和外延效益很高的基础设施领域。为推进清洁供暖工作高质量可持续地发展，建议对清洁供暖补贴政策进行适当的调整和补充。建立清洁供暖基金为长输供暖项目提供资本金和债务资金支持，结合此类项目的财务特性提供额度大、利率低、贷款期长的资金支持，并借鉴国际金融机构的信贷管理机制，支持资金采取报账制方式，项目公司不直接接触到资金，由基金直接付款给招投标所确定的各供应商，达到资金有效使用和监管，促进长输供暖项目高效、有序健康发展。

参考文献

[1]李岩：基于吸收式换热的热电联产集中供热系统配置与运行研究[D]，清华大学;2012年；

[2]付林、江亿、张世刚：《基于Co-ah循环的热电联产集中供热方法》，载《清华大学学报》(自然科学版)2008年第48卷第9期；

[3]付国栋、谢争先、肖常磊、赵然：大温差吸收式换热技术换热站应用案例分析[J]，建筑热能通风空调;2019年02期；

[4]张世钢、付林、李永红、赖中练、肖常磊，吸收式换热过程及设备[J]，暖通空调;2015年09期；

[5]李宝聚、杨红：热泵机组大温差设计实例分析[A]，绿色设计创新实践——第5届全国建筑环境与设备技术交流大会文集[C]，2013年；

[6] 王晓军，王嘉，王源，崔凯，孙枫然：长距离热水供暖输送项目经济性分析,《煤气与热力》2019年4月刊

作者简介

程钊，1992年生，男，助理工程师，从事暖通、热力工程专业设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。

单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26

邮编：430000

Email: chengzhao@dewn.cn

联系电话：15039259515

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

基于小区集中供热采用相变材料蓄热装置的系统经济性分析

闫梓祥
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：社会发展带来的巨大变革让人们对舒适性生活的要求逐步提升。在南方集中供暖覆盖区域越来越大的今天，寻找一种清洁、节能、稳定且经济性合适的供暖方式显得尤为重要。作为集中供暖异军之一的电蓄热系统供暖模式，其应用一直因其经济性问题而备受争议，但其强大的电网调峰功能却不容置疑。为此本文着重以电锅炉设备为基础，采用相变材料作为系统蓄热装置，分析其应用于实际项目的经济性，为其他实际集中供暖工程提供参考。

关键词：相变材料　供暖　蓄热　经济分析

引言

南方供暖愈演愈烈的今天，针对南方地区供暖模式的探讨及发声也越来越多。归纳下来总是围绕着清洁供暖、因地制宜的方式展开。而以电能作为南方供暖基础能源，不需要建设天然气管道且不受气源短缺问题影响的优势，让“以电供暖”的呼声越来越高。

普遍认为以电为基础能源的供暖方式有空气源热泵供暖、电锅炉供暖、电热膜供暖及电蓄热供暖。我国大部分地区电力实行分段式收费方式，鼓励用户多用谷期电。为了缓解电网日益扩大的峰谷差值，电蓄热式供暖模式目前正逐渐成为集中供暖的一个重要发展方向。电蓄热供暖可将电网谷期价格相对低廉的电能转化成热能储存起来，在用电高峰时期提供给热用户，以此来降低供暖运营公司的能源成本并缓解国家电网峰谷差值。

本文着眼于南方地区供暖发展问题，以无机盐材料相变蓄热装置为依托，结合武汉地区某小区集中供暖，详细分析电蓄热供暖运用于实际项目的经济性。

工作原理

电蓄热供暖系统是指将建筑物白天（或尖峰负荷时段）所需的热量全部或者部分在夜间（或电力低谷时段）制备好，并以其他形式储存起来供白天（或尖峰负荷时段）使用。而本文所研究的电蓄热供暖就是在利用夜间谷期电力作为系统基础能源来加热相变蓄热模块，至蓄热模块均发生相变并储存热量，供白天使用。蓄热装置之所以选用相变材料，是因为相比较于

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

传统储热物质–水而言，相变材料的蓄热能力更加优秀，具有能量密度高且释热过程稳定等特点。

系统组成及介绍

电蓄热系统由电锅炉、高温蓄热装置及其他附件组成。

电锅炉以电作为基础能源，于夜间谷电期间运行生产高温热水，对高温蓄热装置进行循环加热，直至蓄热装置充满热量为止。

电锅炉在电力低谷期间满负荷运行，除保证供热主体的夜间负荷需求外，还要在电力低谷时段将蓄热装置热量充满。在其他时段，电锅炉不需要运行，系统供热主体的全部热负荷由相变蓄热装置提供。系统工作流程如图1所示。

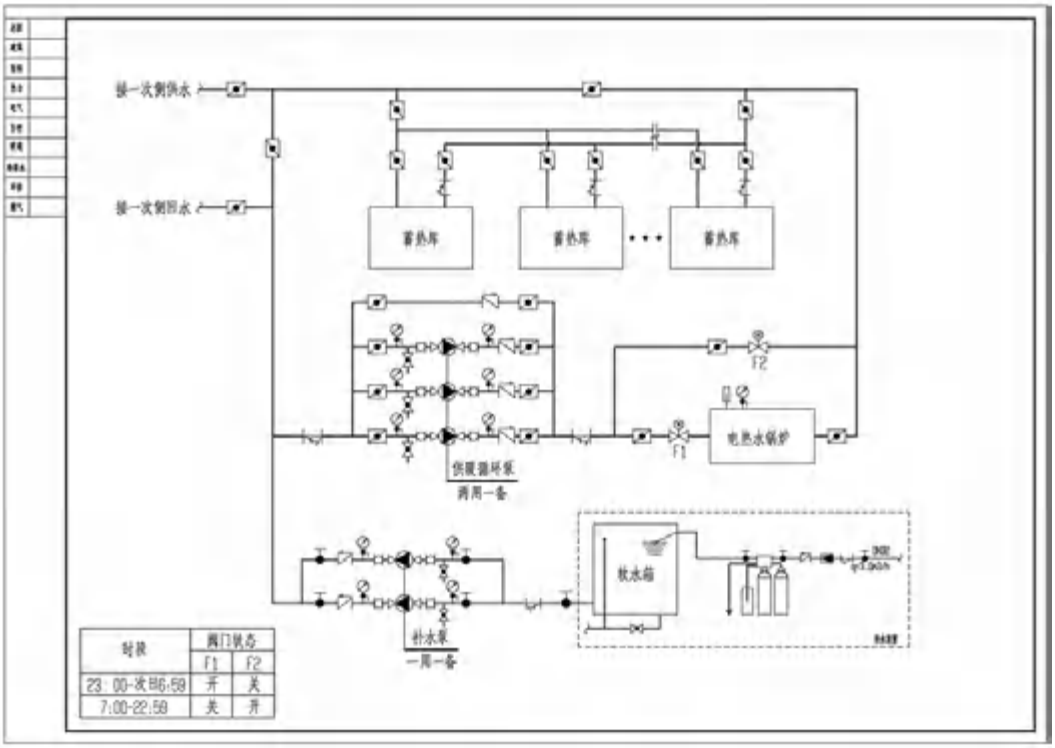


图1 电蓄热系统工作流程

相变蓄热材料的相变温度约75℃～78℃，蓄热装置24小时热损失率在5%以内；电热水锅炉出水温度为85℃，锅炉热效率98%，小区供暖管网热损控制在5%以内。供暖系统热源与二次管网采用板式换热器间接连接，二次侧末端可采用多种供暖形式，如风机盘管、组合式空气处理机组、散热片和地暖等。

设备选型分析

武汉地区现有某住宅小区集中供暖工程，小区供暖面积为36428㎡，末端用户供暖形式为散热片。通过负荷计算软件模拟可知，小区集中供暖设计总热负荷为1234kW。本项目采用全负荷蓄热模式，充分利用电网谷电，以降低整个供暖系统的运行费用。

项目典型日各时段供暖热负荷如表1所示。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表1 典型日各时段负荷统计表

时间	住宅逐时负荷系数	实时负荷（kw）	备注
0:00	0.645	796.49	低谷时段
1:00	0.419	517.41	低谷时段
2:00	0.29	358.11	低谷时段
3:00	0.29	358.11	低谷时段
4:00	0.29	358.11	低谷时段
5:00	0.371	458.14	低谷时段
6:00	0.5	617.44	低谷时段
7:00	0.903	1115.09	平　　段
8:00	0.71	876.76	平　　段
9:00	0.726	896.52	高峰时段
10:00	0.435	537.17	高峰时段
11:00	0.645	796.49	高峰时段
12:00	0.629	776.73	高峰时段
13:00	0.629	776.73	高峰时段
14:00	0.629	776.73	高峰时段
15:00	0.661	816.25	平　　段
16:00	0.661	816.25	平　　段
17:00	0.919	1134.85	平　　段
18:00	0.984	1215.11	平　　段
19:00	0.984	1215.11	平　　段
20:00	1	1234.87	尖峰时段
21:00	0.968	1195.35	尖峰时段
22:00	0.935	1154.60	平　　段
23:00	0.903	1115.09	低谷时段
典型日累计热负荷		19913.51	

晚间11点至第二天早上7点共计8个小时，均为电网电力低谷期。电力低谷期间小区集中供暖热需求约为4578.9kWh；非电力低谷时段供暖热源为相变蓄热装置，蓄热装置向外放热量需求为155334.62kWh。小区典型日供暖尖峰负荷出现在晚8点，此时供暖热负荷为1234.87kW。

根据以上数据计算可得，蓄热装置总蓄热量为：155334.62kWh÷95%÷95%=16991.26kWh；蓄热小时为8小时，平均每小时蓄热量为：16991.26kWh÷8=2123.9kW；电力低估期间，电锅炉除了需要向蓄热装置储存热量以外，还需向用户提供必要供暖热负荷，电锅炉设计热负荷为：（4578.9kWh÷8+2123.9kW）÷98%=2782kWh。故，选用蓄热装置容量约为61.2GJ，装置占地面积约120㎡；1.4MW电热水锅炉2台，占地面积约20㎡。

系统运行分析

相变蓄热系统运营维护费用比例为0.3%［1］，设备残值为初始投资的5%，设备报废期20年，热电转换效率98%，蓄热装置24小时热损失率为5%，小区供暖管网系统热损失5%。

相变蓄热系统初投资包含相变蓄热模块、电加热模块及其他辅助设施。现有研究在初投资方面只考虑主要设备费用，相变蓄热模块造价：8万元/GJ×61.2GJ=489.6万元，电锅炉投资：20万元/台×2台=40万元。

武汉地区供暖季按照120天计算，当系统全部投产运行后，热源系统年度运行能耗统计如

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

下表所示。

表2 热源系统年度用电量

循环泵电耗（kWh）	21289
电锅炉电耗（kWh）	2668800
总用电量（kWh）	2690089

主设备初投资汇总约529.6万元，按照相变蓄热系统运营维护费用比例为0.3%，设备残值为初始投资的5%，设备报废期20年计算，分摊到热源年度用电量的年固定成本约为0.0994元/kWh。

结论

按照武汉地区商用电谷电价格0.3219元/kWh计算，相变蓄热热源系统运用于该小区集中供暖系统收益为零的热价为0.4213元/kWh。武汉地区集中供暖入户热价约0.4元/kWh，远低于0.4213元/kWh；供热运营企业收益为零时小区集中供暖用电谷电电价为0.3元/kWh，若要盈利，则需要申请政府供暖补贴，降低居民供暖电价谷电使用成本至0.3元/kWh以下。

本文主要对电蓄热供暖系统运行经济性提出一些建议，可为实际工程应用提供参考。

参考文献

[1]：王琼.高新区电蓄热供暖系统分析.山西建筑.2017年6月。

[2]：《实用供热空调设计手册》（陆耀庆 主编）

作者简介

闫梓祥，1990年生，男，工程师，从事供热通风与空调行业，现就职于武汉德威工程技术有限公司。

单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26

邮编：430000

Email：coral287931126@163.com

联系电话：13127571926

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

空气源热泵技术应用及问题探讨

崔翔
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：空气源热泵技术的科学应用，对于我国能源节约型社会建设以及城市冷暖问题解决具有重要意义。本文对热泵技术的发展历程、特点及现阶段的研究方向及问题进行阐述，希望可以起到一定擦参考作用。

关键词：空气源　热泵　研究现状　应用分析

引言：

能源即使推动社会可持续发展的重要支撑，同时也是社会生产生活活动有序开展的基本保证。在长期粗放式经济发展模式下，我国能源依赖问题、能源匮乏问题逐渐凸显，这会对社会经济未来可持续发展产生极大的限制作用。利用空气源热泵技术可以有效控制建筑供能能耗，提升能源利用效率，降低化石燃料的消耗。

一、热泵技术介绍

热泵原理：

热泵的功能是把热从低位势（低温端）抽升到高位势（高温端）排放。空气源热泵就是利用室外空气的能量通过机械作功，使能量从低位热源向高位热源转移的制冷/热装置。它以冷凝器放出的热量来供热，以蒸发器吸收的热量来供冷。

一台压缩式热泵装置，主要有蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀四部分组成，通过让介质不断完成蒸发（吸取环境中的热量）→压缩→冷凝（放出热量）→节流→再蒸发的热力循环过程，从而将环境里的热量转移到水中或空气中。其工作原理与制冷机相同，都是按照逆卡诺循环工作的，所不同的只是工作温度范围不一样。

热泵制热系数 ε_h 值恒大于1。因此，采用热泵技术可以节约大量的电能。

热泵技术发展史：

19世纪初，英国物理学家J.P.Joule提出了“通过改变可压缩流体的压力就能够使其温度发生变化”的原理。1854年，W.Thomson教授（Lord Kelvin勋爵）发表论文，提出了热量倍增器（Heat Multiplier）的概念，首次描述了热泵的设想。

二战以后，工业经济的长足发展带来对供热的大量需求及相对能源短缺，促进了大型供热

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

及工业用热泵的发展。1973年的全球性能源危机，进一步促进了热泵在全世界范围内的发展。

二、空气源热泵的特点

1、空调系统冷热源合一，不需要设置专门的冷冻机房、锅炉房；

2、无冷却水系统，省去冷却塔、冷却水泵，节省冷却动力消耗及冷却水损耗；

3、无锅炉、无相应的燃料供应系统，无烟气，系统安全、卫生、简洁；

4、系统设备整体安装，操作、维护管理简单方便；

5、规格齐全，工程适应性强， 利于系统划分，可分层、分块、分用户单元独立设置系统；

6、夏季运行COP值较水冷机组低，耗电较多，冬季运行节省能源消耗。对于南京这样冬冷夏热城市的一般建筑而言，热泵系统的全年能耗低于水冷机组加锅炉的空调系统。

7、价格较水冷式机组高；

8、机组常年暴露在室外，运行环境较差，使用寿命比水冷机组短；

9、热泵机组的噪音较大，对环境及相邻房间有一定影响；

10、空气源热泵的性能随室外气候变化明显；

11、机组以室外空气作为冷却介质或热源，空气比热容小，室外侧换热器传热温差小，机组体积较大。

三、空气源热泵的研究现状

以环境空气作为低品位热源，可以取之不尽，用之不竭，无偿获取。空气源热泵安装灵活、使用方便、初投资相对较低,。

空气源热泵研究状况：

1、空气源热泵结霜、化霜问题的研究

空气源热泵冬季采用空气作为热源，随着室外温度的降低，蒸发器表面温度随之下降，甚至低于0℃。此时，当室外空气在流经蒸发器被冷却时，其所含的水分就会析出并依附于蒸发器表面形成霜层。结霜对热泵是极其不利的，随着霜层的形成，蒸发器传热热阻增加，蒸发温度下降，机组的性能下降，工况恶化，制热量也将下降，这将严重影响压缩机以及热泵整体的性能。同时，除霜带来的额外费用还将降低空气源热泵的经济性，这也是空气源热泵在寒冷、潮湿地区的应用受到限制的原因。故结霜机理、化霜方法一直是空气源热泵研究与应用中要解决的重点与难点。

为了对空气源热泵结霜除霜所带来的损失进行量化的分析，有研究提出了不同地区、不同使用情况下的平均结霜除霜损失系数的概念，平均结霜除霜损失系数越大的地区应用空气源热泵越不经济。据此，将我国空气源热泵使用地区根据平均结霜损失系数分成4类：

低温结霜区：如济南、北京、郑州、西安、兰州等；

轻霜区：如成都、桂林、重庆等；

重霜区：如长沙：

一般结霜区：如杭州、武汉、上海、南京、南昌、宜昌等。

这些都可以作为热泵设计选用中重要的参考依据。`

2、计算机模拟在空气源热泵系统中的应用

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

随着计算机技术的不断普及，计算机在暖通空调中的应用也日益广泛。关于计算机模拟在暖通空调中具有代表性的应用主要有以下几个方面：

①对压缩机的计算模拟

②对蒸发器的计算模拟

③系统仿真研究

④系统能耗分析软件

空气源热泵有待解决的问题及改进方向:

对于空气源热泵而言，除了具有种种优点之外，仍存在很多不足及有待解决的问题。空气源热泵的性能受室外气候条件变化影响较大，随着室外环境的恶化热泵的工作性能急剧下降，进而严重影响室内环境。进一步研究应考虑采取相应措施来合理改善机组的性能。

空气源热泵另一个突出的问题就是蒸发器冬季结霜问题。这不但导致系统供热性能的急剧下降，还将对压缩机等重要部件产生不良影响(如冰堵)，严重时将损坏压缩机，使系统不能正常运转；同时，结霜还将使机组运行费用增加。

由于室外空气一年四季甚至一天当中的温度波动较大，这就对实现整个空气源热泵系统的自动控制提出了很大的挑战，还有待于逐渐探索和完善。

四、空气源热泵的应用:

南京是个夏季热、冬季冷，湿度又高的城市。二十世纪九十年代初南京就有工程开始采用空气源热泵冷热水机组。 近几年空气源热泵在南京发展很快，下面就几个典型工程的情况作如下介绍：

长江贸易大楼项目：

长江贸易大楼1991年设计，1994年建成并投入使用的现代化写字楼，大楼建筑面积约3.5万㎡，建筑总高度95米，其中地下一层，地上23层，外围护结构为全玻璃幕墙。

大楼选用6台美国约克公司AWHC-200热泵机组6台，装机额定制冷量为3672KW（1044RT），面积冷指标为105W/㎡，热泵额定制热量为107W/㎡。热泵机组置于主楼顶层屋面，系统配置8台水泵，每台泵的循环水量为200m³/h，扬程为32mH2O。热泵与水泵分别并联再串联，各热泵进出水管直接与分集水器连接，水泵置于室内。热泵机组采用弹簧减振器减振，水泵也采用弹簧减振台座减振。空调系统末端设计为变水量，主机为定水量台数控制。

据现场调查和测量，大楼工作人员对空调满意度较高，夏季某天在吸气温度40℃情况下（局部排除有短路吸入现象），系统出水7.58℃，回水12℃，水温差为4.42℃（热泵运行5台，水泵运行3台，尚有少数楼层未投入使用），室内基本满足26℃的设计要求。约克公司标准型热泵机组（200RT）的噪音在82dB(A)左右，但由于热泵位置较为合适，土建处理、减振措施都较为妥当（女儿墙较高，热泵与疏散楼梯为水泵房所隔，与疏散楼梯口有一定的水平距离），这些综合措施使热泵机组较大的噪音并未对大楼产生明显影响，在热泵所在楼层的电梯厅测得的噪音在45dB（A）左右，在紧贴热泵下部的办公室，噪音也在45dB(A)左右，吊顶内噪音约为50dB(A)左右。可见该工程减振隔音的综合措施收到明显效果。

明日大酒店项目：

明日大酒店，建筑面积约7800㎡，其中20%左右为酒店公共用房80%左右为客房。酒店共

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

选用3台110RT热泵，实际只用2台。

冬季使用效果良好，某晚，室外温度0-2℃，天气多云，热泵出水温度维持在39-41℃，客房内温度可达25℃。下雪天气，热泵仍能正常运行。使用至今曾有过一、二次结霜比较严重，自动除霜困难，管理人员用顶层生活用锅炉热水冲淋后，一切正常。热泵置于酒店顶层屋顶，三台水泵置于热泵旁的室外平台，与热泵一一对应，即每台泵与热泵串联后再并联。与热泵相邻的楼层为酒店内部办公用房，其室内噪单约为45-50dB(A)，冬天个别雨雾寒冷天，由于橡胶隔振垫被冻，隔振效果减弱，其紧贴楼层噪音有所增加。但由于热泵未紧贴客房布置，客房未受明显影响。实际运行表明，系统开2台热泵已足以满足空调要求，冬天极个别的恶劣天气才需开3台热泵。

五、结束语:

目前空气源热泵技术已经在国内进行了广泛推广，运行质量良好，供能效果得到了业主单位的普遍认可；但在实际应用和运行过程中也存在一定的共性问题（结霜化霜，噪音，随气候变化波动衰减）。因此，业内人士有必要加大对该项技术研究与推广的力度，确保该项技术具有的优势能够得到有效利用，不足的地方能够得到补充完善，进而实现理想化、绿色化供能新模式。

参考文献

[1] 实用供热空调设计手册（第二版） 陆耀庆

[2] 空气源热泵供暖技术及具体应用分析 科学与财富2018年1期

作者简介

崔翔，1988年生，男，中级工程师，从事供热通风与空调工程专业设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。

单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26

邮编：430000

Email:cuixiang@dewn.cn

联系电话：13797054452

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

吸收式热泵技术在冷凝水余热回收中的应用

罗龙
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：供暖用蒸汽管网经一次表面换热后，排放的冷凝水仍存在一部分的显热。为充分利用这部分的冷凝水余热，经研究采用吸收式热泵技术对冷凝水的余热进行深度回收，用于二次侧采暖，提高蒸汽管网的供热效率。

关键词：供暖　蒸汽管网　冷凝水　吸收式热泵　余热利用

一、前言

节能减排是当前社会发展亟待解决的问题，蒸汽冷凝水余热利用的目的是让蒸汽有限的能量发挥最大的价值，发展循环经济，提高能源利用效率，降低能源消耗，减少热源加热污染物的排放，有效的保护环境。

在民用采暖换热过程中产生了大量的冷凝水，这部分冷凝水由于出水温度的不稳定，目前只有很少一部分进行了再次利用，其余部分被直接排入市政污水管网，浪费极大。冬季在小区换热站附近经常可以看到，蒸汽冷凝水排放的部位出现冒“白烟”问题，一方面造成无为能耗，另一方面也造成了环境污染。

二、现有冷凝水余热利用技术

由于冷凝水的量有限，出水温度也存在差异，冷凝水的余热利用较困难。现有冷凝水余热利用方式为：蒸汽通过汽水换热器后产生高温冷凝水，冷凝水经过板式换热器换热后对二次网进行加热。

2.1 现有余热利用原理与系统构成

系统原理：热网蒸汽进入汽–水换热器，换热后生成约70℃左右的冷凝水，冷凝水箱收集冷凝水后，通过冷凝水泵打入板式换热器。二次网回水通过采暖主循环泵首先打入板式换热器进行初段升温，对二次网采暖循环水进行预加热，然后进入汽–水换热器进行再加热，达到热网供水温度。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

现有余热系统主要由表面式换热器进行余热回收，系统主要由三大部分组成：换热部分、冷凝水回收部分及补水部分组成；换热部分由汽-水换热器、循环水泵和管道阀门等组成；冷凝水回收部分由板式换热器、冷凝水箱、冷凝水泵和管道阀门组成；补水部分由水处理装置、补水箱、补水泵和补水管道及阀门等组成；

2.2 现有冷凝水余热回收系统不足

冷凝水余热回收系统不足：汽水换热器出来的冷凝水温度较高的情况下（ >60℃ ）通过板式换热器换热可利用一部分余热（小于60℃以下的余热无法再利用），在冷凝水温度较低的情况下，冷凝水没有利用价值，也只有排放掉。

冷凝水回收部分采用板式换热器的形式，在冷凝水的温度高于二次网的回水温度时，冷凝水的余热才能被回收利用。当冷凝水的温度接近或是低于二次网的回水温度时，板式换热器就无法利用冷凝水的余热了。

三、采用蒸汽型吸收式热泵的冷凝水余热利用技术

随着民用采暖汽水换热器新技术的引进和发展，螺旋缠绕管换热器以其相同换热量下体积小、效率高、不易腐蚀结构及冷凝水温度低等特点，逐步替换列管换热器。新型换热器的冷凝水出水温度在50℃左右，与二次网回水温度几乎没有温差，常规板换无法实现余热的利用。

本项目的余热回收供热系统采用蒸汽驱动吸收式溴化锂热泵机组作为余热资源的提取设备。吸收式热泵无大功率电耗，它能够利用市政管网的蒸汽驱动，回收低品位的热能转化为高品质的热能。

3.1 吸收式热泵的工作原理

吸收式热泵采用水为制冷剂，溴化锂为吸收剂。吸收式热泵驱动部分采用高温热源，仅有溶液泵少量耗电，不同于普通热泵采用电驱动，耗电量比较大。吸收式热泵机组系统分为冷剂循环和溶液循环：

冷剂循环：驱动热源加热发生器，发生器中产生的制冷剂蒸汽在冷凝器中冷凝成冷剂水，经U型管进入蒸发器，在低压下蒸发，产生制冷效应。

溶液循环：发生器中流出的浓溶液降压后进入吸收器，吸收由蒸发器产生的冷剂蒸汽，形成稀溶液，用泵将稀溶液输送至发生器重新加热形成浓溶液。

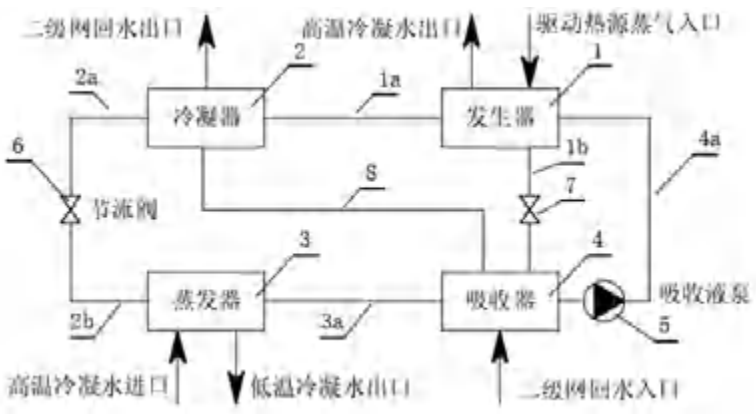


图3.1-1 吸收式热泵的系统原理

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.2 吸收式热泵回收余热的优势

吸收式热泵的制热功率可以在1～10MW之间选择，其特点主要有：

1) 回收蒸汽凝结水余热，减少蒸汽耗量；

2) 增大蒸汽热网供热能力；

3) 有效减小一次网管径，节约投资；

4) 以蒸汽热网热量来驱动设备运行，减少电力消耗；

5) 可对低品位冷凝水回收利用，减少二次网水耗量；

6) 机组型式多样，可满足热用户不同的温度、压力需求；

因此，采用吸收式热泵进行冷凝水余热回收，节约能源、降低成本、提高经济效益。

四、基于吸收式热泵的新型余热供暖系统设计

蒸汽换热原理：以蒸汽为热源的民用小区集中供暖热力站或工业用换热站，汽–水换热器、汽水分离器及吸收式热泵出来的约80～50℃冷凝水，在冷凝水箱内汇集，再进入吸收式热泵机组内将热量提取。冷凝水的温度降至30℃以下，排至系统补水箱，为庭院二次管网进行补水。

二次网换热原理：蒸汽热力站的二次侧管网50℃的采暖回水，首先进入吸收式热泵机组加热至54℃，然后进入螺旋缠绕管换热器再加热至75℃。

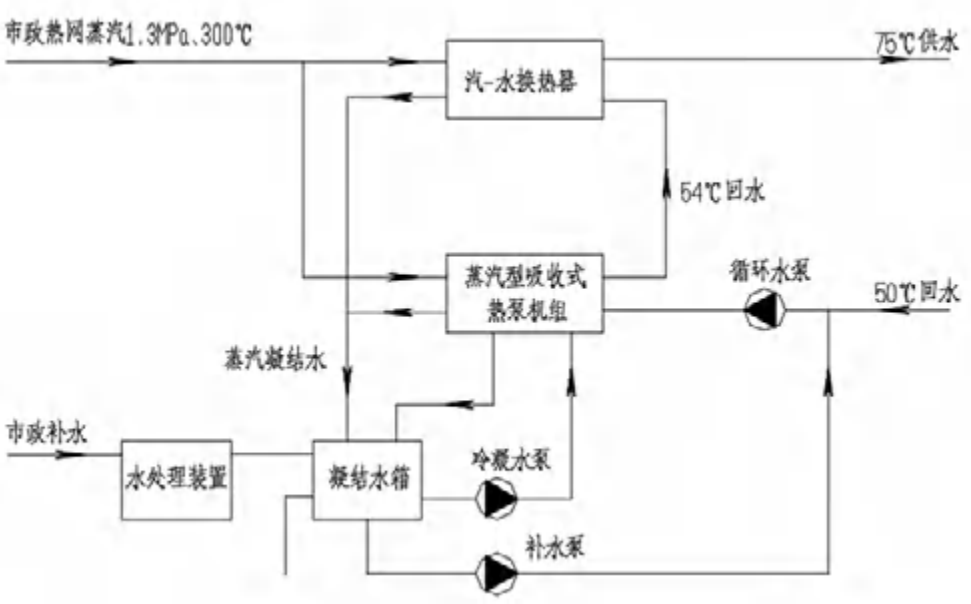


图4.1–1 吸收式机组冷凝水余热利用原理图

基于吸收式热泵的新型余热供暖系统主要由换热部分、冷凝水回收部分及补水部分组成；换热部分由汽–水换热器、循环水泵和管道阀门等组成；冷凝水回收部分由吸收式热泵机组、冷凝水箱、冷凝水泵和管道阀门组成；补水部分由水处理装置、补水泵和补水管道及阀门等组成；

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

五、系统应用案例

某集团公司工业家属区供热改造项目，供热面积约122474m2,共39栋住宅，1598户。原有小区供热系统冷凝水直接排放，现增加吸收式热泵对蒸汽冷凝水余热进行回收，用于小区供热，减小采暖系统的蒸汽耗量。

5.1 系统方案

5.1.1系统参数

1、一级蒸汽网设计参数1.3MPa（g）、300℃，运行参数为：0.6Mpa，180℃；

2、二级网供暖热媒供回水设计温度为75℃/50℃，设计压力为0.9 MPa；

3、住宅供热面积约122474m2，总热负荷约7348kW。

5.1.2 技术方案

现增加一台余热吸收式热泵，系统主换热器采用螺旋缠绕管换热器，依据设计工况，凝结水出水设计温度在55℃，将系统换热器冷凝水、气液分离器冷凝水、及吸收式热泵驱动后的冷凝水汇集到冷凝水箱（系统补水可利用此水箱）。再将55℃的冷凝水进入热泵机组进行余热回收，冷凝水温度降至25℃，部分用作二次网补水，多出的低温冷凝水从水箱低温侧溢流排出。

该采暖系统的蒸汽耗量约为11T/h，余热回收系统配置一台1MW蒸汽驱动吸收式热泵机组，吸收式热泵采用小型模块化机组，负荷可在0～120%之间进行无极调节，吸收式热泵为常开，热泵的蒸汽侧电磁阀依据冷凝水出口温度进行调节。系统的冷凝水箱与补水箱共用。冷凝水箱容积选用6 m3，冷凝水箱设置液位报警。冷凝水循环的采用单级立式循环泵，循环泵流量11m3/h,扬程10mH2O。水泵常开，与冷凝水箱最低液位和吸收式机组冷凝水出口最低温度连锁控制。

5.2 不同冷凝水温度下余热回收对比

冷凝水余热回收吸收式热泵机组在不同的冷凝水进水温度下的效率也是不同的，现对系统冷凝水温度为75℃、65℃、55℃及45℃情况下进行对比分析：

表5.2-1 不同冷凝水出水温度下冷凝水的热回收对比

冷凝水温度（℃）	75	65	55	45
冷凝水热量（kW）	640	512	384	256
机组供热量（kW）	1555	1244	933	622
采暖季天数（天）	90			
年节省供热量（kWh）	2351160	1880928	1410696	940464
节省蒸汽量（T/采暖季）	3526.74	2821.39	2116.04	1410.70

注：以上设计参数考虑负荷率70%情况下计算得出。住宅采暖按照一个采暖季90天，每天24小时考虑。

5.3经济效益

依据5.2节四种工况下冷凝水出水温度，对该系统产生的经济效益进行对比分析，如下

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表：

表5.3-1 不同冷凝水出水温度下余热利用经济效益分析

冷凝水温度（℃）	75	65	55	45
采暖季天数（天）	90			
设备功率（kW）	4+0.75			
年耗电量（kwh）	7182			
用电单价（元/kwh）	0.6907			
热泵系统耗电（元/年）	1960.61			
年节省供热量（kWh）	2351160	1850928	1410696	940464
节省蒸汽量（T/采暖季）	3526.74	2821.39	2116.04	1410.70
蒸汽单价（元/T）	185			
年节省费用（万元/年）	65.24	52.20	39.15	26.10

注：以上设计参数考虑负荷率70%情况下计算得出。住宅采暖按照一个采暖季90天，每天24小时考虑。

六、结论

1) 采用吸收式热泵进行冷凝水余热回收，冷凝水的温度可降至25℃，突破常规换热只能换热至接近二网50℃的温度，最大限度的利用冷凝水的余热资源；

2) 吸收式热泵的电耗小，主要电耗仅溶液泵，1MW额定供热量的机组泵的电功率仅4kW；

3) 采用吸收式热泵回收冷凝水余热，普通壳管式汽水换热器的凝结水出水温度在75℃，冷凝水余热的能源节约占比8.71%。螺旋缠绕管换热器的凝结水出水温度较低，一般在55℃左右，能源节约占比5.23%；

4) 案例中12万方采暖面积，螺旋缠绕管换热器出水温度55℃，选用的吸收式热泵机组额定供热负荷1MW，机组的造价约30万，加上6m3冷凝水箱、2台0.75kW的冷凝水循环泵的工程节能改造总投资约45万元。按照70%的负荷率计算，年节省蒸汽费用在39.15万元，热泵系统耗电4.96万元，整个系统的投资回收期在1.3年。同时，采用吸收式热泵的新型余热回收系统，仅需要初次对系统进行补水，后期运行采用30℃以下的低温冷凝水补水，无需软化后的自来水补水，节省系统补水费用。

5) 蒸汽供热在南方应用较普遍，武汉、合肥、南京、上海和贵阳等省会城市已逐步开展热电联产集中供热，但供热企业的用能成本普遍偏高，利用蒸汽冷凝水的余热进行集中供暖可以极大的减少污染物的排放及供热企业的用能成本，具有较高的环境效益和经济效益。

参考文献

[1] 马最良，热泵技术应用理论基础与实践，中国建筑工业出版社，2010

[2] 穆金亮，蒸汽凝结水余热利用，节能，1996

[3] 田爱兵、冯爱华，300MW机组循环水余热利用吸收式热泵技术，2016

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

作者简介

罗龙，1984年生，男，高级工程师，从事热能与动力工程专业设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。

单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26

邮编：430000

Email:luolong027@126.com

联系电话：15002733784

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

浅谈PE-RT Ⅱ管道在集中供热系统中的应用

余志雄
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：我国自20世纪50年代起，在前苏联的援助下安装集中供热系统，随着我国经济社会的发展和人们的生活水平不断的提高，以及科学技术的不断进步，集中供热已成为城镇公共事业的重要组成部分，是现代化城镇的重要基础设施。由始至今，在供热工程中包括小区二级网材质选择中基本使用的是钢制管，虽然钢制管道具有耐压耐高温等特点，但同时耐腐蚀性差，在输送热水的过程中，易收到热水介质及其中的离子（包括金属离子及氧）腐蚀，以及地下水浸泡过程中也容易导致管道的腐蚀，使用寿命相对较短，已严重影响供热效果及质量，国家每年都需要投入很多的人力、物力去改造翻新老旧管网。随着“以塑代钢”理论的普及、耐热塑料材料在供热系统中的应用推广及国家有关塑料管道标准体系的不断完善，相应国际标准和国家标准陆续出台，这些标准体系的制订和不断完善为耐热塑料管道在供热系统中的应用，提供了生产、设计及使用依据。

关键词：高密度耐热聚乙烯　PE-RTⅡ管　集中供暖系统　二级管网

我国城市集中供热系统现状

我国自20世纪50年代起，在前苏联的援助下安装集中供热系统，随着我国经济社会的发展和人们的生活水平不断的提高，以及科学技术的不断进步，建筑集中供热已成为城镇公共事业的重要组成部分，是现代化城镇的重要基础设施。作为一项基本民生工程，特别是在寒冷的北方地区，越来越多的受到人们的重视。集中供暖由于能源利用率效率较高，是目前北方区域较为普通的供热方式。在节约能源、保护环境的大形势下，城市集中供热一直是各界关注的能源工程和环保工程。因此，安全、绿色、环保是城市供热管网不容忽视的三个重要指标。

集中供暖系统主要由热源、热网、换热站、热用户四部分组成。热源分为热电厂与集中锅炉房等，热网分为一级管网和二级管网。热源产生蒸汽或热水，通过一级管网输送至换热站，经过换热站的换热器把一级管网中的蒸汽或热水的热量传递个二级管网中的介质，最后由二级管网把 热量送至热用户，热用户最后通过室内散热设备（散热器或地暖等）把热量散发到室

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

内，以满足人们的生活需求和生产需要。

城镇集中热的介质以热水为主。2012年，热水供热能力和供热总量均超过80%；热水供热管道长度占总长度的92%，其中二级管网长度占总长度约70%[1]。可以看出，城镇供热中二级管网占整个集中供热工程中很大份额。

在供热工程中，绝大多数集中供热二级管网的管道和一级管网一样，以钢管为工作管，外加保温层。钢管具有耐压耐高温等特点，但致命的弱点就是腐蚀问题，腐蚀导致管道锈穿漏水，锈蚀的残渣堵塞管道，导致阀门堵塞无法正常开闭，管道上的仪表无法正常运作；即便是质量合格的钢管，腐蚀也会导致管道使用寿命缩减，频繁出现供热故障；其次，由于接头采用焊接方式连接，焊缝质量受工人技术水平影响较大，同时，焊缝也是最容易发生腐蚀泄漏的部分。因此，管道在一定年限（10~15a）后需要相关单位加强维修或者更换，否则将严重影响供热效果及质量，为此，每年都需投入很多的人力、物力去改造翻新老旧管网。

集中供热系统二级管网发展趋势

为推进供热系统节能，近年来，我国在大力推行供热体制改革，通过安装热量表等计量装置和热分摊方法实行供热分户计量，为防止仪表堵塞，一般对供热水质要求较高，目前供热管网普遍采用传统的钢管，热媒介质中游离的氯离子以及其他盐类的存在会引起金属管道的电化学腐蚀，这种电化学反应随着热媒的温度升高而加剧，以钢管作为工作管的管道，投入使用一段时间后就发生管内锈蚀，在运行的初期会导致管道堵塞，导致输送能耗增加、采暖效果降低；随着锈蚀的发展，管道泄漏成为常态，导致热媒损失；同时锈蚀也影响仪表和计量装置的计量精度。

在欧洲，为解决以上问题，早在上世纪80年代，耐热材料的塑料管道被引入，替代钢管，作为工作管，用于集中供暖的二次管网，在近30年的应用中，取得了预期的设计效果并得到了各方的认可，相关技术规范等也逐步的完善。

在我国，随着“以塑代钢”理论的普及、耐热塑料材料的应用，高密度耐热聚乙烯（PE-RT II型）以下简称PE-RT II管，因其使用寿命长、保温效果好、耐腐蚀性好、接头连接可靠，可使系统失水率降低到0~1%；以及具有施工方便、综合成本低等特点，有效解决目前集中供热管网存在的易腐蚀、使用寿命短、“跑、冒、滴、漏”严重、热损失大、水质差、小区路面反复开挖现象严重等问题，因此，在我国多个城市小区供热二级管网新建、改造工程中进行了试用，试点案例非常成功，取得了良好的供热效果与节能体验。

高密度耐热聚乙烯（PE-RT II型）管道材料

高密度耐热聚乙烯（PE-RT II）管道材料是一种高分子粘弹性材料，通过乙烯与己烯共聚获得的，具有优异的长期耐热稳定性及优良的静液压强度，同时保留了传统高密度聚乙烯优异的焊接性能、低温抗冲击性能、耐开裂性能以及缺口敏感性等诸多优点[2]。并且，因其管材的工艺可以生产出管径较大的管道，从而PE-RT II管道已在国外的供热二级管网工程得到了广泛的应用。近两年，我国北方近十几个管网改造试点工程以及新建管网工程已尝试采用了PE-RT II管作为工作管的预制直埋保温管，取得了良好效果。

PE-RT II管道在二级管网的应用

对于集中供热管网而言，安全性是第一位，这是一项基本的民生工程，一旦冬天不能正常

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

运行，带来的问题尤为严重。因此应该从管道的原材料开始进行严格的要求和规范，才能确保用于集中供热管网的管道长期稳定性和可靠性。首先，选用的PE-RT II管道原材料应能够符合国家标准GB/T28799.1《冷热水用耐热聚乙烯（PE-RT）管道系统-第1部分：总则》中PE-RT II型原材料性能要求[3]，在此基础上，考虑到集中供热二级网的重要性，还应符合焊接性能（对接焊接性和电容连接）、静液压状态下长期的热稳定性、耐热氧老化性能的要求。

PE-RT II管材强度验算

任何管道（无论是金属管材还是塑料类管材）在内压（正压或负压）作用下，管壁任意一点会产生三个方向的应力，即:轴向（沿长度方向正压时拉伸或负压时压缩）、径向（负压时收缩）和环向（正压时扩大），在三个方向的应力中，以环向应力为最大。根据工程计算方法中，依据最不利条件的原则，应按照环向应力进行耐压强度分析。环向应力的计算式如式（1）。

$$\sigma = \frac{P \bullet d_j}{2 e_{min}} \qquad (1)$$

式中：σ——管道环向应力，MPa；

P——管道系统设计压力，MPa；

d_j——管道计算内径，mm；

e_{min}——管道最小壁厚，mm；

显然，管材的许用设计应力σ_D应该不小于管道所承受的环向应力，即：

$$\sigma_D \geq \sigma$$

将式（1）变换为可以用以确定管壁厚度的形式，可得式（2）。

$$e_{min} \geq \frac{P \bullet d_j}{2 \sigma_D} \qquad (2)$$

从式（2）可知：管壁厚度与管材的许用设计应力的一次方成反比，与管材的工作压力和管道内径的一次方成正比。

塑料类管材同钢管等金属管道力学特性的主要区别，是使用温度对许用设计应力的影响极大，冷态下的承压能力不能用以判断在长期使用条件下的耐久性。其使用寿命主要取决于不同使用温度对管材的累积破坏作用。

参照国际标准 ISO 13760的相关规定，根据Miner’s规则（累计损伤原则），如果材料在供热温度T作用下，经n年后破坏，则每一年耗用的寿命是1/n，此分数称为“每年破坏量”。

按照国际标准ISO/10508:1995推荐的方法,对总设计使用周期为50年,根据奥、德、法地区典型使用条件,统一划分的使用条件分级，如表1[4]。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表1 欧洲对热塑性塑料管的使用条件分级

使用条件等级	设计温度		最高设计温度		故障温度		典型应用范围（举例）
	℃	时间 (Y)	℃	时间 (Y)	℃	时间 (h)	
应力安全系数	1.5		1.3		1.0		
1	60	49	80	1	95	100	供60℃热水
2	70	49	80	1	95	100	供70℃热水
4	40 60 20	20 25 2.5	70	2.5	100	100	地面辐射供暖
5	60 80 20	25 10 14	90	1	100	100	85/60℃散热器供暖

使用条件分级体现了“综合热作用”（即“设计温度”和“最高设计温度”作用周期的总和）的概念。表1的数值可以看出，欧洲这些地区典型使用条件的特点是采暖期很长、热媒温度较低。例如4级，总设计使用周期的50年中，只有2.5年（即5%、平均每年不到1个月）是非采暖期。使用条件分级并不是硬性规定,是按特定地区气候和典型使用条件计算所得的推荐性标准，应该合理地加以引用。当然，最好能够根据当地的采暖周期特点、使用寿命年限内不同温度的作用频率，逐步编制出各地区自己的使用条件分级标准。

PE-RT Ⅱ管系列（S）的选择

PE-RT Ⅱ工作管及管件的管系列（S）应根据管道在相应应用条件下的设计应力和管道系统设计压力来计算。S值可由式（2）变通形式的式（3）计算，并按一定规则向下圆整：

$$\frac{\sigma_D}{P} \leq \frac{d_j}{2e_{min}} = S \qquad (3)$$

S是塑料类管材的尺寸系列（S系列），一个与管径和壁厚有关的无量纲数值。可以在许用设计应力和系统工作压力既定的条件下,便捷地直接计算和确定应该选用的S系列,并得知不同管道外径所需要的对应壁厚。

综合以上PE-RT II管材的设计选用程序，以及集中供热中常用到工况，下表2中列举一些RER-RT II型供热管道在不同温度下的设计应力[5]，与不同设计压力下的管系列的选择。

表2 RER-RT II型供热管道在不同温度下的设计应力

60℃生活热水/温泉水	70℃生活热水/温泉水	60℃供暖	75℃供暖	80℃供暖
4.02MPa	3.72MPa	4.39MPa	4.02MPa	3.50MPa

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表3 RE-RT II型供热管道管系列（S）的选择

使用条件	设计压力（MPa）				
	S3.2/SDR7.4	S4/SDR9	S5/SDR11	S6.3/SDR13.6	S8/SDR17
≤60℃生活热水	1.25	1.00	0.80	0.64	0.50
≤70℃生活热水	1.16	0.93	0.74	0.59	0.46
≤60℃供暖	1.51	1.21	0.97	0.76	0.60
≤75℃供暖	1.25	1.00	0.80	0.63	0.50
≤80℃供暖	1.09	0.87	0.70	0.55	0.43
注：SDR=2S+1					

供热用柔性塑料管不同于冷水用塑料管，使用条件比较复杂，环应力σ及系列S值与管道运行压力、温度都有关系，无法简单的从列表规定对应于工作压力、使用温度级别和管材公称外径要求的厚度。因为在压力比较高、温度比较低的使用条件下计算的环应力σ选用的管系列S值，可能同时适合于压力比较低、温度比较高的运行工况。

选用不同的管系列S值对于工程的投资有很大的影响，所以应该合理的分析管道运行工况，合理的选用适用壁厚，既保证管道的运行安全与稳定，又能避免因选用壁厚过厚的管道而增大项目投资，造成不必要的浪费；对于设计压力≥0.6MPa的供热系统，供、回水可分别采用不通管系列S值，达到降低工程初投资目的。

PE-RT II管道应用案例

国内最早的工程应用，于2012年在内蒙古、吉林、山东等地区展开，应用类型为小区钢制二级管网改造，截止至目前，项目所使用PE-RT II管道运行的管网系统良好。

工程一：沈阳市供热改造项目

2017年供热管网采用PE-RT II型热力保温管，温度：60℃ 压力：0.6Mpa。

该项目由于PE-RT II管道重量轻（仅为金属管的1/8），施工强度低、搬运方便。一般施工，无需大型施工机械，大大缩短了施工周期。

图1 沈阳市某项目

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

工程二：架空敷设

山东济南市某新建项目，供/回水温度：55/45（地暖）；建筑楼层：27层使用部位：地下室架空与立管。

该项目开创了PE-RT II管在明用建筑室内采暖立管中使用的先河，通过总结试点项目使用情况及运行数据，开发了管道固定环、固定支架和约束支架等，墙体安装方法与固定方法。

图2 山东某项目

工程三：南方集中供暖

武汉市火车站某新建项目，建筑面积：35420 m^2；设计供/回水温度：75/50；建筑层高：26m。层使用部位：地下室架空与立管分支。

作为南方集中供暖标杆的武汉，自1988年开始，当地发改委就着手研究推动集中供暖，目前，武汉市已实现集中供暖的建筑面积400多万平方米。随着以塑代钢的普及与技术发展，南方市场也受到PE-RT II管在城镇二级管网中所带来的，使用寿命长、水流阻力小、施工安装方便、日常维护简单与综合造价低等特点的吸引。

图3 武汉某项目

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

案例小结

通过实际的工程应用，可以看出当前的集中供热温度已经低温化，二级管网采用PE-RT II管道替代传统的钢制管道，是完全可以胜任且具有相当竞争优势的。如：

（1）PE-RT Ⅱ型预制保温管（DN100口径以下）较钢管价格更经济。但由于PE-RTII 管道能减少管道焊接、焊口探伤等操作，综合比较直埋敷设较塑套钢预制保温管直埋敷设造价减少约10%，且其使用寿命达50年以上，是钢管使用寿命的3倍~5倍。

（2）PE-RT Ⅱ型预制保温管（DN100口径以下）较钢管价格更经济。且由于PE-RTII 管道能减少管道焊接、焊口探伤等操作，综合比较直埋敷设较塑套钢预制保温管直埋敷设造价减少约10%，且其使用寿命是钢管的3倍~5倍。

（3）无腐蚀锈蚀，不结垢、不堵塞，清洁供暖。对于水中的大多离子和建筑物内的化学物质均不起化学作用，不生锈，不腐蚀，不生细菌。从用户反映情况看热水输送质量较高，水质清澈没有铁锈等混杂物，说明塑料保温管不仅保温效果好，而且具有良好的卫生性。

（4）无补偿敷设。PE-RT II型管为粘弹性材料，与土壤间的摩擦力就足够抵消管道的轴向热胀力；因此管道完全可采用直埋无补偿的方式进行敷设，且无需采用额外的固定措施。

（5）耐热耐冷性高：耐热聚乙烯PE-RTⅡ管维卡软化点126℃，最高工作温度可达80℃。使用温度在70℃左右工作压力在1.0MPa以下时均可以使用50年；低温脆化温度为-70℃，因此，在-40℃以上，材料仍然有比较好的韧性。

（6）施工工艺简单：采用专用工具进行电熔连接或热熔承插连接，操作简便，自动化程度高，重量轻（仅为金属管的1/8）施工强度低、搬运方便，施工成本低于钢管施工费用。

结论与展望

大量的资料收集和数据调查也查明，国内城市供热二级管网的水温已经低温化，根据PE-RT II管道材料的物理特性，采用PE-RT II管道作为集中供热二级管网，也基本可以替代传统的钢制管道，并可大大避免因钢制管道腐蚀，导致管道堵塞、输送能耗增加、采暖效果降低等情况得出现。

PE-RT II管道材料具有传统钢管不具有的优异的耐腐蚀性、施工便利性、接头严密性与可靠性和长期使用寿命，作为新型的管材，具有热稳定性好、耐腐蚀、绿色易回收等优点，用于集中供热二级管网可靠、可行。

耐热聚乙烯（PE-RT II）塑料管道的力学特性与钢管的区别在于，使用温度对设计许用应力的影响极大，冷态下的承压能力不能用以判断在长期使用条件下的耐久性。因此，根据Miner’s规则（累计损伤原则），需对集中供热二级管网的使用工况进行分析，对应的计算出在该工况条件下，PE-RT II管道供、回水管道的设计应力。设计应力确定之后，就可以按照相应的国家标准进行压力选型和管材的规格选型了；对于设计压力≥0.6MPa的供热系统，供、回水可分别采用不通管系列S值，达到降低工程初投资的目标。

目前，直埋保温塑料管在我国北方的多个城市小区热力二次管网新建、改造工程中进行了试用，试点案例非常成功，取得了良好的供热效果，预制保温塑料管具有良好发展前景，是城镇集中供热二次管网未来发展方向。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

参考文献

[1.]柯锦玲，赵启辉.集中供热用高密度耐热聚乙烯(PE-RTⅡ)塑料复合管技术发展.供热工程建设与高效运行研讨会论文集，2015.04.

[2.]ISO1043-1-2001，塑料 定义和术语 第一部分：基础聚合物及其特性.

[3.]GB/T28799.1-2012《冷热水用耐热聚乙烯（PE-RT）管道系统-第1部分：总则》

[4.]建设部工程质量安全监督与行业发展司、建设部科学技术司、建设部科技发展促进中心、中国建筑标准设计研究院.《全国民用建筑工程设计技术措施——建筑产品选用技术•专集》（2005CPXY）

[5.]赵启辉，柯锦玲.供热用 PE-RT II 塑料管道原材料质量保证和追溯.供热工程建设与高效运行研讨会论文集，2019.04.

作者简介

余志雄，1993年生，男，从事供热通风与空调工程专业设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。

单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26

邮编：430000

Email:yuzhixiong@dewn.cn

联系电话：18752061855

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

武汉地区民用集中供热方案研究

陈方元

摘要：针对武汉地区城镇区域民用集中供热领域存在的供热技术路线选择问题进行分析研究。认为在热负荷较为集中的区域，应首选电厂余热为区域集中供热热源，其次在具备条件的情况下，依次考虑地源热泵、水源热泵、空气源热泵为热源，利用局域热网集中供热，以达到节能、减排、资源集约、降低成本的目的。经分析提出了适合在武汉地区的推广的民用供热方案。

关键词：集中供热　因地制宜　区域供热、供暖

1 引言

目前，有别于北方供暖，地属夏热冬冷地区的武汉地区用能特点有：

1) 夏季有制冷需求、冬季有采暖需求，供冷供暖周期相对较短；

2) 本地区人们未形成集中采暖习惯。民用建筑习惯以户为单位采用户式空调分散制冷采暖，公用建筑习惯以楼为单位采用多冷热源形式中央空调半集中式制冷采暖；

3) 集中供热普及率较低，区域集中式采暖接入率不高（＜70%），缴费率不高，用能成本高，达产期长；

实施集中供热制冷是利用热电联产、电厂余废热、工业余废热、天然气分布式能源站、水地源热泵等方式进行，更具有节能、减排、环保、经济性优的特点。

分散供热具有建设规模小、投资主体明确、周期短、运行、管理灵活方便、便于计量等特点。

目前武汉居住建筑供暖方式以个人行为的分散供暖为主，集中供热制冷普及率较低。本地用能主体更习惯于分散供热。但随着近年来为了节约能源，保护环境，在国家相关政策的推动下，电厂余热集中供热在武汉的大力推广开来，集中供热让本地区用户熟知起来。

目前，本地区民用集中供热领域存在以下问题：

1) 用能建筑建设时序、开发进度、达产率、缴费率等用能情况均无法确定。而在通常情况下，项目建成后达产率是影响项目经济性的重要因素。很多项目由于达产周期长，缴费率不高导致项目在达产期间需要背负沉重的资金成本，经营上入不敷出。达产率、缴费率风险较大；

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2) 虽实现资源集约，但集中供暖设施建设投资高，利用率较低，回收期长，无相关有力的政策支持，运营成本比北方采暖高，民众受限于承担能力、习惯于常规用能习惯，对集中供热接受度不高；

3) 建筑能耗是制约本地供暖的最大问题。城市居民采取电暖器、空调等采暖方式，即开即用，其采暖能耗约为每平方米每年6到8度电，折合消耗2到3公斤煤。而集中供暖，连续供热，每平方米每年要消耗15至20公斤煤。

国家相关节能环保政策明确要求，南方地区城市供热应因地制宜采用多元化的供热方式，并充分利用地热能、太阳能等可再生能源。根据武汉市资源条件和能源供应状况，除电厂余热和工业废热外，分布式供热热源可利用的其它热源主要有地源热泵（包括地埋管、地下水、地表水）、污水源热泵、集中能源站（以区域热网为热源）、热源塔热泵、空气源热泵、分散燃气锅炉、蓄热式电采暖、分布式冷热电三联供等。

以上分布式供热制冷方式，可同步解决建筑物供热制冷问题，具有能源综合利用效率高，节能环保效益显著等技术优势，与利用余热、废热的城市集中供热制冷互为补充，实现城市供热制冷的全覆盖、高效益和多元化和可持续发展。

目前武汉地区主要民用供热方式有五种，即热电联产集中供热、企业自备锅炉房（集中或分散）供热、地源热泵与全能变频常规空调系统相结合的复合式能源系统的区域供热、天然气壁挂炉分户式供热和电力空调分户式供热。夏季使用空调的单位主要有各企事业单位的办公楼、商店、医院以及居民楼等，主要使用电力空调。

2 气候特点

武汉市地处江汉平原东部，地形属于典型的残丘性河湖冲击平原。

属亚热带季风气候，四季分明，降水充分，雨热同季，夏热冬冷。年均降雨量1269毫米，且多集中在6–8月。年均气温15.8℃–17.5℃，最高气温40.1℃，最低气温–18.1℃，年无霜期一般为211天–272天，年日照总时数1810小时–2100小时。冬夏长分别约110和135天。夏季盛行东南季风，冬季盛行西北风。

3 资源条件

资源	适用性	资源利用分析
生物质能	√	武汉周边可供利用的生物质资源总量很大，目前武汉生物质资源利用方式有：秸秆做饲料，秸秆还田，秸秆做生产原料，秸秆做肥料，但从环境保护，安全生产和建设场地等的方面考虑，武汉市中心不适宜采用生物质能源，宜在城市周边生物质资源丰富地区发展生物质能源利用。
余热废热	√	武汉有青山电厂、武昌热电厂、阳逻鸿峰电厂、关山电厂、武钢钢厂余热、武石化的废热等热源资源，余热、废热资源丰富。武汉市现有热源能合集中供热可供采暖建筑面积约 1.12 亿平方米，其中电厂余热可供采暖面积约 9640 万平方米，工业废热可供采暖面积约 1480 万平方米，垃圾余热可供采暖面积约 184 万平方米。
水能	√	武汉市现有地表水资源 31.70 亿 m^3，地下水资源 10.18 亿 m^3，水资源总量 35.16 亿 m^3，全市过境水量 6731 亿 m^3，其中长江、汉江过境水量 6695 亿 m^3，具有十分优越的地表水资源条件。长江及汉江取水排水位置主要为

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

		自来水取水口及污水排水口。拥有自来水取水口共11座，供水能力428.7万吨/日。
污水能	√	武汉市有大中型排污口215个，其中长江39处，长江可容纳污水量为77226.9×10⁴t/a，截至2019年底，全市污水总设计处理规模达363.5万吨/日，其中中心城区310万吨/日，新城区58.5万吨/日。根据公示的污水处理厂污水量估算可供热总面积约899万平方米，可供冷总面积约577万平方米。
地热	√	武汉地区属于较适应地埋管地源热泵开发利用区域，地层每延米换热量多为35~60W/m，具体取决于地层结构和岩土体热物性参数。因此，可根据工程场地状况，考虑采用地埋管式地源热泵系统。
太阳能	√	目前在供热领域是一种辅助形式，可作为其它能源的补充形式使用。一般考虑利用光伏车棚及屋顶光伏利用形式提供部分用电需求。由于受季节和天气影响较大，使用具有一定的条件限制，宜有选择性使用该项资源。
天然气	√	武汉市天然气气源主要为忠武线、淮武线、川气东送线和西气东输二线输送的天然气。忠武线对武汉市的合同气量12亿m³/年，川气东送线对武汉市的实际供气量约2.3亿m³/年，西二线对武汉市的合同气量约3.2亿m³/年。武汉江夏安山1200万立方米天然气应急储气库，是国家中部地区最大的储备库。因此，武汉天然气资源目前较充足。适宜发展燃气联合循环热电联产（大规模），燃气分布式能源（中小规模）。

武汉地区可利用的清洁能源依次为余热、地表水资源、污水源、地热源、生物质、天然气以及太阳能。

武汉地区余热资源丰富，且已有一定基础的集中供热基础设施，宜作为首选热源。一方面可减少污染排放、提升能源利用效率，减少能源消耗，改善城市环境。另一方面降低供能成本。

武汉地区水资源丰富，实现江水、湖水的取用和退排较为容易，但湖水水深较浅，水温受空气温度影响较大。夏季热泵机组的温排水可能会破坏湖水生态平衡，造成藻类植物爆发性生长，影响湖水治理和景观，因此在选用水源作为冷热源时，宜先落实湖水热消纳能力。

武汉地区天然气和电均较充足，且电力和天然气利用技术成熟，性价比高，因此可作为基础冷热源。

武汉地区太阳能资源一般，多以辅助利用形式存在，供能不稳定。宜选择性使用。武汉地区多用于供应生活热水或光伏发电。

4 供冷供热技术分析

目前武汉居住建筑供暖方式以个人行为的分散供暖为主，各种供暖方式效果、经济性、能耗、对环境的影响及供热安全等方面差别较大，部分的分散式供热技术造成能源浪费、环境污染。

下面就武汉地区供能技术的适用性分析如下：

供能技术	技术筛选分析
	优先选择。集中供热系统热源稳定充足，使用清洁便捷、安全可靠性高，可

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

城市集中供热	以减少冷热源设备的容量，管理集中、方便，能够提高能源的利用率，冬季通过板换可以置换不同品质热能，满足用户供热需求，夏季可通过吸收式溴化锂冷水机组生产冷水，满足用户空调供冷需求，因此应积极发展集中供热。另外，基于目前的能源价格水平的测算结果，余热吸收式制冷成本相对较高，但当其与电制冷机供冷成本相当时，基于节能和能源高效利用的角度出发，宜优先选择余热吸收式制冷。
水源/地源/空气源热泵	有条件使用。水源稳定、清洁、温度合适时，可采用水源热泵冷（热）机组作为冷、热源。水源宜选择流动水，这样夏季热泵机组的温排水不会造成热污染，致使藻类植物爆发性生长，水域氧容量减少，影响水域水质和生物群生存繁殖。湖水选用时，应注意热污染带来的影响，需得到主管部门的核准，取水手续审批难度大；系统需经常清洗。因此，可根据湖水热消纳能力，考虑小规模水源热泵系统。 武汉地区属于较适宜地埋管地源热泵开发利用区域，地层每延米换热量多为50～60W/m，具体取决于地层结构和岩土体热物性参数。因此，可根据工程场地状况，考虑采用地埋管式地源热泵系统。 武汉地区较适宜使用空气源热泵，可根据场地条件和负荷需求，考虑采用空气源热泵系统制冷制热制生活热水。
燃气直燃机	有条件使用。采用天然气作为驱动源，存在燃料使用安全隐患、烟气污染物排放等一系列问题，且受燃气供应影响较大。溴化锂机组有制冷效率低，且衰减逐年增加的先天问题。但可调节燃气的季节负荷，均衡电力负荷峰谷，改善环境质量。因此，当用电紧张，燃气供应充足且实行分季计价而价格比较低廉时，可选用直燃型溴化锂吸收式冷（热）水机组作为冷、热源。
燃气锅炉	有条件使用。技术成熟，可靠、便捷。在具备采用集中供热的条件下，不提议采用燃气锅炉供热。燃气锅炉供热一般作为临时热源和热网调峰热源使用。
电锅炉	原则上尽量不使用。电力资源不充足，且无经济的分时电价时，原则上尽量不使用，宜优先选择燃气锅炉，大中城市原则上宜优先选择燃气锅炉。
电制冷机	优先选择。技术成熟、使用安全、可靠、便捷、经济。当用电不紧张时，冷源应优先选择电制冷机。
吸收式冷水机	有条件使用。有足够的废热、余热可利用时，优先选择溴化锂吸收式冷水机组作为冷源。
蓄冷	有条件使用。当逐时负荷峰谷差悬殊或负荷高峰与电网高峰时段重合或有峰限电要求，且可申请到专项蓄冷电价时，可采用蓄冷系统。
燃气三联供	有条件使用。一次能源的利用效率是其他形式不可比拟的，但初投资大，系统复杂，对冷热电负荷需求必须达到一定规模和使用条件，方可采用，系统运行的经济性比技术复杂性更为重要。属于有条件时，宜采用。
复合能源	有条件优先使用。具备多种能源的大型建筑或公共建筑群，当很难确定采用某种能源最经济时，宜采用复合能源供冷、供热。有条件时宜采用冷热电联产或集中供冷、供热站，可以减少冷热源设备的容量，管理集中、方便，能提高能源的利用率。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

5 常用供热系统对比分析

常用的供热系统对比分析如下：

序号	供热形式	能源种类	热源供热能源成本（元/kWh）	安全可靠性	资源便捷性
1	区域集中供热	燃气热电	0.21	较安全可靠	清洁便捷
		燃煤热电	0.14	较安全可靠	清洁便捷
		高炉冲渣水	0.06	较安全可靠	清洁便捷
2	江（污）水源热泵	水源+电	夏季制冷：0.23 元/KWh；冬季制热：0.286 元/KWh	系统需经常清洗	受
3	地源热泵	地源+电	夏季制冷：0.33 元/KWh 冬季制热：0.301 元/KWh	浪费逐年增加	难
4	天然气锅炉	天然气	0.35	较安全可靠	受燃气供应量影响
5	燃气三联供	天然气	0.23	安全可靠	受燃气供应量影响
6	燃气空气源热泵	天然气	0.20	有泄露风险	受燃气供应量影响
7	壁挂炉	天然气	0.42	有泄露风险	受燃气供应量影响
8	户式空调	电	0.67	舒适性差	便捷
备注	1、上述考虑采暖全天使用进行对比，运行成本以达产率 100%计算； 2、商业用电 0.6907 元/KWh，居民用电 0.578 元/KWh； 3、商业用水 3.49 元/吨； 4、商业用气 3.094 元/Nm3，居民三档天然气价 3.54 元/Nm3，燃气低位热值 8000kcal/Nm3； 5、电厂余热价格 45 元/GJ；冲渣水废热价格 5 元/GJ。 6、上述供热能源成本不考虑热力设备折旧费、运行管理费以及银行贷款利息等燃料费以外的其他各项支出。				

通过上述对比分析，采用区域集中供热无论从用热单价、安全可靠性及资源便捷性等方面都要占有很大优势。因此武汉宜优先发展城市集中供热作为建筑供热，其次有条件发展水源热泵、地源热泵、空气源热泵，最后采用燃气锅炉补充，燃气空气源热泵、燃气三联供填补分散用热区和供热不足区域。

6 集中供热盈亏平衡分析

结合国内集中供热项目建设运营经验及武昌、青山管网建设运营情况，现对集中供热项目经济性进行粗略分析。

管网供热能力2000万㎡，工程总投资5亿元。经测算，当供热用户接入面积达到500万㎡时，该项目微盈，盈利金额234.8万元。

序号	类别	金额（万元）	备注
一	收入	12750	
1	热费收入	12750	按 8.5 元/月*㎡考虑
二	成本	12515.2	
1	购热成本	7143.6	含电厂输送至各项目水电热成本
2	管网租金	2000	管网工程造价 4%考虑
3	人员工资	960	80 人编制

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4	管网热损	357.2	5%
5	二级站水电成本	714.4	占热成本 10%
6	维保费用	1000.0	资产总额的 2%
7	其他费用	340	其他
三	盈利	234.8	

由于集中供热项目一次性投入较高、人员工资及运维成本相对固定、低热负荷率时管网热损反而越大，因此，集中供热项目只有在热用户稳定接入、形成规模效应后才能扭亏为盈。

7 结论

武汉地区应该把集中供暖与推进能源综合利用促进当地资源循环发展联系起来，供暖方式的选择应根据当地气象条件、能源状况、节能环保政策、居民生活习惯以及承担能力等因素，通过技术经济比较分析确定。因地制宜依据本地区的能源结构来实现制冷采暖。

根据武汉市资源条件和能源供应状况，经济条件可行的情况下，宜优先采用集中供热（+分布式供冷（公建）/分散供冷（住宅））。

鉴于集中供冷技术上限制颇多，负荷波动较大，供冷温差小，使用率低，制冷系统难以在技术上实现精准调节（质调节较弱），且供冷成本高，因此武汉地区宜根据冷负荷密度选择供冷形式，冷负荷较小较分散的用能区宜采用分散供冷，如住宅小区；冷负荷较大较集中的用能区宜采用分布式能源站供冷，如商业等（针对冷负荷密集建筑群或单体建筑）。

具体建筑项目应结合项目的资源条件、使用功能和空调负荷特点经经济技术比较选择能源结构合理、使用稳定安全的冷热源形式，具备可再生能源使用条件的应优先采用可再生能源，按以下原则确定：

1) 居住建筑制冷采暖：采用分体式热泵空调器，燃气壁挂炉供暖和供应生活热水；高档居住建筑可采用户式空调系统（空气源热泵、多联机空调系统）供冷供热，具备资源条件且技术经济合理时优选余热集中供热，其次可采用地源热泵、燃气热泵集中供冷供热，不应采用锅炉供热。

2) 开发强度大，公共建筑集中建设区域，建筑供冷供热需求大，负荷密度高，统一建设分布式能源站供热（冷）（热源优先考虑工业废热、电厂余热），采取特许经营模式，能源站的供冷半径不宜大于1500m；换热站的供热半径不宜大于500m。

3) 政府办公建筑、财政投资和公益性公共建筑应采用余热或可再生能源（地源热泵、空气源热泵、多联机、热源塔热泵等空调系统）供冷供热。

4) 其他公共建筑应优先采用可再生能源（地源热泵、空气源热泵、多联机、热源塔热泵等空调系统）供冷供热，如资源条件受限或确需通过锅炉供热才能满足使用要求时，否则不应采用锅炉供热。

5) 实施多能互补集成优化工程。加强终端供能系统统筹规划和一体化建设，在大型公用设施、商务区等新增用能区域，实施终端一体化集成供能工程。

参考文献

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[1]《武汉市中心城区排水防涝专项规划(2012-2030)》
[2]《武汉市能源发展十三五规划》
[3]《武汉市城镇污水收集与处理专项规划（2018-2035）》

作者简介

陈方元，1985年生，女，从事能源咨询设计工作，现就职于武汉德威工程技术有限公司。
单位地址：武汉市友谊大道999号武钢大厦B26
邮编：430000
Email：tyfd2006@163.com
联系电话：18627800102

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

660MW机组供热期间中排压力低限经验公式的应用

马超　宋宏儒　秦建新　杨杰
（华能邯峰电厂）

摘要：660MW西门子凝汽式机组先后完成了供热改造，本文阐述了改造前后对汽轮机通流部分的影响，结合机组不同供热工况下的参数进行了通流部分的强度校核分析。根据典型供热工况下中排压力低限值确定了中排压力低限经验公式，根据该公式可以得到任意供热工况下中排压力低限值，为运行人员在参数调整上提供参考，保证了机组的安全运行。

关键词：供热机组改造　中排压力　经验公式

1 供热改造背景

华能邯峰电厂机组为西门子H-30-100-2/M-30-63/N-30-4×10型亚临界、单轴、四缸四排汽、纯凝汽式、反动汽轮机。2016年10月，#1机组完成供热改造；2017年11月，#2机组完

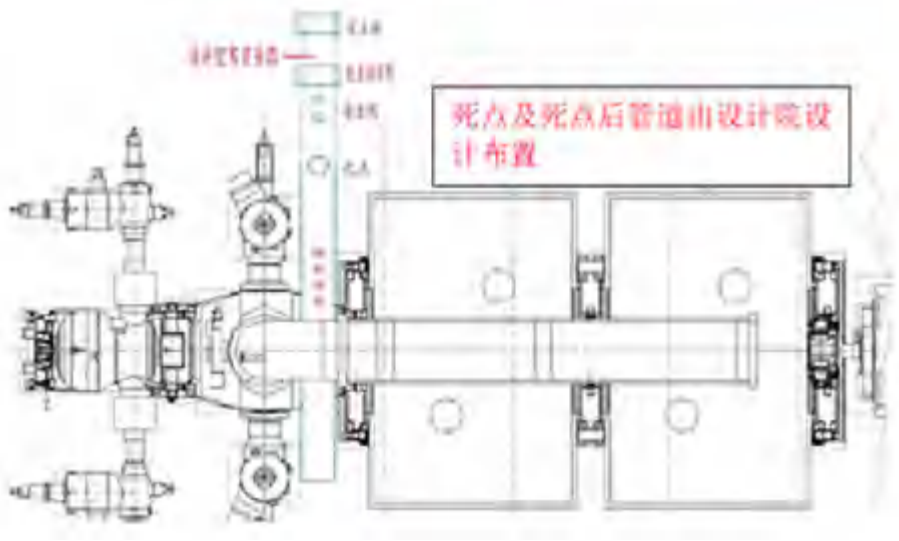


图1 抽汽调节蝶阀布置在连通管垂直管段俯视图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

成供热改造。在中压缸排汽管立管段上安装抽汽压力液压调整蝶阀，通过调节该阀来控制低压缸的流量，以满足抽汽汽源的压力。在液压蝶阀前三通引出供热母管作为供热汽源，抽汽供热母管上依次安装有两个安全阀、气动抽汽逆止阀、液动抽汽快关阀、电动调节阀、通过汽机房16米东侧运转层向南引进换热首站。设计参数为单台机在额定抽汽压力0.65MPa（a），温度为291.1℃工况下，能满足供热抽汽量为400t/h，最大供热抽汽量为600t/h的供热要求。抽汽调节蝶阀布置在连通管垂直管段俯视图如图1所示。

2 供热改造对通流部分的影响

2.1 供热改造对高、中压缸通流部分的影响

本次供热改造对高压通流部分的强度不产生任何影响。

原机组按照纯凝设计，因此中压末级叶片在原设计时可能未考虑抽汽运行时，大流量，大压差的恶劣工况。而实际上机组已经运行多年，中排压力通过调压阀调整为 0.65MPa(a)，压力和温度均不低于纯凝工况，通流部分应力强度与原额定纯凝工况在同一水平，可保证机组在额定抽汽工况下安全运行。

在部分负荷下，调整抽汽投入时，中压排汽温度会随着主汽流量的减少而升高，金属材料的屈服强度会相应降低，但该温度范围内屈服强度变化幅度不大，同时由于主蒸汽流量减少也降低了叶片应力，级功率和蒸汽弯应力大幅降低，因此在低负荷抽汽工况下可允许中排温度略有升高，在此工况下，以 388℃为上限，可保证机组的安全运行。抽汽工况的运行限制及建议如下：

1）为了保证中压缸末几级叶片的安全可靠性，在投入抽汽时中压缸排汽压力不得低于<再热压力与中排最低抽汽压力的关系曲线>的限制，如图2所示。

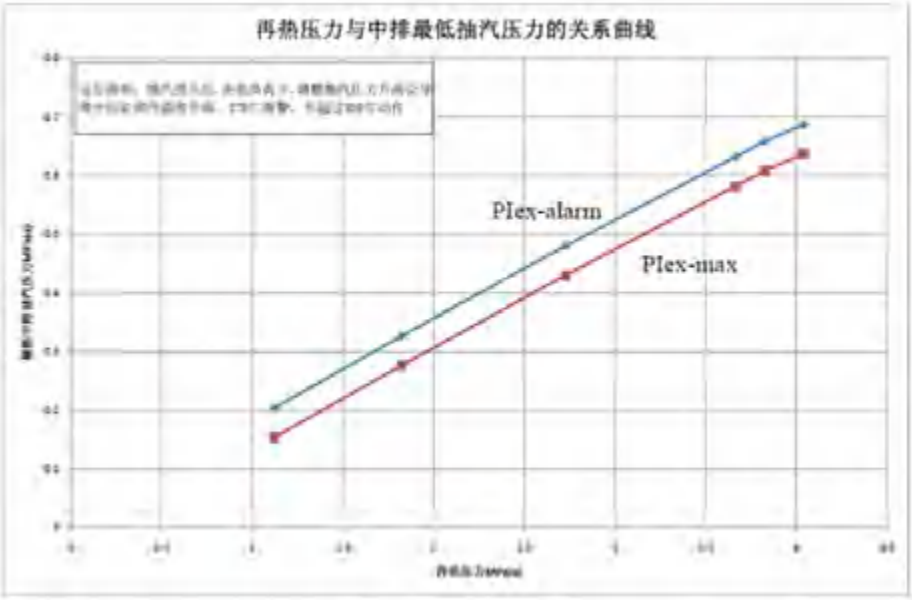


图2 再热压力与中排最低抽汽压力的关系曲线

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

其中：PIin为中压缸进口压力；PIex-alarm为中排抽汽压力报警值；PIex-max为中排抽汽压力动作值；PLin为低压缸进汽压力；PIin为进入中压缸的蒸汽流量。

当中排抽汽压力达到PIex-alarm时报警，通过调整抽汽管道上的抽汽压力调节阀节流来减少抽汽量；如果连通管抽汽调节蝶阀全关仍无法提高抽汽压力，抽汽压力继续降低至 PIex-max 时，延迟30s后抽汽自动解列。如果需要在低于此压力下抽汽时，可通过调整抽汽管道上的控制阀门节流来满足。

2）中压缸排汽温度不超过388℃，经过计算，调整压力情况下中压缸排汽温度接近此限制温度的最小进汽量约为839t/h，此时高压第一级静叶前压力约为10MPa(a)。为此，机组应在该主汽流量以上投入调整抽汽，如中压缸排汽温度达到388℃，需增大进汽量或降低再热温度或降低中排压力。

2.2 供热改造对低压缸通流部分的影响

低压部分长叶片的强度主要考虑小流量下的摩擦鼓风，根据理论计算，额定背压下低压缸最小冷却流量可以保持在200t/h（两个低压缸）左右。在连通管压力调整碟阀的设计中需满足该最小冷却流量的要求，另外在调节阀后增加压力测点，用于监视低压缸进汽量，最低不得低于0.22MPa，以保证机组的安全运行。随着背压的升高，低压缸需要更多的冷却流量。因此在关注低压缸进汽压力的同时，还要保证低压缸排汽温度不超限。低压排汽温度以及低压末级静叶持环前报警、动作温度仍保持原设置。如低压缸排汽温度达到定值，需提高真空、增大进汽量或降低再热温度。

3 机组不同供热工况下通流部分强度校核分析

#2机进行了供热机组调峰能力试验，五种供热工况下的现场试验数据如表1所示。工况一为最大采暖供汽量下的机组最大出力工况，工况二为最大采暖供汽量下的机组最小出力工况；工况三为常用采暖供汽量下的机组最大出力工况；工况四为常用采暖供汽量下的机组最小出力工况；工况五为最小采暖供汽量下的机组最小出力工况。改造后供热机组的设计采暖供汽流量为400t/h，现场试验的最大采暖供汽流量为250t/h，距离设计值有较大差距。这主要受限于目前的实际外网供热面积及热网供水量，在热网回水温度降低及热网供水量增加的条件下，机组可以进一步提高对外供热能力。

表1 不同供热供汽量工况下的机组调峰出力现场数据汇总

序号	测点名称	单位	工况一 最大抽汽量最大出力	工况二 最大抽汽量最小出力	工况三 常用抽汽量最大出力	工况四 常用抽汽量最小出力	工况五 最小抽汽量最小出力
1	机组功率	MW	622	405	639	380	311
2	采暖供汽流量	t/h	250	250	194	195	102
3	进口级前压力	MPa	15.51	10.44	15.62	9.60	7.75
4	给水流量	kg/s	510	308	520	300	246

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

5	过热减温水流量	kg/s	38	25	19	19	13
6	加热器回水压力	MPa	1.55	1.1	1.54	1.06	0.94
7	加热器回水温度	℃	86.5	88	86.6	82.7	81
8	采暖供汽压力	MPa	0.56	0.29	0.55	0.29	0.24
9	采暖供汽温度	℃	299	289	294	299	294
10	中压缸进汽压力	MPa	3.67	2.4	3.7	2.23	1.79
11	中压缸进汽温度	℃	546	543	548	542	516
12	中排压力	MPa	0.56	0.29	0.55	0.29	0.24
13	中排温度	℃	299	289	294	299	294
14	低压缸进汽压力	MPa	0.46	0.25	0.49	0.25	0.22
15	采暖调节阀开度	%	32	48	23.5	37	29
16	联通管调节阀开度	%	29	25	34	25	25

由表1可以看出：

1）供热机组在最大采暖供汽量250t/h条件下，机组的调峰出力范围为405MW-622MW，中压缸排汽温度在289-299℃之间，远远低于上限值388℃；供热机组在常用采暖供汽量200t/h条件下，机组调峰出力接近正常范围，为380MW-639MW，中压缸排汽温度也在295℃左右，变化不大；供热机组在工况五（采暖供汽量100t/h条件下）试验时，现场热网加热器运行进口压力为微正压状态，继续降低出力将导致热网加热器进口压力变为负压，水位调整较为困难，因此供热机组在采暖期的极限最小出力宜按此工况的出力数据为基准，此时中压缸排汽温度为294℃，由此可见，各极限工况下，中压缸排汽温度变化不大，均能满足机组正常运行的要求，且远远低于上限值，因此，中压缸排汽温度并非运行人员参数调整的重点。

2）供热机组在三个最低出力工况（工况二、工况四、工况五）试验时，联通管供汽调节阀开度最低关至25%，三个试验工况下阀门后压力均大于0.22MPa，可以满足低压缸最小冷却蒸汽量的要求，因此机组正常运行时，低压缸摩擦鼓风发热也不是运行人员重点考虑的问题。

由此可见，如何使中压缸通流部分应力强度与原额定纯凝工况在同一水平，保证中压缸末几级叶片的安全可靠性，将是运行人员参数调整的重点。

4 中排压力低限经验公式的确定与应用

上海电气提供了各典型供热工况下中排压力低限值，为运行人员在参数调整上提供参考，如表2所示，图中给出不同机组负荷（MW）、抽汽供热流量（t/h）所对应的中排压力低限值。

表2 各典型供热工况下中排压力低限值

负荷 \ 流量	100 t/h	150 t/h	200 t/h	250 t/h	300 t/h
660 MW	0.549	0.560	0.571	0.583	

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

600 MW	0.495	0.506	0.517	0.528	0.543
550 MW	0.447	0.458	0.469	0.480	0.495
500 MW	0.402	0.415	0.427	0.437	0.447
450 MW	0.357	0.368	0.379	0.391	0.402
400 MW	0.315	0.327	0.338	0.349	0.360
330 MW	0.247	0.259	0.271	0.283	0.295

由于以上数据只是典型工况，因此我们希望能够通过对间断点进行拟合，得到经验公式，由此得出任意供热工况下中排压力低限值。

将表中数据进行四舍五入，并进行数据分析，可得到以下公式（4-1）：

$$0.25+(X-330)*0.04545/50+(Y-100)*0.01/50 \qquad (4\text{-}1)$$

其中：X为机组负荷（MW），Y为供热抽汽流量（t/h）。

利用matlab计算机应用软件，通过对以上函数公式进行数值逼近，可以得到以下经验公式（4-2）：

$$9.09^{-4}X+2.28^{-4}Y-7.377^{-2} \qquad (4\text{-}2)$$

其中：X为机组负荷（MW），Y为供热抽汽流量（t/h）。

由式(4-2)得到以下计算结果，如表3所示，与原始数据比较，最大误差不超过0.003MPa，能够满足运行要求。

表3 由中排压力低限值经验公式所得计算结果

流量 / 负荷	100 t/h	150 t/h	200 t/h	250 t/h	300 t/h
660 MW	0.549	0.560	0.572	0.583	——
600 MW	0.498	0.506	0.517	0.529	0.540
550 MW	0.449	0.460	0.472	0.483	0.495
500 MW	0.404	0.415	0.426	0.438	0.449
450 MW	0.358	0.369	0.381	0.392	0.401
400 MW	0.313	0.324	0.335	0.347	0.358
330 MW	0.249	0.260	0.272	0.283	0.295

中排压力低限值经验公式已经应用于邯峰电厂#1、#2机组，DCS画面上可以显示机组当前负荷和供热抽汽流量下所对应的中排压力低限值，如图3所示，运行人员可以通过调整中排连通管压力调整碟阀开度，使中排压力达到低限值以上，从而改善中压末级叶片大流量，大压差的恶劣工况，保证机组安全运行。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

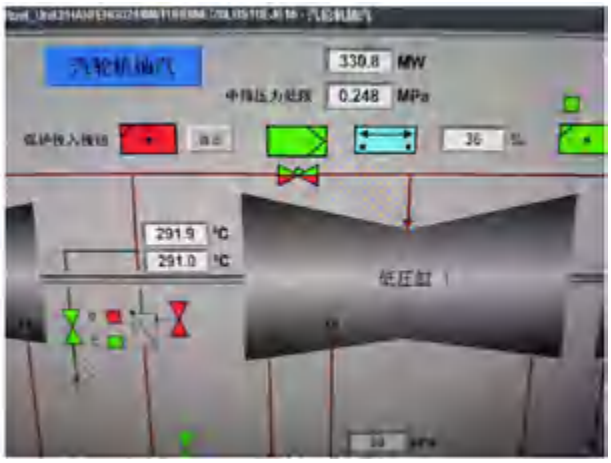


图3 邯峰电厂DCS画面机组中排压力低限显示

5 结论

1）邯峰电厂供热改造后，中压缸末几级叶片可能存在大流量、大压差的恶劣工况，从而超过材料的屈服极限，低压缸也存在小流量下的摩擦鼓风导致低压缸排汽温度超限。因此，中压缸排汽压力、温度和低压缸最小进汽流量的调整，是保证供热期间汽轮机通流部分安全运行的关键。

2）机组各极限供热工况下，中压缸排汽温度变化范围不大，均远远低于高限制388℃，低压缸最小进汽流量也均能够满足运行要求，因此，中压缸排汽压力成为运行人员监视调整的重点。

3）根据上海电气提供的邯峰电厂各典型供热工况下中排压力低限值，确定了中排压力低限经验公式，并应用于机组DCS画面上，为运行人员监视调整中压缸排汽压力提供指导，保证汽轮机中压通流部分的安全。随着外网供热面积及热网供水量的扩容，中排压力低限经验公式将发挥更大的参考作用。

作者简介

马超，工程师，从事火电机组集控运行工作，现任华能邯峰电厂运行部主值，华能邯峰电厂，河北省邯郸市峰峰矿区义井镇邯峰电厂，056200，569242650@qq.com，15175409301。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

采暖季室内、外温度高低与相对湿度关联性的量化分析

张黎明[1] 王剑影[1] 李萌[1] 刘震宇[1] 王宜华[1] 司江周[1] 于兴亮[2]
（1. 国电投南阳热电有限责任公司 河南南阳 473000；2. 国电投新乡豫新发电有限责任公司 河南新乡 453000）

摘要：针对采暖季某小区同楼层同单元对门邻居室内温度高低差异进行原因分析，指出老式建筑设计缺陷存在密封及保温性能差、暖气片功率小、装修物包裹暖气片阻碍散热以及暖气片固定方式缺陷导致热量散失等问题，改善采暖效果简易措施取得提升室内温度3-3.5℃的成效值得肯定。通过楼栋端头户型及周围邻居是否供暖对应室内温度差异量化分析，得出1面墙散热点影响室内温度约1℃的结论值得参考。室外相对湿度越小采暖室内温度越低的关联性论点值得重视，通过采集的数据为依据计算得出，室外湿度能够影响室内温度约3℃，相对湿度每变化1%影响室内温度约0.04℃以及室外温度每变化1℃，影响室内温度约0.25℃量化的数据，为热力公司及相关节能公司后续精准调控热用户室内温度，提供更为科学全面的参数依据和调整手段，以更好提升供暖服务能力及能效，值得业内参考与借鉴。

关键词：围护结构 湿度 室外温度 室内温度 换热站 暖气片

0 引言

进入采暖季，采暖效果是涉及民生的大问题，家中暖气“热”与“不热”是居民最关注的，特别是供暖初期参数提升期间，各热力公司都会面临大量来自热用户感觉暖气“不热”的质询。本文针对采暖季河南省南阳市某小区同楼层同单元对门邻居室内温度高低差异进行原因分析，给出热用户改善采暖效果的简易措施，值得借鉴。通过室内温度等数据用心采集与分析，给出采暖季室内、外温度高低与相对湿度关联性的量化分析，值得业内重视与参考。

1 概况

相对湿度在40%–70%，冬季室内最适宜的温度是18–25℃，18℃无冷感，而15℃是明显冷感的温度界限。河南省采暖期为每年的11月15日至次年的3月15日，室内供暖温度根据2018年施行的《河南省集中供热管理试行办法》第二十六条，在供热期内,热经营企业应当保证居民热用户有供热设施的卧室、起居室(厅)的室温不低于18℃。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

常规采暖系统均采用热水，我国现行的《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》规定，散热器壁挂供暖系统，按热水温度为75/50℃或85/60℃进行设计，供回水温差设计值为20℃；地面辐射的地暖系统，供水温度≤60℃，从舒适及节能，供水温度宜35～45℃，供回水温差≤10℃。随着建筑围护结构节能措施的逐步完善，目前的供暖设计中，二次网的供水温度设计是60–65℃，回水温度设计是45–50℃，温差是15℃–20℃。

2020年11月15日，南阳市开始城市集中供暖。某小区某楼栋三楼端头西户的住户反映供暖后室内温度偏低的情况，见表1所示，2020.12.12日上午约11:30钟，同楼层同单元对门邻居室内温度高达18.8℃（序号3），而自家温度仅15.6℃（序号2）。室外温度约10℃时，室内温度才达到最高值约16℃（序号4），室外温度约0℃时，室内温度只能到约14.2℃（序号1）。曾经多次采取对入户供水管滤网及室内暖气片冲洗、放空气等措施，采暖效果始终未改善。连续三天以上不开窗户，室内温度最高升至16℃。尝试早上开窗通风约1小时，室内温度从15.8℃降低至13.8℃，而再关窗1小时也仅能升温至14.8℃，开窗通风降温2℃/小时，关窗升温仅1℃/小时，明显存在暖气加热不足室温偏低的问题。

表1 简易措施实施前后及与邻居室内温度对比表

序号	日期	时间	温湿度计室内温度℃	室内湿度	最近天气室外温度℃	最近天气风速	最近天气室外湿度	室外温度℃	备注
1	2020.12.08	15:40	14.2	19%	7/0	东风2级		约0	客厅
2	2020.12.12	11:22	15.6	66%	11/0	西南2级		约8	客厅
3	2020.12.12	11:30	18.8	65%	11/0	西南2级			对门邻居家客厅室温
4	2020.12.12	15:04	16	58%	11/0	西南2级		约10	客厅
5	2020.12.21	13:42	20.3	47%	0/-2	南风1级		约8	卫生间
6	2020.12.14	12:15	17.2	48%	2/-3	东南2级	27%	0	客厅（2020.12.13日14：30简易措施实施完毕）
7	2021.01.04	6:58	17.3	49%	3/-1	北风1级	23%	0	客厅
8	2020.12.31	7:22	15.9	44%	3/-3	西风1级	51%	-5	主卧
9	2020.12.31	8:07	16.6	42%	3/-3	西风1级	40%	-6	次卧
10	2020.12.31	8:48	19	55%	3/-3	西风1级	49%	-3	卫生间
11	2020.12.29	22:32	17.8	40%	2/-3	东风2级	75%	-5	客厅
12	2021.01.07	11:33	14.6	38.30%	0/-9	东风3级	20%	-3	客厅

3 室温偏低原因分析

针对该户采暖室内温度偏低问题，排查确认供热一次网、二次网参数正常，满足采暖需求。详见图示1、2，电厂侧一次网运行参数，供水温度98.17℃，回水温度56.95℃；热力换热站侧一次网供水温度约96.4℃，回水温度56.2℃；换热站二次网供水温度59.3℃，回水温度51.9℃。

结合该小区实际及空气相对湿度等数据采集分析，确认导致室温偏低原因主要如下：

3.1该小区老式建筑的墙、门、窗等围护结构设计缺陷存在密封及保温性能差。该小区房屋1998年相继建成，在《公共建筑节能设计标准》（GB50189–2005）颁布前投用，未考虑密封及保温等节能措施，墙、门、窗等围护结构向外传递热量大，散热快，温升困难。如单层窗户密封性差，铝塑钢窗直接镶嵌在墙孔内用混凝土砂浆密封固定，封闭不严密，没有保温措

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图1 一次网运行参数

图2 二次网运行参数

施。门、窗框变形大，多处存在缝隙透风密闭不严，窗户面积过大，窗墙面积比达约40%,卧室采用凸窗结构等，均不能满足节能措施要求，与适用于豫北地区的DBJ41/T184-2017《河南省居住建筑节能设计标准（寒冷地区75%）》要求相比差距更大。

3.2散热器，也即暖气片选型参数偏差导致其散热量不足。依据《采暖散热器散热量测定方法》（GB/T13754-92），1998年建房期间采暖散热器是按照采暖供热给水温度95℃为依据选型，而至2013年开始供热，实际供暖二次网采用现行60-65℃的给水温度，由于实际采暖供热供水温度达不到95℃,所以15年前安装的暖气片功率小，采暖效果差。暖气片选型时一般按增加15～30%散热量考虑余量，确保采暖效果。见表1序号8、9、10数据比较，卫生间内新加装的柱状辐射散热器，散热量大，室内温度可达19℃，较同时段主卧、次卧室内温度高约2.5-3℃。

3.3装修物包裹暖气片阻碍散热，制约采暖效果。

3.4该小区原安装的暖气片采用的是壁挂型钢管翅片式辐射换热器，暖气片外壁的铁皮外壳阻碍散热，制约采暖效果。

3.5该小区原安装的暖气片直接紧贴墙壁固定，导致其散热量通过传导方式散失到墙壁，热量大量损失，采暖效果差。

3.6楼栋端头户型及周围邻居是否供暖也是导致房间内采暖效果差异的重要因素之一。该热用户户型正好是端头户，三楼西户，必然比同楼层中间户型多一面端墙散热点，且该户上下层住户均没有使用暖气，而该住户对门邻居，仅是东隔墙邻居没有使用暖气，上下层住户均在使用暖气，如此比较，房间6面墙，该户较对门邻居的房间多3面墙散失热量。同时段，该户室内温度15.6℃较对门邻居室内温度18.8℃低3.2℃，平均1面墙散热点影响室内温度约1℃。见表1序号8、9数据比较，位于最西端头的主卧温度15.9℃，较同时间位于中间的次卧室内温度16.6℃低0.7℃，差别1面墙散热点影响室内温度也是接近1℃。

3.7空气相对湿度等数据采集分析，室外相对湿度是导致房间内采暖效果差异的重要因素之一。对比表1序号11、12数据，同样室外温度-5℃时，室外湿度75%时室内温度高达17.8℃，室外湿度20%时室内温度仅14.6℃，相差3.2℃，较小的室外湿度对应较低的采暖室

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

内温度，室外湿度影响室内温度3℃左右。究其原因，房屋建筑墙体及周围空气中水分蒸发散失，室外相对湿度降低变小，而湿度降低变小的过程，正是水分气化蒸发过程带走大量热量，必然导致房屋建筑围护结构散热更多，最终导致室内温度更低。

4 改善采暖效果简易措施及效果

结合室温偏低原因分析，装修物包裹暖气片阻碍散热、楼栋端头户型、上下左右邻居没有供暖及室外相对湿度影响房间内采暖效果等因素人为无法改变，在暖气片更换之前，该热用户采取了以下改善采暖效果的简易措施：

4.1针对墙、门、窗等围护结构设计缺陷存在密封性能差问题，采取对门、窗加装塑料布、密封布帘等挡风、密封缝隙的措施。寻常百姓家，最直接的土办法，挂加厚棉质窗帘、门帘，对门窗加装塑料布等挡风、密封缝隙的措施。有条件时，可考虑改造双层窗户密封结构，门窗缝隙采取可靠密封措施，同时增加保温措施。后续，结合老旧小区功能提升改造等惠民工程的实施，可在改善建筑密封及保温性能方面多做工作，提高围护结构传热阻值。如，现有墙体外侧敷设高效保温层等措施。

4.2针对装修物包裹暖气片阻碍散热的问题，该用户拆除暖气片外侧装修腔体遮挡活动屏风，确保更好的散热采暖效果。曾经室内温度变化观察，约可以提升采暖室内温度0.5℃。因无法拆除现有装修物件，后续可以考虑在房间适当空间加装新型暖气片以提升采暖效果。

4.3拆除原暖气片外壁的铁皮外壳，避免阻碍散热，很好的提升了采暖效果。

4.4将原暖气片固定螺栓松开，确保换热器脱离墙壁，并与墙壁尽可能的保持最大的间隙，避免热量直接散失至墙壁，确保发挥暖气片最佳换热效果。

通过以上措施，见表1序号7，在外界环境温度约0℃时，达到17.8℃最高客厅室内温度记录。在外界环境温度约8℃时，见表1序号5，卫生间达到20.2℃最高室内温度记录，见表3序号12，客厅室内温度可达19.4℃。表1序号6，在较低的湿度27%情况下，外界环境温度约0℃时，室内温度17.2℃，依然较表1序号1外界环境温度约0℃时室内温度14.2℃高出约3℃，若是按照表1序号7、1相比，措施实施后，至少提升室内温度约3.5℃。

措施实施后，达到提升室内温度3–3.5℃的成效。

5 室外温度、相对湿度对室内温度影响度分析

表2 相同室外温度，不同相对湿度对应的室内温度统计表

序号	日期	时间	温度统计室内温度℃	温度统计室内湿度	室外天气室外温度℃	室外天气概况	室外天气室外湿度	室外温度
1	2020.12.17	19:44	19.1	50%	13.0	多云 2级	66%	8
2	2020.12.28	18:31	19	50.00%	11~2	东北 1级	81%	4
3	2020.12.29	07:08	19	51%	12.0	多云 2级	98%	5
4	2021.01.03	17:04	17.8	46%	6~-3	东北 1级	60%	3
5	2020.12.21	22:01	18	18.30%	11~-2	东北 2级	68%	3
6	2020.12.27	6:28	16.6	47%	13.0	东南 1级	88%	3
7	2020.12.29	07:07	17.8	50%	1~-6	东北 3级	98%	3
8	2020.12.31	15:25	18.3	40%	3~-3	西南 3级	27%	3
9	2021.01.03	22:07	17.8	47%	0~-3	东北 1级	85%	3
10	2021.01.08	18:13	15.1	40%	1~-10	西北 2级	14%	3
11	2020.12.30	18:28	17	37%	2~-8	西北 1级	26%	2
12	2021.01.05	18:30	17.3	38%	1~-5	东北 2级	34%	2

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

12	2021.01.05	19:41	17.3	49%	4/-5	东北1级	57%	2
13	2021.01.06	20:01	15.8	61%	4/-1	东北1级	59%	2
14	2021.01.06	20:36	16.3	46%	4/-7	东北2级	36%	2
15	2020.12.21	7:29	17.2	46%	10/-2	西南2级	80%	-2
16	2020.12.25	7:39	17.4	48%	10/-2	东风2级	90%	-2
17	2020.12.30	20:14	16.7	37%	2/-3	东风2级	41%	-2
18	2021.01.03	21:41	15.8	45%	4/-10	东北2级	39%	-2
19	2020.12.14	8:01	15.6	42%	2/-5	东风2级	36%	-3
20	2020.12.30	20:47	16.8	37%	2/-3	东北2级	41%	-3
21	2020.12.29	22:32	17.8	40%	2/-5	东风2级	75%	-5
22	2020.12.29	23:59	17.8	46%	2/-5	西风1级	77%	-5
23	2020.12.30	0:14	17.5	43%	2/-5	西风1级	77%	-5
24	2020.12.31	0:02	17	41%	3/-7	西风1级	43%	-5
25	2021.01.07	11:33	14.6	38.20%	0/-9	东风3级	20%	-5
26	2020.12.31	6:39	16.1	40%	3/-8	西南2级	54%	-8
27	2020.12.31	8:29	16.2	41.50%	3/-8	南风1级	52%	-8
28	2021.01.07	7:55	15.8	38%	0.125	东风4级	31%	-9
29	2021.01.08	7:05	14.1	39%	3/-9	西南1级	46%	9
30	2021.01.08	7:30	14.1	40%	3/-9	西南1级	51%	-9

表3 相同相对湿度，不同室外温度对应的室内温度统计表

序号	日期	时间	温湿度计室内温度℃	温湿度计室内湿度	墨迹天气室外温度℃	墨迹天气风速	墨迹天气室外湿度	室外温度
1	2020.12.14	12:15	17.2	42.50%	2/-5	东南2级	27%	0
2	2021.01.08	18:05	14.1	45.50%	0/-9	西南3级	27%	-1
3	2020.12.31	8:29	16.2	41.50%	3/-8	南风1级	52%	-8
4	2020.12.26	19:06	18.6	49%	12/0	东风2级	82%	7
5	2020.12.27	17:24	16.5	49%	12/0	南风2级	54%	12
6	2021.01.05	18:30	17.3	43%	4/-5	东风2级	54%	2
7	2020.12.26	20:27	18.3	45.50%	12/0	东风2级	60%	6
8	2021.01.03	17:04	17.9	46%	6/-3	东北2级	60%	5
9	2020.12.28	18:31	19	50.50%	10/-6	东北1级	63%	8
10	2020.12.24	20:37	18.1	48.50%	11/-2	西风2级	63%	4
11	2020.12.20	7:37	17.2	47%	9/-3	北风3级	63%	-1
12	2020.12.28	19:26	19.4	50.50%	11/-6	东风4级	65%	8
13	2021.01.03	22:07	17.9	47%	6/-3	东北2级	65%	3
14	2020.12.27	19:44	19.1	50%	12/0	东南2级	66%	8
15	2020.12.26	21:34	18.3	49%	12/0	西南2级	66%	6
16	2021.01.05	23:25	17.7	49%	4/-5	西北2级	66%	0
17	2020.12.25	22:17	19.3	50%	11/-5	东北3级	77%	6
18	2020.12.29	23:59	17.8	49%	2/-5	西风1级	77%	-5
19	2020.12.30	0:14	17.5	43%	2/-5	西风1级	77%	-5
20	2020.12.27	6:28	16.6	47%	13/0	东南1级	68%	3
21	2020.12.29	8:37	19.2	50%	1/-6	东北3级	86%	3
22	2020.12.26	6:26	19	50%	12/-1	东北2级	68%	1

见表2数据，对应相同室外温度，分析室外相对湿度对室内温度影响度，表3数据，相同室外相对湿度，分析室外温度参数对室内温度影响度，取得量化的数据。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

5.1大量采集数据为依据计算得出，室外湿度能够影响室内温度约3℃。

相同采暖供热一、二次网供回水参数，相同的室外风速、风向，相同室外温度，不同的室外湿度会导致室内温度偏差约3℃，对比表2序号7、10，更是高达4.1℃。

5.2大量采集数据为依据计算得出，相对湿度每变化1%影响室内温度约0.04℃。

对比表2序号7、10，相同室外温度3℃时，室外湿度14%的室内温度仅15.1℃，室外湿度88%室内温度达19.2℃，室内温度相差4.1℃，室外湿度相差74%，相对湿度1%影响室内温度为4.1/74=0.055℃。相同计算方式，可得，室外温度2℃，相对湿度1%影响室内温度为（17.3-16.3）/（57-26）=0.032℃；同室外温度-2℃，相对湿度1%影响室内温度为（17.4-15.8）/（90-29）=0.026℃；同室外温度-5℃，相对湿度1%影响室内温度为（17.8-14.6）/（77-20）=0.056℃。计算这几个室外温度点相对湿度1%影响室内温度的平均值为（0.055+0.032+0.026+0.056）/4=0.042℃。

5.3大量采集数据为依据计算得出，室外温度每变化1℃，影响室内温度约0.25℃。

对比表3序号1、2，相同室外湿度27%时，室外温度相差4℃，采暖室内温度相差17.2-14.4=2.8℃，计算室外温度每变化1℃，影响采暖室内温度=2.8/4=0.7℃，同样方法计算各室外湿度对应的室外温度每变化1℃，影响室内温度值，然后计算平均值得出，室外温度每变化1℃，影响室内温度约0.25℃。

6 结语

6.1采暖供热期室内温度不低于18℃是最基本标准，针对采暖季某小区同楼层同单元对门邻居室内温度高低差异进行原因分析，指出该小区老式建筑的墙、门、窗等围护结构设计缺陷存在密封及保温性能差、暖气片功率小、装修物包裹暖气片阻碍散热以及暖气片固定方式缺陷导致热量散失等问题，改善采暖效果简易措施值得借鉴，取得提升室内温度3-3.5℃的成效值得肯定。通过楼栋端头户型及周围邻居是否供暖对应室内温度差异量化分析，得出1面墙散热点影响室内温度约1℃的结论值得参考，提出室外相对湿度越小采暖室内温度越低的论点值得重视。

6.2正是该小区老式建筑及配套暖气片功率小采暖效果差，才有机会采集大量室内温度变化数据，通过大量采集到的数据为依据计算得出，室外湿度能够影响室内温度约3℃，相对湿度每变化1%影响室内温度约0.04℃以及室外温度每变化1℃，影响室内温度约0.25℃的量化的数据，为热力公司及相关节能公司后续精准调控终端热用户室内温度，提供更为科学全面的参数依据和调整手段，以更好提升供暖服务能力及能效，值得业内参考与借鉴。

作者简介

张黎明（1972-），男（汉族），河南省信阳市固始县人，本科，热能动力工程专业高级工程师，1990年参加工作，国电投南阳热电有限责任公司，多年从事发电厂汽机专业技术管理工作。通讯地址：河南省南阳市高新区百里奚路国电投南阳热电有限责任公司设备维护部，邮编473000，联系电话：0377-60182166，手机13503870735，电子邮件地址：liming9936@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

城市供热系统管网蓄热潜力分析

刁晨曦
（北京市热力集团有限责任公司朝一分公司）

摘要：随着社会和科技的发展，建筑的供热负荷随之产生了各种各样的变化，进而导致了供热系统产生了多个用热峰值与谷值。但热源运行最理想的运行工况却是一个稳定高效的区间。两者在供需关系上产生了一定的冲突，而在城市寸土寸金的环境中，建立大型的储热装置是一件很奢侈的事情，而供热系统原有配套供热管网的循环水有着相当的储热能力，取代一部分蓄热装置，本文从供热运行管理的方面对一次线储热及空调系统储热两个方向进行了供热管网的蓄热能力分析。

关键词：供热管网　调峰　储热　消峰填谷

一 现状

城镇供热系统的主要热负荷为采暖、通风、生活水及工业用热。而一般居住区的主要供热负荷为采暖，日供热负荷呈现于日间低、夜间高，类似于碗形的曲线。

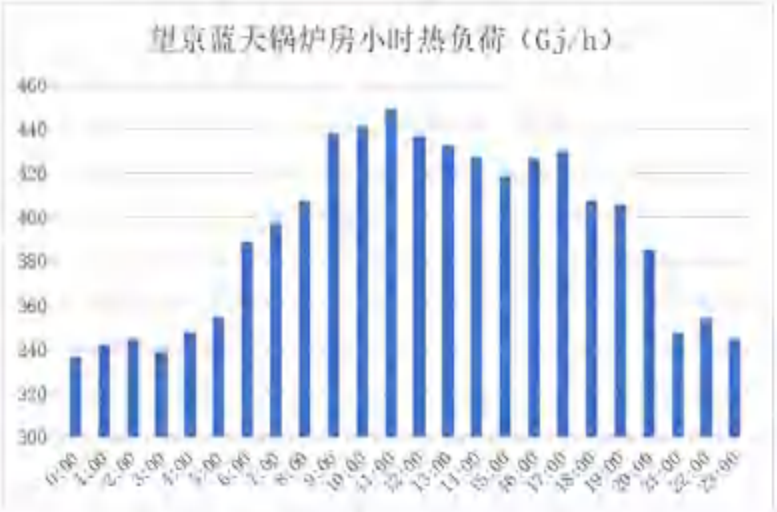
但随着经济发展，建筑形式、结构的不断更新换代，建筑的热负荷形式也随之发生了巨大的变化。新建楼宇风机盘管及新风用户根据其人员生活工作规律存在很大的周期性，导致其热力站热负荷存在周期性的波动，特别是大量利用风机盘管及新风的用办公用户出现集中情况后周期性波动影响极为严重，这对一次管网的水力平衡要求提出了极大地挑战，即用热峰值会引起末端居民用户产生“平压差”现象，用热谷值时热源出现大量超压泄水情况。间歇性的峰谷变化产生的水力冲击对管网安全也造成了不利的影响。

为了应对供热系统的各种峰谷波动，现阶段大多数工程主要是以外接蓄热罐为主，极少有从设计阶段即把供热管网自身储热能力即开发出来的方案，本文即通过对供热系统运行管理的角度上对城镇供热管网的储热潜力进行分析。

望京蓝天锅炉房供热建筑面积400万㎡，空调系统供热面积120㎡，主要负荷为采暖。由上图可清晰的看到，日间负荷可达夜间负荷的1.3倍，并伴随着多次的峰谷波动。较传统的纯散热器供热系统白天负荷低，夜间负荷高，负荷只取决于环境因素的负荷规律出现了颠覆式的变化，人因对供热负荷出现了明显的影响。

二 分析

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



城市供热作为城市能源规划里最重要的环节之一，供热系统相比于其他能源系统有着特殊的优势，供热管网中大量的循环水有着极大的蓄热潜力，可以为其他能源环节提供一定的缓冲空间。管网蓄热的主要环节包括一次市政热网及二次空调系统热网。利用传统的散热器采暖系统及建筑热惰性蓄热会大幅度的影响热用户的舒适的，故暂不做考虑。

1、市政热网蓄热

根据当前的城镇供热系统结构，市政一级热网有着最大的蓄热潜力，以望京蓝天锅炉房为例，供热面积400万㎡，根据实际工程经验，一级热网内储水量可达4000m³。如以40℃-60℃的温升计算，热网可蓄热336Gj，一次可储蓄极端天日热负荷3.6%的热量，所储蓄的热量可满足用热谷值阶段约1小时的用热需求。

且市政热网是热电站、区域锅炉房的热负荷输出对象，频繁的负荷波动对热源的生产也有很大的影响，热源锅炉频繁的调节负荷，导致热源工况不稳定，燃料燃烧不充分，大幅的降低热源燃烧效率。在独立核算机制下，降低市政热网温度可极大的减小热网损耗降低，热源效率提升，但过度追求热源温度降低会导致热力站换热效率下降，热网面对热力站负荷激增甚至区域热负荷激增的情况应对能力不足特别是大型的管网，输送距离过长，反应时间往往以天计。

特别是在智慧城市供热系统“源网荷储”的巨系统联动机制下，市政热网蓄热是一个打破原有的独立运行机制，寻求一个相互弥补、耦合、联动的切合点。

2、空调系统蓄热

空调供热系统相较于传统的散热器供热系统用热更加灵活，进而带来了受人为因素影响的集中用热。一般从每日4前后时起部分商户开始备货，至6前后时部分商户开始上班，及9时前后办公用户上班会出现2次供热负荷大幅增加，至11左右时达到每日用热峰值。峰值后至每日气温最高，建筑负荷最低的15时，达到第一个谷值后建筑热负荷开始缓步上升，到17时左右，达到第二个峰值，并在18时及21时因用户下班分别出现2次大幅度的负荷下降，最终达到全天的用热谷值。整体来看，热网负荷每日存在2次峰值、2次谷值，并有2次大幅度负荷上升和2次大幅度的负荷下降。且在用热大幅上升期间，热源的提升速度，热网的响应能力通常不能满足需求，供热效果极差，而在用热谷值，热源负荷下降。每日热网波动明显，引起锅炉效率降

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

低，并且频繁的补水泄水。

这种剧烈的波动对整个供热系统的安全稳定运行有着极大的影响，对热源的响应能力产生了极大的考验。而空调系统对于散热器系统有着独特的特点—空调系统实际使用的是风机盘管或新风机组二次换热换出的热风，二次系统的循环水在风机盘管和新风机组停用是，几乎不参与散热。

通过利用这种特点，完全可以利用空调系统的二次管网进行蓄热。以空调系统管网储热为手段，以降低供热系统负荷为目的。通过对非居民热力站空调系统在用热谷值时进行提前升温蓄热（将二次循环水温度提升至55℃），在非居民用热达到峰值时，减小完成蓄热热力站一次热源流量，非居民热力站以管网蓄热为主热源，一次网热源作为补充。一次网全力为其他热力站供热。

根据每日2次峰值及2次谷值的特点，空调系统可完成2次储热及用热。根据暖通空调的设计估算方式空调系统存水量以1L/㎡计算，蓄热温度及空调系统运行温度为55/40℃。每万平米蓄热量为0.6561GJ。以望京蓝天锅炉房为例，共计120万㎡的空调系统供热面积，预计一次可储热78Gj。基本可满足建筑自身1小时的热量需求。

以望京蓝天锅炉房为例，合理的利用管网储热能力每次最大可储热414Gj热量，约为极端天气下每日供热量的4.4%。如进行第二次峰值储热热或其他因环境因素引起的峰谷值储热，还可进一步提升管网的总储热量。可有效的进行消峰填谷，并降低集中用热导致局部热负荷骤升带来的管网整体负荷波动。

当前阶段的城镇供热管网储热可通过管理手段进行实现，通过值守人员的定期调整或是简单自控设备的时段设定来实现。下一步则需要通过对管网进行模拟计算，计算出在什么时候，什么位置，储多少热，而又要在什么时候释放出来，以什么速率去储，以什么速率去释放并通过物联网的手段去实现它，实现数据化、信息化。

三 结论

城镇供热管网在储热上有着极大的潜力，而且只需要简单的管理上的改变即可有效的利用这种储热能力，试验的成本颇低。在纯粹的城镇供热系统上，这种储热可以利用管网蓄热的柔性来耦合设备运行的刚性进而带来系统的稳定性，但会导致供热系统的能耗有一定程度上的上升。而综合考虑热源锅炉效率，一个稳定的外网工况带来的稳定的锅炉高效区稳定运行却能极大的降低因锅炉频繁启停、加减负荷或是直接工况调整至低效区等情况导致的锅炉效率下降，特别是燃料成本远高于电力成本的地区。当然具体的成本分析还需要综合各种因素进行进一步的核算，并进行工程实际的验证。而且这种蓄热方式使得供热系统有更大的弹性，降低计划外的环境、人行为变化带来的波动给热用户更好的体验。最后，通过管网本身的蓄热能力，提升供热系统的平均工况，但大幅降低系统用热高峰和用热低谷两个极端工况的波动范围，并使得管网运行更加平滑，极大的增强了供热系统的安全性和稳定性。

参考文献

望京蓝天锅炉房DCS运行记录

望京蓝天锅炉房能耗台账

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

民用建筑暖通空调设计技术措施（第二版）
城镇供热管网设计标准CJJ34-2010
城镇供热管网工程施工及验收规范CJJ28-2014

作者简介

刁晨曦，热能工程师，现工作于北京市热力集团有限责任公司朝阳第一分公司东湖供热服务站，主要从事于区域锅炉房的运行管理。单位地址：北京市朝阳区望京西园二区220号，邮编：100102，联系电话15011430753，Email地址15011430753@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

低温多效海水淡化装置离子阱在线清洗控制技术的应用研究

邢兆强　依庆文　周永利　杨德久　张文帅
（天津国投津能发电有限公司　天津　300480）

摘要：本研究针对低温多效海水淡化离子阱长期运行过程产生的腐蚀污堵问题，采用XRF分析了填料铝环垢样的元素组成，设计现场在线清洗方案，通过监测铝环的表面形貌分析、溶垢率及腐蚀速率对比以及清洗前后对Fe3+的去除率等方法对清洗效果进行了综合评估。结果表明：采用质量浓度为2%的氨基磺酸为清洗剂进行循环清洗过程，，能够有效去除离子阱铝环表面垢样，溶垢率达80%以上，且清洗后的离子阱处理Fe3+的效率显著提高，去除率可提高4倍。

关键词：海水淡化　离子阱　在线清洗

一、研究背景

天津国投津能发电有限公司低温多效海水淡化（MED）设备的生产工艺是采用以色列IDE公司热法低温多效海水淡化[1-2]技术，装设的每套海水淡化设备由蒸发器组成，蒸发器采用铝（5052）材质换热管。为防止海水中Fe3+离子及其他腐蚀性离子发生置换反应，造成换热管壁腐蚀[3-5]穿孔无法使用，长此以往将导致低温多效海水蒸发器无法投入生产运行状态或大大降低淡化水生产效率。在低温多效海水淡化（MED）设备原海水侧前置参数性能匹配的离子阱，但由于热法海水淡化针对海水预处理系统原海水出水浊度要求较低，水中大量的悬浮物、黏泥附着在铝环表面，严重阻碍铝环与海水接触并阻碍发生置换反应，导致无法起到保护后续蒸发器换热管的目的。

目前通过人工形式拆除离子阱并将铝环分批次外运至场地逐步采用压力水枪清洗，清洗完毕后采用拆卸过程相反方式对离子阱铝环进行回装并试运，整个清洗过程实施困难较大，且存在较大施工安全风险及诸多不可控因素。近年来，国内逐渐开始针对低温多效海水淡化装置蒸发器换热管的清洗技术的工程应用[6-9]，本研究团队成功完成了国投北疆电厂低温多效海水淡化铝合金换热管的

化学清洗技术及工程应用，结合蒸发器换热管酸洗的工程经验，制定了针对国投北疆电厂

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

海水预处理离子阱装置特点的在线清洗方案，并取得了预期效果。

二、研究内容

本次研究的目的在于解决了海水淡化装置铝合金换热管因海水中含有微量腐蚀作用的Fe3+及其他腐蚀性金属离子，接触海水淡化装置铝合金换热管后发生置换反应造成换热管束的局部腐蚀穿孔，导致海水淡化装置效体蒸发器淡化水生产效率降低的技术问题。而提出的一种低温多效海水淡化装置前置离子阱在线清洗控制技术的应用研究，该技术方案能将海水中腐蚀性金属离子的浓度降低到了可忽略的程度，有效保护铝合金换热管不受这样的离子攻击产生动电流腐蚀，保障海淡装置安全稳定运行。

(1)垢样分析方法

现场获取离子阱装置内铝环填料，采集铝环表面垢样，置于恒温干燥箱内烘干，105℃，待质量恒定，取出置于研钵内充分研磨。采用Axiosm X射线荧光光谱仪（XRF）对样品化学元素组成进行检测分析。

(2)清洗介质选择

采用静态溶垢试验和腐蚀失重试验进行清洗介质选择。其中，静态溶垢试验采用清洗介质浓度为4%的溶液在500mL 烧杯中浸泡烘干的铝环垢样（20g），浸泡时间为10h，然后过滤试验溶液，将残留垢样烘干后称重，溶垢率采用失重法进行计算，详见公式：

$$\eta=(m0-m1)/m0 \times 100\%$$

式中：η为溶垢率；m0为试验前垢样质量，g；m1为试验后垢样质量，g。

(3)清洗方案制定

通过搭建离子阱循环清洗系统（见图1），通过循环泵将配制好的特定浓度的清洗溶液在

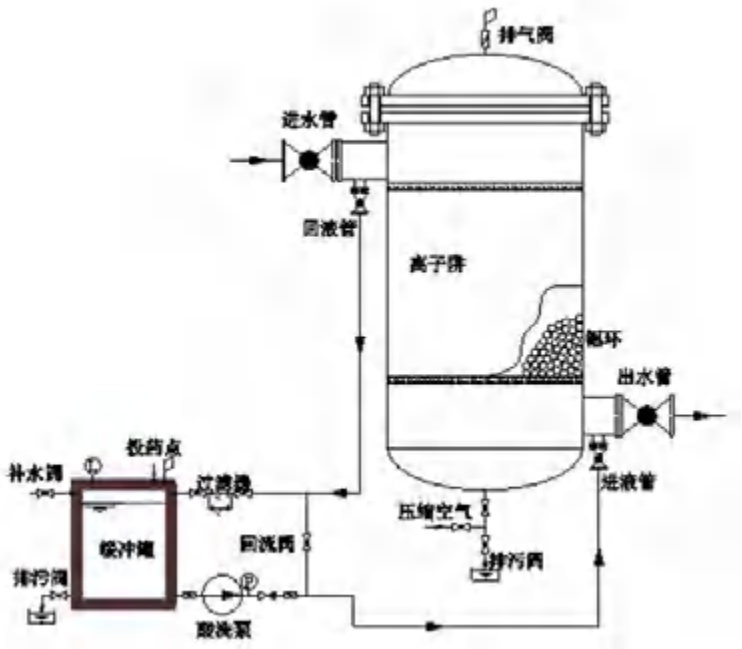


图1 离子阱化学清洗系统示意图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

离子阱和清洗剂存储水箱之间往复循环，离子阱罐体底部设置曝气装置，加快清洗溶液在罐体内的流动性和均匀性，以达到清洗效果。清洗期间分别对系统的pH、钙、镁、铝离子浓度进行了实时监测，用于判断清洗终点并根据系统清洗效果及时调整清洗方案。与此同时，在系统清洗前与离子阱进口处布置铝合金腐蚀监测挂片，对系统铝环的腐蚀程度进行考察。最后，检测离子阱清洗前后，预处理海水中Fe3+的浓度，计算去除率，用于评价清洗效果。

(4) 清洗工艺流程

首先，按照图1所示搭建好离子阱化学清洗循环系统，检查阀门、循环泵等装置配件的状态，放置好清洗效果监测铝环，确认各取样口能够顺利取样，最后按照以下程序进行离子阱的循环清洗：

① 清水循环冲洗。将清洗水罐注满清水，开启循环泵，进行2~4 小时的清水冲洗。清洗期间，每小时排出一半清洗废水，并补充同样的清水。清水清洗结束后，排空清洗水罐。

② 氨基磺酸清洗。在清洗水箱配置2%浓度的氨基磺酸清洗剂，开启循环泵和并通入压缩空气，进行循环清洗并曝气。

③ 清洗过程中监测。每小时检测一次清洗水箱中酸洗溶液的pH、钙离子、镁离子和铝离子含量：当pH 升高超过2.0 时，适当补充氨基磺酸，调节酸洗溶液的pH 重新降至初始水平；当钙离子和镁离子浓度不再明显上升时，可认为垢样基本全部被溶解，确认清洗终点；当铝离子浓度增加幅度明显超过钙离子和镁离子时，可认为此阶段主要以清洗液与铝环发生反应，应当提前停止清洗过程。

④ 待清洗结束后，将废液排放至厂区定点废液池，通过澄清、调节pH 及等相关工艺至达到排放标准。

⑤ 清水二次冲洗。酸洗结束后，再次利用清水对系统内的残余清洗溶液进行冲洗，清洗操作与①相同，本次残余废液同样排入废液池，处理方式与④相同。

(5)清洗过程监督

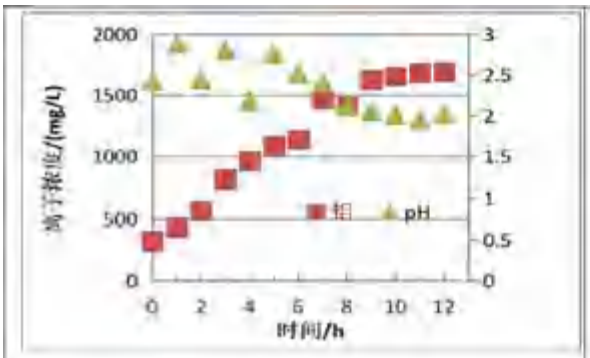


图2 pH 和铝离子浓度的变化图

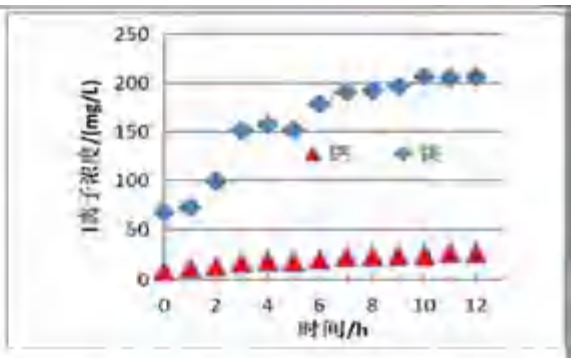


图3 镁离子和钙离子浓度的变化图

通过对离子阱清洗期间各项监测指标的变化情况进行监督，其中，图2为pH 和铝离子浓度的变化规律，图3为镁离子和钙离子浓度的变化规律。由图可知，清洗前期，随着铝垢的溶解

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

消耗氨基磺酸以及氨基磺酸的适时补充，使得pH 处于波动状态，与此同时，表征铝垢溶解程度的铝离子、镁离子和钙离子浓度均显现直线上升状态，说明清洗效果比较明显。10 小时之后，镁离子和钙离子浓度基本趋于稳定，而铝离子浓度仍表现出一定的增长趋势，根据垢样成分组成，可以推测，此阶段铝环表面的垢样已经基本清洗干净，又考虑到铝离子浓度并未出现明显的上升，说明清洗溶液对铝环的腐蚀不严重，所以继续使用系统中的清洗溶液进行循环冲洗，清洗指标稳定后结束。

三、实施效果

实施过程分别通过监测铝环和离子阱运行前后的Fe3+处理效率对清洗效果进行评价。图4为监测铝环清洗前后的对比图，由照片可以看出，此次清洗效果比较理想，铝环表面黏附的铝垢清洗比较彻底，由于铝环在长期运行中遭受到一定的腐蚀，清洗后的铝环表面能够看到明显的腐蚀坑。通过铝环清洗前后的三维视频显微图可以看出，清洗前，由于垢层的覆盖，表面粗糙度较高，清洗后则整体出比较平整，但仍存在局部的突起，说明铝环表面仍存在极其微量垢层，但这并不影响总体的清洗效果。

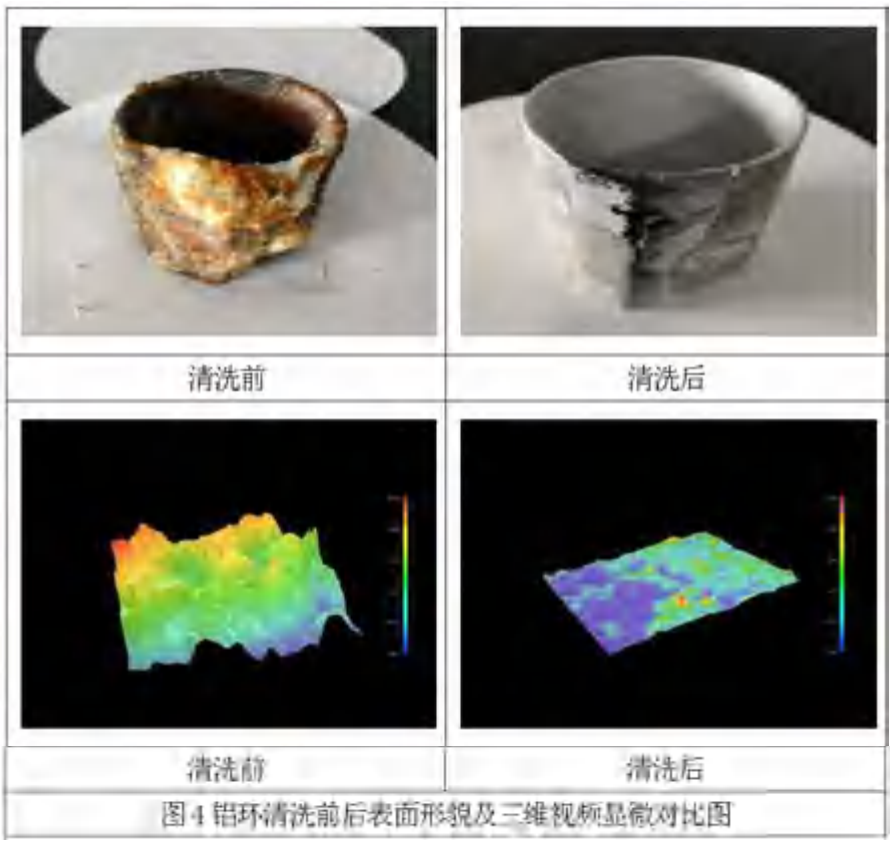


图4 铝环清洗前后表面形貌及三维视频显微对比图

通过监测铝环清洗前后溶垢率和腐蚀速率的对比情况，由图5可以看出，此次清洗效果比较理想，顶部和底部监测铝环的溶垢率均达到了80%以上，由于酸洗溶液在离子阱是上进下出，故顶部的清洗效果好于底部。两者的腐蚀速率分别为0.41 g•m−2•h−1和0.31 g•m−2•h−1，均远低于《HG/T 2387−2007工业设备化学清洗质量标准》对于铝及铝合金材料腐蚀速率低于

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2 g•m−2•h−1 的标准，说明本次清洗的时间设置合理，既满足了清洗要求，也控制了铝环的腐蚀。

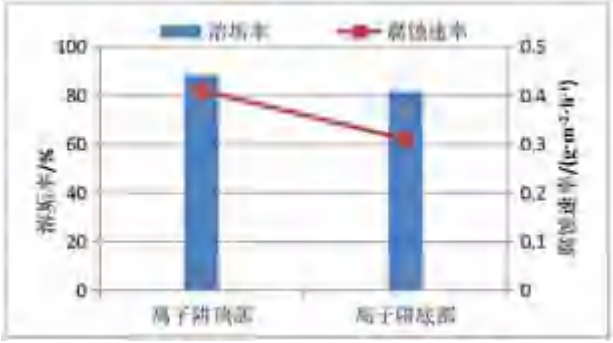


图5 酸洗监测铝环溶垢率和腐蚀速率监测结果

四、效益评估

低温多效海水淡化装置前置离子阱在线清洗控制技术的效益评估主要体现在经济效益评估和设备性能评估两个方面。

（一）直接经济效益评估

本次研究成果有效避免海水淡化装置换热管的局部腐蚀穿孔而导致水质异常，且实施改造过程简单，时间短，人工、材料、备件消耗费用低，综合评价效果显著。首年核减活动实施成本仍可节约12.2万元/列海淡，折合现有装机8列2.5万吨/天海淡装置本年度可节约维护成本97.6万元/年。

根据海水淡化装置性能试验效果数据，项目实施后单列海淡产水量平均增加943吨/天，合计单列海淡每年增加产水量34.42万吨，按照目前自来水4.9元/吨的价格计算，单列海淡增产淡水价值168.66万元/年。目前年平均运行海淡3列海淡，则可累计增产淡水价值505.97万元/年。

综上所述，本研究直接经济效益约为603.57万元/年。

（二）综合试验效益评估

通过离子阱对Fe3+的处理效果对本次清洗进行总体评价，由图6可知，通过对离子阱进行清洗，系统对Fe3+的去除率由8%提升到了48%，去除效率提升了4 倍，效果明显，使得经过离子阱处理后的Fe3+的浓度降至40 μg/L 以下，显著降低了蒸发器内换热管被高价位金属的腐蚀风险。

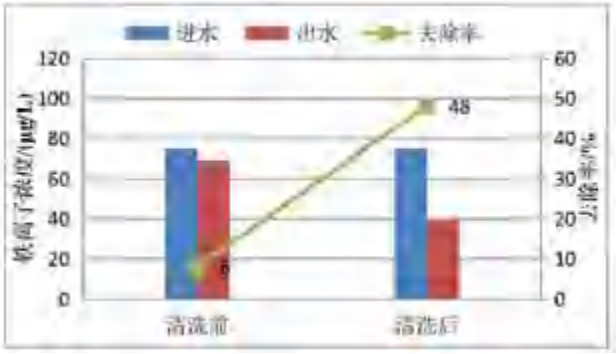


图6 离子阱清洗前后对铁离子的去除效果对比图

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

五、结论与建议

本项目涉及低温多效海水淡化装置前置离子阱在线清洗控制技术的应用研究，该技术方案能将海水中腐蚀性金属离子的浓度降低到了可忽略的程度，有效保护铝合金换热管不受这样的离子攻击产生动电流腐蚀，并实现连续在线式反洗过程。现经实验、分析、计算得出以下结论：

（1）离子阱铝环表面附着垢样主要以铝的腐蚀产物为主，夹杂部分海水沉积垢、泥沙以及絮凝剂的疏松状混合垢样。

（2）离子阱的在线清洗过程，清洗时间约为10小时，系统pH、Ca2+和Mg2+浓度基本维持不变，说明铝环表面垢样基本清洗干净，同时Al3+含量未出现大幅增加，清洗剂腐蚀控制较为稳定。

（3）通过监测铝环溶垢率达到80%以上，腐蚀速率均远低于《HG/T 2387-2007工业设备化学清洗质量标准》对于铝及铝合金材料腐蚀速率要求，对Fe3+的去除率由8%提升到了48%，去除效率提升了4 倍，综合效果显著。

（4）根据离子阱的运行规律，合理调整运行方式控制逻辑，综合考虑运行周期、清洗频率、清洗时长、含量监测和终点判断及能源消耗等因素比较合理。

参考文献

[1]尹建华,吕庆春,阮国岭.低温多效蒸馏海水淡化技术［M].海洋技术, 2002 年,第21卷,第4期:22～26.

[2]孙育文,周军.低温多效蒸馏法海水淡化技术的应用[J].华电技术,2009年第31卷第7期:65-67.

[3] 王昆雨. 离子阱海水前处理工艺对铝合金换热管腐蚀特性影响[D]. 辽宁：大连理工大学，2013.

[4]唐智新,吴礼云等.低温多效蒸馏海水淡化蒸发器结垢原因分析及清洗[J]. 冶金动力. 2015(09).

[5] 顾志忙, 卢基林, 陶映初. 铝缓蚀剂研究进展[J]. 化学清洗,1997, 13(2）： 31-32

[6] 聂鑫, 田利. 盐酸清洗在低温多效蒸馏海水淡化装置中的应用[J]. 电站辅机, 2011, 32(3）： 32-35.

[7] 聂鑫, 田利. 低温多效海水淡化装置的酸洗[J]. 清洗世界,2011, 27(11）： 6-9.

[8] 郝振. 热力发电厂换热器在线化学清洗技术研究与应用[J]. 陕西电力, 2014, 42(6）：81-83.

[9]李玉才, 张世文, 陈仲祥, 等. 高效铝换热器酸洗缓蚀剂的研制[J]. 河北化工, 2006, 29(6): 22-23.

作者简介

邢兆强，工程师，研究方向：热、电、水联产燃煤发电机组智能控制技术综合利用，联系电话13389976993，邮箱XingZhaoQiang@126.com，工作单位：天津国投津能发电有限公司，单位地址：天津市滨海新区汉沽汉南路266号，邮编300480。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

高背压循环水供热与高低旁联合供热在辅助调峰中的应用

汪永生
（京能（赤峰）能源发展有限公司）

摘要：东北电力辅助服务市场自启动以来，在促进清洁能源消纳、减少碳排放方面做出了重要贡献，各火电机组根据自身实际情况进行深度调峰灵活性改造，在供热期既保证了供热，又达到了调峰的目的。本文以京能（赤峰）能源发展有限公司#1机组高背压循环水供热及两台机组高低旁路改造后联合供热进行深度调峰为实列，阐述150MW汽轮机供热灵活性改造在深度调峰中的应用及经济性分析。

关键词：高背压 循环水供热 高低压旁路联合供热 辅助调峰 节能减排

京能（赤峰）能源发展有限公司现有2台型号为CC135/N150-13.24/535/535/0.981/0.29超高压中间再热双抽凝汽式汽轮机，配2×480t/h循环流化床锅炉，设计工业蒸汽供汽能力70t/h、采暖供热能力220MW。

一、供热改造背景

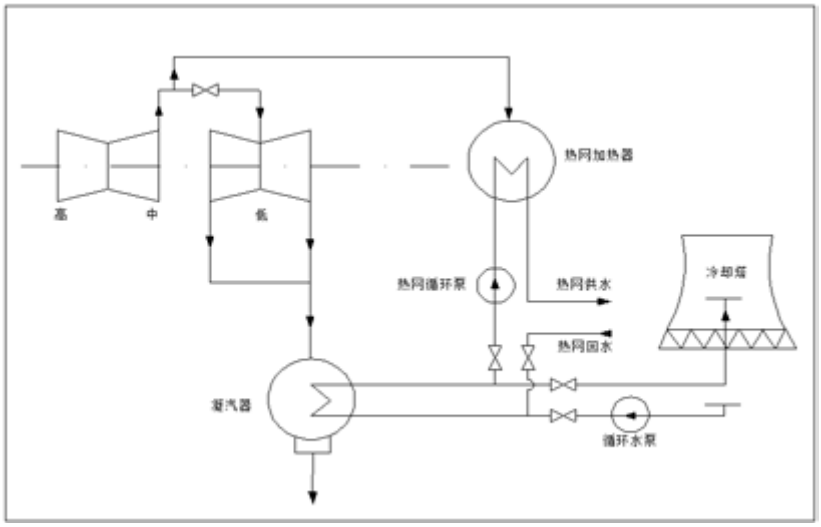
京能（赤峰）能源发展有限公司在2015年为提高采暖供热量，以满足城市快速发展所需的采暖用热，对#1机组进行了高背压循环水供热改造，采暖供热能力提高80MW，增加供热面积230万平方米，全厂采暖总供热能力达到300MW。2019年为了减少供热期东北电网调峰考核，对两台机组30%B-MCR进行改造，目的是在深度调峰工况下，工业蒸汽压力能满足用户需要。旁路系统改造完毕后，调峰时双机总负荷能降至25%额定负荷，#2机低旁供工业蒸汽60t/h，供汽压力0.70MPa，温度300℃，但双机采暖供热能力只有180MW，此调峰运行方式只能适用于供热初末期，采暖需热量相对较小的时期。在每年6个月的采暖期中，至少2.5个月还需要承担电网公司调峰考核，严重影响公司经济效益。2020年公司在#2机组新增一套50%B-MCR调峰旁路，投运后双机负荷降至31%额定负荷，#2机低旁供60t/h的工业供汽，双机采暖供热能力达到300MW，实现全供热期都具备调峰能力。

二、供热改造方案

1. #1机组高背压循环水供热

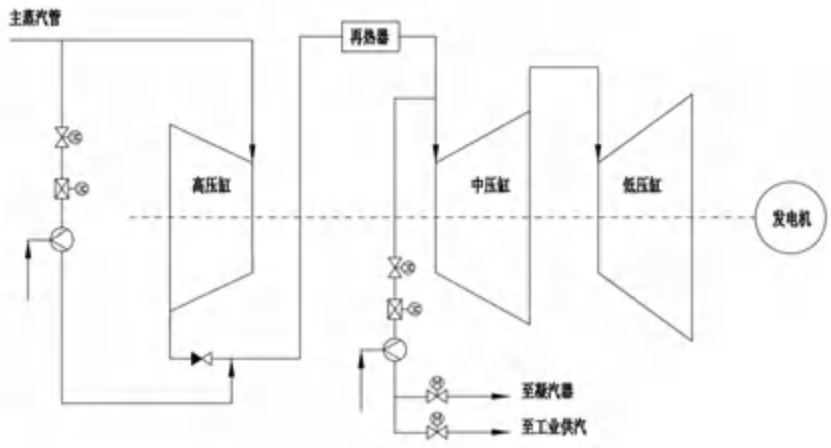
微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

将凝汽器内的循环水切换为热网循环水，利用汽轮机排汽对凝汽器内的热网循环水进行加热。凝汽器背压由5～7kPa左右升至30～38kPa[1]，低压缸排汽温度由30～40℃升至69～76℃（背压对应的饱和温度）。经过凝汽器的第一次加热，热网循环水回水温度由44℃提升至68～75℃，然后经热网循环泵升压后送入首站热网加热器，利用采暖抽汽将热网供水温度进一步加热后向一次热网供热[2]。供热期#1机组循环水泵停运，#2机循环水供#1机辅机冷却水，#1机冷源损失为零，极大的提高了机组热效率，机组发电煤耗较改造前降低90g/kWh。



2. 旁路供工业蒸汽改造

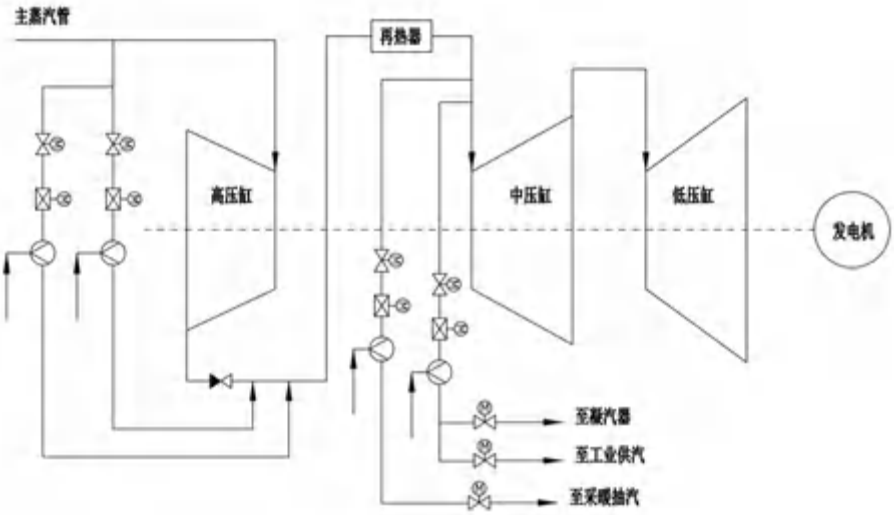
在低旁出口至三级减温器之间加装一台型号为Q967Y-25C DN600高温电动球阀，作为电动隔离门。电动隔离门前设置异径三通，将新增电动隔离门至低旁出口间管材由原Q235A螺旋缝管升级为#20钢无缝管，从新增三通处铺设管道引接至工业抽汽母管，加装一台型号为Q967Y-25C DN400高温电动球阀，并增设疏水点，设计供工业抽汽流量60t/h。高旁及旁路系统其它管道、设备不作改动。深度调峰时，高低旁路同时投运，供工业蒸汽。此改造项目改动设备少，投资小，投运简单，最大的优点是高低旁路流量匹配，不影响汽轮机的安全运行，同时保证锅炉再热蒸汽流量，有效防止了再热器超温现象的发生。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3. #2机组新增旁路改造

在#2机组新增一路50%B-MCR调峰旁路，新增一路对应38%B-MCR高旁进汽量的低压旁路，供采暖蒸汽。原低旁供工业蒸汽对应的高旁进汽量为12%B-MCR。原30%B-MCR启动高旁只作为机组启动时使用或者备用。深度调峰时，#2炉负荷达到93%B-MCR，#2机电负荷降至38%额定负荷，采暖供热达到153MW，工业蒸汽供汽60t/h；#1机高背压循环水供热147MW，双机能够满足调峰供热需求。



三、调峰时双机运行调整方案

供热期正常运行时，#1机组高背压运行循环水供热，同时带工业蒸汽。进入供热中期，热网回水温度44-50℃，热网供水量稳定在5250t/h，凝汽器最高出水温度控制不超过75℃，#1机高背压供热量189.2-152.6MW，热网回水温度越高，高背压供热量越少，低压缸进汽量相应减少，机组负荷也降低。为了增加#1机组电负荷，供热期基本都是由#1机组供工业蒸汽，这样#1机组既不影响电负荷，又不影响热负荷。#2机组根据采暖供热量的需要，调整采暖抽汽量，满足城市供热需要。如果#1机工业蒸汽供汽压力不足，则#2机组进行适当补充，保证工业蒸汽母管压力。

机组进入深度调峰时，首先#1机组开始减负荷，#2机组稳定锅炉正常出力。当工业蒸汽压力因#1机组负荷降低而降低后，#2机组开始投入原低旁至工业蒸汽供汽，维持工业蒸汽母管压力稳定。同时#2机组根据供热压力比（调节级压力与中压缸第三级后压力之比，用来反映高中压缸进汽量的一个参数），缓慢投入新增高旁，控制供热压力比在正常范围内。#1机组负荷降至85MW后[3]，全停工业蒸汽供汽，全部由#2机原低旁供出。#1机组负荷降至60MW后，依次投运低旁、高旁，减温减压后的蒸汽进入凝汽器，加热热网循环水回水，保证高背压供热量，#1机组负荷可降至20-23%额定负荷。#2机组投运完工业供汽后，开始投入新增低旁至采暖供汽，同时关小汽轮机采暖抽汽，根据供热压力比开大新增高旁，同时手动关小中压缸进汽调门，提高再热蒸汽压力，减少中压缸进汽量，但中压缸进汽调门开度不得小于30%，否则可能会引起中压主汽门、再热主蒸汽管道等发生晃动。#2机组电负荷降至60MW时，全停采暖抽

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

汽。#2机组新增高旁全部投运后，根据高压缸排汽温度、采暖供热量、主蒸汽压力，增加锅炉给煤量。因#2机旁路投运，高旁蒸汽减温减压后进入锅炉吸热，同时给水温度大幅度降低，导致锅炉出力降低，所以必须适当增加给煤量，才能维持调峰投运前的主蒸汽流量。

机组退出深度调峰时，#1机组依次减小高低旁出力，增加锅炉给煤量，提高机组负荷。当#1机组电负荷加至60MW时，全停高低旁；当电负荷加至90MW时，将工业蒸汽供汽由#2机组低旁切换至#1机组三抽供汽，然后根据供热量，将机组负荷增加至需要值。#2机组原低旁供工业蒸汽供汽停运过程中，根据供热压力比，逐渐减小新增高旁出力，同时逐渐全开中压缸进汽调门。当#2机组电负荷加至60MW以上时，逐渐投入汽轮机采暖抽汽。#2机组新增高旁及新增低旁退出过程中，根据机组负荷变化，可适当减少锅炉给煤量，防止锅炉超压，旁路系统全部退出后，将机组负荷增加至需要值。

四、调峰收益

利用旁路系统调峰，发电煤耗明显增加，发电量明显减少，但通过调峰补偿与减少耗煤量，经济效益非常可观，#2机原旁路调峰与扩容改造旁路后主要指标如下：

序号	项目	单位	改造前	改造后
1	#2 机组发电量	kWh/a	2.401×10^{8}	1.734×10^{8}
2	#2 机组平均发电标准煤耗率	g/kWh	296.48	341.27
3	#2 机组发电厂用电率	%	6.978	7.288
4	#2 机组供热厂用电率	%	6.247	9.731
5	#2 机组综合厂用电率	%	13.225	17.019
6	#2 机组工业抽汽供热量	GJ	9.145×10^{5}	9.145×10^{5}
7	#2 机组采暖抽汽供热量	GJ	1.692×10^{6}	1.879×10^{6}
8	#2 机组平均供热标准煤耗率	kg/GJ	39.66	39.66
9	#2 机组耗标煤量	tce/a	232784.5	133458.5
10	调峰补贴电量（一档）	kWh	1.647×10^{7}	1.647×10^{7}
11	调峰补贴电量（二档）	kWh	5.857×10^{6}	2.316×10^{7}
12	标准煤价（含税）	元/t	475.8	
13	上网电价（含税）	元/MWh	308.5	
14	热价（含税）	元/GJ	21.28	

根据东北电网调峰管理细则，热电机组在采暖期40%<负荷率≤50%为第一档，报价上限0.4元/kWh；热电机组在采暖期负荷率≤40%，报价上限1.0元/kWh。

供热期#2机组旁路系统扩容改造后较改造前发电量减少64.3GWh，供热量增加18.7 万GJ，节约标煤量4592.21 吨，经计算可增加收益533万元。#2机组旁路系统扩容改造总费用约600万元，两个供热期完全可以回收投资成本。#2机组通过扩容后的旁路系统调峰，每年可以为企业增加利润1900万元，双机同时调峰可以为企业增加利润4500万元。

五、结束语

高背压运行循环水供热与高低旁联合供热参与电网调峰非常匹配，汽轮机负荷降低，但锅

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

炉负荷可以达到40%B-MCR以上，对锅炉燃烧以及氮氧化合物排放的控制非常有利。旁路系统扩容改造，投资少，见效快，适合供热机组的调峰灵活性改造。

参考文献

[1] 黄树红.汽轮机原理，2008

[2] 崔海虹. 热电厂汽轮机低真空循环水供热改造及节能分析[J]. 区域供热，2011（3）

[3] 哈尔滨汽轮机厂.汽轮机启动运行说明，2008

作者简介

汪永生，职务：汽轮机运行专工；职称：工程师； Email：cfnywys@163.com；单位地址：内蒙古赤峰市红山区红庙子镇西水地；电话：15048680190

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

海水脱硫热电联产机组对海洋生态环境累积影响研究

王刚　刘注显　吕蒙　王卓
（华能国际电力股份有限公司大连电厂）

摘要：华能大连电厂一、二期工程4×350MW机组采用先进海水脱硫工艺，随着国家对水污染防治工作的日益重视和监管日趋严格，为降低环保风险，切实了解脱硫海水排放对周边海域是否存在潜在影响，电厂通过为期一年的脱硫海水排放海域监测调查工作，掌握脱硫海水排放对周边海域的影响。在此期间，通过周边海域海水水质跟踪监测结果分析，使企业及时了解脱硫海水外排入海对受纳海域水质的影响情况，也为国内同类型采取海水脱硫电厂提供参考和借鉴。

关键词：脱硫海水　排放海域　水质　累计影响

前 言

华能国际电力股份有限公司大连电厂（以下简称“华能大连电厂”）隶属于华能国际电力股份有限公司，位于大连市甘井子区大连湾和尚岛，距大连市约20km，距大连港6.9km。

现已建成4×350MW火力发电机组，总装机容量1400MW，电厂分两期建成，两期机组分别于1988年和1998年正式投产。为更好的保护环境，完成华能集团总体SO2减排指标，华能大连电厂对一、二期工程4×350MW机组实施了烟气海水脱硫工艺。

为了解华能大连电厂海水脱硫工艺产生的脱硫海水对所在地区周边海域的影响，华能大连电厂开展了为期一年的脱硫海水排放海域监测调查工作，并组织了此次调查及周边海域的环境监测工作，以掌握脱硫海水排放对周边海域的影响。在此期间，通过周边海域海水水质跟踪监测结果分析，使企业及时了解脱硫海水外排入海对受纳海域水质的影响情况。

1.概述

1.1调查原则

本次调查坚持以下原则：

（1）客观性原则

根据脱硫海域海水排放污染物排放实际，以及第三方环境监测数据，客观、真实反映污染

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

源现状和排放水平。

（2）突出重点原则

对进入华能大连电厂脱硫海水排放海域及周边污染物排放标准规定的监测因子进行调查。

（3）实用性原则

调查方法和调查成果具有针对性、实用性和可操作性。

1.2调查方法

主要采用现场调研、水质监测两种调查方法。在资料收集的基础上根据排污口现状、进行现场调查和监测。

（1）调查华能大连电厂脱硫排污口污染源总体情况；

（2）调查海域走势水质淤积处进行监测；

（3）调查泊石湾海滨浴场进行监测；

（4）分别从大潮期和小潮期进行调查与监测，从而得到充分的具有代表性监测数据。

1.3调查程序

基于调查目的和已有的调查资料，本次调查思路重点是通过资料收集、现场调查及取样监测分析，最终完成华能大连电厂脱硫海水排放对周边海域影响的调查工作。

2.调查内容

按照国家标准规范，对华能大连电厂脱硫海水排放海域进行海域环境调查，同时，制定详细的调查监测方案，通过对监测数据进行整理分析，最终编制调查报告。

2.1调查范围

华能大连电厂位于大连市甘井子区大连湾和尚岛，距大连市约20km，距大连港6.9km。根据华能大连电厂脱硫海水的排放口位置，及周边受纳海域的情况，确定调查范围，调查范围见图2-1。

图2-1 华能大连电厂脱硫海水排放海域环境调查范围示意图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.2调查点位

2.2.1布点原则

通过现场勘察，掌握脱硫海水排放口位置并根据海水排放扩散路线制定监测点位。以排放口为放射中心，辐射下游区域污染源可能影响的范围，同时兼顾海域各功能区及敏感区域。

2.2.2点位布设

根据点位布设原则，本次调查共布设4个点位，点位位置见图2-2，具体情况见表2-1，各点位现场照片见图2-3。

图2-2 脱硫海水排放海域水质监测点位示意图

表2-1 监测点位统计表

点位号	地理位置		功能区
	经度	纬度	
1	E121° 43 18.88"	N39° 1 26.93"	四类
2	E121° 43 13.36"	N39° 1 32.49"	四类
3	E121° 43 14.21"	N39° 2 5.16"	三类
4	E121° 46 27.32"	N39° 1 31.18"	二类

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

华能大连电厂脱硫海水排放口

1号监测点位现状

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2号监测点位现状

3号监测点位现状

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4号监测点位现状

图2-3 华能大连电厂脱硫海水调查点位现状图

2.3调查项目

2.3.1海水水质调查

（1）监测因子

水温、悬浮物、pH、溶解氧、生化需氧量、COD、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、活性磷酸盐、石油类、硫化物、挥发酚、总砷、总铅、总汞、总镉、总铜、总锌、总铬、总镍

（2）监测频次

每季度监测2次，每次采集3个样品。

分大、小潮汐进行监测。

（3）监测周期

12个月。

（4）分析方法

海水水质分析按照《海洋监测规范 第4部分 海水分析》（GB17378.4-2007）要求，各监测因子具体分析方法见表2-2。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表2-2 分析方法统计表

监测类别	监测因子	分析方法及标准
海水水质监测	水温	海洋监测规范第4部分：海水分析水温表层水温表法 GB 17378.4-2007（25.1）
	悬浮物	海洋监测规范第4部分：海水分析悬浮物重量法 GB 17378.4-2007（27）
	pH	海洋监测规范第4部分：海水分析 pH pH计法 GB 17378.4-2007（26）
	溶解氧	海洋监测规范第4部分：海水分析溶解氧碘量法 GB 17378.4-2007（31）
	生化需氧量	海洋监测规范第4部分：海水分析生化需氧量 五日培养法（BOD_5）GB 17378.4-2007（33.1）
	化学需氧量	海洋监测规范第4部分：海水分析化学需氧量 碱性高锰酸钾法 GB 17378.4-2007（32）
	氨	海洋监测规范第4部分：海水分析次溴酸盐氧化法 GB 17378.4-2007（36.2）
	亚硝酸盐	海洋监测规范第4部分：海水分析亚硝酸盐 萘乙二胺分光光度法 GB 17378.4-2007（37）
	硝酸盐氮（硝酸盐）	海洋监测规范第4部分：海水分析硝酸盐 镉柱还原法 GB 17378.4-2007（38.1）
	活性磷酸盐	海洋监测规范第4部分：海水分析无机磷 磷钼蓝分光光度法 GB 17378.4-2007（39.1）
	石油类	海洋监测规范第4部分：海水分析油类 紫外分光光度法 GB 17378.4-2007（13.2）
	硫化物	海洋监测规范第4部分：海水分析硫化物 亚甲基蓝分光光度法 GB 17378.4-2007（18.1）
	挥发酚	海洋监测规范第4部分：海水分析挥发性酚 4-氨基安替比林分光光度法 GB 17378.4-2007（19）
	砷	海洋监测规范第4部分：海水分析砷原子荧光法 GB 17378.4-2007（11.1）
	铅	海洋监测规范第4部分：海水分析铅无火焰原子吸收分光光度法 GB 17378.4-2007（7.1）
	汞	海洋监测规范第4部分：海水分析汞原子荧光法 GB 17378.4-2007（5.1）
海水水质监测	镉	海洋监测规范第4部分：海水分析镉无火焰原子吸收分光光度法 GB 17378.4-2007（8.1）
	铜	海洋监测规范第4部分：海水分析 无火焰原子吸收分光光度法（连续测定铜，铅和镉） GB 17378.4-2007（6.1）
	锌	海洋监测规范第4部分：海水分析火焰原子吸收分光光度法 GB 17378.4-2007（9.1）
	总铬	海洋监测规范第4部分：海水分析总铬 二苯碳酰二肼分光光度法 GB 17378.4-2007（10.2）
	镍	海洋监测规范第4部分：海水分析 无火焰原子吸收分光光度法 GB 17378.4-2007（42）

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.结果分析

根据华能大连电厂排放的脱硫海水水质特点，基于受纳海域一年跟踪监测结果，选取了海水水质中常规污染物溶解氧、生物需氧量、化学需氧量、石油类及特征污染物铅、锌，对设置的4个监测点位进行逐一分析，结果如下。

（1）溶解氧

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中溶解氧最低值为6.21毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-1。

图3-1 1号点位溶解氧变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中溶解氧最低值为6.24毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-2。

图3-2 2号点位溶解氧变化柱状图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3号监测点位在2019年4个监测季度中溶解氧最低值为6.24毫克/升，满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-3。

图3-3　3号点位溶解氧变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中溶解氧最低值为7.20毫克/升，满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-4。

图3-4　4号点位溶解氧变化柱状图

（2）生化需氧量

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中生化需氧量最高值为1.36毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-5。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-5　1号点位生化需氧量变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中生化需氧量最高值为1.48毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-6。

图3-6　2号点位生化需氧量变化柱状图

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，3号监测点位在2019年4个监测季度中生化需氧量最高值为2.45毫克/升，满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-7。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-7　3号点位生化需氧量变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中生化需氧量最高值为2.99毫克/升，满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-8。

图3-8　4号点位生化需氧量变化柱状图

（3）化学需氧量

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中化学需氧量最高值为1.16毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-9。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-9　1号点位化学需氧量变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中化学需氧量最高值为1.10毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-10。

图3-10　2号点位化学需氧量变化柱状图

3号监测点位在2019年4个监测季度中化学需氧量最高值为1.42毫克/升，满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-11。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-11　3号点位化学需氧量变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中化学需氧量最高值为1.61毫克/升，满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-12。

图3-12　4号点位化学需氧量变化柱状图

（4）石油类

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中石油类最高值为0.031毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准。详见图3-13。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-13　1号点位石油类变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中石油类最高值为0.0383毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-14。

图3-14　2号点位石油类变化柱状图

3号监测点位在2019年4个监测季度中石油类最高值为0.0253毫克/升,满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-15。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-15 3号点位石油类变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中石油类最高值为0.0269毫克/升,满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-16。

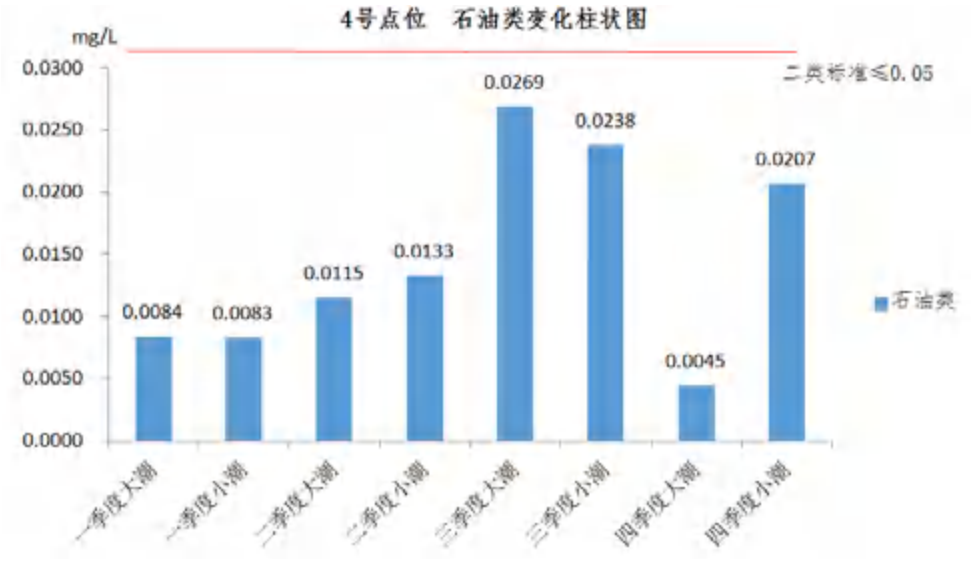


图3-16 4号点位石油类变化柱状图

（5）铅

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中铅含量最高值为0.00180毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准0.050毫克/升。详见图3-17。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

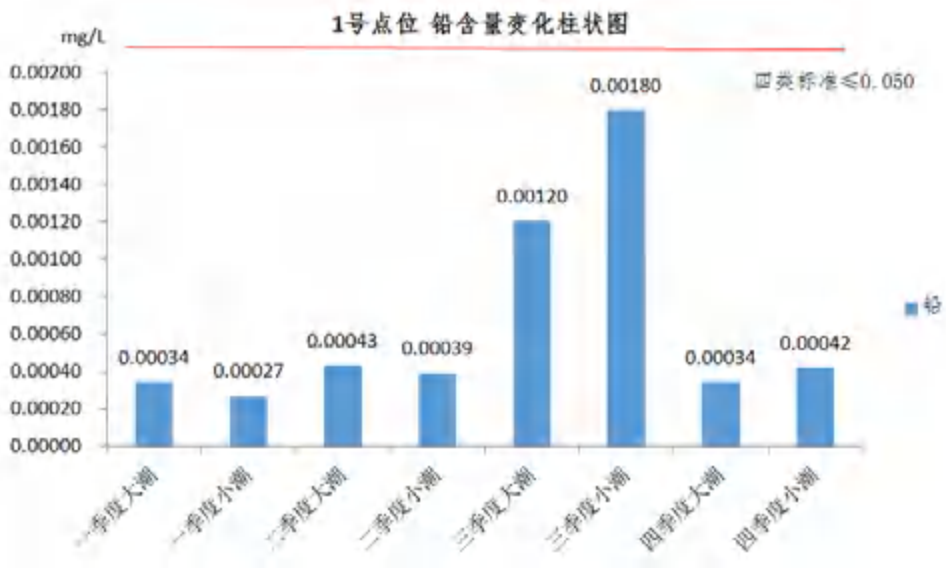


图3-17　1号点位铅含量变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中铅含量最高值为0.00178毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-18。

图3-18　2号点位铅含量变化柱状图

3号监测点位在2019年4个监测季度中铅含量最高值为0.00338毫克/升，满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-19。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-19　3号点位铅含量变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中铅含量最高值为0.00175毫克/升，满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-20。

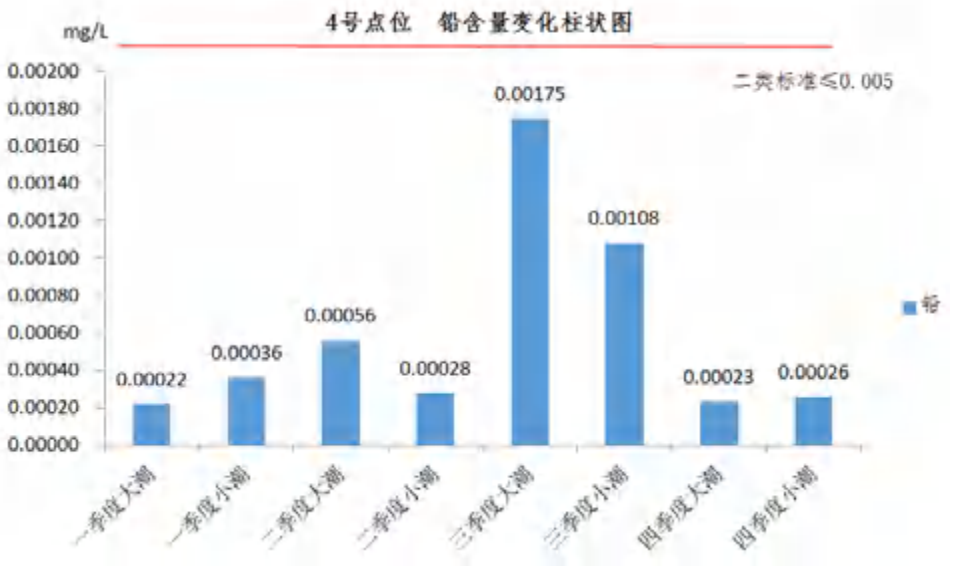


图3-20　4号点位铅含量变化柱状图

（6）锌

根据受纳海域海水水质监测数据统计结果，1号监测点位在2019年4个监测季度中锌含量最高值为0.0170毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准，详见图3-21。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-21　1号点位锌含量变化柱状图

2号监测点位在2019年4个监测季度中锌含量最高值为0.0107毫克/升，满足其点位所在的海水水质四类标准0.50毫克/升。详见图3-22。

图3-22　2号点位锌含量变化柱状图

3号监测点位在2019年4个监测季度中锌含量最高值为0.0192毫克/升，满足其点位所在的海水水质三类标准，详见图3-23。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-23　3号点位锌含量变化柱状图

4号监测点位在2019年4个监测季度中锌含量最高值为0.0192毫克/升，满足其点位所在的海水水质二类标准，详见图3-24。

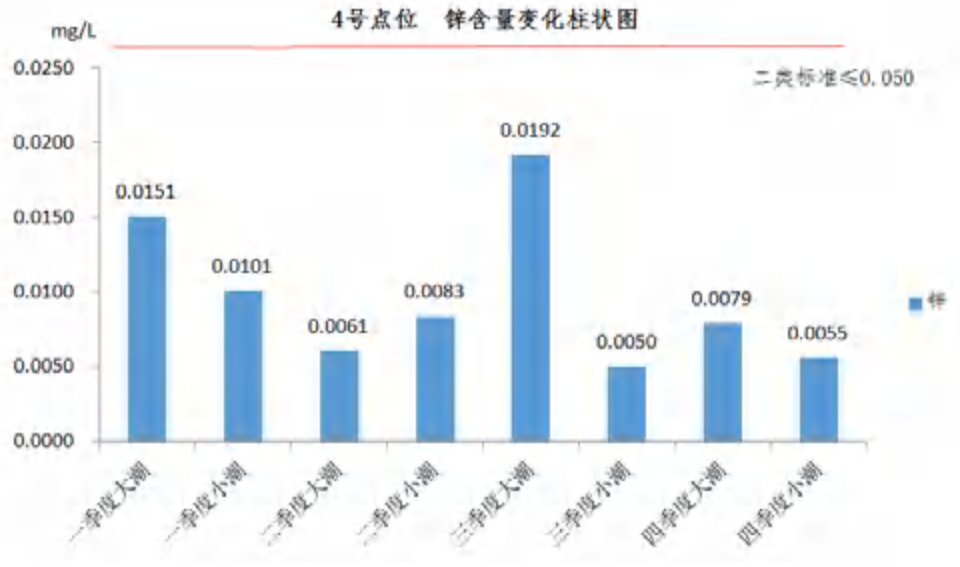


图3-24　4号点位锌含量变化柱状图

4.结论及建议

4.1结论

经过为期一年的海域跟踪监测，监测数据显示华能大连电厂脱硫海水排入海域后，受纳海域的海水水质中常规污染物溶解氧、生物需氧量、化学需氧量、石油类及特征污染物铅、锌的

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

含量均低于或远低于相关海水水质标准。

4.2建议

（1）建立健全完善的管理体制，保证脱硫系统的正常运行，保证脱硫海水的稳定达标排放。

（2）设置水质在线监测系统，实时监控脱硫系统的运行情况。

（3）持续对脱硫海水的受纳海域进行跟踪监测，掌握排污口周边海域环境变化情况。

作者简介

王刚，男，硕士研究生学历，高级工程师，曾任华能大连电厂第三届环保专业技术带头人，现为大连市环保产业协会环境综合治理领域特聘专家，大连市生态环境事务服务中心特聘环境评估专家，长期从事电力等工业企业环保管理研究工作。工作单位：华能国际电力股份有限公司大连电厂；通信地址：辽宁省大连市甘井子区大连湾883号生产部；邮编：116100；电子邮箱: 176891616@qq.com；联系电话：0411-87118390；手机：15840807944。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

基于趸售模式下多元化供热节能技术应用

刘平升
（华能营口电厂　营口　115007）

摘要：近年大量纯凝电厂经过供热抽汽改造进入供热市场，这就必然面对着供热系统运营、维护等问题，而往往后改造供热的电厂采取的经营方式都是趸售模式，趸售模式往往面临着热网循环水泵电耗高、循环水供回水温差小等突出问题，给电厂提高供热经济性带来很大挑战。同时，由于同一电厂内供热改造的机组容量不同，供热参数等级不一致，部分机组采用了先进供热技术，深度调峰等都对电厂供热效益带来影响，但也预示着其中蕴藏着很大的节能潜力。营口电厂一期2×320MW超临界直流机组、二期两台600MW超超临界直流机组进行了中压缸排汽打孔抽汽供热改造，一期一号机组进行了小机乏汽回收利用（吸收式热泵）项目改造，供热采用趸售模式，经过营口电厂多年的努力摸索与实际，形成了一套针对趸售模式下的多元化供热统筹优化方案，有效提高了电厂供热经济效益，具有很高的推广价值。

关键词：趸售　吸收式热泵　质调　多元化

前言

营口电厂一期2×320MW机组作为主热源，对营口经济技术开发区集中供热，供热经营方式为趸售供热，原设计供暖面积1286×104m2。2016年一期机组抽汽供热能力达到饱和，不能满足区域采暖负荷增长的需求，电厂对二期600MW超超临界机组采用中低压导汽管打孔抽汽方式实施了供热改造。为进一步提高机组运行经济性，增加供热能力，一期320MW一号机组于2013年实施了小机乏汽余热利用改造，改造新增4台吸收式热泵，用于回收给水泵汽轮机排汽余热。由于营口电厂一、二期对外供热参数等级不同，且一号机安装有小机乏汽回收利用系统，供热系统相对复杂，但也为营口电厂争取供热效益最大化提供了多种手段和途径。针对趸售模式存在的普遍问题以及不同供热方式、不同等级供热参数，营口电厂积极组织分析，与热力公司紧密沟通，实现了热网水侧“极限供热温度、大温差小流量”供热技术，汽侧“蒸汽能效阶梯利用”技术，大幅降低了供热能耗，其经验具有很高的推广价值。

1.供热趸售模式下存在的问题与对策

营口电厂供热模式以趸售为主，采暖趸售模式主要以电厂厂区为界，按热量计费。火电企

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

业进入供热市场必然会在运营、维护过程中遇到许多困难，营口电厂在运营供热系统初期同样也面临着一系列问题，下面针对营口电厂在供热经营过程中发生的问题进行分析，对电厂采取的方案进行介绍。

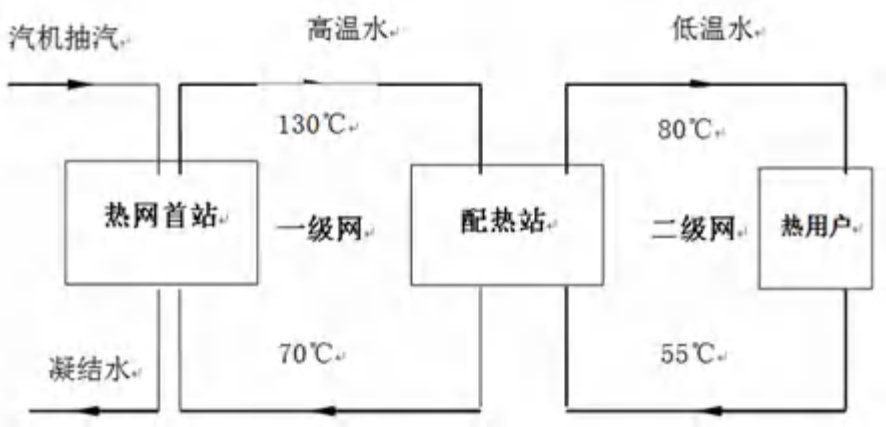


图1.1营口电厂供热系统的组成

1.1趸售模式下首站循环水泵扬程偏高

趸售模式下热网首站的循环水泵的设计扬程，一般都是按照热网可研或直接由热力公司提供的数据确定的。热网循环水的流动是由水泵提供的动能实现的，大型采暖热水网由如下水泵提供动力：热网首站循环水泵 + 中继泵 + 分布式升压泵。热网首站循环水泵提供全部热网循环水量的动能，能耗最高。中继泵提供部分热网循环水量的动能，耗能较高，分布式升压泵大都安装在热网末端的二级换热站内，仅提供少部分热网循环水的动能，能耗最小。

热网循环水的动能不足，主要表现在热网部分区域或热网末端区域。从技术和经济角度出发，应首先考虑开启分布式升压泵升压，再考虑启动中继泵升压，最后考虑热网首站循环水泵升压。但在实际趸售模式下，电厂与热力公司是按照热量计费，首站耗能都是由电厂承担，这就决定了首站设计时，热力公司提供的循环水泵扬程很高。趸售模式的电厂对外网的系统和运行模式不了解，外网应该有的升压泵不运行；热网的水力平衡设施不完善和调整不到位，一遇到动能不足就要求电厂升压升温提高流量，形成了首站循环水泵在高扬程、大流量下运行，造成了电厂首站能耗很高。

大部分电厂热网投入初期，一次网循环水采用“大流量小温差”的运行模式，实际供回水温差较低，最好时能达到50℃，大部分在40—45℃，造成了一次网输送能力降低，首站循环水泵能耗高。造成这种现象的原因主要为热网水系统设计不合理、二级站板式换热器换热面积不足或结垢严重、一次网供回水管路上联络管阀门不严一次网循环水短路、热网水力平衡设施不完善等。

1.2 热网循环水侧“极限供热温度、大温差小流量”技术的应用

营口电厂要求热力公司在调节供热量的过程中，采用“极限供热温度”控制方式，即随着天气温度下降，首先由电厂提高供热温度，在保证供热温度达到热力公司管网能够承受的上限

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

时，再采用增加热网一网循环水流量的方式增加供热量。采用此技术后，营口电厂趸售一网供热热网全年平均值达到105℃，供热中期达到110℃。

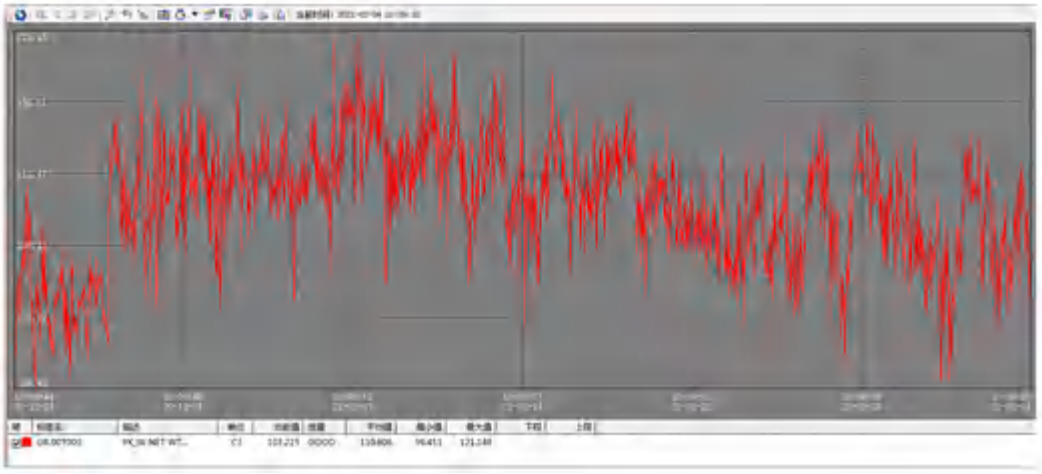


图1.2营口电厂一网供热温度曲线

营口电厂通过与热力公司积极沟通，共同对热力网进行排查，逐一确认一次网供回水联络门的严密程度，要求热力公司在供回水联络门处安装温度测点，监视内漏程度，并积极向热力公司解释双方的利益平衡关系，得到热力公司的理解与支持，要求热力公司二级站板换定期清洗，换热面积不足的增加板换；取消一些不必要的一次网供回水联络门，对保留的一次网供回水联络门定期检测维修，确保阀门的严密不内漏；有管网热负荷变化较大时，要求热力公司进行水力平衡计算和分析，完善热网平衡设施。通过一系列努力，营口电厂现阶段热网供回水温差能够稳定在50—55℃之间，达到了国内先进水平。通过营口电厂一系列措施的改进，同样的供热量条件下，热网一次循环水流量降低15%，扣除各项损失后可降低循环水泵电耗约300KW，年节约厂用电成本41万元。

室外平均气温	-10℃	-10℃	-5℃	-1℃
一次网供水温度℃	104	107	110	104
一次网回水温度℃	49.9	49.5	51	52
一次网循环流量 t/h	7277	7269	6971	6696

表1.1营口电厂热网循环水供回水参数与室外温度

2.多元化供热统筹优化方案

2.1多元化供热统筹优化方案背景

2.1.1供热抽汽参数不同

营口电厂一、二、三、四号机组供热，一、二号320MW汽轮机中压缸排汽管抽汽，额

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

定抽汽量450t/h，抽汽压力0.44MPa，抽汽温度257℃；三、四号600MW汽轮机中压缸排汽管抽汽，抽汽压力1.0MPa，抽汽温度371.5℃。热网抽汽经减温减压器汇合后参数约0.36MPa、267℃，三、四号机供热蒸汽经过减压后必然存在一定的高品质能量损失，影响全厂供热效益。

2.1.2吸收式热泵技术的利用

一号机采用吸收式热泵技术，在不增加供热抽汽的蒸汽和维持原换热首站不改动的前提下，提取#1机组汽动给水泵乏汽潜热。小汽机乏汽余热利用后，设计年节约标准煤2.63万吨。余热利用系统采用的溴化锂吸收式热泵具有较大的节能优势，COP一般在1.65～1.85左右。

2.1.3 深度调峰对供热产生影响

东北电网“两个细则”要求及机组旋转备用管理办法都对营口电厂供热稳定带来影响，深度调峰期间面临供热能力不足的问题。

基于以上四点原因，为保证营口电厂供热效益最大化，电厂特制订供热优化调整方案。供热优化的总体思路为，在相同的对外供热量条件下，首先保证一号机热泵满出力运行，其次利用一期两台320MW机组供热抽汽，不足时再利用二期600MW机组供热抽汽，这样能够保证供热抽汽能力的经济利用，减少高品质能量的浪费，有效吸收小机乏汽，同时兼顾机组深度调峰收益，使营口电厂供热效益最大化。

2.2热网汽侧“蒸汽能效阶梯利用”技术的采用

2.2.1供热负荷在一、二期机组之间的分配

供暖初、末期（11月1日—11月30，次年2月末至3月31日）通过调节#3、#4机组热网加热器循环水出口蝶阀至15%，降低#3、#4机组热网循环水流量，保持#3、#4机组热网小流量（1000 t/h ~1500t/h）方式备用。非深调期间，供暖中期及严寒阶段（12月1日—2月末）在保证开发区供热参数的前提下，要求少用#4机组抽汽供热量，控制#4机组热网循环水供水温度（#1、#2加热器混合后）不低于80℃即可；增加供热量时，首先要将#1、#2机组供热量加至当前负荷对应的最大量，方可增加#3、#4机组供热量；减少供热量时，要求首先将#3、#4机组供热量减下来，然后再降低一期机组供热量。

2.2.2 保证热泵高效稳定运行采取的措施

为保证一号机热泵高效稳定运行，营口电厂采取以下技术措施：一号机在负荷变化过程中，热泵驱动蒸汽压力要保证大于0.1MPa；三台及以上热泵运行时，保证小机排汽至凝汽器蝶阀全关，蝶阀全关后小机排汽压力高时，继续提高驱动蒸汽压力，小机排汽压力稳定在7.5–8.5KPa。投入小机排汽至凝汽器调门自动，设定小机排汽压力7.5KPa，自动调节小机排汽压力；一、二号热网加热器顶部供汽蝶阀要在保证热泵稳定运行的基础上进行调节，初步设定开度在30%左右，通过关小进入热网加热器的蒸汽量，保证热泵驱动蒸汽压力充足。

2.2.3一期旋转备用抽查期间供热负荷分配

一、二号机旋转备用抽查加负荷受限时，可通过继续减小机组供热量增加电负荷；本机供热减小后，其他两台机增加供热量，保持供热参数稳定；加减供热时，控制热网加热器出口水温变化≤2℃/min；一号机特别注意：关闭供热蝶阀过程中保证热泵驱动蒸汽压力最低0.05MPa，防止热泵跳闸，注意小机排汽压力；当热泵驱动蒸汽压力达到0.05MPa，仍无法满

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

足电负荷要求时，可适当关小厂外热网加热器顶部供汽蝶阀，不要再关供热蝶阀，防止热泵跳闸；开关加热器顶部供汽蝶阀要缓慢，防止水位大幅波动；抽查结束后，将加热器顶部蝶阀恢复至30%开度。

2.3多元化供热带来的危险因素预知

当需要增加四号机组供热量时，需先开大四号机两台热网加热器循环水出口蝶阀，增加四号机热网循环水量，再增加供汽量；减少时相反，先减汽，再减水，避免加热器超压、超温运行。

供热调整过程中要根据机组负荷，对供热情况提前处理；调整过程要缓慢，防止供热参数大幅波动。各机组长、主值要建立一个观念，就是供热阀门调整不仅仅影响供热，也反过来影响负荷，减负荷过程中，随机组负荷降低，同时应关低压缸进汽蝶阀，保证供热量，在关小低压缸进汽蝶阀过程中，负荷也是降低的；如果在负荷已经减到目标值后，再去调整，对机组水、煤、主汽压力又是一个扰动，协调短时间很难稳定；加负荷时同理；在调整供热参数时，一、二号机为供热主力，应在保持供热蝶阀一定开度前提下，尽量用低压缸进汽蝶阀去调整，不要三个阀都调。

3.总结

近年大量纯凝电厂经过改造进入供热市场，而大部分后改造电厂采取的经营方式都是趸售模式，趸售面临着热网循环水泵电耗高、循环水供回水温差小等突出问题。同时，由于同一电厂内供热改造的机组容量不同，供热参数不一致，另外深度调峰等都对电厂供热效益带来影响，但也预示着其中蕴藏着很大的节能潜力。营口电厂热网循环水侧采用“极限供热温度”技术，一网供热热网全年平均值达到105℃，供热中期达到110℃；通过采用“大温差小流量”控制技术，使热网供回水温差稳定在50—55℃之间，达到了国内先进水平，同样的供热量条件下，热网一次循环水流量降低15%，扣除各项损失后可降低循环水泵电耗约300KW，年节约厂用电成本41万元。营口电厂热网汽侧采用“蒸汽能效阶梯利用”技术，避免了“高品质”蒸汽低效利用，年节约标煤1000吨。同时，2019-2020供热季较往年多回收小机乏汽热量3万GJ，折合110万元，这些技术的应用使电厂供热效益大幅提升，值得推广应用。

参考文献

[1]丁文伟等.600MW机组集中供热运行的优化方案[R].2017

[2]王振兴等.城市集中供热系统的优化研究[R].3005

作者简介

刘平升（1985-），男，本科，工程师，现从事汽轮机运行管理工作。

工作单位：华能营口电厂

工作单位地址：辽宁省某市鲅鱼圈区华能营口电厂

邮编：115007

Email:277867565@qq.com

联系电话：15940741510

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

面向深度调峰的小机乏汽余热利用技术

刘平升
（华能营口电厂 营口 115007）

摘要：东北某电厂俄制320MW超临界定压直流机组采用吸收式热泵技术，回收#1汽轮机组汽动给水泵乏汽潜热，用于加热热网循环水，提高供热效率。随着东北地区发电形势的变化，深度调峰幅度逐渐增加，机组140MW负荷以下时系统已无法满足吸收式热泵参数控制要求，面临着热泵设备频繁跳闸、溴化锂溶液结晶和冷剂冻结等问题。电厂通过一系列有效的调整和完备的技术措施，实现了机组深度调峰最低至85MW负荷下吸收式热泵仍可高效稳定运行，避免了深度调峰给吸收式热泵带来的驱动蒸汽压力不足、小机乏汽不足等问题，对可能出现的溴化锂溶液结晶、冷剂冻结等提供了很好的解决方案，有效提高了供热经济效益。

关键词：吸收式热泵 深度调峰 乏汽 供热

前言

东北某电厂一期一、二号机组在冬季供暖期承担着当地的冬季供暖任务，其热网首站布置了四台卧式管壳式热网加热器，利用原苏联320MW超临界定压直流汽轮机中压缸抽汽来加热供热循环水。为提高机组的总体供热效率，电厂通过对一号机组小机排汽系统改造，以供热抽汽作为驱动热源，溴化锂吸收式热泵为主体，回收小机乏汽余热。小汽机乏汽余热利用后总回收余热量41.63MW，在不增加新热源的情况下可增加供热面积75.69万m2。但随着东北地区发电形势的变化，机组负深度调峰逐渐增加，电厂原苏联2×320MW超临界直流定压机组冬季负荷最低已减至85MW，驱动蒸汽压力低于0.03MPa，热泵无法投入运行。通过关小低压缸进汽蝶阀提高深调期间热泵驱动蒸汽压力后，又面临着小机乏汽不足，热泵明显吸收乏汽凝水显热，乏汽凝水温度最低达到10℃，容易出现溶液结晶或冷剂冻结等问题。

1.吸收式热泵设计参数

东北某电厂吸收式热泵驱动蒸汽参数为0.34MPa、220℃、97.156t/h，回收#1机组小机乏汽66.96t/h（表1-1）。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

项目		单位	RHP547F
台数		-	4
乏　汽	压力	kPa(a)	7.5
	流量	m^3/h	33.48
蒸　汽	入口压力	MPaG	0.34
	凝水出口背压	MPaG	<0.02
	流量	ton/h	48.578

表1-1 热泵设计参数表

2.深度调峰后吸收式热泵优化调整方案

2.1 降低低压缸进汽量，提高驱动蒸汽压力

结合自身情况，结合国内同类型机组的先进调峰经验，电厂完成了一期两台原苏联2×320MW超临界定压（23.5MPa）直流机组的“低压缸供汽蝶阀最小运行开度”试验，实现了机组供热期灵活性调峰最低至85MW长时间运行，低压缸进汽蝶阀最小开度已关至0%，但蝶阀为非完全密闭结构，仍有一定蒸汽量进入低压缸。关小低压缸进汽蝶阀后，有利保障了热泵驱动蒸汽压力，最低深调电负荷85MW时，仍能保障驱动蒸汽压力不低于0.15MPa。

2.2改变采暖抽汽的分配方式

热泵驱动蒸汽来自于#1机组采暖抽汽母管（中压缸排汽），热泵利用部分采暖抽汽，其余的采暖抽汽进入热网加热器。由于热网加热器热网水进水温度较低，驱动蒸汽从热网加热器进汽管道附近接口时因为热网加热器工作时的凝结作用，造成热网加热器蒸汽通流阻力小于热泵，热泵驱动蒸汽的压力不能保证，影响热泵效率和正常工作。在城市热网负荷不增加的情况，通过调整优化热网加热器供汽蝶阀开度，优先保证热泵驱动蒸汽压力不低于0.15MPa，热泵乏汽凝水温度不高于40℃，保证热泵高效运行，全部回收小机乏汽热量，剩余蒸汽进入热网加热器。

2.3 优化小机至凝汽器排汽蝶阀控制

电厂通过一系列调整后，有效提高了热泵机组驱动蒸汽压力，但深调期间又面临着小机乏汽量不足的问题，部分热泵机组明显吸收了小机乏汽凝水显热，凝水温度最低达到10℃，面临着溶液结晶或冷剂冻结问题。电厂优化调整了小机排汽至凝汽器蝶阀控制逻辑，当热泵运行三台及以上时，小机排汽至凝汽器主蝶阀全部关闭，投入旁路蝶阀自动控制，设定压力定值7.54KPa，自动跟踪小机排汽压力。当热泵机组出现故障导致小机排汽压力升高后，首先旁路蝶阀自动开启，主蝶阀当压力升至11KPa后，缓慢开启，当压力升至12.5KPa时，快速开启。通过调整，保证了热泵乏汽凝水温度运行在30℃以上，避免了冷剂结冻问题。

2.4吸收式热泵机组参数优化调整

机组深度调峰后，热泵系统原有的一些预置报警定值和启停方式都发生了很大变化，在调整机组参数尽量维持热泵全部回收小机乏汽基础上，为防止热泵在极端条件下出现溴化锂结晶或冷剂冻结等问题，电厂对热泵机组边界参数进行了优化调整。1）对热泵机组参数设置数值

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

调整；2)对热泵机组溶液泵、冷剂泵变频配置进行调整；3）对热泵机组预设报警定值重新进行修订，经调整后热泵机组能够满足全部回收小汽机乏汽余热。

2.5吸收式热泵机组启停控制方式设计

虽然经过机组侧、热泵侧一系列调整，能够保证在最低负荷下四台热泵全部投入运行，回收小机乏汽，但影响热泵机组投退的因素较多，如热网水流量、热网水回水温度、驱动蒸汽压力、小机乏汽压力等。为保证热泵稳定可靠运行，避免极端情况下出现热泵溶液结晶、冷剂水冻结等问题；同时，为避免热泵突然跳闸带来的小机排汽压力大幅波动及对热网造成的冲击，电厂设计了一套热泵机组自动启停控制方式。

2.5.1热泵机组启动允许条件

热泵机组驱动蒸汽母管压力≥0.06MPa、小机乏汽压力~12.5kPa是热泵系统投运允许条件为驱动蒸汽压力最低时，对应的小机乏汽压力的工况。根据热泵机组参数优化运行数据可以分析，驱动蒸汽流量满足66.52t/h，驱动蒸汽压力≥0.06MPa，四台热泵可以全部投运，且能够满足小机乏汽余热的全部回收。当驱动蒸汽压力≥0.06MPa时，对应的小乏汽压力会≤12.5kPa。

2.5.2热泵机组顺序启动条件

热泵机组顺序启动，满足以下条件：

1）热泵机组驱动蒸汽母管压力≥0.06MPa、通过小机至大机排汽关断阀自动控制小机乏汽压力7.45kPa；启动第一台热泵机组。

2）热泵机组驱动蒸汽母管压力≥0.06MPa且乏汽凝水温度＞38℃；关小小机至大机排汽管道关断门保持小机乏汽压力7.45kPa；启动第二台热泵机组。

以此类推，启动第三、四台热泵机组。

2.5.3热泵机组顺序停运条件

热泵机组顺序停运，满足以下条件：

1）热泵机组驱动蒸汽母管压力＜0.05MPa或热泵乏汽凝水温度＜25℃；小机至大机排汽管道关断阀自动控制小机排汽压力稳定；停运第一台热泵。

2）热泵机组驱动蒸汽母管压力继续＜0.05MPa或热泵乏汽凝水温度＜25℃；小机至大机排汽管道关断阀自动控制小机排汽压力稳定；停运第二台热泵。

以此类推，停运第三、四台热泵机组。

3.吸收式热泵系统优化后可取得的收益

根据热泵热量回收计量软件统计，负荷140MW—85MW期间，热泵平均供热量为80.84MW，乏汽余热回收热量30.31MW，COP为1.59；2019-2020供热季较往年多回收小机乏汽热量3万GJ，折合110万元。

序号	供热周期	回收余热量（GJ）	热价（元）	节能收益（元）
1	2016-2017年度	282173	37	10,440,413.21
2	2017-2018年度	288143	37	10,661,291.00

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3	2018-2019 年度	283489	37	10,489,093.00
4	2019-2020 年度	313261	37	11,590,657.00

4.推广价值

通过营口电厂一系列有效调整，保证了深度调峰条件下小机乏汽余热的高效回收利用，提高了供热经济效益；避免了深度调峰时热泵机组因驱动蒸汽压力不足、小机乏汽不足等原因带来的频繁跳闸问题，对热泵机组可能出现的溴化锂溶液结晶、冷剂冻结等问题提供了很好的解决方案。面对快速发展的供热市场以及节能减排的大趋势，回收利用电厂各类余热，尤其是蒸汽凝结产生的大量潜热、提高供热盈利能力已经是势在必行，东北某电厂的成功实践为系统内乏汽余热回收利用提供了一个有力的参考。

参考文献

[1]陈 东 刘广义 等.热泵技术及其应用[M].化学工业出版社.2005

[2]于 充 李梦和 等.电厂集中供热热力性能测试报告[R].东北电力设计院.2008

作者简介

刘平升（1985-），男，本科，工程师，现从事汽轮机运行管理工作。

工作单位：华能营口电厂

工作单位地址：辽宁省某市鲅鱼圈区华能营口电厂

邮编：115007

Email:277867565@qq.com

联系电话：15940741510

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

热电联产燃煤电厂废水处理系统改造技术路线探索

王刚 吕蒙 王卓 刘注显
（华能国际电力股份有限公司大连电厂）

摘要：本文以国内某30万千瓦等级火电厂为例，探讨了火电厂在废水处理系统改造过程中的思路和技术路线，主要包括工业废水和生活废水处理系统的改造内容，电厂计划采用生化处理方式削减生活废水COD排放量，采用电子絮凝等新工艺进行工业废水中悬浮物的捕集，最终使水质达标排放或回用，达到国家2014年新《环保法》、《水污染防治行动计划》（即《水十条》）和地方标准要求。

关键词：生活废水　工业废水　废水处理系统　达标排放

前言

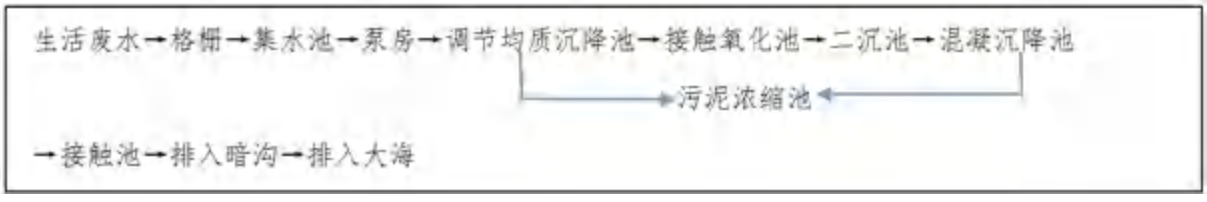
国内某30万千瓦机组火电厂的生活废水和工业废水处理系统是上个世纪80年代建厂初期设计安装的。污水处理设计能力为100吨/小时。其工艺流程为：

生活废水→格栅→污水池→初沉池→曝气池→二沉池→接触池→排入暗沟→排入大海

但由于电厂大部分厂址始建于回填的近海滩涂上，埋入地下的生活废水收集管道长时间运行后损坏泄漏，致使海水流入混合，导致生活废水含盐量大大超标（Cl－为2000–4000 mg/L），排放中的有机物质和悬浮物质超标（COD=200 mg/L）。并致使系统的设备和管道腐蚀严重，丧失了系统的处理功能。针对上述问题，2006年实施了改造，改造内容：

新建部分：调节均质沉降池、集水池、污泥干化池。

改造部分：原初沉淀池改为污泥浓缩池，原曝气池改为接触氧化池。改造后的工艺流程如下：



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

改造后，出水符合当时的国家三废排水标准GBJ4-73。目前由于系统损坏等多种原因，系统已无法正常运行且GBJ4-73排放标准已不适合当今国家环保要求。必须提标改造。出水指标必须满足国家《污水综合排放标准》GB8979-1996要求。

（2）工业废水

该厂工业废水约有15种。主要是采用收集后集中处理方式。其中：下列废水的水量均较大，排水相关指标均较高：锅炉化学清洗废水每个时间段的排水量较大约2000m³，SS（悬浮物含量）约1000-2000 mg/L，化学需氧量CODcr约2000-4000 mg/L，油槽区域废水20 m³/h，油含量50 mg/L。空气加热器洗涤水每个时间段的排水量较大约4000m³，SS（悬浮物含量）约≤4000 mg/L。化学需氧量CODcr约＜1000 mg/L指标均较高。发电站排水：640 m³/d，油含量10 mg/L，指标较高。启动排水300 m³/d，化学需氧量CODcr为360 mg/L，指标较高。

目前，稳定的废水处理量约为1000m³/d，不稳定废水处理量每个时间段的排水量可达4000m³。经系统处理后，出水排入大海。由于工业废水处理系统年数久远，设备和辅助系统遭受破坏性腐蚀严重。整个系统近似瘫痪，丧失了处理功能。未达标的废水如长期排放，必将造成对厂区及相关海域的严重污染及影响。

1 项目必要性

电厂生活废水和工业废水系统严重老化，已不能满足目前的处理需要，造成生活废水和工业废水不能稳定达标排放，影响电厂总排污口水质。

生活废水目前处于完全直排的情况，曝气池曝气风机等无法使用，曝气池内配件老化需要更换，更重要的是长年以来初沉池后续处理流程，已不能完全处理初沉池内污水。生活废水处理设施已不能满足环保排放要求，亟待改造和扩容。

工业废水原设计工艺要求，废水经中和、絮凝、沉淀等工艺环节后达标排放。原设计絮凝反应由于溶解池搅拌器，硫酸铝输送泵等设备故障无法进行。目前先进的絮凝反应已采用电子絮凝原理，避免加药环节，能够更好的保护环境，建议改造升级。

以上提及的各设备现状既不符合国家2014年新《环保法》和《水污染防治行动计划》（即《水十条》）和地方标准对于废水达标排放的要求。对现有生活废水和工业废水系统进行升级改造已势在必行并迫在眉睫。电厂计划采用生化处理方式削减生活废水COD排放量，采用电子絮凝等新工艺进行工业废水中悬浮物的捕集，最终使水质达标排放或回用。

1.1 项目方案

1.1.1生活废水处理系统解决方案

目前处理站系统仍在维持运行，但处理水量，水质均达不到设计及生产要求，对周边区域环境及相关海域造成了一定的污染及影响，其主要原因可能如下：

（1）调节池的有效容积为700m³而非原设计方案中描述的1000m³。调节池中仅设1台2.2KW的推流搅拌机，故存在很大区域的搅拌混合死角，均质搅拌效果很差。建议解决方案：

1）拆除原推流搅拌机

2）在调节池底部增设穿孔曝气系统

（2）原水中可能浸入海水，系统的可生化性较差。原接触氧化池的停留时间约为9.5小时，底部没有没有穿孔布气管。建议解决方案：提高系统的可生化能力

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

1）把2个污泥浓缩池其中一个改为接触氧化池。

2）把原系统中的混凝沉降池改为接触氧化池。

3）把原接触氧化池底的穿孔布气管改为微孔曝气系统。

4）使接触氧化停留的时间提升至约15小时。

5）二沉池部分污泥回流至接触氧化池。

（3）为使系统悬浮物浓度进一步降低及出水稳定达标解决方案：

1）在调节池前端增设高效离心沉淀池

2）在接触池前端增设多介质过滤系统。

（4）为提高生产环境质量，把原有的污泥干化场(间）改为污泥脱水间。

1.1.2工业污水处理系统解决方案

电厂工业废水处理系统年代已久，设备、管道及相应系统腐蚀严重甚至损坏，已无法正常使用。该系统主要处理电厂约15种不同特性废水的混合水，处理能力及处理难度相对较高。随着国家对废水排放的指标要求不断的提高，企业生产规模生产能力的不断壮大，原系统已根本不能满足生产需要，必须进行改造、升级，对原主题工艺进行变更调整，具体解决方案如下：

1）把1号池改为调节池，内设穿孔曝气搅拌系统，以提高水的均质能力。

2）采用生化工艺：把2号池改为接触氧化池内设微孔曝气系统及组合填料系统以更好的降解污水中的CODcr，BOD5，SS及氨氮指标，使之达标。

3）在处理系统前端增设电絮凝系统，使之更好的降解系统中的悬浮物，辅助后道工艺的预处理。

5）在处理系统前端增设气浮系统以降解油槽区域来水（约20t/h)的油含量。

5）对原系统中的脱水机、泵类、阀类、工艺管道、仪表、供电、自控等进行维修、更换以及升级改造。

1.2 环境保护

此项目的实施对环境的影响很小。为了确保不发生污染环境问题，在本项目建设过程中，首先要提高施工单位的环境保护意识，注意环保意识的教育，加强环保宣传，进行环保讲座等方式；同时加强监督工作。在项目建设过程中还需要注意固体废弃物的防治：

（1）项目改造过程中应从减少废物的产生入手，加强进入环境管理系统、生态化建设以及清洁生产方面的知识培训；

（2）鼓励减少有毒有害材料的使用；

（3）要注意工业废物，如有色金属等的处理、回收再利用等问题；垃圾运输过程中需防止泄露，对有毒垃圾需要做掩埋或其他处理，防止环境污染。

2 方案说明

2.1 项目前期情况简述

由于电厂大部分厂址始建于回填的近海滩涂上，埋入地下的生活废水收集管道长时间运行后损坏泄漏，致使海水流入混合，导致生活废水含盐量大大超标（Cl－为2000–4000 mg/L),排放中的有机物质和悬浮物质超标（COD=200 mg/L）。并致使系统的设备和管道腐蚀严重，丧失了系统的处理功能。电厂工业废水处理系统年代已久，设备、管道及相应系统腐蚀严重甚至

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

损坏，已无法正常使用。该系统主要处理电厂约15种不同特性废水的混合水，处理能力及处理难度相对较高。随着国家对废水排放的指标要求不断的提高，企业生产规模生产能力的不断壮大，原系统已根本不能满足生产需要，必须进行改造、升级。项目的详细内容：

2.1.1生活废水处理系统

1、原污泥浓缩池，絮凝池改为接触氧化池。

2、原污泥干化池废除，改为污泥脱水机系统。

3、原接触氧化池穿孔曝气改为微孔曝气系统，原填料系统更换。

4、改造后的接触氧化池均已实施加盖（钢混结构）封闭处置，以适应寒冷季节的工艺要求及臭气收集处理要求。

5、动力控制系统调整改造。

6、新增部分：

1）高效离心沉淀罐：1座。

2）多介质过滤系统：1套。

3）压滤机系统：1套。

4）中间水池：1座。

5）絮凝组合池：1座。

6）接触氧化池微孔曝气系统：1套。

7）调节池穿孔曝气系统：1套

8）加药系统：1套。

9）风机：2台。

10）臭气收集及尾端处理系统：1套（如需做）。

2.1.2工业废水处理系统

1、主体工艺调整。

1）把1号池改为调节池，内设穿孔曝气搅拌系统。把2号池改为接触氧化池，内设微孔曝气系统及组合填料系统。

2）新增气浮池1套，预处理油槽区域来水约20t/h，降解系统油含量。

3）新增电絮凝系统，更好的降低系统的悬浮物浓度。

2、新增电絮凝处理系统：1套。

3、新增气浮池（系统）：1套。

4、新增调节池穿孔曝气系统：1套。

5、新增接触氧化池微孔曝气系统：1套，组合式填料：1套。

6、维修或更换。

1）污泥池刮泥机L=12m，1台。

2）沉淀池刮泥机L=20m，1台。

3）脱水机现有脱水速率4 m^3/h，更换为8 m^3/h。

4）各类泵阀类更换。

5）各种管道维修更换。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

6）仪表维修或更换。

7）搅拌机系统维修或更换。

7、系统钢平台，钢架，栏杆，扶梯等维修更换， 铸铲油漆

8、系统工艺管道，支架铸铲油漆

9、供电系统新增及调整

10、自控系统新增及调整

3 结论与建议

3.1结论

（1）生活废水

①目前使用的生活废水处理系统是经2006年实施改造后的系统。设计出水标准是按国家三废排放标准GBJ4-73设计的。而此标准如今已不适用。生活废水处理系统出水指标应满足国家《污水综合废水排放标准》GB8978-1996要求。

②目前生活废水处理系统由于存在设计缺陷及系统损坏等多种原因，系统已无法正常运行。出水指标：CODcr，BOD5氨氮等远高于国家《污水综合废水排放标准》GB8978-1996要求。已造成污水站处理区域内环境，厂区管网以及相关海域的严重污染及影响。

③目前生活废水处理系统由于存在设计缺陷及系统损坏等多种原因，与《新环保法》、《水十条》及《2000年电力环境保护规划》、国家《污水综合废水排放标准》GB8978-1996等目标及要求相距甚远。

（2）工业废水

①由于工业废水处理系统年数久远，原系统的设计标准及要求已远远不能满足《新环保法》、《水十条》及《2000年电力环境保护规划》、《污水综合废水排放标准》GB8978-1996的目标及要求。

②由于工业废水处理系统年数久远，原设计标准及要求已远远不能满足当今要求。设备和辅助系统遭受破坏性腐蚀严重。整个处理系统已丧失了正常的处理功能。出水指标：SS、CODcr，BOD5，油度等指标数远高于国家标准。如长期排放，势必造成对厂区相关海域的严重污染及影响。

3.2建议

（1）生活废水

①必需提标改造，使系统出水全部达标排放，从而满足国家《污水综合排放标准》GB8978-1996要求及排入GB3097中二类海域的污水，执行一级标准要求。

②为节约水资源，建设单位如考虑回用，需提供回用点的水质要求，同时还应满足《城市污水再生利用工业用水水质》GBT-19923-2005要求。

③建议使处理达标的废水回用至厂区杂用水系统（绿化、浇厕、路面冲洗等）。

（2）工业废水：

①必需提标改造，使系统运行处理能力能够达到新的设计要求，出水全部达标排放，从而满足国家《污水综合排放标准》GB8978-1996要求及排入GB3097中二类海域的污水执行一级标准要求。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

②为节约水资源，建设单位如考虑回用，需提供回用点的水质要求，同时还应满足《城市污水再生利用工业用水水质》GBT-19923-2005要求。

③建议使处理达标的废水回用至工业水预处理系统或用于循环冷却水系统。

④从节约工程总造价方面考虑，建议工业废水选用恢复性改造。

作者简介

王刚，男，硕士研究生学历，高级工程师，曾任华能大连电厂第三届环保专业技术带头人，现为大连市环保产业协会环境综合治理领域特聘专家，大连市生态环境事务服务中心特聘环境评估专家，长期从事电力等工业企业环保管理研究工作。工作单位：华能国际电力股份有限公司大连电厂；通信地址：辽宁省大连市甘井子区大连湾883号生产部；邮编：116100；电子邮箱：176891616@qq.com；联系电话：0411-87118390；手机：15840807944。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

热力站现状及节能分析

刘晓晨
（北京市热力集团有限责任公司朝一分公司）

摘要：本论文主要研究北京朝阳地区集中供热热力站能耗现状及节能效果。目前，随着城市集中供热事业的不断发展和当今碳中和愿景目标，大型的区域性热网或锅炉房已越来越多的替代原有小型分散性的燃煤及燃气锅炉房。集中供热是北方大型城市多采用的集中供暖形式，它有着高效利用热能，绿色，环保等诸多的优势，是城市化进程的不可或缺的组成部分。

集中供热也有着其管理半径过大，调节不利的弊端。如何通过合理的调配热能资源，使得热能充分利用，减少能源的热损失，对如今的集中供热企业来说，有着至关重要的作用。由于集中供热系统的庞大，合理的调节则意味着动辄数以万记费用的节省，是很值得供热企业密切注意并切实推广的。

通过合理的了解集中供热系统热耗情况，根据热用户用热需求调节热力站的供热温度曲线，找出经济科学的节能供热模式，是本论文研究的初衷。

关键词：热耗分析　系统节能　技术应用

第一章 绪　论

1.1研究的背景和意义

集中供暖行业属于公用基础设施行业，为避免重复建设，一定范围内往往只设一个主要热源。集中供热与分户供热相比,具有节约燃料、减轻大气污染、节省用地、供热质量高、低噪音、少扰民、自动化程度高、设备故障率低等优势。受基建投资力度加大、城镇化加速、供热需求持续增长等因素影响，近年来我国城市集中供热事业得到了快速发展。2018年我国集中供热固定资产投资总额在655.0亿元左右。集中供暖行业作为我国基础公共服务之一，是涉及到我国国计民生的重要举措，相关企业在从事集中供暖业务，需要取得主管部门发放的供暖经营许可证或经备案认可才能从事该项业务。同时，城市集中供暖行业的退出也存在政策方面的限制，政府部门对供暖企业有向用户保证供暖的强制要求，企业不可以像其他行业的企业一样根据自身经营情况随时决定停产退出。

1.2.国内集中供热发展现状

集中供热是清洁供热的重要方式之一。集中供热与传统的分散供热相比，具有减少环境

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

污染、节约能源等优点。以燃气锅炉为例，分散式小锅炉生产能源利用效率40–50%，而集中供热所用的大型锅炉生产的能源利用效率高至70%–80%。此外，用集中热源代替众多分散锅炉，可将污染物从面排放变为点排放，能够集中、有效处理污染物，减少排放量。

1.3研究的意义

随着我国提出2060年碳中和愿景目标，欧盟、日韩等主要经济体纷纷宣布或强化其碳中和目标和措施，掀起了全球“碳中和竞赛”。面对百年未有之大变局，将碳中和作为统筹国内经济社会可持续发展与全球应对气候变化协同共赢的发展战略，以技术突破带动新一轮产业和科技革命，引导经济发展动力由资源依赖转向技术创新，实现能源安全、经济高质量发展和生态环境质量持续改善，形成新发展格局的重要抓手，是总书记为我国未来发展指明的绿色低碳发展的重大目标和方向。

2021.1.15，市委常委会传达学习习总书记在省部级主要领导干部学习贯彻党的十九届五中全会精神专题研讨班上的重要讲话精神。蔡奇同志要求加快推动经济社会发展全面绿色转型，深入实施绿色北京战略，继续打好污染防治攻坚战，把碳排放、碳中和摆上位置，拿出行动。

市场环节，以大电网大市场实现能源大范围优化配置。电网既是能源输送的载体，也是市场配置的平台。需加快建设以智能电网为基础、特高压电网为骨干网架的全国能源优化配置平台，满足清洁能源大规模接入、输送和消纳需要，利用外调绿电逐步替代本市燃气发电。

北京热力大网主要热量来源于北京电厂，面临电厂外调绿电逐步替代本市燃气发电影响，降低热网能耗势在必行。

1.4 课题的研究内容

本论文分析了北京朝阳地区各类型建筑物热力站的供热能耗情况，将对应供热面积的建筑物按照热用户的用热需求进行分类，总结出每类建筑物的供热能耗水平，并在此基础上对这些数据基础上对这些数据按照运行管理的专业化程度和用户主动节能意识等方面进行对比，得到相应的结论。

结合在供热运行方面的一些试点项目，对大型集中供热模式中需要注意的各节能环节进行对应性的分析，通过实际案例，反映出供热节能的各环节可以采取的节能模式，为供热企业的日常生产领域提供借鉴意义。随后将目前供热技术领域上试点的部分新技术成果进行展示，将其在解决供热难题以及提高运行管理效率和能力等方面的效果和应用进行解读。

第2章 北京地区能耗数据来源

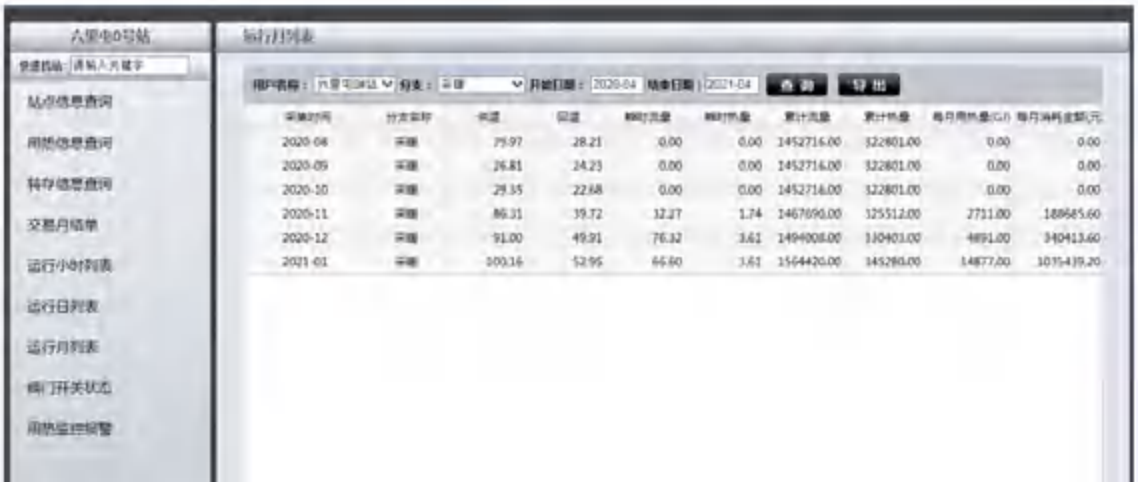
2. 1能耗数据采集

作为一个大型供热企业，对供热参数的统计采集记录方面，一直都是非常重视的。在供热技术的飞速发展下，热力站智能化、自动化水平逐渐提高，数据的远程采集、实时传输记录方面也更加完善，对热力站热量、供温、回温、供压、回压等数据等数据实现了监测上传上传。

为了提高数据的及时性和准确性，热力站仪表统一由热力智控公司进行维护管理，并搭建智能卡平台，实现了数据的实时传输。但是由于一些特殊用户，不同意安装数据远传设备，热力智控采用人工进行热力站内数据集抄，确保了全口径热耗数据统计。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

智能卡平台数据由远传和热力站站内数据集抄导入相结合的方式进行数据留存。可按照热力站点、时间查询导出。



热量数据采集工作是以周为单位进行积累，还要因为个别热力站的某一期数据出现故障、无法采集等情况，造成数据的缺失，需要进行数据甄别，实现数据的最大程度的充实、准确。按照北京地区法定的供热期间，每年可以采集十七期的有效数据，2018年至2020年共计采集五十一期热耗数据。

2. 2 能耗数据处理和计算

采集统计范围内的热力站共有565座，在2018年至2020年数据收集过程中，为了提高数据的精确性，将其中故障站、月查表站等，无法保证数据统一性、有效性及精确性的热力站进行剔除，最终得到本次分析使用的2018年至2020年数据齐全的热力站共计 530座。

为了降低室外温度对热耗的影响，采用了折算实际温度的计算方法计算热能耗，热能耗计算公式：热力站热能耗指热力站运行期间发生的热能源的消耗量和热力站供暖面积的比值。具体公式如下：

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

$$热能耗=\frac{热力站热用量}{热力站供暖面积}\times\frac{121}{运行天数}\times\frac{(18-0.6)}{(18-实际平均温度)}$$

财年热能耗采取每周单期热能耗周聚合的计算方法。

北京市法定要求供暖时间是1月1日至3月15日和11月15日至12月31日，共计121天。

选取北京地区连续30年的平均室外温度0.6℃作为温度的修正系数。

通过北京市朝阳区气象局提供的专业气象信息，采集热力站所在区域气象站室外温度信息，通过热力一站一日一核算平台，导出2018年至2020年每天的室外平均温度,按照每周单期用热量折算实际平均温度。

2. 3 能耗数据分析利用

在成本利润化大趋势的影响下，能耗管理系统的重要性就凸显了出来，可以根据当日室外天气气象数据，依据“一站一日一计划”平台核定的计划供热量及预计供热量数据，派专人使用“新智无人值守”平台进行二次供温调节，并根据热力站的实际情况设定温度控制曲线，在气温相对稳定的情况下，采取分时段、曲线控制，通过加强调节频次，确保热量供需平衡，减少能源浪费，保证居民用户有着良好的用热体验。通过参考各站热量数据，便于运行过程中根据数据进行过程调控，做到科学化、智能化管理。

对于老旧小区，投诉量较大热力站，服务站结合户内测温数据，在保证二网平衡，且末端居民室温达标的前提下，根据当日室外温度，服务站加强巡查频次，适当进行热耗压减，热指标不合规的情况下提供相关证据至分公司尝试调整指标。

对于公建、空调站点，结合公建站点实际使用特色，白天及工作日使用频次高，夜晚使用需求降低，夜间及非工作日进入低温运行状态，服务站通过使用方沟通运行时段，因地制宜设

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

定调控方案，从而保证当日核算执行到位率合格。

通过上述调控措施，所辖热力站的核算指标数据分析，根据实际与往年情况变化对比分析，尽量调控方法采用对比最优化的控制方式在保证居民用热体验的前提下进行热力站调控，当出现预报温度和实际温度偏差较大时，采用自动控制和时段控制相结合的方式调控，实现按需供热，确保居民室温达标的同时合理降低热耗，提高供热企业效益和较少能源浪费。

第3章 不同类型热力站能耗现状研究

3.1 住宅类建筑不同节能等级对比分析

面对建筑用能情况越来越受重视， 国规制定了建筑的三步节能标准，1980年建筑设计为基准节能水平；第一步节能是1986年后建筑设计要求在基准节能的基础上节能30%；第二步节能是1995年后建筑设计要求在一步节能的基础上节能30%，最终达到节能50%，第三步节能是2004年后建筑设计要求在二步节能的基础上节能30%，最终达到节能65%。其中30%的节能中，建筑物占20%，供热系统占10%。国家的这些举措，旨在提高住宅类建筑物的供热质量，减少热能耗损失。

节能水平属于基础节能的共81座热力站，供热面积468万㎡，其中2018年平均折算单耗0.2732GJ/㎡；2019年平均折算单耗0.2745GJ/㎡；2020年平均折算单耗0.2666GJ/㎡，三年平均折算单耗0.2718 GJ/㎡。

节能水平属于一步节能的共75座热力站，供热面积337万㎡，其中2018年平均折算单耗0.2701GJ/㎡；2019年平均折算单耗0.2722GJ/㎡；2020年平均折算单耗0.2660GJ/㎡，三年平均折算单耗0.2694GJ/㎡。

节能水平属于二步节能的共67座热力站，供热面积490万㎡，其中2018年平均折算单耗0.2605GJ/㎡；2019年平均折算单耗0.2612GJ/㎡；2020年平均折算单耗0.2525GJ/㎡，三年平均

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

折算单耗0.2580GJ/㎡。

节能水平属于三步节能的共209座热力站，供热面积1469万㎡，其中2018年平均折算单耗0.2085GJ/㎡；2019年平均折算单耗0.2108GJ/㎡；2020年平均折算单耗0.204GJ/㎡，三年平均折算单耗0.2077GJ/㎡。

结论：从上述的三步建筑的实际节能可以看出，随着建筑节能等级的越来越高，建筑的能耗下降的更加显著。

3.2生活热水对能耗的影响

随着人们生活质量的提高，居民对用热量的要求也日益增加，其中生活热水用热量尤其凸显出来，通过2018-2020年的生活水热力站和纯采暖热力站平均折算单耗的对比分析。

2018年生活水热力站平均折算单耗0.2448GJ/㎡；2019年生活水热力站平均折算单耗0.2462GJ/㎡；2018年生活水热力站平均折算单耗0.2496GJ/㎡；

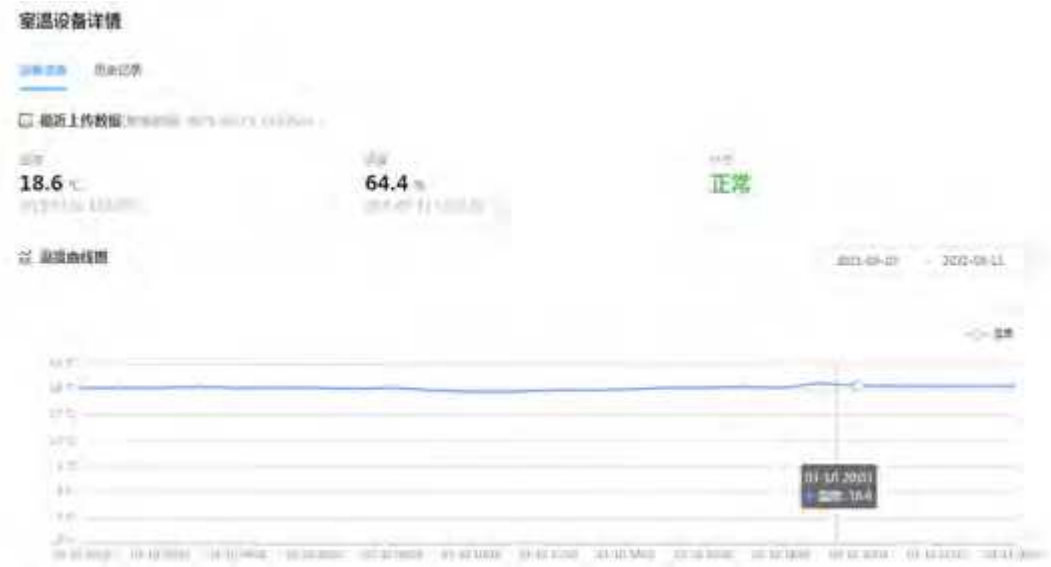
2018年纯采暖热力站平均折算单耗0.2331GJ/㎡；2019年纯采暖热力站平均折算单耗0.2345GJ/㎡；2018年纯采暖热力站平均折算单耗0.2282GJ/㎡；

为了满足生活热水需求，生活水热力站比纯采暖热力站热耗高5%左右。

第4章 典型节能措施节能效果研究与分析

4.1供热系统节能降耗的意义

从节能的角度，合理的二次管网水力平衡的调整，可以有效降低水、电热的单耗，节约水、电、热的运行成本，为分公司节省成本支出，提高企业效益。在二次管网水力工况存在不平衡的情况下，有的楼栋尤其是近端住户，室内温度偏高，远端住户室温偏低不达标。这时会产生以下几种情况：一方面为了保证上述住户室温达标，热力站要提高整个二次管网供热温度参数，普遍提高住户室内温度，热的用户室温更加热，冷的用户室温接近达标，浪费了大量的热能。另一方面，热力站加大二次管网循环泵的流量，使管网趋于平衡，浪费了大量的电能。同时，不达标住户在散热器各末端私接水龙头泄放供热系统水，也导致系统热能和水的流失。如果能够做好二次管网水力平衡调节，将消除供热系统的水力失调，节省水、电、热的单耗，



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

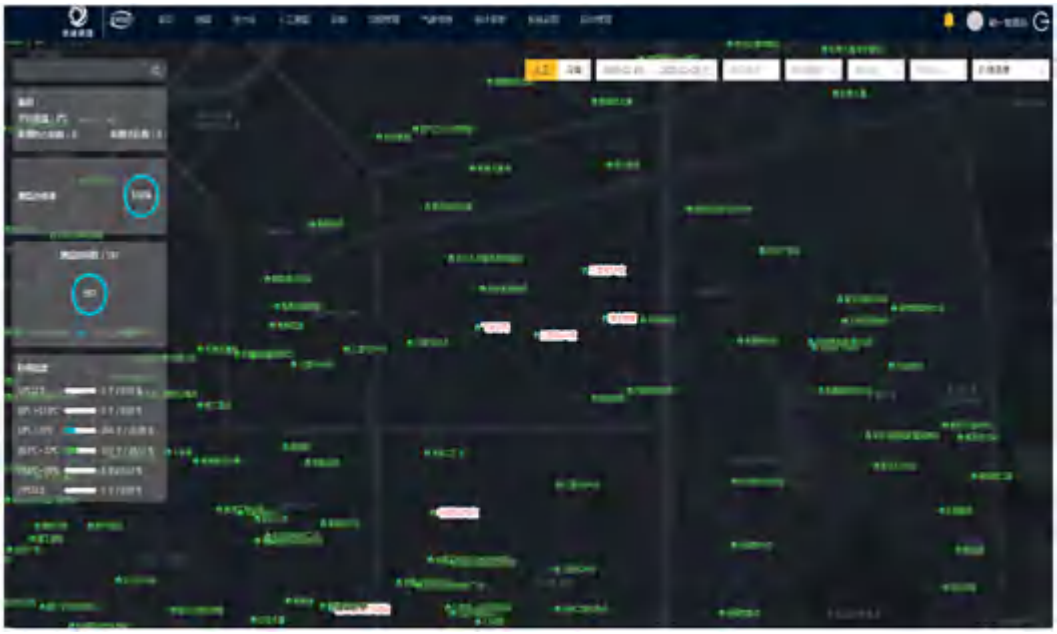
避免通过简单提高供热温度参数和循环泵流量或在用户端加水龙头的方法来应付解决。

4.2供热系统二网平衡项目实施分析

室温采集装置

北京热力朝一分公司开展为居民室内安装室温采集器的工作。选择远中近、高中低的典型用户进行安装，结合后续水力计算和调节工作，为效果验证提供有力的数据支撑，同时也为理论计算和实际工况差别提供微调的依据。

分公司计划在10个小区中安装，共计1100个室温采集点，目前已安装550个采集点，可时时监控用户室内温度情况，为调节平衡提供帮助。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

对能耗超标的热力站逐站分析

筛选出2018年至2020年的平米热耗≥0.3GJ的统代居民热力站初步筛，分析能耗超高原因，督促服务站按新标准收集运行数据，编制诊断报告，进而根据诊断报告进行二网改造。

分公司从今年1月开始对所管辖居民住宅小区、统管和代管热力站、建筑楼栋、热力单元入口等信息开展了详细普查。目的是为了尽快摸清不同年代和保温的统代管居民住宅面积、热耗、楼口二网平衡现状，为分公司制定二网平衡和智慧供热实施计划奠定基础。

“二网平衡”方法探研

1. 技术原则：站内一次侧供回水、高低区二次侧供回水温度无线监控。根据现场工艺情况，加入自控系统，调节一次侧回水与二次侧回水（一个区即可，高区或低区均可）温控阀节约能源。温控阀连接后，具备自动调节开度及远程控制和无线开度功能。此自控系统为无线系统，可做到根据室外温度自动调节温度控制阀开度，精准控制供水温度。在小区单元回水管上（前、中、末端各2处）加装回水温度测点，实时监控管网温度变化。

现场实施：在站内有220V电源供电处加装AutoHeat控制器，用来采集无线温度测点。在一次侧供回水、二次侧高低区供回水上加装T2温度胶囊，监控温度，共计6个测点。将一个区（高区或低区）的温控阀通讯模块与AutoHeat控制器连接，再将一次侧温控阀通讯模块与AutoHeat控制器连接，即控制两个温控阀。加装前中末端，各2个单元的回水温度无线监测反馈点，共计6个测点。

预期效果：加装调试完成后，可根据AutoHeat控制器内数据库自主学习模块，结合室外温度、回水温度、热负荷量、室内温度等常用参数计算的节能算法，通过调节温控阀精确控制供水温度，减少热量的损失。运行过程保证不影响系统当前运行状况，不影响热用户室内温度体验。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

		控制单元		
EC01		36.400002	27	8.371571
EC02		1	1	75.000603
EC03		2.5	3.1	100
EC04		36.400002	27	0
EC05		4.9	0.4	100
EC06		0	0	9.813358
EC07		0	20	0
EC08		0	0	0
		输入AI值		
AI01	二次供水温度	36.299999	31.80062	58.05052
AI02	室外温度	13.1	16.570694	14.629521
AI03	二次回水温度	34.700001	28.764056	40.834185
AI04	一次出水温度	36.799999	31.069431	62.644161
AI05	一次进水温度	89.599998	82.332462	91.33847
AI06		34.299999	33.139893	34.930233
		输入VI值		
VI01	二次供水压力	3.9	2.71185	4.10432
VI02	二次回水压力	2.9	2.4512	3.44896
VI03	一次进水压力	7.1	5.5098	8.946303
VI04	一次出水压力	2.6	1.48224	4.87468
VI05	水箱液位	111.099998	59.094002	121.788902
VI06		0	0	0
		输入DI状态		
DI01	1#循环泵反馈		ON	
DI02	1#补水泵反馈		OFF	
DI03	加药泵反馈		OFF	
DI04	2#循环泵反馈		OFF	

2.技术方案简述

在原系统每个入楼口供回水主管泄水阀位置上，安装快速接头（不影响原泄水功能），快速接头能够连接温度、压力传感器，将系统的运行参数采集到新研发的快速调节诊断手持仪。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

手持仪通过内部软件运算，直接计算出各个入楼口所需要的流量，运维人员只需要按照手持仪的提示，操作管道上的阀门开大或关小，就可以完成整个小区流量的分配，达到系统水力工况的初平衡。

另外，通过向手持仪中输入站内各设备的运行参数，系统关键点的压力数据，手持仪会根据内部的故障判断模型，判断站内系统阻力是否合理，设备运行是否正常，如板换阻力、循环泵运行参数等。

同时，会在小区某些住户室内安装室内温度面板，采集住户室内温度，验证调节达到的效果。

3.达到的效果

量化系统运行过程中的各项参数，使运维人员能够看得见系统各分支的流量、压力、温度等数据。

缩短系统水力平衡的调节时间和工作量。借助手持仪，运维人员可以直接将阀门调节到合适的开度，不需要反复进行调节。

参考文献

[1] 孟慧秀. 热力站耗能设备节能措施浅析[J]. 科技情报开发与经济.2010:12~13

[2] 果俊梅 刘金平 李孝平 . 热力站调节控制方法的探讨 [J]. 区域供热 .2010.4:34~36

[3] 牧原，王俊杰. “无人值守”热力站计算机监控系统[J]. 自动化仪表.2002:35~37

[4] 张继民. 集中供热采暖系统常见问题解析[J]. 科技信息. 2011.12:54~56

[5] 徐杨.小区采暖方式的选择[J].科技风.2010.12:24~25

作者简介

刘晓晨，供热工程师，现工作于北京市热力集团有限责任公司朝阳第一分公司供热生产部，主要从事于供热生产管理。单位地址：北京市朝阳区望花路甲1号，邮编：100101，联系电话18001031860，Email地址：licyon@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

数字化技术的智慧供热系统设计研究

关怀[1] 王海营[1] 马斌[1] 艾方兴[1] 曲辰 王志浩[1] 李庆鹏[1] 郑添全[1]
(1.华能大连电厂 辽宁大连 116100)

摘要：随着国内“互联网+”智能能源的发展，智能供暖已成为传统供热项目的重要发展方向。基于供热系统的数据收集，传输和分析过程，智能供热技术的系统结构主要包括物理系统层，物联网识别层，智能控制层，系统安全技术和标准化建设系统。包括物理系统层的关键技术包括高效热源，液压网络液压平衡，蓄热，热力和功率调节等。物联网感知层的关键技术包括全面的数据感知和有效的数据传输。智能控制层中的关键技术包括对多个供热网络的优化控制，大数据分析和全面的评估系统。系统安全技术主要分为管理系统，技术系统和运维系统。标准化系统的建立主要包括热网物理系统和信息系统的相关标准。为了进一步促进智能供暖的发展，不断提高供暖系统的计算机化，数字化和智能化水平，并利用太阳能，地热，生物质能等可再生能源实现绿色供暖。电力系统和天然气系统紧密耦合，以充分利用各种能源的特征。基于大数据，云计算和其他信息技术，我们将提高用户的节能意识，提高供热质量，并扩展供热服务。鼓励和支持各种新的供暖技术，并进行新的演示和试验。它管理收费机制，并采用相关政策和标准来指导智能供暖的发展。

关键词：智慧供热 物理系统 物联感知 智慧控制 系统安全

引言

我国的工业供热具有生产技术相对落后，产业结构不合理等现象。平均而言，主要工业产品的单位能耗比国际先进水平高约30%。大多数热力公司的劳动力成本高，关于加热网络的信息不足，广泛的加热方法，能源消耗高，热源相对隔离，热交换站与热用户之间以及用户之间的信息，我仍然遇到诸如满意的运营问题。另外，家用热源主要是燃煤动力。在产生热量的过程中，由于技术限制和监管不力，大量污染物的排放造成了一些空气污染。近年来，注意力已经集中在由多种能源使用方法引起的资源浪费和环境污染上。

1智慧供热发展背景

供热工程是与人们生活息息相关的重要基础工程。随着社会的不断发展和城市化的快速发展，我国供热规模正在日益扩大。图1和图2显示了《中国统计年鉴》在过去20年中计算出的城市中蒸汽和热水加热，蒸汽和热水管道的长度。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

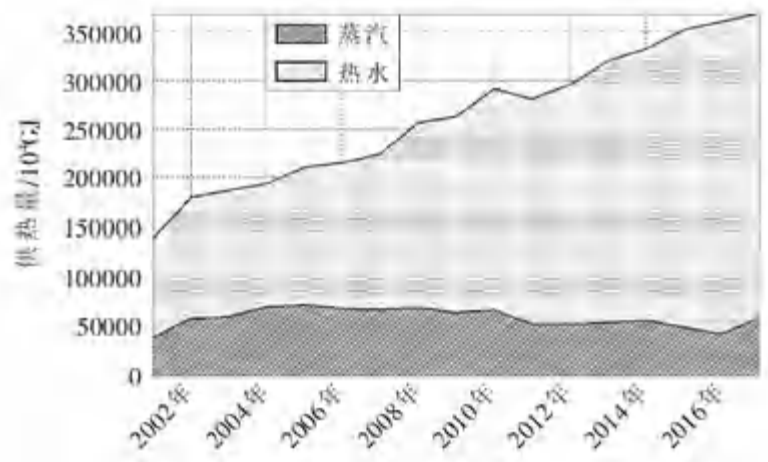


图1我国蒸汽和热水供热量变化

2001年的城市供热量为137847 x 104 GJ，2017年的城市供热量为368285 x 104 GJ，增长了167.17%。1998年，蒸汽和热水管的总长度为34,308公里，但在2017年增长了522.51%，达到276,288公里。同时，采暖面积从1998年的86540 x 104立方米增加到2017年的830858 x 104立方米，增长了860.09%。随着供热工业的快速发展，供热能耗迅速增加，与供热有关的环境污染问题也在日益增加。因此，与供热相关的研究人员不断更新他们的供热技术，以提高供热效率，提高能源效率并减少供暖污染物排放。

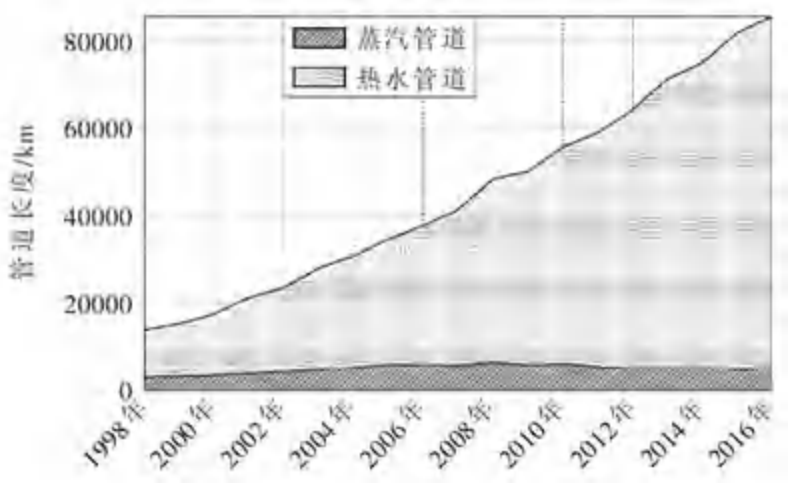


图2我国蒸汽和热水管道长度变化

近年来，互联网已逐渐融入各个领域，并在促进互联网发展中发挥了强大的作用。2015年7月，立法机关发布了立法机关关于积极推动“互联网+”行动以鼓励在多个领域应用“互联网+”行动的指导意见。2016年2月，国家发改委，能源局，工业和信息化部联合发布了《关于促进互联网+智能能源发展的指导意见》，并指出了“互联网+”智能能源。，（能源互联网）是一种互联网和能源。能源工业的一种新发展形式是生产，传输，存储，消费和能源市场的紧密

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

结合。它的主要功能是设备智能，多能量调节和计算机化。对称，供需分散，扁平系统和公共交易。同时，智慧城市建设快速发展，“互联网+”智能能源理念逐步落实，通信技术和控制技术不断更新，物联网等先进技术的应用范围，大数据和云计算正在扩展。

这些因素使供暖项目成为能源行业的重要部门，朝着智能供暖迈进，并不断提高供暖质量和能源效率。智能加热是将物理加热系统和信息系统深度集成的智能系统。诸如传感器技术，空间定位，物联网和信息安全之类的技术可用于完全连接热源，热网络，热站，热用户和系统内的存储。热力设备充分利用大数据，云计算，人工智能，建模和仿真技术的优势，优化供暖系统中各设备的控制，互联，综合识别和智能决策，具有以下特点。

随着许多新的加热设备，控制方法和互联网技术的应用，传统的加热系统变得越来越智能。许多国内外学者对智能供暖进行了深入的研究和工程实践。2017年5月，陕西省城市供热协会主办的首届智能供暖论坛在青岛举行。在2019年7月，中国城市采暖协会发布了《2019年中国采暖蓝皮书–城市智能采暖》，内容涵盖了开发过程，技术架构，系统规划，设计和建造，生产控制以及智能采暖的实际案例，有用的概述。

智能供热系统是涉及供热公司，系统集成公司，设备制造商以及整个热用户产业链的系统项目，包括热源，热网，热交换站和设备过程，数据识别以及整个热传递用户是有针对性的，系统智能控制等技术。本文是对智能供暖未来发展的初步介绍，希望它将介绍与智能供暖有关的各种技术，并为与智能供暖有关的研究人员和工程师提供有用的参考资料，并具有良好的前景。

2智慧供热关键技术

智能供暖的建设围绕供热系统，充分利用各种先进的信息控制技术，实现供热系统的精确控制，满足用户的供热需求。基于供暖系统中数据的采集，传输和分析过程，智能供暖的技术架构可分为物理系统层，物联网感知层和智能控制层。同时，为了确保供热系统的安全和标准化，有必要继续加强和应用安全技术并建立标准系统。图3显示了智能供暖技术的体系结构。用于热源，热网络，热交换站，热用户的各种设备技术。物联网感知层主要涉及信息感知和信息传输。智能控制层基于物联网传感层获取的信息，实现最优控制，故障诊断等。

图3智慧供热技术架构

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.1物理系统层

2.1.1高效的热源

通过将热三联相结合，可以实现多能源供应，与燃气锅炉相比，可以更好地体现“温度匹配，分步使用”的能耗原理。近年来，热电联产技术已广泛用于区域供热。同时，合理有效地利用各种余热资源和可再生能源进行取暖，也是减少取暖能耗，实现清洁取暖的重要途径。吸收性热交换技术可用于热源和热站，以提高能源效率。具体地，驱动冷凝式蒸汽轮机的废气的吸收式热泵安装在火力发电厂中，以使废气的热量最大化。通过在火力发电厂中安装吸收式热交换单元，可以将加热管网的回水温度降低到20° C，可以增加供水管和回水管之间的温差，并进行加热我会增加加热管网的容量。热泵技术使用高度的电能来获取热量。与将电能直接转化为热量相比，地热热泵和空气热源热泵等设备可以有效地提高加热效率。

2.1.2水力平衡技术

管网水力损失，管网水力损失和管网散热损失是热网损失的主要标志，其中由管网水力不平衡引起的热损失占最大比例。因此，有必要充分利用液压平衡技术来提高加热网络的整体效率。水力平衡技术是指使用水力平衡器来调节热力管网的阻力，以使用户获得的流量等于设计值。作者写道，热力系统中管道，阀门和热交换器的实际电阻与设计值有一定偏差，因此，当实际流量达到最大时，用户无法获得最佳加热效果。因此，在调节水力平衡的过程中，有必要结合实际的加热效果来改变流的设计值。常用的液压平衡方法包括手动平衡阀调整和自动平衡阀调整。

2.1.3储热技术

传统的供暖系统根据室外温度来控制供暖，供暖的高峰和低谷差别很大。如果供热不足，则该设备的效率将降低，无法满足由峰值热负荷确定的装机容量。通过在加热系统中安装储热设备，可以校正热负荷的峰值，谷值和谷值，并平滑热负荷曲线。同时，可以充分利用余热资源，太阳能，电锅炉等，以进一步提高供暖系统的经济性和清洁度，并提高优化能源系统供暖的能力。分配空间和时间根据蓄热介质的状况，可以将蓄热装置分为水蓄热，导热油蓄热和耐火砖蓄热。另外，相变储热技术正在逐步应用于工程中。

2.1.4热电协同调控

火力发电厂中的传统供热系统通常采用“利用热量来确定电能”的原理进行操作。此模式降低了电源系统的灵活性，并对风能消耗和PV施加了一定的限制。协调和优化电力和热力系统，在传统的热力系统中增加电锅炉，电压缩热泵，热能存储设备和其他设备，以最大化加热网络本身，管道和传热延迟，并加热网络中的热交换器。它的性能特征可以打破传统的“利用热量来确定电力”的操作模式，并提高电力系统的调节能力。

2.1.5用户热计量和需求响应

卡路里测量是一种加热操作方法，可让您测量和收集用户实际消耗的卡路里。它可以促进用户的自愿节能，并降低用户的能源成本。这是减少建筑物能耗的有效方法。主要的热量测量方法是散热器热量分配方法，用户温度计方法，流量温度方法，切换时区方法和温度区方法。各种热量测量方法的应用范围是不同的。有必要根据建筑物的状况（新建，改建，扩建等）和建筑物中加热设备的形式来决定使用哪种测量方法，以及项目计划的经济学。在促进温度计技

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

术的应用过程中，仍然需要解决有效的室温控制，家庭之间的热传递，热水质量和热量定价系统的问题。

随着加热系统中智能电表的改进和热量测量的发展，热用户可以逐渐满足并参与热量需求。与电网的需求响应类似，热电厂和热用户达到了在动态热价的影响下更改热参数，稳定热负荷并减少高峰和低谷的目标。并且减轻了热阻塞的问题。在热需求响应过程中，可以通过将系统中的热量消耗与诸如变频泵之类的辅助设备的能量消耗进行全面比较，来实现供暖系统的最佳运行。

2.1.6建筑节能

建筑节能技术主要包括改善建筑设计，优化围护结构（外墙，窗户，屋顶）的热性能以及有效利用太阳能。建筑物的设计必须考虑建筑物的热交换，通风和照明的水平，并且可以使用动态热模拟技术来确定最佳的建筑物计划。研究指出，不同建设计划的能源消耗相差超过30%。通过在现有或新建筑物的外墙和屋顶上安装聚苯乙烯板等隔热材料，并将单扇窗户改为带双层玻璃窗的中空窗户，可以有效提高建筑物的隔热性能，并提高建筑物的能源利用率可以增加，可以减少。经济合理，取决于外窗的传热系数，外墙的传热系数，屋顶的传热系数，窗与墙的比例以及其他影响能源消耗和经济因素的因素确定围护结构的材料是否合理。

2.2物联感知层

智能供暖的物联网识别层主要包括数据采集与通信，现场数据采集与上传完成，控制平台控制信息传输，现场控制反馈信息上传等过程。现场获得的数据包括温度，压力和流量，温度，压力，热源入口/出口阀的开度，供热网络中的变频泵频率以及房间供暖用户的温度，压力，流量，温度。为了实现热电联产功能，有必要获取热源，热网和热用户的数据，然后使用高速双向实时集成通信网络将数据发送到上层设备。监控和优化供热网络运行的法规。通信网络主要分为有线和无线系统。由于加热系统占地很大，因此通常使用无线方法，例如无线自组网（ZIG-BEE），网桥连接和GPRS传输。网络时钟同步技术用于确保实时热电偶的正确时序，加热网络时间数据以及控制指令。数据采集与传输技术解决方案需要综合考虑数据传输距离，传输速度，设备成本，实时性能，覆盖范围等，以便根据供热系统的实际情况确定合理的技术解决方案。

2.3智慧控制层

2.3.1多源热网优化控制

多源加热网络是一种加热方法，其中加热系统具有多个热源。通过不同类型和大小的热源的网络操作，您可以充分利用不同热源的特性，加热系统的经济性，加热系统的可调节性和可靠性，并改善操作和管理。优化了供暖系统的水平，方便在城市中使用。中国供热基础设施的扩展和发展。多源加热网络的最佳控制优先考虑可再生热源和高效热能的使用，并考虑到各种热源的动态特性，能源利用效率，可重复性，稳定性和经济性等因素。多源热网的优势取决于热源的合理地理分布，热源的正确启动和运行策略以及有效的热传递和分配。

2.3.2大数据分析技术

通过基于从物联网感知层获得的供热网络数据应用大数据和人工智能，可以有效提高智能供热网络的运行水平。大数据和人工智能在智能加热网络中的应用包括基于用户数据的负荷预

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

测，加热系统关键设备参数的识别，加热参数的调整（加热温度，流量等）和处理。不限于这些。此外，大数据技术可用于分析用户的卡路里消耗特征，从而为扩展，重建和规划城市供热网络提供强有力的支持。

2.3.3评价体系

建立科学，全面的评估体系，是指导智能供热相关技术升级，提高供热质量，提高供热效率的重要基础。需要围绕热源，热网络和热用户建立相应的指标。热源指标主要包括热源效率和可靠性指标，而热网络指标包括传热效率，传热系数和能耗率。供热用户指标包括热利用效率和水力发电。规划，散热等它还包括总体指标，例如供暖系统的碳排放量和能效。在获得每个子索引之后，使用层次分析法和其他方法来建立智能供暖系统的综合度量系统。

2.4系统安全

为了确保智能供热网络的数据安全，有必要建立一个数据安全系统，以防止数据网络瘫痪，防止供热网络数据丢失，防止重要的数据泄漏和应用系统损坏。系统数据安全系统主要分为管理系统，技术系统以及运维系统。管理系统包括数据访问和更改权限管理，设备信息管理，人员管理等。技术系统包括非法外部监视，物理监视，数据加密，应用程序防火墙等。运维系统包括安全事件响应计划，操作日志管理等。

2.5标准化体系

为了促进智能供暖的顺利建设，有必要为热网的物理和信息系统建立标准化的系统。对于热网的物理系统，需要指定热源的原理，热网，用户测量数据，特定类型，采集频率，数据准确性等。信息接口标准化是设备和热网管理系统的输入和输出，包括网络通信协议，不同系统之间的数据交互格式，报告文件格式，数据统计信息等，以确保平滑的数据交互。

3数字化技术智慧供热未来发展方向

3.1技术层面

智能加热的结构是一个有机的整体，涵盖了物理加热系统和信息控制系统。基于信息流的能量流最佳控制需要持续改善供暖系统的计算机化，数字化和智能水平。合理有效地利用太阳能，地热能，生物质能和其他可再生能源实现绿色供暖将是智能供热网络发展的重要方向。同时，进一步加强供热系统与电力系统之间的耦合作用，使热电的各种特性最大化也是提高能源系统整体效率的重要方向。

3.2商业模式层面

我们将继续扩大温度计技术的应用范围，提高用户的节能意识，实现节能终端。基于智能取暖的全面信息识别，大数据和云计算等先进技术被用于能源系统的能源分析，以向相关用户提供能源诊断，优化能源使用策略和优化能源使用策略，从而进一步减少用户能源费用。同时，它基于供热设备整个生命周期的运行数据创建设备文件，提前发现隐藏设备的危险，减少各种风险的发生，并提高了供热网络系统的安全性。

3.3政策层面

鼓励和支持各种新的供热技术和新的示范试点工作，并根据市场法简化供热和充电机制。在城市规划中，有必要充分利用该地区的各种资源，综合考虑供热网络的建设。我们将积极宣布智能取暖的建设标准，促进智能取暖的标准化。建立典型的智能供暖案例库，以向关联公司

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

提供参考样本。

4结论

随着城市供热需求的不断增加和供热质量要求的不断提高，智能供热逐渐成为供热系统发展的重要趋势。智能加热是传统加热系统和许多信息控制技术的结合。它在提高加热质量，减少加热能耗和确保加热安全方面起着非常重要的作用。楼宇智能供暖系统包括多种技术，包括物理系统层，物联网识别层，智能控制层，系统安全性和楼宇标准系统。各种技术需要不断更新和升级。未来，智能供暖技术将更加环保，高效，并将与电气和天然气系统紧密集成，以充分补充各种能源系统。同时，需要不断改革业务模型和政策，以更好地推动智能供暖的建设和功能。

参考文献

[1]方修睦.智慧供热对供热企业及相关企业的要求[J].煤气与热力，2018，38(3)：1-6.

[2]钟崴，陆烁玮，刘荣.智慧供热的理念、技术与价值[J].区域供热，2018(2)：1-5.

[3]中国城镇供热协会.中国供热蓝皮书2019：城镇智慧供热[M].北京：中国建筑工业出版社，2019.

[4]李岩，付林，张世钢，等.电厂循环水余热利用技术综述[J].建筑科学，2019，26(10)：10-14.

[5]付林，江亿，张世钢.基于Co-ah循环的热电联产集中供热方法[J].清华大学学报：自然科学版，2018，48(9)：1377-1380，1412.

[6]张承虎，张金生.二级网供热系统水力调节及节能改造[J].区域供热，2019(4)：55-60.

[7]朱翼虎，王芃.水力平衡技术的现状分析与物联网水力平衡阀的应用[J].区域供热，2019(5)：80-83，117.

[8]徐飞，闵勇，陈磊，等.包含大容量储热的电-热联合系统[J].中国电机工程学报，2019，34(29)：5063-5072.

[9]顾泽鹏，康重庆，陈新宇，等.考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J].中国电机工程学报，2019，35(14)：3596-3604.

[10]赵玺灵，付林，甄浩然，等.热电协同型热电冷三联供系统新流程和运行特性研究[J].区域供热，2020(5)：116-122.

作者简介

关怀，华能大连电厂运行部主值班员，中级工程师，注册安全工程师

通信地址：辽宁省大连华能大连电厂运行部 邮编：116100 联系电话：18840877050

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

调节型喷射泵在供热系统中的应用

万元欣　邵顺刚　陈永进
（华能上安电厂）

摘要：老旧小区供暖系统中存在同一个小区采暖方式不同的情况，地暖、挂暖共用一套二级管网。一般情况下，地暖用户所需供、回水温度为45℃、35 ℃，挂暖用户所需供、回水温度为55℃、45 ℃。地暖、挂暖混供导致室温不均衡，挂暖区域室温偏低，地暖区域室温偏高，同时造成热量浪费。随着热力事业的发展，热网的覆盖面积逐年增大，人们对生活舒适性的主球越来越高，对供暖要求的质量也越来越高，按需供热与供暖用户的舒适度有着直接关系，因此如何有效解决地暖挂暖混供问题，从而实现按需供热显得尤为重要。

关键词：调节型喷射泵　地暖挂暖混供：平衡阀

上安电厂在老旧小区供热系统改造工程中，利用可调节型喷射泵技术实现地暖挂暖分别供暖，达到用户室温均衡。本文通过鹿泉经济开发区南新城小区供热改造工程的分析，对喷射泵的设计原理、设备选型、安装使用过程深入研究，对设备技术指标进一步规范，希望对各个环节实现更加有效的控制。

1调节型喷射泵原理

喷射泵是以伯努利原理为理论基础，通过动压与静压的转换实现热力系统的扩容以及水

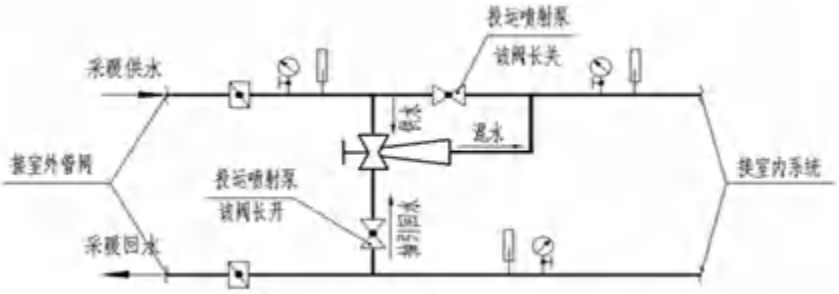
微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

力平衡。利用喷射泵系统，可以实现降低地暖区域供水温度，挂暖区域供水温度不变的运行方式。

调节针⑤的移动改变喷嘴①的截面积，将静压转化成动压，流速越大压强越小，在混合喷嘴②处产生低压区，形成对周围流体的吸力，两股流体在喉管③处充分混合后进入扩散管④，随着扩散管截面积的不断扩大，流速逐渐降低，动压转化成静压，压力不断提升，对混合后的流体产生推动力。

2确定方案

1）在地暖楼栋分支处安装调节型喷射泵，抽引回水经喷射泵混水后降低供水温度：

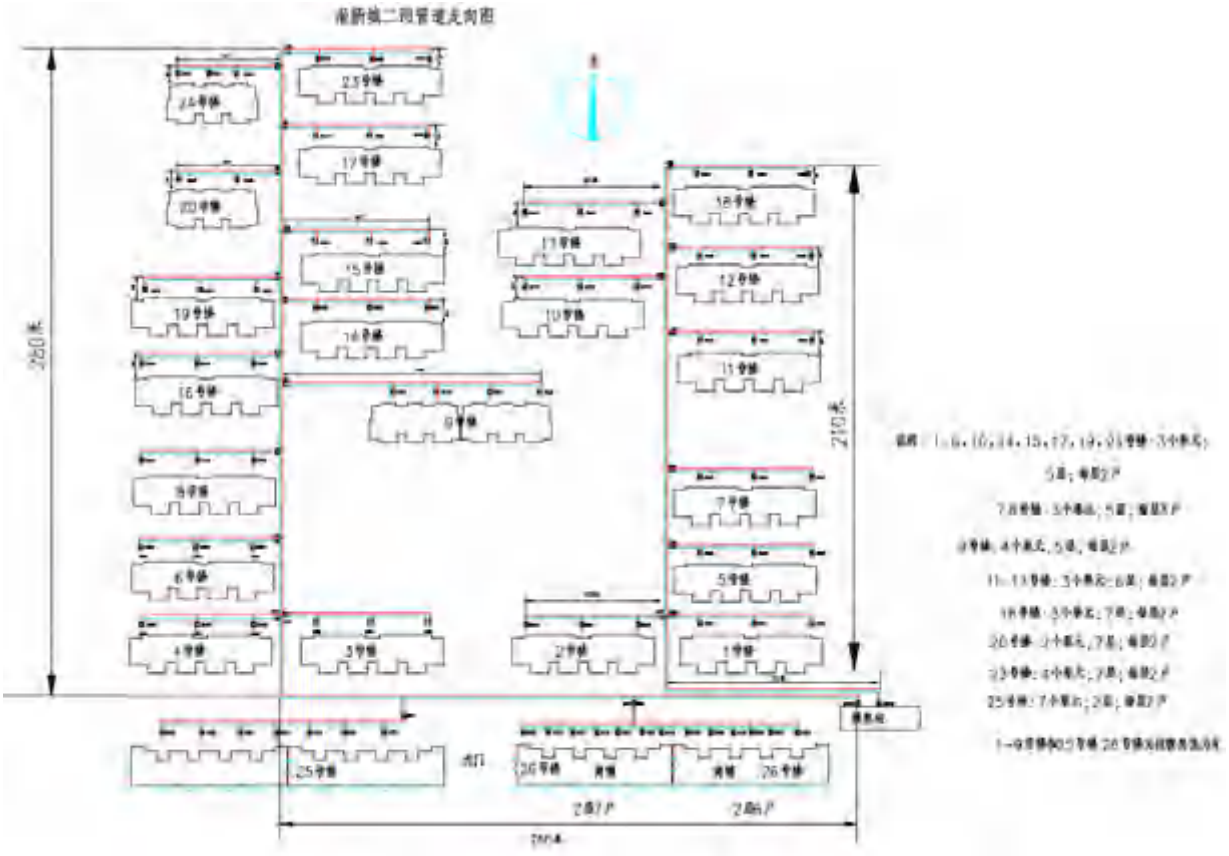


2）在挂暖楼栋分支处回水管上安装高精度平衡阀，用于调节挂暖区域供热流量，供水温度不变：

3设备选型及安装

1）前期的调研工作对于调节型喷射泵的设计选型非常重要。其中循环泵的额定流量、额定扬程、额定功率、运行台数、运行频率、总的建筑面积、总的实供面积等参数必须准确核实，是确定喷射泵设计流量的重要技术参数。南新城换热站供暖建筑物主要是低层住宅及商铺，总供暖面积约为13.4万㎡，其中地暖面积5.6万㎡，挂暖面积7.8万平方米。小区10–24号楼采用地暖供热，小区1–9、25、26号楼及商业为挂暖方式。站内为两套机组并联供热，该站主要矛盾是两个不同采暖方式的区域共用一套二级管网。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



换热站概况：

序号	名 称	数量	主要性能（额定参数）	实际运行情况	备注
1	二次循环泵	2台	G=171.12t/h，H=33.97m，P=22KW；	G=352.64/h，二次H=13m	2台 43.6HZ
2	板换	4台	Q=6300KW； 换热面积：170 ㎡；	一次103.37/47.06， 二次 58.4/45.5	/
3	其 他		1-9、25、26号楼及商业为挂暖 10-24号楼为地暖	混供	

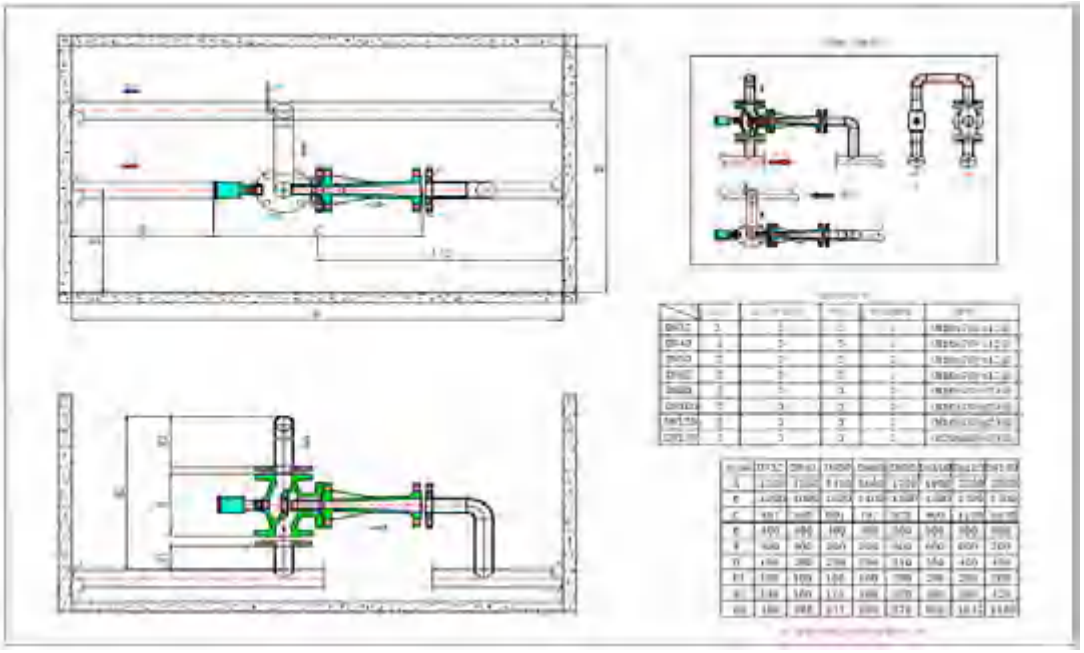
2）严寒期热力站实际运行的一次供水温度、一次回水温度、二次供水温度、二次回水温度等参数也必须准确，是确定混水比的重要技术参数。

南新城热力站2019-2020年供暖季运行情况：

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

序号	项目名称	单位	数值
1	循环泵流量：	T/H	171.12
2	循环泵扬程：	米	33.97
3	循环泵功率：	KW	22
4	循环泵运行台数：	台	2
5	循环泵运行频率：	HZ	43.6
6	二次流量	T/H	352.64
7	二次供水压力：	Mpa	0.36
8	二次回水压力：	Mpa	0.23
9	二次供水温度：	℃	58.4
10	二次回水温度：	℃	45.5
11	一次供水温度：	℃	103.37
12	一次回水温度：	℃	47.06
13	热力站到最远端的管沟长度：	米	464
14	楼层数	层	7
15	供热面积（建筑面积）	万m²	13.4

3）现场确定喷射泵的安装位置，要考虑管井的尺寸能否放下喷射泵，对于管井狭小的管井要关注一下管井的深度考虑喷射泵立式安装方案，管井设备及管道的老化情况，管井的卫生情况等。南新城二级供热管网均敷设于地下管沟内，管沟内径高1.4米，宽1.2米，能够满足喷射泵的安装要求。



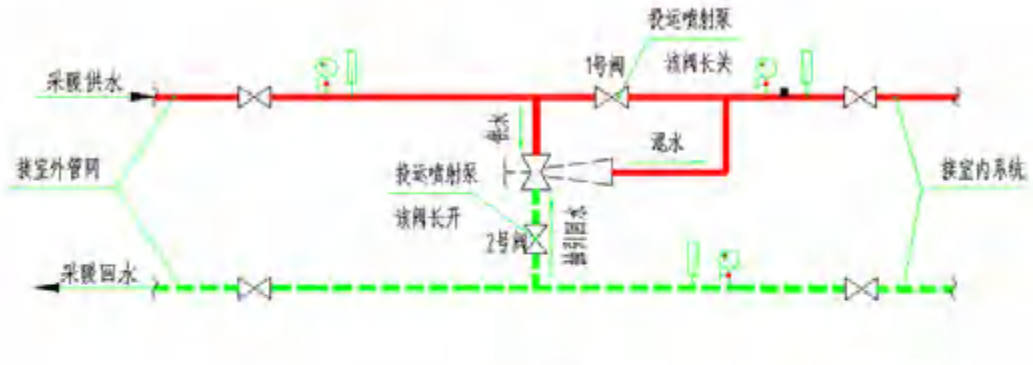
微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4）根据各用热单位的用热面积确定喷射泵及平衡阀的规格大小：

序号	楼栋及单位名称	实供面积	采暖类型	生产喷射泵规格	出厂行程（%）	备注
1	南新城小区10楼	3240	地暖	DN80	65.54	喷射泵
2	南新城小区11楼	3348	地暖	DN80	66.23	喷射泵
3	南新城小区12楼	3348	地暖	DN80	66.23	喷射泵
4	南新城小区13楼	3240	地暖	DN80	65.54	喷射泵
5	南新城小区18楼	3240	地暖	DN80	65.54	喷射泵
6	南新城小区14楼	3672	地暖	DN80	68.23	喷射泵
7	南新城小区15楼	3348	地暖	DN80	66.23	喷射泵
8	南新城小区16楼	3456	地暖	DN80	66.90	喷射泵
9	南新城小区17楼	3132	地暖	DN80	64.84	喷射泵
10	南新城小区19楼	3456	地暖	DN80	66.90	喷射泵
11	南新城小区20楼	2484	地暖	DN65	71.29	喷射泵
12	南新城小区23楼	1989	地暖	DN80	56.54	喷射泵
13	南新城小区24楼	1300.5	地暖	DN80	50.31	喷射泵
14	南新城小区1号楼	2484	片暖	DN80	62.77	高精度平衡阀
15	南新城小区2号楼	2808	片暖	DN80	65.23	高精度平衡阀
16	南新城小区3号楼	2592	片暖	DN80	63.61	高精度平衡阀
17	南新城小区4号楼	2268	片暖	DN80	62.77	高精度平衡阀
18	南新城小区5号楼	2268	片暖	DN80	61.05	高精度平衡阀
19	南新城小区6号楼	2484	片暖	DN80	62.77	高精度平衡阀
20	南新城小区7号楼	2448	片暖	DN80	62.49	高精度平衡阀
21	南新城小区8号楼	2448	片暖	DN80	62.49	高精度平衡阀
22	南新城小区9号楼	3528	片暖	DN100	59.33	高精度平衡阀
23	南新城小区25号楼	1377	片暖	DN65	61.53	高精度平衡阀
24	南新城小区26号楼	520	片暖	DN65	23.97	高精度平衡阀
25	公安厅标牌	4618.76	片暖	DN80	76.88	高精度平衡阀
26	双联复合肥有限公司	3246.17	片暖	DN80	68.33	高精度平衡阀
27	双联化工有限公司	1514.88	片暖	DN50	73.21	高精度平衡阀
28	金隅水泥	4142	片暖	DN80	74.08	高精度平衡阀
29	咪咪咪咪	2569	片暖	DN65	75.27	高精度平衡阀
30	河北安装	5996.75	片暖	DN100	70.07	高精度平衡阀
31	陆源科技	6011.5	片暖	DN100	70.13	高精度平衡阀
32	自来水厂	814.28	片暖	DN40	68.40	高精度平衡阀
33	傅山医院	5506.56	片暖	DN100	68.15	高精度平衡阀

5）“安装示意图”中所标注的1号阀和2号阀必须保证严密性，建议选用焊接球阀。否则会导致关闭不严的分支用户过热，造成严重的水力与热力失调。单个供热系统应全部安装喷射泵，严禁有不装、漏装现象，否则会导致更严重的水力失调。喷射泵的安装具有方向性，有箭头标记的（内口边缘也有钢印箭头标记，以此为准）接口连接供水管道上游，扩散管出口接供水管道下游，另一个接口连接供回水联通管。必须严格安装这种方式连接，不能接错，否则喷射泵无法正常工作。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



4投运调试

1）调节型喷射泵的调节行程DN32-DN80为20mm，DN100-DN125为40mm。根据实际供热建筑面积，在出厂时已经预先设定好了开度，一般不需要现场调节。每个喷射泵都预留了调节余量，在进行现场微调时都具有调节空间。在实际供热运行过程中，当出现用户室内温度过低时，需要到用户家里实际测量用户室温，然后可参照如下公式调节喷射泵开度：调整后喷射泵的行程=喷射泵当前行程*20/当前用户室内温度。比如当前程为15mm，用户室内温度16度，此时我们需要调大喷射泵开度把室内温度升到20度，利用上述公式对应的新的喷射泵行程为：15*20/16=18.75mm。在实际供热运行过程中，需要走访典型用户，测量室内温度，然后对喷射泵进行微调，过热的楼栋调小喷射泵，过冷的楼栋调大喷射泵。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2）调试过程中需要排查喷射泵的混水状况，对于不能正常混水的喷射泵要关闭供回水联通管的阀门，同时将喷射泵的行程放大20%。除了喷射泵之外的所有调节装置要么拆除、要么全部开到最大。喷射泵投运初步调整后地暖区域供水温度明显下降，通过调节高精度平衡阀，控制挂暖区域的供水流量达到二网平衡。

序号	楼号	混水后供温	回水温度	主管供水温度	主管回水温度	调整前阀门开度	调整后阀门开度
1	16	45.4	35.6	49.1	39	8	14
2	14	45.6	35.5	49.2	38.8	7	15
3	15	45.5	35.7	49.8	39.2	8	15
4	17	46.2	35.8	49.2	38.8	9	15
5	19	46.3	35.9	48.8	38.9	8	15
6	20	45.8	36.1	49.1	38.8	7	13
7	23	46.8	36.2	49	38.3	9	15
8	24	45.5	36.1	49.2	38.9	8	14
9	10	45.5	36.2	49.5	39	7	14
10	11	45.6	36.8	49.2	39.2	8	15
11	12	45.7	36.5	49.5	39.2	7	14
12	13	45.8	36.6	49.3	39.1	8	15
13	18	46.2	36.7	49.5	39.2	7	15

3）注意事项

（1）根据喷射泵的工作原理，热源侧供水温度需要保持挂暖区域室温达标的工况温度值。因此，以控制供水温度为调节对象的自控系统需相应调整。

（2）若按照流量进行平衡调节时，应以供水进入喷射泵的流量为基准。不能按照混合后的流量调平衡。

（3）不能依据测温枪去调节温度。应该按照用户室内温度来指导喷射泵的平衡调节工作。

5成果统计

2020–2021年供暖季南新城小区室温基本均衡，地暖用户室温显著降低，地暖平均室温与挂暖平均室温温差由上个供暖季2.95度降至0.54度。热耗同比降低6.2%，电耗同比降低5%。

室温对比：

供暖季	2019-2020 供暖季		2020-2021 供暖季	
采暖方式	地暖	挂暖	地暖	挂暖
室温平均值（℃）	24.14	21.19	23.15	22.61
差值（度）	2.95		0.54	

能耗对比：

供暖季	采暖天数	热单耗（W/m²）	电单耗（kwh/万m²）
2019-2020	122	32.57	62.26
2020-2021	121	30.55	59.14

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

参考文献

【1】吴望一《中国大百科全书》74卷（第二版）物理学词条：流体力学：中国大百科全书出版社，2009-07：50-51页

【2】对我国供热技术发展的展望[J]. 石兆玉. 区域供热. 2015（05）

【3】论述供热管网水力平衡调节方法.陈磊.《科技信息•中旬刊》2017年第03期

作者简介

万元欣：助理工程师，华能上安电厂，供热

地址：河北省石家庄市桥西区工农路669号，邮编050085。

联系电话：17367800040，Email:1312230258@qq.com

邵顺刚：工程师，华能上安电厂，

地址：河北省石家庄市桥西区工农路669号，邮编050085。

联系电话：13831112277

陈永进：助理工程师，华能上安电厂，

地址：河北省石家庄市桥西区工农路669号，邮编050085。

联系电话：17736093675

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

提高阳床周期制水量的一个案例

单晨曦[1] 尹占成[1] 岳明[1] 郭建东[1] 敖彬[1] 王东升[1] 吴宜燃[1] 王成霖[2] 孙成军[1] 王昊[1] 金全[1]
董航[1] 姚远[1] 吴贵德[1]
(1 华能丹东电厂 辽宁丹东 118300；2 华能大连电厂 辽宁大连 116000)

摘要：针对阳床周期制水量偏低、酸耗上升，造成工业废水出水PH异常、无法回收至脱硫补水，通过增加阴床进碱量，废水回收暂时得到解决；找出了阳床树脂劣化，水帽不均匀造成布水偏流为主要原因；通过更换树脂，提高水帽质量，阳床周期制水量明显升高、酸耗明显降低，达到了预期目的。

关键词：周期制水量 酸耗 PH 酸碱费用 水帽

1 设备简况

华能丹东电厂一期工程系Sargent&Lundy设计、整套引进的2X350MW燃煤机组，锅炉补给水系统由U.S.FILTER公司设计、制造；水源为铁甲水库，制水流程为预处理＋碳滤器＋一级复床＋混床；预处理为两台机械搅拌泥渣再循环型澄清池＋重力式滤池，一级除盐包括阳床、除碳器、阴床；为单元制，共两列；除盐系列出口管线设有在线电导率表、硅表。

除盐系列的床体为固定逆流再生；再生酸碱注入原设计使用计量泵，后酸注入改为喷射器；除盐系列有关参数见表1。

表1 除盐系列有关参数

序号	设备	项目	单位	阳床	阴床
1	罐体	总高度	mm	3048	2438
2		直径	mm	2260	2260
3		截面积	m^2	4.01	4.01
4	树脂	层高	mm	1658	1278
5		装填体积	m^3	6.65	5.12

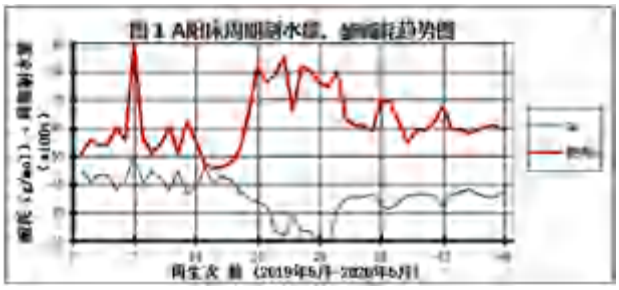
2 存在的问题

从2019年5月起，A阳床周期制水量下降、酸耗上升，出现异常。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.1 周期制水量酸耗趋势图

我们对19年5月18日到20年5月17日间阳床的周期制水量、酸耗进行统计，做出图1。



2.2 周期制水量下降、酸耗上升

从2019年11月24日开始，阳床周期制水量开始下降，最低值到达1859t；对19年3月7日–19年11月3日和19年11月24日–20年5月6日间的周期制水量、酸耗进行统计，得表2。

表2 A阳床周期制水量下降酸耗上升一览表

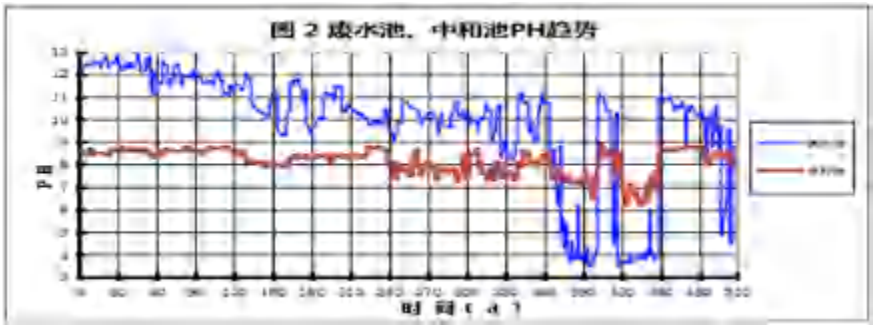
时间区段	统计	周期制水量	酸耗	周期制水量		酸耗	
				下降	幅度	上升	幅度
		t	g/mol	t	%	g/mol	%
19年3月7日-19年11月3日	最低值	3675	45.62	918	22.28	13.44	25.08
	平均值	4120	53.58				
	最高值	4573	61.79				
19年11月24日-20年5月6日	最低值	1859	54.71				
	平均值	3202	67.02				
	最高值	4132	84.85				

可以看出，阳床周期制水量从4120下降到3202t，下降918t，下降幅度达到22.28%；酸耗从53.58上升到67.02g/mol，上升13.44g/mol，上升幅度达到25.08%。

3 造成的后果

3.1 1#废水池、中和池PH趋势

我们对19年1月8日到20年5月31日间1#废水池、中和池PH进行统计，做出图2。



微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.2 工业废水出水PH异常

我厂运行20多年，如19年1月1日–19年5月22日，1#池废水PH一直在11–12.9之间，中和池PH一直处于回收标准的上限限（之前阴床碱耗比较高）；脱硫系统投入、回收工业废水后，由于脱硫浆液运行中PH很低，如此高PH的工业废水恰能起到中和作用。

除盐系列再生工艺调试后，如19年5月23日––19年10月10日，主要是阴床碱耗明显下降，废水池PH从12下降到10.4，中和池PH从8.6下降到8.2，下降了0.4。

但是19年12月12日后，由于阳床酸耗上升，废水池PH最低值下降到3.5，使得工业废水无法回收至脱硫补水，因此我们在再生阴床时通过增加碱量的方法，变相向废水池加碱，中和池PH维持在回收标准的下限，以满足脱硫用水要求；见表3.

表3 1#池、中和池PH

时间段	水样	最低值	平均值	最高值
19年1月1日-19年5月22日	废水池	11	12	12.9
	中和池	8.1	8.6	8.8
19年5月23日--19年10月10日	废水池	9.1	10.4	11.8
	中和池	7.1	8.2	8.8
19年12月12日—20年5月31日	废水池	3.5	7.7	11.2
	中和池	6.2	7.9	8.9

3.3 阴床碱耗增加

对19年11月8日–20年2月1日和20年3月18日–20年5月11日间阴床的周期制水量、碱耗进行统计，得表4。

表4 阴床碱耗上升一览表

时间区段	周期制水量	碱耗	上升	上升幅度
	t	g/moL	g/moL	%
19年11月8日-20年2月1日	2630	58	15	25.86
20年3月18日-20年5月11日	2608	73		

可以看出，阴床周期制水量变化不大；碱耗从58上升到73g/mol，上升15g/mol，上升幅度达到25.86%。

4 采取的措施

4.1 树脂性能分析

2019年12月23日对A阳床阳离子交换树脂性能进行分析，见表5；水分只有上限的报废标准，但是却比正常值的下限还低1.51%，我们在2017年6月5日的测量数值是48.11%，两年多的时间水份降低近5%，说明树脂交换性能已经明显下降。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表5 阳树脂性能试验

序号	项目	单位	报废指标		正常值	测量值
1	体积交换容量	mmol/mL	≤	1.5		2.01
	体积交换容量下降分率	%	≥	25		
2	含水量	%	≥	60	45-48	43.41
3	含铁量(湿树脂)	mg/kg	≥	9500		1460
4	圆球率	%	≤	80		99.75

4.2 更换阳床树脂

树脂水份是树脂进行离子交换反应的载体，充足的水份，是树脂正常工作的保证，因此，虽然报废标准没有规定水份的下限，但是，实际上重要的指标工作交换容量明显下降，酸耗明显上升，已经严重影响阳床运行经济性，因此，2020年12月18日我们对A阳床的阳离子交换树脂进行了更换。

5 取得的效果

5.1 A阳床周期制水量上升酸耗下降

更换阳床树脂后，周期制水量、酸耗见表6；周期制水量达到4906t，上升1704t，幅度达到53.22%；较B阳床周期制水量5161t低254t，较之前的差值710t，收窄656t；酸耗下降到43.8g/moL，下降23.22g/moL，幅度达到34.65%，达到了比较好的水平。

表6 A阳床周期制水量上升酸耗下降一览表

时间区段	统计	周期制水量	酸耗	周期制水量		酸耗	
				下降	幅度	上升	幅度
		t	g/moL	t	%	g/moL	%
19年11月24日-20年5月6日	最低值	1859	54.71	1704	53.22	23.22	34.65
	平均值	3202	67.02				
	最高值	4132	84.81				
21年01月11日-03月06日	最低值	4406	48.8				
	平均值	4906	43.8				
	最高值	5898	36.4				

5.2 废水池PH满足了回收要求

随着阳床运行情况的好转，减少从阴床向废水池的加碱量有了可能，我们从2021年1月21日开始，将每次再生阴床的用碱量恢复正常，观察中和池的PH；对。2021年1月13日--2月24日间PH进行统计：废水池、中和池分别为9.72、10.00，满足了回收要求。

6 经济效益

对阳床周期制水量提升、阴床正常用碱量再生后节约的酸碱用量及费用进行统计，见表7，每年节约盐酸、烧碱费用浪费分别18.18万元、26.99万元，合计45.17万元。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

表7 酸碱费用下降计算表

序号	项目	单位	阳床		阴床	
1	时间区段		19 年 11 月 24 日-5 月 6 日	21 年 01 月 11 日-03 月 06 日	从阴床向废水池加碱	正常用碱量再生阴床
2	年制水量	d/n	1095000	1095000	1095000	1095000
3	周期制水量	d	3202	4906	2600	2600
4	再生次数	次	341.97	223.20	421.15	421.15
5	酸碱用量	t/次	1.4067	1.4067	0.7095	0.4054
6		t	481.05	313.97	298.81	170.74
7	单价	元/t	1088.10	1088.10	2107.08	2107.08
8	酸碱费用	万元	52.34	34.16	62.96	35.98
9	下降	万元	18.18		26.99	
10	合计	万元	45.17			

参考文献

[1] 范玉宝，吴贵德，华能丹东电厂锅炉补给水运行调试[J]. 东北电力技术，2008，29（8）:37-41.

[2] 吴贵德,等,澄清池优化运行实践[J].东北电力技术，399，37（9）:45-48.

[3] 常仁杰，吴贵德，等.提高补给水制备能力的几个途径[C].发电行业水处理技术研讨会论文集 2018.04:230-233.

[4] 王海彬，吴贵德，等.离子交换系统调试方案的制定与实施[C].电力化学2019年学术年会论文集 2019.09:493-503.

[5] 吴贵德，等.一级除盐系统运行失效终点判断方法的改进[C].2019年电力行业化学专业技术交流会论文集 2019.11:320-326.

[6] 杨成典,吴贵德,等.处理周期制水量偏低问题的一个案例[C].第四届发电行业水处理技术研讨会论文集,2020.09:460-463.

作者简介

单晨曦(1982-)，黑龙江望奎人，东北电力大学毕业，工程硕士，高级工程师。

通讯地址：辽宁省 东港市 华能丹东电厂

邮编：118300

E-mail：13904157770@139.com

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

提高制水能力，满足对外供汽增长需求

张风涛　林安飞　单晨曦　肖承武　殷威　杨立永　庞海　王昊　吴宜燃　王东升　焦力刚　姜宇　侯宇林　吴贵德
(华能丹东电厂　辽宁丹东　118300)

摘要：通过完善、整治除盐设备、改造再生系统，对除盐系列再生工艺、失效终点判断方法进行改进，提高了周期制水量，降低了酸碱耗、能耗；进一步实现阳床、阴床同时再生，缩短了再生时间，除盐系统制水能力得到显著提高，满足了对外供汽增长需求，实现了节能减排，取得了良好的经济效益和社会效益。

关键词：同时再生　同时再生　供汽　制水能力　再生时间

1 简况

华能丹东电厂一期工程系Sargent&Lundy设计、整套引进的2X350MW燃煤机组，锅炉补给水系统由U.S.FILTER公司设计、制造；水源为铁甲水库，制水流程为预处理＋碳滤器＋一级复床＋混床；预处理为两台机械搅拌泥渣再循环型澄清池＋重力式滤池，一级除盐包括阳床、除碳器、阴床；为单元制，共两列；除盐系列的床体为固定逆流再生；再生酸碱注入原设计使用计量泵，后酸注入改为喷射器。

近期，东港市工业企业有了较大的发展，存在对工业用汽的较大需求，但是他们自己生产蒸汽，其生产过程不能满足环保要求，如果达到环保标准，则成本太高，企业发展进入了死胡同；为谋求企业的发展，履职电厂对工业企业实现节能减排的社会责任，准备全部承担东港市120t.h−1工业用汽的需求；因此，提高补给水处理制水能力，成为了电厂的当务之急。

5.65　　3.83

2 已经完成的几项技术改进

2.1改进再生工艺，降低酸碱耗

①　1 主要内容

通过对离子交换系统再生设备的改进，再生过程中的酸碱用量、浓度、流量的推算、选择，小反洗、置换、正洗时间等参数的调试，使再生工艺得到优化、再生时间缩短、酸碱耗降低、制水能力得到提高，实现了节能减排，取得了良好的经济效益和社会效益。

②　2 取得的效果

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

• 1自用水率降低、再生时间缩短

改进前再生时间是9.20h，改进后再生时间为6.63h，缩短再生时间2.73h，此间每个周期可以多制水224t。

改进前后除盐水自用水量分别是99.17、65.75t，每个运行周期节约除盐水33.42t；改进前后除盐水自用水率分别是2.48、1.64 %，下降0.84%

•2酸碱耗降低，节约酸碱费用

改进后，阳床酸耗、阴床碱耗分别由51.25、98.08 g/mol降到了43.88、61.31 g/mol，降幅分别为14.58%、37.79%；按每天制水2500t计算，每年节约酸碱费用分别降低24.61、71.07万元，共95.68万元。

2.2 改进除盐系列失效终点判断方法，提高周期制水量

① 1 主要内容

通过对阴床、阳床运行接近失效时有关指标变化的相互关系和变化的规律进行摸索，改进阴床、阳床及一级除盐系统运行失效终点判断方法，使其更加合理、经济；在保证出水水质满足控制标准的前提下，使周期制水量提高至上限；使除盐系列实现安全、经济运行。

② 2 周期制水量提高,节约酸碱费用

阳床，我们以DD为核算标准，制水量提高幅度为10.73%，阴床，四个周期的制水量提高幅度平均为10.16%。

对制水量、酸碱量等进行统计，改进失效终点确定方法，酸碱费用分别降低2.53、1.95万元，共4.43万元；如果考虑松原化工供汽，酸碱费用分别降低8.14、6.25万元，共14.39万元

2.3 处理阴床周期制水量偏低的问题

① 1 主要内容

通过对除盐系列周期制水量偏低的原因分析、处理，明确了固定床树脂压实层的正确添加，是保障周期制水量的基础；床体水帽损坏，将造成阳床、阴床运行、再生时发生偏流，周期制水量必然降低，水帽的完好，是保障周期制水量的重要因素。

② 2 取得的效果

经处理中间水箱溢流管脱落、A阴床水帽缺陷、补足压脂层，周期制水量显著提高。

A中间水箱溢流管脱落、A阴床水帽损坏两个故障处理好后，A阴床周期制水量已经由2108.5提高到2560.1t，提高452t，提高幅度21.44%；补足压脂层，A阴床周期制水量已经由2560.1提高到2645.5t，提高85t，提高幅度4.03%。

总的效果是，A阴床周期制水量已经由2108.5提高到2645.5t，提高537t，提高幅度25.47%；其中，处理“A中间水箱溢流管脱落、A阴床水帽损坏两个故障”“补足压脂层”对提高周期制水量的贡献率分别是84.18%、15.82%。

2.4 增加小反洗、小正洗、顶压工序，提高周期制水量

① 存在问题

除盐系列再生系统原设计没有小反洗、小正洗、顶压工序，也没有硬件支持，阴床周期制水量只有2131t。

② 改进方法

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

•1 改进设备：加设阳床、阴床小反洗、小正洗、顶压的管线、气动门以实现相应工序。

• 2 修改程序：在阳床、阴床再生程序中加入小反洗、小正洗、顶压工序。

③ 取得的效果

2020年10月20日，改进完成后，在阳床、阴床小反洗、小正洗、顶压工序都能正常进行，除盐系列正常再生，周期制水量由2131t提高到2500t。

2.5饮用水泵、清水泵出口加装连通门，尽量使用小功率泵，节约电能

① 存在的问题

原设计饮用水泵是专为饮用水、消防水供水；除盐系统制水，无论是哪一个工序，都使用清水泵；清水泵、饮用水泵的电机功率分别是37.3、22.4KW，出力分别为173t/h、80t/h。

我们在单系列运行时、在阳床反洗、小反洗、小正洗、正洗时、在阴床反洗、小反洗、小正洗、正洗、循环洗时时，都只能使用清水泵，而我们需要的流量都非常小，清水泵出力非常大，浪费电能，容易憋泵。

② 改进方法

为了节约厂用电，同时避免憋泵，通过设备改进、修改程序，我们在单系列运行时、在阳床反洗、小反洗、小正洗、正洗时、在阴床反洗、小反洗、小正洗、正洗、循环洗时时，也就是在具备条件的时候，我们不再使用清水泵，而使用饮用水泵。

• 1 改进设备：在清水泵和饮用水泵出口加装联络管、气动门。

• 2 修改程序：在阳床反洗、小反洗、小正洗、正洗时、在阴床反洗、小反洗、小正洗、正洗、循环洗时时，可以选择使用饮用水泵。

③ 取得的效果

2020年10月15日，改进完成后，在阳床反洗、小反洗、小正洗、正洗时、在阴床反洗、小反洗、小正洗、正洗、循环洗时时，我们可以使用饮用水泵，除盐系列正常再生，每年节约电能49319KW.h，折合电费1.97 万元，达到了预期效果。

2.6酸碱计量箱进酸碱管线加装气动门

① 存在的问题

两套除盐系列的阳床、阴床、混床，每次再生、计量箱需要进酸碱时，都要进行酸碱储罐出口门、酸碱计量箱入口门的开关操作。

• 1 再生频度高，化学值班员在酸碱系统区域进行的操作也非常频繁，发生人身伤害的概率也会提高。

• 2 由于计量箱进酸碱操作，都是手动门，在酸碱计量箱达到高液位时需要靠人工监视，然后到酸碱区域现场手动关闭酸碱阀门；忘记、或者动作迟缓，都会造成酸碱计量箱溢流，这也是一个重大安全隐患。

• 3 现在，我厂对外供汽，用水量居于高位，再生操作特别频繁，酸碱储罐出口门故障率大大提高，酸碱储罐出口门故障，处理时就有可能需要对酸碱储罐进行排空，工作量非常大，还处在污染环境、存在酸碱损失。

• 4 四台酸碱储罐出口，原设计分别只有一道手动门，如此设计，就意味着，这个门不能发生故障，发生一次无法恢复的故障，就存在需要将储罐放空的可能。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

• 5这个门，在我厂为纯凝方式时，几天开关一次，即存在一定风险，现在我厂供热、供汽，一天要开关几次。

• 6当这个门因为故障、无法开启而需要处理时，将面临罐里的酸碱如何处置的问题，抉择会是非常艰难的！存在非常严重的安全隐患。

② 改进方法

• 1 加装气动隔膜阀。

在两个酸碱储罐出口手动门后，各加装一道手动门，在酸碱计量箱进酸碱手动门前加装气动隔膜阀。

• 2 气动门开关操作，在CRT上实现；开关状态，在CRT上显示。

• 3 实现酸碱计量箱高液位闭锁：气动门与酸碱计量箱液位计联动：在酸碱计量箱在高液位时自动关闭。

③ 取得的效果

• 1 在需要进行酸碱计量箱进酸碱，可以在CRT上时，进行储罐出口气动隔膜阀开关操作，同时阀门开关状态，可以在CRT上显示，非常直观、方便。

• 2 酸碱计量箱实现高液位闭锁：与酸碱计量箱液位计联动：在酸碱计量箱在高液位时自动关闭。

• 3 降低化学值班员进行有关酸碱操作的难度，在需要进行酸碱计量箱进酸碱时，只是需要到酸碱区域现场进行检查确认，而不需要进行操作。

• 4 酸碱储罐出口门，增加到两道，有利于酸碱储罐的检修工作。

④ 安全效益

• 1 减少化学值班员进行有关酸碱操作的难度。

• 2 降低因为酸碱计量箱进酸碱时，发生酸碱事故的概率。

• 3 基本避免酸碱计量箱溢流隐患。

• 4 消除四台酸碱储罐出口的一道手动门发生无法恢复的故障、无法开启而需要处理时，而面临罐里的酸碱如何处置的安全隐患！

2.7 解决阳床周期制水量偏低的问题

① 1 主要内容

针对阳床周期制水量偏低、酸耗上升，造成工业废水出水PH异常、无法回收至脱硫补水，通过增加阴床进碱量，废水回收暂时得到解决；找出了阳床树脂劣化，水帽不均匀造成布水偏流为主要原因；通过更换树脂，提高水帽质量，阳床周期制水量明显升高、酸耗明显降低，达到了预期目的。

② 2 取得的效果

• 1 A阳床周期制水量上升酸耗下降

更换阳床树脂后，周期制水量、酸耗见表6；周期制水量达到4906t，上升1704t，幅度达到53.22%；较B阳床周期制水量5161t低254t，较之前的差值710t，收窄656t；酸耗下降到43.8g/moL，下降23.22g/moL，幅度达到34.65%，达到了比较好的水平。

• 2 废水池PH满足了回收要求

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

随着阳床运行情况的好转，减少从阴床向废水池的加碱量有了可能，我们从2021年1月21日开始，将每次再生阴床的用碱量恢复正常，观察中和池的PH；对。2021年1月13日--2月24日间PH进行统计：废水池、中和池分别为9.72、10.00，满足了回收要求。

3 几项技术改进的关键点

表1 几项技术改进的关键点

序号	改造项目	改造方法、效果
1	酸碱计量箱，加装电子液位计	1 液位数据在控制室CRT上显示，2 提高显示精度，减少人工观测存在的误差。3 能够发出液位触发信号，即液位下降到某数值时能够使再生程序进入下一步骤。
2	增设小反洗、小正洗、顶压，优化再生程序	增设小反洗、小正洗、顶压步序，再生效果变好，周期制水量提高。
3	酸碱计量泵出口加装气动门	在再生结束时，将制水系统与浓酸、浓碱彻底切断，以避免酸碱污染。
4	酸碱稀释水加装流量调节门	酸碱稀释水流量控制使用流量调节门，并能在CRT上进行，保障酸碱浓度能够及时得到调节。
5	更换树脂，提高周期制水量	树脂劣化后，再生酸碱耗上升，浪费酸碱，使用合格的树脂，再生酸碱耗达标，同时获得较高的周期制水量，提升了制水能力。
6	阳床、阴床空气门前加装电磁阀	可以使相关步序实现远程操作，以实现程序再生。1 电磁阀在控制室CRT上有显示，能够进行开关操作。2 电磁阀的开关操作能够在再生程序中进行。
7	清水池，饮用水泵出口加装联络管、联络门	原设计，所有工况下，我们都只能使用清水泵，而我们需要的流量都非常小，清水泵出力非常大，容易憋泵；使用饮用水泵，可以节约电能。
8	阳床置换取样改进	阳床置换取样点改在在排水水平管段，以解决阳床置换取样取不出水样的问题。
9	改进一级除盐系统运行失效终点判断方法	改进阴床、阳床及一级除盐系统运行失效终点判断方法，使周期制水量提高至上限。
10	3 恢复浓酸门、浓碱门的远程操作	恢复浓酸门、浓碱门为气动阀，以入酸碱池内操作手动阀门存在安全隐患的问题。

4 取得的效果

4.1 供汽能力提高

改进再生工艺后，周期制水量提高，再生时间由9.2h缩短到5.65h，置换用水大量降低，自用水率由2.48%降低到1.46%，供水能力由原来的2641t/d提高到3107t/d，提高了465t/d，提高幅度达到18%；供汽能力由原来的2186t/d提高到2652t/d，提高幅度达到21%，见表2。

表2 除盐系统制水能力提高程度

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

序号	项目	单位	改造前	改造再生工艺
1	实际出力	t/h	73	76
2	自用水率	%	2.48	1.46
3	周期制水量	t	2109.5	2500
4		t	2056	2464
5	运行时间	h	28	32
6	再生时间	h	9.2	5.65
7	周期	h	37.37	38.06
8	制水能力	t/h	113	131
9		t/d	2708	3153
10	供水能力	t/h	110	129
11		t/d	2641	3107
12	供水能力提高	t/d		465
13		%		**18%**
14	机组补水	t/d	455	455
15	供汽能力	t/d	2186	2652
16		t/h	91	110
17	供汽能力提高	t/d		**19**
18		t/h		**21%**

4.2 经济效益

日供汽能力提高466t/d，年供汽能力提高17.01wt/y，供汽收益按50元/t计算，则经济效益达850万元/y，见表3。

序号	项目	单位	改造前	改造再生工艺
1	供汽能力	t/d	2186	2652
2	供汽能力提高	t/d		466
3		wt/y		17.01
4	供汽收益	元/t		50
5	经济效益	万元/y		850

参考文献

[1] 范玉宝，吴贵德，华能丹东电厂锅炉补给水运行调试[J]. 东北电力技术，2008，29（8）:37-41.

[2] 吴贵德,等,澄清池优化运行实践[J].东北电力技术，399，37（9）:45-48.

[3] 常仁杰，吴贵德，等.提高补给水制备能力的几个途径[C].发电行业水处理技术研讨会论文集 2018.04:230-233.

[4] 王海彬，吴贵德，等.离子交换系统调试方案的制定与实施[C].电力化学2019年学术年会论文集 2019.09:493-503.

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[5] 吴贵德，等.一级除盐系统运行失效终点判断方法的改进[C].2019年电力行业化学专业技术交流会论文集2019.11:320-326.

[6] 杨成典,吴贵德,等.处理周期制水量偏低问题的一个案例[C].第四届发电行业水处理技术研讨会论文集,2020.09:460-463.

[7] 杨成典,吴贵德,等.“大阳床小阴床”问题的解决方案[C].2020年发电行业水处理技术研讨会论文集,2020.09:456-459.

[8] 吴贵德,等.阳床运行异常分析[R].

作者简介

张风涛(1970.10-)，河北成安人，北京电力专科学校毕业，工程硕士，高级工程师。

通讯地址：辽宁省 东港市 华能丹东电厂

邮编：118300

E-mail：zhangfengtaohn@21cn.com

手机：13942588892

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

350MW超临界循环流化床机组深度调峰经济性分析

卢忠祥　李寿军　刘贵喜
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：为实现国家“碳达峰”、“碳中和”目标，风电、光伏等新能源装机容量快速增加，为保证新能源发电能力不受限制及电网的稳定运行，火电机组参与深度调峰已成为一种新常态；2020年10月，内蒙古京能双欣发电有限公司#1、#2机组首次申报参与电网深度调峰辅助服务，通过计算单机参与电网40%负荷深度调峰每小时净收益7562元，为公司创造了利润，在同类型机组中有较好的借鉴意义。

关键词：深度调峰　新能源　补偿　净收益

一、概述

内蒙古京能双欣发电有限公司为内蒙古电网直调公用火电机组，#1、#2机组分别于2019年9月、12月168小时试运合格正式投入商业运行，内蒙古电网为充分挖掘调峰资源，保证电网安全稳定运行，最大限度消纳新能源，鼓励发电企业提供调峰服务，电网出现弃风、弃光时运营机构即可优先启动内蒙古电网火电机组调峰辅助服务，当内蒙古电网调峰资源用尽仍不能满足调峰时向华北电力调峰辅助服务市场申报调峰需求，调峰期间造成的欠发电量由新能源分摊补偿，而调峰期间的发电量则按照当月电量、电价结构正常结算，公司积极响应电网需求于2020年10月#1、#2机组首次申报参与电网深度调峰辅助服务，目前两台机组不需要系统升级和设备改造即可满足40%负荷深度调峰。

二、主要设备选型

锅炉：选用东方锅炉股份有限公司生产的超临界直流循环流化床锅炉，采用单炉膛、平衡通风、一次中间再热、固态排渣、循环流化床燃烧方式，全钢架结构、全悬吊 M 型布置，采用高温冷却式旋风分离器进行气固分离，锅炉型号：DG1241/25.49-Ⅱ1 型。

汽轮机：选用东方电气集团东方汽轮机厂有限公司生产，一次中间再热、单轴、三缸双排汽、间接空冷、七级回热、抽汽空冷凝汽式汽轮机，汽轮机型号：CJK350/353-24.2/1.5/566/566。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

发电机：选用东方电气集团东方电机有限公司生产，水－氢－氢冷却、静态励磁发电机，发电机型号为 QFSN-350-2-20。

主变压器：选用特变电工股份有限公司新疆变压器厂生产，户外、双绕组、油浸三相铜芯节能型升压电力变压器，型号为 SFP-460000/220。

三、深度调峰补偿规则

目前内蒙古电网火电机组调峰交易采用“阶梯式”报价方式，共八档，报价周期为日；需下调机组出力时优先下调报价低的机组，需增加机组出力时优先上涨报价高的机组，通过AGC闭环执行，同一报价调峰资源不能全部调用时按各机组该报价下申报的调峰能力等比例调用。

一档（70%-100%）只能报0价；

二档到三档（50%-70%）每档报价范围0-0.3元/kWh；

四档（40%-50%）报价范围0-0.4元/kWh；

五档（30%-40%）报价范围0-0.5元/kWh；

六档至八档（30%以下）每档报价范围0-0.6元/kWh。

备注：目前蒙西电网50%负荷以上调峰不结算。

我公司目前两台机组只参与40%负荷深度调峰（未升级系统和设备改造），补偿电量为相对于50%负荷最小技术出力（175MW）的欠发电量。

四、经济分析

（一）深调成本和收入测算

火电机组参与深度调峰后，一方面可以获取较高的深调补偿收益。另一方面会导致能耗指标增加，及发电量减少影响售电收入减少，因此其综合收益存在不确定性，需要对参与深度调峰的经济性进行综合测算。

在当前市场形势下，如果机组不参与深度调峰，在电网调峰期间非深调机组带额定出力的50%，而参与深调机组按照指令进入深调状态。因此要比较深调的净收益，只需要比较非深调状态和深调状态的收益差额。

1、深调期间变动成本测算

变动成本包含煤耗、水耗、灰渣处置、变动折旧、尿素与石灰石粉六项，其中因为深调和不深调会产生不同的只有煤耗和灰渣处置成本，因此仅对燃料成本和灰渣处置成本进行分析。

备注：40%负荷深调与50%负荷相比：

① 尿素用量增加0.06t/h，0.06 t/h × 2000元/t=120元/h，石灰石粉用量减少3t/h，3 t/h × 40元/t=120元/h，该两项正好相抵。

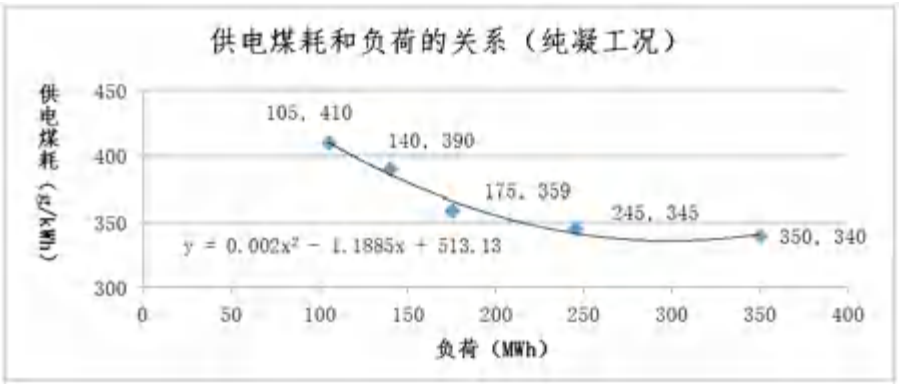
② 水耗基本不变。

（1）燃料成本

燃料成本测算的关键是深调煤耗测算，通过筛选机组深度调峰期间典型负荷段典型参数下反平衡供电煤耗，寻找随调峰深度的增加供电煤耗的变化规律，煤耗b与负荷p满足b=f(p)多项式关系：

图1-1深度调峰负荷与供电煤耗关系图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



b=0.002*p2−1.1885p+513.13

其中，

b——供电煤耗，单位：g/kWh；

p——实时功率，单位：MW。

则燃料成本为：

Cf=μf*b*Qsw

其中，

Cf——燃料成本；

μf——当期燃料单价；

Qsw——测算时间内上网电量。

（2）灰渣处置费

我公司2020年底双机渣仓改造后均排放干渣，实际出磅灰渣量为理论计算灰渣量，理论灰渣量通过入炉原煤量和空干基灰分折算得出。

MA0=7000*Aar* b *Qst/ Qnet

其中，

b——供电煤耗，单位：g/kWh；

Aar——收到基灰分，单位：%；

Qst——测算时间内上网电量；

Qnet——入炉煤热值；

MA0——理论灰渣量；

灰渣处置成本由灰渣运输费17.01元/t和灰渣处置费9元/t组成，合计每吨费用为26.01元/t。则

CA= MA0*ζ

其中，

MA0——理论灰渣量；

ζ——灰渣处置单价；

CA——灰渣处置成本。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

综上，参与深度调峰期间与发电相关的变动总成本为以上2项变动成本的总和，即

$\sum Cv = Cf + CA$

2、深调期间固定成本测算

固定成本为财务费、管理费、税金、职工薪酬、生产费、固定折旧六项成本统一归为固定成本。但固定成本无论深调或不深调总额不会发生大的变化，只有因为年度总电量减少度电固定成本会相应升高，可忽略不计。

3、深调影响售电收入减少量

深度调峰期间的发电量按照正常电价结算，因此售电收入减少量只是深调期间上网电量较同时长内非深调带50%负荷上网电量减少部分。

$\triangle Ijs = （Q50\% - Qst）* \delta$

其中，

Q50%——50%负荷上网电量；

Qst——深调时段上网电量；

δ——上网电价；

△Ijs——深调影响售电收入减少量。

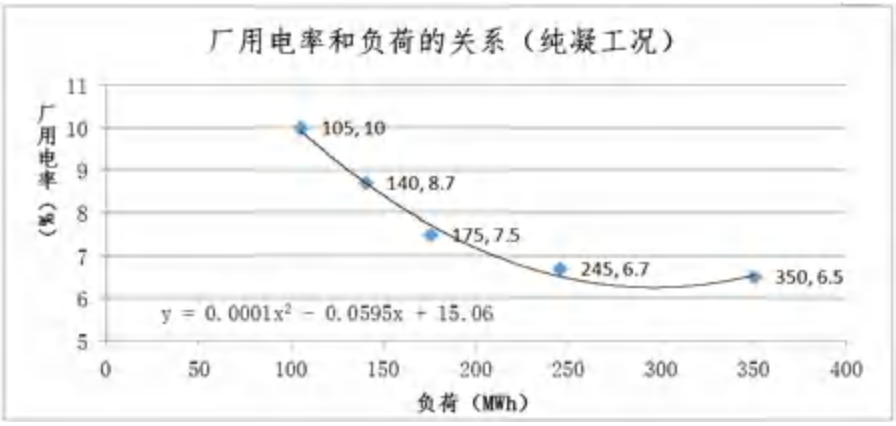
4、深度调峰收入测算

深度调峰收入由深调期间上网电量的售电收入和深调电量补偿收入两部分构成。深调期间上网电量按深调厂用电率计算，电价以当月交易计划电量成分按结算顺序加权得出。

（1）深调厂用电率

通过筛选机组深度调峰期间典型负荷段典型参数下厂用电率，寻找深调负荷同厂用电率的关系，厂用电率l与负荷p满足l=f(p)线性关系式：

图1-2深度调峰负荷与厂用电率关系图



$l=0.0001*p2-0.0595*p+15.06$

其中，

l——厂用电率，单位：%；

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

p——实时功率，单位：MW。

则，深调上网电量Qst为

Qst= Qf* l

（2）深调电量

深调电量以最小技术出力为基准，在此基准上少发的电量为深调电量，并按照相应规则进行补偿。

Qst= (17.5-p)*t

其中，

P——深调负荷，单位：万千瓦；

t——深调时间，单位：小时；

Qst——深调电量，单位：万千瓦时。

（3）深调期间补偿收入

深度调峰补偿我公司为40%负荷段，因此深调补偿应根据实际调峰深度所在档位。

Ibc= Qst1* α 1

其中，

Qst1———一档深调电量，单位：万千瓦时；

α 1———一档深调补偿电价；

Ibc——深调补偿收入。

（二）深调净收益测算

1、2020年10月深调边界条件

上网电价0.2399元/kWh、深调补偿电价0.36元/kWh（40%-50%负荷）、入炉煤热值2747cal/g、入炉煤收到基灰分54%、度电成本0.3163元/kWh、灰渣运输费17.01元/t、灰渣处置费9元/t、入炉标煤单价447元/t、尿素单价2000元/t、石灰石粉单价40元/t。

2、深度调峰净收益是指机组参与深度调峰工况的补偿收入与不参与深调机组负荷为最小技术出力的收益之间的差值，具体公式如下：

E = Ibc - Cf - CA - △Ijs

其中，

E——深度调峰净收益；

Ibc——深调补偿收入；

Cf——燃料成本；

CA——灰渣处置成本；

△Ijs——深调影响售电收入减少量。

五、结论

1. 40%负荷厂用电率、供电煤耗分别为8.7%、390g/kWh，较50%负荷各增加1.2%、31g/kWh。

2. 我公司目前未参与30%负荷深度调峰，应用回归法推测得出30%负荷厂用电率、供电煤耗分别为10%、410g/kWh，较50%负荷各增加2.5%、51g/kWh。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3. 按照2020年10月深调边界条件计算单机每小时增加净收益7562元。

六、40%负荷深调存在的问题

1. 锅炉旋风分离器入口烟温低，尿素溶液反应效率低氨逃逸大，长期运行易造成空预器堵塞及氮氧化合物排放指标超标。

2. 锅炉一、二次风量低，物料循环慢、流化不良，易造成床温低且分布不均，局部产生低温焦块，冷渣器排渣困难。

3. 锅炉吹灰蒸汽压力低，吹灰效果差，受热面积灰严重导致汽温低。

4. 汽动给水泵流量低再循环调门开启后波动大，易造成给水流量大幅度摆动。

5. 发变组AVC自动控制达负荷下限，AVC装置易闭锁，造成发电机电压、6kV厂用母线电压无法自动调整。

6. 机组长时间深调脱硫系统水平衡将无法维持，导致吸收塔液位高浆液氯离子含量超标、脱水困难、脱硫效率低发生二氧化硫排放指标超标。

七、结束语

深度调峰对火电机组热效率影响非常大，但调峰期间造成的欠发电量通过新能源进行分摊补偿，通过理论和实际的大量数据进行计算，只要深度调峰补偿电价合适就会产生较高的综合收益，但在调峰过程中也暴露出了许多问题，我们会在以后的实践过程中不断摸索和总结经验，调峰深度也向40%负荷以下努力，后续将会分享给大家。

参考文献

[1] 内蒙古京能双欣发电有限公司运行规程

[2] 内蒙古京能双欣发电有限公司性能考核试验报告

作者简介

卢忠祥，职称：工程师，从事专业：节能，工作单位：内蒙古京能双欣发电有限公司，联系电话：15044781241 0473-6187341 邮箱：jnsxluzhongxiang@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

630MW机组汽轮机超低背压供热改造和控制策略

孙锡岩[1] 梁双荣[2]
（1国电荥阳煤电一体化有限公司 郑州 450100；2国电龙源节能技术有限公司 北京 100039）

摘要：本文依据机组的性能试验报告，对某公司630MW超临界湿冷机组超低背压供热机组模型进行了标定，在此基础上，对低压缸微出力工况进行了变工况计算、分析、阀门组态控制，达到满足供热期间机组安全运行、提高供热能力、实现自动控制等改造目标，同时与实际运行数据进行了对比分析，对同类型机组超低背压供热改造提供依据。

关键词：汽轮机 超低背压 微出力 供热

1. 引言

随着本地度居民采暖供热需求逐年加大，该公司积极践行社会责任，在原有供热能力上经科学论证，进行了超低背压供热改造，供热能力提高50%。

热电联产机组典型供热技术包括：高背压供热、吸收式热泵供热、中低压缸连通管打孔抽汽供热、低压缸光轴供热、低压缸微出力供热等。

其中，高背压供热技术部分或者全部将机组排汽余热用于供热，经济性好，但改造后机组变负荷能力降低，在对机组热电解耦能力要求越来越高的背景下，该技术适用性面临较多限制；吸收式热泵供给技术属于部分利用机组排汽余热，该技术在兼顾节能和灵活性方面比较均衡，但其初投资大，运行维护成本较高；低压缸光轴供热技术可最大程度增大供热抽汽量，提高机组调峰能力，但低压缸光轴改造对机组发电能力有一定影响，增加了转子更换和保管的工作；中低压缸连通管打孔抽汽供热技术是目前最成熟，应用最广泛的技术；低压缸微出力供热技术是通过降低机组排汽背压，减少低压缸进汽流量，控制排汽相对容积流量在25%–30%左右，以提高机组供热能力和热电解耦能力。

2. 方案介绍

2.1改造范围

低压缸微出力供热技术的改造范围主要涉及机组中低压缸联通管改造和抽空气系统改造。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.1.1中低压缸联通管改造

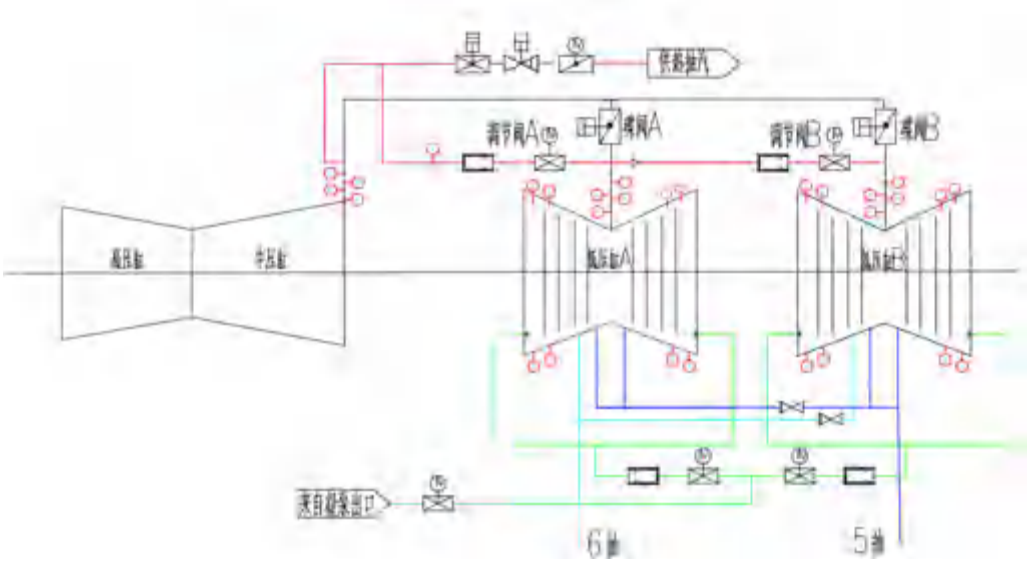


图1.超低背压全过程可调抽汽改造方案原则性热力系统

2.1.2总体改造内容如下：

1) 中低压缸连通管和供热碟阀改造；

2) 新增旁路冷却蒸汽系统；

3) 配套汽轮机本体运行监视测点改造；

4) 在 5 段抽汽和 6 段抽汽引自低压缸 B 的抽汽支管上增加逆止门；

5) 新增供热抽汽管道自连通管引口，接入新建热网首站供热抽汽母管，抽汽管道配置逆止阀、快关碟阀、电动蝶阀；

6) 低压缸末级叶片抗水蚀金属耐磨层喷涂处理；

7) 配套供热系统适配性：新增4台热网加热器和3台2600T/H的热网循环泵；

8) 配套自动控制系统改造；

9) 超低背压低压缸微出力全过程可调抽汽运行试验。

2.2超低背压改造机理

相关研究成果表明，随着流经低压缸长叶片的蒸汽容积流量的降低，叶片动应力先增加后减小；当流经叶片的蒸汽相对容积流量降低至5%左右时，叶片动应力与叶片设计容积流量下动应力相当，处于安全运行范围，但需要减小蒸汽容积流量时快速通过应力驼峰区。为了使低压缸在低进汽质量流量时，排汽容积流量仍在安全的运行范围内，可通过进一步降低排汽背压来实现。

通过在低压缸进口增设可靠性更高的调节型蝶阀，以及为了满足低压缸高真空运行要求，对机组原抽空气系统的改造，可合理控制低压缸排汽相对容积流量在20%-30%左右（见图1），实现机组宽幅连续调整，机组运行中，可避开末叶颤振区，推迟蒸汽脱流和鼓风过渡工

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

况的发生，减轻由于级内蒸汽流速低、动叶入口冲角大而导致的水蚀，降低末叶出口脱流高度，改善末级和次末级工作状况。

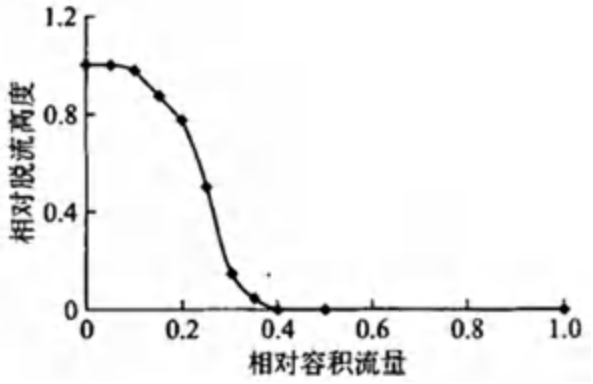


图2.低压缸微出力改造后排汽容积流量调整范围

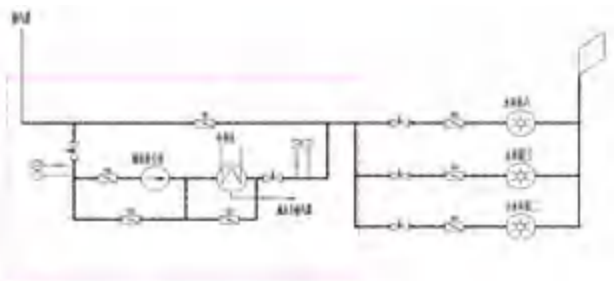
2.3真空系统

中压缸排汽供热后，因凝汽器热负荷较小，循环水泵单泵运行已完全可以满足机组运行需求，进行校核计算时仅考虑循环水泵单泵运行，计算结果见表1。

表1 低压缸全过程可调抽汽运行工况凝汽器变工况特性计算结果

项目名称	单位	工况 1	工况 2
低压缸全过程可调抽汽运行	/	是	是
凝汽器热负荷	MW	141.58	141.58
循环水泵运行方式	/	单泵运行	单泵运行
冷却水流量	T/H	33370	33370
冷却水进口温度	℃	20	15
低压凝汽器压力校核值	KPa	2.773	2.053
高压凝汽器压力校核值	KPa	3.091	2.294
凝汽器平均压力	KPa	2.928	2.170

由以上分析可知，汽轮机低压缸全过程可调抽汽运行工况下凝汽器压力理论上可以达到较低压力（低于 3kPa.），实际运行中无法达到背压低于2kPa的超低背压，因此通过加装串联式辅助抽空气系统，提高抽空气系统的抽速，使机组背压可降低至2kPa及以下，同时提高水环真空泵的入口压力，降低水环真空泵入口温度，提高水环真空泵抽空能力。抽空气系统见图3。



微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3.抽空气系统示意图

3. 超低背压低压缸微出力工况分析

本部分主要分析发电负荷和供热抽汽量间的关系，存在四种基本情况：额定蒸发量下发电负荷和供热抽汽量间的关系；最小蒸发量下发电负荷和供热抽汽量间的关系；低压缸微出力时发电负荷和供热抽汽量间的关系以及纯凝工况。以上四种情况确定的边界所包围的区域（见图5），即机组供热期间的安全运行范围。其中低压缸微出力工况对应的排汽背压不超过2KPa，排汽温度不超过60℃。

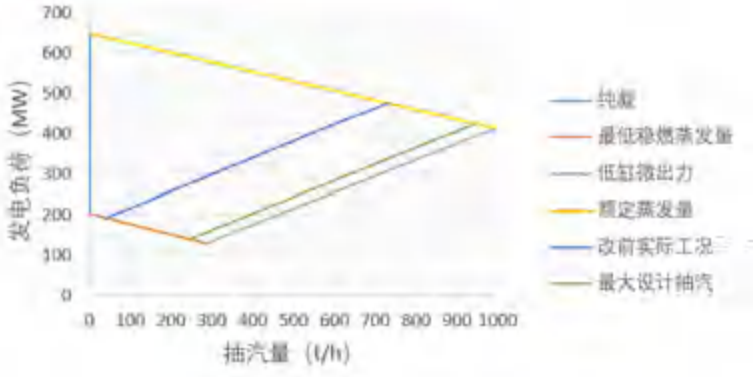


图4. 机组抽汽量与发电负荷关系曲线

4. 改造前后运行参数对比

本机组采用超低背压低压缸微出力供热技术，中排抽汽进入热网加热器加热热网循环水，热网疏水回凝汽器。

通过对改造前后运锅炉蒸发量920T/H供热能力比对，结果见表2。

表2 50%锅炉额定蒸发量改造前后运行数据对比表

		改造前	改造后
项目	单位	CQ50MS	CQ50MS
发电功率	MW	236.19	206
主蒸汽流量	T/H	928.5	925
主蒸汽压力	MPa	11.62	11.88
主蒸汽温度	℃	566.0	566.0
低压缸进汽流量	T/H	260.0	150
采暖抽汽流量	T/H	207	498
采暖抽汽压力	MPa	0.59	0.39
采暖热负荷	MW	289	348
供热基准	W/m²	42.2	42.2
供热面积	万 m²	685.6	825.6
供热比	/	0.39	0.33
热电比	/	1.22	1.69
发电热耗率	kJ/(kW·h)	6998.8	6370.7
发电煤耗	g/(kW·h)	262.2	237.8

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

5. 自控系统改造

实施低压缸全过程可调抽汽改造后，控制系统配套主要改造内容如下：

1）改造方案新增加监视测点等接入 DCS 控制系统；

2）低压缸进汽蝶阀 > 20%时，低压缸进汽蝶阀投入自动状态，可自动跟踪中压缸排汽压力，压力自动分为定压和滑压方式。

3）低压缸进汽蝶阀 < 20%时，低压缸进汽蝶阀自动保持当前状态，无法输入压力指令。

4）低压缸进汽蝶阀 < 15%时，低压缸进汽蝶阀自动解除，转入手动控制。

5）A、B低压缸进汽蝶阀，可单独投入自动，也可组阀投入自动,跟踪中压缸排汽压力。

6）低压缸冷却蒸汽旁路蝶阀也可投入自动，跟踪中压缸排汽压力。

6. 结论

（1）本文以改造超低背压改造前后供热工况对比，达到了改造目标。

（2）通过对背压改造、超低背压低压缸微出力改造提高了供热能力。

（3）超低背压低压缸微出力供热技术提升了机组调峰能力和供热能力，在保障汽轮机安全运行的前提下，提高了机组运行经济性。

参考文献

[1]杨旭中,郭晓克,唐慧. 热电联产规划设计手册[M].1版.北京:中国电力出版社, 2009:1-11.

[2]赵冲,罗向龙,陈颖,等.热电联产集中供热方案的分析对比[J].热能动力工程,2016,31(12):48-55.

作者简介

孙锡岩，职称为工程师，现从事火力发电厂集控运行汽机专业

工作单位：国电荥阳煤电一体化有限公司

单位地址：河南省荥阳市城关乡国电大道一号

邮编：450100

Email：12063066@chnenergy.com.cn

联系电话：15838042139

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

电站锅炉烟气的余热利用系统的研究

高强
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：随着近年来能源价格的不断提升以及节能减排政策性要求的日益严格，不断提高电站效率、降低机组供电煤耗、减少对外排放成为今后我国大力发展火力发电的重点。

中国的燃煤电厂为全国提供了绝大多数电能，同时也消耗了大量的煤炭和水资源，并排出大量烟气，而锅炉的排烟热损失占锅炉总热损失的70%～80%。因此，降低电厂锅炉的排烟温度可以有效降低煤耗，对于节能减排和提高电厂的经济性具有重大意义。

本文主要综述了燃煤电厂锅炉烟气的余热利用方法，并着重对三种新型低温烟气的余热回收系统进行了介绍。在锅炉的不同部位，烟气所具有的能级不同，分为高温烟气和低温烟气，其中低温烟气余热由于能级品位较低不易被利用而常常被浪费，针对这一现实，本文对如何对低温烟气余热进一步利用，综述了烟气的两级回收利用系统、烟气侧串联与并联的余热利用以及烟气余热利用的水侧优化的余热利用方案。

对于烟气的两级翅片换热器回收，锅炉排出的高温烟气先和一级翅片进行换热，温度降低的低温烟气继续和二级翅片换热，被回收的余热进入热泵的制冷循环，总的出功进一步增大。从而提高了烟气的利用效率；对于烟气侧串联与并联的余热利用，在烟气温度较高的烟道，利用能级较高的烟气加热回热系统高压锅炉给水，能级较低的烟气用来加热空气，串联和并联两种集成方式都可以使机组效率达到极大提高；对于烟气余热利用系统水侧优化，张昌顺 经过对若干个方案的比较研究，最后得到了低温省煤器与第6级回热加热器并联的最优低温烟气的回收利用方案，进一步吸收利用了低温烟气的余热。本文对于电厂锅炉烟气余热利用系统的研究和应用有一定的参考价值。

关键词：燃煤电站　方案优化　余热利用　分级利用

第一章 绪论

1.1研究的背景及意义

在工业加热、冶炼等工艺过程中广泛使用石油、煤炭和天然气等许多种类的能源，在这些工艺过程之后会产生大量各种形式的二次能源-----余热；一般电站锅炉的排烟温度较高，会造成较大的排烟热量损失，最大限度地利用烟气热量，可以有效减少煤炭消耗，提高能源利用

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

率。其中，锅炉系统的烟气排放不仅会使热能动力的能源损耗变高，也会造成对环境的破坏、污染，我们可以通过对锅炉产生烟气中的余热进行利用来解决这一问题。通常来说，一般锅炉的排烟温度为120～130 ℃；而使用高硫颜料作为燃料的锅炉烟气温度约为150 ℃；使用暖风装置的锅炉的烟气温度高达160～180 ℃；所以，烟气的余热具有较大潜力的利用价值。

我国“富煤、贫油、少气”的能源特点决定了火力发电在我国发电供应中的主导地位较长时期内仍将保持，煤电传统发展方式面临的节能减排形势日益严峻。为贯彻中央财经领导小组第六次会议和国家能源委员会第一次会议精神，落实《国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划（2014～2020年）的通知》（国办［2014］31号发）要求，加快推动能源生产和消费革命，提升煤电高效清洁发展水平，引进与自主开发相结合，是今后我国火力发电的重点。

电站锅炉作为我国的第一大耗能设备，每年消耗约十五亿吨标煤，占全国煤炭消耗总量的近50%。而电站锅炉排放的二氧化硫、氮氧化物和二氧化碳约分别占全国相应污染物排放总量的45%、42%、48%左右[1]。虽然随着环保技术的发展，电站锅炉的污染物排放量会有所下降，但近期来看，电站锅炉的各种污染物排放还将保持在较高的水平。因此，积极开展电站锅炉的节能减排研究是我国能源环保工作的重要内容。目前，大型电站锅炉的热效率一般在90～94%左右，而其中的排烟热损失占到全部热损失的一半以上，蕴藏着巨大的余热资源。按照设计排烟温度120～140℃计算，低温烟气余热资源量达0.7亿吨标煤。采用锅炉烟气余热利用技术，如回收50%左右的烟气余热，每年可节约标煤0.35亿吨，相当于近40台600MW火力发电机组的年耗煤量，或两座三峡电站的年发电量；同时，余热排放的减少，大大降低环境热污染，减轻热岛效应；而由于节能亦可实现烟气中的硫氧化物和氮氧化物等有害气体的减排。

据调查显示：过去十年期间，我国传统燃煤电站大型火力发电机组的供电煤耗减少50g/kW•h以上，同比每年可降低约2.2亿吨的燃煤使用量，如果以排烟计算，每一年实际二氧化碳的排放量可减少约5.4亿吨；燃煤发电过程中NOX排放强度下降约1.65g/kWh，同比每年NOX的排放量减少约795万吨[2]。总之，烟气余热利用具有节能、节水、减少二氧化碳及其它有害气体排放等综合作用，具有巨大的经济和社会效益，对我国节能减排战略具有重大意义。

1.2国内外研究现状

目前，燃煤电站锅炉尾部空气预热器出口的烟气设计温度大多在120～140℃之间这部分烟气具有温度低、能级品位差的特点，因此大多数电站对于这部分排烟余热的回收利用主要有两种大的方向:一种是通过能量转化设备，转化为其它形式的能源回收；另一种是利用“能量转化”的思路，使这部分低品位能量维持热能的形态被加以利用。具体采用何种方式回收余热，要根据电站的实际情况与需求决定。

我国上海外高桥电厂三期2×1 000 MW机组进行了低温省煤器改造，低温省煤器布置在引风机后脱硫装置前，通过烟气和低温省煤器中的凝结水进行热交换回收烟气余热，其节能效果明显[3]。同时，华北电力大学、山东大学、西安交通大学等单位均也较早开展了通过加装低温省煤器来回收烟气余热的相关研究，并在山东十早泉电厂、长春第二热电厂、开封电厂等机组成功应用；2009年，上海外高桥电厂三期1000 MW超超临界机组采用“排烟热能回收系统”，通过加装烟气冷却器将125℃的烟气冷却到85℃左右，机组供电煤耗下降2.719／kWh，创造了282g／kWh的世界供电煤耗最低记录。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

在国外，类似的余热利用方式也得到了较广泛的应用。德国科隆电厂采用旁路烟道技术，把低温省煤器设置在与空预器并联的旁路烟道中，在保证空气预热器所需热量的前提下引入部分烟气到旁路烟道内加热锅炉给水，是全世界范围内节能效果较好的在运行机组系统。为减少排烟损失，前苏联某电厂在锅炉对流竖井下部设置了低温省煤器以加热热网水，实际上德国也多采用低温省煤器方案，德国某电厂2×800MW褐煤发电机组在静电除尘器和烟气脱硫塔之间加装了烟气冷却器，其原理与低温省煤器相同。即利用凝结水降低烟温。低温省煤器的运用就是减少发电厂烟气排放热损失、实现烟气余热利用的一种手段。凝结水在低温省煤器内吸收排烟热量，降低排烟温度，自身被加热，升高温度后再返回汽轮机低压加热器系统，代替部分低压加热器的作用，是汽轮机热力系统的一个组成部分。低温省煤器将节省部分汽轮机的回热抽汽，在汽轮机进汽量不变的情况下，节省的抽汽从抽汽口返回汽轮机继续膨胀做功，因此，在发电量不变的情况下，可节约机组的能耗。这是低温省煤器的最大特点，也是它不同于一般省煤器和回收排烟热量的余热锅炉之处。虽然加装低温省煤器后烟气阻力有所上升，但由此带来的引风机所增加的运行电费还不到采用此技术后所节约的运行费用的 10% ~30%，因此低温省煤器方案具有较好的应用前景，目前在国内1 000 MW 及600 MW 级机组上已有不少进行了低温省煤器的安装和改造工作。

日本采用以水为传热媒介的分体烟气-烟气加热器(简称 MGGH)，即循环冷却水将从MGGH(烟气降温换热器)吸热后，再将热量传递给布置在脱硫吸收塔出口的 MGGH(烟气升温换热器)中的低温烟气。设置 MGGH 烟气换热器方案可利用烟气余热提高脱硫后净烟气温度，有利于烟气抬升，可降低污染物落地浓度，并可改善烟囱的运行条件[4]。由于目前国内对于脱硫后排烟温度没有加以限制，因此对于 MGGH 的应用工程较少。但随着我国火电机组环保排放控制标准的不断提高，各种环保工艺也不断应用，MGGH 技术来讲是具有良好发展前途的环保工艺。前苏联、德国多采用的低温省煤器方案，即利用凝结水降低烟温;低温省煤器的运用就是减少发电厂烟气排放热损失、实现烟气余热利用的一种有效手段。

1.3烟气余热利用的形式

目前，燃煤电站锅炉尾部空气预热器出口的烟气设计温度大多在120~140℃之间这部分烟气具有温度低、能级品位差的特点，因此大多数电站对于这部分排烟余热的回收利用主要有两种大的方向:一种是通过能量转化设备，转化为其它形式的能源回收；另一种是利用“能量转化”的思路，使这部分低品位能量维持热能的形态被加以利用。具体采用何种方式回收余热，要根据电站的实际情况与需求决定。

本文主要根据燃煤锅炉的低温烟气余热难以利用的问题，着重对低温烟气的余热回收利用进行论述：

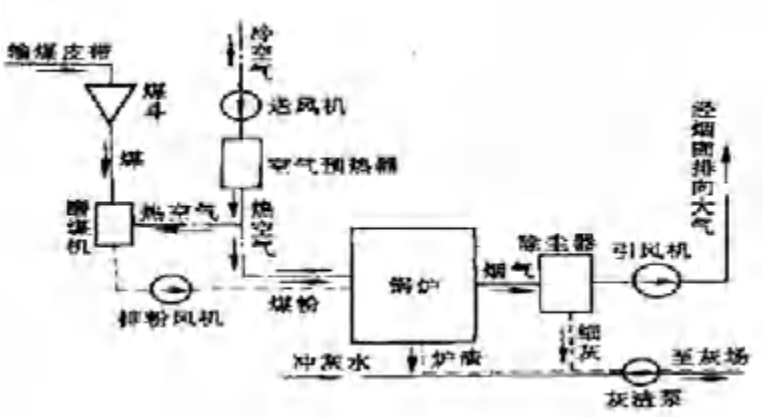
（1）利用两级翅片管换热器回收；

（2）利用烟气侧串联与并联的最优联结方式回收；

（3）对烟气余热利用系统水侧进行优化的回收

大型火电机组常用的节能有效途径是通过增设受热面来回收利用烟气余热，回收的烟气余热分为高温烟气的余热、中温烟气余热、低温烟气余热。这三种烟气余热一般用来加热锅炉中的给水、加热凝结水以节省抽汽、预热冷空气、预热干燥煤粉等。本章主要介绍高、低温这两

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



种不同能级的烟气回收方法。

第二章 烟气余热回收方法

2.1高温烟气的余热回收利用

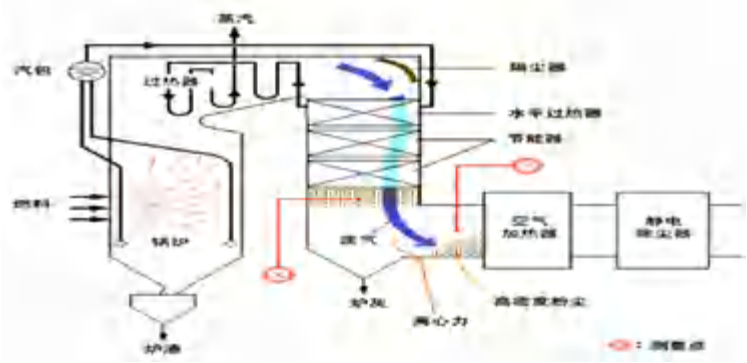


图2-1煤粉锅炉示意图[6]

锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内进行悬浮燃烧。煤粉燃烧放出热量，燃烧火焰中心具有1500℃或更高的温度。与此同时，煤粉在燃烧的过程中会产生大量的烟气。高温烟气经炉膛上部出口离开炉膛进入水平烟道，然后再向下流动进入垂直烟道。在锅炉本体的烟道内布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等受热面。烟气在流过这些受热面时，以对流换热为主的方式将热量传递给工质，过热器和再热器主要布置于烟气温度较高的区域，从汽包中通过

汽水分离分离出来的饱和蒸汽进入过热器，然后过热器再通过与炉膛内的高温烟气对流换热，变成过热蒸汽。由过热器出来的过热蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机做功。为提高锅炉－汽轮机组的循环效率，对高压机组大都采用蒸汽再热 ，即在汽轮机高压缸做完部分功的过热蒸汽，被送回锅炉再热器，再一次吸收炉膛中高温烟气的热量，进行再加热。

2.2低温烟气的余热利用

2.2.1加热汽轮机凝结水

利用低温省煤器回收锅炉烟气余热也是一种较为常见的余热利用形式，同时也是烟气余热利用较为有效的方法之一。为不影响炉内燃烧以及锅炉内部的受热面的换热过程，将低温省煤

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

器安装在锅炉尾部烟道的空预器之后除尘器之前，它的结构和锅炉本体中的省煤器结构类似，均采用蛇形弯管布置，如图2-2所示。

图2-2 低温省煤器和回热系统[2]

将低温省煤器并联在汽轮机侧的低压回热系统，烟气从低温省煤器管道外侧流动进行放热，管道内部流动的是汽轮机低压回热系统的部分凝结水，与管道外的烟气进行热交换，吸收烟气放出的热量。汽轮机低压回热系统吸收了部分烟气热量，从而可减少用于加热凝结水的部分汽轮机抽汽，汽轮机的抽汽量减少，留在汽轮机中做功的蒸汽量增加，从而增加了汽轮机的做功，回收余热，进而提高 了锅炉热耗率，减少了电厂发电煤的消耗量。并且利用低温省煤器回收余热，可以通过调节进入低温省煤器内的凝结水流量，很好的适应煤种变化、季节变化和负荷变化引起的排烟温度不同。

同样世界上的其它一些国家如德国的许多电厂也均采用了低温省煤器。在国内，余热利用在威海电厂、山东龙口电厂、上海外高桥电厂等电厂以及冶金、陶瓷灯工业生产中都有了较为成熟的应用。有一些研究者已经对余热利用做了大量的理论研究。黄圣伟[7]等对等效焓降法在计算煤耗方面的应用进行了研究。徐文栋[10]指出了暖风机的使用带来的问题，并使用了利用前置式液相空气预热器，在使用暖风器时段，可替代暖风器的作用，同时在烟气出口部分加设低温省煤器吸收由于前者带来的排烟温度升高带来的热量损失，并分析了通过加装低温省煤器进行烟气余热回收利用而带来的节煤效益。

2.2.2预热空预器进口冷空气

利用排烟加热来自环境的低温空气，即在主空气预热器之前增加一级前置式空气预热器，锅炉利用排出的烟气来预热进入主空气预热器的进口空气。其主要原理为增加一级换热装置，与热空气的换热面积增加，而烟气和空气的进口温度保持不变，空气吸收的热量增加，进入炉膛的空气温度提高，既有利于锅炉稳定燃烧，又可以解决主空气预热器由于壁面温度较低导致

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

的腐蚀、积灰、磨损等问题。在我国，较小规模的工业锅炉中，如辽宁发电厂670t/h的锅炉，已有利用前置式空气预热器进行烟气的余热回收，从而达到稳定锅炉燃烧、提高机组效率的成功应用。

2.2.3烟气余热加热管网热水

我国供热系统的一次供回水温度一般设计成95℃/70℃，有时为增强热网的供热能力，一次供水温度会达到130℃/70℃.而燃煤锅炉的排烟温度一般都保持在100℃以上，完全可以满足加热热网水的要求。尤其是对电站燃煤锅炉而言，在北方的采暖期周期内，加热热网水还可以减少汽轮机采暖抽汽、增加发电量、提高能量利用效率。利用烟气余热加热热网水，能量绝大部分可传递至热网水当中，烟气余热利用效率很高。然而这种利用方式却需要持续的热需求，在一年当中的非采暖期就可能造成设备停止运行，这对烟气余热的持续利用是不利的。

本章主要在一些前人对于电厂低温烟气余热利用系统的分析计算研究的基础上，总结介绍了几种利用效率最优的低温烟气余热回收利用的系统装置。包括低温烟气的两级余热回收、烟气侧的串联和并联余热回收以及低温余热利用系统的水侧优化。

第三章 低温烟气的余热利用

3.1利用两级翅片管换热器回收余热

本节着重介绍两级翅片管换热器的烟气余热回收方案。该方案包括一个一级翅片管换热器和一个二级翅片管换热器，还有一个热泵装置。在烟气余热回收时，采用水回路热泵装置，在二级翅片管换热器和热泵装置之间增加了水箱，目的是当供给的热水温度达到需求的温度时，不需要再继续给水加热，将水蓄入水箱停止加热。水回路的增加防止了烟气温度过高时，致使二级翅片管换热器当中的水温度升得过高，进入热泵系统后温度超过压缩机的启动临界温度，导致压缩机难以启动，整个系统无法运行。

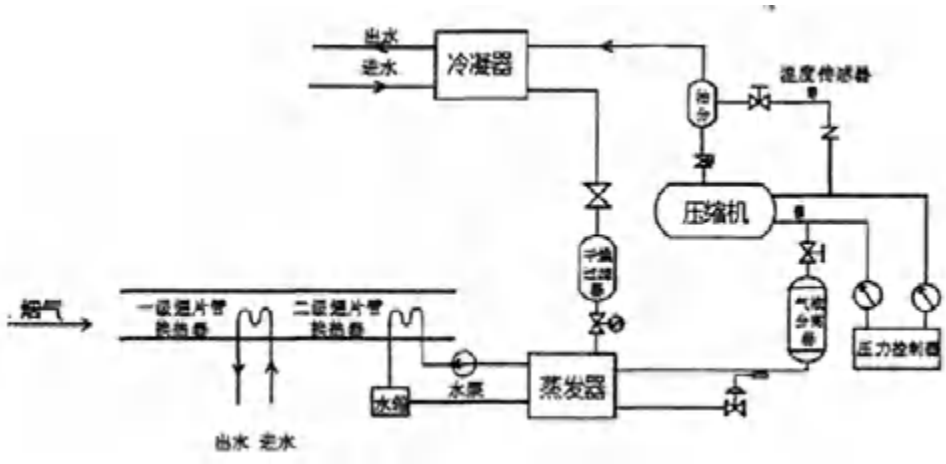


图3-1 两级余热回收装置[1]

两级余热回收装置的工作原理是电站燃煤锅炉排出的高温烟气首先和一级翅片管换热器进行热量交换，把热量传递给一级翅片管换热器中的水，升高后的水温可以用于居民冬季取暖，此时回收的热量大部分是显热。温度已经降低的低温位烟气继续和二级翅片管换热器进行换

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

热，将热量传递给二级翅片管换热器中的水，水吸热升温后进入热泵系统中的蒸发器，将热量传递给蒸发器中的制冷剂，此时烟气中的余热被回收进入热泵系统中完成制热循环，此时回收的热量包括气化潜热。

南京理工大学的代明然[1]针对烟气的两级余热回收，做了大量的结构设计计算，讨论了一级翅片换热器的最佳设计方案。具体包括换热工质烟气和水的流量、流速、温度、压力等原始数据的处理计算，还有水和烟气的物性参数的研究，最后通过对一级翅片换热器的传热面积及传热面积的结构进行设计，具体包括翅片厚度、翅片净间距、管的内外径、管排等方面的数值要求，最后得到了一级翅片管换热器的最佳设计方案。

通过代明然[1]的设计方案，设计出了一套全不锈钢的的一级翅片管换热器。将一级翅片管换热器安装在某燃煤锅炉尾部烟道中，利用翅片管换热器回收烟气的余热，用回收烟气的余热来加热锅炉中的回水，锅炉回水进入翅片管换热器，烟气与其总体成逆流布置，回水吸收烟气余热后温度升高，直接回到供水管道。经过与一级翅片管换热器的热交换，烟气由入口温度78.2℃降低到53.3℃，烟气温降为24.9℃。翅片管中的水温由入口时的47.08℃升高到49.43℃，温升为2.35℃。

同样，为了能对余热烟气进行高效的回收利用，代明然对二级翅片管换热器、冷凝器、蒸发器、压缩机选型、水箱热泵装置配件选型都做了设计计算、比较，最后得到了各级换热器的较理想设计方案。如下表3-1。

表3-1二级翅片管换热器设计结果[1]

管内径 d_i（mm）	管外径 d_o（mm）	翅片厚 δ_{s1}（mm）	翅片间距	翅径	换热器宽	换热器长	换热器高
s_l（mm）	d_h（mm）	h_{kd2}（mm）	h_{cd2}（mm）	h_{gd2}（mm）			
13	16	0.35	3.85	46	520	685	380

烟气经过一级翅片换热器后温度降至53.3℃，这种低温烟气具有巨大的潜热资源，可以通过热泵系统继续回收利用。53.3℃的低温烟气先通过经过各种分析设计计算优化的二级翅片管换热器，将热量传递给翅片管中的水，使换热器中水温提高了5℃。被加热的水再通入蒸发器中循环利用[1]。

经过设计计算，冷凝器选用卧式壳管式冷凝器，两流程，壳程为制冷剂，管程的水吸收制冷剂放出的热量后，送至用户处用于冬季供暖。具体结构如表3-2所示。

表3-2冷凝器设计结果[1]

管内径 d_i（m）	管外径 d_o（m）	管子数	管长（m）	筒径（m）	换热面积（m）
0.013	0.016	56	2	0.219	5.76

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

经过以上设计，系统运行后，管程的水温度升高了5℃，制冷剂的温度降低了25℃。进一步提高了烟气的余热利用率。

表3-3蒸发器的设计[1]

管内径 d_i（m）	管外径 d_o（m）	管子数	管长（m）	筒径（m）	换热面积（m^2）
0.01	0.012	118	1.5	0.219	6.5

二级翅片管换热器中的水吸收烟气的余热后，进入蒸发器，将热量传递给制冷剂后再进入二级翅片管换热器完成循环。经过设计改进，二级翅片管换热器中的水将吸收烟气的热量传递给制冷剂后，水温下降了5℃，而制冷剂的温度则上升了5℃，同样也提高了烟气余热的利用效率。蒸发器型式选卧式壳管式，管程是制冷剂，壳程是水。

3.2烟气侧串联与并联的余热利用

常规集成低温省煤器的锅炉烟气余热利用系统虽然可以提高机组效率，降低发电煤耗，但其自身也存在着一定的限制：一方面，常规烟气余热利用系统中回收的烟气余热来自空气预热器出口的烟气，烟气温度低、品位差，受到传热温差的限制只能加热低级别的凝结水，导致节能效果不佳。以华北电力大学的张昌顺[2]提出的烟气余热利用系统为例，电厂中低温省煤器可以利用的烟气温度一般仅为130℃左右，只能用于加热级别较低的回热加热器中的凝结水；另一方面，在空气预热器的空气入口处，处于环境温度下的空气(通常只有25℃甚至更低)和烟气(通常120～130℃甚至更高)之间的传热温差可以达到100℃以上，由此带来的空气预热器传热火用损失较大，烟气－空气换热系统有待进一步改进。

综合考虑以上因素，在对常规锅炉烟气余热利用系统分析结果的基础之上，结合我国燃煤的主要煤种特性，并考虑低温烟气的低温腐蚀问题，华北电力大学的张昌顺提出了两种新的适用于燃煤电厂锅炉烟气余热利用的集成系统：

（1）烟气侧串联系统；

（2）烟气侧并联系统。

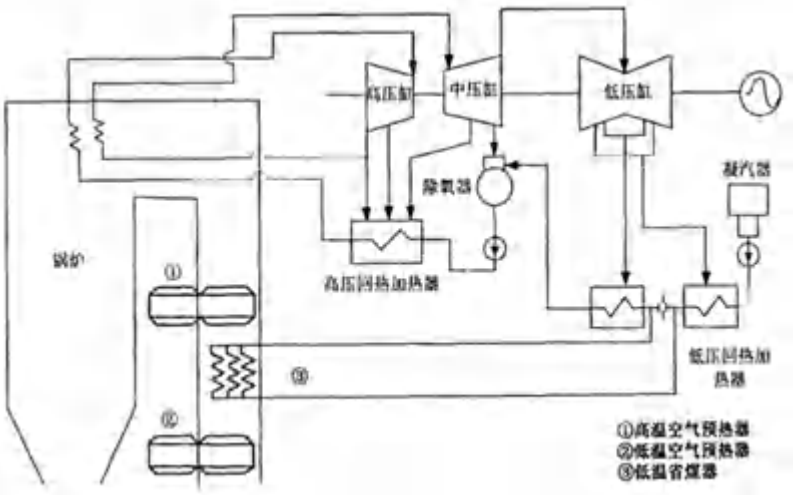
此两种集成系统中低温省煤器都处在烟温较高的烟道处，利用能级较高的烟气加热回热系统高压锅炉给水，排挤压力较高、做功能力较强的回热抽汽，使机组在主蒸汽量不变的情况下，总的出功进一步增大；能级较低的低温烟气用来加热空气，减少烟气和空气的换热温差，减小了系统火用损。这两种集成方式都可以使机组效率得到极大的提高。

3.2.1烟气侧串联余热利用系统

如图3-2所示，在串联余热利用系统中，把空气预热器分成高温和低温两级分开布置，在两级空气预热器之间布置低温省煤器。省煤器出口的烟气温度比较高，所以经过省煤器的烟气又进入高温空气预热器，加热高温空气后进入低温省煤器，加热从回热系统引出的凝结水，烟气经过低温省煤器后又进入低温空气预热器，加热冷空气。这里的两级空气预热器和低温省煤器串联布置，烟气依次流经高温空气预热器、低温省煤器、以及低温空气预热器；空气先在低温空气预热器中预热，然后进入高温空气预热器加热到设计热风温度。在本系统中低温省煤器

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

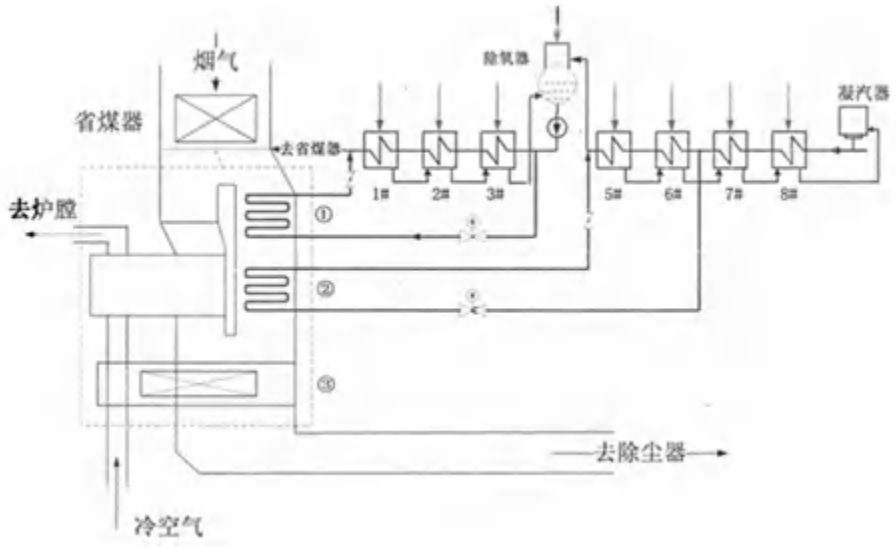
处于烟气温度较高的区域，可根据机组负荷不同串联或并联在级别较高的回热加热器上，排挤能级较高的回热抽汽；此外，由于空气预热器的分级布置，使得两级空气预热器中的烟气–空气传热温差减小，空气预热器的传热火用损失也相应减小，系统的效率要高于常规烟气余热利用系统。



3–2烟气侧串联余热利用热力系统图[2]

3.2.2烟气侧并联余热利用系统

如图3–3所示是烟气侧并联余热利用热力系统示意图，该系统在省煤器出口之后布置与空气预热器相并联的旁路烟道，旁路烟道中布置高温换热器和低温换热器。省煤器出口的高温烟气一部分进入空气预热器，一部分进入旁路烟道，加热流经高温换热器中的高压锅炉给水以及流经低温换热器中的低温凝结水。在并联烟道之后的会合烟道布置烟气–空气加热器，回收低温烟气中能级较低的余热，补偿因烟气分流造成的空气吸热量不足。并联系统的设计极大的提升了所回收烟气余热的品味，可以替代更高级抽汽，以获得更高的节煤效果。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

图3-3烟气侧并联余热利用热力系统示意图[2]

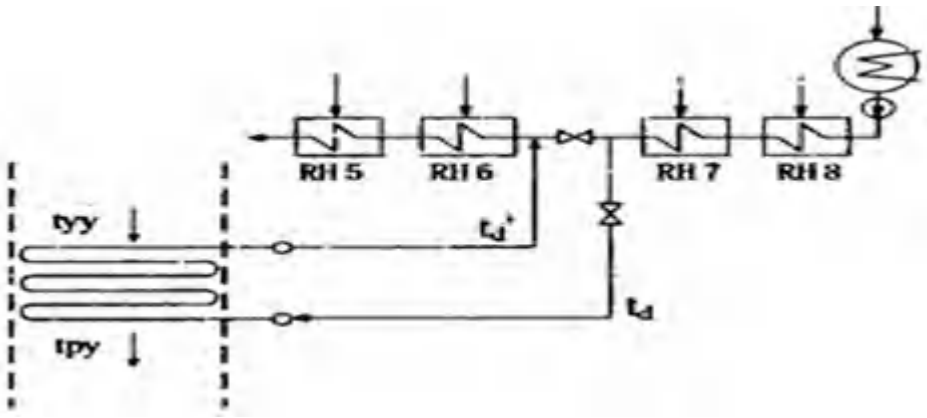
（1）高温换热器 （2）低温换热器 （3）空气预热器

3.3烟气余热利用系统水侧优化

在烟气余热利用系统凝结水侧，低温省煤器与回热系统的联结方式以及排挤抽汽的级别不同都会对余热利用的效果以及运行的可靠性造成影响。就低温省煤器联入热力系统的实质而言，联结方式只有低温省煤器串联入回热系统和低温省煤器并联入回热系统两种方式；若考虑到换热温差、节能效果等方面而选择排挤不同级别的抽汽，低温省煤器联入热力系统的具体联结方式可分为串联、单级并联、跨级并联以及串并联混合等方式。联结方式不同，节能效果可能具有很大差异，因此根据实际工况和系统参数选择合理的集成方式尤为重要。

理论上，低温省煤器可以与回热系统中的任意一级或几级回热加热器相联结。但实际上，由于烟气侧和水侧必须存在一定的对数换热温差以及出口水温不得超过进口烟气温度等传热限制条件存在，低温省煤器不能与级别过高的回热加热器相联结。

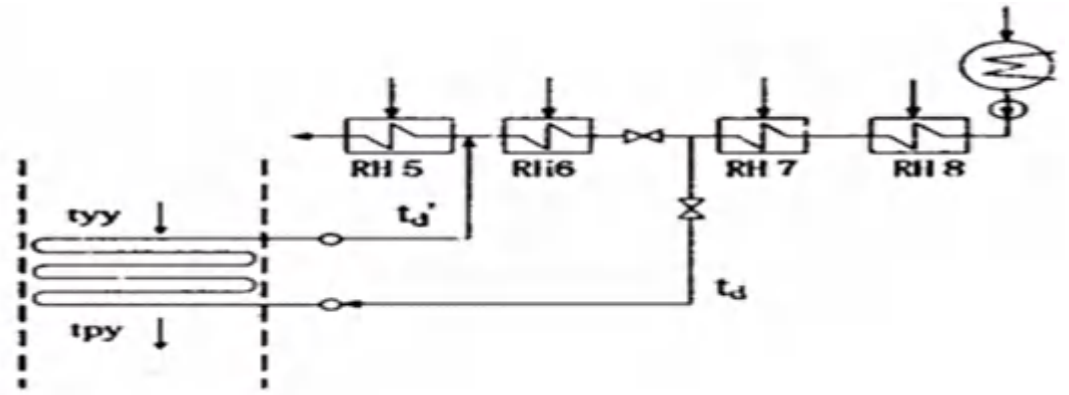
在华北电力大学张昌顺[2]研究的热力系统中，锅炉的排烟温度为130℃，考虑到锅炉煤种以及尾部受热面低温腐蚀等因素，低温省煤器的出口温度设为100℃。张昌顺通过对低温省煤器与各级回热加热器之间串联、并联、以及跨级并联九种连接方式的研究，得到了各方案的最后节能效果。如图3-4，经过对比分析得出：（1）单纯从热力学角度来看，串联在第6、7级回热加热器之间的方案3以及与第6级回热加热器并联的方案6的节能效果最好；（2）仅从节能效果来看，串联方案1与并联方案4的供电标准煤耗降低值也分别相等；与此同时，串联方案2和3，与并联方案5和6的标准煤耗降低值也分别相等；而跨级并联方案7，其节能效果介于方案1和2以及方案4和5之间，类似的还有跨级并联方案8和9，其节能效果均介于方案2和3以及方案5和6之间。



（1）串联于6#和7#之间

如图3-4（1）所示为在第6级回热加热器的入口前设置分流阀，引出全部凝结水分流至低温省煤器，在低温省煤器中吸热后返回本级热力系统的入口处，进入更高一级回热加热器；如图3-4（2）采用并联方式布置，低温省煤器与第6级回热加热器并联于热力系统。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



（2）与RH6并联

图3-4低温省煤器的联结[2]

综上所述，单纯从热力学分析的角度来看，方案3和方案6能达到相同的最优的节煤效果。但由于串联方案会增加系统的水侧阻力，需要额外增设相应的水泵，而并联方案中流经回热加热器中的水量降低，所减少的水侧阻力足以弥补其流经低温省煤器时所增加的阻力，因此不必额外增加水泵，这对于在电厂原有热力系统的基础上进行余热利用改造较为有利。所以，综合来看，采用并联联结方式的方案6为最优方案。

参考文献

[1] 代明然. 低温烟气余热两级回收装置设计与研究［D］. 南京：南京理工大学，2015.

[2] 张昌顺. 锅炉烟气余热利用系统流程优化及关键设备试验［D］. 华北电力大学，2014.

[3] 郝向辉. 大型燃煤锅炉低温烟气余热综合利用及节能分析［D］. 华北电力大学，2015.

[4] 王志军. 燃煤锅炉低温烟气余热的深度高效利用［D]. 东南大学，2016.

[5] Searle M, Shiret A R, The Opportunities for a New Generation of High Efficiency Gas Boiler[J].ASHRAE Transactions, 2000, 78:96~105

[6] Perry L.A Case Study Of Condensing Boiler Energy Savings[J].ASHRAE Transactions, 2000, 78:96~105

[7] 黄圣伟. 大型燃煤电站锅炉烟气余热利用系统节能分析与优化研究［D］. 华北电力大学，2013.

[8] 赵恩婵，张方炜，赵永红. 火力发电厂烟气余热利用系统的研究设计［R］. 北京：北京国电华北电力工程有限公司，北京 100011,2008.5:12～19.

[9] 许加庆. 电站锅炉烟气余热利用与低温腐蚀防止研究［D]. 华北电力大学，2015.3.

[10] 徐文栋. 烟气余热利用技术及其工程应用研究［D]. 上海：上海理工大学，2013.5.

[11] 程小松. 电厂冷端系统及烟气余热利用系统运行优化控制［D］. 重庆：重庆大学，2015.5.

[12]Simin Wang, Yanzhong Li, Jian wen, et al. Experimental investigation of header configuration on two-phase flow distribution in plate-fin heat exchanger[J], International Communications in Heat and Mass Transfer Volume 37, Issue 2, Pages 116-120.

[13] Wang DX, Bao A，Kunc W, et a1. Coal power plant flue gas waste heat and water recovery[J].Applied Energy 2012; 91：341-348.

[14] 张晨旭. 大型燃煤机组深度余热优化利用系统节能分析［D］. 华北电力大学，2015.3.

[15] Jeong K, Kessen MJ, Bilirgen H. Analytical modeling of water condensation incondensing heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer2010; 53:2361-2368.

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

某电厂350MW汽轮机组高中压缸提前预暖技术应用与研究

华曙光
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：通过实践找到缩短汽轮机启动时间的应对措施，达到整体节能降耗的目的。

关键词：汽轮机　启动时间　节能降耗

引言：

某电厂两台汽轮机型号为：C350/329-24.2/1.5/566/566 ，超临界、单轴、三缸两排汽、一次中间再热、间接空冷抽汽凝汽式汽轮机。高、中压缸和低压缸均采用对称分流式，高、中、低压缸为双层缸结构。本机组设计有高压缸倒暖、高压缸正暖、高压缸夹层加热、中压缸预暖系统。高压缸倒暖系统在冷再热蒸汽管道压力大于700KPa，高压缸调节级温度小于150℃时投

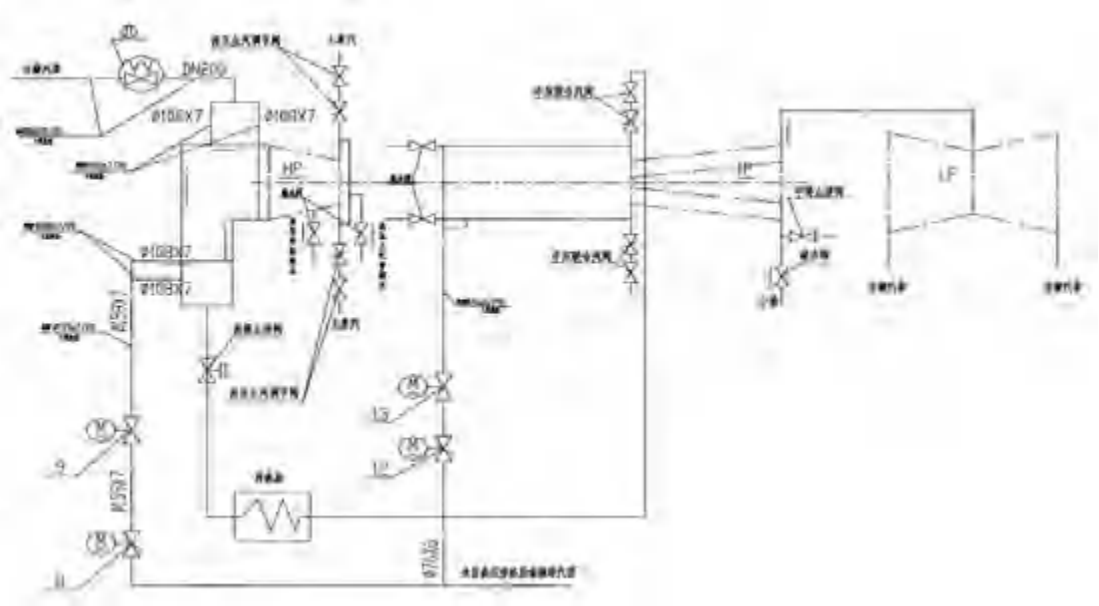


图3-1高中压缸预暖系统

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

入；高压缸正暖系统在汽轮机摩检开始转速降至200rpm时投入；高压缸夹层加热系统在高压缸下半内壁温度小于300℃时投入，蒸汽压力要求0.98MPa–4.9MPa；中压缸预暖在高压缸预暖投入时投入。

汽轮机的启动是一个不稳定的加热过程，进行合理经济的启动就是寻求合理的加热方式，使汽轮机在启动过程中各部分热应力、热变形、胀差及振动值等均维持在允许范围内，将汽轮机金属温度均匀地提高至工作温度，进入正常的运行状态。

暖机的目的是使汽轮机各部位金属得到充分的预热，减小汽缸内外壁、法兰与螺栓之间的温度差及转子表面与中心的温度差，从而减小金属内部应力，使汽缸、法兰和转子均匀膨胀且保证胀差值能够在安全范围内变化，确保汽轮机内部存在动静间隙，避免摩擦，进而使带负荷速度相应提高，缩短汽轮机升至额定负荷所需要的时间，达到节约能源的目的。

一、机组两次启动情况的对比分析：

1. 某电厂2020年1月22日机组启动情况：

1月21日 22:46 开始高中压缸预暖，投夹层加热。

1月22日05:07冲车前参数：主汽压力4.39MPa，温度395℃；再热器压力0.8MPa，温度355℃。高压缸调节级后内壁温度155/157℃、高压缸夹层温度172℃、中压缸进汽中心内壁温度96/95℃、高中压缸热膨胀24.7/24.9mm、高压缸热膨胀mm、中压缸2.7/2.4mm。

05:08开始冲车。

05:15 转速500rpm开始摩检。

05:49 转速至1200rpm开始暖机60分钟，

06:50 低速暖机结束，开始升速。

07:01 转速至2600rpm,暖机25分钟。

07:33 定速3000rpm。

08:32 并网。

09:19 切缸前参数：主汽压力6.9MPa，温度507℃；再热器压力0.88MPa，温度449℃。高压缸调节级后内壁温度201/202℃、高压缸夹层温度82℃、中压缸进汽中心内壁温度78/74℃、高中压缸热膨胀14.2/14.5mm、高压缸热膨胀13.77/13.92mm、中压缸6.0/5.6mm，高压缸胀差2.0/2.1。

09:20 开始切缸。

09:25 切缸后，高压缸胀差快速上涨，10:18最大至8.1mm。

09:51 主蒸汽温度由530℃降至466℃。负荷由80MW降至39MW，主蒸汽压力由7.5MPa涨至10MPa，此时高压缸调节级后内壁温度448/448℃、高压缸夹层温度259℃、中压缸进汽中心内壁温度363/371℃、高中压缸热膨胀19.8/20mm、高压缸热膨胀17.85/18.30mm、中压缸8.3/8.0mm。10:18 主蒸汽温度500，负荷73MW胀差开始下降。

14:13~16:25 主蒸汽温度由479℃涨至548℃，负荷由98MW涨至150MW，胀差由5.8/5.2涨至5.8/6.0，

16:25 高压缸调节级后内壁温度519/519℃、高压缸夹层温度382℃、中压缸进汽中心内壁温度464/479℃、高中压缸热膨胀33.8/33.7mm、高压缸热膨胀33.97/33.24mm、中压缸

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

16.1/15.3mm。10:18 主蒸汽温度548扔在上涨，负荷150MW持续上涨，胀差开始下降。

图3-2 1月份机组启动膨胀曲线

2. 某电厂2020年12月05日机组启动情况：

2020年11月30日13:00投入1号机组高压缸倒暖、中压缸预暖、夹层加热，开始暖机。13:11 投入1号机组轴封、真空系统。

2020年12月05日16:00 1号汽轮机冲车前参数：高压缸调节级后内壁温度322/323℃、高压缸夹层温度320℃、中压缸进汽中心内壁温度231/220℃、高中压缸热膨胀24.7/24.9mm、高压缸热膨胀15.1/15.3mm、中压缸热膨胀9.5mm/9.5mm，高中压缸暖机进汽压力0.299MPa,进汽温度350℃，夹层进汽温度345℃，高中压缸预暖进汽总门开度80%。

17:30 汽机挂闸，开始冲车，冲车参数：主汽压力5.16MPa，温度454℃；再热器压力0.79MPa，温度376℃。

17:38 汽机定速500rpm转速，投入摩检检查。

17:53 摩检正常后重新设定目标转速1200rpm开始升速。

17:54 投入汽轮机正暖。

18:26退出正暖，投入高压缸倒暖。

18:01 退出夹层加热。

18:05 汽轮机转速1200rpm，暖机40分钟。

18:23 低加随机滑启。

18:50 低速暖机结束，设定目标转速3000rpm，开始升速。

19:03 汽轮机定速3000rpm，暖机40min。

19:05 做喷油试验、润滑油压力开关试验、真空压力开关试验、EH油压力开关试验、HPT试验均正常。

19:26 停交流润滑油泵及交流启动油泵。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

21:00 退出高压缸倒暖。

21:13 1号发变组并网。

21:14 切缸前参数：机组负荷34MW，主蒸汽压力6.4MPa，主蒸汽温度462℃，再热汽压力1.2MPa，再热汽温度464℃，高旁开度100%，低旁开度53%，高压缸调节级后内壁温度318/319℃、高压缸夹层温度303℃、中压缸进汽中心内壁温度334/334℃、高中压缸热膨胀26.4/26.7mm、高压缸热膨胀15.9/16.3mm、中压缸10.5/10.3mm。

21:15 汽轮机开始切缸。

21:22 高压缸切缸完成，切缸后参数：机组负荷62MW，主蒸汽压力7.6MPa，主蒸汽温度476℃，再热汽压力1.0MPa，再热汽温度468℃，高压缸胀差1.41/1.45mm，中压缸胀差3.9/3.9mm，低压缸胀差6.5/6.6mm，高压缸调节级后内壁温度398/400℃，高压缸夹层温度317℃，中压缸进汽中心内壁温度356/362℃，高中压缸热膨胀26.6/26.9mm，高压缸热膨胀15.9/16.4mm，中压缸10.7/10.5mm。

21:16~22:01 主蒸汽温度由460℃涨至522℃，且进行了汽轮机切缸操作，高压缸胀差由1.41/1.45涨至4.2/4.3mm，中压缸胀差由3.9/3.9涨至4.2/4.3mm，低压缸胀差由6.5/6.58涨至7.23/7.22mm。

22:03~22:29 主蒸汽温度由523降至490℃后稳定。高压缸胀差稳定在4.3/4.4mm，此时高中压缸热膨胀29.3/29.7mm，高压缸热膨胀16.1/16.9mm，中压缸热膨胀11.8/11.4mm。由于给煤机频繁压死，锅炉燃烧不稳定，主蒸汽温度难控制，故机组负荷一直在低负荷80MW左右稳定至22:58。

图3-3 12月份机组启动膨胀曲线

23:39~23:48 主蒸汽温度由497℃涨至522℃，高压缸胀差由4.73/4.85涨至4.86/4.99mm，此时高中压缸热膨胀31.3/31.2mm，高压缸热膨胀17.4/17.8mm，中压缸热膨胀13.9/13.4mm。此时开始降主蒸汽温度至512℃，高压缸胀差稳定不再上涨。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

00:20 高中压缸热膨胀32.6/32.5mm，高压缸热膨胀17.8/18.4mm，中压缸热膨胀14.8/14mm，此时涨主蒸汽温度及机组负荷，高压缸胀差均在下降。00:50 锅炉大小阀切换完毕。

00:54 锅炉转态完成。

二、对比分析得出结论：

通过对两次机组启动时各参数的对比发现，1月21日1号机在启机过程中严格按照说明书要求进行相关暖机操作，汽轮机启动过程中汽轮机由挂闸到3000rpm定速用时2小时25分，并网后带负荷过载中高压缸胀差最大至8.1mm。1号机在12月份的启动过程中，由于提前5天进行暖机操作，在汽轮机冲车前，暖机时间充分，汽轮机缸体得到很好的膨胀，在汽轮机冲车过程中1-8瓦振动未超过60um，且未在2600rpm进行高速暖机，汽轮机由挂闸到3000rpm定速用时1小时33分，缩短了机组启动时间；其次在汽轮机切缸后及升负荷过程中高压缸胀差控制良好，均未超过5.2mm。通过采用高中压缸提前预暖技术，有效地降低了燃油、燃煤用量，节约了启动成本，增加了企业的综合效益。

汽轮机大多数事故发生在启动过程中，机组各部件的温差、热应力、热变形增大，不正确的暖机工况以及设备本身某些结构存在缺陷都可能造成事故的发生，因此在机组启动过程中暖机的时间长短和效果决定了机组启动时的经济性、合理性，通过采取相应的控制手段如：启动方式的选择，启动参数的选择、升温升压率的控制等，就可以降低暖机时间，加强暖机效果。该技术实施的主要原则是使以降低汽轮机转子热应力为基础，保护汽轮机各部分零件，防止由于内部温度剧烈变化而使相应部件产生热疲劳，降低机组的寿命。

机组冷态启动中速暖机的目的主要有两个：防止材料低温脆性破坏和避免过大的热应力。从冲转到额定转速主要是为了提升高、中压转子的温度，防止低温脆性破坏。中速暖机完毕应注意检查汽缸总膨胀和中低压缸的膨胀情况以及机组差胀并做好记录。如膨胀不足，应查明原因，并及时解决，以免在继续升速的过程中引起振动。中速暖机结束的大致标志包括，调节级金属温度及中压缸进汽处金属温度达到规定温度300℃以上，调门蒸汽室壁温到达机前压力所对应的饱和温度以上，高中压转子中心孔温度与转子表面温差在正常范围内，高中压转子应力曲线满足继续升速要求。另外对TSI重要数据进行监视，所有数据均应在允许范围内。

参考文献

（1）汽轮机启动运行说明书 20180516
（2）汽轮机安装说明书 20180516
（3）汽轮机说明书 20180516
（4）汽轮机高中压缸预暖、夹层预暖说明书 20180516
（5）300MW级汽轮机运行导则 DL/T 609-1996

作者简介

华曙光，汉族，大学本科，内蒙古乌兰察布市兴和县人，工程师，现为内蒙古京能双欣发电有限公司发电运行部部长助理兼汽机主管，公司地址：内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗蒙西镇工业园区，邮编016014，联系电话17604739141。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

浅析蒸汽管网的补偿设计

陈宇琪
（武汉德威工程技术有限公司　湖北武汉　430000）

摘要：针对热网管道运行过程中，管道会因温度升高引起热伸长，其产生的应力会破坏管道及支墩结构产生的问题，介绍了常用补偿器的产品特点及技术要求，并分析了热网设计中典型的补偿设计选型。热网常见补偿方式：利用管道自身弯曲的自然补偿；设置补偿器。合理的补偿设计和安装，对蒸汽管网的安全运行具有重要的意义。

关键词：蒸汽管网　热膨胀　自然补偿　补偿器

1. 常用补偿器的产品特点及技术要求

管道热补偿[1][2][3][4]：防止管道因温度升高引起热伸长产生的应力而遭到破坏所采取的措施。常见补偿方式：1、利用管道自身弯曲的自然补偿；2、设置补偿器。蒸汽热网常用的补偿器有旋转、波纹、大拉杆、铰链、球形补偿器和套筒补偿器等。旋转补偿器是目前蒸汽管网上应用最多最广泛的一种补偿器，应用于架空管网较为普遍；在直埋管网的应用中，尤其是能够设置旋转井或允许局部出地情况下，旋转补偿器的应用也逐渐增多。蒸汽直埋管网常用的补偿器以外压轴向型波纹补偿器为主。蒸汽架空管网在局部地方会用到大拉杆和铰链补偿器。球形补偿器应用在架空管网中空间条件相对紧张的位置。套筒补偿器目前在蒸汽管网上相对应用不多。

1.1旋转补偿器

旋转补偿器[ ]是一种通过旋转两端相对角度来补偿管道轴向位移的补偿器，主要由密封座、密封压盖、密封填料组合件、变径管、芯管等构件组成，成对安装在热力管道上，相对同

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

步旋转吸收管道轴向位移。旋转角度，短臂长度，布置形式是旋转补偿器设计的三个重点。

旋转补偿器具有：

①补偿量大，可根据自然地形及管道强度灵活布置，旋转角可达±15°；

②管道中不产生介质盲板力，可降低固定支架推力，特别适用于大口径管道；

③密封性能优越，长期运行不需维护；

④设计选用及安装灵活方便，工程造价低投资少等特点。

1.2外压轴向型波纹补偿器

外压轴向型波纹补偿器[6]是吸收管道轴向位移的波纹补偿器，由内筒、波纹管、外筒及附属构件组成。

外压轴向型补偿器具有：

①波纹管受外力作用，抗压强度高；

②膨胀位移时波纹管处于拉伸状态，不发生失稳破坏，安全可靠；

③波纹管采用316L材料制作，耐腐蚀弯曲疲劳强度高，抗腐蚀性能好。

注：波纹管材质的选择一般根据工作温度、循环应力、耐腐蚀性和制造工艺等方面综合分析选用，其要具有较高的疲劳寿命、较大的塑性储备、较高的韧性、较好的成型性能和焊接性能、良好耐腐蚀性和耐高温性能等特点。

波纹管材质常见有S30403(304L)、S30408(304)、S31603(316L)、S31608(316)和S22053(双相不锈钢)等；工程上波纹管材质一般选用316L，其在耐腐蚀性、耐热性等综合性能上要优于304、304L和316。

S22053其耐腐蚀性、耐压强度等性能优于316L,一般用在介质比较特殊场合，在蒸汽热网

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

中不常用。

1.3大拉杆波纹补偿器

大拉杆波纹补偿器[7]是能吸收管道系统任意平面内横向位移的补偿器，它由接管与两个波纹管以及大拉杆等零件构成。

大拉杆波纹补偿器具有：

①波纹管采用316L材料制作，弯曲疲劳强度高，抗腐蚀性能好；

②可以在安装时在补偿方向进行反向预紧，起到增大补偿量的作用；

③外部设置的大拉杆可以限制补偿量保护波纹管，运行安全；

④无内压轴向推力，对固定支架影响小。

1.4单式万向铰链补偿器

单式万向铰链补偿器[8]是能吸收管道系统任意平面内角位移的补偿器，它由端管、波纹管、万向环、铰链板等零件构成。

单式万向铰链补偿器具有：

①波纹管采用316L材质制作，弯曲疲劳强度高，抗腐蚀性能好，使用寿命长；

②铰链构件可承受介质液压推力和管道重量，对固定支架影响小。

注：单式万向铰链补偿器价格：3330元/个 (DN300 PN25 T=350℃ 角向补偿量: ± 7.5°)

1.5球形补偿器

球形补偿器[ ]是吸收管道一个或多个方向上横向位移的补偿器，主要由球体和密封装置等元件组成，依靠球体的角位移来吸收管道热膨胀位移。

球形补偿器具有：

①结构紧凑，占用空间小；

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

②采用可注组合密封技术，实现长期可靠密封；

③补偿能力大，可降低管线固定支架和补偿器数量，节省总投资；

④可绕轴线旋转任意角度，还可向任何方向折曲，适用范围广；

⑤可自身平衡盲板力，对固定支架作用力小。

1.6套筒补偿器

套筒补偿器[ ]是吸收管道轴向位移的补偿器，它的芯管和外套管能相对滑动。

套筒补偿器具有：

①结构紧凑，占用空间小；

②采用新型密封材料，其具有强度大，摩擦系数小，效果好，维修方便；

③补偿能力大，可降低管线固定支架和补偿器数量，节省总投资。

2. 典型设计选型

2.1旋转补偿器

旋转补偿器补偿可以布置在架空管线间、地埋管线间、架空和地埋结合处、高低管位结合处、直角转弯处、非直角转弯处等，布置位置随意性很大，不影响补偿效果。

常见的布置方式包括同轴对中布置、错位布置和Ω型同轴三种。

同轴对中布置：一般布置于规划路由带宽较窄，现场路由笔直的长直管段上。

错位布置：一般布置于规划路由带宽较宽，现场路由有拐弯、凹陷或高程差较大等的管段上。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

Ω型同轴布置：一般布置于规划路由带宽较窄，现场路由笔直的长直管段上。

多管并行布置：几根管道走向一致，共用支墩。

⑴ 旋转补偿器的布置比较灵活多变，根据现场具体条件进行布置，对以上常见的三种布置方式的优缺点对比如下：

	同轴对中布置	错位布置	Ω型同轴布置
优点	管线占位同一直线，造价较低	造价低，弯头数量少	旋转臂短，管线占位同一直线
缺点	旋转臂长，弯头数量多，阻力较大。	管线占位不同一直线，旋转臂长，需要足够的管线带状宽度。	弯头数量多，阻力大；造价高。

若现场条件过于复杂，以上三种布置不能满足要求时，需具体情况综合考虑。

⑵旋转补偿器的旋转角可达 ± 15° ，其补偿的距离较长，在实际布置过程中，需结合现场条件、旋转臂长度等情况综合考虑补偿距离，补偿距离宜为200米至300米，补偿间距不宜过大。如果补偿距离过长，会造成对应的管托的滑板会加长，补偿段对固定支架叠加的摩擦力会增大，管线的横向摆动会加大。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

⑶当温度偏高或补偿段折角地方较多，建议适当缩短补偿距离。

⑷当采用多管布置时，考虑相邻管道不能出现碰撞等问题，建议适当缩短补偿距离，否则在补偿的地方，前后共用支墩的跨距会变大，影响此处前后的支架布置。

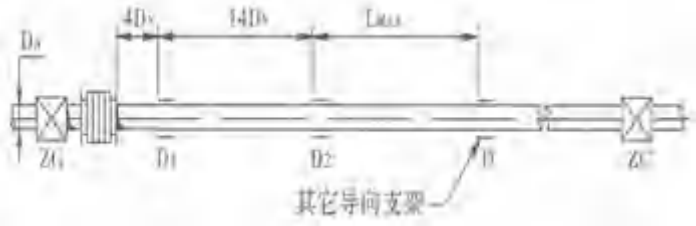
⑸同轴对中布置中的图4，由对中布置衍生而成，其旋转臂布置在一边，根据现场反馈的情况，建议在旋转臂或折角的斜臂上设置支架，否则此处旋补重心不稳，容易侧翻；另在折角的斜臂上设置支架时，需考虑管道的轴向位移，以免支架滑落。

⑹ Π型组合补偿器(对中和错位)由于有横向摆动，故两侧一定距离内不准设置导向支架，其中《动力管道设计手册》对导向支架设计距离有要求。安装时，补偿器与管道保持同心，须对旋转角 θ 的一半进行预偏装或按设计热位移的一半进行预偏装。

2.2外压轴向型波纹补偿器

外压轴向型补偿器由于轴向补偿量大，稳定性好，其在直埋蒸汽管网运用中较为常见，如下图所示：

在某些局部受限的地方，架空蒸汽管网中也会用到外压轴向型补偿器，布置如下图：



布置要点

⑴ 外压轴向型补偿器属于自由型膨胀节，不能承受介质内压推力，增大固定支架的受力；

⑵ 补偿器的一端应布置在靠近固定支架处，另一端应设置导向支架，第一个导向支架与补偿器的间距为4D，第二个导向支架距第一个导向支架间距为14D；

⑶ 补偿器应根据设计温度进行合理布置，一般情况，管径≤DN150，一个补偿段间距宜为38.5米；DN200≤管径≤DN500，一个补偿段长度宜为51米；DN600≤管径，一个补偿段以为63米。

⑷ 补偿器与管道轴向应一致，距补偿器12m范围内管道不应有变坡和转角。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

⑸ 折角应尽量靠近固定支架，如果折角处于补偿器一侧，其应设置在固定支架与补偿器之间（如采用的4D的小角度弯管，在配管图上会比较直观）。

⑹ 如一补偿段出现几次折角，折角应距补偿器不小于12m，建议适当缩短补偿距离。

安装要点

⑴补偿器上的流向标志方向应与管道内介质流动方向一致（一般情况下，补偿器有A、B型之分，在安装时需注意其方向；应补偿器内部设置导流筒，如果安装方向不一致，会导致导流筒的开孔对着介质的流向，导流筒容易被介质冲蚀）。

⑵外压轴向型波纹补偿器建议在安装前进行预拉伸（波纹管被压缩），其预变形量不得超过最大轴向补偿量的40%(此过程一般在工厂里进行，施工现场在安装时不需要考虑预拉伸)。

⑶安装时应保证补偿器与管道对接的同轴度，严禁利用补偿器的变形强行调整管道的安装偏差。

⑷管道安装完毕后，应尽快拆除或松开补偿器上用于安装和运输的涂有标志的辅助定位构件及紧固件，并按设计要求将限位装置调到规定位置。

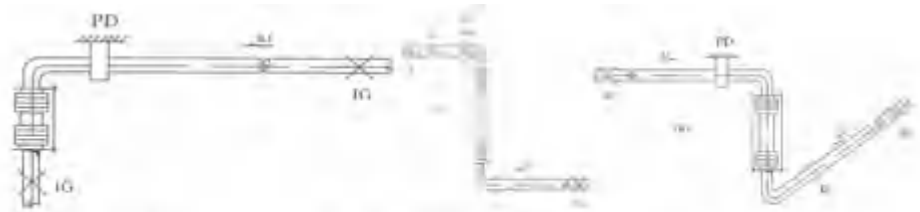
⑸水压试验时，检查固定支座是否已固定，必要时可进行加固，使管路不发生移动或转动。

⑹直埋管道按相关规范要求，需水压试验合格后进行保温补口工作，此时做水压试验时，须对补偿器两端固定节处的外护管进行固定，同时管段上的补口处的前后外护管需临时连接，必要时可进行加固，使管线成一整体，水压试验时管路不发生移动或转动。

⑺考虑⑹中增设固定措施的工程量较大，现场一般情况下，都是焊接检验合格后进行保温补口，随后对需打压的管道进行回填，再进行水压试验工作。

2.3大拉杆波纹补偿器

横向大拉杆波纹补偿器常用于架空蒸汽管道上，通常布置在“L”形管段的短臂上，补偿长臂热位移；或布置在平面“Z”形管段、立面“Z”形的中间管臂较短的管段上，以补偿该管段各管臂的热位移。各种布置如下图所示：



1、“L”形　　2、平面“Z”形　　3、立面“Z”形

布置要点

⑴ 横向大拉杆波纹补偿器属于约束型膨胀节，能承受介质内压推力，对固定支架影响小；

⑵ 由于大拉杆的长度一般偏长，常用的一般不小于2m，在高低位设置此类补偿器时，需考虑立管的高度（至少需满足大拉杆长度+2个弯头的长度）。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

⑶ 大拉杆的补偿距离不宜超过100m，当介质温度偏高，建议适当缩短补偿距离。

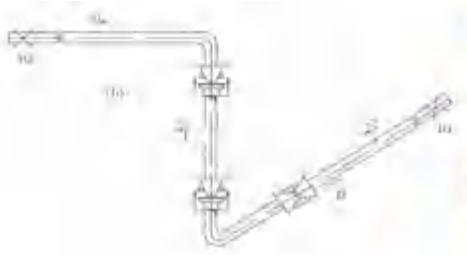
⑷ “L”形短臂和“Z”形中间管臂尽可能短，不宜过长。

安装要点

⑴ 大拉杆在安装时，应施以与横向位移相反方向的“冷紧”，其冷紧量约为实际最大横向位移的一半，当横向位移量不是很大时，可不进行冷紧。

2.4单式万向铰链补偿器

单式万向铰链补偿器用于架空蒸汽管道上，常成对使用，或将两个单式万向铰链补偿器与一个单式角向铰链补偿器组合使用，布置在空间“Z”形、“Π”形等管段上，以补偿该管段各管臂的热位移。各种布置如下图所示：



1、立面“Z”形

2、现场图片

布置要点

⑴ 单式万向铰链补偿器属于约束型膨胀节，能承受介质内压推力，对固定支架影响小；

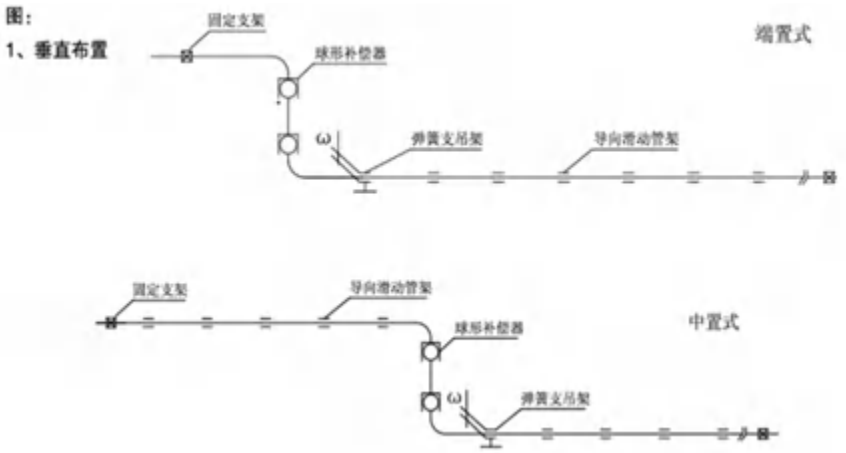
⑵ 与补偿横向位移补偿器相比，补偿角向位移补偿器主要用在当“L”、“Z”形管臂都偏长，角向位移补偿器更具灵活性。

安装要点

⑴ 铰链补偿器在安装时，应施以与角向位移相反方向的“冷紧”，其冷紧量约为实际最大角向位移的一半，当角向位移量不是很大时，可不进行冷紧。

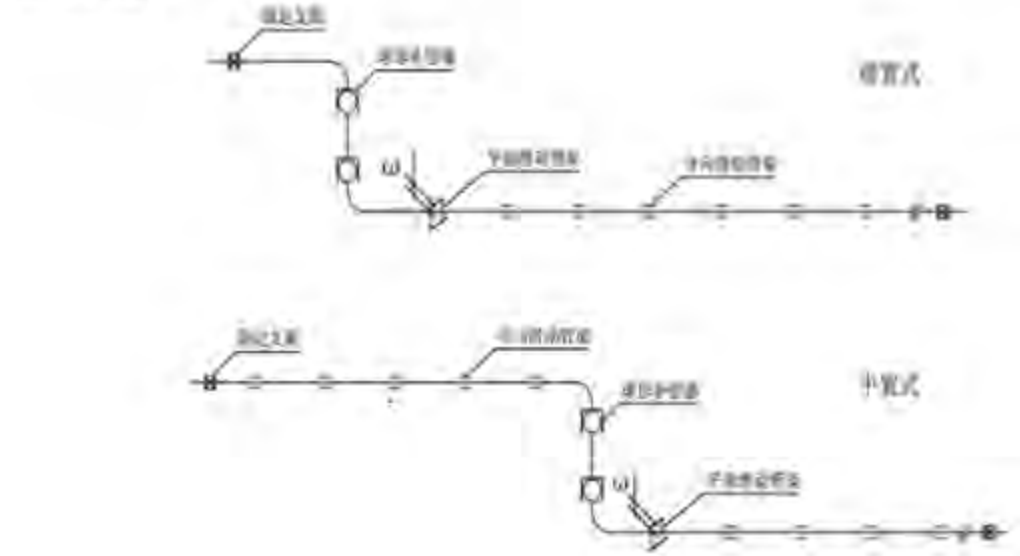
2.5球形补偿器

球形补偿器常用于架空蒸汽管道上，其布置较灵活，可水平、垂直和倾斜布置等。常见布置如下图所示：



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2、水平布置



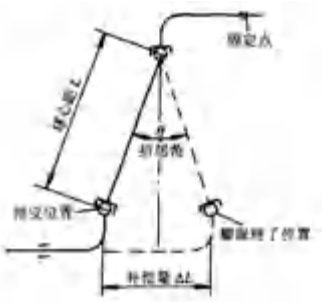
布置要点

⑴ 球形补偿器存在侧向位移，需合理设置导向支架；同时为避免管段绕曲，应适当增设导向支架；

⑵ 球形补偿器的折屈角可达 ± 15° ，其补偿的距离较长，在实际布置过程中，需结合现场条件、球心距长度等情况综合考虑补偿距离。

⑶ 在实际布置过程中，考虑球形补偿器的球体会转动，有泄漏的风险，其补偿距离建议不宜过长，一般不超过150m。

⑷需注意球心距与折屈角的对应关系，一般情况下球心距L不宜过小。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

安装要点

⑴ 球形补偿器与管道保持同心，须对折屈角 θ 的一半进行预偏装或按设计热位移的一半进行预偏装。

2.6套筒补偿器

套筒补偿器常用于架空蒸汽管道上，也可用于直埋管道上。套筒补偿器是通过芯管和外套管的相对滑动，来吸收管道产生的轴向位移，其布置形式较为单一，如下图所示：

布置要点

⑴ 套筒补偿器在管线布置中应在其两侧设置导向支架，以保证芯管和外套管的同轴度；

⑵ 套筒补偿器两侧管道跨距应比正常跨距小，防止由于管道自身重量造成补偿器内外套偏向一侧。

⑶套筒补偿器相对其他补偿器来说，应用的偏少，由于易泄漏，宜用在参数要求不高的场合。

安装要点

⑴ 安装时应保持两端管道的同轴度。

经济对比分析

蒸汽管网设计过程中，考虑到部分地方在设置补偿器时，其选择有多种，在满足设计条件的情况下，往往就需考虑各种补偿器的价格，来决定最优的补偿方案，现对各种常用的补偿器及旋转井的价格对比如下：

类别	管径	技术参数	补偿量(偏转角度)	价格 (元/个)
旋转补偿器	DN300	PN25 T=350℃	旋转角±15°	2350
外压轴向型波纹补偿器	DN300	PN25 T=350℃	补偿量 350mm	6370
大拉杆波纹补偿器	DN300	PN25 T=350℃	补偿量 300mm	4800

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

单式万向铰链补偿器	DN300	PN25 T=350℃	角向补偿量:±7.5°	3330
球形补偿器	DN300	PN25 T=350℃	折屈角：±10°	4500
套筒补偿器	DN300	PN25 T=350℃	补偿量 250mm	2900
旋转井	/	/	/	30000～40000

注：① 旋转井的尺寸：长、宽和深度都按3–4米考虑；

② DN300长半径90度和45度弯头价格分别为：366元/个和219元/个。

在设计选型过程中，要结合补偿距离、现场情况等各种因素进行具体的对比分析，来得出最佳的补偿方案。

3. 结论

本文分类介绍了常用补偿器的产品特点及技术要求，另外简单说明了几种补偿器的适用场景，布置方式及优缺点。通过对实际工程的运用，阐述了常用补偿器在管网中敷设的运用方式。在实际工程中，遇到复杂、难以处理的节点，合理的选择合适的补偿器，有助于得到最经济、最具社会效益的补偿方案。

参考文献

[1] 王翰章, 王化云. 管道热应力及热补偿[J]. 林业科技情报, 2004(02):40−40.

[2] 武文华. 蒸汽管道热力补偿失效问题分析[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(004):62−63.

[3] 王莹. 工艺管道热补偿的研究[J]. 辽宁化工, 2010, 39(002):207−209.

[4] 曾凡星. 火力发电厂汽水管道冷热补偿与支吊架合理选配及调整探讨[J]. 机电信息, 2017(6).

[5] 郭平. 旋转补偿器在热力管道上的应用[J]. 煤气与热力, 2009, 29(005):13−16.

[6] 高重建. 蒸汽供热管道中波纹管补偿器的设计计算[J]. 煤气与热力, 2006, 026(005):61−65.

[7] 袁立方. 基于CAESAR Ⅱ的大拉杆横向型波纹补偿器在供热管道设计中的应用分析[J]. 轻工科技, 2013, 000(001):36−37.

[8] 孙华伟. 一种单式万向铰链补偿器:, CN208311769U[P]. 2019.

[9] 游庆和. 一种球形补偿器的试验装置:, CN210603879U[P]. 2020.

[10]邓曾禄. 套筒补偿器的结构与发展[J]. 压力容器, 2004(z1):71−75.

作者简介

陈宇琪，从事城镇供热管网设计，武汉德威工程技术有限公司，武汉市洪山区友谊大道999号，邮编430000，邮箱1542586340@qq.com，联系电话13184137689

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

供热机组热电解耦深度调峰技术分析

敖 磊
（武汉德威工程技术有限公司）

摘要：热电联产机组热电特性复杂、热电耦合强烈，严重限制了热电联产机组的运行区间。而随着我国风力、光伏等新能量发电的增多，急需提高现役火电机组深度调峰能力。本文针对供热机组受传统“以热定电”运行模式的限制，导致机组调峰能力低的问题，简单介绍并分析了供热机组热电解耦深度调峰的主要技术方案，并作出了总结。

关键词：供热机组　热电解耦　深度调峰

1. 引言

我国清洁和可再生能源，如水电、风电和太阳能装机容量和发电量已位居世界第一。随着新能源发电比重的增加，加之传统煤电产能过剩，尤其是冬季供暖期间，受火电装机容量大、调峰能力弱等因素限制，加剧了电网的调峰难度，导致我国有些地区弃风、弃光的矛盾比较凸显。这是伴随着我国能源结构调整变革的新问题，新现象。在我国政府明确“碳达峰碳中和”重大战略部署的大背景下，将“热电联产”机组进行“热电解耦”以达到深度调峰的要求是在新形势下的必然选择，即将热电机组进行适应性的深度调峰，给新能源机组创造电能消纳的条件。这对提高现役火电机组运行灵活性以及深度调峰能力提出了新的要求。

2. 热电解耦及其意义

热电解耦是对热电机组进行适应性的深度调峰，压低负荷运行，通过技术改造，将供热产生的电负荷就近消纳，或者通过电能替代、电制热锅炉将所发的电能直接转化为热能储存，在需要供热时通通过热电厂的管网送出。通过这种方式，将热电厂的热电产出解耦，在供热季将发电的空间腾挪出来，给新能源机组创造电能消纳的条件。

3. 热电解耦的主要技术方案

在火电机组深度调峰技术改造中，基于供热需求和机组运行、设备状况等各种不同的自身条件，选择出最优热电解耦改造的方案，确保机组能在供热期间既能实现电负荷25~30%稳定运行，又能满足供热负荷的需求。以下主要针对供热机组的改造路线进行简单的介绍并分析，并作出总结。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.1 机组旁路供热方案

汽轮机旁路分为高压旁路和低压旁路。机组旁路供热方案即通过对机组旁路系统进行供热改造，使机组正常运行时，部分或全部主再热蒸汽能够通过旁路系统对外供热，实现机组热电解耦，降低机组的发电负荷。单独的高压旁路和单独的低压旁路供热能力分别受到锅炉再热器冷却的限制和汽轮机轴向推力的限制，两者均无法单独实现热电解耦，达到深度调峰的目的。

因此一般采用高、低压旁路联合供热的方案，这也是当前热电解耦最常见的方案之一，主要利用部分过热蒸汽经高旁减温减压至高压缸排汽，经过再热器加热后经低旁减温减压后从低压旁路抽出作为供热抽汽的汽源。该方案主要通过匹配高、低旁路蒸汽的流量的方式避免高、中压缸轴向推力不平衡等风险，能够满足机组灵活性改造的目标要求，技术上可行，且投资较小，其改造方案一般如下图1所示：

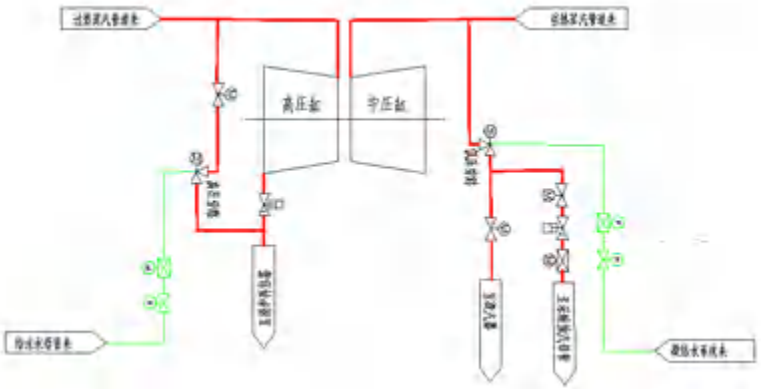


图1 高、低压旁路联合供热方案改造

该方案主要改造原高压旁路和低压旁路以使其满足供热抽汽需求。其改造的重点在于增设一套减温减压装置以及相应配套的管道仪表阀门等。供热抽汽取自低压旁路阀后电动截止阀之前的旁路管道。抽汽工况时利用高压旁路将部分主蒸汽旁路至高压缸排汽（高排逆止阀后），供热抽汽取自低压旁路后。为了便于采暖抽汽压力调整，低旁后抽汽扣至抽汽母管的适当位置增加截止阀、快关逆止阀和调节阀。

高低压旁路联合供热改造方案能够在持续低电负荷的情况下，机组维持一定的供热能力。当然由于高低旁路联合供热存在高品质热量低用的问题，其经济性较低，会造成严重的能源浪费。

3.2 低压缸零出力（切缸）运行方案

相比高低压旁路联合供热方案，低压切缸技术能够最大化有效利用低品质蒸汽供热。该技术的核心是仅保留少量冷却蒸汽进入低压缸，低压缸不做功或少做功，实现低压转子“零”出力运行，使更多的蒸汽进入供热系统，提高供热能力，降低电负荷。低压缸最小进气流量与机组背压有关。当排汽容积流量一定时，低压缸最小进气流量随背压的降低而减小。

低压缸切缸运行技术改造可分为抽真空系统改造及低压进汽管道改造两部分，其中抽真空系统改造只需在原有抽真空母管上新增一套罗茨真空泵，用于将机组背压将至3kPa。低压缸

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

进汽管道改造是为了更精确的对低压缸流量进行控制，同时保证低压缸进汽流量始终大于最小流量，避免由于鼓风摩擦带来的叶片振动等一系列问题。其中进汽管道改造方案一般如图2所示：

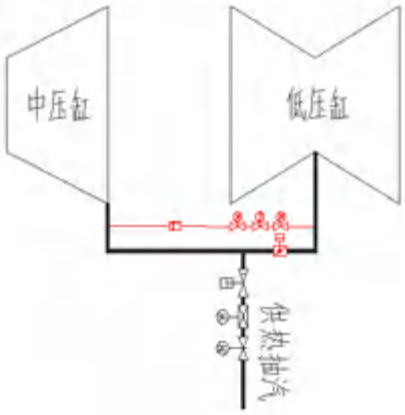


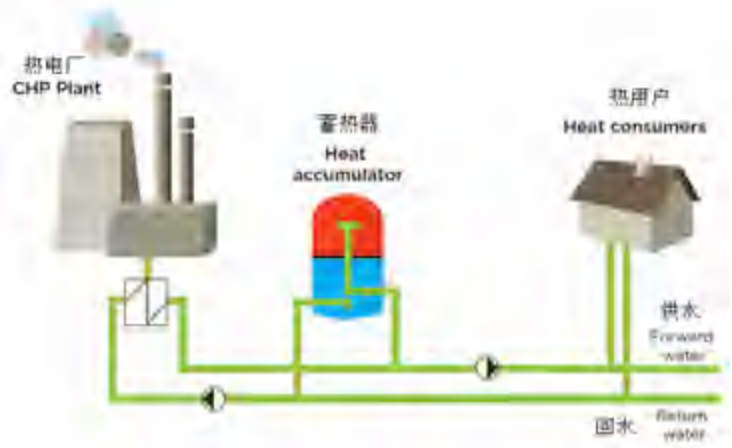
图2 低压缸切缸进汽管道改造

该方案主要是在原中低压缸连接管上增加一个可完全密封蝶阀，增加低压缸最小冷却蒸汽流量旁路，加装低压缸冷却喷水和低压缸的温度测点。重点在于核算低压末级叶片的安全性和可靠性。

低压切缸技术的有点在于：对汽轮机本体改造范围很小，通过蝶阀的开关实现低压缸“零出力”与“满出力”在线切换，在电网波谷阶段低压缸“零出力”实现机组深度调峰，在电网波峰阶段低压缸“满出力”运行，满足电网用电需求，不仅回收了余热，也实现了热电解耦。在相同电负荷的情况下，相较高低压旁路联合供热方案，其供热能力较差，在相同供热量的情况下，切除低压缸发电量损失较多，若无电网深度调峰补贴政策，也没有扩大供热负荷市场的电厂来说，不宜采用。

3.3 储热罐供热方案

储热罐可通过加装升压设备、阀门和管线等，选择合适的位置接入热网。当电网用电负荷高，而供热负荷较低时，将机组多供的热量存贮起来；当电力负荷较低时，储热装置可将存贮的热量释放出来来满足供热需求，从而降低机组发电负荷，达到热电解耦深度调峰的目的。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

采用储热罐方案，如在电网高峰时段机组能够利用抽汽的的余量充分蓄热，而在电网低谷时段机组调峰能力取决于锅炉最低稳燃负荷，另外值得注意的是如在电网高峰不能进行抽汽蓄热的机组，单纯的蓄热罐则无法实现深度调峰，需通过其他额外方式，才能实现机组热电解耦。

储热罐方案可以保证热网的安全运行，在热网出现异常待故障修复后，可以快速补充热量，如出现异常低温时，储热罐也可以提供短期的尖峰热源。同时也增加了热电厂和供热公司的供热调节手段，有利于机组保持在较高效率下运行，提高经济性。

3.4 电锅炉供热方案

配备储热装置的蓄热式电锅炉可直接建在热电厂内，通过安装必要的阀门、管道连接至热网。在热电联产运行时，电锅炉利用机组上网电能（不足时可利用电网谷电）加热蓄热介质，蓄热介质可根据电网，热网的需求决定即系存贮热量消纳调峰电能或者放出热量来补充供热缺口，从而实现热电负荷解耦。其传统的蓄热装置有热水罐，熔融盐蓄热罐等。

机组采用电锅炉改造后，电锅炉功率可以根据热网负荷的需求连续调整，调整响应快，运行比较灵活，电负荷甚至可以降为“0”，机组深度调峰能力很大。

4. 热电解耦主要技术方案总结分析

文中所提到的集中热电负荷解耦技术方案中，增设配套蓄热装置的电锅炉方案适用性是比较广泛的，其调峰幅度最大且灵活，不过期能量有效利用率较差；高低压旁路联合供热方案投资较少，但其供热能力受到锅炉再热器冷却，汽轮机轴向推力及高排冷却等因素的限制，且运行控制较为复杂，存在能源浪费的情况，不宜用在热负荷高的机组上；低压缸切缸方案运行方案投资少，有较好经济性，但灵活性较差，调峰能力有限，最重要的问题是低压缸末级叶片的安全性问题有待进一步论证；储热罐方案在投资、经济性和安全运行方面均较好，但其调峰能力较低，且储热罐占地面积较大。因此，在进行供热机组热电解耦改造时应根据机组自身特点，电网，热网的需求，成本及收益等方面进行综合考虑。

5. 结语

目前可再生能源正蓬勃发展，“碳达峰碳中和”伟大战略部署的提出，使得可再生能源并网接入市场的紧迫性日益加剧。在这一大形式下，可以预见政策面将会推出更多的经济信号激励电厂进行灵活性改造以增加电网可再生能源的消纳能力，这是一个广阔的市场，对于灵活性不够的燃煤供热机组既是挑战也是难得机遇。

参考文献

[1] 华志刚，周乃康，袁建丽，张起《燃煤供热机组灵活性提升技术路线研究》.2018年热电专委会学术交流会论文集2018.07 254-260

作者简介

敖磊，男，武汉德威工程技术有限公司，助理工程师，注册公用设备工程师，主要从事城镇供热管网设计
工作单位武汉德威工程技术有限公司，地址：武汉市武昌区友谊大道999号武钢办公大楼B座26层，
邮箱地址：aolei@dwen.com

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

关于深度调峰机组快速启动的分析研究

许建军　华曙光
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：现用电负荷的不均性，在用电负荷高峰时段，电网往往超负荷，此时需要快速投入正常运行以外的发电机组以满足需求，平衡电网的用电高峰，所以这些发电机组称调峰机组。深度调峰就是受电网负荷峰谷差影响较大而导致各发电厂降出力、发电机组超过基本调峰范围进行调峰的一种运行方式，深度调峰的负荷范围超过该电厂锅炉最低稳燃负荷（一般深度调峰的调峰深度为60%-70%BMCR）。

关键词：火力发电厂　汽轮机组　快速启动　邻机加热　环保

前言：

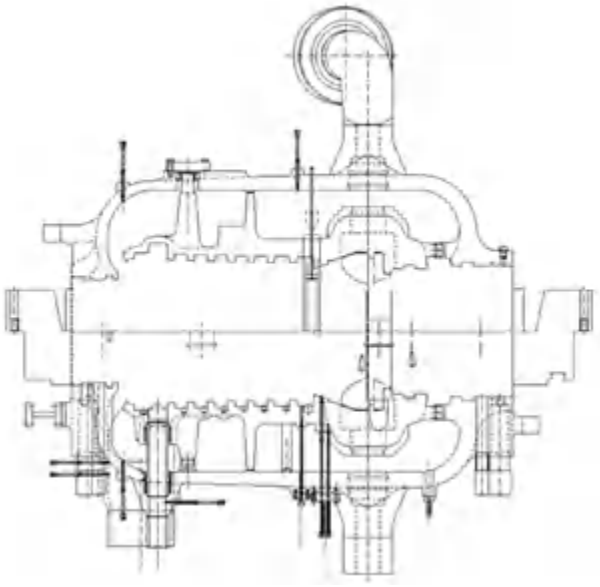
调峰机组要求具备快速启动与停止，并网时同步调整容易。一般调峰机组有燃气轮机机组和抽水蓄能机组等等，但目前亚临界、超临界火电机组也再作为调峰机组运行。对于调峰火电机组来讲，其能够调峰的能力取决于机组的最小负荷及最大负荷之比，而机组的调峰能力又取决于锅炉对于高低负荷的适应能力。从目前国产锅炉来讲，理论上可以从100%调到30%，也就是说，一台600MW机组，其发电量可以能够从600MW下降到180MW，其调峰能力是420MW，其调峰深度是70%。所以汽轮机组负荷高低适应性也是对机组快速启动和停机方式的考验。

1、CJK350/353-24.2/1.5/566/566型汽轮机结构介绍

CJK350/353-24.2/1.5/566/566型汽轮机，高压缸为双层缸结构，内缸外壁第4级处设置隔热环，将内、外缸夹层空间分为2个区域，设计有汽缸夹层加热系统。1级单列调节级和10级压力级与高压喷嘴组均装于高压内缸，内缸支承在外缸上，外缸通过前后猫爪搭在前后轴承箱体上。

滑销系统设置为：高、中压静止部分死点位于汽轮机纵向轴线与中低压轴承箱底部横向键中心线交点上，故机组高、中压静止部分运行时，以死点为中心向前膨胀。推力轴承装于高、中压缸之间的高中压轴承箱内，运行时，推力轴承带动整个轴系随高中压轴承箱向前移动，转子以推力轴承为相对死点向前、后膨胀。机组启动时，高压缸、中压缸、高中压轴承箱、前轴承箱向前膨胀，低压缸向前、后两个方向膨胀。

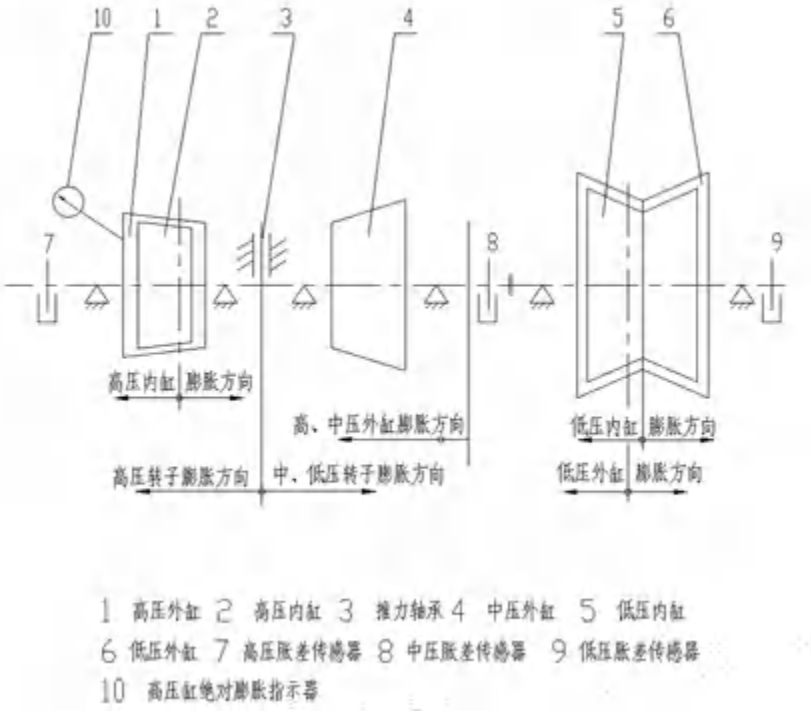
微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666



为了减小轴承箱滑动时的磨擦阻力而使汽缸顺利膨胀，在前轴承箱和高中压间轴承箱底部装有自润滑滑块，箱底滑块喷润滑膜，消除箱底与基架表面的干磨擦。

为了测量绝对膨胀和高压、中压、低压转子和汽缸的胀差，在高压转子前端（前轴承箱内）、中压转子后端（中低压间轴承箱内）和低压转子后端（低压后轴承箱内）装有胀差传感器，前轴承箱基架上装有热膨胀传感器，监测高压缸的绝对膨胀。

为了适应机组的快速启动，原设计高压缸为双层缸结构，内缸外壁第4级处设置隔热环，将内、外缸夹层空间分为2个区域，设有汽缸夹层加热系统。中压缸设计有正暖系统。



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.1汽轮机快速启停面临的问题

#2机组从2020年09月16日启机，到机组带300MW负荷,时间跨度长达三天。#1机组从2020年12月05日启机，到机组带300MW负荷，时间跨度长达两天。#1机组启动从2020年12月01日开始进行投轴封、投高压缸预暖，进行高压缸、中压缸暖缸，启动时间还是两天。造成一是高压内外缸夹层蒸汽温度提升速度太慢，机组启动阶段无法快速升温到350℃，以适应机组的快速启动特性。二是机组启动时间长会使锅炉烟气中氮氧化物排放超标，造成环境保护压力大。

2.2汽轮机快速启动解决方案

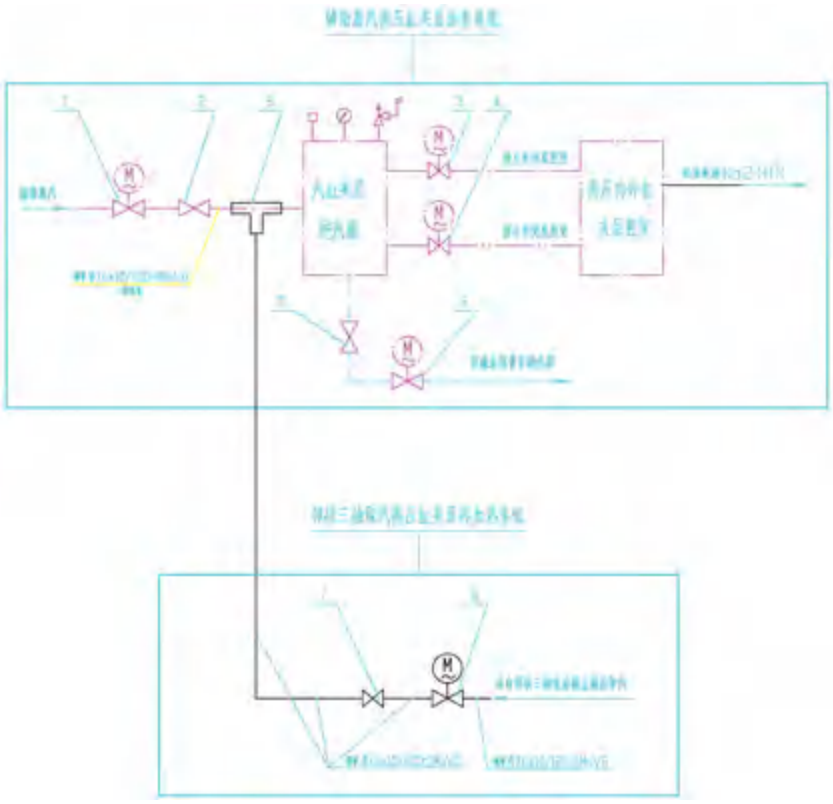
针对此种情况提出解决方案，在原“辅助蒸汽高压缸夹层加热系统”上增加“邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统”。从邻机三抽电动截止阀后取汽送入高压缸夹层加热联箱入口蒸汽管，进而提高高压缸夹层的温度。

现在“辅助蒸汽高压缸夹层加热系统”已安装配置运行，再需增加“邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统”。从邻机三抽电动截止阀后与三号高压外置加热器前取口，通过双机共用联通管道送入高压缸夹层加热联箱入口管道，邻机蒸汽进入夹层加热联箱入口管道前加装自动疏水器，及时疏出管道内积水。

3、邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统使用介绍

1）.此系统仅用于机组冲转前，此系统投入之前高压缸排汽逆止阀仍处于强关状态。

2）.在“辅助蒸汽高压缸夹层加热系统”投入使用使高压缸调节级后内缸内壁温度达到260℃后，为加快机组高压内、外缸尽快膨胀，可通过关闭件1和件2，打开件7、件8来使“邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统”投入工作，密切监视汽缸温升率不超过50℃/h，汽缸壁温差



微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

（尤其注意高压内缸内、外壁，高压内缸外壁与高压外缸内壁）不超过50℃。

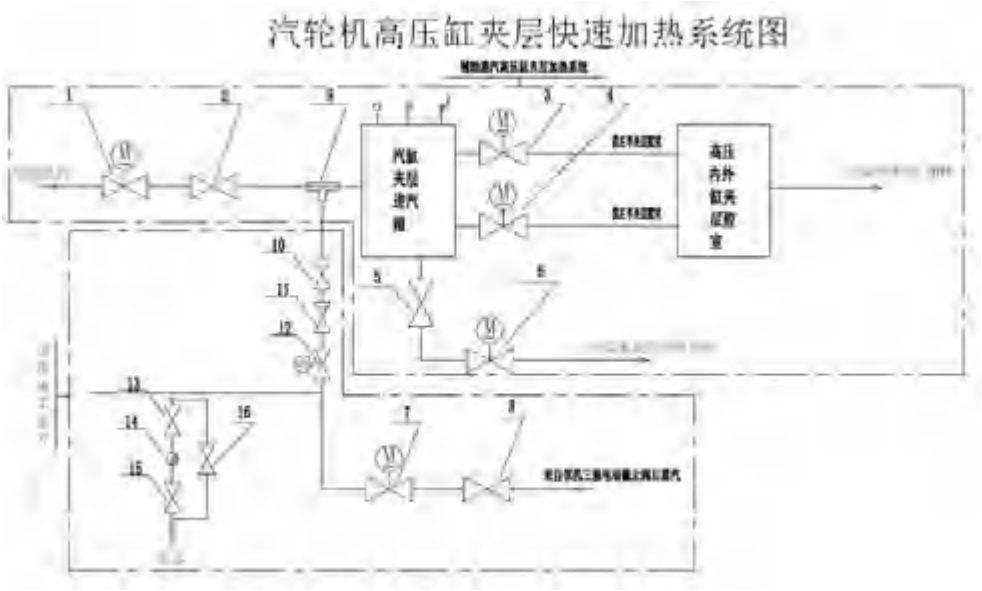
3）.“邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统”投入工作后使高压缸调节级后内缸壁温度达到330℃以上，汽缸金属温差正常、高压缸膨胀达到26mm以上且高压缸膨胀稳定后可进行机组启动，先后关闭件8、件7、件3和件4，切除本加热系统。

4）.邻机三抽取汽参数条件：温度430℃～450℃，压力范围1.0MPa～2.5Mpa。

4、项目实施效果

从邻机三抽电动截止阀后与三号高压外置加热器前取口，加装电动截止阀，手动截止阀。通过双机共用联通管道送入高压缸夹层加热联箱入口管道，增加电动截止阀、逆止阀、锻制等径三通。邻机蒸汽进入夹层加热联箱入口管道前加装自动疏水器，及时疏出管道内积水。

邻机三抽取汽高压缸夹层加热系统，安装完毕后需做10MPa水压试验。



结论

采用邻机供汽提前对汽轮机进行预暖后可缩短机组正常启动时间6小时，节余燃油约15吨左右，多发电量约480MWh。因此，每次机组启动节约油约10.5万元，多发电量约13万元。

目前，电网负荷需要机组频繁调备和深度调峰。适应机组的快速启动，减少氮氧化物排放，减少机组启动阶段的锅炉燃油消耗，认清现阶段发展形势，时刻关注电力行业发展方向，火电发电量下降，就意味着企业利润将会降低，积极寻求新的利润增长点势在必行。因此确保机组深调负荷下氮氧化物达标排放是环保达标的木桶短板，在机组快速启动、深度调峰的大背景下，必须从根本上改变营销思路。

作者简介

许建军，工程师，热能动力，内蒙古京能双欣发电有限公司，
地址：内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗蒙西镇蒙西高新技术工业园区，
邮编：016062，　邮箱：jnsxxujianjun163.com，　电话：17604739019

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

汽轮机排汽余热的回收利用

陈尚敏
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：减少汽轮机排汽损失和回收汽轮机的排汽余热是提高火力发电厂热效率的有效方法，在北方冬季供热期，若以汽轮机凝汽器循环水为热源进行供热，既能保障汽轮机的正常运行，回收蒸汽，降低卡诺循环冷端温度，提高效率，又解决了采暖供热问题，将大大节约成本和减少碳排放。

关键词：汽轮机　低真空　回收余热　供热

汽轮机在是发电厂发电的重要设备，运行稳定性直接关乎到发电效率和效益，是管理重点所在。汽轮机运行中循环效率大概是40%左右，有很多热量流失，是被排气损失循环水所带走，造成了资源的浪费。而在可持续发展背景下，节能降耗成为社会主流，为了可以实现汽轮机排气余热回收利用，可以调控汽轮机低真空运行。汽轮机循环效率大概是30%左右，机组低真空运行相较于正常运行效率较低，但是冷却排气同时加热热网循环水，可以直接供热，最大程度上降低汽轮机余热损失。所以，此种方式可以为热电厂带来更加可观的经济效益，有效回收汽轮机排气余热，减少资源损耗。

一、减少汽轮机排气损失的方式

火力发电厂日常生产中，汽轮机排气过程中会产生很多的热量，这些余热资源通过凝汽器循环水冷却处理后变成水，然后再次加热循环水，热量直接流失，造成资源损耗。结合目前火电厂生产现状来看，生产效率低，资源损耗大的主要原因是冷源损失。为了有效改善此类问题，多是通过以下几个方面着手改进。

（一）回热抽汽

汽轮机排气余热回收利用，一个有效方式则是回热抽汽，通过部分做功不完全的蒸汽实现汽轮机凝结水加热处理，并且加热除氧减少汽轮机排气量，提升电厂循环热效率同时，阿静冷源损失降到最低。

（二）可调整抽气式汽轮机

两级可调整抽气式汽轮机运行中，部分做功蒸汽抽出，以此充当自用蒸汽。或是将做功不

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

完成的低压段蒸汽抽出采暖抽汽，不仅可以将汽轮机排气损失降到最低，还可以有效提升火电厂生产效率和效益，改进工艺能耗大的问题。

（三）背压式汽轮机

实习工背压式汽轮机，加热外热用户热网回水，或是排气共计热用户，汽轮机排气凝结放热得到利用，为热用户提供采暖支持，减少资源损耗，提升火电厂整体生产经济效益。但是，汽轮机效率会有所下降，产生一系列连锁反应，尤其是供热温度的调整受到影响，无法实现远距离输送排汽功能。

从中可以看出，上述的几种措施主要是减少能耗，少部分回收汽轮机排气余热资源，如何实现汽轮机排气余热大规模回收利用，实行低真空运行模式是最佳方式。

二、汽轮机低真空运行的优势分析

汽轮机低真空运行模式下，结合实践经验来看，可以实现大规模的汽轮机排气余热回收利用。就低真空运行模式来看，冬季可以发挥热力网供热回水的资源优势，为汽轮机组提供冷却水源支持，汽轮机排气凝结冷却成水。加热热网回水，可以为热网供水提供支持，由于热力网供热回水温度要远远高于循环水温度，因此尽可能营造低真空，将热网回收充当循环水，通过此种方式实现汽轮机低真空运行。就低真空运行模式优势来看，表现在以下几点。

其一，厂用电用量减少。低真空运行模式，对于电厂而言可以有效减少电能损耗和运行成本，为电厂带来更大的经济效益。低真空模式运行下，通过热网循环水泵来支持热网循环水流经机组凝汽器，依据实际需要停止循环水泵运行，可以起到减少电能损耗的作用。在低真空模式运行下，排气余热可以被热用户使用，不需要将循环水输送到冷却水塔，循环水泵为其他机组运行提供备用泵支持，即便发生故障也可以保证汽轮机连续运行，减少水资源损耗。

其二，节能环保。低真空运行模式下，推行集中供热，设备整体容量大，可以减少采暖锅炉投入成本，后期维修和管理工作量随之减少，带来更大的经济效益。低真空模式下，集中供热减少能耗同时，还可以降低灰渣清除以及分散运输燃料的工作量，提升工作效率。同时，此种模式还可以将SO2排放量降到最低，有效改善城市卫生环境，潜移默化中提升人们的生活品质。

其三，改善凝汽器铜管锈蚀问题。凝汽器铜管污垢、锈蚀，是影响到排气余热资源回收利用的一个主要因素之一，凝汽器排气温度不断升高会导致铜管结垢。而热网循环水主要是选用软化水，是经过特定化学方法处理反应而来，硬度降低，可以显著改善水质，降低铜管污垢和锈蚀量。同时，基于胶球泵定期冲洗凝汽器，用软化水作为供热循环水补水，并且配备专门的储水箱和水处理装置，保证补水及时、连续。另外，为了降低整体能耗，变频控制补水泵，在降低能耗同时，维持热网回水压力保持恒定状态。

三、方案介绍

汽轮机在正常运行时，汽轮机循环效率约为40%，大量的热量以排汽形式损失被循环水带走。汽轮机在低真空运行时，汽轮机循环效率约为30%，更多的热量被凝汽器循环水带走。机组低真空运行比正常运行效率低，但低真空运行在冷却排汽的同时又加热了热网循环水，可以直接供热或作为热网循环水的初次加热，使汽轮机余热损失降低，因而，对热电厂热力循环供热来说是相对经济的。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

在凝汽式汽轮机中，蒸汽从锅炉获得的热量，一部分在汽轮机中做功转化为电能，其余大部分（约60%~70%)热量通过间冷塔散失。若对汽轮机实施低真空改造，将提高汽轮机排汽压力及排汽温度，从而提升循环水的温度，并达到居民采暖的温度要求，将原来损失冷源的排汽凝结热回收用于供暖。由于提高凝汽器排汽温度，会导致背压升高，降低了凝汽器的真空度，即所谓低真空循环水供热方案。在采暖期，采用低真空循环水供热工况运行时，需要间冷塔及循环水泵退出运行，将凝汽器的循环水系统切换至由热网循环泵、热水管网等组成的循环水回路，形成新的“排汽余热器，用户则变成了冷却塔，构成一完整的循环水路，机组的冷源损失降为零，循环热效率提高至90%以上。在非采暖期，机组恢复纯凝工况运行时，热网循环泵及热网加热器退出运行，原循环水泵及冷却塔恢复运行。

四、具体案例介绍

汽轮机低真空供热改造，尽管使汽轮机本身的运行经济性降低，但从整个电厂来看，却具有较大的经济效益。以某电厂15MW纯凝机组改造后来看，在一个采暖期内，2016年内蒙地区采暖费26. 7元/㎡,对外供热获得收益1335万元：由于汽轮机真空降低，使汽轮机电功率降低，影响了汽轮机的发电量，汽轮机低真空运行120天，影响发电负荷1200kW,电量损失235万元，换热站内循环水泵630kW,按一台全天80%负荷率运行，50%时间运行补水泵30kW,前10天50%负荷运行凝结水泵30KW,电动阀门等耗电约10kW,电价0. 68元/kW•h,电费86. 58 万元,低真空改造后机组的耗煤量增加2207. 33t,亏损119. 2万元，则汽轮机低真空供热的年净收益为893. 9万元。而14MW汽轮机低真空改造采暖项目总投资1608万元，因此，投资回收年限为1. 44年，基本实现了当年投资、当年回收的目标。

汽轮机低真空供热技术，实现了循环水余热的利用,采暖系统切换至汽轮机低真空模式下运行后，汽轮机系统运行稳定，采暖效果良好，供热区热用户反映良好，达到了预期的效果。低真空运行循环水供热还具有以下优势：

（1）通过汽轮机低真空循环水供热技术开发，回收了循环水余热，节约了高品位一次能源，实现资源、能源的梯次利用，提高能源综合利用率，并减少余热大量排放浪费；

（2）不对汽轮机本体及转子进行改造，仅对凝汽器及循环水系统改造即实现了低真空循环水供热，避免了汽缸及转子一次性改造后非采暖季经济性差的问题；

（3）采用一次热网直供用户模式，有效降低了热网循环水温度，对减少发电影响，提高机组的经济性大有帮助。若再配合二级混水换热装置及室外温度补偿，循环水温还有可能降低；

（4）不影响余热发电，进行循环水温度调节。余热回收发电不同于常规热电厂，难以实现锅炉实时负荷调整。当供热初期、末期热负荷相对较小时，本项目通过补水泵补充部分冷水来降低循环水温度，富余出的回水量通过旁路至间冷塔降温，实现供热温度调节；

（5）系统采用DCS自动控制。后气缸排汽温度、热网回水温度、系统压力全部自动进行调节，保证了系统运行的安全性，保障了供热效果。

五、汽轮机低真空供热模式的未来推广发展

汽轮机低真空供热模式应用实践中取得了丰富的经验，成果斐然，开始广泛应用热电企业中，此种方式较为节能环保，有效降低水资源损耗，以及SO2的总排放量，实现资源高水平

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

开发和利用。汽轮机低真空供热模式迎合当前时代发展需要，同现代化城市发展相关要求相契合，在电厂生产中应用可以降低能耗，改善环境污染问题，切实提升热电企业的生产效率和经济效益。结合实际情况来看，目前我国汽轮机低真空供热机组整体能耗问题愈加严峻，而此种模式多是应用在中小型汽轮机组，因此在大型汽轮机组中应用是否切实可行还有待进一步深化实践。

目前全球能源紧张问题愈加严峻，无论是发达国家还是发展中国家，都开始大力倡导节能降耗，发展技术来提升资源利用效率。我国作为一个发展中国家，经济发展的同时也造成了资源大量消耗和环境污染，因此为了满足国家现代化建设相关要求，应严格遵循国家相关政策和制度要求，逐步淘汰中小型汽轮机，汽轮机排球余热回收的工作中低真空模式也在逐步消失和淘汰。因此，还需要进一步探究如何高效回收大型汽轮机排气余热资源，寻求最佳的模式。

如果是300MW机组，应增加资金投入进行冬季低真空运行供暖改造，夏季实行宁其实运行模式，通过此种方式来实现资源最优化配置与利用。300MW机组凝汽器通水量大概是3万t/h，而我国很多热电厂的3个热网供水量是1.3万t/h左右。结合商业实践经验开始推行热电厂热力网和发电厂热点网并网，集中运行和管控。所以，需要做好相关准备工作，加热发电厂搬迁则需要增加热电厂的供热面积，热网供水量将翻倍增长，汽轮机排气余热资源总量也将进一步增加。尤其是当前很多城市现代化进程加快，供热面积增加也对新时期排气余热资源回收利用工作提出了更高的要求。如果300MW机组中至少一台机组采用低真空运行模式，那么汽轮机所产生的排气余热资源可以全部回收，创造更加可观的经济效益。

300MW机组规模较大，实行低真空运行模式时会遇到一系列问题，尤其是在排气温度升高和真空降低时，容易受到诸多客观因素影响。因此，如何进一步改造升级，实行低真空运行模式，一方面是对汽轮机组本体改造，兼顾高真空运行模式和低真空运行模式，但是此种模式改造成本费用较高，后期维护工作压力增加。另一方面，低温供热，将热网供水温度尽可能降低到一定标准，供热需求得到满足基础上，同时降低热网回水温度不超过50℃。这样热网循环水温度、回水温度之间差距最小化，仅仅改造循环水系统，维护汽轮机组安全稳定运行，创造更大的经济效益。

另外，需要考虑的是，厂用电同样是能耗关键环节，厂用电率控制在0.05～0.075范围内，电厂的节能水平较为可观，但是厂用电率超过了0.088，那么说明电厂的能耗属于较高水平，这样会增加整体运行成本，所产生的经济效益随之下降。但从另一个角度来看，此种情况下社会效益较为可观，可以减少水资源用量以及排放余热量。电厂的汽轮机组整体的用电负荷增加，排气余热回收所产生的经济效益同步增长。因此，热电厂在机组改造，实现排气余热资源高效回收利用同时，也要注重厂用电率控制在合理范围内，以此来创造更大的经济效益和社会效益。

六、结论

汽轮机低真空循环水供暖技术充分利用了汽轮机的排汽余热，可以实现能源的梯级利用，增加了热电厂的供热能力，明显提高电厂能源的综合利用效率，具有显著的节能和环保效益，能积极响应国家提出的节能减排方针。汽轮机低真空运行循环水供热改造简单，机组运行稳定，但在改造前必须对机组进行安全校核，并且汽轮机低真空运行循环水供热与集中供热锅炉

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

房相比，投资少、见效快，并节约城市用地、减少大气污染、减轻运输负担，具有显著的社会效益。该技术为提高我国量大面广的中小型热电企业的综合利用效率和水平开辟了新途径，具有良好的推广应用价值和发展前景。

作者简介

陈尚敏，助理工程师，任职于内蒙古京能双欣发电有限公司，现从事集控运行专业，单位地址：内蒙古鄂尔多斯市蒙西镇蒙西工业园区，邮箱jnsxchenshangmin@163.com，电话：17604739164。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

火电厂烟气余热利用系统的应用

韩飞[1] 张国良[2] 郭伟[3] 付彪[4] 张泽林[5] 祝福川[6]
(内蒙古京能双欣发电有限公司 内蒙古鄂尔多斯市 016000)

摘要：锅炉排烟热损失一直是火力发电厂影响锅炉热效率的重要因素，在火电厂经济环保运行的今天，有效地降低锅炉排烟热损失是提高锅炉运行效率的可观手段。而在锅炉烟道尾部设计增加低温省煤器，增加烟气换热面积，可以对锅炉排烟温度进行再次利用，该部分烟气余热的利用可以有效提高锅炉整体的热效率，同时降低排烟温度，对机组的节能减排起到显著效果。文章主要针对350MW超临界循环流化床锅炉烟气余热利用系统的应用进行说明。

关键词：火力发电厂 锅炉热效率 烟气余热利用 热损失 排烟温度

0.前言

在当今全球范围内，能源的供需矛盾日益突出，环境污染已经威胁人类的生存，倡导环境、能源、经济的可持续发展成为当前迫在眉睫的战略问题，世界各国都日益重视可再生能源和余热的开发与利用。

热力发电厂是以朗肯循环为基础进行热功转换获得电能的，根据热量法的分析，发电厂的主要热量损失是由于汽轮机冷源损失和锅炉烟气的排热损失而引起的。对于大型机组而言，排烟热损失是锅炉各项热损失中最大的一项，电站锅炉的排烟温度通常为120～150℃，相应的热损失相当于燃料热量的5%～12%。近几年来，由于能源紧张，随着节能工作的进一步开展，各种新型节能先进锅炉日趋完善，虽然采用先进的燃烧装置强化了燃烧，降低了不完全燃烧量，但经过燃烧优化来降低排烟温度的幅度非常有限，省煤器和空气预热器的改造因受到空间的限制，降低排烟温度的幅度也很小，同时尾部受热面的低温腐蚀也限制了排烟温度的大幅降低。因此，为了进一步提高锅炉的热效率，达到节能降耗的目的，独立于原有锅炉系统之外的烟气余热利用系统成为节能降耗一项重要的途径。

1.烟气余热利用系统设备结构介绍

烟气余热利用系统（低温省煤器）换热形式为烟气–水换热器，包括金属换热器、氟塑料换热器、板壳式换热器、循环水泵、补水泵、增压泵及相关附件。金属换热器、氟塑料换热器布置于引风机出口与吸收塔入口之间的水平烟道上，金属换热器从上至下分为5组独立的换热模块，模块形式为肋片式管道，模块间用密封扁钢进行密封，顶端设置上壳体进行密封。每组

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

模块均配有独立的进出口小集箱，进出口连接管上均装有手动隔离阀，以便在某个模块发生故障时单独隔离，从而不影响整个烟气余热利用系统的运行。氟塑料换热器从左至右分为5组独立的换热模块，换热形式为氟塑料光管，每组模块的进出口连接管上也装有手动隔离阀，模块顶端用聚四氟乙烯板隔离密封。

烟气余热利用系统中金属换热器换热管、肋片的材质全部采用耐受低温酸露腐蚀的ND钢（09CrCuSb）、非金属换热管采用氟塑料。

为了防止烟道内部积灰，在金属换热器出口烟道上下布置固定式蒸汽吹灰器，左右各三台，能够满足在锅炉最低稳燃负荷30%THA和100%BMCR工况下可靠、稳定运行。

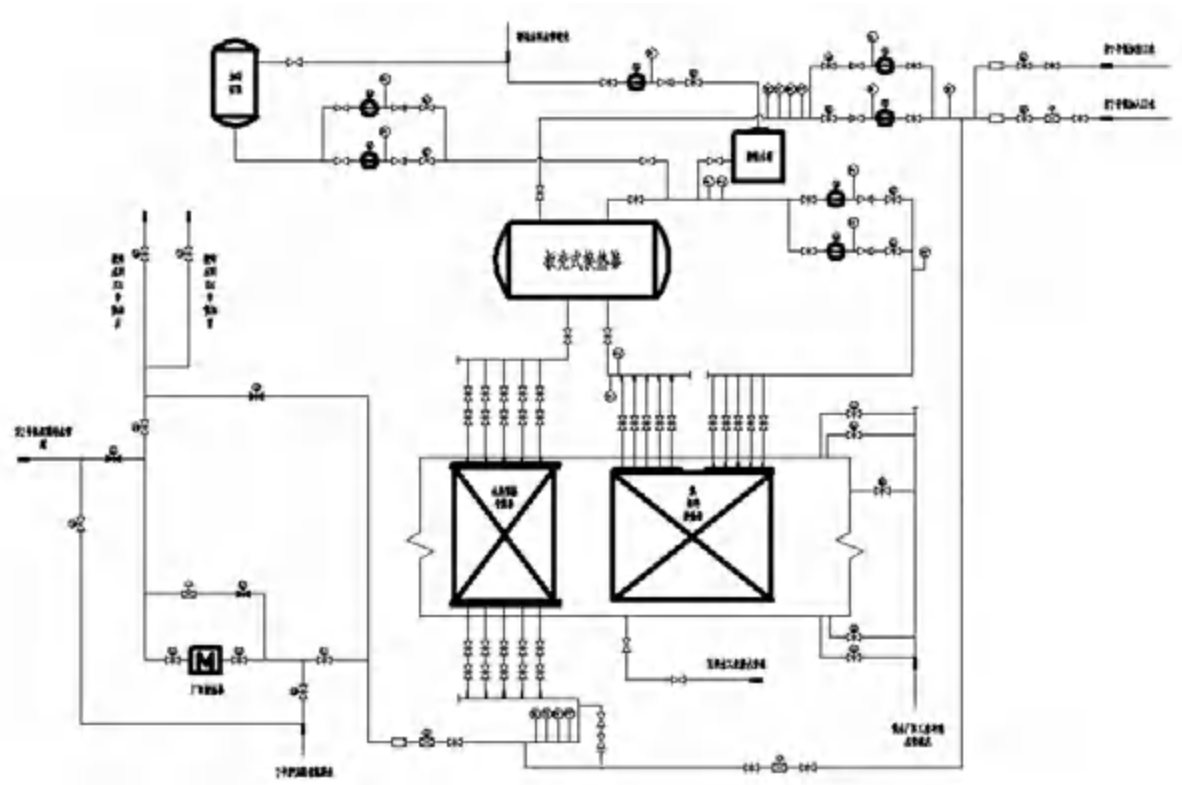
2.烟气余热利用系统原理及运行流程

2.1 烟气余热利用系统原理

烟气余热利用系统是通过烟气余热来加热低加回热系统的凝结水，将锅炉的排烟温度降低至合适值。烟气余热通过回热系统的凝结水回收热量来排挤下一级低加的汽轮机抽汽，使抽汽回到汽轮机继续做功，增大汽机的做功功率，从而降低机组发电标煤耗。而在采暖时期，还可将回收的热量用于加热热网水，节能效果更显著。

2.2烟气余热利用系统运行流程

烟气余热利用系统运行介质为汽轮机凝结水，在7号低加进出口混合而成的65℃凝结水通过布置在锅炉房0米的升压泵，将凝结水输送至金属换热器系统内进行换热，同时金属换热器布置有再循环管道，便于凝结水流量调节及管道冲洗。



系统流程图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

氟塑料换热器运行介质为除盐水，化学来的除盐水经加药装置调整水质后，通过布置于引风机房0米的循环水泵，将介质输送至氟塑料换热器系统进行水循环。同时在电除尘屋顶布置氟塑料换热器膨胀水箱，运行过程中随时对氟塑料换热系统进行补水。

凝结水在烟道内最先进行换热，加热后的凝结水在非采暖季回水至6号低加入口或出口，在采暖季，加热厂区换热器后回至热力系统。

烟气余热利用系统能保证每台机组满负荷至最低稳燃负荷之间运行时，烟气换热装置满足烟气的温降要求，机组各负荷运行时，调节锅炉烟气换热器装置的凝结水量控制其出入口温升，系统调节可靠、灵活。同时，在机组正常运行时，烟气余热利用系统停止运行、水系统排空的状态下，锅炉烟气换热装置能满足在锅炉满负荷运行状态下长期干烧，并保证设备本体不变形、不腐蚀、运行可靠。

3.烟气余热利用系统分析

3.1烟气酸露点分析计算

序号	燃料特性	单位	设计煤种（不考虑炉内脱硫）
1	收到基水分	%	6.5
2	空干基水分	%	3.23
3	干燥无灰基挥发分	%	35.91
4	收到基灰分	%	45.2
5	收到基碳	%	36.61
6	收到基氢	%	2.26
7	收到基氧	%	6.72
8	收到基氮	%	0.65
9	收到基硫	%	2.06
10	收到基低位发热量	kJ/kg	13800
11	烟气酸露点	℃	110.5
12	水露点	℃	41.5

3.2 FGC1 热力计算（BMCR 工况，环境温度20℃，其他工况作为校核）

序号	名称	单位	数值	备注
1	入口烟气温度	℃	165.75	

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2	出口烟气温度	℃	120	
3	烟气份额	%	100	
4	入口水温	℃	87.7	
5	出口水温	℃	147.7	
6	水流量	t/h	298.70	4台设备
7	传热量	MW	21.11	4台设备
8	设备数量	台	4.00	
9	换热面积	m2	32504	4台设备
10	烟气流速	m/s	9.31	
11	烟气阻力	Pa	480	

3.3 板式换热器热力计算（BMCR工况，环境温度20℃，其他工况作为校核）

序号	名称	单位	数值	备注
1	热网水入口水温	℃	50	环境温度-20℃设计
2	热网水出口水温	℃	70	
3	热网水流量	t/h	193.57	
4	换热量	MW	4.5	
5	热水入口水温	℃	116	
6	热水出口水温	℃	55	
7	热水流量	t/h	63.15	
8	换热面积	m2	97	

3.4经济性计算：锅炉侧影响（BMCR）

序号	名称	单位	数值				
1	环境温度	℃	-20	-10	10	20℃	35
2	风机出口温度	℃	-5	5	25	35	50
3	原排烟温度	℃	97	104	118	125	142

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

4	现排烟温度	℃	80	80	80	80	88
5	降至现排烟温度烟气放热量	MW	8.44	10.99	17.36	22.17	23.4
6	FGC1 吸热量	MW	5.49	8.69	15.11	21.11	22.72
7	净进入锅炉热量	MW	2.95	2.30	2.25	1.06	0.68
8	锅炉效率相对变化	%	0.32	0.25	0.25	0.12	0.00
9	降低供电煤耗	g/kwh	1.08	0.84	0.82	0.39	0.25

3.5 汽机热耗影响（FGC1排挤低加抽气，BMCR）

序号	名称	单位	数值				
1	环境温度	℃	-20	-10	10	20℃	35
2	凝结水吸热量	MW	5.49	8.69	15.11	21.11	22.72
3	水流量	kg/s	46.81	59.10	73.04	82.97	89.32
4	出口水温度	℃	116	123	137	147.7	147.7
5	排挤 6 号抽汽量	kg/s	1.68	2.12	2.63	2.98	3.21
6	排挤 5 号抽汽量	kg/s	0.78	1.70	3.87	5.99	6.45
7	排挤 6 号抽汽多做功	MW	0.58	0.73	0.90	1.02	1.10
8	排挤 5 号抽汽多做功	MW	0.42	0.92	2.09	3.23	3.48
9	总多做功	MW	1.00	1.64	2.98	4.25	4.57
10	降低供电煤耗	g/kwh	0.49	0.99	2.35	3.33	3.58

3.6 厂区供暖热耗影响（采暖季FGC1供热，BMCR）

序号	名称	单位	数值	
1	厂用供热热量	MW	4.5	4
2	汽机 5 抽蒸汽温度	℃	240.8	240.8
3	汽机 5 抽蒸汽压力	MPa	0.508	0.508
4	节省供热抽汽	kg/s	1.96	1.74
5	少抽汽多做功	MW	1.06	0.94
6	降低供电煤耗率	g/kWh	0.83	0.74

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

3.7 经济性计算（BMCR，环境温度对整体经济性影响）

序号	名称	单位					
			1	2	3	4	5
1	环境温度	℃	-20	-10	10	20	35
2	风机出口温度	℃	-5	5	25	35	50
3	最终排烟温度	℃	80	80	80	80	88
4	FGC1 吸热量	MW	5.49	8.69	15.11	21.11	22.72
5	FGC2 吸热量	MW	19.69	19.69	19.69	19.69	15.77
6	替代蒸汽暖风器降低供电煤耗率	g/kWh	2.86	2.15	0.72	0.00	0.00
7	汽机侧降低供电煤耗率	g/kWh	0.49	0.99	2.35	3.33	3.58
8	净进入锅炉热量	MW	2.95	2.30	2.25	1.06	0.68
9	提高锅炉效率	%	0.32	0.25	0.25	0.12	0.07
10	锅炉侧降低供电煤耗率	g/kWh	1.08	0.84	0.82	0.39	0.25
11	厂区供热降低供电煤耗	g/kWh	0.83	0.74	0.00	0.00	0.00
12	系统电耗增加供电煤耗率	g/kWh	0.34	0.37	0.4	0.41	0.43
13	系统净降低供电煤耗率）	g/kWh	4.92	4.35	3.49	3.31	3.4

3.8 节水收益（脱硫塔入口烟气温度降低节水量）

序号	名称	单位	数值
1	原脱硫塔入口烟气温度	℃	125
2	现脱硫塔入口烟气温度	℃	80
3	烟气放热量	MW	22.07
4	节水量	t/h	33.09
5	年运行小时数	h	5000
6	全年节水量	万 t	16.54

3.9 烟气余热利用系统经济性随温度变化，主要体现在：

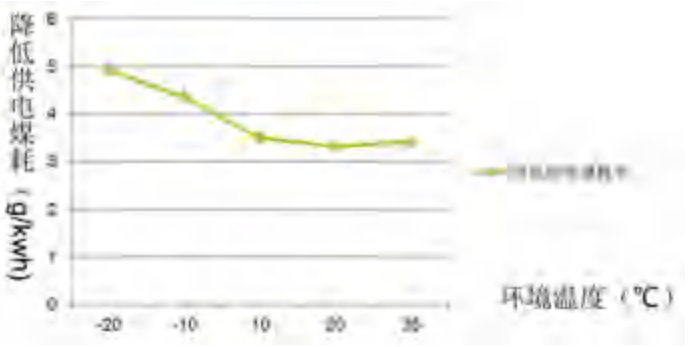
3.9.1 夏季排烟温度升高，高温级烟气换热器FGC1多吸收热量，排挤更多的汽机抽汽，降低供电煤耗率较多。随着环境温度下降，排烟温度也降低，高温级烟气换热器FGC1少吸收热量，降低供电煤耗率较少。当环境进一步降低，需要投入蒸汽暖风器，则低温级烟气换热器FGC2起到替代蒸汽暖风器的作用，相当于排挤5级抽汽，经济性大大增加，降低供电煤耗率也

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

更多。

3.9.2 排烟温度随环境温度增加而增加，更多热量进入汽机，排挤更多的汽机回热抽汽，降低汽机热耗率更多，但同时锅炉净利用烟气余热利用量也减少，锅炉效率增加。

3.9.3 烟气余热系统耗电对供电煤耗率影响变化不大。



3.10 烟气余热利用系统经济性分析总结（BMCR，环境温度20℃）：

3.10.1 虽然锅炉排烟温度由 165℃降到 80 ℃ ，但是FGC1、FGC2吸收的热量并没有全部进入锅炉，最终净进入锅炉热量为1.06MW，故锅炉效率提高0.12%。

3.10.2 热量进入汽机回热系统达21.11MW，并排挤了低加抽汽，降低供电煤耗率达 3.33g/kWh。

3.10.3 综合锅炉、汽机影响，系统总降低发电煤耗率 3.72g/kWh。考虑烟气阻力、空气阻力、水侧阻力（0.41g/kWh），系统净降低发电煤耗率 3.31g/kWh。

3.10.4 脱硫塔入口烟气温度降为80℃，降低脱硫水耗16.54万t/年。

结论

烟气余热利用系统（低温省煤器）布置在引风机出口与脱硫塔入口之间的烟道上，利用烟气余热冬季加热厂内采暖热网水（一台机供给采暖热网水，另外一台机低温省煤器热量供给回热系统），其它季节加热主机凝结水方案，使其发挥了脱硫吸收塔深度节水和充分利用烟气余热的作用，将烟气温度由~115℃降低至90℃左右，对烟气余热进行充分回收，并减少了脱硫系统减温水的补水量，具有一定的节水效果。

由7号低加进口和7号低加出口各抽一路凝结水掺混，通过调节阀控制分支流量，从而控制掺混后的凝结水温度为65℃左右，然后由凝结水升压泵打入低温省煤器换热，吸收烟气余热后的凝结水再引回至6号低加入口或者6号低加出口，这种方式不仅解决了凝结水引出点温度低，造成低温省煤器腐蚀问题，同时余热利用系统氟塑料换热器采用氟塑料换热材料，避免了换热器低温腐蚀、积灰等问题，而且最大限度的利用了烟气余热，回收充分，热经济性好。

目前，国家对于燃煤机组节能减排标准不断提高，应用合理先进的技术手段是必不可少的，烟气余热利用系统的应用，在响应国家及地方政府节能降耗的号召的同时，也可以切实提高锅炉热效率，降低排烟热损失，提高机组利用率，在资源回收再利用上起重要地位。

参考文献

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

[1]内蒙古京能双欣发电有限公司 内蒙古京能双欣2×350MW低热值煤发电工程烟气余热利用系统换热器技术规范书，2017。

[2] 中国电力工程顾问集团西北电力设计院，内蒙古京能双欣2×350MW低热值煤发电工程烟气余热利用专题报告，2016

作者简介

韩飞，1979年9 月，汉族，内蒙古化德人，大学本科，工程师，内蒙古京能双欣发电有限公司设备（工程）管理部锅炉主任，主要从事火电厂技术管理工作，电话：17604739066，E-mail：jnsxhanfei@163.com。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

火力发电厂低碳运行的经济性研究

李亮亮
（内蒙古京能双欣发电有限公司）

摘要：“碳达峰、碳中和”稳居两会能源领域的“C位”话题。今年的政府工作报告，不仅将扎实做好碳达峰、碳中和各项工作列入2021年重点任务，更要求各行各业制定好2030年前碳排放达峰行动方案，进而加快实现“十四五”规划中推动绿色低碳发展的既定目标。提高火力发电厂的低碳运行水平，通过调整机组运行，采用先进的流化床锅炉技术，节能降耗，可以提高火电厂的效益，成为了现在火力发电厂的低碳运行的经济性措施之一。

关键词：火力发电厂　低碳运行　经济性运行

一、火力发电厂低碳运行的研究背景和意义

经济的快速发展带来了环境污染严重的问题，碳排放量的增多致使温室效应加剧，我国越来越重视解决碳排放问题，电力工业的发展是能源发展的核心，因此，我们要加快电力结构的能源优化，为发电厂的低碳运行创造条件。

1.1研究背景

我国正处于经济转型的重要时期，这其中电力系统的的污染排放是我国环境污染的主要因素，促进低碳电力能源可持续发展是提高我国能源利用率，促进整个经济可持续发展的重要环节。这其中，电力能源循环利用是促进低碳发展的重要方式，为了减少温室气体的排放，必须优化整个电力系统结构，开发譬如风电、新能源、核电等先进的发电技术，但是由于我国还没有建立起完善的经济发展可持续发展政策，这导致电力行业的可持续发展得不到相关政策的支持，发电厂的低碳运行模式无法与当前经济效益和环境保护达到平衡状态，我国以煤炭燃烧为能源的发电模式短期内无法改变，造成环境污染，严重影响了我国经济的发展，危害了人民群众的身体健康。

1.2研究意义

全社会运行过程中，低碳运行的背景，要求火力发电厂进行的低碳运行是非常必须的，所以火力发电厂在电力电能生产的过程中，能够积极的促使发电厂改造升级，且需要不断的提高能源利用效率的提升，保证电力电能的清洁生产，以此适应社会经济发展的要求，这就促使火力发电厂能够积极的向系能源进行使用，加快自身改革，优化产业结构，以此有效的减少低碳

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

运行的污染物的排放。

二、发电厂低碳运行的几点建议

2.1制定合理的电力能源发展计划

以我国经济社会发展和电力能源分布情况为主要依据，优化电我国的电力能源结构，以此满足现阶段我国经济发展和能源发展的要求，最终实现我国电力资源经济性可持续性的发展，而解决电力资源问题的核心在于解决以煤炭燃烧为主要发电动力的旧发电模式，推进煤炭绿色开发，达到提高资源利用率的目的。

2.2 节能降耗

建立以指标为中心、以标准为依据、以计量为手段的节能监督体系，监测、分析影响发电设备经济运行的重要参数、性能和指标，在全厂耗能设备及系统的设计、安装、调试、运行、检修、技术改造等各个环节开展设备优化、系统优化、运行优化、指标优化，使全厂的煤、电、油、汽、水等消耗指标都达到最佳水平。

落实生产指标责任制，实行以“定量为主，定性为辅”的考核手段，按部门职责将指标分类、分解，厂部分解到部门，部门分解到班组，班组分解到个人；年分解到月，月分解到天；做到人人有指标,个个担责任。

持续开展对标管理，通过与设计值、厂内机组间、本机组历史最优值、同区域机组、行业内机组比对，正确认识与先进水平的差距，明确节能工作的重点方向和存在的潜力。

充分发挥“节能合理化建议”活动的作用，激发员工的潜能，多为企业节能降耗献计献策，从而使企业和员工双赢。

2.3 持续以新技术优化设备和系统

在创新节能监督管理和优化运行方式的同时，大力应用新技术、新方法、新工艺、新材料来优化设备和系统是节能降耗技术支撑的关键所在。

为提高汽机在低负荷运行的经济性， 汽轮机制造厂均推荐采用定—滑—定运行方式， 并提供了相应的滑压曲线，但对于各机组其喷嘴组的结构、配汽机构阀门重叠度、控制系统及蒸汽参数等均有差异，因此必须根据本机组特性对制造厂推荐的滑压曲线进行优化，尽量减少调门的节流损失，寻找机组低负荷滑压合理的阀位点， 以指导运行人员进一步提高机组的运行经济性指标。

燃煤电厂存在较多和较大问题的大多来自锅炉，由于锅炉设计煤种和实际燃用煤质偏差较大，给锅炉的安全稳定、经济运行、环保排放带来了一系列问题，主要表现在：制粉系统出力不足，锅炉出力受限；锅炉燃烧稳定性差，助燃油量增加；蒸汽参数达不到设计值，减温水量增加；锅炉结渣加剧，严重时掉渣灭火；积灰加剧，受热面磨损、腐蚀、超温和爆管等加剧；灰分增加，输灰不畅；硫分增加，污染物排放量增加，脱硫耗电率居高不下等。要缓解以上问题，首先进行的就是开展掺配煤工作。

2.4 加强技术培训提升员工综合素质

首先，火力发电厂企业可以根据内部实际情况，制定工作操作流程并要求操作人员认真学习，做到规范操作；其次，定期举行员工技术培训或专家讲座，将行业内最先进的技术向员工传达，一方面开阔其视野与提升其技术水平，另一方面利于促进其业余时间的自我学习。将企

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

业培训与自我学习有效结合，以进一步保障企业技术的不断提升，满足节能减排与清洁生产的技术要求。

三、结束语

目前全球在倡导低碳经济、低碳生活的新形势下，世界各国都加强了节能减排、能源结构优化的力度， 但在今后的几十年中能源结构仍将以燃煤火力发电为主导地位， 燃煤火电厂节能减排是一项任重道远并且刻不容缓的工作，要以科技进步作为节能工作的关键技术支撑，同时全面、全员、全过程的节能管理和节能监督是节能工作的最重要保障。

参考文献

[1] 王双童. 低碳经济形势下提升燃煤发电企业节能降耗对策.

[2] 张天贺. 火力发电厂低碳运行的经济性研究与分析.

作者简介

李亮亮，助理工程师，任职于内蒙古京能双欣发电有限公司，现从事集控运行专业，单位地址：内蒙古鄂尔多斯市蒙西镇蒙西工业园区，油箱：jnsxliliangliang@163.com，电话：17604739115。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

面向大型蒸汽管网的智慧供热技术体系研究及应用

解世涛
（京能十堰热电有限公司）

摘要：大型蒸汽供热管网是以蒸汽为供热介质的管道网络，热源通过供热管网将蒸汽输送到各个工业或居民用户，以满足工业生产工艺用蒸汽和居民采暖的需求。在大型蒸汽供热管网实际运行中，由于各热力站距离远、覆盖地域范围大等方面的影响，常规的运行管理模式很难保障管网的安全稳定经济运行。本文重点围绕终端数据采集与传输、热力站站端智能控制、远程智慧监控平台和客户友好用能服务四个层面展开技术研究，进而构建完善的智慧供热整体解决方案，并在湖北十堰市集中供热系统进行示范化应用。

关键词：蒸汽管网　智慧　供热

1 背景介绍

十堰市为传统的非采暖区，是我国唯一大面积采暖的南方城市。从1984内开始，至今已经有33年集中供热历史，由于多年的生活习惯，采暖、生活热水已经成为市民生活的必须和依赖。

十堰市现有供热用户441家，供热监控站460组。供热介质采用蒸汽，热源采用京能十堰热电厂2×350MW机组供热，出口段蒸汽量为900t/h，参数为1.3MPa/300℃，2019-2020年采暖期现有在线热用户434家，采暖面积共计约1200万平方米。未来5年（2020-2025年）规划新增采暖面积为349.3万平方米，冬季采暖最大热负荷为866.5t/h（实际用热量，未统计供热管网网损）。

十堰市现状管网由原阳森电厂管网、原东风电厂管网和京能十堰热电有限公司新建管网组成。总体上分为5条管线，分别为1#A线、1#B线、2#线、3#线和4#线。

1#A线（DN900）从电厂出来后，向南敷设约1900米至发展大道与王湾路交叉口后，管网进入发展大道综合管廊，之后沿发展大道综合管廊向东敷设约1550米，在此分出主分支4#线，1#A主管线（DN900）沿大岭路敷设至张湾河，后沿张湾河南侧向东敷设至张湾河与百二河交叉处，转弯沿百二河西侧向南邮电街，后分出一分支与原阳森电厂DN500老管线对接，主管线

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

DN900继续沿百二河西侧向南敷设至东岳路后，分出三个接驳点，一个与原原阳森电厂DN500老管线对接，一个与原阳森电厂DN500新管线对接，另外一个与原东风电厂3#线柳林支线接驳，1#A主管线管径变成DN600继续沿百二河西侧继续向南敷设至中岳路再次与原阳森电厂DN500新、老管线对接。2019~2020采暖季，1#A线主要承担原阳森电厂所有用户及原东风电厂3#柳林支线所有用户。

1#B线（DN600）自电厂出来后与1#A线并行敷设至张湾河，与原东风电厂1#对接，并与1#A联通，中间设置分割阀。2019~2020采暖季，1#B线主要负责原东风电厂1#线大部分用户以及原东风电厂3#小部分用户。

新建2#线（DND900）自电厂出来后，向北敷设至阳光大道，转弯沿阳光大道北侧向西敷设至兴业路路口，之后沿兴业路东侧向南敷设至发展大道路口，分出一分支沿发展大道向东敷设于1#A连接，形成4#调峰联通线，2#主管由DN900变径成DN800继续向南敷设至车城西路，后沿张湾河南侧向西南方向敷设至东风热电小灰楼与原东风电厂2#对接。2019~2020采暖季，2#线主要承担原东风电厂2#用户及原东风电厂3#小部分用户。

3#线（DN500）为双星轮胎供热专线。自电厂出来后与2#线并行敷设至兴业路与风神路交叉口，之后沿风神路北侧向西南方向敷设至建设大道，转弯后沿建设大道西侧向北敷设至阳光大道路口，转弯沿阳光大道敷设至双星轮胎厂，沿途分一分支给锂诺电池，管线总长约9公里。

4#线（DN800）起点为1#A线在发展大道（国瑞蓝湖郡小区）分出，继续向东敷设至清潭路与发展大道交叉口，之后沿清潭路敷设至中国信合地标处，进入国道G209，后沿国道G209向南敷设至北京北路与东环路交叉口，后延东环路敷设至天麟时代为止。

面对如此庞大复杂的供热系统，供热企业需平衡好供热安全、可靠、环保、舒适、经济等

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

目标矛盾因素，给供热调度运行提出了重大挑战，亟待采取现代化、科学化、智能化的方式在系统工程侧面提升供热系统的生产技术水平。

根据2019-2020年供暖季十堰热网“一张网”实际运行情况，现有管网问题较多，存在管道冗余、保温破损、管道泡水、管道瓶颈等问题，导致整体热损在20%以上，且部分管道压降较大，蒸汽到达很多末端用户后无法满足正常参数需求，无法供热；如果继续如此，势必会影响到十堰地区未来五年供热事业的正常发展。当前，十堰东风公司进行“三供一业”改制，东风家属区供热管理将全部划归京能十堰公司管理，如何为用户提供经济、舒适的供热环境，如何保证供热企业在现有热源基础上提供更多的供热面积，如何更好地安全运行，这三个问题促使我们要对原来的供热情况做出改变。

2 国内研究概况

城市智慧供热系统建设，国内研究、探索较多。中国城镇供热协会组织编写《中国供热蓝皮书2019——城镇智慧供热》，介绍了中国城镇智慧供热的发展理念、技术指南和经验分享等内容，并分享部分北方智慧热网研究案例。

哈工大方修睦教授阐述智慧供热的技术架构，分析智慧供热的信息物理系统、智慧供热的层次，对实施智慧供热提出建议。天津能源投资集团朱咏梅主任讨论智慧热网的生产管理，提出供热管理目标分成自动化（源、站）和信息化（运维管理）阶段，全面耦合联动阶段和智慧供热阶段，从智慧供热的设备管理、调度管理、运行管理及运行安全四个方面，分析各方面的关键内容，以及相应的处置方式。中国市政工程华北设计研究总院有限公司王淮总工程师，就智慧供热的系统规划，从供给侧和需求侧分析重点关注内容，提出规划依循的方针和原则。介绍多种热源侧设备设施，分析相对应的主要技术特点和优点，为规划设计提供参考。太原热力集团张建伟介绍搭建太原太古热源智慧网平台主要框架及其功能，介绍通过一级高温水网自控，实现全网平衡，达到长距离输送效果。

在城市智慧热网建设中，高温水供热研究分析较多，并有部分实施案例，对于城市蒸汽供暖智慧化管理的，缺少相应的研究分析，尤其是对于城市一级供热范围，缺乏实际实施案例。

3 研究内容与技术关键点：

3.1研究内容：通过研究大型蒸汽管网供热系的终端数据采集与传输、热力站终端智能控制，远程智慧监控平台和客户友好用能服务四个方面，拟实现城市智慧供热完善解决方案，并在十堰市集中供热系统进行示范化应用。

3.1.1研究大型蒸汽管网供热系统计量系统整体解决方案，实现区域能量耦合监测，参数可靠有效，并对后续基于“用户综合需求”的源网联动调整奠定数据基础。

3.1.2 研究山区大型蒸汽管网及大规模用户用能数据采集解决方案，实现关键参数的采集连续稳定可靠，为后续用户侧智慧化调整奠定数据基础。

3.1.3 研究大型蒸汽管网供热系统智能控制方案（蒸汽供热运行参数调节延迟较大），进行电动调节阀与相应测点布置优化设计，实现全网热力平衡。

3.1.4 研究换热站与热用户温压控制运行优化技术，实现供热小区二次网水力平衡。

3.1.5 研究大数据下热源、换热站、热用户的联动调整方式，实现“按需供热”。

3.1.6 研究基于GIS平台的智慧热网监测体系，实现全域设备、人员、热用户动态在线展

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

示。

3.1.7 研究基于B/S架构的用能系统组态监测、热力特性动态仿真平台监测，实现整个管网系统热力动态监测与评估。

3.1.8 将研究成果应用于湖北十堰智慧供热系统中，同时，规划建设客服系统、收费系统及视频监控系统，最终形成完善的智慧供热整体解决方案。

3.2技术关键点：

3.2.1 国内首个850T/h蒸汽供热系统智慧化管理技术；

十堰市为传统的非采暖区，是国内唯一大面积采暖的南方城市，采用的是蒸汽供暖的方式。当前国内大型的蒸汽供热系统大多采用人工调节为主的运行方式，运行管理模式不能适应大型热网节能运行的需求，并且不能保证供热安全性，出现事故隐患时操作人员难以及时发现，易造成供热设备、供热系统事故。同时大型集中供热蒸汽热网管线，由于各热力站距离远，线路覆盖地域范围大，输送过程中对热量损失、热力平衡调节、动态节能运行等有很高的要求，人工调节、传统的质调节模式很难达到节能运行的要求，导致城市供热系统效能低、能耗巨大、安全性差。十堰热电是国内首个供气能力达到900T/h的热电厂，通过建立热网运行调节的实时运行参数传输平台、智能分析平台、远程监控平台、热源采集数据系统平台等底层数据兼容的智慧供热整体解决方案，实现基于自动控制、自动节能调节运行的智慧供热技术方案，是城市大型蒸汽热网技术升级、节能运行、提高效益的方向。最终目标是实现城市大型蒸汽热网的“均衡输送、按需供热”。

3.2.2 长达15千米的蒸汽供热首末端高压差平衡自动调节技术。

十堰市地处秦岭山区，地势高低不平，落差达到百米，供热首末端的压差控制是本项目的一大难点，调整不当会造成部分地区供热不足和供热整体失衡。本项目拟在主要支线增加计量及调节设备，实现热网层架的监测与管控，克服高压差的困扰，通过供热数据的分析，优化和调整供热参数，将蒸汽供热距离延长到15千米，同时建立蒸汽供热首末端高压差平衡自动调节技术。

3.2.3 231千米蒸汽供热管网自平衡节能降耗技术。

京能十堰热电现有蒸汽供热管线约231千米，本项目通过控制支线电调阀调整一级网热力平衡，换热站以用户侧回水温度调整控制热用户温度，配合变频调控家属区水力平衡，实现住户温度可控，达到二网水力平衡的效果，实现全网平衡运行。通过全网平衡运行，降低能耗，提升蒸汽供热半径，延长提升蒸汽供热最长距离，在供热量一定的前提下，进一步加大供热面积，提升经济效益。

3.2.4 GIS实时动态展示技术。

本系统采用先进的GIS实时动态展示技术，实现全网热力工况实时在线监测，基于GIS地图热网管理信息系统，实现快速定位及查阅；监视系统中哪个点出现报警直接显示和定位，并出具分析结果，供运行人员判断。

3.2.5 蒸汽供热智能分析技术。

智能分析系统是基于数据挖掘技术对各个机组进行设备故障诊断、能耗诊断、优化控制进行全方位的分析。热力工作人员只要在监控中心点击一个按键，就将整个热网各站设备故障情

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

况、能耗情况，以及运行情况清晰的了解；故障分析是对热力站内设备进行故障诊断，并给出导致此运行异常及故障的原因，及解决办法；能耗诊断是对热力站耗热量、耗水量和耗电量进行分析，不单单是给出能耗高低的结果，同时给出导致结果的原因，以及下一步节能的方法；优化控制是对所有机组分析离线机组、就地控制机组、超标机组和未达标机组，可以及时了解管网目前状态进行针对性的解决。

4 研究方案和技术路线如下：

按照智慧供热的需求，开展三个层级的研究工作：

（1）热网智能感层整体解决方案研究：现场安装的各种自控设备、计量设备、温控设备等，这些设备可以将现场的数据进行采集，为智慧供热的大数据分析提供数据来源及控制依据。

（2）数据传输层整体解决方案研究：通过现代化的网络技术（包括3G、4G甚至即将运行的5G；ADSL；NB-IoT；LORA；专用光纤网络等）将现场自控设备的数据信息上传到智慧供热平台。

（3）智慧应用层整体解决方案研究：通过现代化的大数据分析算法、人工智能技术，对庞大的实时数据、历史数据进行大数据分析，根据实时数据形成故障诊断、根据历史数据形成能耗预测，形成供热专家系统。

在理论研究的同时，启动湖北十堰集中供热系统智慧供热平台建设（分层成果研究完成，立即进行成果转化），主要包括如下工作：

（1）建立智慧热网基础平台。

架构由数据库服务器、应用服务器、WEB服务器、三维工作站、显示器、A3打印机、UPS电源、硬件防火墙、隔离网闸等硬件设备，数据库软件、管理软件等系统软件基础平台，采用模块化的成熟软件包在服务器及数据库平台上完成整个系统的搭建、应用开发、客户化实施工作。建立大屏集控站，选址地点建议在综合楼一楼综合会议室位置，通过3×4拼接大屏，展示热网运行状态。

（2）把京东热网、十堰杨森热网的数据分批逐步接入新平台。

保留用户原有一次计量设备，更换智能监视仪表、远程数据采集控制一体化的远程监控箱，通过远程监控箱采集热网实时运行参数，与系统服务中心通过4G无线传输热网信息，实现热用户运行远程监控。

十堰市热网管线长，蒸汽供热运行参数调节延迟强，建议用户侧阀门不做变动，仍采用手动阀门调节，主要支线及管网关键节点处阀门更换为电动调节阀，通过远程调控实现管网热力平衡。同时主要支线及管网关键节点处增加温度、压力、流量等运行参数检测，用于供热管理分析。

（3）逐步推进预付费改造、智能巡检、热网用户管理、管损分析、供热调度控制系统、客服管理等功能。

（4）建立热网热力平衡模型，为今后热网供热、扩建等提供静态和动态热力计算。

（5）用户侧控制建设。需要对于楼栋层级规划建设楼栋智能平衡系统和通断时间面积法系统建设。通过楼栋进水阀门调整控制温度、流量。在典型热用户层级，规划安装典型用户室

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

温采集装置，为智慧热网的以满足预定室内采暖温度为总体目标、以室内采暖热舒适度的建筑热耗为控制计算目标、分时段供水温度等为控制参数的热力站优化控制策略。

5 结束语

近年来，在我国城市集中供热领域，自动控制技术、远程调节技术、各种平衡调节技术、无人值守换热站以及计量技术等都得到了迅速的发展，集中供热调度中心也在各市、县级城市相继地建设起来，这些技术被众多供热企业认可并得以实施。从2015 年开始，随着“互联网+”、“人工智能”与“云计算和大数据”时代的到来，集中供热迈向“智慧供热”的新要求已成为行业关注的焦点。

“智慧供热”是以供热管网数据采集为中心，结合计算机网络技术、自动化控制技术、物联网技术、地理信息技术、云平台服务技术为基础，将供热源、供热一次管网、二次换热站、供热二次管网、热用户等参数集中管理，实现智慧化的控制方式、二次换热站无人值守、可视化的处理结果及辅助决策建议，以更加精细化、形象化、动态化的方式管理、生产和服务。将管网地理信息系统、数据采集及通讯系统、巡检系统、风险预控系统、客服系统、移动终端等进行互联互通，消除系统间数据孤岛的运行方式，对数据进行对比、分析、共享，从而达到智慧供热、节能降耗、安全供热，提高供热系统管理和服务水平。

参考文献

[1] 韩钊，袁建娟，孙春华，齐承英等，基于信息化的智慧热网系统应用分析[J].区域供热，2018

[2] 王海，王海英，周海珠. 多热源环状管网的面向对象水力计算方法[J].浙江大学学报（工学版），2012，10.

[3] 蔡志军，王天鹏. 集中供热系统的热网自动化控制[J].区域供热，2017（3.

[4] 李沛峰, 杨勇平, 戈志华, 等. 300MW 热电联产供热系统分析与能耗计算[J].中国电机工程学报, 2012,23:2.

[5] 高长亚 . 集中供热分户计量温控一体化实施方法研究与应用[D]. 山东大学，2016.

作者简介

解世涛 工程师 从事电厂工作20年 现工作于京能十堰热电有限公司

单位地址：湖北省十堰市张湾区京能十堰热电有限公司 邮编：442000

Email 地址：xshtao159@163.com 联系电话：0719-7103833

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

旁路供热技术参与机组灵活性调峰分析

杨添皓　刘琼伟
（京能十堰热电有限公司）

摘要：随着新能源在电网中的占比越来越大，火电厂参与调峰运行的次数及运行小时数越来越多，为了提高火电机组运营效率，各区域电网公司鼓励各火电发电企业特别是供热企业参与到调峰市场中，在保证电网安全稳定运行的前提下，争取取得低负荷调峰收益。各点发电企业目前均在对各自所在电网区域运营政策，展开针对性的灵活性改造，目前主流改造包含高背压、储能、低压缸切除和高低旁改造等主要手段，本文针对华中电网特点，就某电厂高低压旁路改造进行分析及论证。

关键词：发电企业　灵活性改造　供热改造　电网　深度调峰

〇、引言

为了提高火电机组运营效率，各发电企业针对电网政策变化，积极参与到辅助调峰市场服务中，在保证电网安全稳定运行的前提下，争取取得低负荷调峰收益。目前主流改造包含高背压、储能、低压缸切除和高低旁改造等主要手段，本文针对华中电网政策对高低压旁路供热技术在安全性和经济性进行分析论证，争取给同类型机组提供借鉴及参考建议。

一、 概述

1.1电网政策解读：

结合调峰辅助服务市场运行规则（试行），根据湖北电网机组实际情况，火电机组基本调峰标准为其额定容量的50%。机组参与深度调峰成交的售出电量根据成交结果获得经济补偿，不影响机组年度计划电量。深度调峰服务费用由市场内深度调峰交易时段运行的火电厂、水电厂、风电厂、光伏电站共同分摊1。

1.2电热市场运行情况

从目前湖北省机组装机情况来看，目前水电占比约45%、火电占比约40%、新能源等占比约15%，但由于三峡发电量80%以上外送他省，所以湖北省水电资源“靠天吃饭”的特点依旧显著，呈现典型的季节性短、集中在7-9月份等特点，年初、年中、年末，不同时段电力资源性质完全不一样，年初年末湖北省处于枯水期，发电主要依靠火电，年中主要看来水情况，水

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

多了火电给水电让路，水少了火电成主力机组2，对我省火力电厂提出了较大考验。特别在冬季期间，十堰电负荷与热负荷均存在供应需求，二者互相矛盾，在保证电负荷的情况下，无法保证供热需求，在满足热负荷需求的情况下，又无法满足电负荷调度。

1.3机组灵活性改造情况

湖北省能源局下发了关于报送煤电改造计划的通知，要求各有关电力企业制定煤电节能改造、超低排放改造以及灵活性改造计划其中灵活性改造计划将作为新能源年度规模配置参考依据。

结合以上几点，火力发电厂进行灵活性改造是必然之路，某厂结合自身特点，选择进行高低压旁路供热改造，从而满足机组灵活性改造要求，适应电网运营市场规则，争取深度调峰补贴。

二、 供热系统及高、低旁系统改造介绍

2.1供热系统介绍

（1）供热系统介绍：

某厂采用东方电气集团东方汽轮机有限公司生产的350MW超临界抽凝式汽轮机，汽轮机抽汽提供低压工业供汽汽源，汽源自中压缸第五级抽汽口抽出，采用旋转隔板来调节控制汽轮机的供热抽汽压力和流量，管道上装设逆止阀、快速关断阀、调节阀，再热热段作为备用供热汽源，提供补充汽源。

旋转隔板具有类似于调节阀门的全开全关、限位调节功能。当旋转隔板处于全开状态时，机组相当于常规同容量的纯凝机组；当旋转隔板处于全关状态时，亦保证有最小的容积流量，确保机组低压缸满足最小的冷却流量，以保证机组运行的安全性。通过调节旋转隔板的开度以控制隔板前压力来满足抽汽要求。

2.2高、低旁系统改造介绍

2.2.1机组旁路供热系统

高旁设计容量为锅炉最大连续蒸发量的35%,低旁容量满足机锅联合启动曲线各工况下高旁入口流量加减温水流量所对应的低旁容量。高压旁路管道:高旁阀前设计温度579℃，设计压力：25.4MPa。高旁阀后设计温度377.5℃，设计压力：6.73MPa。低压旁路阀前及暖管管道设计压力为6.73MPa,设计温度为577℃。低旁阀后管道设计压力为1.6MPa,设计温度为200℃。

2.2.2旁路供热改造方案

1、旁路供热目前主要技术特点有；

（1）可以进一步提升机组供热能力；

（2）保证供热机组深度调峰下的供热可靠性；

（3）实现停机不停炉供热。

2、目前针对旁路供热系统主要理念有以下几点：

（1）再热蒸汽供热方案，即将再热热段蒸汽用于供热。该方案能够一定程度提高机组低负荷时供热抽汽能力。但受末级叶片强度和汽轮机压比的限制，能从再热蒸汽抽取的最大抽汽流量约为再热蒸汽流量的10%~15%。3。

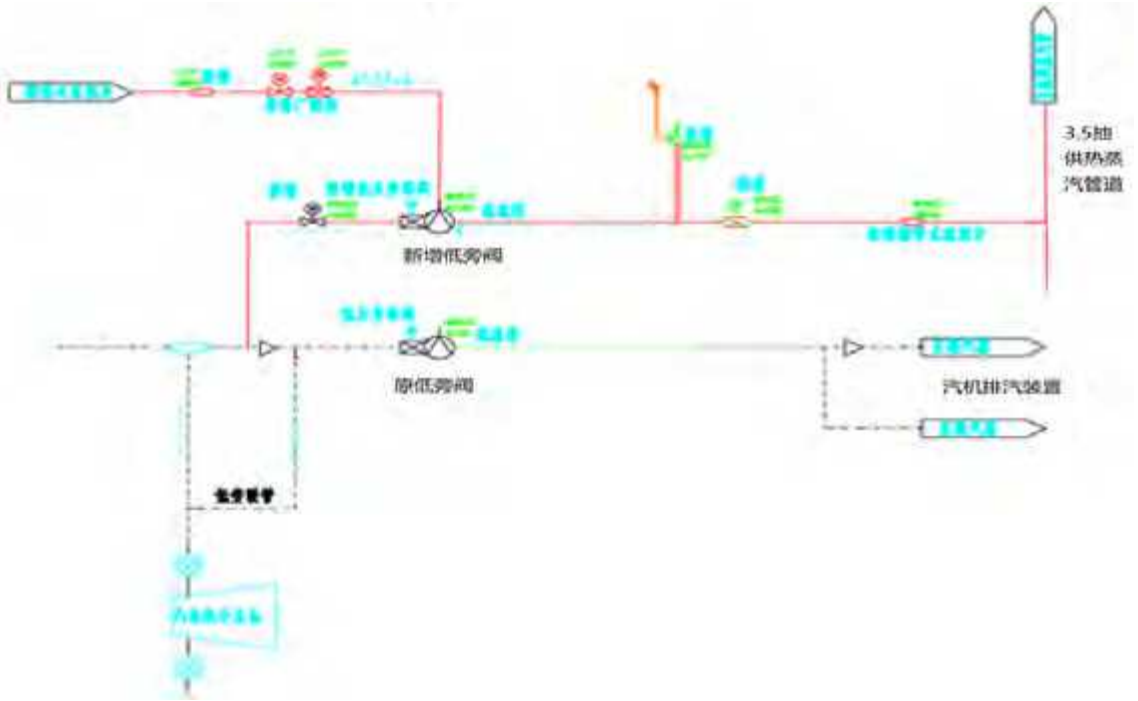
（2）主蒸汽供热方案，即直接从主蒸汽管道用于供热。当从主蒸汽管道的抽汽流量较大

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

时，会引起锅炉侧过热器和再热器热量分配变化，再热器吸热量显著减小，存在再热器超温的风险。一般而言，在保证锅炉再热器不超温的前提下，主蒸汽抽汽流量约为额定主蒸汽流量的5%，同时主蒸汽供热参数较高对设备工艺要求较为显著。

（3）汽轮机高低旁路联合供热方案，即经高旁将部分主蒸汽旁路至高压缸排汽，之后从低旁后抽汽作为供热抽汽的补充汽源。该方案可以采用适当匹配高低旁路蒸汽流量的方式避免前述方案存在的风险和问题，能够满足机组灵活性改造的目的4。

结合某厂实际需求目前可通过汽轮机高低旁路联合供热方案实现机组灵活性改造，在提高一定供热能力的前提下保证电负荷具备一定的调峰能力。供热旁路系统图见图一，配套安装相应隔离门、安全门。改造后高低压供热旁路供热系统与原供热管道连接后对外供热。



图一：低压供热旁路系统图

三、 高低压旁路联合供热系统的关键性问题

3.1汽机安全运行问题

结合目前已进行旁路改造机组运行情况，目前旁路改造技术针对汽轮机的安全运行问题，主要在叶片安全性、机组轴向推力、排汽温度及管阀缺陷等方面。

3.1.1高中压缸末级叶片安全性、机组轴向推力和高压缸排汽温度的影响

针对汽轮机本体安全性，要结合供热改造边界条件要求汽轮机厂或者具备核算资质单位重新核对，要求对汽轮机进行详细的热力计算，制定供热工况图，明确最小负荷曲线和功率限制曲线，重新计算热平衡图明确汽轮机各级压比，作为机组运行主要技术参数参考指标。针对轴向推力问题可以根据主机厂提出的调节级压力与高压缸排汽压力和中压缸进汽压力的关系，通过运行参数调整控制高压旁路和低压供热旁路阀门开度，来保证汽轮机轴向推力。

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

在灵活性要求的调峰范围及负荷变化率的工况下，金属温度变化率大而快，汽轮机阀门、汽缸、转子、叶片等通流部件将承受很大的热应力，将对通流部件寿命产生严重损耗。因此须对这些部件的强度进行优化设计和寿命评估，优化机组原启动曲线，注意合理分配各负荷段升温范围，控制温升率。采用旁路供热时优先调整机组负荷，待负荷稳定后，逐步调整低压供热旁路抽汽流量，高压旁路主要作为控制轴系参数及排汽压力的操作手段，操作过程中始终满足低压旁路前流量等于高旁流量加上减温水流量的总和。

3.1.2中联门与高排压力协调控制情况

针对中联门是否参与调节问题要与主机厂进行确认，结合旁路改造后高压缸排汽压力核算中压联合汽阀是否参与调节，若参与调节需厂家核算目前阀门结构及流量特性曲线是否满足调节需求，若不具备条件则需进行升级改造，同时提供新的调节流量特性曲线。结合已改造机组运行情况，若中联门参与调节，要尽量避免阀门在低开度下持续运行，减小阀门节流损失同时避免中联门出现异常振动情况。某厂于主机厂确认，中调门受汽轮机进汽量影响，旁路供热时中调门不参与调节。

3.1.3运行中管道及阀门振动问题

考虑新增抽汽管道可能产生的支撑、膨胀、振动及超速等方面的问题，通过对已改造机组运行观察，供热旁路系统在流量大的情况下现场运行噪音较大，给运行人员及维护人员造成噪音问题，在设计初期要考虑管道是否加装消音涂层，降低厂房内噪音。

对已改造机组出现热控测量表计因高频振动导致的仪表失灵及漏汽情况，所以在旁路改早前期，要充分考虑管道流速及测点安装位置，同时施工作业时要严格按照标准进行金属检测工作。

3.1.4主要辅机安全性

因旁路改造后，为保证供热能力，锅炉运行出力较大，汽轮机出力缺较小，这就要求主要辅机出力要匹配锅炉运行工况，主要辅机长时间在高负荷期间运行，这对辅机安全运行提出较大考验，特别是采用汽泵驱动的给水泵要充分考虑深度调峰下汽轮机抽汽是否能满足给水泵出力要求。同时要重新核算各减温水系统调节能力，因深度调峰期间凝结水泵、给水泵出力较高，各减温水系统减温水压力较大，要避免各减温水系统调节阀在较小开度下运行，造成阀门在短时间冲刷损坏，出现内漏情况，从而降低降温水系统调节性能同时也增加日常检修及维护工作量。

3.2锅炉安全运行问题

再热器超温情况，从目前运行工况看，机组冷再抽汽供热时，需考虑再热器超温限制，采用高低旁联合供热对再热器超温无明显影响，针对旁路改造热平衡图已与锅炉厂进行确认，就主要工况下再热冷段温度和再热热段温度进行核算，确保改造后各参数可以满足运行需求。

通过对已改造机组的调研分析，要加强锅炉防磨防爆检测力度，特别是各联箱分配器接管座要进行定期检查，结合机组深调工况，对温度变化较大的受热面进行重点检查，防止出现管道裂纹、蠕变等主要安全隐患。

3.3自动控制问题

目前针对供热系统自动控制问题主要纠结于改造后系统自动投入及结合自动控制中对于高

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

旁调节阀和低旁调节阀的控制逻辑，要进行充分论证，并利用调试机会，要求专业调试人员对系统进行整体调试。确保各控制系统跟踪及反馈运行正常。主流的控制思路目前有两种一是通过供热旁路压力进行控制，另一种是针对流量进行协调控制。各厂需针对各自实际运行情况选择适合自身的控制逻辑。

3.5 设备选型、安装问题

由于旁路系统改造主要针对管道及阀门进行改造，所以总体而言改造费用较小，但系统内运行参数较高，参数变化范围较大，在设备安全稳定运行可靠性上要求较高，所以在对设备选型和安装时要严格执行标准及技术协议要求，防止出现因管网阀门流量系数选择不合理或质量不过关、管网设计、阀门选型过程中考虑不周全等情况造成机组在运行中出现管道泄漏、阀门卡涩、严重时导致汽轮机超速、停机等安全隐患，针对已改造机组运行情况分析，供热高、低压旁路阀在调试过程中容易存在卡涩、阀位波动的问题。该问题是影响高低旁路供热调节品质和安全运行的关键因素之一。所以针对供热高、低压旁路阀要更深层次的严格筛选设备形式及安装工艺。

在抽汽管道上设置快关门、逆止门、安全阀等，以防止甩负荷时供热管道返汽造成超速。抽汽管道上的阀门应尽量靠近汽轮机，以减少抽汽口至快关门间的存汽容量。旁路阀门要进行抗冲刷改造和调节特性改造，要求改造后阀门具备快关快开能力。

确保疏水良好，防止造成汽轮机进水或冷蒸汽。机组灵活性改造后可能长期处于低负荷工况下运行，需对疏水阀的开启逻辑进行优化。

四、 结论

4.1经济性分析

改造后若某厂参与深度调峰，在保证机组安全运行的前提下分别对机组中压旋转隔板供热和旁路供热进行测算，通过热平衡图利用反平衡公式计算，当采取中压旋转隔板供热时机组负荷227.482MW，机组热耗6410KJ/kw.h。采取旁路供热时机组负荷可降至102MW，机组热耗7235KJ/kw.h.满足深度调峰需求，基本满足供热季供热需求。按照锅炉设计效率94.50%、管道效率99%计算。使用中压旋转隔板供热发电标煤耗约为234.08g/(kw.h)，使用高低压旁路供热发电标煤耗约为264.20g/(kw.h)。改造后煤耗增加约30g左右，按照30%THA工况下进行深度调峰时，则参与深调时每小时增加发电煤耗量约为3.36t。

按照理论估算，1Gj能量对应278kw.h，若电价为0.4元/kw.h ，则对应1GJ热价需要112元/GJ，若热价为20元/GJ，则需要补贴电价大约为0.33元/kw.h。以上仅为理论估算值，若考虑高品质蒸汽增加的耗煤量及改造成本，电价补贴达到0.4元/kw.h的话，理论上可以达到一定的调峰收益。

按照湖北电力调峰服务细则，机组深度调峰服务费= ∑（第 j 档深度调峰电量 × 第 j 档报价），某厂参与深度调峰应尽量保证在三挡以下调峰，则收益效果明显5。

按照实际计算的话深度调峰相对净收益是指机组参与深度调峰工况的绝对净收益与不参与深调机组负荷为最小技术出力的净收益之间的差值，同时要考虑机组煤耗增加造成的原料成本及每年维护增加成本，三者同步计算更能真实客观地反映深度调峰时机组的利润情况，并以此为基础逐步建立改造收益模型是较为合理的。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

主要模型计算公式（概念）如下：

$$\sum 调峰收益 = \sum 深度调峰相对净收益 - \sum 供热工况煤耗损失 - \sum 额外增加维护成本 - \sum 改造成本$$

其中：

$\sum_{调峰收益}$：调峰总收益

$\sum_{深度调峰相对净收益}$：深度调峰相对净收益

$\sum_{深度调峰供热工况煤耗损失}$：深调工况下同一供热流量下供热煤耗增加成本

$\sum_{额外增加维护成本}$：针对旁路供热系统增加的维护及检修成本

$\sum_{改造成本}$：改造总投资成本

4.2社会效益分析

高低压旁路供热灵活性改造方案补充汽源本质上是旁路汽轮机做功蒸汽用于供热，以达到减少汽轮机做功，提高机组供热抽汽能力的目的，可以保证机组出力较小，不受以热定电的运行方式限制，调峰能力不受到热负荷的制约，参与深度调峰辅助服务市场，争取高补贴电价，在保证供热的同时更好的解决弃风弃光问题，所以结合目前市场形势，进行机组灵活性改造是大势所趋。

参考文献

【1】翦天聪.汽轮机原理.水利电力出版社.1996.

【2】W.特劳佩尔[瑞士].热力透平机（特性与结构强度）.机械工业出版社.1986.

【3】华中能源监管局.湖北电力调峰辅助服务市场运营规则（试行）.2020

【4】薛朝囡.汽轮机高低旁路联合供热在超临界350 MW机组上的应用.热力发电201801029

作者简介

杨添皓，电力工程师，从事汽轮机检修工作，就职于京能十堰热电有限公司，地址湖北省十堰市张湾区京能热电产业园，联系电话18647477136

微信搜一搜 山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

热电机组旁路调峰收益分析与探讨

侯建军
（内蒙古京能盛乐热电有限公司　内蒙古呼和浩特市　011500）

摘要：旁路抽汽作为热电机组一项灵活性改造方案，其技术可靠性逐渐完善成熟，近年来在北方地区得到进一步推广；本文结合某电力上市公司下属几家热电厂旁路抽汽改造案例，介绍了各厂改造方案及投运前后收益情况，指出了系统投运后存在的典型问题及处理方法；重点针对某正在改造热电厂，分析探讨了该厂旁路改造后，参与电网深度调峰或者单纯作为地区严寒期供热补充的收益情况及预期。结果表明热电机组通过旁路抽汽实现热电解耦，改造后机组具备一定深度调峰能力，能增加清洁上网空间；如果旁路抽汽仅以增加供热量为目标，没有电网辅助服务配套补偿，燃料成本是关键，作为自营供热尚可考虑，具体收益需结合当地辅助服务补偿政策来估算；该项技术在北方风光资源富庶地区具有极大推广应用价值。

关键词：热电解耦；旁路抽汽　深度调峰　盈利模式　辅助服务　供热补充

0 引言

近年来国家部委出台系列政策鼓励新能源发展，北方风光资源富庶省份风电、光伏等新能源发电份额逐步增大，为降低弃风弃光率，各火电机组需频繁降至最低电负荷配合。然而随城市化步伐加快，各地供热需求也在逐年攀升，北方地区燃煤供热机组居多，该类机组冬季“以热定电”的特殊运行方式，尤其单一抽汽供热机组，其抽汽能力与机组电负荷率成正比，采暖期调峰能力较差，无奈采取弃风、弃光方式来维持电力系统稳定。当前电网对热电机组深度调峰能力及灵活性运行需求愈来愈强烈，尤其三北地区冬季供暖期，这一需求更加迫切[1–5]。热电机组灵活性改造目前有多种方式，旁路抽汽是一项灵活性改造热电解耦技术，能有效改善采暖期发电负荷与机组供热（供汽）能力之间的矛盾[6–8]，近年来得到进一步推广应用。

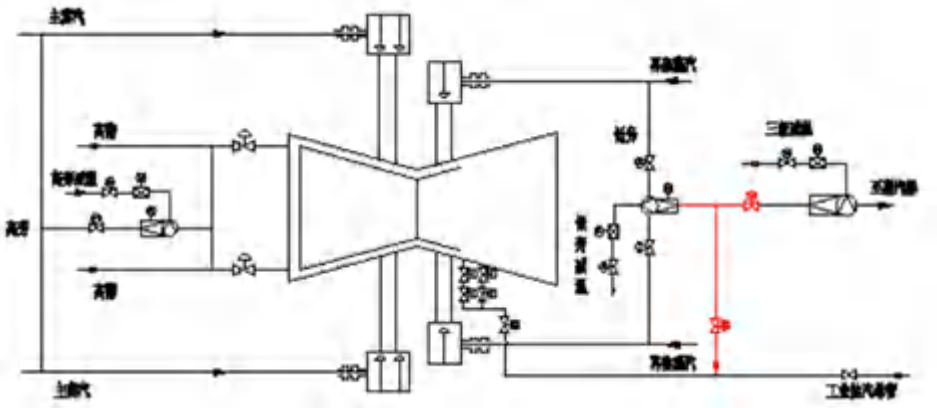
1各厂改造及收益简介

1.1赤峰某热电厂

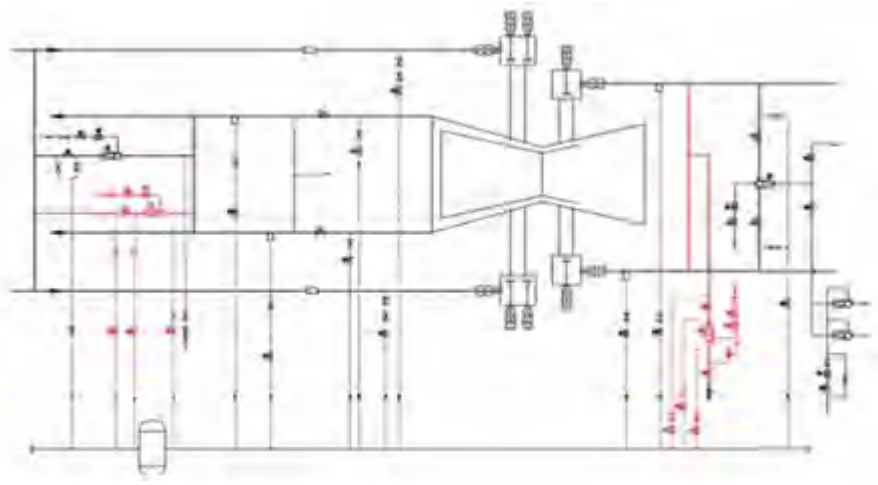
赤峰某热电厂装机容量为2×150MW机组属东北电网辖区。汽轮机为哈尔滨汽轮机厂生产的超高压一次中间再热、单轴、双缸、双抽汽供热、凝汽式汽轮机，两个工业抽汽口位于中压缸第12级后，两台机组严寒期最大采暖供热量为1250GJ/h（包括自用部分），工业抽汽量约60t/h。由于蒙东区域新能源装机容量不断上升，而地区电量送出通道受限，调峰容量稀缺，自

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2014年东北电网辅助服务市场启动以来，该厂在辅助服务市场上的考核费用平均每年约300万元，2019年该厂仅前四个月调峰考核已达700余万元呈快速上升趋势。2019年中该厂对#2机组30%启动旁路进行了灵活性改造，在低旁减温减压器后增加异径三通，将低压旁路后的蒸汽用来供工业抽汽（图一），可以在供暖初末期实现深度调峰，设计电负荷最低能减至25%。2019下半年旁路供工业抽汽系统投运，10月份辅助服务市场获得650余万元的补偿收入，11月份后由于赤峰地区进入供热中期，供热需求大无法满足深调要求11月中旬退出调峰市场，当月获得补偿100余万元，12月份无深调分摊考核接近300余万元。



图一：赤峰某电厂2019年旁路改造示意图



图二:赤峰某电厂2020年新增旁路改造示意图

为进一步提升深度调峰能力，增大旁路抽汽量，2020年经充分前期论证，该厂继续对#2机组进行了“新增调峰供热旁路”改造（图二），即在2019年对原旁路改造的基础上，另外新增了49%BMCR容量高压旁路、37%BMCR容量低压旁路，其中新增低压旁路提供采暖抽汽，原启动低压旁路继续作为工业抽汽汽源使用。该项目于2020年11月17日完成改造，投入后可以在采暖中期满足供热量和工业抽汽需求，2020年12月份调峰市场补偿高达1319万元。#2机组旁路系

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

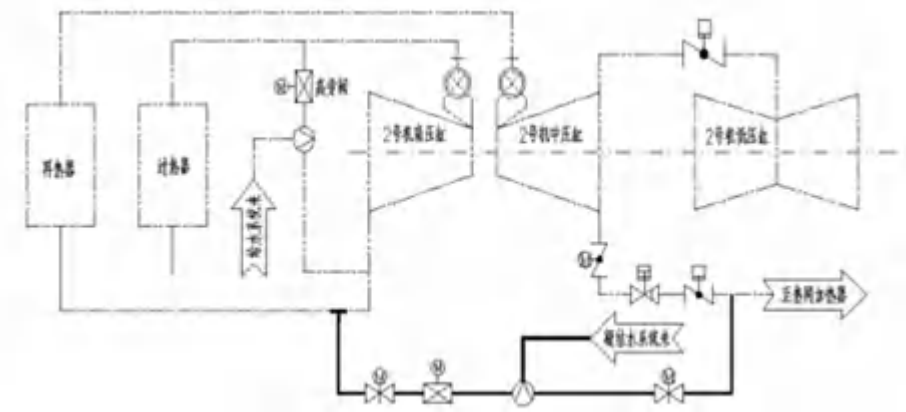
统扩容改造后，机组深调期间双机总负荷减至95MW，双机最大采暖供热量能达到950GJ/h，较改造前采暖供热量增加420GJ/h，同时供70t/h的工业供汽，基本满足供热中期供热需求，解决了供热中期不能参与深度调峰的难题。

1.2右玉某热电厂

山西右玉某电厂装机容量为2×330MW机组属山西电网辖区。汽轮机为北京北重汽轮发电机有限责任公司生产，型号为NZK330-17.75/540/540,型式为亚临界、一次再热、单轴三缸双排汽、直接空冷凝汽式汽轮机；锅炉为上海锅炉厂生产，最大连续蒸发量(BMCR)为1178t/h，最低稳燃负荷30%BMCR。机组配置70%BMCR高压旁路，100%BMCR低压旁路系统。高压旁路调节阀型号为HBSE280-250，两台低压旁路调节阀型号为CCI-NBSE60-500-2，阀门品牌为CCI。机组正常运行时高压旁路装置具有超压安全保护的功能。一号、二号机组分别于2011年12月29日和2012年1月16日投入商业运营，2014年10月15日两台机组完成供热改造。2018年初山西省经信委下发文件《山西省经济和信息化委员会关于印发2018年度省调发电企业发电量调控目标预案的通知》（晋经信电力字〔2018〕5号），将该厂列为可再生能源调峰机组试点，如在规定时间内完成灵活性改造并通过验收，可获得3.5至7亿kWh的标杆电量。为此该厂积极开展机组灵活性改造工作，分别于2018年12月、2019年12月，相继完成二号、一号机组的灵活性改造工作。

1.2.1 #2机组灵活性改造方案

按照省经信委发文要求，为争取标杆电量奖励，该厂先进行了#2机组灵活性改造，采用了再热冷段抽汽供热的旁路供热改造方案：由冷再管道引出作为抽汽供热管道，并经减温减压器减温减压后与汽轮机抽汽进行适配（保证压力、温度参数一致）汇合，供至热网加热器。冷再管道进口至减温减压器入口装设电动闸阀，减温减压器出口至热网加热器的管道上设置电动蝶阀，减温减压器管道上设置1台安全阀，保证在极端工况下不超压，减温水采用凝结水，在30%额定负荷下旁路供热设计最大抽汽量设计130t/h。二号机组经过灵活性试验过程中，当机组供热负荷为521.15GJ/h时,最小电负荷可降低至98.369MW(为机组额定负荷的29.81%,主汽温度为494.9℃,主再热蒸汽参数正常。在整个最小出力试验中,始终未投入任何燃油助燃,燃烧稳定,主汽温度、压力满足汽机运行的需要。受锅炉再热器超温及减温减压器冷却水量影响，无法达到设计最大出力,抽汽量只能达到100t/h。



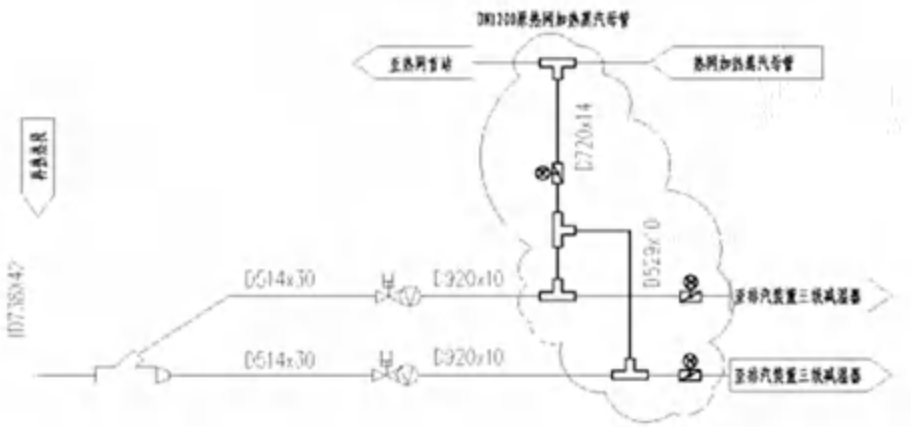
图三：右玉某厂#2号机组改造示意图

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

该厂二号机组灵活性改造之后，截止2020年底共计收益约7810万元。其中2019年享受深调补贴3208.32万元，2020年1335.5万元，2019年奖励基础电量9.9亿kWh，电价0.332元/kWh，2019年该厂交易平均电价为0.299元//kWh，电量差价收益3267万元。

1.2.2 #1机组灵活性改造方案

2019下半年在总结#2机组灵活性改造基础上，进行了#1机组改造，采用高低压旁路联合供热改造方案：在原有低旁去排汽装置管道上分别加装电动蝶阀，在低旁后和新加装的电动蝶阀前的管道加装三通，将两台低旁管道合并后引出作为抽汽管道，管道上设置电动隔离阀，利用高、低压旁路系统，采用热再进行采暖供热，通过现有的高、低旁阀门及其进出口管道，实现锅炉蒸发量与汽轮机进汽量、旁路供热蒸汽量之间的平衡，保证汽轮机在30%额定负荷工况下运行并提供满足供热参数要求的采暖蒸汽220t/h。



图四：右玉某厂#1机组改造示意图

因高、低压旁路按启动旁路设计，在此工况下运行高、低压旁路要参与调节，长期运行可能导致阀芯、阀座冲刷，同时对高、低压旁路控制阀进行了防冲刷改造。主机设备改造后，相应新增设备的控制部分纳入到DCS控制系统，实现自动控制。除主机设备改造外，为了保证空冷系统在冬季的安全稳定运行，在风机单元加装了自动防冻苫布。一号机组经过灵活性改造试验于2019年12月3日08:30开始,当机组供热负荷为512.32GJ/h时，主蒸汽参数正常，在整个最小出力试验中,始终未投入任何燃油助燃,燃烧稳定,该负荷下稳定运行8小时,最小电负荷可降低至95.12MW(为机组额定负荷的28.82%)，2019年12月3日16:30时一号机组供热工况下最小出力试验结束。试验过程中，各项技术指标符合设计要求,机组在试验供热量时的最小电负荷出力下,各主机、辅机运行正常,能够适应机组变工况运行的要求。

该厂#1机组于2019年底完成灵活性改造，一年以来收益共计2023万元。其中2020年奖励基础电量2.45亿kWh，电价0.332元/kWh，2020年度该厂交易平均电价为0.282元/kWh，直接收益增加约1225万元，2020年#1机组深度调峰收益798万元。

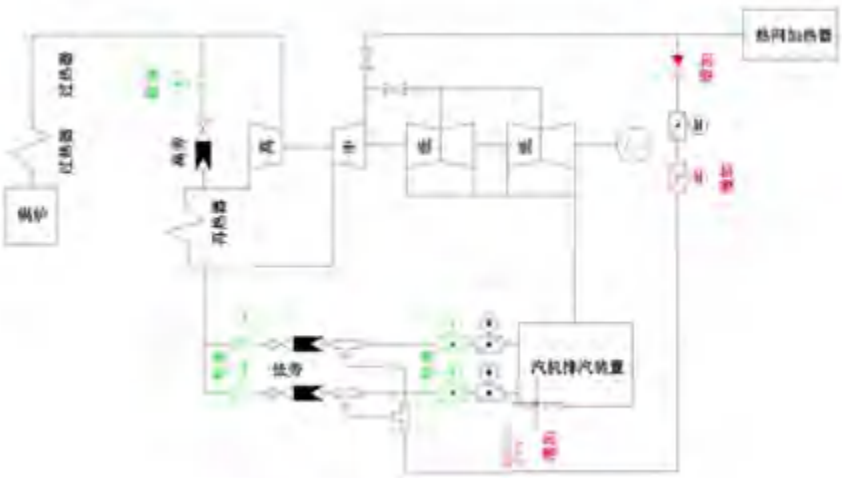
1.3长治某热电厂

长治某热电厂2×600MW+2×300MW机组属山西电网辖区，该厂四台机组运营时间超过10年，为国内300MW级以上最早的直接空冷机组，期间经历直接空冷尖峰混合冷却改造，经历长

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

输供热以及灵活性改造等等。截止2020上半年山西电网新能源发电占比高达40%且持续增长，由于省内水电资源少，所有火电机组被迫进行深度调峰。2020年该厂四台机组参与深度调峰时间：#1机105小时，#2机12小时，#3机346小时；#4机322小时。2020年1–10月份获得深调收益173.49万元。

结合省内电网辅助调峰服务补偿政策出台，经充分论证及前期调研，2020下半年该厂#4机组旁路抽汽改造项目立项，10月初利用B修机会改造工程按期开工，11月15日项目初步完工。由于低旁后至排汽装置2台电动蝶阀执行机构不满足快开要求，当供热系统突发事件解列时存在较大的系统超压安全风险，项目完工后未及时进行调试。2021年3月初进口电动执行机构到货后，当天连续作业加班安装到位，具备试验条件，向省调申请旁路系统进行深度调峰性能试验。该试验在供热末期进行，为达到试验负荷，旁路抽汽部分热量通过空冷岛散失，试验结果表明：该厂通过对#4机组旁路抽汽改造，确保炉侧最低负荷（给煤量152T/H，给水流量791T/H）前提下，高旁开度最大26.8%，低旁开度52.7%/55.6%,t通过旁路抽汽配合机组降电负荷至180MW(30%)稳定运行4小时；期间汽轮机轴系各项参数稳定，高低旁减温水投运正常。按照以上试验结果，参照山西省现行灵活性改造后现货交易报价政策，该厂#4机组调峰能力达30%，供热期深调期间上网电价能达到第三档0.75元/kWh；参与调峰时间按照100小时测算，相比改造前0.286元/kWh上网电价，调峰收益增加至少650万元。



图五:长治某热电厂#4机组旁路改造系统示意图

2 存在典型问题及处理方法

2.1 高排温度高降低主汽温运行

赤峰某电厂#2机组深度调峰时，随供热负荷增加锅炉出力增大，汽轮机进汽量减少，导致高压缸排汽压力明显高于非调峰工况下对应压力，高压缸排汽温度明显升高，严重时达到报警值，为争取更多深调补偿，为解决排汽温度偏高的问题，控制高压缸排汽温度在400℃以下，将主蒸汽温度由535℃降至505℃，同时根据高压缸排汽温度控制高旁进汽量。山西右玉热电厂#2机组冷再抽汽调峰时也存在类似问题[9]。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

2.2 再热器超温

右玉某热电厂#2机组采用冷再抽汽供热改造，设计抽汽量130t/h，实际调试及使用过程，受原高旁减温能力限制，再热器超温问题比较突出，无法达到设计抽汽量，通过主蒸汽降温配合，目前抽汽量能达到100 t/h；系统需要进一步技改完善。

2.3 中调门未能深度参与调节

根据赤峰某热电厂设计要求，中压调门调整到位才能保证最大的低旁供采暖蒸汽量。在#2机旁路系统改造前，80MW负荷下做中调门节流试验，中压调门关至30%，前后差压1.0MPa时，再热蒸汽管道、中压主汽门、中压调门、连接调门油动机的EH油管道开始明显晃动，蒸汽节流声变大。为保证运行安全，目前要求中调门前后差压控制不超过0.5MPa，中调门最大关至34%，但中压主汽门及管道仍然有轻微晃动，主要异常现象是中压主汽门阀体及连接管道温度测点频繁磨损损坏。因中调门不能深度参与调整，所以旁路系统也无法达到最大抽汽工况；山西右玉及长治两家电厂经改造机组，目前中压调门均为参与憋压调节。

2.4 调峰高低压旁路压力调节阀故障

赤峰某热电厂调峰低旁压力调节阀从安装后就发生卡涩，不能全开全关，靠调峰低旁进汽电动门进行节流调节。调峰高旁压力调节阀运行一段时间后，出现抽汽能力不足的现象，目前原因还不明确，通过调峰高旁进汽电动门节流调节。

2.5 调峰投退过程中汽包水位波动大

因调峰旁路系统流量计未能安装到位，调峰高低旁路调整只依靠“压力比”进行匹配调整，但主给水流量与进入汽轮机的主蒸汽流量偏差大，给水泵调节迟缓，容易造成汽包水位异常升高，必须根据主蒸汽压力变化率、供热量等参数缓慢操作才能控制好汽包水位。

2.6 自动投入率不高

该电力集团目前已改造完成几家热电机组，目前均存在不同程度的自动投入率偏低问题；各电厂偏重于辖区政策的争取，为实现利益最大化一有政策立即上项目，因此普遍存在项目前期调研不足，策划起点不高，后期自动控制这一块重视程度略显不够问题；后续须做好专题调研，借助检修机会完善系统，逐步提升机组自动化水平[10]

3 呼市某热电厂改造思路及盈利模式探讨

3.1改造思路

呼市某热电厂2*350MW超临界机组厂址位于呼和浩特市盛乐园区属蒙西电网辖区，厂址距呼和浩特市区大约25公里。该厂原为呼和浩特市盛乐园区“冷热电三联产”配套项目2012年开始筹建，2016年初双机投产后园区发展滞后，原设计双机抽汽最大供热负荷700MW，折合供热面积1400万平米，项目投产初期全厂供热面积总计不到70万平米；全年纯凝工况运行，年度煤耗水平一度达320g/kWh以上机组经济性极差。

该厂积极争取当地政府支持，深度挖掘供热市场；2016下半年通往呼和浩特城区长输供热管网建设启动（约30公里），2017年四季度采暖期投运，2018年接带供热面积达到1290万平米；面对呼和浩特市关停小锅炉等政策加持以及逐年增长的供热需求，2019年#2机组进行高背压改造，对外供热能力增加到1700万平米。2018年采用合同能源引进第三方，在扩建预留场地建设了4X40MW电锅炉蓄热项目，主要利用电网政策参与深度调峰，通过获得调峰补偿来实现

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

最大化收益。目前蒙西电网深度调峰补偿额度最高档仅为0.4元/kWh，远低于国网东北、西北区域及山西电网补偿水平；统计盛乐2021年1–3月份电蓄热参与深度调峰电量2740万kWh，补偿结算电价为0.38元/kWh[11]。盛乐热电积极响应国家30/60政策，深入分析蒙西电网最近几年新能源发展形势；积极开展灵活性改造调研，2020年委托某电力设计院与汽轮机厂，联合完成了#1机组旁路抽汽供热改造可行性研究。

本次#1机组拟通过高、低压旁路阀抽汽供热改造，即锅侧相对机侧高负荷运行，锅炉新蒸汽通过旁路系统向原热网加热蒸汽系统提供采暖用汽，以此实现机组低负荷阶段热电解耦或提高机组供热能力需求。改造后锅炉侧过量的主蒸汽经原有高压旁路系统进入冷再热蒸汽管道，再依次经过低温再热器、高温再热器进入高温再热蒸汽管道。高温再热蒸汽一小部分进入汽轮机中压缸，满足汽轮机最小进汽量的要求。其余再热蒸汽经低压旁路阀减温减压后为热网加热器提供热源。高、低压旁路阀及减温水系统均利用原有系统及阀门，对高低压旁路阀进行防冲刷改造，原有高低压旁路减温水管路装设流量计。为隔断进入凝汽器的低压旁路阀出口蒸汽，在原低压旁路阀出口至原三级减温减压器的原低旁阀出口管道上新增一道电动隔断阀，隔断阀前新增一路去原热网加热蒸汽管道的抽汽管道，管道上设置气动逆止阀和电动关断阀，抽汽管道就近引接至A列外原有热网加热蒸汽母管。为精确计量高、低压旁路抽汽蒸汽流量，在低压旁路阀出口管道至原采暖蒸汽管道的新增抽汽管道上各增加一套流量测量装置。高、低压旁路阀抽汽供热仅冬季采暖期运行。原有热网首站所有热力设备均维持不变[12–14]。

3.2 收益分析与探讨

3.2.1参与电网深度调峰

本改造项目当前主要依靠深度调峰盈利，后期若有收益可观的政策支持还可能参与现货交易；该厂旁路抽汽在电网有深调需求时与现有电蓄热项目叠加投运，能将#1机组深度调峰能力提升至100%，也就是说完全实现了零出力上网，调峰期间可以获得最高档次的调峰补偿，参与时间按每个采暖季300小时，调峰平均深度10%预估，收益主要来自三个方面测算如下：

第一，单机350MW按10%调峰深度，300小时旁路调峰电量合计1050万kWh，按照目前蒙西电网0.4元/kWh最高补偿额度，旁路抽汽调峰获得补偿合计420万元，扣除蒸汽成本50%获得收益约210万元；

第二，旁路抽汽参与深调，与目前的电蓄热叠加，盛乐#1机组拥有100%调峰能力，获得整体调峰补偿额度增量不低于0.02元/kWh，对电蓄热深调电量将产生增量电价；电蓄热调峰按平均140MW/h深调幅度，投运300小时合计4200万kWh深调电量，电蓄热深调产生增量补偿84万元。

第三，以上旁路抽汽量合计约4万吨用于供热，按照给城发19元/Gj收益估算约150万元；此部分主要为旁路参与深调的富余蒸汽，减温减压后用以供热类似余热利用，且投运时间具有不确定性；因在上述第一条已进行成本扣除，可以看作无成本热量来核算收益。

旁路抽汽参与深度调峰，以上三方面合计估算，一个采暖季综合收益约440万元。

3.2.2 用于极寒期供热补充

该项目作为极寒期供热补充，基于该厂现有热源设备及系统，后期有两种方案可以考虑：

第一，该厂热网循环水流量1.3万t/h已达现有热网循环泵设备出力上限，目前最大供热

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

温度试验工况曾达到114℃，常规供热温度107℃左右；整个热网系统供水温度设计上限为130℃，后期供水温度还有提升空间；考虑通过增加换热器，增设循环泵等在目前基础上进一步提升供水温度，预计通过旁路抽汽100t/h能将热网供水温度整体提升5℃左右，日供热量增加约6000Gj。但是给城发的趸售热价19.2元/GJ，以今年一季度该厂500元/吨的入厂标煤单价测算，用旁路抽汽来向城发供热收益是倒挂的，此方案在标煤单价降至400元/吨以下才可以考虑。

第二，将目前通往城区和园区热网系统分开，以现有供热能力满足城区；旁路抽汽主要用于园区供热增量部分（约50万平米/年增加幅度），因园区为自营供热，经济收益上肯定划算。后续随园区供热需求上升该厂#2机组可参照技改。

3.2.3 拓展工业蒸汽用户

随园区发展逐步拓展培育工业蒸汽用户，增加供汽收入；旁路抽汽减温减压后可以针对不同压力、温度需求的工业蒸汽用户。

综上，旁路抽汽改造项目利用高品质蒸汽减温减压后供热，从能量利用角度非常不划算；且主要在供热初末期投运，可能对目前#1机组中排抽汽产生排挤，甚至挤占#2机组高背压供热份额，肯定会提高该厂整体能耗水平。该项目主要是利用电网辅助服务补偿政策，能获得较高额度的深调补偿，从经济收益或盈利角度上分析，参与深度调峰或者扩大自营供热均可行[15–16]。

4 结论

通过分析以上赤峰、右玉、长治三家热电厂旁路改造后运营及收益情况，综合呼市正在改造某热电厂盈利模式探讨，得出结论如下：

4.1 火电机组深度调峰是随着电力能源结构调整，在国内出现的一种特有的过渡性产品，随着电力市场现货竞价交易体制完善终将被替代；在此过程中政策红利是最大影响因素，政策刺激下灵活性改造机组增多，政策红利会逐步减少，后续对机组深度调峰期间性能要求也会愈来愈高，提前做好机组控制性能优化，在未来的竞争中才会领先。

4.2 旁路抽汽改造是在保证机组深度调峰能力。同时满足供热需求的背景下应运而生的新思路，政策发布须及时对接尽早完成灵活性改造，有利于热电厂实现盈利最大化。

4.3 无论在原有旁路技改还是另加抽汽旁路，均可实现不同程度调峰，增加清洁能源上网空间，该两种方案目前国内均有成功实施的经验。

4.4 确保锅炉最低稳燃负荷前提下，使用哪种技术路线技改，取决于各热电厂自身需求，15%以下深调建议在原有旁路进行，投资费用不高且实施方便。

4.5 利用高品质蒸汽减温减压后供热，从能量利用角度不太符合国家能量梯级利用主体思路；且在供热初末期投运参与深调，将对现有热源产生排挤，提高热电厂整体能耗水平。

4.6 所处区域电网政策不明朗情况下，选择旁路供热改造须认真组织项目可研，结合当地灵活性改造政策，新能源发展趋势，近年深度调峰开启时间，结合机组目前对外供热能力等综合测算；单纯作为极寒期供热补充自营供热可以考虑，趸售给供热公司须做好经济性测算。该项技术在北方风光资源富庶点地区具有极大推广应用价值。

微信搜一搜
山东舜业压力容器有限公司
微信扫描识别左侧图片中二维码关注公众号并到会员中心免费注册会员可到资料下载中下载查阅更多行业论文、课件等资料，详情咨询群创办人：18325411666

参考文献

[1] 邢振中,冷杰,张永兴,等.火力发电机组深度调峰研究[J].东北电力技术, 2014,35(41):18-23.

[2] 胡润青,窦克军.我国北方地区可再生能源供暖的思考与建议[J].中国能源, 2017, 39(11):25-32.

[3] 方豪,夏建军,林波荣,等.北方城市清洁供暖现状和技术路线研究[J].区域供热, 2018(1):11-18.

[4] 苏鹏,王文君,杨光,等.提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J].中国电力,2018,51(05):87-94.

[5] 李染生,付喜亮,侯建军.基于需求分析的热电解耦方案选型优化[A].2019年中国电机工程学会年会论文集[C],2019年.

[6] 居文平,吕凯,马汀山,等.供热机组热电解耦技术对比[J].热力发电,2018,47(09):115-121.

[7] 章艳,吕泉,李杨,等.四种热电厂电热解耦改造方案的运行灵活性剖析[J].电力系统自动化,2020,44(02):164-172.

[8] 包治光.北方地区热电联产机组灵活性深度调峰改造技术路线研究[J].自动化应用,2020(12):147-148+152.

[9] 张海丰,杜朝伟,贾铁鑫.浅谈汽轮机旁路供热调试过程中的问题与处理方法[J].电站辅机,2019,40(03):30-32

[10] 刘畅,耿林霄,王珩,等.高低旁路联合供热改造控制策略研究[J].热力发电,2020,49(11):126-132.

[11] 侯建军.电蓄热锅炉供暖项目需配套政策助力[J].电力决策与舆情参考,2019,424/425(42/43):57-60.

[12] 宣伟东.300MW机组高低旁路联合供热改造实践分析[J].节能技术,2020,38(06):561-564.

[13] 薛朝囡,杨荣祖,王汀,等.汽轮机高低旁路联合供热在超临界350MW机组上的应用[J].热力发电,2018,47(05):101-105

[14] 王海成.350MW超临界机组高低压旁路供热技术分析[J].黑龙江电力,2020,42(03):256-259.

[15] 付蔷.促进风电消纳的火电灵活性改造深度及经济效益研究[D].北京交通大学,2018.

[16] 付怀仁,包伟伟,张敏,等.当前主流供热改造技术的灵活性及经济性分析[J].热力透平,2019,48(02):99-104+145.

作者简介

侯建军(1977)，男，毕业于武汉大学热能与动力工程专业，内蒙古乌兰察布市人，高级工程师，从事2*350MW超临界机组运行管理、辅机技术升级改造、新技术应用开发等工作。

工作单位：内蒙古京能盛乐热电有限公司

地址：内蒙古呼和浩特市和林格尔县盛乐服务业集聚区京能盛乐热电

邮政编码：011500

手机号码：18804718197

Email：2640072081@ qq.com

QQ:2640072081