

针对现役机组灵活性运行和深度调峰的 锅炉技术研究



哈尔滨锅炉厂有限责任公司
2017年4月

主要介绍内容

- 一、火电灵活性及深度调峰改造背景
- 二、火电灵活性改造所面临的技术问题
- 三、超低负荷计算示例及方案分析
- 四、哈锅灵活性技术工作

火电灵活性改造背景

初步估算，到2020年，我国风电、太阳能装机将分别达到**2.2亿千瓦**和**1.1亿千瓦**以上，而**2015年**弃风率和弃光率却分别达到了**15%**和**12.6%**，电网对新能源的消纳能力亟需提高。新的电力供需环境下，火电利用小时数将长期保持在较低水平，火电机组尤其是煤电机组在未来几年持续低负荷或深度调峰将成为新常态。



火电是“三北”地区主力电源，对于该地区火电进行深度改造可获得1亿KW以上的调峰能力。

火电灵活性改造背景

提高已有煤电机组（包括纯凝与热电）的灵活性，
为消纳更多波动性可再生能源，灵活参与电力市场创造条件。

锅炉改造目标：

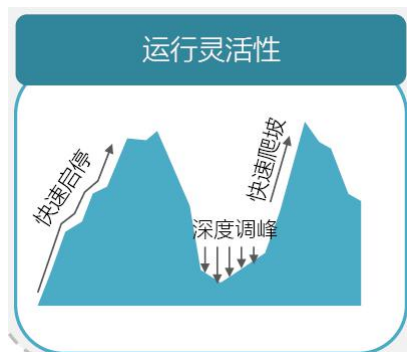
1. 深度调峰

超低负荷

2. 快速启停

快速变负荷

3. 快速爬坡



40%→20%



2%/min→5%/min



4h→2h



深度调峰能力

快速爬坡能力

快速启停能力



哈电集团
HARBIN ELECTRIC CORPORATION

哈尔滨锅炉厂有限责任公司
HARBIN BOILER COMPANY LIMITED

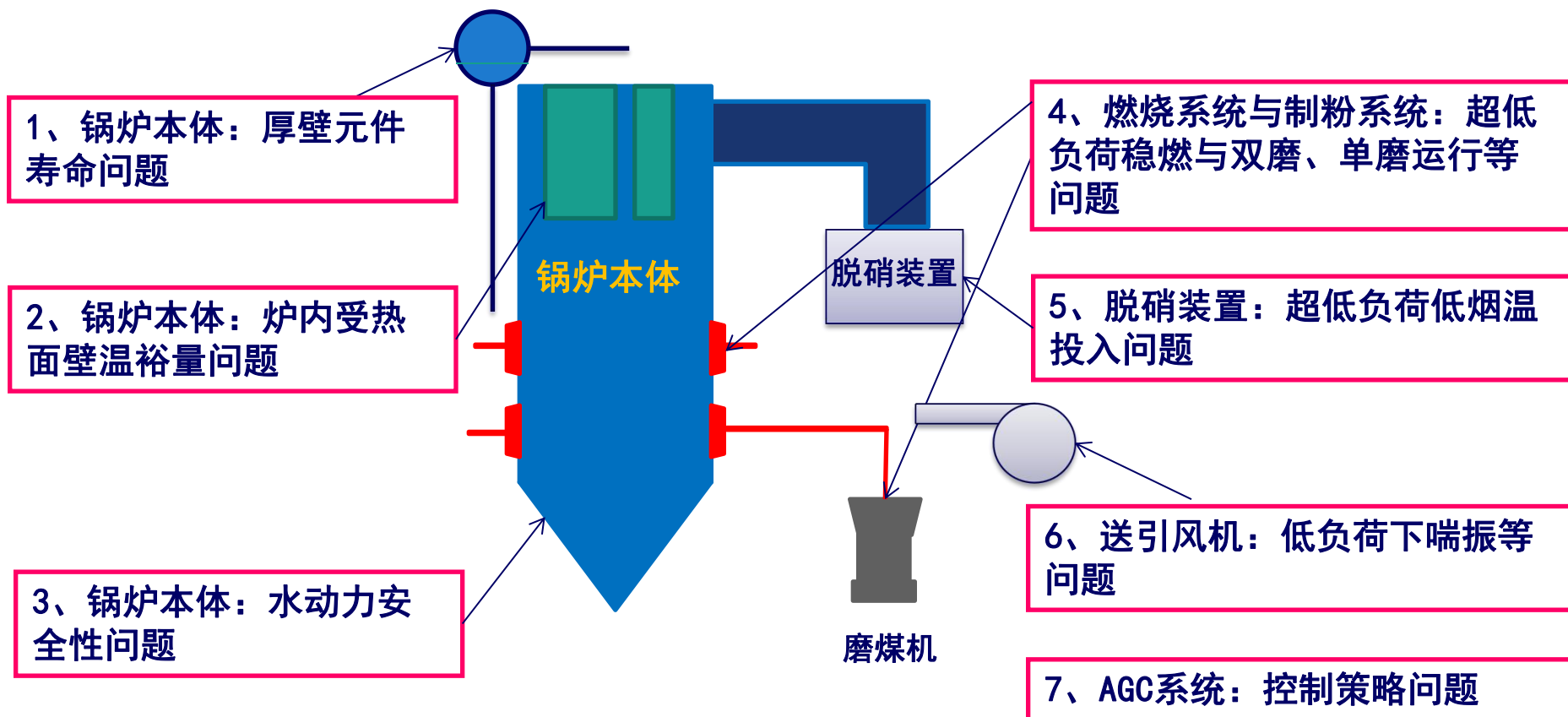
火电灵活性改造所面临的技术问题

火电灵活性改造锅炉的初步目标：

- 实现15~25%BMCR超低负荷稳定运行
- 锅炉快速变负荷能力从1.5%提升到 3%。

火电灵活性改造所面临的技术问题

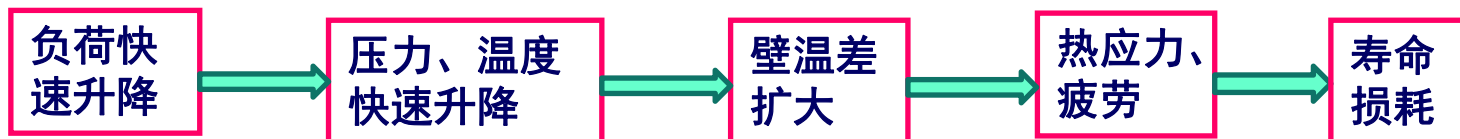
为实现灵活性改造目标，锅炉及其辅助系统需解决的问题：



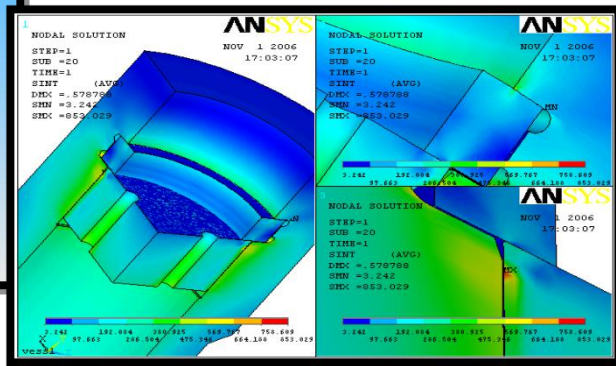
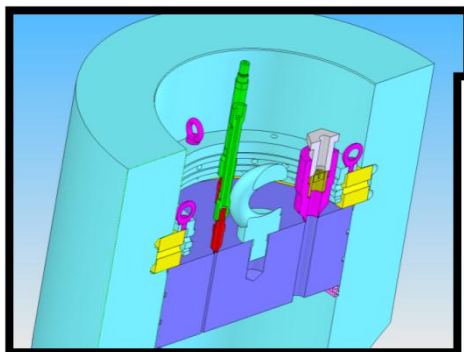
火电灵活性改造所面临的技术问题

2.1 厚壁元件寿命问题

- 汽包、分离器、末过出口集箱等；
- 必须进行寿命损耗的计算，确保快速升降负荷的安全性。



厚壁元件疲劳—应力
分析计算



火电灵活性改造所面临的技术问题

2. 2炉内受热面壁温安全性问题

超低负荷工况下：

- 工质侧：蒸汽流量较低，管屏内的流量偏差加剧；
- 燃烧侧：重点集中在稳燃，空气动力场偏离最佳状态；
- 烟气侧：烟气流量低，炉内充满度差，烟气侧偏差加剧；



- 工质侧和烟气侧偏差叠加，出口蒸汽壁温偏差加大；
- 炉内受热面壁温裕量降低，局部管子可能超温；



- 重新核算受热面的壁温安全性，评估拉裂危险性；
- 在确保壁温安全性的基础上，受热面动态壁温报警值的设置；

火电灵活性改造所面临的技术问题

2. 3水动力安全性问题

超低负荷水动力安全性核算：

- 燃烧器运行方式：单磨/双磨运行，投运上层/底层燃烧器；
- 炉内热流密度偏差：热流密度偏差导致各管受热不均；
- 工质侧质量流速较低，管间的流量偏差加剧；



需要核算停滞、倒流和动态不稳定性

火电灵活性改造所面临的技术问题

2.4 超低负荷脱硝装置投入问题

超低负荷工况下，脱硝装置入口烟气温度的可能会低于300℃，脱硝装置无法投运，现有的主流全负荷脱硝改造技术如：省煤器分级、烟气旁路等在超低负荷下存在局限。

因此有必要研发新的超低负荷脱硝技术方案。

火电灵活性改造所面临的技术问题

2.5 超低负荷燃烧器稳燃和制粉系统配合问题

超低负荷下
磨煤机与燃烧器的匹配

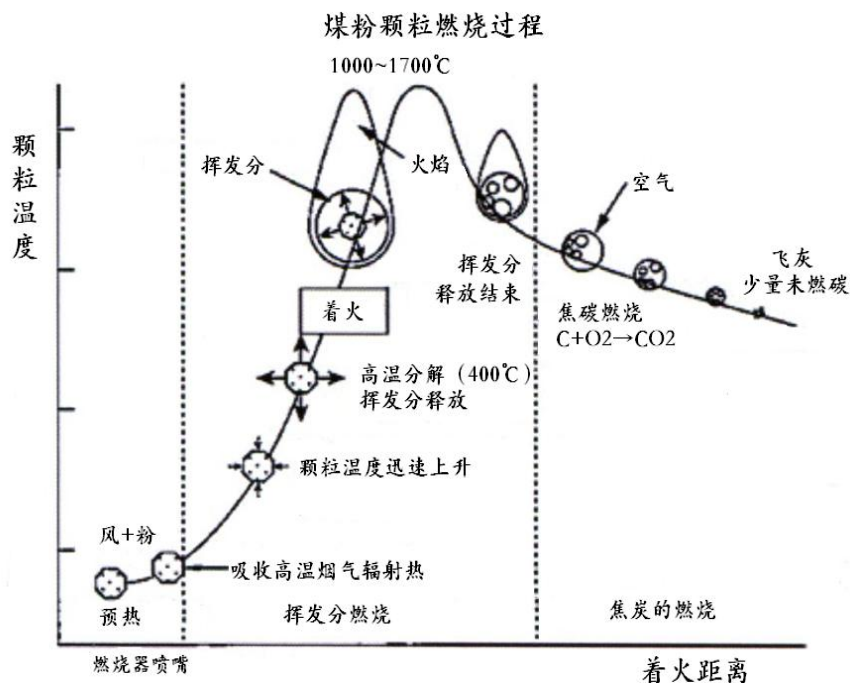
超低负荷工况下，燃烧器稳燃问题，需采取特殊方法加强燃烧器稳燃能力（微油、等离子、富氧微油）

超低负荷工况下燃烧器与磨煤机的匹配，磨煤机单磨/双磨运行问题。



火电灵活性改造所面临的技术问题

超低负荷下燃烧条件恶化:



- 锅炉负荷降低，**炉膛温度**水平降低，一次风的辐射加热能力降低，着火能力下降；
- 火焰相对支持性减弱，着火组织能力下降；
- 空预器入口烟温降低，磨煤机**干燥出力**下降；
- 受磨煤机最小通风能力限制，风煤比升高，**煤粉浓度**降低，着火稳定性下降；
- 高过量空气系数，炉膛火焰温度下降，燃尽变差；
- 燃烧不稳定易引发锅炉及辅机设备**MFT**；也易受外部条件干扰，造成燃烧急剧不稳定。

火电灵活性改造所面临的技术问题

2. 6超低负荷风机安全运行问题

烟风系统超低负荷运行稳定性：

- 烟风系统主要考虑风机在低负荷的稳定性。低负荷风机存在的主要问题是失速和喘振。
- 是否发生喘振取决于流量、系统阻力与风机特性的匹配性。

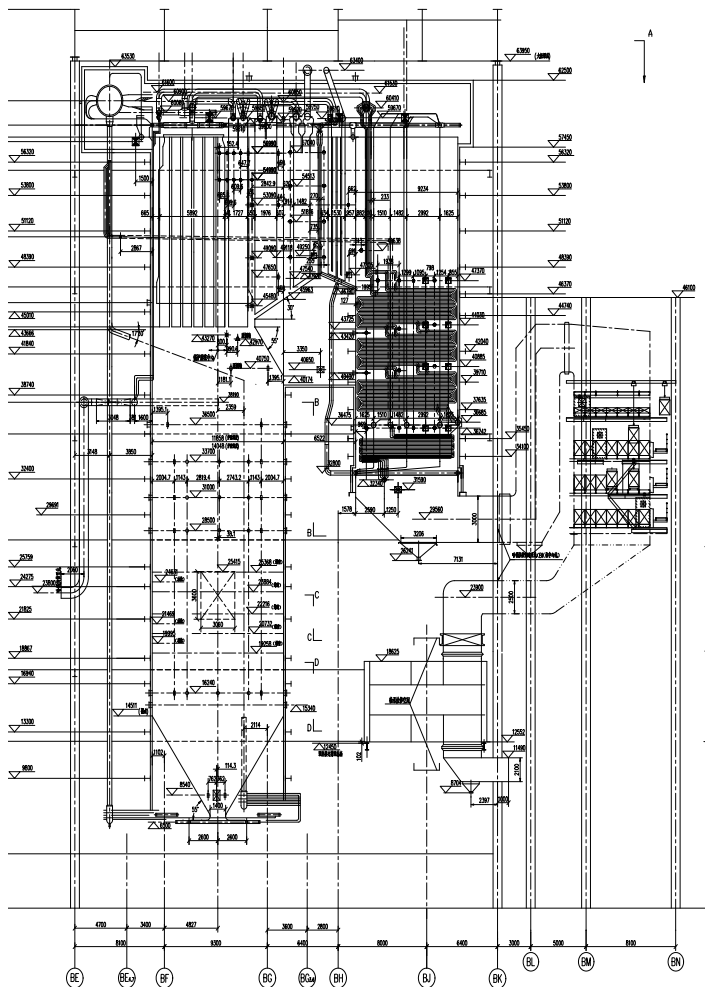
超低负荷计算示例及方案分析

某电厂2x300MW机组灵活性改造

锅炉总体布置说明：

- 亚临界、一次中间再热、自然循环汽包炉；
- 单炉膛，采用平衡通风、四角布置的摆动式燃烧器，切向燃烧；
- 5台MPS200HP-Ⅱ型中速磨煤机，4运1备；
- 过热器采用两级喷水减温器；
- 再热蒸汽采用摆动燃烧器+事故喷水；

超低负荷目标：15%BMCR负荷



超低负荷计算示例及方案分析

近期工作进展：

- 更低的稳燃负荷，15%BMCR工况下所有数据的重新核算；
- 15%BMCR～30%BMCR超低负荷下磨煤机出力及热平衡核算；
- 15%BMCR工况下，磨煤机投运方式及燃烧器方案深入论证；
- 超低负荷脱硝投入方案优化，新方案对系统的影响更小；
- 完成15%BMCR工况炉内热态数值模拟计算，为壁温及水动力计算提供更为精确的炉内热负荷分布。

超低负荷计算示例及方案分析

名 称	符 号	单 位	设计煤种	运行煤
碳(收到基)	C_{ar}	%	40.25	36.5
氢(收到基)	H_{ar}	%	3.28	2.7
氧(收到基)	O_{ar}	%	9.74	8.3
氮(收到基)	N_{ar}	%	0.71	2.12
硫(收到基)	S_{ar}	%	0.43	0.36
灰份(收到基)	A_{ar}	%	15.99	18.02
水份(收到基)	M_{ar}	%	29.6	32
水份(空气干燥基)	M_{ad}	%	14.2	17.74
挥发份(可燃基)	V_{daf}	%	47.97	48.50
收到基低位发热值	$Q_{net. ar}$	KJ/kg	14510	13563

某电厂燃用煤热值较低，将导致炉内温度水平偏低，影响炉内燃烧的稳定性；同时由于水分较高，需着重考虑磨煤机干燥出力的问题。

超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷下的热力计算

项目	单位	BMCR负荷 设计煤工况	30%BMCR负荷 运行煤工况
主蒸汽流量	t/h	1035	300.5
主蒸汽出口压力	MPa.g	17.5	16.65
主蒸汽出口温度	°C	540	517
给水温度	°C	282.8	212.3
给水压力	MPa.g	19.0	17.06
再热蒸汽流量	t/h	846.8	261.4
再热蒸汽出口压力	MPa.g	3.816	1.076
再热蒸汽出口温度	°C	540	513
再热蒸汽进口压力	MPa.g	3.996	1.132
再热蒸汽进口温度	°C	333.5	271.9
过热器喷水量	t/h	0	60.4
再热器喷水量	t/h	0	0
过量空气系数	-	1.2	1.4
磨煤机投运层数	-	4	2
燃煤量	t/h	195.84	65.5
总风量	t/h	1218.2	476.2
脱硝入口烟温	°C	419	315

超低负荷计算示例及方案分析

磨煤机厂家核算15%BMCR工况：

单磨运行：

- 该负荷可满足干燥出力，更高负荷干燥出力不足；
- 磨出力较高，煤粉浓度高；
- 若变负荷，需投/切磨，操作复杂；
- 若跳磨，安全性低。

双磨运行：

- 负荷调节范围广；
- 磨负荷率低，风煤比高，煤粉着火条件变差；
- 投相邻磨，保证火焰相互支持。

建议：推荐双磨运行，助燃措施、燃烧器及调整优化同时进行。

超低负荷计算示例及方案分析

提高超低负荷稳燃措施：

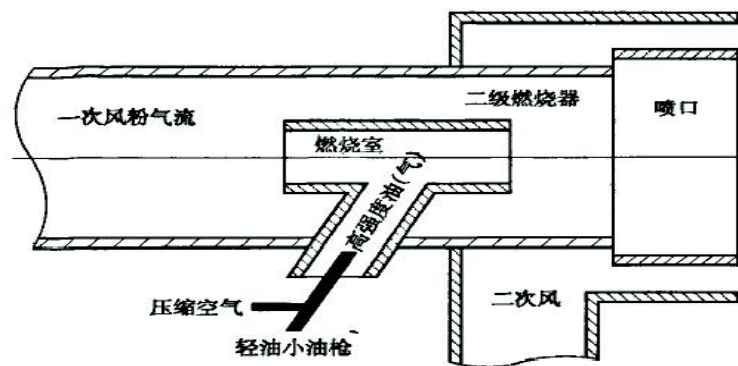
- 微油点火燃烧器助燃；
- 等离子点火燃烧器助燃；
- 富氧微油点火燃烧器助燃；
- 稳燃燃烧器及调整优化；

建议：助燃措施、燃烧器及调整优化同时进行。

超低负荷计算示例及方案分析

1、微油点火燃烧器

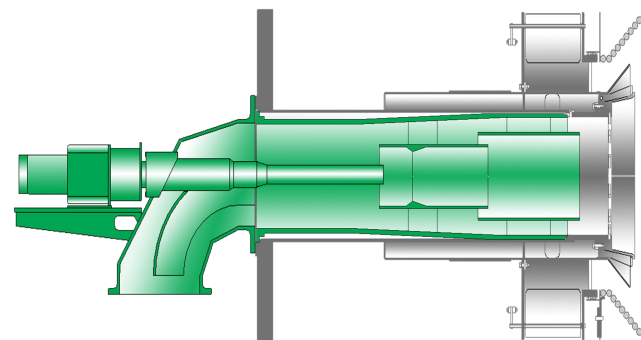
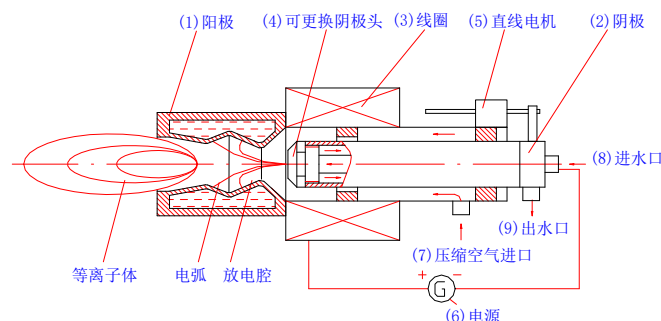
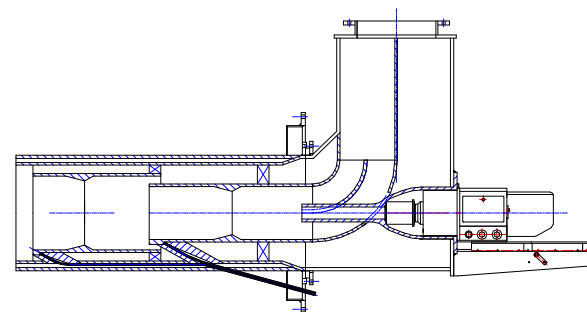
- 压缩空气高速射流将燃油直接雾化成超细油滴并燃烧，油滴在极短时间内完成的蒸发、气化，使气体燃料直接燃烧，从而提高火焰温度。
- 一级燃烧区，浓相煤粉通过气化燃烧高温火核，煤粉颗粒的急剧升温、裂解，释放出大量的挥发分，并迅速着火燃烧。
- 二级燃烧区，淡相煤粉混合并分级燃烧，燃烧能量逐级放大，达到点火并加速煤粉燃烧的目的。



超低负荷计算示例及方案分析

2、等离子点火燃烧器

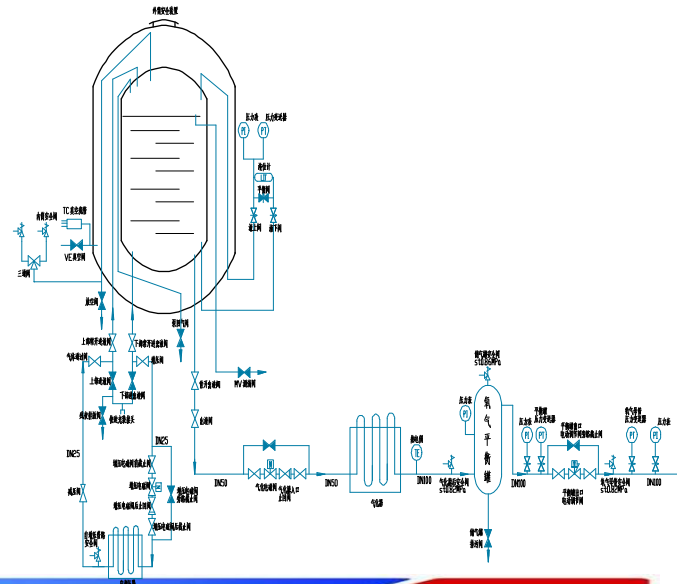
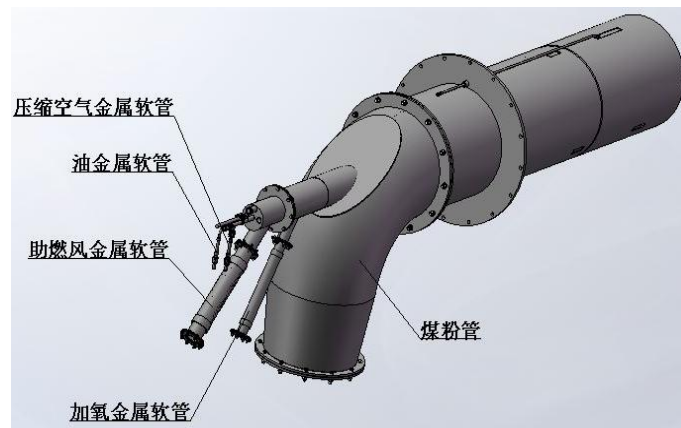
- 强磁场下获得稳定功率的直流空气等离子体，形成 $T > 5000\text{K}$ 的局部高温区——“火核”；
- 煤粉颗粒经过高温区迅速释放出挥发物，并使煤粉颗粒破裂，从而迅速燃烧；
- 其燃烧过程同微油点火燃烧器（同上）；
- 优点：无油；
- 缺点：煤质适应性差，阴极寿命短，通常在200 h左右。



超低负荷计算示例及方案分析

3、富氧微油点火燃烧器

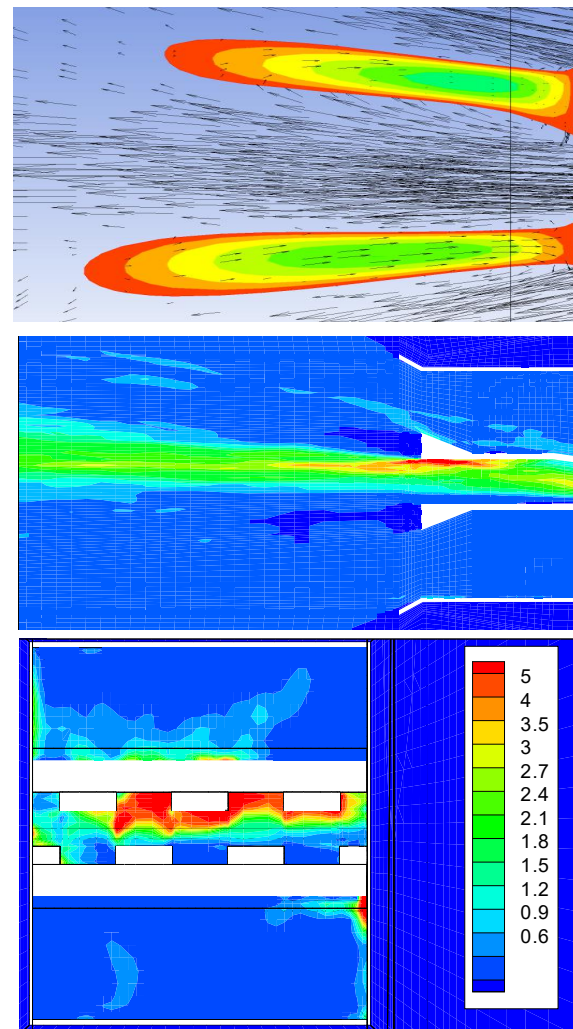
- 燃料风中 N_2 不参与燃烧，吸收大量热量，降低了燃烧区域的温度。
- 富氧燃烧，燃料风氧浓度 $>21\%$ ，提高了燃烧区域温度，促进煤粉表面传热传质及燃烧速度。
- 富氧微油技术依托现有的微油点火技术，将富氧引入油枪雾化区、火焰燃烧区、燃烧器中心煤粉浓缩区，提高点火热源温度、改善煤粉着火及燃烬效果。



超低负荷计算示例及方案分析

4、稳燃燃烧器-中心富燃料内焰着火燃烧器

- 中心富燃料区，煤粉浓度急剧升高；
- 中心煤粉迅速点燃，并持续燃烧，形成氧量梯度分布；
- 燃烧器出口形成稳定的高温回流区，用于迅速加热煤粉；
- 高烟温、高煤粉浓度、高氧浓度梯度，共同实现低负荷稳燃。



超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷脱硝装置投入问题

超低负荷工况下，脱硝装置入口烟气温度低于300℃

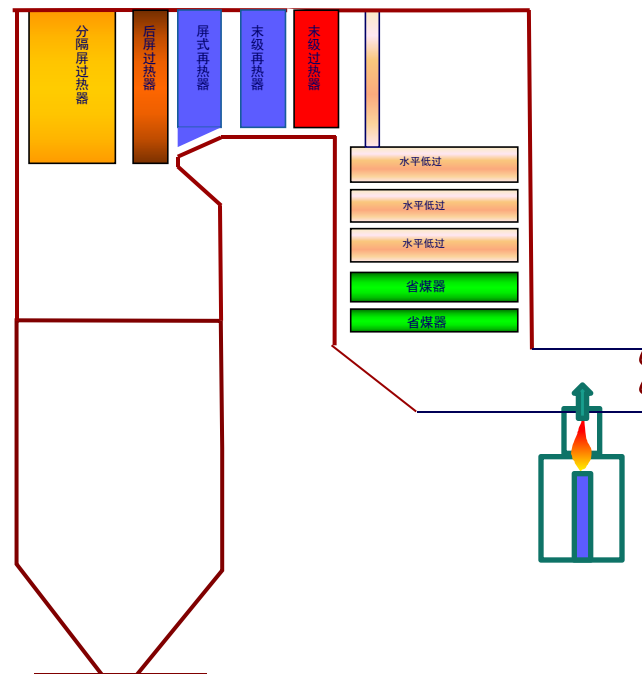
目前主要改造方法：

- 置换省煤器（全分级）
- 烟气旁路（烟道阻力分配问题）
- 省煤器旁路、省煤器分级
- 零号高加、SCR入口设置换热器、天然气加热烟气等。
- 亚临界锅炉在水循环系统加泵，提升省煤器入口水温。

超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷方案1---SCR前增加小油枪

- 锅炉超低负荷目标为15%BMCR;
- 采用小油枪燃烧预燃室，在SCR前水平烟道布置烟气喷口;
- 引用热二次风做助燃风;
- SCR入口烟温低于300℃投用，保证SCR入口烟温>300℃;
- 此方案需要消耗燃油，且存在油滴燃烧不完全而复燃的风险，排烟温度会升高。

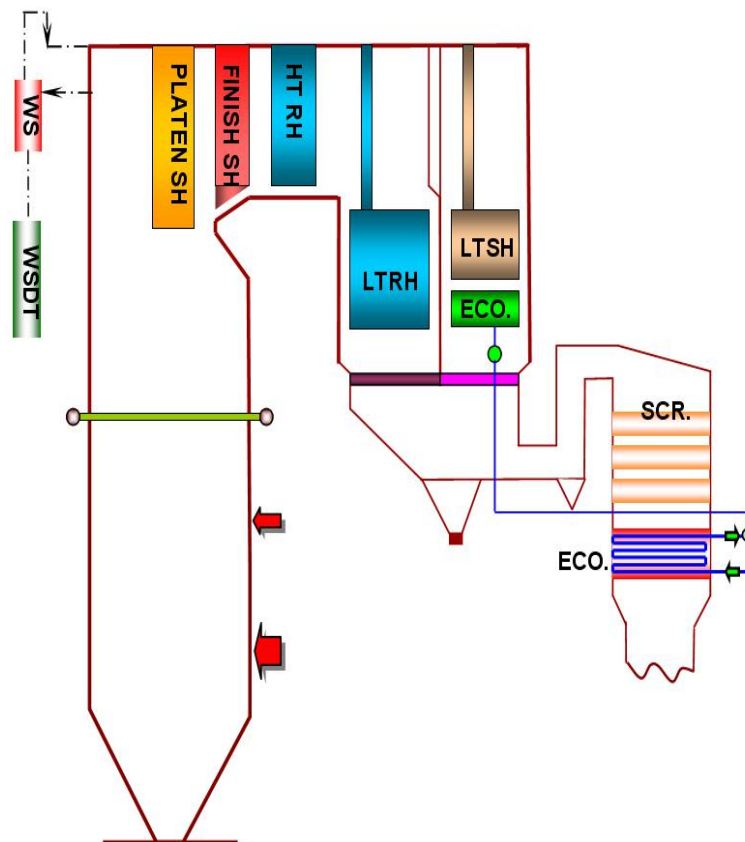


SCR前增加小油枪

超低负荷计算示例及方案分析

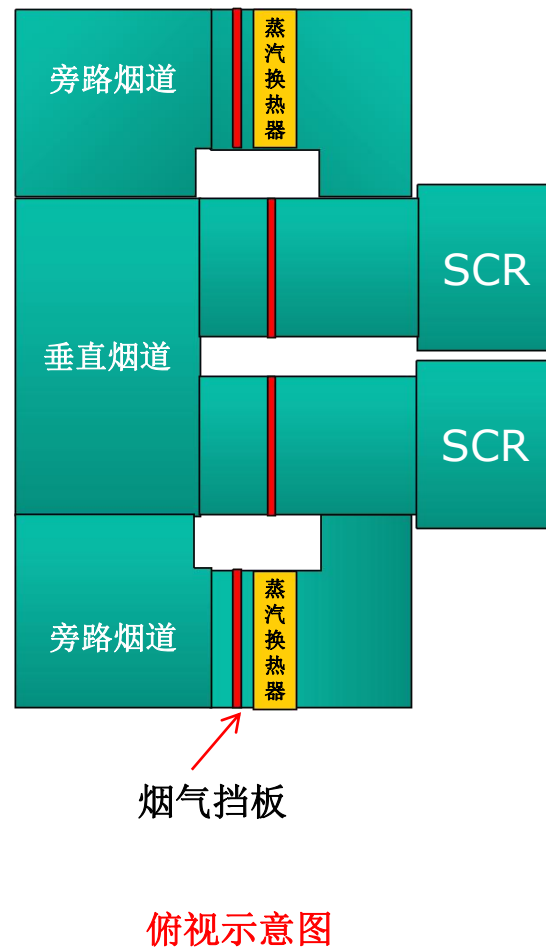
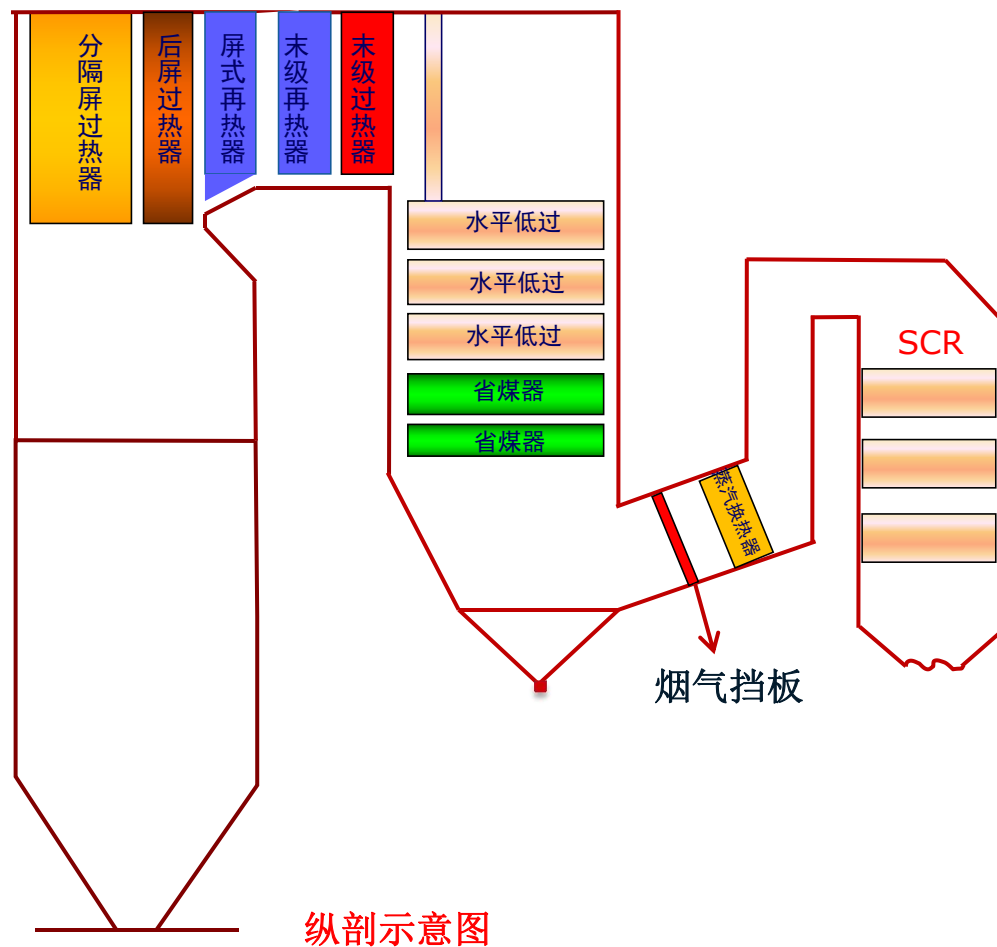
超低负荷方案2——全分级省煤器

- 锅炉超低负荷目标为15%BMCR;
- 在SCR后增加“全分级省煤器”（受热面积与原省煤器相等）；
- 与原省煤器并联布置，各省煤器前加设阀门；
- 高负荷投用原省煤器，低负荷给水切换为“全分级省煤器”，原省煤器干烧；
- SCR入口烟温低于300℃投用，保证SCR入口烟温>300℃；
- 可保证超低负荷SCR投用，但需要新布置省煤器与阀门，且占用较大的空间，增加烟道阻力，排烟温度不会升高。



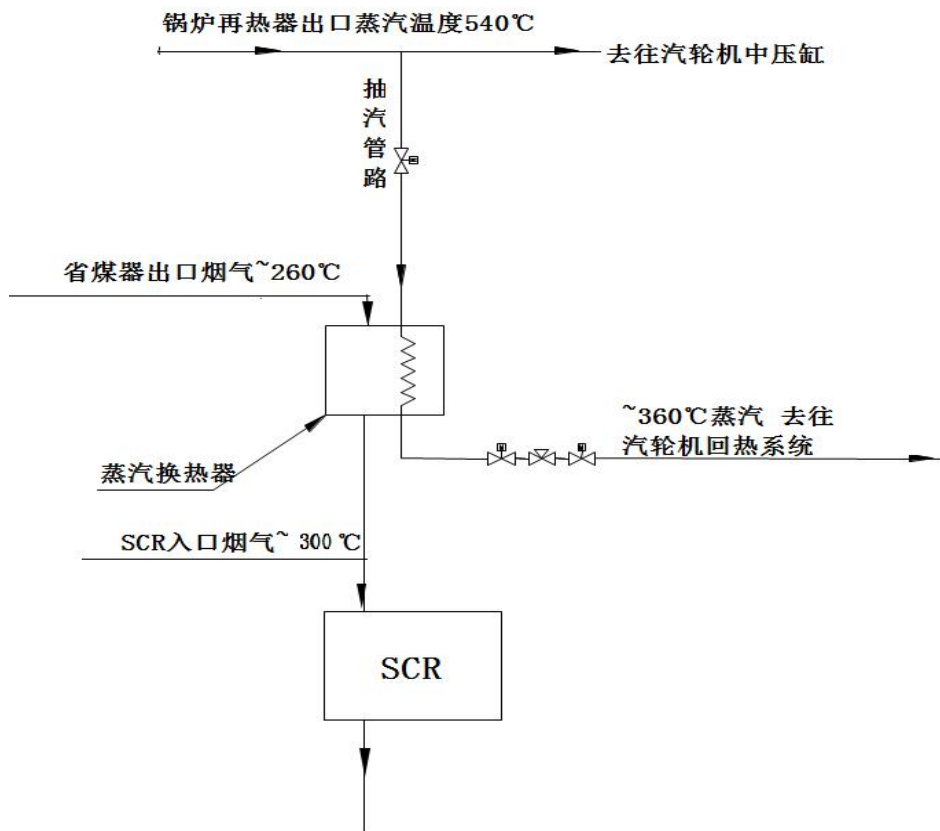
超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷方案3---蒸汽换热器



超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷方案3---蒸汽换热器



抽高温再热蒸汽系统图

优点

- 系统简单，操作方便。
- 在超低负荷时，保证SCR入口烟温 $>300^{\circ}\text{C}$ ，达到全负荷脱硝。

缺点

- 需布置换热面与相应的管路，增加烟道阻力，消耗较多的再热蒸汽热量，排烟温度会升高。
- 存在烟气挡板积灰问题。

超低负荷计算示例及方案分析

超低负荷方案4--省煤器热水再循环

原理如下：

通过热水再循环提高给水温度，减少省煤器的冷端换热温差，以减少省煤器对流换热量，使省煤器出口烟气温度提高。

系统流程如下：

下降管（或省煤器出口管道）→热水循环管道→再循环泵→循环水管道至给水管道的省煤器。

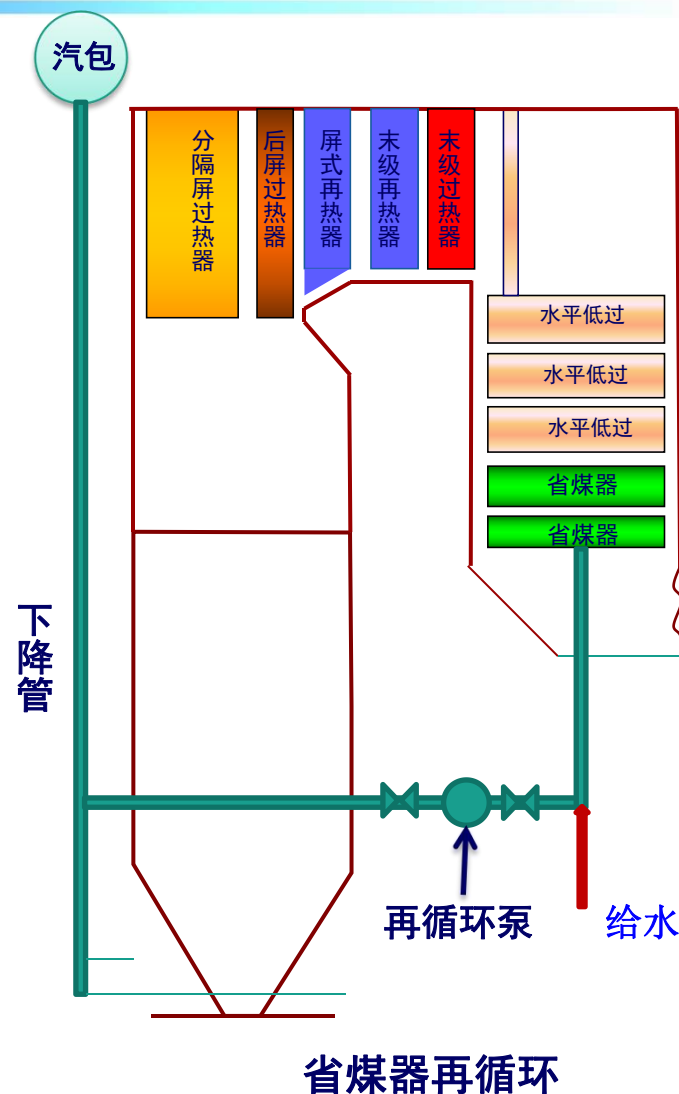
系统特点：

系统简单、调节性好、日常维护工作量小。

因包含循环泵及冷却水系统初投资高。

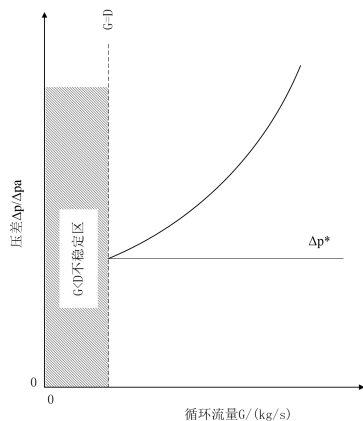
水冷壁安全性有待核算。

本方案在国外应用业绩较多，国内目前粤电沙角C1号、2号、3号等众多机组也进行了应用。



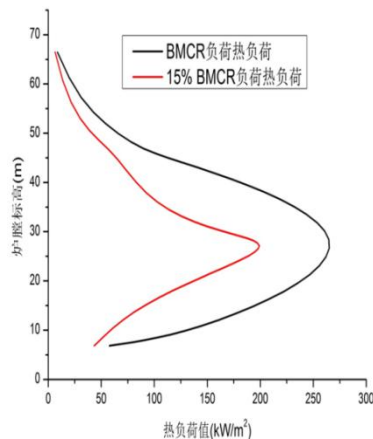
超低负荷计算示例及方案分析

低负荷水动力安全计算分析



	热力计算参数	单位	15%BMCR
亚临界锅炉 水动力计算	额定蒸发量	t/h	163.5
	汽包出口压力	MPa	8.5
	汽包出口饱和汽温	℃	299

循环停滞校核判断曲线



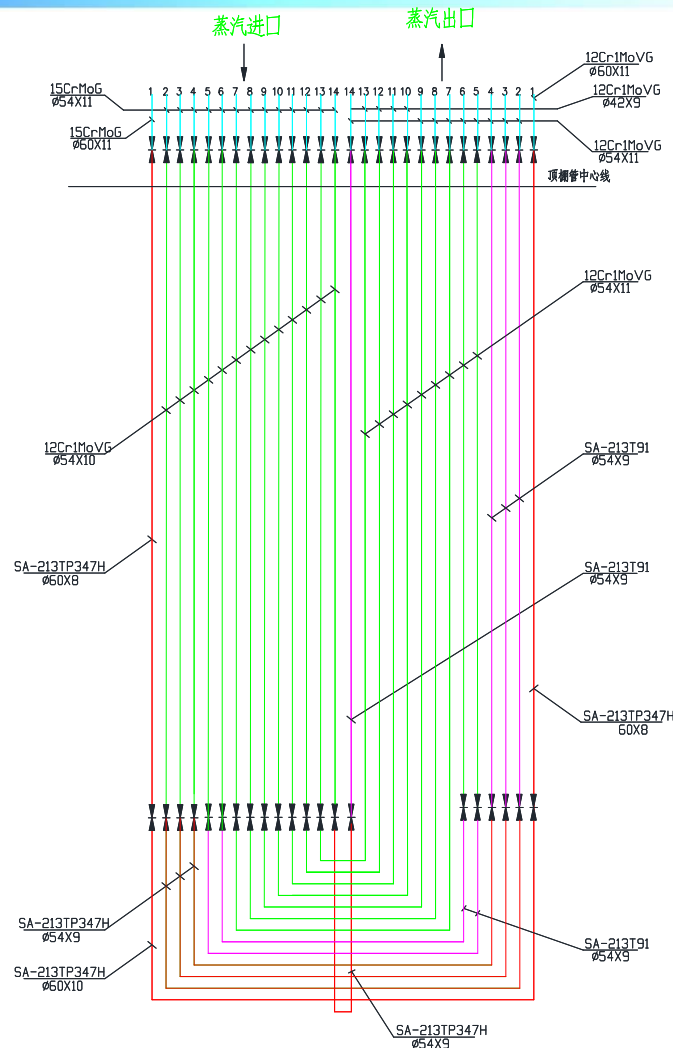
热负荷曲线对比

- **循环倍率**：在BMCR工况，整个水系统的循环倍率约为3.2~4，而计算15%BMCR负荷，安全系数较高。
- **壁温情况**：由于自然循环良好的自补偿特性，在15% BMCR负荷处回路中干度最小处的干度基本不变，远小于允许干度的要求，DNB校验结果合格。即不会发生因膜态沸腾，水冷壁管壁温度和鳍片温度都处于材料允许范围之内。
- **停滞校核**：深度调峰工况燃烧稳定时，炉内**热负荷分布均匀稳定**，不会发生停滞现象。

超低负荷计算示例及方案分析

15%BMCR屏过偏差及壁温计算校核

- **稳定工况：**金属壁温由561℃升至576℃，壁温裕量减小至6℃；
- **工况变化：**如启停磨、负荷、燃料量风量变化等；
- **材料升档：**12Cr1MoVG改为T91；
- **在线运行监测优化系统：**对受热面壁温进行实时监测，数据导入分析系统，由分析系统给出运行优化建议。



原设计

哈锅灵活性技术工作

哈锅的技术工作：

全负荷锅炉整体性能优化；

- 深度调峰技术方案优化；
- 水动力计算，受热面应力、壁温校核，换材优化；
- 厚壁元件寿命分析；
- 兼顾全负荷，不影响高负荷性能。

燃烧系统优化：

- 超低负荷稳燃措施/燃烧器；
- 保证全负荷燃烧系统性能；
- 优化控制，精细调试。

建议：设备/系统改造，需要优化全负荷整体性能。

哈锅灵活性技术工作

哈锅的技术工作：

在线运行监测优化系统：

电厂运行边界条件多变（煤质、辅机、负荷），提供优化的运行指导；

- 菜单式模式（环保、经济模式）；
- 燃烧优化调整；
- 锅炉控制优化调整；
- 锅炉故障诊断；
- 机组状态评估，预防性维护。

初步结论和工作建议

机组灵活性运行涉及锅炉及其辅助系统，如何保证锅炉本体及其辅机的长期安全、稳定运行是关键。

哈锅通过调研及计算形成锅炉灵活性改造的初步方案，

初期目标为：实现超低负荷下锅炉安全稳定运行；

最终目标：在安全稳定的同时，提升经济性：锅炉效率、污染物排放指标、机组煤耗和厂用电率；

建议针对具体项目组成工作组，进行现场摸底运行，提出若干方案，比选评审出最佳可实施方案！

诚信 高效 和谐
Integrity & High-efficiency & Harmony

联系我们 CONTACT US



哈尔滨锅炉厂有限责任公司
HARBIN BOILER COMPANY LIMITED

地 址：中国·哈尔滨香坊区三大动力路 309 号
总 机：086-0451-82198888
销 售：086-0451-82198018
传 真：086-0451-82681689
网 址：www.hbc.com.cn
邮 编：150046



哈尔滨锅炉厂有限责任公司
HARBIN BOILER COMPANY LIMITED