

玉环超超临界直流锅炉运行特点

作者：王 志 发布日期：2009-3-27 16:56:48 (阅 631 次)

关键词：锅炉 超超临界 节能环保

王 志

（华能玉环电厂，浙江省玉环县，317604）

摘 要：环境和能源是关系到我国 21 世纪可持续发展的重要战略问题，节约环保已成为全世界人民共同愿望和强烈呼声。锅炉行业为适应节约环保要求的日益提高，需要大力开展煤清洁燃烧和新发电技术的研究。为了提高能源利用效率，提高火力发电设备的可靠性、经济性和环保性，华能集团敢为人先，率先在我国发展超超临界百万千瓦机组，提高了机组热效率，降低了发电煤耗，大幅度减少了污染物的排放。本文重点介绍了玉环电厂超超临界百万千瓦机组直流锅炉的运行特点。

关键词：锅炉、超超临界、节约环保

1 锅炉概况

1.1 玉环电厂超超临界锅炉型号为 HG-2953/27.46-YM1，由哈尔滨锅炉厂有限责任公司引进三菱重工株式会社（Mitsubishi Heavy Industries Co. Ltd）技术设计制造，采用Π型布置、单炉膛、低 NO_x PM 燃烧器和 MACT 燃烧技术，反向双切圆燃烧。锅炉采用一次中间再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构，设计燃用神府东胜煤和晋北煤。

1.2 锅炉炉膛断面尺寸为 32084mm（宽）×15670mm（深），炉膛全高为 65500mm，采用内螺旋管垂直上升膜式水冷壁，并在水冷壁集箱的出口管接头安装节流圈。

1.3 采用 MHI 的 PM 型燃烧器和 MACT 燃烧系统，风粉混合物通过入口分离器分成浓淡两股分别通过浓相和淡相二只喷嘴进入炉膛，PM 主燃烧器上方增设四层 AA（附加风）喷嘴。PM 型八角反向双切圆布置的摆动燃烧器，在热态运行中一、二次风均可上下摆动，最大倾角为±30°。

1.4 过热器采用四级布置，即低温过热器（一级）、分隔屏过热器（二级）、屏式过热器（三级）和对流过热器（四级）；再热器为二级，即低温再热器（一级）和高温再热器（二级）。其中低温再热器和低温过热器分别布置于尾部烟道的前、后竖井中，均为逆流布置。在上炉膛、折焰角和水平烟道内分别布置了分隔屏过热器、屏式过热器、对流过热器和高温再热器，由于烟温较高均采用顺流布置，所有过热器、再热器和省煤器部件均采用顺列布置，以便于检修和密封，防止结渣和积灰。

1.5 过热器各段进出口集箱间的连接采取按 1/2 炉宽混合并在汇集总管上设置三级喷水减温器，每级喷水又分成左右两路。再热蒸汽温度可采用烟气分配挡板和摆动燃烧器两种方式，入口集箱前设置有事故减温喷水，总设计流量为 3.5% BMCR 工况再热蒸汽流量。

1.6 省煤器管束采用无缝光管顺列布置，管束与四周墙壁间装设防止烟气偏流的阻流板，管束上还设有可靠的防磨装置。省煤器为自疏水式，进口联箱上装有疏水、锅炉充水和酸洗的接管座，并带有相应的阀门。省煤器入口联箱（包括该联箱）至过热器出口的工质总压降不大于 3.6 MPa。

1.7 制粉系统采用中速磨正压直吹式系统，配备 6 台带动态分离器的 HP1163/Dyn 型磨煤机，BMCR 工况下 5 台运行，1 台备用。每台磨煤机出口有 4 根粉管，每根粉管分成两根分管连接至同层相邻的燃烧器，每台磨供 1 层共 8 只燃烧器。

1.8 锅炉配有两台半模式、双密封、三分仓容克式空气预热器，立式布置，烟气与空气以逆流方式换热。预热器型号为 34-VI（T）-1800-SMR，转子直径为Φ16400，传热元件总高度为 1800mm。空气预热器采用径向、轴向和环向密封系统。为防止空气预热器低温腐蚀，设有热风再循环系统。

1.9 锅炉设内置式启动系统，由启动循环泵、汽水分离器、贮水箱、疏水扩容器、疏水泵、水位控制阀、截止阀、管道及附件等组成。汽水分离器为圆形筒体结构，设计上除考虑汽水的有效分离，还考虑启动时汽水膨胀现象。

1.10 锅炉除渣采用刮板捞渣机机械除渣装置，过渡渣井采用悬挂布置。过渡渣井下部插入捞渣机，水槽内

的水封板采用不锈钢材料。

1.11 锅炉性能计算数据表

表 1：锅炉性能计算表（设计煤种：神府东胜煤）

负 荷 项 目	单位	BMCR	BRL	75% BMCR	50% BMCR	35% BMCR	高加 切 除
1. 蒸汽及水流量							
过热器出口	t/h	2953	2807	2214	1476	1033	2371
再热器出口	t/h	2446	2316	1873	1282	912	2357
省煤器进口	t/h	2953	2807	2214	1476	1033	2371
过热器一级喷水	t/h	89	84	66	44	21	119
过热器二级喷水	t/h	30	28	22	17	38	47
过热器三级喷水	t/h	89	84	66	44	38	95
再热器喷水	t/h	0	0	0	0	0	0
2. 蒸汽和水温度							
过热器出口	℃	605.0	605.0	605.0	605.0	605.0	605.0
过热汽温度偏差	℃	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0
再热器进口	℃	359.0	354.0	333.0	342.0	351.0	357.0
再热器出口	℃	603.0	603.0	603.0	603.0	576.0	603.0
再热汽温度偏差	℃	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0
省煤器进口	℃	298.0	295.0	279.0	254.0	234.0	185.0
省煤器出口	℃	322.0	319.0	306.0	288.0	277.0	241.0
过热器减温水	℃	322.0	319.0	306.0	288.0	277.0	241.0
再热器减温水	℃	179.0	177.0	168.0	155.0	143.0	179.0
启动分离器	℃	428.0	429.0	426.0	384.0	365.0	423.0
3. 空气温度（按环境温度为 20℃）							
空气预热器进口一次风	℃	29.0	29.0	29.0	31.0	32.0	30.0
空气预热器进口二次风	℃	23.0	23.0	23.0	30.0	33.0	31.0
空气预热器出口一次风	℃	309.0	305.0	286.0	274.0	263.0	247.0
空气预热器出口二次风	℃	324.0	319.0	303.0	287.0	272.0	266.0
4. 烟气温度							
炉膛出口	℃	1000.0	980.0	930.0	850.0	780.0	970.0
省煤器进口（再热器侧/过热器侧）	℃	408.0 /465.0	406.0 /459.0	393.0 /447.0	391.0 /402.0	377.0 /387.0	405.0 /454.0
省煤器出口（再热器侧/过热器侧）	℃	359.0 /369.0	354.0 /358.0	341.0 /337.0	326.0 /302.0	301.0 /287.0	304.0 /293.0
空气预热器进口	℃	364.0	359.0	342.0	320.0	297.0	302.0
空气预热器出口(未修正)	℃	129.4	127.0	115.0	108.0	104.0	108.0
空气预热器出口(修正)	℃	125.0	122.0	111.0	103.0	99.0	104.0
5. 燃料消耗量(实际)	t/h	367	345	288	203	145	341

6. 输入热量	GJ/h	8350	7850	6560	4610	3300	7760
7. 锅炉热损失							
干烟气热损失	%	4.56	4.44	4.33	4.32	4.44	3.48
氢燃烧生成水热损失	%	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06
燃料中水分引起的热损失	%	0.21	0.20	0.18	0.15	0.14	0.14
空气中水份热损失	%	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07
未燃尽碳热损失	%	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
辐射及对流散热热损失	%	0.17	0.18	0.21	0.30	0.42	0.18
未计入热损失	%	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
总热损失	%	6.04	5.91	5.80	5.84	6.06	4.84
8. 锅炉热效率							
计算热效率(按 ASME PTC4.1 和低位发热量计算)							
计算热效率	%	93.96	94.09	94.2	94.16	93.94	95.16
9. 炉膛热负荷							
截面热负荷	MW/m ²	4.59	4.32	3.61	2.54	1.81	4.27
容积热负荷	kW/m ³	82	77	65	46	33	77
10. 风率							
一次风率	%	21.7	22.7	21.9	22.7	27.2	22.9
二次风率	%	78.3	77.3	78.1	77.3	77.3	77.1
11. 过剩空气系数							
炉膛出口	—	1.15	1.15	1.23	1.37	1.50	1.15
省煤器出口	—	1.15	1.15	1.23	1.37	1.50	1.15

1.12 锅炉设计煤种和校核煤种分别为神府东胜煤和晋北煤，煤质分析数据如下：

表 2：燃煤煤质分析

名 称 及 符 号		单位	设计煤种 (神府东胜煤)	校核煤种 (晋北煤)	常用煤种 (印尼煤)
工业分析	收到基全水分 Mt	%	14.00	9.61	17.00
	空气干燥基水分 Mad	%	8.49	/	5.48
	收到基灰分 Aar	%	11.00	19.77	5.61
	收到基挥发分 Var	%	27.33	22.82	36.38
	收到基固定炭 FCar	%	47.67	47.80	41.01
收到基低位发热量 Q _{net,ar}		kJ/kg	22760	22440	22400
哈氏可磨系数 HGI			56.00	54.81	/
元素分析	收到基碳 Car	%	60.33	58.56	59.19
	收到基氢 Har	%	3.62	3.36	4.44
	收到基氧 Oar	%	9.95	7.28	11.6
	收到基氮 Nar	%	0.69	0.79	1.33
	收到基全硫 St,ar	%	0.41	0.63	0.83
灰	变形温度 DT	℃	1130.0	1110.0	/

熔 融 性	软化温度 ST	℃	1160.0	1190.0	/
	流动温度 FT	℃	1210.0	1270.0	/
灰 分 分 析	二氧化硅 SiO ₂	%	36.71	50.41	/
	三氧化二铝 Al ₂ O ₃	%	13.99	15.73	/
	三氧化二铁 Fe ₂ O ₃	%	13.85	23.46	/
	氧化钙 CaO	%	22.92	3.93	/
	氧化镁 MgO	%	1.28	1.27	/
	三氧化硫 SO ₃	%	9.30	2.05	/
	氧化钠 Na ₂ O	%	1.23	1.23	/
	氧化钾 K ₂ O	%	0.72	1.10	/

2 超超临界直流锅炉运行特点

2.1 双切圆燃烧

锅炉采用三菱开发的 PM（Pollution Minimum）型燃烧器，共分六层，配以六台 HP 型中速磨煤机，每台磨煤机出口四根一次粉管，每根一次粉管在炉前又一分为二，各带两个角。炉膛截面为矩形结构，采用无分隔墙的八角双切圆燃烧方式，全摆动式燃烧器。燃烧器采用前后墙布置，两个切圆余速相互抵消，保证了燃烧室良好的空气动力场，两侧对称点间的烟温偏差小于 50℃。炉膛出口和水平烟道沿炉宽烟速偏差不大于 20%。沿炉宽各管间热偏差系数小于 1.2。由于水冷壁按炉膛热负荷分布装设不同节流孔圈控制流量，使每根水冷壁管吸热情况基本相同，出口工质温度偏差很小。燃烧器数量增加，单只燃烧器热功率低，有效地防止了炉膛结焦。

燃烧器分布_前墙

图 1：炉膛双切圆示意图

2.2 PM 型燃烧器低 NO_x、MACT 燃烧特性

锅炉是目前应用最广泛的能源终端利用技术，也是大气中污染物排放的主要来源。燃烧过程中排放的污染物，如二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)等都会引起环境的变化。

华能玉环电厂 1000MW 超超临界锅炉采用了 MHI 的 PM 型燃烧器和 MACT 燃烧系统，有效抑制了氮氧化物(NO_x)的产生。PM 型的燃烧器见图 2，风粉混合物通过入口分离器分成浓淡二股分别通过图 2 PM 燃烧器简图

浓相和淡相二只喷嘴进入炉膛，由图 3 可以看出浓相煤粉浓度高，所需着火热量少，利于着火和稳燃；由淡相补充后期所需的空气，利于煤粉的燃尽，同时浓淡燃烧均偏离了 NO_x 生成量高的化学当量燃烧区，大大降低了 NO_x 生成量，与传统的切向燃烧器相比，NO_x 生成量可显著降低。PM 燃烧器由于将每层煤粉喷嘴分开成上下二组，增加了燃烧器区域高度，降低了燃烧器区域壁面热负荷，有利于防止高热负荷区结焦。

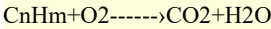
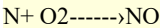
图 3 PM 燃烧器 NO_x 生成量示意图

MACT 燃烧系统，就是在 PM 主燃烧器上方一定高度增设二层 AA 风（附加风）喷嘴达到分层燃烧目的，这样整个炉膛沿高度分成三个燃烧区域，即下部为主燃烧区，中部为还原区，上部为燃尽区，这种 MACT 分层燃烧系统可使 NO_x 生成量减少 25%，MACT 燃烧技术原理见图 4。

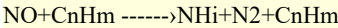
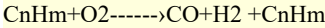
图 4 MACT 燃烧技术原理图

由于在炉膛的主燃烧区燃料是缺氧燃烧，炉膛过量空气系数为 0.85，但在燃烧器喷口附近，由于燃烧率较

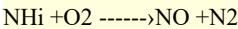
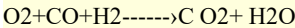
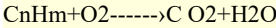
低，需要的氧量较少，因此在燃烧器喷口附近的区域内是氧化性气氛，这时燃料氮氧化后生成 NO_x，在炉膛中间的主燃烧区，空气量仅为燃烧理论空气量的 0.85，因此燃烧的过程也是一个还原的过程，主燃区的化学反应过程如下：



在燃烧器的上部通过 OFA 喷嘴加入部分空气，使进入炉膛的空气量达到理论燃烧空气量的水平，形成一个还原脱 NO_x 区，此还原区的化学反应过程如下：



在 OFA 喷口的上方，是 AA 风喷口，通过 AA 风喷口喷入炉膛的风量为总风量的 15%，在此燃尽区内的化学反应过程如下：



根据三菱公司现已运行机组经验，采用三菱公司特有的 MACT 燃烧技术，烟气排放 NO_x 含量实测值约为 270~290mg/Nm³，满足我国环保标准。

2.3 锅炉蒸汽压力高，机组热耗率低

根据不同国家，不同厂商的测算，采用常规超临界参数的机组比亚临界参数的机组其净热耗率约可下降 1.7~2.5%，而超超临界机组，根据不同的参数，将比常规超临界机组再下降 0.7~5.5%。

由于超临界机组于压力高的原因，其低压缸的排汽湿度比同样进汽温度的亚临界机组要大，玉环电厂汽轮机应用了独特的抗水蚀和抗腐蚀技术。为了满足机组主蒸汽和再热蒸汽高压力的要求，玉环工程采用了美国材料试验标准 P92 的金属材料。这种材料焊接技术要求高、难度大，而且国内没有这种金属的材料标准和焊接工艺标准。华能公司组织有关科研机构、高校和供货商、施工单位联合攻关，破解一道道技术难题，在技术上保证了工程的顺利进行。

玉环电厂锅炉过热蒸汽压力 27.46 MPa，对应汽机主汽压力为 26.25MPa，再热蒸汽压力 5.94 MPa，对应汽机中缸进汽压力为 5.56MPa，机组热耗 7316 kJ/kW.h，大大低于超临界和亚临界机组。

2.4 锅炉蒸汽温度高，机组效率提高

根据《工程热力学》原理，热力循环过程中，热源参数越高，那么工质做功的效率也就越高，蒸汽温度的提高将大大提高机组的效率，下表列举了蒸汽温度升高 10℃ 机组效率的提高情况

表 3：蒸汽温度升高 10℃ 机组效率变化表：

	主汽	一次再热汽	二次再热汽
一次再热机组	0.30%	0.25%	--
二次再热机组	0.25%	0.15%	0.15%

玉环电厂的过热蒸汽温度和再热汽温度分别为 605℃ 和 603℃，在这样高的温度下，高温过热器和再热器管的最高壁温可达到 640~650℃，只有采用热强性高、抗蒸汽氧化和烟侧高温腐蚀的新型高铬奥氏体钢才能满足要求，锅炉的三级过热器和四级过热器的蛇形管（炉内部分）均由超级 304H（ASME Code Case 2328）和 HR3C（ASME Code Case 2115）组成，前者为含铜达 3% 的细晶粒奥氏体钢，即 18Cr10Ni3Cu，后者为含铬达 25%、含镍达 20% 并含有少量铌的高铬奥氏体钢，即 25Cr20NiNb。蒸汽管道材质 P122/T122，P92/T92 也是在国内首次使用，满足了高压、高温的要求，高材质的应用满足了锅炉过热蒸汽温度和再热汽温度高的要求，使机组热效率达到了 45%，发电煤耗 272g/kW.h，供电煤耗达到 290.9 g/kW.h，达到国际先进水平，可大量节约煤炭资源。

2.5 超超临界锅炉独特的配风方式

超超临界机组配备有较好的热工自控系统，具有良好的调节性能，其中 MHI 的风箱挡板控制别具特色。

2.5.1 概述

风箱挡板由油风挡板、煤风挡板、相邻油和煤层燃烧器的辅助风挡板、过燃风挡板和附加风挡板组成。设置风箱挡板的目的是使每个燃烧器获得合适的风/煤比。风箱挡板的基本控制方法叙述如下：

2.5.2 风箱挡板的配置及控制图，见图 5：

图 5：风箱挡板的配置及控制

2.6 带启动循环泵的启动系统

对于直流锅炉来讲，在锅炉启动及直流负荷以下运行时，从水冷壁中出来的工质是单相的水或汽水混合物，因此为保证锅炉在启动及直流负荷以下的负荷运行时，能将汽水混合物分离并保证过热器中不进水，玉环电厂设置了带循环泵的启动系统满足直流锅炉的特殊要求。当机组的负荷高于其直流负荷时，启动系统串联在机组中呈干态运行，起到均衡蒸汽温度及流量的作用。启动系统示意图如下：

图 6 锅炉启动系统

采用带泵的启动系统的优点如下：在机组启动初期，可以很好的回收工质及热量，同时在机组冲洗过程中使用循环泵增加水冷壁内的工质流速，达到冲洗的效果，从而可以节省化水车间的制水能力。

3. 结束语

由于煤炭在中国一次能源结构中的主导地位，决定了在电力生产中以煤电为主的格局在未来的几十年内不会改变。在燃煤发电技术中，超超临界锅炉的发电技术秉承了常规火电机组的特点，在技术的成熟性和大型化方面优于上述其它洁净燃煤发电技术，已成为目前国内外燃煤火电机组发展的主导方向。玉环 4×100 万千瓦高效洁净节能环保超超临界机组的成功长期稳定运营，是我国火力发电技术发展的又一个里程碑，对于积累超超临界机组的设计、建设、运行、管理经验，加速设备的国产化，降低机组造价，将具有重要的意义。

玉环电厂的超超临界百万千瓦机组率先在国内投产，其经济指标将大大好于亚临界、超临界机组。我们将发挥大机组的优势，与国际先进电厂开展经济指标的对比工作，自我加压，寻找差距和不足，学习先进的管理理念和电力技术，永争国内最优，充分体现了华能敢为人先、敢为人所不能的精神。

参 考 文 献

- 1、玉环电厂超超临界锅炉技术资料，哈尔滨锅炉厂有限公司
- 2、沈邱农、柳惠龄等《超超临界火电机组技术选型研究》研究报告，2003.9
- 3、《玉环电厂锅炉性能考核报告》 西安热工院

作者简介：

王 志，男，1968 年 10 月 28 日出生于辽宁锦州，1992 年 8 月参加工作，热动、电气专业双学士学位，高级工程师职称。现工作于率先投产国内首台百万千瓦机组的华能玉环电厂，任锅炉主管。

1992 年 8 月至 2001 年 1 月，从事火力发电厂的运行工作。2001 年 1 月至 2005 年 10 月，从事国华绥中电厂 800MW 机组锅炉技术管理工作，负责超临界直流锅炉的安全与经济运行工作。在此期间，在锅炉技术领域不断刻苦钻研，努力提高自己，解决了一个又一个超临界直流锅炉运行中所遇到的难题。2002 年 7

月，被国华电力公司聘为厂级专业技术带头人。2005 年 7 月，参加指导了国华太仓电厂的国产 600MW 机组直流锅炉的调试。目前从事四台百万千瓦机组超超临界直流锅炉的运行技术管理工作。

来源：华能玉环电厂