

哈锅 1000MW 超超临界燃煤锅炉炉内还原性气氛优化试验研究

陈永生¹, 梁绍华²

(1.国电泰州发电有限公司, 江苏 泰州 225327; 2.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:某厂容量为 1000MW 的#1 机组锅炉在停炉检修期间发现燃烧器 AA 风风门和 OFA 风风门之间区域存在较严重的高温腐蚀问题, 由于高温腐蚀的发生与炉内还原性气氛的强弱直接相关, 为此进行了优化炉内还原性气氛的燃烧调整试验。试验内容包括氧量优化试验, 变 AA 风试验, 变各层二次风风门试验, 以及变整体二次风配风试验, 通过试验优化了炉内还原性气氛, 得到了机组优化运行的氧量, 同时得出保持二次风的刚性, 有利于改善炉内还原性气氛。

关键词:超超临界; 燃煤锅炉; 二次风风门; 还原性氛围; 试验研究

0 前言

随着环境问题的日益突出, 低 NO_x 燃烧器得到了广泛的应用, 水冷壁附近更容易出现局部还原性气氛, 再加上炉内空气动力场较紊乱, 燃烧气氛除了氧化性气氛与还原性气氛外, 还会出现氧化-还原交替气氛, 运行经验表明, 影响炉内水冷壁外部腐蚀的最主要因素, 是水冷壁附近的烟气成分和管壁温度, 并且还原性气氛比氧化性气氛要更具腐蚀性^[1,2]。当前, 对于炉内还原性气氛的研究已有相关文献报道^[3-6], 但对于 1000MW 容量机组的相关研究还不多见。某厂容量为 1000MW 的#1 机组锅炉在停炉检修期间, 发现燃烧器顶部 OFA 风风门与 AA 风风门之间的水冷壁区域存在严重的高温腐蚀问题, 由于炉内高温腐蚀的发生一般与该区域的还原性气氛有关^[7-9], 为优化机组运行, 减缓该区域的高温腐蚀问题, 对该机组锅炉进行了炉内还原性气氛优化试验研究, 通过试验研究与分析, 改善了该区域的还原性气氛, 提高了机组运行的安全性和稳定性, 可为相关机组的运行和设计提供技术参考。

1 设备概述

该厂#1 锅炉为三菱重工业株式会社提供技术支持, 由哈尔滨锅炉厂设计制造的 1000MW 超超临界变压运行直流锅炉。锅炉采用 Π 型布置、双炉膛、一次中间再热、低 NO_x PM 主燃烧器和 MACT 燃烧技术、反向双切圆燃烧方式, 炉膛为内螺纹管垂直上升膜式水冷壁, 循环泵启动系统; 调温方式除煤/水比外, 还采用调节烟气分配挡板、摆动燃烧器和

喷水等方式。锅炉采用平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构, 设计煤种为神华煤, 校核煤种分别为兖州煤和同忻煤。

锅炉燃烧系统采用改进型低 NO_x PM (Pollution Minimum) 主燃烧器和 MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) 型低 NO_x 分级送风燃烧系统, 采用 CUF 墙式切圆燃烧大风箱结构, 共设六层浓淡一次风口, 三层油风室, 十层辅助风室, 一层燃尽风室, 并且燃尽风室和一、二次风喷嘴均可上下各摆动 20° , 在燃烧器上部还设置了两层 AA 风。具体燃烧器结果图参见图 1。

在采用 PM 煤粉燃烧技术的主燃烧器中, 煤粉经过 PM 煤粉分离器以后, 分成了浓淡两相煤粉, 这两相煤粉又分别进入浓煤粉燃烧器和淡煤粉燃烧器。在这两种煤粉燃烧器煤粉喷嘴体内设导向板用以分隔 PM 煤粉分离器分离后形成的浓相煤粉气流和淡相煤粉气流, 在燃烧器喷口内设置有波形钝体, 该钝体与喷嘴体内导向板一起使浓、淡相煤粉气流一直保持到燃烧器出口。在出口处针对浓淡煤粉燃烧器配置不同的助燃风, 使浓淡两相煤粉及时合理地配风燃烧, 有效地控制 NO_x 的排放量。同时, 在波形钝体出口处, 形成一个稳定的回流区, 回流区中的烟气使得每个煤粉燃烧器初燃段浓淡两相得到相对分离, 并使火焰稳定在一个较宽的负荷变化范围内, 有利于保证及时着火及燃烧稳定, 同时能有效抑制 NO_x 排放。波纹钝体使得在煤粉气流下游产生一个负压高温回流区, 在此负压区中存在着高温烟气的回流与煤粉/空气混合物间剧烈的扰动和混合,

这一点满足了锅炉负荷在较宽范围变化时对煤粉点火和稳定燃烧的要求。

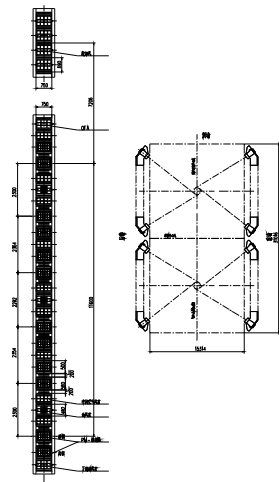


图 1 锅炉燃烧器结构图

2 试验准备与结果分析

2.1 试验准备

针对锅炉在燃烧器顶部OFA风风门与AA风风门之间区域（高度约 70m）存在的高温腐蚀问题，利用停炉期间，在该区域加装了烟气取样测点，测点开设在炉膛水冷壁前后墙中间位置，即在腐蚀最严重的区域，测孔为开设在两根水冷壁管之间鳍片上的 10mm钢管，钢管一端与炉膛内壁面平齐，这样可保护钢管不被烧坏，同时测点还包括该层的 4 个观火孔；在测试时，采用烟气预处理泵配合便携式烟气分析仪，从炉膛内壁面直接抽取烟气进行分析，分析的内容包括该测点的O₂、CO和NO_x等。对于试验安排，先对锅炉的运行现状进行测试，在此基础上，针对燃烧系统的特点，先进行运行氧量的优化，然后分别对AA风、油辅助风（油-AB/CD/EF）、辅助风 2（BC/DE/F-辅）和辅助风 1（AB/CD/EF-U/L）进行了相关调整试验，最后根据上述结论，对燃烧系统进行了总体配风试验。

2.2 运行现状与分析

为了解机组当前的运行状况，进行 1000MW电负荷下的运行现状工况试验（T-1）。在试验工况中，运行磨组为ABCDEF六台磨，采用的煤质见表 1（整个试验期间保持煤质基本一致），运行表盘氧量约为 2.51%，习惯配风方式，保持运行状况稳定。在此工况下，锅炉热效率为 93.55%，锅炉A/B两侧NO_x排放浓度为 288/261（mg/m³）。在试验期间，对炉

膛OFA风层与AA风层之间的区域炉膛水冷壁壁面进行了还原性气氛测量，从试验结果来看，当前测量区域内的还原性气氛较强，尤其是炉前测点和#5 角的CO浓度较高，均在 10000ppm以上，且#5 角含氧量还较低，此两个测点相应的过量空气系数a约分别为 1.01 和 1.00（具体参数见表 2）。根据一般的运行经验和有关文献^[2]，在燃烧器供氧不足的时候，即当过量空气系数a<1.0，CO>0.5%时，则说明该区域为强还原性气氛，这将会使H₂S大幅提升，而H₂S的存在将大大加速水冷壁面的高温腐蚀。结合试验结果来看，炉前区域和#5 角区域为较严重的高温腐蚀区域。

表 1 煤质分析结果

名称	收到基碳	收到基氢	收到基氧	收到基氮	收到基硫	收到基水分	收到基灰分	干燥无灰基挥发分	收到基低位发热量
符号	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	M _{ar}	A _{ar}	V _{daf}	Q _{net,ar}
单位	%	%	%	%	%	%	%	%	kJ/kg
数值	55.38	3.53	5.69	1.09	0.54	19.55	14.18	38.41	19972.64

表 2 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-1	O ₂	%	1.37	0.82	1.36	0.5	2.28	0.5
	a	/	1.07	1.01	1.06	1.00	1.11	1.02
	CO	ppm	449	12130	3548	10050	3154	523
	NO _x	ppm	152	32	154	55	162	55

表 3 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-1	O ₂	%	1.37	0.82	1.36	0.5	2.28	0.5
	a	/	1.07	1.01	1.06	1.00	1.11	1.02
	CO	ppm	449	12130	3548	10050	3154	523
	NO _x	ppm	152	32	154	55	162	55
T-2	O ₂	%	1.03	1.91	1.06	0.44	2.41	0.64
	a	/	1.05	1.08	1.05	1.01	1.12	1.03
	CO	ppm	67	7520	2337	6150	4366	1824
	NO _x	ppm	27	15	4	5	160	65

2.3 运行氧量优化试验

由于运行氧量的提高，能够直接改善炉内的还原性气氛，因此在运行现状测试试验的基础上，进行了氧量优化试验。从试验结果来看，将表盘运行氧量从 2.51%提高到 2.76%，NO_x排放浓度有所上升，锅炉热效率分别为 93.55%、93.41%，即锅炉热效率有所降低。从炉内还原性气氛测量数据来看（见表 3），提高运行氧量，CO浓度有所降低，炉内还原性氛围有所缓解，但是炉前测点和#5 观火孔处的CO浓度依然偏高，由于煤质条件的限制，引风机出

口风压已较高,为防止脱硫旁路烟道的开启,并综合考虑锅炉热效率、NO_x排放浓度,未进一步提高运行氧量。

因此在当前煤质条件及运行条件下,在 1000MW 电负荷工况运行时,宜将表盘显示氧量的平均值控制在 2.8%左右。

2.4 变 AA 风试验

进行了 2 个试验工况,在试验工况中,工况序号为 T-2、T-3,负荷为 1000MW,在保持运行氧量和其他条件基本一致的情况下,将两层 AA 风门开度从 75% (T-2),调整至 50% (T-3)。试验结果(表 4)表明,锅炉热效率变化不大,NO_x 排放浓度有所增大。

表 4 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-2	O ₂	%	1.03	1.91	1.06	0.44	2.41	0.64
	a	/	1.05	1.08	1.05	1.01	1.12	1.03
	CO	ppm	67	7520	2337	6150	4366	1824
	NO _x	ppm	27	15	4	5	160	65
T-3	O ₂	%	0.06	2.05	0.01	0.02	2.12	0.02
	a	/	0.99	1.09	0.99	0.99	1.10	0.99
	CO	ppm	3566	5540	3652	2813	4823	3436
	NO _x	ppm	11	22	8	50	22	94

从炉内还原性气氛测量数据来看,通过关小 AA 风门开度,除炉前测点外,测量区域 CO 浓度有所降低,尤其是炉前区域和#5 角区域的 CO 浓度有较明显降低,但过量空气系数 a 变化不大;通过关小 AA 风门,增大了下层燃烧器区域的二次风风量,有利于煤粉颗粒和可燃气体的燃尽,可弱化炉内还原性气氛。综合考虑,在满负荷条件下,将 AA 风风门保持在 50%开度左右。

2.5 变油辅助风(油-AB/CD/EF) 试验

进行了 2 个试验工况,工况序号分别为工况 T-3、T-4,负荷均为 1000MW,维持蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定。在这 2 个试验工况中,在保持运行氧量和其他运行状况基本一致的情况下,将油辅助风门开度从 50% (T-3),调整至 80% (T-4),其相应风门开度见表 5。试验结果表明,锅炉热效率分别为 93.44%、93.41%,变化不大,NO_x 排放浓度有所增大。

从炉内还原性气氛来看(表 6),将油辅助风开度开大,炉前测点 CO 浓度降低到 4950ppm,同时各测点过量空气系数 a 有所增大,但其他各点(除

#1 角外) CO 浓度均有所增大,并且浓度在 0.5%左右,说明还原性氛围有所增强,其原因是由于油辅助风风门开大,影响了二次风风门的刚性,使炉内燃烧恶化。因此,在试验煤质条件下,满负荷运行时,对于油辅助风保持在 50%左右开度即可。

表 5 变油辅助风试验工况配风方式 %

工况 序号	AB-L	油-AB	AB-U	CD-L	油-CD	CD-U	EF-L	油-EF	EF-U
T-3	50	50	30	20	50	20	20	50	20
T-4	50	80	30	20	80	20	20	80	20

表 6 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-3	O ₂	%	0.06	2.05	0.01	0.02	2.12	0.02
	a	/	0.99	1.09	0.99	0.99	1.10	0.99
	CO	ppm	3566	5540	3652	2813	4823	3436
	NO _x	ppm	11	22	8	50	22	94
T-4	O ₂	%	2.07	2.28	0.42	0.50	3.30	0.02
	a	/	1.11	1.11	1.01	1.01	1.17	0.99
	CO	ppm	64	4950	4010	5000	4020	5045
	NO _x	ppm	162	28	28	62	40	19

2.6 变辅助风 2 (BC/DE/F-辅) 试验

变油辅助风试验进行了 3 个试验工况,工况序号分别为工况 T-3、T-5、T-6,负荷均为 1000MW,在保持运行氧量和其他运行参数基本一致的情况下,将辅助风 2 门开度从 30% (T-6),调整至 50% (T-3)、80% (T-5),具体风门开度见表 7。试验结果表明,随着辅助风 2 风门开度的开大,锅炉热效率分别为 93.44%、93.38%和 93.41%,变化不大,NO_x 排放浓度有所增大。

从炉内还原性气氛测量数据来看(表 8),增大辅助风 2 的风门开度,CO 浓度有所增大,过量空气系数 a 有所减小,说明炉内还原性氛围增强,炉内燃烧状况恶化;其中,在辅助风 2 开度为 30%时,各测点过量空气系数 a 基本上在 1.0%以上,其中炉前区域的过量空气系数 a 达到 1.16,同时 CO 浓度有较明显降低(与辅助风 2 开度为 80%的工况相比较),其原因与减小辅助风 2 开度减小,有利于增强二次风的刚性,有利于炉内切圆的稳定。

表 7 变辅助风 2 试验工况配风方式

工况序号	单位	BC-辅	DE-辅	F-辅
T-3	%	50	50	30
T-5	%	80	80	80
T-6	%	30	30	30

表 8 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-3	O ₂	%	0.06	2.05	0.01	0.02	2.12	0.02
	a	/	0.99	1.09	0.99	0.99	1.10	0.99
	CO	ppm	3566	5540	3652	2813	4823	3436
	NO _x	ppm	11	22	8	50	22	94
T-5	O ₂	%	0.07	3.05	0.59	0.03	2.45	0.17
	a	/	0.99	1.15	1.01	0.99	1.12	0.99
	CO	ppm	4438	4882	6010	3421	4235	5670
	NO _x	ppm	8	30	10	8	20	12
T-6	O ₂	%	1.53	3.02	0.09	0.03	2.55	1.20
	a	/	1.07	1.16	1.00	0.99	1.13	1.06
	CO	ppm	2662	3964	1822	3850	4230	1027
	NO _x	ppm	15	30	6	17	33	50

2.7 变辅助风 1（AB/CD/EF-U/L）试验

进行了 2 个试验工况，工况序号为 T-6、T-7，在保持运行氧量和其他运行状况基本一致的情况下，将辅助风 1（AB/CD/EF-U/L）门开度从 30%（T-6），调整至 60%（T-7），具体风门开度参见表 9。试验结果表明，随着辅助风 1 风门开度的开大，锅炉热效率变化不大，NO_x 排放浓度有所增大。

从炉内还原性氛围测量数据来看（表 10），增大辅助风 1 的风门开度，CO 浓度明显增大，除炉后测点的浓度稍低于 0.5% 外，其他各测点均在 0.65% 以上，同时过量空气系数 a 有明显降低，#1、#4、#5 和 #8 角的氧量值降低到 0% 左右，说明炉内还原性氛围增强，可能导致该区域的 H₂S 浓度大幅增大，

高温腐蚀将恶化。其原因是由于辅助风 1 风门开度开大，导致二次风刚性变差，影响了炉内烟气流场的稳定性。因此在当前试验煤质下，负荷为 1000MW 时，将辅助风 1 置于 30% 开度左右。

表 9 变辅助风 2 试验工况配风方式 %

工况 序号	AB-L	油-AB	AB-U	CD-L	油-CD	CD-U	EF-L	油-EF	EF-U
T-6	50	50	30	20	50	20	20	50	20
T-7	60	50	60	60	50	60	60	50	60

表 10 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-6	O ₂	%	1.53	3.02	0.09	0.03	2.55	1.20
	a	/	1.07	1.16	1.00	0.99	1.13	1.06
	CO	ppm	2662	3964	1822	3850	4230	1027
	NO _x	ppm	15	30	6	17	33	50
T-7	O ₂	%	0	2.78	0	0	2.62	0
	a	/	0.98	1.13	0.98	0.98	1.13	0.98
	CO	ppm	6550	7120	7400	6615	4882	7340
	NO _x	ppm	8	8	7	17	32	15

2.8 整体二次风配风试验

在上述试验的基础上，进行了变整体二次风配风试验。试验工况包括 T-8~T-11。在这 4 个试验工况中，负荷均为 1000MW，保持运行氧量基本一致，4 个试验工况的配风方式分别为均布配风方式、全自动配风方式、束腰配风方式和正塔配风方式，具体配风方式参见表 11。

表 11 整体二次风配风风门开度 %

工况序号	AB-L	油-AB	AB-U	CD-L	油-CD	CD-U	EF-L	油-EF	EF-U	BC-辅	DE-辅	F-辅
T-08	55	50	55	55	55	55	55	55	55	30	30	30
T-09	30	10	30	30	10	30	30	10	30	20	20	30
T-10	70	70	70	20	20	20	70	70	70	30	30	30
T-11	80	80	80	60	60	60	20	20	20	30	30	30

从试验结果来看，正塔配风方式（T-11）时锅炉热效率最高，束腰配风方式（T-10）次之，全自动配风方式（T-9）再次之，均布配风方式（T-8）锅炉热效率最低；从 NO_x 排放浓度来看，束腰配风方式（T-10）最高，均布配风方式（T-8）次之，全自动配风方式（T-9）再次之，正塔配风方式（T-11）最低，具体参见图 2。

从炉内还原性氛围测量结果来看（表 12），以全自动配风方式（T-9）时，过量空气系数 a 基本上在 1.0 以上，同时 CO 浓度均在 0.5% 以下，这基本上能有效控制 H₂S 的产生，从而有利于抑制高温腐蚀

的发生，其炉内还原性氛围状况较好，而其他 3 个工况不论是过量空气系数 a 还是 CO 浓度，均相对要差一些，并且综合起来考虑，束腰配风方式（T-10）居其次，正塔配风方式（T-11）再次之，均布配风方式（T-8）状况最差。对比分析可以看出，保持二次风的刚性有利于改善炉内还原性氛围，这是控制炉内还原性气氛的关键，这一点在前述的试验中也已得到验证；另外，开大底层二次风的风门开度，增强启转二次风的刚性，这有利于炉内切圆的稳定，进而有利于改善炉内还原性氛围。

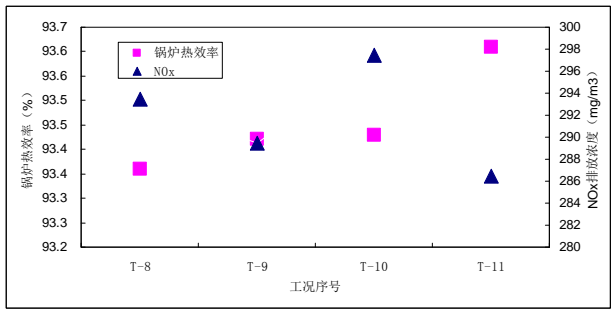


图 2 不同配风方式下的锅炉热效率和 NOx 排放浓度

表 12 炉内还原性气氛测量结果

测点	成分	单位	#1 角	炉前	#4 角	#5 角	炉后	#8 角
T-8	O ₂	%	0.03	2.67	0	0.02	3.2	0
	a	/	1.00	1.13	0.99	0.98	1.16	0.98
	CO	ppm	177	5640	3560	8050	4756	7845
	NO _x	ppm	202	41	5	4	35	7
T-9	O ₂	%	0.07	2.93	0.8	0.09	2.8	0.79
	a	/	1.00	1.15	1.04	0.99	1.14	1.03
	CO	ppm	167	4850	505	4978	4650	2440
	NO _x	ppm	30	26	107	90	32	127
T-10	O ₂	%	0.08	2.34	0.04	0.12	3.05	0.03
	a	/	1.00	1.11	0.99	1.00	1.16	0.98
	CO	ppm	2602	5325	6745	1558	4625	7450
	NO _x	ppm	23	32	32	60	40	18
T-11	O ₂	%	0.01	1.49	0.05	0.05	2.05	0.01
	a	/	1.00	1.06	0.99	0.99	1.09	0.98
	CO	ppm	2186	5600	3652	3506	4625	7880
	NO _x	ppm	9	71	16	52	55	9

因此在当前试验煤质下，负荷为 1000MW 时，从减小改善炉内还原性氛围来看，采用全自动配风方式较好；从提高锅炉热效率和降低 NOx 排放浓度来看，保持正塔配风方式较好。

3 结论与展望

(1) 提高运行氧量，有利于改善炉内还原性气氛，同时在 1000MW 负荷下，表盘运行氧量宜控制在 2.8% 左右；

(2) 在满负荷下，减小 AA 风门，同时控制油辅助风（油 AB/CD/EF）、辅助风 2 风（BC/DE/F-辅）、辅助风 1（AB/CD/EF-U/L）的开度，以保持二次风刚性，有利于改善炉内还原性气氛；

(3) 在满负荷下，正塔配风方式时锅炉热效率最高，正塔配风方式时 NOx 排放浓度较低，全自动配风方式时炉内还原性氛围状况最好。

(4) 为提高机组运行的安全性，在接下来的工作中，考虑在高温腐蚀严重的区域，加装在线测点，实时检测该区域的烟气成分，为运行提供参考。

参考文献：

- [1] 牛焱,吴维,李远士.在交替氧化-硫化气氛中 12Cr 钢的高温腐蚀[J].金属学报,2000,36(8):851-853.
- [2] 岑可法,周昊,池作和. 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,2007. 326.
- [3] 吴东垠,谷学军,许晖,等. 炉内还原性气氛的研究[J].湖北电力,2005,29(2):51-53.
- [4] 徐远鹏. 锅炉水冷壁高温腐蚀原因及对策[J].中国电力,2005,38(10):76-79.
- [5] 湛莉,李勤刚. 某燃煤电厂锅炉印尼煤掺烧高温腐蚀分析[J].腐蚀与防护,2010,31(7):548-551.
- [6] 张知翔,成丁南,边宝,等. 水冷壁材料在模拟烟气中的高温腐蚀研究[J].材料工程,2011(4):14-19.
- [7] 周新刚,苗长信. 电站锅炉高温腐蚀产生的原因及防范措施[J]. 华电技术,2010,32(1):49-51.
- [8] 马淑芬,赵宗林,白旭东. 锅炉还原性气氛结渣特性试验研究[J].东北电力技术,2005(11):7-10,25.
- [9] 王胜,辛以波. 水冷壁管高温腐蚀及冲刷分析[J]. 腐蚀科学与防护技术,2010,22(3):243-246.

作者简介：

陈永生（1962-），男，江苏镇江人，主要从事电厂节能相关的技术与管理工作。