

我国 600MW 级机组燃煤锅炉的发展

发布日期：2008-1-16 12:04:25 (阅 315 次)

关键词：锅炉 锅炉 600MW

1 基本概况

我国电站的首台 600MW 火力发电机组为元宝山电厂的 2 号机组，锅炉>锅炉是德国 Steinmiiller 公司制造的亚临界本生型直流锅炉>锅炉，燃用元宝山当地的老年褐煤，于 1985 年底投产。此后，随着国民经济的高速增长，对电力的急剧需求促进了大容量机组的发展，到目前为止，600MW 级(包括 500MW)的火力发电机组已有 17 台投入运行(见表 1)。在今后几年中还将有近 10 台这种容量的机组陆续投产。

表 1 600MW 级锅炉>锅炉统计

电 厂	容量 MW	参 数	设计煤种	燃烧方式	磨煤机	制造厂商	投产年月	元宝山 600	亚临界	元宝山褐煤	直流燃烧
											器八角布置
风扇磨	S70-45	德国	Steinmüller	1985-12	平圩	2×600	亚临界	淮南烟煤	四角切圆	中速磨	RP-1003HG-CE1998-11
											1992-12 北仑 2×600 亚临界
											晋北烟煤 1.四角切圆
											2.墙式对冲 HP-983
											MPS-89GABB-CE
											B&W1991-10
											1994-10 石洞口二厂 2×600 超临界
											神木石圪台
											烟煤四角切圆 HP-943ABB-CE
											SULZER1992-06
											1992-12 神头二厂 2×500 亚临界
											平 朔
											洗烟煤墙式对冲
											(前后墙)MPS-245 捷 克
											SKODA199207
											1993-10 哈尔滨三厂 600 亚临界
											鹤岗、
											双鸭山烟煤四角切圆 RP-1003HG1996-01 沙角 C 厂 3×660 亚临界
											神府东胜
											烟煤四角切圆 HP-983ABBCE1996-06-24
											1996-06-28
											1996-06-05 盘山 2×500 超临界
											晋北烟煤墙式对冲
											(两侧墙)ZGM-95
											中速磨俄罗斯 1995-12
											1996-05 邹县二期 2×600 亚临界
											济宁烟煤墙式对冲 FW&双进
											双出球磨 F&W1997-01
											1997-11

所有这些机组都分别代表了各供货厂商的最新水平，但在投产后的较长时期内，存在问题比较多，运行不稳定。通过建设单位的共同努力，认真调试优化，严格科学管理，使大多数都发挥了正常的设计水平，锅炉>锅炉运行效率比较高，都在 91.00 以上，最好的达到 95.25(以低位发热量为准)。只有个别外国供货商对中国的煤质特性缺乏深刻的认识，造成了严重的设计失误和重大的经济损失。在这样一个不平凡的大机组发展过程中，我国的科研、设计、制造、建设和运行管理等部门都已积累了相当丰富的经验，必将对今后大型机组的稳步发展打下良好的基础。

2 结构特点及运行状况

2.1 结构特点

在已投的 17 台 600MW 级机组锅炉>锅炉中，除元宝山电厂 2 号炉为燃烧元宝山老年褐煤之外，其余均为燃用烟煤的锅炉>锅炉。鉴于供货商的不同，采用的燃烧方式也各不相同，但主要为 2 大流派，即以 ABBCE 为代表的采用直流燃烧器、四角布置切圆燃烧方式和以 B&W 为代表的采用旋流燃烧器前后墙布置的对冲燃烧方式，神头二电厂和盘山电厂的 600MW 级机组锅炉>锅炉分别采用双蜗壳旋流燃烧器、前后墙布置和单蜗壳旋流燃烧器、两侧墙布置 方式。

CE 型**锅炉>锅炉**采用炉水循环泵的控制循环汽水系统，B&W 及 F&W 则采用自然循环汽水系统，神头二厂捷克产 500MW 亚临界机组采用全负荷复合循环系统，元宝山电厂采用本生型强制循环直流炉，超临界机组均采用强制循环直流**锅炉>锅炉**。

在采用的制粉系统中,元宝山电厂因燃用褐煤而采用德国传统的风扇磨煤机八角布置直吹系统,邹县电厂二期采用 F&W 技术的双进双出钢球磨煤机正压直吹系统。盘山电厂每台炉配置 8 台 ZGM95 型中速球磨机正压直吹系统,其余均为采用 RP、HP、MPS 型中速磨煤机的正压直吹系统。

各台锅炉>锅炉机组的设计规范及结构特性参数汇总见表 2、3 所列。

表2 600MW级机组锅炉¹⁾锅炉设计规范及结构特性参数

项	目	平	圩	哈尔滨三厂北	仓沙角 C	石洞口二厂邹	县元宝山神头二厂盘	山机组号 1、231、21、2、31、25、621、21、2	额定功率/MW	600600600600500500BMCR/t*h-1200820082008
2027210019002020183216501650	制造厂商	HGCEHGABBCEB&WABBCESulzer/CEFWECSteinmüller	捷克 SKODA	俄罗斯锅炉>	锅炉型号	HG2008/186M				
						HG2008				
					/18，2YM2CC RRRBC	FWEC2020				
					/18.101	ΠΠ1650				
250515KT	锅炉>	锅炉布置型式	Π形Π形Π形Π形Π形Π形塔式塔式 T 形主汽出口压力/MPa	18.2918.2018.20						
					18.2018.2025.4018.0718.6017.4625.00	过热汽温/℃				
						再热汽温/℃	540.6			
							540.6540.0			
							540.0540.0			
							540.0540.0			
							542.7541.0			
							569.0541.0			
							541.0545.0			
							545.0540.0			
							540.0545.0			
545.0	给水温度/℃	278.3278.3279.7	276.0275.0286.0278.9257.0255.0275.0	设计排烟温度/℃	135126130					
		131132130	140139135	设计热效率(LHV)/87.93						
		(HHV)92.0892.80	93.3387.78							
		(HHV)92.5392.5591.5090.5091.50	制粉系统 RP1003RP1003HP983							
		MPS89GHP983HP943FWD10D								
		双进球磨 S70.5								
		风扇磨 MPS245ZGM95	炉膛宽/m							
			炉膛深/m	18.542						
				16.43218.543						
				16.43219.56(19.5)						
				16.43(17.4)19.558						
				16.43318.82						

	16.5821.882
	16.95520.86
	20.8619.44
	15.323.08
13.46 炉膛水平截面/m ²	304.7321.4(339.3)321.4312.0371.0435.14297.43310.66 炉膛高度/m
	63.790
	57.20(62.32)56.99562.130 61.90057.92076.000 炉膛容积
	/m ³
	170671660715042154851610016884185511689416117 上煤粉喷口中心
	至屏底高/m
	20.1020.1016.77(19.95)16.7620.03 25.7233.5021.71 炉膛容积热负荷
	/kW.m-3
	101.099.5(149.8)
	116 (119) 112.0103.569.3576.64871.7984.0 炉膛截面热负荷
	/MW.m-2
	5.495.645.45 4.965.45.343.123.794.084.04 燃烧器区域热负荷
	/MW.m-2
	2.109 1.490 1.300 1.480 0.9670.916
注：括号内为 2 号炉数值。表 3 600MW 机组锅炉>锅炉燃用煤种及煤质分析	
项 目	平 圩哈尔滨三厂北 仑沙角 C 石洞口二厂邹 县元宝山神头二厂盘 山设计煤种淮南烟煤鹤岗 双鸭山
	晋山烟煤神府东胜神木石圪台济宁烟煤元宝山褐煤平朔洗烟煤晋北烟煤 VdAf/36.81
32.3630.0030.8541.5261.0039.3232.30	Aar/27.6128.121.1715.007.7228.7424.4137.0019.77FC/VN1.811.782.09
2.24	1.81 Qnet.ar/MJ.k-1g 20.52522.41022.55822.90019.55612.52715.91022.440(DT/ST)/°C
	1110/13001100/11901130/12101120/11501270/13501260/1330>15001110/1198

2.2 运行状况

在早期投运的机组中，几乎都经历了较长的“成长期”，通常为 3a 左右。在此期间存在的主要问题有：炉内结渣、过热器与再热器超温爆管、出力不足等，致使锅炉>锅炉机组运行很不稳定，非计划停运次数多而时间长，利用系数平均为 45~50，平均等效可用系数仅为 60~68。造成这一状况的原因是多方面的，包括设备的设计、制造、安装质量、运行操作和管理等，但在大多数情况下，最主要的还是设备(包括主要辅机设备)的设计、制造和安装质量问题。比较突出的例子如下。

最为突出的是元宝山电厂 2 号机组，它是我国首台引进的 600MW 机组，自 1985 年底投产后，运行很不正常，炉内严重结渣，负荷带不上，连续运行时间很短，直到 1993 年以前，机组最高负荷仍只能是 520MW，不得不于 1994 年 1 月 1 日起将铭牌出力改为 520MW。炉内严重结渣是锅炉>锅炉正常运行的最大障碍。通过长达 10a 的大量的设备改进、运行调整试验和加强燃烧管理等工作，直到 1997 年 9 月才通过了锅炉>锅炉额定负荷 600MW 下的 168h 运行考核试验，实属罕见。

在引进的 600MW 机组中，北仑电厂 1 号机组锅炉>锅炉在投运初期运行不稳定。在造成运行不稳定的诸多因素中，锅炉>锅炉设计欠合理及燃用煤质不适应是主要的矛盾。自首次并网发电以后，曾有再热器与过热器的爆管现象，在 1993 年 3 月发生了因炉膛内严重结渣和冷渣斗内大量堆渣而发生炉膛下部严重破坏的罕见事故。

在国产的 600MW 机组中，平圩电厂 1 号炉是国产首台按美国 CE 公司引进技术设计制造的，仅就 1989 年 11 月正式移交试生产到 1990 年 11 月期间，就曾对锅炉>锅炉进行过 2 次有计划检修和 40 次临时检修。存在的主要问题是：(1)四角燃烧器不能正常摆动；(2)过热蒸汽温度两侧偏差大，一级喷水减温调节时滞大；(3)磨煤机出力不足，煤粉细度达不到设计要求等。于 1994 年 10 月以后又多次发生锅炉>锅炉水冷壁管因横向裂纹而引起的爆管漏泄 事故。

哈尔滨第三发电厂 3 号 600MW 机组于 1996 年元月投产，在 1996~1997 年的 2a 中，平均等效可用率仅为 43.99，平均非计划停运次数为 40.56 次/(台*年)。除了汽轮机等方面的原因外，锅炉>锅炉方面的主要问题有：受热面焊口漏泄；空气预热器着火严重烧损；燃烧器摆动调节机构销子经常断裂及磨煤机等辅助设备问题。此外预热器出口风温达不到设计值(低 40~50℃)，空气预热器漏风率高及过热器系统阻力损

失大、汽温调节困难等问题还直接影响着锅炉运行的经济性。

沙角 C 电厂 660MW 机组于 1996 年 6 月投产,在同年的 7~12 月期间,曾因炉内严重结渣而被迫 8 次停炉清渣。在 1997 年内 1、3 号机组的非计划停炉次数分别为 29 次和 27 次,2 号机组的等效可用率仅为 63.94。

随着机组容量的增大,其运行可靠性对机组本身经济性及对电网的影响也越大。实际调研表明,在最近一个时期内,对大容量机组发展过程中所遇到的、人们关切的、也是比较突出的问题是炉内受热面的结渣、炉膛出口烟气能量偏差和过/再热器爆管问题。本文将在后面予以专门论述。

此外,可靠性统计资料也表明,通常在同一电厂内首台机组的运行状态较差,而随后的机组运行状态就会好得多,这充分说明,由于大型 600MW 机组在我国的发展较晚,但速度却很高,毕竟还是缺乏建设和运行管理等各方面的经验,一旦取得经验,就会有明显的改观。

3 锅炉炉膛出口烟气的能量偏差

任何锅炉炉膛出口都比较普遍地存在着烟气的能量偏差(gaseous energy imbalance)只是偏差的程度各有差异,俗称锅炉炉膛出口烟气偏差,包括烟气温度和速度(流量)的偏差。在水平烟道进口的垂直断面上,这种偏差既存在于上下方向,也存在于左右两侧方向上。其对锅炉运行的影响也随首炉的不同而千差万别,有些可能没有什么影响,有的可能影响较大,甚至诱发受热面严重结渣沾污或爆管事故。

采用直流燃烧器四角布置切圆燃烧方式的锅炉,是由于炉内强烈旋转的上升气流在到达炉膛出口处时仍有残余旋转存在,以及气流向水平方向转弯的结果,加之该处分隔屏或后屏的特定结构所造成的。

这种烟气能量偏差将会导致其后各级过热器、再热器的壁温和蒸汽温度的偏差,如果过热器或再热器的系统设计布置不当,汽侧存在的热力偏差将可能加剧这一偏差,迫使在汽温高的一侧大量使用减温水,当局部壁温长期超出金属材料耐温极限时,将会导致爆管。以平圩电厂 1 号炉试验数据为例,过热器出口最大壁温差达 87℃,最大偏差(指相对于平均壁温)为 46℃,再热器出口最大壁温差为 108℃,最大偏差达 64℃;又如北仑电厂 1 号炉 600MW 负荷时,左右平均烟温差 70℃,450MW 负荷时,最高达 96℃。

炉膛出口的烟气能量偏差也会引起高温受热面的沾污结渣,进一步影响过热器与再热器的汽温特性,甚至影响其运行的安全可靠,处理不当时,有可能导致运行事故。

这一偏差现象其实早已客观存在,过去只是因我国电站锅炉的容量比较小,过热器系统设计和金属材料的选用等方面能确保受热面金属温度不超过其允许值,长期运行而不频繁发生超温爆管事故。而近期内大量大机组的投运,有些锅炉因过热器、再热器系统设计欠合理;造成烟侧偏差与汽侧偏差相叠加,或因其选用管材的许用温度极限较低,裕度偏小,或因某些实际使用金属材料的许用温度定值不可靠,引起过热器或再热器的超温爆管,使炉膛出口烟气能量偏差影响问题突出起来,成为一个热点问题,引起了业内人士的广泛关注。

要想彻底消除这种偏差而达到非常均匀是不可能的,同时,也是不必要的。但是,设法减小这种偏差程度,有效而合理地选用各级管金属材料,设法减少或消除由此而产生的金属材料超温爆管事故是必要而又完全可能的。

为减轻炉膛出口烟气能量偏差程度,首先应从燃烧器的设计布置着手,组织恰到好处的切圆燃烧空气动力工况,尽可能减少炉膛出口处烟气的残余旋转和能量偏差。上海锅炉厂为外高桥电厂设计制造的 300MW 机组锅炉,采用 CFS II 型同心反切燃烧器系统,一次风逆时针切圆,二次风顺时针切圆布置,通过将最上层燃烬风在一次风中心线基础上再向逆时针方向偏转 25°,取得了良好的消旋作用。加上过热器与再热器系统设计的改进,例如,过热器采用 2 级喷水减温,屏式再热器与末级再热器间用导汽管进行左右交叉等,使末级过热器在主汽温度达到额定值时的最大偏差为 10~11℃,末级再热器壁温的最大偏差也仅 11℃。平圩电厂 1、2 号炉将上部二次风和顶部燃烬风反切 22°后,使烟温偏差降低约 100℃,屏式再热器及末级再热器也很少出现超温现象。北仑电厂 1 号炉进行类似的燃烧器改造后,使炉膛两侧出口烟温偏差减少了 50℃左右,过热器和再热器爆管现象也得到了明显的改观。

可见,对于直流燃烧器四角布置切圆燃烧方式锅炉>锅炉,通过一、二次风及顶部燃烬风(OFA)之间正反切圆的适当配合是可以大大减小炉膛出口烟气能量偏差的。但目前还未能达到得心应手的水平,如果反切不当,非但很难奏效,反而可能导致火焰中心上移或燃烬度降低等弊端,因此,还必须继续不断地进行深入的研究,以便更确切地掌握一、二次风正反切布置对炉内燃烧工况及炉膛出口烟气能量偏差影响的规律性。也可以看出研究开发和应用能左右摆动的喷口是必要的,届时,将可在锅炉>锅炉投运时,通过优化调整而将各个喷口设定在某个适宜的切圆位置上。

为了减少或消除过热器和再热器超温爆管事故,进行正确而合理的过热器、再热器系统设计,包括各段受热面位置的合理选择,两者受热面积的匹配以及减温器的合理配置。实践经验表明,为减小热力偏差,减少高档耐温管材的用量,各段受热面之间进行正确的交叉混合是十分必要的,但这种交叉混合应特别注意避免汽侧热偏差与烟侧热偏差相互叠加。实践也证明,在我国大型电站锅炉>锅炉过热器系统中设置2级减温器且双侧布置以及再热器的减温器单级双侧布置都是十分可取的。与此同时,在设计中选用恰当的金属材料,保证其在使用中有足够的耐温裕量,同样是确保受热面安全可靠不发生爆管事故的重要环节。

4 炉内结渣沾污

4.1 炉内结渣状况

长时期以来,燃煤锅炉>锅炉炉内的结渣沾污一直是危及锅炉>锅炉运行安全和降低可用率的主要问题,无论锅炉>锅炉容量大小,或者还是不同燃烧方式,至今还没有彻底解决,而是不同程度地存在着。随着机组容量的增大,炉膛断面热负荷和燃烧器区域热负荷相对增高,易于结渣。我国现已投运的600MW级锅炉>锅炉机组有将近半数以上的锅炉>锅炉在投产初期存在着比较严重的结渣沾污问题,造成的影响也是很大的。

4.1.1 元宝山电厂

元宝山电厂600MW机组锅炉>锅炉因严重结渣而只能长期带负荷520MW,主要原因有:(1)燃烧器设计不合理。虽然德国Steinmüller公司在设计、制造大型褐煤锅炉>锅炉方面是有丰富经验的,但对易着火、易稳燃、易结渣的元宝山老年褐煤的特性却缺乏足够的认识,错误地将燃烧器设计了过长的(1672mm)带扩展角的预混合段;选用了过高的一次风温180~200℃(国内通常为120℃);采用了较低的一次风速14.3m/s,国内经验表明16~17m/s是比较合理的。(2)燃煤特性变化。燃用元宝山地区褐煤虽然属设计煤种,但煤质特性变化很大,Aar=25~35;War=18~25;Qnet,ar=11000~15000kJ/kg;灰熔点t_l=1080~1180℃,设计煤种的t_l=1260℃。设计炉膛出口烟温为1095℃,实际运行平均在1180~1210℃,局部最高达到1300℃,均超过了灰的开始变形温度。(3)制粉系统漏风率大。设计漏风率为17,历史最好水平为<25;风扇磨煤机易磨损件的运行周期短,打击板的寿命最初仅500h,新旧磨的一次风量偏差可达20左右,引起炉内火焰偏斜,当相邻2台磨停运时,偏斜更为严重。(4)吹灰器投用率低,导致炉膛出口温度进一步提高。

4.1.2 北仑电厂

北仑电厂1号锅炉>锅炉发生“3.10”重大事故就是由炉内严重结渣引起的,而导致如此严重结渣及炉底堆积渣的主要原因有:(1)炉膛设计结构参数的选取不够合理,对属于严重结渣性的设计煤种而言,容积热负荷偏高,炉膛高度不足;(2)实际燃用煤质不稳定,灰熔点变化较大;(3)炉膛吹灰器数量少,吹灰面积不足,且运行可靠性差,利用率低。

此外,平圩电厂、石洞口二厂、沙角C电厂等也都曾发生过较严重的结渣堆渣事故,被迫数次停炉清渣。石洞口二厂在锅炉>锅炉运行中必须采取特殊的掺烧高灰熔点煤的手段,并缩短吹灰的时间间隔。盘山电厂500MW机组锅炉>锅炉燃用山西晋北烟煤,为防止炉膛出口过热器受热面结渣,设有8个热风喷嘴,送入15的热风以冷却烟气,为解决炉膛燃烧器区域结渣问题,除控制入炉煤质外,定期投用装设在两侧墙四角的8只远动工业水水力吹灰器,吹灰器可上下左右摆动120°,除渣效果十分显著。

4.2 结渣原因分析及对策

大型锅炉>锅炉机组的结渣问题至今仍在困扰着锅炉>锅炉的安全经济运行,它既是一个非常棘手又是

一个必须面对的问题。综合分析现有各厂锅炉结渣的原因及对策，必须切实注意以下几方面的工作。

4.2.1 锅炉炉膛及燃烧器的设计选型

(1)在锅炉炉膛及燃烧器的设计选型之前，首先必须深入细致地做好设计煤种和校核煤种特性的实验研究工作，鉴于当前对煤质的着火、燃烬、结渣与沾污特性尚无十分准确而又统一的评判方法或标准，宜用多种方法，从不同的角度对上述重要的煤质特性作出科学而合理的评判，并以已有的相近锅炉的运行实绩作为佐证。对此，热工研究院已进行了长达 15a 之久的研究，也就是“煤性炉型耦合系统工程”的研究，已积累了大量的数据资料和经验。

(2)在炉膛设计中对关键的结构参数的选择，如炉膛容积热负荷、断面热负荷、燃烧器区域热负荷及炉膛高度等必须以保护运行可靠性为主要目标。鉴于我国电站用煤相对变化较大，更应考虑到一些不利的因素，决不可图暂时的经济利益。在这方面，华能南京电厂 300MW 锅炉机组由于炉膛设计得比较高大而给电厂的安全与经济运行带来了诸多的方便，值得参考。

(3)燃烧器、燃烧系统及诸如吹灰器、炉底除渣装置等辅助设备的选型与设计布置也必须予以充分地考虑。在燃烧器设计中除保证及时稳定着火燃烧外，应着重防止煤粉射流火焰的贴壁和冲刷水冷壁，并设法减少炉膛出口烟气的能量偏差；选用合适的吹灰器和吹灰介质，要有足够数量的吹灰器及吹灰面积，炉底除渣设备选型应保证炉膛落渣的破碎和排出能力。

4.2.2 入厂煤的煤质特性与燃煤管理

(1)锅炉历来都是针对某个设计煤种而特定设计制造的，即使某种锅炉有较强的煤种适应性，也是相对的，而且也是有一定范围的。因此，必须燃用尽可能接近设计煤质特性的煤种，必须准确把握入厂煤的着火燃烧与结渣特性。

(2)如若不得不燃用与设计煤质特性相差比较远的煤种时，必须事先做好可行性试验研究工作。当遇到燃用低灰熔点煤而出现结渣现象时，可考虑以适当方式掺烧高灰熔点煤。

4.2.3 锅炉运行工况优化与管理

(1)锅炉机组投运后，必须进行认真细致的燃烧优化调整试验，组织合理的燃烧工况，使各燃烧器的风粉配置合理，炉内火焰充满度好而不偏斜，保证合理的煤粉细度和恰当的炉内空气过剩系数。

(2)加强对炉内燃烧工况及结渣状况的监视和检查。可根据实际情况，采取适宜的燃烧器投运方式及相应的配风工况，必要时可适当降低锅炉负荷，使已形成的结渣掉落，结渣严重时应及时停炉。

(3)对于四角切圆燃烧锅炉，必须保证燃烧器摆动调节灵活，运行中应避免燃烧器下倾过大，防止炉膛下部严重结渣，对于墙式燃烧的旋流燃烧器，应确保其各个调风挡板灵活可调。

(4)加强对吹灰器的调试和维修，确保正常而有效的吹灰，吹灰器的正常运行是保证锅炉受热面清洁的主要手段，对锅炉运行的可靠性和经济性有着切不可低估的重要作用。

5 结论与建议

5.1 我国 600MW 级电站锅炉的发展，经历了较长的“成长期”，取得了十分宝贵的经验，已开始步入成熟发展的阶段。但仍必须多方采取有力措施，大大缩短“成长期”，向国际水平努力。

5.2 大型锅炉机组的炉内受热面结渣沾污及过/再热器的爆管问题仍在影响着机组运行的可靠性和经济性，是设计、制造、安装、运行及管理各部门不得不面对而必须予以足够重视的问题，同时，实践经验表明，通过努力也是可以减轻或避免的。

5.3 大量试验研究结果和实践经验表明，炉膛出口烟气的能量偏差，通过炉膛和燃烧器设计布置的优化是可以减少的，辅以恰当的过/再热器与减温器的系统设计，加上合理选用耐温材质，超温爆管事故也是可以消除的。

5.4 煤质特性是个复杂的问题，特别是煤粉在炉内燃烧过程中的行为性状，对锅炉的运行性能有着十分重要的影响，无论对新扩建锅炉机组，还是对已有锅炉燃用煤质的变化或掺混，都必须事先进行细致的试验研究。与此同时，仍有必要继续进行“煤性炉型耦合系统工程”的深入研究，以便更好地掌握其内在规律，指导锅炉的设计选型，优化运行，以及不同煤种的掺混燃烧。

参考文献

- 1 袁颖、相大光、姚伟.炉膛选型 10 年汇编(煤性炉型耦合系统工程).西安热工研究所, 1993, 7
- 2 乐长义.华东 600MW 电站锅炉>锅炉存在的主要问题和原因分析.华东电力试验研究院, 1998
- 3 郑泽民主编.我国大型火电机组的现状与展望(上卷).电力工业部热工研究院, 1993, 7
- 4 相大光.四角燃烧烟气能量不平衡与过热器、再热器安全性的研究.电力部热工研究院, 1996, 12
- 5 许云松.哈尔滨第三发电厂 3 号机组锅炉>锅炉燃烧优化调整试验报告.电力工业部热工研究院、哈尔滨第三发电厂, 1997, 6
- 6 王春昌.沙角 C 电厂 3 号炉燃烧优化调整试验报告.电力部热工研究院、沙角发电总厂、广东省电力试验研究所, 1997, 5
- 7 锅炉>锅炉运行经验总结.盘山发电厂, 1997, 4