

W 型火焰锅炉炉内燃烧过程检测实验研究

方庆艳, 姚 斌, 江瑞宝, 周怀春

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 设计了一套用于大型燃煤锅炉炉内测温、烟气分析及颗粒取样研究的设备, 它包括水冷枪抽气热电偶、飞灰等速取样仪和烟气多功能测量分析仪。利用它对某电厂 300 MW 的 W 型火焰锅炉沿炉膛高度进行了测温、烟气分析及颗粒采样综合测试试验, 并测量了颗粒样品含碳量和粒径分布。结果表明: 炉内温度和煤粉细度都是影响煤粉燃尽率的重要因素, 当锅炉负荷大于 260 MW 时则煤粉细度成为主导因素; 该炉磨煤机出力裕度不大, 煤质变差时高负荷下煤粉急剧变粗, 机械不完全损失和化学不完全损失都增加, 是燃尽率低的主要原因。研究结果为掌握该炉燃烧特性和进行相关技术调整提供了有意义的参考信息。

关 键 词: W 型火焰锅炉; 水冷枪抽气热电偶; 烟气分析; 燃尽率; 温度; 粒度

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

1 引 言

W 型火焰锅炉燃用低挥发分贫煤和无烟煤, 在我国有广泛的应用前景, 但运行中仍存在飞灰可燃物较高、高负荷时低氧量运行、燃烧效率较差等问题。因此, 为了进行相关技术调整以提高锅炉燃烧效率, 研究和掌握 W 型火焰锅炉燃烧特性及炉内燃烧过程是必要的。文献[1~2]用水冷枪抽气热电偶对四角切圆锅炉炉内燃烧过程进行了测量研究, 但目前还没有文献针对 W 型火焰锅炉开展相关的研究工作。

本文设计了一套用于大型燃煤锅炉炉内测温、烟气及颗粒取样分析研究的设备仪器, 利用它对某电厂 300 MW 的 W 型火焰锅炉沿炉膛高度进行了测温及气体、颗粒综合测试试验, 对试验结果进行了详细分析。

2 试 验

2.1 实验设备

实验设备由 3 个部分组成: 水冷枪抽气热电偶、飞灰等速取样仪和烟气多功能测量分析仪。水冷枪

抽气热电偶由热电偶元件、遮热罩及水冷抽气套管组成, 它与二次仪表及抽气系统组成整套的抽气热电偶高温计。抽气热电偶的工作原理是利用遮热罩把热电偶的工作端从其环境中屏蔽开来, 并用抽气的方法提高烟气对热电偶和遮热罩的冲刷速度, 增加其对流放热系数, 减少热电偶的辐射放热损失, 减少测量误差, 其系统图见图 1。颗粒采样和烟气分析系统图如图 2 所示, 可以同时采集炉内颗粒, 并进行烟气成份分析(CO_2 、 O_2 、 CO 和 SO_2)。整套设备现场试验工作系统示意图如图 3 所示。

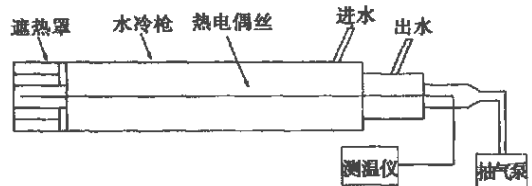


图 1 水冷枪抽气热电偶系统

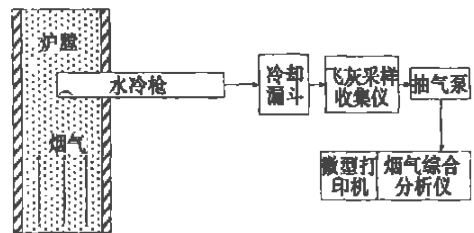


图 2 颗粒采样和烟气分析系统图

2.2 现场试验

在 W 型火焰锅炉上沿炉膛高度方向选取了 4 个看火孔作为测点, 测点位置如图 4 所示。1 号测点位于着火区, 2 号测点位于燃烧区, 3 号测点位于燃尽区, 4 号测点位于锅炉尾部折焰角。试验时, 测温点离水冷壁距离为 1.0 m 左右。试验中, 分别对

200~230 MW、260~280 MW 及 300 MW 负荷工况进行了测试, 结果见表 2, 还采集了入炉煤样、飞灰及炉渣样品。

2.3 实验室分析

入炉煤样元素分析和工业分析结果见表 1。用工业分析仪测量了炉内颗粒样品含碳量, 并用灰平衡法计算了燃尽率, 用英国 Malvern 公司的 MAM5004 型激光粒度分析仪分析了炉内颗粒样品粒度分布, 用马弗炉测量了飞灰和炉渣含碳量。

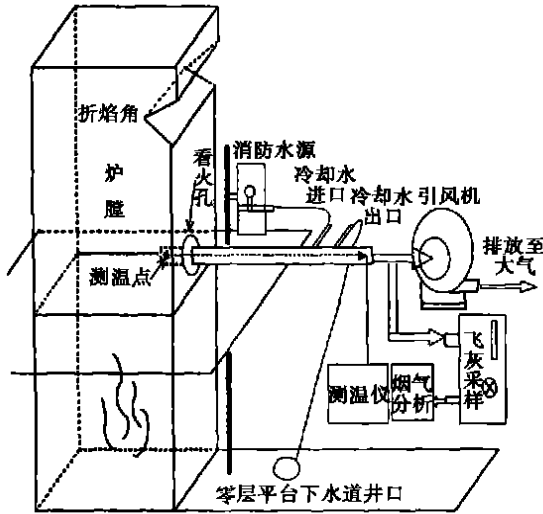


图 3 现场试验系统示意图

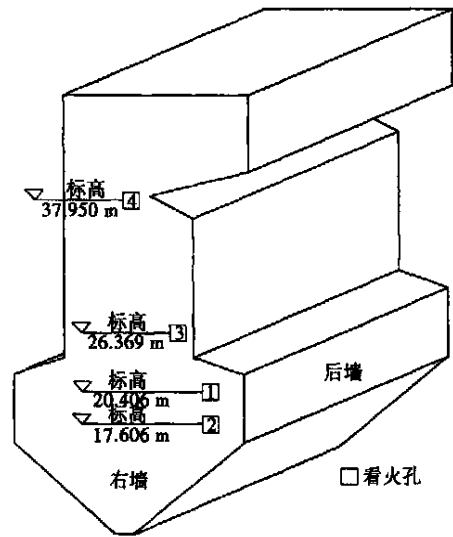


图 4 试验测点位置示意图

3 结果及讨论

该 W 型火焰锅炉是美国 Foster-Wheeler 公司生产的自然循环燃煤汽包炉, 配 4 套 D-10D 双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统, 煤粉细度随磨煤机出力几乎呈线性变化。煤样 1 为表 2 中工况编号 1~6 时使用煤种, 煤样 2 为工况编号 7 时使用煤种。

表 1 锅炉设计煤种及试验中入炉煤样元素和工业分析

	工业分析/%				元素分析/%					发热量 $Q_{\text{re.l. ar}}$ /kJ·kg ⁻¹
	V_{daf}	M_{ar}	A_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}	
设计煤种	11.0	8.30	22.98	57.72	60.17	2.680	0.670	4.920	0.280	22 553.0
入炉煤 1	39.21	8.60	44.01	28.87	41.85	2.150	0.635	1.768	0.987	16 075.0
入炉煤 2	29.20	9.00	31.15	42.65	54.09	2.080	0.717	1.863	1.096	19 135.0

表 2 测温、烟气分析及颗粒燃尽率结果

测点 (标高/m)	编号	负荷/MW	热电偶温度/K	烟气分析仪读数				燃尽率/%
				O_2 /%	SO_2 /mL·m ⁻³	CO /mL·m ⁻³	CO_2 /%	
1号(20.406)	1	200	1 373	—	—	—	—	92.57
	2	230	1 283	—	—	—	—	88.04
	3	260	1 163	15.4	82	50	3.1	86.79
	4	270	1 293	14.7	76	30	5.6	78.70
2号(17.606)	5	270	1 391	12.3	52	18	7.0	93.15
3号(26.369)	6	280	1 323	10.2	13.5	20	7.8	92.19
4号(37.950)	7	300	1 288	8.7	24	47	8.3	90.22

3.1 温度分布

从煤粉气流运动方向来看, 煤粉气流进入炉膛后在向下运动过程中, 受到来自炉内的高温烟气的回流和辐射加热, 煤粉迅速升温着火; 随之进入燃烧区迅速燃烧放出大量的热, 同时由于下炉膛四周敷设了

卫燃带, 炉内温度快速升高; 随着煤粉进一步的燃烧, 进入上炉膛燃尽区, 由于水冷壁的吸热和煤粉燃烧速率下降, 炉内温度开始降低, 直到炉膛折焰角处, 温度最低。图 5 表明, 尽管负荷不同, 但是沿煤粉气流运动方向的温度分布仍呈现 W 型火焰锅炉燃烧特点。图 6 为 1 号测点不同负荷下的测量温度, 可以看出, 随着负荷升高而温度逐渐降低; 当负荷进一步升高时, 温度又慢慢升高。负荷 200 MW 时的温度比 260 ~ 270 MW 温度要高 80 ~ 110 K, 负荷 230 MW 时的温度与 270 MW 时的温度基本相等。原因是负荷增加, 给煤量增加, 煤粉气流流量增加, 流速增加, 着火热增加, 着火燃烧滞后, 温度降低; 当负荷进一步增加时, 炉膛整体温度升高, 对处于着火区的煤粉气流回流和辐射加热加强, 温度又会升高。

3.2 烟气分析

图 7 中烟气分析结果表明, 沿煤粉气流运动方向 O_2 、CO 含量逐步降低, CO_2 含量逐步升高, 说明煤粉逐步燃烧的过程。数值变化趋势说明, 煤粉着火

以后迅速燃烧; SO_2 含量逐步降低, 说明燃烧生成的 SO_2 逐步被氧化。4 号测点 SO_2 含量高于 3 号测点是因为负荷升高, SO_2 生成量增加, CO 含量高于 3 号测点说明负荷高时, 化学不完全燃烧损失增加。

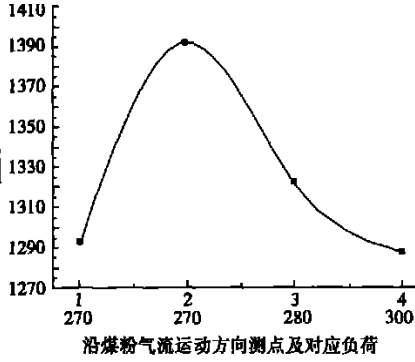


图 5 沿煤粉气流运动方向不同测点的测量温度

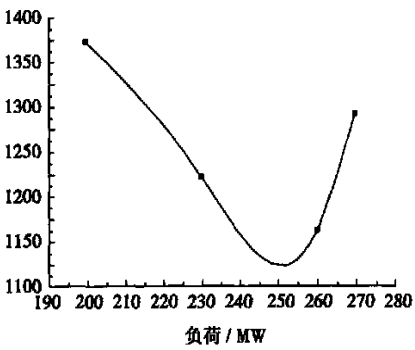


图 6 1 号测点不同负荷下的测量温度

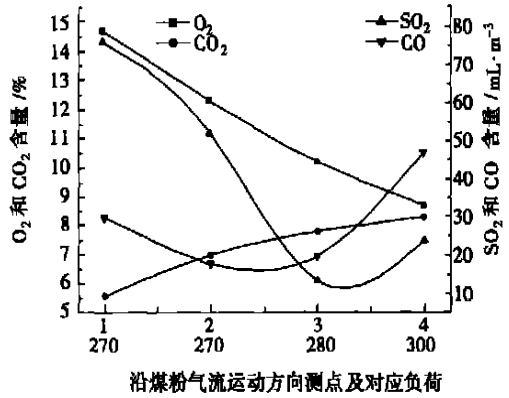


图 7 沿煤粉气流运动方向不同测点烟气分析结果

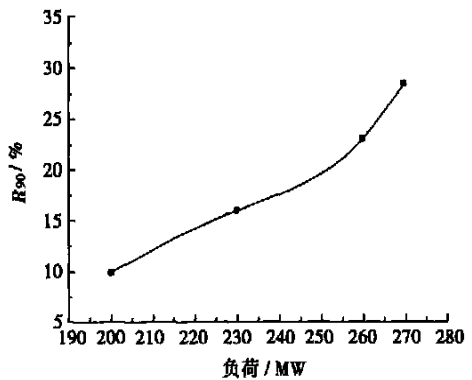


图 8 1 号测点不同负荷下的颗粒粒度

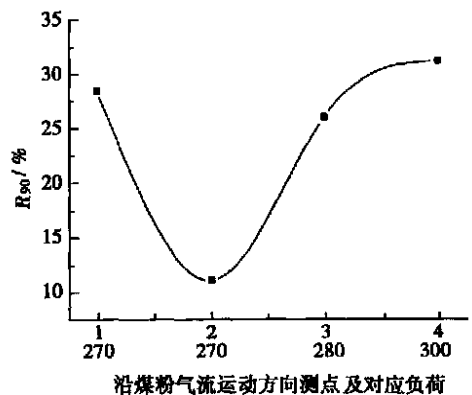


图 9 沿煤粉气流运动方向不同测点的颗粒粒度

3.3 颗粒粒度

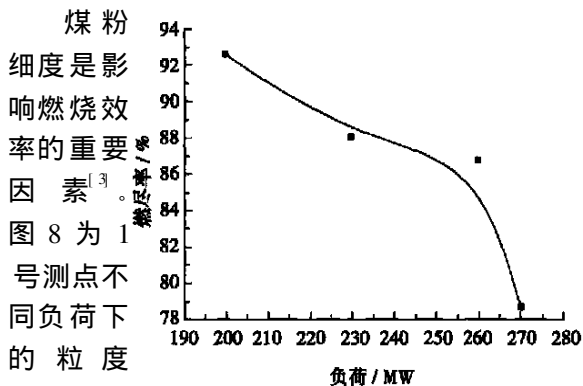


图 10 1 号测点不同负荷下的燃尽率

煤粉细度是影响燃烧效率的重要因素^[3]。图 8 为 1 号测点不同负荷下的粒度 (R_{90}) 分布, 随着负荷的升高, 颗粒粒径变粗, 说明磨煤机出力增加, 煤粉变粗。分析图 9 中沿煤粉气流运动过程粒度表明, 煤粉颗粒粒径随燃烧的进行逐渐

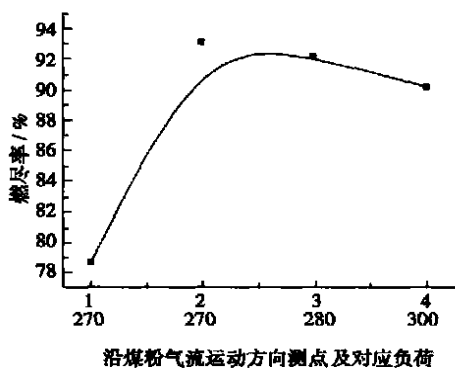


图 11 沿煤粉气流运动方向不同测点的燃尽率

减小。3 号和 4 号测点粒度增加表明高负荷下燃用试验煤种 1 和 2 时磨煤机出力增加, 煤粉急剧变粗, 偏离设计值。燃烧试验证实^[1], 磨煤机出力裕度不大, 煤质变差时高负荷下出力增加, 煤粉变粗, 这是该炉高负荷下燃尽率低的主要原因。

3.4 颗粒燃尽率

由图 10 可以看出, 1 号测点处颗粒燃尽率随着负荷增加而逐渐降低, 这与图 8 中 1 号测点不同负荷下的颗粒粒度分布趋势正好相反, 也说明了煤粉细度对燃尽率的重要影响。同时由于负荷增加, 煤粉气流速度增加, 煤粉颗粒在燃烧器出口到 1 号测点之间停留时间减少, 也使燃尽率降低。结合图 6 中 1 号测点不同负荷下的温度分布表明炉膛温度对燃尽率的重要影响。在测量负荷内, 当负荷小于 260 MW 时, 温度降低, 颗粒燃尽率随之降低; 当负荷大于 260 MW 时, 温度升高, 燃尽率仍然降低则说明

此时煤粉细度是燃尽率的主导因素。试验煤种挥发分较高, 着火和燃烧提前, 因此各负荷下燃尽率均较高。分析图 11 表明沿煤粉气流运动方向煤粉颗粒燃尽率变化也与图 9 中不同测点的颗粒粒度分布趋势相反; 1 号和 2 号测点颗粒燃尽率分别为 78.70 和 93.15, 说明颗粒逐步燃尽, 燃尽率增加; 3 号和 4 号测点颗粒燃尽率为 92.19、90.22, 低于 2 号测点, 如前所述, 主要因为磨煤机出力裕度不大, 煤质变差时高负荷下出力增加, 煤粉变粗, 机械不完全燃烧损失增加。比较各测点的燃尽率表明, 煤粉进入炉膛在下行过程中着火后迅速燃烧掉大部分可燃质, 之后煤焦由于经历了高温热煅烧导致反应性降低和灰层对氧扩散的阻碍, 燃烧速率减小, 燃尽时间延长^[4]。

4 结 论

- (1) 煤粉颗粒进入炉膛后在下行过程中迅速着火燃烧掉大部分的可燃质, 之后煤焦燃烧速率由于反应性降低和灰抑制作用而降低, 燃尽时间延长;
- (2) 燃用试验煤种 1 和 2 时, 在测量负荷内着火区温度在负荷小于 260 MW 时随着负荷增加而降低, 当负荷大于 260 MW 时又会随负荷增加而升高;
- (3) 炉膛温度和煤粉细度都是影响煤粉燃尽率的重要因素, 当锅炉负荷大于 260 MW 时则煤粉细度成为主导因素;
- (4) 磨煤机出力裕度不大, 煤质变差时高负荷下煤粉急剧变粗, 机械不完全燃烧损失和化学不完全燃烧损失都增加, 是燃尽率低的主要原因。所以在设计同类型锅炉时, 要充分考虑实际运行中煤质的变化, 选取充裕的磨煤机出力裕度, 以得到合理的煤粉细度, 提高锅炉运行经济性。

参考文献:

[1] 蒋持志, 朱皓强, 赵华庭. 极低挥发分无烟煤在电站锅炉炉膛中燃烧过程的微观分析[J]. 东南大学学报, 1991, 21 (1): 107-111.

[2] HWANG YUHLONG. Three-dimensional model studies of a pulverized coal corner-fired utility furnace and comparisons with local furnace data and boiler exhaust NO_x [D]. Austin: The University of Texas, 1997.

[3] 姜秀民, 杨海平, 刘 辉, 等. 煤粉颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (12): 142-145.

[4] ROBERT HURT, SUN JIAN KUAN, MELISSA LUNDEN. A kinetic model of carbon burnout in pulverized coal combustion[J]. *Combustion And Flame* 1998, 113: 181-197.

chanical and chemical incomplete combustion losses. The latter is the main cause of a low burn-out rate. The authors' study results may offer significant reference data and information for understanding the combustion characteristics of the above type of boilers and conducting relevant technical adjustments. **Key words:** W-shaped furnace, water-cooled gun suction thermocouple, flue gas analysis, burn-out rate, temperature, particulate size

激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量 = **The Measurement of Carbon Content in Fly Ash by Laser-induced Breakdown Spectroscopy** [刊, 汉] / WU Ge, LU Ji-dong, YU Liang-ying, et al (National Key Laboratory for Coal Combustion Under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 365 ~ 368

The theory of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and its present status of application potential are described and the measurement of carbon content in fly ash by using this method and results of analysis presented. The rank of coal selected is Jiaozuo anthracite. By a method of rapid incineration fly ash samples with carbon content ranging from 0.5% to 7.0% were obtained. The measurement of carbon content in fly ash by using LIBS technique was compared with the carbon content in fly ash samples measured through the use of traditional weight combustion method. The results of the two measurement methods are in very good agreement. **Key words:** laser-induced breakdown spectroscopy, plasma, calibration, carbon content of fly ash

降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的理论及应用 = **The Theory of the Reduction of Fly-ash Carbon Content in a Circulating Fluidized Boiler and Its Applied Research** [刊, 汉] / QIU Yan, TIAN Mao-cheng, CHENG Lin (Institute of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, post Code: 250061), NIU Wei-ran (Thermal Energy Research Institute under the Shandong Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 369 ~ 372

First, from the viewpoint of combustion an analysis was conducted of the main factors which may influence the carbon content of fly ash in a circulating fluidized bed boiler. Then, in the light of the high carbon content of fly ash during the practical operation of a HG-465/13.7-L PM 7 circulating fluidized bed boiler the impact of coal quality and operating parameters on fly-ash carbon content was ascertained by an analysis on the basis of theoretical investigation in conjunction with on-site tests. The test results have been used to guide boiler operation, resulting in a reduction of fly-ash carbon content from the original 18% to 12%. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, carbon content of fly ash, combustion adjustment

回流式循环流化床烟气脱硫的工程试验研究 = **Experimental Study of the Flue Gas Desulfurization Project of a Reflux Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / HAN Xu, YAO Guang-yi, LI Rui-xing, et al (Wuhan Kaidi Electric Power Co. Ltd., Wuhan, China, Post Code: 430070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 373 ~ 376

At Yinchuan Thermal Power Plant an experimental investigation was conducted on boiler No.5 (150 t/h) involving the flue gas desulfurization plant for a reflux type circulating fluidized bed (CFB) with a semi-dry method of CFB desulfurization technique being employed. The designed flue gas quantity being treated on the desulfurization plant is 160,000 m³/h. Inside the desulfurizer and at its top employed is a special reflux construction design. With the realization of internal circulation of materials inside the desulfurizer the concentration at the inlet of dust removal device has been reduced. Through industrial tests studied was the impact of calcium/sulfur ratio and water spray rate on the efficiency of the system desulfurization. Test results indicate with the calcium/sulfur ratio being 1.3, temperature and concentration inside the desulfurizer respectively at 70 °C and 800 g/m³ the system desulfurization efficiency can reach 90%, dust emission concentration is 80 mg/m³ and the desulfurization system resistance less than 1.5 kPa. **Key words:** reflux type, circulating fluidized bed, flue gas desulfurization, desulfurization efficiency