

# 水煤浆燃烧飞灰含碳量的影响因素及控制

俞海森, 赵 翔, 曹欣玉

(浙江大学 能源清洁利用与环境工程教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 水煤浆是一种很有市场潜力的清洁燃料, 控制飞灰含碳量是非常重要的。本文通过对茂名热电厂 25<sup>o</sup>C 炉燃烧水煤浆试验, 针对飞灰含碳量大小影响因素进行分析, 具体从水煤浆燃料的浓度、雾化状况、燃料特性、燃烧方式、锅炉负荷、空气过量系数等方面进行分析。

**关 键 词:** 水煤浆; 飞灰; 含碳量; 燃烧; 雾化

中图分类号: TQ534.4 文献标识码: A

## 1 引 言

水煤浆作为一种清洁燃料, 具有很好的市场潜力。但是飞灰含碳量大小仍是值得我们关注的, 从锅炉燃烧效率来说, 当飞灰含碳量增大将导致机械未完全燃烧损失  $q_4$  上升, 燃烧效率下降。此外还将增加锅炉受热面和尾部烟道受热面的磨损。因此, 对于燃烧水煤浆锅炉, 如何控制飞灰含碳量及其影响因素是重要的, 通过对茂名热电厂 2 号炉燃烧水煤浆改造试验, 针对飞灰含碳量大小影响因素进行分析, 提出有效的措施, 结合实际进行分析。

## 2 锅炉和水煤浆燃烧器

茂名 2 号炉为前苏联 T·K·3 制造的 TИ-15A 型 220 t/h 锅炉, 原设计为燃煤锅炉, 1968 年 1 月改烧重油。锅炉系单汽包自然循环锅炉, 整体呈  $\Pi$  型布置, 采用煤粉悬浮固态排渣方式, 炉膛为矩形, 其尺寸为 9.852 m  $\times$  7.1 m。四壁布满水冷壁管, 炉膛出口布置屏式过热器和凝渣管, 炉顶和水平烟道顶部布有顶棚过热器, 高温和低温两级过热器, 减温器布置在低温与高温级过热器中间, 减温方式为给水(原设计为自制冷凝水)喷水减温。尾部烟道内间隔布置两级省煤器和两级管式空气预热器。

燃烧器共分五层(见图 1)。依次自下而上第一层为下二次风喷口, 第二、三、四层为水煤浆和油两

用燃烧器, 各布置中心风和一次风, 同时侧面布置有侧二次风, 第五层为上二次风喷口。四角共布置 12 只燃烧器, 燃烧水煤浆或油在 100% 负荷时, 投用 10 只吸燃烧器。喷嘴采用 3 t/h 撞击式多级雾化水煤浆喷嘴或 1.25 t/h 油喷嘴<sup>[1]</sup>。

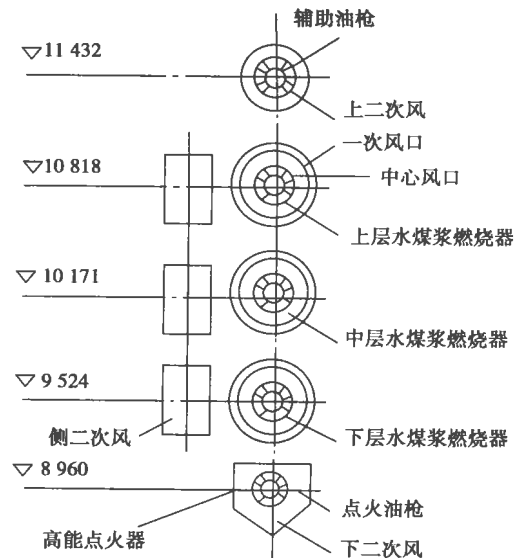


图 1 2 号炉燃烧器示意图

## 3 水煤浆燃烧机理

水煤浆含水量大, 在加热干燥阶段水分先蒸发, 蒸发过程中水煤浆中的煤粉颗粒发生结团现象, 随后水煤浆滴发生爆裂, 形成多孔结构的焦颗粒。挥发份首先析出着火, 随后焦炭着火燃烧, 直至燃尽。由于含有大量水份, 焦炭颗粒爆裂表面形成大空穴或碎片状, 燃烧不仅在表面进行, 还在多孔焦炭颗粒内部进行。此外, 水蒸汽对焦炭的反应起了催化作用<sup>[2]</sup>。水蒸汽扩散到碳粒表面与碳发生气化反应生成 CO, 使得碳与氧的多相反应变为 CO 与氧的单相反应。方程式如下:



水煤浆燃烧未燃尽碳形成原因是水煤浆雾化液滴的平均直径比煤粉颗粒大, 在加热和挥发份析出过程中, 二次分离破碎和结团现象同时存在, 结团形成的焦炭粒子明显比煤粉焦炭粒子大。影响飞灰含碳量的因素有许多, 由于水煤浆燃料含有大量水份, 因此它的燃烧特性及飞灰含碳量的影响因素与煤粉燃料有所不同。水煤浆燃料的浓度, 雾化状态, 燃料特性, 燃烧方式, 锅炉负荷和空气过量系数等都能影响飞灰含碳量。

## 4 飞灰含碳量的影响因素分析

### 4.1 水煤浆浓度

水煤浆浓度大小即含水量多少, 对燃烧关没有本质的影响, 但水分的存在导致水煤浆着火温度低于制浆原煤的着火温度。其原因是水煤浆滴在水分蒸发后形成多孔结构的干燥粒, 此时比表面积很大, 致使析出挥发份的速度和数量都增加, 因此水煤浆更容易着火。为什么水煤浆燃料比煤粉颗粒燃烧后飞灰含碳量低? 主要因为水份蒸发后水煤浆滴形成多孔结构, 不仅增大了粒子的比表面积, 而且减弱了颗粒内部反应的各种阻力, 在高温回流烟气作用下水份蒸发过程中发生爆裂现象, 形成颗粒表面的大空穴或碎成几个小块, 进一步增大了粒子的比表面积, 促进水煤浆颗粒的着火, 增加挥发份和焦炭的反应速度。此外, 在高温烟气回流区, 水蒸气和炭的反应, 使炭的两相反应转换为气相反应, 有利于完全充分燃烧。

然而水煤浆中大量水份需要吸收汽化潜热将推迟着火以及在蒸发过程中发生结团现象对燃烧不利。因此, 水煤浆的浓度不宜过低, 目前国内水煤浆浓度一般在 65%~70%, 茂名热电厂为 66%。

### 4.2 雾化状况

水煤浆雾化状况对燃烧有很大影响。水煤浆液滴雾化越好, 浆滴直径就越小, 则燃烧越容易。不言而喻, 浆滴直径越小, 着火时间越短, 燃烧更充分, 则飞灰含碳量就小。茂名电厂水煤浆雾化是通过蒸汽压力大小来控制, 合理的汽压浆压比很重要。当雾化汽压升高后, 水煤浆滴更细小, 整体雾化效果好, 此时雾炬着火距离变短且根部回流区温度升高, 有助于更快着火及更好燃尽, 因此有效增加雾化汽压可以降低飞灰含碳量。通过对 1 号角和 4 号角中下

排燃烧器试验我们可以发现, 当适当提高雾化汽压, 雾炬根部提高了几十度, 着火距离变短。这对燃烧显然是有利的。试验数据见表 1。

表 1 雾化汽压变化影响试验

	雾化汽 压/MPa	着火距 离/mm	雾炬根部 温度/℃	浆压 /MPa	
1 号中排燃烧器	1.02	700	887	1.00	
	1.20	600	901		
1 号下排燃烧器	1.06	600	877		
	1.14	400	920		
4 号中排燃烧器	1.00	400	980		0.92
	1.14	350	1062		
4 号下排燃烧器	1.02	500	961		
	1.15	400	971		

### 4.3 燃料特性

水煤浆的燃料特性对飞灰含碳量和燃烧效率的大小也有一定的影响。通过额定负荷茂名热电厂 220 t/h 炉燃用兖日水煤浆和山东白杨河电厂 230 t/h 炉燃用八一水煤浆的工业试验结果比较, 可以看出水煤浆燃料特性的重要性。燃料特性和试验结果见表 2 和表 3。对比两种煤浆, 从表 3 可知, 兖日水煤浆的氧量与含炭量之比大于八一水煤浆, 而其飞灰含炭量要低一些, 燃烧效率略高些。燃料中挥发份大小对着火温度和着火时间也有影响, 含碳量与挥发份之比越大, 燃烧效率越低, 飞灰含碳量越大<sup>[3]</sup>。兖日水煤浆由于 O/C 比高、C/V 比低, 其飞灰含炭量要低于八一水煤浆, 燃烧效率也要高一些。因此, 为降低飞灰含炭量, 水煤浆燃料可有效提高 O/C 比, 减小 C/V 比。

表 2 燃料特性

	C <sup>y</sup> /%	H <sup>y</sup> /%	O <sup>y</sup> /%	N <sup>y</sup> /%	S <sup>y</sup> /%	V <sup>y</sup> /%	A <sup>y</sup> /%	W <sup>y</sup> /%	Q <sub>hw</sub> <sup>y</sup> /kJ·kg <sup>-1</sup>	浓度 /%
兖日水煤浆	50.17	3.22	5.67	0.96	0.27	22.56	5.42	34.29	18 892	66.71
八一水煤浆	47.90	3.07	3.80	0.89	0.83	20.15	5.91	37.60	17 605	62.40

表 3 满负荷燃烧试验结果工况

	O/C 比	C/V 比	飞灰含量/%	燃烧效率/%
兖日水煤浆	0.113	2.22	5.13	99.51
八一水煤浆	0.079	2.38	8.46	98.99

### 4.4 锅炉负荷

在锅炉负荷变化情况下, 也会造成飞灰含碳量的变化。通过对茂名热电厂 2 号炉 40% 负荷与满负荷的工况试验(试验结果见表 5): 负荷低时, 飞灰含碳量升高, 负荷高时, 飞灰含碳量下降。该试验在两负荷工况正常稳定燃烧后进行, 当时的炉膛出口

过量空气系数分别为 1.55 和 1.26。这样可以较好地分析负荷变化对飞灰含碳量的影响。从表 4、表 5 试验数据和试验结果明显看出, 40% 低负荷时, 炉膛燃烧器区域层平均温度约为 1 260 °C 左右; 100% 负荷时, 温度为 1 400 °C 以上, 飞灰含碳量下降了 1/2。这主要是因为负荷高时, 燃料消耗量大, 炉膛整体温度得到提高, 化学反应阻力减小, 能够更好的完全燃烧和减小飞灰的含碳量。

表 4 各工况炉膛燃烧器区域层温度分布 (°C)

	炉膛位置	前壁	后墙	左墙	右墙	平均
		温度	温度	温度	温度	温度
40% 负荷	8 米层火监孔	1 181	1 194	1 350	1 315	1 260
	11 米层火监孔	1 259	1 231	1 285	1 287	1 266
100% 负荷	8 米层火监孔	1 348	1 415	1 414	1 465	1 411
	11 米层火监孔	1 402	1 445	1 419	1 449	1 429

表 5 各试验工况飞灰含碳量

	40% 负荷	满负荷
飞灰含碳量/ %	6.34	5.13
8 米层炉膛平均温度/ °C	1260	1411
11 米层炉膛平均温度/ °C	1266	1429
炉膛出口过量空气系数	1.55	1.26

#### 4.5 过量空气系数

直接影响燃烧过程的过量空气系数是炉膛出口过量空气系数。众所周知, 过量空气系数大小对飞灰含碳量影响很大。通过在满负荷运行工况下不同过量空气系数对飞灰含碳量的影响(见表 6), 可以看出炉膛出口过量空气系数为 1.26 时与炉膛出口过量空气系数为 1.20 时, 飞灰含碳量降低不多, 而炉渣含碳量却降低了, 燃烧效率也略有提高。当然炉膛出口过量空气系数也不宜过大, 否则会降低炉温, 飞灰含碳量将增大。因此选择合适的炉膛出口过量空气系数很重要。

表 6 炉膛出口过量空气系数对飞灰含碳量的影响

炉膛出口过量空气系数	1.26	1.20
飞灰含碳量/ %	5.13	5.88
炉渣含碳量/ %	1.02	5.02
燃烧效率/ %	99.51	99.42

#### 4.6 燃烧方式

不同的燃料有不同的燃烧特性, 燃烧方式必然也不同。茂名热电厂 2 号原来烧油时满负荷工况燃烧方式为 442 (从上往下各层燃烧器个数), 改烧水煤浆后, 满负荷工况燃烧方式变为 244。主要考虑到使水煤浆焦炭颗粒在炉膛内停留时间增加, 减小不完全燃烧损失。同时加大上二次风门开度, 使燃烧后期得到足够的氧量, 同时反应扩散阻力减小, 充分混合反应, 可有效降低飞灰含碳量。

## 5 结 论

(1) 水煤浆燃料特性本身对飞灰含碳量大小有影响。选取含碳量不高, 挥发份含量高的烟煤作水煤浆的原煤比较好。虽然水煤浆的浓度大小对燃烧没有本质影响, 但考虑到汽化潜热, 浓度不宜过小, 一般在 65% ~ 70%。

(2) 水煤浆雾化状况对燃烧影响很大。汽压的大小及汽压浆压的合理匹配是雾化好坏的关键, 水煤浆和雾化介质在燃烧器喷嘴处最佳压力为 1.0 ~ 1.2 MPa, 雾化细度 SMD 约 100 μm。

(3) 燃烧方式应该采用 244, 而不是 442, 同时可以加大上二次风门开度, 这种燃烧方式有利于降低飞灰含碳量。

(4) 在锅炉实际运行中应注意负荷和过量空气系数对飞灰含碳量的影响。及时调整空气供应量, 充分满足燃烧所需氧量, 同时保证炉膛的高温状态。

#### 参考文献:

- [1] 浙江大学热能所. 茂名热电厂 2 号炉烧水煤浆工程 [R]. 杭州: 浙江大学热能所, 2001.
- [2] 岑可法, 姚 强. 煤浆燃烧、流动、传热和气化理论与应用技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [3] 容奎恩, 袁镇福. 电站锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

(渠 源 编辑)

火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法 = **Multi-model Robust Forecast Control of Thermal Power Plant Loads** [刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Jiong, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), XUE Jing-yan (China Power Complete Equipment Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100011) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 186 ~ 190

A multi-model robust forecast control method is presented for the load control of thermal power plants. Under this method at first the fuzzy division of a load zone is conducted. Then, in each fuzzy sub-zone a corresponding structural-parameter perturbation model is set up, and a controller designed by using a robust forecast control method. The total control quantity is a weighted average of the output of these individual sub-controllers. Simulation results indicate that the above method makes it possible to let the load system obtain a good overall control performance. **Key words:** multi-model control, guaranteed performance control, forecast control, linear matrix inequalities

叶片数量和一次风率对双调风旋流燃烧器流场的影响 = **The Impact of the Blade Quantity and Primary-air Flow Rate on the Flow Field of a Dual-register Vortex Burner** [刊, 汉] / CHEN Zhi-chao, LI Zheng-Qi, SUN Rui (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), GAI Jian-yong (Xibaipao Power Generation Co. Ltd., Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 191 ~ 194

On a cold-state test rig and two 1025t/h boilers a cold-state test was conducted of the aerodynamic characteristics of a dual-register vortex burner with the use of a isothermal modeling method. The results of the test indicate that the ratio between the maximum diameter and length of the recirculation zone of the above-mentioned burner (which has 12 inner secondary air blades) on the one side and the outermost layer diameter on the other side is respectively higher than 1.38 and 1.48. The expansion angle is found to be greater than  $80^\circ$ . This results in a suction of sufficient high-temperature gas essential for the ignition of pulverized coal. When the burner is fitted with 8 inner secondary air blades, there is no recirculation zone and the expansion angle is between  $61.9^\circ$  and  $69.5^\circ$ . This condition is unfavorable to the achievement of a stable combustion. The adoption of a lower primary-air flow rate will result in a relatively large recirculation zone, which can be conducive to achieving a stable combustion. **Key words:** dual-register vortex burner, blade, primary-air flow rate, aerodynamic characteristics

水煤浆燃烧飞灰含碳量的影响因素及控制 = **Factors Having an Influence on Carbon Content in Fly Ash During the Combustion of Coal-water Slurry and Their Control** [刊, 汉] / YU Hai-miao, ZHAO Xiang, CAO Xin-yu (Education Ministry Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Environmental Engineering, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 195 ~ 197

Coal-water slurry is a kind of clean fuel with promising market demand. During its combustion the control of carbon content in fly ash remains a problem calling for due attention. Through a combustion test of coal-water slurry in Boiler No. 2 of Maoming Thermal Power Plant the authors have analyzed the various factors, which are believed to have an impact on the carbon content in fly ash. Such factors include concentration of coal-water slurry, atomization conditions, fuel characteristics, combustion modes, boiler load, excess air factor, etc. **Key words:** coal-water slurry, fly ash, carbon content, combustion, atomization

基于数据融合的球磨机最佳负荷工作点判断 = **Data Merging-based Determination of the Optimal-load Operating Point of a Ball Mill** [刊, 汉] / TIAN Liang, ZENG De-liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department,