

煤粉与水煤浆焦炭颗粒燃烧速度的分析和比较

俞海森, 赵 翔, 曹欣玉, 黄镇宇

(浙江大学 热能工程研究所 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: 通过茂名热电厂 2 号燃用水煤浆锅炉与半山电厂 5 号煤粉炉满负荷燃烧试验, 对水煤浆(CWS)与煤粉焦炭颗粒进行燃烧速度的分析、比较。通过 SEM 扫描电镜, BET 氮吸附试验和粒度分析仪, 对燃烧试验的飞灰样进行试验分析, 讨论 CWS 与煤粉焦炭颗粒燃烧速度的差异原因。

关 键 词: 煤粉; 水煤浆; 焦炭颗粒; 燃烧速度

中图分类号: TK16 文献标识码: B

1 前 言

水煤浆作为一种很有市场前景的代油洁净燃料, 目前已经在国内得到很好应用, 比如广东茂名热电厂的两台 50 MW 机组, 两台 100 MW 机组(正在改造中); 山东白杨河电厂三台 50 MW 机组, 汕头热电厂的 50 MW 机组等都利用水煤浆为燃料发电, 其燃烧效率高, 经济效益好。但水煤浆炉与煤粉炉的燃烧机理与焦炭颗粒燃烧速度有所不同, 本文以茂名热电厂 2 号水煤浆炉与半山电厂 5 号煤粉炉满负荷燃烧试验为例, 对水煤浆与煤粉焦炭颗粒进行燃烧速度的分析和比较。

2 试验锅炉及工况介绍

茂名热电厂 2 号炉为苏制 TK3 制造的 TII-15/A 型 220 锅炉, 原设计为燃煤锅炉, 后改烧重油。2001 年 12 月经浙江大学改造为烧水煤浆运行。该

炉系单汽包自然循环锅炉, 整体呈 II 型布置, 炉膛尺寸为 9.852 m×7.1 m, 采用国内首次应用的侧二次风配风方式的燃烧器^[1]。半山电厂 5 号煤粉炉为 SG-420/13.7-M417A 型, 超高压单汽包自然循环锅炉。1996 年投产, 后经改造实际满负荷为 135 MW, 采用混煤燃烧。试验工况均为满负荷。

3 燃料、飞灰样介绍

本次试验所用燃料为: 茂名热电厂 2 号炉采用山东兖日水煤浆, 半山电厂 5 号煤粉炉采用大同混煤, 燃料特性详见表 1。试验所用燃料细度如下, 半山煤粉细度: < 88 μm 占 88.56% (R₂₀₀=0.40%, R₈₈=11.44%); 制浆煤粉细度: < 75 μm 占 86.3%, 其中 < 5 μm 占 29.4%。试验中锅炉主要运行参数及试验结果见表 2。飞灰样品均取自排烟处, 烘干后用于分析测试。

4 样品分析方法与内容

文中用 SEM 扫描电镜对 CWS 炉和煤粉炉的飞灰颗粒进行表面形态分析, 通过 BET 氮吸附试验对飞灰颗粒进行比孔容积和比表面积等的分析, 还用粒度分析仪进行飞灰粒度的分析, 从而综合分析了 CWS 与煤粉焦炭颗粒燃烧速度的差异及其原因。

表 1 燃料特性

	C/%	H/%	O/%	N/%	S/%	V/%	A/%	W/%	Q _{dw} /kJ·kg ⁻¹	浓度/%	粘度/mPa·s
水煤浆	50.17	3.22	5.67	0.96	0.27	22.56	5.42	34.29	18 892	65.71	1 182
半山煤粉	50.97	3.33	5.90	0.89	0.62	20.19	30.49	7.80	19 186		

注: 粘度所得数据在室温为 8.4 °C, 剪切速率为 100 s⁻¹

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-08-02

作者简介: 俞海森(1976-), 男, 浙江杭州人, 浙江大学博士研究生。

表 2 试验工况主要运行参考及试验结果

工 况	燃水煤浆	燃煤粉
主汽压力/ MPa	9.47	13.68
主汽温度/ °C	534.4	538.3
给水温度/ °C	212	240
排烟温度/ °C	141.3	133.2
排烟氧量/ %	9.51	6.2
排烟处过量空气系数	1.80	1.41
飞灰含炭量/ %	2.55	2.38
灰渣含炭量/ %	1.38	1.55
热效率/ %	90.70	91.38
燃烧效率/ %	99.76	98.78

表 3 BET 氮吸附法 试验主要数据

	CWS 炉飞灰	煤粉炉飞灰
比表面积/ $m^2 \cdot g^{-1}$	1.943 6	1.247 5
比孔容积/ $mL \cdot g^{-1}$	0.002 24	0.001 18
平均孔径/ nm	4.243 84	3.854 82

表 4 飞灰平均粒径

	CWS 炉飞灰	煤粉炉飞灰
平均粒径/ μm	27.57	5.098

表 5 飞灰粒度分布

容积比/ %	CWS 炉飞灰		煤粉炉飞灰	
	颗粒直径 < μm			
10.00	13.18		0.540	
25.00	21.92		2.664	
50.00	33.65		6.621	
75.00	50.04		13.07	
90.00	68.41		26.41	

5 试验结果的分析讨论

从氮吸附试验结果(见表 3)可知, CWS 炉飞灰颗粒的比孔容积、比表面积和平均孔径都比煤粉炉飞灰颗粒的大。说明 CWS 焦炭颗粒反应接触面大, 反应阻力小, 燃烧速度快。通过粒度分析数据(见表 4), 可以看出煤粉炉飞灰颗粒的粒径比 CWS 炉飞灰粒径要小得多, 其平均粒径仅为 $5 \mu m$, CWS 炉飞灰为 $27.57 \mu m$ 。从表 5 也可看出, 当 CWS 炉飞灰的粒径 < $68.41 \mu m$ 时, 占 90%(体积百分比); 而煤粉炉飞灰颗粒粒径 < $26.41 \mu m$ 就能占 90%(体积百分比)。这主要是由于 CWS 雾化颗粒在前期水分蒸发时发生结团现象, 即使制浆煤粉和煤粉炉的煤粉细度一样, CWS 炉飞灰粒度也要比煤粉炉的飞灰粒度大, 这造成对燃烧的不利。此外, CWS 含有大量水份, 初期水份蒸发将吸收大量的热量, 延迟了着火, 这使得 CWS 燃烧初期的燃烧速度落后于煤粉。

在水份蒸发后期, 随着 CWS 雾化颗粒表面熔结物的生成, 蒸汽逸出的阻力加大, 当颗粒内水蒸气和部分挥发分产生的压力足够大时, 便发生爆裂现象。表面产生大量空穴与裂缝, 内部形成中空且多孔结构的颗粒。所以, CWS 炉飞灰颗粒比孔容积和比表面要比煤粉炉飞灰颗粒的大。

上述颗粒微观结构可通过对飞灰颗粒进行电镜扫描论证, 由图 1 可以清晰地看到 CWS 焦炭颗粒在燃烧过程中, 颗粒表面有许多空穴, 有些颗粒爆裂, 甚至呈破碎状。



图 1 CWS 炉飞灰颗粒电镜扫描图

由煤粉炉飞灰颗粒的电镜扫描图(见图 2)可见, 颗粒表面没有明显的太空穴和爆裂现象^[4]。

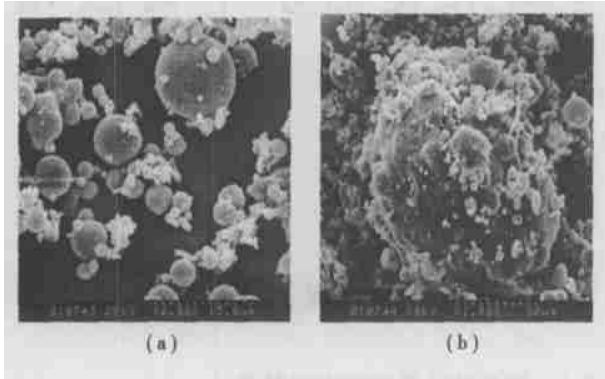


图 2 煤粉炉飞灰颗粒电镜扫描图

飞灰颗粒的电镜扫描图所示与氮吸附法试验所得比表面积、比孔容积和孔径大小数据完全一致。由于爆裂使 CWS 焦炭颗粒表面形成许多空穴和裂缝, 同时内部形成中空与多孔结构, 使 CWS 比孔容积和比表面积增大, 而且还减小了颗粒内部反应的阻力, 这促进了 CWS 颗粒的着火并加快了挥发分和焦炭的反应速度, 所以其后期燃烧速度高于煤粉后期燃烧速度。

众所周知, 焦炭燃烧反应生成产物有 CO 和 CO₂, 生成的 CO 很不稳定, 在炭表面附近和氧接触即被氧化成 CO₂。因此, 焦炭燃烧速度主要受氧气向焦炭表面以及氧气在灰壳中扩散速度的影响。CWS 焦炭颗粒由于反应比表面积和比孔容积增加, 从而更利氧气向焦炭表面以及氧气在灰壳中扩散, 加

快反应速度。此外, 在高温下水蒸气和碳的气化反应, 使碳的两相反应转换为气相反应, 水蒸气在焦炭的反应中起催化的作用^[3]。所以 CWS 焦炭颗粒燃烧速度比煤粉焦炭颗粒燃烧速度快。总的来说, CWS 前期燃烧速度低于煤粉, 后期燃烧速度高于煤粉。从表 2 数据看, 茂名热电厂 220 t/h 燃水煤浆炉的热效率为 90.70%, 燃烧效率为 99.76%, 飞灰和灰渣含碳量分别为 2.55% 和 1.38%; 半山电厂 420 t/h 煤粉炉的热效率为 91.38%, 燃烧效率为 98.78%, 飞灰和灰渣含炭量分别为 2.38% 和 1.55%。可以认为 CWS 总体燃烧速度、燃烧效率和燃尽程度接近于烟煤。

6 结 论

(1) CWS 焦炭颗粒燃烧速度比煤粉焦炭颗粒燃烧速度快。

(2) 总体来说, CWS 前期燃烧速度低于煤粉, 后期燃烧速度高于煤粉, 总体燃烧速度、燃烧效率和燃尽程度接近于烟煤。

参考文献:

(上接第 616 页)

参考文献:

- [1] 章臣榭. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1986.
- [2] 刘长良. 大机组热工过程动态模型的研究及应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2002.
- [3] 王东风, 于希宁, 宋之平. 制粉系统球磨机的动态数学模型及分布式神经网络逆系统控制[J]. 中国电机工程学报, 2002(1): 97-99.
- [4] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 张玉铎. 系统辨识与建模[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [6] 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] 陈在平, 杜太行. 控制系统计算机仿真与 CAD[M]. 天津: 天津

- [1] 赵翔. 茂名热电厂 2 号炉改烧水煤浆工程[D]. 杭州: 浙江大学热能所, 2001.
- [2] 徐万仁, 杜鹤桂. 煤粉性状对残炭颗粒形态及燃尽特性的影响[J]. 动力工程, 1994 14(3): 31-33.
- [3] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [4] 大学出版社, 2001.
- [8] 倪维斗. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] PETER ESERIN. Application of canonical variate analysis to the dynamical modeling and control of rum level in an industrial boiler[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 1999. 1163-1166.
- [10] ADLER T, KULESSKY R. Power unit simplified dynamics models development, identification, accuracy estimation[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 2001. 1636-1641.
- [11] CHENG XU, RICHARD W KEPHART, CHARLES H MENTEN. Model-based Once-through Boiler Start-up Water Wall Steam Temperature Control[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Application[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 2000. 778-783.

is given of the basic process of its implementation and, on this basis, an expanded and balanced combustion control system proposed. The above work can serve as an exemplary case and provide reference for control version optimization in other thermal power plants and for the full utilization of system resources. **Key words:** primary air, pulverized coal, on-line monitoring, Symphony, realization

煤粉与水煤浆焦炭颗粒燃烧速度的分析和比较 = **Analysis and Comparison of the Combustion Speed of Coal Water Slurry and Pulverized-coal Coke Particles** [刊, 汉] / YU Hai-miao, ZHAO Xiang, CAO Xin-Yu, HUANG Zhen-yu (Education Ministry Key Laboratory on Energy Clean Utilization and Environmental Engineering under the Thermal Power Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 631 ~ 633.

Through the full-load combustion tests of a coal water slurry-fired boiler No. 2 at Maoming Thermal Power Plant and a pulverized coal-fired boiler No. 5 at Banshan Power Plant an analysis and a comparison was conducted of the combustion speed of coal water slurry (CWS) and pulverized-coal coke particles. With the help of a scanning electron microscope and by way of a BET nitrogen adsorption test and by using a granularity analyzer the fly ash samples of the combustion test were studied and analyzed. This is followed by a discussion of the causes, which may have led to the divergence in combustion speed of CWS and pulverized-coal coke particles. **Key words:** pulverized coal, coal water slurry, coke particle, combustion speed

水煤浆代油改造技术在工业采暖锅炉中的应用 = **The Application for Industrial Heating Boilers of a Modification Technology Involving the Conversion from Oil firing to Coal Water Mixture Firing** [刊, 汉] / ZHAO Bao-cheng, ZHU Liu-juan, GU Bo-qin (College of Mechanical & Power Engineering under the Nanjing Polytechnical University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 634 ~ 637.

The 14 MW heavy oil-fired industrial heating boiler of Beijing Yanshan Petrochemical Civilian Energy Sub-company has been converted to fire coal water mixture. In the light of the specific features of this conversion the authors have expounded the proper adjustment and modification of the boiler system under the condition of retaining the original facilities. The social economic benefits resulting from the above-cited modification are evaluated and analyzed. It can be shown that the coal water mixture as a kind of clean fuel enjoys a high potential of wide applications. **Key words:** industrial heating boiler, coal water mixture, modification

水煤浆技术在吉化炼油厂的应用 = **The Application of Coal Water Slurry Combustion Technology at Jihua Oil Refinery** [刊, 汉] / CAO Xian-bo, TAO Shu-cheng (Jihua Oil Refinery, Jilin, China, Post Code: 132000), LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu (Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 638 ~ 641.

The conversion and modification of a 65 t/h oil-fired boiler at Jihua Refinery to fire coal water slurry is described along with a brief account of the latter's discharge, storage and transportation system, the boiler front system components, slag and dust removal system. Moreover, analyzed are the modified-boiler operating conditions, economic and social benefits achieved and future use prospects of such modifications. The actual results of conversion of the above-cited boiler indicate that its load can be higher than 60 t/h, combustion efficiency above 97% and thermal efficiency greater than 88.5%. **Key words:** coal water slurry, combustion, boiler, oil refinery

一种有效的船舶轴系安装新方法 = **A New Effective Method for Installing a Ship Shafting** [刊, 汉] / LI Nan (Mechanical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116023), NIU Ming-tian (Naval Representative Office Resident at Dalian Shipyard, Dalian, China, Post Code: