

220 t/h 电站燃油炉改烧水煤浆炉内传热及排放特性的试验

王 岭, 赵 翔, 曹欣玉, 黄镇宇

(浙江大学 热能工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 水煤浆是一种新型的代油洁净燃料。文中介绍了电站燃油锅炉改烧水煤浆后炉内传热及其污染物的排放测试结果, 包括温度场、火焰黑度、过热器管壁温度、排烟温度、排烟成分的测量。这些数据表明了燃烧水煤浆的一些特点, 可为锅炉改烧水煤浆的改造和设计提供参考。

关键词: 水煤浆; 火焰黑度; 排放; 锅炉

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 前 言

水煤浆是一种清洁的新型燃料, 它具有易于输送、低污染等优点。在常温下水煤浆的粘度为 $1\ 000 \sim 1\ 500\ \text{mPa}\cdot\text{s}$, 通常由 $60\% \sim 70\%$ 煤粉与 $40\% \sim 30\%$ 的水及少量添加剂组成。水煤浆由于可以象油一样的输送、储存和燃烧, 其油炉改造可利用原有设施, 改造工作量少、灰渣处理简单, 因而具有投资少、改造周期短等优点, 是以煤代油的理想代用燃料。

广东省茂名热电厂 2 号炉为 TJ1-15/A220 t/h 锅炉, 原设计为燃煤锅炉。该锅炉 1968 年 1 月改烧重油, 配备 2 台 25 MW 抽凝式汽轮发电机组。近年来, 由于燃油价格不断攀升, 一些燃油电厂停机备用。今后的油价也会因为石油资源的日益枯竭和国际石油组织的政策而居高不下。这些因素已影响而且必将继续影响燃油电厂的正常运行。2001 年 1 月, 茂名热电厂委托浙江大学对 2 号燃油锅炉实施改烧水煤浆工程, 最终于 2001 年 12 月改造成功投入连续烧水煤浆运行。

本次试验就是通过茂名热电厂 2 号油炉改烧水煤浆后锅炉炉膛传热、对流传热特性以及排烟成分等一些数据与烧油工况对比来分析水煤浆燃烧的一些特点, 为锅炉改烧水煤浆的改造设计提供一些参考。

2 锅炉和燃料简介

该锅炉为 220 t/h 单汽包自然循环锅, 整体呈 JI

型布置, 炉膛为矩形炉室, 其尺寸为 $9.852\ \text{m} \times 7.1\ \text{m}$, 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有顶棚过热器, 水平烟道有高温过热器和低温过热器, 减温器布置在低温与高温过热器中间, 减温方式为给水喷水减温。尾部烟道内, 间隔布置两级经济器和两级空气预热器。锅炉改烧水煤浆后主要设计技术参数列于表 1。

表 1 锅炉改烧水煤浆后主要设计技术参数

	数 据
锅炉额定出力/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	220(220)
过热蒸汽压力/MPa	9.8(9.8)
过热蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	539.1(540.1)
汽包压力/MPa	10.8(10.8)
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	215(215)
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	161.2(148.9)
锅炉热效率/ $\%$	90.2(92.4)
热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	342.6(326.08)

括号内数据为燃油工况

试验在锅炉额定负荷下进行。所用水煤浆喷嘴为浙江大学热能工程研究所研制的 3 t/h 撞击式多级蒸汽雾化喷嘴, 单只喷嘴流量在 $2 \sim 3.5\ \text{t/h}$ 范围内变化。水煤浆的工业分析结果示于表 2。

表 2 水煤浆工业分析

	数据
全水分 $M_t/\%$	33.69
分析水分 $M_{ad}/\%$	2.75
灰分 $A_d/\%$	8.62
全硫分 $S_t, \text{ar}/\%$	0.36
低位发热量 $Q_{\text{net, ar}}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.99
挥发分 $V_{\text{daf}}/\%$	38.08

燃油的含硫量为 1.46% , 含氢量 10.78% , 低位发热量为 $40.423\ \text{MJ}/\text{kg}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 温度场的测量

针对 2 号炉炉膛横截面积宽深比为 $1.39:1$, 采用短边两侧墙布置的四角切圆燃烧方式, 通过采用侧二次风和一次风双切圆布置, 有利于加强煤浆雾

炬的着火燃烧。燃烧器共分 5 层。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(为侧二次风布置)，第五层为上二次风喷口。燃烧器示意图见图 1。

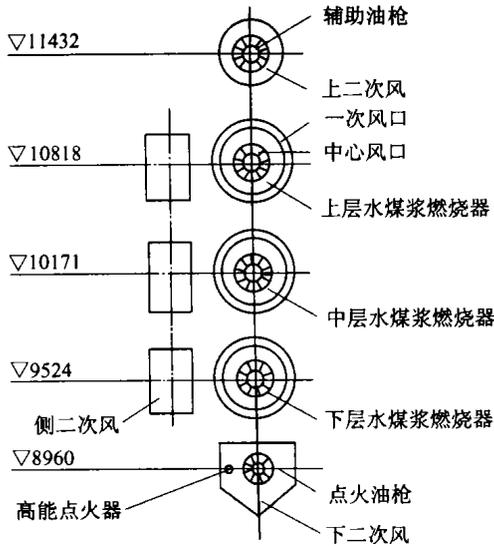


图 1 油、水煤浆两用燃烧器示意图

温度场的测量采用红外高温计，分别对 2 号锅炉炉膛的 5 个测点进行温度测量，结果示于表 3。

表 3 100% 负荷下燃油和燃水煤浆温度场 (°C)

测点标高位置	温度(oil)	温度(cws)
8 m 前墙	1 588	1 463
11 m 右侧墙	1 544	1 423
11 m 左侧墙	1 533	1 414
15 m 前墙	1 077	1 207
炉膛出口	892	960

由表 3 可见，烧水煤浆炉内温度水平比燃油的低，致使炉内换热量低于燃油时工况。还可以看出，由于水煤浆燃烧过程水分蒸发过程的存在和高速喷雾燃烧的特点，水煤浆的着火距离和火炬长度大于燃油工况时火焰，造成烧水煤浆时炉膛出口烟温升高。

3.2 火焰黑度的测量

火焰黑度的测量采用多双色高温计法^[1]：

根据普朗克定律，黑体的单色辐射强度是波长和温度的函数。如取某一固定波长，则其单色辐射强度只与黑体温度有关，而物体发射出的光线强度又和辐射强度成正比，这样，根据亮度就可以求出被测黑体的温度：

$$I_{\lambda_0} = E_{\lambda_0} / \pi = 2C_1 / \lambda^5 \cdot \exp(-C_2 / (\lambda T_0))$$

如果被测物体不是黑体，则可得：

$$I_{\lambda_0} = \epsilon_{\lambda} E_{\lambda_0} / \pi = 2C_1 \epsilon_{\lambda} / \lambda^5 \cdot \exp(-C_2 / (\lambda T))$$

因为光学高温计是根据黑体标定的，这时用光学高温计测得的亮度温度 T_0 将低于实际温度 T 。将以上两式相等，可得：

$$1/T - 1/T_0 = \lambda / C_2 \cdot \ln \epsilon_{\lambda}$$

T —被测物体的绝对温度，K； T_0 —光学高温计测得亮度温度，K； C_2 —常数， $C_2 = 1.4388 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{K}$ ； ϵ_{λ} —物体的单色黑度。

因此，这时需要应用两种滤光片，红色和绿色，可以测得两个亮度温度：

$$1/T - 1/T_{01} = \lambda_1 / C_2 \cdot \ln \epsilon_{\lambda_1}$$

$$1/T - 1/T_{02} = \lambda_2 / C_2 \cdot \ln \epsilon_{\lambda_2}$$

由于两者都是发光火焰，则火焰的单色黑度的经验关系式^[1]：

$$\epsilon_{\lambda_1} = 1 - \exp(-M_s / \lambda_1^n)$$

$$\epsilon_{\lambda_2} = 1 - \exp(-M_s / \lambda_2^n)$$

根据郝太儿的建议，在采用这一方法计算火焰黑度时，可取 $n = 1.39$ 。

在算得火焰的真实温度 T 及指数 M_s 后，根据线图查得火焰黑度。

我们对燃油和燃水煤浆的火焰黑度作了测量，结果列于表 4。

表 4 火焰黑度的测量

	加红光片	加绿光片	M_s	黑度
燃油	1 773 K	1 783 K	1.4	0.54
燃水煤浆	1 443 K	1 445 K	3.0	0.70

红色光片的波长为 $\lambda = 655.1 \text{ nm}$ ，绿色光片波长为 $\lambda = 555.3 \text{ nm}$ 。由表 4 数据可知，水煤浆的火焰黑度比燃油的高。

3.3 对流受热面传热特性的变化

燃油改烧水煤浆后，燃烧后需空气量增加，所产生的烟气量也相应增加，从而增大了烟气流速，表 5 示出了锅炉各受热面烟气速度的变化(燃油和燃水煤浆 100% 负荷下炉膛出口过量空气系数为 1.10 和 1.20)。

表 5 锅炉各受热面烟气速度 (m/s)

受热面	燃油	燃水煤浆
屏式过热器	2.62	3.23
凝渣管	3.44	4.14
高温过热器	5.92	7.03
低温过热器	7.24	8.25
一级经济器	6.1	6.83
一级空预器	11.06	12.61
二级经济器	6.05	6.96
二级空预器	7.94	9.04

从表中可以看出，燃油锅炉改燃水煤浆后，各受热面的烟气速度都有增加，增加量达 12% ~ 24%。

由于改烧水煤浆后,炉膛出口温度的提高,必然带来对对流受热面的烟气温度提高,从而使过热器对流传热温压大大增加,加上对流受面烟气速度的增加,这些都使得对流受热面的吸热大于燃油工况。同时由于水煤浆中灰分的存在,使得过热器因积灰管壁温度也高于燃油时候的管壁温度。图3显示的过热器左侧5、16、27、38、49、60、71、82、98、104 排管壁温度在燃油和燃水煤浆100%负荷下的分布。烧水煤浆时过热器的最高管壁温度为561.17℃,燃油时的管壁最高温度553.6℃。

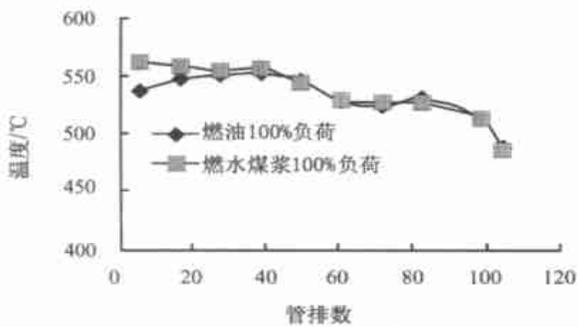


图2 过热器管壁温度分布

3.4 排烟成分的测量

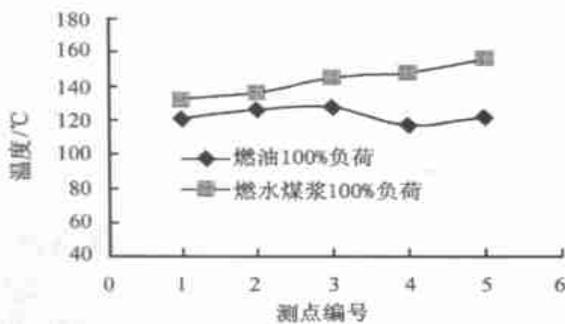


图3 排烟温度分布

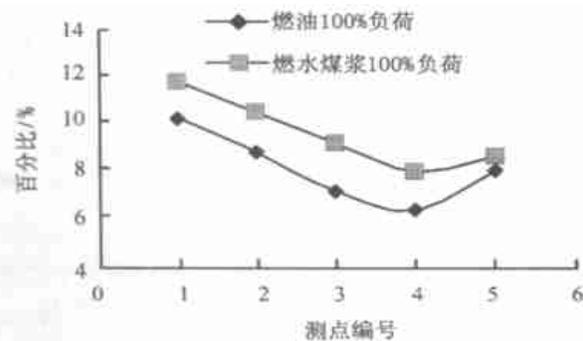


图4 氧的百分含量分布

多组分烟气分析仪。图3~图5分别是在锅炉尾部空气预热器出口烟道相同截面上的5个测点测得的排烟温度、氧气百分含量、二氧化硫浓度的结果。

由图可以看出,油炉改烧水煤浆后,排烟温度升高,最高为155.3℃,此温度不仅高于燃油工况,而且远大于酸露点;烟气中氧含量升高(大约高1%~1.5%),及排烟过量空气系数增大;二氧化硫的排放浓度显著下降(燃油最高达到654 mg/m³),水煤浆最高为228.5 mg/m³,这说明虽然水煤浆燃料含有较多的水分,但不会引起尾部空气预热器的低温腐蚀,而且二氧化硫排放对大气污染的程度大大的降低,可见水煤浆是一种清洁的燃料。

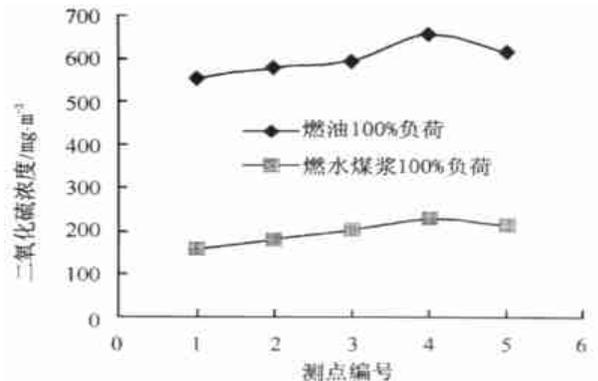


图5 二氧化硫浓度分布

4 结论

(1) 和燃油相比,水煤浆火炬炉内温度普遍比燃油低100~200℃,着火距离和火炬长度增加,炉膛出口烟温升高。

(2) 燃水煤浆时火焰黑度高于燃油工况的火焰黑度。

(3) 和燃油相比,燃水煤浆时对流受热面烟气流速增加,过热器管壁温度高于燃油时的温度。这时可以通过增加减温水和吹灰来降低过热器管壁温度。

(4) 和燃油相比,燃水煤浆时排烟温度要高于燃油时的温度,同时二氧化硫的排放要比燃油低的多。

(5) 燃水煤浆时,对尾部受热面出现低温腐蚀的可能性要小于燃油工况。

参考文献:

- [1] 秦裕昆. 炉内传热[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 岑可法. 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.

and transverse speed pulsation of the drag reducing fluid has been conspicuously suppressed. **Key words:** drag-reducing fluid, turbulence structure, surfactant solution, phase Doppler anemometer

220 t/h 电站燃油炉改烧水煤浆炉内传热及排放特性的试验 = **Heat Transfer and Emission Characteristics Tests of a 220 t/h Oil-fired Utility Boiler Retrofitted for Firing Coal-water Slurry** [刊, 汉] / WANG Ling, ZHAO Xiang, CAO Xin-yu, HUANG Zhen-yu, et al (Institute of Thermal Energy Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 589 ~ 591

Heat transfer performance and pollutant emissions were measured and tested for an oil-fired 220 t/h utility boiler being retrofitted to fire coal-water slurry, a new type of clean fuel as a replacement for oil. Measurements were taken of the temperature field, flame emissivity, superheater tube wall temperature, exhaust gas temperature and composition. These data represent some special features of coal-water slurry combustion and may serve as reference data during the design and retrofitting of a boiler for firing coal-water slurry. **Key words:** coal-water slurry, flame emissivity, pollutant emission, boiler

高硫石油焦燃烧污染物排放特性的试验研究 = **Experimental Investigation on Pollutant Emission Characteristics Resulting from the Burning of Petroleum Coke with a High Sulfur Content** [刊, 汉] / YUAN Gui-cheng, LIU Wu-biao, ZHANG Chun-lin, LIU De-chang (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 592 ~ 594, 606

On a hot-state test rig a desulfurization test was conducted for the burning of high-sulfur petroleum coke. On this basis discussed was the influence of such factors as combustion temperature, calcium/sulfur ratio and excess oxygen content on SO₂ and NO_x emissions. As a result, a theoretical and practical basis is provided for the industrial application of petroleum coke with a high sulfur content. **Key words:** petroleum coke with a high sulfur content, combustion test, SO₂ emissions, NO_x emissions

无烟煤与贫煤混煤燃烧和 NO_x 排放特性的实验研究 = **Experimental Research on the Burning of Anthracite Mixed with Lean Coal and Its NO_x Emission Characteristics** [刊, 汉] / FANG Li-jun, HUI Shi-en (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), GAO Zheng-yang, YAN Wei-ping (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 595 ~ 598

By using a themobalance and a small-sized pulverized-coal combustion test rig an experimental study was conducted for a multitude of test items. The latter include the combustion characteristics of anthracite, lean coal and the blends of the above two coals in three different proportions, NO_x generation mechanism at different combustion-air supply rates, and burn-out characteristics. Through the processing and analysis of the test data it is concluded that there exists some difference in combustion performance between the anthracite and lean coal with the performance of the blends of these two coals exhibiting intermediate characteristics. A proper selection of excess air factor can lead to a high-efficiency combustion of anthracite and lean coal blended in different ratios and to low NO_x emissions. With respect to coals being blended in three different ratios a suitable range of excess-air factor values is proposed to attain a high-efficiency combustion and low pollutant emissions. This may serve as a guide for the cost-effective and clean operation of power plants firing the above coal blends. **Key words:** burning of anthracite mixed with lean coal, combustion characteristics, NO emissions, burn-out characteristics

1025 t/h“W”火焰锅炉燃烧特性试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of a 1025 t/h**