

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 06 - 0773 - 05

## 65 t/h 燃油锅炉改烧水煤浆技术研究

刘建忠, 周俊虎, 黄镇宇, 杨卫娟, 程 军, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 介绍了 65 t/h 燃油锅炉改烧水煤浆关键的一些技术和实际应用, 对锅炉本体改造, 油 / 水煤浆两用燃烧器开发、水煤浆喷嘴的设计进行了介绍. 改造后锅炉进行了油浆混烧和全烧水煤浆的调整试验. 实际应用结果表明, 水煤浆点火燃烧稳定, 锅炉负荷可达 60 t/h 以上, 燃烧效率达到 97% 以上, 锅炉热效率达到 90% 以上, 污染物排放符合国家环保要求.

**关键词:** 水煤浆; 燃烧; 锅炉

**中图分类号:** TK229.7 **文献标识码:** A

### Study on technology of coal-water slurry in a 65 t/h oil-fired boiler

L U Jian-zhong, ZHOU Jun-hu, HUANG Zhen-yu, YANG Wei-juan, CHENG Jun, CEN Ke-fa

(State key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The key technology and application of retrofitting 65 t/h oil - fired boiler into CWS (coal - water slurry) - fired one was reported. The boiler proper retrofit, the study and design of oil/CWS dual burner and CWS nozzle were also reported. The combustion adjustment tests were made in the boiler burning CWS and oil - CWS. Application results indicate that CWS can be ignited and burned steadily in the boiler, the boiler load can reach 60 t/h, combustion efficiency is over 97% and boiler efficiency is over 90%, the pollution emission of flue gas can reach national standards.

**Key words:** coal water slurry; combustion; boiler

随着我国经济的快速发展, 石油消费呈现加速增长态势. 2003 年我国进口石油量已达到 9 112 万 t, 需支付大量外汇, 油价居高不下, 已在一定程度上影响我国经济发展. 因此, 寻找新的代油燃料, 确保我国能源供应的稳定和社会经济的可持续发展具有重要意义. 我国煤炭资源十分丰富, 占化石能源资源的 80% 以上, 如果把不清洁的煤转化成洁净的代油燃料, 无疑将是一项符合国情、有重要社会效益的工作. 水煤浆正是实现代油的煤基洁净燃料, 它是由 68% 左右的煤粉、32% 左右的水和 0.5% 左右的化学添加剂组成的, 其流动和储存特性类似重油, 并能像油一样雾化燃烧, 是一种理想的代油燃料. 因水煤浆燃料的组成特点使其在锅炉中的燃烧过程与油、煤粉都有区别, 燃油锅炉要实现水煤浆稳定高效燃烧, 则必须对锅炉本体、燃烧器、喷嘴等关键部件进行改造设计<sup>[1,2]</sup>. 笔者针对某厂 65 t/h 燃油锅炉, 介绍了进行改烧水煤浆的一些技术设计和燃烧试验, 结果表明改造是成功的.

### 1 原锅炉概况

该锅炉是北京锅炉厂制造的 Y - 65/3.9 - 1 型燃油锅炉, 原设计燃烧渣油. 锅炉采用中压单锅筒、自

收稿日期: 2005 - 02 - 27

基金项目: 浙江省科技攻关计划资助项目 (2004C36010)

作者简介: 刘建忠 (1965 - ), 男, 浙江瑞安人, 博士, 教授, 博士生导师. Tel: 0571 - 87952884, E - mail: jzliu@zju.edu.cn

然循环、负压燃烧、平衡通风、型室内布置。炉膛为正方形截面，锅炉采用全悬吊结构，利用大直径下降管集中供水。炉膛为密节距水冷壁，水平烟道及尾部烟道上部布置有过热器和包墙管。水平烟道分两级布置了对流过热器，两级之间装设喷水减温器，以调节过热蒸汽温度。省煤器为单级布置，空预器为卧式，尾部垂井装有钢珠除尘。原设计燃烧装置为 4 只重油燃烧器（后改为油/天然气两用），分 2 排布置于炉室前墙。锅炉简图如图 1 (a) 所示。

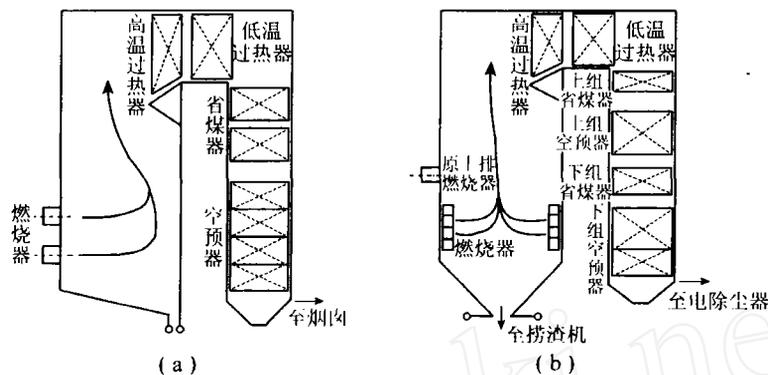


图 1 改造前、后锅炉示意

Fig. 1 The sketch of boiler retrofit

(a) 改造前; (b) 改造后

## 2 油炉改烧水煤浆的关键技术及难点

(1) 燃烧 水煤浆需要的着火热是煤粉的 1.3 倍，如何保证稳定着火和高效燃烧；水煤浆着火和燃烧特点与油相差较大，如何把油燃烧器改成水煤浆和油两用燃烧器；设计及研制能使高黏度水煤浆良好雾化的防磨喷嘴；与燃油相比，水煤浆火炬延长 3 m 以上，如何保证炉膛出口的烟温在允许范围内<sup>[3,4]</sup>。

(2) 灰渣处理 水煤浆虽然属少灰燃料，但也要防止炉内结焦、积灰，清除炉底灰渣，防止各受热面积灰和飞灰磨损，并做到灰渣综合利用，满足环保要求。

(3) 高水分问题 水煤浆含有 30% ~ 40% 的水，如何防止露点升高而引起尾部受热面低温腐蚀。

(4) 传热及受热面 油炉热负荷大于煤炉（如容积热负荷大 1.60 ~ 1.75 倍），改烧水煤浆后如何提高锅炉出力；水煤浆和油辐射换热特性不一样，油炉改烧水煤浆后炉膛等受热面吸热分配将发生变化，如何调整受热面布置，保证减温装置满足汽温的要求，过热器不超温。

(5) 烟气排放污染 如何控制烟气中的飞灰、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放，符合国家环保排放要求。

(6) 设备 燃烧器和受热面改造后，阻力会有所增加，如何降低烟风阻力；水煤浆燃烧过量空气系数比燃油大 0.1 左右，空气和烟风量会有所增加，如何使原送、引风机尽量少改动而满足要求。

(7) 运行 水煤浆冷炉快速点火及切换技术；水煤浆冷热态调整试验问题；水煤浆燃烧运行优化和操作规程；水煤浆低负荷稳燃运行技术。

## 3 锅炉改造技术

### 3.1 锅炉本体改造

燃油锅炉特点是炉膛容积小，热负荷大，该炉容积热负荷为  $0.24 \text{ MW}/\text{m}^3$ ，为了适应水煤浆燃烧，锅炉体积需要扩大，以降低锅炉容积热负荷，为此炉膛整体向下延伸约 2 m。

在受热面改造方面，过热器和喷水减温装置不改动，为了提高热风温度，对省煤器和空预器的面积和布置进行调整，即在省煤器上、下两组之间增加一级空预器，同时上组省煤器去除 6 排管子，增加下级空

预器的面积，使空预器总面积约增加 2 000 m<sup>2</sup>。改造后的锅炉如图 1 (b) 所示。此外，锅炉水冷壁和其他受热面增加吹灰装置，省煤器和空预器增加耐磨装置。

炉底由原来平炉底改为冷灰斗，并增加刮板式捞渣机。除尘器选用单室二电场静电除尘器，干法出灰，经刮板送入专用飞灰罐车，直接运送并进行综合利用。

### 3.2 油/水煤浆两用燃烧器

燃烧器由前墙布置旋流燃烧器改为四角布置直流燃烧器<sup>[5]</sup>，该燃烧器为油/水煤浆两用燃烧器，均等布风方式，一次风喷口（即油/水煤浆两用燃烧器）2 层，二次风口 3 层；一次风喷口内层为中心一次风，外层为周界一次风，按分级送风形式布置，中心风道设置固定叶轮（图 2）。燃油时投中心风和部分周界一次风，燃水煤浆时投周界一次风。为了保证燃油时蒸汽参数和燃瓦斯气的需要，保留前墙上排 2 个旋流燃烧器。

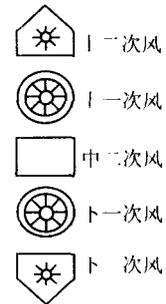


图 2 燃烧器示意  
Fig. 2 The sketch of burner

### 3.3 水煤浆和油雾化喷嘴

这次改造使用的喷嘴是浙江大学研制的撞击式多级蒸汽雾化型水煤浆喷嘴<sup>[6]</sup>，该喷嘴主要磨损部位镶嵌碳化钨材料，使喷嘴寿命达到 1 500 ~ 2 000 h。油喷嘴采用“Y”型喷嘴，其主要技术参数见表 1。

表 1 水煤浆和渣油喷嘴技术参数

Table 1 Nozzle parameters of CWS and residual oil

技术参数	水煤浆	渣油
设计容量 (每支) / t · h <sup>-1</sup>	1.6	0.9
容量范围 / t · h <sup>-1</sup>	1.0 ~ 2.2	0.6 ~ 1.2
浆压 (枪前) / MPa	1.1 ~ 1.2	2.5
雾化用蒸汽压力 (枪前) / MPa	1.3 ~ 1.5 ( 300 )	机械雾化
雾化细度 (SMD) / μm	95 (<黏度 1 Pa · s)	

## 4 试验和应用

### 4.1 试验燃料特性

试验期间水煤浆燃料由自备制浆厂提供，制浆用煤为鹤岗烟煤，燃料油为渣油，水煤浆和油特性见表 2。

表 2 燃料特性

Table 2 The characteristics of fuels

燃料	工业分析 (ar) / %				元素分析 (ar) / %					热值 MJ · kg <sup>-1</sup>
	M <sub>t</sub>	A	V	FC	w (C)	w (H)	w (O)	w (N)	w (S)	
水煤浆	36.17	6.79	21.92	34.82	48.38	2.84	4.89	0.74	0.19	18.48
渣油	2.00	0.30			85.70	10.00	0.80	0.70	0.50	40.55

### 4.2 水煤浆锅炉点火过程

每个燃烧器下二次风喷口里装有水煤浆点火系统（图 3），包括带稳燃器的、高能点火枪和燃气枪管。在水煤浆点火前，先用高能点火棒点燃瓦斯气，再用瓦斯气逐支点燃主油枪管内的渣油，待锅炉负荷达到 40%，炉膛温度在 900 ~ 1 000 以上，炉膛出口温度超过 650 ~ 700 后，再逐步投入水煤浆枪，逐渐提高锅炉负荷和炉膛温度，同时逐步撤除油枪或气枪。后来加大了燃气枪容量，用 4 支燃气枪直接点燃水煤浆，再逐步切换，这样就完全脱离了燃油。

### 4.3 燃烧调整试验结果

(1) 锅炉的主要技术参数 燃烧调整试验共进行 3 个工况，工况 1 为油和水煤浆混烧工况，燃料比例是水煤浆投 4 支枪，渣油投 2 支枪；工况 2 是全烧水煤浆工况，投 6 支水煤浆枪；工况 3 是全烧水煤浆低负荷（50% 负荷）试验，投 4 支水煤浆枪。燃烧器配风对作好燃烧是非常重要的，根据热力计算，投

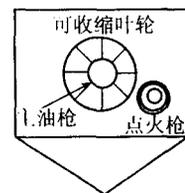


图 3 下二次风燃烧器喷口  
Fig. 3 Nozzle of bottom SA

水煤浆枪 6根就能满足 55 t/h设计负荷要求,一般安排在下层一次风口 4根,上层一次风口 2根(对角),相应的配风按均等配风的要求分布,即上二次风、中二次风和下二次风按设计要求全投。调试期间水煤浆喷枪前浆压维持在 0.9 MPa左右,汽压维持在 0.9~1.0 MPa,水煤浆入炉温度维持在约 49℃。

表 3说明锅炉改造后能满足运行要求,无论是油/水煤浆混烧还是全烧水煤浆,无论是高负荷还是低负荷(50%),锅炉主要参数都在改造设计范围内,能满足运行要求。调试期间,锅炉最高曾达到 65 t/h。锅炉在低负荷(50%)全烧水煤浆条件下,水煤浆依然快速着火,燃烧稳定。在上述工况下,燃烧效率和锅炉热效率分别达到 97%和 90%以上,与煤粉炉不相上下。

表 3 锅炉主要技术参数

Table 3 The technical parameters of boiler

参 数	原设计	改造工况			试验工况		
	工况	设计工况	低负荷	燃油工况	工况 1	工况 2	工况 3
锅炉出力 / $t \cdot h^{-1}$	65.0	55.0	32.5	65.0	50.5	55.4	34.0
蒸汽压力 /MPa	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.88	3.75
蒸汽温度 /	450	450	450	450	450	451	446
减温水 / $t \cdot h^{-1}$	1.50	3.14	0.96	1.14	适中*	适中*	少量*
给水温度 /	150	135	135	135	104	104	104
热风温度 /	220.0	300.0	259.8	298.0	298.0	321.0	282.0
冷风温度 /	30	30	30	30	26	26	25
排烟温度 /	157.0	148.4	122.6	142.2	129.0	141.0	120.0
燃烧效率 /%		97.00	96.00		99.29	97.32	97.22
锅炉效率 /%	91.30	89.80	89.60	92.30	92.17	90.08	90.02
燃料消耗量 / $t \cdot h^{-1}$	4.89	8.84	5.19	4.76			
燃料种类	重油	水煤浆	水煤浆	重油	油/水煤浆	水煤浆	水煤浆

\*减温水流量指示器损坏,只根据阀门开度判断多少是否够用。

但试验中也发现全烧水煤浆飞灰含碳量偏高,在 10%~20%之间。原因一是风量不足,根据炉膛出口(高过和低过之间)测量,氧量为 2.5%~3.0%(热力计算要求 4%),偏低;另外,送入炉内的风量测量表明也偏低;二是测试期间由于煤浆质量等原因,经常发生喷嘴堵塞现象,频繁换枪,造成燃烧状态波动,不利于燃烬。

(2) 炉内温度分布 对锅炉燃烧器区域(测点在 4 个墙中间标高 5 500 mm)、燃烧器上方(测点在两侧墙标高 8 500 mm)和炉膛出口温度测量结果见图 4和表 4。燃烧区域最高温度为 1 400℃以上,说明燃烧是非常稳定的,煤浆着火距离均在 200~300 mm 以内,上层燃烧器比较近。图 4 为全烧水煤浆时炉内燃烧温度随锅炉负荷变化情况,负荷升高,各点温度也随之提高。在负荷较低情况下,燃烧器区域和炉膛出口温度依然维持在 1 200 和 700℃左右,说明能保证水煤浆稳定着火燃烧。

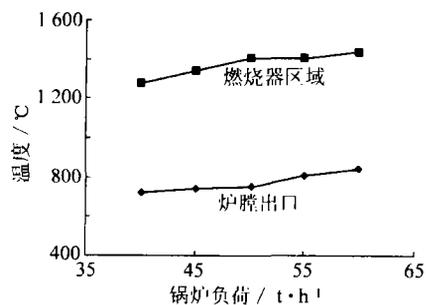


图 4 炉内温度随负荷的变化曲线

Fig. 4 The change of curves of temperature with load

表 4 炉膛燃烧温度分布

Table 4 The combustion temperature distribution in furnace

位置	前墙	左侧墙	右侧墙	后墙	左上侧墙	右上侧墙
工况 1	1 415	1 430	1 410	1 409	1 195	1 208
工况 2	1 422	1 414	1 402	1 393	1 171	1 190
工况 3	1 201	1 198	1 212	1 185	975	988

(3) 排烟成分 全烧水煤浆锅炉尾部烟气成分监测数据见表 5, 测量仪器为 Testo360 烟气分析仪. 3 个工况下  $\text{NO}_x$  排放浓度分别为 585, 498 和  $425 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{SO}_2$  排放浓度分别为 598, 379 和  $352 \text{ mg/m}^3$ , 均明显低于国家旧锅炉环保排放标准, 特别是  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  明显低于常规燃油渣油和煤粉锅炉, 因此在环保方面也具有明显优势.

表 5 烟气成分

Table 5 The composition of flue gas

烟气成分	工况 1	工况 2	工况 3
$w(\text{O}_2) / \%$	7.3	5.6	8.5
$w(\text{CO}_2) / \%$	12.0	13.6	10.8
$w(\text{CO}) / \%$	81	205	94
$c(\text{NO}_x) / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	585	498	425
$c(\text{SO}_2) / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	598	379	352

注:  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  排放浓度已折算到氧量 6%.

## 5 结 论

运行结果表明 65 t/h 油炉改烧水煤浆后, 锅炉主要参数能满足运行要求, 锅炉负荷可以达到设计值 55 t/h 以上, 调试期间最高可以达到 65 t/h. 锅炉热效率在 90% 以上, 燃烧效率在 97% 以上. 水煤浆/油两用燃烧器既能满足水煤浆快速着火、稳定燃烧的目的, 又能满足油燃烧的要求. 水煤浆燃烧时, 火炬明亮, 燃烧完全. 喷嘴负荷调节范围大, 调节方便, 油浆切换容易.

改烧水煤浆后锅炉烟气污染物排放物  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  均低于国家环保排放标准, 具有十分明显的社会效益, 初步估计 1 台锅炉年经济效益达到 1 500 万元以上. 作为我国第 1 台 65 t/h 燃油设计锅炉改烧水煤浆, 对我国大量的燃油锅炉改烧水煤浆具有重要的示范意义, 为我国“以煤代油”的战略决策开辟了一条新的道路.

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ceng jiliang, Cao Xinyu, Zhao Xiang, et al. Application of CWS combustion technology to power plants in guangdong province of china [A]. Proceedings of KOPE - 03 [C]. Tokyo: Published by the JSME, 2003. 415 ~ 419.
- [3] Liu Jianzhong, Yao Qiang, Cao Xinyu, et al, Researches on the aerodynamic characteristics of CWS tangentially arranged burners in utility boilers [A]. Proc. 19th Int. Tech. Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems [C]. Rockville: Published by Coal Technology Association, 1994. 505 ~ 516.
- [4] 赵翔, 姚强, 曹欣玉, 等. 水煤浆在电站燃油锅炉内的燃烧试验 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (2): 187 ~ 191.
- [5] 翁卫国, 周志军, 黄镇宇, 等. 新型油——水煤浆两用燃烧器的设计及冷态试验 [J]. 电站系统工程, 2003, 19 (3): 42 ~ 43.
- [6] 黄镇宇, 李习臣, 曹大东, 等. 大型撞击式水煤浆喷嘴流量特性试验研究 [J]. 电站系统工程, 2004, 20 (5): 25 ~ 28.