

中储式热风送粉 W 型火焰锅炉炉内 空气动力场实验研究

闫 晓, 许卫疆, 孙新国, 惠世恩, 徐通模

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对引进美国 FW 公司的配备双旋风分离式煤粉燃烧器的 W 型火焰锅炉, 在相似模化的基础上建立冷态模型, 利用热线风速仪与示踪法测量了不同工况下炉内的空气动力场, 得出了不同工况下炉内流场的矢量图、火焰长度、炉内主气流在炉深方向上的分布曲线以及主气流充满度变化曲线, 通过实验结果对炉内空气动力特性进行了分析, 研究表明, 沿水平方向高速送入炉内的三次风对炉内空气动力特性有显著影响。

关键词: W 型火焰锅炉; 冷态模型实验; 空气动力场; 动量流率

中图分类号: TK223

文献标识码: A

1 前言

根据我国的燃料政策, 电站锅炉燃用的煤种多为无烟煤、贫煤和劣质烟煤等煤种, 其中无烟煤占相当大的比例。这些燃料由于挥发份比较低 ($V_{daf} \leq 10\%$), 着火、稳燃和燃尽都比较困难。电站锅炉如何安全和经济地燃烧无烟煤等低反应能力煤是我国能源工业迫切需要解决的一个问题。W 型火焰锅炉由于采用了长火焰、分级送风、煤粉浓缩技术等手段, 使得锅炉机组在煤种适应性、低负荷稳燃能力、飞灰燃尽等方面有着相当大的优势, 成为燃烧无烟煤等劣质燃料的首选机型。

东方锅炉(集团)股份有限公司引进美国 FW 公司 W 型火焰锅炉技术, 其燃烧系统采用直吹式乏气送粉。直吹式乏气送粉系统对煤质稳定, 设备健康, 水平高的机组来说是适宜的。但由于我国电站锅炉煤粉质量变化比较大, 加之近年来锅炉负荷的峰谷变化也在加大, 所以这种燃烧系统显得不很适应。对于难着火和燃尽的无烟煤、贫煤及劣质烟煤(指多灰, 低发热量的烟煤), 根据我国的实践和理论计算, 由于着火吸热量较大, 为稳定着火和燃烧, 采用储仓式热风送粉系统, 从稳定燃烧, 适应煤种和负荷变化

方面都优于直吹式乏气送粉系统。但储仓式热风送粉系统带来的问题就是乏气(即三次风)如何送入炉内参加燃烧。本实验根据东方锅炉(集团)股份有限公司提出的储仓式热风送粉系统的初步方案(即三次风从前后墙中部, 二次风 E 层和 F 层中间水平送入), 组织炉内空气动力工况的实验研究, 验证原设计工况的合理性以及三次风对于炉内空气动力工况的作用与影响, 为工程设计和实际运行提供了科学依据。

2 实验系统及实验方法

对于锅炉炉膛进行空气动力场模化研究时, 由于其自身的复杂性, 要完全满足模型实验相似的条件是无法实现的, 必须忽略只起局部作用, 不影响全局的因素, 抓住起决定性作用的因素, 对炉内流场只作近似模化。忽略掉傅鲁德准则数 Fr , 普朗特准则数 Pr 等, 并且只作等温模化, 主要满足以下三个相似条件:

(1) 模型与原型保持几何相似。原型为东方锅炉(集团)股份有限公司为湖南株州电厂设计的 300 MW W 型火焰锅炉, 相似比为 1:20。

(2) 气流流动处于第二自模化区 ($Re \geq Re_{cr}$)。

(3) 燃烧器各喷口及前后墙分级风的气流动量流率比相等。

实验研究表明, 只有保证炉膛内雷诺数 Re 达到第二自模化区, 炉内空气动力特性就不再受 Re 数的影响。 Re 数作为相似准则数的意义就在于“惯性力与粘性力的相对比例决定了流体质点的轨迹”^[1]。当 Re 数非常大时, 粘性力与惯性力相比已经非常小, 粘性力可以忽略不计, 此时的流动轨迹只决定于惯性力, 因此 Re 数不再对流动工况有影响。本文对于临界 Re 数进行了测定, Eu 数与 Re 数的变化规律如

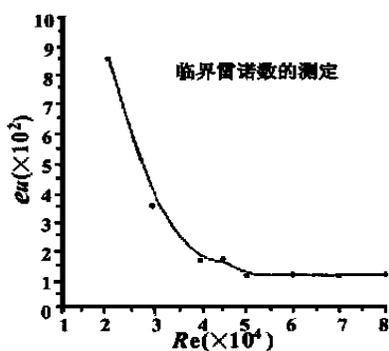


图1 临界雷诺数测定图

图1所示。由图1可以看出,本实验台中临界雷诺数 Re_{ij} 大约在 4.5×10^4 左右。在本文的工况设计中,各工况均保证炉膛内雷诺数 Re 大于 5×10^4 , 所以所测工况均处于第二自模化区。

模型及实验系统如图2所示。主要设备为美国TSI公司生产的1050A型恒温热线风速仪及数据采集测试系统。实验结果由打印机输出。测点布置及坐标系的选取如图3所示。模型采用钢架结构,两侧墙为有机玻璃板,一面板用来观察气流,另一面布置测孔。实验过程中,热线测得的数据经过AD转换器并经由计算机处理,可以得到每一个测点上速度的大小值,该点的方向利用“飘带法”测定,在得到每一个测点上速度的大小和方向以后,就可以确定流场的矢量特性。

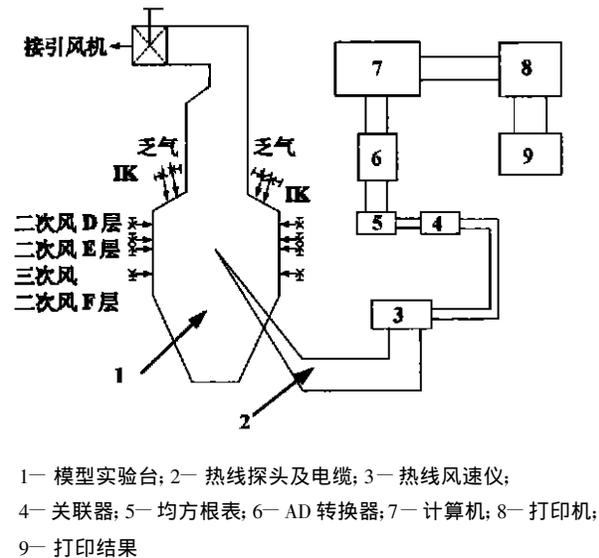


图2 实验系统图

3 实验内容

本文通过组织原设计工况和无三次风的工况,同时作者组织了拱上一次风动量流率增大的工况比较炉内空气动力特性,研究三次风对于炉内空气场的影响。实验工况列入表1中,其中工况1为原设计工况。

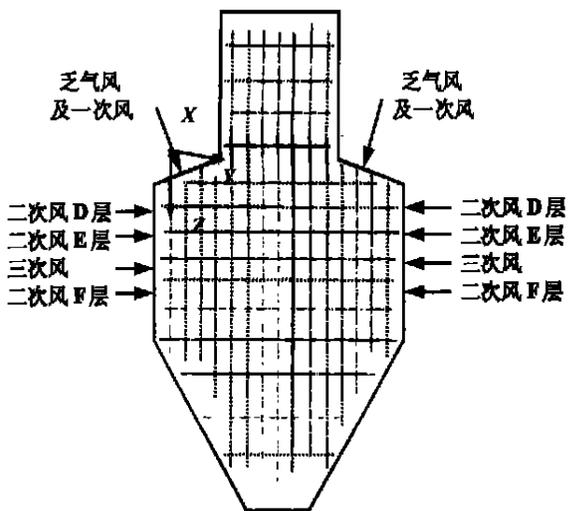


图3 测点布置图

表1 实验工况

工 况	拱上风速 /m·s ⁻¹			前后墙二次风速 /m·s ⁻¹			三次风风 速/m·s ⁻¹	动量流率比
	一次风 W_1	乏气风 W_{FQ}	油枪风 W_{YQ}	D层 $W_{2,D}$	E层 $W_{2,E}$	F层 $W_{2,F}$	W_3	$M_{拱}: M_{2,D}: M_{2,E}: M_{2,F}$ $M_{F}: M_{2,F}$
1	23.18	7.12	7.73	7.73	7.73	7.73	19.45	1; 0.25; 0.33; 1.33; 0.85
2	23.18	7.12	7.73	7.73	7.73	7.73	0	1; 0.25; 0.33; 0; 0.085
3	37.5	7.12	7.73	7.73	7.73	7.73	19.45	1; 0.1; 0.14; 0.55; 0.35

4 实验结果及分析

为了分析方便,说明以下几点:

(1) 坐标系的选取见图3所示。其中 x 为炉宽方向, y 为炉深方向, z 为炉膛高度向下方向。 $X = x/d_1$, $Y = y/d_1$, $Z = z/d_1$, d_1 为拱上一次风喷口直径。

(2) v_{zs} 为拱上折算速度, 计算公式为

$$v_{zs} = \sqrt{\frac{F_1 v_1^2 + F_{FQ} v_{FQ}^2 + F_{2,A} v_{2,A}^2 + F_{2,B} v_{2,B}^2 + F_{YQ} v_{YQ}^2}{A_1 + A_{FQ} + A_{2,A} + A_{2,B} + A_{YQ}}}$$

其中 v_1 、 v_{FQ} 、 $v_{2,A}$ 、 $v_{2,B}$ 、 v_{YQ} 分别为拱上一次风、乏气风、二次风A层、二次风B层、油枪风的喷口速度; A_1 、 A_{FQ} 、 $A_{2,A}$ 、 $A_{2,B}$ 、 A_{YQ} 分别为各喷口的面积。

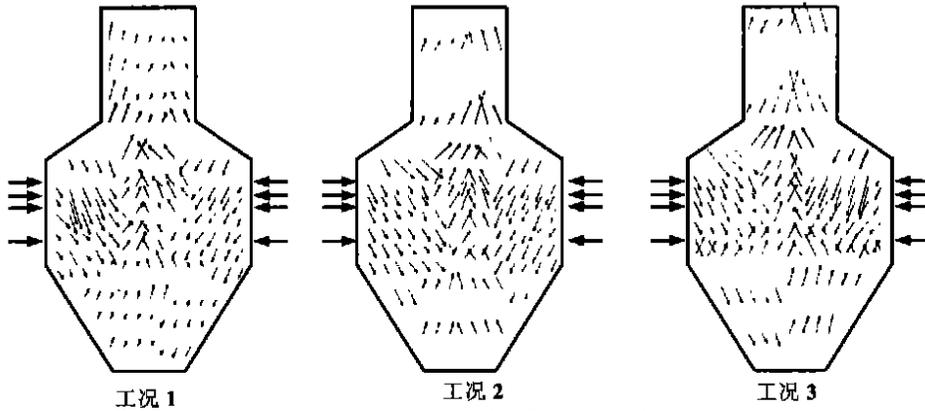
(3) 气流的充满度: 用该处有效气流所占炉膛截面积与当地炉膛截面积的比值表示, 其中有效气流指的是该截面上的下行气流。

计算公式为 $\epsilon = \Delta F_1 / F_{01}$, 其中 ΔF_1 是指该截面上有效气流所占的炉膛截面积, ΔF 是指当地的炉膛截面积。

4.1 流场图谱分析

在本实验所研究的炉型中, 取 H 为炉膛出口到冷灰斗底部的高度。拱上主气流向下运行过程中, 速度不断衰减, 取主气流的终端速度为 5 m/s , 即认为当下行主气流的速度小于终端速度时, 主气流已经衰减完毕, 火焰行程大致在该位置, 取此位置到炉膛出口的距离为 L , 定义火焰长度 $CH = L/H$ 。对于本文所研究的炉型, 当拱上主气流能运行至炉膛中下部二次风喷口中心线位置以下时, 认为火焰长度不至于短路, 此时, $CH = 0.375$; 当拱上主气流下行至冷灰斗高度的三分之二处以下时, 认为冷灰斗内存在结渣的可能性, 考虑到实验中在冷灰斗内测点的布置较少, 所以判断位置取在冷灰斗内第一排测点的位置, 此排测点在冷灰斗高度的五分之四处, 由于拱上主气流的终端速度的取值较大, 所以用此位置判断冷灰斗内结渣的可能性是合理的, 此时 $CH = 0.58$ 。由以上叙述可以得到, 合理的火焰长度范围应在 $0.375 \sim 0.58$ 之间。

图 4 是流场矢量图, 图 5 是各工况下拱上主气流速度衰减曲线图。工况 1 是按照原设计工况各参数



图中箭头和图 3 中各次风喷口位置相对应

图 4 各工况下流场矢量图

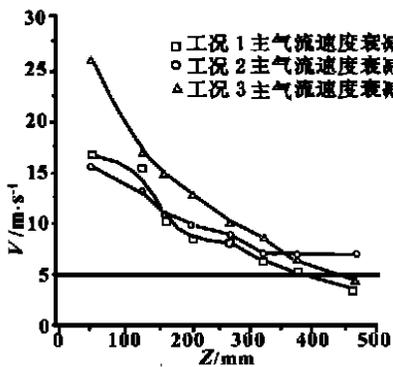


图 5 主气流速度衰减图

组织的实验工况, 从图 4 中所示的流场图谱可以看出, 整体炉内气流分布是比较合理的。由拱上各风口喷出的炉顶各股风, 在向下运行

的过程中与前后墙所布置的 D、E、F 层二次风及 E、F 层二次风中间的三次风混合, 到冷灰斗的转角处开始转弯, 形成比较对称的 W 型火焰, 在冷灰斗下面基本上是死滞区, 气流流动速度比较低。从速度分布可以看出, 侧墙边壁流通截面的形状变化对于主流场的分布规律没有明显的影响。从图 5 中可以看出, 主气流在冷灰斗上沿时已经衰减完毕, 火焰长度 $CH = 0.404$, 这个值在合理的火焰长度范围内, 说明在此工况下拱上主气流的行程既不会发生短路, 提前离开炉膛, 也不会发生主气流冲入冷灰斗引起结渣可能的情况。在锅炉的实际运行过程中, 这样的工况比较安全, 不会造成冷灰斗内大量结渣。同时, 炉内主气流向下运行至冷灰斗拐角处才转弯向上, 满足了煤粉在炉内停留时间长的要求, 又不会造成烟气短路时发生在炉膛出口的结渣问题以及水平烟道烟温过高等问题。该工况的流场分析可以看出, 原设计工况下炉内空气动力场比较合理。工况 2 是在原设计工况参数下关掉三次风的极限工况。从图 4 中流场速度分布图可以看出, 当无三次风时, 向下气流的行程比原设计工况要长得多。从图 5 中炉内主气流沿炉膛高度方向的衰减曲线可以看出, 向下气流的转折点基本到达了炉底, 此时 $CH = 0.584$, 这个位置已经靠近判断火焰冲刷冷灰斗的极限值, 从偏安全的角度, 在缺少三次风的情况下, 冷灰斗存在结渣的可能性, 在实炉运行中应该加以注意。流场图谱中可以看出, 无三次风的炉内

仍能形成比较对称的 W 型火焰, 且沿炉宽方向并无明显的不同。在横向射流中, 三次风速度水平较高, 与拱上一次风速度大致在同一水平线。高速的横向射流对于拱上主气流有明显的阻碍作用, 这一点从火焰行程上可以看出。同时三次风作为一股载粉气流, 从燃烧的角度讲, 三次风应该穿透拱上主气流到达炉膛中部然后转弯向上, 而不是跟随主气流到达炉膛底部, 因为炉膛中部的温度水平要高于炉膛底部, 从穿透主气流方面考虑, 三次风应该保持在一定的速度水平以达到穿透主气流的目的。但是三次风位于炉膛中部, 如果使主气流在此位置转弯向上, 势

必导致火焰短路。工况3是在工况1的基础上提高拱上一次风风速, 目的在于研究三次风对于拱上风的阻碍作用大小, 从图4中可以看出, 当拱上一次风风速增大到 37.5 m/s 时, 炉内仍然形成较为对称的 W 型火焰, 拱上主气流在炉内的行程与工况 1 相差不多。从图 5 中拱上主气流速度衰减曲线可以看出, 火焰长度 $CH = 0.404$, 与工况 1 相比主气流在拐弯的位置剩余速度要高于工况 1。可见当拱上一次风风速在适当的范围内提高时, 由于三次风的阻碍作用, 拱上主气流不能冲入冷灰斗内造成冷灰斗结渣的可能。

4.2 炉内主气流在炉深 Y 方向的速度分布规律

图 6 是各工况下炉内主气流在炉深 Y 方向上的分布规律。工况 1 中在炉深方向 W 型火焰相对中心线基本对称分布。从冷灰斗上沿速度分布规律可以看出, 当下行气流到达冷灰斗上沿时, 虽然仍有气流

向下流动, 但沿炉深下行气流所占的流通断面在减小, 上升气流所占流通断面在增大, 此处气流已有大部分转弯向上流动, 总体气流的转弯就在冷灰斗上沿附近。缺少三次风的情况下, 炉内烟气沿炉深方向仍然能形成相对中心线基本对称的 W 型火焰。在 Z 方向上, 随 Z 的增大, 向上流通截面积不断变小。工况 2 中在缺少三次风的情况下, 分级风对主流的衰减程度不够, 使得主气流仍然向冷灰斗发展。同时, 由于动量流率较大的 F 层二次风对主气流有推动作用, 使主气流偏向炉膛中心位置, 所以在二次风 F 层下部处向上流动的气流所占横截面积反而减小, 这与原设计工况的流场规律有较大的不同, 究其原因还是因为缺少三次风时分级风对于主气流的衰减作用不够。工况 5 中, 拱上一次风风速增大并不影响炉深 Y 方向速度分布规律。

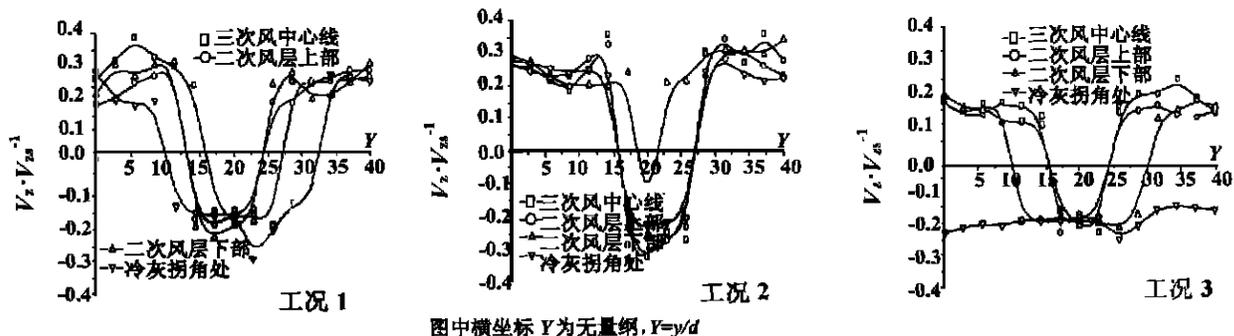


图 6 各工况下炉内主气流在炉深 Y 方向上的分布规律

4.3 炉内主气流充满度变化规律

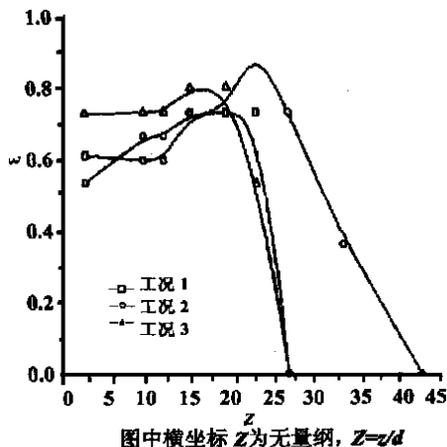


图 7 充满度变化曲线图

较差, 各工况大致在 0.4 ~ 0.6 之间。拱上主气流在向下运行的过程中不断扩散, 使得向下气流变粗, 炉膛横截面上向下气流所占比例上升, 主气流充满

度开始变好, 曲线上升, 随着前后墙上分级风的介入, 炉内主气流被横向射流推向炉膛中心, 炉膛端面上下行气流增多, 主气流充满度曲线再次上升。在炉膛下部及冷灰斗内, 由于主气流自身的衰减及横向分级风的衰减作用, 当气流运行到这些位置时已经衰减完毕或者拥有较小的动量流率, 炉膛横截面上的上升气流所占比例上升, 炉膛充满度开始变差, 主气流充满度曲线开始下降直至衰减到零。工况 1 和工况 2 相比, 曲线主要区别在炉膛中下部(即三次风喷口中心线以下的位置), 没有三次风的工况, 在炉膛下部主气流充满度明显要好于有三次风的工况。工况 3 的主气流充满度曲线变化规律说明在一定范围内增大一次风无助于改变炉膛下部的的主气流充满度, 这进一步证明了三次风对于拱上主气流的阻碍作用。

(下转第 281 页)

由于水的密度远大于烟气的密度, 流动时受重力的影响较大, 因此水平烟道各段的流量比较一致, 偏差值还不是很明显。锅炉在实际运行时, 偏差要大得多。通过试验, 可以定性地观察到各段流动特点。

从水模试验的观察结果可以看出, 调节上二次风喷口流量, 可以改变炉膛出口的流量分布。在实际运行中, 由于燃烧项的加入, 体积膨胀剧烈, 这种调节手段的影响可能更加明显。可以认为, 通过调节上部二次风量的分布, 能够起到削弱残余旋转, 减小偏差的作用。至于怎样的风量分配比较合适, 还有待进一步研究。

5 结论

本文对目前大型炉膛普遍存在的烟温烟速偏差问题进行了初步的探讨, 提出了一些新的调节方式, 并通过试验手段进行验证, 有一定的实用价值。就理论分析和试验结果, 可以得出以下结论:

(1) 分析认为, 引起炉膛出口烟速烟温偏差的

主要原因是炉内气流的残余旋转。通过调节上二次风喷口各角的风量, 形成烟气流动中局部的高压富燃区, 挤压火焰主流, 改变烟速烟温分布。可以起到迫使水平烟道两侧烟气流量基本平衡的目的。

(2) 通过水模试验, 采取调节上二次风量在各角的不均匀分配, 达到了削弱炉膛出口残余旋转, 减小烟气偏差的目的。

参考文献:

- [1] 郭宏生, 徐通模, 惠世恩, 等. 四角布置切向燃烧锅炉水平烟道烟温、汽温偏差原因分析及防止对策[J]. 动力工程, 1996, 16(2): 9-13.
- [2] 龚文字, 周月桂, 周屈兰, 等. 引进型 600 MW 切向燃烧锅炉烟气偏差的试验研究[J]. 动力工程, 1999, 19(2): 37-40.
- [3] 丁士发, 曹汉鼎, 许晋源. 四角切圆燃烧锅炉折焰角结构分析[J]. 动力工程, 1999, 19(2): 19-23.
- [4] 陈刚, 顾玉春, 谢勇. 三次风下移减小大容量煤粉锅炉烟温偏差[J]. 锅炉技术, 2000, 31(3): 27-29.
- [5] 丘纪华, 李佛金, 陈刚, 等. 煤粉射流燃烧特征试验及数值模拟[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(11): 107-109.

(渠源 编辑)

(上接第 266 页)

5 结论

(1) 通过冷态模化实验研究发现, 在原设计工况下, 炉内能够形成 W 型火焰, 主气流转弯在冷灰斗拐角处的下沿左右, 火焰行程较长。沿炉深方向火焰具有良好的对称性, 在炉宽方向未发生明显的不均匀现象, 动量流率比 $M_{拱}; M_{2D}; M_{2E}; M_3; M_{2F}$ 为 1; 0.25; 0.33; 1.33; 0.85。

(2) 三次风对于炉内流场的合理性具有重要作用。从极端工况(即缺少三次风的工况)中可以看出, 在其余参数与工况 1 保持一致, 关掉三次风的情况下炉内仍能形成较为对称的 W 型火焰, 但此时的火焰行程变长, 主气流运行至炉底并与炉底发生碰

撞后才转弯向上。

(3) 高速水平送入的三次风对于拱上主气流有明显的阻碍作用, 在适当的范围内提高拱上一次风风速并不会发生火焰冲刷冷灰斗, 当动量流率比 $M_{拱}; M_{2D}; M_{2E}; M_3; M_{2F}$ 增大到 1; 0.1; 0.14; 0.55; 0.35 火焰开始发生短路。

参考文献:

- [1] 魏小林, 徐通模, 惠世恩. W 型火焰锅炉冷态模型实验及数值计算[J]. 动力工程, 1994, 14(1): 27-32.
- [2] 李之光, 相似与模化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [3] 岑可法. 锅炉燃烧实验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 徐通模. 锅炉燃烧设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [5] 许晋源. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

(渠源 编辑)

alkali metallic oxides on the NO reduction, the authors have specially investigated the effect of bituminous coal char after its being subjected to an impregnated catalyst treatment on the NO reburning process and NO reduction rate. The test was completed at an initial concentration of NO at $1\ 000 \times 10^{-6}$ and under reaction temperatures of $900\ ^\circ\text{C}$ and $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ respectively. The test results indicate that the metallic oxides in the coal ash have a very strong catalytic action on NO in the reburning zone. The bituminous coal char originally believed to have a very poor effect on NO reduction can exercise a great influence on heterogeneous reduction of NO after a cheap catalyst being added to the above-mentioned coal char. Under the condition of an appropriate reaction temperature and stoichiometric ratio (SR) the catalyst in the coal char can reduce the activation energy of NO reduction reaction and expedite the speed of that reaction, thus quickening the NO reduction speed. **Key words:** reburning, coal char, NO catalytic reduction

中储式热风送粉 W 型火焰锅炉炉内空气动力场实验研究 = **Experimental Study of Aerodynamic Characteristics in a W-shaped Flame Boiler Equipped with a Bin and Feeder System and Fed Tertiary Hot Air in the Boiler Furnace** [刊, 汉] / YAN Xiao, XU Wei-jiang, SUN Xin-guo, HUI Shi-en, XU Tong-mo (Energy & Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 263 ~ 266, 281

With regard to a W-shaped flame boiler imported from US Foster Wheeler Co. and fitted with dual-swirl separation type pulverized coal burners a cold model was set up based on an analog simulation. With the help of an hot-wire anemometer and by the use of a trace method measurements of in-furnace aerodynamic field were taken under different operating conditions. As a result, obtained under various operating conditions were the vector diagrams of in-furnace flow field, length of flame, curves of in-furnace main gas-flow distribution along the furnace depth direction and curves of variation of main gas-flow filling-fullness degree. On the basis of the experimental results an analysis was conducted of the in-furnace aerodynamic characteristics. The results of an experimental study indicate that the tertiary air fed into the furnace at high velocity along a horizontal direction has a significant effect on the in-furnace aerodynamic characteristics. **Key words:** W-shaped flame boiler, cold model experiment, aerodynamic field, dynamic flow rate

近临界及超临界压力区垂直光管和内螺纹管传热特性的试验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Vertical Smooth Tubes and Internally Ribbed Ones in Near-critical and Supercritical Pressure Zones** [刊, 汉] / HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, SUN Dan (National Key Lab of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 267 ~ 270

Presented in this paper are the test results of the heat transfer characteristics of vertical smooth tubes and internally ribbed ones in near-critical and supercritical pressure zones. In the near-critical pressure zone the heat transfer characteristics of the smooth tubes will deteriorate when the pressure increases to approach the critical pressure. The critical dryness of heat transfer deterioration will experience a drastic reduction. In extreme cases there emerges a dramatic rise in wall temperature even in a sub-cooled zone. As for an internally ribbed tube, its heat transfer deterioration in the near-critical pressure zone can be eliminated. However, with the pressure approaching a critical one the capacity of the internally ribbed tube to suppress heat transfer deterioration will decrease. The minimum heat transfer factor of the smooth tube and internally ribbed tube after a heat transfer deterioration will occur respectively at a pressure of 21.0 MPa and 22.0 MPa. After surpassing the critical pressure the smooth tube and the internally ribbed one will have their respective heat transfer characteristics improved. In a high enthalpy zone the internally ribbed tube can experience a reduction in wall temperature. **Key words:** internally ribbed tube, heat transfer deterioration, near-critical pressure, supercritical pressure, supercritical pressure boiler

50 MW 高压锅炉全燃高炉煤气的研究 = **A Study of Blast Furnace Gas-fired 50 MW High-pressure Boiler** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, CAO Zi-dong, TANG Gui-hua, SHEN Yue-fen (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power.