

# 部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究

王伟平,张忠孝,滕叶,陈永权

(上海理工大学 动力工程学院,上海 200093)

**摘要:**以某 130 t/h 锅炉为原型搭建冷态实验台,研究部分气化煤制气再燃技术中多点喷射再燃气流对炉内上升气流的覆盖率,并采用标准湍流模型对其进行了数值模拟。结果表明:实验中八点喷射再燃气流对上升气流的覆盖率高,且 4 种工况中四角侧气流以  $41.17^\circ$  射入,四墙中心处再燃气流以  $84.57^\circ$  射入时,再燃气流对上二次风的覆盖效果最好。

**关键词:** 锅炉; 多点喷射; 冷态流场; 覆盖效果

中图分类号: TK227.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)01-0097-04

## Influence of multi-point injection on coverage fraction of coal gas during its reburning process

WANG Wei-ping, ZHANG Zhong-xiao, TENG Ye, CHEN Yong-quan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Taking one 130 t/h boiler as prototypes, established cold state experimental bench. To better reburn the coal gas, test the influence of multi-point injection on coverage fraction of upflow in gasifier. Numerically simulate this process with standard turbulence model. The results show that, while the injection points are eight, the coverage fraction is the highest. Under four conditions, when the flow inclination of four corners all is  $41.17^\circ$  and reburning flows from the centrals of four walls is  $84.57^\circ$ , the overfire air can be greatly covered.

**Key words:** boiler; multi-point injection; cold state flow field; coverage fraction

气体再燃是一种低  $\text{NO}_x$  燃烧技术,投资运行成本低且脱氮效率高,近年来受到广泛研究<sup>[1-2]</sup>,但由于中国气体燃料资源分布不均,限制了该技术的应用。在气体再燃低  $\text{NO}_x$  燃烧技术的基础上,针对缺乏再燃气的电厂,研发了“部分气化煤制气再燃技术”<sup>[3]</sup>,该技术在锅炉前安装小型加压气流床气化装置,将部分煤粉加压气化后产生的煤制气作为再燃燃料,在再燃区 8 个喷射点(炉膛四角各 4 个,炉膛四墙中心处各 4 个)高速喷入炉膛中心处,用以再燃还原  $\text{NO}_x$ 。

通过数值模拟与实验研究的方法,研究部分气化煤制气再燃技术中多喷射点再燃气流对炉内上升气流的覆盖率,为该技术的实际运行提供了参考。

## 1 实验装置及原理

### 1.1 实验装置

以某 130 t/h 锅炉为原型,根据 1:5 的比例搭建冷态实验台。实验台由 3 部分组成,分别为锅炉炉膛、燃烧器和送风管路。图 1 为冷态实验台系统。锅炉燃烧器喷口由下至上依次为下一次风喷口、下

收稿日期: 2012-11-12 责任编辑: 宫在芹

作者简介: 王伟平(1989—)男,江西抚州人,在读硕士,从事煤的清洁燃烧技术研究。

引用格式: 王伟平,张忠孝,滕叶,等.部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究[J].洁净煤技术,2013,19(1):97-100,117.

二次风喷口、上一次喷口、上二次风喷口、再燃气体喷口和燃尽风喷口。

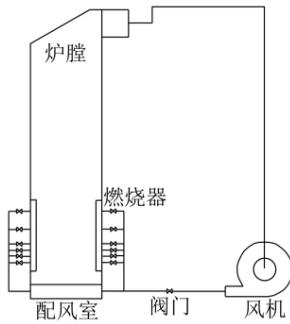


图1 冷态实验台系统

实验的工质为空气,实验仪器为热球风速仪,实验的测试区域及测点坐标布置如图2所示,其中x轴为以喷口中心为原点的气流轴线;y轴为沿燃烧器喷口的水平轴线;O点为燃烧器喷口中心。

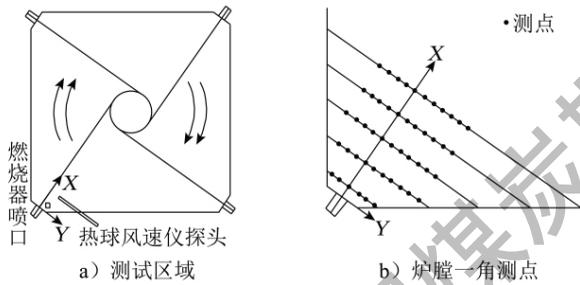


图2 测试区域及炉膛一角测点示意

### 1.2 实验原理

根据相似模化理论,冷态实验必须遵循以下原则<sup>[4]</sup>:①模型与实物保持几何相似;②模型与实物在对应的工况下,保证气流运动状态进入自模化区;③模型与实物的各股气流动量比相等。

由于模型与实物的一二次风动量比相等<sup>[5-6]</sup>,即

$$\frac{m_{1M}\omega_{1M}}{m_{2M}\omega_{2M}} = \frac{m_{20}\omega_{20} + m_P\omega_P}{m_{20}\omega_{20}} = \frac{m_{10}\omega_{10}(1 + k\mu)}{m_{20}\omega_{20}} \quad (1)$$

式中, M, O 分别代表模型和实物; 1, 2 分别代表一、二次风;  $m, \omega$  分别代表该喷口的质量流量及气流平均流速;  $\mu$  为一次风的煤粉质量浓度, kg/kg, 取 0.36;  $k$  考虑煤粉流速与风速不同的系数, 取 0.8。

同时根据模型与实物的欧拉数相等,可计算出模型二次风风速

$$\omega_{2M} = \omega_{20} \sqrt{\frac{\rho_{20}}{\rho_{2M}} \cdot \frac{\Delta P_{2M}}{\Delta P_{20}}} \quad (2)$$

式中,  $\Delta P_{2M}/\Delta P_{20}$  为模型与实物流阻, 取 2;  $\rho$  为密度。

联合式(1)、(2), 设定各喷口工质温度相等, 可得到:

$$\frac{\omega_{1M}}{\omega_{2M}} = \frac{\omega_{10}}{\omega_{20}} \sqrt{\frac{\rho_{2M}}{\rho_{1M}} \cdot \frac{\rho_{10}(1 + k\mu)}{\rho_{20}} \cdot \frac{f_{2M}}{f_{1M}} \cdot \frac{f_{10}}{f_{20}}} \quad (3)$$

根据实物不同喷口的运行参数, 可得到冷态模型的各喷口参数。表1为冷态模型与实物各个喷口参数对照。

参数	数值	参数	数值
模型一次风速	11.4	实际一次风速	22.0
模型二次风速	22.6	实际二次风速	50.0
模型再燃风速	51.0	实际再燃风速	100.0
模型燃尽风速	29.0	实际燃尽风速	64.2

在保证一次风、二次风、燃尽风不变的情况下, 在锅炉炉膛再燃区的四侧墙中心处增设4个再燃喷口。图3为八点喷射再燃示意。通过实验结果及数值模拟对比, 研究八点喷射在不同入射角度下的混合流动特性, 为电站锅炉多点喷射再燃脱硝提供参考。

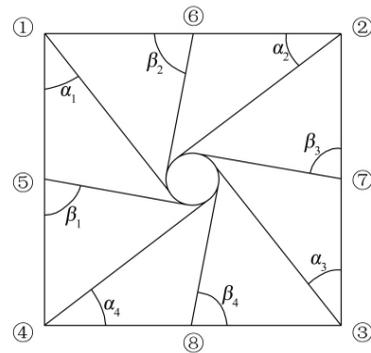


图3 八点喷射再燃示意

### 2 流场数值模拟

锅炉内的气体流动是一种三维湍流流动, 在三维直角坐标系中, 根据 Navier - Stokes 方程, 可得到气相湍流控制方程组, 其通用形式为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W\phi) = \frac{\partial}{\partial x}[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}] + S_\phi \quad (4)$$

入口边界条件: 一次风  $v_1 = 11.4$  m/s, 二次风  $v_2 = 22.6$  m/s, 再燃风  $v_3 = 51$  m/s, 燃尽风  $v_4 = 29$  m/s; 出口边界条件为炉膛出口负压取运行值 -50 Pa; 壁面边界条件: 无速度滑移, 无质量渗透条件。

其中,边界上的湍动能  $k = \frac{3}{2}(\overline{I\mu})^2$ ,湍动能耗散率

$\varepsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$ ,湍流强度  $I = 0.16\text{Re}^{-1/8}$ ,湍流长度

尺寸  $l = 0.007L$ 。

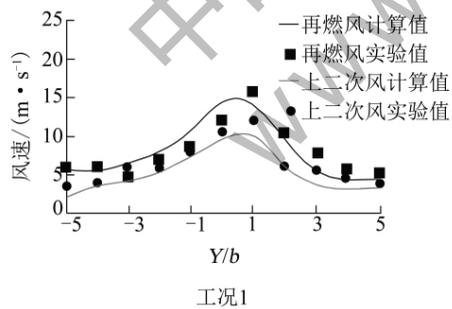
对各变量的差分方程组采用 SIMPLE 方法,二阶上风差分格式对流动方程组进行迭代<sup>[8]</sup>,得到不同工况下的炉膛流场的数值模拟结果。

### 3 实验值与计算值对比分析

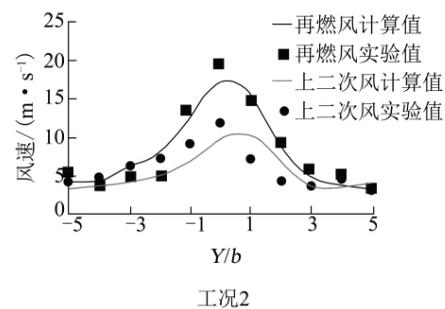
测量了 4 种工况下,炉膛四角处再燃喷口和上二次风喷口截面上 5 组无量纲距离  $X/b$  ( $X/b = 1, 2.5, 5, 7.5, 10$ , 喷口的宽度  $b$  为 2 cm) 测点上的风速,在每组  $X/b$  测点上,在喷口中心左右侧每隔 2 cm 进行速度测量,将测量的结果与数值模拟的结果进行对比。表 2 为工况 1~4 再燃喷口速度参数。

表 2 工况 1~4 再燃喷口速度参数

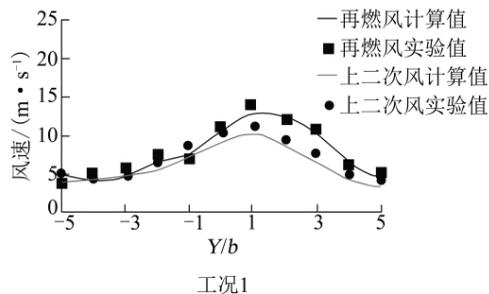
工况编号	四角处再燃风		墙中心处再燃风	
	入射角度 $\alpha/(\circ)$	入射风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	入射角度 $\beta/(\circ)$	入射风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	41.17	51	—	—
2	41.17	51	90.00	51
3	41.17	51	84.57	51
4	41.17	51	74.57	51



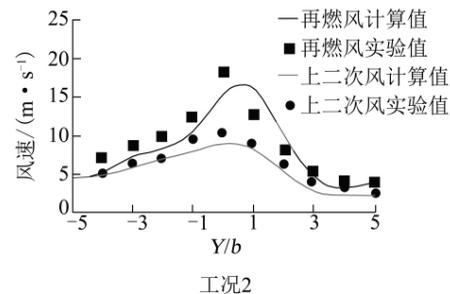
a)  $X/b=7.5$



工况 2



工况 1



工况 2

b)  $X/b=10.0$

图 4 工况 1 2 下四角再燃风和上二次风气流速度分布

#### 3.1 再燃喷口数目对覆盖效果的影响

湍流射流混合过程对化学反应有极为重要的作用<sup>[9]</sup>,再燃气流对炉膛下部区域的旋转上升烟气流体的覆盖效果,决定了再燃气流和炉内烟气的混合程度,从而影响脱硝效率。大量研究表明沿炉膛水平截面,炉内气流浓度剖面分布同速度剖面分布将存在相似性<sup>[10]</sup>,因此实验中可以用速度的分布来表征浓度的分布<sup>[11]</sup>。

工况 1 2 中再燃气流高速喷入炉膛,在喷口前端 ( $X/b = 1, 2.5, 5$ ),由于风速大,气流刚性较强,再燃气流与上二次风的速度中心轴线大致重合,再燃气流速度在  $-2 < Y/b < 2$  范围内均高于上二次风,可以很好的覆盖炉膛下部的上升气流。

由图 4a) 可知,当气流接近炉膛中心处 ( $X/b = 7.5$ ) 时,工况 1 由于再燃气流速率出现衰减,再燃气流在炉内旋转气流冲击下向锅炉炉墙一侧偏斜<sup>[12]</sup>,其速度最大值出现在  $Y/b = 1$  附近;相比于工况 1 2 的气流偏斜率要小。由图 4b) 可知,工况 1 再燃气流的最大值为 13.1 m/s,不能明显高于上二次风速,表示该处再燃气流覆盖效果较差。而在工况 2 中,由于锅炉四侧墙中心处增设了再燃喷口,通过周围气流的卷吸作用,保证了四角侧再燃风有足够的动量,能够射入炉膛旋转气流中心,对上二次风的覆盖率更高。

### 3.2 四墙中心处再燃气流射角度对覆盖效果的影响

对于燃煤锅炉,切圆直径是炉内气流流动状态的重要特征<sup>[8]</sup>,理想的炉内气流流动状态是在炉膛中心形成合适的圆形旋转火焰<sup>[13-14]</sup>。

在保证再燃风速及上二次风速不变的情况下,改变四侧墙中心处再燃气流射角度,由 $90^\circ$ 逐渐调整至 $74.57^\circ$ ,由图5a)可以看出,在远离喷口的位置( $X/b=7.5$ )处,随着入射角度的降低,工况2、3、4的再燃气流中心处最大速度点分别出现在 $Y/b=0.5, 1, 1.5$ 左右,该现象表明在不同的入射角度下,由于四侧墙中心处再燃气流与四角侧的再燃气流

混合强度不同,从而引起四角侧再燃气流偏斜率的差异,最终形成不同直径的切圆。

工况4再燃气流中心处最大速度点出现在 $Y/b=1.5$ ,再燃气流偏斜率最大,在炉内形成较大的切圆,切圆直径过大,使再燃气流容易贴墙,在实际运行中易造成水冷壁的结渣<sup>[15]</sup>。

根据图5b)可知,工况2、3中再燃气流速度在 $-2 < Y/b < 2$ 范围内均高于上二次风风速,且再燃风与上二次风的速度中心轴线基本重合;但工况3在 $X/b=10$ 处的再燃气流最大风速小于工况2,同时再燃气流偏斜率大于工况2,表明工况3在炉内能形成更大的切圆,覆盖效果更好。

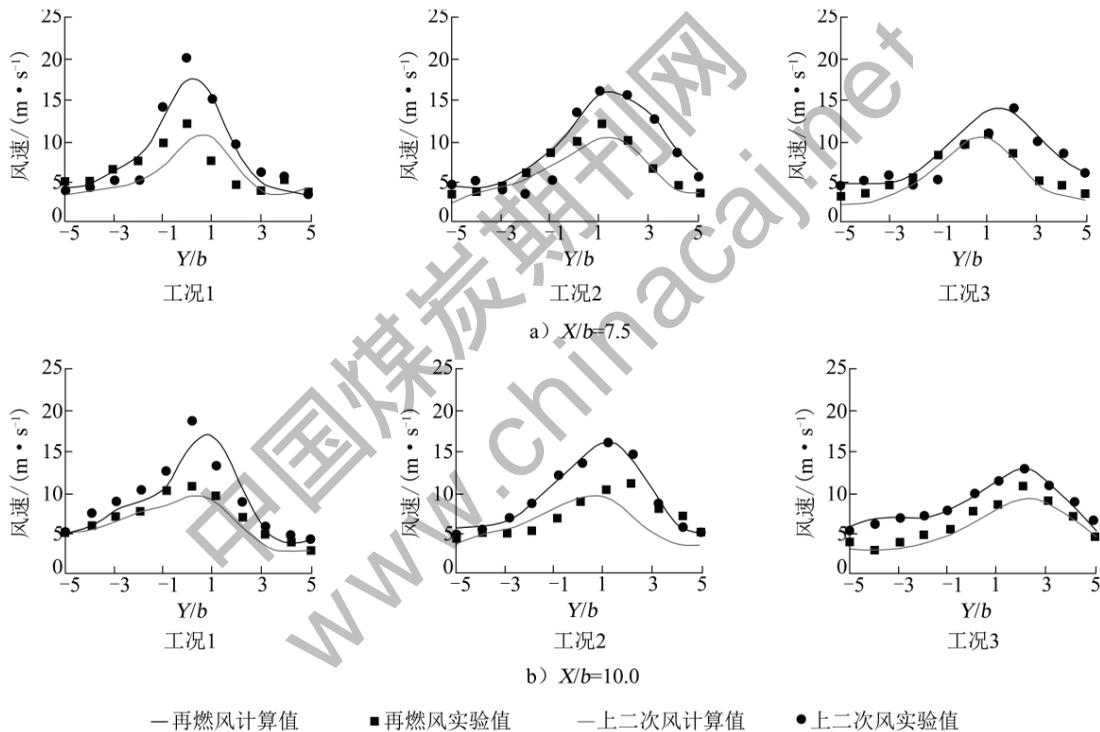


图5 工况2、3、4下四角再燃风和上二次风气流速度分布

## 4 结 论

1) 部分气化煤制气再燃脱硝技术中,与炉膛四角侧气流喷射方式相比,八点喷射的再燃气流对炉内上升气流覆盖效果更好,有利于脱硝效率的提高;

2) 八点喷射再燃方式中,再燃气流射角度对于炉内上升气流的覆盖效果有较大的影响,在本文研究的四种实验工况中,工况3中四角侧气流以 $41.17^\circ$ 射入,四墙中心处再燃气流以 $84.57^\circ$ 射入,再燃气流对上二次风的覆盖效果最好。

### 参考文献:

[1] 张忠孝,姚向东,乌晓江,等. 气体再燃低 $NO_x$ 排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 99-102.  
 [2] 陶晓华,张忠孝,陈国艳,等. 天然气再燃还原 $NO_x$ 动力学模拟及试验研究[J]. 洁净煤技术, 2006, 12(3): 67-70.  
 [3] 张忠孝. 部分气化煤制气再燃低 $NO_x$ 燃烧系统[P]. 中国专利: 200710044664.8 2009-02-11.

(下转第117页)

经过洗选,矸石可以就地废弃,减少无效运输,同时为综合利用煤矸石创造条件<sup>[9]</sup>。据此目的,进行全面的质量管理。

1) 加强入选原煤管理,加大对入选原煤的考核力度,确保入选原煤平均灰分误差控制在规定范围。要求入选的原煤质量稳定,应加强煤炭企业全面质量管理,保持煤炭质量的优质、稳定。矿井的煤质管理是整个企业煤炭质量全面管理的根本。保证煤质稳定对煤炭洗选加工有重大意义。

2) 定期召开煤质分析例会。选煤厂煤质领导小组每月定期组织相关人员召开煤质例会,对煤质管理中存在的问题进行得失分析,强化管理人员的煤质意识,提高煤质管理的执行力。

3) 在材料采购环节要降低采购成本。材料成本是原煤成本中的最主要变动成本,具有很大的潜力空间。材料采购是材料成本发生的第一环节,应制定原材料计划制度、采购控制制度及售后跟踪制度<sup>[10]</sup>。

4) 选煤厂设备具有连续化、自动化、高速度、精密化的特点<sup>[11]</sup>。高度的机械化要求各工种之间无缝衔接,上一道工序为下一道作好铺垫,不留问题。质量意识牢记在心,时时刻刻不忘质量是企业生存之本。加强对机电设备的管理与维护,为连续生产作好日常保养工作。

### 3 结 语

如何将全面质量管理更好地应用到选煤生产的各个环节,切实利用好选煤厂加工手段,生产出

适销对路的优良产品,作到最低运营成本运营,是选煤工作者面临的长久的课题。只有执行全面质量管理,按照技术先进、经济合理的原则,降低生产成本,在保证产品质量的前提下,达到精煤产率最大化,从而实现选煤厂经济效益最大化。

#### 参考文献:

- [1] 王玉鑫. 对青山选煤厂质量管理工作的分析[J]. 煤炭技术, 2012, 31(3): 141-142.
- [2] 张晔. 精益理论在电子制造业机电设备产能管理中的实践与研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- [3] 范婧. 企业产品危机管理探究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [4] 张红权. 辽宁移动公司生产机房项目全面质量管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [5] 王建运. 压力管道元件质量保证体系运转情况的监督检查[J]. 化工设备与管理, 2010, 47(5): 51-53.
- [6] 丁大勇. 建筑工程施工项目质量管理与控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
- [7] 张立. 基于TQM的LK公司粉针生产质量管理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [8] 秦岩. 选煤厂精细化管理的策略探讨[J]. 煤质技术, 2008(6): 7-8.
- [9] 孙淑君. 全面质量管理与编辑部管理[J]. 河北煤炭, 1999(3): 72.
- [10] 宿建民. 商品煤质量问题与应对策略[J]. 煤炭技术, 2008, 27(8): 168-169.
- [11] 班海俊, 杨兵乾. 我国选煤行业管理现状[J]. 陕西煤炭, 2009(1): 31-32.
- [10] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [11] 吴双应, 李友荣, 卢啸风. 采用喷气再燃降低NO<sub>x</sub>排放时单喷嘴射流的冷态分析[J]. 工业加热, 2001(6): 4-7.
- [12] 张泽, 吴少华, 秦裕琨, 等. 炉内喷嘴射流刚性的理论模型及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 104-109.
- [13] 王莹, 秦裕琨, 吴少华, 等. 炉内流场对水冷壁高温腐蚀影响的数值模拟分析[J]. 热能动力工程, 2000, 15(3): 284-286.
- [14] 朱彤, 范卫东, 信伟, 等. 双炉膛炉内空气动力场的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 1997, 12(6): 401-404.
- [15] 李永华, 司金茹. 不同摆角下四墙切圆燃烧器的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 17-24.

(上接第100页)

- [4] 李之光. 相似与模化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [5] 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及其测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [6] 阎维平, 刘亚芝, 黄景立. 2000t/h四墙切圆锅炉炉内空气动力场试验研究[J]. 电站系统工程, 2010(5): 4-6.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 周托, 张忠孝, 乌晓江, 等. 气体再燃燃烧器喷口流动特性冷态实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(2): 137-141.
- [9] 秦裕琨, 张泽, 吴少华, 等. 切圆燃烧流场中水平浓淡风煤粉燃烧器射流特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 67-71.