

低流量煤粉稳燃燃烧器内回流特性研究

严祯荣 韩 军 仝庆华 茆敦平

(上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062)

摘 要: 运用 CFD 技术和实验研究了一次风速度、内二次风速度、内二次风旋流强度和钝体阻塞率等参量变化对回流区大小和回流速度的影响。增加内二次风速, 回流区长度和平均回流速度皆呈现缓慢增加趋势; 增加内二次风旋流强度, 回流区长度和平均回流速度能较快增加, 能明显地提高回流区卷吸高温烟气热量; 钝体阻塞率为 1.070 是比较合适的。

关 键 词: 煤粉工业锅炉; 低流量燃烧器; 稳燃技术; CFD 技术; 锥形钝体; 回流区

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

燃煤粉工业锅炉在高效率、环保、运行成本、小容量适应性、煤种适应性等方面, 与其它燃煤工业锅炉的洁净煤技术相比较, 都具有较大的绝对优势和广阔的发展前景。然而, 对于燃煤工业锅炉而言, 由于燃煤流量小, 炉膛容积也较小, 实现燃烧器的稳燃, 合理组织炉内流动和燃烧工况是十分困难的, 制约燃煤粉工业锅炉全面推广应用。尽快研究开发工业锅炉煤粉燃烧器, 是决定燃煤粉工业锅炉发展前景的最关键的工作^[1]。岑可法等人指出, 实现煤粉在工业锅炉中的燃烧, 燃烧器的设计是关键^[2]。提高点火区域的煤粉浓度和在一次风粉管喷口设置一个容积比较小的煤粉预燃室是实现低流量煤粉燃烧器稳燃的基本措施。然而, 低流量煤粉燃烧器的一次风煤粉混合物离开喷口到达着火区域处的时间很短, 来不及吸收炉内大量的辐射热以确保煤粉着火和稳燃, 为此, 可以考虑依靠炉内高温烟气的回流来加热一次风粉混合物, 这种一次风粉混合物与高温烟气直接接触时强烈混合产生的对流传热效果比辐射传热更为强烈。实现炉内高温烟气的回流可以采用钝体回燃的方式。研究表明^[3], 钝体形状决定了回燃的效果的好坏, 是影响流场特性的关键因素, 非流线型钝体比流线型钝体具有更大的中心回流区尺

寸和回流量; 与楔型钝体和抛物线型钝体相比, 锥型钝体具有更好的稳燃效果。因此, 研究低流量煤粉稳燃燃烧器内回流特性是非常必要的。

1 低流量煤粉稳燃燃烧器的结构

合理组织燃烧器内空气动力场是获得良好稳燃效果的关键, 为此设计出一种低流量煤粉稳燃燃烧器, 其结构如图 1 所示, d 为一次风道直径, b 为钝体高度, D 为预燃室直径。当一次风粉混合物进入一次风粉道, 在内二次风旋流器的作用下, 到达喷口处遇到钝体, 一次风粉混合物绕过钝体时, 在钝体后形成一个稳定的回流区, 在回流区内充满炉膛中心回流来的高温烟气, 使回流区成为巨大的蓄热体, 在回流区外侧与主流之间的区域, 在外二次风道的热空气作用下, 形成可燃燃气粉混合物和热回流烟气湍流混合区, 由于在边界上有较大的径向速度梯度, 可燃混合物和高温烟气之间发生强烈的质量、动量和能量交换, 可燃混合物就不断被加热而升温, 并达到着火温度而开始着火。火焰由内向外传播, 并把热量又传给回流的烟气, 使之带往上游, 再把热量传给新鲜的可燃混合物, 在预燃室内形成稳定燃烧。

2 参量对回流特性的影响

由图 1 得到, 影响燃烧器内回流特性的参量有一次风速(v_1)、内二次风速(v_2)、内二次风旋流强度(Ω)、钝体阻塞率($b \cdot r$) (定义 $(b/d)^2$ 为钝体阻塞率, 一般记作 $B \cdot R$)。由于参量的变化多, 依靠实验手段来获得各种情况下的燃烧器内空气动力场具有工作周期长、成本高、测量难度大等问题^[4], 给研究工作带来了巨大困难。近几年来, 数值模拟 (CFD) 技术的准确性和可靠性已经得到工程界和理

收稿日期: 2011-05-24; 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目 (2009QK112)

作者简介: 严祯荣 (1972-) 男, 四川岳池人, 上海市特种设备监督检验技术研究院高级工程师、博士。

论界共同认可,其省时省力、灵活改变运行条件的特点受到了众多国内外学者的青睐^[5-7]。为此,运用 CFD 技术来研究参量变化对回流区域空气动力场的影响规律,考察回流区域对流换热强弱效果,以优化出适合燃烧更低流量煤粉的稳燃燃烧器。

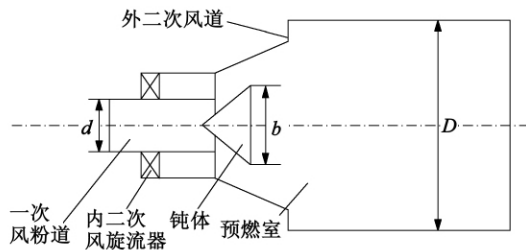


图 1 低流量煤粉稳燃燃烧器结构

Fig. 1 Structure of a pulverized coal burner with stable combustion at a low flow rate

2.1 模拟对象及网格划分

以图 1 作为物理模型。其中一次风为直流风;二次风采用内、外分级送风方式,实现空气的分级供给,其中内二次风经过旋流叶片后以旋流形式进入预燃室内,外二次风采用直流风。图 2 为计算区域的网格划分图,网格总数约为 50 万。燃烧器一次风和内二次风出口附近区域采用非结构化四面体网格并进行了加密,其余部分均采用规则六面体网格,另外在预燃室后方增加了一段计算空间,以便能得到完整的回流区尺寸。

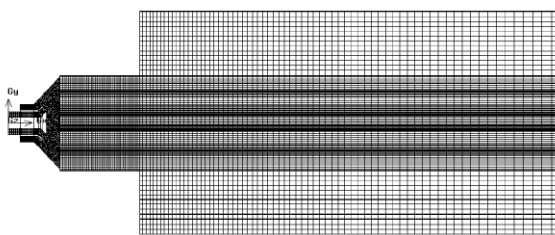


图 2 网格示意图

Fig. 2 Schematic drawing of a grid

2.2 数学模型和计算方法

考虑到计算物理模型的结构特点,选用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型来模拟强旋转流动的湍流流场,其计算精度比标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型的计算结果高,其表达式为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \varepsilon + G_k \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon} \rho \quad (2)$$

式中: κ —湍流脉动动能; ε —湍流动能的耗散率; μ —气体的粘性系数; μ_t —湍流粘性系数 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; G_k —由于平均速度分量引起的湍能; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\sigma_k = 0.07179$, $\sigma_\varepsilon = 0.07179$ 。

计算中的边界条件:一次风,内、外二次风进口设置为速度进口,预燃室出口设置为压力出口,其余壁面均为无滑移壁面,表面粗糙度为 0.5。收敛条件:连续性方程残差小于 1×10^{-4} ,流场速度残差小于 1×10^{-3} ,湍流模型中 κ 、 ε 的残差小于 1×10^{-3} 。

2.3 结果分析

在模拟计算时,燃烧器的外二次风保持不变,而通过改变一次风速、内二次风速、内二次风旋流强度、钝体阻塞率等参量来获得该燃烧器流场特性的变化规律。

2.3.1 参量变化对回流区域大小的影响

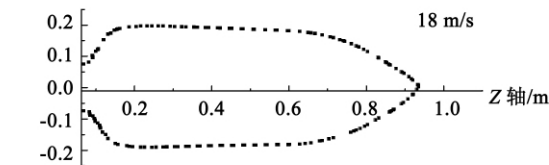
回流区域大小可以用轴向长度和径向宽度来衡量。图 3 表示参量变化对回流区域轴向长度的影响。图 3(a) 为不同 v_1 时的回流区域情况,当 v_1 由 18 m/s 提高到 26 m/s 时,回流区轴向长度由 0.935 m 增至 0.939 m,可见回流区轴向长度随 v_1 的增加变化缓慢。图 3(b) 为不同 v_2 回流区域大小情况,当 v_2 分别为 18、21 和 25 m/s 时,回流区长度对应为 0.896、0.915 和 0.933 m,长度增加较为明显。图 3(c) 为不同 Ω 时回流区域大小情况,当 Ω 由 1.23 增至 3.70 时,回流区长度由 0.905 m 增大为 1.007 m,即相对增大了 10.2%,变化十分明显。图 3(d) 为不同的 $B \cdot R$ 的回流区域大小情况,3 种不同钝体阻塞率下的回流区长度分别为 0.946、0.930、0.945,呈先减后增的趋势。

在回流区的径向宽度方面,由于工业锅炉燃烧器中的预燃室空间较小,气流流动被空间约束而在径向方向上得不到充分地发展,故各工况下所得回流区宽度随轴向距离的增大而均在 0.4 m 左右波动。

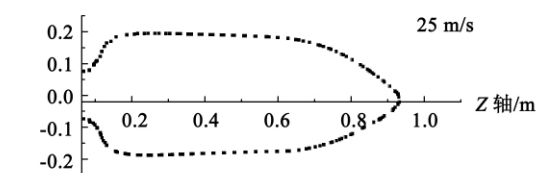
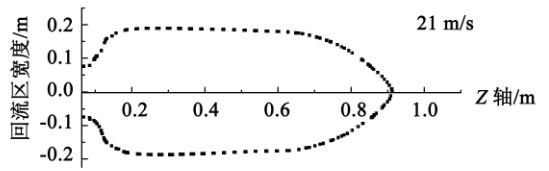
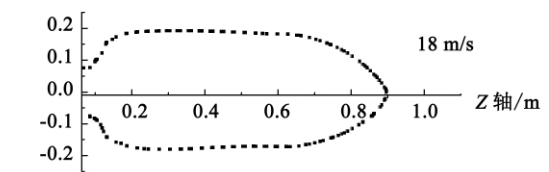
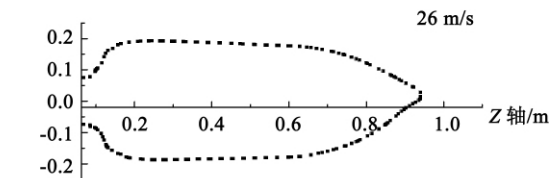
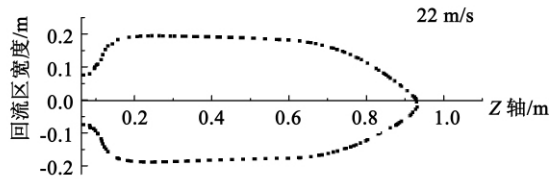
2.3.2 参量变化对回流区域轴向速度的影响

分析了参量变化对燃烧器空气动力场回流区大小的影响情况,回流区域的对流换热强弱效果不但与回流区域大小有关,而且还与回流区域速度有关。根据计算结果,对轴向距离为 0.2~0.6 m 之间若干截面上的流场轴向速度进行了统计,得到各参量下的预燃室径向坐标上平均轴向速度的分布曲线,如图 4 所示。由图 4 中可以看出,轴向速度分布均呈开口向上的抛物线分布。图 4 中曲线与横坐标的两交点的距离则可以反映流场回流区的直径大小,因

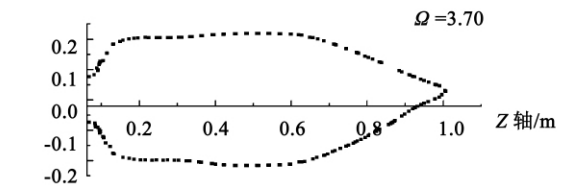
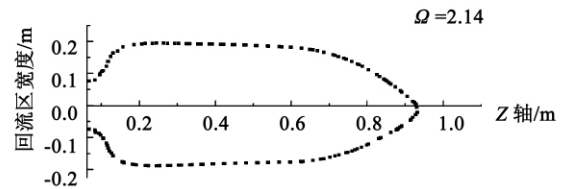
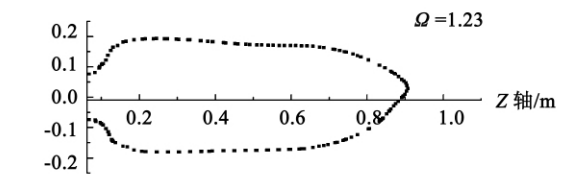
为在靠近预燃室内壁处由于有直流外二次风作用,使得该处附近的轴向速度方向为正,而旋转内二次风和钝体的共同作用使得预燃室内流场中心区域存在负压,产生回流,因此在流场中心位置轴向速度为负值。图 4(a) 所示,当一次风速为 18、22 和 26 m/s 时,所得的最大回流速度分别为 8.1、8.0 和 7.6 m/s,截面平均回流速度分别为 6.3、6.2 和 5.9 m/s,表明一次风风速增大时流场中心回流速度略有降低。图 4(b) 所示,内二次风风速的变化时的 3 个工况下所得的最大回流速度分别为 8.1、8.1 和 8.0 m/s,速度分布情况也较为相似,表明内二次风速的变化对轴向回流速度影响较小。



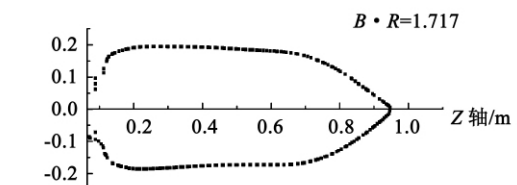
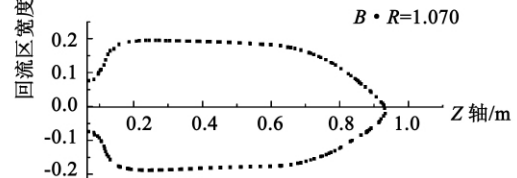
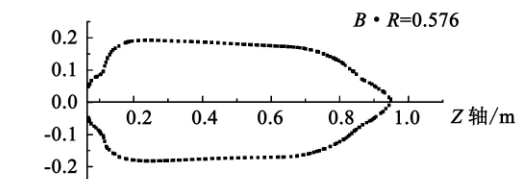
(a) 一次风速对回流区轴向长度的影响



(b) 内二次风速对回流区轴向长度的影响



(c) 内二次风旋流强度速对回流区轴向长度的影响



(d) 钝体阻塞率对回流区轴向长度的影响

图 3 参量变化对回流区域大小的影响

Fig. 3 Influence of the change in parametric variables on the size of the return flow zone

图 4(c) 所示,内二次风旋流强度变化时,在三种工况下所测得的最大回流速度呈现了递减趋势,平均回流速度依次为 6.1、6.2 和 5.7 m/s,但 $\Omega = 3.70$ 工况下的回流面积也明显大于前面两个空况,三种工况下的回流区直径分别为 0.34、0.36 和 0.44 m,则回流区回流量分别为 2.2、2.5 和 3.5 m^3/s ,这表明提高内二次风旋流强度能使流场具有更高的卷

吸高温烟气的能力, 从而有助于煤粉的换热和燃烧。图 4(d) 所示, 钝体阻塞率 $B \cdot R$ 分别为 0.576、1.070、1.717 的 3 种工况中所测得的最大回流速度

依次为 6.2、6.2 和 6 m/s, 平均回流速度为 5.4、6.2 和 5.0 m/s, 说明随着钝体阻塞率的增加, 回流速度总体上呈先增后减的趋势。

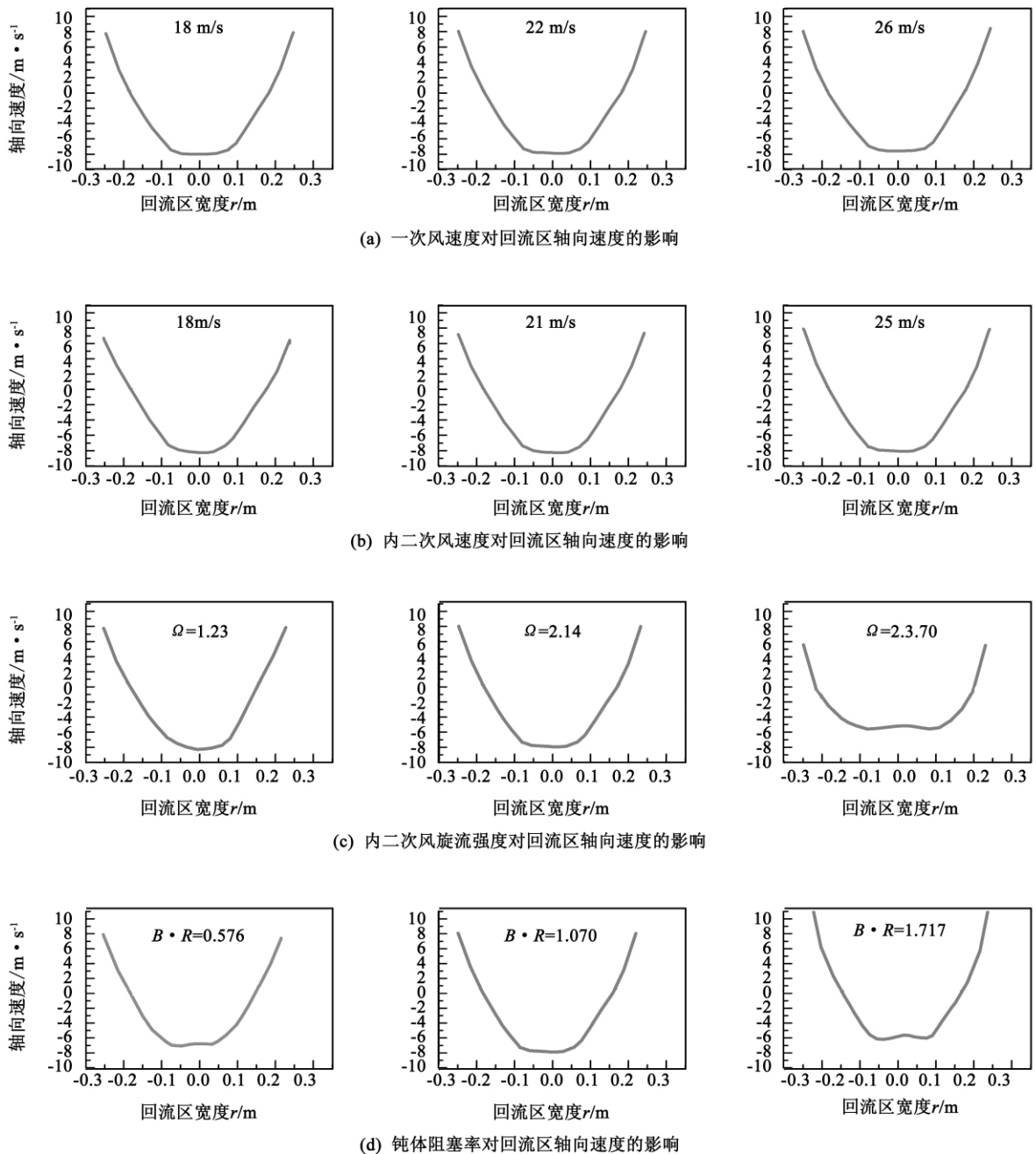


图 4 参量变化对回流区轴向速度的影响

Fig. 4 Influence of the change in parametric variables on the axial velocity in the return flow zone

2.4 合理的参量选择

从 2.3 节分析可知, 一次风速的变化对燃烧器内空气动力场没有明显的有益影响, 其中随一次风速由 18 m/s 增加至 26 m/s 的过程中, 流场平均回

流速度下降了 6%, 分析其原因为直流一次风进入燃烧器预燃室后会对回流产生冲击, 一定程度上减缓了回流区内的气流速度, 因而随一次风速的增加流场中的平均回流速度会有所降低。内二次风旋流

强度的增加能够较明显地提高燃烧器流场卷吸高温烟气的能力,其值由 1.23 提高至 3.70 时,回流区轴向长度增加了 10.2%,而截面上的平均回流量上升了 37%,而随内二次风速的增加,回流区长度和平均回流速度皆呈现缓慢增加趋势。钝体阻塞率变化对燃烧器的空气动力场影响也不明显,比较而言钝体阻塞率为 1.070 时燃烧器内回流速度偏大,有利于强化回流区域内对流换热。因此,低流量煤粉稳燃燃烧器的参量宜选择较大的内二次风旋流强度,钝体阻塞率为 1.070 时比较合适。

3 回流特性的实验验证

3.1 实验系统

冷态实验台系统图如图 5 所示,燃烧器由一次风管、内二次风管、外二次风道和预燃室组成。其中,内二次风采用旋流的送风方式,外二次风设置于预燃室壁面附近,其送风方式为直流。实验的主要目的是通过一次风速、二次风速、二次风旋流强度、钝体阻塞率,测量燃烧器截面轴向速度,然后分析上述参量对截面轴向速度的影响,并对实验结果与模拟结果进行比较,分析两者的差异。

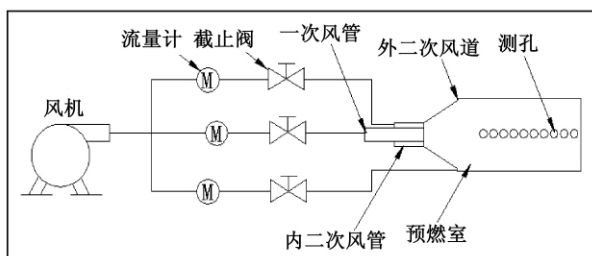


图 5 回流特性实验系统图

Fig. 5 Diagram of a return flow characteristic test system

3.2 实验原理

冷态实验仅仅实现风速的测量,依据毕托管的测速原理,分别测出管道中不同测点处的总压和静压,从而算出动压,进而获得测点处的速度^[8]。实验中一次风管、二次风管、分级风管一同连接于接出管,接出管的另一端安装在送风机上,每个支管上都安装有蝶形阀,用以控制每个管道的流量。一次风速以及二次风速参数的调节通过改变蝶形阀开度实现,而二次风旋流强度则通过改变旋流叶片的角度实现,钝体阻塞率则通过制作不同的中心风管扩锥大小来实现。

3.3 实验方法

实验过程中将风机产生的风量分为三路,通过一次风管、内二次风管和外二次风管分别引入燃烧器,每个支路上安装蝶形阀及涡街流量计以控制和调整送风量,流量计的精度为 0.5%。在预燃室水平方向每间隔 50 mm 设置一个测孔,共计 10 个。另外,在每个测孔与预燃室所在的垂直截面上每 35 mm 设置一个测点,共计 15 个,测点总数为 10 × 15,共 150 个。

实验过程中,通过各支管上的蝶形阀可实现各风口风速的调节。调节蝶形阀,使用标定好的毕托管通过直管道的测孔测量管道内的风速,使此风速达到指定燃烧器工况下经换算的值。通过更换可拆卸、带不同旋流角度的内二次风旋流叶片实现内二次风旋流强度的变换。钝体阻塞率则通过制作不同高度的钝体和改变中心风管扩锥大小来实现。实验中利用 IFA300 型二维热线风速仪对燃烧器预燃室内旋转射流在各测点上的轴向速度进行测量,其测试精度为 0.1 m/s。实验时,采用三孔探针和微压计测量燃烧器的速度场分布,对燃烧器测点测量其所在轴向速度大小;轴向速度的测量是在测量位置开测量孔,然后在该位置沿径向布置 9 个测点来进行。利用飘带法观测各测点上的气流流动方向,以确定出各工况下回流区的尺寸和长度大小。

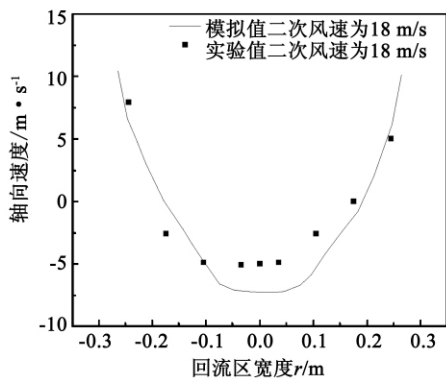
3.4 实验结果与模拟结果比较

实验工况 1 为一次风速为 22 m/s,二次风旋流强度 Ω 为 2.14,钝体阻塞率 $B \cdot R$ 为 0.576。改变内二次风速 v_2 这个参量,测量回流区轴向速度和回流区的宽度的变化曲线,并与数值模拟值进行比较,如图 6 所示。实验与数值模拟结果基本吻合,进一步表明数值模拟的结果是可靠的。

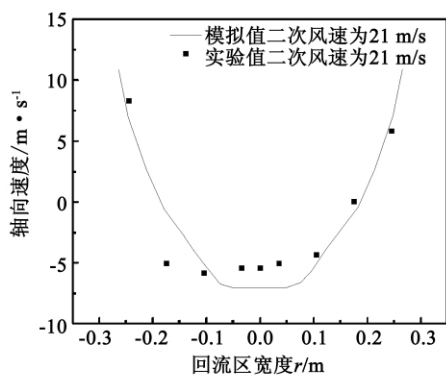
4 结论

(1) 燃煤粉工业锅炉煤流量低,炉膛容积小,要实现稳燃,就要提高着火区域煤粉浓度、着火区域热量和设置有限空间的煤粉预燃室。

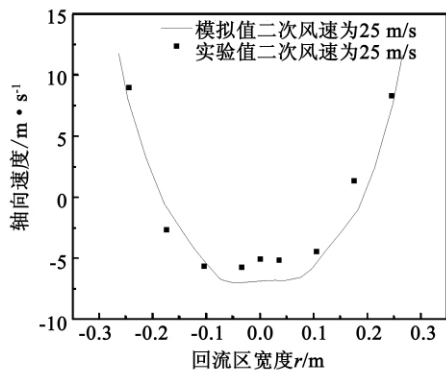
(2) 一次风速度、内二次风速度、内二次风旋流强度以及锥形钝体阻塞率等参量对预燃室内的回流区的轴向长度、轴向速度发生影响,进而影响回流区的热量和稳燃性能。低流量煤粉稳燃燃烧器的参量宜选择较大的内二次风旋流强度,钝体阻塞率为 1.070 时比较合适。



(a) 内二次风速为 18 m/s 时的比较



(b) 内二次风速为 21 m/s 时的比较



(c) 内二次风速为 25 m/s 时的比较

图 6 工况 1 的实验与数值模拟结果比较

Fig. 6 Comparison of the test results with simulated ones under the No. 1 operating condition

参考文献:

[1] 严祯荣, 罗晓明, 时贵玉, 等. 燃煤粉工业锅炉的发展前景及节能减排技术创新[J]. 节能技术, 2010, 28(1): 65-69, 71.
YAN Zhen-rong, LUO Xiao-ming, SHI Gui-yu, et al. Prospects of pulverized coal-fired industrial boilers and energy-saving and emissions reduction technical innovations [J]. Energy-saving Technology, 2010, 28(1): 65-69, 71.

[2] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.

CEN Ke-fa, YAO Qiang, LUO Zhong-yang, et al. Higher combustion [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.

[3] 曾东和, 易超, 熊立红. 钝体形状对旋流燃烧器出口流场影响的数值研究[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 375-378, 442.
CENG Dong-he, YI Chao, XIONG Li-hong. Numerical study of the influence of the passivated body shape on the flow field at the outlet of a swirling flow burner [J]. Power Engineering, 2006, 26(3): 375-378, 442.

[4] Special A, Cui J. CFD studies on burner secondary airflow [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(2): 1126-1140.

[5] 唐强, 罗渝东, 张力, 等. 低热值煤层气燃烧器的影响因素及优化的数值模拟[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 344-348.
TANG Qiang, LUO Yu-dong, ZHANG Li, et al. Numerical simulation of the factors influencing a low heating value coal-bed gas burner and its optimization [J]. Power Engineering, 2007, 27(3): 344-348.

[6] 徐岩. 新型煤粉燃烧器燃烧过程数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
XU Yan. Study of the numerical simulation of the combustion process of a new type pulverized coal burner [J]. Wuhan: Central China University of Science and Technology, 2007.

[7] 安恩科, 于娟, 朱基木, 等. 低 NO_x 燃烧器与常规直流煤粉燃烧器的 NO_x 生产特性的研究[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 784-789.
AN En-ke, YU Juan, ZHU Ji-mu, et al. Study of the NO_x production characteristics of a low NO_x burner and conventional once-through pulverized coal burner [J]. Power Engineering, 2006, 26(6): 784-789.

[8] 朱霖, 池作和, 孙公钢, 等. 一种适用于煤粉工业锅炉燃烧器的冷态流场特性研究[J]. 中国计量学院学报, 2011, 22(1): 39-43.
ZHU Lin, CHI Zuo-he, SUN Gong-gang, et al. Study of the cold-state flow field characteristics of a burner applicable for pulverized coal-fired industrial boilers [J]. Journal of China Metering College, 2011, 22(1): 39-43.

(丛敏编辑)

更正

《热能动力工程》2012 年(2) 第 211 页图中的温度 1300、1500 应为 1200、1300; 第 251 页图 12 中(a) 图 0.002 应为 0.02, (c) 图 0.001 应为 0.01, 0.0012 应为 0.012。

特此更正

旋流片开槽深度对低热值煤层气燃烧特性的影响 = **Influence of the Depth of the Grooves of the Swirling Flow Baffle on the Combustion Characteristics of Coal Bed Gas With a Low Heating Value** [刊, 汉] ZHOU

Jin, ZHANG Li, YAN Yun-fei, PU Ke (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(3). - 312 ~ 317

To enhance the combustion efficiency of the coal bed gas with a low heating value, designed were three types of low heating value coal bed gas burner combined by different depths of the groove on the baffle. An experimental study was performed of the combustion characteristics with the influence of various flow rates and depths of the groove on the velocity and temperature inside the combustion chamber as well as its flame configuration characteristics being analyzed. It has been found that the distribution of flame temperature along the axial line direction is similar to that of the flow speed and both have a peak value of temperature and speed. At a same axial distance, the methane flow rate will decrease and the central flow speed of the flame and temperature peak value of the three types of the swirling flow baffle will gradually decrease. In addition, the peak value locations of the central flow speed and temperature will also gradually move forward, however, that of the temperature is invariably greater than that of the central flow speed. When the swirling flow baffle with grooves of 3 mm deep are used, the length and diameter of the flame will increase most quickly and the axial speed distribution and the temperature field inside the combustion chamber will be optimum, thus achieving an optimum rigidity of the jet flow and an optimum filling degree of the flame. **Key words:** low heating value, coal bed gas, swirling flow, combustion, burner

低流量煤粉稳燃燃烧器内回流特性研究 = **Study of the Return Flow Characteristics of a Low-flow-rate Pulverized Coal Steady-combustion Burner** [刊, 汉] YAN Zhen-rong, HAN Jun, TONG Qing-hua, MAO Dun-ping

(Shanghai City Special-purpose Equipment Surveillance and Inspection Technique Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200062) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(3). - 318 ~ 323

By using the CFD technology and test, studied was the influence of such parameter variables as primary air speed, inner secondary air speed, inner secondary air swirling flow intensity and blocking rate of the passivated body etc. on the size of the return flow zone and speed. To increase the secondary air speed, both length of the return flow zone and average return flow speed will assume a slow ascending tendency. To increase the inner secondary air swirling flow intensity, they will increase comparatively quickly, leading to an enhancement of the heat quantity rolled and absorbed in the return flow zone. It is comparatively appropriate when the blocking rate of the passivated body is 1.070. **Key words:** pulverized coal industrial boiler, low-flow-rate burner, steady-combustion technology, CFD (computational fluid dynamics) technology, cone-shaped passivated body, return flow zone