

往复多孔介质加热炉半预混燃烧混合特性研究

景 森 程乐鸣 张俊春 邱坤赞

(浙江大学 热能工程研究所 能源清洁利用国家重点实验室 浙江 杭州 310027)

摘 要: 采用冷态试验和数值模拟相结合的方法研究半预混燃烧器空气燃气速度比、燃气喷口位置以及气体预热温度对燃烧室中气体混合特性的影响。冷态试验采用示踪气体法; 数值模拟利用组分输出模型。研究表明, 增加空气/燃气速度比使燃烧器内部燃气浓度分布更均匀, 燃烧器内同一水平截面中纵向燃气浓度峰值随空气/燃气速度比增加而逐渐向燃烧器壁面移动; 燃气喷口设置在气流分配装置前的混合效果要优于设置在气流分配装置后的燃气喷口; 空气预热温度增加使燃烧器内部燃气浓度分布更均匀。

关 键 词: 多孔介质; 半预混; 燃烧器; 混合特性

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

往复多孔介质加热炉将高温空气燃烧技术、多孔介质燃烧技术以及周期性换向技术有机结合在一起^[1], 采用半预混燃烧方式, 有效避免回火, 并对烟气余热有效回收再利用。

半预混燃烧是介于完全预混燃烧与非预混燃烧模式之间的燃烧方式。半预混燃烧中空气与燃气的混合程度直接影响燃气燃烧程度, 若空气量少于理论空气量, 很难保证燃气与空气混合充分, 燃气不能完全被氧化; 若空气量过大, 虽然燃料可充分燃烧, 但空气流速过快会带走大量热量^[2]。

为研究往复多孔介质加热炉半预混燃烧系统燃气与来流空气的混合特性, 采用冷态试验结合数值模拟计算, 研究空气/燃气速度比、燃气喷口位置对燃烧室混合特性的影响。其中冷态试验采用示踪气体法; 数值模拟利用组分输出模型。

1 研究方法

1.1 气体浓度分布测量方法

测量气体浓度分布的研究方法主要有 3 种。示踪气体法 将示踪气体与空气混合, 通过气体分析仪测量分析测点处示踪气体的浓度值^[3-5]; 热电偶测量法, 在实验装置内布置金属丝, 喷入热空气, 通过

热电偶测量热空气与冷空气混合后金属丝节点温度, 判断混合情况^[6]; PIV 测量法, 将示踪颗粒喷入气体中, 采用 PIV 技术测量颗粒运动状况^[7-8]。其中, 热电偶测量法在燃烧器内部设置的金属丝和热电偶对燃烧器内部流场有扰动, 热电偶测温具有一定滞后性, 测量误差较大。而 PIV 测量方法中, 采用示踪粒子与气体混合代替燃气喷入系统, 由于气、固间存在滑移, 要做到示踪粒子与气体充分混合比较困难。综上, 本研究在冷态试验下采用 CO 作为示踪气体, 通过烟气分析仪测量测点位置处示踪气体的浓度, 研究燃烧器中的气流混合特性。

1.2 实验系统

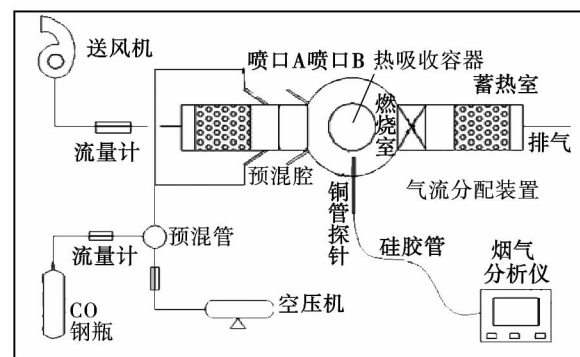


图 1 冷态实验系统图

Fig. 1 Drawing showing the system of the cold-state test

图 1 为往复多孔介质加热炉半预混燃烧系统模块化冷态试验台系统图。为研究燃气进入系统预混腔和燃烧室的混合特性, 试验中采用 CO 作为示踪气体, 由 CO 与来自空压机的空气混合而成预混气代替燃气, 预混气由喷口进入预混腔并与主通道内的空气混合后形成部分混合气体, 经气流分配装置进入燃烧器内继续混合。

冷态实验测孔和测点布置图如图 2 所示。示踪气体浓度采用直径为 4 mm 的铜管探针测量。探针一端置于测点处, 另一端通过硅胶管与烟气分析仪连

收稿日期: 2012 - 12 - 26; 修订日期: 2013 - 02 - 27

作者简介: 景 森(1988 -), 女, 辽宁锦州人, 浙江大学硕士研究生。

接 试验中可在线获得示踪气体浓度值。实验台燃烧室测孔如图 2(a) 所示分布。纵向方向将燃烧器分为 3 个截面 截面 1、截面 3 分别与上、下燃气入口成同一水平面 截面 2 位于两个燃气入口中间位置。考虑到横向方向各截面气流通道面积变化, 设定测点位置为燃烧器轴向中心线或热吸收容器外壁与测孔处燃烧器壁面之间五等分的 6 个测点, 如图 2(b) 所示。燃气由燃烧系统不同位置喷入将影响气体混合特性。为研究不同燃气喷口位置对混合特性的影响, 试验系统设置两种燃气喷入口进行试验研究, 其中喷口 A 置于气流分配装置前, 喷口 B 置于气流分配装置后。

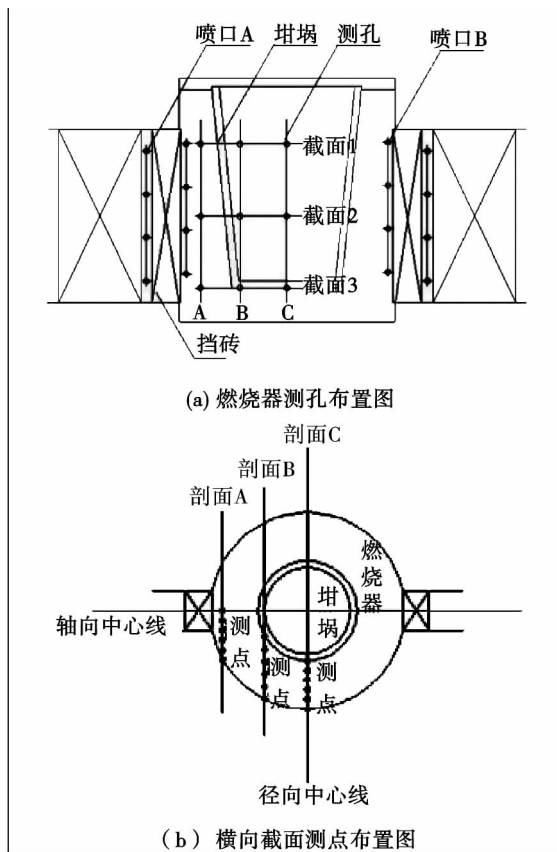


图 2 冷态实验测孔及测点布置图

Fig. 2 Arrangement layout of the measuring holes and points

为便于说明气体在燃烧器中的混合特性, 引入相对浓度比和标准偏差两个概念。相对浓度比是某测孔 6 个径向测点中, 将最靠近轴向中心线的测点处示踪气体相对浓度比定义为 1, 其它测点相对浓度比是这一测点实际浓度与最内部测点浓度的比值。通过对比同一测孔处 6 个测点的相对浓度比曲线分析混合特性, 若曲线变化平缓, 则说明这一测孔所对应的径向浓度变化不大, 燃气浓度分布均匀; 反

之, 则说明燃烧器内部燃气混合较不均匀。

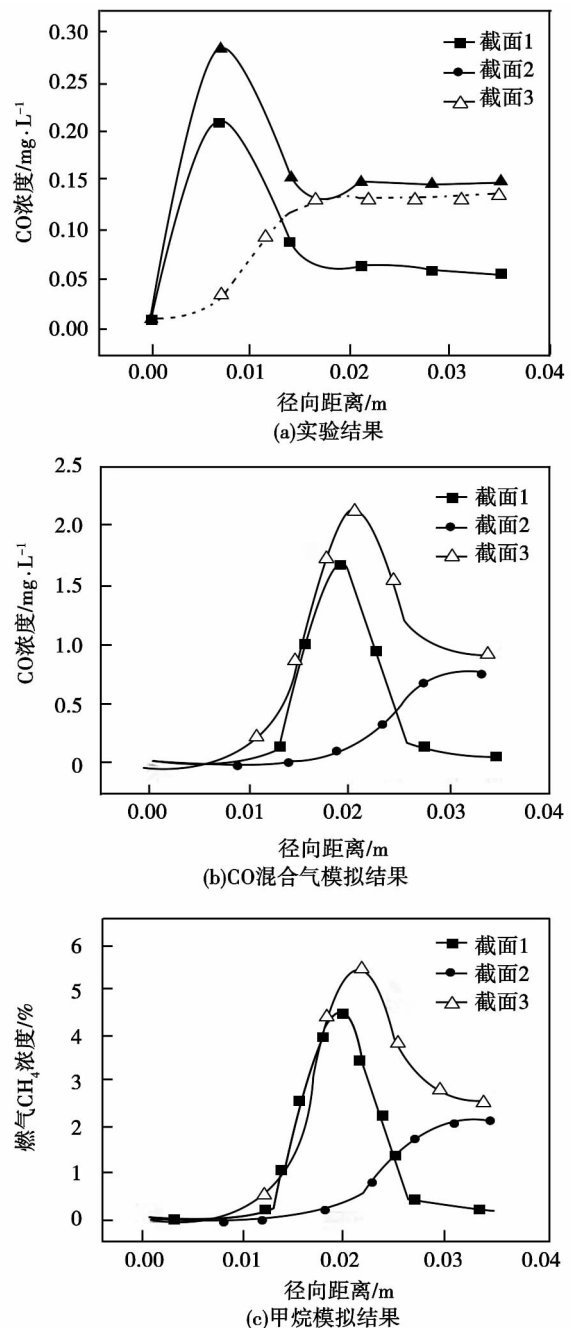


图 3 剖面燃气浓度变化曲线对比

Fig. 3 Contrast of the variation curves of the fuel gas concentration in a section

标准偏差是衡量数据分布分散程度的标准, 用以衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差计算式为:

$$S = \sqrt{\sum (c_i - \bar{c})^2 / (N - 1)} \quad (1)$$

式中: c_i —某一测点的燃气浓度值; \bar{c} —所有测点的平均浓度值; N —测点总数。标准偏差越小, 这些值

偏离平均值就减少,反之亦然。燃气(空气)浓度标准偏差反映出某一截面燃气(空气)浓度分布的均匀程度,通过对比燃烧器轴向距离不同剖面上燃气(空气)标准偏差,分析燃烧器内部燃气与空气的混合特性。

1.3 数值模拟

由于冷态试验中测点数量、位置的限制,为了准确研究燃烧器内气流混合特性,针对系统建立数学模型进行分析。模拟燃气为 CH_4 。对半预混燃烧器内气流混合假设:

- (1) 系统绝热;
- (2) 不考虑系统漏风;
- (3) 流动是定常流动,流体物性参数为常数;
- (4) 气体均为理想气体。

计算时空气、燃气入口均为速度入口,燃烧器出口为压力出口;初始条件设置为燃烧器内甲烷质量分数为零,氧气的质量分数为 0.23。模拟时,求解器选择 Segregated 隐式格式,湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型,激活能量方程,选择组分输出模型。控制方程中对流项的离散方法选择一阶迎风格式,速度-压力耦合选择 SIMPLEC 算法。

1.4 实验结果与数值模拟结果的一致性

在冷态试验下采用 CO 作为示踪气体;在数值模拟计算中,采用燃气成份 CH_4 进行。

为了验证 CO 混合气作为示踪气体可以准确描述燃气(CH_4)进入燃烧器内部的流场,将试验结果与 CO 混合气数值计算模拟结果、甲烷数值计算模拟结果进行对比,结果如图 3 所示。

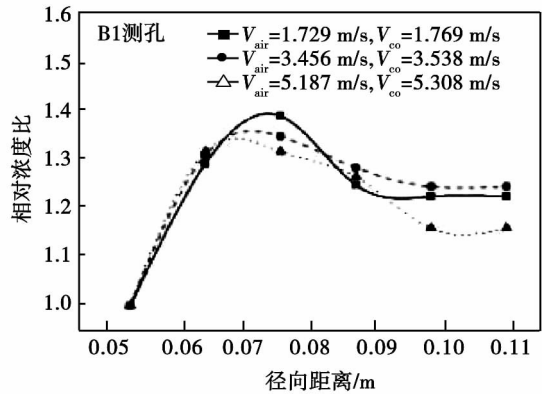
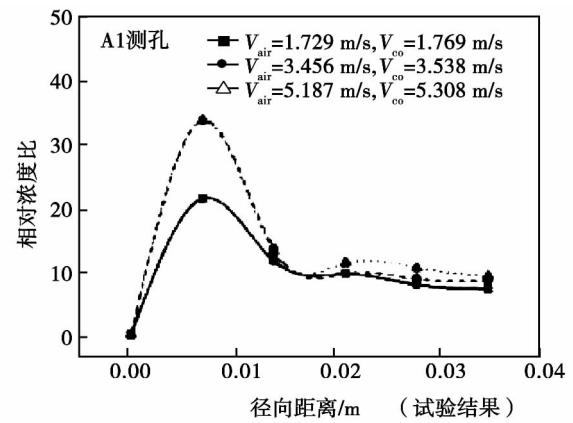
从中可以看出,采用 CO 进行试验具有代表性,其在燃烧器内截面上的浓度分布规律一致。

2 结果与讨论

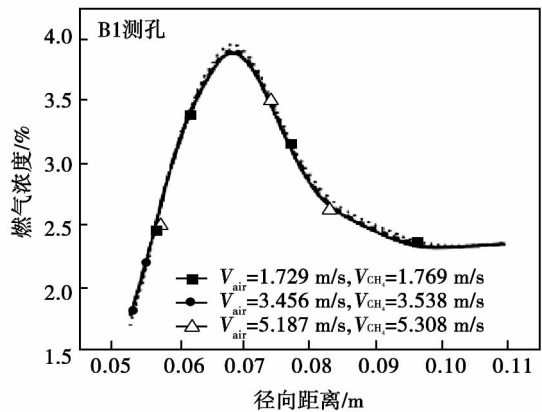
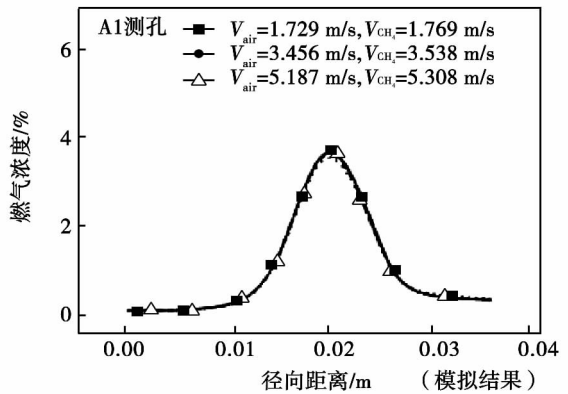
2.1 空气、燃气速度比对混合特性影响

2.1.1 相同速度比对混合特性影响

相同速度比时燃气喷口位置对燃烧器混合特性的影响如图 4 所示。其中, A1 是指图 2 中剖面 A 与截面 1 相交线; B1 则是指图 2 中剖面 B 与截面 1 的相交线。燃烧器轴向中心线或热吸收容器外壁与测孔处燃烧器壁面之间五等分的 6 个测点分别对应图 4(a) 中沿径向距离增加的 6 个测点 (V_{air} 是空气进入预混腔前的蓄热段空截面流速, V_{co} 是 CO 预混气通过喷口流速)。



(a) 相同速度比对 A1、B1 浓度影响 (试验结果)



(b) 相同速度比对 A1、B1 浓度影响 (模拟结果)

图 4 相同速度比对混合特性影响
Fig. 4 Influence of an identical speed ratio on the blended characteristics

图 4 中, 试验和模拟结果均表明空气/燃气速度比相同时, 空气、燃气流速的变化不影响燃烧器内燃气分布规律。其中, 图 4(a) 中 A1 测孔误差较大, 是由试验测量误差造成的。

图 5 是用数值模拟定性分析对应 3 种工况下燃烧器内混合特性。可见 3 种工况下燃气浓度标准偏差相同, 即燃烧器内部燃气浓度分布相同。

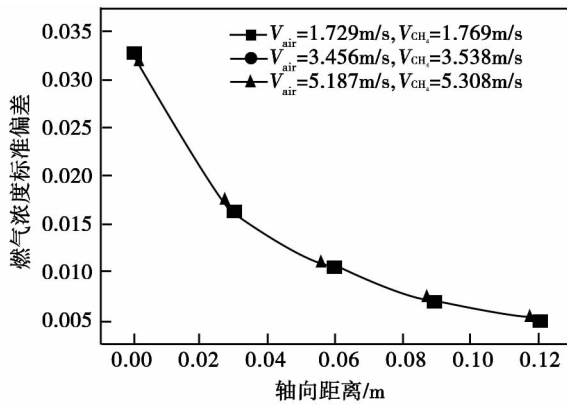


图 5 相同速度比下燃气浓度标准偏差对比

Fig. 5 Contrast of the standard deviations in fuel gas concentration at an identical speed ratio

2.1.2 不同速度比对混合特性影响

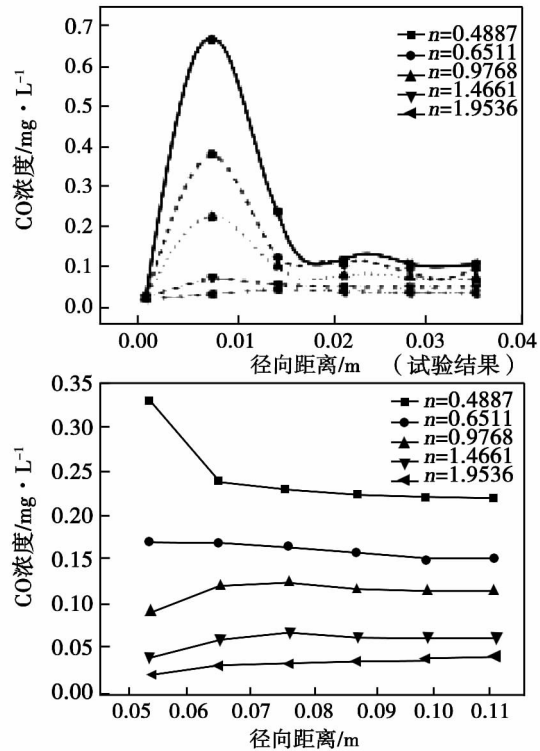
不同空气、燃气速度比对燃烧器混合特性的影响如图 6 所示。图 6 中 CO(燃气) 浓度波动幅度均随 n 值(空气/燃气速度比)增加而趋于平缓。这是因为 n 值增加意味着燃气量相同时空气量增加, 空气流速增加会加大空气对燃气的稀释作用, 使燃气浓度分布更均匀。

图 6 中随着 n 值增加 CO(燃气) 浓度分布的抛物线曲线波峰逐渐右移, 即燃烧器内同一水平截面中纵向燃气浓度峰值随空气/燃气速度比增加而逐渐向燃烧器壁面移动。这是由于空气/燃气速度比增加, 燃气受空气流扩散作用增强, 空气有向边壁流动的趋势, 在空气的作用下燃气趋向边壁流动, 致使抛物线波峰右移。

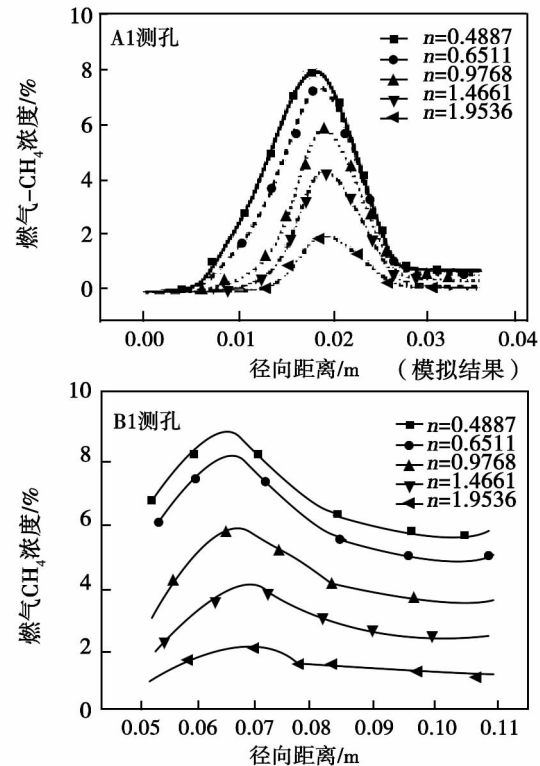
数值模拟计算的不同空气/燃气速度比下截面 1 燃气浓度分布如图 7 所示。

图中燃气在燃烧器内分布随空气/燃气速度比增加而越加均匀, 并且速度比增加使燃烧器内同一水平截面中径向燃气浓度分布的峰值逐渐向燃烧器壁面移动。

综上所述, 随着空气、燃气速度比增大, 燃烧器



(a) 不同速度比对 A1、B1 浓度影响 (试验结果)



(b) 不同速度比对 A1、B1 浓度影响 (模拟结果)

图 6 不同速度比对混合特性影响

Fig. 6 Influence of various speed ratios on the blended characteristics

内空气流对燃气的稀释作用越强烈, 燃烧器内气体

混合更加充分,因此空气、燃气速度比的增大有利于燃气最大限度燃烧。在实际运行中,由甲烷与氧气的化学反应方程式 $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$,令甲烷完全燃烧所需氧气与甲烷的体积比为 1:10。通过燃烧器尺寸可计算出甲烷完全燃烧时空气与甲烷的速度比为 1.25。当空气/燃气速度比进一步减小 ($n < 1.25$) 时,气体混合特性不仅变差,燃烧产生 CO 排放量急剧增加。因此在燃烧器运行中要合理控制空气与燃气速度比。

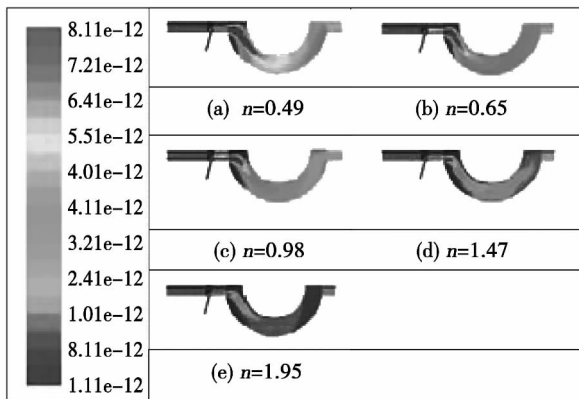


图 7 不同速度比下截面 1 燃气浓度模型计算结果分布图

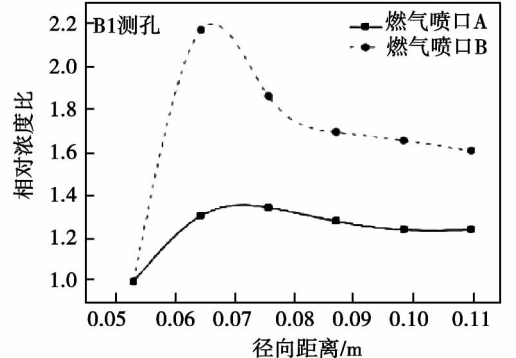
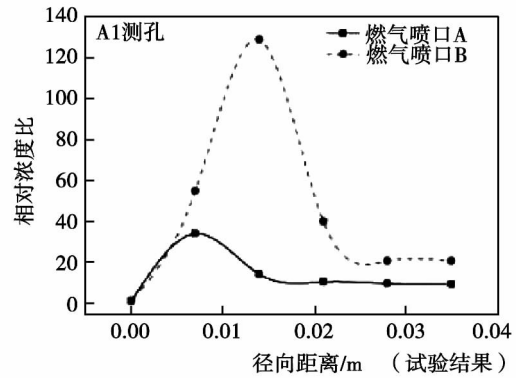
Fig. 7 Chart showing the distribution of the calculation results obtained by using the flue gas concentration model in section No. 1 at various speed ratios

2.2 燃气喷口位置对混合特性影响

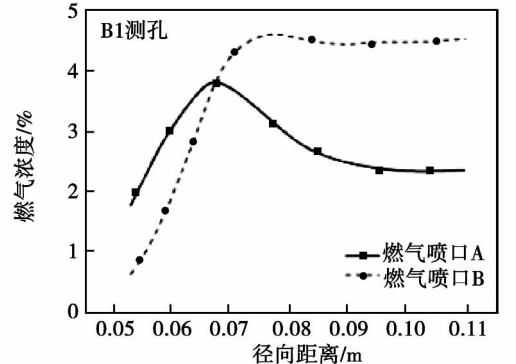
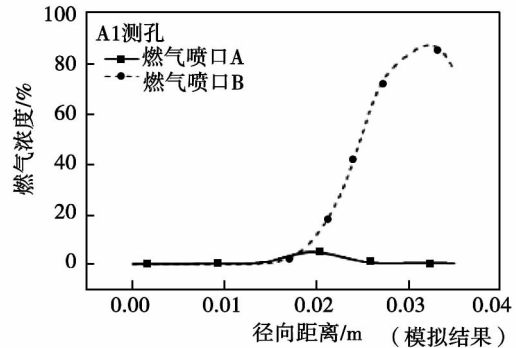
燃气喷口位置对燃烧器混合特性影响如图 8 所示。

试验与模拟结果均表明,燃气喷口置于气流分配装置后时燃气浓度峰值明显增加,说明燃气从气流分配装置后的喷口 B 进入燃烧器腔室时,气体混合程度要比燃气从置于挡砖前的喷口 A 进入燃烧器腔室时的混合程度低。这是因为燃气喷口置于气流分配装置后时燃气在燃烧器内的扩散减弱。因此,燃气喷口置于气流分配装置前端更为合理。

图 9 是采用数值模拟定性分析燃气喷口位置对燃烧器内整体混合特性的影响。燃气喷口 B 的燃气浓度标准偏差变化很大,轴向距离 0~0.03 m 时其燃气浓度标准偏差明显高于燃气喷口 A,表明此时燃气浓度分布不均匀,尤其这一段位于气体燃烧段入口,燃气容易产生不完全燃烧。文献 [9] 关于热态实炉的测试结果也验证了上述结果。



(a)燃气入口位置 A1、B1 浓度影响 (试验结果)



(b)燃气入口位置对 A1、B1 浓度影响 (模拟结果)

图 8 燃气入口位置对混合特性影响

Fig. 8 Influence of the location of the fuel gas inlet on the blended characteristics

2.3 预热温度对混合特性影响

实际运行中,燃气一般是常温,但来流气体由于吸收蓄热系统中的热量,与燃气混合前其温度较高。

为研究来流气体温度对混合特性的影响, 改变模型计算中的来流温度进行数值模拟。图 10 是不同来流气体温度对气体混合特性影响的模拟计算结果。

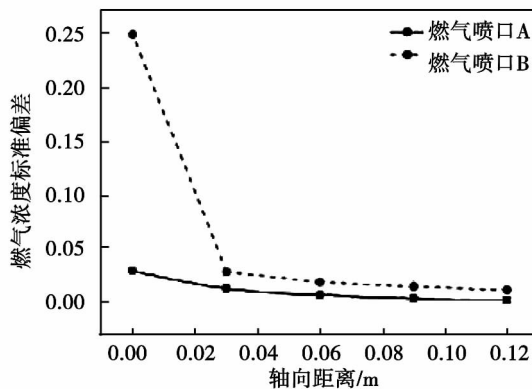


图 9 燃气入口位置对燃气标准偏差影响

Fig. 9 Influence of the location of the fuel gas inlet on the standard deviation of the fuel gas

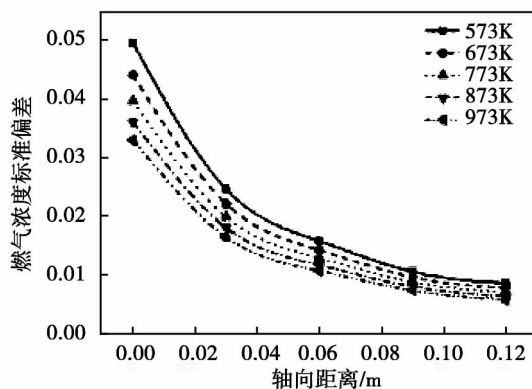


图 10 不同预热温度下燃气浓度标准偏差

Fig. 10 Fuel gas standard deviation at various preheated temperatures

图 10 中, 随着来流空气温度增加, 燃气分布越均匀, 此时更易于在燃烧器内形成良好的燃烧环境。这是因为空气温度上升、密度减小, 空气体积膨胀, 空气流速随之增加。此时空气对燃气流的稀释作用会增强, 射流作用增强燃气扩散, 因此较高的来流气流温度下, 燃气的扩散程度增加。由于系统针对空气预热, 燃气仍由外界喷入系统, 因此提高预热温度本质上就是增加空气的截面流速, 即增加空气与燃气速度比, 使燃烧器内部气体混合更加均匀。

3 结 论

对半预混燃烧器的混合特性进行试验研究和数

值模拟, 主要得到以下结论:

(1) 空气、燃气速度比影响燃烧器内燃气分布规律。空气、燃气速度比相同时, 空气、燃气流速的变化不影响燃烧器内燃气分布规律; 空气/燃气速度比增加可使燃烧器内部燃气浓度分布更均匀; 燃烧器内同一水平截面中纵向燃气浓度峰值随空气/燃气速度比增加而逐渐向燃烧器壁面移动。

(2) 燃气喷口设置在气流分配装置前的混合效果要优于设置在气流分配装置后的燃气喷口。

(3) 增加空气预热温度起到加大空气/燃气速度比作用, 燃烧器内燃气浓度分布更均匀。

参考文献:

- [1] 程乐鸣, 方梦祥, 王勤辉, 等. 往复式多孔介质气体燃烧金属熔炼炉 [P]. 中国: CN201110110835. 9. 2011.
CHENG Le-ming, FANG Meng-xiang, WANG Qin-hui, et al. Reciprocating type porous medium gas combustion metal melting furnace [P]. China: CN201110110835. 9. 2011.
- [2] Noiray N, Durox D, Schuller T. Passive control of combustion instabilities involving premixed flames anchored on perforated plates [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 1283-1290.
- [3] CHEN Zhi-chao, LI Zheng-qi, ZHU Qun-yi. Gas/particle flow and combustion characteristic and NO_x emissions of a new swirl coal burner [J]. Energy, 2011, 36(2): 709-723.
- [4] Eun-Seong Cho, Suk Ho Chung. Improvement of flame stability and NO_x reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 650-658.
- [5] 魏 飞, 杨艳辉. 内构件对高密度提升管内气体混合行为的影响 [J]. 化工学报, 2001, 52(9): 766-770.
WEI Fei, YANG Yan-hui. Effect of the internals on the gas mixing behavior inside a high density riser [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(9): 766-770.
- [6] Hiromu Sakurai, Kihong Park, Peter H, et al. Size-dependent mixing characteristics of volatile and nonvolatile components in diesel exhaust aerosols [J]. Environmental Science Technology, 2003, 37(24): 5487-5495.
- [7] A Pandu Ranga Reddy, Sujith R I, Chakravarthy S R. Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV [C]//AIAA, 2005.
- [8] Fernando F Grinstein, Ted R Young, Guoqiang Li. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirler combustor [C]//AIAA, 2002.
- [9] 郑成航. 低热值气体多孔介质燃烧机理与工业化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
ZHENG Cheng-hang. Mechanism governing the combustion of low heating value gas porous media and its industrialization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

(丛 敏 编辑)

In the light of the problem that it has no way to directly measure the residual carbon content of a circulating fluidized bed boiler, presented was a method for indirectly measuring the residual carbon content by using the information about the air quantity and coal quantity which can be easily measured. First, through an analysis of the mechanism, established was a model governing the dynamic mechanism of the residual carbon content, capable of real-time reflecting the combustion conditions inside the furnace. Then, based on the generalized Kalman filtering theory, an information fusion algorithm was determined and the coal quantity and total air quantity fed were used to accurately calculate the residual carbon content inside the furnace. Finally, a test verification was performed on a 300 MW unit in a power plant and a contrast of the heat quantity, bed temperature and oxygen quantity thus calculated according to the residual carbon content with the real values showed that the error does not exceed 2% when the load changes in the range from 95% to 65%, proving that the residual carbon content in a circulating fluidized bed boiler can be accurately predicted by using the generalized Kalman information fusion method. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, generalized Kalman filtering, residual carbon content, mechanism model, heat quantity

带排烟余热回收的 CFB 锅炉节能分析 = **Energy-saving Analysis of a CFB boiler with the Waste Heat Recovered from the Exhaust Gases** [刊, 汉] ZHAO Bin, ZHANG Lu-tao (College of Metallurgy and Energy Source, Hebei United University, Tangshan, China, Post Code: 063009), LU Tai, YAN Chen-shuai (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013, 28(5). -497 ~ 501

Presented was a CFB boiler system (referred to as RGCFB for short) for recovering the low temperature flue gas waste heat by utilizing a separation type heat pipe air preheater and established was a model for calculating the flue gas and air resistance, fan power consumption rate and net efficiency. On the basis of the operating parameters of No. 1 CFB boiler in Jingyu power plant, a contrast and analysis were performed of the thermal efficiency and net efficiency of the CFB and RGCFB boiler under four operating conditions. The research results show that the thermal efficiency of the RGCFB boiler is 1.28 to 2.23 percentagepoints higher than that of the CFB boiler and the net efficiency is 0.51 to 1.18 percentage points higher than that of the CFB boiler. Finally, the factors influencing the net efficiency of the RGCFB boiler were analyzed and the fact that to use the net efficiency as an index for evaluating the operation of a boiler can effectively guide the economic operation of the boiler was pointed out. **Key words:** CFB boiler, exhaust gas waste heat recovery, theoretical model, net efficiency, influencing factor

往复多孔介质加热炉半预混燃烧混合特性研究 = **Study of the Semi-premixed Combustion Mixed Charac-**

teristics of a Reciprocal Porous Medium Heater [刊, 汉] JING Miao, CHENG Le-ming, ZHANG Jun-chun, et al (National Key Laboratory on Energy Source Clean Utilization, Thermal Energy Engineering Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 502 ~ 507

By using a method combining the cold-state test with the numerical simulation, studied was the influence of the air-fuel gas speed ratio, fuel gas spout location and gas preheated temperature of a semi-premixed burner on the mixed characteristics of gases in the combustion chamber. The tracer gas method was adopted during the cold-state test and the component output model was used during the numerical simulation. It has been found that to increase the air/fuel gas speed ratio can make the fuel gas concentration distribution inside the burner more uniform and longitudinal fuel gas concentration peak value will gradually shift to the wall surface of the burner with an increase of the air/fuel gas speed ratio. The mixing effectiveness of the burner when the fuel gas spout is located before the gas flow distribution device is superior to that when the fuel gas spout is located after the distribution device. To increase the air preheating temperature can make the fuel gas concentration distribution inside the burner more uniform. **Key words:** semi-premixed burner, mixed characteristics

天然气锅炉烟气凝结及换热特性的研究 = Study of the Condensation and Heat Exchange Characteristics of Flue Gases in a Natural Gas-fired Boiler [刊, 汉] LI Hui-jun, PENG Wen-ping (College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 508 ~ 513

Based on the dual-film and boundary theory, with the heat and mass transfer inside the gas film layer intensified by the pumping action being taken into consideration, obtained was a correlation formula of the heat exchange coefficient of a natural gas-fired boiler at the flue gas side and the deviation between the calculated value and the actual one is within 2.6%, more approaching to the real case. At the same time, with the NO_x produced in the flue gases being taken into account, a model for directly determining the steam content of the flue gases according to the constituents of the flue gases was presented and a model for determining the distribution of the steam content, flue gas temperature and cooling water temperature along the condensing heat exchanger tube bank by employing the heat quantity and mass balance theory was also proposed. The model in question only requires measuring and obtaining the temperatures of the flue gases and cooling water at both inlet and outlet and then the changes of the flue gas temperature and cooling water temperature along the tube bank can be calculated. A comparison with the test values