

高温蓄热式加热炉中的燃气流流动分析

李 健¹, 赵博宁^{1,2}

(1. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072; 2. 柳州运输职业技术学院, 广西 柳州 545007)

摘 要: 运用 Fluent 软件对天然气在高温蓄热式加热炉中的燃烧过程进行了模拟研究. 比较分析了影响炉膛内气流温度、流场以及烟气质量分数分布特征的主要因素. 结果表明: 当天然气和空气的预热温度都不变时, 改变天然气和空气射流间的夹角, 会影响炉膛内的温度分布, 炉内的最高温度几乎呈线性降低, 炉内平均温度呈二次曲线变化先增大后减小. 当天然气和空气射流间的夹角为 35° 时, 炉内表面和钢坯表面温度比较均匀, 并且 NO 生成量少, 对提高钢坯的加热质量和降低环境污染均非常有利.

关键词: 天然气; 流场; 温度场; 浓度场

中图分类号: TG 315.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2009)08-1090-06

天然气是一种优质的气体燃料. 因其热值高、质量稳定、设备简易、便于控制以及污染小等优点, 在世界能耗结构中所占的比例越来越大. 最近 10 年, 很多企业已经对工业炉进行了燃天然气改造^[1-2]. 本文以天然气在高温蓄热式锻造加热炉上的应用为背景, 对其燃烧参数和炉膛结构参数进行了热态模拟. 在本研究中, 获得微分方程组并对其进行离散化求解是一个难点^[3-4]. 这些数学上的困难可以直接借助 Fluent 软件解决. Fluent 求解的思路是首先根据实际情况抽象和建立物理模型, 然后选择求解模型, 设置边界条件和初始条件, 设置迭代和控制参数并进行计算, 最后进行后处理和分析得出结论^[5-6].

1 物理模型和计算工况

1.1 燃烧过程数值模拟的物理模型

流体的流动, 一般分为层流和湍流. 由于炉膛的尺寸较大, 燃料入口处流速较高, 流动往往是湍流状态, 所有的物理量都是空间和时间的随机变量, 但是湍流流动仍遵循连续介质一般运动, 并具有一定规律的统计学特征, 其瞬时流动仍满足黏性流体流动方程, 描述燃烧流场各瞬时的微分方程如下^[7-8]:

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{ef} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)) \quad (2)$$

组分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_s \frac{\partial}{\partial x_j} m_s \right) - R_s \quad (3)$$

能量方程为

$$\frac{\partial (\rho C_P T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_P T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_h \frac{\partial C_P T}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (4)$$

k 方程为

收稿日期: 2009-04-08.

作者简介: 李 健(1961—), 男, 陕西西安人, 副教授.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right] - C_p \rho k^{3/2} \quad (5)$$

ε 方程为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{C_1 \epsilon}{k} \mu_1 \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right] - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

式(1)~(6), ρ 为流体密度(kg/m³); t 为时间(s); P 为压力(Pa); i, j 分别可取 1, 2, 3; u_j 为直角坐标系 j 方向速度(m/s); x_j 为直角坐标系 j 方向的坐标; m_s 为组分的质量分数(%); R_s 是扩散项或源项的生成率(s⁻¹); S_h 为热焓源项(W/h³); μ₀ 分子黏性系数(Pa·s); μ₁ 为湍流动力黏性系数(Pa·s); u_t = ρc_uk²/ε, 其中 c_u 为系数, c_u=0.09; μ_{ef} 为湍流有效黏性系数(Pa·s), μ_{ef} = μ₀ + μ₁; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; C₁ = 1.44, C₂ = 1.92.

1.2 计算工况

本文设计了几种天然气射流与空气射流间的夹角, 来考察其对炉内温度场、流场分布及燃烧产物的影响. 由于本文采用的是三喷口式烧嘴, 中间喷口喷天然气, 两边喷口喷空气, 所以计算时天然气射流采取直喷方式, 只改变两侧空气射流喷射方向, 就可以实现改变两者射流夹角的目的. 计算工况: 烧嘴安装高度为 650 mm, 烧嘴喷口间距为 450 mm, 空气预热温度为 800 ℃, 燃气预热温度为 800 ℃, 天然气射流与空气射流间的夹角为 0°~50°.

2 实体模型的建立以及简化

2.1 实体模型的建立

以某锻造厂采用高温空气燃烧技术改造后的蓄热式加热炉为研究对象, 燃烧空间的有效长度为 4.2 m, 宽为 4.2 m, 高度为 3.6 m, 炉墙两侧分别布置 2 组烧嘴, 两侧烧嘴交替的进行喷气和排烟, 烧嘴所用的天然气总量为 759.02 m³/h, 理论所需的助燃空气量为 7 796.91 m³/h. 烧嘴有效流通面积为圆截面, 燃料采用工业天然气, 主要成分为 CH₄, 其平均热值为 35 kJ/m³. 由于天然气理论空气耗量为 9.4, 为了避免空气喷口过大, 故设计烧嘴有 3 个喷口, 中间喷口喷天然气, 直径为 240 mm, 两侧喷口喷空气, 直径为 360 mm, 空气喷口与天然气喷口可成一定夹角, 相邻喷口组成一个燃烧单元, 依靠横向动量形成湍流, 以便组织炉膛内燃料燃烧. 同时, 空、燃气烧嘴喷口水平安装, 有利于空、燃气的充分混合, 避免烧嘴火焰直烧加热钢坯. 锻造加热炉运行参数见表 1.

表 1 锻造加热炉主要参数

Table 1 The major of parameters of forge heating furnace

最高炉温/ ℃	最大生产能力/ (kg·h ⁻¹)	燃料种类	平均热值/ (kJ·m ⁻³)	炉底热强度/ (GJ·m ⁻² ·h ⁻¹)	最大燃料消耗量/ (km ³ ·h ⁻¹)	空气过 剩系数
1 300	300	天然气	35	1.506	760	1.02

2.2 建立实体模型和划分网格

计算区域为三维区域, 炉膛的结构并不复杂, 但燃气入口相对炉子尺寸小, 网格过大对入口空间内部速度和温度等计算不利, 网格过小造成网格数目巨大, 计算时间延长. 本文采用固定正交的非均匀网格, 在保证喷口处网格连续的前提下, 网格的大小在靠近炉墙和喷口约 30 mm 处渐渐增大为 100 mm 至 300 mm 不等, 共生成网格约 117 891 个. 网格生成后输出 3D 格式的 mesh 文件.

2.3 边界条件的设定

设定边界条件的类型, 指定流动变量和热量在边界条件处的值, 是 Fluent 使用过程中很关键的一部

分, 设定边界条件必须将燃料和助燃空气入口设定为速度入口, 各入口处射流的速度和方向依具体工况决定, 表 2 给定射流入口的直径和射流组分的质量分数. 烟气出口定义为压力出口, 所以烟气出口方向应与入口方向一致.

表 2 射流入口边界条件

Table 2 The boundary condition of the inlets

入口	直径/mm	$w(\text{CH}_4)/\%$	$w(\text{O}_2)/\%$	$w(\text{N}_2)/\%$
gasinlet_1	240	1	0	0
gasinlet_2	240	1	0	0
airinlet-1	360	0	0.220 1	0.729 9
airinlet-2	360	0	0.220 1	0.729 9
airinlet-3	360	0	0.220 1	0.729 9
airinlet-4	360	0	0.220 1	0.729 9

3 炉内温度分布的分析

图 1~3 为炉内的最高温度、平均温度、最高温度与平均温度之差随空气射流与天然气射流之间的夹角的变化. T_{\max} 为最高温度; T_{ave} 为平均温度; α 为天然气射流与空气射流间的夹角(即喷射角度). 当喷射角度由 5° 增加到 50° 时, 炉内的最高温度几乎呈线性降低, 炉内平均温度近似成二次曲线变化先增大后减小; 当喷射角度处于 $20^\circ \sim 35^\circ$ 时对应的炉内的平均温度较高; 当喷射角度处于 $25^\circ \sim 40^\circ$ 时最高温度与平均温度的差较小. 这主要是因为天然气和空气是由不同的喷口进入炉膛, 在进入炉膛前没有混合, 在进入炉膛后边扩散混合边燃烧. 如果喷射角度过大, 天然气和空气混合较早, 燃烧太快, 燃烧区靠近喷口附近, 火焰高温不能很快传到炉膛中部或后区造成炉膛温度分布不均匀; 如果喷射角度过小, 天然气、空气在还未进行充分混合燃烧时亦被吸入对侧的蓄热室通道, 所以喷射角度过小或过大都会造成炉内温度分布不均匀.

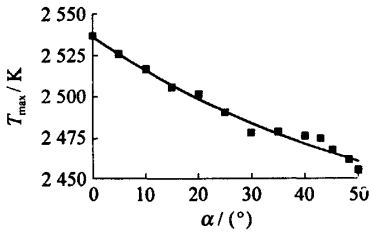


图 1 T_{\max} 随 α 的变化

Fig. 1 The T_{\max} of the furnace in every α

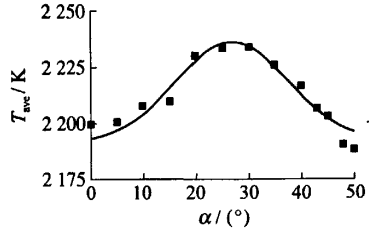


图 2 T_{ave} 随 α 的变化

Fig. 2 The T_{ave} of the furnace in every α

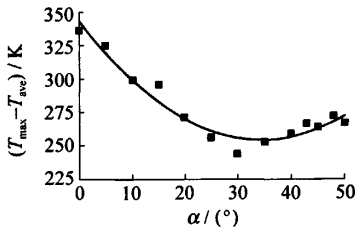


图 3 $T_{\max} - T_{\text{ave}}$ 随 α 的变化

Fig. 3 The $T_{\max} - T_{\text{ave}}$ of the furnace in every α

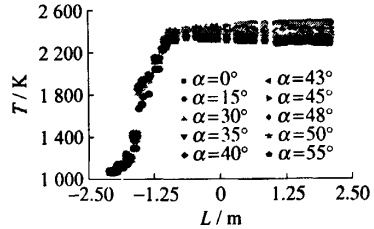


图 4 天然气喷口中心轴线上的温度分布

Fig. 4 The temperature distribution along the fuel burners' Geometry axis

图 4 为各个工况下, 沿天然气喷口中心轴线方向上的温度分布. 可见, 各工况均在距烧嘴喷口 1 m 左

右达到最高温度, 随后温度变化不大, 比较平缓. 当采用蓄热式燃烧技术时, 在前后 2 个换向周期, 天然气、空气从相反方向的喷口喷入炉膛内混合燃烧, 若较好地控制, 后半周期炉膛内的温度分布应与前半周期相反. 即在后半个换向周期燃烧时, 同样在距喷口 1 m 左右, 炉内的温度达到最高, 随后变化不大, 变得比较平稳. 所以若给钢坯加热时, 钢坯最好放置在距前后喷口 1 m 左右的位置. 图 4 中, T 为测点温度, L 为测点与喷口几何轴线的距离.

4 炉内烟气的质量分数分布特征

天然气燃烧过程中生成的 NO_x 中, NO 占 90% 左右, 其余为 $\text{NO}_2^{[7,8]}$, 因此本文中对烟气的含量只考虑了 NO , 而没有考虑 NO_2 . 图 5 是烟气的质量分数随空气射流与天然气射流夹角的变化. 可见, 在加热炉的实际生产调试中, $0^\circ \sim 5^\circ$ 属于调试敏感区域. 也就是说, 控制如此小范围的夹角, 对于伴随着环境的振动以及毛坯材料的碰撞的大尺寸加热炉, 将会使设备性能的稳定性非常差. 理论上, 研究 $0^\circ \sim 5^\circ$ 这样质量分数变化巨烈的区域是最有吸引力的, 但是研究适于实际应用的加热炉空气射流与天然气射流的夹角对烟气的质量分数的影响是本工作的重点. 本实验选择天然气射流和空气射流间的夹角 α (即喷射角度) 为 $5^\circ \sim 50^\circ$. 每 10° 为一个间隔. 由图 5 可见, 有喷射角度和没有喷射角度时, 除 NO 外, 其余烟气组分的质量分数相差很大. 当喷射角度为 5° 时, CH_4 的质量分数和 O_2 的质量分数是没有喷射角度的 $1/12$, CO_2 、 H_2O 和 N_2 的质量分数分别为没有喷射角度 1.56、1.51、1.1 倍. 这说明有喷射角度比没喷射角度时, 天然气和空气混合充分, 燃烧比较完全. 并且有喷射角度时, 随着喷射角度的增加, CH_4 的质量分数随之增加, O_2 和 N_2 的质量分数反而减少, CO_2 和 H_2O 的质量分数呈先增大, 后减小的变化趋势, 而 NO 的质量分数出现先减小后增大的趋势. 这说明并非喷射角度越大, 天然气和空气混合就愈充分, 对燃烧越有利.

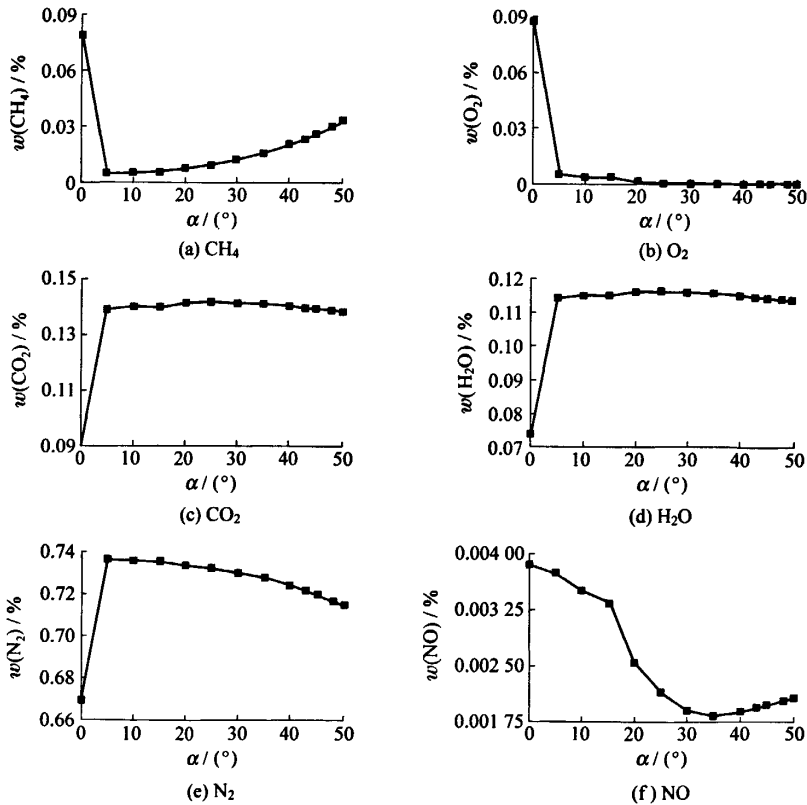


图 5 出口处各种烟气的质量分数

Fig. 5 The average mass fraction of different flue gas in the burners' outlet

观察图 5(f), NO 的质量分数随喷射角度变化, 当喷射角度增加到 35° 之前, NO 的质量分数在逐渐减少. 当由 35° 增加到 50° 时, 质量分数又开始增加. NO 的生成量和温度有很大关系^[5], 当炉内温度在 1500°C 附近变化时, 温度每增加 100°C , NO 的反应速度将增大 $6\sim 7$ 倍. 当温度为 2000°C 时, NO 的生成速度就极为迅速. 分析炉内最高温度随喷射角度的变化可知, 炉内最高温度在喷射角度增大到 35° 之前持续降低, 超过 35° 后, 开始缓慢升高, NO 的质量分数也随之增加.

5 炉内流速的分布

图 6 为喷口横截面的烟气速度分布, 对比这几种工况下的流速图发现, 当喷射角度为 $20^\circ\sim 35^\circ$ 时, 在炉中心形成很大的漩涡, 流速分布比较均匀, 因此温度比较均匀. 而当喷射角度大于 35° 时, 由于湍流太大, 形成的漩涡太大, 使高温燃气与高温空气不能达到良好的细化混合, 结果致使燃料燃烧不充分, 所以当喷射角度增大时, 出口处的天然气的质量分数也随之增加, 而出口温度随之减小. 当喷射角度小于 35° 时, 主要以小漩涡为主, 虽然有利于燃料和空气的混合, 但是由于小漩涡是主要的能量耗散区, 所以炉内最高温度比较高, 平均温度却比较低.

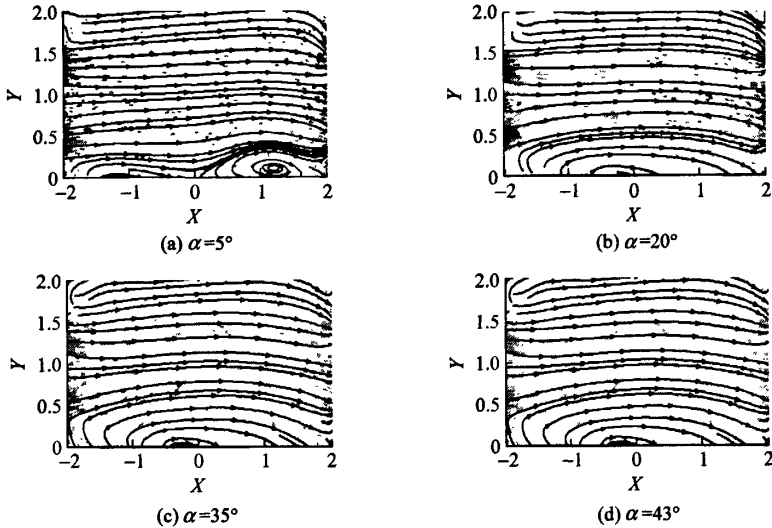


图 6 不同 α 条件下喷口横截面速度向量图

Fig. 6 The velocity distribution of flow in the burners' sectional surface with different α

6 结论

1) 空气射流与天然气射流成一定的角度喷射时, 不仅可以使天然气和空气射流剧烈混合, 而且可以避免高温气流冲刷对面的炉墙, 提高加热炉的寿命.

2) 当天然气射流与空气射流间的夹角由 5° 增加到 50° 时, 炉内的最高温度和出口处的平均温度几乎成线性降低, 炉内平均温度成二次曲线变化先增大后减小, 并且炉膛内的高温区越靠近喷口处.

3) 各工况均在距烧嘴喷口 1 m 左右达到最高温度, 随后温度变化不大, 比较平缓. 所以若给钢坯加热时, 钢坯最好放置在距前后喷口 1 m 以外的位置.

4) 综合各方面的因素, 当天然气和空气射流间的夹角为 35° 时, 炉内和钢坯表面温度比较均匀, 并且 NO 生成量少, 对提高钢坯的加热质量和降低环境污染均非常有利.

参考文献:

- [1] 唐炼. 世界能源供需现状与发展趋势[J]. 国际石油经济, 2005, 13(1): 30-33.
TANG Lian. Global Energy supply versus demand: current status and growth curve[J]. International Petroleum Economics, 2005, 13(1): 30-33. (in Chinese)
- [2] RAFIDI N, BLASIAK W. Heat transfer characteristics of HTAC heating furnace using regenerative burners[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 2027-2034.
- [3] ZHANG C, ISHII T, HINO Y, et al. The numerical and experimental study of non-premixed combustion flames in regenerative furnaces[J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122(2): 287-293.
- [4] GUPTA A K, BOLZ S. Effect of air pre-heat temperature and oxygen concentration on the flame structure and emission[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1999, 121(3): 209-216.
- [5] 郝玉玲, 邹宗树, 蔡九菊, 等. 燃气喷射方向对高温空气燃烧室内流动影响的数值模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 276-279.
HAO Yu-ling, ZOU Zong-shu, CAI Jiu-ju, et al. numerical simulation of furnace-flow properties effected by fuel injection in high temperature air combustion furnace[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2003, 24(3): 276-279. (in Chinese)
- [6] 曹诗倬. 锻造加热设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 5-25, 51-59.
- [7] 苏正川. 高温空气燃烧的试验和数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学热能与环境工程研究所, 2003.
SU Zheng-chuan. High temperature air combustion experiment and numerical simulation research[D]. Shanghai: Institute of Thermal & Environmental Engineering, Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [8] 任雁秋. 加热炉热过程数学模型[J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(4): 424-424.
REN Yan-qiu. Mathematical model methods of thermal process in reheating furnace[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 1999, 18(4): 424-424. (in Chinese)

Flow Analysis of Combustion Gas Flow in High Temperature Regenerative Heating Furnace

LI Jian, ZHAO Bo-ning

(1. School of Materials Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Liu Zhou Transportation Technology College, Liuzhou 545007, Guangxi, China)

Abstract: Numerical simulation of temperature field in high temperature regenerative heating furnace by Fluent software. This paper compares and analyzes main factors of the gas flow and characteristics of temperature distribution in the furnace. Temperature field and flow field are simulated in the furnace when changing the direction of the natural gas and air. The results show that when the preheating temperature of natural gas and the air is constant, changing the angle between natural gas and air jet, the temperature and flow field have changed. The maximum temperature and the average temperature curves nearly assume the linearity to be reduced, the average temperature curve becomes the conic section change, and the high temperature area approaches the nozzle place. When the angle of burners is at 35°, temperature in furnace and surface on steel billet is relatively uniform. Moreover, amount of formation of NO is less, which is a favorable factor for heating quality and reducing environmental pollution of steel billet.

Key words: natural gas; flow field; temperature field; concentration field

(责任编辑 刘 潇)