

蓄热式钢包烘烤过程中包内高温低氧特性的数值模拟

欧俭平, 蒋绍坚, 马爱纯, 萧泽强

(中南大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:为了分析入炉气体的预热温度对高温空气燃烧过程的影响,综合考虑体系的质量、动量、能量守恒以及燃烧体系的组份平衡,建立了煤气-空气双预热的三维非稳态燃烧数学模型,并以CFX4.3为计算平台,耦合流体流动、燃烧和换热过程,首次对蓄热式燃烧过程中高温低氧特性进行了数值研究,得出了在不同预热温度时,燃烧室内气体温度场和氧气浓度场分布.结果表明,提高气体预热温度有利于加快燃烧进程,提高燃烧室内气体的整体温度及温度均匀性,降低局部氧浓度.

关键词:钢包烘烤; 高温低氧; 燃烧; 数值模拟

中图分类号:TK16; Q242 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-606X(2004)03-0215-06

1 前言

钢包是炼钢连铸的重要设备之一,在使用前必须充分烘烤升温.目前普遍采用的是普通型或自身预热型钢包烘烤器,存在热效率低、能耗大等问题.

最新研制的蓄热式烤包装置采用20世纪90年代初开发成功的高温空气燃烧技术^[1](High Temperature Air Combustion, HTAC),燃料在高温低氧气氛中实现完全燃烧,燃烧火焰体积显著扩大,火焰温度分布均匀,不存在传统燃烧过程中出现的局部高温高氧区,NO_x的形成受到抑制,污染物的排放降低.

因实验方法的局限,很难直接得到燃烧室内流场、燃烧温度场及浓度场等的具体分布.随着计算技术的发展,可以通过数学模型和数值计算方法对燃烧室和工业炉内的流体流动及燃烧现象进行研究.近几年,国内对高温空气燃烧中流体流动、燃烧及传热的基本规律进行了数值分析^[2-6],但在体现该技术高温低氧特征的温度场及浓度场分布方面缺乏研究数据.本工作建立了多入口、多出口的三维非稳态燃烧数学模型,并采用有限差分方法和修正的速度-压力耦合算法,分析了不同预热温度时,燃烧室内气体温度场和氧气浓度场分布特性.

2 数学模型

2.1 控制方程组

钢包烘烤包含流体流动、燃烧和换热现象.本工作采用帕坦卡-斯波尔丁学派的方法,用一个通用的基本参数 ϕ 进行描述^[7],湍流 $k-\varepsilon$ 模型的守恒方程组的通用表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i\phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1)$$

具体的内容与表达式列于表1.

收稿日期:2003-06-25, 修回日期:2003-09-25

作者简介:欧俭平(1970-),男,湖南邵阳市人,博士研究生,主要从事高效传热、燃烧新技术及热工设备仿真与优化研究,
E-mail:oujp@sohu.com.

表 1 守恒方程中的变量、输运系数和源项^[8-11]

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum	U_j	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + B_i$
Turbulence kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$P + G' - \rho \varepsilon$
Turbulence dissipation rate	ε	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G' - C_2 \rho \varepsilon)$
Enthalpy	$C_p T$	$\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_{\text{Temp.}}}$	$Q_{\text{rad}} + Q_{\text{R}} - \frac{\partial q_t}{\partial x_j}$
Mean of gas mixture fraction	F	$\frac{\mu}{\sigma_F} + \frac{\mu_T}{\sigma_T}$	0
Variance of the mixture fraction	G	$\frac{\mu}{\sigma_F} + \frac{\mu_T}{\sigma_T}$	$C_{g1} \mu_T \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2 - C_{g2} \rho \frac{\varepsilon}{k} G$

其中

$$B = \rho g, \quad (2)$$

$$P = \mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho k \right), \quad (3)$$

$$G' = -\frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho \sigma_\rho} g \nabla \rho, \quad (4)$$

$$\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T, \quad (6)$$

$$Q_{\text{R}} = -\sum_i^{N_k} R_i \left[h_{f,i}^0 + C_{p,i} (T_{\text{pre}} - 298) \right], \quad (7)$$

$$Q_{\text{rad}} = K_{a,l} \int_0^\infty \int_{4\pi} [I_l(\Omega) - I_{b,l}] d\Omega dl, \quad (8)$$

$$q_t = -\lambda \nabla T + \sum_i^{N_k} f_i \left[h_{f,i} + \left(\frac{1}{2} U^2 + k \right) \right]. \quad (9)$$

常数 $C_1=0.8$, $C_2=0.45$, $C_{g1}=2.8$, $C_{g2}=2.0$, $C_\mu=0.1$, $\sigma_k=0.9$, $\sigma_\varepsilon=1.22$, $\sigma_T=0.9$, $\sigma_{\text{Temp.}}=0.9$, $\sigma_1=0.9$, $K_{a,l}=0.075$ W/(m²·K).

2.2 边界条件和初始条件

进口采用 Dirichlet 边界条件，直接设定进口速度；进口湍动能 k 和动能耗散率 ε 分别由 $k_{\text{int}}=C_{b1}u_{\text{int}}^2$ 和 $\varepsilon_{\text{int}}=k_{\text{int}}^{1.5}/(C_{b2}d_{\text{int}})$ 确定，经验常数 C_{b1} , C_{b2} 分别为 0.002 和 0.3。

出口采用压力边界条件；壁面沿射流方向采用壁面函数，包壁外表面温度直接设定，包壁内部无热源，温度变化由包衬材料的导热系数确定。

计算域内初始速度为 0，初始温度以及助燃空气、煤气的温度根据现场实际设定。

2.3 求解方法

采用混合差分格式和修正的速度-压力耦合算法^[7,11]，对速度、压力、温度、焓、混合分数等采用欠松弛因子。为加速收敛，湍流模型每计算 20 次耦合 1 次辐射，并采用自适应时间步长的求解策略^[12]，设置 1 个较小的初始时间步、1 个较大的最终时间步和 1 个很大的最大时间，自适应时间步长方法在一定范围内能自动地增长时间步长。

3 数值模拟

3.1 计算条件

利用以上模型，在 ALPHA250 工作站上，以商业软件 CFX4.3 为基础，用 Fortran 语言编制用户程序，对某厂公称容量为 160 t 的钢包烘烤器进行数值计算，比较在不同气体预热温度条件下包

内温度和氧气浓度分布特性. 钢包的包口内径 3000 mm, 包底内径 2600 mm, 高 3800 mm, 壁厚 300 mm. 包衬材料的密度为 2860 kg/m^3 , 比热和导热系数随温度变化, 分别为 $803+0.618 \times 10^{-3}T$ 和 $5.314-3.37 \times 10^{-3}T$. 蓄热式烧嘴的设计燃烧能力为 3.45 MW, 采用转炉煤气-空气双预热的方式, 当一对烧嘴燃烧时, 另一对烧嘴起排烟及蓄热作用, 间隔一定的时间交替换向. 煤气和空气的比热^[13] 分别为 $883.3+0.43T-1.31 \times 10^{-4}T^2$ 和 $942.2+0.24T-1.84 \times 10^{-5}T^2$, 导热系数^[13] 分别为 $0.003+2.27 \times 10^{-5}T+7.74 \times 10^{-8}T^2$ 和 $0.004+8.02 \times 10^{-5}T-1.92 \times 10^{-8}T^2$. 由于进出口条件不是轴对称的, 故本计算采用直角坐标系, 坐标原点位于包口的中心, 计算模型如图 1 所示.

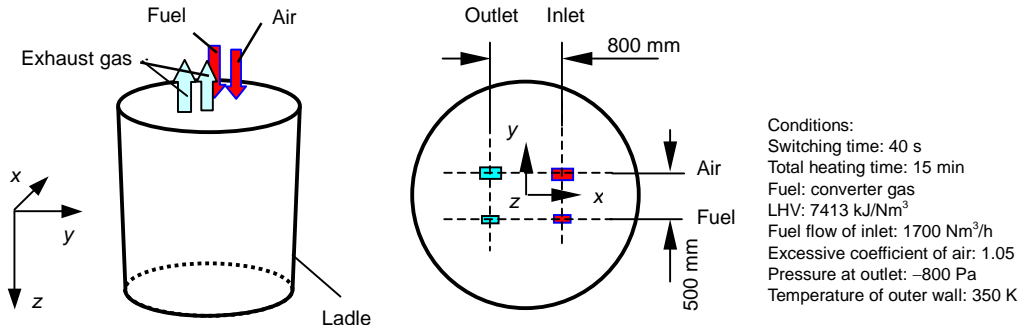


图 1 钢包烘烤计算模型

Fig.1 Calculated model

计算中模拟了入炉助燃空气和煤气的三种不同温度, 分别为 305, 1273 和 1473 K. 运行一个工况的 CPU 时间约为 72000 s 左右.

3.2 结果及分析

图 2 为高温空气燃烧条件下钢包烘烤终点时刻($t=900 \text{ s}$)钢包内速度矢量图. 由图可以看出, 由于高速射流的抽引, 煤气射流与空气射流相互间发生强烈混合并逐渐形成漩涡, 卷吸钢包内的烟气, 使烟气在钢包内的停留时间延长, 有利于形成低氧气氛, 实现高温低氧燃烧.

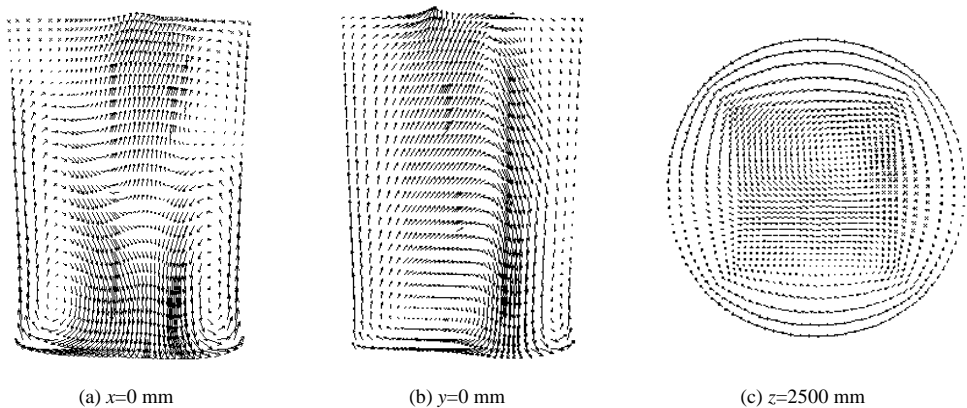


图 2 高温空气燃烧条件下钢包中心截面气相的速度矢量图

Fig.2 Velocity vectors of flow in ladle under high temperature air combustion ($t=900 \text{ s}$)

图 3 为不同气体预热温度条件下钢包烘烤终点时刻($t=900 \text{ s}$)包内温度分布的部分计算结果. 当助燃空气和煤气不经过预热时, 如图 3(a)所示, 自烧嘴喷出的煤气和空气在钢包内主要进行常规

燃烧, 钢包内的烟气得不到有效卷混, 包内气体温度低, 分布极不均匀, 钢包下部存在高温区域; 采用高温空气燃烧技术后, 随着气体温度的升高, 气流喷出速度增大, 加强了包内气体循环搅动, 发生高温低氧燃烧, 火焰体积增大, 火焰温度升高, 包内的气体的温度整体升高且趋于均匀, 如图 3(b), 3(c). 参与燃烧的气体的预热温度越高, 包内的气体的整体温度越高, 温度均匀性越好. 针对该烤包器内炉气温度的现场测试结果略低于计算值, 最大误差不超过 30 K^[14]. 可以认为, 数值计算结果与工程实际基本符合.

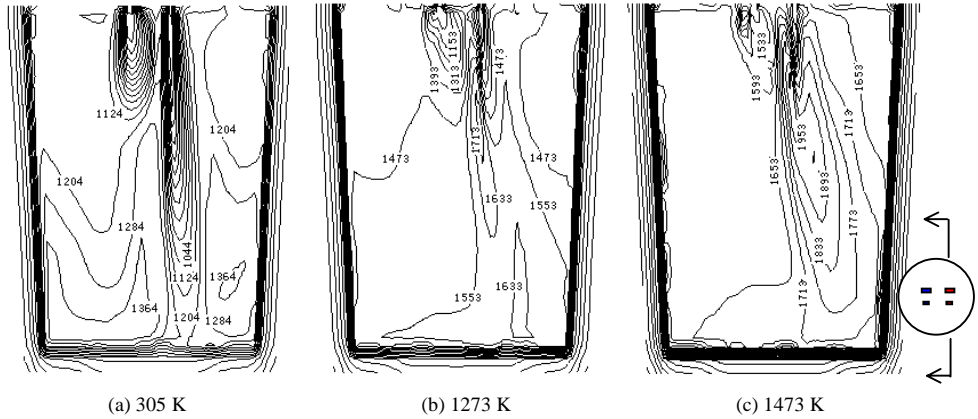


图 3 不同气体预热温度时包内温度分布

Fig.3 Contour of temperature in ladle under different gases preheated temperatures ($t=900$ s)

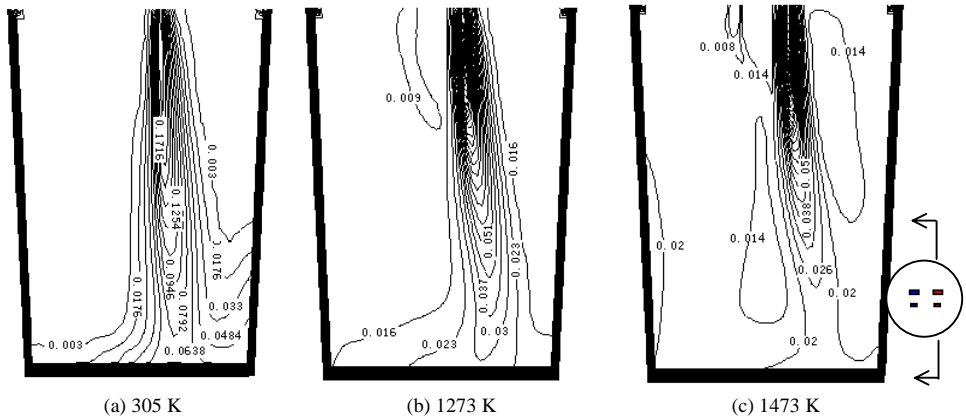


图 4 不同气体预热温度时包内氧气浓度分布

Fig.4 Contour of oxygen concentration in ladle under different gases preheated temperatures ($t=900$ s)

气体预热温度对燃烧过程的影响还可通过包内氧气浓度的分布情况进行分析. 如图 4 所示, 当助燃空气和煤气不经过预热时, 到达包底的空气流股含氧浓度较高, 接近 7%; 气体预热温度为 1473 K 时, 到达包底的空气流股含氧量减少至 2%. 结果表明, 自烧嘴喷出的气体温度越高, 其反应活性越强, 卷混越激烈, 空气流股中氧含量降低越快, 燃烧速度也就越快, 燃烧效果越好.

气体预热温度分别为 305 和 1473 K 时, 在钢包内任取一点(0, 0, 2300), 计算得到该点处气体

温度随时间的变化如图 5 所示. 受周期性换向的影响, 在烘烤前期, 两种工况下炉内气体温度均呈振荡上升趋势, 但气体预热温度为 1473 K 时, 钢包烘烤过程中包内气体温度相对较高, 且振荡消除时间相对较短.

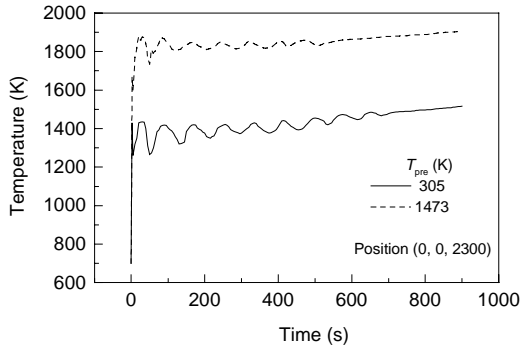


图 5 烤包过程中包内气体温度随时间的变化
Fig.5 Gas temperature vs. time during baking

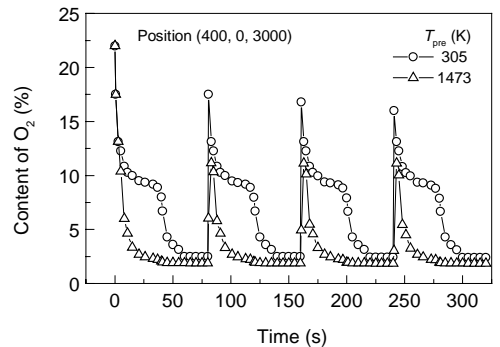


图 6 烤包过程中包内氧浓度随时间的变化
Fig.6 Oxygen content vs. time during baking

气体预热温度分别为 305 和 1473 K 时, 点(400, 0, 3000)处烟气中氧含量随时间变化见图 6. 为便于比较, 只列出前 4 个周期(换向 8 次)的计算结果. 由图可以看出, 随着周期性换向燃烧-排烟的进行, 该点处烟气中氧含量基本呈周期性变化, 但不同工况具有不同的变化特征. 当助燃空气和煤气温度为 305 K 时, 燃烧过程中该点处烟气中氧含量降低到 8% 左右, 换向后受燃烧烟气的稀释, 氧含量才进一步降低到 2.5% 左右, 表现为氧含量在周期内呈阶梯式下降. 入炉气体预热温度为 1473 K 时, 由于燃烧速度快, 燃烧过程中该点处烟气中氧含量迅速降低到 2% 左右, 结果是周期内该点处氧浓度始终低于入炉气体温度为 305 K 时的对应值.

4 结论

针对蓄热式烤包器建立了多入口、多出口的三维湍流燃烧数学模型. 通过数值模拟对蓄热式烤包器内高温低氧燃烧特性进行了分析. 结果表明, 由于蓄热式烧嘴出来的高速射流的抽引, 煤气射流与空气射流相互间发生强烈混合并逐渐形成漩涡, 卷吸钢包内的烟气, 使烟气在钢包内的停留时间延长, 有利于形成低氧气氛. 自烧嘴喷出的气体的温度越高, 卷混越激烈, 空气流股中氧含量降低越快; 高温低氧燃烧技术有利于加快燃烧进程, 提高燃烧室内的气体的整体温度及其温度均匀性, 参与燃烧的气体的预热温度越高, 包内的气体的整体温度越高, 温度均匀性越好.

符号表:

B	体积力 (N/m^3)	C_1, C_2	ϵ 方程模型常数	C_{b1}, C_{b2}	湍流边界经验数据
C_{g1}, C_{g2}	G 方程模型常数	C_p	定压比热 [$J/(kg \cdot K)$]	C_μ	粘度常数
d	当量直径 (m)	$d\Omega$	微元空间角 (sr)	f	气相组份分率 (%)
F	平均气相组份分率 (%)	G	混合物分数的方差	G'	体积生成项 (Pa)
g	重力加速度 (m/s^2)	h_f	生成焓 (J/mol)	I	热源辐射强度 (W/sr)
k	湍流动能 (m^2/s^2)	$K_{a,l}$	介质吸收系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]	LHV	煤气低发热值 (J/Nm^3)
l	波长 (nm)	N_R, N_S	组元数	P	剪切生成项 [$N/(m^2 \cdot s)$]
p	压力 (Pa)	Q	热量 (J)	q_t	总能量通量 (J/m^2)
R_i	i 组元的摩尔分数	S_ϕ	源项	T	温度 (K)
t	时间 (s)	U	气体的时均速度 (m/s)	u	气体流量 (m/s)
ϕ	通用变量	ρ	气体密度 (kg/m^3)	λ	导热率 [$W/(m \cdot K)$]

Γ_ϕ	通用扩散系数	ε	耗散速率 (m^2/s^3)	μ	气体粘度 [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]
σ	普朗特数				
上、下标					
b	黑体单色	eff	有效	i, j	组元
int	入口	l	波长	pre	预热
R	化学反应	rad	辐射	S	体系物种
T	湍流	Temp.	温度	x, y, z	通用坐标方向
0	标准状态				

参考文献：

- [1] 萧泽强, 吉川邦夫. 高温空气燃烧新技术讲座 [R]. 北京: 中国科学技术协会工程学会联合会, 1999. 116–118.
- [2] 杨卫宏, 萧泽强. 高风温低氧无焰燃烧过程的数值模拟 [J]. 煤气与热力, 2000, 20(4): 258–261.
- [3] 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温低氧燃烧条件下氮氧化物的生成特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(1): 17–22.
- [4] 朱彤, 张毅勤, 刘敏飞, 等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟 [J]. 同济大学学报, 2002, 30(8): 932–937.
- [5] 李宇红, 祁海鹰, 苑皎, 等. 预热温度影响甲烷高温空气燃烧特性的数值分析 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(2): 257–260.
- [6] 欧俭平, 吴道洪, 萧泽强. 蓄热式加热炉内流体流动、燃烧与传热的数值模拟 [J]. 工业炉, 2003, 25(1): 44–47.
- [7] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算 [M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1984. 16–19.
- [8] 卡里尔 E E. 燃烧室与工业炉的模拟 [M]. 陈熙, 周晓青, 译. 北京: 科学出版社, 1987. 27–66.
- [9] 梅焱. 有色冶金炉窑仿真与优化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 26–49.
- [10] 王应时, 范维澄, 周力行, 等. 燃烧过程数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 134–137.
- [11] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. 278–279, 431–447.
- [12] 李欣峰. CFD 技术在闪速炼铜中的应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2001. 63–64.
- [13] Stephen R T. An Introduction to Combustion, Concepts and Application [M]. Singapore: McGraw-Hill, 1996. 540–549.
- [14] Ou J P, Hsiao T C. Investigation and Application of HTAC in China [A]. Kunio Yoshikawa. CREST: Fifth International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification [C]. Yokohama: Tokyo Institute of Technology, 2002. A201–A214.

Numerical Simulation on High Temperature and Diluted Air Characteristics of Regenerative Ladle Baker

OU Jian-ping, JIANG Shao-jian, MA Ai-chun, XIAO Ze-qiang

(School of Energy and Power Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: High temperature air combustion (HTAC) can increase the adiabatic flame temperature and enlarge the flame volume, which can strengthen the heating capability. Based on the technology of HTAC, the fuel in regenerative ladle baker can burn completely. The preheated temperature of inlet gases affects the combustion process greatly. With the aim to study the effect of preheated temperature on the combustion, a 3-D transient mathematical model of combustion combined with flow and heat transfer is established in this paper. Based on the commercial CFD soft CFX, using the method of Finite Difference and SIMPLEC, the characteristics of high temperature diluted air in the chamber under different preheating temperatures of inlet gases are analyzed numerically. Turbulence $k-\varepsilon$ model, Mixed Is Burnt model and Monte Carlo method are used. Results evidence that due to effects of jets, backflow and eddies are formed and the high temperature burned flue gas in the ladle can mix and dilute the fresh air. Higher temperature of inlet gases is favorable to the combustion process. Increasing the preheating temperature can increase the domain temperature and its uniformity and decrease the oxygen content of local flue in the chamber. The deviation of temperature between calculated results and test results is less than 30 K. The calculated results agree with the experimental observation and theoretical analysis well.

Key words: ladle heating; high temperature diluted air; combustion; numerical simulation