

AOD 蓄热式烘烤过程热行为与 NO 排放的数值模拟

袁玲¹ 朱苗勇¹ 陈洁²

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 宝山钢铁股份有限公司不锈钢分公司, 上海 201900)

摘要 采用新型 AOD 蓄热式烘烤器对 120 t AOD 设备烘烤过程炉内温度分布和 NO 排放量进行了数值模拟, 分析了空气预热温度(1 273 ~ 1 473 K)、空气进口与燃气入口间的相对距离 L (0.28 ~ 0.51 m) 对流场、温度场和 NO 排放的影响。结果表明, 随 L 值增加, 炉内最高温度下降, 气体温度均匀性提高, NO 生成量降低; 空气预热温度提高, 炉内气体温度升高, 反应区 NO 含量升高。空气预热温度 1 273 K 即可满足要求。

关键词 AOD 蓄热式烘烤 温度分布 NO 排放量 数值模拟

Numerical Simulation of Thermal Behavior and NO Emission in AOD with Regenerative Baking

Yuan Ling¹, Zhu Miaoyong¹, Chen Jie²

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Stainless Steel Branch of Baosteel, Shanghai 201900)

Abstract The numerical simulation of temperature distribution and NO emission in furnace during baking of an 120 t AOD unit by using new regenerative baker for AOD has been carried out. And the effects of temperature of preheated air (1 273 ~ 1 473 K) and distance L between air inlet and fuel gas jet (0.28 ~ 0.51 m) on flow field, temperature field and NO emission are analyzed. Results show that with increasing L value, the highest temperature in furnace decreases, the temperature difference of gas decreases and the amount of generating NO decreases; with increasing preheated temperature, the temperature of gas in furnace increases and the NO content in reacting region increases. It shall meet the requirement for preheated temperature of air being 1 273 K.

Material Index AOD, Regenerative Baking, Temperature Distribution, NO Emission, Numerical Simulation

高温空气燃烧 (High Temperature Air Combustion, 简称为 HTAC) 技术因其具有高效节能、低污染排放、生产效率高、产品质量优良的优越性, 受到越来越多的重视^[1]。但这项技术涉及的物理化学现象仍然需要更进一步的研究^[2]。

近几年来, 蓄热式烘烤在冶金设备的烘烤方面得到了广泛的应用^[3~7]。但目前还未见关于 HTAC 技术在 AOD 烘烤方面应用的报道。

本文以 120 t AOD 为研究对象, 利用商业软件 STAR-CD 来研究 AOD 烘烤过程中高温空气燃烧的火焰特性以及氮氧化物的生成特性, 分析不同进口间距和不同空气预热温度对燃烧温度场及 NO 生成的影响。

1 数学模型

1.1 计算对象及网格划分

图 1(a) 为蓄热式 AOD 烘烤系统示意图。AOD 的结构参数为炉口内径 1.80 m, 炉身内径 4.92 m, 炉底内径 2.60 m, 炉子深度 7.64 m。炉盖上共有 3 个烧嘴, 2 个空气烧嘴在两侧对称布置, 中间为天然

气喷嘴。基本计算条件如下: 天然气喷嘴直径 0.06 m; 空气喷嘴直径 0.26 m; 环境压力 101.325 kPa; 环境温度 298 K; 燃料, 天然气, 热值 31.4 MJ/m³, 流量 500 m³/h; 空气过剩系数 1.1。

对于具体工况的确定, 主要是分析空气预热温度分别为 1 273 K、1 473 K 和空气进口与燃料入口间距离 L 为 0.28 ~ 0.51 m 时炉内的温度分布情况及 NO 生成情况。

数值计算的解析区域为 AOD 内燃烧空间。计算采用直角坐标系, 坐标原点位于炉口的中心。计算中对模型进行了简化, 将圆形喷口以相同面积的矩形喷口代替, 采用贴体网格系统, 运用块结构化网格对解析区域进行网格划分, 网格系统如图 1(b) 所示。

1.2 控制方程

(1) 流体流动模型。连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\nabla \cdot (\rho v \times v - \mu_{\text{eff}} \nabla v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}} (\nabla v)^T] \quad (2)$$

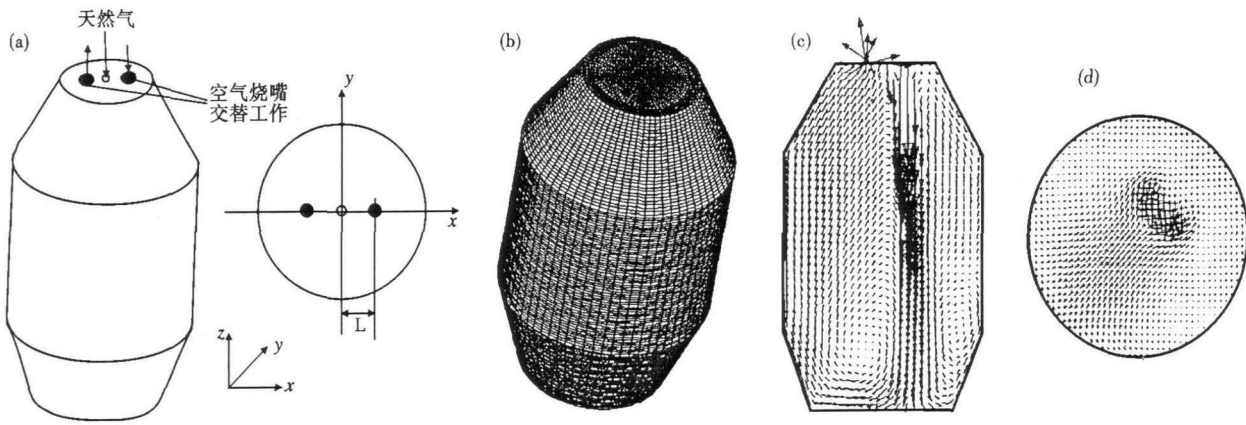


图 1 AOD 蓄热式烘烤系统 (a) 和网格系统 (b) 示意图; AOD 内截面 $y=0\text{ m}$ (c), $z=-3.0\text{ m}$ (d) 处气体速度矢量图, 空气预热温度 $1\ 273\text{ K}$

Fig.1 Schematic of AOD regenerative baking system (a) and Mesh system (b); Vector diagram of gas flow speed at section $y=0\text{ m}$ (c) and $z=-3.0\text{ m}$ (d) in AOD, preheated temperature of air- $1\ 273\text{ K}$

能量方程:

$$\nabla \cdot \left[\rho v h_i - \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \nabla \cdot \nabla h_i \right] = 0 \quad (3)$$

式中: ∇ - 向量微分算子; ρ - 质量密度; v - 速度 (矢量); μ_{eff} - 有效黏度系数, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T$; μ - 层流黏度系数; μ_T - 湍流黏度系数, 由 κ - ϵ 双方程模型确定^[8]; p - 炉内压力; h_i - 比焓; λ - 导热系数; c_p - 定压比热容。

(2) 燃烧模型。燃料气体与空气从不同的通道进入炉内, 属扩散火焰, 选用 PDF 模型进行计算。平均混合分数 f 及其均方根脉动值 g_f 的输送方程可表示为^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j f - \frac{\mu_i}{\sigma_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j g_f - \frac{\mu_i}{\sigma_i} \frac{\partial g_f}{\partial x_j} \right) = C_d \mu_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} g_f \quad (5)$$

式中: 常数 $\sigma_i = 0.7$, $C_g = 2.86$, $C_d = 2.0$ 。

(3) 辐射传热模型。采用离散坐标辐射模型可以解决从面面间辐射到燃烧中空间辐射等辐射问题, 其数学表达式为^[9]:

$$\frac{d(I_{s_i})}{dx_i} = -(a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) + a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

式中: a - 吸收系数; σ_s - 散射系数; \vec{r} - 位置矢量; \vec{s} - 方向矢量; \vec{s}' - 散射方向矢量; s_i - \vec{s} 分量; σ - Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$; n - 折射系数; I - 总辐射强度; T - 热力学温度; Ω' - 立体角; Φ - 相函数, 表示内向散射的空间分布特性。

(4) NO_x 生成模型。燃烧过程 NO_x 的生成, 主要有 3 种途径: 热力型、燃料型和快速生成型。由于燃料中氮含量非常少, 燃料型氮可以忽略, 燃烧过程中所产生的 NO_x 中 NO 含量占 90% 左右, 因此只计算燃烧过程产生的热力型 NO 。 NO 传输方程为^[10]:

$$\nabla \cdot (\rho v \omega_{\text{NO}}) - \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} + \frac{\mu}{\sigma_T} \right) \nabla \cdot \omega_{\text{NO}} \right] = \rho R_{\text{NO}} \quad (7)$$

式中: ω_{NO} - NO 的质量分数; R_{NO} - NO 的生成速率。

1.3 边界条件和数值计算方法

边界条件为: (1) 入口: 给定天然气和空气的流速、温度和质量组分; (2) 出口: 假定各物理量沿流动方向参数导数为 0, z 轴为炉内介质流动方向; (3) 壁面: AOD 壁面为固定壁面, 沿射流方向采用壁面函数, 无滑移, 无内热源, 认为其绝热。

采用 STAR-CD 进行求解和后处理。对各变量的差分方程组离散形式用欠松弛迭代法求解, 对压力-速度耦合用 SIMPLE 算法求解。辐射传热模型的离散坐标法采用计算精度要求和计算经济性都较好的 S_4 方程^[11]。湍流模型每计算 10 次耦合一次辐射。

2 计算结果与分析

2.1 AOD 内的流体流动特征

由图 1(c, d) 可以看出, 炉内气体在 AOD 底部逐渐形成两个大的回流区, 大部分高温烟气被高速空气射流卷吸, 使空气在与燃料接触反应之前先与烟气混合, 延长了烟气在炉内的停留时间, 有利于形成低氧气氛, 实现高温低氧燃烧。可以避免在喷嘴附近产生局部高温区, 减少热力型 NO 的产生。

2.2 空气进口与燃料入口间距离 L 和空气预热温度对燃烧状况的影响

燃料喷口与助燃空气喷口距离太近,则混合速度太快,不利于实现低氧燃料;反之则混合太慢,影响燃烧的稳定性。

在预热温度1 273 K、1 473 K下,研究不同空气进口与燃料入口间距离 L 对炉内温度分布的影响。 L 值分别为:0.28,0.33,0.39,0.45,0.51 m。

从图2(a,b)可以看出,随着空气进口与燃料入口间距离的增加,火焰明显变长,说明燃料与空气混合燃烧前得到了较好的稀释,使燃烧放热缓慢,燃烧区域沿炉子长度方向扩大。随着 L 的增加,燃烧的最高温度呈下降趋势,与炉衬接触的区域温度提高,有利于提高升温速度。

空气预热1 473 K时,随着距离的增加,温度分布规律(图2c,d)与预热1 273 K时相近。

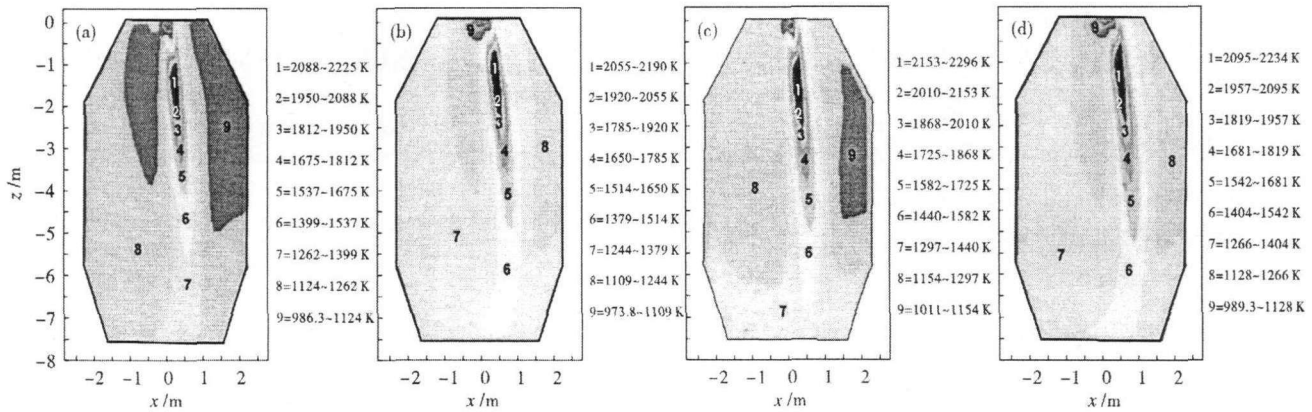


图2 空气预热温度1 273 K(a)(b)和1 473 K(c)(d), $L=0.33\text{ m}$ (a)(c)和 $L=0.51\text{ m}$ (b)(d)时炉内的温度分布
Fig. 2 Temperature distribution in furnace: air preheating temperature at 1 273 K (a) (b) and at 1 473 K (c) (d); $L=0.33\text{ m}$ (a) (c), $L=0.51\text{ m}$ (b) (d)

比较图2(a,b,c,d)的温度分布结果,相同距离时,随着入炉空气温度的升高,预热气体带入的物理热增加,系统的反应热也随之增加,燃料在高温气氛中燃烧,提高了其理论燃烧温度,火焰温度升高。而且随着可燃混合物温度升高,气体的导热系数增加,气体密度变小,气流喷出速度增大,加强了炉内气体循环搅动和对流传质,燃烧空间扩大,炉内气体的温

度整体升高且趋于均匀。

从图3(a)可清楚地看到,在空气预热1 273 K时,随着入口间距增大,炉内同一截面上的温度梯度变小,当入口间距 $L=0.28\text{ m}$ 时,温差约为1 218 K,当 $L=0.51\text{ m}$ 时,温差降到了962 K。中心区的最高温度降低,与炉壁接触的区域温度上升,从 $L=0.28\text{ m}$ 时的1 100 K升高到 $L=0.51\text{ m}$ 时的1 300

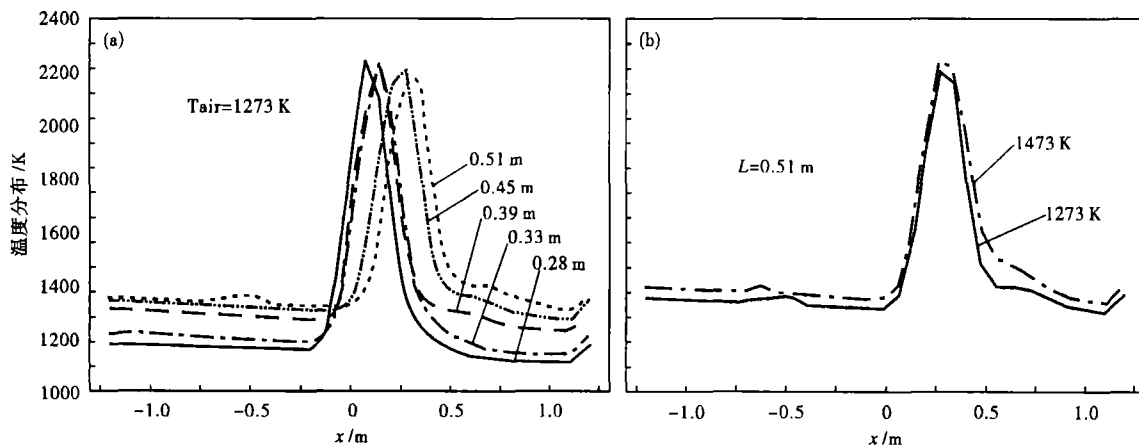


图3 空气预热1 273 K时 AOD 内的温度分布图(a);空气预热1 473 K与1 273 K时 AOD 内温度分布比较(b); $y=0\text{ m}$, $z=-1.3\text{ m}$
Fig. 3 Temperature distribution in AOD for air preheating at 1273K (a) and comparison of temperature distribution in AOD for air preheating at 1 273 K and at 1 473 K (b); $y=0\text{ m}$, $z=-1.3\text{ m}$

K, 升温显著。空气预热为 1 473 K 时, 炉内温度分布随着入口间距的变化趋势与 1 273 K 时相近。

从图 3(b) 可以看出, 在 $L = 0.51$ m 时, 预热温度由 1 273 K 升为 1 473 K, 相应位置的温度升高, 平均温升为 51 K。

由图 4(a) 可见, 预热 1 273 K 时最高温度由 0.28 m 时的 2 237 K 降到了 0.51 m 时的 2 190 K; 预热 1 473 K 时, 最高温度则从 0.28 m 时的 2 306 K 降到了 0.51 m 时的 2 234

K。预热温度较高时, 随着入口间距的增加, 炉内最高温度的降低越明显。当入口间距从 0.45 m 增大到 0.51 m 时, 最高温度的变化已不太显著。因为进口间距 L 较小时, 烟气的稀释作用比较弱, 燃料在氧含量高的区域燃烧, 因此火焰温度更高。

从图 4(b) 可以看出, 空气预热温度越高, 烟气出口处的 NO 浓度越大, 而且预热温度越高, L 的变化对 NO 含量的影响越大。在预热温度为 1 273 K 和 1 473 K 两种情况下, 随着空气进口与燃气入口间距的增加, 烟气中的 NO 浓度都显著降低。1 273 K 时, L 从 0.28 m 增加到 0.51 m, NO 浓度由 64×10^{-6} 低到 34×10^{-6} ; 1 473 K 时, NO 浓度则由 109×10^{-6} 降低到 66×10^{-6} 。

增大空气与燃料喷嘴间的相对距离, 使燃气与空气的混合推迟, 使燃料和空气接触之前, 最大限度地被烟气稀释, 降低了燃烧区的氧含量, 抑制了 NO 的生成; 同时, 由于间距 L 的增加, 火焰最高温度相

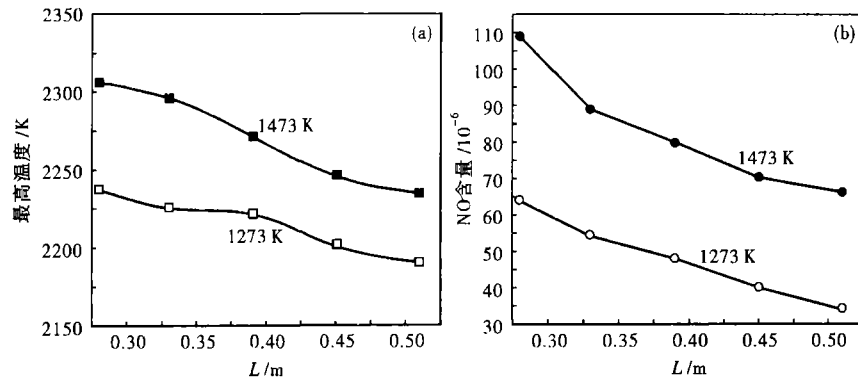


图 4 空气进口与燃气入口间距 L 对 AOD 内最高温度(a)和 NO 含量(b)的影响, 空气预热温度 1 273 K 和 1 473 K

Fig. 4 Effect of distance L between air inlet and fuel gas jet on maximum temperature in AOD (a) and NO content (b), air preheating temperature at 1 273 K and 1 473 K

对降低, 因此 NO 的生成量减少。

3 结论

(1) 空气预热温度相同时, 空气进口与燃气入口喷嘴的间距 L 由 0.28 m 增加至 0.51 m, AOD 内最高温度下降, 与炉衬接触的区域温度显著上升, 炉内气体的温度均匀性提高; 污染物 NO 的生成量逐渐降低。

(2) 空气进口与燃气入口喷嘴间距不变时, 入炉气体的预热温度由 1 273 K 增至 1 473 K, 平均温升 51 K, AOD 内气体的整体温度升高; 反应区内 NO 的含量升高。

(3) 在稳定燃烧的基础上, 增大空气进口与燃料入口之间的距离有利于改善烘烤效果。提高空气预热温度有利于提高炉内气体的整体温度, 但却不利于降低 NO 的排放, 同时也增加了对蓄热体功能的要求, 并且换向时间延长, 因此一般空气预热 1 273 K 即可达到要求。

参考文献

- 1 欧俭平. 高温空气燃烧技术在冶金热工设备上的应用及数值仿真和优化研究. 长沙: 中南大学, 2004: 6
- 2 Yang Weihong, Blasiak W. Numerical Study of Fuel Temperature Influence on Single Gas Jet Combustion in Highly Preheated and Oxygen Deficient Air. Energy, 2005, 30: 385
- 3 欧俭平, 詹树华, 萧泽强. 蓄热式钢包烘烤的数值模拟. 钢铁研究学报, 2005, 17(1): 19
- 4 欧俭平, 蒋绍坚, 马爱纯, 等. 蓄热式钢包烘烤过程中包内高温低氧特性的数值模拟. 过程工程学报, 2004, 4(3): 215
- 5 李欣, 梁凯丽, 冯俊小. 蓄热式钢包烘烤器气体混合特性数值模拟. 热科学与技术, 2005, 4(4): 323
- 6 吕英华. 钢包烘烤器的蓄热式改造及性能分析. 冶金能源, 2006, 25(2): 48
- 7 吴光亮, 朱荣, 李士琦. 蓄热式钢包烘烤装置优化设计. 特殊钢, 2003, 24(1): 24
- 8 王应时, 范维澄, 周力行, 等. 燃烧过程数值计算. 北京: 科学出版社, 1986
- 9 朱彤, 张毅勤, 刘敏飞, 等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟. 同济大学学报, 2002, 30(8): 932
- 10 杨占春, 刘浏, 陈蛾, 等. 同轴烧嘴炉内混合燃烧过程的数值模拟. 钢铁研究学报, 2002, 14(9): 21
- 11 王力军, 李爱民, 李继怀, 等. 高温空气燃烧炉内耦合传热的数值模拟. 计算物理, 2005, 22(1): 77

袁玲(1978-), 女, 博士研究生, 2005 年东北大学硕士毕业. 冶金设备烘烤, 燃烧过程数值仿真。

收稿日期: 2008-03-10