

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230220

铁矿石烧结过程传质传热数值模拟

李中正, 吴朝霞, 王金杨, 康增鑫

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 以某钢铁厂 360 m² 带式烧结机单节台车中的烧结料为研究对象, 基于多孔介质模型和烧结理论, 结合局部非平衡热力学理论、组分传输理论以及烧结过程中各种关键子模型的动力学方程, 建立了二维瞬态烧结料烧结过程传质传热的数学模型。模拟研究影响烧结过程传质传热的主要因素和规律, 得到了烧结过程中料层温度、料层中烟气主要成分具体分布情况。结果表明: 抽风负压的增加使料层的整体温度升高、料层中氧气含量上升和二氧化碳含量降低; 料层厚度的增加使料层的整体温度升高、料层中氧气含量下降和二氧化碳含量上升。台车底部合适的抽风负压和料层厚度分别为 12 kPa 和 0.6 m, 燃烧带料层温度接近于 1 500 K, 且燃烧带料层中氧气和二氧化碳体积分数分别为 11% 和 10% 左右。

关键词: 烧结矿; 多孔介质; 烧结过程; 传质传热; 数值模拟

中图分类号: TF 046.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)01-0035-09

Numerical Simulation of Mass and Heat Transfer in Iron Ore Sintering Process

LI Zhong-zheng, WU Zhao-xia, WANG Jin-yang, KANG Zeng-xin

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: WU Zhao-xia, E-mail: ysuwzx@126.com)

Abstract: Taking the sintering material in a single pallet of a 360 m² belt sintering machine in a steel plant as the research object, based on the porous media model and sintering theory, combined with local non-equilibrium thermodynamic theory, component transport theory and the kinetic equation of various key sub-models, a two-dimensional transient mathematical model of mass and heat transfer in the sintering process of sintering material was established. The main factors and laws affecting the mass and heat transfer in the sintering process were simulated and studied, and the material bed temperature, the specific distribution of the main flue gas components in the material layer were obtained. The results show that, an increase in negative pressure of the exhaust caused a rise of overall temperature in the material layer, an increase in oxygen content and a decrease in carbon dioxide content in the material layer. The increase in thickness of the material layer leads to a rise of overall temperature, a decrease in oxygen content, and an increase in carbon dioxide content in the material layer. The appropriate exhaust negative pressure at the bottom of the trolley and material layer thickness are 12 kPa and 0.6 m, respectively. The temperature of the combustion zone is close to 1 500 K, and the volume fractions of oxygen and carbon dioxide in the combustion zone are about 11% and 10%, respectively.

Key words: sinter; porous media; sintering process; mass and heat transfer; numerical simulation

虽然中国的烧结矿产量每年约为 10 亿 t^[1], 但烧结矿的质量参差不齐。烧结矿质量直接影响着钢铁工业生产。烧结过程中会发生水分的蒸发和凝结、熔剂分解、烧结矿的熔化和凝固、碳反

应、铁氧化物还原等物理化学反应, 并伴随着传质传热^[2], 最后得到烧结矿。烧结过程中合理的传质传热是生产优质烧结矿的重要体现。研究烧结过程的传质传热、掌握料层温度分布以及主要烟

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 河北省教育厅科学技术研究项目(BJ2021099)。

作者简介: 李中正(1999—), 男, 山西吕梁人, 东北大学硕士研究生。

气浓度分布具体情况,对于提高优质烧结矿的生产有着理论指导意义。

对于烧结过程传质传热的数学模型, Yang 等^[3]建立了一维非稳态烧结过程数学模型,充分研究了烧结过程中的传质传热并且对烧结过程所涉及的大部分现象进行模拟,但碳反应模型中只考虑碳充分反应. 夏德宏等^[4]提出了求解烧结物料温度数学模型,分析了烧结过程中料层的传热过程,并通过该模型的仿真计算结果提出一种多层配料模型,但该模型没有考虑传质过程. Mitterlehner 等^[5]建立了烧结模型,对烧结过程主要反应进行了模拟,但没有考虑其他反应的影响. Hou 等^[6]分析了布料方式对烧结传质传热的影响,但影响烧结的因素单一。

综上所述,针对烧结过程传质传热的数值模拟研究很多,但料层中各个位置传质传热的具体情况模拟研究甚少. 因此,本文以多孔介质模型和烧结理论为基础,基于局部非热力学理论和组分传输理论,结合烧结过程中各种关键子模型的动力学方程,充分考虑烧结过程中各种关键子模型对烧结过程传质传热的影响,建立二维瞬态烧结料层烧结过程传质传热的数学模型,模拟研究影响烧结过程传质传热的主要因素和规律,掌握烧结过程料层温度和料层中主要烟气浓度的具体情况,为后续烧结过程协调控制提供支持。

1 模型建立

1.1 物理模型及其假设

本文针对某钢铁厂 360 m² 带式烧结机的单节台车建立烧结料层烧结过程物理模型. 如图 1 所示,在烧结过程中,点火装置在台车前端启动,台车从左往右缓慢移动,在底部抽风机的作用下,空气经料层自上往下流动,废气从底部排出。

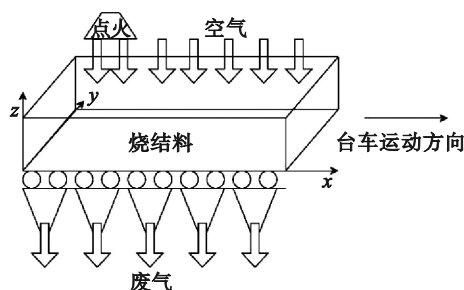


图 1 烧结料层烧结过程物理模型

Fig. 1 Physical model of sintering process of sintering material

本文针对单节台车中烧结料区域进行网格划分,在确保计算精度的前提下,为了提高网格品质和收敛速度,采用了分块三角形网格对计算域进行网格划分,在传质传热剧烈的区域进行网格细化,其他区域使用较稀疏的网格. 烧结料层网格系统如图 2 所示。

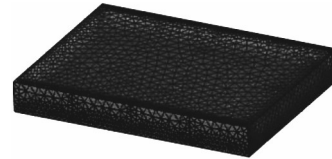


图 2 烧结料层网格系统

Fig. 2 Sintering bed grid system

由于烧结过程传质传热的复杂性,难以进行准确的数学描述和数值模拟,故对其计算和分析过程进行简化,并作以下假设:

- 1) 料层间横向传质传热可以忽略;
- 2) 忽略烧结过程中的辐射传热过程,以热传导和对流为主要的传热方式;
- 3) 气体为不可压缩的流体,但气体密度变化符合理想气体状态方程,烧结料为各相同性的多孔介质;
- 4) 烧结料颗粒内部不存在温度梯度,不考虑料层收缩。

1.2 数学模型

烧结料层烧结过程传质传热控制方程如下。

1) 能量方程. 针对台车中的烧结料和空气之间的传热过程,以局部非热力学平衡双能量方程为基础对其进行求解,即分别建立烧结料和空气的能量方程。

烧结料能量方程:

$$(1-\varepsilon_p)\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} - \nabla \cdot \left((1-\varepsilon_p)\kappa_s \nabla \cdot T_s \right) = (1-\varepsilon_p)Q_s - Q_{fs} + Q_{rs} \quad (1)$$

空气能量方程:

$$\varepsilon_p \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{u} \nabla \cdot T_f - \nabla \cdot \left(\varepsilon_p \kappa_f \nabla \cdot T_f \right) = \varepsilon_p Q_f + Q_{fs} + Q_{rf} \quad (2)$$

式中: ε_p 为烧结料颗粒孔隙度; $c_{p,s}$ 和 $c_{p,f}$ 分别为烧结料和空气的比定压热容, J/(kg·°C); ∇ 为梯度算子; \mathbf{u} 为气体速度矢量, m/s; κ_s 和 κ_f 分别为固、气导热系数, W/(m·°C); T_s 和 T_f 分别为固、气温度, K; ρ_s 和 ρ_f 分别为固、气密度, kg/m³; Q_s 和 Q_f 分别为固、气体积热源, W/m³; Q_{fs} 和 Q_{rf} 分别为烧结过程中各种关键子模型固、气相的反应热, W/m³;

Q_{is} 为烧结过程传质传热中空气与烧结料之间的交换热量,

$$Q_{is} = (T_f - T_s) \frac{6\beta(1-\varepsilon_p)}{d_s}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{k_f}{d_s} (2 + 0.75Re^{0.5} Pr^{0.333}). \quad (4)$$

其中: d_s 为烧结料颗粒直径, m; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数.

2) 质量方程. 烧结料质量方程为

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = - \sum_k R_{k,s} M_{k,s}. \quad (5)$$

空气质量方程为

$$\varepsilon_p \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_p \rho_f \mathbf{u}) = \sum_k R_{k,f} M_{k,f}. \quad (6)$$

式中: $R_{k,s}$ 和 $R_{k,f}$ 为烧结过程固、气相中各组分的反应速率, mol/(m³·s); $M_{k,s}$ 和 $M_{k,f}$ 为固、气相中各组分的摩尔质量, kg/mol; k 代表烧结过程中各种关键子模型.

3) 组分传输方程为

$$\varepsilon_p \rho_f \frac{\partial w_k}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_k + \varepsilon_p \rho_f (\mathbf{u} \cdot \nabla) w_k = \sum_k R_{k,f}. \quad (7)$$

式中: w_k 为组分的质量分数; \mathbf{j}_k 为组分的质量扩散通量, mol/(m²·s); $\mathbf{j}_k = -(\rho_f D_i^m) \nabla \cdot w_k$, D_i^m 为分子扩散系数, m²/s.

4) 动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_f \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\varepsilon_p \rho_f \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot (\varepsilon_p \mathbf{P}) + \mathbf{F} + \sum_k R_{k,f} \mathbf{u}. \quad (8)$$

式中: \mathbf{P} 为压力, N/m³; \mathbf{F} 为源项.

在烧结过程中, 台车中烧结料为均匀多孔介质. 空气流经料层时, 需要考虑黏性和惯性阻力的影响, 故气相动量方程中需要增加一个源项 \mathbf{F} , 源项 \mathbf{F} 由黏性阻力和惯性阻力组成. 源项 \mathbf{F} 表达式为

$$\mathbf{F} = - \left(\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u} + \frac{1}{2} \rho_f C_2 \mathbf{u}_{mag} \mathbf{u} \right). \quad (9)$$

式中: μ 为气体动力黏度, Pa·s; \mathbf{u}_{mag} 为气体流动速度; α 和 C_2 分别为多孔介质中的黏性阻力系数和惯性阻力系数, 采用 Ergun 方程^[7] 计算.

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150}{d_s^2} \frac{(1-\varepsilon_p)^2}{\varepsilon_p^3}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{d_s} \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p^3}. \quad (11)$$

5) 气相状态方程为

$$\mathbf{P} = \rho_f R_u T_f \sum_k \frac{w_{k,f}}{M_{k,f}}. \quad (12)$$

式中: R_u 为通用气体常数, J/(mol·K); $w_{k,f}$ 为烧结

过程气相中各组分的质量分数.

1.3 关键子模型

烧结料烧结过程传质传热的关键子模型包括水分的蒸发和凝结、石灰石分解、白云石煅烧、烧结矿的熔化和凝固、碳反应、铁氧化物还原等物理化学反应.

1) 水分的蒸发和凝结. 烧结过程中, 烧结料中水分会发生蒸发或凝结, 水分蒸发或者凝结状态^[8] 可以通过饱和蒸汽压 $p_{H_2O}^*$ 来判断.

饱和蒸汽压 $p_{H_2O}^*$ 大于气体中的蒸汽分压 p_{H_2O} , 烧结料中水分处于蒸发状态. 对于水分蒸发, 通常有两个阶段: 恒定速率蒸发阶段和下降速率蒸发阶段. 当烧结料中水分质量分数 w_{H_2O} 大于临界含水量 w_{cr} , 水分处于恒定速率蒸发阶段, 这一阶段的反应速率为

$$R_{1,dry} = \frac{k_{H_2O} w_{H_2O} a_s (p_{H_2O}^* - p_{H_2O})}{R_u T_f}. \quad (13)$$

式中: a_s 为烧结料颗粒的比表面积, m⁻¹; k_{H_2O} 为水蒸气的传质系数, m/s.

当烧结料中水分质量分数 w_{H_2O} 小于临界含水量 w_{cr} 时, 水分处于下降速率蒸发阶段, 这一阶段的反应速率为

$$R_{2,dry} = \frac{\chi k_{H_2O} w_{H_2O} a_s (p_{H_2O}^* - p_{H_2O})}{R_u T_f}. \quad (14)$$

其中:

$$\chi = 1 - (1 - \omega)(1 - 1.796\omega + 1.0593\omega^2),$$

$$\omega = \frac{w_{H_2O}}{w_{cr}}.$$

当饱和蒸汽压 $p_{H_2O}^*$ 低于气体中的蒸汽分压 p_{H_2O} 时, 烧结料中水分处于凝结状态, 这一阶段的反应速率为

$$R_{conden} = \frac{k_{H_2O} w_{H_2O} a_s (p_{H_2O}^* - p_{H_2O})}{R_u T_f}. \quad (15)$$

2) 石灰石分解. 石灰石是烧结料最常用的烧结熔剂. 通常情况下, 当温度为 873 K 时, 烧结料中石灰石开始分解, 温度在 1 173 K 附近时, 石灰石分解反应达到化学沸腾, 故石灰石在烧结过程中一般可以完全分解. 石灰石分解反应为 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

石灰石分解反应速率^[9] 为

$$R_{\text{CaCO}_3} = \frac{h_p a_{\text{CaCO}_3} U_{11} (T_f - T_{11})}{\Delta H_{\text{CaCO}_3}}. \quad (16)$$

式中: h_p 为固、气传热系数, W/(m²·K); a_{CaCO_3} 为烧结料中石灰石颗粒的比表面积, m⁻¹; U_{11} 为与石灰

石分解度相关的系数; T_{11} 为石灰石分解的初始温度, K ; ΔH_{CaCO_3} 为石灰石分解反应的焓.

3) 白云石煅烧. 除石灰石外, 白云石也是烧结熔剂的重要来源. 白云石煅烧反应不受内扩散限制, 而且烧结过程中气流速率较快, 故可以认为白云石煅烧处于化学反应的控制范围内, 反应速率主要被温度影响. 白云石煅烧反应为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$.

白云石煅烧反应速率^[10]为

$$R_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} = \frac{h_p a_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} U_{12} (T_f - T_{12})}{\Delta H_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}}. \quad (17)$$

式中: $a_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$ 为烧结料中白云石颗粒的比表面积, m^{-1} ; U_{12} 为与白云石分解度相关的系数; T_{12} 为白云石分解的初始温度, K ; $\Delta H_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$ 为白云石煅烧反应焓.

4) 烧结料的熔化和凝固. 烧结料的熔化和凝固^[11]是烧结过程中重要现象. 在实际烧结过程中, 烧结料的熔化和凝固非常复杂, 涉及到热量传递、孔隙率改变、气体流动等许多相关因素. 当烧结过程中的温度高于烧结料的熔点温度时, 烧结料开始熔化; 当温度低于烧结料的熔点温度时, 烧结料开始凝固. 凝固可视为熔化的逆过程, 但有不同的潜热值. 烧结料熔化或凝固热为

$$Q = -\frac{\partial}{\partial t} (\varphi \Delta H \rho_s). \quad (18)$$

φ 为烧结料熔体体积分数,

$$\varphi = \frac{(T_s - T_m)}{(T_{\text{max}} - T_m)}. \quad (19)$$

式中: 在能量守恒方程的源项 Q_{rs} 和 Q_{rf} 中以 Q 来解释说明熔化或凝固热; ΔH 为熔化或凝固焓; T_m 为烧结料熔化的初始温度; T_{max} 为烧结过程中最高温度.

5) 碳反应. 碳反应是烧结过程中最重要的反应. 烧结料中的焦炭与氧气发生反应, 产生二氧化碳和一氧化碳, 一氧化碳也会与氧气发生反应, 为烧结过程提供热能. 碳反应为 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$, $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$.

焦炭燃烧反应发生在焦炭颗粒的表面. 焦炭燃烧模型视为未反应核收缩模型, 反应的速率由气膜边界传质和界面化学反应决定^[12].

焦炭燃烧生成二氧化碳反应速率为

$$R_{\text{C}_1} = 4\pi r_c^2 N_c c_{\text{O}_2} / \left(\frac{1}{\xi k_1} + \frac{\zeta_c d_s}{Sh D_{\text{CO}_2, \text{eff}}} + \frac{r_{\text{C}_0} - r_c}{\varepsilon_p e^{-B(r_{\text{C}_0} - r_c)} D_{\text{O}_2}} \right). \quad (20)$$

其中,

$$Sh = 2 + 0.7 Sc^{0.333} Re^{0.7}, \quad (21)$$

$$k_1 = 589 T_s e^{\left(-\frac{222820}{R_s T_s} \right)}, \quad (22)$$

$$r_c = r_{\text{C}_0} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{\text{C}_0}} \right)^{0.3333}. \quad (23)$$

焦炭燃烧生成一氧化碳反应速率为

$$R_{\text{C}_2} = \frac{1092\pi r_c^2 N_c P_{\text{CO}_2}}{22.4 T_s \zeta_c \left(\frac{1}{k_{f1}} + \frac{3}{r_c \rho_c E_{f1} k_2} \right)}. \quad (24)$$

一氧化碳氧化反应速率^[13]为

$$R_{\text{CO}} = 3.25 \times 10^7 c_{\text{CO}} c_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5} c_{\text{O}_2}^{0.5} e^{\left(-\frac{15098}{T_f} \right)}. \quad (25)$$

式中: c_{O_2} , c_{CO_2} , c_{CO} 和 $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为氧气、二氧化碳、一氧化碳和水蒸气浓度, mol/m^3 ; N_c 为单位体积焦炭颗粒数, $1/\text{m}^3$; r_{C_0} 和 r_c 分别为烧结料中焦炭颗粒初始半径和未反应部分半径, m ; ρ_{C_0} 和 ρ_c 分别为初始焦炭颗粒密度和未反应部分焦炭颗粒密度, kg/m^3 ; Sh 为谢尔伍德数; Sc 为斯密特数; ξ 为校正因子; ζ_c 为焦炭颗粒形状因子; D_{O_2} 和 $D_{\text{CO}_2, \text{eff}}$ 分别为氧气质量扩散系数和二氧化碳有效质量扩散系数, m^2/s ; k_1 和 k_2 为碳反应产生二氧化碳、一氧化碳的反应速率常数, $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s})$; P_{CO_2} 为烧结过程中生成 CO_2 的静压力; E_{f1} 为反应有效系数; k_{f1} 为焦炭燃烧生成一氧化碳的界膜传质系数, m/s .

6) 铁氧化物还原反应. 烧结过程中铁氧化物发生还原反应^[14]. 烧结料主要成分为赤铁矿, 赤铁矿与一氧化碳反应生成铁和二氧化碳, 其反应为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$.

反应速率为

$$R_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{1092\pi r_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^2 N_{\text{Fe}_2\text{O}_3} c_{\text{CO}}}{22.4 T_s \zeta_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} / \left(\frac{1}{k_{r2}} + \frac{d_s \left((1-f)^{-1/3} - 1 \right)}{2D_{\text{CO}}} + \frac{(1-f)^{2/3} k_3}{1 + 1/K} \right). \quad (26)$$

式中: $r_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 为烧结料中赤铁矿颗粒半径, m ; $N_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 为单位体积赤铁矿颗粒数, $1/\text{m}^3$; $\zeta_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 为赤铁矿颗粒形状因子; k_{r2} 为赤铁矿与一氧化碳反应生成铁和二氧化碳的界膜传质系数, m/s ; D_{CO} 为一氧化碳质量扩散系数, m^2/s ; f 为赤铁矿还原度; k_3 为赤铁矿与一氧化碳的反应速率常数, $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s})$; K 为赤铁矿反应平衡常数.

1.4 边界条件

针对烧结料烧结过程传质传热进行模拟, 计算区域与图 1 所示的烧结机台车结构相同. 空气

由台车底部的抽风机从料层顶部吹入,经料层参与传质传热过程从底部排出.料层顶部空气入口设置为速度入口边界条件,入口空气速度和温度由实际工况确定;料层底部空气出口设置为压力出口边界条件,出口回流压力和温度由实际工况确定.装载烧结料的台车墙壁不透风、绝热且为无滑移边界条件.

1.5 模型验证

模型验证通过模拟结果与实际测量值进行对比实现.测量的数据包括烧结过程料层温度和主要烟气浓度,对比结果如表 1 所示.由表 1 可见,采用该模型得出的料层温度和主要烟气浓度的模拟值与实际值基本相同,最大误差为 9.7%,且在 10% 范围内,故可以认为本文建立的模型可靠.

表 1 烧结台车烧结过程参数
Table 1 Process parameters of sintering bed

区域	温度			氧气体积分数/%			二氧化碳体积分数/%		
	模拟值/K	实际值/K	误差/%	模拟值	实际值	误差	模拟值	实际值	误差
烧结矿带	393	434	9.4	21.04	21.52	2.2	0.028	0.03	6.7
燃烧带	1 500	1 425	5.3	11.22	12.35	9.1	9.630	10.45	7.8
预热干燥带	865	953	9.5	15.24	16.72	8.8	6.730	7.45	9.7
湿料带	329	354	7.1	20.35	21.36	4.7	0.029	0.03	3.3

2 模拟结果与分析

2.1 烧结过程料层温度

结合烧结过程中物理、数学模型以及各种关键子模型对烧结料层烧结过程传质传热进行数值模拟,图 3 所示为台车自点火至终点整个烧结过程中不同抽风负压对烧结过程料层温度分布的影响情况.由图 3 可见:自点火起,加热料层顶部

的燃料使其燃烧,因为台车底部抽风负压和高温区热层流的影响,燃烧带趋于变宽,峰值温度升高,燃烧速率也随着料层温度的升高而加快,这证实了料层底部的热集聚效应.烧结过程中伴随着料层自上而下的传质传热,料层迅速分层,分成了烧结矿带、燃烧带、预热干燥带、湿料带等不同的温度带.各个温度带分布不均,部分原因是料层中的热量集聚分布不均,但主要是由台车底部抽风负压的改变导致的.

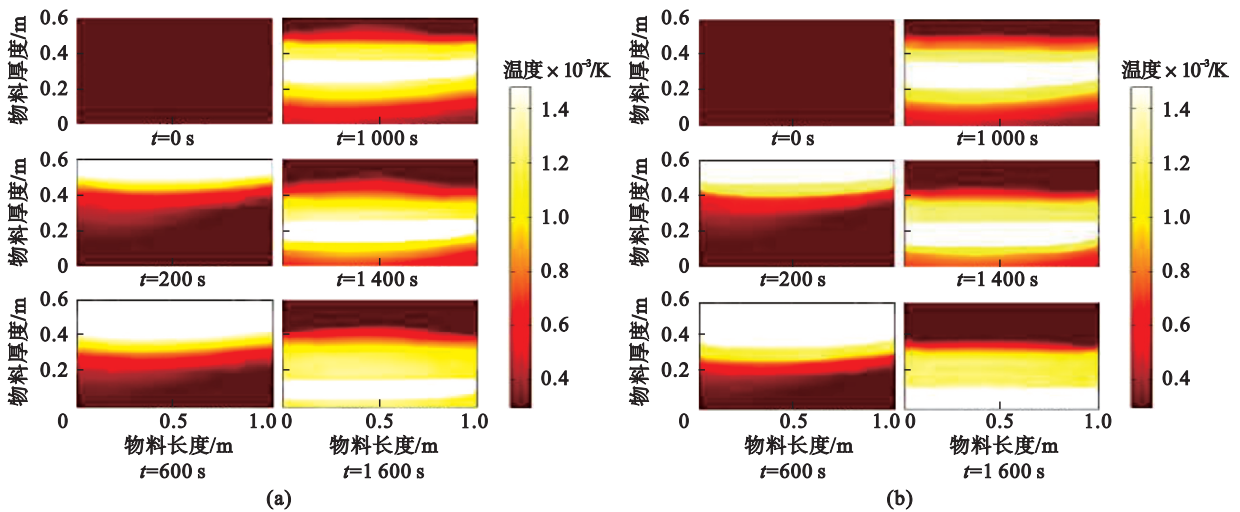


图 3 抽风负压对料层温度分布的影响

Fig. 3 Influence of exhaust pressure on the temperature distribution in sintering bed

(a)—抽风负压 10 kPa; (b)—抽风负压 12 kPa.

台车底部抽风负压的增加改变了料层的热状态.在 200~600 s 的烧结过程前期,对比图 3a 和图 3b,随着抽风负压的增加,料层温度快速上升,图 3b 中 600 s 时燃烧带的整体厚度相比于图 3a 中

600 s 时增加了 0.04 m,料层燃烧速率加快,燃烧带、预热干燥带、湿料带等向下推进的速率加快,料层的整体温度升高,其中燃烧带的温度最高接近于 1 500 K.在 600~1 400 s 的烧结过程中期,因

为台车底部抽风负压的影响,进入料层的空气流量突增且温度突降,导致离台车顶部0.1 m左右高度范围内的料层温度快速下降,烧结矿带冷却,相对于图3a,图3b中的烧结矿带更厚,分布更均匀,燃烧带更宽,抽风负压的增加加快了烧结矿带的生成和燃烧带向下推进的速率,改善了料层中热量分布不均现象,料层整体温度趋于稳定,有利于提高烧结矿质量.在1 400~1 600 s的烧结过程后期,通过对比图3a和图3b,抽风负压增大使燃烧带更快接近料层底部,为后续判断烧结终点提供了新的指导依据.

图4为台车自点火至终点整个烧结过程中不

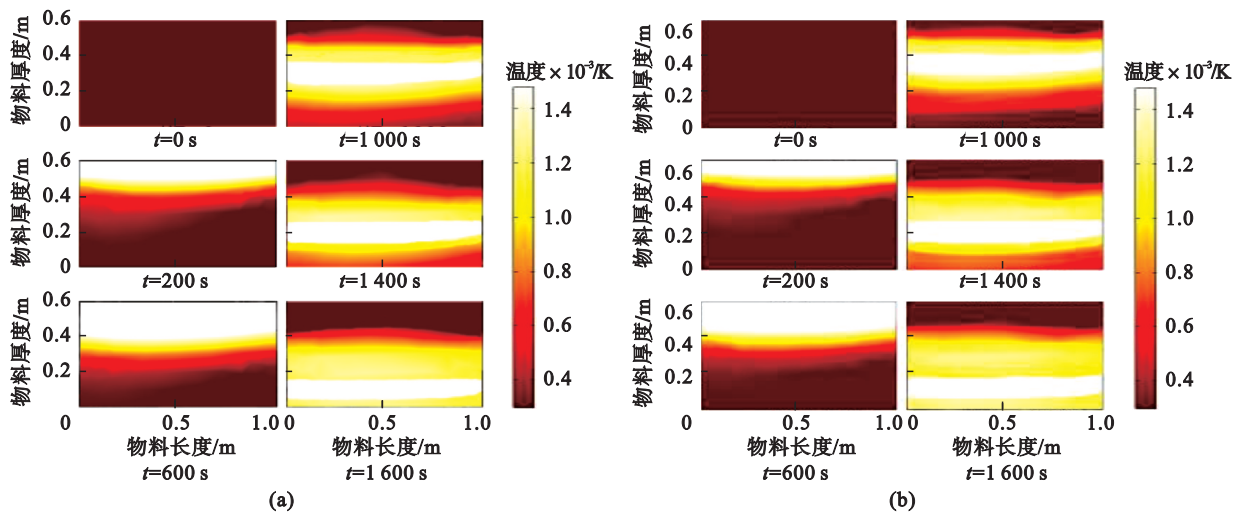


图4 料层厚度对料层温度分布的影响

Fig. 4 Influence of bed thickness on temperature distribution in sintering bed

(a)—料层厚度0.6 m; (b)——料层厚度0.7 m.

2.2 料层中氧气含量

图5为台车自点火至终点整个烧结过程中不同抽风负压对料层中氧气体积分数分布的影响情况.由图5可见:未点火时,料层中氧气体积分数为21%左右.点火启动后,在烧结过程初期,上部料层短时间内发生了一系列反应,处于此料层中的氧气参与反应,故此料层中的氧气体积分数快速减少,燃烧带处的氧气体积分数下降至11%~13%.随着抽风负压的增大,进入料层中的氧气量增加,反应更剧烈,故图5b中200 s时料层内的氧气体积分数相对于图5a中的下降更快且更深入.在烧结过程中期,烧结继续向下快速推进,图5b中600 s时在离料层顶部0.25 m左右高度范围内的烧结料正处于剧烈反应且该料层中的氧气体积分数一直处于11%左右,相对于图5a向下推进的深度增加0.05 m.这是由于台车底部抽风负压的增大,使料层中氧气含量更充足,加

同料层厚度对烧结过程料层温度分布的影响情况.由图4可见:在200~600 s的烧结过程前期,由于点火以及保温的温度和时间相同,图4a的料层整体温度与图4b相差不大;当进入烧结过程中后期,因为不同料层厚度对料层的影响,在相同的抽风负压下,图4a的燃烧带到达料层底部所需时间短,并且图4a中的烧结矿带分布更均匀,但由于料层下部的自动蓄热作用,图4b的燃烧带比图4a宽0.02 m,图4b料层的整体温度更高.通过对比图4a和图4b,不同的料层厚度对于判断烧结终点以及烧结矿的质量有重要意义.

快了烧结向下推进速率.烧结矿带中焦炭颗粒燃烧殆尽,处于该料层中的氧气不再参与反应,氧气的体积分数快速上升至约21%,与空气中的氧气体积分数大致相同,不再变化.在烧结过程后期,随着烧结继续向下推进,料层的透气性以及结构发生了改变,推进速率减小,料层中氧气体积分数下降幅度变小,燃烧带上部约0.1 m的料层中还有部分焦炭颗粒,仍有氧气参与反应,故该料层中的氧气体积分数处于14%~18%.抽风负压的增大提高了料层中氧气含量.

图6为台车自点火至终点整个烧结过程中不同料层厚度对料层中氧气体积分数分布的影响情况.由图6可见:未点火时,料层中氧气体积分数为21%左右.点火后,上部料层中的氧气参与反应,氧气体积分数快速减少,燃烧带处的氧气体积分数下降至11%~13%.在烧结过程初期,由于不同的料层厚度,图6a相比于图6b向下推进

的速度快,所以图 6a 中 200~600 s 的氧气体积分数下降更快.当进入烧结过程中后期,随着烧结继续向下推进,图 6a 烧结矿带中氧气体积分数恢复为 21% 左右,且范围比图 6b 大.由于料层下部

的自动蓄热作用,图 6b 中燃烧带更宽,参与反应的氧气多,故图 6b 相比于图 6a 中燃烧带处氧气含量少.

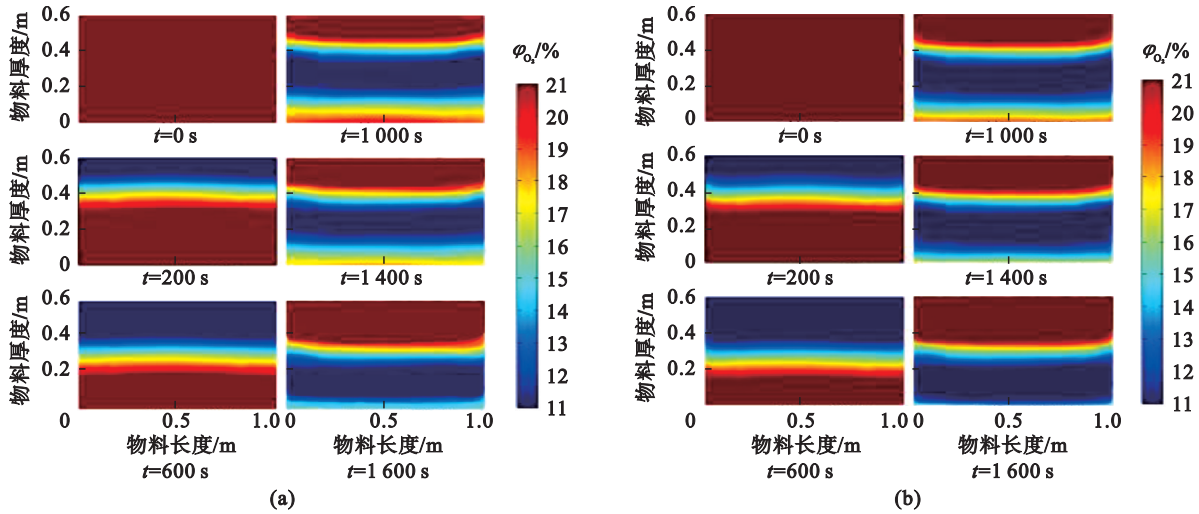


图 5 抽风负压对料层中氧气体积分数分布的影响

Fig. 5 Influence of exhaust pressure on distribution of oxygen volume fraction in sintering bed

(a)—抽风负压 10 kPa; (b)—抽风负压 12 kPa.

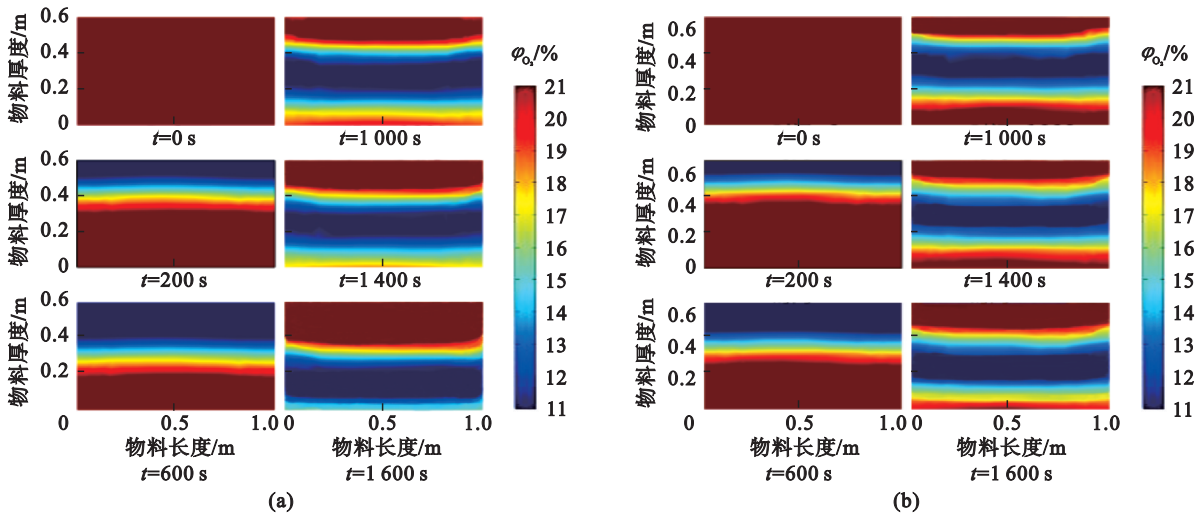


图 6 料层厚度对料层中氧气体积分数分布的影响

Fig. 6 Influence of bed thickness on the distribution of oxygen volume fraction in sintering bed

(a)—料层厚度 0.6 m; (b)—料层厚度 0.7 m.

2.3 料层中二氧化碳含量

图 7 为台车自点火至终点整个烧结过程中不同抽风负压对料层中二氧化碳体积分数分布的影响情况.

台车底部抽风负压的增加改变了料层中二氧化碳浓度.由图 7 可见:未点火时,料层中二氧化碳体积分数约为 0%.点火启动后,烧结过程初期,上部料层短时间内发生了各种反应,有大量二氧化碳生成,故此料层中的二氧化碳体积分数

快速增加,燃烧带处的二氧化碳体积分数快速上升至 10% 左右.在烧结过程中期,图 7b 中 600 s 时二氧化碳体积分数为 10% 左右的燃烧带料层厚度平均比图 7a 多 0.05 m,抽风负压的增加加快了向下推进的速率,加剧了烧结过程中的各种反应,料层中的二氧化碳体积分数上升.在烧结过程后期,1 600 s 时烧结向下推进速率减小,料层中二氧化碳体积分数上升幅度变小,燃烧带上面约 0.1 m 的料层中还有未反应的焦炭、铁氧化物

和烧结矿熔剂颗粒,故处于该料层中的二氧化碳体积分数在3%~8%。烧结矿带中反应物消耗完毕,二氧化碳不再产生,由于台车底部抽风负压的影响,进入料层的空气流量增加且进入下部料层,故下部料层中的二氧化碳体积分数上升,同

时加快了下部燃烧带料层推进速率,加剧了其反应,故燃烧带料层的二氧化碳体积分数处于10%左右。抽风负压的增加加快了烧结矿带生成速率,降低了料层中二氧化碳含量。

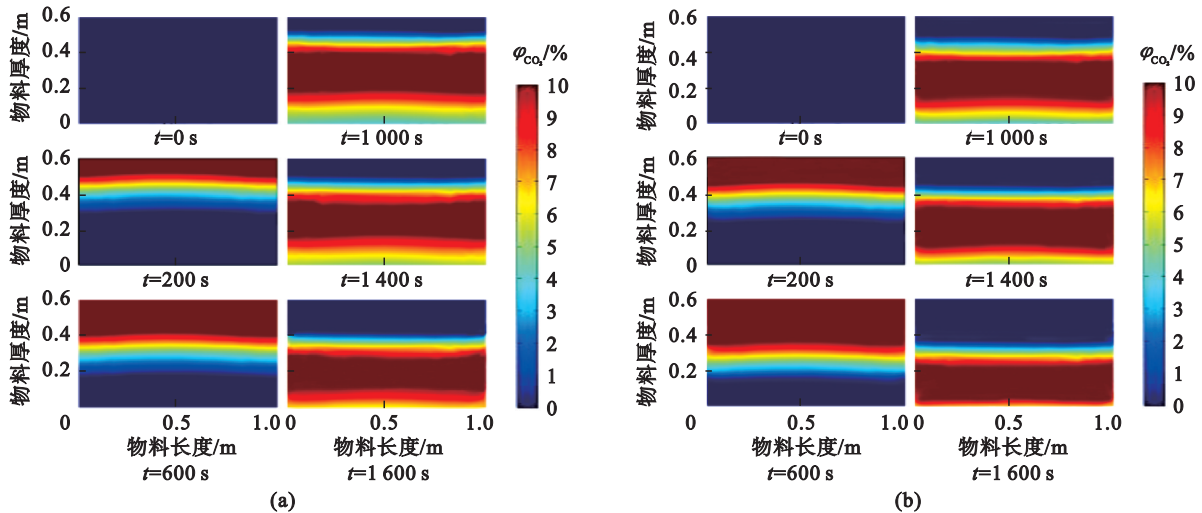


图7 抽风负压对料层中二氧化碳体积分数分布的影响

Fig. 7 Influence of exhaust negative pressure on the distribution of carbon dioxide volume fraction in sintering bed
(a)—抽风负压 10 kPa; (b)—抽风负压 12 kPa.

图8为台车自点火至终点整个烧结过程中不同料层厚度对料层中二氧化碳体积分数分布的影响情况。由图8可见:未点火时,料层中二氧化碳体积分数约为0%。点火后,上部料层发生各种反应,有大量二氧化碳生成,故此料层中的二氧化碳体积分数快速增加,燃烧带处的二氧化碳体积分数快速上升至10%左右。在烧结过程初期,由于不同的料层厚度,图8a相比于图8b向下推

进的速度快,所以图8a中200~600s时的二氧化碳体积分数上升更快且在更深入的料层中产生。当进入烧结过程中后期,随着烧结继续向下推进,图8a烧结矿带中二氧化碳体积分数变为0%左右,且范围比图8b大。由于料层下部的自动蓄热作用,图8b中燃烧带更宽,生产的二氧化碳多,故图8b相比于图8a中燃烧带处二氧化碳含量多。

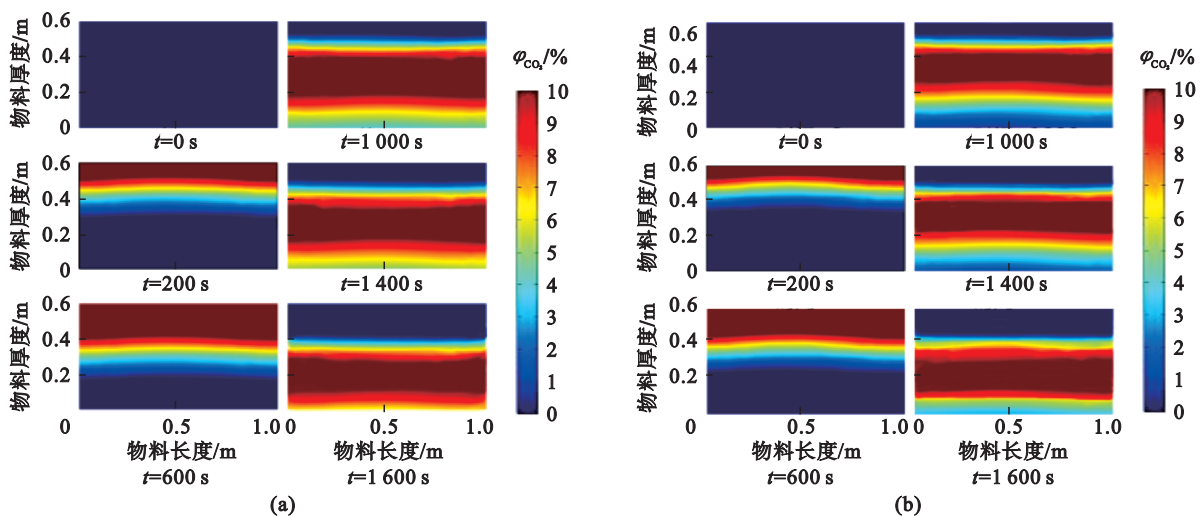


图8 料层厚度对料层中二氧化碳体积分数分布的影响

Fig. 8 Influence of bed thickness on the distribution of carbon dioxide volume fraction in sintering bed
(a)—料层厚度 0.6 m; (b)—料层厚度 0.7 m.

3 结 论

1) 以多孔介质模型和烧结理论为基础,基于局部非热力学理论和组分传输理论,结合烧结过程中各种关键子模型动力学方程,以COMSOL软件作为计算平台,建立了烧结料烧结过程传质传热的二维瞬态数学模型,根据该模型对烧结过程传质传热进行了和分析,得到料层温度、料层中主要烟气浓度具体分布情况,很好地描述了烧结过程中传质传热的具体情况。

2) 影响烧结料烧结过程传质传热的因素为抽风负压和料层厚度。随着抽风负压的增加,改变了料层的热状态,燃烧带变宽且向下推进的速率加快,料层的整体温度升高,增加进入料层的氧气且氧气更加深入下部料层,使料层中的整体氧气含量上升,加快排出二氧化碳使料层中整体二氧化碳含量下降;随着料层厚度的增加,燃烧带向下推进的速率减慢,但料层的整体温度升高,料层中的整体氧气含量下降,整体二氧化碳含量上升。

3) 烧结过程中料层状态与其中的主要烟气含量变化情况相关联。燃烧带料层中的反应剧烈,料层温度升高,最高接近1 500 K,料层中氧气体积分数下降至11%左右,二氧化碳体积分数上升至10%左右;烧结矿带料层中的反应结束,料层中氧气体积分数上升至21%左右,二氧化碳体积分数下降至0%左右;燃烧带上面和下面约0.1 m的料层中的反应未完全结束,料层中氧气体积分数在14%~18%,二氧化碳体积分数在3%~8%。

4) 根据该模型可以模拟计算烧结料烧结过程传质传热,为后续烧结过程协调控制各个位置的具体情况,提高烧结矿质量、烧结终点预测以及烟气含量控制提供了新的指导方向。

参考文献:

[1] Cheng Z L, Tan Z T, Guo Z G, et al. Recent progress in sustainable and energy-efficient technologies for sinter

production in the iron and steel industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 131: 110034.

- [2] 王淦. 废气循环烧结热质传输过程数值模拟及其应用[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
(Wang Gan. Numerical simulation and application of heat transfer process of waste gas circulating sinter[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.)
- [3] Yang W, Ryu C, Choi S, et al. Mathematical model of thermal processes in an iron ore sintering bed[J]. *Metals and Materials International*, 2004, 10(5): 493-500.
- [4] 夏德宏, 焦红蕾, 张刚, 等. 烧结工序中燃烧与传热过程的数值模拟[J]. *工业炉*, 2006, 5(3): 11-12.
(Xia De-hong, Jiao Hong-lei, Zhang Gang, et al. Numerical simulation of combustion and heat transfer in sintering process[J]. *Industrial Furnace*, 2006, 5(3): 11-12.)
- [5] Mitterlehner J, Loeffler G, Winter F, et al. Modeling and simulation of heat front propagation in the iron ore sintering process[J]. *ISIJ International*, 2004, 44(1): 11-20.
- [6] Hou P, Kang C. Improved distribution of fuel particles in iron ore sintering process[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2011, 2(5): 55-56.
- [7] 张晟, 张晓虎, 赵亮, 等. 基于Ergun方程的菱镁球团填充床层阻力特性实验[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 347-352.
(Zhang Sheng, Zhang Xiao-hu, Zhao Liang, et al. Experiment of resistance characteristics for magnesite pellets packed bed based on Ergun equation[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(3): 347-352.)
- [8] Wang G, Wen Z, Lou G F, et al. Mathematical modeling and combustion characteristic evaluation of a flue gas recirculation iron ore sintering process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 964-974.
- [9] Zhang X H, Feng P, Xu J R, et al. Numerical research on combining flue gas recirculation sintering and fuel layered distribution sintering in the iron ore sintering process[J]. *Energy*, 2020, 192: 116660.
- [10] De Castro J A, Sasaki Y, Yagi J I. Three dimensional mathematical model of the iron ore sintering process based on multiphase theory[J]. *Materials Research*, 2012, 15(6): 848-858.
- [11] Zhang B, Zhou J M, Li M. Prediction of sinter yield and strength in iron ore sintering process by numerical simulation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 131: 70-79.
- [12] Pahlevaninezhad M, Emami M D, Panjepour M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristic in a sintering bed[J]. *Energy*, 2014, 73: 160-176.
- [13] Zhou H, Zhao J P, Loo C E, et al. Numerical modeling of the iron ore sintering process[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(9): 1550-1558.
- [14] Jozwiak W K, Kaczmarek E, Maniecki T P, et al. Reduction behavior of iron oxides in hydrogen and carbon monoxide atmospheres[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2007, 326(1): 17-27.