



燃料分层烧结过程中焦炭分布模拟优化

张金虎^{1,2}, 徐 进¹, 刘思达¹, 杨晓波¹, 周宗彦¹

(1. 江西理工大学 颗粒技术江西省重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 方大特钢科技股份有限公司, 江西 南昌 330012)

摘要: 燃料分层分布是一种基于烧结料层自动蓄热效应, 沿料层高度调整燃料配比, 从而降低燃料消耗的技术。本文基于计算流体力学 CFD 模型模拟燃料分布烧结过程, 以料层中最高温度为基准, 分析三层燃料分布对烧结性能的影响。结果表明, 焦炭含量对烧结料层最高温度分布、熔体生成及二氧化碳排放影响显著。适度增加上、中层焦炭含量能加速熔体生成, 提升热量传递均匀性, 提高烧结矿质量。当上、中、下层焦炭质量分数分别为 5.1%、3.9%、3.3% 时, 与传统工艺相比, 总焦炭使用量可以减少 0.3 个百分点, 固体燃料消耗降低 3.38 kg/t。

关键词: 铁矿石烧结; 燃料分层; CFD; 低碳

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0001-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.072

Simulation optimization of coke distribution during fuel stratification sintering

ZHANG Jinhu^{1,2}, XU Jin¹, LIU Sida¹, YANG Xiaobo¹, ZHOU Zongyan¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Particle Technology, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Fangda Special Steel Technology Co., Ltd., Nanchang 330012, Jiangxi, China)

Abstract: Fuel stratification distribution is a technology that adjusts the fuel ratio along the height of the material layer based on the automatic heat storage effect of the sintered fuel stratification so as to reduce fuel consumption. In this paper, the sintering process of fuel distribution is simulated based on the computational fluid dynamics CFD model, and the influence of fuel distribution on the sintering performance of the three layers is analyzed based on the highest temperature in the fuel stratification. The results show that the coke content has a significant effect on the maximum temperature distribution, melt formation and carbon dioxide emission of the sintering bed. Moderately increasing the content of coke in the upper and middle layers can accelerate melt formation, improve heat transfer uniformity, and improve the quality of sinter. When the mass fractions of upper, middle and lower coke are 5.1%, 3.9% and 3.3%, respectively, the total coke consumption could be reduced by 0.3% and the carbon consumption could be reduced by 3.38 kg/t compared with the traditional process.

Key words: iron ore sintering; fuel stratification; CFD; low carbon

近年来, 随着绿色低碳理念在冶金工业中的广泛推广, 实现烧结过程燃料精准控制已成为减碳研究的重点之一。燃料分层烧结技术利用烧结料层的自动蓄热效应, 通过沿料层高度逐级调整

焦炭含量, 从而实现对温度场进行精细调控。这一技术旨在改善烧结过程中温度分布和熔体生成条件, 为控制烧结反应内部复杂过程提供了一种有效手段。相较于传统烧结, 分层烧结可降低燃

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52276154); 江西省自然科学基金青年资助项目(20232BAB214043)

作者简介: 张金虎(1998—), 男, 硕士研究生, 从事烧结过程中燃料分层分布方面的研究。

料使用并减少 CO₂ 的排放, 从而降低温室效应^[1]。黄柱成等^[2]于 2005 年提出了料层蓄热及燃料分层分布模型, 并进行了三层燃料分层布料烧结试验。结果表明, 最佳燃料分布比例使固体燃料消耗降低 3.69 kg/t, 且未影响到烧结矿质量。白晨光等^[3]将 300 mm 料层划分为三层, 调整各层燃料分布, 证明分层烧结可有效减少焦炭含量。吴胜利等^[4]提出“燃料分加”或“燃料与熔剂共同分加”的方案, 以提高厚料层烧结中的固体燃料燃烧性, 解决自动蓄热导致的一系列问题。一些学者利用数值模拟手段研究燃料分层分布技术, 评价烧结矿的质量和强度^[5-6]。李法社等^[7]建立了三维模型模拟料层最高温度变化, 并优化了各层燃料配比。结果表明, 在不改变烧结矿质量的情况下, 优化方案焦炭质量分数降低了 4%。SHRESTHA 等^[8]模拟 600 mm 料层烧结过程, 通过三层分配减少焦炭含量, 结果表明, 燃料分层分布可降低燃料消耗 3.5% 或 1.33 kg/t。

尽管早期一些学者研究验证了燃料分层在优化温度场和提高烧结矿质量方面的潜力, 但烧结过程中热传导、化学反应及气固相互作用等多物理场耦合的关键机理依然存在较大不确定性, 传统实验手段难以直接揭示其中的动态变化与内部细节。因此, 如何突破“黑箱”限制, 深入解析烧结过程内部机理, 成为当前亟待解决的问题。数值模拟作为一种先进的分析工具, 能够有效打开烧结过程这一复杂“黑箱”。本文通过基于计算流体力学(CFD)模型, 同时考虑热传导、化学反应、气固相互作用和相变等关键过程, 直观揭示温度演变和熔体生成的内在规律, 为进一步探索烧结过程中的内在调控机制提供理论依据。

1 模型描述

本文构建的模型由连续性方程、动量方程、组分方程、能量方程、化学反应速率方程及相变速率方程组成^[9-11]。此外, 该模型整合了多个关键子模型, 包括改进后的水分干燥与凝结模型^[12]以及石灰石分解模型^[13]、铁矿石氧化^[14]、焦炭燃烧^[11,15]、矿物熔化和凝固^[16]等模型。水分干燥与凝结模型通过同时引入恒速干燥和降速干燥两个

阶段来描述水分迁移与相变过程的动态变化; 石灰石分解模型在原有仅考虑化学反应阻力的基础上, 加入了颗粒外部边界层传质阻力以及颗粒内部 CaO 产物层传质阻力。整体模型共涵盖 9 种组分, 其中包括: 赤铁矿(Fe₂O₃)、磁铁矿(Fe₃O₄)、石灰石(CaCO₃)和焦炭 4 种固相组分; O₂、CO₂、CO、H₂O、N₂ 5 种气相组分以及 5 个化学反应。模型各方程以及各反应速率方程分别由表 1~3 给出。

表 1 模型中关键方程^[9-11]

方程	表达式
气体质量守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g v) = S_{\text{mass,gs}} + S_{\text{mass,gg}}$
动量守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g v_i)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g v_i v_j) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla v_i) - S_{\text{momentum}}$
气相输运方程	$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon Y_i)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g v Y_i) = \nabla(\rho_g Y_i \nabla Y_i) + S_{\text{gs}} + S_{\text{gg}}$
气相能量方程	$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon C_{\text{pg}} T_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g v C_{\text{pg}} T_g) = \nabla[(\lambda_g \nabla T_g)] + h_v(T_s - T_g) + S_{h,\text{gs}} + S_{h,\text{gg}}$
固体组分守恒方程	$\frac{\partial[(1 - \varepsilon) \rho_s Y_j]}{\partial t} = -S_{\text{gs}}$
固相能量守恒方程	$\frac{\partial[\rho_s(1 - \varepsilon) C_{\text{ps}} T_s]}{\partial t} = \nabla[(\lambda_{s,\text{eff}} \nabla T_s)] + h_v(T_g - T_s) + S_{h,\text{gs}}$

2 仿真条件及方法

模拟区域如图 1 所示。首先将计算域分为三层(除铺底料层外), 通过热平衡计算和前人研究的蓄热率验证燃料分层的可行性。根据物料平衡和热收支计算, 基准试验焦炭质量分数为 4.4%。在燃料分层烧结(fuel layered distribution sintering, FLDS)中, 上、中、下各层焦炭质量分数分别为 5.6%、4.0%和 3.0%(图 1)。通过模拟计算, 最终确定了上层焦炭质量分数的上限为 5.4%, 下层焦炭质量分数的下限为 2.7%。

本文共设计了 7 种工况, 见表 4。在表 4 中, 每个工况对应一种不同的焦炭含量分布方案。对于料层上层, 在工况 1 至工况 3 中, 焦炭质量分数逐步增加, 从 4.8% 提高到 5.4%; 对于料层中层, 在工况 4 至工况 6 中, 中层的焦炭质量分数

表 2 模型中考虑的主要气固反应和子模型

Table 2 Main gas-solid reactions and sub-models considered in the model

化学反应	反应速率方程
水分干燥和凝结 ^[12] : $H_2O(l) \leftrightarrow H_2O(g)$	$R_{\text{drying}} = \frac{\gamma A k_{\text{wtr}}}{R_g T_g} (P_{H_2O}^* - P_{H_2O})$ $\gamma = \begin{cases} 1, \psi > 1 \\ 1 - (1 - \psi) \cdot (1 - 1.796 \cdot \psi + 1.0593 \cdot \psi^2), \psi \leq 1 \end{cases}$ $R_{\text{conden}} = \frac{A k_{\text{wtr}}}{R_g T_g} (P_{H_2O} - P_{H_2O}^*)$
焦炭燃烧 ^[11,15] : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ $0.5C + H_2 \rightarrow 0.5CH_4$ $C + O_2 \rightarrow CO_2$	$R_{\text{coke},i} = \frac{A_p n_c C_i}{1/(\xi K_{r,c,i}) + 1/K_{g,i} + 1/K_{\text{eff},i}} \quad (i = O_2, H_2O, H_2, CO_2)$
石灰石分解 ^[13] : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	$R_{\text{lime}} = \frac{A_{\text{iso}} W_{\text{ls}} (C_{CO_2}^c - C_{CO_2}) n_1}{d_p / (\text{Sh} \cdot D_{CO_2}) + [d_p (d_p - d)] / (d_1 D_s) + (C_{CO_2}^c / K_1) (d_p / d_1)^2}$
$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$ $2Fe_3O_4 + 0.5O_2 \rightarrow 3Fe_2O_3$ ^[14]	$R_{\text{iron},i} = \frac{4\pi r_0^2 (C_i - C_i^e) n_h}{\frac{1}{K_{g,i}} + \frac{1}{D_{\text{eff},i} \frac{1}{K_{r,h,i} [K_{h,i} / (1 + K_{h,i})]} (r_0^2 / r)}} \quad (i = CO, O_2)$
熔化和凝固 ^[16]	$q_m = \frac{\partial}{\partial t} (f_m \Delta H_m \rho_b) \quad f_m = \frac{T_s - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}$

表 3 气-气反应速率^[11,17,18]

Table 3 Rates of gas-gas reactions

化学反应	反应速率/(mol·m ⁻³ ·s ⁻¹)
$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	$1.3 \times 10^{11} C_{H_2O}^{0.5} C_{CO} \exp(-15000/T_g)$
$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	$10^{11} C_{H_2} C_{O_2} \exp(-5050/T_g)$
$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	$2.78 C_{H_2O} C_{CO} \exp(-1510/T_g)$
$CO_2 \rightarrow CO + 0.5O_2$	$7.5 \times 10^{11} C_{O_2} \exp(-46500/T_g)$
$CH_4 + 1.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	$9.2 \times 10^6 C_{CH_4}^{0.5} C_{O_2} \exp(-9622/T_g)$
$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	$93.96 C_{O_2} C_{H_2} \exp(-5604/T_g)$

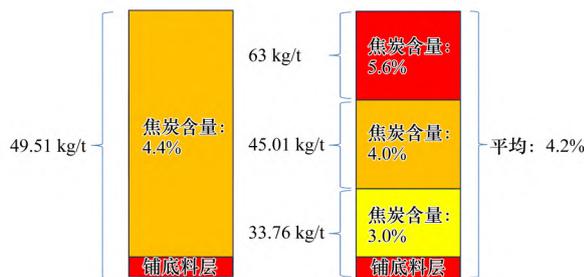


图 1 基准与分层试验中焦炭质量分布

Fig. 1 Height and coke content in each layer

分别设置为 5.1%、3.9%、4.2%，分析不同焦炭含量对中层温度分布和熔体生成的影响；对于料层下层，工况 7 到工况 9 中，焦炭质量分数分别设置为 3.0%、3.3% 和 3.9%，评估焦炭含量对下层温度和熔体生成的影响。

本文使用 Fluent 软件对烧结过程进行数值模拟，求解流动、传热和质量传递方程。初始条件和边界条件通过 Fluent 中用户自定义函数(UDF)设定，包括：料层初始温度设为 300 K，铁矿石和焦炭初始粒径分别设为 3.2 mm 和 1.6 mm；壁面速度为零；入口速度为 3.5 m/s；点火温度为 1400 K，持续时间为 90 s；保温温度为 1073 K，持续时间为 60 s；出口边界压力在点火期间为 -10000 Pa，烧结过程中为 -15000 Pa。模型中假设混合料内部分布均匀，视为各向同性多孔介质，表面平整无凹陷，同时忽略烧结过程中的漏风现象。微分方程中的瞬态项采用二阶隐式格式离散化。应用 SIMPLE 算法求解速度和压力的耦合问题，能量方程残差为 10⁻⁶，其他方程残差为 10⁻³，时间步长为 0.5 s。连续介质方程和动量方

表 4 不同工况条件下每层焦炭质量分数
Table 4 Coke content per layer under different operating conditions %

工况	上层	中层	下层
1	4.8	3.9	3.0
2	5.1	3.9	3.0
3	5.4	3.9	3.0
4	5.1	3.6	3.0
5	5.1	3.9	3.0
6	5.1	4.2	3.0
7	5.1	3.9	2.7
8	5.1	3.9	3.0
9	5.1	3.9	3.3

程的松弛因子分别设置为 0.7 和 0.5。

3 结果及讨论

3.1 常规烧结与分层烧结对比

使用 YANG 等^[19]提供的烧结杯试验数据对数值模型进行了验证。表 5 列出了模拟和试验中使用的参数。模拟与试验床层温度比较如图 2 所示。

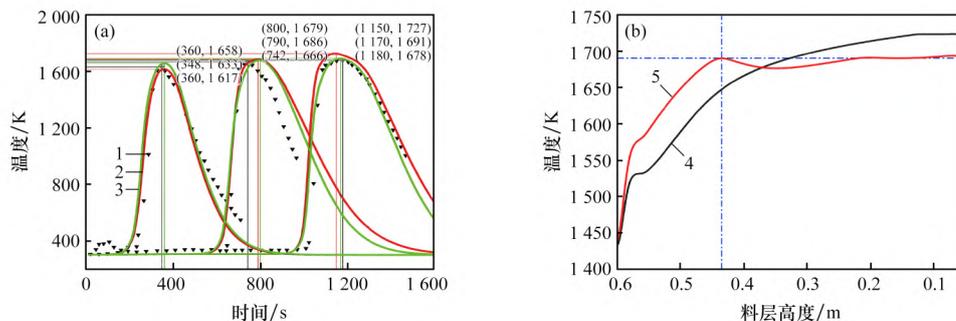
图 2(a) 比较了传统烧结(CS)和 FLDS 烧结过

程中三个测温点处床层温度随时间变化的结果。在这两种情况下,在料层高度为 0.49 m(上层)、0.30 m(中层)和 0.11 m(底层)的温度变化趋势几乎相同。图 2(b) 显示 FLDS 技术使料层温度分布更均匀,有效避免了传统均匀布料方法中、上层温度不足和下层过熔的问题,特别是在料层高度为 0.43 m 之前,温度优势更为明显,表明分层烧结在点火初期温度升高更快,且受常温空气影响较小,传热效率更高。虽然分层烧结的最高温度低于传统工艺,但温度均匀性得到了提高。通过对火焰前沿速度(flame front speed, FFS)和烧结时间进行计算。其中,FFS 定义为料层温度为 1 000 K 时两点之间的距离与传播所消耗的时间之比。例如,距离取为 $y = 0.49$ m 位置与 $y = 0.11$ m 位置之间的差值;烧结时间是指烟气温度达到最高值的时间。由模拟数据可计算出 FLDS 条件下 FFS 为 0.495 mm/s,烧结时间为 1 420 s;CS 的 FFS 为 0.496 mm/s,烧结时间为 1 360 s。由此可见,两者 FFS 相差不到 1%,但 FLDS 烧结时间比 CS 快 4.2%。这里采用的是不同位置处的定义,所以在计算中可能会出现误差,但对结论无较大影响。

表 5 模型中使用参数

Table 5 Parameters used in the model

床层高度/mm	点火阶段 负压/Pa	保温和烧结 阶段负压/Pa	料层初始 温度/K	点火 温度/K	点火 时间/s	保温 温度/K	保温 时间/s	铁矿石初 始直径/mm
600	10 000	15 000	300	1 400	90	1 073	60	3.2
焦炭初始 直径/mm	石灰石初始 直径/mm	平均粒径/ mm	铁矿石质量 分数/%	焦炭质量 分数/%	石灰石质量 分数/%	临界 含水量/%	料层 含水量/%	
1.6	1.6	3.0	83.2	4.4	12.4	5.0	7.0	



(a) 模拟与试验温度对比; (b) CS 和 FLDS 最大温度比较

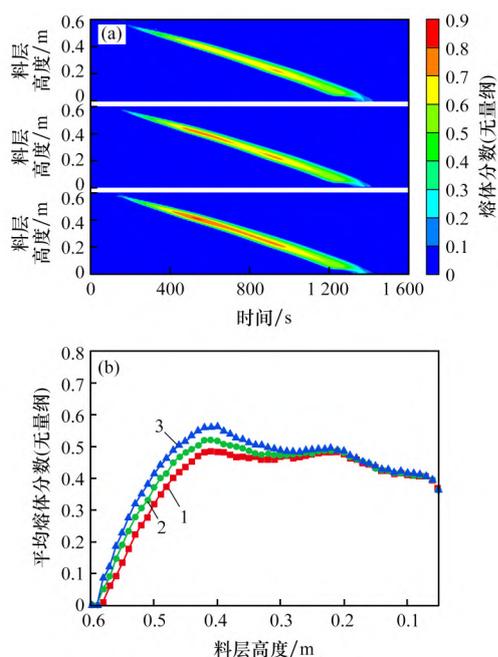
1—烧结杯试验; 2—烧结模型; 3—分层烧结模型; 4—传统烧结; 5—分层烧结。

图 2 模拟与试验床层温度比较

Fig. 2 Comparison of simulated and experimental bed temperatures

3.2 上层焦炭含量对烧结过程的影响

根据文献[16]:当熔体分数低于0.2时,认为烧结混合料未充分熔化;而当熔体分数高于0.4时,则认为发生了过度熔化;介于0.2至0.4之间时,产品烧结矿被认为符合高炉使用要求。但是熔体分数的计算值与选取的液相线和固相线有关,故本文中计算的熔体分数略高,但是依旧可反映烧结过程中液相的生成规律。图3为上层不同焦炭质量分数(4.8%、5.1%、5.4%)下的熔体分布及平均熔体分数,固定中层焦炭质量分数为3.9%、下层为3.0%。由图3(a)可以看出,随着上层焦炭含量的增加,液相生成量有所增多,改善了上部料层的点火和燃烧效率。由图3(b)表明,当焦炭质量分数为4.9%时,在高度为0.53 m以上的区域平均熔体分数低于0.2,出现欠烧现象;当焦炭质量分数为5.4%时,上部区域又出现了大范围过熔现象,降低了料层透气性,影响烧结矿的质量。故在此选择焦炭质量分数为5.1%的工况方案,既避免了点火初期烧结不足现象,又降低了上层过熔现象。



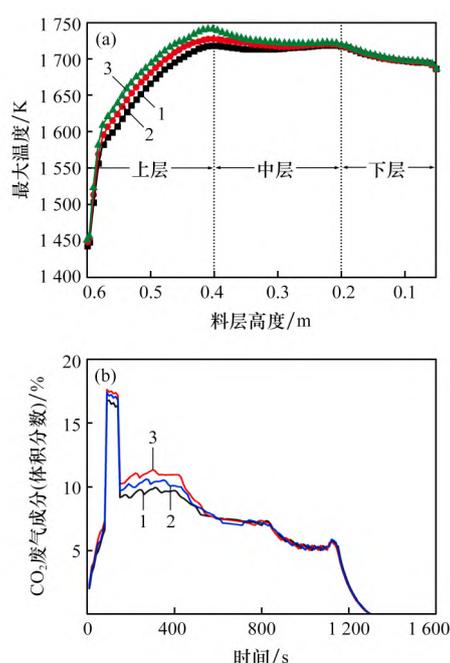
(a) 熔体分数; (b) 平均熔体分数
1—工况 1; 2—工况 2; 3—工况 3。

图3 上层焦炭质量分数变化对烧结熔体分数及平均熔体分数的影响

Fig. 3 Influence of upper-layer coke mass fraction on sintering melt fraction and average melt fraction

不同焦炭含量下的最大温度与CO₂排放情况如图4所示。由图4(a)可知,随着焦炭含量增加,料层中的最大温度显著提高。在焦炭质量分数为5.4%的工况下,最大温度达1740 K。尽管增加焦炭含量有助于提高温度,但过高的温度可能导致上层料层过熔,增加过熔风险,影响烧结效果。

由图4(b)可知,随着上层焦炭含量的增加,工况1~3的平均CO₂排放体积分数依次分别为5.77%、5.92%、6.09%,由此可见上层焦炭含量对烧结过程的影响最大,差异性持续至800 s,约占整个烧结过程的50%。当上层焦炭质量分数为5.4%时,CO₂排放量最高,说明废气排放增加。这表明,在实际生产中,虽然增加上层焦炭含量有助于提高温度均匀性,但应适当控制焦炭含量,以避免过度的CO₂排放,从而减少碳排放负荷。研究表明,随着上层碳含量的增加,烧结速度提高约0.1个百分点,因此对烧结速度的影响较小,不做深入探讨。综合以上,选择焦炭质量分数为5.1%的方案较为合理。



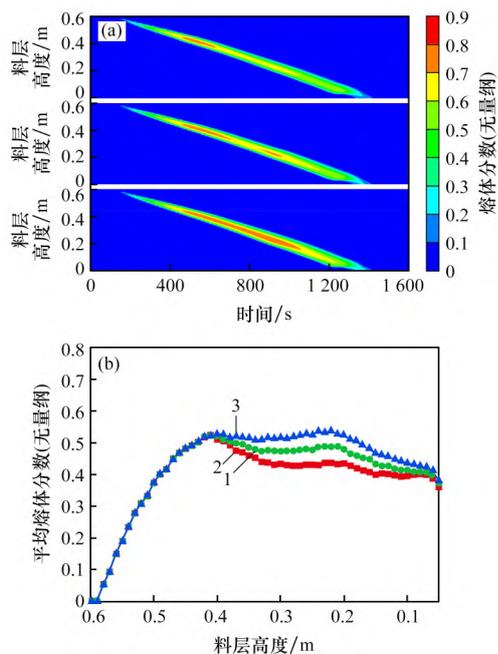
(a) 床层最高温度; (b) CO₂废气排放
1—工况 1; 2—工况 2; 3—工况 3。

图4 上层不同条件比较

Fig. 4 Comparison of different conditions in the upper layer

3.3 中层焦炭含量对烧结过程的影响

图 5 展示了中层焦炭质量分数从 3.6% 增加到 4.2% 时的熔体分布和平均熔体分数。由图 5 可知,随着中层焦炭含量的增加,熔体量明显增多,显著改善了烧结矿的强度和透气性。当中层焦炭质量分数为 4.2% 时,图 5(a) 显示出熔体分布较宽,易造成死烧结,使得成品矿透气性差,图 5(b) 在 0.2 m 位置处平均熔体分数高于 0.5,显著出现过熔现象。当中层焦炭质量分数为 3.9% 时,相比于工况 5 和 6,其在烧结下部液相生成明显减少,熔体分布更加均匀,液相生成更加稳定。

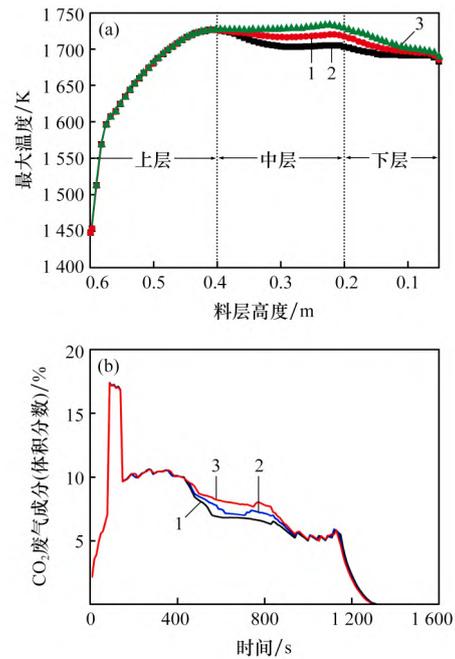


(a) 熔体分数; (b) 平均熔体分数
1—工况 6; 2—工况 5; 3—工况 6。

图 5 中层焦炭质量分数变化对烧结熔体分布及平均熔体分数的影响

Fig. 5 Influence of middle-layer coke mass fraction on sintering melt fraction and average quality melt fraction

中层焦炭含量对床层最大温度的影响如图 6 所示。由图 6(a) 可看出,在焦炭质量分数为 4.2% 时,最大温度约为 1 740 K,显著高于其他工况。虽然温度提升有助于提高烧结矿强度,但过高温可能导致局部过度熔化,尤其在中部区域。当焦炭质量分数为 3.9% 时,中部区域温度更为平稳,整个床层温度保持在理想范围内。因此,适度控制中层焦炭含量,避免过熔现象至关重要。由图 6(b) 可知,随着中层焦炭含量增加,工况



(a) 床层最高温度; (b) CO₂ 废气排放
1—工况 4; 2—工况 5; 3—工况 6。

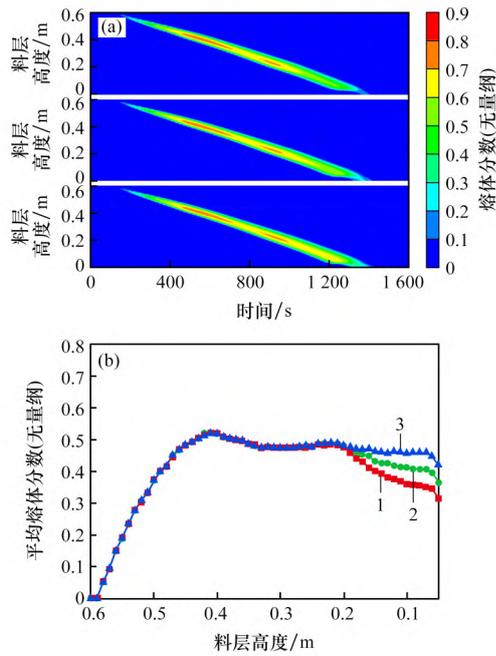
图 6 中层不同条件比较

Fig. 6 Comparison of different conditions in the middle layer

4~6 的平均 CO₂ 排放体积分数依次为 5.80%、5.92%、6.07%,CO₂ 排放量也逐渐增加。注意到在 400 s 之前以及在 1 000~1 300 s 期间,不同焦炭含量的 CO₂ 排放量曲线几乎重合,原因是因为在料层的上部和下部焦炭配比相同,在 400~1 000 s 期间,烧结过程中 CO₂ 排放量与中层焦炭含量呈现出正相关。与上层类似,过高的焦炭含量会导致更高的 CO₂ 排放,也带来了更大的碳排放压力。综合以上分析表明,当焦炭质量分数为 3.9% 时,中部区域的热量传递和烧结矿质量显著提高,可避免局部过熔导致的负面影响。

3.4 下层焦炭含量对烧结过程的影响

下层焦炭含量对烧结熔体分数与平均熔体分数影响如图 7 所示。从图 7 可见,随着下层焦炭质量分数从 2.7% 分别增加至 3.0% 和 3.3% 时,下层熔融相生成明显增加,特别是在接近 0.1 m 的下部区域,熔体分数分布良好。当焦炭质量分数为 3.3% 时,相比于工况 7、8 熔体分布最均匀,平均熔体分数也最稳定。然而,过高的温度和熔体生成可能降低烧结矿强度。因此,需要合理控制下层焦炭含量,提高温度传递的均匀性和烧结矿质量。



(a) 熔体分数; (b) 平均熔体分数
1—工况 7; 2—工况 8; 3—工况 9。

图 7 下层焦炭质量分数变化对熔体分数及平均熔体分数的影响

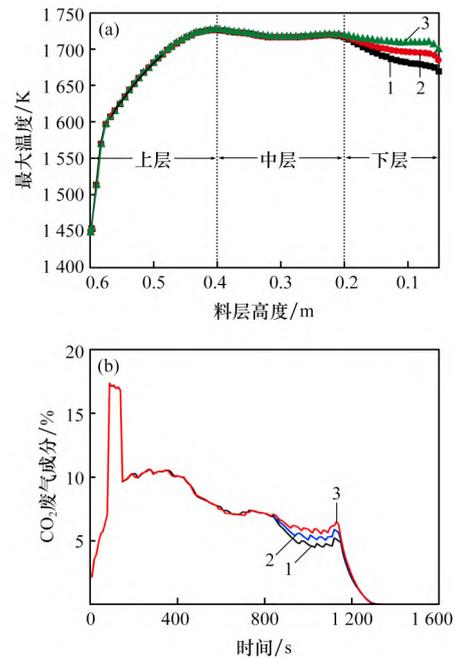
Fig. 7 Influence of bottom-layer coke mass fraction on sintering melt fraction and average melt fraction

下层焦炭含量对床层最大温度的影响如图 8 所示。由图 8(a) 可看出, 不同下层焦炭含量对最大温度有较大影响。在焦炭质量分数为 3.3% 时, 床层最大温度较为稳定, 温度波动较小, 且下部料层温度显著提高, 促进了烧结的充分进行, 改善了烧结矿质量。由图 8(b) 可知, 随着下层焦炭含量增加, 工况 7~9 的平均 CO_2 排放体积分数依次为 5.83%、5.92%、6.02%, CO_2 排放量也随之增加, 焦炭质量分数为 3.3% 时排放量最大。

综合以上分析表明, 适度增加下层焦炭含量能显著改善下部料层的温度传递和熔体生成, 提高烧结矿的均匀性和质量。因此, 焦炭含量为 3.3% 时能够实现温度分布的均匀性和烧结质量的提高, 同时兼顾节能和减排效果。

4 结论

(1) 相比于传统的均质烧结, 燃料分层烧结显著优化了料层内的温度分布, 减少烧结过程中出现上部烧结不完全和下部过度熔化的现象, 可有效降低燃料消耗。



(a) 床层最高温度; (b) CO_2 废气排放
1—工况 7; 2—工况 8; 3—工况 9。

图 8 下层不同条件比较

Fig. 8 Comparison of different conditions in the bottom layer

(2) 适度增加上层焦炭含量可提高点火速度和熔体质量, 减少上部烧结不足, 但过高焦炭含量会增加燃料消耗。中层焦炭含量的增加可优化热量传递, 减少过熔现象, 但过高可能导致局部温度过高。在保持良好温度分布的前提下, 适度增加中层焦炭含量可提高烧结效率。降低下层焦炭含量可有效控制热量积累, 防止过熔现象, 改善烧结矿质量, 且减少能源消耗, 达到节能降耗的效果。

(3) 通过调整不同层次的焦炭含量, 当上、中、下层的焦炭质量分数分别为 5.1%、3.9%、3.3% 时, 对比传统烧结工艺, 焦炭质量分数降低 0.3 个百分点, 节约固体燃料使用量 3.38 kg/t。

参考文献:

- [1] 李建军, 邵雁, 熊劲, 等. 烧结工序节能减排技术研究综述[J]. 烧结球团, 2022, 47(5): 95-101.
LI Jianjun, SHAO Yan, XIONG Jin, et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5): 95-101.

- [2] 黄柱成,江源,毛晓明,等. 铁矿烧结中燃料合理分布研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,37(5): 884-890.
HUANG Zhucheng,JIANG Yuan,MAO Xiaoming, et al. Fuel appropriate distribution in iron ore sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2006,37(5): 884-890.
- [3] 白晨光,谢皓,邱贵宝,等. 烧结料层中的蓄热模型 [J]. 重庆大学学报,2008,31(9):1002-1007.
BAI Chengguang, XIE Hao, QIU Guibao, et al. An accumulation heat model and its application in iron ore sintering [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(9): 1002-1007.
- [4] 吴胜利,陈东峰,赵成显,等. 提高厚料层烧结燃料燃烧性的试验研究 [J]. 钢铁,2010,45(11):16-21.
WU Shengli, CHEN Dongfeng, ZHAO Chengxian, et al. Study on improving combustion of solid fuel in deep bed sintering [J]. Iron&Steel,2010,45(11): 16-21.
- [5] 叶恒棣,周浩宇,朱蓉甲,等. 分层供热均热低碳烧结方法及基础试验研究 [J]. 烧结球团,2023,48(5): 43-50.
YE Hengdi,ZHOU Haoyu,ZHU Rongjia, et al. Method of low-carbon sintering with uniform heat and basic experimental research based on layered heating [J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(5): 43-50.
- [6] 王建平,田万一. 烧结矿冷却过程的余热利用研究 [J]. 烧结球团,2013,38(1):50-53.
WANG Jianping, TIAN Wanyi. Study on utilization of waste heat during sinter cooling process [J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(1): 50-53.
- [7] 李法社,张小辉,张家元,等. 基于料层最高温度控制的铁矿烧结燃料合理分布 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):386-393.
LI Fashe,ZHANG Xiaohui,ZHANG Jiayuan, et al. Fuel appropriate distribution based on the highest temperature control in iron ore sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(2): 386-393.
- [8] SHRESTHA S, XU J, YU A B, et al. Numerical simulation of fuel layered distribution iron ore sintering technology [J]. Ironmaking&Steelmaking, 2022, 49(1): 83-100.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] PAHLEVANINEZHAD M, DAVAZDAH EMAMI M, PANJEPOUR M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed [J]. Energy, 2014,73: 160-176.
- [12] ZOU Z, HUANG T, YANG X, et al. Mathematical model and computer simulation of moisture transfer process during sintering [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1995,5(1): 15-20.
- [13] YOUNG R. Dynamic mathematical model of sintering process [J]. 1977(6): 621-328.
- [14] AR İ, DO Ć U G. Calcination kinetics of high purity limestones [J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 83(2): 131-137.
- [15] ZHAO J P, LOO C E, ZHOU H, et al. Modelling and analysis of the combustion behaviour of granulated fuel particles in iron ore sintering [J]. Combustion and Flame,2018,189: 257-274.
- [16] 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.
- [17] NI W J, LI H F, ZHANG Y Y, et al. Effects of fuel type and operation parameters on combustion and NO_x emission of the iron ore sintering process [J]. Energies, 2019,12(2): 213.
- [18] PAHLEVANINEZHAD M, EMAMI M D, PANJEPOUR M. Identifying major zones of an iron ore sintering bed [J]. Applied Mathematical Modelling,2016,40(19/20): 8475-8492.
- [19] YANG W, RYU C, CHOI S, et al. Modeling of combustion and heat transfer in an iron ore sintering bed with considerations of multiple solid phases [J]. ISIJ International,2004,44(3): 492-499.