



移动扫码阅读

李震, 刘征建, 张建良, 等. 富氧技术对烧结过程燃料燃烧及 CO 排放的影响数值模拟 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(4): 178-185.

LI Zhen, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, et al. Numerical Simulation of the Impact of Oxygen Enrichment Technology on Fuel Combustion and CO Emissions During Sintering [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(4): 178-185.

富氧技术对烧结过程燃料燃烧及 CO 排放的影响数值模拟

李震¹, 刘征建^{1,*}, 张建良¹, 王耀祖^{2,3}

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学智能科学与技术学院, 北京 100083; 3. 北京科技大学人工智能研究院, 北京 100083)

摘要: 在我国推进落实“双碳”目标的背景下, CO 减排技术的研发与优化已成为烧结工序的重要研究方向。基于计算流体动力学(CFD)技术, 分别构建了燃料颗粒燃烧模型和烧结机模型, 通过数值模拟研究了 O₂ 浓度对燃料颗粒燃烧及烧结料床燃烧过程的影响。结果表明, 对于燃料颗粒而言, 提高 O₂ 浓度能够显著改善燃料的完全燃烧条件, 提升燃料燃烧效率并降低 CO 排放量。然而, 在烧结工序中, O₂ 浓度对燃料燃烧行为的影响较为复杂。烧结料床内部燃料燃烧同时受到料层传热及 O₂ 浓度的双重影响, 提升 O₂ 浓度会导致燃料着火点降低, 进而延长高温带宽度, 并增大不完全燃烧对于 O₂ 的消耗。当 O₂ 浓度提升幅度较小时, 燃料不完全燃烧比例升高, 当 O₂ 浓度提升至 23%, 烧结燃烧效率下降至 94.4%, 烧结温度降低, 燃烧产物中 CO 的浓度显著增加。随着 O₂ 浓度的进一步提高, O₂ 浓度和料层温度的协同作用优化了 CO 二次燃烧的动力学条件, 烧结过程燃烧效率得以提升, CO 排放浓度显著降低。当 O₂ 浓度提高至 27% 以上时, 燃烧效率超过 94.9%, 对于提升烧结工序燃料利用效率和降低烧结烟气 CO 排放浓度具有显著的优化作用。

关键词: 炼铁; 烧结; 富氧技术; 燃料燃烧; 烧结烟气; CO 排放浓度

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)04-0178-08

Numerical Simulation of the Impact of Oxygen Enrichment Technology on Fuel Combustion and CO Emissions During Sintering

LI Zhen¹, LIU Zhengjian^{1,*}, ZHANG Jianliang¹, WANG Yaozu^{2,3}

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Intelligent Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Artificial Intelligence Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Against the backdrop of China's "Dual Carbon", CO emission reduction technologies are crucial in the sintering process. We employed Computational Fluid Dynamics (CFD) to develop separate models for the combustion of fuel particles and for sintering machines. Numerical simulations were conducted to study the effects of oxygen concentration on fuel particle combustion and the combustion process within the sintering bed. For fuel particles, increasing oxygen concentration

收稿日期: 2025-01-09

修回日期: 2025-03-13

接受日期: 2025-03-16

DOI: 10.20078/j.eep.20250406

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174291)

第一作者: 李震(2000—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要研究方向为烧结。E-mail: lizhenzyx@163.com

*通讯作者: 刘征建(1982—), 男, 辽宁锦州人, 教授, 主要研究方向为低碳炼铁。E-mail: liuzhengjian@ustb.edu.cn

effectively improves conditions for complete combustion, enhances fuel combustion efficiency, and reduces CO emissions. Higher oxygen levels promote more thorough oxidation reactions, ensuring a greater proportion of fuel conversion to carbon dioxide (CO₂) rather than carbon monoxide (CO). However, the influence of oxygen concentration on fuel combustion behavior during sintering is more complex. Internal fuel combustion in the sintering bed is simultaneously affected by heat transfer and oxygen concentration within the material layer. Increasing oxygen concentration leads to a lower fuel ignition point, extending the high-temperature zone and increasing oxygen consumption due to incomplete combustion. When the increase in oxygen concentration is small, the proportion of incomplete fuel combustion increases. This is because the additional oxygen initially promotes faster ignition but does not sufficiently support complete combustion throughout the sintering bed layer. Consequently, when the oxygen concentration reaches 23%, the sintering combustion efficiency decreases to 94.4%, the sintering temperature drops, and the CO concentration in the combustion products increases. This phenomenon highlights the delicate balance between oxygen availability and combustion dynamics during sintering; insufficient oxygen results in incomplete combustion and increased CO emissions. Further oxygen concentration increases, combined with rising layer temperature, optimize the kinetic conditions for CO secondary combustion. This indicates that excess oxygen supports initial combustion and facilitates further CO oxidation to CO₂ in the high-temperature regions of the sintering bed. Consequently, the sintering combustion efficiency improves, and the CO emission concentration decreases. When the oxygen concentration is increased to above 27%, the combustion efficiency exceeds 94.9%, significantly optimizing fuel utilization efficiency during sintering and reducing CO emission concentration in the sintering flue gas. This indicates a threshold oxygen concentration beyond which the benefits of enhanced combustion efficiency and reduced emissions become pronounced. These findings highlight the importance of carefully controlling oxygen levels during sintering to achieve both energy efficiency and environmental goals. This study provides valuable insights into how oxygen concentration improves combustion efficiency and reduces emissions during sintering, contributing to energy efficiency and environmental protection in industrial applications.

Keywords: Ironmaking; Sintering; Oxygen enrichment technology; Fuel combustion; Sintering flue gas; CO emission concentration

0 引 言

随着全球气候变化和环境问题的日益严峻,减少工业生产过程中的温室气体排放已成为国际关注的焦点问题。钢铁行业作为高能耗、高排放的行业之一,其烧结工序产生的 CO₂ 和 CO 排放对环境造成了显著影响^[1-2]。烧结工序是钢铁生产中的重要环节,通过将铁矿石、燃料和熔剂混合后进行高温燃烧,基于液相固结,形成强度及还原性较高的烧结矿以供高炉炼铁使用^[3-5]。然而,燃料燃烧是烧结过程的主要热量来源,这一过程不仅产生大量的 CO₂,还因燃烧不完全等原因导致 CO 等大气污染物排放,燃烧效率降低造成能源浪费。因此,探究有效的 CO 减排技术对于钢铁行业的可持续发展至关重要^[6-7]。

富氧技术通过提高助燃空气中的 O₂ 浓度,可以显著改善固体燃料的燃烧条件,减少不完全燃烧产物 CO 的生成。在烧结过程中,理论上应用富氧技术可以提高固体燃料的燃烧效率,提高烧结温度,促进 CO 的二次燃烧,从而有效降低 CO 排放^[8-11]。

烧结过程中复杂的物理化学变化使得在不同富氧率条件下富氧技术的实施效果出现明显差异。单长冬等^[12]在全精粉烧结体系中的对比实验表明,相比于富氧率提升至 25% 的条件,未富氧工况下的烧结速度、成品率等综合指标更具优势。刘杰等^[13]通过超高料层双层烧结实验证实,富氧操作可显著强化烧结过程,将烧结矿转鼓强度提升 7.73%,成品率增加约 4.11%。余雪峰等^[14]的研究也表明富氧技术的实施有利于优化烧结工

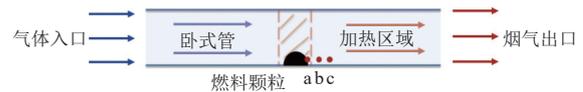
序,其认为富氧鼓风技术是重要的烧结 CO 减排控制方法,能够有效降低 CO 排放。值得注意的是,张亚鹏等^[15]通过富氧实验发现,富氧开始时,CO 浓度出现跃升,在前中期进行较高浓度的富氧,能够改善烧结矿低温还原粉化指数,改善烧结矿冶金性能。这些研究成果表明,富氧技术的应用效果存在工艺条件敏感性,且烧结过程富氧技术对于烧结过程的影响机理尚不明确。由于富氧技术在烧结过程中的应用涉及复杂的物理化学变化,包括燃烧效率、温度分布、矿物相变等多个方面。烧结杯实验方法虽然能够模拟实际烧结过程,但是基于该实验特点,需要较长的准备和实验时间,难以快速获取大量数据;其次,实验过程中涉及多个变量(如 O₂ 浓度、燃料配比、烧结温度等),这些变量之间的相互作用复杂,难以精确控制;最后,烧结杯实验的规模较小,难以完全反映实际工业生产中的复杂条件^[16-18]。因此,采用数值模拟方法对燃料颗粒及烧结过程中的燃烧行为进行深入研究,能够有效克服传统实验方法的局限性,为揭示富氧技术对烧结过程的影响机制提供更为精确的理论依据。通过数值模拟,可以系统分析不同 O₂ 浓度、燃料特性及烧结工艺参数对燃烧效率、温度场分布及气体排放(尤其是 CO 排放)的影响规律,从而明确富氧技术在降低 CO 排放、提高燃烧效率及优化烧结工艺方面的潜力。这种研究方法不仅能够显著缩短研究周期,还能实现多变量条件的精确控制,为烧结过程的绿色化和高效化提供重要的理论参考依据,同时为实际工业生产中的工艺优化和节能减排提供指导^[19-23]。

本研究旨在通过计算流体力学(CFD)数值模拟,探究富氧技术对烧结过程中 CO 排放的影响机制。通过构建燃料颗粒燃烧及烧结过程的数学模型,模拟不同氧气浓度条件下的燃烧过程,分析富氧对烧结过程燃烧效率以及 CO 排放的影响,为富氧技术在烧结过程中的优化应用提供理论依据。

1 模型及方法

1.1 模型结构及特点

本研究包含 2 种计算模型,对比分析单颗粒燃料燃烧与烧结料床内部燃料燃烧行为差异。首先建立燃料单颗粒燃烧模型,如图 1 所示,燃料颗粒直径为 20 mm,入口处气体流速为 0.3 m/s,基准模型中气体成分为空气,不同计算案例中 O₂ 和 N₂ 浓度见表 1。



注: a、b、c 为烟气监测点。

图 1 燃料颗粒模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fuel particle model

表 1 气体入口处气相成分

Table 1 Gas phase composition at gas inlet %

组别	O ₂ 浓度	N ₂ 浓度
①	21	79
②	30	70
③	40	60

烧结机模型结构如图 2 所示,该模型以点火及保温系统、烧结机机身、负压系统及烟气监测作为主要组成部分。在点火阶段,系统设定点火区域入口处气体温度为 1 373 K,负压维持在 8 kPa。进入保温阶段后,入口处气体温度调整至 1 100 K,负压提升至 14 kPa。烧结机机身部分设计为绝热容器,具体尺寸为高度 920 mm、长度 65 m。此外,该模型监测烧结机底部的烟气出口情况,以便实现烧结过程烟气成分的实时采集。

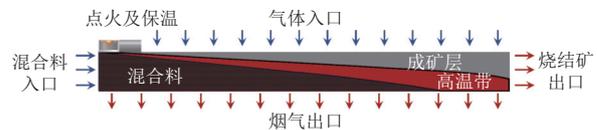


图 2 烧结机模型示意图

Fig. 2 Sintering machine model diagram

烧结混合物主要为含铁原料、燃料、二氧化硅以及碳酸盐组分,其具体成分及详细配比见表 2。烧结混合物设定为平均粒径 3 mm 的颗粒。在不同的算例中,烧结气氛中的氧含量呈现等比例增大,具体烧结气体成分情况见表 3。

表 2 原料化学成分

Table 2 Chemical composition of raw materials

化学成分	质量分数/%
C	4.0
H ₂ O	8.0
SiO ₂	5.3
Al ₂ O ₃	2.7
MgO	2.5
Fe ₂ O ₃	54.0
Fe ₃ O ₄	9.0
CaCO ₃	14.5

表3 烧结气体入口处气相成分
Table 3 Gas phase composition at sintering

组别	gas inlet	
	O ₂ 浓度	N ₂ 浓度
①	21	79
②	23	77
③	25	75
④	27	73
⑤	29	71
⑥	31	69

1.2 计算模型

1.2.1 基本假设条件

考虑烧结过程中具备显著的一维特征,对本次计算中的烧结机模型进行了如下假设:

(1)气体流动与相互作用:受负压驱动,烧结气体从入口抽入烧结材料层,持续向下流动。考虑烧结过程中气固反应的复杂性,采用欧拉-欧拉多相流模型进行计算,其中气固两相为可相互作用

用的连续介质。

(2)氧化反应与氧气充足性:烧结过程被视为整体氧化反应,其中气相氧含量始终保持充足。基于前人研究,气固相反应中的燃料燃烧反应在本模型计算过程中设定为C-CO-CO₂的二次燃烧过程。

(3)守恒原则:计算过程严格遵循物质与能量守恒原则,以确保模拟结果的稳定性及准确性。

(4)简化因素:模型忽略了实际生产中的烧结漏风现象及烧结料床的收缩效应。

(5)热量传输行为:模型主要考虑由于物理化学反应引起的固相内部热传导及气相与固相间的热交换,将热辐射的影响视为次要因素并予以忽略。

1.2.2 化学反应子模型

烧结过程涉及复杂的气固相化学反应以及气相均质化学反应,基于前人研究,本模型计算过程中涉及的化学反应以及反应速率的具体表达式见表4。

表4 化学反应及反应速率^[24-30]

Table 4 Chemical reaction and reaction rate^[24-30]

化学反应方程式	化学反应速率/(mol·(m ³ ·s) ⁻¹)	注释
2CO(g) + O ₂ (g) = 2CO ₂ (g)	$1.3 \times 10^8 C_{O_2}^{0.5} C_{CO}^{0.5} C_{CO} \exp\left(-\frac{15100}{T_g}\right)$	C _i : 气体浓度, kmol/m ³
2C(s) + O ₂ (g) = 2CO(g)	$\pi d_c^2 n_c^2 C_{O_2} / (k_c^{-1} + k_{ash}^{-1} + k_m^{-1})$	C _i [*] : 气体反应平衡浓度, kmol/m ³
C(s) + CO ₂ (g) = 2CO(g)	$7.5 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{46500}{T_g}\right) C_{CO_2}$	r ₀ : 初始半径, m
CaCO ₃ (s) = CaO(s) + CO ₂ (g)	$1.67 \times 10^7 \exp\left(-\frac{1.9067 \times 10^5}{8.314T_s}\right) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{0.4043}$	r: 当量颗粒半径, m
H ₂ O(l) ⇌ H ₂ O(g)	$\frac{A_s K_{g,H_2O}}{8.314T_g} (P_{saturation} - P_{H_2O})$	T _g : 气相温度, K
3Fe ₂ O ₃ (s) + CO(g) = 2Fe ₃ O ₄ (s) + CO ₂ (g)	$\exp\left(7.255 + \frac{3720}{T_s}\right)$	M _i : 第i气固反应中气态物质的摩尔质量, kg/mol
Fe ₃ O ₄ (s) + CO(g) = 3FeO(s) + CO ₂ (g)	$\exp\left(5.289 - \frac{4711}{T_s}\right)$	T _s : 固相温度, K
FeO(s) + CO(g) = Fe(s) + CO ₂ (g)	$\exp\left(-3.127 - \frac{2879}{T_s}\right)$	n: 每单位体积的粒子数
4Fe ₃ O ₄ (s) + O ₂ (g) = 6Fe ₂ O ₃ (s)	$\frac{n_{Fe_3O_4} 4\pi r_0^2 (C_{O_2} - C_{O_2}^*)}{\frac{1}{k_{O_2}} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 + \frac{r_0(r_0-r)}{r D_{eff,O_2}} + \frac{1}{K_{g,O_2}}}$	d _c : 燃料颗粒直径, m

1.3 边界条件

燃料颗粒燃烧模型中,燃料所在区域以1273K温度进行加热,使燃料发生燃烧,点火时间持续30s。表5为烧结机模型的边界条件及初始化设

定,本模型基于国内某钢铁企业烧结机实际运行参数建立,模型中烧结混合料入口及烧结气体入口为速度入口,而烧结烟气出口设定为压力出口,烧结料层内部气体流速及烧结气体出口处的气相

速率受料床温度、抽风负压及料层内部孔隙率影响。根据生产实际情况,烧结矿出口设定为速度出口,且烧结机速为固定值。此外,烧结机壁面设置为理想绝热壁面条件,在计算过程中,不与外界发生质量传递及热量的损耗。

表 5 模型边界条件和初始化条件
Table 5 Model boundary conditions and initialization conditions

参数	单位	数值
料层厚度	mm	920
点火温度	K	1 373
保温温度	K	1 100
点火负压	kPa	8
保温负压	kPa	14
烧结负压	kPa	14
烧结机速	m/min	1.8
混合料平均粒径	mm	3

1.4 求解方法

求解模型的过程中,利用 FLUENT(2021R1) 软件计算并求解气-固连续相方程和能量守恒方程。初始条件、边界条件、气流阻力、热交换效率和化学反应速率由 C 语言(UDF)用户自定义,并使用 SIMPLE 算法计算速度场和压力场的耦合。

2 结果与讨论

2.1 O₂ 浓度对燃料颗粒燃烧行为的影响

基于燃料颗粒模型计算过程中 3 个关键监测点(a、b、c)CO 及 CO₂ 浓度的监测,分析了不同 O₂ 浓度条件下燃料颗粒的燃烧行为及其气体产物的排放特性,结果如图 3、4 所示。燃料颗粒边界处监测点 a 的 CO 浓度较高,这是由于气固反应消耗了固相边界附近的 O₂,同时新生成的 CO 未能及时与 O₂ 发生二次氧化反应,从而在颗粒边缘积聚。随着监测位置向远离颗粒的方向移动,CO 与 O₂ 的二次燃烧反应逐渐增强,同时,燃烧气体产物与卧式管内气体的混合更为充分,CO 浓度呈现出下降趋势。

通过监测 CO₂ 浓度变化发现,其浓度随监测点位置变化趋势与 CO 不同。从颗粒边界向外,由于 CO 与 O₂ 的充分二次燃烧,CO₂ 浓度先在监测点 b 显著上升,随后在监测点 c 因气相流动导致的稀释效应而有所下降。

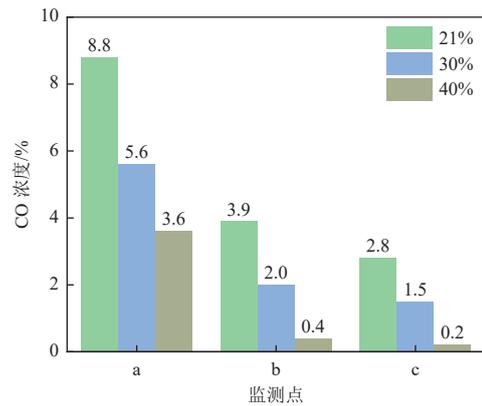


图 3 O₂ 浓度对颗粒燃烧烟气中 CO 浓度的影响
Fig. 3 Effect of oxygen concentration on CO concentration in the particle burn flue gas

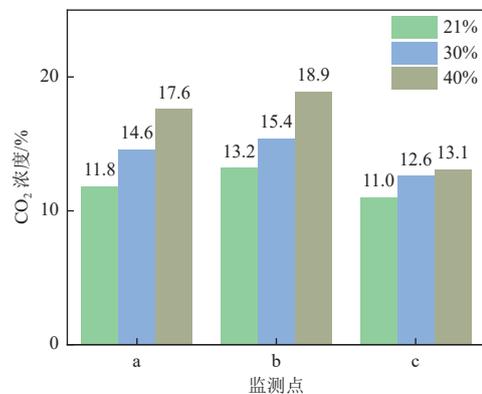


图 4 O₂ 浓度对颗粒燃烧烟气中 CO₂ 浓度的影响
Fig. 4 Effect of oxygen concentration on CO₂ concentration in the particle burn flue gas

进一步对比单一监测点在不同 O₂ 浓度下的气相组成,结果显示,随着气相中 O₂ 含量增加,CO 占比显著减少,而 CO₂ 生成量提升。这表明氧势的提升有效改善了燃料的完全燃烧条件,促进了燃烧过程的进行,同时也加剧了二次燃烧反应。

2.2 O₂ 浓度对燃料颗粒燃烧效率的影响

如图 5 所示,随着气相中 O₂ 浓度的逐步增加,燃料颗粒的燃烧反应更加剧烈,燃烧速率加快,且二次燃烧过程得到了显著优化。这一现象反映了 O₂ 浓度对于颗粒燃烧反应动力学的重要影响,其浓度的提升促进了燃料与 O₂ 之间的有效接触,从而加速了燃烧反应的进行。基于本模型计算结果,O₂ 浓度的提升与燃烧效率的升高之间呈正相关。对于单颗粒燃料的燃烧情况而言,卧式管内 O₂ 含量充足,当浓度增加时,燃烧反应更为迅速且完全,燃料得到更充分的利用,该条件减少了未完全燃烧产物 CO 的生成,有效提高了燃料颗粒燃烧效率。

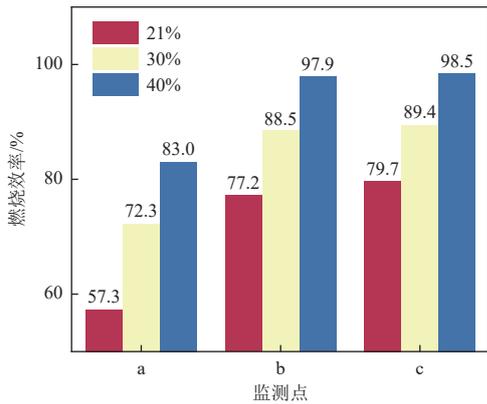
图5 O₂浓度对燃料颗粒燃烧效率的影响

Fig. 5 Effect of oxygen concentration on combustion efficiency of fuel particles

2.3 O₂浓度对烧结料层最高温度的影响

如图6所示,随着气相中O₂含量的不断提升,燃料的燃点呈现显著的下降趋势。当烧结气体入口气相中O₂浓度增至23%时,料层内部的O₂含量随之上升,燃烧速率加快。然而,在此条件下,燃料燃烧反应速率提升,O₂消耗量增大,导致料层内二次反应的气体条件恶化,燃料的不完全燃烧比例随之提升,进而影响了烧结过程中的最高温度,使烧结料层温度由1612 K降低至1603 K。

随着O₂浓度的进一步增大,燃料的燃烧过程逐渐趋于充分,完全燃烧的比例也逐步提升,燃料在燃烧过程中释放的热量显著增加,进而促使料层温度得到提升,当O₂浓度增大至31%时,烧结料层最高温度上升至1667 K。

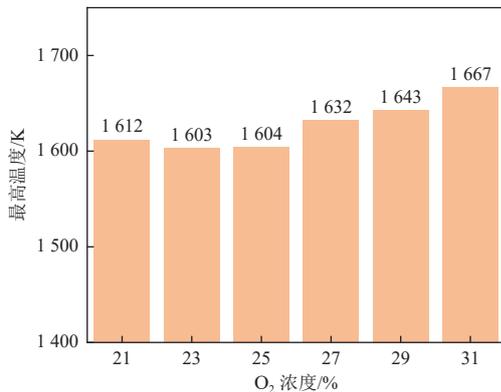
图6 O₂浓度对烧结料床最高温度的影响

Fig. 6 Effect of oxygen concentration on maximum temperature of sinter bed

基于以上研究可知,烧结料床内的燃烧过程与单颗粒燃料燃烧具有较大差异,烧结料床内部涉及较为复杂的热质传输行为,燃料燃烧同时受

到料层传热及O₂浓度的影响,O₂浓度提升会导致燃料着火点降低,进而增大不完全燃烧对于O₂的消耗量。在O₂浓度提升幅度较小时,燃料不完全燃烧比例升高,烧结温度降低,随着浓度进一步增大,燃料完全燃烧占比提高,料床烧结温度提升。

2.4 O₂浓度对烧结料床燃烧效率的影响

进一步探究O₂浓度对烧结料床燃烧效率的影响,如图7、8所示。与烧结料床最高温度变化趋势相一致,当O₂浓度小幅度上升时,燃料燃烧速率提高,O₂消耗速率随之增加,导致燃料的不完全燃烧比例提升,进而使得燃烧产物中CO的浓度提升。当O₂浓度为23%时,燃烧效率由空气条件下的94.6%降低至94.4%。

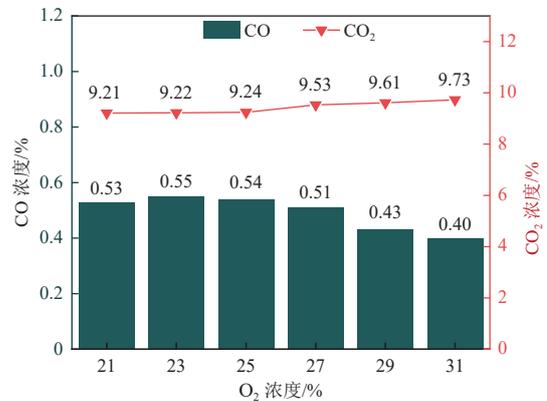
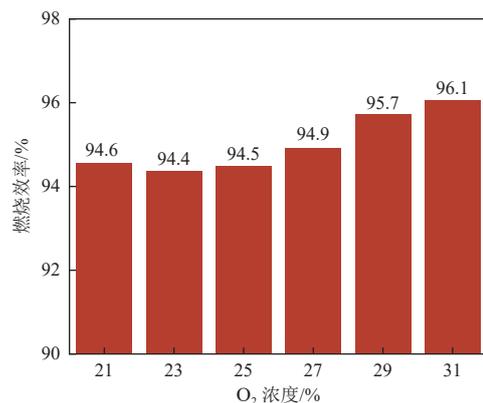
图7 O₂浓度对烧结烟气中CO、CO₂体积分数的影响Fig. 7 Effect of oxygen concentration on the volume fraction of CO and CO₂ in sintering flue gas图8 O₂浓度对燃烧效率的影响

Fig. 8 Effect of oxygen concentration on combustion efficiency

随着O₂浓度的进一步增大,二次燃烧的动力学条件得到了显著改善。O₂浓度的提升以及料层温度的升高共同促进了CO的二次氧化,使得CO₂的浓度逐渐升高。同时,燃料的完全燃烧占比也

随之提高,燃烧效率得到了显著增大,当 O_2 浓度提高至31%时,燃料燃烧效率达到96.1%。

3 结 论

本研究通过建立燃料颗粒燃烧模型及烧结机模型,研究了 O_2 浓度对于燃料颗粒燃烧及烧结料床燃烧过程的影响。

(1)对于燃料颗粒燃烧条件, O_2 浓度的提升有效改善了燃料的完全燃烧条件,促进了燃烧过程的进行,同时也加剧了CO的二次氧化燃烧反应,提升燃料燃烧效率,降低CO排放量。

(2)烧结料床内部燃料燃烧同时受到料层传热及 O_2 浓度的影响, O_2 浓度提升会导致燃料着火点降低,进而增大不完全燃烧对 O_2 的消耗量。

(3)在 O_2 浓度由23%提升至27%时,燃料不完全燃烧比例升高,烧结温度降低,燃烧产物中CO的浓度出现提升,燃烧效率降低。

(4)当 O_2 浓度提高至27%以上, O_2 浓度的提升以及料层温度的升高共同优化CO二次燃烧条件,燃料燃烧效率得到优化。

参考文献 (References):

- [1] 王兰英. 钢铁行业大气污染治理科技发展分析与展望 [J]. 能源环境保护, 2024, 38(3): 65-73.
WANG Lanying. Analysis and prospects of air pollution control techniques in the iron and steel industry[J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(3): 65-73.
- [2] 张建良, 王琪, 刘陈新, 等. 钢渣比对钒钛磁铁矿烧结质量的影响研究 [J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(5): 123-129.
ZHANG Jianliang, WANG Qi, LIU Chenxin, et al. Effect of steel slag ratio on the sintering of vanadium-titanium magnetite ore[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(5): 123-129.
- [3] MOHAMMAD S, PATRA S, HARICHANDAN B. Reductants in iron ore sintering: A critical review[J]. Fuel, 2023, 332: 126194.
- [4] HSIEH L H, WHITEMAN JA. Sintering conditions for simulating the formation of mineral phases in industrial iron ore sinter[J]. ISIJ International, 1989, 29(1): 24-32.
- [5] FERNÁNDEZ GONZÁLEZ D, RUIZ BUSTINZA I, MOCHÓN J, et al. Iron ore sintering: Process[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2017, 38(4): 215-227.
- [6] LI Zhen, WANG Yaozu, ZHANG Jianliang, et al. Numerical simulation of CO generation and combustion efficiency in sintering process: Effect of solid fuel particle size[J]. Steel Research International, 2025, 96(1): 2400094.
- [7] LIU Zhengjian, LI Zhen, WANG Yaozu, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer behavior during iron ore sintering: A review[J]. Metals, 2023, 13(7): 1277.
- [8] 龙红明, 丁龙, 赵贺喜, 等. 典型钢铁生产流程烟气中CO减排研究进展 [J]. 钢铁, 2023, 58(8): 1-12+24.
LONG Hongming, DING Long, ZHAO Hexi, et al. Research progress of CO removal in flue gas of typical steel production process[J]. Iron & Steel, 2023, 58(8): 1-12+24.
- [9] KANG H, CHOI S, YANG W, et al. Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2011, 51(7): 1065-1071.
- [10] WANG Yaozu, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, et al. Study of stand-support sintering to achieve high oxygen potential in iron ore sintering to enhance productivity and reduce CO content in exhaust gas[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119855.
- [11] ZHANG Jun, GUO Xingmin, HUANG Xuejun. Effects of temperature and atmosphere on sintering process of iron ores[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(10): 1-6.
- [12] 单长冬, 张建良, 王耀祖, 等. 富氧条件下高粉配比对烧结指标及冶金性能的影响 [J]. 钢铁, 2023, 58(1): 22-30.
SHAN Changdong, ZHANG Jianliang, WANG Yaozu, et al. Effect of high magnetite concentrates ratio on sintering index and metallurgical properties under oxygen-enriched conditions[J]. Iron & Steel, 2023, 58(1): 22-30.
- [13] 刘杰, 周明顺, 刘会波, 等. 超高料层双层烧结富氧强化及烟气排放行为研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(3): 851-859.
LIU Jie, ZHOU Mingshun, LIU Huibo, et al. Study of flue gas emission behavior and oxygen-enriched intensification of double-layer sintering with ultra-high bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3): 851-859.
- [14] 余雪峰, 钟庭梁, 王延江, 等. 烧结过程一氧化碳减排机理及技术分析 [J]. 河北冶金, 2024(10): 71-79.
SHE Xuefeng, ZHONG Tingliang, WANG Yanjiang, et al. Mechanism and technical analysis of carbon monoxide emission reduction in sintering process[J]. Hebei Metallurgy, 2024(10): 71-79.
- [15] 张亚鹏, 季斌, 张晓臣, 等. 富氧对烧结过程和烧结矿质量的影响 [C]//第十三届中国钢铁年会论文集——2. 炼铁与原燃料. 重庆: 中国金属学会, 2022: 193-197.
ZHANG Yapeng, JI Bin, ZHANG Xiaochen, et al. Effect of oxygen enrichment on sintering process and quality of sinter[C]//Proceedings of the 13th China Iron and Steel Annual Conference—2. Iron making and raw fuel. Chongqing: Chinese Society of Metals, 2022: 193-197.
- [16] 吴宏亮, 罗云飞, 周江虹, 等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1179-1188.

- WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(4): 1179–1188.
- [17] 倪文杰, 邹宗树, 李海峰, 等. 烟气循环烧结工艺中富氧和焦炉煤气喷吹的优化 [J]. *材料与冶金学报*, 2019, 18(1): 1–6.
- NI Wenjie, ZOU Zongshu, LI Haifeng, et al. Process optimization of oxygen enrichment and coke oven gas injection in iron ore sintering with flue gas recirculation[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2019, 18(1): 1–6.
- [18] 孙有宏. 从富氧烧结中探讨流量调节的原理及设计 [J]. *甘肃冶金*, 2013, 35(2): 13–16.
- SUN Youhong. Principle and design of flow regulation in oxygen-enriched sintering program[J]. *Gansu Metallurgy*, 2013, 35(2): 13–16.
- [19] ZHOU Hao, ZHOU Mingxi, CHENG Ming, et al. Experimental study and X-ray microtomography based CFD simulation for the characterization of pressure drop in sinter bed[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 811–819.
- [20] LI Sida, ZHANG Jianliang, WANG Yaozu, et al. Migration and reaction mechanism of barium in $\text{BaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ system during sintering[J]. *Steel Research International*, 2023, 94(10): 2200926.
- [21] WANG Yaozu, ZHANG Jianliang, CHENG Qiang, et al. Interface interaction between SiO_2 and magnetite under high temperature: Particle migration and inhibition mechanism[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(3): 561–572.
- [22] LIU Zhengjian, LI Zhen, ZHANG Jianliang, et al. Rapid, non-destructive identification of iron ores-based random forest (RF) using visible and near-infrared spectroscopy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55(4): 2591–2600.
- [23] NIU Lele, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, et al. Mineralogical properties and co-sintering characteristics of fluxed iron ore with magnetite concentrates[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(2): 318–328.
- [24] WANG Gan, WEN Zhi, LOU Guofeng, et al. Mathematical modeling of and parametric studies on flue gas recirculation iron ore sintering[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 648–660.
- [25] CAI Jin, KONG Xiangwei, CHENG Liu, et al. Mathematical modeling and characteristics evaluation of coke replacing with commercial biochar in iron ore sintering process[J]. *Fuel*, 2024, 377: 132820.
- [26] CHEN Jinchao, KANG Zengxin, WU Zhaoxia. Three-dimensional transient model analyses the influence of coke size on the evolution characteristics of iron sintering temperature field[J]. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 2024: 03019233241275063.
- [27] WU Yufeng, GAN Min, JI Zhiyun, et al. New approach to improve heat energy utilization efficiency in iron ore sintering: Exploration of surface fuel addition[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 190: 125–137.
- [28] LI Chaoqun, QIN Shuai, WANG Xue, et al. Reduction of carbon emission in iron sintering process based on hot air sintering technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 471: 143403.
- [29] ZHOU Hao, ZHAO Jiawei, LOO C E, et al. Numerical modeling of the iron ore sintering process[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(9): 1550–1558.
- [30] DE MORAIS OLIVEIRA V, DE RESENDE V G, DOMINGUES A L A, et al. Alternative to deal with high level of fine materials in iron ore sintering process[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4985–4994.