

钒钛磁铁矿球团煤基还原颗粒运动及煤粉喷射燃烧数值模拟

刘鹏^{1,2}, 宇文超^{1,2}, 龚斯宇^{1,2}, 刘秉国^{1,2*}, 张利波^{1,2}, 彭金辉^{1,2}

(1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学非常规冶金省部共建教育部重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要:开展了回转窑内钒钛磁铁矿球团煤基还原颗粒运动及煤粉喷射燃烧数值模拟研究。结果表明, 回转窑内三种颗粒在运动过程中存在分层现象和离散料堆现象。离散料堆现象导致了颗粒数轴向周期性波动分布, 并结合反应焓变推导出了单个周期内的平均波动能量为 $\bar{E} = 25.58$ MJ; 煤粉喷射燃烧过程中燃料射流在重力作用下会形成反弹效果, 作用区间长度约 2 m, 该区域内传质传热过程被强化, 易出现局部过热现象, 可通过附着配碳和外配碳球团混合配碳的方式削弱能量波动与局部过热, 矿石颗粒的附着配碳量约为 18.9 g/kg。

关键词:钒钛磁铁矿; 回转窑; 还原; 数值模拟; 颗粒运动; 煤粉喷射燃烧

中图分类号: TF55, TF046 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)04-0097-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Simulation on particle movement and pulverized coal jet combustion of titano-magnetite pellets during the reduction with coal in rotary kiln

Liu Peng^{1,2}, Yu Wenchao^{1,2}, Gong Siyu^{1,2}, Liu Bingguo^{1,2*}, Zhang Libo^{1,2}, Peng Jinhui^{1,2}

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Intensification Metallurgy, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: In this paper, the numerical simulation of on particle movement and pulverized coal injection combustion during the coal-based reduction of titano-magnetite pellets in rotary kiln was carried out. The results show that there were delamination phenomenon and discrete pile phenomenon in the movement process of three kinds of particles in rotary kiln. The discrete particle piles led to the axial periodic fluctuation distribution of particle number. Combined with the change of reaction enthalpy, the average fluctuation energy in a single period was deduced as $\bar{E} = 25.58$ MJ; in the process of pulverized coal injection combustion, the fuel jet would form a rebound effect under the action of gravity, and the length of the action zone was about 2 m. The mass and heat transfer process in this zone was strengthened, and the local overheating phenomenon was readily to occur. The energy fluctuation and local overheating could be reduced by the way of attaching carbon with coal powder on the surface of ore pellets and mixing carbon with external coal pellets. The amount of carbon distribution by adhering to ore particles is about 18.9 g/kg.

Key words: titanomagnetite, rotary kiln, reduction, simulation, particle movement, pulverized coal jet combustion

收稿日期: 2021-05-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1900500)。

作者简介: 刘鹏(1989-), 男, 辽宁葫芦岛人, 博士在读, 研究方向: 钒钛磁铁矿非高炉冶炼技术, E-mail: 786538903@qq.com;

*通讯作者: 刘秉国, 教授, 博士, 电话: 0871-5191046, E-mail: bingoliu@126.com。

0 引言

钒钛磁铁矿是重要的战略资源^[1-5]。我国钒钛磁铁矿资源的利用至今主要围绕高炉法展开^[6-8],该工艺能大规模地实现铁的回收,却无法利用矿石中的钛资源^[9-10],形成的含钛高炉渣(二氧化钛品位在20%~25%)只能堆存处理,目前含钛高炉渣的累积量已达到7000万t以上,且每年有超过60万t的增量^[11],既浪费了资源,又对环境造成极大的污染^[12];此外高炉工艺严重依赖焦炭,而炼焦所需的优质煤资源有限,且炼焦工艺污染环境。为了实现我国碳中和的预期目标,研发能够实现铁、钒、钛等有色金属协同回收的非高炉冶炼工艺具有重要意义。

早在20世纪60年代末,新西兰钢铁公司就应用回转窑法进行钒钛磁铁矿直接还原处理,实现了回转窑法的工业化探索应用。我国自20世纪70年代末开始组织开展钒钛磁铁矿精矿非高炉直接还原流程攻关探索,围绕回转窑法、转底炉法、竖炉法、流化床法四种冶炼工艺进行研究,得到并分析了实际生产过程中相关工艺的顺行经验与主要障碍,这些工艺需要对防止再氧化、强化磁选分离等问题进行改进。具体来看,回转窑法易结圈;转底炉法存在低熔点物质炉底堆积的问题;竖炉法对球团强度依赖高,炉料一旦粉化粘结或膨胀堵塞都将对工艺顺

行产生影响;流化床法稳定性差,且极易再氧化。目前,尽管回转窑直接还原工艺越来越受到人们的重视^[13-17],但回转窑作为强耦合、大滞后复杂系统^[18-21],需要对回转窑内矿料颗粒运动规律和煤粉喷射燃烧状态开展研究,才能使生产过程顺利进行,消除不可控因素。

笔者针对回转窑内离散料堆引起能量波动以及煤粉喷射燃烧过程形成的局部过热等问题,通过颗粒运动及煤粉喷射燃烧模拟进行了研究,旨在为钒钛磁铁矿回转窑非高炉冶炼提供理论指导。

1 原料及方法

1.1 原料

钒钛磁铁矿精矿样品来自攀枝花某矿区,主要化学成分如表1所示,精矿粉末平均粒度100 μm,铁氧化物和钛氧化物含量之和超过80%,是钒钛磁铁矿中相互共生的主要物相。精矿粉末配2%膨润土、20%水,造球后干燥,所得球团粒径大约为15 mm;煤粉(固定碳:62.12%;挥发分:33.64%;灰分:4.29%)和熔剂(主要成分为CaO和CaCO₃)也需要造球,球团粒径分别为20 mm和10 mm左右。模拟过程生成球团时粒径取正态分布,煤粒球团占精矿球团的14.82%。

表1 钒钛磁铁矿精矿主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of titano-magnetite concentrate

%

Fe ₃ O ₄	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	Co ₃ S ₄	ZnS	CuS
68.51	13.41	5.00	6.77	4.45	1.17	0.29	0.16	0.15	0.050	0.019

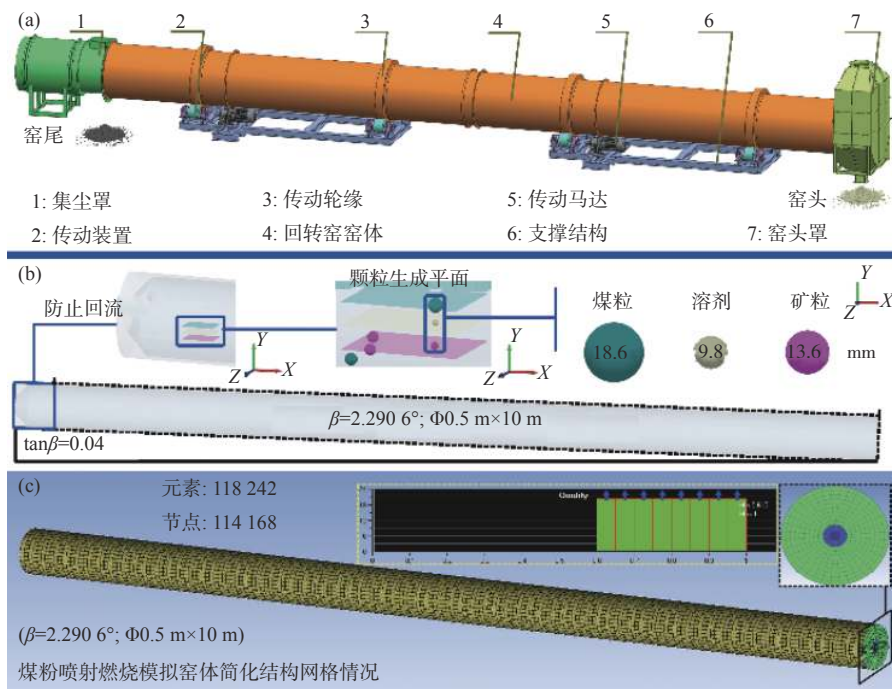
1.2 模拟方法

研究所用回转窑模型长径比(20:1)与实际生产的回转窑(如:广东广青金属科技有限公司)相同,尺寸则按1:10的比例缩小为Φ0.5 m×10 m,这种合理简化大大降低了模拟过程中的计算量(图1)。还原过程涉及到物料运动、煤粉喷射燃烧和化学反应三个方面,笔者基于EDEM离散元模拟软件对回转窑内矿料颗粒运动过程进行模拟;基于Fluent流体学模拟软件对煤粉喷射燃烧过程进行模拟;基于HSC热力学计算软件对还原过程中相关反应的焓变进行了分析。

对于颗粒运动模拟,颗粒生成参数(表2)按生产经验进行配置(配碳质量是铁氧化物质量的20%

左右),模拟过程中有熔剂、煤粒、矿石三种颗粒;回转窑以4 r/min的速度进行旋转;选择Hertz-Mindlin模型^[22]作为颗粒间、颗粒与回转窑模型内壁的接触模型;从第一个颗粒在窑尾生成开始,直到进料量和出料量相同时结束,整个模拟时长924 s,用时15 d(i9 7920X CPU)。

对于煤粉喷射燃烧模拟,煤粉燃料与空气混合,成分及喷射速度如表3、4所示;网格划分情况如图1c所示,整个回转窑窑体划分为118 242个结构型网格元素,共有114 168个节点;选择基于RNG(重整化群)的k-ε湍流模型和湍流混合快速燃烧反应模型^[23-24]对回转窑内空载煤粉喷射燃烧过程进行模拟。



(a) 回转窑结构; (b) 颗粒运动模拟简化结构; (c) 煤粉喷射燃烧模拟网格划分

图 1 回转窑的模拟简化结构

Fig. 1 Simplified simulation structure of rotary kiln

表 2 模拟过程(颗粒运动)中的颗粒生成参数

Table 2 Particle formation parameters used in simulation study (particle motion)

	实体密度 ρ /(g·cm ⁻³)	半径分布/mm	生成速率/(kg·s ⁻¹)	质量分数/%
煤粒	1.5	N(10,0.25)	0.206 2	11.42
熔剂	2.6	N(5,0.25)	0.146 1	11.50
矿粒	3.6	N(7.5,0.25)	1.208 3	77.08

注: N(10,0.25)表示模拟过程中颗粒半径按正态分布生成, 10 为半径平均值(单位: mm), 0.25为标准差。

表 3 模拟过程中(煤粉喷射燃烧)燃料参数

Table 3 Fuel parameters used in simulation study (pulverized coal injection combustion)

燃料空气混合物组成/%					工业分析/%			元素分析w/%			
煤粉	O ₂	CO ₂	H ₂ O	挥发分	C固	灰分	水分	C	H	O	N
20	18.4	0.1	0.1	10	75	10	5	90	5	4	1

注: 燃料热值为29.67 MJ/kg。

表 4 模拟过程中(煤粉喷射燃烧)燃料喷射速度

Table 4 Fuel injection velocity used in simulation study (pulverized coal injection combustion)

煤粉喷射速度/(m·s ⁻¹)	质量流动/(kg·s ⁻¹)
6	0.066 669 1
7	0.077 780 6
8	0.088 892 2
9	0.100 004
10	0.111 115

2 结果与讨论

2.1 颗粒运动模拟结果与反应焓波动分析

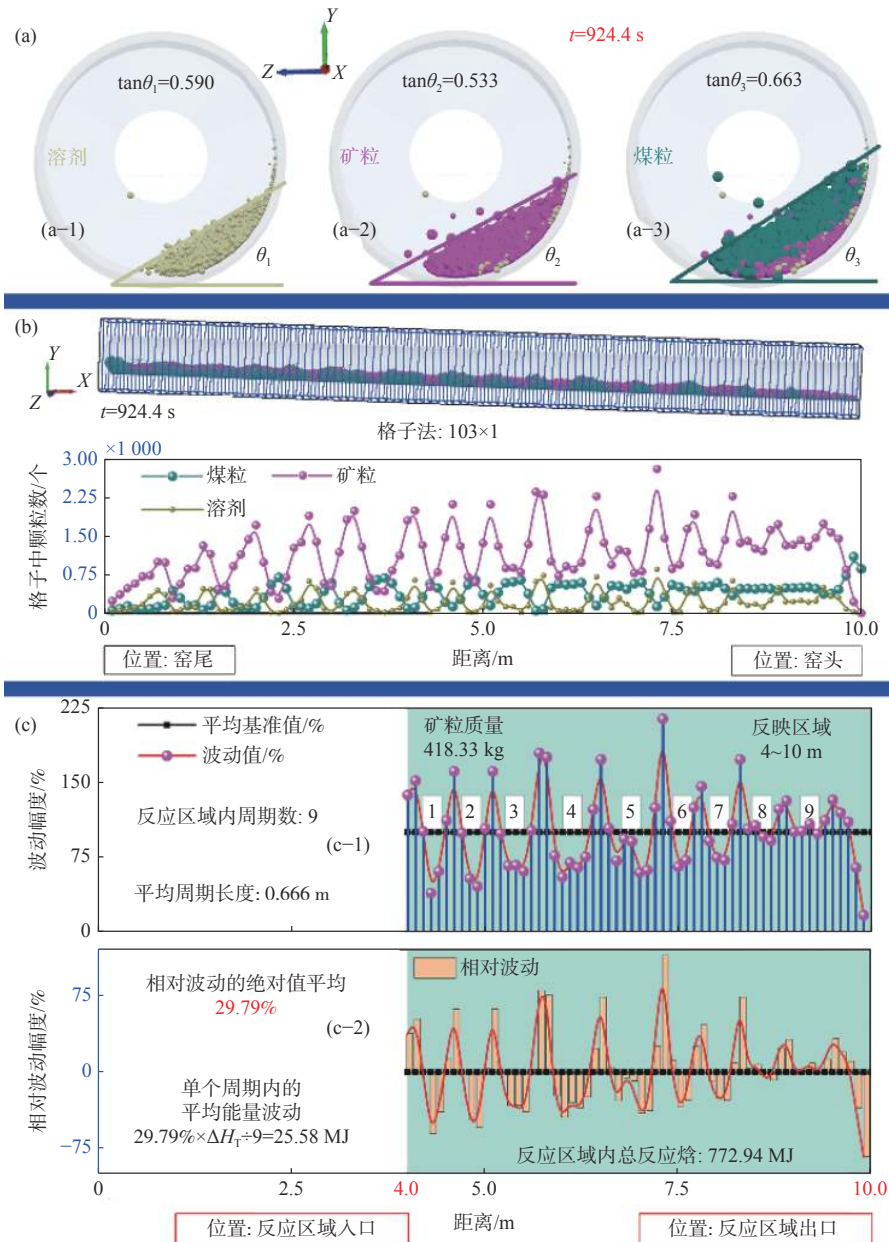
2.1.1 分层现象与离散料堆现象

回转窑内颗粒运动从模拟结果来看主要有两个特征: ①煤粒、熔剂、矿粒的分层现象; ②颗粒数轴向离散分布形成料堆。下面分别进行讨论。

分层现象是颗粒系统整体重力势能最小化的体现, 对比图 2a 可以看出: 熔剂颗粒处于下层, 这主要

由于其粒度最小;位于中层的矿石颗粒质量比(77.08%)最大,在颗粒运动过程中起主导作用;位于上层的煤粒密度最小。分层现象并没有排除颗粒混合,实际上,相关研究^[25]表明,如果不同种类的颗粒粒度、密度差异很小,则更倾向于不分层的完全混

合,所以准确来说,分层现象是密度粒度存在差异的三种颗粒在形成一定混合程度后所出现的降低整体机械能的纵向分布现象。每种颗粒主体所在层都形成了动态休止角,对应的正切值如图2a所示。



(a) 休止角计算与分层现象; (b) 反应区域内颗粒数轴向波动性分析; (c) 反应区域内反应热引起的能量轴向波动性分析

图2 颗粒运动模拟结果

Fig. 2 Simulation results of particle motion

每一个颗粒在回转窑中都要经历上升下降的周期性运动,但在下降后,并不是所有颗粒立即开始上升,而是形成了一个概率累积效果(料堆),这个累积效果可以增加颗粒上升过程的触发概率,最终建立

了料堆中的颗粒数动态平衡(颗粒下滑上升)。颗粒系统整体的运动模式就是通过这种料堆的形式实现的,离散式分布的料堆是颗粒运动的主要特征,并最终表现为颗粒系统整体的波动性(图2b)。相关研

究表明^[26], 实际的回转窑内物料颗粒运动存在离散料堆轴向周期性分布现象, 这也印证了本文中的模拟结果。

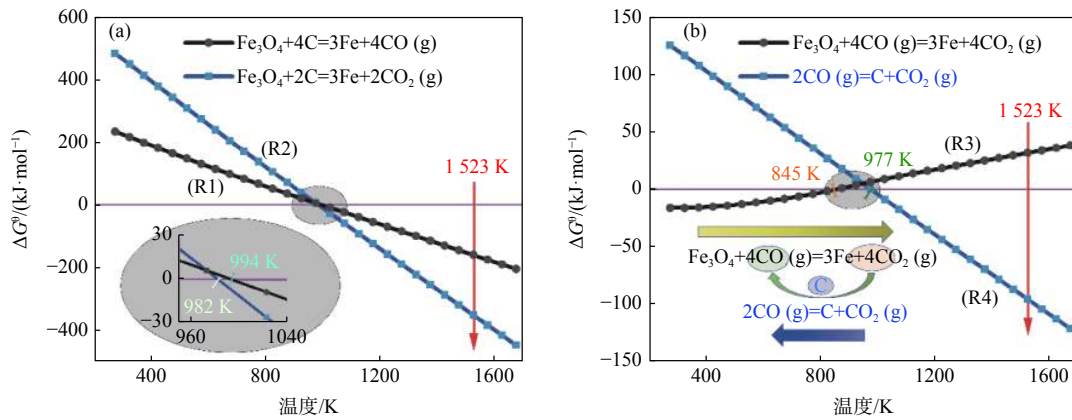
2.1.2 离散料堆与反应焓变引起的能量波动

反应区域的长度可以由公式 (1) 确定。其中, 依据模拟结果, 颗粒系统整体推进速度为 $v_{Axial}=0.01189\text{ m/s}$; 由文献^[27] 可知, 当反应温度为 1523 K 时, 在 500 s 内铁矿石的还原率可以达到 95% , 因此反应区域长度计算中, 反应时间取 $t_R=500\text{ s}$ 。如图 2c 所示, 回转窑模型内反应长度的计算结果约为 6 m 。

$$L = v_{Axial} \times t_R = 5.945\text{ m} \quad (1)$$

在合适的温度、合适的配碳量条件下, 钒钛磁铁矿还原过程中存在还原铁相的聚集和分离后 TiO_2 的逆向迁移, 其中钛的化合价不会发生变化, 且钛氧化物含量不到铁氧化物的 20% , 对热力学分析中反应焓变的影响有限。因此, 笔者在讨论钒钛磁铁矿还原反应焓变的计算时, 将其等量转化为 Fe_3O_4 以简化分析过程。

还原反应过程涉及煤粉的固相还原和煤粉气化后的气相还原见图 3。



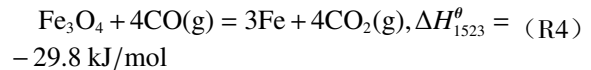
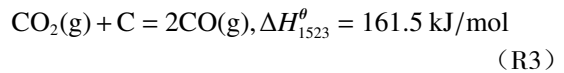
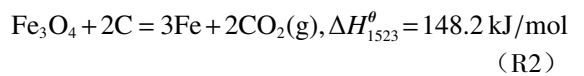
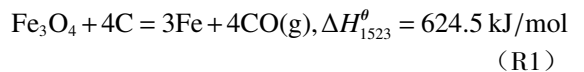
(a) 固相还原反应; (b) 间接气相还原反应

图 3 还原过程中相关反应的热力学分析

Fig. 3 Thermodynamic analysis of related reactions in reduction process

固相还原反应(R1 和 R2)受限于煤粉与矿石的接触界面, 矿石颗粒球团内部的铁氧化物需要煤粉颗粒气化后形成的 CO 气相还原剂进行还原^[28]。因此, 即便是固相还原剂参与的直接还原铁生产, 铁氧化物的气相还原也是主要还原过程。气相还原主要分为两个过程, 一个是煤粉气化生成 CO (R3), 另一个是铁氧化物的 CO 气相还原(R4)。由反应焓变的计算结果可知, 还原过程是吸热的。在分析气相还原过程的反应焓变时, 需要考虑 CO 气体随气流的逸出, 以固相还原为依据, 设置 CO 逸出系数为 $\gamma=53.05\%$, 从而计算了间接气相还原反应焓变 $\Delta H_{1523}^\theta(\text{IGR}) = 624.5\text{ kJ/mol}$ (公式 2), 进一步计算了 500 s 内反应区域中物料的总反应焓变 $\Delta H_{\text{Total}}^\theta = 773.101\text{ MJ}$ (公式 3); 依据颗粒运动模拟结果(图 2c), 反应区域内物料波动一共形成了 9 个完整周期, 平均周期长度为 0.666 m , 相对波动的绝对值平均为 29.79% 。这样, 单个周期内平均能量波动可由公式(4)计算得到($\bar{E} = 25.58\text{ MJ}$), 将该能量波动转换为标准煤当量, 结果如公式(5)所示, 即每千克矿石

由反应焓所形成的能量波动, 相当于 18.9 g 的标准煤燃烧产生的热量。



$$\Delta H_{1523}^\theta(\text{IGR}) = \Delta H_{1523}^\theta(\text{R3 \& R4}) / (1 - \gamma) = 624.5\text{ kJ/mol} \quad (2)$$

$$\Delta H_{\text{Total}}^\theta = \frac{418.33 \times 68.51\%}{231.533} \times 1000 \times 624.5 = 773.101\text{ MJ} \quad (3)$$

$$\bar{E} = \Delta H_{\text{Total}}^\theta \div 9 \times 29.79\% = 25.58\text{ MJ} \quad (4)$$

$$\bar{E}_{\text{标准煤}} = \frac{\Delta H_{\text{Total}}^\theta \times 29.79\% \times 1000^2}{418.33 \times 29307.6} = 18.9\text{ g/kg} \quad (5)$$

2.2 煤粉喷射燃烧模拟结果

2.2.1 温度场分布

回转窑的空载 (指煤粉喷射燃烧模拟过程中, 回转窑模型内无颗粒, 下同) 燃烧温度场分布模拟结果如图 4 所示。

从图 4 径向截面的温度场分布中可以看出, 煤粉燃料离开燃烧器喷嘴后快速燃烧, 在窑头附近形

成了高温区; 径向截面和左视图的高温区域在距窑头 2 m 处出现明显的下移, 之后高温区域上移, 这一现象产生的原因是燃料射流在重力的作用下出现了反弹效果; 从图 4 的左视图中可以看出温度场会随着燃料喷射速度的增大而向窑尾端推进; 需要指出的是, 喷射燃料的反弹效果会形成局部过热现象, 这会对钒钛磁铁矿还原过程产生不利影响。

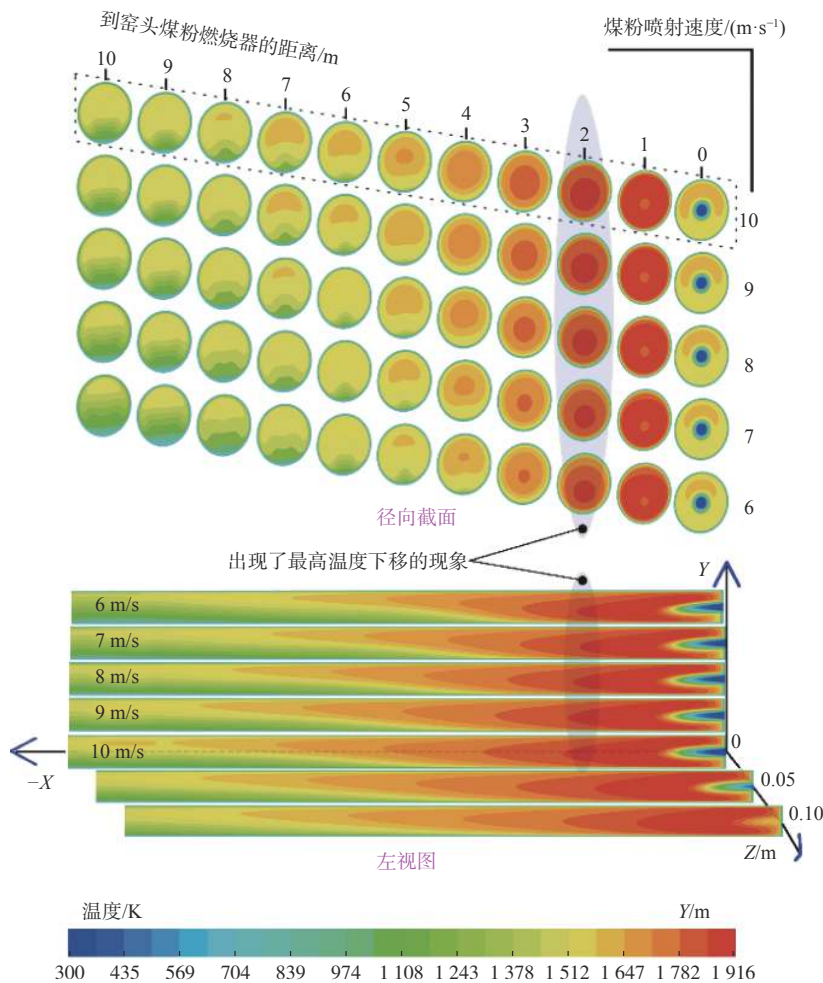


图 4 煤粉喷射燃烧温度场分布模拟结果(径向截面与左视图)

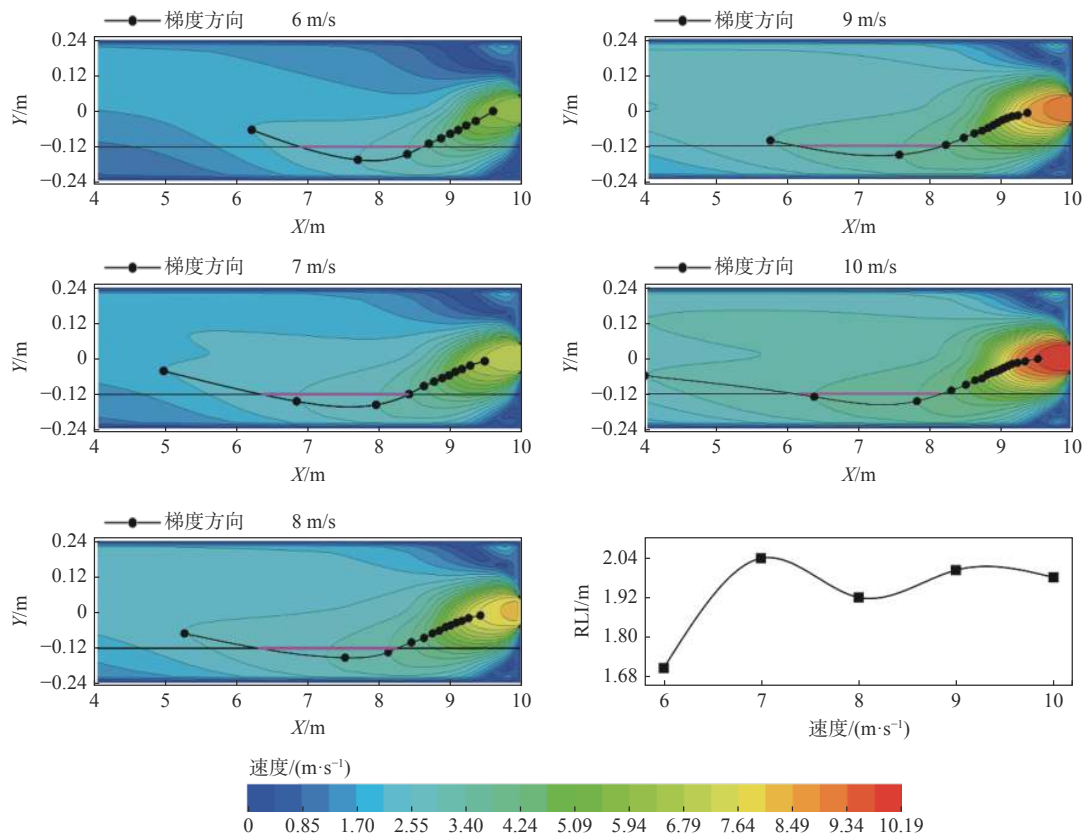
Fig. 4 Simulation results of temperature field distribution of pulverized coal injection combustion (radial section and left view)

2.2.2 速度场分布

回转窑的空载燃烧速度场分布模拟结果如图 5 所示。

图 5 中喷射燃料的速度场梯度变化描述了重力作用下的反弹效果, 不同燃料喷射速度(6 ~ 10 m/s)的反弹接触点都出现在距离窑头 2 ~ 3 m 处; 满负荷运行的回转窑内矿料填充度一般为 20%, 此时, 燃

料射流会在矿料表面形成一个反弹效果作用区间, 笔者记录了不同燃料喷射速度条件下反弹效果作用区间的长度(Rebound Length Index-RLI), 发现随着燃料喷射速度的增大, RLI 具有阻尼衰减的趋势, 最终该区间长度稳定在 2 m; 反弹效果作用区间内的传质、传热过程会被强化, 容易形成局部过热的现象, 从而导致该工艺的可控性降低。



反应区域内重力作用下燃料射流的反弹效果

图 5 煤粉喷射燃烧速度场分布模拟结果(反弹长度指数-RLI)

Fig. 5 Simulation results of velocity field distribution of pulverized coal injection combustion (Rebound Length Index-RLI)

3 结论

对钒钛磁铁矿回转窑法直接还原铁生产工艺中矿料球团的运动和煤粉喷射燃烧过程进行了模拟研究。主要结论如下:

1) 颗粒炉料在回转窑内存在分层现象和离散料堆现象, 其中离散料堆现象是颗粒运动过程中的主要特征。

2) 在反应区域内由离散料堆分布波动和吸热还原反应焓变引起的单个周期的能量波动值为 $\bar{E}=25.58$ MJ。

3) 煤粉喷射燃烧存在燃料射流反弹现象, 反弹区域长度约为 2 m, 该区域内传质传热过程被强化,

会引发局部过热。

4) 煤粉喷射燃烧利用煤粒处于上层的分层现象和离散料堆运动特征, 可以通过附着配碳和外配碳球团混合配碳的方式削弱能量波动和局部过热, 矿石颗粒的附着配碳量约为 18.9 g/kg。

5) 颗粒系统运动过程中所形成的波动性离散料堆现象及其研究结果丰富了回转窑法钒钛磁铁矿直接还原铁生产工艺的顺行控制参考依据, 削弱能量波动及局部过热的混合配碳方式有利于该工艺的稳定运行与智能化控制。下一步可以考虑设计微波回转窑处理钒钛磁铁矿, 以实现利用微波原位加热效果提高能量利用率、减少杂质引入、减少 CO₂ 排放, 并消除能量波动现象。

参考文献

[1] Guo X, Dai S, Wang Q. Influence of different comminution flowsheets on the separation of vanadium titano-magnetite[J]. Minerals Engineering, 2020, 149: 106–177.
 [2] Chen J, Chen W, Mi L, et al. Kinetic studies on gas-based reduction of V anadium titano-magnetite pellet[J]. Metals, 2019, 9: 145–158.
 [3] Hu T, Lv X, Bai C, et al. Reduction behavior of Panzhihua titanomagnetite concentrates with coal[J]. Metallurgical and

- Materials Transactions B, 2013, 44B: 252–260.
- [4] Jiang T, Yu Z, Peng Z, *et al.* Preparation of BF burden from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process (CAP)[J]. *ISIJ International*, 2015, 55: 1599–1607.
- [5] Jiang T, Wang S, Guo Y, *et al.* Effects of basicity and MgO in slag on the behaviors of smelting vanadium titanomagnetite in the direct reduction-electric furnace process[J]. *Metals*, 2016, 6: 1–10.
- [6] Fu W, Wen Y, Xie H. Development of intensified technologies of vanadium-bearing titanomagnetite smelting[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18: 7–10.
- [7] Wang S, Guo Y, Jiang T, *et al.* Behavior of titanium during the smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets in an electric furnace[J]. *JOM*, 2019, 71: 323–328.
- [8] Gan M, Sun Y, Fan X, *et al.* Preparing high-quality vanadium titano-magnetite pellets for large-scale blast furnaces as ironmaking burden[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2018, 139: 149–158.
- [9] Zeng R, Li W, Wang N, *et al.* Influence and mechanism of CaO on the oxidation induration of Hongge vanadium titanomagnetite pellets[J]. *ISIJ International*, 2020, 142: 1–10.
- [10] Hu T, Lv X, Bai C, *et al.* Carbothermic reduction of titanomagnetite concentrates with ferrosilicon addition[J]. *ISIJ International*, 2013, 53: 557–563.
- [11] Liu P, Zhang L, Liu B, *et al.* Determination of dielectric properties of titanium carbide fabricated by microwave synthesis with Ti-bearing blast furnace slag[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28: 88–91.
- [12] Yang J, Tang Y, Yang K, *et al.* Leaching characteristics of vanadium in mine tailings and soils near a vanadium titanomagnetite mining site[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 264: 498–504.
- [13] Zeng R, Li W, Wang N, *et al.* Effect of Al₂O₃ on the gas-based direct reduction behavior of Hongge vanadium titanomagnetite pellet under simulated shaft furnace atmosphere[J]. *Powder Technology*, 2020, 376: 342–350.
- [14] Chen D, Zhao L, Liu Y, *et al.* A novel process for recovery of iron, titanium, and vanadium from titanomagnetite concentrates: NaOH molten salt roasting and water leaching processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, (244–245): 588–595.
- [15] Adetoro A, Sun H, He S, *et al.* Effects of low-temperature pre-oxidation on the titanomagnetite ore structure and reduction behaviors in a fluidized bed[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49B: 846–857.
- [16] Dang J, Zhang G, Hu X, *et al.* Non-isothermal reduction kinetics of titanomagnetite by hydrogen[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20: 1134–1139.
- [17] Geng C, Sun T, Yang H, *et al.* Effect of Na₂SO₄ on the embedding direct reduction of beach titanomagnetite and the separation of titanium and iron by magnetic separation[J]. *ISIJ International*, 2015, 55: 2543–2549.
- [18] Du Q, Mo H, Tian L, *et al.* A preliminary control system on a barium sulphide rotary kiln process[J]. *IEEE Computer Society*, 2010, 142: 286–290.
- [19] Atmaca A, Yumrutas R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66: 435–444.
- [20] Mu J, Leder F, Park W C, *et al.* Reduction of phosphate ores by carbon: Part I. process variables for design of rotary kiln system[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 1986, 17B: 861–868.
- [21] Boateng A A. Rotary kilns-transport phenomena and transport processes[M]. 2nd Edition. Elsevier, 2016.
- [22] Zhao S, Zhou X, Liu W. Discrete element simulations of direct shear tests with particle angularity effect[J]. *Granular Matter*, 2015, 17: 793–806.
- [23] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1: 3–49.
- [24] Wang S, Lu J, Li W, *et al.* Modeling of pulverized coal combustion in cement rotary kiln[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20: 2350–2356.
- [25] Escotet-Espinoza M, Foster C, Ierapetritou M. Discrete element modeling (DEM) for mixing of cohesive solids in rotating cylinders[J]. *Powder Technology*, 2018, 335: 124–136.
- [26] Ndiaye L, Caillat S, Chinnayya A, *et al.* Application of the dynamic model of saeman to an industrial rotary kiln incinerator: Numerical and experimental results[J]. *Waste Management*, 2010, 30: 1188–1195.
- [27] Ding Y, Wang J, She X, *et al.* Reduction characteristics and kinetics of bayanobo complex iron ore carbon bearing pellets[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 20: 28–33.
- [28] Zhou L, Zeng F. Reduction mechanisms of vanadium-titanomagnetite-non-coking coal mixed pellet[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2011, 38: 59–64.