

提高球团矿配比对高炉布料的影响及其优化研究

宁泽尧, 张晓辉, 王楠
(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 含铁炉料结构直接影响着高炉布料料层孔隙度, 进而影响煤气流合理分布, 探究球团矿配比对料层分布的影响及改善层间界面效应至关重要。本研究采用离散单元法对 2 550 m³ 高炉的炉顶区域进行了三维建模, 研究了存在焦炭层时提高球团矿配比对炉料料面形状的影响规律, 并对矿焦层间界面效应提出了优化方案。结果表明, 随球团矿质量配比的提高, 炉料颗粒在溜槽末端的速度与落点半径增大, 料流更加分散; 随溜槽倾角增大, 溜槽有效长度增加, 炉料落点半径大幅增大; 提高含铁炉料中球团配比, 使得含铁炉料在径向上向炉喉中心滚动, 而在纵向上整体高度降低, 矿焦界面渗流现象严重。因此, 增加球团矿配比时, 为保证炉喉处初始料面稳定的形状, 应使矿石布料角度增大, 以减缓含铁炉料向炉喉中心的滚动。

关键词: 球团矿配比; 料面形状; 料流轨迹; 界面效应; 离散单元法

中图分类号: TF046.6; TF51; TF542

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0095-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.012

Effect of increasing pellet ratio on blast furnace burden distribution and its optimization research

NING Zeyao, ZHANG Xiaohui, WANG Nan

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The structure of the iron-bearing charge directly affects the porosity and void ratio of the material layer of the blast furnace burden distribution, and then affects the reasonable distribution of coal gas flow, so it is very important to explore the influence of pellet ratio on the distribution of the material layer and improve the interlayer interface effect. In this study, the discrete element method is used to model the roof area of the 2 550 m³ blast furnace in 3D, and the influence of increasing the pellet ratio on the shape of the charge surface in the presence of coke layer is studied, and an optimization scheme is proposed for the interface effect between the coke layers. The results show that with the increase of pellet mass ratio, the velocity and landing radius of the charge particles at the end of the chute increase, and the fuel flow is more dispersed. With the increase of the chute inclination, the effective length of the chute increases, and the landing radius of the charge increases significantly. Increasing the proportion of pellets in the ferrous charge makes the iron-containing charge roll towards the center of the throat in the radial direction, the overall height decreases in the longitudinal direction, and the seepage phenomenon at the coke interface is serious. Therefore, when increasing the pellet ratio, in order to ensure the stable shape of the initial material surface at the throat, the angle of ore distribution should be increased to slow down the rolling of the iron-containing charge to the center of the throat.

Key words: pellet ratio; shape of burden surface; fuel flow trajectory; interface effect; discrete element method

钢铁行业是国民经济的支柱产业, 具有对化
石能源高度依赖和能源消耗高度密集的特点, 是

碳排放重点行业^[1-2]。在国家“双碳”目标及日趋
严格的能耗要求下, 节能减排、降本增效、绿色

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-07-03

作者简介: 宁泽尧(2000—), 男, 硕士研究生, 从事高炉布料模拟研究。

通信作者: 王楠(1968—), 女, 教授, 从事铁资源绿色冶炼技术、冶金过程及反应器模拟仿真等研究。

智能已然成为钢铁企业可持续发展的关键。由于钢铁行业的碳排放中约有 70% 源自炼铁生产, 因此, 高炉炼铁系统的节能减排对于钢铁工业绿色低碳发展意义重大。目前, 我国高炉冶炼所用含铁炉料主要为高配比烧结矿搭配少量球团或块矿, 而与烧结工艺相比, 低能耗、低排放的球团工艺有助于高炉减排。同时, 高品质的球团矿对改善高炉整体孔隙度分布以及提高煤气流利用率起着至关重要的作用^[3-7]。然而, 随着球团配比增加, 球团矿的易滚动特性会直接导致炉料颗粒运动行为和分布状态发生改变, 造成料面形状难以稳定, 从而影响高炉稳定运行^[8]。

为探究炉料颗粒在高炉布料过程中的运动行为, 业内对此进行了大量研究工作。李肇毅等^[9]、YU 等^[10]建立了等配比缩小的高炉模型, 以冷态试验方法对炉喉空区的料流轨迹进行了研究。王斌等^[11]基于 1:3 的炉喉截面模型, 通过布料试验研究了球团矿对比对中心矿焦比的影响。由于炉内高温高压的环境, 使得高炉布料冷态试验结果的准确性受到一定影响, 刘云彩^[5]、邱家用等^[12]采用了数学分析的方法对高炉炉料的落点轨迹与料面形状进行了数值研究。王国斌^[13]结合宝钢 2 号高炉炉料组成和布料制度, 开展了不同球团矿配比时料堆结构参数的测定及料面形状的计算。近年来, 离散单元法 (discrete element method, DEM) 逐渐成为研究高炉炉料分布较为有效的方法。夏修浩等^[14]使用 DEM 方法研究了颗粒形状对高炉布料的影响, 得出了不同颗粒形状对料面形状与炉料孔隙度的特征差异。HE 等^[15]基于 DEM 方法研究了不同球团比条件下多环布料的固态炉料分布行为。当球团配比增加到 100% 时, 炉料整体速度、料流宽度及落点半径均增大; 同时, 球团矿发生明显炉料偏析, 集中分布在炉喉中心与炉料层底部。综上, 前人虽然深入研究了布料参数对高炉炉料分布规律的影响, 但相关研究主要集中于对单独矿石炉料料面分布进行描述, 而关于存在焦炭层时, 提高球团矿对比对炉料料面形状的影响及矿石与焦炭层间界面效应的研究报道较少。

本文基于某国企 2 550 m³ 高炉设计了相似比

为 1:1 的炉顶三维物理模型, 使用 DEM 方法模拟了球团矿对比提高对矿焦料层分布的影响, 并针对改善矿焦层间界面效应提出了改进建议, 从而为球团高配比条件下的高炉合理布料及上部精确调剂提供理论依据。

1 模型及研究方法

1.1 离散元模型

本文采用基于分子动力学 LAMMPS 扩展的开源离散元模型工具 LIGGGHTS 3.8.0, 离散单元法中的软球模型将颗粒接触时的变形看作颗粒间的重叠, 可明显减少计算量, 适用于模拟高炉类的物料密集反应器; 颗粒作用力计算采用非线性 Hertz-Mindlin 无滑移弹性模型^[16], 两个相互接触的固体颗粒受力分析如图 1 所示。

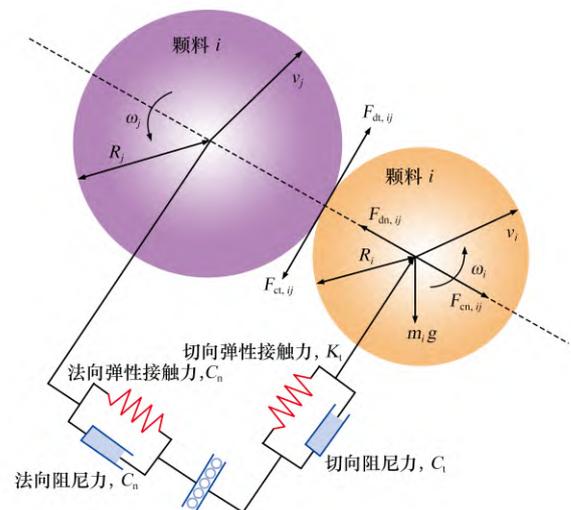


图 1 颗粒接触模型

Fig. 1 Particle contact model

颗粒在高炉中发生平移与转动, 其运动方程如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{en,ij} + F_{dn,ij} + F_{et,ij} + F_{dt,ij}) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (M_{t,ij} + M_{r,ij}) \quad (2)$$

式中: m_i 为颗粒 i 的质量, kg; v_i 为颗粒 i 的平动速度, m/s; g 为重力加速度, m/s²; I_i 为颗粒 i 的转动惯量, kg·m²; ω_i 为流体对颗粒 i 的角速度, rad/s; 其它各力与力矩如表 1 所示。

表 1 颗粒间作用力计算公式

Table 1 Calculation formula for force between particles

力与力矩	颗粒间作用力公式	
法向弹性接触力 ($F_{en\ ij}$)	$K_n \delta_n$	$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n }$
法向阻尼力 ($F_{dn\ ij}$)	$-\eta_n V_{n\ ij}$	$\eta_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{m^* K_n}$
切向弹性接触力 ($F_{et\ ij}$)	$-K_t \delta_t$	$K_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n }$
切向阻尼力 ($F_{dt\ ij}$)	$-\eta_t V_{t\ ij}$	$\eta_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{m^* K_t}$
切向转矩 ($M_{t\ ij}$)	$R^* n \times (F_{et\ ij} + F_{dt\ ij})$	$K_r = \frac{K_n B^2}{12}$
滚动摩擦转矩 ($M_{r\ ij}$)	$-K_r \theta_r \quad \theta_r \leq \theta_0$ $M_0 \quad \theta_r > \theta_0$	$M_0 = \frac{n \times (F_{en} + F_{dn}) B^2}{6}$

注: 表 1 中: K_n 为法向接触时的弹性常数; K_t 为切向接触时的弹性常数; δ_n 为颗粒间的重叠量; δ_t 为两颗料间切向位移矢量; $V_{n\ ij}$ 为颗粒之间相对速度的法向分量; β 为系数, 由弹性碰撞系数计算得来; R^* 为两个相互接触的单元的当量半径 m ; m^* 为当量质量 kg ; n 为等效半径 m ; $V_{t\ ij}$ 为颗粒之间相对速度的切向分量; η_n 为颗粒之间的重叠距离 m ; G^* 为当量剪切模量 Pa ; E 为杨氏模量 Pa ; B 为接触宽度 m ; K_r 为滚动摩擦系数; θ_r 为相对旋转角度 ($^\circ$); θ_0 为阈值角度 ($^\circ$); 当 $\theta_r > \theta_0$ 时 $M_{r\ ij}$ 等于 M_0 为滚动摩擦转矩。

1.2 模拟条件

本文研究区域为高炉炉顶部分, 以某企业高炉为原型, 在实际高炉结构参数的基础上建立简化模型, 具体如图 2 所示。图 2 中, 高炉炉顶部分由落料口、旋转溜槽、炉喉和部分炉身组成。描述炉内料面位置的料线深度为 1.50 m。模拟中使用的旋转溜槽悬挂点至零料线距离为 4.00 m,

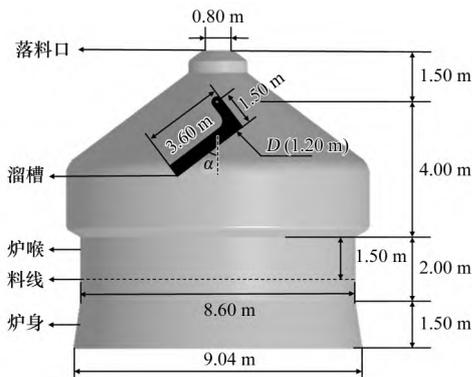


图 2 2 550 m³ 高炉炉顶几何模型

Fig. 2 Geometric model of 2 550 m³ blast furnace top

溜槽横截面形状为半圆形, 截面半圆直径 (D) 为 1.20 m, 旋转溜槽长度 (l_0) 为 3.60 m, 倾动距为 1.50 m, 溜槽倾角设为 α , 溜槽工作角度为 $2^\circ \sim 53^\circ$ 。为了研究真实炉料在高炉布料过程中的运动轨迹及料面形状演变, 入炉炉料由球形的球团矿, 组合球形状的焦炭与烧结矿组成, 相应尺寸分布如表 2 所示。

表 2 炉料尺寸分布

Table 2 Size distribution of charge

炉料	颗粒形状	颗粒粒度/mm	颗粒等效体积/ m^3	颗粒密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	等效质量/kg
焦炭		45	4.77×10^{-5}	1 118	0.053
烧结矿		22	5.58×10^{-6}	3 077	0.017
球团矿		13	1.15×10^{-6}	3 695	0.004

对于焦炭与烧结矿的颗粒形状, 通过等效体积方法可得到组合球中单一球的半径。在仿真工作中为减少生成的粒子数和模拟时间, 所有粒子尺寸均放大 3 倍。对于 DEM 模拟采用的杨氏模量、泊松比及摩擦系数等物性参数, 选用了前人研究的参数范围^[17], 具体参数如表 3 所示。

表 3 DEM 颗粒物性参数

Table 3 Particle parameters used DEM simulation

参数	焦炭	烧结矿	球团矿
时间步长/s	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
杨氏模量/Pa	5.4×10^8	3.5×10^8	1.2×10^8
泊松比	0.22	0.25	0.24
弹性恢复系数	0.35	0.31	0.34
	—	0.35	0.40
	—	—	0.42
静摩擦系数	0.87	0.78	0.42
	—	0.84	0.40
	—	—	0.25
滑动摩擦系数	0.15	0.15	0.07
	—	0.17	0.07
	—	—	0.02

本文采用多环布料矩阵下的中心加焦模式, 溜槽旋转角度及相应的布料圈数如表 4 所示。焦炭层与矿石层分别以 18 圈和 12 圈进行旋转布料,

表 4 高炉布料矩阵
Table 4 Charging matrix of blast furnace

种类	布料矩阵							
焦炭	溜槽倾角/(°)	44.0	42.0	39.5	37.0	34.0	31.0	18.0
	圈数	3	3	3	2	2	2	3
矿石	溜槽倾角/(°)	42.0	40.0	37.5	35.0	32.0	—	—
	圈数	2	3	3	2	2	—	—

同时结合某企业高炉布料操作“焦批单批布料平均时间为 135 s，矿批单批布料平均时间为 90 s”，焦炭与矿石每圈布料时间设置为 7.5 s，最终自下而上形成焦-矿两层炉料。

2 结果与讨论

2.1 不同球团矿配比炉料安息角的验证

为了验证不同球团矿配比炉料 DEM 模拟结果的准确性，其采用的验证方法：① 将不同球团矿配比的含铁炉料填充至圆筒中，保证炉料质量一定，圆筒直径与炉料颗粒平均直径之比保持为 10:1，同时使料柱高径比保持在 1.2 ~ 1.7 之间；② 炉料填充完毕后，匀速提升圆筒，保证形成的料堆所受料柱静压力尽量小；③ 测量堆高(h)及半径(r)，并根据公式(3)计算确定炉料安息角(φ)。炉料安息角 DEM 模拟结果及试验测定与模拟结果对比如图 3 所示。

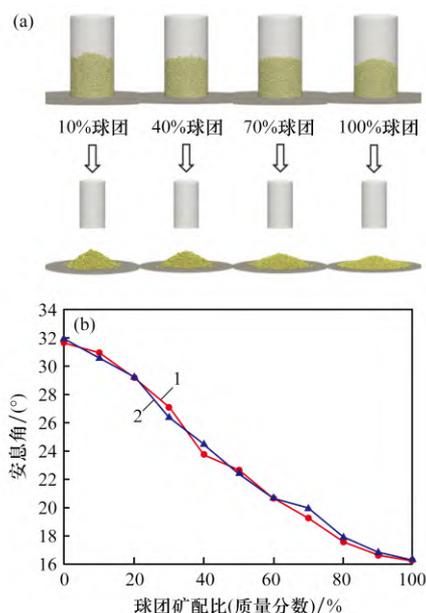
$$\varphi = \arctan(h/r) \quad (3)$$

由图 3(a) 可以看出，随球团矿配比提高，炉料堆高降低，半径增大，炉料安息角降低。由图 3(b) 可知，当球团矿配比从 0% 升至 100%，炉料安息角由 31.90° 降至 16.30°，模拟结果与试验结果吻合较好，可为研究不同球团矿配比条件下的高炉布料及炉料下降规律提供理论基础。

2.2 球团矿配比及溜槽倾角对料流轨迹的影响

当前模拟研究的炉料结构为球团矿与烧结矿的混合炉料，混合炉料中球团矿配比设置分别为 0%、20%、40%、60%、80% 与 100%，矿批总质量为 75 t(即质量流率为 227.27 kg/s)，溜槽倾角为 40°，用以模拟不同球团矿配比下炉料落点半径及溜槽出口速度，颗粒流动轨迹与溜槽末端速度及落点半径模拟结果分别如图 4、5 所示。

由图 4 可知，提高球团矿对比对炉料料流轨



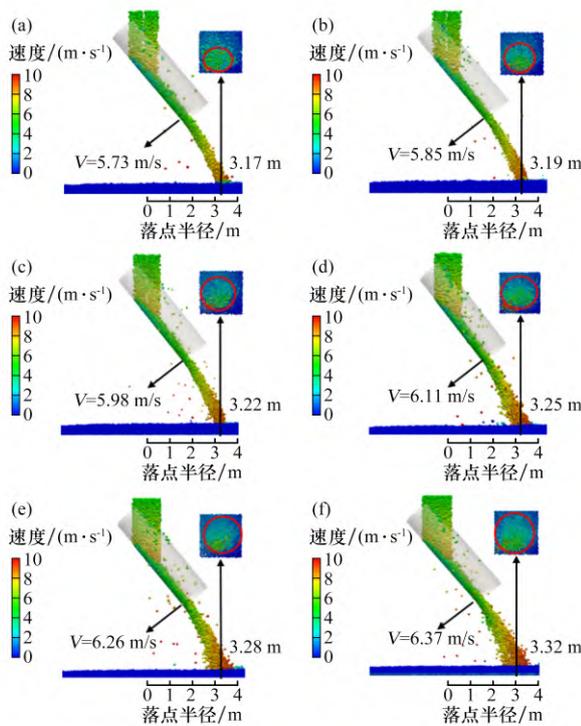
(a) DEM 模拟结果; (b) 试验测定与 DEM 模拟结果对比
1—试验测定; 2—模拟。

图 3 炉料安息角 DEM 模拟结果及试验测定与模拟结果对比

Fig. 3 DEM simulation results and comparison of burden resting angle of experimental measurement and simulation results

迹会产生一定影响。当球团矿配比分别为 0%、20% 和 40% 时，料流宽度较小，整体较为集中；当球团矿配比增加到 60%、80% 和 100% 时，料流宽度明显增大，料流更为散乱，这是由于球团矿相比烧结矿形状更接近球形，炉料间的相互作用力较小，导致炉料在溜槽上偏离溜槽中心更多，炉料分布较为分散。

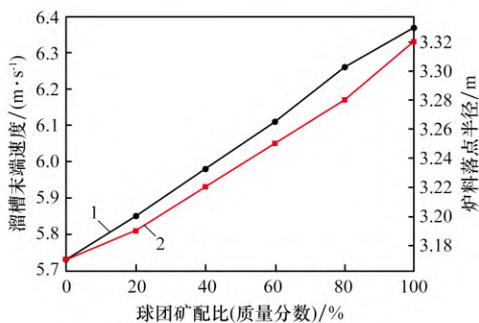
由图 5 可知，随着球团矿配比由 0 提升至 100%，炉料颗粒在溜槽末端的速度近乎线性增大，由 5.73 m/s 增至 6.37 m/s，这是由于球团矿颗粒球形度高，摩擦类型更接近滚动摩擦，在溜槽上运动时和其他炉料颗粒以及溜槽内壁接触的摩擦力更小，因此在溜槽上运动受到的阻力更小，速



球团矿配比(质量分数)/%: (a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80; (f) 100

图 4 不同球团矿配比下颗粒流动轨迹(溜槽倾角为 40°)

Fig. 4 Motion trace of burden particles with different pellet ratios (the chute angle is 40°)



1—溜槽末端速度; 2—炉料落点半径。

图 5 不同球团矿配比下溜槽末端速度及落点半径

Fig. 5 Velocity and landing radius at the end of the chute with different pellet ratios

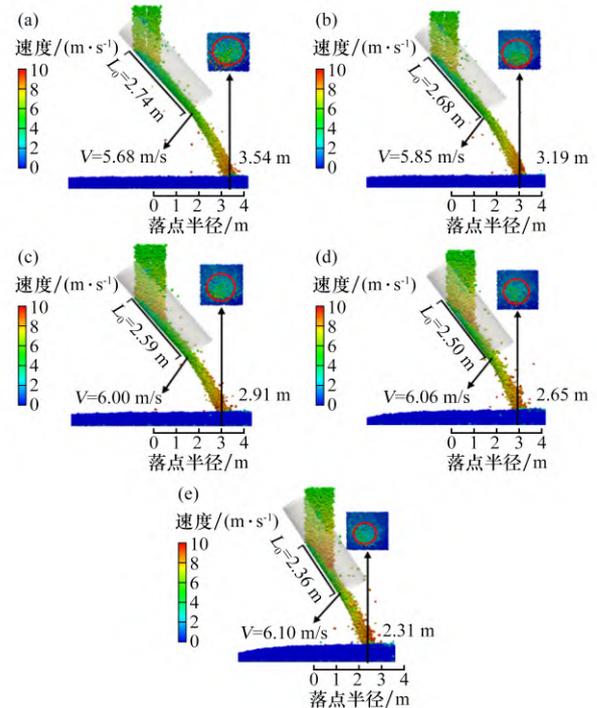
度相比于烧结矿更大; 同时因溜槽末端速度的增大, 径向分速度随之增大, 落点半径也变得更远, 由 3.17 m 增至 3.32 m。

为研究溜槽倾角对布料的影响, 固定球团矿配比为 20%, 溜槽角度选择采用表 4 中矿石的布料矩阵, 分别为 32.0°、35.0°、37.5°、40.0°和 42.0°。同时使用溜槽有效长度, 即炉料通过落料口在溜槽上的落点至溜槽末端的距离, 确定溜槽

对炉料的影响。模拟结果如图 6、7 所示。

由图 6 可得, 随着溜槽倾角的增大, 溜槽有效长度增大, 由 2.36 m 增大至 2.74 m, 炉料在溜槽上的运动距离变长, 料流宽度因运动距离增加, 炉料向溜槽边缘移动而增大。

由图 7 可知, 随溜槽倾角由 32.0° 增大至

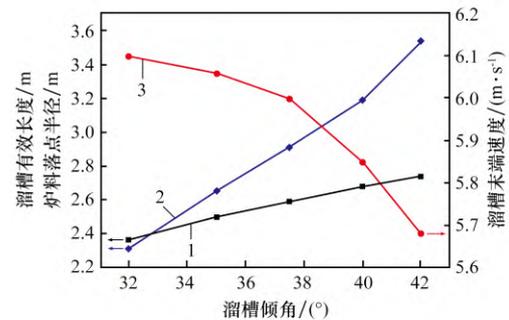


溜槽倾角/(°): (a) 42.0; (b) 40.0; (c) 37.5;

(d) 35.0; (e) 32.0

图 6 不同溜槽倾角下颗粒流动轨迹(球团矿配比为 20%)

Fig. 6 Motion trace of burden particles with different chute angles (the pellet ratio is 20%)



1—溜槽有效长度; 2—炉料落点半径; 3—溜槽末端速度。

图 7 不同溜槽倾角下溜槽有效长度、溜槽末端速度及落点半径

Fig. 7 Profiles of chute effective length, velocity at the end of chute, and falling radius with different chute angles

42.0°, 炉料落点半径大幅增大, 由 2.31 m 增大至 3.54 m; 溜槽末端速度随溜槽倾角的增加而逐渐降低, 由 6.10 m/s 降低至 5.68 m/s, 这是由于溜槽倾角增加, 径向距离增加, 落点因此增大; 炉料落至溜槽上的速度较小, 而溜槽的有效长度变长, 溜槽对炉料的控制作用更加明显, 因此炉料在溜槽出口处的速度减小。

2.3 不同球团矿配比时的料面形状及矿焦边界效应

为保证炉料料层整体透气性、维持高炉稳定运行, 结合生产实际选取了球团矿配比为 20% 和 40% 的含铁炉料, 根据表 4 中焦炭及矿石的布料矩阵进行布料, 对高炉炉顶矿焦料层分布进行模拟研究。炉料分布特征及层间界面效应如图 8 所示。

由图 8(a) 可知, 料面为中心加焦模式, 中心焦炭堆高为 0.87 m, 中心堆角为 28.5°, 边缘平台高度为 0.80 m, 宽度为 0.67 m, 矿石集中在距炉喉中心 2.70 m 处, 料面最高高度为 1.25 m。由图 8(b) 可知, 相比 20% 球团矿配比下的炉料料面, 40% 球团矿配比下料面边缘平台宽度增大, 由 0.67 m 增大至 0.72 m; 料面最高处向炉喉中心偏移, 位于距炉喉中心径向 2.40 m 处, 料面最高处的高度由 1.25 m 下降至 1.20 m; 而料面中心焦炭堆堆高和中心堆角相比 20% 球团矿配比下料面

未发生改变。

对图 8(a) 与图 8(b) 的矿焦界面(1~4.3 m)进行放大, 可观察到矿石层与焦炭层之间界面相互交错, 产生了层间渗流现象。在 20% 球团矿配比的炉料分布中, 部分矿石颗粒渗入焦炭层, 也有少量球团矿颗粒渗入中心焦炭柱, 这种现象是焦炭层布料形成的孔隙与矿石炉料布料时对焦炭层冲击共同作用的结果。而 40% 球团矿配比的炉料分布中, 可观察到随着球团矿配比提高, 矿石层与焦炭层层间渗流现象更为严重, 更多的矿石渗入焦炭层, 粒径较小的球团矿大量出现在焦炭层底部, 导致焦炭层孔隙被填充, 降低了料层透气性, 影响了高炉的稳定运行。

为了对料面不同位置处的含铁炉料质量占比分布规律进行研究, 在径向与纵向上分别对球团矿与烧结矿质量占比进行统计与分析, 结果如图 9 所示。由图 9(a) 可知, 球团矿在径向 0.75~1.00 m 位置处占比较高, 而在 3.25~4.25 m 区域占比较低, 前者是由于在该布料挡位矿石炉料数量较少, 而前一挡位的球团矿相较不规则形状的烧结矿更容易沿炉料间隙滚动至此区域, 渗入焦炭堆, 造成球团矿占比的增大; 后者是由于焦炭布料后, 料面形成了一定坡度, 当矿石炉料在初始的两个

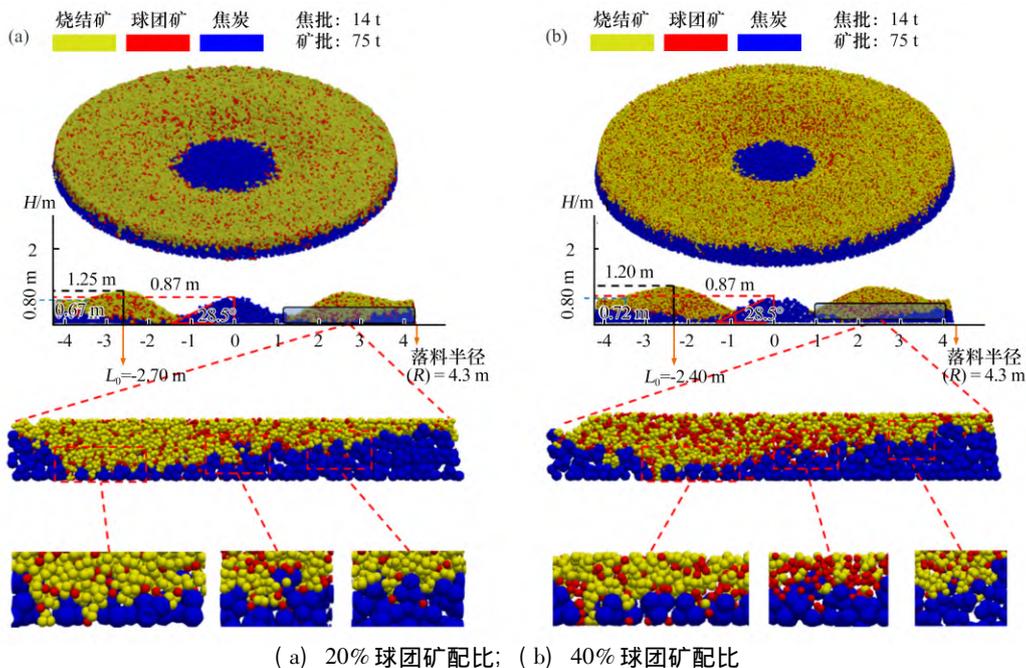


图 8 炉料分布特征及层间界面效应

Fig. 8 Burden distribution characteristics and interlayer interface effect

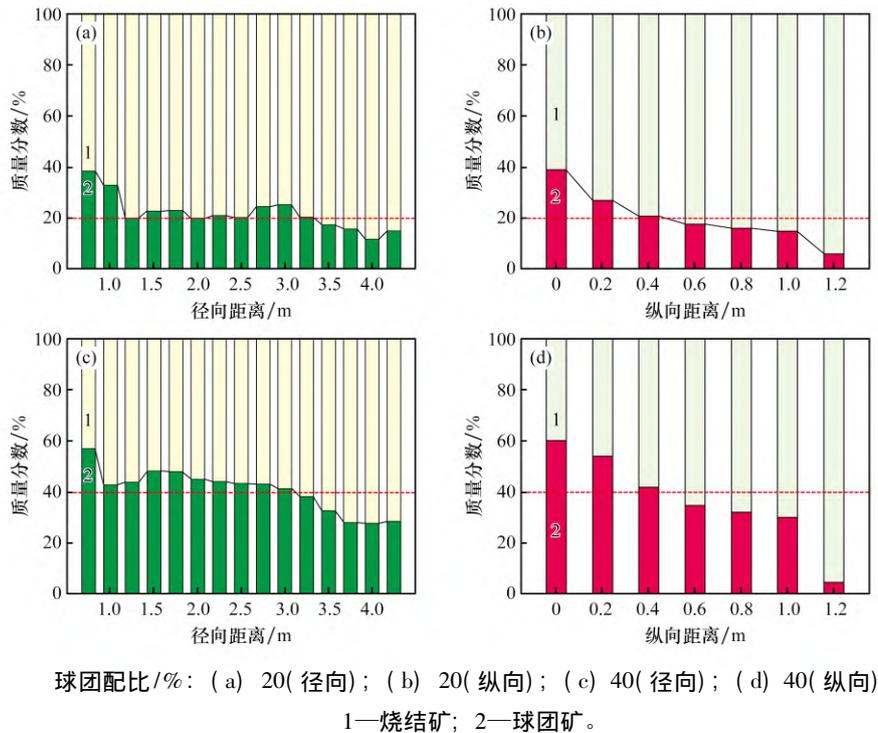


图9 料面不同位置处炉料质量分数

Fig. 9 Burden mass percentage on different charge surface position

挡位布料时,球团矿更易沿焦炭堆滚落,造成边缘区域球团矿占比减少,2.75~3.00 m区域球团矿占比增加。由图9(b)可知,球团矿在料面底层占比较高,随纵向高度提高,球团矿占比逐渐降低。这是由于球团矿粒径小于烧结矿,更容易穿过焦炭颗粒间隙,到达料层底层,导致底层球团矿占比增大。

由图9(c)可知,球团矿在径向0.75~3.00 m位置处占比均大于40%,而在炉喉边缘位置(3.25~4.25 m)球团矿占比较低。与图9(a)相比,因球团矿配比的提高,更多的球团矿沿焦炭堆向炉喉中心滚动,导致球团矿进一步向炉喉中心汇聚。由图9(d)可知,与图9(b)相比,球团矿占比在炉喉纵向分布趋势基本相同,随炉喉纵向高度提高而降低。

由图9可知,当球团矿配比由20%增大至40%时,矿石炉料平均粒径降低,整体球形度增大,矿石炉料滚向炉喉中心,造成炉喉中心矿焦占比增大,中心气流被抑制。因此,结合本文2.2节,在球团矿配比提高时若要发展中心气流,保证炉料稳定运行,高炉布料溜槽倾角应整体增大 $0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$,使矿石炉料落点半径变远,进而减

少矿石炉料向炉喉中心滚动,保证炉喉中心矿焦比,使得中心气流得到发展,高炉透气性增大,料面形状保持稳定。

3 结论

(1) 随球团矿配比由0提升至100%,炉料颗粒在溜槽末端速度由5.73 m/s增至6.37 m/s,落点半径由3.17 m增至3.32 m,料流更为分散。随溜槽倾角由 32.0° 增大至 42.0° ,溜槽有效长度由2.36 m增大至2.74 m,炉料落点半径由2.31 m增大至3.54 m,而炉料颗粒的溜槽末端速度因溜槽对其控制作用提升,由6.10 m/s降低至5.68 m/s。

(2) 随着含铁炉料中球团矿配比由20%提高至40%,含铁炉料在径向上向炉喉中心滚动,料面最高处由2.70 m偏移至2.40 m;在纵向上,料面最高处的高度由1.25 m下降至1.20 m;在矿焦界面处,更多的球团颗粒渗入焦炭层。

(3) 在矿石质量与料线高度不变条件下,随球团矿配比提高,为保证高炉炉喉处料面形状稳定,建议矿石炉料布料矩阵整体增大 $0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$,从而减缓含铁炉料向炉喉中心滚动。

参考文献:

- [1] 刘征建,王家保,张建良,等. 高炉能耗现状及降耗技术展望[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(1): 1-10.
LIU Zhengjian, WANG Jiabao, ZHANG Jianliang, et al. Status of energy consumption and prospect of consumption reduction technology in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(1): 1-10.
- [2] KAGECHIKA H. Production and technology of iron and steel in Japan during 2006 [J]. ISIJ International, 2007, 47(6): 773-794.
- [3] ZHOU P, SHI P Y, SONG Y P, et al. Evaluation of burden descent model for burden distribution in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(8): 765-771.
- [4] LI Z Y, KUANG S B, LIU S D, et al. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace[J]. Powder Technology, 2019, 353: 385-397.
- [5] 刘云彩. 高炉布料规律[M]. 4版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
LIU Yuncai. Distribution law of blast furnace [M]. 4th ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [6] 马洪佑, 张建良, 王振阳, 等. 高炉无钟炉顶设备布料偏析现象[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(3): 220-226.
MA Hongyou, ZHANG Jianliang, WANG Zhenyang, et al. Segregation of burden distribution phenomenon in bell-less furnace top equipment [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(3): 220-226.
- [7] SHI L, ZHAO G S, LI M X, et al. A model for burden distribution and gas flow distribution of bell-less top blast furnace with parallel hoppers [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(23/24): 10254-10273.
- [8] ZHAO Z J, SAXÉN H, LIU Y J, et al. Numerical study on the influence of pellet proportion on burden distribution in blast furnace [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2023, 50(6): 613-620.
- [9] 李肇毅, 顾德仁. 高炉布料模拟试验装置的建立和初试[J]. 宝钢技术, 1992(2): 17-21.
LI Zhaoyi, GU Deren. Establishment and preliminary test of blast furnace burden distribution simulation test device [J]. Baosteel Technology, 1992(2): 17-21.
- [10] YU Y W, BAI C G, ZHANG Z R, et al. Theoretical calculation and validation of burden trajectory in bell-less top blast furnace [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(7): 505-508.
- [11] 王斌, 王炜, 郑魁, 等. 高球团矿配比条件下炉喉矿焦比变化规律及其优化 [C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集. 重庆, 中国金属学会, 2023: 213-218.
WANG Bin, WANG Wei, ZHENG Kui, et al. The variation law of furnace throat ore/coke under high pellet charging ratio and its optimization [C]//The Chinese Society for Metals. The 14th CSM Steel Congress Proceedings. Chongqing: Chinese Society for Metals, 2023: 213-218.
- [12] 邱家用, 高征铠, 张建良, 等. 无料钟炉顶高炉中炉料流动轨迹的模拟 [J]. 过程工程学报, 2011, 11(3): 368-375.
QIU Jiayong, GAO Zhengkai, ZHANG Jianliang, et al. Simulation of burden trajectory in a bell-less top blast furnace [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(3): 368-375.
- [13] 王国斌. 提高球团矿对比对高炉块状带料面形状和煤气流分布影响的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
WANG Guobin. Effect of high pellet ratio on burden layer profile and gas flow distribution in the lump zone of blast furnace [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [14] 夏修浩, 周连勇, 马华庆, 等. 颗粒形状模型对高炉布料过程 DEM 模拟的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(12): 1228-1236.
XIA Xiuhao, ZHOU Lianyong, MA Huaqing, et al. Effect of particle shape model on DEM simulation of charging process in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(12): 1228-1236.
- [15] HE L, JIANG X, AN H W, et al. Effects of pellet ratio on the burden movement and distribution characteristics in the BF throat [J]. Powder Technology, 2024, 432: 119130.
- [16] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20(3): 327-344.
- [17] KOU M Y, WU S L, ZHOU H, et al. Numerical investigation of coke collapse and size segregation in the bell-less top blast furnace [J]. ISIJ International, 2018, 58(11): 2018-2024.