



综合含铁炉料结构与矿焦相互作用对高炉炉料分布的影响

郭文昊, 张晓辉, 王楠

(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 高炉炉喉处炉料的分布与烧结矿、球团矿和块矿的入炉比例密切相关。本文研究了不同含铁炉料结构下炉料颗粒的运动行为,并分析了含铁炉料组成与矿焦相互作用对炉料分布特征的协同影响。结果表明,当球团矿和块矿的总质量分数小于32%时,颗粒流动轨迹稳定。中心加焦可使含铁炉料的径向偏析最小化。在矿焦层界面处,观察到矿石颗粒的堆积和渗透行为。当球团矿比例较高时,矿石颗粒容易渗入焦炭层的空隙结构中,进而降低矿焦混合层的孔隙度。

关键词: 高炉; 混合物组成; 颗粒轨迹; 炉料分布; 矿焦界面; 离散单元法

中图分类号: TF5

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0068-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.080

Effects of interaction between iron-containing charge structure and ore coke on distribution of blast furnace charge

GUO Wenhao, ZHANG Xiaohui, WANG Nan

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

Abstract: The distribution of charge at the throat of the blast furnace is closely related to the furnace entry ratio of sinter, pellet and lump ore. In this paper, the motion behavior of charge particles under different iron-containing charge structures is studied, and the synergistic influence of the interaction between iron-containing charge composition and ore coke on the distribution characteristics of the furnace charge is analyzed. The results show that, when the total mass fraction of pellets and lump ores is less than 32%, the particle flow trajectory is stable. Center coking minimizes radial segregation of ferrous charges. At the interface of the ore coke layer, the accumulation and penetration behavior of ore particles is observed. When the proportion of pellets is high, ore particles are easy to penetrate into the void structure of the coke layer, which in turn reduces the porosity of the ore-coke mixed layer.

Key words: blast furnace; mixture composition; particle trajectory; charge distribution; mineral coke interface; discrete element method

高炉是冶炼和还原铁矿石的高效反应器,其生产成本、能源效率和碳排放是炼铁过程中最受关注的因素。传统上,由于具有更好的冶金性能和更适宜的资源条件,烧结矿被用作主要的含铁炉料。然而,球团矿生产比烧结矿消耗更少的能源且碳排放更低,使用廉价的块矿则可以降低生产成本。因此,含铁炉料组成的协同优化对于提

高高炉生产效率、减少二氧化碳排放以及保持合理的炼铁成本至关重要^[1-2]。

研究人员发现,综合炉料结构决定着料层的透气性^[3-5]。在高炉炼铁过程中,由块矿、球团矿和烧结矿组成的综合含铁炉料被冶炼为生铁^[3]。高炉在布料过程中,综合含铁炉料和焦炭通过旋转溜槽以相应的布料矩阵交替装入炉内。由于筛

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-04-29

作者简介: 郭文昊(1998—),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。

分现象,小颗粒矿石嵌入焦炭层的上部,然后向焦层底部移动^[5]。分层炉料结构由所谓的混合层或“界面”层隔开。矿焦混合层紧密堆积,其透气性低于单独的焦炭层和矿石层,这不可避免地影响了高炉喉部铁矿石颗粒的分布。因此,综合含铁炉料的分布及料层空隙度成为了研究重点之一。

ZHOU 等^[6]使用离散单元法(DEM)研究了焦层塌陷。结果表明,炉料层的轮廓趋于平坦,在高球团矿比例下难以形成新的焦炭平台,因此建议球团矿比例应小于 40%。XU 等^[7]基于离散单元法计算了含铁炉料的装料顺序,结果表明炉喉处炉料的分布特征与料斗卸料过程中含铁物料质量分数的变化趋势一致。YU 等^[8]研究了焦炭形状、球团矿直径、静摩擦以及颗粒间滚动摩擦和恢复系数对矿焦层渗透的显著影响。MIO 等^[9]研究了炉料颗粒在料斗和溜槽上的偏析行为。KOU 等^[10]研究了溜槽形状和装料方式对颗粒流动的影响,结果表明半圆形溜槽可使颗粒获得均匀的径向尺寸分布,并且高流动性颗粒会影响含铁炉料的流动和相互作用。E 等^[11]使用计算流体动力学和离散单元法相结合的方法,研究了实验高炉中混合层的形成。尽管有上述广泛的研究,但在实际多环布料条件下,含铁炉料组成的偏析特征以及矿焦界面的筛分现象仍存在一些挑战。随着烧结矿、球团矿和块矿比例的变化,炉料分布轮廓如何变化?矿焦质量比和相应的料层透气性如何变化?这些问题在很大程度上仍未得到明确解答。离散单元法数值模拟为解决这些问题提供了有效途径。除此之外,在下一步的工作中,熔剂及球团矿的酸碱性也需考虑至数值模拟中。

本文建立了高炉炉顶的全尺寸三维离散元模型,研究了综合含铁炉结构的优化和矿焦界面筛分现象。首先,将烧结矿、球团矿和块状矿按适当的质量比例组合成“综合含铁炉料”,研究综合含铁炉料从溜槽到料堆的运动行为。在确定含铁炉料颗粒流动轨迹的基础上,进一步讨论了综合含铁炉料结构对料层分布特性的影响。基于组合球的等效体积法与双重积分,量化了不规则料层的孔隙度。研究结果可为优化高炉炉喉炉料分布提供更有价值的信息。

1 模型及研究方法

1.1 离散元模型

本研究使用基于分子动力学程序(LAMMPS)扩展的开源离散元建模工具(LIGGGHTS 3.8.0),在离散元模型中,软球模型将接触颗粒的变形视为颗粒间的重叠,这大大减少了计算量,适用于模拟像高炉这样的颗粒密集型反应器。颗粒上的作用力通过非线性(Hertz-Mindlin)无滑移弹性模型计算,两个固体颗粒的接触模型如图 1 所示。

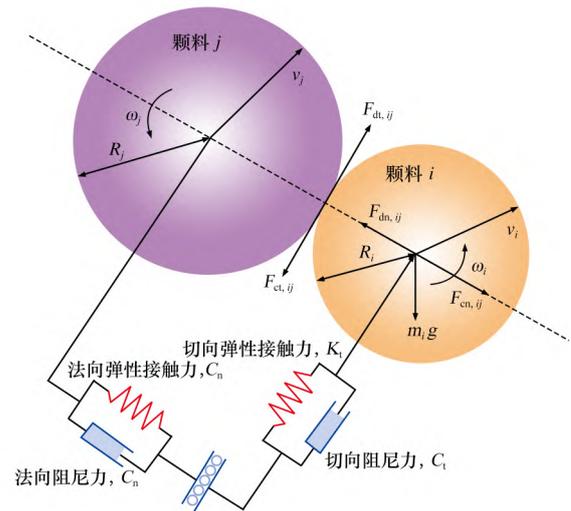


图 1 颗粒接触模型

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。

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

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

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。

1.2 模拟条件

图 2 为 1 800 m³ 高炉炉顶的几何模型以及模拟中颗粒取样位置。简化的高炉炉顶几何模型主要由料斗、中心喉管、溜槽和炉喉组成,如图 2(a)所示,这些部分被定义为由钢制成的壁面。模

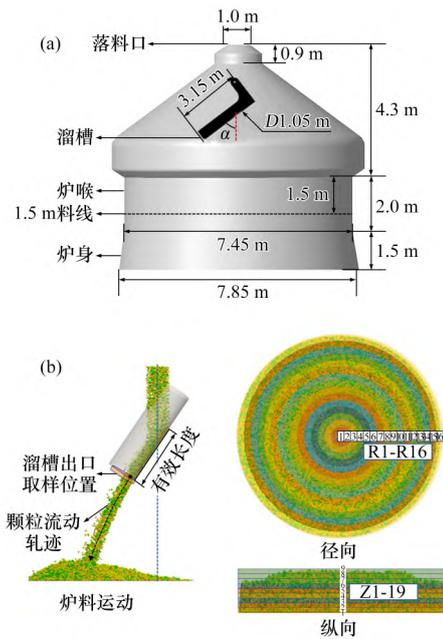
表 1 颗粒间作用力计算公式

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 ($F_{et,ij}$)	$-K_t \delta_t$	$K_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_t }$
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。

拟使用的溜槽横截面为半圆形, 倾角为 α , 直径为 1.05 m, 长度为 3.15 m。此外, 几何模型的尺寸与实际计算域相同。图 2(b) 展示了颗粒样本沿径向、纵向和溜槽出口方向的情况, 可以分析含铁炉料颗粒在所有方向上的偏析情况。为了定量分析含铁炉料颗粒在矿石层中的分布, 从炉喉中心到炉壁划分为 16 个区域 (R1 至 R16), 从炉喉底部到炉料分布轮廓的峰值位置均匀划分为 9 个区域 (Z1 至 Z9)。由于高炉炉喉中实际的炉料分布轮廓难以测量, 因此假设初始炉料分布轮廓为水平。

炉料由焦炭和含铁炉料组成, 含铁炉料包括烧结矿、球团矿和块矿。每种炉料颗粒的尺寸和形状等相关参数列于表 2。球团矿颗粒为球形, 烧结矿、块矿和焦炭颗粒为非球形, 由 3 或 4 个具有一定重叠的球体组合而成。它们的形状是根据炉料在高度和宽度方向上的实际形态设计的。剪切模量、泊松比和摩擦系数等参数从文献和材料



(a) 炉顶几何模型;

(b) 沿径向、纵向和溜槽出口方向的颗粒取样位置

图 2 模拟中使用的几何模型及颗粒样品

Fig. 2 Geometric model and particle samples used in the simulation

数据库中获取^[12,17], 如表 2 所示。YU 等^[14]报道, 当球团矿的剪切模量从 10^9 Pa 降低到 10^7 Pa 时, 高炉炉喉处炉料沿径向的分布没有明显差异。在他们的研究工作中, 剪切模量被定义为剪切力的弹性系数(即剪应力与剪应变的比值), 这意味着较小的剪切模量对应较软的材料。通过在模型中降低剪切模量, 可以增加时间步长, 因为允许颗粒之间有更大的重叠。因此, 减少计算时间的一种可行方法是使用较小的剪切模量。为确保模拟的连续性, 时间步长固定为瑞利时间步长的 20%。瑞利时间步长可由式(3)获得。

$$\Delta t = \frac{\pi R}{0.163\sigma + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (3)$$

式中: R 为颗粒半径, mm; σ 为泊松比; ρ 为颗粒密度, kg/m^3 ; G 为剪切模量, Pa。

布料过程模拟中, 在料斗上方设置一个“颗粒工厂”, 按指定比例连续生成包括烧结矿、球团矿和块矿的综合含铁炉料。炉料颗粒从料斗排出, 然后在重力作用下通过中心炉喉管落入溜槽, 再分散到炉喉, 形成具有指定内外安息角的料堆。炉料颗粒停止移动后, 形成稳定的炉料层, 模拟

表2 模型使用参数

Table 2 Parameters used in the present model

参数	烧结矿	球团矿	块矿	焦炭	炉壁	
颗粒形状					—	
等效体积/mm	22	13	30	45	—	
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3 077	3 695	4 231	1 118	7 850	
杨氏模量/Pa	3.5×10^8	1.2×10^8	1×10^8	5.4×10^8	2×10^{11}	
泊松比	0.25	0.24	0.21	0.22	0.30	
静摩擦系数	烧结	0.84	0.40	0.41	0.78	0.61
	球团	—	0.25	0.27	0.42	0.48
	块矿	—	—	0.60	0.71	0.69
恢复系数	焦炭	—	—	—	0.87	0.41
	烧结	0.35	0.40	0.39	0.31	0.35
	球团	—	0.42	0.48	0.34	0.54
滚动摩擦系数	块矿	—	—	0.41	0.32	0.43
	焦炭	—	—	—	0.35	0.20
	烧结	0.17	0.07	0.10	0.15	0.09
滚动摩擦系数	球团	—	0.02	0.03	0.07	0.06
	块矿	—	—	0.07	0.10	0.09
	焦炭	—	—	—	0.15	0.09

过程结束。

在本研究中,多环布料矩阵装料圈数和溜槽旋转角度如表3所示。焦层和矿层的旋转圈数分别为18圈和12圈。此外,根据 $1\,800\text{ m}^3$ 高炉焦炭批次和矿石批次的平均装料时间,焦炭和含铁炉料模拟的装料时间均设置为 7.5 s ,最终从底部到顶部形成两层焦矿装料。

实际上,由于烧结矿较块矿具有更好的冶金性能和更适宜的资源条件,尤其是在中国,它被用作高炉的主要含铁炉料。此外,由于块矿的冶金质量较差,其在中国高炉中的质量比通常为 $10\% \sim 15\%$ ^[16]。为了分析组合含铁炉料成分对炉料分布特征的影响,设计了三种不同的混合含铁炉料成分,包括原始炉料成分、低烧结矿比例结构和高球团矿比例结构,如表4所示。

2 结果与讨论

2.1 综合含铁炉料的分布特征

针对不同块矿质量比例的布料方案,研究综

表3 多环布料矩阵装料圈数和溜槽旋转角度

Table 3 Charging circlemumber in the multi-ring burden distribution matrix and chute angular position

焦层		矿层	
溜槽角度/($^\circ$)	旋转圈数	溜槽角度/($^\circ$)	旋转圈数
40.5	3.0	39.0	2.0
38.5	3.0	37.0	3.0
36.0	4.5	34.5	2.0
33.5	2.0	31.5	2.0
30.5	2.0	28.5	3.0
13.0	3.5	—	—

表4 综合含铁炉料结构方案(质量分数)

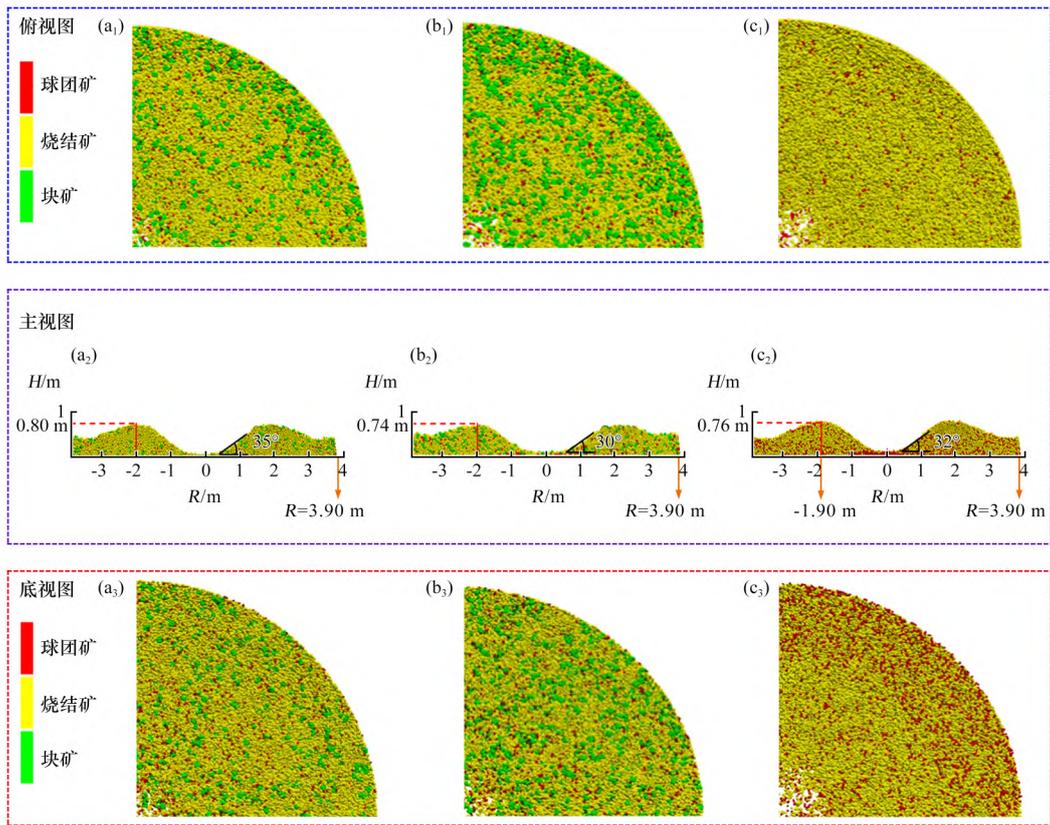
Table 4 Scheme of integrated iron-bearing burden

方案	structure			%
	烧结矿	球团矿	块矿	
1	80.0	6.0	14.0	
2	68.0	6.0	26.0	
3	68.0	32.0	0	

合含铁炉料结构对矿石层分布特征的影响,具体如图3所示。由图3可知,当用烧结矿替代不规则块矿时,综合含铁炉料在矿石层中分布均匀。然而,当球团的质量分数增加到 32% 时,大量球团颗粒会移动到矿石层底部。从正面看,矿石层的形状呈“平台加漏斗”状。当球团质量分数保持在 6% 时,随着烧结矿占比从 80% 降低到 68% ,矿石层的峰高从 0.8 m 降至 0.74 m 。同时,内部休止角也从 35° 降至 30° 。另一方面,当烧结矿质量分数保持在 68% 时,随着球团占比从 6% 增加到 32% ,矿石层的峰高从 0.74 m 增加到 0.76 m 。相应地,内部休止角从 30° 增加到 32° ,峰位向炉喉中心移动 0.1 m 。

此外,图4展示了在三种综合含铁炉料结构(块矿比例分别为 0% 、 14% 和 26%)下,炉喉中心附近径向和纵向方向上炉料的质量百分比。由图4可知,在炉喉中心附近的径向位置,球团的质量百分比相对较高,而烧结矿的质量百分比相对较低。当球团占比增加到 32% 时,由于球团尺寸较小且呈球形,球团和烧结矿的质量百分比在径向和纵向方向上均表现出显著变化。

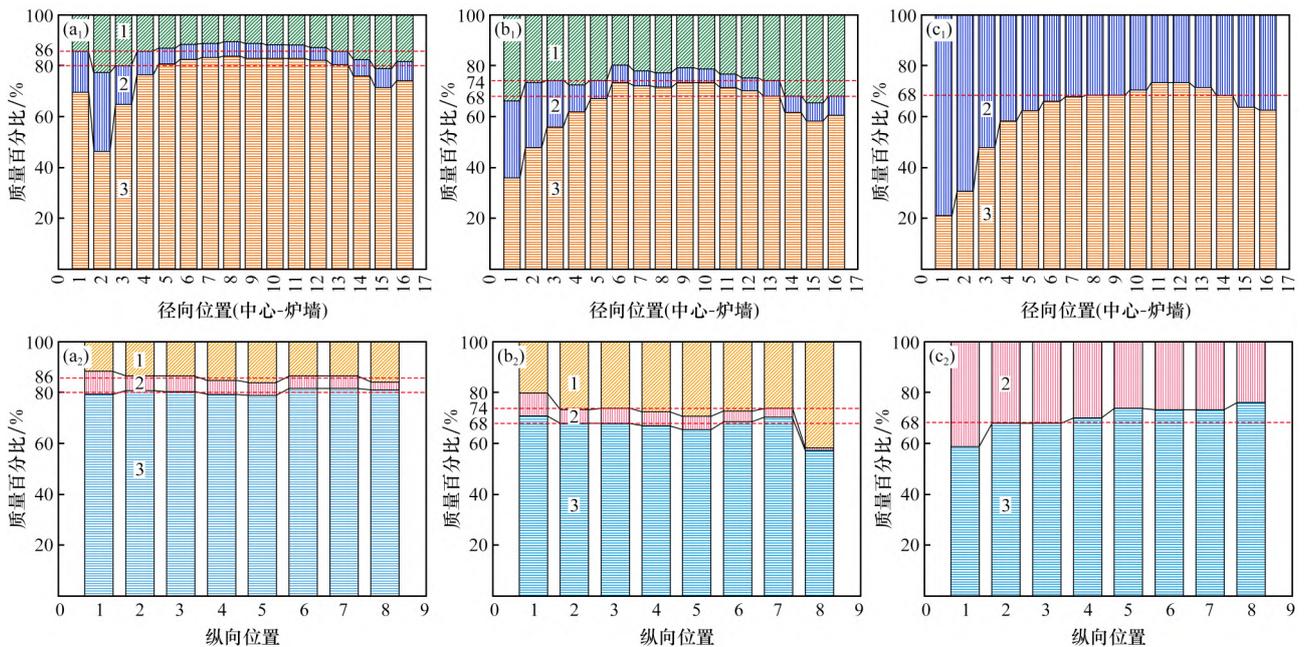
填充床的孔隙率反映了颗粒的紧密程度。在本研究中,不规则堆积层的体积通过双积分求解。



方案 1: (a₁)、(a₂)、(a₃); 方案 2: (b₁)、(b₂)、(b₃); 方案 3: (c₁)、(c₂)、(c₃)

图 3 三种综合含铁炉料结构在多环布料模式下的炉料分布情况

Fig. 3 Burden distribution under multi-ring charging mode for three combined ferrous burden compositions



方案 1: (a₁)、(a₂); 方案 2: (b₁)、(b₂); 方案 3: (c₁)、(c₂)

1—块矿; 2—球团矿; 3—烧结矿。

图 4 三种铁质炉料组合条件下径向和纵向的炉料质量百分比

Fig. 4 Burden mass percentages in radial and longitudinal directions under three combined ferrous burden compositions

孔隙率(P) 定义为床内孔隙的体积分数, 并可直接根据公式(4) 计算得出。

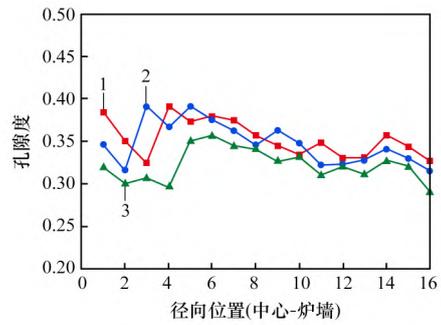
$$P = \frac{\iint_D f(x,y) d\sigma - \sum n_i v_i}{\iint_D f(x,y) d\sigma} \quad (4)$$

式中: n_i 表示第 i 种类型的粒子数量, 个; v_i 表示该类型粒子的体积, m^3 ; 这里的 $\iint_D f(x,y) d\sigma$ 指的是不规则料层体积, m^3 。

图 5 描绘了从炉喉中心至炉墙方向矿层径向孔隙率的分布情况。当球团矿质量比恒定为 6% 时, 随着烧结矿占比从 80% 降至 68%, 孔隙率变化并不显著。当球团矿质量比达到 32% 时, 随着球团矿向炉喉中心滚动, 孔隙率降至 0.32。此外, 矿层的孔隙率会随着综合含铁炉料中球团矿质量比的增加而降低。当球团矿质量比增加到 32% 时, 矿层孔隙率变化明显。对于那些生产球团矿能力不足的钢铁企业而言, 为了减少烧结矿的使用量, 在矿石批次不变的情况下, 可以用块矿替代减少的烧结矿。另外, 当选择用优质球团矿替代烧结矿时, 需要制定合适的装料参数, 以确保高炉料层的孔隙率。

2.2 矿焦界面的分布特征

图 6 展示了三种不同块矿配比(0、14% 和 26%)

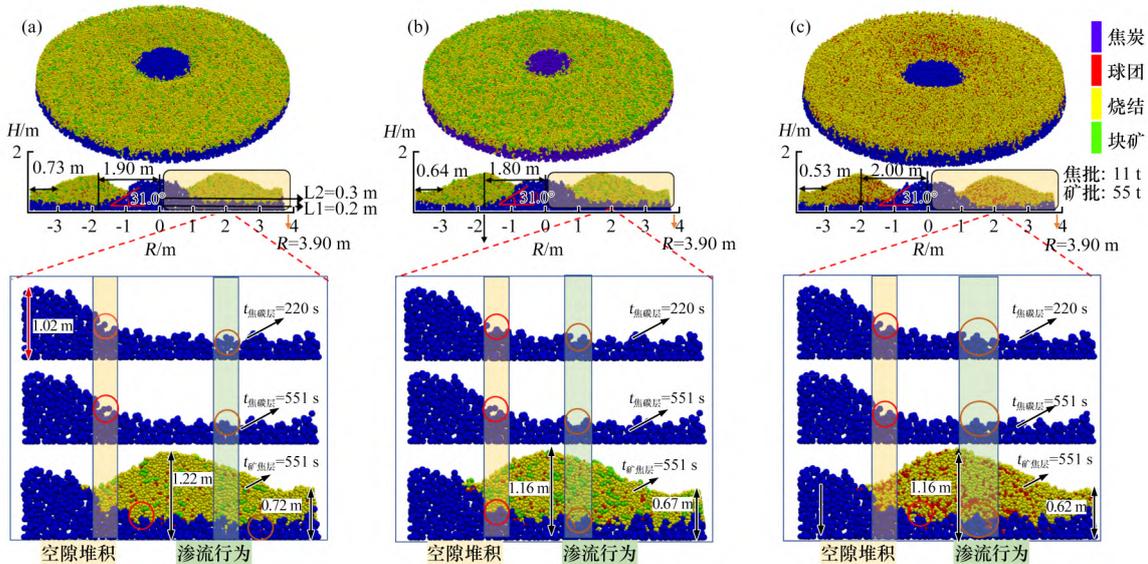


1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3。

图 5 矿层沿径向方向的孔隙率分布

Fig. 5 Porosity distribution of the ore layer along radial direction

下综合含铁炉料的矿焦层形状和矿焦界面情况。由图 6 可知, 在相同的布料矩阵下, 三种综合含铁炉料结构对应的焦层峰值高度和内安息角分别为 1.02 m 和 31°。当球团矿占比固定为 6% 时, 随着烧结矿比例从 80% 降至 68%, 矿焦层的峰值高度从 1.22 m 降至 1.16 m, 炉墙附近料堆的高度从 0.72 m 降至 0.67 m。此外, 矿焦层峰值位置到炉喉中心线的水平距离从 0.49R 减小到 0.46R。然而, 当烧结矿比例固定为 68% 时, 随着球团矿比例从 6% 增加到 32%, 矿焦层的峰值高度保持不变, 但炉墙附近料堆的高度 0.67 m 降至 0.62 m。而且, 矿焦层峰值位置到炉喉中心线的水平距离从 1.84 m 增加到 2.04 m。



(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

图 6 三种综合含铁炉料结构下矿焦层的分布情况

Fig. 6 Distribution of ore-coke layer under three combined ferrous burden compositions

此外,进一步研究了矿焦界面处的渗透行为和空隙堆积情况。在 220 s 时,初始焦炭层中焦炭堆积形成空隙结构,在焦炭层表面的焦炭颗粒之间可以清晰地观察到随机且不规则的空隙。在 550 s 时,综合含铁炉料基于相应的布料矩阵分布在焦层上,矿石颗粒明显填充了焦层内的空隙。此外,小粒度的矿石颗粒能够渗透到焦层中,增加了球团矿落入焦炭层内空隙的可能性。为了进一步研究矿焦界面效应,沿着炉喉纵向将炉料层划分为两个区域: L1(0.2 m) 和 L2(0.3 m)。由于 L2 的高度低于炉料层中焦炭的最低高度,因此可以充分研究矿石在焦炭层中的渗透行为。

图 7 展示了 L1 和 L2 截面处焦炭和矿石的分布情况(为了直观地检查矿石在焦炭层中的分布,在 L1 和 L2 处截取纵向截面的四分之一)。在纵向截面 L2 处,矿石渗透到焦炭层的情况明显可见。由于矿焦混合层的筛分现象,随着纵向高度接近 L1,仍有部分矿石颗粒渗透到该层中。矿石颗粒在焦层的渗透,进而降低了矿焦层的孔隙度。

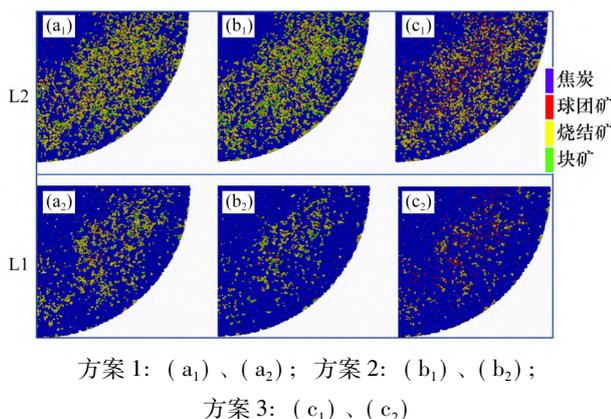
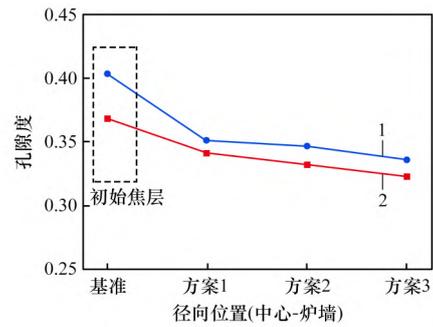


图 7 在 L1 和 L2 截面处矿层和焦层的分布情况

Fig. 7 Distribution of ore and coke layers at sections L1 and L2

图 8 展示了三种不同综合含铁炉料结构下, L1 和 L2 截面的料层孔隙率(基准点为初始焦层,即各物料为 0)。由图 8 可以看出,对于 L1 和 L2 截面,第一层焦炭的孔隙率分别为 0.407 和 0.345。L2 截面的孔隙率低于 L1 截面,这与图 7 的观察结果一致。此外,还可看出,在综合含铁炉料中,随着块矿或球团矿质量比的增加, L1 和 L2 截面的孔隙率差异减小。因此,矿石颗粒对焦炭颗粒的渗透降低了矿焦层的孔隙率。



1—纵向 L1 截面; 2—纵向 L2 截面。

图 8 在三种铁矿石混合成分条件下, L1 和 L2 下部矿层的孔隙率

Fig. 8 Porosities of burden layer at sections of L1 and L2 under three combined ferrous burden composition

由于综合含铁炉料的流动轨迹不同,三种矿石在料层中的分布情况可能会有所变化。图 9 展示了当块矿比例分别为 0、14% 和 26% 时,综合含铁炉料在径向和纵向方向上的质量百分比。由图 9 可以看出,从径向位置 R1 到 R3,综合含铁炉料的质量百分比不存在。当球团矿配比恒定为 6% 时,随着烧结矿配比从 80% 降至 68%,块矿在径向和纵向方向上的质量分布与综合含铁炉料的成分一致。综合含铁炉料颗粒的偏析主要存在于中心焦炭装入时纵向的矿焦界面处。此外,与图 6 的结果相比,中心加焦减弱了矿石颗粒在炉喉径向的偏析,但矿焦界面的空隙结构导致纵向区域矿石颗粒的明显偏析。因此,在中心布焦的情况下,小粒径的球团矿很容易落入焦炭层的空隙中,矿层中块矿的质量分布与综合含铁炉料的结构一致。

3 结 论

研究采用离散元方法对 1 800 m³ 高炉料槽中综合含铁炉料的运动行为进行了研究,考虑了不同含铁炉料的质量比以及溜槽角度等因素的影响。在全尺寸条件下,详细探讨了综合含铁炉料结构以及矿石与焦炭界面对料层分布特性的影响,得出如下结论。

(1) 中心加焦方式可最大程度的减少炉喉径向方向上综合含铁炉料的偏析现象,而在纵向方向上,矿石颗粒则倾向于在焦层的空隙部分聚集。矿石颗粒渗入焦层的内部空隙,并进一步加剧了

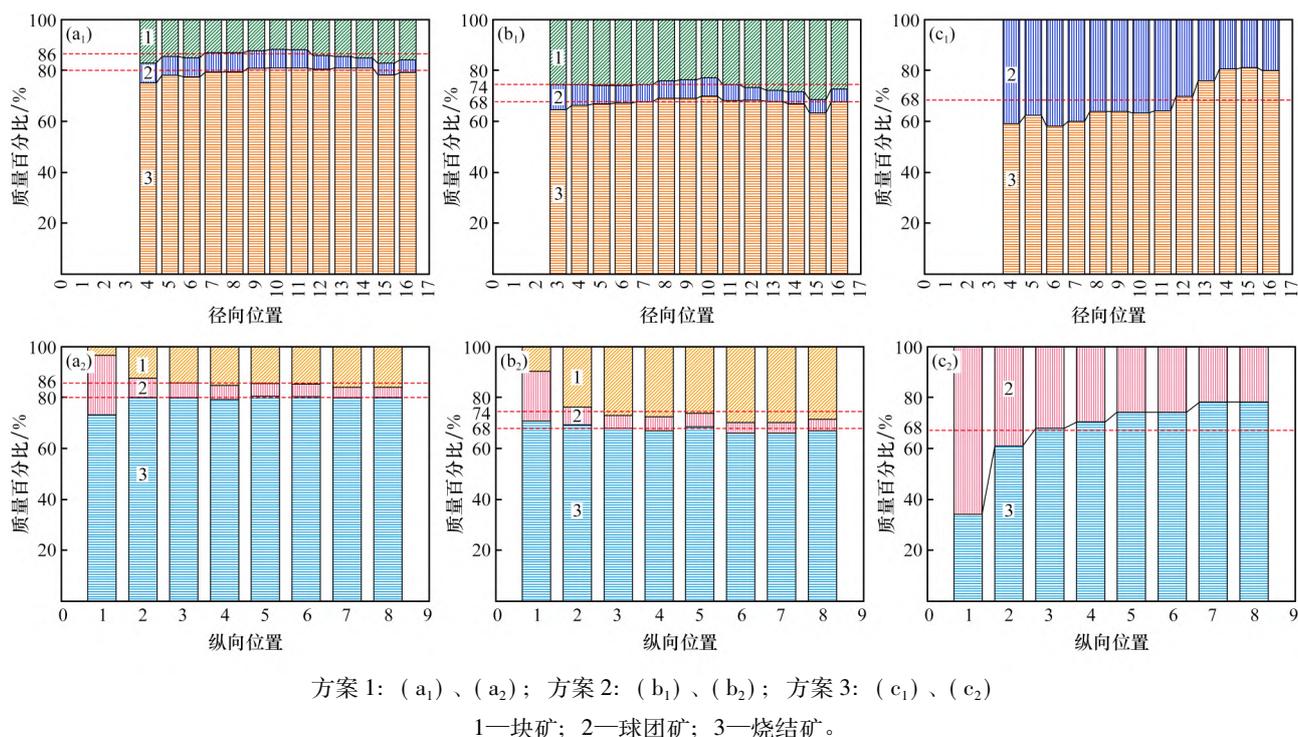


图9 沿径向和纵向的铁矿石总质量百分比

Fig. 9 Mass percentage of combined ferrous burden in radial and longitudinal directions

矿石与焦炭在界面的混合情况。此外,与不规则的烧结矿和块矿相比,小粒径的球团矿更容易穿透焦炭层。

(2) 当块矿的配比增加到26%时,矿层的整体孔隙率保持稳定。然而,当球团矿的配比增加到32%时,矿层的孔隙率则趋于降低。矿层的孔隙率受烧结矿、球团矿或块矿的组合配比以及孔隙率变化趋势的影响,其变化趋势需综合评估。

参考文献:

- [1] 潘钊彬. 碳中和背景下我国低碳炼铁技术发展现状与前景[J]. 烧结球团, 2024, 49(1): 35-41.
PAN Zhaobin. Development status and prospect of Chinese low-carbon ironmaking technology under carbon neutrality background[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(1): 35-41.
- [2] 蔡大为, 范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团, 2023, 48(4): 1-7.
CAI Dawei, FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4): 1-7.
- [3] YANG Y L, YIN Y X, WUNSCH D, et al. Development of blast furnace burden distribution process modeling and control[J]. ISIJ International, 2017, 57(8): 1350-1363.
- [4] 肖扬武, 刘强, 易正明. 碱度对烧结矿致密化行为的影响[J]. 烧结球团, 2025, 50(2): 30-37.
XIAO Yangwu, LIU Qiang, YI Zhengming. Effect of alkalinity on sinter densification behavior[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(2): 30-37.
- [5] 刘佳文, 陈铁军, 周仙霖, 等. 烧结料层透气性影响因素及其改善措施解析[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(7): 817-826.
LIU Jiawen, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Analysis of influencing factors and improving measures of permeability of sinter layer[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(7): 817-826.
- [6] ZHOU H, WU J L, HONG Z B, et al. Numerical simulation of coke collapse and its optimization during burden charging at the top of bell-less blast furnace[J]. Powder Technology, 2021, 389: 155-162.
- [7] XU W X, CHENG S S, NIU Q, et al. Effect of the main feeding belt position on burden distribution during the charging process of bell-less top blast furnace with two parallel hoppers[J]. ISIJ International, 2017, 57(7): 1173-1180.
- [8] YU Yaowei, SAXÉN, Henrik. Effect of DEM parameters

- on the simulated inter-particle percolation of pellets into coke during burden descent in the blast furnace, ISIJ International, 2012, 52: 788 - 796.
- [9] MIO H, KOMATSUKI S, AKASHI M, et al. Validation of particle size segregation of sintered ore during flowing through laboratory-scale chute by discrete element method [J]. ISIJ International, 2008, 48 (12) : 1696 - 1703.
- [10] 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.
- [11] E Dianyu. Numerical investigation of mixed layer effect on permeability in a dynamic blast furnace [J]. Engineering Reports, 2020, 2(5) : e12166.
- [12] MIO H, KADOWAKI M, MATSUZAKI S, et al. Development of particle flow simulator in charging process of blast furnace by discrete element method [J]. Minerals Engineering, 2012, 33: 27 - 33.
- [13] 滕召杰, 程树森, 赵国磊. 高炉中心加焦对气流分布及煤气利用的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(12) : 9 - 14.
- TENG Zhaojie, CHENG Shusen, ZHAO Guolei. Influence of central coke charging on the gas distribution and utilization for a blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(12) : 9 - 14.
- [14] YU Y W, SAXÉN H. Particle flow and behavior at bell-less charging of the blast furnace [J]. Steel Research International, 2013, 84(10) : 1018 - 1033.
- [15] XU B H, YU A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(16) : 2785 - 2809.
- [16] WU Shengli, XU Haifa, WANG Guojun, et al. Basic study of modern blast furnace using natural lump ores rationally [J]. Chinese Journal of Engineering, 2007, 29(3) : 320 - 324.
- [17] 宁泽尧, 张晓辉, 王楠. 提高球团矿配比对高炉布料的影响及其优化研究 [J]. 烧结球团, 2025, 50(1) : 95 - 102.
- NING Zeyao, ZHANG Xiaohui, WANG Nan. Effect of increasing pellet ratio on blast furnace burden distribution and its optimization research [J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(1) : 95 - 102.
-
- (上接第 26 页)
- LI Shaohua, ZHU Mingliang, ZHANG Lidong, et al. Analysis of three-component radial mixing evaluation methods in rotary retorting [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32 (6) : 1224 - 1229.
- [15] VAN PUYVELDE D R, YOUNG B R, WILSON M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis [J]. Powder Technology, 1999, 106(3) : 183 - 191.
- [16] GUPTA A, KATTERFELD A, SOETEMAN B, et al. Discrete element study mixing in an industrial sized mixer [C] // 6th World Congress on Particle Technology, WCPT 2010. Nürnberg Messe GmbH, 2010: 1 - 4.
- [17] 王超, 曹泽琦, 李文, 等. 基于离散元的氧化铝造粒粉堆积仿真研究 [J]. 中国陶瓷工业, 2021, 28(6) : 1 - 6.
- WANG Chao, CAO Zewen, LI Wen, et al. Simulation study on accumulation of alumina granulation powders based on discrete element method [J]. China Ceramic Industry, 2021, 28(6) : 1 - 6.
- [18] 戚江涛, 邓越云, 张纪元, 等. 基于 EDEM 的厩肥与颗粒肥混合排肥装置设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4) : 1 - 9.
- QI Jiangtao, DENG Yueyun, ZHANG Jiyuan, et al. Design and experiment of mixed fertilizer discharging device for manure and granular fertilizer based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4) : 1 - 9.