

doi:10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.009

新型 DRI - 挡板布料器布料过程的数值模拟

李海峰, 游洋, 邹宗树, 蔡九菊

(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: COREX 熔化气化炉炉顶布料设备由煤-溜槽和 DRI-挡板两种布料器组成, 其中 DRI-挡板属于新型布料器, 布料规律尚不明确. 通过离散单元法(DEM)建立了 DRI-挡板布料过程的数学模型, 通过该模型分析了 DRI-挡板的操作参数对布料过程带来的影响. 其中包括考察了挡板角度对布料落点位置的影响, 获得了布料档位与挡板角度的对应关系. 还考察了料堆的形成过程和单一物质多粒度混合布料形成的料堆内部偏析情况, 获得了不同档位半径物料的粒度偏析信息. 同时也考察了矿石和焦炭混合布料过程, 获得了矿焦的径向分布规律. 研究结果为 COREX 现场合理调节布料模式提供参考依据.

关键词: 挡板布料器; 离散单元法; 布料规律; 混合布料; 数值模拟

中图分类号: TF 557 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)06-0800-06

Numerical Simulation on the Charging Process of New DRI-Flap Distributor

Li Hai-feng, YOU Yang, ZOU Zong-shu, CAI Jiu-ju

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The charging system of COREX melter gasifier consists of one coal-gimbal distributor and eight DRI-flap distributors. As the DRI-flap distributor is a new type of distributor, few research is found to help to understand the charging process of DRI-flap distributor in depth. In this study, a mathematical model of charging process of the DRI-flap distributor was developed based on discrete element method and was used to investigate the effect of operating parameters during charging process. The relationship between the flap angle and radial position was obtained when studying the effect of flap angle on the landing position. After examining the formation process and internal segregation of the stock pile, the size segregation in the radial direction was revealed. Meanwhile, the distribution of ore and coke in the radial direction was given during their mixture charging process. These modeling results can guide us to adjust charging mode in COREX production field.

Key words: DRI-flap distributor; discrete element method; charging law; mixture charging; numerical simulation

COREX 是奥钢联开发的一种用煤和球团(块矿)生产铁水的炼铁新工艺^[1], 是最早实现工业化的一种非高炉熔融还原炼铁工艺, 其上部还原竖炉和下部熔化气化炉在布料过程均涉及到装料设备. 其中熔化气化炉炉顶采用煤-溜槽布料器和 DRI(直接还原铁)-挡板布料器两种布料设备, 通过调节布料模式来完成布料过程. 冶金

工作者经过多年研究已掌握溜槽布料器的布料规律^[2-6], 但针对气化炉涉及的 DRI-挡板布料器的布料规律的研究文献很少, 由上部竖炉排出的 DRI 和焦炭经挡板布料器如何实现均匀布料, 是实现熔化气化炉稳定运行的关键操作, 因此对新型 DRI-挡板布料器进行研究具有现实意义.

关于入炉物料的布料规律的研究方法主要有

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAE04B01, 2011BAE04B02); 国家自然科学基金资助项目(51104037).

作者简介: 李海峰(1982-), 男, 河北邯郸人, 东北大学博士后研究人员; 邹宗树(1958-), 男, 山东章丘人, 东北大学教授, 博士生导师; 蔡九菊(1948-), 男, 辽宁锦州人, 东北大学教授, 博士生导师.

物理实验模拟^[2-3]、数学模型模拟^[4-5]和工厂在线实测分析^[6]三大类。数值模拟研究中的离散单元法 (DEM) 是 Cundall^[7] 于 1979 年首次提出的, 这种方法拥有计算颗粒的宏观力学和信息的优势。随着计算机算法的不断优化以及计算机性能的普遍提高, DEM 方法在研究颗粒流动行为的发展上再次显出其独有的优势。本文以气化炉新型的 DRI - 挡板布料器为研究对象, 采用 DEM 方法建立新型布料器的数学模型, 模型的准确性已通过物理实验的结果得到了验证^[8]。本文主要从数值模拟方面对其布料规律进行详细研究, 基于离散单元法构建的 COREX 挡板布料器的数学模型, 从宏观上可研究布料操作参数对布料过程带来的影响, 从微观尺度上可分析料堆内部物料的粒度偏析和矿焦分布的详细信息。

1 挡板布料器 DEM 数学模型建立

1.1 研究对象 - 挡板布料器

DRI 布料器的功能结构如图 1 所示, 新型布料器主要由垂直下料管、倾斜下料管和挡板组成, 物料通过上部的螺旋排料装置将物料送入垂直下料管, 物料经过缓冲管进入倾斜下料管, 与挡板碰撞后速度方向发生改变, 由于挡板角度的不同可实现将物料分配到不同径向位置的功能。即新型布料器主要通过调节挡板角度完成由上部竖炉产生的物料导入到下部气化炉内任意位置的功能。挡板为可拆卸装置, 根据现场要求, 亦可更换不同形状的挡板。

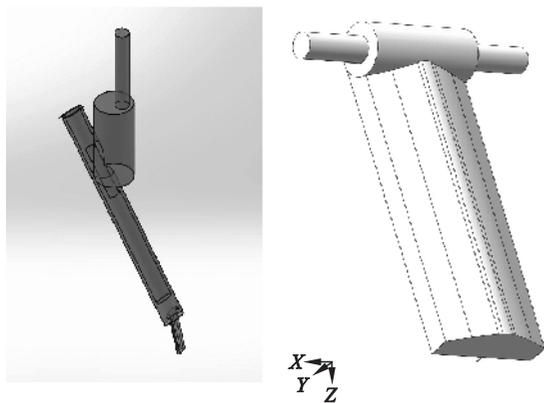


图 1 DRI 布料器的结构图

Fig. 1 Structure diagrams of DRI-flap distributor

1.2 DEM 方法简介和模拟参数的确定

离散单元法适用于模拟散体物料的运动, 通过对每一个颗粒进行受力分析, 获得颗粒的运动行为。模型中颗粒与颗粒发生碰撞时的作用力如

图 2 所示, 其中颗粒 i, j 均受到两种力和两种力矩的作用。

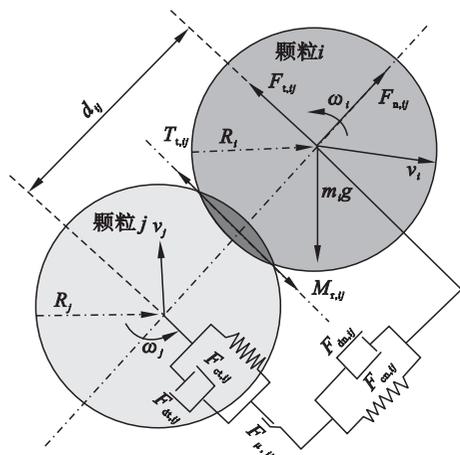


图 2 颗粒间的受力分析图

Fig. 2 Schematic diagram of forces between two particles

作用力包括颗粒自身重力、颗粒 - 颗粒或颗粒 - 壁面之间的接触力。力矩包括切向力矩和滚动摩擦力矩。根据牛顿第二定律, 可获得颗粒的运动方程如下:

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

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

式中符号的意义及颗粒 - 颗粒或颗粒 - 壁面的接触力及力矩的计算公式^[9]见表 1。实际生产中矿石、焦炭等入炉物料的颗粒数高达几千万, 甚至上亿, 计算在实验室是无法完成的, 因此, 本文采用按照相似原理缩小的挡板布料器物理实验装置的几何区域作为数值模拟区进行计算, 并适当改变颗粒粒度, 以减小计算量和缩短计算时间。数学模型相关参数列于表 2 中。

2 结果分析与讨论

2.1 挡板布料器档位与挡板角度对应关系

挡板布料器布料规律的影响参数很多, 现场布料制度采用布料档位作为控制参数, 考虑到挡板角度是改变炉料分配位置的关键因素, 本文首先考察挡板角度与档位半径 (即落点位置) 的对应关系, 为研究不同档位下的料堆形状、料堆结构等信息确定基本参数。通过建立的 DEM 挡板布料器数学模型, 不断调节挡板角度, 使颗粒到达指定落点位置, 得到现场 LIR04624 操作线 (即料位

高度 14.0 m)下布料档位与挡板角度的关系,如图 3 所示.

表 1 作用在颗粒 i 上的力和力矩的计算公式
Table 1 Components of forces and torques acting on particle i

符号	计算方程
$F_{cn\ ij}$	$-4/3E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{1.5} \hat{n}$
$F_{dn\ ij}$	$-\eta_n (6m_{ij}E^* \sqrt{R^*} \delta_n)^{0.5} V_{n\ ij}$
$F_{ct\ ij}$	$-\mu_s F_{cn\ ij} (1 - (1 - \delta_{t\ ij}/\delta_{t\ ij\ max})^{1.5}) \hat{\delta}_t$
$F_{dt\ ij}$	$-\eta_t (6\mu_s m_{ij} F_{cn\ ij} \sqrt{1 - \delta_{t\ ij}/\delta_{t\ ij\ max}}/\delta_{t\ ij\ max})^{0.5} V_{t\ ij}$
$F_{\mu\ ij}$	$-\mu_s F_{cn\ ij} \hat{\delta}_t$
$T_{t\ ij}$	$R_{ij} (F_{ct\ ij} + F_{dt\ ij})$
$M_{\tau\ ij}$	$\mu_r F_{cn\ ij} \bar{\omega}_{t\ ij}$

$\delta_{t\ ij\ max} = \mu_s (2 - \nu)/2(1 - \nu)$, $E^* = E/2(1 - \nu)$, $\hat{n} = \frac{R_i}{|R_i|}$, $\bar{\omega}_{t\ ij} = \frac{\omega_{t\ ij}}{|\omega_{t\ ij}|}$, $\hat{\delta}_t = \frac{\delta_t}{|\delta_t|}$, $V_{t\ ij} =$
 其中: $V_{ij} - V_{n\ ij}$, $V_{n\ ij} = (V_{ij} \cdot \hat{n}) \hat{n}$, $V_{ij} = V_j - V_i + \omega_j \times R_j - \omega_i \times R_i$, $1/R^* = 1/|R_i| + 1/|R_j|$. 切向力 $F_{ct\ ij} + F_{dt\ ij}$ 在 $\delta_{t\ ij} > \delta_{t\ ij\ max}$ 时, 应取值 $F_{\mu\ ij}$

表 2 数学模型中的主要参数
Table 2 Parameters in mathematical model

参数	球团	焦炭
直径/mm	8/10/12	14
颗粒数	48 000	8 000
剪切模量/MPa	10	216
泊松比	0.250	0.250
恢复系数(颗粒-颗粒)	0.200	0.180
恢复系数(颗粒-壁面)	0.500	0.300
滑动摩擦系数(颗粒-颗粒)	0.640	0.580
滑动摩擦系数(颗粒-壁面)	0.500	0.500
滚动摩擦系数(颗粒-颗粒)	0.075	0.125
滚动摩擦系数(颗粒-壁面)	0.180	0.250
时间步长/s	5×10^{-5}	

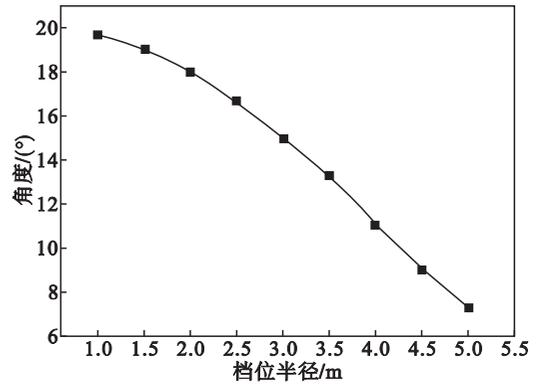


图 3 挡板角度与布料档位关系图
Fig. 3 Relationship between flap angle and radial position

研究发现, DRI 挡板角度与落点位置的计算结果与溜槽布料器的规律不完全相同. 随着布料档位的增加, 挡板角度(与竖直方向的夹角)随之减小, 但减小幅度出现先增加后减小的趋势. 从 3.5 m 到 4.0 m, 挡板角度变化幅度最大, 约为 2.32°. 出现先增加后减小趋势的主要原因是在某角度前后, 物料与挡板碰撞后速度方向发生改变. 档半径小于 4.0 m 时, 物料与挡板发生碰撞后, 其速度减小且运动方向保持不变, 但随着挡板角度的减小, 颗粒与挡板碰撞夹角变大, 碰撞能量损失增多, 造成的速度衰减也增大, 使得物料离开挡板后的水平速度变小, 需要更大的挡板角度差才能到达指定落点位置. 档半径大于 4.0 m 时, 物料与挡板发生碰撞后, 其速度方向发生改变, 且随着挡板角度的减小, 碰撞后的速度变大, 只要较小的挡板角度差就能达到指定落点位置.

2.2 料堆形成过程的模拟

相对于物理实验, DEM 布料数学模型具有其独特的优势, 即可从颗粒尺度上获得 DRI 布料的信息. 8 个 DRI 挡板布料器同时布料, 得到的布料形状与溜槽布料器单环布料结果^[10]类似, 但也存在差异, 即与溜槽布料结果相比, 挡板布料形成的料堆在圆周存在分布不均匀现象, 如图 4 所示. 作者认为其主要原因是挡板形状. 首先, COREX 现场 DRI 布料器的挡板受料面为一凸面(见图 1), 颗粒与挡板受料面碰撞后, 形成比较分散的料流, 分散在以挡板为中心的大约 45° 范围内. 8 个 DRI 挡板布料器同时布料时, 正好形成一个 360° 圆环. 模拟采用与现场一致的挡板形状, 挡板横截面形状类似球冠面的凸面, 颗粒主要与挡板的两个侧面相碰, 导致颗粒碰后主要分布在挡板中心线的两侧, 在圆周方向上不均匀.

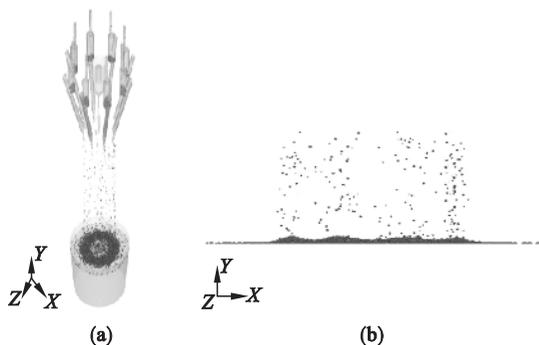


图 4 挡板布料器布料形成的料面形状

Fig. 4 Burden shape through DRI-flap distributor

(a) — 整体图 ; (b) — 局部图.

截取竖直方向上的横截面 , 分析球团矿料堆的长大过程 , 可以得到不同布料时间下的料堆形状 , 如图 5 所示 . 可以看出球团矿料堆的长大过程与煤的相似 , 主要受到料流宽度的影响 , 先形成一定宽度的料堆锥形 , 随着颗粒逐渐增加 , 在料流宽度的落点内 , 料堆逐渐长大 , 直至达到稳定内外堆角后 , 料堆继续长大 , 但内外堆角基本不变 .

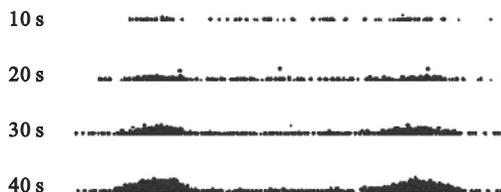


图 5 料堆长大过程

Fig. 5 Burden shape under different time

2.3 单一物质多粒度混合布料模拟

实际布料过程中 , 球团矿的粒度并不是均匀的 , 而是存在一定的粒度分布 . 本文研究了球团矿有粒度分布的条件下 , 经 DRI 挡板布料器布料形成料堆中颗粒的偏析情况 . 模拟选取 8 ~ 12 mm 的球团矿颗粒 , 其中 8 , 10 , 12 mm 的球团矿颗粒数各占 1/3 , 获得了不同档位下的偏析情况 , 模拟结果如图 6 所示 . 通过对料堆结构分析可知 , 大颗粒主要聚集在偏向炉墙的料堆一侧 , 而小颗粒主要聚集在偏向炉心的料堆一侧 . 造成此现象的主要原因是相对于小颗粒而言 , 大颗粒具有较大的滚动性 , 故物料在 DRI 倾斜管中发生偏析 , 小颗粒紧贴壁面运动 , 大颗粒在小颗粒表面上滚动 , 小颗粒由于受到壁面的摩擦 , 速度衰减幅度大于大颗粒 , 且与挡板的碰撞点低于大颗粒 , 故大颗粒被弹回的速度大于小颗粒 , 最终造成大颗粒聚集于炉墙处 , 而小颗粒聚集于炉心处 . 同时 , 随着档位半径的增加 , 料堆逐渐减小 , 料层厚度依次降低 , 分析其原因 , 主要是由于档位增加形成的料环变大 ,

物料分布在更广的区域 , 因而相同的物料体积下形成的料堆变小 , 料层厚度降低 .

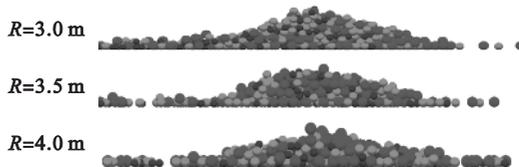


图 6 不同布料档位颗粒的偏析结果

Fig. 6 Size segregation under different radial positions

2.4 多元物质混合布料模拟

实际生产中 , 上部预还原竖炉将球团矿还原为金属化率为 80% 以上的 DRI (海绵铁) , 随竖炉中加入的焦炭一起通过竖炉下部的螺旋排料机送入 DRI - 挡板布料器 , 并通过调节 DRI - 挡板布料器的挡板角度将其布至熔化气化炉指定位置 .

挡板布料 DEM 数值模拟选择档位半径 1.5 , 2.5 , 3.5 m 模拟了球团矿和焦炭混合布料的过程 , 形成料堆的截面形状如图 7 所示 .

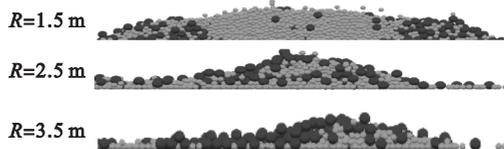


图 7 不同 DRI 布料档位下的料面形状

Fig. 7 Burden shape under different radial positions

根据不同布料档位下的料面形状分析可知 , 当布料档位为 1.5 m 时 , 炉料会在气化炉心聚集 , 并未形成“圆环状”的料堆 , 其原因是料流宽度 . 研究发现物料落到档位半径 1.5 m 处后 , 由于颗粒有向炉心方向的分速度 , 使得颗粒在料堆上继续向炉心运动 , 从而导致颗粒在炉心聚集 . 研究还发现与单一物料模拟相同的结果 , 即随着布料档位半径的增大 , 料层的厚度明显减小 .

图 8 为不同布料档位半径下的矿焦比分布

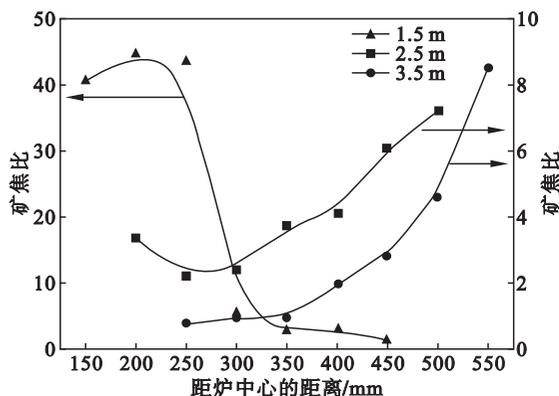


图 8 各档位矿焦比分布

Fig. 8 Distribution of the ratio of ore to coke under different radial positions

图. 布料档位为 1.5 m 时, 其矿焦比沿中心至炉墙逐渐降低, 其值在中心区域远大于靠近炉墙区域; 2.5 和 3.5 m 时, 矿焦比变化趋势与 1.5 m 的相反, 其矿焦比沿中心至炉墙逐渐增大, 但其变化幅度小于 1.5 m 的. 模拟结果表明: 档位较低时, 球团主要分布在靠近中心的区域, 焦炭主要分布在靠近炉墙的位置; 档位较高时, 球团主要分布在靠近炉墙的位置, 而焦炭则主要分布在靠近中心的位置.

为了详细分析炉内物料的偏析情况, 引入偏

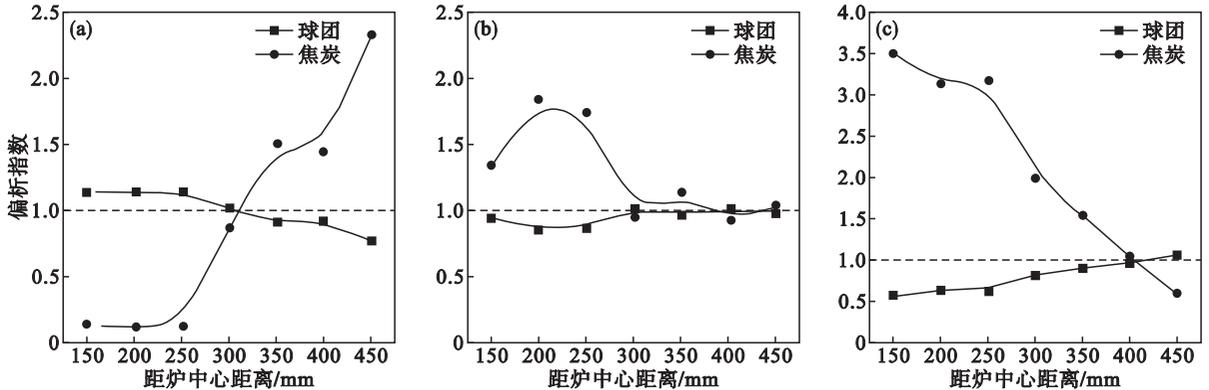


图 9 不同 DRI 布料档位下的料堆偏析情况

Fig. 9 Segregation index under different radial positions

(a)— $R=1.5$ m; (b)— $R=2.5$ m; (c)— $R=3.5$ m.

当档位半径较小时, 由于 DRI-挡板布料器的挡板横截面形状为近似球冠面, 经过挡板两侧边缘的球团与挡板不发生碰撞, 直接落在靠近炉心的区域, 而经过挡板中心的球团则会与之碰撞, 反弹至靠近炉墙的位置. 由于焦炭粒径约为球团粒径的两倍, 焦炭与挡板碰撞的几率大大增加, 基本上全部焦炭均被反弹到靠近炉墙的区域, 从而造成小粒度的球团主要分布在靠近中心的区域, 而大粒度的焦炭主要分布在靠近炉墙的区域.

当档位半径较大时, 球团和焦炭与挡板碰撞的概率基本等于 100%. 相对于焦炭, 球团与挡板的碰撞恢复系数较大, 碰撞时能量损失小, 反弹速度比焦炭速度大, 因而球团主要分布在靠近炉墙的区域, 而焦炭则主要分布在靠近炉心的区域.

3 结 论

1) 基于离散单元法构建了适合 COREX 挡板布料器的数学模型, 获得了现场布料制度下布料档位半径与挡板角度的关系, 为现场合理调节挡板角度提供参考依据.

2) 模型模拟了料堆的形成过程, 发现新型布料器形成料堆的料面形状类似于溜槽布料器单环

析指数来定量分析不同档位半径下的炉料偏析信息, 偏析指数由式(3)计算获得^[11].

$$SI_k = FM_k / IM_k \quad (3)$$

式中 FM_k 为 k 类颗粒在料堆中的质量分数, IM_k 为 k 类颗粒占总物料的质量分数, k 为颗粒的种类.

偏析指数计算结果如图 9 所示. 档位较小时, 焦炭主要聚集在外堆角一侧, 矿石在内外堆角均有聚集, 但内堆角一侧稍多于外堆角一侧; 档位较大时, 焦炭主要聚集在内堆角一侧, 矿石在内外堆角均有聚集, 但外堆角一侧稍多于内堆角一侧.

布料时形成的圆环形状, 但料堆在圆周方向上存在分布不均匀的现象, 这一点有别于溜槽布料器形成的料堆.

3) 模型模拟了单一物质多粒度混合布料过程, 发现在档位 3.0~4.5 m 之间的料堆结构具有大颗粒聚集在炉墙一侧、小颗粒聚集在炉心一侧的特点.

4) 模型模拟了多元物质混合布料的情况, 结果发现: 档位较小时, 焦炭主要聚集在外堆角一侧, 矿石在内外堆角均有聚集, 但内堆角一侧稍多于外堆角一侧; 档位较大时, 恰好相反.

参考文献:

- [1] 方觉. 非高炉炼铁工艺与理论[M]. 北京: 冶金工业出版社 2010.
(Fang Jue. The technology and theory of non-blast furnace ironmaking[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press 2010.)
- [2] Liu S D, Zhou Z Y, Dong K J, et al. Numerical investigation of burden distribution in a blast furnace[J]. *Steel Research International* 2015, 86(6): 651-661.
- [3] Wright B, Zulli P, Zhou Z Y, et al. Gas-solid flow in an ironmaking blast furnace—I: physical modeling[J]. *Powder Technology* 2011, 208(1): 86-97.

(下转第 809 页)