

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180131

并罐式无钟高炉布料过程偏析优化措施

徐文轩¹, 程树森¹, 牛 群¹, 董志宝², 陈艳波²

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司炼铁作业部, 河北 唐山 063200)

摘 要: 基于国内某5 500 m³高炉,建立了并罐式无钟炉顶系统三维几何模型,利用离散单元法对高炉炉料从矿焦槽运动至料面全过程进行了分析,并通过1:1模型试验对计算结果进行了验证。此外,分别研究了光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽等4种溜槽结构和600、650和730 mm等3种喉管直径对布料过程落点偏析和流量偏析的影响。结果表明,计算结果与试验结果基本吻合。使用方溜槽有利于改善并罐高炉布料过程中的落点偏析和流量偏析,同时,溜槽上的料磨料结构有利于进一步改善偏析程度。使用600 mm喉管直径时也有利于改善并罐高炉布料过程中的落点偏析和流量偏析,在喉管内不堵料的情况下,使用尽可能小的喉管有利于改善偏析。

关键词: 并罐; 高炉; 布料; 偏析; 离散单元法

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)10-0024-08

Optimization measures of segregation during charging process of bell-less top blast furnace with two parallel hoppers

XU Wen-xuan¹, CHENG Shu-sen¹, NIU Qun¹, DONG Zhi-bao², CHEN Yan-bo²

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Ironmaking Department, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: Based on an 5 500 m³ blast furnace in China, a three dimensional geometrical model of bell-less top system with two parallel hoppers was established, and the motion process of burdens from the bunker to the stock surface was analyzed by the discrete element method, and the calculated results were verified by a 1:1 scale model experiment. In addition, the effect of chute structures, including the smooth semicircular chute, the rough semicircular chute, the smooth rectangular chute and the rough rectangular chute, and the central throat tube diameter, such as 600, 650 and 730 mm, on the flux segregation and the falling point segregation were also investigated. The calculated results show a well agreement with the experimental results. The rectangular chute is benefit to improve the falling point segregation and the flux segregation during the charging process of the blast furnace with two parallel hoppers. Meanwhile, the rock box structure in the chute is also favor to improve the segregation further. Using the 600 mm central throat tube is helpful to improve the falling point segregation and the flux segregation during the charging process of blast furnace with two parallel hoppers. In the case of unplugging in the throat, it is helpful to improve the segregation by using the smallest tube.

Key words: parallel hopper; blast furnace; burden charging; segregation; discrete element method

高炉布料过程,即炉料流经矿焦槽、皮带、料罐、中心喉管和旋转溜槽运动至料面的过程。而炉料在运动过程中,由于炉料自身特性和设备结构影响,炉料经旋转溜槽布入料面会产生偏析,进而影响高炉内炉料分布。高炉是一个由炉料下降运动和气体上升运动组成的逆流多相复杂反应器。近年来,随着生态环境的日益恶化,炼铁工作者面临

着巨大的挑战,国内高炉容积也不断大型化,以提高劳动生产率、降低炼铁成本^[1-2]。随着高炉大型化,炉缸直径和炉喉直径也相应增大,对高炉上部和下部操作要求也更高。高炉内煤气流分布主要由炉内炉料分布所决定,而炉内炉料分布又主要由上部制度所决定,因此,上部调剂也逐渐变得越来越重要。目前,国内大多数高炉炉顶系统主要分为

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2017YFB0304300, 2017YFB0304302)

作者简介: 徐文轩(1993—),男,博士生; **E-mail:** xuwenxuan_ustb@126.com; **收稿日期:** 2018-03-28

通讯作者: 程树森(1964—),男,博士,教授; **E-mail:** chengsusen@metall.ustb.edu.cn

并罐式和串罐式无钟炉顶。由于并罐式无钟炉顶系统具有赶料能力强和建设成本低等优点,因此被国内大多数高炉所采用,如宝钢 1 号 4 966 m³ 高炉、武钢 5 号 4 350 m³ 高炉和首钢京唐 1 号和 2 号 5 500 m³ 高炉等。在并罐式无钟炉顶布料过程中,炉料流经中心喉管时会偏行于一侧,布入料面后会产生蛇形偏析。因此,对于大型高炉,减少并罐式无钟炉顶高炉布料过程产生的偏析是炼铁工作者亟待解决的问题,这对大型高炉稳定顺行至关重要。

对于并罐式无钟炉顶的固有缺点,炼铁工作者以及研究学者对并罐式无钟炉顶高炉布料进行了大量研究,其研究方法主要为缩小比例模型试验^[3-7]、单颗粒数学模型^[8-14]和离散元仿真^[15-25]。SHI Lin 等^[16-31]通过建立单颗粒数学模型研究了并罐布料过程中的流量偏析和落点偏析。滕召杰等^[10]基于单颗粒数学模型,发现并罐高炉布料时料面中心与高炉中心不重合。王波等^[32-33]结合生产实践探讨了并罐布料过程中的偏析以及改善措施。并罐高炉布料过程中,炉料在料面周向上的落点集合并非圆形,称之为落点偏析。而炉料在料面周向上的质量分布不均匀,则称之为流量偏析。在高炉布料过程中,当节流阀开度不变时,炉料在料面落点处质量流量保持一致。因此,落点偏析影响的是炉料落点远近,而流量偏析影响的是料面料层厚度不均匀。尽管前人对布料过程中落点偏析和流量偏析做了大量研究,但缺乏系统的改善措施。

本文基于国内某 5 500 m³ 高炉,利用离散单元法分别研究了溜槽结构(光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽)和中心喉管直径大小(600、650 和 730 mm)对布料过程落点偏析和流量偏析程度的影响,详细分析了并罐高炉布料过程中产生落点偏析和流量偏析的原因,并系统提出了并罐高炉布料偏析改善措施。

1 模型及边界条件

1.1 几何模型

本文基于国内某 5 500 m³ 高炉,建立了并罐式无钟炉顶系统三维几何模型,主要包括矿焦槽、皮带、料罐、中心喉管、溜槽和炉喉,如图 1 所示。

1.2 数学模型

在数值计算过程中,离散单元法将炉料颗粒简化为相互独立的离散单元,颗粒间相互接触采用非黏性接触软球模型,两颗粒碰撞时接触模型由阻尼器、弹簧和滑动摩擦器组成,如图 2 所示,颗粒发生

的平动和转动由其与相邻颗粒或墙壁间的相互作用确定,控制方程见式(1)和式(2)。颗粒所受的力包括重力 $m_i g$ 、颗粒 i 与颗粒 j 间的法向接触力 $F_{cn,ij}$ 和切向接触力 $F_{ct,ij}$ 、法向阻尼力 $F_{dn,ij}$ 和切向阻尼力 $F_{dt,ij}$ 、切向转矩 $T_{t,ij}$ 和摩擦转矩 $T_{r,ij}$,切向转矩是由切向力引起颗粒 i 发生转动的力矩,滚动摩擦力矩是阻止颗粒 i 发生转动的力矩。

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

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

式中: m_i 、 v_i 、 I_i 和 ω_i 分别为颗粒 i 的质量、平动速度、转动惯量和转动速度。

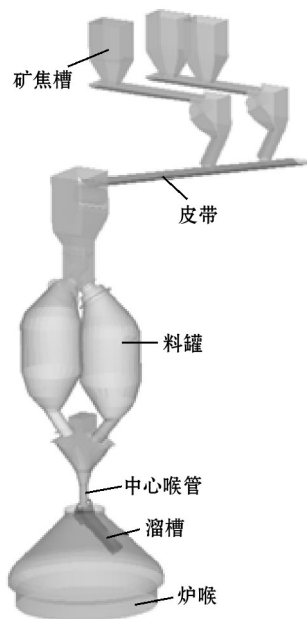


图 1 并罐式无钟炉顶几何模型

Fig. 1 Geometrical model of bell-less top system with two parallel hoppers

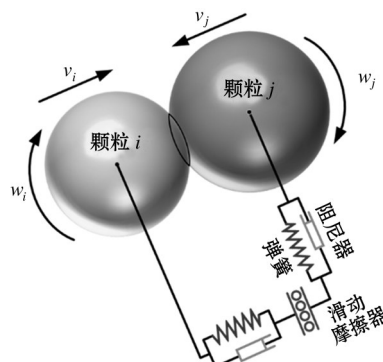


图 2 颗粒间接触模型示意图

Fig. 2 Schematic of contact model between particles

1.3 边界条件

在计算过程中,炉料类型采用焦炭,计算时颗

粒粒径与实际入炉焦炭粒径相同,焦炭粒度分布见表1,计算所用材料物性参数见表2。多环布料过程中,溜槽倾角由大向小转变,炉料落点位置也由料面边缘向中心移动,其布料矩阵见表3。由于生产过程中初始料面难以确定,故在计算过程中将焦炭布入水平料面。计算初始时焦炭在矿焦槽内随机生成,在重力作用下到达上料主皮带,完全装入左料罐后打开料流节流阀,最终经溜槽布入料面。计算过程中,料线为1.3 m,溜槽转速为8.5 s/r,时间步长为 2×10^{-4} s,计算总时间步数为 1.75×10^6 步。

表1 计算所用焦炭粒度分布

Table 1 Size distribution of coke in calculation			
粒径/mm	质量/kg	质量分数/%	颗粒数量
<25	1 196.80	3.52	188 487
25~40	3 196.00	9.40	160 555
40~60	14 892.00	43.80	207 927
60~80	11 107.80	32.67	57 705
>80	3 607.40	10.61	9 519
合计	34 000.00	100.00	624 193

表2 计算所用材料物性参数

Table 2 Physical properties of materials in calculation			
材料类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/Pa	泊松比
焦炭	1 050	2.2×10^7	0.22
壁面	4 500	5.0×10^9	0.30

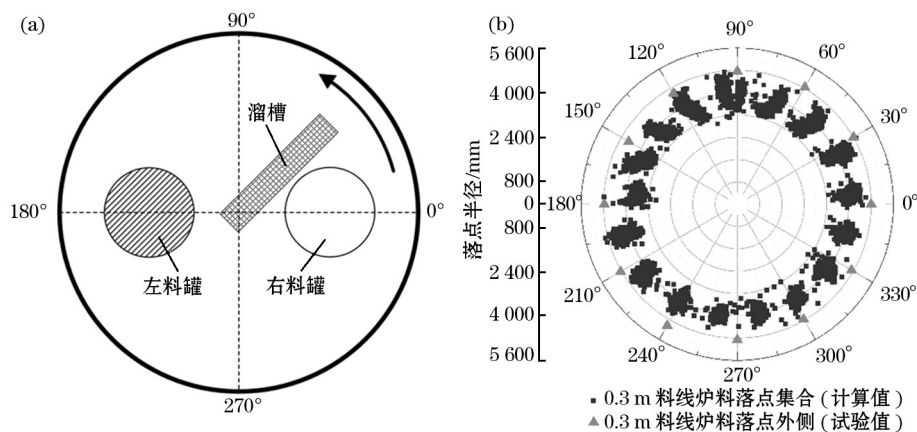
表3 计算所用焦炭布料矩阵

Table 3 Charging matrix of coke in calculation								
项目	数据							
角度/(°)	37	35	33	30	27	24	18	9.5
环数	6	3	2	2	2	1	1	3.0

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为验证离散元计算的可靠性,本文将计算结果与1:1模型试验结果进行对比。圆溜槽倾角为 37° 时0.3 m料线落点半径计算值与试验值对比如图3所示。其中黑色方形点为计算结果,每个黑色方形点代表每个颗粒在0.3 m料线时的落点。由于在试验过程中不可能记录0.3 m料线时每个颗粒的落点半径,故在炉喉周向12个方向上记录了料流宽度最外侧点位置,如图3(b)中三角形点所示。由图3可知,试验值与计算值基本吻合,证明了离散元计算的可靠性。同时,从计算结果中可以得出,在炉喉周向不同方位上炉料的料流宽度不同,在 90° 时料流宽度较大,而在 270° 料流宽度较小,这是由于不同方位时炉料在圆溜槽出口处偏转程度不同所致,如图4所示。偏转程度是指炉料在溜槽运动时由于受到科氏力的作用,其在溜槽内的运动轨迹与溜槽母线不平行。炉料在圆溜槽出口处偏转程度越大,则料流宽度越小;反之,炉料在圆溜槽出口处偏转程度越小,则料流宽度越大。



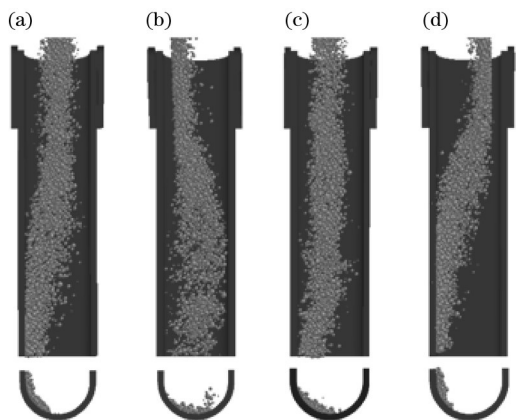
(a) 炉顶系统俯视图; (b) 试验结果与计算结果对比。

图3 圆溜槽倾角为 37° 时0.3 m料线炉料落点半径计算值与试验值对比Fig. 3 Comparison of 0.3 m stock level burden falling point between calculated results and experimental results for a chute tilting angle at 37°

2.2 溜槽结构对料面炉料分布偏析的影响

为研究不同溜槽结构对料面炉料分布偏析的影响,分别采用国内常用的光面圆溜槽、料磨料圆

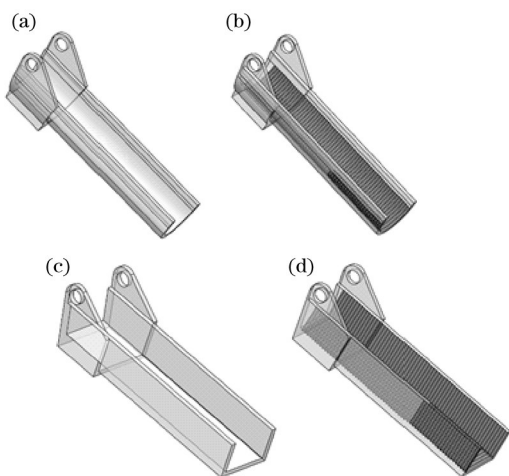
溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽等4种溜槽结构,如图5所示。其中料磨料溜槽与光面溜槽的主要区别为料磨料溜槽会在内衬上安装键槽,用来储存一



(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=90^\circ$; (c) $\beta=180^\circ$; (d) $\beta=270^\circ$ 。

图 4 炉料在光面圆溜槽内运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectory of burden on smooth semicircular chute

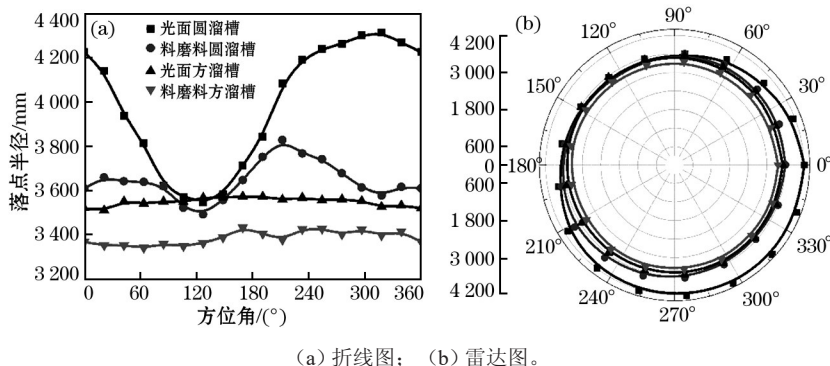


(a) 光面圆溜槽; (b) 料磨料圆溜槽;

(c) 光面方溜槽; (d) 料磨料方溜槽。

图 5 不同溜槽结构示意图

Fig. 5 Schematic of different chute structures



(a) 折线图; (b) 雷达图。

图 6 溜槽结构对 37°倾角 0.3 m 料线炉料落点半径的影响

Fig. 6 Effect of chute structure on 0.3 m stock level burden falling point for a chute tilting angle at 37°

同样,为分析溜槽结构对料面炉料流量偏析的影响,将炉喉沿圆周方向等面积划分为 12 个扇形区域,统计每个区域内的炉料总质量。不同溜槽结构

小部分炉料,下次炉料从中心喉管落至溜槽时会与储存在键槽内的炉料碰撞,而不是直接与溜槽衬板产生碰撞,以此来达到延长溜槽寿命的目的。

为分析不同溜槽结构对炉料落点偏析的影响,分别计算了使用不同溜槽结构时炉料在 37°倾角 0.3 m 料线周向不同方位角的落点半径,结果如图 6 所示。从图中可以看出,使用料磨料方溜槽和光面方溜槽时,炉料落点半径在料面周向上差异较小,而使用光面圆溜槽时炉料落点半径在料面周向上差异最大。而且使用光面圆溜槽位于方位角 120°时炉料落点半径最小,但在方位角 300°时炉料落点半径最大,这是由于位于方位角 90°时炉料在光面圆溜槽出口处偏转程度最小,而位于方位角 270°时炉料在光面圆溜槽出口处偏转程度最大,炉料在光面圆溜槽出口处偏转程度大相当于降低了料线,进而导致炉料落点半径大。为分析溜槽结构对料面周向落点偏析的影响,引入标准差 σ 来评价炉料落点半径在料面周向上的偏析程度,其定义见式(3)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

式中: N 为料面周向上炉料落点半径的总取样点数; x_i 为位于取样点 i 处的炉料落点半径; μ 为所有取样点 i 的炉料落点半径平均值。

计算得知分别使用光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽时炉料落点半径在料面周向上的标准差为 280.12、85.38、18.06 和 30.38。因此,可以得出使用方溜槽可以减少并罐高炉布料落点偏析。此外,当使用圆溜槽时,料磨料结构也可以减少并罐高炉布料落点偏析,而料磨料结构对使用方溜槽时布料落点偏析影响则较小。

对料面周向炉料质量分布的影响如图 7 所示。由图 7 可知,使用光面圆溜槽时料面周向上炉料质量分布最不均匀,而使用料磨料方溜槽时料面周向上炉

料质量分布最均匀。使用光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽时炉料质量分布在周向上的标准差分别为 132.60、93.20、29.04 和 22.24。因此,可以得出使用料磨料方溜槽时料面炉料流量偏析最小,而使用光面圆溜槽时料面炉料流量偏析最大。

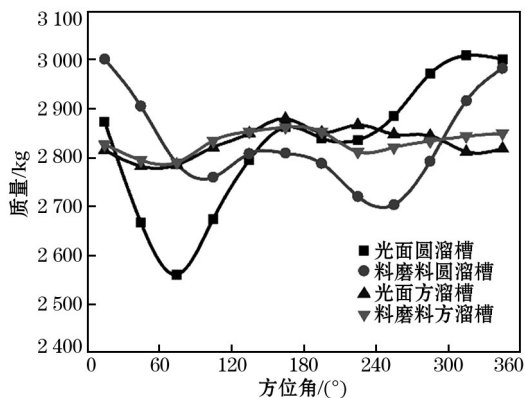


图 7 溜槽结构对料面周向炉料质量分布的影响

Fig. 7 Effect of chute structure on burden mass distribution in circumferential direction of stock surface

为找到造成料面炉料落点偏析差异的原因,分析了炉料在布料过程中溜槽出口处的速度变化,结果如图 8 所示。首先,从图中可以看出,使用光面溜槽时溜槽出口处炉料速率大于使用料磨料溜槽时溜槽出口处炉料速率,同时可以看出,使用光面圆溜槽位于方位角 120° 时炉料速率最大,这是由于位于方位角 90° 时炉料在溜槽出口处偏转程度最小,炉料从节流阀运动至溜槽出口阶段内由重力势能转换为动能的能量最大。相反,使用光面圆溜槽位于方位角 300° 时炉料速率最小,这是由于位于方位角 270° 时炉料在溜槽出口处偏转程度最大,炉料从节流阀运动至溜槽出口阶段内由重力势能转换为动能的能量最小。此外,使用方溜槽时溜槽出口处炉料速率小于使用圆溜槽时溜槽出口处炉料速率。炉料在溜槽出口处的速率大小直接决定炉料在料面上落点位置,因此使用方溜槽时炉料落点半径要小于使用圆溜槽时炉料落点半径。同样,使用料磨料溜槽时炉料落点半径要小于使用光面溜槽时炉料落点半径。而炉料在不同溜槽方位角的溜槽出口速率差异程度直接决定炉料在料面上落点偏析程度,使用光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽时溜槽出口处炉料速率在周向上的标准差分别为 0.43、0.30、0.17 和 0.21,其趋势与图 6 一致。

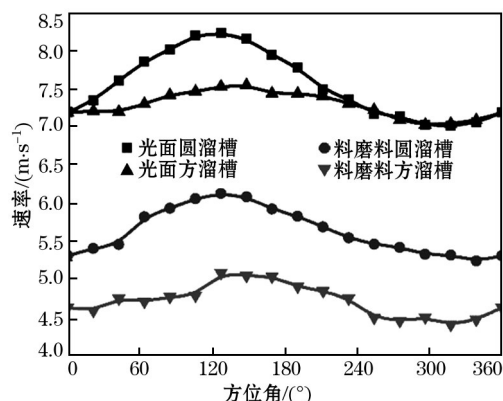


图 8 溜槽结构对炉料在溜槽出口速度的影响

Fig. 8 Effect of chute structure on burden velocity at chute outlet

当炉料流出溜槽后,由于炉料在溜槽内受到科氏力的作用,炉料在料面落点的方位角与溜槽方位角之间存在一个滞后,称为滞后角,如图 9 所示。在高炉布料过程中,当节流阀开度一定时,炉料流经溜槽的质量流量保持恒定,因此炉料在料面落点处的质量流量也保持恒定。而并罐高炉布料之所以产生流量偏析,则是因为炉料在中心喉管内偏行于一侧,导致炉料在不同方位角溜槽上运动轨迹不同,以及炉料在溜槽出口处偏转程度不一致,进而导致料面周向不同方位角上的炉料落点滞后角不一致,这是引起料面周向炉料流量偏析的根本原因。不同溜槽结构对炉料在料面落点滞后角的影响如图 10 所示。由图 10 可知,使用光面圆溜槽时炉料落点滞后角在料面周向上波动最大,而使用方溜槽时炉料落点滞后角在料面周向上波动则较小。同时可以看出,使用光面圆溜槽位于方位角 120° 时炉料落点滞后角波动最大,因此位于方位角 90° 时炉料质量波动最大。使用光面圆溜槽、料磨料圆溜槽、光面方溜槽和料磨料方溜槽时炉料落点滞

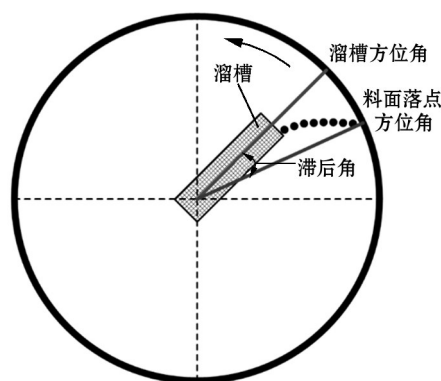


图 9 料面炉料落点滞后角示意图

Fig. 9 Schematic of burden falling point delay angle in stock surface

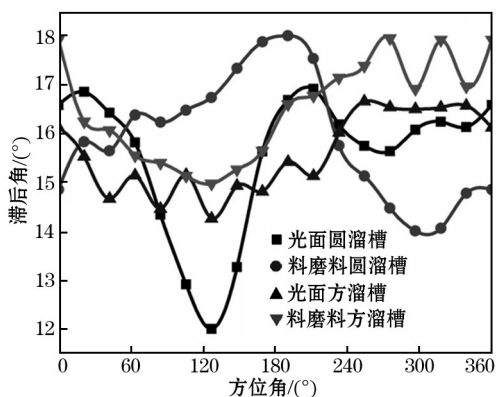
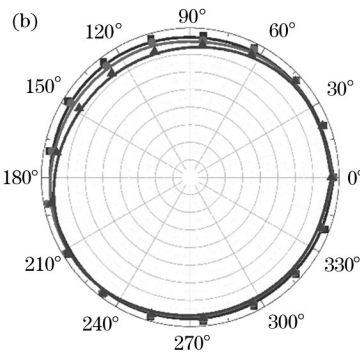
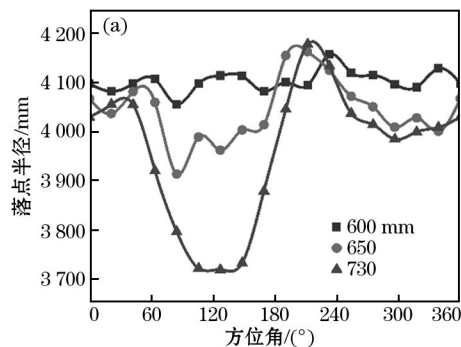


图 10 溜槽结构对炉料在料面落点滞后角的影响

Fig. 10 Effect of chute structure on burden falling point delay angle in stock surface

后角在料面周向上的标准差分别为 1.42、1.25、0.79 和 0.99。因此,使用方溜槽有利于改善料面周向上



(a) 折线图; (b) 雷达图。

图 11 喉管直径对 0.3 m 料线炉料落点半径的影响

Fig. 11 Effect of throat tube diameter on 0.3 m stock level burden falling point

同样,为分析喉管直径对料面炉料流量偏析的影响,将炉喉沿圆周方向等面积划分为 12 个扇形区域,统计每个区域内的炉料总质量。不同喉管直径对料面周向炉料质量分布的影响如图 12 所示。由图 12 可知,使用 730 mm 喉管直径时料面周向上炉料质量分布最不均匀,而使用 600 mm 喉管直径时料面周向上炉料质量分布最均匀。使用 600、650 和 730 mm 喉管直径时炉料质量分布在周向上的标准差分别为 60.90、62.90 和 110.66。因此,可以得出使用 600 mm 喉管直径时料面炉料流量偏析最小,而使用 730 mm 喉管直径时料面炉料流量偏析最大。

为找到造成料面炉料落点偏析差异的原因,分析了炉料在布料过程中溜槽出口处的速度变化,结果如图 13 所示。炉料在溜槽出口处的速率大小直接决定炉料在料面上落点位置,而炉料在不同溜槽方位角的速率差异程度直接决定炉料在料面上落点偏析程度,使用 600、650 和 730 mm 喉管直径时溜

槽出口处炉料速率在周向上的标准差分别为 0.15、

2.3 喉管直径对料面炉料分布偏析的影响

为研究不同喉管直径对料面炉料分布偏析的影响,分别采用国内常用的 600、650 和 730 mm 等 3 种喉管直径,计算过程中溜槽结构采用光面圆溜槽。为分析不同喉管直径对炉料落点偏析的影响,分别计算了使用不同喉管直径时炉料在 37° 倾角 0.3 m 料线周向不同方位角的平均落点半径,如图 11 所示。从图 11 中可以看出,使用 600 mm 喉管直径时炉料落点半径在料面周向上差异较小,而使用 730 mm 喉管直径在料面周向上差异最大。而且分别使用 600、650 和 730 mm 喉管直径时炉料落点半径在料面周向上的标准差为 21.42、63.67 和 138.25。因此,可以得出使用 600 mm 喉管直径时可以减少并罐高炉布料落点偏析。

槽出口处炉料速率在周向上的标准差分别为 0.15、0.31 和 0.54。因此,使用 600 mm 喉管直径时溜槽出口处炉料速率差异变化最小,落点偏析最小。

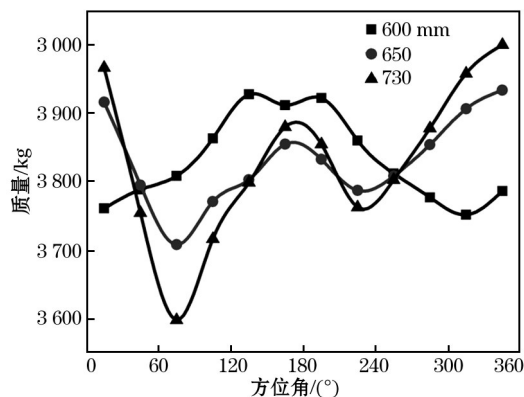


图 12 喉管直径对料面周向炉料质量分布的影响

Fig. 12 Effect of throat tube diameter on burden mass distribution in circumferential direction of stock surface

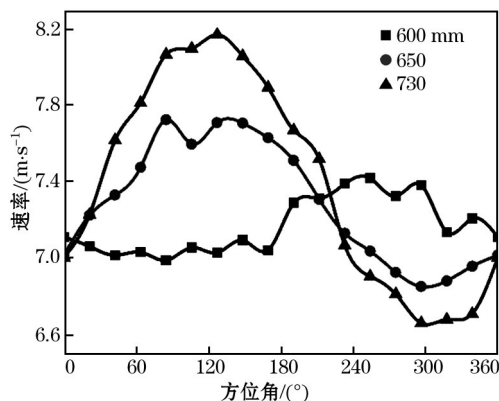


图 13 喉管直径对炉料在溜槽出口速度的影响

Fig. 13 Effect of throat tube diameter on burden velocity at chute outlet

不同喉管直径对炉料在料面落点滞后角的影响如图 14 所示。由图 14 可知,使用 730 mm 喉管直径时炉料落点滞后角在料面周向上波动最大,而使用 600 mm 喉管直径时炉料落点滞后角在料面周向上波动则较小。使用 600、650 和 730 mm 喉管直径时炉料落点滞后角在料面周向上的标准差分别为 0.27、0.79 和 0.93。因此,使用 600 mm 喉管直径时有利于改善料面周向上炉料流量偏析。

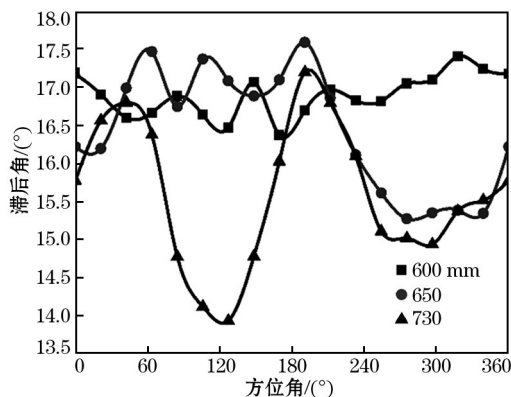


图 14 喉管直径对炉料在料面落点滞后角的影响

Fig. 14 Effect of throat tube diameter on burden falling point delay angle in stock surface

在并罐式无钟高炉布料过程中,由于炉料在喉管内一侧偏行,导致炉料在处于不同方位溜槽上的有效运动长度和运动轨迹不同,如图 15 所示,进而炉料在溜槽出口处偏转程度不同。当节流阀开度一定时,炉料在不同直径的喉管内运动时其填充率不同,随着喉管直径的减小,炉料在处于不同方位溜槽上的有效运动长度和运动轨迹波动会随之减小,炉料在溜槽出口处偏转程度波动也随之减小。当炉料在溜槽出口处偏转程度波动减小,料面周向上炉料落点偏析和流量偏析也会相应减小。但在

生产实际中,应注意喉管直径不能太小,以防止在布料过程中喉管堵塞,影响高炉生产。

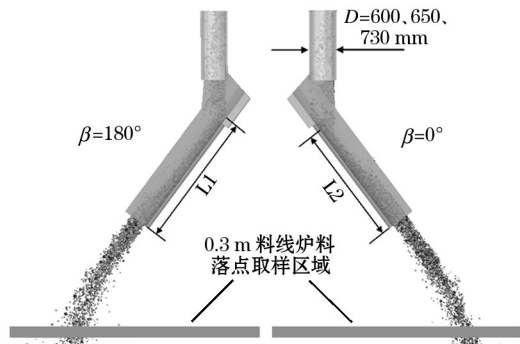


图 15 炉料在不同方位角溜槽上有效运动长度变化示意图

Fig. 15 Schematic of variation of effective motion length of burden at different azimuth angles of chute

3 结论

(1) 在布料过程中,溜槽出口处炉料偏转程度在周向上的差异决定了炉料在料面上的落点偏析,而料面炉料落点滞后角在周向上的差异决定了炉料在料面上的流量偏析。

(2) 使用方溜槽有利于改善并罐高炉布料过程中的落点偏析和流量偏析,同时,溜槽上的料磨料结构有利于进一步改善偏析程度。

(3) 使用 600 mm 喉管直径时有利于改善并罐高炉布料过程中的落点偏析和流量偏析。因此,在喉管内不堵料的情况下,使用尽可能小的喉管有利于改善偏析。

参考文献:

- [1] 张福明,钱世崇,殷瑞钰. 钢铁厂流程结构优化与高炉大型化[J]. 钢铁, 2012, 47(7): 1. (ZHANG Fu-ming, QIAN Shi-chong, YIN Rui-yu. Blast furnace enlargement and optimization of manufacture process structure of steel plant[J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 1.)
- [2] 周春林,刘春明,董亚锋,等. 国外炼铁状况及中国炼铁发展方向[J]. 钢铁, 2008, 43(12): 1. (ZHOU Chun-lin, LIU Chun-ming, DONG Ya-feng, et al. BF ironmaking in the world and development direction in China[J]. Iron and Steel, 2008, 43(12): 1.)
- [3] Guha M, Nag S, Kundu S, et al. Particle size segregation in the falling stream of burden materials[J]. ISIJ International, 2009, 49(11): 1816.
- [4] Nag S, Guha M, Kundu S, et al. Mass distribution in the falling stream of burden materials[J]. ISIJ International, 2008, 48(9): 1316.
- [5] Standish N, Kilic A. Comparison of stop-start and continuous sampling methods of studying segregation of materials discharging from a hopper[J]. Chemical Engineering Science, 1985, 11(40): 2152.

- [6] Standish N. Studies of size segregation in filling and emptying a hopper[J]. Powder Technology, 1985, 45: 43.
- [7] Kajiwar Y, Jimbo T, Joko T, et al. Investigation of bell-less charging based on full scale model experiments[J]. Transactions ISIJ, 1984, 24: 799.
- [8] 赵国磊,程树森,徐文轩,等. 高炉中心加焦炉料分布机理及布料方式探讨[J]. 钢铁, 2016, 51(6): 10. (ZHAO Guo-lei, CHENG Shu-sen, XU Wen-xuan, et al. Mechanism of burden distribution in central coke charging process and exploration on charging pattern in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2016, 51(6): 10.)
- [9] 滕召杰,程树森,赵国磊. 溜槽截面形状及参数对高炉布料的影响[J]. 钢铁, 2014, 49(9): 34. (TENG Zhao-jie, CHENG Shu-sen, ZHAO Guo-lei. Influence of chute cross section and parameters on burden distribution for blast furnace[J]. Iron and Steel, 2014, 49(9): 34.)
- [10] 滕召杰,程树森,赵国磊. 并罐式无钟炉顶布料料面中心研究[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(6): 5. (TENG Zhao-jie, CHENG Shu-sen, ZHAO Guo-lei. Research of the center of the burden surface for a bell-less top blast furnace with parallel hoppers[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(6): 5.)
- [11] 杜鹏宇,程树森,滕召杰. 并罐式无钟炉顶布料蛇形偏料的研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(4): 479. (DU Peng-yu, CHENG Shu-sen, TENG Zhao-jie. Research of snakelike deviation in the burden distribution of a parallel-hopper bell-less top[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(4): 479.)
- [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. (QIU Jia-yong, GAO Zheng-kai, ZHANG Jian-liang, et al. Simulation of burden trajectory in a bell-less top blast furnace[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(3): 368.)
- [13] 任廷志,刘剑平,郑明会. 并罐式无钟高炉周向均匀布料[J]. 东北重型机械学院学报, 1997(1): 15. (REN Ting-zhi, LIU Jian-ping, ZHENG Ming-hui. The method of even burden distribution for the bell-less top with parallel hoppers[J]. Journal of Northeast Heavy Machinery Institute, 1997(1): 15.)
- [14] Ren T, Jin X, Ben H, et al. Burden distribution for bell-less top with two parallel hoppers[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2006, 13(2): 14.
- [15] 徐文轩,程树森,牛群,等. 并罐式无钟炉顶装料模式对料面炉料分布的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 8. (XU Wen-xuan, CHENG Shu-sen, NIU Qun, et al. Effects of charging patterns of bell-less top blast furnace with two parallel hoppers on burden distribution of stock surface [J]. Iron and Steel, 2017, 52(12): 8.)
- [16] 徐文轩,程树森,赵国磊,等. 并罐式无钟炉顶装料过程中炉料运动及分布的离散元分析[J]. 过程工程学报, 2016(6): 1038. (XU Wen-xuan, CHENG Shu-sen, ZHAO Guo-lei, et al. Analysis of particles movement and size distribution in parallel-hopper bell-less top of blast furnace with discrete element method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016(6): 1038.)
- [17] 李超,程树森,赵国磊,等. 串罐式无钟高炉炉顶炉料运动的离散元分析[J]. 过程工程学报, 2015(1): 1. (LI Chao, CHENG Shu-sen, ZHAO Guo-lei, et al. Analysis of particles movement in the serial-hopper bell-less top of blast furnace with discrete element method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015(1): 1.)
- [18] 邱廷省,吴紧钢,邱小平,等. 无料钟并罐装料过程的离散单元模拟[J]. 计算机与应用化学, 2015(5): 527. (QIU Ting-sheng, WU Jin-gang, QIU Xiao-ping, et al. A discrete element method modeling for charging process in a bell-less top with two parallel hoppers[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015(5): 527.)
- [19] 吴紧钢,邱廷省,邱小平,等. 多粒径颗粒并罐装料偏析行为的离散单元模拟[J]. 计算机与应用化学, 2015(9): 1031. (WU Jin-gang, QIU Ting-sheng, QIU Xiao-ping, et al. A discrete element method for modeling segregation behavior in charging poly disperse particles into two parallel hoppers[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015(9): 1031.)
- [20] 胡招文,郭福亮,陈晨,等. DEM模拟解析二元混合颗粒粒径偏析分布规律[J]. 重庆大学学报, 2015(5): 38. (HU Zhao-wen, GUO Fu-liang, CHEN Chen, et al. Analysis on distribution law of particle size segregation of binary particle mixtures based on DEM[J]. Journal of Chongqing University, 2015(5): 38.)
- [21] Mitra T, Saxén H. Discrete element simulation of charging and mixed layer formation in the ironmaking blast furnace[J]. Computational Particle Mechanics, 2016, 3(4): 541.
- [22] Mitra T, Saxén H. Simulation of Burden Distribution and Charging in an Ironmaking Blast Furnace[J]. IFAC-Papers on Line, 2015, 48(17): 183.
- [23] ZHANG J, QIU J, GUO H, et al. Simulation of particle flow in a bell-less type charging system of a blast furnace using the discrete element method[J]. Particuology, 2014, 16: 167.
- [24] LI Y, XU Y, JIANG S. DEM simulations and experiments of pebble flow with monosized spheres[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 312.
- [25] 郭其飞,李家新,杨佳龙,等. 大型高炉实用布料模型开发[J]. 中国冶金, 2016, 26(8): 17. (GUO Qi-fei, LI Jia-xin, YANG Jia-long, et al. Development of a practical model of burden distribution for a large blast furnace[J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 17.)
- [26] SHI L, ZHAO G, LI M, 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.
- [27] Nag S, Koranne V M. Development of material trajectory simulation model for blast furnace compact bell-less top[J]. Iron-making and Steelmaking, 2013, 36(5): 371.