

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180195

泰钢串罐式高炉炉顶插入件设计优化

邦嘉文¹, 程树森¹, 葛军亮², 陈培敦³, 徐文轩¹, 胡 伟¹, 薛玉卿³

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 钢铁研究总院科技信息与战略研究所, 北京 100081;

3. 山东泰山钢铁集团有限公司, 山东 莱芜 271100)

摘 要: 插入件通常安装在高炉料罐中以延长设备使用寿命, 而料罐中安装插入件对料罐和炉喉内炉料粒度分布有重要影响。基于泰钢 1 780 m³ 高炉串罐式无钟炉顶系统, 建立等比例三维几何模型, 分别在改变插入件安装高度和直径的条件下, 对炉料从皮带运动至炉喉全过程进行离散单元仿真计算。统计结果表明, 安装插入件使大粒径颗粒分布趋于料罐中心, 小粒径颗粒分布在料罐壁面附近; 下料罐卸料过程中, 安装插入件使颗粒流动模式由“漏斗流”转变为“活塞流”, 缩小了炉喉径向平均粒径波动范围。当插入件安装在料罐下部锥形区域高度的 1/2, 且直径等于料罐出口直径时, 炉喉中心区域平均粒径相对较大。对实际料罐插入件的设计与安装以及高炉生产具有重要指导意义。

关键词: 插入件; 串罐式无钟炉顶; 离散单元法; 粒度分布

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)01-0019-09

Design optimization of insert in serial-hopper bell-less top system of Taisteel blast furnace

BANG Jia-wen¹, CHENG Shu-sen¹, GE Jun-liang², CHEN Pei-dun³, XU Wen-xuan¹,
HU Wei¹, XUE Yu-qing³

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute for Science and Technology Information and Strategy, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 3. Shandong Taishan Iron and Steel Group Co., Ltd., Laiwu 271100, Shandong, China)

Abstract: To prolong the service life of equipment, usually an insert is installed inside the hopper of the blast furnace, but the insert installed in the hopper has a great influence on the particle size distribution in the hopper and the throat. A full-scale 3D geometrical model was established, which based on the serial-hopper bell-less top system of the Taisteel 1 780 m³ blast furnace. Moreover, the motion of burden particles from the belt to the throat was simulated by the discrete element method at the condition of changing locations and diameters of the insert respectively. Statistical results showed that larger particles stayed near the center while small particles locate near the side wall when the insert is installed in the lower hopper. During the discharging progress of the lower hopper, the particle flow pattern ends to a plug flow compared with the funnel flow at the condition without the insert. Hence, the average diameter fluctuant range of particles decreases in radial direction of the stock surface. In addition, the average particle diameter is relatively larger in the central zone of throat when the insert diameter is equal to the diameter of outlet and the installation height of the insert is half of the height of the cone-shape zone in the lower part of hopper. Moreover, this study has important guidance on the design and installation of the insert and the production of blast furnaces.

Key words: insert; serial-hopper bell-less top; discrete element method; particle size distribution

高炉是一个逆流式层状填充料冶金反应器, 上升的高温煤气流与下降的炉料接触而发生一系列物理化学反应。高炉稳定顺行与炉内煤气流分布密切相关, 而炉料粒度分布对煤气流分布有“整流”作用^[1], 因此, 通过上部调节改善炉内炉料分布, 进而控制煤气流分布使高炉顺行。基于厄根公式^[2]提

出炉料分级入炉技术, 认为将小颗粒炉料布到高炉边缘区域, 大颗粒布到靠近高炉中心的区域, 将有利于提高煤气利用率^[3-6]。串罐式无钟炉顶由于上、下料罐中心线与高炉中心线重合, 下料罐装料时, 为避免炉料直接冲击下节流阀, 通常在下料罐中安装插入件; 虽然能起到延长设备使用寿命的效果,

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

作者简介: 邦嘉文(1995—), 男, 硕士生; **E-mail:** jiawen160515@163.com; **收稿日期:** 2018-05-17

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

但也影响炉料在料罐和炉喉内的分布。

对高炉下料罐中安装插入件对料面炉料分布规律的研究甚少,仅停留在插入件对颗粒流流动状态的影响研究。Haertl J等^[7]通过物理试验研究表明,在漏斗形料罐安装叠锥型插入件能改变颗粒流动模式;Chou C S等^[8]研究了非对称三角形插入件安装位置及尺寸对颗粒流动的影响,但这些研究均基于插入件安置在颗粒流动床初始为静止且均匀分布的状态下进行的试验;而炉料颗粒装入下料罐时,先碰撞中心插入件再落至料罐中,料罐中炉料因偏析呈不均匀分布。近年来,随着计算机技术的快速发展,离散单元法^[9] (Discrete Element Method, DEM)已成为分析非连续介质颗粒运动行为的数值模拟方法,并被很多高炉研究者运用于高炉布料的研究领域中^[10-18]。Mio H等^[19]使用DEM离散单元法模拟了炉料从料仓至炉喉整个运动过程,在没有插入件的情况下,大颗粒炉料总是趋于最后排出,与物理试验相吻合。Yang S C等^[20]通过DEM研究了不同形状插入件对颗粒流动模式的影响,并通过试验验证其结果的正确性;刘强等^[21]运用离散单元法得到插入件尺寸与出口尺寸相等时,流动区宽度最大,易形成“活塞流”;李超等^[22]采用离散单元法研究了串罐中安装插入件对颗粒在下料罐径向分布的影响,通过对比试验结果验证了离散单元仿真结果的准确性,但没有分析插入件对炉喉处炉料分布的影响,而炉喉处炉料的分布决定高炉煤气流的分布。因此,研究插入件对颗粒在料罐与炉喉内的分布状态的影响,将对实际生产过程布料操作具有非常重要的指导意义。

本文通过建立了1 780 m³高炉串罐式无钟炉顶计算模型,运用离散单元法进行仿真计算,对比了在下料罐中安装插入件与不安装插入件条件下,炉料在料罐和炉喉料面的分布。通过仿真不同插入件直径大小与安装位置条件下炉料的分布规律,研究插入件直径和安装位置对料罐和炉喉内炉料分布的影响,为实际生产中插入件的设计与安装提供理论依据。

1 数值模拟

1.1 物理模型

根据泰钢1 780 m³串罐式高炉无钟炉顶结构,建立了等比例三维无钟炉顶计算模型,如图1所示,无钟炉顶模型主要包含料仓、皮带、上料罐、下料罐、插入件、中心喉管、旋转溜槽和炉喉等结构。

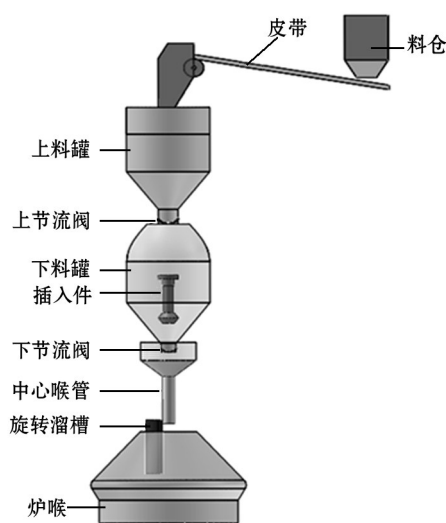


图1 串罐式无钟炉顶模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of serial-hopper bell-less top system

根据该1 780 m³高炉所安装的插入件实物尺寸参数及安装位置,设置了3个安装高度,并设计了3种尺寸大小的插入件,如图2和图3所示。本文中安装高度指插入件底部距下料罐出口的距离,研究插入件安装高度对布料过程的影响时,安装高度取值分别为 $h/3$ 、 $h/2$ 和 $2h/3$,图2中插入件是安装高度为 $h/3$ 时的情况。图中 D 定义为插入件的直径,当插入件直径为变量时,将下料罐出口直径 d 作为参照, D 分别取值为 $0.5d$ 、 $0.75d$ 和 d ,按比例伸缩后得到图3所示的插入件尺寸图。

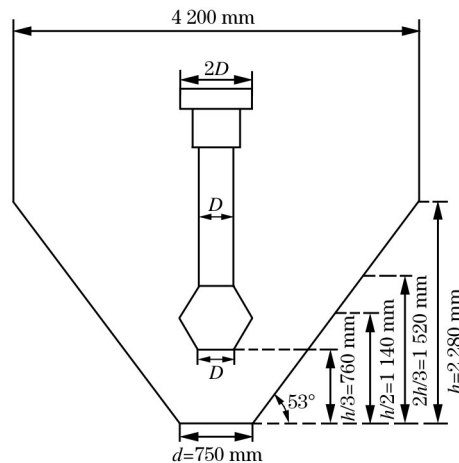


图2 插入件安装位置图

Fig. 2 Design drawing of placement of insert

1.2 离散单元法

高炉炉料在装入高炉炉喉的过程中,视为以离散颗粒的形式存在,运用DEM进行仿真计算时,颗

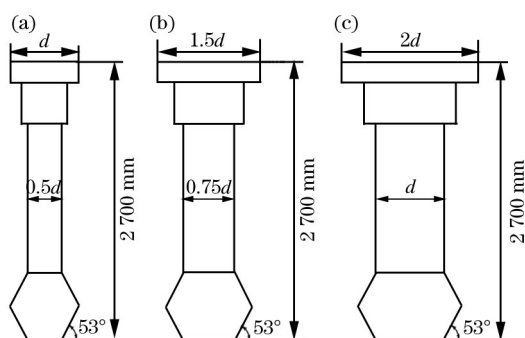
(a) $D=0.50d$; (b) $D=0.75d$; (c) $D=d$.

图3 不同直径插入件几何结构图

Fig. 3 Geometrical structure schematic of insert with different diameters

粒间相互接触采用非黏性接触软球模型^[23],颗粒碰撞接触时在接触点处产生形变;基于牛顿第二定律和位移法分析颗粒与颗粒、颗粒与几何界面之间的碰撞。颗粒运动过程包括平动与转动,假设颗粒平动是受重力以及颗粒间或者颗粒与几何界面的接触力作用下的运动,转动是在力矩作用下的运动。因此,颗粒的平动与转动过程的控制方程见式(1)和式(2)。

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

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

式中: m_i 、 I_i 、 v_i 、 ω_i 分别表示颗粒 i 的质量、转动惯量、线速度和转动速度; k 为颗粒 i 相互作用的颗粒数。此外,作用在颗粒 i 的力包括:重力 mg ,颗粒 i 与颗粒 j 之间的法向接触力 $F_{cn,ij}$ 和法向阻尼力 $F_{dn,ij}$,切向接触力 $F_{ct,ij}$ 和切向阻尼力 $F_{dt,ij}$ 。 $T_{t,ij}$ 和 $T_{r,ij}$ 分别为切向转矩与滚动摩擦转矩,切向转矩是由切向力引起颗粒 i 发生转动的力矩,滚动摩擦转矩是阻止颗粒 i 发生转动的力矩,这些力与力矩的计算公式在文献[24]中已给出。

1.3 计算条件

仿真计算过程中,其主要设备参数见表1。本文主要采用焦炭颗粒作为炉料进行仿真,焦炭粒度分布见表2。焦批质量为10 t,根据实际现场使用的焦炭粒径范围,设置4个焦炭粒级,由于泰钢高炉使用的焦炭颗粒粒径整体偏小,仿真的焦炭颗粒直径为实际焦炭直径的1.5倍,以减少计算负载,其放大

倍数的主要依据为颗粒总数量,即在同时考虑计算机计算能力且不影响计算结果的前提下确定的放大倍数。焦炭颗粒在料仓中以250 kg/s的速率随机生成4种不同粒级的焦炭颗粒。仿真所用材料的物性参数^[25-27]见表3。布料时,溜槽的转动方向为顺时针方向,溜槽倾动方向为从炉喉边缘向炉喉中心倾动,其布料矩阵为 $C_2^{41.5 \ 39.5 \ 37.5 \ 35 \ 32 \ 29}$ 。在该模型中,假设颗粒落在水平的料面上,并且计算过程忽略气流对炉料的影响。

表1 几何模型主要参数

Table 1 Main parameters of geometry model

参数	数值
皮带长度/m	10.0
皮带倾角/(°)	10.0
皮带速度/(m·s ⁻¹)	2.0
中心喉管直径/m	0.6
炉喉直径/m	7.0
溜槽长度/m	3.0
溜槽宽度/m	1.14
溜槽倾角范围/(°)	29.0~41.5
溜槽转速/(r·min ⁻¹)	8.0
溜槽倾动速度/(r·min ⁻¹)	0.267 5

表2 仿真所用焦炭粒度分布

Table 2 Particle size distribution of coke in simulation

粒径/mm	质量/kg	质量分数/%	颗粒数
13.5~22.5	720	7.20	210 888
22.5~37.5	446	4.46	28 232
37.5~60.0	2 968	29.68	44 142
60.0~72.0	5 866	58.66	36 748
合计	10 000	100.00	320 046

表3 仿真所用材料物性条件

Table 3 Material properties in simulation

材料类型	密度/(kg·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
皮带	1 200	1.0×10^7	0.40

1.4 计算方案

本文主要研究插入件对炉料在料罐和炉喉内的分布及运动模式的影响,并通过改变插入件直径与安装高度,优化炉料分布,计算方案见表4。

表4 计算方案

Table 4 Simulation scheme

参数	Base	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
插入件直径 D	0(无插入件)	$0.5d$	$0.5d$	$0.5d$	$0.75d$	d
插入件安装高度 H	0(无插入件)	$h/3$	$h/2$	$2h/3$	$h/2$	$h/2$

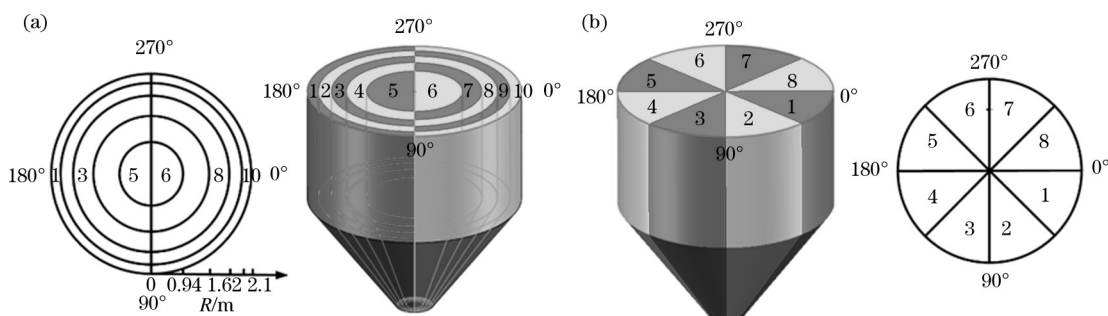
2 结果与讨论

2.1 安装插入件对炉料分布的影响

根据表 4 的计算方案进行数值计算,首先对下料罐中安装插入件与不安装插入件两种不同情况下的计算结果进行分析。将下料罐分别沿着径向和圆周方向划分为等体积的 10 个和 8 个区域,以分

析炉料在下料罐径向与圆周方向的分布规律。

下料罐径向与圆周方向区域划分示意图如图 4 所示。其中,0°为皮带一侧的方位,径向是指从 180°指向 0°的方向,料罐直径为 4.2 m,径向区域 5、6 表示料罐中心区域,其半径为 0.939 m,区域 8 外侧半径为 1.626 m;圆周方向则表示从 0°位置按顺时针旋转的方向。



(a) 料罐径向区域划分; (b) 料罐圆周区域划分。

图 4 下料罐区域划分示意图

Fig. 4 Schematic of regional division in lower hopper

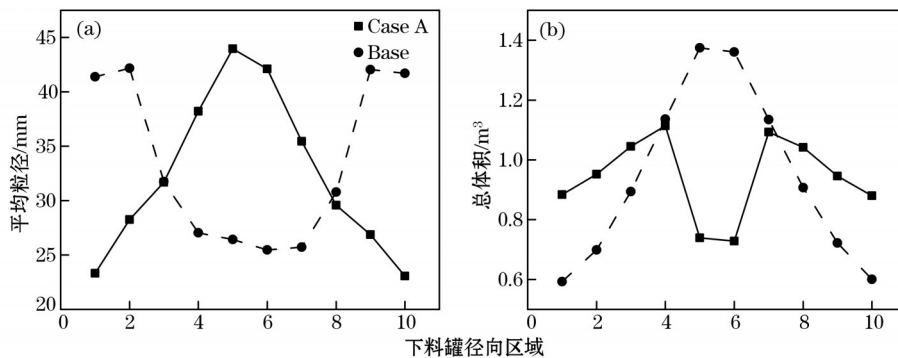
下料罐径向的平均粒径分布和总体积分布如图 5 所示。平均粒径定义公式见式(3)。

$$d_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (3)$$

式中: d_{av} 为某区域的平均粒径; n 为该区域内颗粒总数; d_i 为该区域内颗粒 i 的直径,平均粒径用于反映某个区域内颗粒整体的粒径大小。

从表 2 中可以看出,最小粒级颗粒数约为最大

粒级颗粒数的 6 倍,说明平均粒径越小,小颗粒相对较多;平均粒径大,大粒径颗粒相对较多。而总体积定义为某区域内所有颗粒的体积之和,其值与该区域各颗粒的粒径大小及颗粒数有关,与该区域平均粒径的值相关性较小。由于沿径向划分的各区域底面积相同,用总体积来反映各区域颗粒堆积的高度,所以料罐径向的堆尖位置位于总体积较大的区域。



(a) 平均粒径; (b) 总体积。

图 5 下料罐径向炉料分布

Fig. 5 Distribution of burden in radial direction of lower hopper

由图 5 可知,Case A 和 Base 分别表示安装与不安装插入件的情况,区域 5、6 表示料罐中心区域,不安装插入件时,料罐中心区域平均粒径较小,边缘平均粒径较大,说明料罐中心的小颗粒相对较多,而边缘大颗粒相对较多;安装插入件后,其粒径分

布则相反。因为不安装插入件时,料罐中心区域的总体积较大,炉料堆尖位于料罐中心区域,小颗粒在堆尖附近从大颗粒间隙渗透至料面下层,使大颗粒浮于表面。由于大颗粒的安息角较小,易沿着料堆斜面滚落至料罐边缘;而安装插入件后,颗粒碰

撞插入件顶部后向四周分散,落至料罐圆锥漏斗壁面,颗粒滚向料罐底部的过程中,由于粒度偏析,小颗粒渗透至靠近壁面的区域,大颗粒浮在料堆斜面上层,所以壁面附近的平均粒径小。

径向总体积反映炉料在各区域内的高度,在下料罐装料后期,Case A 条件下,炉料落至区域4和区域7处并形成堆尖,大颗粒则易于沿着料堆斜面滚落至料罐中心区域,因此区域5和区域6的平均粒径较大。但滚落至料罐中心区域的颗粒数目较少,所以中心区域的总体积较小。从图中可以看出,安装插入件对下料罐径向的平均粒径和体积分布影响较大。

料罐圆周方向炉料分布如图6所示。由于在圆

周方向上,安装插入件与不安装插入件的平均粒径和总体积变化差异较小,引入标准差 σ 来评价两种条件下圆周方向的偏析程度,其定义见式(4)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4)$$

式中: N 为料罐圆周方向区域总数; x_i 为位于区域*i*处的平均粒径; μ 为所有区域*i*的平均粒径的平均值。通过计算得出,Case A 和 Base 的平均粒径标准差分别为 1.34 和 1.16,安装插入件与否对圆周方向的颗粒平均粒径影响较小。同理,Case A 和 Base 的总体积标准差分别为 0.008 和 0.006,圆周各区域体积相对均匀。因此,安装插入件对下料罐圆周方向的平均粒径和体积分布影响较小。

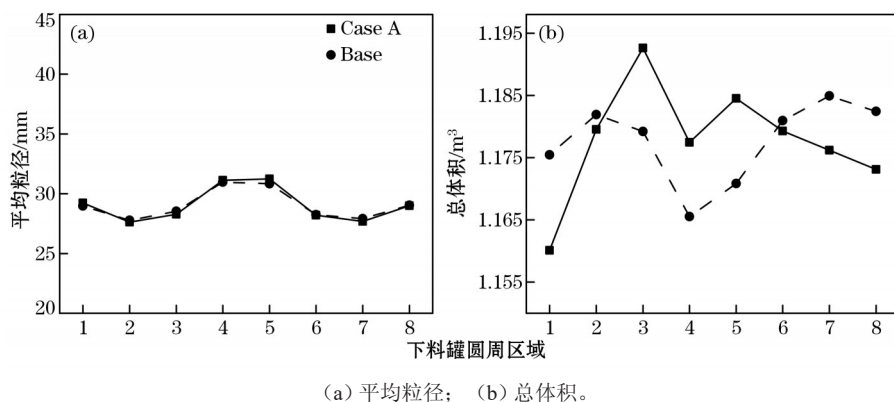


图6 下料罐圆周方向炉料分布

Fig. 6 Distribution of burden in circumferential direction of lower hopper

由于插入件底部浸入颗粒中,需对下料罐卸料过程颗粒流的运动状态进行分析。在仿真计算过程中,下料罐卸料用时 105 s,每 15 s 示踪一次炉料颗粒,以下料罐刚开始卸料时作为零时刻,即可得到炉料从下料罐排出时的先后顺序。

下料罐卸料时序图如图7所示,无插入件时,料罐中心的颗粒先排出,靠近料罐壁面的颗粒后排

出,形成“漏斗流”;而安装插入件后,炉料卸料过程颗粒以相对均匀的速度运动,近似于“活塞流”,同一水平线上的炉料基本保持平稳下降。插入件的安装,明显改变了颗粒流动模式。

为了探究颗粒排出时粒径变化的规律,在料罐出口设置一个圆柱体分析区来监测平均粒径的变化,得到卸料过程颗粒粒度变化图如图8所示。卸

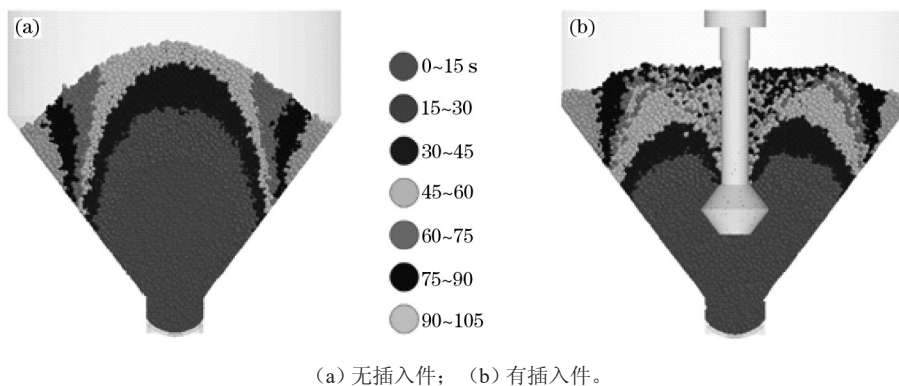
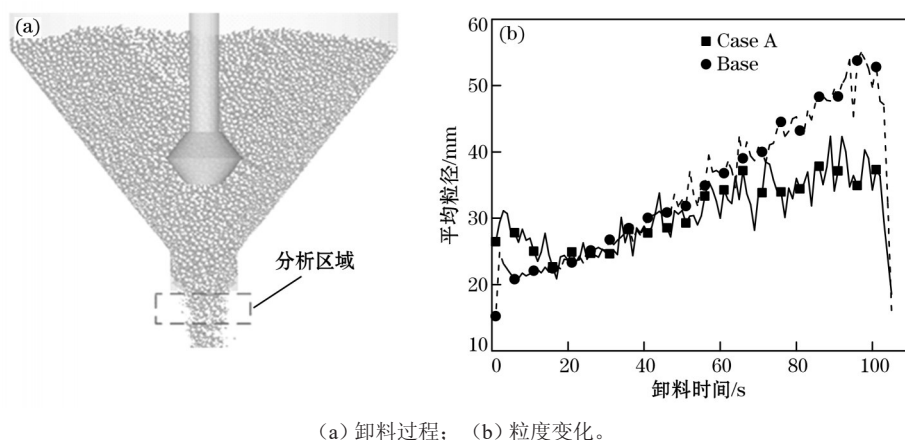


图7 下料罐卸料时序

Fig. 7 Color mapping of discharged time in lower hopper



(a) 卸料过程; (b) 粒度变化。

图8 下料罐卸料过程粒度变化

Fig. 8 Variation of particle size in analysis zone during discharging process from lower hopper

料最初阶段,平均粒径变化趋势均为先增大后减小;随后,无插入件条件下,平均粒径随时间逐渐增大,相邻时间排出的颗粒粒径波动小;安装插入件后,颗粒平均粒径极差(最大值与最小值之差)减小,相邻时间排出的颗粒粒径波动较大,这是因为“活塞流”使同一水平的大颗粒与小颗粒同时排出,小颗粒掺混在大颗粒中。在卸料的最后阶段,颗粒下降至插入件下方,流动模式转变“漏斗流”,在下降过程中,小颗粒将渗透至料罐壁面,上部的大颗粒先排出,两种条件下的平均粒径最后均出现迅速减小的趋势。

为了了解炉料在炉喉处的分布状态,将炉喉视为一个圆柱体,并沿径向划分为20个等体积的区域,如图9所示。由于料罐卸料过程下节流阀开度及布料矩阵不变,且串罐式无钟炉顶圆周方向偏析小,因此,本文将主要对炉喉径向平均粒径分布进行分析。

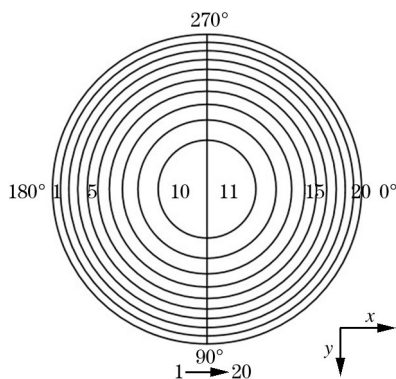


图9 炉喉径向区域划分示意图

Fig. 9 Schematic of regional division in radial direction of throat

当炉料落在等体积的20个区域内,通过模拟软

件导出各区域内颗粒的粒径信息,再经后处理即得到炉喉径向炉料分布图如图10所示。沿炉喉径向方向,安装插入件与不安装插入件,其平均粒径变化趋势相近,靠近边缘的炉料平均粒径小,靠近中心区域,颗粒平均粒径较大。然而,安装插入件后,靠近中心区域的平均粒径相对较小,平均粒径极差减小,中心区域大颗粒占比相对较小。

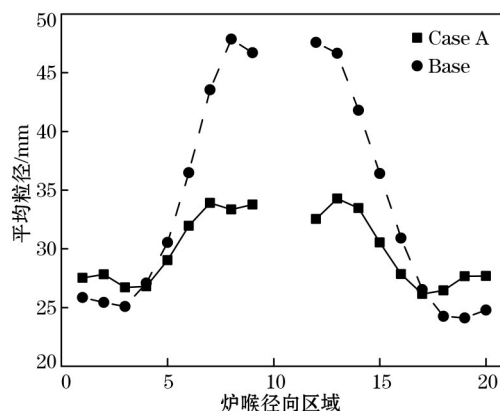


图10 炉喉径向炉料分布

Fig. 10 Distribution of burden in radial direction of throat

因此,安装插入件后,炉料颗粒在料罐中呈现中心区域大颗粒聚集而边缘小粒径颗粒聚集的分布状态。炉料排出料罐时,形成“活塞流”,使大小颗粒掺混排出,炉料颗粒在炉喉径向的平均粒径极差减小,靠近炉喉中心区域的大颗粒相对较少,对中心煤气流的发展有一定的抑制作用。

2.2 插入件安装位置对炉料分布的影响

根据生产经验,通常希望边缘炉料颗粒粒径小,靠近中心的颗粒粒径大;而安装插入件后,炉喉中心区域平均粒径小,大颗粒占比小。因此,通

过计算不同插入件尺寸和安装高度下炉喉料面的炉料分布,获取最佳插入件尺寸和位置的设计方案。

根据表 4 的计算方案,用离散单元法计算了 Case A、Case B 和 Case C 3 种条件下的布料过程,并分析下料罐和径向平均粒径和体积的分布。

由于炉料堆尖位于总体积较大的区域,从图 11 中可知,随着插入件安装高度增加,料罐中炉料堆

尖越靠近料罐边缘,滚落至料罐中心的大颗粒减少,导致中心区域的平均粒径呈减小趋势。3 种插入件安装高度下,平均粒径差异较小,总体积相差较大,因为插入件安装高度影响炉料落点位置,由于 Case A 安装位置低,炉料碰撞插入件顶端时动能损失较大,落点位置靠近料罐中心,滚落至料罐边缘的颗粒较少,所以 Case A 边缘区域的总体积较小,中心区域的体积较大。

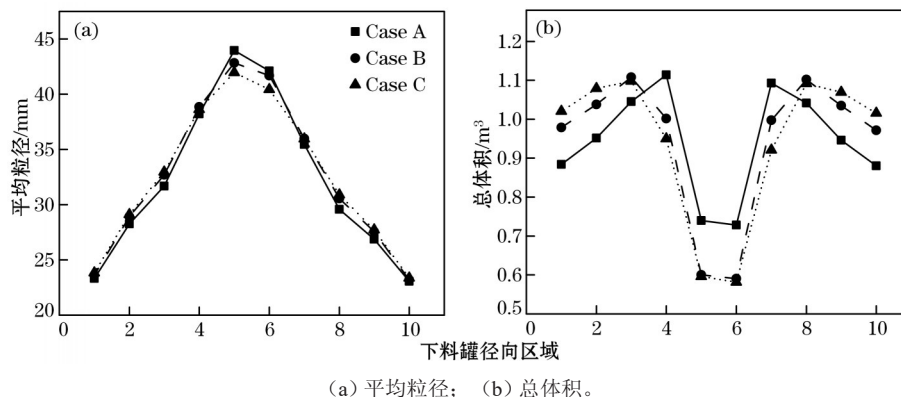


图 11 不同插入件安装高度下炉料径向分布

Fig. 11 Distribution of burden in radial direction of lower hopper when insert at different positions

插入件通过影响颗粒在料罐中的分布以及颗粒流的运动模式,将进一步影响颗粒在炉喉处的分布,按照图 9 的划分示意图,分析炉料颗粒的径向平均粒径与体积的分布规律。如图 12 所示,Case A 和 Case B 两种情况下,炉料在炉喉径向平均粒径分布相近,而 Case C 条件下,靠近中心区域的平均粒径相对较小,边缘平均粒径偏大,表明插入件安装高度过高时,插入件底部对炉料流动模式的影响减弱,料罐中心大颗粒先排出,靠近壁面的小颗粒较晚排出,导致炉喉中心区域平均粒径减小,当插入件底部位于下料罐锥形区域高度的 1/2 时,径向平均粒径分布极差相对较大。

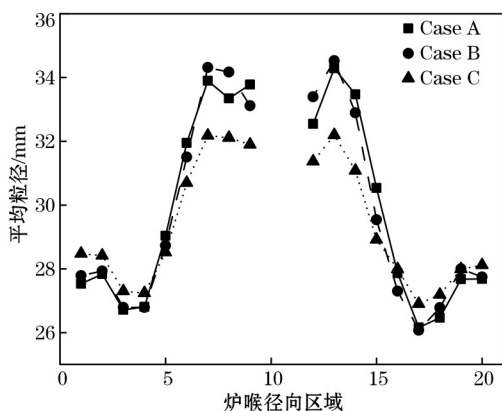


图 12 不同插入件安装高度下炉喉径向炉料分布情况

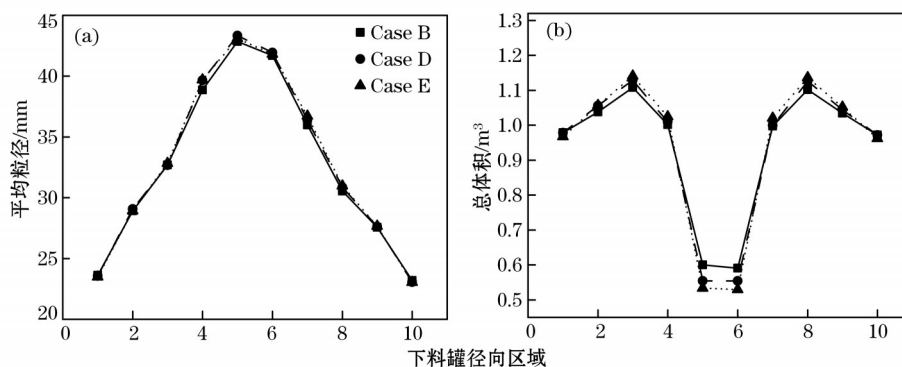
Fig. 12 Distribution of burden in radial direction of throat when insert at different positions

2.3 插入件直径对炉料分布的影响

根据 2.2 节的结果,进一步研究插入件直径对炉料分布规律的影响。取表 4 中 Case B、Case D 和 Case E 3 种条件进行数值计算并分析,即插入件安装高度为 $h/2$,插入件的直径分别取值为 $0.5d$ 、 $0.75d$ 和 d ,得到炉料在下料罐中径向分布。

不同插入件直径下炉料径向分布如图 13 所示。由图 13 可知,安装不同直径插入件时,下料罐径向平均粒径差异较小,说明插入件直径对料罐颗粒的分布影响甚小;由于颗粒碰撞插入件的面积增大,料堆堆尖位置稍偏离料罐中心,插入件直径较大时,对颗粒有一定的阻挡作用,使滚落至插入件下方的大颗粒减少。

安装不同直径的插入件后,炉喉炉料颗粒径向平均粒径分布规律图如图 14 所示,随着插入件直径的增大,在靠近炉喉中心区域,颗粒的平均粒径逐渐增大;在靠近炉墙区域,颗粒平均粒径逐渐减小。因为插入件直径增大时,其与料罐壁面间的距离减小,颗粒下降过程时,部分料罐中心区域的大颗粒受到插入件阻挡作用,趋于最后排出并落至靠近炉喉中心的区域。因此,插入件直径对炉喉径向平均粒径影响较大,平均粒径的极差随直径的增大而增大。当插入件直径等于下料罐出口直径时,靠近炉喉中心区域的大颗粒相对较多。



(a) 平均粒径; (b) 总体积。

图 13 不同插入件直径下炉料径向分布

Fig. 13 Distribution of burden in radial direction of lower hopper at condition of different insert diameters

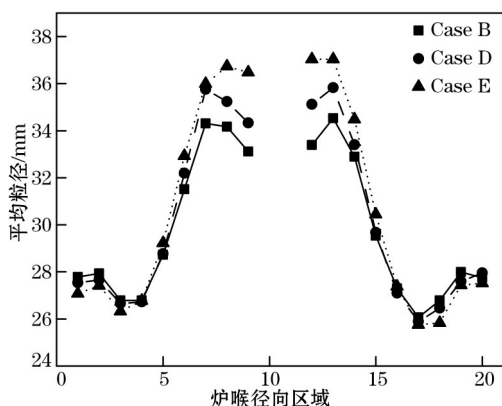


图 14 不同插入件直径下炉喉径向分布情况

Fig. 14 Distribution of burden in radial direction of throat at condition of different insert diameter

3 结论

(1) 安装插入件后,大颗粒主要分布在下料罐中心区域,小颗粒分布在料罐边缘;由于插入件底部浸入颗粒中,下料罐排料过程中,颗粒流模式为“活塞流”。炉喉径向颗粒平均粒径分布极差减小,靠近中心的区域大颗粒较少。

(2) 随着插入件安装高度增加,炉料堆尖偏离料罐中心,料罐边缘颗粒体积增加,中心区域颗粒体积减小;但安装位置不宜过高,否则插入件底部对颗粒流影响较小,若形成“漏斗流”,料罐边缘的小颗粒将布在炉喉中心,导致炉喉径向的平均粒径分布极差减小。

(3) 插入件直径大小对料罐炉料分布影响较小,对炉喉处炉料分布影响明显。随着插入件直径逐渐增大,在炉喉中心区域的颗粒平均粒径逐渐增大,边缘平均粒径逐渐减小。

(4) 虽然安装插入件能避免炉料直接碰撞下节

流阀,延长其使用寿命,但也改变了炉料在料罐和炉喉内的分布规律。改变插入件的尺寸及安装高度,目的在于抑制颗粒流排出下料罐时形成“漏斗流”,尽量使靠近料罐中心区域的大颗粒较晚排出,使之落至炉喉中心附近区域。在所考察的范围内,当插入件安装在料罐下部锥形区域高度的1/2,直径尺寸等于料罐出口直径时,炉喉中心区域的平均粒径相对较大。

参考文献:

- [1] 朱清天,程树森.高炉上部煤气流调剂影响研究[J].钢铁,2008,43(2):22.(ZHU Qing-tian, CHENG Shu-sen. Preliminary study on effects of charging system of blast furnace on gas flow distribution[J]. Iron and Steel, 2008, 43(2): 22.)
- [2] 赵宏博,滕召杰,程树森,等.高炉原燃料分级布料过程及时序[J].北京科技大学学报,2013,35(6):714.(ZHAO Hong-bo, TENG Zhao-jie, CHENG Shu-sen, et al. Graded charging process and time series of raw materials for blast furnaces[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(6): 714.)
- [3] 项钟庸,姜曦.用评价高炉生产效率的新方法研讨大型高炉生产状况[J].钢铁,2018,53(8):38.(XIANG Zhong-yong, JIANG Xi. Analysis of production indexes of large BF by new evaluation method for production efficiency[J]. Iron and Steel, 2018, 53(8): 38.)
- [4] 陆明春.无料钟炉顶的发展及秦冶炉顶设备的应用特点[J].中国冶金,2018,28(8):71.(LU Ming-chun. Development of bell less top and application characteristics of Qinye's top equipment[J]. China Metallurgy, 2018, 28(8): 71.)
- [5] 张福明,钱世崇,张建,等.首钢京唐5500 m³高炉采用的新技术[J].钢铁,2011,46(2):12.(ZHANG Fu-ming, QIAN Shi-chong, ZHANG Jian, et al. New technologies of 5 500 m³ blast furnace at Shougang Jingtang[J]. Iron and Steel, 2011, 46(2): 12.)

- [6] 赵军,田欣,滕召杰,等. 烧结矿分级入炉及焦丁混装的研究与实践[J]. 钢铁研究, 2015, 43(6): 5. (ZHAO Jun, TIAN Xin, TENG Zhao-jie, et al. Research and practice of the sinter charging by size and nut coke mixing charging process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 43(6): 5.)
- [7] Haertl J, Ooi J Y, Rotter J M, et al. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(4): 370.
- [8] Chou C S, Lee A F, Yeh C K. Placement of a non-isosceles-triangle insert in an asymmetrical two-dimensional bin-hopper[J]. Advanced Powder Technology, 2009, 20(1): 80.
- [9] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47.
- [10] Mio H, Akashi M, Shimosaka A, et al. Speed-up of computing time for numerical analysis of particle charging process by using discrete element method[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(5): 1019.
- [11] Ketterhagen W R, Curtis J S, Wassgren C R, et al. Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method [J]. Powder Technology, 2009, 195(1): 1.
- [12] LIU S, ZHOU Z, DONG K, et al. Impaction of particle streams on a granular bed[C]//AIP Conference Proceedings. AIP: [s.n.], 2013: 634.
- [13] 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.
- [14] 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, 16(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, 16(6): 1038.)
- [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] 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.
- [17] 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.)
- [18] 马富涛, 张建良, 刘云彩. 基于人工智能算法的高炉布料数值模拟[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 8. (MA Fu-tao, ZHANG Jian-liang, LIU Yun-cai. BF burden distribution numerical simulation based on genetic algorithm[J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 18.)
- [19] 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.
- [20] Yang S C, Hsiao S S. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts[J]. Powder Technology, 2001, 120(3): 244.
- [21] 刘强, 苏景林, 战金辉, 等. 内构件对移动床内颗粒物料流动特性影响的离散模拟[J]. 过程工程学报, 2017, 17(6): 1163. (LIU Qiang, SU Jing-lin, ZHAN Jin-hui, et al. Discrete modeling of effect of insert on discharge dynamics of granular material in moving bed[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(6): 1163.)
- [22] 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, 15(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, 15(1): 1.)
- [23] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010. (HU Guo-ming. Analysis and Simulation of Granular System by Discrete Element Method Using EDEM [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010.)
- [24] ZHOU Z Y, ZHU H P, YU A B, et al. Discrete particle simulation of gas-solid flow in a blast furnace[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1760.
- [25] 徐文轩, 程树森, 牛群, 等. 并罐式无钟高炉布料过程偏析优化措施[J]. 钢铁, 2018, 53(10): 24. (XU Wen-xuan, CHENG Shu-sen, NIU Qun, et al. Optimization measures of segregation during charging process of bell-less top blast furnace with two parallel hoppers[J]. Iron and Steel, 2018, 53(10): 24.)
- [26] Yu Y W, Andreas W. Inter-particle percolation segregation during burden descent in the blast furnace[J]. ISIJ International, 2011, 51(7): 1050.
- [27] Yu Y W, Saxén H. Effect of DEM parameters on the simulated inter-particle percolation of pellets into coke during burden descent in the blast furnace[J]. ISIJ International, 2012, 52(5): 788.