

COREX 竖炉物料运动流型及瞬态特性的 离散元模拟

周 恒, 游 洋, 罗志国, 邹宗树

(东北大学 多金属共生矿生态利用教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于离散单元数值计算方法, 建立 COREX 竖炉内物料颗粒尺度运动行为的数学模型, 研究炉内物料运动流型及其瞬态特性, 特别是颗粒的瞬态速度和瞬态应力分布. 模拟结果表明: COREX 竖炉内存在三种类型的流动区域: 活塞流区、准停滞区以及沟流区. 炉内颗粒的瞬态速度分布表明炉内存在两种类型的速度波: 装料过程引发的向下传播的速度波和底部排料引发的向上传播的速度波. COREX 竖炉内颗粒法向应力随时间的变化较小, 竖炉底部导流锥顶部存在较强的应力区, 而无导流锥竖炉底部中心存在较强应力区, 沟流区的应力较弱.

关 键 词: COREX 竖炉; 离散元法; 流型; 瞬态特性; 法向应力

中图分类号: TF 557 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)09-1293-05

Discrete Element Simulation of Solid Flow Pattern and Transient Features of Burden Descending in COREX Shaft Furnace

ZHOU Heng, YOU Yang, LUO Zhi-guo, ZOU Zong-shu

(Key Laboratory of Ecological Utilization of Multi-metallic Minerals of Education Ministry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A mathematical model based on discrete element method (DEM) was developed to investigate the behaviors of solid particulate motion in a COREX shaft furnace model from particle-scale view. The solid flow pattern and transient features of burden were simultaneously analyzed, especially the transient behavior of velocity and stress distribution were calculated. The results showed that the solid flow in COREX shaft furnace can be divided into three different flow regions: plug flow zone, quasi-stagnant zone and converging flow zone. The transient behavior of velocity distribution indicates that there are two types of velocity waves in the furnace. One is a downward wave caused by charging and the other is upward from bottom caused by discharging. The normal stress has a minor change with time. A high stress field exists on the top of the guiding cone, while for the furnace without guiding cone, the particles in the lower central zone present strong normal stress. On the contrary, the particles exhibit weak normal stresses in the converging flow zone.

Key words: COREX shaft furnace; DEM (discrete element method); flow pattern; transient features; normal stress

高炉炼铁是现代冶金工业生产的主导流程, 但其面临着焦煤资源逐渐短缺的问题. 为摆脱对冶金焦炭的依赖, 近年来诸如 FINEX, Hismelt 以及 COREX 等非高炉炼铁技术得到迅猛发展^[1].

其中, COREX 是首先实现工业化运行的一种用煤和球团(块矿)生产铁水的炼铁新工艺, 具有无焦或少焦冶炼的特点^[2-3]. COREX 竖炉及熔化气化炉均为典型的气固逆流反应器, 离散颗粒的运

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAE04B02); 国家自然科学基金资助项目(51174053).

作者简介: 周 恒(1988-), 男, 湖南衡阳人, 东北大学博士研究生; 邹宗树(1958-), 男, 山东章丘人, 东北大学教授, 博士生导师.

动行为直接影响炉况的稳定和顺行,因此,COREX 过程中固体物料的运动现象一直是学者研究的热点^[4-7].

根据炼铁反应器中物料运动行为的研究方法,可将其主要分为两大类:物理实验研究和数值模拟研究. Lee^[8]建立冷态模型研究了有无死料柱对竖炉物料运动流型的影响. Zhou 等^[9]通过物理实验模拟了引入 AGD(areal gas distribution)技术 COREX 竖炉内的物料运动状态. 上述研究成果为了解 COREX 竖炉中物料运动行为提供了有效信息,但冷态实验结果只能反映炉料运动的宏观行为,不能从微观角度描述物料的运动特征. 近年来,随着计算机能力的大幅提升,基于拉格朗日坐标系,考虑颗粒与颗粒/壁面相互作用的离散单元法(DEM)可从颗粒尺度描述物料运动行为,无须过多假设,并可获得微观的瞬态信息,已引起学者们的广泛重视^[10-12]. 事实上,DEM 已被应用到模拟 COREX 过程的炉顶布料行为^[4,7,13],竖炉下部物料下降速度^[14],熔化气化炉内物料运动行为等^[5]. 本文采用离散单元法建立 COREX 竖炉内颗粒流动的数学模型,进行固体物料运动流型的分析,深入颗粒尺度描述物料运动过程中的瞬态特征,为进一步了解炉内物料运动行为提供理论依据.

1 数学模型

1.1 DEM 模型建立

根据牛顿第二定律,颗粒运动的控制方程可描述为

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

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

式中: m_i , I_i , v_i 和 ω_i 分别代表颗粒 i 的质量(kg)、转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)、平动速度(m/s)和转动速度(rad/s); $m_i g$ 为 i 颗粒所受重力; $F_{cn,ij}$, $F_{ct,ij}$ 为颗粒间法向、切向接触力(N); $F_{dn,ij}$, $F_{dt,ij}$ 为颗粒间法向、切向阻尼力(N); T_{ij} , M_{ij} 分别为颗粒所受切向力扭矩和滚动摩擦扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$); k_i 为与颗粒 i 相接触颗粒数目. 本文中颗粒间相互作用力模型采用线性“弹簧-阻尼-摩擦板”模型. 颗粒所受接触力、阻尼力、摩擦力及扭矩详见文献[4, 5, 10, 12].

1.2 模拟条件

离散元模拟需要通过计算程序来实现,本研究采用自主开发模拟程序进行计算,整个代码采用面向对象语言 C++ 实现. 本研究将 COREX-3000 竖炉实际几何尺寸 1:20 缩小,并取其二维扁平模型进行计算,图 1 为本研究竖炉计算区域及几何尺寸. 为减少计算量,本研究二维扁平模型宽度取 5 个 d_p (0.05 m),且将颗粒直径适当放大并加快竖炉下部螺旋排料速度. 其中,每 100 时间步长内有 4 个颗粒从一侧螺旋排出,排料速度约为 0.251 kg/s. 具体模拟条件和模拟参数如表 1 所示.

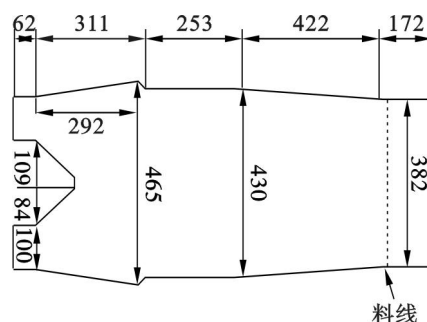


图 1 计算 COREX 竖炉模型尺寸图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of calculation region of COREX shaft furnace (mm)

表 1 模拟条件及参数

Table 1 Simulation conditions and parameters

变量	数值
颗粒形状	球形
颗粒数量, N	24 800
颗粒密度, $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4 000
颗粒直径, d_p / mm	10
颗粒与颗粒滑动摩擦系数, $\mu_{s,pp}$	0.5
颗粒与颗粒滚动摩擦系数, $\mu_{r,pp}$	$0.005 d_p$
颗粒与壁面滑动摩擦系数, $\mu_{s,pw}$	0.5
颗粒与壁面滚动摩擦系数, $\mu_{r,pw}$	$0.005 d_p$
颗粒杨氏模量, E_p / Pa	2 160 000
壁面杨氏模量, E_w / Pa	2 160 000
泊松比, ν_p	0.3
时间步长, $\Delta t / \text{s}$	1.0×10^{-4}

2 结果与讨论

2.1 物料运动流型

COREX 竖炉物料堆积一定高度后,连续排料和加料,当炉内运动状态达到稳定状态时,在炉顶加入红色的示踪料层,表征炉内的运动模式. 图 2 为 COREX 竖炉内物料初始填充床及其运动流

型. 在本研究模拟条件下, 炉内物料运动模式在时间 24.4 s 时达到一相对固定状态. 竖炉内部存在三种类型的流动区域: 活塞流区、准停滞区以及沟流区. 实际生产中, 为避免竖炉底部物料无滑移运动, 于底部中心人为添加导流锥, 本模拟亦在竖炉底部中心设置相应的导流锥区域 (IV). 另外, 竖炉围管以上区域为典型的活塞流区 (I), 物料在径向上下降均匀. 沟流区 (II) 位于竖炉底部螺旋排料丝杠顶端上方区域, 该区域物料下降速度较快. 而竖炉内的准停滞区 (III) 位于竖炉下部螺旋

丝杠近端上方. 这一流动模式特别是竖炉下部的流动状态与前人冷态模拟实验确定的流动特征一致^[8-9]. 其中, 准停滞区的形成受竖炉下部螺旋排料的影响. 炉料在重力作用下向螺旋丝杠顶端空隙运动, 该处有最大下降速度, 随着螺旋丝杠的机械作用, 顶端物料水平向外输送, 从而使丝杠近端螺旋丝杠顶端空隙被顶端传送过来的物料填满, 导致螺旋丝杠近端上方物料下降速度变小. 本研究设定螺旋丝杠顶端为主要排料区域, 因此在螺旋丝杠近端上方形成炉料缓慢移动的准停滞区.

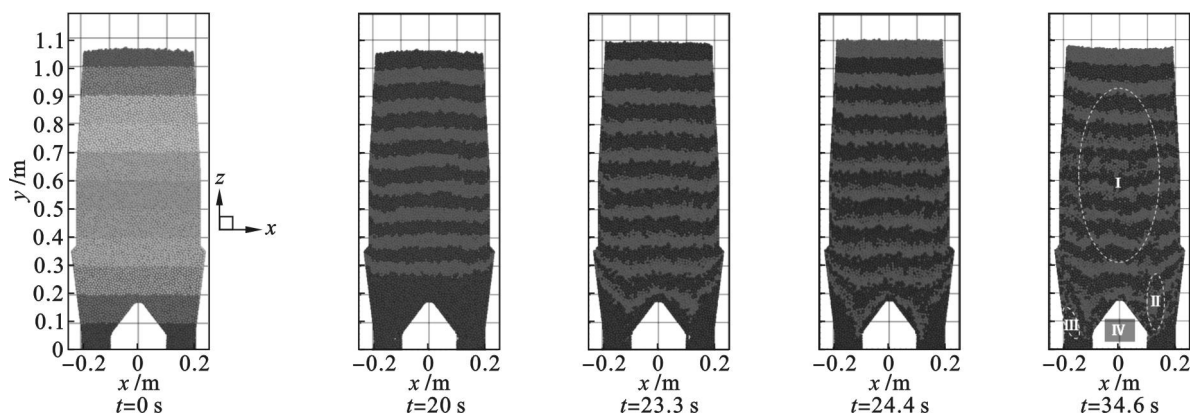


图2 物料运动流型由初始至稳定状态过程

Fig. 2 Evolution of solid flow pattern from initial to steady state

图3为COREX竖炉物料运动流型及迹线图. 从示踪颗粒运动迹线可知, 竖炉边缘颗粒竖直下降进入竖炉下部的准停滞区并在该区域缓慢向排料区运动. 而竖炉中心区物料竖直向下运动至导流锥顶部, 然后沿着导流锥壁面向排料区运动. 从物料运动流型可看出, 竖炉上部物料均匀下降, 运动流型呈现‘一’型. 随着物料的继续向下运动, 边壁处物料下降速度逐渐变慢, 在围管区域下方物料运动流型变为‘U’型. 进入竖炉下部后, 受螺旋排料作用, 运动流型呈现‘W’型. 需要指出的是, 竖炉下部螺旋结构直接影响物料运动流型, 关于螺旋结构对COREX竖炉内物料运动流型及瞬态行为影响的相关工作正在进行中, 将在后续

报道中详细呈现.

2.2 物料运动瞬态行为

COREX竖炉内颗粒平均速度随时间的变化如图4所示. 图4a为低于基准线0.11 m以下区域颗粒平均速度, 图4b为低于围管区域颗粒平均速度.

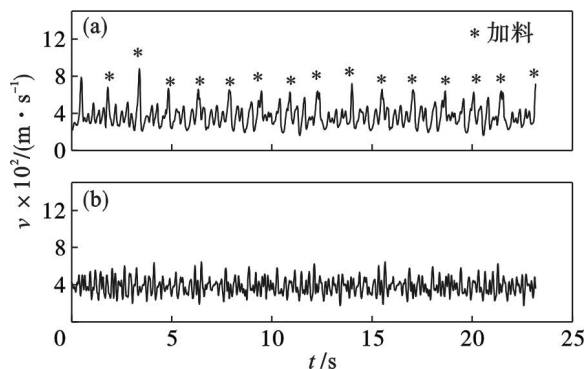


图4 COREX竖炉颗粒平均速度

Fig. 4 Average particle velocity in COREX shaft furnace

(a)—SL -0.11; (b)—围管以下区域.

由图4a可知, 由于装料的原因, 炉内颗粒平均速度存在着与装料频率相匹配的速度波, 在波峰之间速度也呈较为剧烈的波动. 对竖炉围管以下区域而言, 如图4b所示, 颗粒的平均速度受上部的布料过程影响较小, 颗粒速度在均值0.04 m/s周围上下波动. 螺旋的连续排料行为导

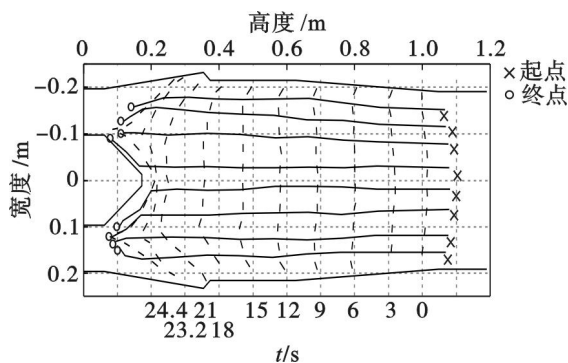


图3 物料运动流型及迹线

Fig. 3 Flow pattern and timelines of burden

致了竖炉下部颗粒平均速度的脉动现象,而前人模拟高炉下部物料速度变化时亦有相似现象^[11]. 图 5 为炉内颗粒的速度矢量变化图. 由图可以看出,底部物料的连续排出会引起自下而上传播的速度波,并且随着炉内高度升高颗粒速度逐渐增大. 这一现象也解释了图 4a 中两波峰之间较为剧烈的振幅波动. 通过对颗粒下降速度的瞬态分析,

炉内存在两种类型的速度波:装料过程引发的向下传播的速度波和底部排料引发的向上传播的速度波. 但需要指出的是炉内物料下降的宏观运动模式是一相对稳定状态,而颗粒尺度描述的瞬态特征可提高对固体物料宏观运动的理解.

图 6 为炉内颗粒所受法向应力. 本模拟定义颗粒 i 所受法向应力为

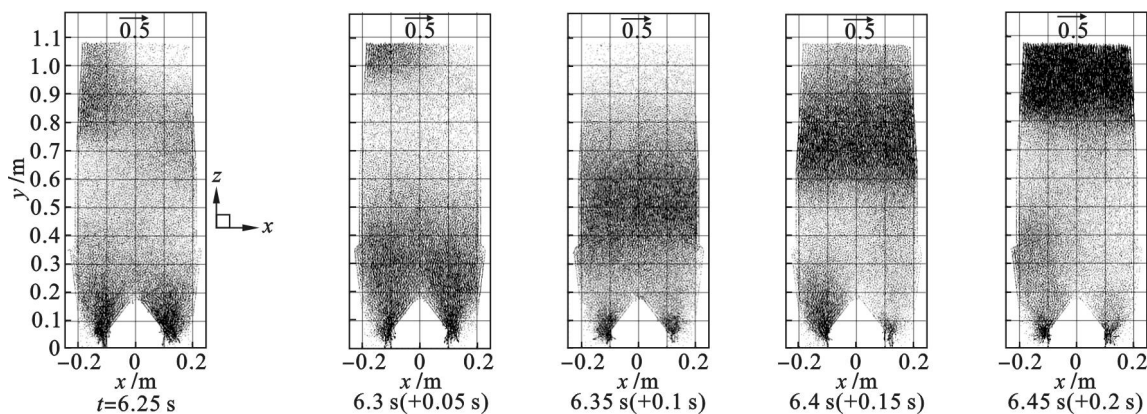


图 5 颗粒速度矢量变化

Fig. 5 Evolution of particle velocity vectors

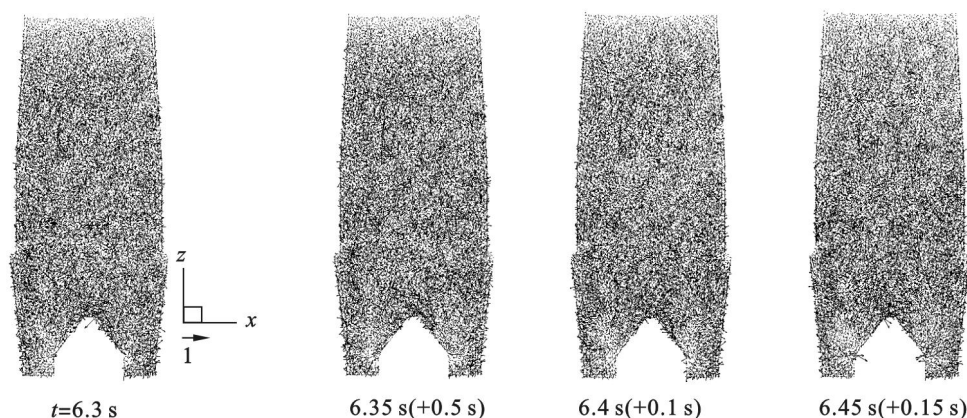


图 6 颗粒法向应力变化

Fig. 6 Evolution of particle normal stress

$$\sigma_n = (\sum F_{n,ij}) / (\pi D_i^2) \quad (3)$$

式中: $F_{n,ij}$ 为作用在 i 颗粒的法向力; D_i 为颗粒直径. 由图可知,本模拟条件下, $t = 6.3 \sim 6.45$ s 时间段内,炉内存在自下而上的速度波,但是炉内各区域颗粒的应力变化较小,主要原因是颗粒瞬态速度波动时,颗粒-颗粒间的接触关系迅速重构,从而导致颗粒所受接触作用力波动较小,只是施力颗粒变化. 图 7 为竖炉底部区域法向应力分布. 竖炉底部导流锥的设置避免了无滑移静止颗粒的存在,高应力颗粒存在于导流锥顶部区域. 当竖炉底部无导流锥时,底部中心区域自发形成死料区,存在强应力结构,此部分颗粒支撑上部颗粒. 而沟流区内由于颗粒的连续排料作用使得此区域具有最弱应力结构.

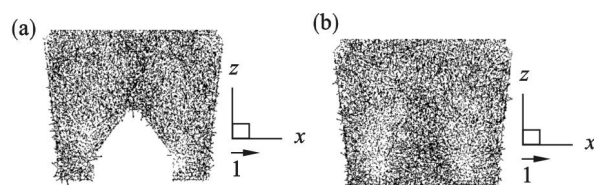


图 7 竖炉底部法向应力

Fig. 7 Normal stress distribution in bottom of furnace

(a) —有导流锥; (b) —无导流锥.

3 结 论

1) 基于牛顿第二定律的离散单元法,建立描述 COREX 竖炉内物料流动的数值模型,该模型

(下转第 1301 页)