

并罐式无钟炉顶装料行为的 离散元模拟及实验研究*

邱家用, 张建良, 孙辉, 闫炳基, 李峰光, 国宏伟

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过离散元模拟和物理实验相结合的方法研究了并罐式无钟炉顶装料过程中颗粒的流动行为.结果表明:DEM模拟能很好地再现实验结果;料罐内部颗粒间力的分布不均匀,强力链主要分布在料罐下部和斜墙附近;料罐内颗粒流动为偏斜式漏斗流,可分为准呆滞区、流动加速区、两侧墙壁附近的剪切层,料罐内颗粒流动模式影响着颗粒的排放顺序,并进一步影响颗粒的下落轨迹及其在炉内的分布;颗粒流动轨迹受料罐出口闸门开度的影响,为保证稳定布料,应将闸门开度控制在合理的范围内;颗粒堆积过程中,堆尖位置随着料流落点位置而变化,堆尖半径大于落点半径.

关键词: 高炉; 无钟炉顶; 离散元法; 装料行为; 颗粒流; 力链

中图分类号: TF512 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.06.002

引言

高炉内炉料分布对料柱透气性及煤气流分布有很大影响,进而影响高炉还原效率及炉况顺行.为提高冶炼效率,装料设备和方法不断得到发展,装料系统主要经历了由钟式布料器、变径炉喉到无钟布料器的发展^[1].随着高炉装料系统由钟式炉顶到无钟炉顶的发展,布料形式灵活多样.因此,研究无钟高炉装料过程中炉料运动行为,对于合理控制炉料分布及稳定高炉操作有重大意义.早期的无钟炉顶为并罐式,并罐布料偏行造成了炉料分布不均匀性的缺陷,钱人毅曾定性地研究了并罐布料周向不均匀分布的原因^[2].为克服这一缺陷,出现了串罐和新型双并罐无钟炉顶^[3],串罐式无钟炉顶的上下料罐串联,为中心排料式;新型并罐式无钟炉顶的料流调节阀更靠近高炉中心线,改变料罐形状,使料流尽量靠近高炉中心线.

为掌握无钟高炉布料规律,国内外许多研究者基于物理实验^[4-6]和单颗粒运动数学模型^[7-11]对无钟炉顶装料过程中的炉料分布进行了研究,促进了无钟高炉布料理论的发展和布料操作的优化.然而,由于炉料是由颗粒物料组成,其在流动过程中表现出不同于连续介质的离散性,在外力作用或内部应力状况变化时,整体发生类似于流体的流动而形成颗粒流.传统

* 收稿日期: 2013-11-11; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB720401)

作者简介: 邱家用(1975—),男,河南人,工程师,博士生(E-mail: qiujiayong0902@163.com);
张建良(1965—),男,天津人,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: zhang.jianliang@hotmail.com).

的布料模型难以分析颗粒流动过程的微观动力学行为和细节,而颗粒尺度分析^[12-13]可以建立宏观运动行为和微观力学的有机联系,有利于获得颗粒离散体的复杂信息和数据,深入认识颗粒流动机制,为优化操作乃至设备的优化设计和工艺改进提供参考。一种颗粒尺度的数值模拟方法就是离散元法(discrete element method, DEM),是由Cundall和Strack^[14]于1979年提出的,随后,DEM得到不断发展和应用,成为工业物料运输、处理加工过程中颗粒流有效可行的数值模拟方法,如流态化床^[15]、振动筛^[16]以及料罐内颗粒流动^[17-19]。近年来,离散元法在研究高炉内炉料运动行为方面发挥了重要作用^[20-24],其中对装料系统以下高炉内炉料运动、力学行为和应力分布方面的研究较多。Mio等^[25-26]基于离散元法研究了钟式炉顶和无钟炉顶的装料过程和粒度偏析行为,基于离散元法建立并罐无钟炉顶布料离散元全模型^[27],从整体上模拟了从缓冲槽、传送带、并罐、溜槽到料面的颗粒流动和堆积过程。料罐内颗粒流动模式、粒度偏析、速度分布对炉料运动轨迹和落点位置有很大影响,因而需要对料罐装料和排料过程中颗粒流进行深入研究。尽管炉料是由不同粒度、密度和形状的颗粒组成,采用单粒径颗粒研究并罐无钟炉顶装料过程中颗粒流动模式和基本流动行为仍是必要的,有利于进一步研究多粒径颗粒流动和偏析行为以及认识高炉实际布料过程中炉料运动行为。

以新型并罐式无钟炉顶为背景,采用物理实验和数值模拟相结合的方法研究了并罐式无钟炉顶装料行为。物理实验是在设计制作了1/12并罐式无钟炉顶装料模型上进行的,为便于观察物料流动状态,采用有机玻璃材料制作。数值模拟方法采用DEM方法,将数值模拟结果与物理实验结果进行对比,验证离散元模型的适用性,从颗粒尺度上分析颗粒微观动力学行为,形成对炉料流动和堆积行为的基本认识。

1 研究方法

1.1 物理模型

物理实验是在1/12比例的并罐式无钟炉顶装料模型上进行的,见图1。实验装置由供料罐、导料槽、并列式料罐(双罐左右对称并列布置,为简化,只含其中之一的左罐)、钢支架、中间漏斗、中心喉管、布料溜槽及方形接料槽组成,除钢支架外均采用厚度5mm的有机玻璃板制作。供料罐是为了便于向料罐内装料而设立的,采用半锥度角近似50°的锥形料罐,出口附近安装了插入式闸门用于控制装料和排料。为便于观察料罐内颗粒堆积形貌和研究颗粒流动模式,将并列式料罐设计为准三维形式,即沿料罐宽度方向取三维料罐中心对称面附近较薄的区域,内型宽度70mm,排料口尺寸72mm×70mm。料罐上部入口处设有导料槽,通过调节导料槽与垂直方向的角度,可改变物料在料罐内的堆积形状,料罐出口的插入式闸门可控制排料流量。中间漏斗与料罐排料咀之间通过螺栓连接。颗粒物质采用经过挑选的、粒度较为均匀的黑豆颗粒,其相关物理性能如表1所示。

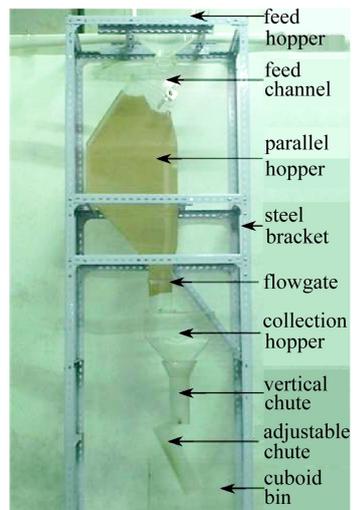


图1 并罐式无钟炉顶装料模型

Fig.1 The parallel-hopper type bell-less charging model

高炉实际装料过程中,炉料由上料系统运输到炉顶,经过上部溜槽进入料罐,炉料运动包

括从料罐出口排出、沿中心喉管下降、在布料溜槽中流动、脱离溜槽末端下落到料面几个阶段。物理模型中采用供料罐代替上料系统,物理实验包括以下步骤:

- 1) 将颗粒料装入供料罐内,将料面整平;
 - 2) 打开供料罐下部的闸门,让物料沿导料槽完全流入料罐内直到堆积稳定,此时保证料罐出口闸门关闭;
 - 3) 打开并控制料罐排料闸门的开度,让颗粒从排料口排出,经过中间漏斗、中心喉管和溜槽,流入接料盒(500 mm×300 mm×90 mm)内,堆积形成具有一定内堆角和外堆角的料堆。
- 整个实验采用数字视频摄像机记录颗粒流动过程。

表 1 实验用颗粒料的物理性能

Table 1 Physical properties of the granular material for the experiment

material	mass m /kg	mean particle diameter d /mm	density ρ /(kg/m ³)
black bean	4.0	9.0	1 165.0

1.2 离散元模型

在颗粒系统中,颗粒运动包括平动和转动,其运动服从 Newton(牛顿)第二定律。在 DEM 中,颗粒接触模型由弹簧、阻尼器和滑动器组成,法向上的弹簧和阻尼器分别对应于法向上颗粒的弹性和塑性,在切向方向上,由滑动器、弹簧和阻尼器组成,分别对应颗粒在切向上的滑动、弹性和塑性,如图 2 所示。由于是针对非粘性颗粒的堆积问题,因此不考虑颗粒间及颗粒与墙壁间的接触粘结,阻尼取局部阻尼和粘性阻尼。颗粒发生的平动和转动是由其与相邻颗粒或墙壁间的相互作用确定,满足如下的控制方程式(1)和(2):

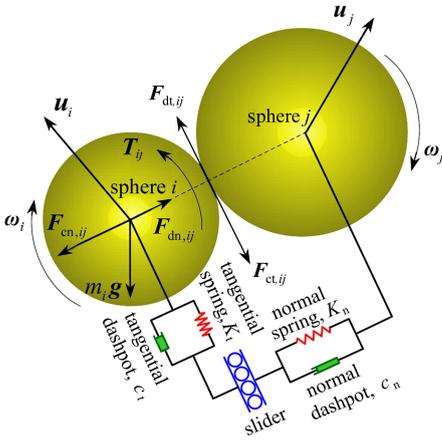


图 2 颗粒间相互作用力模型

Fig.2 Model of interaction forces between two particles

$$m_i \frac{du_i}{dt} =$$

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

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

其中 m_i, I_i, u_i 和 ω_i 分别为颗粒 i 的质量、转动惯量、平动速度和转动速度。对于质量 m_i , 半径 R_i 的圆球颗粒,其转动惯量可表示为 $I_i = (2/5)m_i R_i^2$ 。颗粒所受的力和力矩包括: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 $F_{dt,ij}$, 切向合力矩 T_{ij} 可分解为切向转矩 $T_{t,ij}$ 和摩擦转矩 $T_{r,ij}$ 。切向转矩是由切向力产生的而引起颗粒 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。参考先前文献[28],颗粒所受接触力、阻尼力、摩擦力和转矩列于表 2。

表 2 中的参数具体如下:

$$E^* = [(1 - \nu_i^2)/E_i + (1 - \nu_j^2)/E_j]^{-1}, \quad G^* = [(1 - \nu_i^2)/G_i + (1 - \nu_j^2)/G_j]^{-1},$$

$$G = E/(2 + 2\nu), \quad c_n = 2\beta_n [(4/3)E^* m_{ij}(R^*)^{1/2}]^{1/2},$$

$$c_t = 2\beta_t [8G^* m_{ij} (R^* \delta_n)^{1/2}]^{1/2}, 1/R^* = 1/R_i + 1/R_j,$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{d}_{ij} / |\mathbf{d}_{ij}|, \delta_n = R_i + R_j - |\mathbf{d}_{ij}|,$$

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i + \boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{d}_j - \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{d}_i, \hat{\boldsymbol{\omega}}_i = \boldsymbol{\omega}_i / |\boldsymbol{\omega}_i|,$$

$$\mathbf{u}_{n,ij} = (\mathbf{u}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}, \mathbf{u}_{t,ij} = \mathbf{u}_{ij} - \mathbf{u}_{n,ij}, m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j);$$

值得注意的是,合切向力

$$\mathbf{F}_{t,ij} = -\min(|\mathbf{F}_{ct,ij} + \mathbf{F}_{dt,ij}|, |-\mu_s |\mathbf{F}_{cn,ij} + \mathbf{F}_{dn,ij}||) \cdot \boldsymbol{\delta}_t / |\boldsymbol{\delta}_t|,$$

μ_s 和 μ_r 为滑动和滚动摩擦系数;其中 R_i 和 R_j 分别为单元 i 和 j 的半径; \mathbf{d}_{ij} 为从单元 i 质心到单元 j 质心的位移向量; E_i 和 E_j 分别为单元 i 和 j 的弹性模量; ν_i 和 ν_j 分别为单元 i 和 j 的 Poisson(泊松)比; \mathbf{d}_i 为从单元 i 的质心指向接触点的向量; \mathbf{d}_j 为从单元 j 的质心指向接触点的向量; δ_n 为法向重叠量; $\boldsymbol{\delta}_t$ 为单元 i 和 j 之间的切向位移向量; c_n 和 c_t 分别为法向和切向阻尼常数; β_n 和 β_t 分别为法向和切向临界阻尼比。

表2 作用在颗粒 i 上的力和力矩

Table 2 Components of forces and moments acting on particle i

force and moment		symbol	equation
normal force	contact	$\mathbf{F}_{cn,ij}$	$-(4/3)E^*(R^*)^{1/2}\delta_n^{3/2}\mathbf{n}$
	damping	$\mathbf{F}_{dn,ij}$	$-c_n \mathbf{u}_{n,ij}$
tangential force	contact	$\mathbf{F}_{ct,ij}$	$-8G^*(R^*\delta_n)^{1/2}\boldsymbol{\delta}_t$
	damping	$\mathbf{F}_{dt,ij}$	$-c_t \mathbf{u}_{t,ij}$
gravity			$m_i \mathbf{g}$
tangential torque		$\mathbf{T}_{t,ij}$	$\mathbf{d}_i \times (\mathbf{F}_{ct,ij} + \mathbf{F}_{dt,ij})$
rolling friction torque		$\mathbf{T}_{r,ij}$	$-\mu_r \mathbf{F}_{cn,ij} \hat{\boldsymbol{\omega}}_i$

表3 DEM 模拟用参数

Table 3 Parameters used in the DEM simulation

parameter	value	
black bean	number of particles N	8 995
	particle diameter d /mm	9
	particle density ρ / (kg/m ³)	1 165
	shear modulus G_p /Pa	1.2×10^7
	Poisson's ratio ν_p	0.25
	local damping coefficient C_l	0.05
	critical damping ratio β_n, β_t	0.60
	particle-particle sliding friction coefficient μ_{p-p}	0.50
	rolling friction coefficient μ_r	0.05
	perspex wall	shear modulus G_w /Pa
Poisson's ratio ν_w		0.40
wall-particle sliding friction coefficient μ_{p-w}		0.60
feed channel angles α_f / (°)		40
chute angles α_c / (°)		45 (35, 45, 55)
	opening of flowgate ψ /%	50 (30, 40, 50, 60, 75, 100)
	time step Δt /s	2×10^{-5}

1.3 模拟条件

在 DEM 模拟中,假定颗粒单元为刚性体,本身不会被破坏,且颗粒间接触为点接触。模拟

过程与物理实验步骤类似:首先,在供料罐内随机生成一定数量和粒度的颗粒,使其在重力作用下自由沉降至趋于稳定状态;其次,打开供料罐出口闸门,使颗粒排出,沿导料槽流入并列式料罐内,直到物料全部装入料罐内并趋于稳定;最后,控制料罐排料口的闸门开度,使颗粒由料罐出口排出,经过中间漏斗、中心喉管和溜槽,流入接料盒堆积形成具有一定料面形状的料堆。模拟用颗粒物性参数见表 3(括号内数值为实验中不同操作参数值;剪切模量与弹性模量和 Poisson 比的关系式 $G = E/(2 + 2\nu)$)。

2 模型验证

图 3 为实验和 DEM 模拟的料罐装料过程,料罐上部的导料槽倾角 $\alpha_f = 40^\circ$, 颗粒介质为黑豆;图 4 为料罐排料过程的实验和 DEM 模拟结果,此时料罐排料口闸门开度 $\psi = 50\%$ 。模拟图中料罐右侧的虚线表示无钟炉顶中心线。当打开上部供料罐的出口闸门时,颗粒在重力作用下排出,沿着导料槽进入料罐作斜下抛运动。开始排料时颗粒先与料罐左下侧壁碰撞,然后沿斜面流动到达料罐底部。随着排料进行,料面上升而出现堆尖,最终颗粒堆积形成稳定的料面形状。当开启料罐底部闸门(开度 $\psi = 50\%$)时,颗粒从出口排出,料罐右侧料面下降较快,堆尖消失而形成倾斜的料面,料面左侧的颗粒向右侧滚动,随着颗粒不断排出,料面倾斜度增大,与左下侧墙壁接触的颗粒倾向于后期排出。排料末期,在出口上方附近形成凹面。观察图 3 和图 4,可以看出实验结果与数值模拟结果相近,证实了 DEM 模型的适用性。

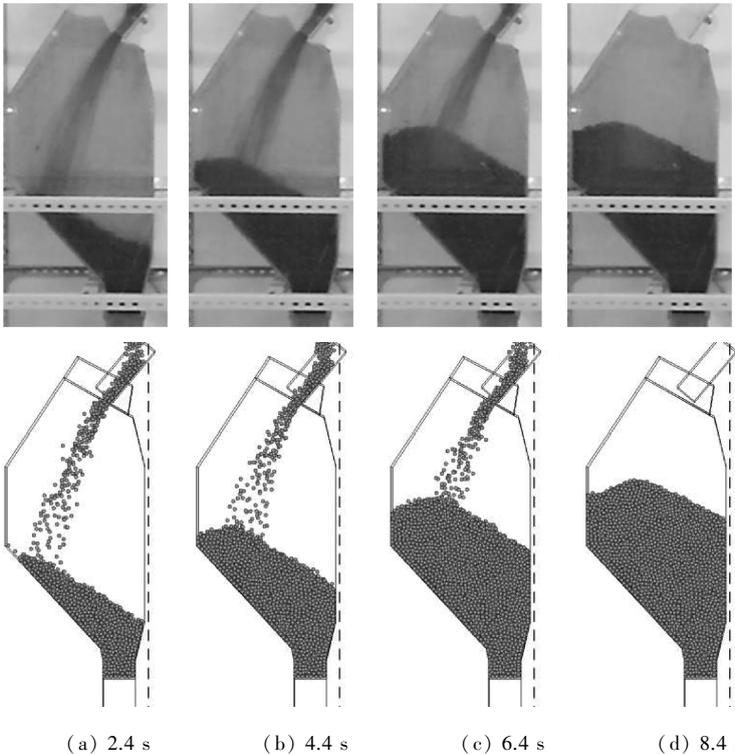


图 3 料罐装料过程 DEM 模拟与实验结果对比 ($\alpha_f = 40^\circ$; 黑豆颗粒;上:实验结果,下:模拟结果)

Fig.3 Comparison of charging process in the parallel hopper between experiment and simulation

($\alpha_f = 40^\circ$; black bean; upper: experimental results, lower: simulation results)

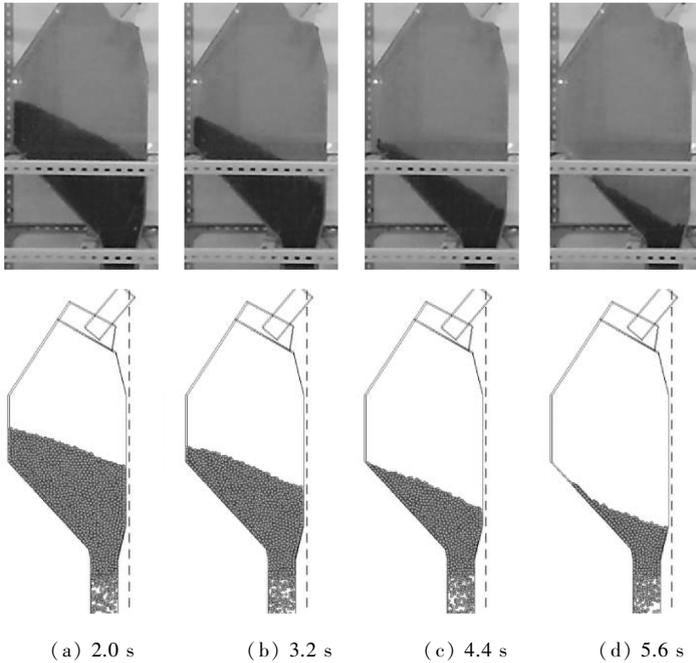


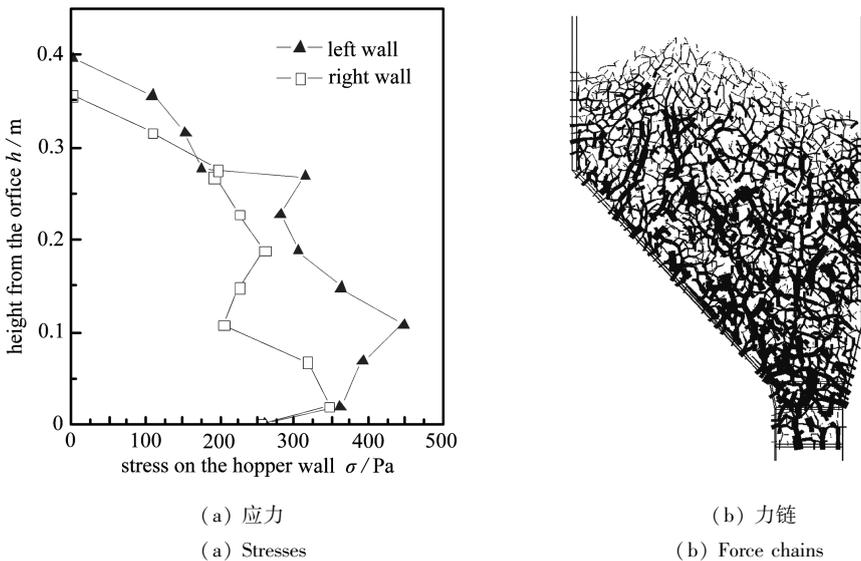
图4 料罐排料过程 DEM 模拟与实验结果对比 ($\psi = 50\%$; 上: 实验结果, 下: 模拟结果)

Fig.4 Comparison of discharging process in the parallel hopper between experiment and simulation ($\psi = 50\%$; upper: experimental results, lower: simulation results)

3 结果与讨论

3.1 料罐边壁的应力分布及内部力链结构

图 5(a) 为左料罐装料后左右边壁上的应力随着高度的变化, 图 5(b) 为相应的料罐内部力链网络结构. 由应力分布图看出, 随着高度降低, 两侧墙壁所受应力先增大, 波动达到峰值,



(a) 应力

(a) Stresses

(b) 力链

(b) Force chains

图5 料罐内部应力分布及力链网络

Fig.5 Distribution of stresses on the wall and contact force chain network in the hopper

随后降低;左侧墙壁的应力总体上大于右侧墙壁,尤其左侧斜墙处的应力,在左侧斜墙中下部达到峰值,而对应的右侧竖直墙壁的下部拐角处的应力降低到谷值;从右侧竖直墙壁拐点往下,右侧墙壁应力增大,达到峰值后在料罐底部闸门处减小,而对应的左侧墙壁的应力不断减小.由力链网络图可知,料罐内部应力分布不均匀,颗粒重量通过力链有方向性地传播到料罐边壁上,顶部以弱力链为主,传播到边壁上的力非常弱,因此上部应力随着高度降低而陡然增加;在下部分布着强力链,尤其左侧斜墙承受着颗粒体系的重力分量,力链强度大,强力链支撑着颗粒体系的大部分重量,使传递到边壁上的力增大,而在底部狭窄的料嘴处的应力不再增大反而减小.左侧斜墙承受着较大的应力,当料罐装料时,由于颗粒下落碰撞产生冲击作用以及颗粒流动摩擦,斜墙承受更大的作用力,因此并列式料罐在设计时要充分考虑斜墙的高强度、耐冲击和耐磨性能,防止料罐斜墙部位破损.

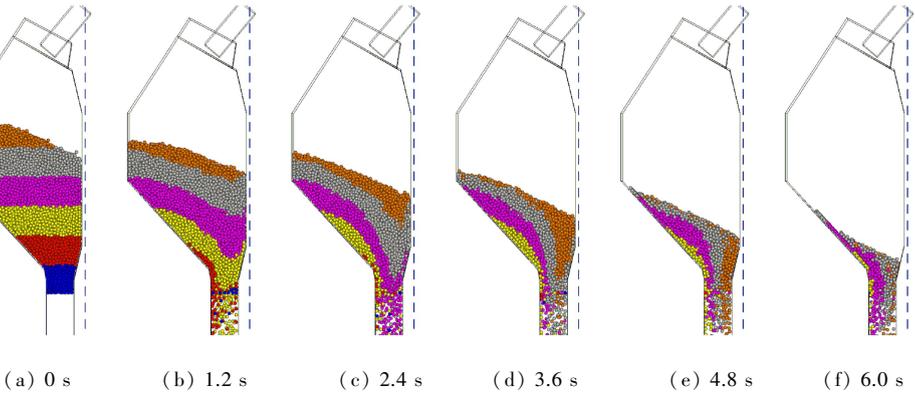


图6 料罐连续排料过程中颗粒的流动模式

Fig.6 Flow patterns of particles in the parallel hopper during the continuous discharging process

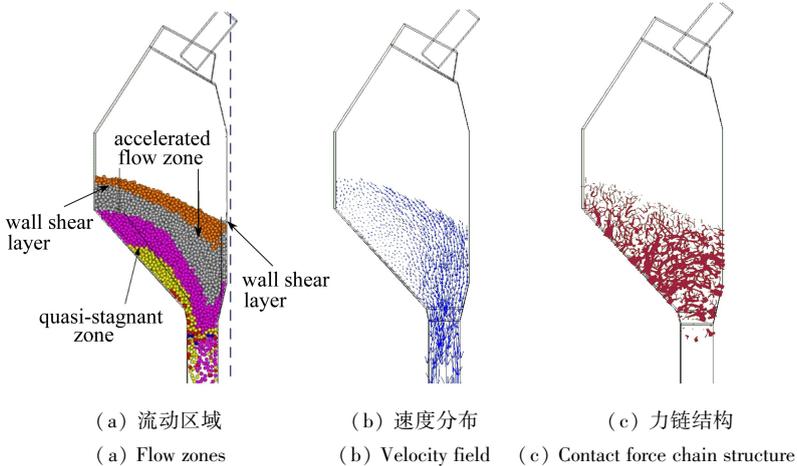


图7 料罐排料过程中颗粒流、速度分布及力链网络 ($t = 1.6$ s)

Fig.7 Internal flow, velocity distribution and contact force chain network in the parallel hopper during the continuous discharging process ($t = 1.6$ s)

3.2 料罐排料流动模式

图6为左料罐排料过程中颗粒流动模式的模拟结果,为了便于观察颗粒的流动状态的变化,将颗粒按高度分成6层,各层颗粒以不同的颜色表示(由下到上依次为蓝、红、黄、紫、浅灰、橙),各图虚线表示高炉中心线.从图中可以看出,在排料初始阶段,料罐左侧墙壁附近的颗

粒下降不明显,而靠近中心侧竖直墙壁的颗粒明显下降;随着排料进行,左侧墙壁附近的颗粒下降缓慢,而靠近中心侧竖直墙壁的颗粒快速下降,造成料罐内料面倾斜变形,料面顶部颗粒向中心侧滚动,出口附近的颗粒下降速度最大,使料罐流动呈现偏斜式的漏斗流。这种流动模式直接与料罐的形状有关,同中心对称的锥形料罐^[21]和平底圆柱形料罐^[17]有很大区别。在平底圆柱形料罐中,颗粒流动区域一般分为:呆滞区、活塞流区、漏斗流区及从活塞流到漏斗流的过渡区。从料罐的排料流动形式来看,料层顶部颗粒向中心侧滚动并向下排出,靠近斜墙的颗粒由于下降缓慢而倾向于后期排出,特别是紫色、浅灰色层靠近斜墙的颗粒最后排出。根据料罐不同部位颗粒的流动状态,可以将颗粒分为不同的区域,即左侧斜墙附近的准呆滞区、流动加速区、两侧墙壁附近的剪切层,如图7(a)所示。这种非均匀流动在颗粒多粒度分布时会加剧颗粒的粒度偏析。图7(b)为对应时刻的料罐垂直截面上的速度分布,图7(c)为力链网络结构。由图可知,排料过程中颗粒流动速度分布不均匀,中心侧颗粒运动速度大于左侧颗粒,在料罐出口附近,颗粒运动加速;料罐内力链分布不均匀,料层下部准呆滞区和流动加速区分布着强力链,而料层顶部分布着弱力链,这种力链分布与速度分布和流动模式相关。准呆滞区的颗粒支撑着流动区的颗粒,使得颗粒间的作用力较大;而流动加速区的颗粒由于流动速度较大,在流动过程中受到中心侧墙壁和准呆滞区颗粒的阻碍,导致流动加速区颗粒间接触力较大;在出口以下,接触力较小,力链断裂,这意味着此时颗粒间相对运动较容易。料罐内颗粒流动模式决定着颗粒的排放顺序,并进一步影响颗粒的流动轨迹及其在炉内的分布。

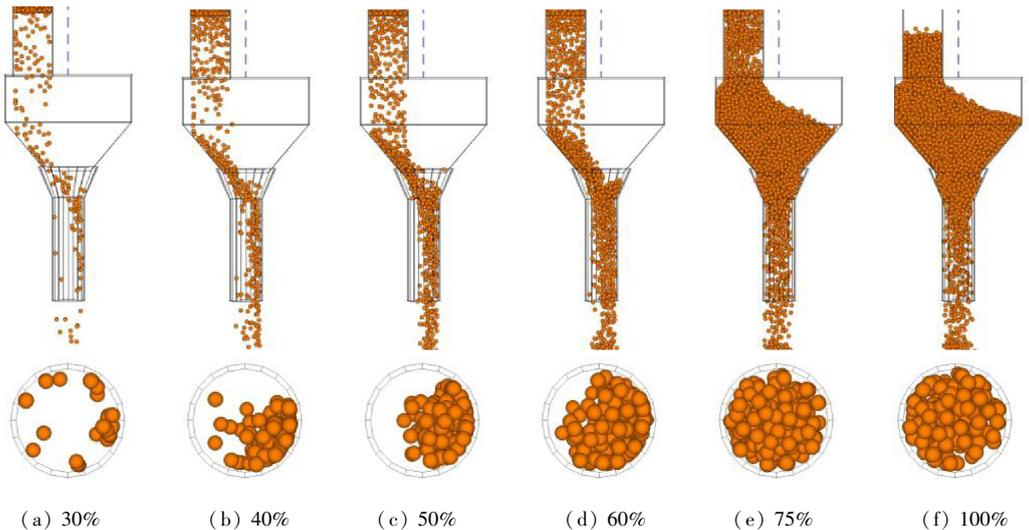


图8 不同闸门开度 $t = 2\text{ s}$ 时中心喉管内颗粒流动的偏行现象(上为正视图;下为喉管1/2长度处横断面图)

Fig.8 Deviation behavior of the granular flow in the vertical chute with different openings of the flowgate $t = 2\text{ s}$
(upper: front view; lower: middle cross-sectional view of the vertical chute)

3.3 中心喉管内颗粒流动的偏行行为

图8为不同闸门开度下,排料2 s时刻颗粒在中间漏斗和中心喉管内的流动形态。DEM模拟再现了并罐式无钟炉顶内颗粒流动的偏行行为,在中心喉管内流动轨迹偏向另一侧。随着闸门开度由30%增加到75%,使中心喉管内颗粒填充率增加,进一步增加开度至100%,填充率不会增加,即中心喉管内颗粒流量不再增加;如图8(a)所示,当开度在30%时,颗粒与颗粒间摩擦和碰撞的机会少,而颗粒与墙壁碰撞导致颗粒跳跃,分散在中心喉管内,造成中心喉管内形成不稳定的料流轨迹,这不利于控制料流轨迹和稳定布料操作;随着闸门开度增加,颗粒数

量增加,颗粒间的摩擦和碰撞占主要地位,更能形成稳定的料流轨迹,且颗粒流偏向喉管的一侧;当开度大于 75%时,颗粒在中间漏斗内出现涌塞现象.因此,为保证稳定布料和料流畅通,料罐闸门开度应控制在一个较为合理的范围内.

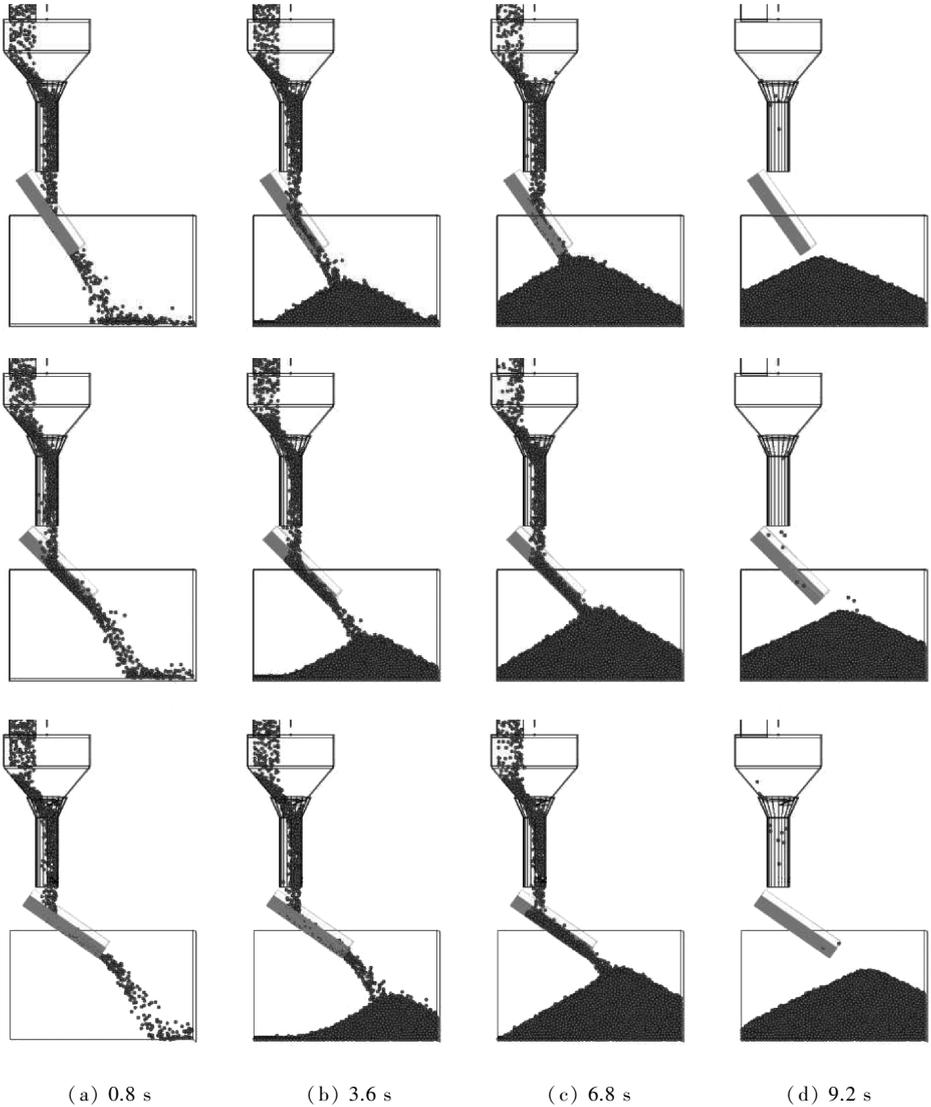


图9 开度 $\psi = 50\%$ 不同溜槽倾角时颗粒堆积过程 DEM 模拟
(上: $\alpha_c = 35^\circ$; 中: $\alpha_c = 45^\circ$; 下: $\alpha_c = 55^\circ$)

Fig.9 DEM simulations of the heaping process with the flowgate opening $\psi = 50\%$ at different chute angles
(upper: $\alpha_c = 35^\circ$; middle: $\alpha_c = 45^\circ$; lower: $\alpha_c = 55^\circ$)

3.4 料堆形成过程

图9为闸门开度50%、不同溜槽倾角时颗粒从料罐出口排出后,沿中间漏斗、中心喉管和溜槽下落流动,形成料堆的过程.由此可定量确定不同溜槽倾角时颗粒的下落轨迹、落点位置和堆尖位置,再观料堆长大过程中料面形状的变化,获得沿径向的料层厚度以及料堆的内外堆角.随着溜槽倾角增大,颗粒离开溜槽的下落轨迹曲率增大,落点位置和堆尖位置向外侧移动,外侧料层厚度增加,内侧料层减薄.从颗粒的堆积过程可以看出,堆尖位置与料流落点位置有

关,堆尖半径稍大于落点半径。当料流落到料面上,颗粒以一定角度撞击料面后,颗粒的流动方向发生改变,料流上表面的颗粒向料堆外侧流动并推动堆尖外侧表面的颗粒,下表面流的颗粒沿料面向内侧流动,随着排料量增加,料层变厚,堆尖位置向内侧移动。

4 结 论

基于离散元法建立了并罐式无钟炉顶装料仿真模型,对料罐装料、排料过程以及料面堆积过程进行模拟研究,通过物理实验验证了离散元模型的适用性。

1) 并罐式无钟炉顶装料过程中,料罐内部应力分布不均匀,强力链主要分布在料罐下部及斜墙附近;排料过程中,料罐内颗粒流动呈现不同的区域,即斜墙附近的准呆滞区、流动加速区、两侧墙壁附近的剪切层,料层上部颗粒向炉顶中心线一侧流动,中心侧颗粒运动速度大于斜墙侧颗粒,这种非均匀流动会加剧多粒度颗粒流动的粒度偏析;颗粒流动模式决定着料罐内颗粒的排放顺序,并进一步影响颗粒的流动轨迹及其在炉内的分布。

2) 颗粒在中间漏斗和中心喉管内的流动形态受料罐出口闸门开度的影响,随着闸门开度变化,颗粒流动轨迹发生变化,为保证稳定布料,料罐闸门开度应控制在合理的范围内。

3) 通过离散元模拟,可以再现无钟炉顶装料过程,定量获得各布料倾角时的料流轨迹、落点位置及料面形状;在颗粒的堆积过程中,堆尖位置与料流落点位置有关,堆尖半径大于落点半径。

参考文献(References):

- [1] 刘云彩. 高炉布料规律[M]. 第3版. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 1-14. (LIU Yun-cai. *Law of Burden Distribution of Blast Furnace* [M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 1-14. (in Chinese))
- [2] 钱人毅. 高炉无钟炉顶布料规律的研究[J]. 钢铁, 1987, 22(8): 46-48. (QIAN Ren-yi. Study on the burden distribution in bell-less blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 1987, 22(8): 46-48. (in Chinese))
- [3] 胡润璞. 高炉炼铁设计原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 175-216. (HU Xun-pu. *Design Principle of Blast Furnace Ironmaking* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 175-216. (in Chinese))
- [4] 杜鹤桂, 余艾冰. 高炉无钟炉顶布料的模拟试验研究[J]. 钢铁, 1986, 21(11): 1-9. (DU He-gui, YU Ai-bing. Simulating study on burden distribution in bell-less top blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 1986, 21(11): 1-9. (in Chinese))
- [5] Liang D, Yu Y W, Bai C G, Qiu G B, Zhang S F. Effect of burden material size on blast furnace stockline profile of bell-less blast furnace[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, 36(3): 217-221.
- [6] Yu Y W, Bai C G, Zhang Z R, Wang F, Lü D G, Pan C. Theoretical calculation and validation of burden trajectory in bell-less top blast furnace[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, 36(7): 505-508.
- [7] 余艾冰, 杜鹤桂. 高炉无钟炉顶中炉料运动的理论解析[J]. 东北工学院学报, 1986, 7(4): 71-78. (YU Ai-bing, DU He-gui. Theoretical analysis of burden movement in the bell-free top of a blast furnace[J]. *Journal of Northeast Institute of Technology*, 1986, 7(4): 71-78. (in Chinese))
- [8] Jiménez J, Fernández B, Sainz de Ayala J, Mochón J, Formoso A, Bueno F. New mathematical model for blast furnace burden distribution[J]. *Revista de Metalurgia*, 1998, 34(extra):

- 158-163.
- [9] 王平. 无料钟料流运动轨迹数学模拟[J]. 钢铁研究学报, 2006, **18**(5): 5-9. (WANG Ping. Mathematical imitation of trajectory of burden flow for bellless top BF[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, **18**(5): 5-9. (in Chinese))
- [10] Nag S, Koranne V M. Development of material trajectory simulation model for blast furnace compact bell-less top[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, **36**(5): 371-378.
- [11] 邱家用, 高征铠, 张建良, 国宏伟, 王春龙, 孔德文. 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): 368-375. (QIU Jia-yong, GAO Zheng-kai, ZHANG Jian-liang, GUO Hong-wei, WANG Chun-long, KONG De-wen. Simulation of burden trajectory in a bell-less top blast furnace[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2011, **11**(3): 368-375. (in Chinese))
- [12] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 黄文彬. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, **33**(2): 251-260. (XU Yong, SUN Qi-cheng, ZHANG Ling, HUANG Wen-bin. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, **33**(2): 251-260. (in Chinese))
- [13] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11-13. (SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. *Introduction of Mechanics for Particulate Materials*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 11-13. (in Chinese))
- [14] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47-65.
- [15] Kaneko Y, Shiojima T, Horio M. DEM simulation of fluidized beds for gas-phase olefin polymerization[J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54**(24): 5809-5821.
- [16] Dong K J, Yu A B, Brake I. DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen[J]. *Minerals Engineering*, 2009, **22**(11): 910-920.
- [17] Zhu H P, Yu A B, Wu Y H. Numerical investigation of steady and unsteady state hopper flows[J]. *Powder Technology*, 2006, **170**(3): 125-134.
- [18] Ketterhagen W R, Curtis J S, Wassgren C R, Bruno C H. Modeling granular segregation in flow from quasi-three-dimensional wedge-shaped hoppers[J]. *Powder Technology*, 2008, **179**(3): 126-143.
- [19] Ketterhagen W R, Curtis J S, Wassgren C R, Bruno C H. Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method[J]. *Powder Technology*, 2009, **195**(1): 1-10.
- [20] Nouchi T, Sato T, Sato M, Takeda K, Ariyama T. Stress field and solid flow analysis of coke packed bed in blast furnace based on DEM[J]. *ISIJ International*, 2005, **45**(10): 1426-1431.
- [21] YU Yao-wei, Saxén H. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, **65**(18): 5237-5250.
- [22] Zhou Z Y, Zhu H P, Wright B, Yu A B, Zulli P. Gas-solid flow in an ironmaking blast furnace—II: discrete particle simulation[J]. *Powder Technology*, 2011, **208**(1): 72-85.
- [23] 张建良, 范正赞, 陈永星, 杨广庆, 杨天钧, 有山达郎. 下部调剂对高炉炉料运动影响的离散模拟[J]. 钢铁钒钛, 2011, **32**(1): 11-16. (ZHANG Jian-liang, FAN Zheng-zun, CHEN Yong-xing, YANG Guang-qing, YANG Tian-jun, Ariyama T. Influence of control of the lower zone on burden motion in blast furnace by DEM[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, **32**(1): 11-16. (in Chinese))
- [24] Kawai H, Takahashi H. Solid behavior in shaft and deadman in a cold model of blast furnace

- with floating-sinking motion of hearth packed bed studied by experimental and numerical DEM analyses[J]. *ISIJ International*, 2004, **44**(7): 1140-1149.
- [25] Mio H, Komatsuki S, Akashi M, Shimosaka A, Shirakawa Y, Hidaka J, Kadowaki M, Matsuzaki S, Kunitomo K. Effect of chute angle on charging behavior of sintered ore particles at bell-less type charging system of blast furnace by discrete element method[J]. *ISIJ International*, 2009, **49**(4):479-486.
- [26] Mio H, Komatsuki S, Akashi M, Shimosaka A, Shirakawa Y, Hidaka J, Kadowaki M, Yokoyama H, Matsuzaki S, Kunitomo K. Analysis of traveling behavior of nut coke particles in bell-type charging process of blast furnace by using discrete element method[J]. *ISIJ International*, 2010, **50**(7):1000-1009.
- [27] Mio H, Kadowaki M, Matsuzaki S, Kunitomo K. Development of particle flow simulator in charging process of blast furnace by discrete element method[J]. *Minerals Engineering*, 2012, **33**(1): 27-33.
- [28] Balevičius R, Džiugys A, Kačianauskas R. Discrete element method and its application to the analysis of penetration into granular media[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, **10**(1): 3-14.

DEM Simulation and Experimental Investigation of Burden Distribution in the Parallel-Hopper Bell-Less Top Blast Furnace

QIU Jia-yong, ZHANG Jian-liang, SUN Hui,
YAN Bing-ji, LI Feng-guang, GUO Hong-wei

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: The flow behavior of particles during the burden distribution process in the parallel-hopper bell-less top blast furnace was investigated with the discrete element method (DEM) as well as a model experiment. It is shown that the DEM simulation results agree with the experimental results well. The contact force distribution in the hopper is nonuniform, i.e., the strong force chains mainly locate in the lower part of the parallel-hopper and in the vicinity of the inclined wall. The flow pattern in the parallel-hopper resembles a deflective funnel flow which comprises the quasi-stagnant zone, the central accelerated flow zone and the wall shear layer. Both the particle falling trajectory and distribution are related to the discharging sequence which is affected by the flow pattern in the hopper. As the flow trajectory is influenced by the opening of the flowgate, it should be controlled within a reasonable range for the stability of burden distribution. The heap peak position varies with the falling point during the heaping process, and the peak radius is larger than that of the falling point.

Key words: blast furnace; bell-less top; discrete element method; burden distribution; granular flow; force chain

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB720401)