

Analysis of particle breaking in the shaft moving beds with discrete element method

Yewei HE¹, Zhen LI¹, Xinxin LI¹, Zeyi JIANG^{1,2*}, Lin LIN^{1,2}

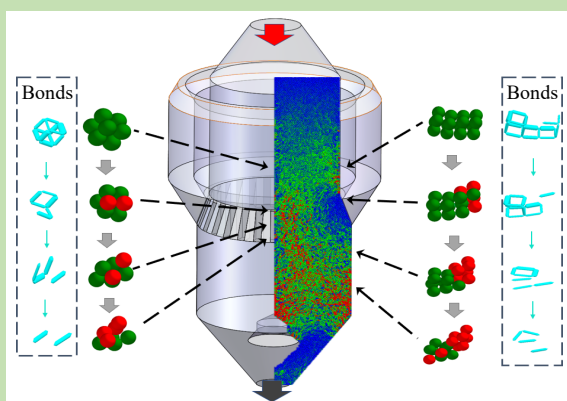
1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory for Energy Saving and Emission Reduction of Metallurgical Industry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The breaking behavior of the burden in the vertically arranged cooler will cause the change in the voidage of the material layer, which will seriously affect the gas permeability of the material layer, and reduce the heat recovery efficiency of vertically arranged cooler. In order to investigate the break of particles in the coke dry quenching (CDQ) chamber, and sintering waste heat recovery vertical tank, the discrete element method was used to explore the falling movement of the burden material via considering the particle breakage in the shaft moving bed. The falling movement process of the particles with different shapes, sizes and bond strength in two vertically arranged cooler was simulated. The velocity and pressure distribution of burden were analyzed. The breaking of coke and sinter particles were compared. The results indicated that the device structure, burden height and particle strength were the main factors affecting particle breakage during the falling movement of the burden. During the falling process, the pressure of particle increased first, then decreased after entering the discharge zone, and the particle breakage was closely related to the pressure. When the coke fell into the corbel zone in the CDQ chamber, the average pressure of the material layer reduced and the breaking rate was slowed down due to the expansion of the device body diameter. Because the strength of the sintered ore was relatively small, the breaking phenomenon occurred when it entered the sintering vertical tank, and the expansion of the device body had little effect on the breaking. Owing to the influence of fixed furnace wall, particles were more likely to be broken near the device wall. Additionally, the square particles were broken along a diagonal from a certain apex. The rectangular particles were broken from one side to the other, and the irregular particles were broken inward from the missing side.

The falling movement process of the particles with different shapes, sizes and bond strength in two vertically arranged cooler was simulated. The velocity and pressure distribution of burden were analyzed. The breaking of coke and sinter particles were compared. The results indicated that the device structure, burden height and particle strength were the main factors affecting particle breakage during the falling movement of the burden. During the falling process, the pressure of particle increased first, then decreased after entering the discharge zone, and the particle breakage was closely related to the pressure. When the coke fell into the corbel zone in the CDQ chamber, the average pressure of the material layer reduced and the breaking rate was slowed down due to the expansion of the device body diameter. Because the strength of the sintered ore was relatively small, the breaking phenomenon occurred when it entered the sintering vertical tank, and the expansion of the device body had little effect on the breaking. Owing to the influence of fixed furnace wall, particles were more likely to be broken near the device wall. Additionally, the square particles were broken along a diagonal from a certain apex. The rectangular particles were broken from one side to the other, and the irregular particles were broken inward from the missing side.

Key words: coke dry quenching; sintering vertical tank; burden movement; particle breaking; discrete element method



收稿: 2019-12-09, 修回: 2020-03-15, 网络发表: 2020-04-07, Received: 2019-12-09, Revised: 2020-03-15, Published online: 2020-04-07

作者简介: 何野维(1994-), 男, 黑龙江省佳木斯市人, 硕士研究生, 动力工程专业, E-mail: 136449718@qq.com; 姜泽毅, 通讯联系人, E-mail: zyjiang@ustb.edu.cn.

引用格式: 何野维, 李臻, 李心心, 等. 竖式移动床层中散料颗粒破碎的离散元分析. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1377-1385.

He Y W, Li Z, Li X X, et al. Analysis of particle breaking in the shaft moving beds with discrete element method (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(12): 1377-1385, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219365.

竖式移动床层中散料颗粒破碎的离散元分析

何野维¹, 李臻¹, 李心心¹, 姜泽毅^{1,2*}, 林林^{1,2}

1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083

2. 北京科技大学冶金工业节能减排北京市重点实验室, 北京 100083

摘要: 建立了竖式移动床层中颗粒破碎的炉料下降运动模型, 采用离散单元法对干法熄焦炉和烧结余热回收竖罐两种竖冷装置内不同形状、尺寸及强度颗粒料的下落运动和破碎过程进行了数值计算。结果表明, 颗粒在下落过程中所受压力先逐渐增大, 进入出料区后又逐渐减小, 颗粒破碎情况与所受压力密切相关; 焦炭在干熄炉内下落到斜道区时, 由于炉体直径扩张, 料层所受平均压力减小, 破碎速率有所减慢。由于烧结矿强度相对较小, 刚进入烧结竖罐就发生破碎现象, 而炉体直径扩张对破碎影响不大; 受固定炉墙的影响, 颗粒在靠近炉墙位置处更容易破碎。分析不同形状颗粒的破碎过程发现, 正方形颗粒从某一点沿对角线逐渐破碎, 长条形颗粒从一侧向另一侧逐渐破碎, 而缺角的不规则颗粒从形状缺失一侧开始向内破碎。

关键词: 干熄焦; 烧结竖罐; 炉料运动; 颗粒破碎; 离散单元法

中图分类号: TQ460.6+4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)12-1377-09

1 前言

散料移动床是一种介于沸腾床和固定床的颗粒床层, 广泛应用于冶金、化工和环保等领域。在竖式移动床如竖式炉窑、竖式冷却装置内的气固换热和反应床层中, 气体与固体的接触程度及其相对运动影响热量交换与化学反应的强弱。在生产过程中, 较大的散料颗粒在从上到下的运动过程中, 受颗粒间撞击和挤压作用逐渐破碎, 粒径减小, 形貌也逐渐由不规则变为规整, 这些均会影响料层的空隙度和透气性。因此, 研究竖式移动床中颗粒破碎的炉料下降运动, 对深入了解炉料演化过程、选取理论模型关键参数、优化设计和操作具有指导意义。

焦炭干熄炉和烧结矿余热回收竖罐是两种常见的竖式冷却装置, 众多学者基于物理实验^[1-3]和连续模型^[4,5]对干熄炉和烧结竖罐内炉料运动及换热的规律进行了探究, 为两种竖冷装置的研发和操控提供了重要的信息。冯妍卉等^[6]运用示踪法得到了炉料下降的时间线图, 并进一步分析了风帽结构、布料方式、料层高度、下料方式等对焦炭下降的影响; 董辉等^[7]假设烧结矿以恒速流动、烧结矿床为各向同性的多孔介质, 进行竖罐内料层传热过程的模拟计算, 分析了气固比、料层高度对炉内气体焓值的影响; 陈士柏等^[8]假设烧结矿内外均匀、无变形, 对竖罐内传热进行数值模拟计算, 分析了炉体结构和气固比对矿石、循环气体出口温度和热空气焓的影响; Zhang 等^[9]用离散元法(DEM)

对某干熄炉炉料运动进行模拟研究, 结果表明 DEM 的计算结果相较于其他流动模型更准确, 可以更好地模拟炉料运动行为; 张雪宽等^[10]利用 DEM 研究了竖冷设备中烧结矿的运动过程, 得出了可抑制烧结矿运动不均匀性的有效措施。但在干熄炉和烧结竖罐内炉料运动的相关研究中, 考虑颗粒破碎对结果可靠性影响的研究较少。

对于流动状态下的颗粒破碎问题, 国内外研究者针对各种破碎机内矿石颗粒的破碎开展了研究工作, 颗粒替换模型(PRM)和颗粒黏结模型(BPM)是 DEM 框架内的两种主要的颗粒破碎建模方法。部分研究者^[11-13]使用 PRM 模型模拟了压缩破碎机、冲击破碎机内颗粒的流动和破碎, 通过模拟估算出生产率、产品尺寸和机器磨损; 还有一些学者^[14-21]使用 BPM 模型对球型岩石、立方岩石等颗粒在破碎机、球磨机内的颗粒断裂行为进行了数值研究, 其中文献[20,21]直接将 DEM 模拟结果与实验结果做了比较; Narcés 等^[22]采用 BPM 模型和 PRM 模型研究了不同建模方式下颗粒破碎过程及计算能力, 证实 BPM 模型可很好地描述力和破碎之间的关系及破碎的过程。

本工作基于干熄炉和烧结竖罐的炉体结构和操作工艺, 采用离散单元法对焦炭颗粒和烧结矿颗粒在相应竖冷装置中的运动进行模拟计算, 基于 BPM 模型研究了两种炉料在装置中的破碎情况, 使用 EDEM 仿真软件作为支撑软件进行仿真研究, 详细分析了不同形状和尺寸颗粒的内部黏结键断裂顺序和进程。

2 研究方法

2.1 物理模型

干法熄焦工艺(CDQ)是通过惰性气体的循环换热, 将炽热红焦冷却至 200℃ 以下, 实现能源的回收利用。烧结矿余热竖罐式回收利用工艺是借鉴干法熄焦工艺中干熄炉的结构和原理, 通过空气回收热烧结矿的显

热。干熄炉和烧结竖罐一般由预存段、斜道段、冷却段和出料段四个区域组成。本工作选取某 140 t/h 焦炭干熄炉(CDQ chamber)^[23]和 550 t/h 烧结竖罐(Sinter vertical tank)^[24]的炉体结构(如图 1, 结构参数见表 1), 建立干熄炉与烧结竖罐的三维平板简化模型(宽度和高度参考实际炉体尺寸, 厚度为 1000 mm)。

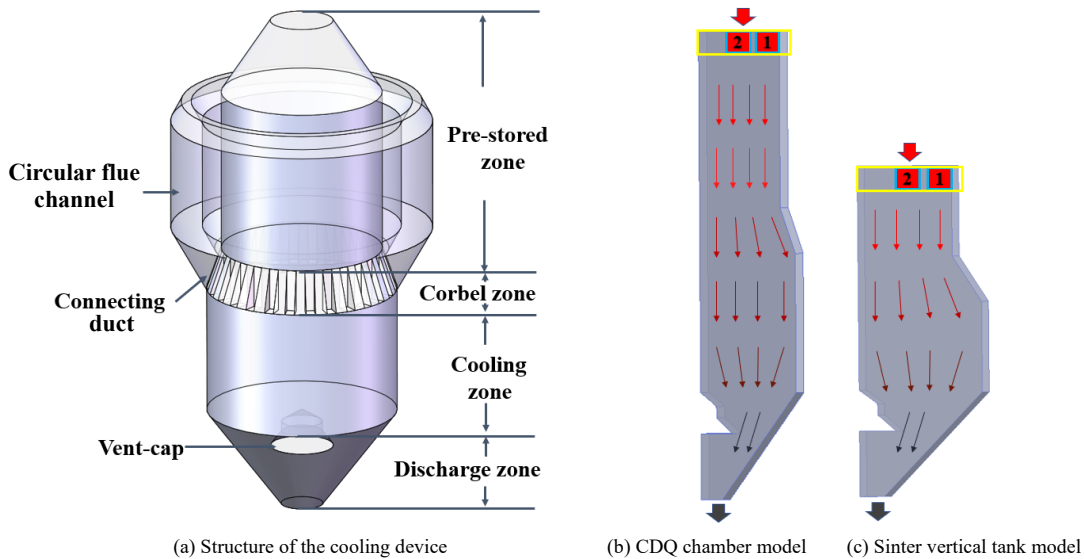


图 1 竖冷装置结构及模型构建
Fig.1 Structure and model construction of the vertical cooling device

表 1 焦炭干熄炉与烧结竖罐的结构参数
Table 1 Structural parameters of CDQ chamber and sinter vertical tank

Parameter/mm	CDQ chamber	Sinter vertical tank
Diameter of pre-stored zone	7700	8000
Diameter of cooling zone	9100	10060
Diameter of discharge outlet	1000	1000
Height of pre-stored zone	7790	4000
Height of corbel zone	2000	2000
Height of cooling zone	6100	4000
Height of discharge zone	4700	4600
Total height	20590	14600

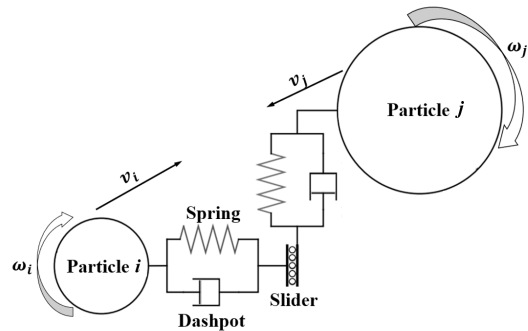


图 2 颗粒接触模型
Fig.2 Contact model between particles

2.2 数学模型

2.2.1 离散元模型

采用 Hertz-Mindlin 模型作为颗粒间作用力模型。两个颗粒发生碰撞时, 接触模型由弹簧、阻尼器及滑动摩擦器组成, 见图 2。颗粒发生的平动、转动由与其相邻的颗粒或墙壁间的相互作用确定, 平动和转动方程见式(1)和(2)^[25]:

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

式中, m_i 和 I_i 分别为颗粒 i 的质量(kg)和转动惯量(kg·m²), v_i 和 ω_i 分别为颗粒 i 的平动速度(m/s)和转动角速度(r/s), t 为时间(s), g 为重力加速度(m/s²), $F_{cn,ij}$, $F_{dn,ij}$, $F_{ct,ij}$, $F_{dt,ij}$, $T_{t,ij}$ 和 $T_{r,ij}$ 分别为颗粒 i 与颗粒 j 间的法向接触力(N)、法向阻尼力(N)、切向接触力(N)、切向阻尼力(N)、切向转矩(N·m)和摩擦转矩(N·m)。上述各力和力矩的详细计算方法见文献[26,27]。

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

2.2.2 颗粒破碎模型

BPM 模型最初由 Potyondy 等^[28]提出, 此模型是将球形小颗粒通过一定尺寸的“黏结键”(bond)黏在一起, 如图 3 所示, 将多颗粒组合黏结构造成大小和形状不同的颗粒团。颗粒间的黏结键可承受一定的法向力和切向力, 当其受到的拉、压、转动等外力超过上限时, 黏结键发生断裂。若某个小颗粒上的黏结键全部断裂, 小颗粒从颗粒团中掉落出来, 表现为颗粒团的破碎现象。在颗粒间的黏结键生成之前和断裂之后, 颗粒间的相互作用根据 Hertz-Mindlin 接触模型计算。当颗粒间存在黏结键时, 黏结颗粒间的力和力矩通过 BPM 模型计算, 计算方程^[18,19,21,22,28]为

$$\Delta \vec{F}_{bn} = -S_{bn} A_b v_n \Delta t \tag{3}$$

$$\Delta \vec{F}_{bt} = -S_{bt} A_b v_t \Delta t \tag{4}$$

$$\Delta M_{bn} = -S_{bn} J \omega_n \Delta t \tag{5}$$

$$\Delta M_{bt} = -S_{bn} \frac{J}{2} \omega_t \Delta t \tag{6}$$

式中, F_{bn} , F_{bt} , M_{bn} 和 M_{bt} 分别为法向力(N)、切向力(N)、法向力矩(N·m)和切向力矩(N·m), S_{bn} 和 S_{bt} 分别为单位面积上的法向刚度(N/m³)和切向刚度(N/m³), v_n , v_t , ω_n 和 ω_t 分别为相对法向速度(m/s)、切向速度(m/s)、法向角速度(r/s)和切向角速度(r/s), $A_b=\pi R_b^2$ 为黏结键的截面积(m²), $J=0.5\pi R_b^4$ 为极惯性矩(m⁴), R_b 为黏结半径(m)。

黏结键的断裂根据法向应力 σ 和切向应力 τ 的大小判断, 当 σ 大于临界法向应力 σ_{\max} 或 τ 大于临界切向应力 τ_{\max} 时, 黏结键发生断裂, 判断方程如下:

$$\sigma = \frac{\vec{F}_{bn, total}}{A_b} + \frac{2M_{bn}}{J} R_b > \sigma_{\max} \tag{7}$$

$$\tau = \frac{\vec{F}_{bt, total}}{A_b} + \frac{2M_{bt}}{J} R_b > \tau_{\max} \tag{8}$$

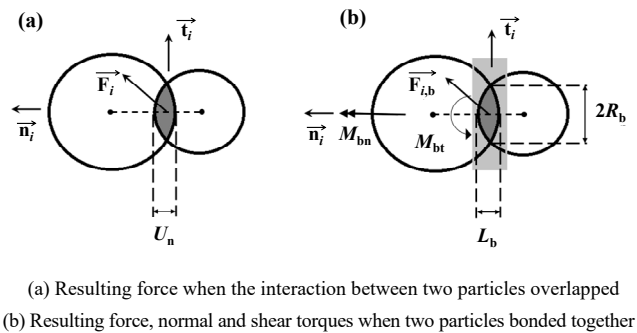


图 3 作用在黏结键上的力与力矩
Fig.3 The forces and torques acting on the bond

2.3 计算条件

在模拟计算中, 平板模型前后两个平面设置为周期性边界; 在上部入口处连续不断地向炉内生成颗粒, 保证炉内颗粒始终处于填满状态; 炉料出口速度由炉底的螺旋出料器控制, 保持出料速度恒定。

入炉颗粒团的尺寸和形貌根据实际工厂竖冷装置入口处的调查统计结果进行简化设定。其中, 球形小颗粒的尺寸根据出炉炉料的主流颗粒尺寸确定, 大颗粒团由若干小颗粒简单堆积并用黏结键黏结而成, 并仅在相邻小颗粒间建立黏结键。两个装置入炉颗粒的形貌、粒度及质量占比见表 2 和 3。在实际生产中, 炉内炉料的颗粒个数在千万级甚至更多, 用离散单元法对其进行模拟研究几乎不可能, 为了减少计算量, 对焦炭和烧结矿进行一定的粒径放大处理, 仿真区域内焦炭颗粒个数为 30 万, 烧结矿颗粒个数为 150 万。模拟所用焦炭和烧结矿的物性参数、颗粒与颗粒间和颗粒与墙壁间的接触参数^[9,29-32]、黏结键相关参数的设置见表 4。其中, 单位面积上的法向和切向刚度、临界法向和切向应力结合文献^[33,34]给出的高温抗压强度及冶金质量标准规定的转鼓强度, 利用 DEM 模拟转鼓实验的方法确定。黏结半径 R_b 的大小与黏结颗粒团内最小单颗粒粒径有关^[21]。在两种炉料运动及破碎的模拟计算中, 时间步长选为 1.5×10^{-4} s, 熄焦炉内实际计算总时间步数为 1.0×10^7 步, 烧结竖罐内计算总时间步数为 0.8×10^7 步。

表 2 焦炭颗粒的形貌和粒度分布
Table 2 Morphologies and size distributions of coke particles

Coke particle	Particle size/ mm	Mass fraction/ %	Particle morphology
Single particle	50	12.36	
Particle group A	80~120	20.75	
Particle group B	120~160	24.55	
Particle group C	>160	26.79	
Particle group D	>160	15.55	

表 3 烧结矿颗粒的形貌和粒度分布
Table 3 Morphologies and size distributions of sinter particles

Sinter particle	Particle size/mm	Mass fraction/ %	Particle morphology
Single particle	6	9.78	
Particle group A	10~16	16.67	
Particle group B	16~25	19.41	
Particle group C	25~40	33.96	
Particle group D	>40	20.18	

表 4 DEM 计算过程中模型参数的设置		
Table 4 Model parameters used in the DEM simulation		
Parameter	Coke	Sinter
Density, $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1050	3300
Shear modulus, G/Pa	2.2×10^6	3.5×10^7
Poisson ratio, ν	0.22	0.25
Restitution for P-P, e	0.18	0.25
Static friction for P-P, μ_s	0.56	0.68
Rolling friction for P-P, μ_r	0.10	0.08
Restitution for P-W, e	0.20	0.20
Static friction for P-W, μ_s	0.40	0.45
Rolling friction for P-W, μ_r	0.07	0.06
Normal stiffness, $S_{\text{bn}}/(\text{N}/\text{m}^3)$	4×10^7	1×10^7
Shear stiffness, $S_{\text{bt}}/(\text{N}/\text{m}^3)$	2×10^7	5×10^6
Critical normal stress, $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	3.0	2.0
Critical shear stress, $\tau_{\text{max}}/\text{MPa}$	1.5	1.0
Bonded disk radius, R_b/mm	31	10

Note: P-P means particle-particle; P-W means particle-wall.

3 结果与讨论

3.1 炉料运动速度及所受压力

干熄炉内焦炭颗粒运动速度和颗粒所受压力分布如图 4 所示。焦炭颗粒下落运动速度与炉体直径有关，冷却段内颗粒运动速度相对于预存段小，单颗粒的运动速度与其所在颗粒团的运动速度大致相同。炉料在预存段和冷却段下落过程中所受压力总体上逐渐增大，在出料段出料过程中压力逐渐卸掉。斜道段近壁面一侧颗粒团所受压力与同高度其他区域相比较小，这是由于炉体外扩形成了炉料泄压空间。在风帽上方和冷却段-出料段连接转角上方，炉料受到风帽和收口锥体的阻滞，颗粒下降速度明显减慢甚至停滞，炉料颗粒所受压力达到最大。

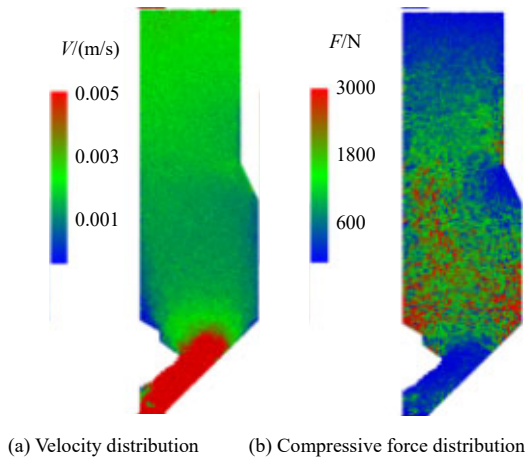


图 4 焦炭颗粒运动速度和所受压力的分布
Fig.4 Velocity and compressive force distributions of coke particles

烧结竖罐内烧结颗粒运动速度和所受压力的分布如图 5 所示，其总体分布情况与焦炭干熄炉大致相同。与干熄炉相比，竖罐内风帽上方和冷却段-出料段转角上方的炉料受压更显著，影响区域也更大。

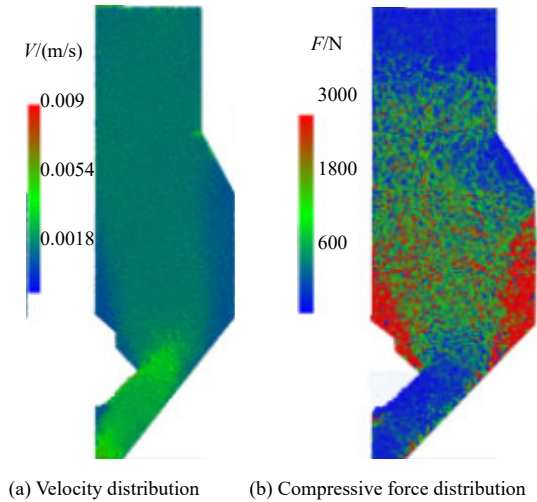


图 5 烧结矿颗粒运动速度和所受压力的分布
Fig.5 Velocity and compressive force distributions of sinter particles

3.2 炉料颗粒的破碎程度

在干熄炉和烧结竖罐预存段上部取 1 m 高度的料层，见如图 1(b)和 1(c)中的黄色方框区域，对料层向下运动时包含的所有颗粒团的黏结键断裂情况进行了统计分析。干熄炉内焦炭颗粒团的破碎情况如图 6 所示。结合图 4 分析表明，在焦炭颗粒团下降过程中，由于颗粒团所受压力逐渐增大，导致不断发生破碎现象。当料层运动到斜道段时，炉体直径变大，颗粒运动速度变慢，且在此区域内靠近炉壁一侧的颗粒团所受正压力变小，颗粒整体破碎速率降低。随料层运动至冷却段，炉料所

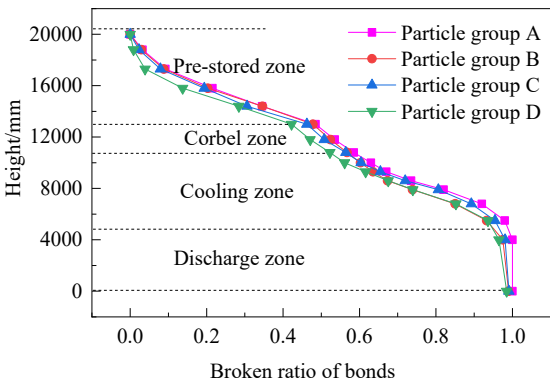


图 6 焦炭颗粒团的破碎过程
Fig.6 Breaking processes of coke particle groups

受平均压力又逐渐增大,破碎速率加快;风帽和收口锥体的阻滞造成该区域压力增大,使颗粒在进出口段逐渐泄压之前仍有较大的破碎速率;在破碎率超过85%后,破碎速率逐渐减慢。当炉料进入出料锥斗区域时,破碎已基本完成。总体上,四种不同尺寸和形貌的焦炭颗粒团在干熄炉内的破碎过程基本一致,破碎均比较完全,干熄炉出口焦炭的粒径差异不大,与实际工厂干熄炉出口处统计分析的焦炭状态相一致。

烧结竖罐内烧结矿颗粒团的破碎情况如图7所示。结合图5分析表明,烧结矿的破碎过程也与所受压力直接关联,而尺寸和形貌不同的颗粒团的破碎过程有一定差异。由于烧结矿机械强度相对较小,入炉初期就产生一定量的破碎;当料层运动至斜道段时,产生的泄压效果不如干熄炉显著,颗粒团的破碎速率没有明显的减缓现象,炉体扩张对烧结矿整体破碎的影响不大。当料层运动至冷却段时,风帽和收口锥体的阻滞形成的高压区域相对干熄炉更大,烧结颗粒的破碎速率持续加快。料层进入出料段后,颗粒所受压力逐渐卸掉,颗粒破碎速率也逐渐减慢。

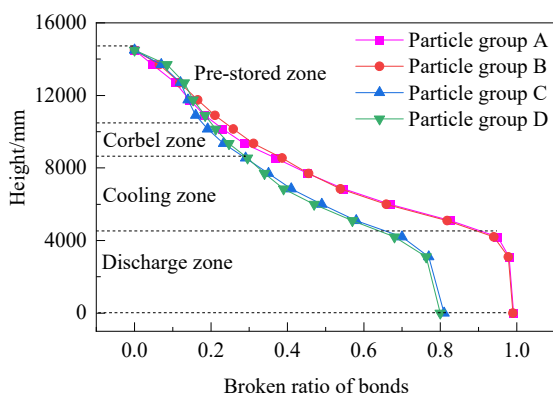


图7 烧结矿颗粒团的破碎过程

Fig.7 Breaking processes of sinter particle groups

总体上,虽然烧结竖罐的高度比干熄炉低,但由于烧结矿强度较低,总体破碎率仍较高(约90%);烧结竖罐装炉颗粒的粒径相差较大,尺寸较大的颗粒在冷却过程中未完全破碎,出口处仍存在粒径较大的颗粒。在实际生产中,烧结竖罐出口处的矿石粒径也存在较大差异,通过等体积相当径的计算方法进行出炉颗粒粒径分类,与实际工厂烧结竖罐出炉颗粒粒径分布基本一致。烧结矿受炉体高度的影响,破碎后粒径差异较大,粒径较大的颗粒在炉内会引起卡料现象发生,而粉料会使料层透气性变差,影响生产质量。

在干熄炉和烧结竖罐内,颗粒由上到下所受压力不

同导致破碎现象发生,由于两种竖冷装置内料层运动速度都较缓慢,经计算运动所产生的撞击力不足以导致颗粒的破碎。颗粒破碎情况与压力的变化相关,若只研究静止状态下的颗粒破碎,其炉体内部的压力分布与连续流动状态下压力分布有很大的不同,模拟结果也有很大差别。

3.3 不同径向位置炉料的破碎过程

在干熄炉和烧结竖罐预存室料层顶部位置选取两个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小方格,分别编号为1和2[如图1(b)和1(c)中的红色方框,靠近炉壁区域编号为1,径向向中间区域编号为2],追踪小方格内所有颗粒团的下落和破碎过程,分析不同位置颗粒团黏结键的断裂情况。图8为焦炭颗粒团在不同区域的破碎情况,可以看出,靠近炉壁区域(1区)颗粒的破碎明显早于径向向中间区域(2区),1区颗粒入炉不久就开始破碎,而2区颗粒运动至斜道段才发生显著破碎;斜道段的泄压直接减缓了1区颗粒的破碎,而对2区颗粒的影响与力链传导有关,减缓位置向下推移约3 m。1区颗粒进入出料段时破碎基本完全,而2区颗粒接近出口位置时才基本破碎完全。

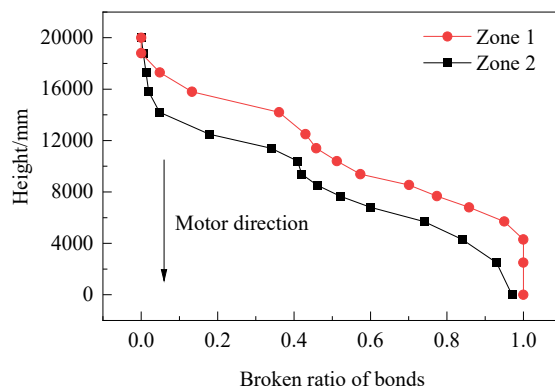


图8 不同径向位置焦炭颗粒团的破碎过程

Fig.8 Breaking processes of coke particles in different radial positions

图9为烧结矿颗粒团在不同区域的破碎情况,可以看出,颗粒在预存段内不同径向位置的破碎率基本相同;斜道位置泄压减缓了炉壁区域(1区)颗粒的破碎,由于竖罐炉体直径相对较大,斜道位置泄压对径向中心区域(2区)颗粒的破碎影响不大。由于冷却段炉壁侧大面积阻滞区的存在,使1区颗粒的破碎速率在炉料进入冷却段逐渐加快,而2区颗粒的破碎速率在炉料运动至由风帽形成的阻滞区时才逐渐加快。两区域内的颗粒到达出口位置均未破碎完全,1区颗粒相较于2区颗粒破碎量更大。

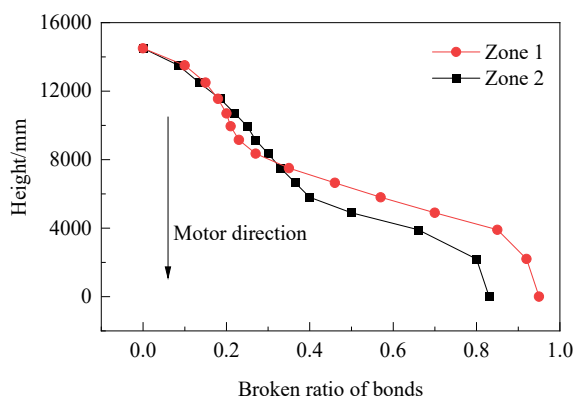


图 9 不同径向位置烧结矿颗粒团的破碎过程

Fig.9 Breaking processes of sinter particles in different radial positions

在上述两种竖冷装置内, 靠近炉壁区域(1 区)颗粒总体上比径向中心区域(2 区)颗粒的破碎更快, 这是由于固定墙壁对颗粒的正压力和摩擦力及炉壁区域明显的阻滞作用增大了颗粒间的作用力。

3.4 不同颗粒团黏结键断裂进程分析

针对干熄炉内的四种焦炭颗粒团, 追踪分析内部黏结键断裂的顺序和进程。由于颗粒破碎与径向位置有关, 且还有一定的随机性, 对于颗粒团 A, 选取破碎开始高度不同的 3 个代表性颗粒, 分析其黏结键的断裂过程, 结果如图 10 所示。图内绿色颗粒为存在黏结键的颗粒(未分离), 红色颗粒为原有黏结键已全部断裂的颗粒(已分离), 浅蓝色长条描述未断裂黏结键的情况, 颗粒团左侧箭头指向的纵坐标位置代表颗粒团刚好破碎时所处的炉内高度。组成颗粒团 A 的小颗粒只有 8 个, 若有一个单颗粒掉落出来, 与其相邻的三个单颗粒内部黏结键由三条变为两条, 导致颗粒强度降低, 在撞击和受压情况下更容易从颗粒团内掉落。总体上, 颗粒团中黏结键的破碎进程符合“唇亡齿寒”的科学道理。因此, 颗粒团 A 在下落运动过程中, 一般是由某一顶点沿对角线逐渐破碎, 颗粒团从开始破碎到基本完全破碎的运动距离只需约 2 m。

选取 2 个颗粒团 B, 分析颗粒团破碎过程及内部黏结键的断裂过程, 如图 11 所示。颗粒团 B 是一种长条形颗粒团, 在下降运动过程中内部中间区域的黏结键最先断裂, 而后续黏结键的断裂过程体现为从一侧到另一侧逐渐发展。颗粒团 B 从开始破碎到接近完全破碎需经过 5 m 以上的下降距离。

选取颗粒团 C 与颗粒团 D 各 1 个, 分析颗粒团破碎过程及内部黏结键的断裂过程, 如图 12 所示。颗粒团 C 是一个缺角的不规则颗粒团, 在下降运动过

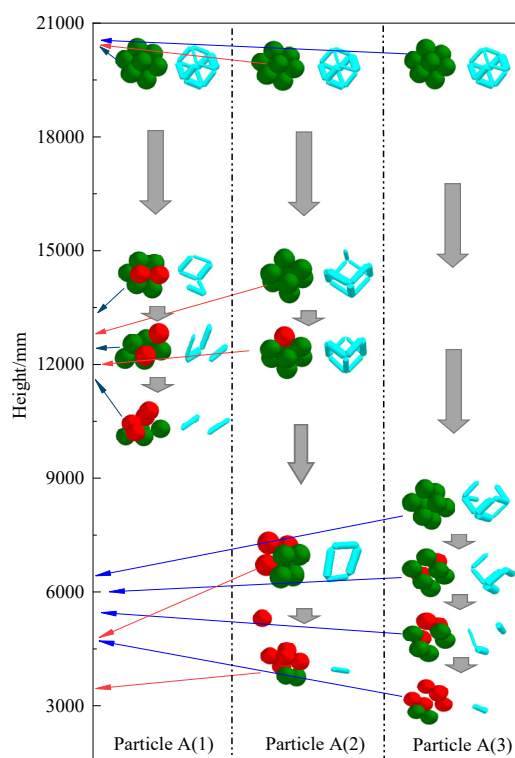


图 10 颗粒团 A 在高度方向上破碎过程

Fig.10 Breaking processes along height direction for particle group A

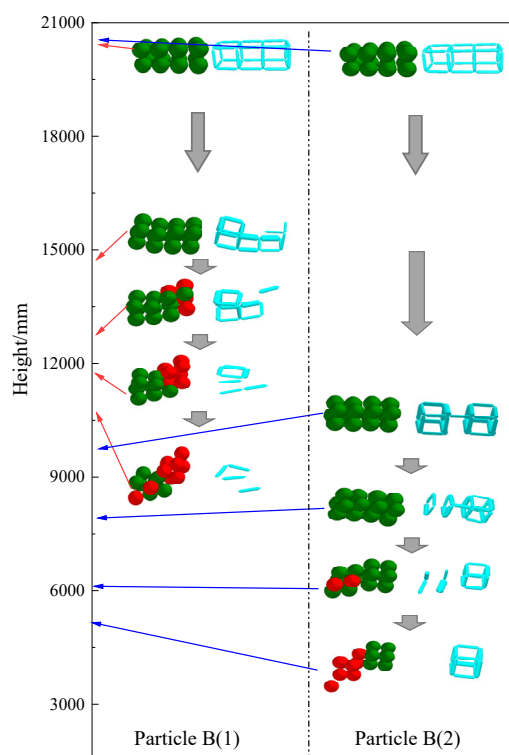


图 11 颗粒团 B 在高度方向上破碎过程

Fig.11 Breaking processes along height direction for particle group B

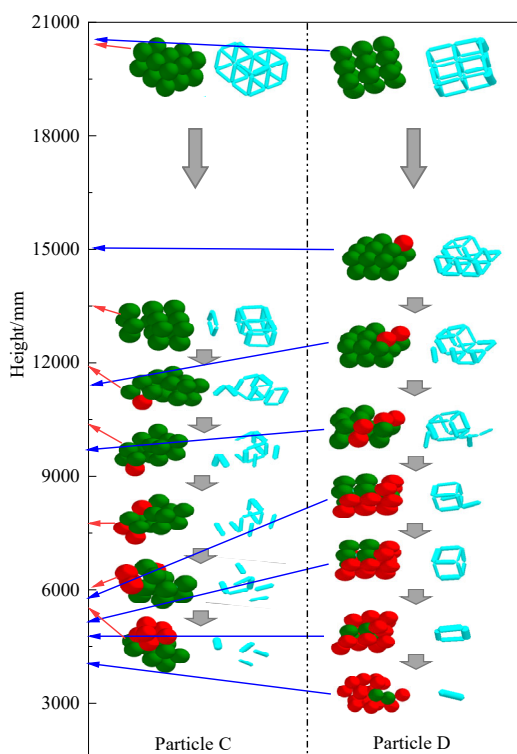


图12 颗粒团C和D在高度方向上破碎过程

Fig.12 Breaking processes along height direction for particle group C and D

程中, 缺角处的单颗粒在受到其他颗粒团撞击时, 更容易从颗粒团中掉落出来, 颗粒团会首先破碎成为一个短的长方形颗粒团和一个形状不规则的子颗粒团。颗粒团运动至斜道段时, 会进一步破碎成类似于颗粒团A的子颗粒团。颗粒团运动至冷却段时, 子颗粒团逐渐破碎完全。颗粒团C从开始破碎后经历8 m以上才达到基本完全破碎程度。颗粒团D是一个完整的 $3 \times 3 \times 2$ 颗粒团, 在下降运动过程中, 破碎过程从某些顶点单颗粒开始, 基本遵从“唇亡齿寒”的原理, 从顶点向内部逐渐完成黏结键的断裂, 随运动过程逐渐破碎完全, 所需距离约为11 m。

4 结论

基于某140 t/h干熄炉和550 t/h烧结竖罐的炉体结构, 应用离散元法对焦炭和烧结矿在两种竖冷装置内运动及破碎情况进行了数值模拟, 得出如下结论:

(1) 两种竖冷装置内, 炉料颗粒在预存段、斜道段和冷却段中所受压力总体上逐渐增大, 运动至出料段后压力又逐渐减小, 颗粒破碎情况与所受压力密切相关。

(2) 炉料在运动过程中, 受到炉体固定墙壁的限制和炉内风帽、冷却段-出料段收口锥体的阻滞, 使这些区

域内颗粒破碎现象更显著。

(3) 颗粒团的破碎存在随机性, 其破碎过程一般是从一侧向另一侧或从角部向内部发展。

参考文献

- [1] 冯妍卉, 张欣欣, 张虎, 等. 干熄炉内影响焦炭下降因素的研究[J]. 燃料与化工, 2004, 35(2): 10-14.
Feng Y H, Zhang X X, Zhang H, et al. Study on influence of coke descending factor in CDQ chamber[J]. Fuel & Chemical Processes, 2004, 35(2): 10-14.
- [2] 刘华飞, 张欣欣, 冯妍卉, 等. 焦炭下降运动的势流模型及实验验证[J]. 燃料与化工, 2005, 36(1): 22-24.
Liu H F, Zhang X X, Feng Y H, et al. Potential flow model of coke descending movement and experimental verification[J]. Fuel & Chemical Processes, 2005, 36(1): 22-24.
- [3] 刘志成, 冯妍卉, 张欣欣, 等. 干熄炉空区内焦炭运动轨迹的数值和实验研究[C]//2006年全国能源与热工学术年会. 张家界: 中国金属学会, 2006: 52-56.
- [4] 石中赢, 张欣欣, 冯妍卉, 等. CDQ焦炭运动黏性流模型壁面摩擦的研究[J]. 燃料与化工, 2006, 37(4): 8-12.
Shi Z Y, Zhang X X, Feng Y H, et al. Study on wall friction of coke behavior in CDQ by kinetic viscous flow model[J]. Fuel & Chemical Processes, 2006, 37(4): 8-12.
- [5] 于泉, 张欣欣, 冯妍卉, 等. 干熄炉内焦炭下降的黏性流模型及其比较研究[J]. 工业加热, 2005, 34(1): 11-13.
Yu Q, Zhang X X, Feng Y H, et al. Viscous flow model of coke descending behavior and comparison study in CDQ cooling chamber[J]. Industrial Heating, 2005, 34(1): 11-13.
- [6] 冯妍卉, 张欣欣, 吴懋林. 干熄焦炉内焦炭下降运动的实验研究[J]. 钢铁, 2007, 42(7): 15-17.
Feng Y H, Zhang X X, Wu M L. Experimental study of coke descent in CDQ cooling chamber[J]. Iron and Steel, 2007, 42(7): 15-17.
- [7] 董辉, 李磊, 蔡九菊, 等. 烧结余热回收竖罐内料层传热过程数值计算[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9): 1299-1302.
Dong H, Li L, Cai J J, et al. Numerical simulation of heat exchange in vertical tank of waste heat recovery[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(9): 1299-1302.
- [8] 陈士柏, 赛庆毅, 丁红光, 等. 烧结余热回收竖式炉内气体流动和传热的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2018, 33(7): 87-94.
Chen S B, Sai Q Y, Ding H G, et al. Numerical simulation of gas flow and heat transfer in a vertical tank for sintering waste heat recovery[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(7): 87-94.
- [9] Zhang A Q, Feng Y H, Liu J, et al. Discrete element simulation of flow pattern of burden in CDQ shaft[M]//Chen R, Sung W P, Kao J C M. Frontiers of Energy and Environmental Engineering, Boca Raton: CRC Press, 2013: 516-520.
- [10] 张雪宽, 徐骥, 孙俊杰, 等. 竖冷设备结构的离散元法模拟优化[J]. 过程工程学报, 2020, 20(2): 158-166.
Zhang X K, Xu J, Sun J J, et al. Structure optimization of the vertically arranged cooler based on the simulation with discrete element method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(2): 158-166.
- [11] Cleary P W, Sinnott M D. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: part 1-compression crushers[J]. Miner,

- 2015, 74: 178–197.
- [12] Sinnott M D, Cleary P W. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: part 2—impact crushers [J]. *Miner*, 2015, 74: 163–177.
- [13] Cleary P W, Sinnott M D, Morrison R D, et al. Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM [J]. *Miner*, 2017, 100: 49–70.
- [14] Weerasekara N S, Powell M S, Cleary P W, et al. The contribution of DEM to the science of comminution [J]. *Powder Technology*, 2013, 248: 3–24.
- [15] Refahi A, Aghazadeh Mohandesi J, Rezai B. Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher [J]. *Miner*, 2010, 94: 83–91.
- [16] Metzger M J, Glasser B J. Numerical investigation of the breakage of bonded agglomerates during impact [J]. *Powder Technology*, 2012, 217: 304–314.
- [17] Metzger M J, Glasser B J. Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill [J]. *Powder Technology*, 2013, 237: 286–302.
- [18] Quist J, Evertsson C M. Cone crusher modelling and simulation using DEM [J]. *Miner*, 2016, 85: 92–105.
- [19] Johansson M, Quist J, Evertsson M, et al. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation [J]. *Miner*, 2017, 103/104: 93–101.
- [20] Quist J. Development of a virtual rock crushing environment based on the discrete element method with industrial scale experiments for validation [D]. Goteborg Sweden: Chalmers University of Technology, 2012: 46–56.
- [21] Li Y W, Zhao L L, Hu E Y, et al. Laboratory-scale validation of a DEM model of a toothed double-roll crusher and numerical studies [J]. *Powder Technology*, 2019, 356: 60–72.
- [22] Narcés J H, Gabriel B, Luis M T, et al. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds [J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29: 692–706.
- [23] 于振东, 郑文华. 现代焦化技术生产手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 612–617.
- [24] 李明明. 烧结矿余热回收竖罐结构及热工参数研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 41–55.
- Li M M. Study on structure and thermal parameters of vertical tank for recovering sinter waste heat [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 41–55.
- [25] 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: 8–9.
- [26] 李超, 程树森, 赵国磊, 等. 吊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): 1–8.
- Li C, Cheng S S, Zhao G L, 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): 1–8.
- [27] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在EDEM上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 17–18.
- [28] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 1329–1364.
- [29] Yu Y W, 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): 5237–5251.
- [30] 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): 788–801.
- [31] Yang W J, Zhou Z Y, Yu A B. Discrete particle simulation of solid flow in a three-dimensional blast furnace sector model [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 278(10): 339–352.
- [32] 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): 1038–1044.
- Xu W X, Cheng S S, Zhao G L, 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): 1038–1044.
- [33] 王兴艳. 高炉用焦炭高温抗压强度研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2004: 30–39.
- Wang X Y. Study on compress strength of coke for blast furnace in hot state [D]. Tangshan: Hebei University of Technology, 2004: 30–39.
- [34] 邵剑华. 烧结矿高温抗压强度研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2007: 27–40.
- Shao J H. High temperature strength of sinter [D]. Tangshan: Hebei University of Technology, 2007: 27–40.