选矿与原料预处理

非规则物料黏结颗粒下的惯性圆锥破碎机仿真

武秋俊[1]，张 勇[2]，刘浩宇[1]，张晶晶[1]
(1. 河北机电职业技术学院，河北 邢台 054000；2. 北方工业大学 土木工程学院，北京 100144)

摘 要： 惯性圆锥破碎机是一种高效的细碎设备。为提高惯性圆锥破碎机的破碎性能，考虑矿石的非规则外形，构建了物料颗粒黏结模型，采用离散元软件(EDEM)对破碎机的破碎过程进行仿真研究，分析破碎区下半区域颗粒流动不均匀的原因。设计正交试验方案并进行正交仿真试验，运用MATLAB软件对仿真结果进行回归分析，建立以-5 mm矿产率为破碎性能评价指标与各试验因素的关系模型，利用遗传算法对试验结果进行优化。结果表明：当激振器转速为25.7 r/s、偏心力矩为1 340.6 N·mm、给料量为67.4 kg/s时，破碎机的破碎性能最佳。仿真研究结果可为惯性圆锥破碎机工艺参数的匹配优化提供参考。

关键词： 惯性圆锥破碎机；EDEM；正交设计；仿真优化
中图分类号： TD451；TP391.9 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-8764(2020)04-0055-06
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.04.055

Simulation research on inertial cone crusher with irregular material bonded particles

Wu Qiujun[1], Zhang Yong[2], Liu Haoyu[1], Zhang Jingjing[1]
(1. *Hebei Institute of Electrical and Mechanical Technology*, *Xingtai* 054000, *Hebei*; 2. *School of Civil Engineering*, *North China University of Technology*, *Beijing* 100144)

Abstract The inertia cone crusher is a kind of efficient fine crushing equipment. In order to improve the crushing performance of the inertia cone crusher, the irregular shape of ore is considered, the material particle bonding model is constructed. The simulation research on the crushing process of the crusher is carried out by using the discrete element software (EDEM), and the reason of the uneven particle flow in the lower part of the crushing area is analyzed. In addition, the orthogonal test scheme is designed, the simulation orthogonal test is carried out, the regression analysis on the simulation results is carried out by using MATLAB software, the relationship model with the -5 mm mineral yield as the crushing performance evaluation index and the test factors is established, the test result is optimized by using genetic algorithm. The results show that the crushing performance of the crusher is the best when the speed of the exciter is 25.7 r/s, the eccentric torque is 1 340.6 N·mm, and the feeding quantity is 67.4 kg/s. Therefore, a reference can be provided for the accouplement and optimization of technological parameters of inertia cone crusher.

Key words inertia cone crusher; EDEM; orthogonal design; simulation optimization

破碎是矿物粉体加工中必不可少的工序，在工业现代化的生产过程中占有举足轻重的地位。我国的矿物粉碎领域经过多年的实践和总结，正逐渐朝“多碎少磨”的新工艺流程方向迈进[1-2]。惯性圆锥破碎机作为一种新型节能超细碎设备，拥有优异的破碎性能，因此被广泛应用于矿物粉碎领域[3-5]，但该型破碎机在进行矿物粉碎时常因工艺参数组合的不同造成破碎效果的不稳定。因此采用合理有效的设计方法对惯性圆锥破碎机关键工艺参数进行优化选配具有重要意义。

对于惯性圆锥破碎机的破碎性能，国内外

收稿日期： 2020-04-22
基金项目： 河北省高等学校自然科学研究项目(Z2019098)；国家自然科学基金资助项目(41762335)
作者简介： 武秋俊(1974—)，女，副教授，主要从事机械设计与数字化建模等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

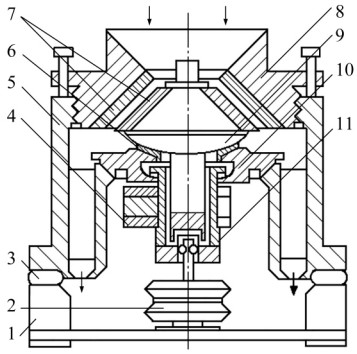
众多学者对其破碎状态进行了研究，如：王晓[6]等运用离散元法中的多球填充法，研究得到了不同充填率下的矿物颗粒破碎情况；Ferellec[7]等对矿物颗粒的填充方法进行了详细剖析，研究得到了不规则矿物颗粒下较适合的填充形式；李东飞[8]等重点研究了单颗粒在破碎腔中的破碎过程及破碎机理，得到了单颗粒破碎后的尺寸概率分布模型。目前针对破碎机的破碎过程主要基于圆形矿物颗粒以及非规则的单矿物颗粒仿真研究，对于数量较多的非规则矿物颗粒在破碎机中破碎过程的研究鲜有报道。

本文以 -5 mm 矿产率作为衡量惯性圆柱破碎机破碎性能的评价指标，考虑矿物颗粒间的力学特性，采用离散元法构建与真实矿石接近的物料颗粒黏结模型。分析选择激振器转速、偏心静力矩以及给料速度作为正交仿真试验的研究对象，利用 EDEM 软件研究 3 因素的不同水平对破碎机 -5 mm 矿产率的影响趋势，通过回归方差分析得到破碎性能评价指标与试验 3 因素的回归模型，最后利用遗传算法推出该型破碎机的最优工艺参数组合，为惯性圆锥破碎机的样机制备及优化提供理论依据。

1 惯性圆锥破碎机的结构及原理

惯性圆锥破碎机主要由激振器、隔振元件、衬板和动定锥组成，其主要结构如图 1 所示，惯性圆锥破碎机的破碎机构主要由动锥和定锥组成，二者表层均附有耐磨衬板，而矿物颗粒的破碎过程主要集中在耐磨衬板之间形成的区域内进行。

在惯性圆锥破碎机正常的矿物破碎过程中，激振器在万向传动装置的联结下旋转产生惯性力，使破碎机的关键结构(动锥绕球面瓦)的球心作旋摆运动。在局部坐标系内动锥与定锥耐磨衬板间形成的区域，矿物颗粒受到衬板以及颗粒间的碰撞冲击力进而被挤压破碎，破碎后的细碎颗粒由卸料口排出，完成物料的破碎作业。该型破碎机的安全性能优异，其破碎力主要取决于偏心力矩和激振器转速，由于破碎机的动锥与传动机构间无刚性连接，因此当矿物



1—底架；2—传动装置；3—隔振元件；4—激振器；5—外壳；6—球面瓦；7—衬板；8—定锥；9—动锥；10—动锥支座；11—轴套。

图 1 惯性圆锥破碎机的结构

颗粒中混入难以破碎的其他金属时，破碎机的激振器将绕主轴继续旋转，但动锥将暂时停止破碎动作，以保护破碎机中的传动系统不受损坏。

2 非规则物料黏结颗粒模型的构建

2.1 非规则物料模型构建

为了反映自然界矿石真实的破碎状态，以铜矿石作为研究对象，对其物料黏结模型进行构建，采用颗粒间的黏结键断裂比来反映惯性圆锥破碎机的矿物颗粒破碎效果。物料黏结颗粒模型的构建方法(图 2)：首先在母系类矩形体(图 2(a))中随机生成 1 组较小的子颗粒，这些子颗粒拥有随机的初始位置和方向(图 2(b))；子颗粒的尺寸利用 DEM 动态仿真均匀增加，并通过接触碰撞产生的颗粒运动重新定向和消除重叠(图 2(c))；当颗粒尺寸在母系类矩形体中以最大极限尺寸粘在一起时，完成物料黏结颗粒模型的构建(图 2(d))。

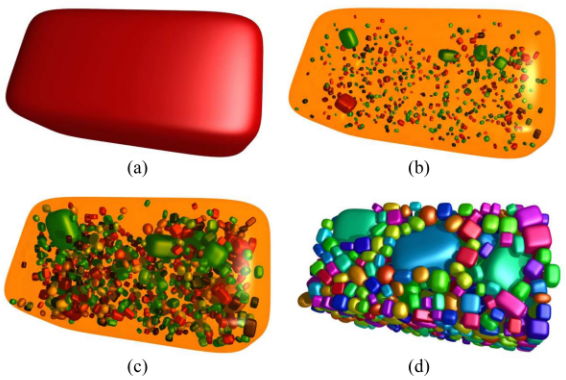


图 2 物料黏结模型构建过程

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物料黏结颗粒模型的破碎原理：物料颗粒在破碎机内部发生碰撞的过程中，当破碎力大于子颗粒间的黏结力时，子颗粒间的黏结键将会断裂，物料黏结颗粒模型的内部结构发生破坏，达到与真实破碎情况一致的效果。

2.2　黏结模型构建

为了准确表征物料黏结颗粒模型内部子颗粒间的胶结关系，采用键合颗粒模型(bonded particle model，BMP)作为离散元法的仿真黏结模型，通过在子颗粒间形成预先计算好的力学属性黏结键，使形成的物料黏结颗粒的破碎状态与真实矿石的破碎状态高度吻合。物料黏结颗粒间的法向、切向接触应力计算方法如下。

$$K_n = \frac{F_n}{\pi r^2} + \frac{4S_n}{\pi r^3} \tag{1}$$

$$K_\tau = \frac{F_\tau}{\pi r^2} + \frac{2S_\tau}{\pi r^3} \tag{2}$$

式中：F_n、F_τ 分别为子颗粒间黏结键的法向力、切向力，N；S_n、S_τ 分别为颗粒的法向力矩、切向力矩，N·s；r 为子颗粒间黏结键的半径，m。各子颗粒间的黏结力通过 EDEM 软件内置的 BMP 仿真黏结模型动态计算得出。

3　惯性圆锥破碎机仿真优化分析

3.1　仿真分析

根据惯性圆锥破碎机的结构建立其 3 维实体模型，在不影响仿真计算的前提下，对破碎机的部分结构进行相应简化[9]，选取铜矿石为物料颗粒。根据物料颗粒和破碎机的材料特性，设置离散元仿真模型的物理及接触参数如表 1 所示[10]。

表 1　仿真模型的物理参数

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
物料颗粒	0.29	7.98×10^7	4 300	—	—	—
钢材	0.28	7.00×10^{10}	7 800	—	—	—
颗粒与颗粒	—	—	—	0.12	0.545	0.030
颗粒与钢材	—	—	—	0.20	0.530	0.042

将预先编译好的各级黏结力颗粒群的 API 导入 EDEM 中，在颗粒工厂中动态生成物料黏结模型，设定物料颗粒平均粒度为 38 mm，模型采用正态分布，其标准差为 0.149。

稳定运行下，破碎机内腔中颗粒的流动分布和破碎状态如图 3 所示。由图 3 可知：较大的颗粒(红色)无法移动至低于破碎区域中部的位置，这些大颗粒将被破碎机捕获进而破碎。从仿真过程来看，低速不利于物料的下滑和相互挤压，导致破碎效率不理想；高速能达到较高破碎效率，但是会加剧衬板的磨损。

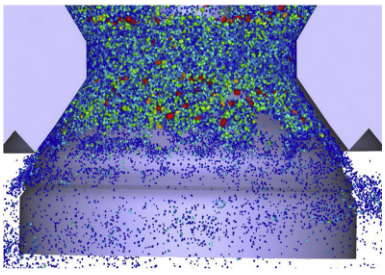


图 3　稳定运行下的破碎状态

颗粒堵塞情况下的破碎状态如图 4 所示。由图 4 可看出，破碎区下半部分的颗粒流动分布是不均匀的，存在大量的空隙。这些空隙大多呈现“倒 V”形，其顶点位于由大颗粒形成的干扰点。造成该现象的原因：当大颗粒群向下移动至其尺寸与动锥和定锥间隙相同的地方时，如果施加给这些大颗粒群上的应力不足以使其破碎，那么这些颗粒可能会出现堵塞的情况。这些大颗粒的堵塞必然会阻碍其上方的颗粒流动，因此在大颗粒群的下方会出现一定程度的空隙，这种堵塞行为是一种短期瞬态效应。传统的破碎机模型通常假设颗粒具有良好的流动性，这种假设有一定的局限性，本文建立的 DEM 模型揭示了部分颗粒在达到动锥破碎深度之前就已经存在一定的颗粒流限制，这与惯性圆锥破碎机的真实破碎状态基本一致，初步验证了所构建的非规则物料黏结颗粒模型的可靠性以及基于离散元法优化该型破碎机破碎性能的可行性。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

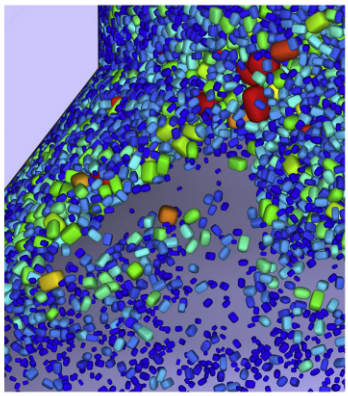


图 4 堵塞情况下的破碎状态

3.2 正交试验方案设计

为了分析不同工艺参数下惯性圆锥破碎机的破碎性能，引入 -5 mm 矿产率作为试验性能评价指标，其计算公式:

$$\gamma = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{3}$$

式中: γ 为 -5 mm 矿产率,%; m 为破碎后 -5 mm粒度的矿石质量，kg; M 为破碎后矿石总质量，kg。

根据前述分析结果，选择激振器转速、偏心力矩和给料量为试验研究因素，采用$L_{16}(4^3)$进行正交仿真试验[11-12]，通过前期大量预试验得出试验 3 因素的合理取值范围，设计试验水平因素编码如表 2 所示。

表 2 水平因素表

水平	因素		
	激振器转速 /(r·s^{-1})	偏心力矩 /(N·mm)	给料量 /(kg·s^{-1})
1	21	1 200	54
2	24	1 300	62
3	27	1 400	70
4	30	1 500	78

3.3 回归优化分析

根据表 2 对惯性圆锥破碎机进行正交仿真试验，得到不同工艺参数下的破碎机 -5 mm 矿产率; 并通过 Design-Expert 实验数据处理软件对结果进行分析，利用极差法求得各因素对破碎机 -5 mm 矿产率的极差(值越大，相应因素的影响力就越大)[13-14]，结果如表 3 所示。由表 3 可知: 在试验因素的取值范围内，对 -5 mm矿产率显著性影响由大到小的顺序: 激振器转速、给料量和偏心力矩。采用降维法，固定任意试验因素至单一水平，绘制 -5 mm矿产率的响应曲面如图 5 所示。

表 3 数值仿真方案与结果

试验编号	激振器转速 /(r·s^{-1})	偏心力矩 /(N·mm)	给料量 /(kg·s^{-1})	-5 mm 矿产率/%
1	21	1 200	52	60.48
2	21	1 300	64	69.75
3	21	1 400	76	61.87
4	21	1 500	88	63.59
5	24	1 200	64	72.58
6	24	1 300	52	76.68
7	24	1 400	88	73.42
8	24	1 500	76	74.06
9	27	1 200	76	82.88
10	27	1 300	88	78.62
11	27	1 400	52	80.06
12	27	1 500	64	78.21
13	30	1 200	88	76.69
14	30	1 300	76	82.47
15	30	1 400	64	81.03
16	30	1 500	52	79.07
I	52.31	63.21	56.32	—
II	62.27	66.13	60.51	—
III	70.62	64.97	70.16	—
IV	71.39	64.51	68.23	—
极差	19.08	2.92	13.84	—

注: I、II、III、IV 为各水平所对应试验指标的平均值。

由图 5(a) 可知: 当给料速度位于坐标中线时，破碎机的 -5 mm 矿产率随激振器转速的增大呈现先上升后下降的趋势，这是因为激振器转速增大，破碎机的破碎力按指数增大，物料颗粒粒度被破碎得更细，进而使 -5 mm 矿产率增大; 但当激振器转速过大时，物料颗粒加权平均粒度减小，增大了排料阻力，使产量降低; 当激振器转速位于坐标中线时，-5 mm 矿产率随给料量的增大呈现先上升后下降的趋势。

由图 5(b) 可知: 当给料速度位于坐标中线时，-5 mm 矿产率随偏心力矩的增大整体呈现上升趋势，这主要是因为偏心力矩增大，单位

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

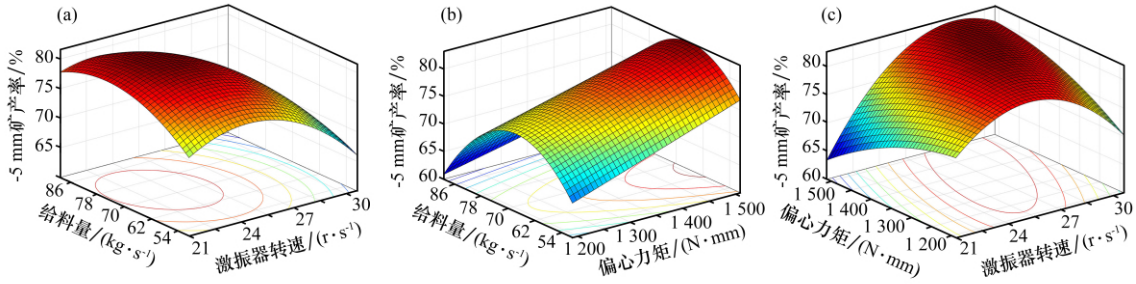


图 5　－5 mm 矿石产率响应曲面

功耗下降，增加了物料颗粒进一步破碎的可能性，从而使－5 mm 矿产率逐渐增大；当偏心力矩位于坐标中线时，－5 mm 矿石产率随给料量的增大呈现先上升后下降的趋势。

由图 5(c) 可知：当激振器转速位于坐标中线时，－5 mm 矿产率随偏心力矩的增大呈现先上升后下降趋势；当给料量位于坐标中线时，－5 mm 矿产率随激振器转速的增大呈现先上升后下降的趋势，且边缘变化趋势差异较大。

为了得到－5 mm 矿产率与各试验因素的关系模型，结合表 3 的试验数据，利用 MATLAB 对破碎机的－5 mm 矿产率进行回归分析，得到回归方程如下。

$$\gamma = -197.618 + 1.423X_1 + 0.462X_2 + 0.947X_3 - 0.037X_1X_2 + 0.023X_1X_3 - 0.012X_2X_3 - 0.019X_1^2 - 0.004X_2^2 + 0.011X_3^2 \quad (4)$$

式中：γ 为－5 mm 矿产率，%；X_1 为激振器转速，r/s；X_2 为偏心力矩，N·mm；X_3 为给料量，kg/s。

试验样本回归分析的残差如图 6 所示。由图 6 可知，试验数据样本的残差区间均穿过原点，其显著性水平小于 0.05，表明回归方程与试验数据拟合效果较好。

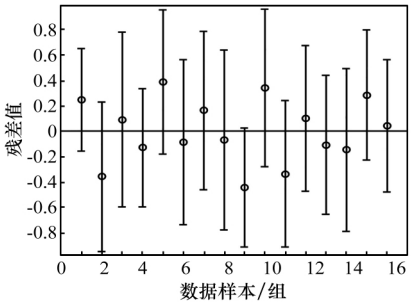


图 6　试验样本回归分析的残差

式(4) 建立了－5 mm 矿产率与激振器转速、偏心力矩和给料量的关系模型，选择破碎机－5 mm 矿产率作为优化对象，以衡量惯性圆锥破碎机的破碎效果。为了得到试验 3 因素的最佳工艺参数组合，以－5 mm 矿产率为寻优条件，建立约束方程：

$$F_{max} = \gamma \quad \text{s.t.} \begin{cases} 21\ \text{r/s} \leqslant X_1 \leqslant 30\ \text{r/s} \\ 1\ 200\ \text{N·mm} \leqslant X_2 \leqslant 1\ 500\ \text{N·mm} \\ 52\ \text{kg/s} \leqslant X_3 \leqslant 82\ \text{kg/s} \end{cases} \quad (5)$$

运用 MATLAB 中的遗传算法工具箱，结合试验因素的取值范围对式(5) 进行寻优，得到优化结果：当激振器转速为 25.7 r/s、偏心力矩为 1 340.6 N·mm、给料量为 67.4 kg/s 时，破碎性能最好，此时－5 mm 矿产率为 84.92%。

4　破碎验证试验

为验证惯性圆锥破碎机仿真分析破碎效果能否真实模拟矿石破碎实况效果，进行仿真破碎验证试验和实际破碎试验。根据破碎工艺参数优化结果组合建立仿真与试验结果的对比分析，每项试验进行 5 次，取其平均值作为最终结果，如表 4 所示。

表 4　惯性圆锥破碎机工艺参数匹配方案

项目	激振器转速/(r·s⁻¹)	偏心力矩/(N·mm)	给料量/(kg·s⁻¹)	－5 mm 矿产率/%
预测值	25.72	1 340.6	67.43	84.92
仿真值	25.70	1 340.6	67.40	84.01
试验值	25.70	1 340.6	67.40	81.27

从表 4 可以看出，对比－5 mm 矿产率的预测结果，仿真结果与试验结果都有一定程度的下降，且试验－5 mm 矿产率小于仿真－5 mm 矿产率，这主要是因为实际试验过程中受到测

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量精度误差、机体振动、颗粒杂质等因素的影响。-5 mm 矿产率的预测值、仿真值和试验值误差大小均在 5% 以内，进一步验证了本文建立的物料黏结颗粒模型的可靠性以及基于离散元法优化惯性圆锥破碎机破碎性能的可行性。

5 结 论

(1) 通过对母系类矩形体的动态填充构建物料黏结颗粒模型，并定义颗粒黏结模型的力学参数，为进行更加符合实际惯性圆锥破碎机破碎过程的数值仿真试验奠定了前期基础。

(2) 利用 EDEM 软件对惯性圆锥破碎机进行仿真分析，解释了破碎区下半部分颗粒流动不均匀的原因：大颗粒群在破碎区容易出现堵塞，导致在大颗粒群下方容易形成空隙，这种堵塞行为是一种短期瞬态效应。

(3) 通过正交仿真试验得出了 -5 mm 矿产率的回归方程，分析得出试验因素对 -5 mm 矿产率影响的主次顺序：激振器转速、给料量和偏心力矩。通过 MATLAB 遗传算法工具箱对破碎性能评价指标进行寻优，当激振器转速为 25.7 r/s、偏心力矩为 1 340.6 N·mm、给料量为 67.4 kg/s 时，惯性圆锥破碎机破碎性能最佳。

参考文献

[1] 毕秋实，王国强，黄婷婷，等. 基于 DEM-FEM 耦合的双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. 吉林大学学报(工学版)，2018，48(6)：1 770-1 776.

[2] 马彦军，范秀敏，何其昌. 适用于多种物料的圆锥破碎机腔型时变磨损预测[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2016，47(4)：1 121-1 127.

[3] 周弘扬，王春雨，巩云鹏. 惯性圆锥破碎机主轴的动力学特性分析[J]. 机械设计与制造，2018(7)：63-65；69.

[4] 任廷志，黄凯锋，程加远，等. 新型惯性圆锥破碎机的减振性能[J]. 中国机械工程，2019，30(22)：2 704-2 708.

[5] 张子龙，任廷志，程加远，等. 考虑粒形转化特性的圆锥破碎机层压破碎行为研究[J]. 机械工程学报，2017，53(16)：173-180.

[6] 王晓，张长献，薛玉君，等. 基于 EDEM 的球磨机不同填充率下颗粒碰撞与能量变化探究[J]. 矿山机械，2019，47(8)：29-34.

[7] Ferellec J F，McDowell G R. A method to model realistic particle shape and inertia in DEM[J]. Granular Matter，2010，12(5)：459-467.

[8] 李冬飞，张海，王超. 单颗粒岩石在反击式破碎机内的破碎机理研究[J]. 机械工程师，2019(6)：16-20.

[9] Celigueta M A，Latorre S，Arrufat F，et al. Accurate modelling of the elastic behavior of a continuum with the Discrete Element Method[J]. Computational Mechanics，2017，60(6)：1-14.

[10] 朱洪民，王泽红，孙维波，等. 离散元及其耦合方法在球磨机研究中的应用[J]. 金属矿山，2018(9)：1-8.

[11] 刘瑞江，张业旺，闻崇炜，等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理，2010，27(9)：52-55.

[12] 杜义贤，王伟，田启华. 结构拓扑优化参数的正交试验设计[J]. 机械设计与研究，2011，27(5)：14-17.

[13] 黄鹏鹏，胡名亮，李成. 基于 EDEM 的反击式破碎机破碎效率仿真分析[J]. 机械设计与制造，2016(12)：64-68.

[14] 叶涛，刘付志标. 基于 DEM-FEM 的圆锥破碎机动锥衬板受力特性研究[J]. 矿业研究与开发，2017，37(8)：76-79.

(上接第 40 页)

[11] 宋彦坡，董武，彭小奇，等. 链箅机球团预热系统能耗分析及优化[J]. 金属材料与冶金工程，2012，8(4)：10-14.

[12] 尹洪超，朱元师，李德付. 基于耦合气固传热箅冷机的数值模拟与研究[J]. 热科学与技术，2012，11(3)：229-233.

[13] L Hong，H Yin，Z Ming，et al. Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln[J]. Powder Technology. 2016(287)：239-247.

[14] 王祎. 铁矿氧化球团链箅机-回转窑模拟模型和控制指导专家系统的研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[15] B. Alazmi，K. vafai. Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2001，44(9)：1 735-1 749.

[16] 冯俊小，郑海薇，张永明，等. 链箅机的热工测试及节能研究[J]. 工业炉，2008，30(1)：11-13.

[17] M. Barati. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system[J]. International Journal of Mineral Processing. 2008，89(1-4)：30-39.

[18] Wei Shao，Zheng Cui，Wang Naihua，et al. Numerical simulation of heat transfer process in cement grate cooler based on dynamic mesh technique[J]. Science China(Technological Sciences)，2016(59)：1 065-1 070.

[19] 张汉泉. 链箅机-回转窑铁矿氧化球团干燥预热工艺参数研究[J]. 矿冶，2005，14(2)：59-62.

[20] 黄柱成，王林，易凌云，等. 低品位铁矿石内配煤球团的回转窑脱水工艺研究[J]. 金属矿山，2017(11)：57-63.

[21] 李伯全，沈宗辉，王宏余. 链箅机箅床温度场间接监控技术[J]. 烧结球团，2007，32(3)：28-30.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net