选矿与原料预处理

基于离散元法的振动破碎机破碎性能仿真优化分析

徐景秀[1]，张 青[1]，姚 慧[2,3]，欧阳曦[3]，江泽鑫[1]

(1. 黄冈师范学院，湖北 黄冈 438000；2. 武汉科技大学，湖北 武汉 430081；3. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081)

摘 要：为提高振动破碎机的破碎性能，考虑矿石的异形特征与其内部间的力学特性，运用三维逆向建模技术，得到典型钨矿石3种外形的云点数据，构建了异形多级内聚颗粒的几何及力学模型；利用离散元软件EDEM对破碎机工作过程进行仿真分析，采用二次回归正交旋转组合设计，建立破碎性能评价指标的多元回归模型及响应曲面，对试验结果进行参数优化。优化结果表明：在外锥转速为46.5 r/min、内锥振动频率为42.8 Hz、给料速度为72.6 kg/s时，振动破碎机破碎性能最优。实际破碎试验结果表明：仿真试验结果与实际试验结果在数值上存在一定偏差，但两者变化趋势及相互之间大小关系基本一致，表明了所建颗粒模型的可靠性，以及使用离散元法优化振动破碎机破碎性能的可行性。

关键词：异形颗粒模型；离散元；破碎机；破碎性能；正交旋转试验；仿真优化

中图分类号：TD451；TP15 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2020)01－0043－07

doi：10.13403/j.sjqt.2020.01.009

Simulation and optimization analysis of crushing performance of vibration crusher based on discrete element method

Xu Jingxiu[1], Zhang Qing[1], Yao Hui[2,3], Ouyang Xi[3], Jiang Zexin[1]

(1. *Huanggang Normal College, Huanggang* 438000, *Hubei*; 2. *Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 43008, *Hubei*; 3. *Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgical Minerals, Wuhan* 430081, *Hubei*)

Abstract In order to improve the crushing performance of the vibration crusher, considering the special-shaped characteristics of the ore and its internal mechanical characteristics, the three-dimensional reverse modeling technology is used to obtain the cloud point data of three typical shapes of tungsten ore, and the geometric and mechanical model of the special-shaped multi-level cohesive particles is constructed; the simulation analysis of the working process of the crusher is carried out by using the discrete element software EDEM, and the combinational design of quadratic regression orthogonal rotation is adopted, the multiple regression model and response surface of the crushing performance evaluation index are established, and the parameters of the test results are optimized. The results show that when the outer cone speed is 46.5 r/min, the inner cone vibration frequency is 42.8 Hz and the feeding speed is 72.6 kg/s, the crushing performance of the vibration crusher is the best. The actual crushing test results show that there is a certain deviation between the simulation test results and the actual test results, but the changing trend and the size relationship between them are basically the same, which shows the reliability of the particle model and the feasibility of using the discrete element method to optimize the crushing performance performance of the vibration crusher.

Key words special-shaped particle model; discrete element; crusher; crushing rotating orthogonal test; simulation optimization

收稿日期：2019－11－23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51604195)

作者简介：徐景秀(1981—)，女，硕士，讲师，从事计算机采矿工程方面的研究。

通讯作者：张 青(1965—)，女，博士，教授，从事矿山系统工程与信息安全方面的研究。

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

振动式破碎机是矿山机械中主要的工作设备，其广泛应用于矿山开采等行业。考虑到全球经济对矿石原料的依赖，以及世界范围内能源的日益紧缺，针对破碎机破碎性能的研究，对于实现破碎机的高效稳定和节能降耗具有重要意义[1]。

传统的理论设计与试验周期较长，成本高，难以高效地对破碎机参数进行优化。近年来，离散元法应用于颗粒破碎机理的研究日益增多[2-5]：伊振宇等[6]研究了粒状材料间的粘结模型，以及颗粒破碎中能耗的演变；母福生等[7]运用离散元法进行单颗粒压缩试验，分析得到了颗粒破碎的概率分布模型；Wang 等[8]提出了颗粒模型的逐步填充理论，建立了类似圆盘形状的颗粒群模型；Ferellec 等[9]提出了不同半径的球对颗粒进行填充的方法，但该方法需要的填充球体较多，计算量较大。综上所述，尽管学者们对不同类别的破碎机破碎性能进行了大量研究，但根据真实矿石的异形特征构建颗粒模型并依此进行破碎机工作参数优化的研究鲜有报道。

通过三维逆向建模技术构建异形多级内聚矿石颗粒的几何及力学模型，运用离散元法，以振动慢剪破碎机为研究载体，以外锥转速、内锥振动频率、给料速度为试验因素，以 -6 mm矿石产率为破碎性能评价指标，进行二次回归正交旋转组合数值模拟试验，旨在获得该型破碎机的最优参数组合，再通过实际破碎试验验证所建模型的可靠性，为该型破碎机样机制备及优化提供理论依据。

1 多级内聚颗粒几何模型的构建

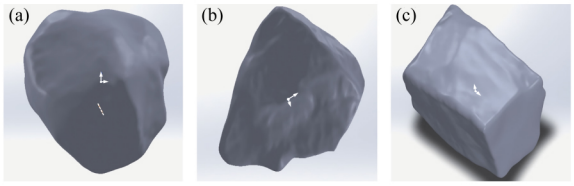
自然界的矿石大多呈现非规则外形特征[10]，一些文献将其简单地简化为固定规则外形，因此在仿真中无法准确反映出矿石破碎的状态。本文选取钨矿石中 3 类具有代表性的非规则外形为研究对象，如图 1 所示。

运用 VIVID 920 三维激光扫描仪采集实际矿石的三维点云数据，并分别建立其几何模型如图 2 所示。



(a) 类圆钨矿石；(b) 类三角钨矿石；(c) 类矩形钨矿石

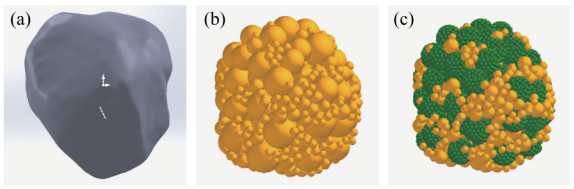
图 1 非规则钨矿石岩样



(a) 类圆钨矿石；(b) 类三角钨矿石；(c) 类矩形钨矿石

图 2 非规则钨矿石几何模型

为了使仿真颗粒模型尽可能与真实颗粒接近，在 EDEM 中将仿真模型颗粒分为 3 级，定义初始颗粒为 1 级颗粒模型，对 1 级颗粒进行模糊填充得到 2 级颗粒模型，对 2 级颗粒进行精细填充得到 3 级颗粒，如图 3 所示。



(a) 1 级颗粒模型；(b) 2 级颗粒模型；(c) 3 级颗粒模型

图 3 异形内聚多级颗粒模型构建

当振动破碎机正常工作时，在外力的作用下，1 级颗粒模型中的部分 2 级颗粒将逐渐脱落；在持续的外力作用下，2 级颗粒将破碎成 3 级颗粒，这一现象对应实际破碎试验中中等粒径颗粒破碎成小粒径颗粒。

2 多级内聚颗粒力学模型

2.1 接触模型

接触模型的选择对使用离散元法模拟仿真试验至关重要，由于矿石颗粒表面无粘附力，因此选择 Hertz-Mindlin 无滑动模型作为颗粒与颗粒之间，以及颗粒与破碎机之间的接触模型。任意两单元间的接触模型如图 4 所示。

两颗粒单元间的力学模型满足下列关系式：

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

$$\begin{Bmatrix} F_n^c \\ F_n^d \\ F_t^c \\ F_t^d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}E'\sqrt{R'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\sqrt{\frac{5}{6}}C_n\sqrt{K_n^c m'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_t^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{\frac{5}{6}}C_t\sqrt{K_t^c m'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (u_n)^{\frac{2}{3}} \\ v_n^r \\ u_s \\ v_t^r \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：R'为当量半径，m；E'为当量杨氏模量，GPa；m'为当量质量，kg；v_n、v_t 为颗粒间的切向和法向相对速度，m/s；u_n、u_s 分别为颗粒间的相对法向位移和切向位移，m；K_n、K_t 为颗粒间的法向和切向刚度系数，N/m^3；C_n、C_t 分别代表颗粒间法向与切向的阻尼系数。

异形多级内聚颗粒间力的传递计算通过上述矩阵依次计算得出，以保证施加的外部载荷能够实时地反映在颗粒间的粘结键上。

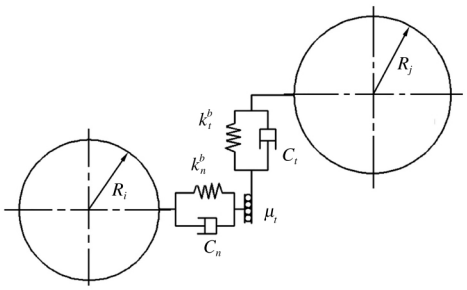


图 4　Hertz-Mindlin 接触模型示意图

2.2　粘结模型

为了真实反映多级内聚颗粒在破碎机中的实际破碎状态及其内部物质间的胶结关系，选择键合粒子模型(bonded particle model，BPM)为其仿真粘结模型，该模型的原理是通过在颗粒模型内部的单元体之间形成一定力学属性粘结键，使颗粒的力学特性与真实破碎状态一致，该区域的力学模型满足线性理论，即

$$F = KU \tag{2}$$

式中：F 为颗粒间粘结力，N；U 为颗粒间粘结键位移，m；K 为粘结键刚度矩阵，其各自的数学公式为

$$F_n^b = \pi k_n^b r_2^b \delta_n \tag{3}$$

$$F_t^b = -\pi k_t^b r_2^b \delta_t \tag{4}$$

$$M_n^b = -\frac{\pi}{4} k_n^b r_b^4 \theta_n \tag{5}$$

$$M_t^b = -\frac{\pi}{4} k_t^b r_b^4 \theta_t \tag{6}$$

式中：F_n^b、F_t^b 分别代表粘结键的法向力、切向力，N；M_n^b、M_t^b 分别代表颗粒间的法向力矩、切向力矩，N·s；θ_n、θ_t 分别代表颗粒间法向角位移、切向角位移，rad；k_n^b、k_t^b 分别代表颗粒的法向刚度、切向刚度，N/m；δ_n、δ_t 分别代表颗粒的法向位移和切向位移，m；r^b 代表颗粒间的粘结键半径，m。

当颗粒受力大于其颗粒间粘结键所受的力时，颗粒间的粘结键发生断裂，此时粘结键中的法向应力 σ 和切向应力 τ 分别满足：

$$\sigma = \frac{F_n^b}{\pi r_b^2} + \frac{4M_n^b}{\pi r_b^3} \tag{7}$$

$$\tau = \frac{F_t^b}{\pi r_b^2} + \frac{2M_t^b}{\pi r_b^3} \tag{8}$$

因此，通过分析异形矿石颗粒力学模型可以得出各级模型下矿石颗粒间粘结键的法向应力与切向应力。

3　振动破碎机仿真优化与分析

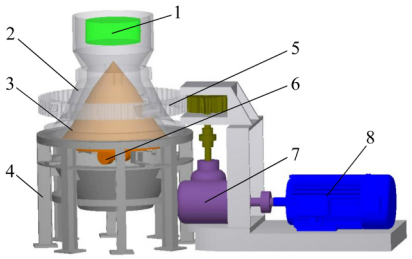
为了提高振动破碎机的破碎性能，根据振动破碎机的工作原理可知，影响其破碎性能的参数主要为内锥振动频率 s、外锥转速 ω 以及给料速度 v。运用 EDEM 对其进行离散元仿真试验，设计三因素五水平二次回归正交旋转组合试验[11]。

3.1　仿真模型的建立

应用三维软件 Pro/Engineer 对振动破碎机进行建模，为了使仿真尽可能的高效准确，将现有的振动破碎机进行适当简化并导入 EDEM 中[12]，如图 5 所示。

振动慢剪破碎机主要由内锥、外锥、减速器、振动电机等部件组成。破碎机正常工作时，

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



1—颗粒工厂；2—外锥；3—内锥；4—机架；5—传动齿轮；6—振动电机；7—减速器；8—主电机。

图 5 振动慢剪破碎机的离散元仿真模型

外锥作匀速圆周运动，内锥作周期性正弦运动。矿石颗粒在入料口(颗粒工厂)落入内锥与外锥的间隙，通过挤压并向下运动直至完全破碎。

3.2 矿石破碎过程数值模拟

采用钨矿石为研究对象，其物理力学特性参数如表 1 所示[13]。

表 1 仿真参数

名称	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
钨矿石	0.35	2.5×10^{7}	2 830
钢	0.30	7×10^{10}	7 800

名称	碰撞恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
钨矿石－钢	0.25	0.65	0.5
钨矿石－钨矿石	0.20	0.45	0.3

在颗粒工厂中以 1∶1∶1 的配比生成 3 类异形多级内聚矿石颗粒模型，将编译好各级粘结力的颗粒群 API 导入 EDEM 中，颗粒平均粒径为 45 mm，并采用正态分布，标准差为 0.097。仿真试验过程如图 6 所示。为了评定破碎机破碎性能的好坏，引入 －6 mm 矿石产率作为试验性能评价指标。其计算公式为

$$\delta=\frac{m}{M}\times100 \tag{9}$$

式中：m 为破碎后 －6 mm 矿石质量，kg；M 为破碎后矿石总质量，kg；δ 为 －6 mm 矿石产率，%。

以三因素二次回归旋转组合设计安排仿真正交试验，选择外锥转速、内锥振动频率、给料速度为试验因素。对各试验因素进行单因素预试验，确定其因素水平编码如表 2 所示，仿真试验方案与结果如表 3 所示。

表 2 因素水平编码

编码	因素		
	外锥转速 X_1/(r·min^{-1})	内锥振动频率 X_2/Hz	给料速度 X_3/(kg·s^{-1})
1.682	70	56	96
1	60	50	90
0	45	40	82
－1	30	30	74
－1.682	20	24	68

表 3 试验方案与结果

试验编号	外锥转速 X_1/(r·min^{-1})	内锥振动频率 X_2/(Hz)	给料速度 X_3/(kg·s^{-1})	－6 mm 矿石产率 δ/%
1	1	1	1	76.12
2	1	1	－1	78.02
3	1	－1	1	80.81
4	1	－1	－1	79.02
5	－1	1	1	83.12
6	－1	1	－1	84.55
7	－1	－1	1	74.92
8	－1	－1	－1	76.01
9	1.682	0	0	74.72
10	－1.682	0	0	76.81
11	0	1.682	0	75.69
12	0	－1.682	0	73.81
13	0	0	1.682	87.95
14	0	0	－1.682	88.01
15	0	0	0	88.65
16	0	0	0	87.17
17	0	0	0	89.21
18	0	0	0	87.69
19	0	0	0	87.41
20	0	0	0	87.12
21	0	0	0	88.42
22	0	0	0	89.11
23	0	0	0	88.21

3.3 试验结果及分析

试验结果通过 SPSS 23.0 数据处理软件进行分析，以确定各试验因素与试验性能评价指标间的拟合优度及其回归方程。具体分析数据如表 4 所示。

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

表 4　试验结果方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平 P	显著性
X_1	254. 244	1	84. 748	131. 96	0. 000	**
X_2	309. 104	1	103. 035	160. 434	0. 000	**
X_3	0. 894	1	0. 298	0. 464	0. 715	—
X_1^2	350. 941	1	87. 735	4. 038	0. 016	*
X_2^2	407. 180	1	101. 795	5. 472	0. 005	**
X_3^2	189. 493	1	47. 373	1. 543	0. 232	—
X_1X_2	618. 854	1	88. 408	10. 765	0. 000	**
X_1X_3	361. 479	1	45. 185	1. 662	0. 194	—
X_2X_3	417. 643	1	52. 205	2. 253	0. 088	—
回归	735. 501	9	56. 577	77. 851	0. 000	**
残差	10. 241	13	0. 788			
误差	6. 541	8	0. 727			
总和	742. 042	22				

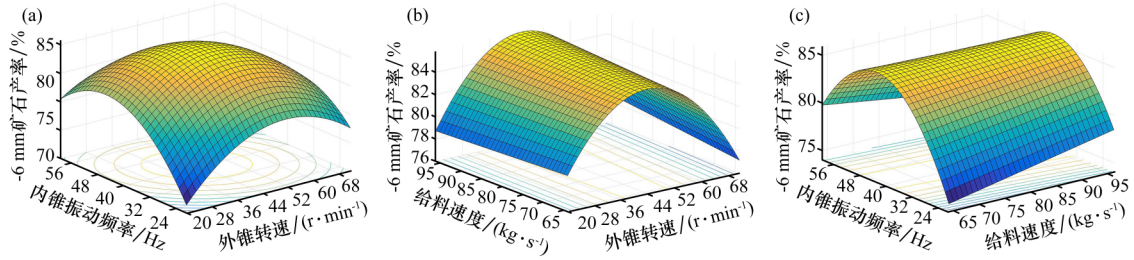
注：$P<0.01$（极显著，**），$P<0.05$（显著，*）。

由表 4 可知：－6 mm 矿石产率响应面模型极显著，回归模型与试验数据吻合较好，因此可得－6 mm 矿石产率与各试验因素的回归方程为

$$\delta = -69.202 + 2.223X_1 + 5.507X_2 - 0.076X_3 - 0.019X_1X_2 + 0.003X_1X_3 - 0.006X_2X_3 - 0.019X_1^2 - 0.051X_2^2 + 0.001X_3^2 \quad (10)$$

为了更加直观地得到－6 mm 矿产率与各试验因素的关系，采用降维法，任意固定其中一个试验因素为 0 水平，采用 Matlab 绘制其响应曲面，如图 6 所示。

由图 6(a) 可知：当外锥转速位于 0 水平时，－6 mm 矿石产率随内锥振动频率的增大呈现先上升后下降的趋势；当内锥振动频率位于 0 水平时，－6 mm 矿石率也随外锥转速的增大呈现先上升后下降的趋势；当外锥转速为 36 ~ 52 r/min，内锥振动频率为 32 ~ 48 Hz 时，－6 mm矿石产率的值位于较高点。由图6(b) 可知：当内锥振动频率位于 0 水平时，－6 mm 矿石产率随给料速度的变化趋势不明显；当给料速度位于 0 水平时，－6 mm 矿石产率随内锥振动频率的增大呈现先上升后下降的趋势。由图 6(c) 可知：当外锥转速位于 0 水平时，－6 mm 矿石产率随给料速度的变化趋势不明显；当给料速度位于 0 水平时，－6 mm 矿石产率随外锥转速的增大呈现先上升后下降的趋势。



(a) 给料速度为 0 水平；(b) 内锥振动频率为 0 水平；(c) 外锥转速为 0 水平

图 6　－6 mm 矿石产率响应曲面

当外锥转速和内锥振动频率作为试验因素时，－6 mm 矿石产率的变化区间较大，因此破碎机的外锥转速和内锥振动频率的交互作用对－6 mm 矿石产率影响较显著。根据相关回归方程和响应曲面图等值线分布密度可知，在试验因素取值范围内，试验三因素对－6 mm 矿石产率显著性影响大小顺序依次为：内锥振动频率、外锥转速和给料速度。

3. 4　破碎机破碎性能参数优化

为寻找试验因素的最佳工作参数组合，提高振动破碎机的破碎性能，以－6 mm 矿产率最大为寻优条件，建立约束方程如下。

$$F_{max} = \delta$$

$$s.t. \begin{cases} 20\ \text{r/min} \leqslant X_1 \leqslant 70\ \text{r/min} \\ 24\ \text{Hz} \leqslant X_2 \leqslant 56\ \text{Hz} \\ 68\ \text{kg/s} \leqslant X_3 \leqslant 96\ \text{kg/s} \end{cases} \quad (11)$$

根据建立的参数化数学模型，结合试验因素的取值范围，利用 Matlab 中非线性优化 Fmincon 函数对约束方程进行求解，圆整参数优化结果：当外锥转速为 46. 5 r/min，内锥振动

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

频率为 42.8 Hz，给料速度为 72.6 kg/s 时，-6 mm矿石产率为 89.74%。

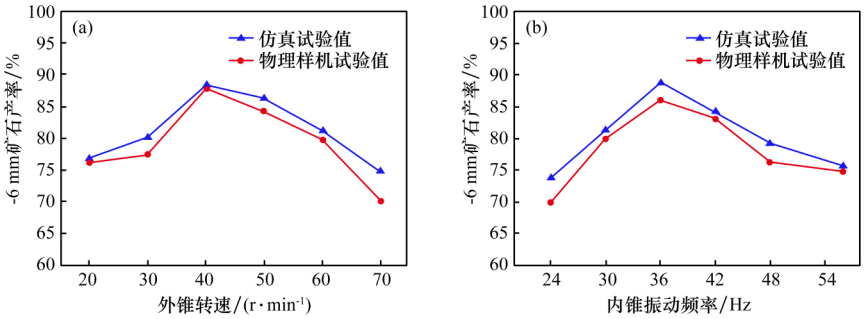
3.5 破碎验证试验

为验证优化后的振动破碎机破碎性能参数，以此进行实际破碎试验，如图 7 所示。

分别选择对破碎机影响较大的试验因素外锥转速和内锥振动频率为横坐标，根据实际破碎试验结果对仿真试验与物理样机试验对-6 mm矿石产率的影响趋势进行对比分析，结果如图 8 所示。



图 7 振动慢剪破碎机破碎试验



(a) 外锥转速作为对比试验因素；(b) 内锥振动频率作为对比试验因素

图 8 实际试验与离散元仿真 -6mm 矿石产率对比

由图 8 可知：实际破碎试验与仿真模拟试验的结果存在一定偏差，但两者变化趋势及相互之间大小关系基本一致，表明构建的异形多级内聚颗粒模型能够较好地模拟矿石的破碎实况。将仿真优化求解的最佳破碎参数应用于实际破碎试验中，得到 -6 mm 矿石产率为 88.02%，与仿真优化预测值相对误差为 1.92%，可见响应面模型具有可靠的精度，验证了所建颗粒模型的可靠性以及使用离散元法优化振动破碎机破碎性能的可行性。

4 结 论

(1) 利用三维逆向扫描技术构建了 3 种典型的异形多级内聚颗粒仿真模型，并定义了颗粒模型间的力学特性及粘结键，为建立更加符合实际矿石破碎过程的仿真试验奠定了基础。

(2) 通过离散元软件 EDEM 对振动破碎机破碎矿石过程进行二次正交旋转组合试验，建立了 -6 mm 矿石产率的回归模型并得到其响应曲面图，分析得出试验三因素对 -6 mm 矿石产率的显著性影响顺序依次为：内锥振动频率、外锥转速和给料速度。

(3) 利用 MATLAB 中非线性优化函数 Fmincon 对约束模型进行寻优处理，优化结果：在外锥转速为 46.5 r/min，内锥振动频率为 42.8 Hz，给料速度为 72.6 kg/s 时，振动慢剪破碎机破碎性能最佳。对仿真试验结果进行实际破碎试验，结果验证了所建颗粒模型的可靠性，以及使用离散元法优化振动破碎机破碎性能的可行性。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] Metzger M J，Glasser B J. Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill[J]. Powder technology，2013(237)：286-302.

[4] 吕超，刘爽，王世明. 计算机辅助破碎设备先进设计发展现状与趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013，44(S1)：323-326.

[5] Ergenzinger C，Seifried R，Eberhard P. A discrete element

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

model predicting the strength of ballast stones [J]. Computers & Structures,2012(108):3 - 13.

[6] 尹振宇,许强,胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究:进展及发展 [J]. 岩土工程学报,2012,34(12):2 170 - 2 180.

[7] 母福生,栗慧,熊宏志. 离散单元法在单颗粒物料单向压缩下的能耗研究 [J]. 有色金属(选矿部分),2013(1):48 - 51;72.

[8] Wang L,Park J Y,Fu Y. Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography [J]. Construction and Building Materials,2007,21(2):338 - 346.

[9] 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.

[10] 郭进山,蔡改贫,卢小江,等. 一种多尺度内聚颗粒模型的构建方法及数值模拟研究 [J]. 科学技术与工程,2016,16(8):72 - 78.

[11] GAO G H,FENG T X,YANG H,et al. Devel-opment and optimization of end-effector for extra-ction of potted anthurium seedlings during transpl-anting [J]. Applied Engineering in Agriculture,2016,32(1):37 - 46.

[12] 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.

[13] Tavarez F A,Plesha M E. Discrete element method for modelling solid and particulate materials [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2007,70(4):379 - 404.

(上接第 28 页)

代全部原有箅条需要一定的周期；10 ~ 11 月停机补箅条月均次数降低到 3 次，较上半年显著降低，减少了停机补炉条造成的生产波动和产量损失。

5　结　论

(1) 酸泥中的硫化物含量较高是导致烧结机箅条腐蚀烧损加剧的主要原因。

(2) 箅条中含碳量高，极易与铬结合形成大量碳化物析出分布在晶界上，导致晶界附近贫铬严重也是加速箅条腐蚀的原因之一。

(3) 优化烧结原料成分，降低箅条中含碳量并提高其铬质量分数，可改善箅条耐蚀性，延长箅条的使用寿命。

(4) 在烧结配料中使用酸泥，会造成箅条消耗量增加，成本升高，应开发其它配用途径。

参考文献

[1] 裴元东,熊军,史凤奎,等. 烧结篦条粘结机理研究及防治措施 [J]. 烧结球团,2018,43(2):1 - 4;44.

[2] 祝建伟,杨新龙. 烧结台车用新型高铬篦条的开发 [J]. 酒钢科技,2017(4):78 - 80;85.

[3] 贵永亮,刘瑾,王孟南,等. 烧结机篦条材料的摩擦磨损及高温抗氧化性能 [J]. 铸造技术,2016,37(4):619 - 621.

[4] 刘世雅,刘拴军,徐和平. 安钢烧结厂 360 m^2 烧结机台车篦条、隔热垫改造 [J]. 烧结球团,2010,35(2):44 - 46.

[5] 唐凌剑,张大晶,刘苗,等. 解决烧结机台车篦条大面积倾斜脱落的实践 [J]. 烧结球团,2017,42(5):18 - 20;28.

[6] 李京业,张进坤,罗宗尧,等. 烧结机篦条和隔热垫频繁脱落的解决措施 [J]. 山东冶金,2016,38(4):79 - 80.

[7] 王军锋. 烧结炉篦条的应力分析与结构优化 [J]. 河南冶金,2016,24(6):25 - 26.

[8] 朱红卫,莫龙桂,张中中,等. 降低 110 m^2 烧结机炉篦条消耗的措施 [J]. 柳钢科技,2015(5):54 - 55.

[9] 李玉和,苟淑云,庞立娟. 进一步提高烧结机篦条抗氧化性能的研究 [J]. 铸造技术,2010,31(11):1 441 - 1 443.

[10] 刘洪峰. 烧结台车高铬篦条的工艺优化 [J]. 甘肃科技,2016,32(21):47 - 48;21.

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