

半自磨机中矿石颗粒形状对轴向偏析的影响研究

Study on the Effect of Ore Particle Shape on Axial Segregation in the SAG Mill

陈慧泉¹, 吴万荣², 刘善聪²

(1. 铜陵有色冬瓜山铜矿, 安徽 铜陵 244031; 2. 中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:针对半自磨机内部矿石颗粒运动状态不易观察及颗粒分布不明确等问题,采用离散元法对比研究半自磨机中非球形与球形矿石颗粒对颗粒轴向偏析的影响。结果表明,非球形颗粒增大了颗粒床层的动态休止角,运动状态更为激烈,筒体颗粒具有更大的动能;颗粒粒径差异导致发生大颗粒聚集在筒体端盖附近区域而小颗粒积聚在筒体中间区域的轴向偏析现象,但非球形颗粒比球形颗粒的轴向偏析现象更为明显。

关键词:离散单元法; 半自磨机; 非球形; 轴向偏析

中图分类号: TD453

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)04-0077-06

Abstract: In view of the problems that it is difficult to observe the movement state of ore particles inside the semi-autogenous mill and the unclear distribution of particles, the discrete element method is used to study and compare the influence of non-spherical and spherical ore particles on axial segregation in the semi-autogenous mill. The results show that non-spherical particles increase the dynamic angle of repose of the particle bed, and the motion state is more intense, and the particles in the cylinder have greater kinetic energy. The difference in particle size leads to the axial segregation phenomenon that large particles accumulate in the area near the end cover of the cylinder, while small particles accumulate in the middle area of the cylinder. However, the axial segregation phenomenon of non-spherical particles is more obvious than that of spherical particles.

Key words: discrete element method; semi-automatic grinding machine; non-spherical; axial segregation

1 前言

半自磨机(SAG)是一类具备破碎和粉磨两种功能的磨矿设备,自20世纪70年代半自磨工艺在工业上应用以来,该技术已经成为选矿厂碎矿、磨矿作业中的常规工艺,也是当今世界各国新建选厂和技术改造中普遍采用的碎磨工艺^[1]。与传统球磨相比,半自磨工艺具有流程简单、易于操作、投资和经营费用低、改善矿浆电学性质、自动控制水平高等优点^[2]。半自磨机磨矿过程中筒体内部有大小不一的矿石和钢球,随着筒体的转动,由于钢球、矿石之间存在粒径、密度大小的差异,筒体轴向方向会形成近似大小颗粒聚集现象,成为轴向偏析现象。半自磨机磨矿原理主要依靠钢球将矿石冲击破碎。若靠近出料端为大钢球小矿石,进料端小钢球大矿石,

则会严重影响矿石的破碎效率。因此研究矿石在半自磨机筒体内部的分布规律具有实际的应用价值。

粒状材料的混合和分离过程普遍存在于制药、化工、能源、食品处理、矿物加工、粉末冶金和采矿行业,是当前颗粒流研究的重要焦点之一^[3],尽管已有大量关于旋转滚筒中颗粒运动的实验和数值研究报告,但大部分研究都集中在球形颗粒的流动规律上。然而,在工业生产过程中,矿石颗粒往往会偏离完美的球形,从而可能导致与球形颗粒不同的流动行为。而近年来出现了越来越多的研究,重点探讨了旋转滚筒中颗粒运动的形状效应。Dubé等人通过放射性粒子跟踪(RPF)技术评估了非球形粒子在滚筒中的流动行为,研究了旋转滚筒中圆柱形粒子的流动动力学。Maione等人通过数值和实验研究了旋转滚筒中由球形和非球形颗粒组成的二元混

[作者简介] 陈慧泉(1970—),男,主要从事矿山机械、矿山智能化研究。

[引用格式] 陈慧泉,吴万荣,刘善聪. 半自磨机中矿石颗粒形状对轴向偏析的影响研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(4):77-82.

合物的轴向偏析,结果表明由密度驱动的轴向分离导致非球形颗粒分布在端壁附近,而球形颗粒则分布在滚筒的中心部分。

尽管有许多关于非球形颗粒在滚筒中的颗粒运动的研究,但尺寸不同的非球形颗粒的多元混合物在半自磨机的流动规律仍然未知。这主要是由于半自磨机和矿石颗粒的不透明性,不能准确地统计半自磨机筒体内的颗粒分布情况,且不同于上述学者所研究的旋转滚筒模型,半自磨机具有筒体长径比小、转速高和筒体端盖的提升条结构,这些因素都会影响颗粒在筒体内的分布,而国内外却少有学者研究半自磨机内的颗粒轴向偏析行为。

因此,本文旨在探索半自磨机中非球形颗粒和球形颗粒的流动特性,研究球形矿石颗粒与非球形矿石颗粒对轴向偏析的影响,为后续研究半自磨机筒体内颗粒轴向偏析现象及其对磨矿效率的影响提供理论基础。

2 半自磨机和矿石的离散元模型建立

2.1 数学模型

本研究用 EDEM 2022 软件进行离散元单元法模拟 (DEM), DEM 模型的基本算法为牛顿第二定律,粒子之间的控制方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{n,ij} + F_{t,ij}) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i \times F_{t,ij}) - \mu_r |F_{n,ij}| R_i \omega_i \quad (2)$$

式中, m_i 和 I_i 分别是粒子 i 的质量和转动惯量; g 表示重力加速度; μ_r 为滚动摩擦系数; $F_{n,ij}$ 和 $F_{t,ij}$ 是粒子 i 和 j 之间的法向力和切向力; v_i 、 ω_i 和 R_i 是粒子 i 的线速度、角速度和半径。

在 DEM 模型中,接触模型用来描述粒子相互接触时的行为。对于干颗粒, Hertz-Mindlin (no slip) 非线性接触模型和 Standard Rolling Friction 模型因其精确度而被广泛应用。Hertz-Mindlin (no slip) 非线性接触模型中法向力和切向力基于 Hertz 和 Mindlin 的理论,可以表示为

$$F_{n,ij} = k_n \delta_{n,ij}^{1.5} + c_n \dot{\delta}_{n,ij} \quad (3)$$

$$F_{t,ij} = \begin{cases} k_t \delta_{t,ij} + c_t \dot{\delta}_{t,ij} & \text{for } F_{t,ij} < \mu_s \cdot F_{n,ij} \\ \mu_s \cdot F_{n,ij} & \text{for } F_{t,ij} \geq \mu_s \cdot F_{n,ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\delta_{n,ij}$ 和 $\delta_{t,ij}$ 分别为两单元法向和切向重叠量; μ_s 为两单元间的静摩擦系数。 k_n 和 k_t 分别是法向和切向刚度系数,表达式为

$$k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (5)$$

$$k_t = -8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (6)$$

式中, E^* 、 R^* 、 G^* 分别是等效杨氏模量、等效半径以及等效剪切模量,这些参数可以定义为

$$E^* = \left[\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$R^* = \left[\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$G^* = \left[\frac{1 - \nu_i^2}{G_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{G_j} \right]^{-1} \quad (9)$$

式中, E_i 、 ν_i 、 G_i 、 E_j 、 ν_j 、 G_j 分别表示质点 i 和 j 的杨氏模量、泊松比和剪切模量。 c_n 和 c_t 分别是法向和切向的阻尼系数,可以定义为

$$c_n = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \cdot \sqrt{S_n \cdot m^*} \quad (10)$$

$$c_t = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \cdot \sqrt{S_t \cdot m^*} \quad (11)$$

式中, m^* 为当量质量, e 为恢复系数, S_n 和 S_t 分别为法向和切向刚度,表达式为

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (12)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (13)$$

Standard Rolling Friction 模型通过向接触表面施加扭矩的方式解决滚动摩擦的模拟问题,粒子 i 表面摩擦力表达式为

$$\tau_i = -\mu_r F_{n,ij} R_i \omega_i \quad (14)$$

式中, μ_r 是滚动摩擦系数, R_i 是接触点到质心的距离, ω_i 是物体在接触点的单位角速度矢量。

2.2 半自磨机和矿石模型

本文主要研究对象为某 $\phi 8.53 \times 3.96$ m 大型半自磨机,由于选矿厂中使用的半自磨机大多仅仅是衬板布局 and 结构有所区别,所以本次研究结果具有一定的泛化参考价值。半自磨机模型包括筒体衬板,进出料端盖以及格子衬板等结构,具体模型如图 1 所示。

矿石的形状是不规则的,为了更好的模拟矿石的几何形状,提高离散元仿真计算效率,本文根据实际矿石颗粒采用多球模型构造仿真矿石颗粒,具体如图 2 所示。多球模型是将一定数量的不同大小球体模型相互重叠组合起来创建复杂形状的颗粒。

2.3 仿真参数设置

设置钢球粒径为 150 mm; 设置矿石颗粒粒径为

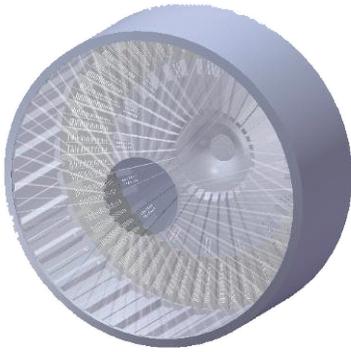


图1 仿真所用筒体模型



图2 非球形矿石颗粒

200 mm、180 mm 和 60 mm。钢球和矿石粒径分布和见如表 1。

表 1 仿真模型中钢球粒径分布及占比

颗粒类型	颗粒尺寸/mm	颗粒体积占比/%	颗粒数
钢球	150	33	5 564
矿石	200	12	1 767
矿石	180	42	10 316
矿石	60	13	50 695

为了提高仿真的计算准确度,筒体模型由 ICEM 划分网格后导入 EDEM 中。颗粒间滑动摩擦系数、恢复系数等接触参数基于现场堆积角试验进行参数标定以及引用有关文献数据^[4-7]。

表 2 半自磨机仿真中所采用的各项参数

参数	符号	数值	单位
磨机长度		3.96	m
钢球填充率		11	%
钢球直径		150	mm
总填充率		28	%
半自磨机转速		10.6	rpm
矿石密度	ρ	3 400	kg/m ³
矿石间恢复系数	e_{r-r}	0.5	
矿石与钢球以及筒体恢复系数	e_{r-s}	0.41	
矿石间静摩擦系数	f_{s-r}	0.49	
矿石与钢球以及筒体静摩擦系数	f_{s-r-s}	0.5	
矿石间滚动摩擦系数	f_{k-r}	0.15	
矿石与钢球以及筒体滚动摩擦系数	f_{k-r-s}	0.25	

3 结果与讨论

3.1 矿石形状对颗粒运动状态的影响

在半自磨机启动后,初始填充的颗粒床与筒壁一起转动。为了更加准确地研究磨机筒体内部的颗粒偏析行为,需选取颗粒在磨机达到稳态时进行分析。图 3 所示为磨机中总颗粒相对于时间的总动能,颗粒总动能在磨机启动时急剧增加,然后随时间波动收敛,直到第 40 s 时总动能趋于稳定,在此之后,总动能在一个恒定值附近波动,表明此时半自磨机内颗粒达到稳态。

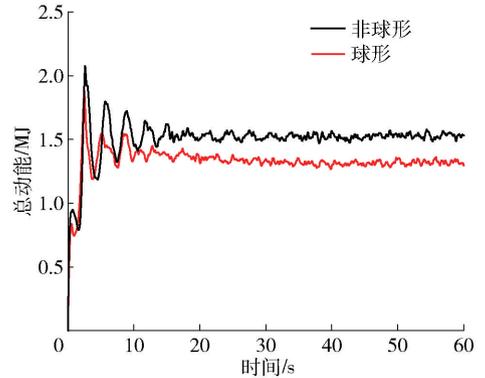


图 3 磨机中颗粒的总动能演化曲线

此外,颗粒总动能与颗粒的运动状态有关,从图 3 可知,非球形矿石颗粒比球形颗粒的总动能更大,其原因是由于非球形颗粒比球形动态休止角大,颗粒床层更弯曲。颗粒分布如图 4 所示,即筒体衬板对非球形颗粒提升能力更强,提升条将颗粒提起更高、更多,抛落时颗粒的动能更大。另外一方面也表明筒体内非球形颗粒参与抛落运动更多,比球形颗粒的运动碰撞更强烈。

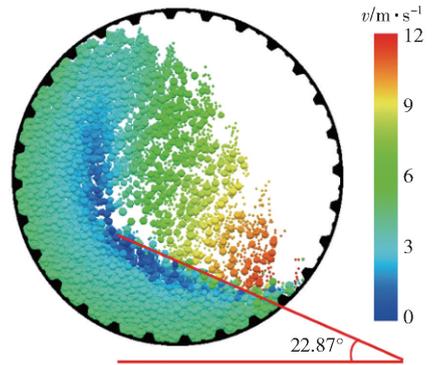


图 4 磨机在第 60 s 中心切片的颗粒分布

3.2 矿石形状对颗粒轴向分布影响

由于磨机筒体的不透明性,无法精确地观察筒

体内部颗粒偏析结果,然而通过数值分析方法能准确地呈现出半自磨机内颗粒轴向偏析的结果。图5所示为半自磨机启动开始后筒体内颗粒的轴向瞬时分布状态,即6、11、17、23和60秒时刻的磨机轴向截面颗粒分布状态,红色和蓝色分别代表大颗粒和小颗粒。在第6秒时刻,对于非球形颗粒仿真中,半自磨机底部、顶部出现明显的蓝色小颗粒带,并且颗粒床表面的蓝色小颗粒也较为明显;对于球形颗粒仿真中,半自磨机底部、顶部也出现了蓝色小颗粒带,但比较小,且颗粒床表面主要以红色大颗粒为主。在第11秒时刻,筒体颗粒开始出现轴向偏析,

即筒体端盖两侧红色大颗粒多于蓝色小颗粒,筒体顶部、底部小颗粒数量明显多于上个时刻,但非球形的红蓝色颗粒带比球形颗粒明显。在第17秒时刻,非球形颗粒仿真中轴向偏析更为明显,红色大颗粒占据着筒体两端位置,蓝色小颗粒则积聚在筒体中部,而球形颗粒仿真中筒体中部蓝色颗粒略多于红色颗粒,颗粒带不显著。在第23秒、60秒时刻,筒体内颗粒分布与第17秒时刻基本相似,颗粒流动趋于稳定。这表明轴向偏析在磨机三转内近乎完成,最终状态为筒体两端区域以大颗粒为主,筒体中部出现以小颗粒为主的轴向带。

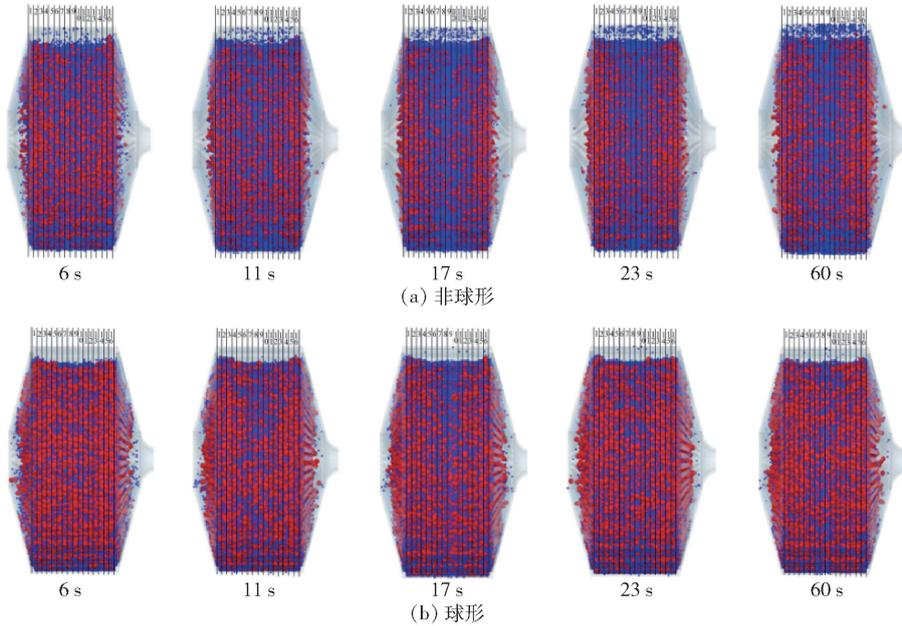


图5 磨机中颗粒在不同时刻的轴向偏析行为

随着半自磨机筒体转动,颗粒沿轴向重新分布,形成端盖两侧区域大颗粒带、中间区域小颗粒带现象,但该现象仅是局限于观察到颗粒表面的现象,为了更加充分说明颗粒偏析现象,对半自磨机启动后1~16区域的颗粒质量进行统计分析并绘制云图,具体如图6所示。由图6(a)可知,非球形颗粒仿真中半自磨机启动后至第30秒之间轴向颗粒质量分布无明显变化,在第30秒左右颗粒质量发生明显变化,由颗粒质量分布基本均匀过渡到2~4区域和12~14区域颗粒质量大,中间区域颗粒质量小的现象,与上文中非球形大颗粒分布在端盖两侧,小颗粒在筒体中间区域相对应。由图6(b)可知,球形颗粒仿真中半自磨机启动后至第35秒之间轴向颗粒质量分布无明显变化,在第35秒左右颗粒质量发生明显变化,2区域和14

区域的颗粒质量相对较大,除筒体中间区域明显小于其他区域,其他区域颗粒质量相差不大,与上文中球形颗粒端盖两侧颗粒带分布不明显,中间区域小颗粒相对应。

磨机筒体两侧端盖由于其端盖提升条及摩擦力的作用会对颗粒施加一定的轴向作用力使得颗粒获得沿筒体轴向上的速度。另外一方面,由于端盖对颗粒提升起到一定的作用,致使端盖附近的动态休止角更大,且小颗粒在颗粒床表面,促使小颗粒往筒体中间区域运动,而大颗粒积聚在端盖两侧。

3.3 矿石形状对偏析指数的影响

颗粒偏析中的一个关键问题是偏析性能的评估。在本次工作中,偏析指数是一种数理统计方法,用于评估磨机的偏析速度。偏析指数可以定义为

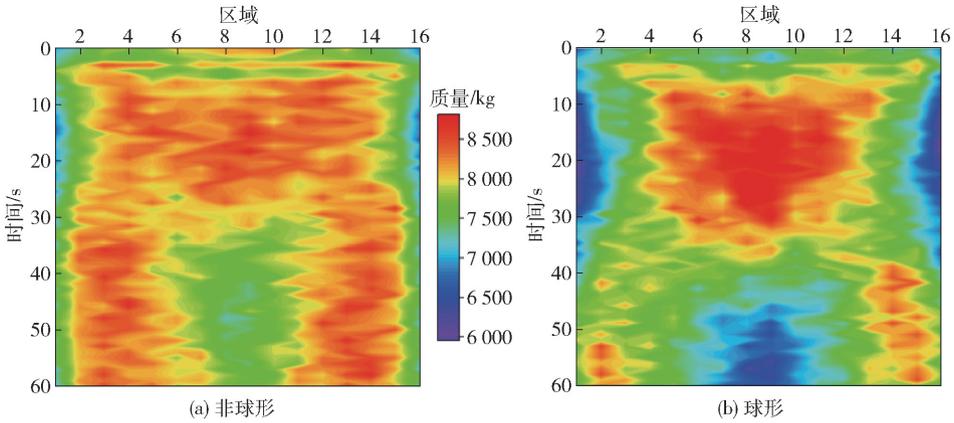


图6 各区域颗粒质量云图

$$I_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^W (C - C_{avg})^2}{W - 1}} \quad (15)$$

式中, W 是颗粒的采样单元的总数; C_{avg} 是整个颗粒床中小颗粒的平均体积比; C 是每个采样单元中小颗粒的体积比。

对于实际的偏析过程, 偏析指数的范围为 0 到 1。 I_s 的值为 0.5 表示完全混合状态, 0 表示该区域不存在小颗粒, 1 则相反, 0 和 1 都表示颗粒完全分离状态。偏析指数的计算需要采样, 其结果受样本数量和样本大小的影响, 偏析指数的统计分析需要比较多的样本, 分析的样本越少, 结果的不确定性就越大。

图 7 所示为两组仿真中各区域的偏析指数云图。在完全混合的初始阶段 ($t = 0$ s), 颗粒的偏析指数约为 0.5。之后随着磨机的转动, 筒体两端偏析指数逐渐下降, 筒体中部偏析指数先上升后下降, 最后稳定在恒定值。图 7(a) 非球形颗粒仿真中筒体两端的偏析指数蓝色区域明显比球形颗粒大, 且偏析指数更小; 非球形颗粒仿真中筒体中间区域的偏析指数在筒体第三转后迅速上升, 最高在 30 s 时达到 0.9, 而球形颗粒仿真中筒体中间区域的偏析指数在第 40 s 时才达到最大值, 约为 0.85。说明随着半自磨机旋转, 非球形颗粒的运动碰撞比球形颗粒更强烈, 偏析现象更明显。

4 结论

本文采用离散元单元法对大型半自磨机内颗粒流动进行了数值模拟, 通过采集选矿厂的数据构建仿真模型, 研究对比分析非球形与球形矿石颗粒对磨机颗粒轴向偏析的影响, 得出以下结论:

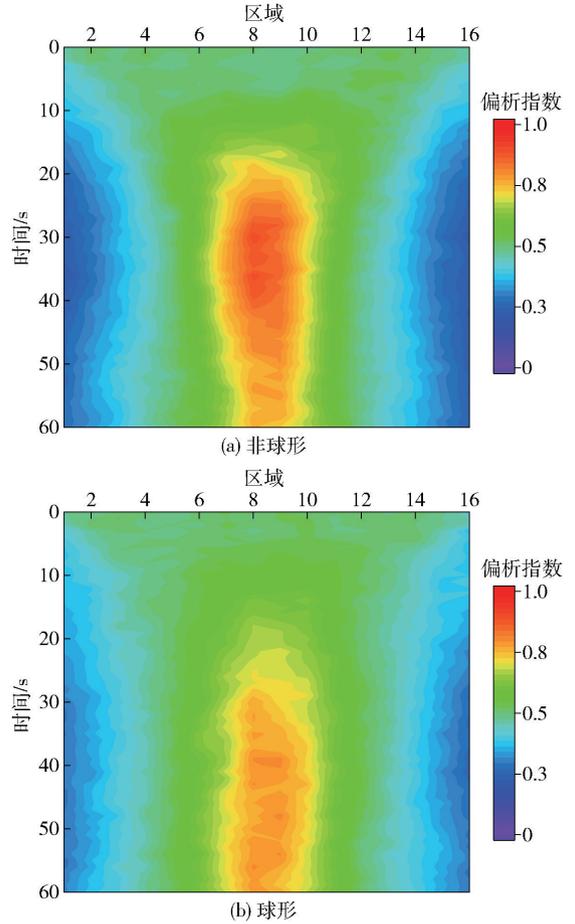


图7 各区域偏析指数云图

- (1) 颗粒轴向偏析是半自磨机运行中的一种固有现象。轴向偏析在磨机运行三圈后完成, 非球形颗粒比球形颗粒偏析现象更为明显。
- (2) 颗粒粒径差异导致小颗粒和大颗粒发生轴向偏析。大颗粒聚集在半自磨机筒体端盖附近区域, 小颗粒积聚在筒体中间区域。
- (3) 受颗粒轴向偏析的影响, 非球形仿真中颗

粒质量最大在筒体两端的2~4区域和12~14区域;而球形仿真颗粒质量最大在筒体两端的2区域和14区域

(4)非球形颗粒仿真中筒体中间区域的偏析指数在第30s时达到最大值0.9,而球形颗粒仿真中筒体中间区域的偏析指数在第40s时才达到最大值,约为0.85。说明非球形颗粒的运动碰撞比球形颗粒更强烈,偏析现象更明显。

[参考文献]

- [1] 陈天乐,肖庆飞,任英东,等.半自磨机结构与筒体衬板研究进展及发展趋势[J].化工矿物与加工,2022,51(2):6.
- [2] 黄金华,丘世澄,阮华东.半自磨介质消耗与产品粒度

特性优化研究[J].现代矿业,2021,37(8):254-257.

- [3] 尤腾胜,李兆辉,何荣权.半自磨系统顽石性质及其对系统产能的影响研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):72-77.
- [4] 尹自信.球磨机铁矿石颗粒破碎及粒度分布行为研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [5] 李同清.球磨机矿磨介质动力学行为研究[D].中国矿业大学,2018.
- [6] 何荣权,尤腾胜,邓朝安.智能磨矿系统半自磨机控制关键参数研究[J].绿色矿冶,2023,39(1):17-20.
- [7] 尤腾胜,冯建伟,陈名洁.钢球尺寸对半自磨-球磨系统产能的影响研究[J].有色设备,2020(2):25-28.

(上接第31页)

[参考文献]

- [1] 孙世国,赵雪芳,王群,等.急倾斜矿体不同开采时序对上覆岩体变形的影响[J].煤矿安全,2015,46(2):190-192.
- [2] 黄平路,陈从新,肖国峰,等.复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律的研究[J].岩土力学,2009,30(10):3020-3024.
- [3] 杨宝贵,彭杨皓,李杨,等.充填开采地表移动变形规律数值模拟分析[J].金属矿山,2014(12):169-174.
- [4] 吴昊燕,张爱民,王志运.深井大规模进路充填开采扰动效应影响分析[J].中国矿山工程,2022,51(3):33-37.
- [5] 魏诚,冀炳信,时跃宁.最新监管政策对金矿地下开采的影响及对策分析[J].黄金,2022,43(8):1-4.
- [6] 周科平,杜相会.基于3DMINE-MIDAS-FLAC3D耦合的残矿回采稳定性研究[J].中国安全科学学报,

2011,21(5):17-22.

- [7] 赵付万,徐世光,黄建国,等.数值模拟在采空区对地表稳定性影响分析中的应用[J].矿产与地质,2017,31(4):820-825.
- [8] 李江,张润达,朱晨迪.两步骤上向水平分层充填法采场宽度优化研究[J].矿业研究与开发,2021,41(4):11-17.
- [9] 杨海彬,李文超,秦秀合,等.某金矿深部采场结构参数与回采顺序优化研究[J].矿业研究与开发,2020,40(12):18-22.
- [10] 解联库,杨小聪,刘庆林,等.基于霍克-布朗破坏准则的采场空区稳定性分析[J].有色金属,2008(3):109-111.
- [11] 莫卿,马驰,王剑波.基于模糊评价的留矿法采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2012,32(1):4-8.