

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.10.013

基于 Archard 磨损模型的二元颗粒球磨机衬板磨损分析

马道明¹, 李同清¹, 尹自信², 黄宸珂³, 陈益楠³, 吴涛³

(1. 江苏海洋大学 机械工程学院, 江苏 连云港 222005;

2. 宿州学院 机械与电子工程学院, 安徽 宿州 234000;

3. 江苏海洋大学 应用技术学院, 江苏 连云港 222005)

摘要:作为球磨机的主要易损部件,衬板在运行过程中会受到钢球的连续冲击和挤压摩擦导致磨损。基于 Archard 模型,针对球磨机内 5 mm 和 10 mm 两种尺寸的介质,在无衬板、不同衬板形状、衬板高度条件下进行了等数量混合的模拟,旨在深入研究这些不同状态下颗粒的运动行为及其对衬板磨损的影响。通过这一研究,期望能够更深入地理解球磨机衬板的分层和磨损机理,进而优化衬板性能、提高磨机效率,并减少球磨机衬板的磨损。经过模拟仿真,得出以下结论:1)颗粒分层现象源于端盖效应和提升条对不同颗粒提升能力的差异。在无提升条时,小颗粒因轻而集中在筒体中心,大颗粒则因重而分布于外围。引入提升条后,小颗粒趋于在筒体两端聚集,形成新的轴向分布,而大颗粒分布相对稳定。2)矩形提升条相比梯形更易导致衬板磨损,但提升条高度增加时,筒体摩擦磨损减小。这模拟结果受限于 Archard 模型,因其未考虑冲击磨损的影响。

关键词: Rocky DEM; 衬板磨损; 球磨机; Archard 磨损模型

中图分类号: TD453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2024)10-0105-10

Wear Analysis of the Lining Plate of Binary Particle Ball Mill Based on Archard Wear Model

MA Daoming¹, LI Tongqing¹, YIN Zixin², HUANG Chenke³, CHEN Yi'nan³, WU Tao³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China;

3. Applied Technology School, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract: As the main vulnerable component of the ball mill, the lining plate is subject to continuous impact and extrusion friction from steel balls during operation, resulting in wear. This article adopts the Archard model to conduct simulations on the mixing of equal quantities of two sizes of media, 5 mm and 10 mm, inside the ball mill under the conditions of no lining plate, different lining plate shapes, and lining plate heights. The aim is to delve deeply into the motion behavior of particles under these different conditions and their impact on lining plate wear. Through this research, the author hopes to gain a deeper understanding of the stratification and wear mechanisms of the ball mill lining plate, further optimize lining plate performance, improve mill efficiency, and reduce the wear of the ball mill lining plate. After simulation and analysis, the following conclusions are drawn: 1) The particle stratification phenomenon is caused by the end cover effect and the difference in lifting ability of the lifting bars for different particles. In the absence of lifting bars, small particles tend to concentrate in the center of the cylinder due to their lighter weight, while large particles distribute around the periphery due to their heavier weight. When lifting bars are introduced, small particles tend to gather at both ends of the cylinder, forming a new axial distribution, while the distribution of large particles remains relatively stable. 2) Rectangular lifting bars tend to cause greater wear on the lining plate compared to trapezoidal lifting bars. However, as the height of the lifting bars increases, the frictional wear of the cylinder gradually decreases. This simulation result is limited by the Archard model, which fails to take into account the influence of impact wear.

Key words: Rocky-DEM; wear; ball mill; Archard model

收稿日期: 2024-03-06

基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(2022AH051380)

作者简介: 马道明(1999—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事球磨机颗粒破碎、离散单元算法研究。

球磨机是医药、矿山、水泥等领域不可或缺的重要研磨设备^[1-4]。衬板作为球磨机的关键易损部件,能够有效保护磨机筒体,并直接影响衬板在磨机运转时起着保护筒体和调整研磨介质运动状态的关键作用,进而直接影响到球磨机的研磨效率^[5]。磨机工作过程中,工作环境恶劣,衬板常受到研磨介质的不断连续撞击冲击和压力作用摩擦导致磨损^[6-8]。随着矿产资源的贫、细、杂,以及磨机设计水平、制造水平等的提升,球磨机向着大型化和超大型化方向发展,研磨介质对衬板的冲击能量急剧增加,从而对衬板提出了更高的使用要求。

为了减少球磨机衬板在磨矿过程中的耗损,提高其工作效率,国内外研究机构通常采用离散单元仿真与试验相结合的方法,基于介质动力学分析球磨机衬板磨损机理,并通过优化衬板结构以达到降低钢耗的目的。其中一些研究成果包括:2008年KATUBILWA^[9]研究了磨矿介质直径分布对研磨参数的影响;2015年DOMINIK^[10]使用离散元法对球磨机内衬板进行数值模拟,并通过与试验数据的比较进行校准;2018年,CLEARY等^[11-13]使用22组离散单元模拟球磨机物料运行数据,找出操作参数和物料运动特性的拟合模型,以创建磨损管理策略。同样,在磨损方面,2018年倪旭^[14]使用自制的衬板摩擦磨损试验装置,分析了钢球-衬板单体和多体接触工况下滚动摩擦系数、磨损形貌、摩擦温升的变化规律,发现在模拟矿浆的环境中可以减轻衬板的磨损;2019年XU等^[15]结合离散单元和剪切冲击能量模型(SEMI),研究介质形状对衬板磨损的影响,结果表明非球面磨损比球面磨损大;2020年XU等^[16]还分析了单介质颗粒和多介质颗粒对衬板磨损的影响,而2021年KATINAS等^[17]则采用离散单元法和Archard磨损模型验证了其在干砂胶轮试验中的可靠性;在2022年谢昌华^[18]利用DEM-SLab软件从颗粒运动形态、功耗及能量利用、衬板及研磨介质磨损等方面对球形颗粒系统的湿式球磨过程进行了研究;2024年张晋霞等^[19]利用EDEM软件基于BP神经网络算法分析振动筛振动参数与料体分层效果;肖庆飞等^[20]用离散元算法对不同筒体衬板结构参数进行模拟试验,并从碰撞能量的角度量化磨矿效果,最后试验结果与离散元仿真试验结果相吻合,验证了离散元法在优化筒体衬板形状的可靠性。

综上所述,介质对球磨机衬板磨损机理是研究衬板磨损的关键问题之一。多项研究表明,磨矿介质的硬度、粒径和分布状态等因素会直接或间接地

影响到衬板的摩擦磨损情况。然而,不同介质的影响程度还需要进一步细致分析和总结。目前,球磨机多介质下对衬板磨损的问题备受关注并属于研究的热点。尽管已有一些关于多介质下球磨机衬板磨损方面的研究成果,但其研究水平、方法和试验条件等存在较大差异,并缺乏系统性和完整性。因此,未来需深入探究衬板磨损机理,建立更加全面、合理的模型,并整合各方面数据以优化衬板材料和球磨机设计方案。

1 离散元介绍

1.1 磨损模型公式

Rocky-DEM有用作预测固体表面由于冲击颗粒的作用而产生的磨损的工具。Rocky-DEM用于实现的磨损模型是基于Archard的磨损定律,这种定律将材料的体积损失与材料表面摩擦力所做的功联系起来^[17]。公式为:

$$V = k \frac{F_t s_t}{H} \quad (1)$$

式中, V 是从接触面磨损的材料总体积; F_t 是施加在接触面上的切向力; s_t 是接触面上的滑动距离; H 是受到磨损的材料硬度; k 是一个无量纲经验常数。

为了在Rocky DEM软件中实施,Archard定律以增量形式考虑:

$$\Delta V = C \Delta W_t \quad (2)$$

式中, ΔV 是模拟时间步长期间磨损的材料体积; ΔW_t 是粒子在同一时间步长内与表面碰撞所做的切向功或剪切功; $C=k/H$ 。

1.2 模拟方案

1.2.1 模拟参数设置

为研究球磨机筒体中的径向颗粒分层现象与球磨机各项运行参数之间的关系,使用一个由工业球磨机筒体简化而来的磨筒,在UG中建立305 mm×150 mm的筒体三维模型,导入到Rocky-DEM中。筒体结构主视图如图1,从左上到右下依次为无提升条、7.5 mm高矩形提升条、10 mm高矩形提升条、10 mm高梯形提升条、15 mm高矩形提升条。

本文旨在探讨多介质状态下球磨机的衬板磨损情况。试验中选用了直径为5 mm和10 mm的钢制磨矿介质。为了单独研究分层作用,同时避免其他参数对结果的干扰,仅通过调整提升条个数来改变介质在筒体内的分布。在模拟试验中,为了简化模型,将颗粒定义为球体。试验过程中设置了详细的材料参数和接触参数,包括颗粒与颗粒之间、颗粒和

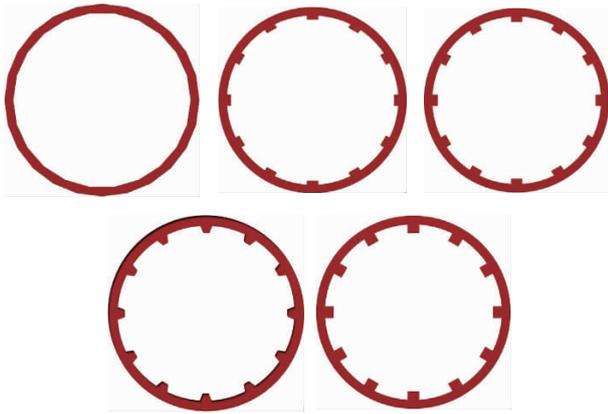


图1 球磨机筒体三维模型主视图

Fig. 1 Front view of three-dimensional model of the ball mill cylinder

衬板之间的静摩擦因数、动摩擦因数、切向刚度比和恢复系数等,具体数值见表1、2。这些参数的设置旨在更准确地模拟实际工况,从而得出更可靠的试验结果。

表1 材料参数和接触参数

Table 1 Material parameters and contact parameters

参数	数值
筒体、颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
筒体、颗粒泊松比	0.3
筒体、颗粒剪切模量/GPa	70
透明盖泊松比	0.25
透明盖密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 500
透明盖剪切模量/GPa	0.198

表3 对比试验表

Table 3 The comparative test table

对比对象	提升条形状			提升条高度		
	wu	10-ju-25%	10-ti-25%	7.5-ju-25%	10-ju-25%	15-ju-25%
形状	无	矩形	梯形	矩形	矩形	矩形
高度/mm	0	10	10	7.5	10	15
提升条数	12	12	12	12	12	12
填充率/%	25	25	25	25	25	25
转速率/%	50	50	50	50	50	50
仿真时间/s	50			100		

1.2.5 磨损开始时间确定

在 Rocky-DEM 中,磨损开始时间需要用户自行定义,这是一个相对复杂的过程,因为它涉及到机构运动、磨损部件与机床之间的间隙等多种因素的影响。这些因素在实际工况中的交互作用相当复杂,因此,软件仿真可能无法完全反映磨损的真实程度。通常情况下,机器或零件的实际使用寿命相对较长,而仿真模拟的时间则相对较短,这可能会导致仿真结果与实际磨损情况存在一定的偏差。为了确保仿真结果的准确性,磨损开始时间最好设

表2 材料的相互作用参数

Table 2 Interaction parameters of materials

颗粒类型	静摩擦因数	动摩擦因数	恢复系数
颗粒-颗粒	0.5	0.1	0.5
颗粒-透明盖	0.8	0.45	0.5

1.2.2 填充率模拟方案

根据填充率公式(3)^[21]:

$$G = \frac{\pi}{4} D^2 L \gamma \psi \quad (3)$$

式中, G 为颗粒质量,kg; D 为球磨机筒体内径,m; L 为筒体长度,m; γ 为颗粒散体密度;取 $\gamma=4.8 \text{ t/m}^3$, ψ 为磨矿介质填充率^[22]。

1.2.3 磨机转速确定

根据转速率公式可知,直径 305 mm 的筒体临界转速为 96 r/min。转速率为实际转速 n 与临界转速 n_c 的比值,用百分率 φ_n ,计算公式如式(4)所示。

$$\varphi_n = \frac{n}{n_c} \quad (4)$$

球磨机在实际工作中通常选择临界转速率的 65%~75%,文中仿真与试验均选择选 50% 的转速率。根据式(4)可知,在这三个水平的转速率的实际转速为 47 r/min。

1.2.4 对比试验表确定

由于球磨机筒体内部介质颗粒的运动受到多种因素影响,故本文设计如下对比试验,具体配比方案如表 3 所示。

置在一个颗粒运动状态已经稳定的阶段。可以更准确地模拟颗粒之间的相互作用以及它们对磨损的影响。此外,为了定量评估筒体中二元颗粒的混合程度,引入了 Lacey 指数。由于 Lacey 指数的数据离散程度过大,使用 Origin 软件自带的曲线拟合工具进行理论分析。如图 2 所示,展示了各方案在无磨损情况下运行 50 s 后的各时间段拟合过后的 Lacey 指数。

如图 2 所示,前 5 s 为颗粒填充阶段,筒体保持静止,因此前 5 s 的 Lacey 指数可忽略不计。从 5 s

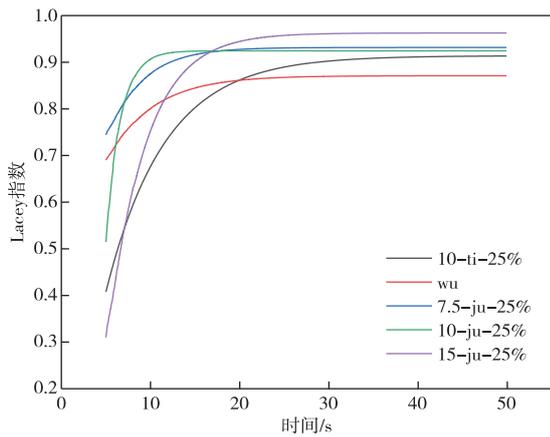


图2 未设置磨损开始时间时各组 Lacey 指数随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of Lacey index variation over time for each group without setting the start time of wear

开始计时,9组仿真的 Lacey 指数在前 10 s 内均呈现出显著的提升趋势。这表明,随着筒体的转动,原本处于分离状态的大小颗粒迅速被混合。在 10~20 s 内,所有组别的 Lacey 指数达到了峰值,反映了颗粒混合程度达到最高点。随着仿真的继续进行,Lacey 指数的变化逐渐趋于稳定。在 20 s 后,各组 Lacey 指数的变化趋于平稳。在试验过程中,颗粒混合达到平稳状态所需时间极短,在这段时间造成的衬板磨损可忽略不计。但在仿真中颗粒混合达到平稳状态所需时间占总仿真时间很大的比例,为了保证仿真数据能尽量与试验数据契合,将磨损开始的时间设定为 20 s,以便剔除颗粒还未混合稳定时的磨损数据。

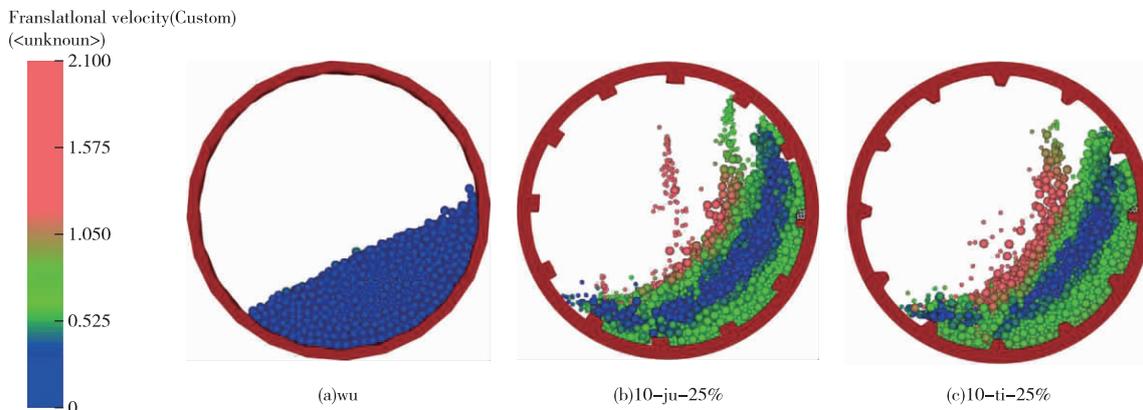


图3 不同形状下颗粒速度分布图

Fig. 3 Particle velocity distribution under different shapes

2.1.2 颗粒分布状态分析

为能直观看出每组具体的颗粒分布情况,图 4、5 为球磨机模拟 100 s 时不同形状下径向和轴向颗粒分布截面图。图 6 为 100 s 时不同形状下颗粒轴向

2 模拟仿真结果分析

2.1 提升条形状仿真结果

2.1.1 颗粒运动状态分析

图 3 为不同形状下颗粒速度分布图,其中磨机内颗粒的运动速度从快到慢分别用红色(7 m/s)、蓝色(0 m/s)和绿色进行渲染。红色代表颗粒处于抛落运动,绿色代表颗粒处于泻落运动,而蓝色则代表颗粒处于静止状态。在时间节点上,本文均选取了磨机运转的最后一刻(wu 组为 50 s,其他组为 100 s)进行观察。

从图 3 中可以清晰地看出以下几点:1)在无提升条的情况下,颗粒运动主要处于泻落状态,且磨机内存在大片空白区域。这表明无提升条时磨矿效果和冲击效果均不理想;2)对于矩形衬板而言,大量钢球以高速进行抛落式运动,显著减少了磨机内的空白区域,从而有助于提升磨机的有效容积利用率,然而这种运动模式也给衬板带来了一定的挑战,因为较多的钢球会直接冲击裸露的衬板,这可能导致筒体磨损情况较为严重;3)梯形提升条的设计相对平滑,高速运动的红色钢球数量较少,这意味着颗粒的破碎效果可能不如矩形提升条。但在抛落过程中,钢球最终会落至有颗粒的地方,因此,梯形提升条的磨损应较矩形提升条小。

综上所述,不同的提升条设计对磨机内的颗粒运动和磨矿效果具有显著影响。在选择提升条类型时,需要综合考虑磨矿效果、冲击效果以及筒体的磨损情况。

颗粒百分比分布图,该图利用 Origin 软件自带的列统计功能将轴向长度分为 10 个区间,统计每个区间里面介质的数量,得到不同条件下球磨机轴向介质分布。其中红色为大颗粒,蓝色为小颗粒。从图中

可以看出,在无提升条的情况下大小颗粒的径向分布是大颗粒在外小颗粒在内,但有提升条的情况下有的能使大小颗粒径向分布均匀却混合。在轴向颗粒分布方面,无提升条的情况下 5 mm 的小颗粒大

多分布在中间区域,而有提升条的情况下有一定的混合现象,但从图 6 颗粒轴向分布图还是可以看出来,在该条件下端盖附件的小颗粒的占比要比中间区域要大。

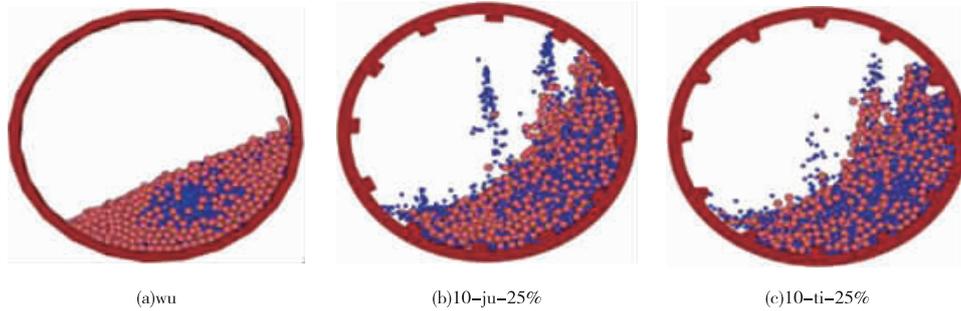


图 4 不同形状下颗粒径向颗粒分布截面图

Fig. 4 Cross section diagram of radial particle distribution under different shapes

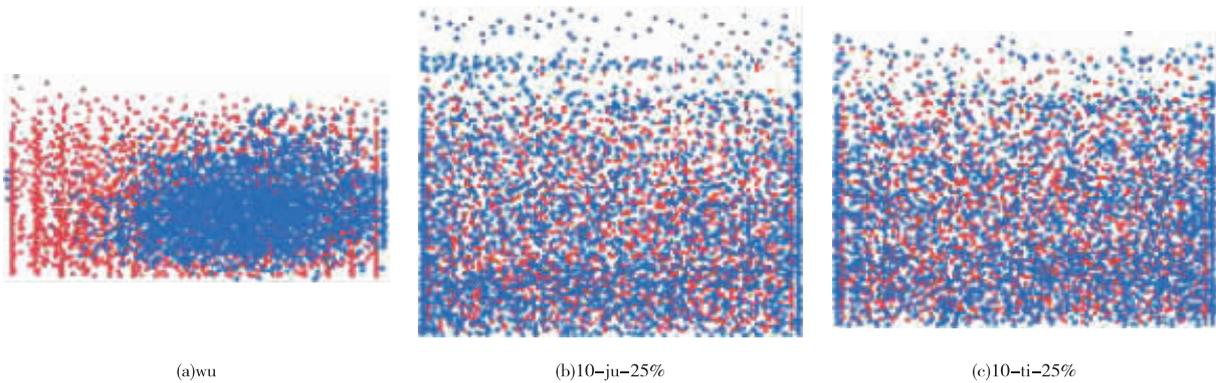


图 5 不同颗粒形状下轴向颗粒分布截面图

Fig. 5 Cross-sectional view of axial particle distribution under different shapes

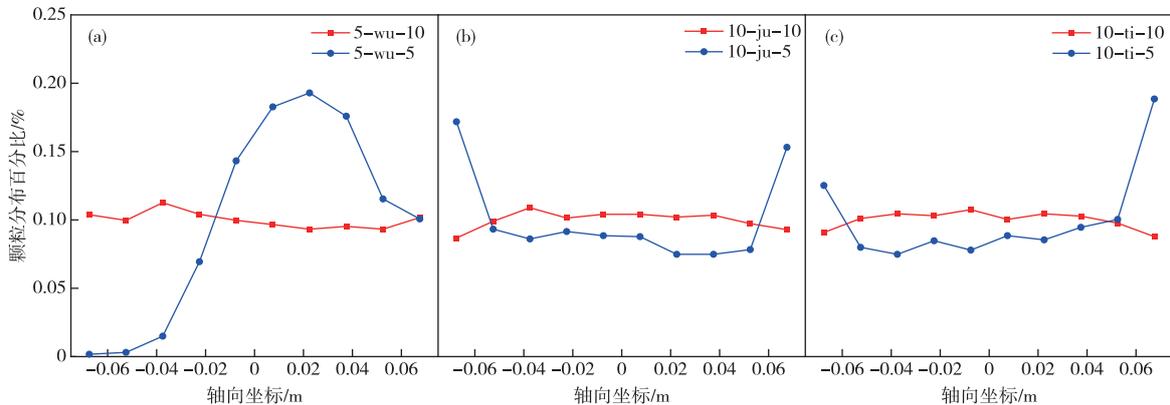


图 6 不同颗粒形状下轴向颗粒分布图

Fig. 6 Axial particle distribution under different shapes

2.1.3 颗粒与筒体碰撞能量分析

球磨机筒体的磨损主要是由颗粒的磨损与冲击造成的,能谱图是一种用于表征磨机内部碰撞环境的常规方法。图 7 为不同形状下颗粒与筒体的耗散能量能谱图 and 不同形状下颗粒与筒体的冲击

能量能谱图,其中方形表示为 10 mm 大颗粒,圆形表示为 5 mm 小颗粒,不同颜色代表不同的组别:红色表示 wu 组,蓝色表示 10-ju-25% 组,绿色表示 10-ti-25% 组。

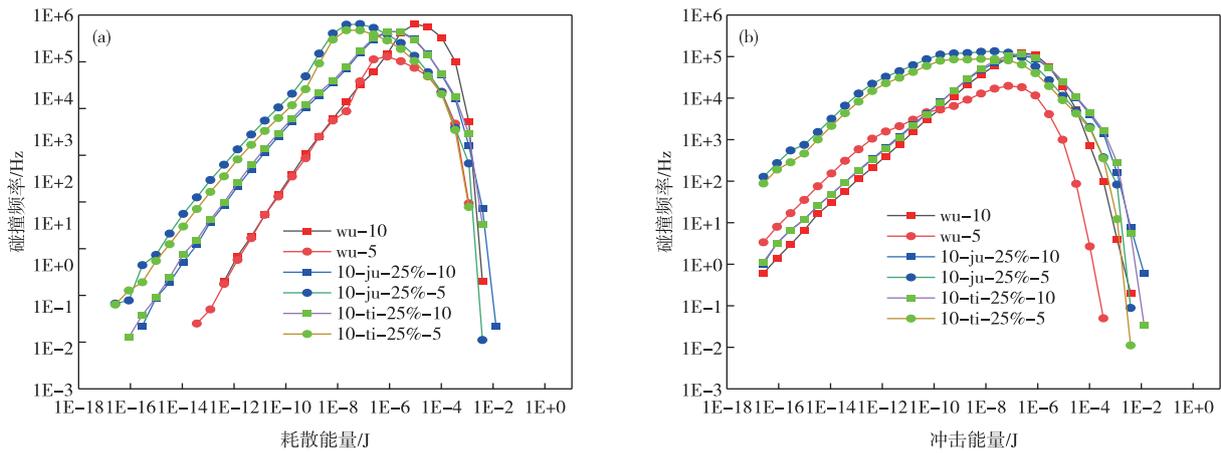


图7 不同形状下颗粒与筒体的耗散能量能谱图

Fig. 7 Energy dissipation spectra of particles and cylinder under different shapes

由此,从图7可以得出:1)颗粒与筒体的耗散能量和冲击能量在 $10^{-17} \sim 10^{-1}$ J,但二者碰撞频率有所不同,冲击能量的碰撞频率比耗散能量的碰撞频率要高;2)无提升条组的大颗粒耗散能量分布往右上方突出,说明无提升条组的大颗粒耗散能量最大;3)无论在哪个形状下,10 mm大颗粒的曲线比5 mm小颗粒的曲线偏右,说明无论是冲击还是耗散能量,大颗粒所携带的能量因为质量的原因都要比小颗粒要大;4)无提升条小颗粒和筒体的碰撞频率远低于有提升条的碰撞频率,这是由于在无提升条的情况下小颗粒主要集中在筒体内部,几乎不与筒体接触;5)有提升条时的小颗粒碰撞频率大于大颗粒碰撞频率,只有径向外围颗粒数量越多,碰撞频率才高,因此有提升条时径向外围小颗粒数量大于大颗粒;6)

矩形与梯形提升条组的大颗粒之间的能量分布相差不大,但小颗粒的碰撞频率矩形组略高于梯形组,这使得矩形组颗粒与筒体之间的能量高于梯形组,同时证明矩形组径向外围小颗粒数量大于大颗粒。

2.2 提升条高度仿真结果

2.2.1 颗粒运动状态分析

图8为高度分别为7.5、10、15 mm矩形提升条颗粒速度分布。由图8初步可知:1)随着提升条高度逐渐增加,球磨机内蓝色的“肾形区”逐渐减小,白色的空白区也在减小;2)随着提升条高度逐渐增加,高速运动的红色钢球数量增多,在水平方向的位移逐渐增大,呈抛落式落回的钢球数量增多,但冲击裸露衬板的钢球数量也在增加。因此,提升条高度增加可能会加剧衬板磨损。

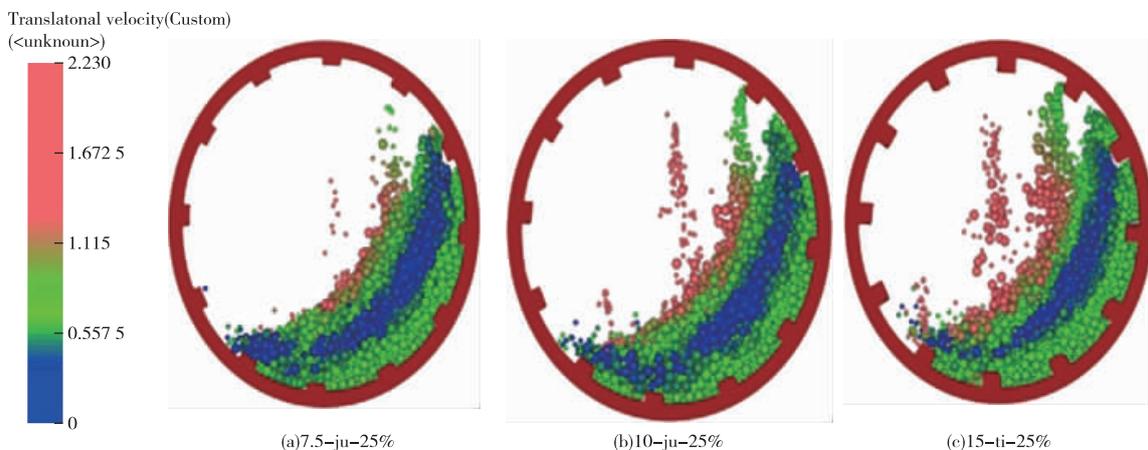


图8 不同高度下径向颗粒速度分布图

Fig. 8 Radial particle velocity distribution at different heights

2.2.2 颗粒分布状态分析

图9为不同高度下的100 s轴向颗粒分布截面图。从图中可以看出:1)随着高度的提升,提升条对大颗粒的提升高度也在升高;2)随着高度的提升,提

升条对小颗粒的数量也在提高,这使得更多小颗粒作抛落运动,到达趾角位置,使有更多小颗粒到达径向外围。

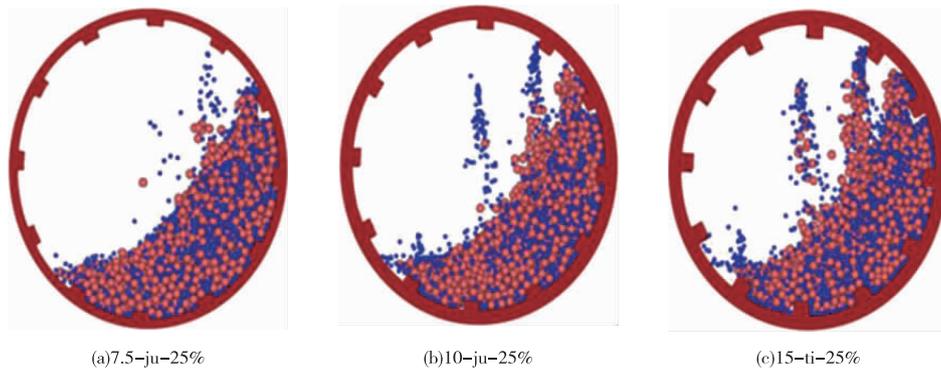


图9 不同高度下径向颗粒分布截面图

Fig. 9 Cross-sectional view of radial particle distribution at different heights

图10、11为不同高度下100 s轴向颗粒分布截面图以及轴向颗粒百分比分布图。从图10中结合Lacey指数可以适当提升条高才能使颗粒混合均匀,端盖效应会使小颗粒向筒体内部集中,而提升条的作用恰好相反小颗粒受到提升条的提升作用靠近筒

体。很明显7.5 mm时,大小颗粒的轴向分布小颗粒既有像a组向中间聚集的现象也有像b组向两边靠拢的现象;10 mm时提升条的作用和端盖效应作用相抵消使得颗粒混合均匀,15 mm时提升条的作用大于端盖效应,使得形成一种新的分层现象。

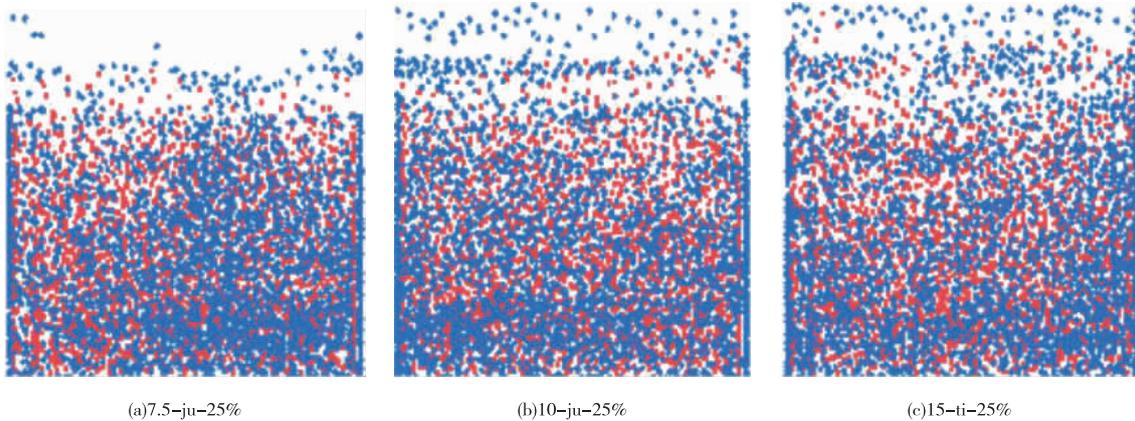


图10 不同高度下组颗粒轴向颗粒分布截面图

Fig. 10 Cross section of radial particle distribution at different heights

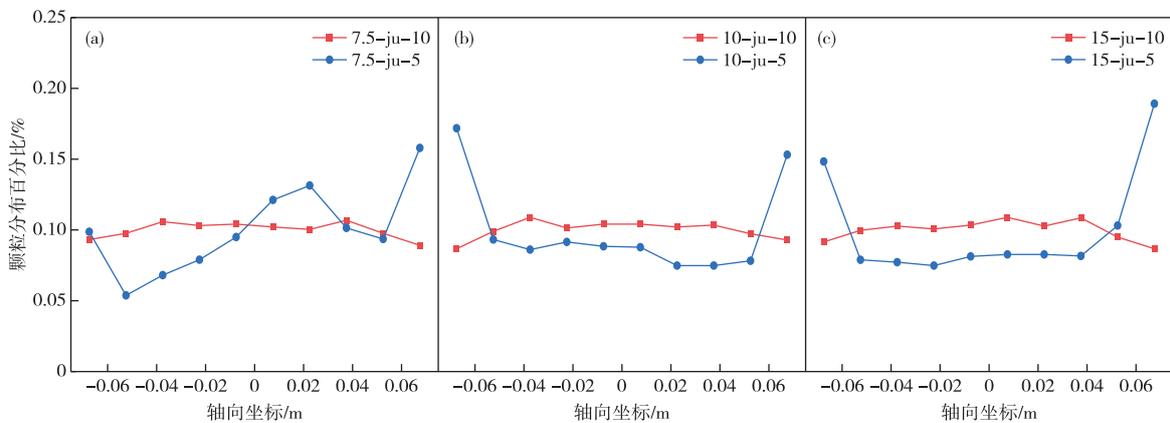


图11 不同高度下轴向颗粒分布图

Fig. 11 Axial particle size distribution at different heights

2.2.3 颗粒与筒体碰撞能量分析

图12为不同形状下颗粒与筒体的耗散能量能谱图和不同形状下颗粒与筒体的冲击能量能谱图,

与上节类似,方形表示为10 mm大颗粒,圆形表示为5 mm小颗粒,不同颜色代表不同的组别:红色表示7.5-ju-25%组,蓝色表示10-ju-25%组,绿色表示

15-ju-25%组。

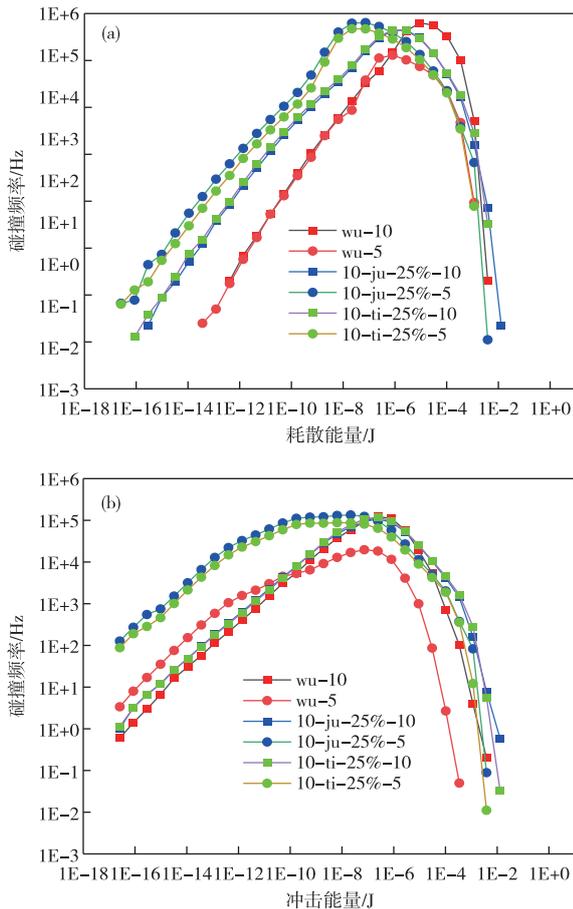


图 12 不同高度下颗粒与筒体的耗散能量能谱图
 Fig. 12 Dissipated energy spectra of particles and cylinders at different heights

从图中可以看出:1)颗粒与筒体的耗散能量范围在 $10^{-12} \sim 10^{-2}$ J,冲击能量范围在 $10^{-16} \sim 10^{-2}$ J,冲击能量的碰撞频率比耗散能量的碰撞频率要高;2)从耗散能量中可以看出,能量小区域 7.5 mm 高度提升条组碰撞频率最小,15 mm 高度提升条组碰撞频率最大,能量大区域 7.5 mm 高度提升条组碰撞频率最大,15 mm 高度提升条组碰撞频率最小;3)从冲击能量中可以看出无论大小颗粒,随着提升条高度增大,碰撞频率也在增大,这验证了前文随提升条高度的增加冲击裸露衬板的钢球数量也在增加。

2.3 磨损的仿真结果

将磨损开始的时间定义为 20 s,分别设置好仿真的时间,仿真结束后将仿真的几何形状导出到“SpaceClaim”软件中,以测量仿真后的体积磨损损失,并与仿真前的结果进行比较。图 13 为各组仿真前后体积损失量,其中 wu 组是仿真 50 s 的仿真时间,因为无提升条时衬板的损失太大,以至于在 80 s 时,离散元计算开始不稳定,为此采用 50 s 的仿真

时间。

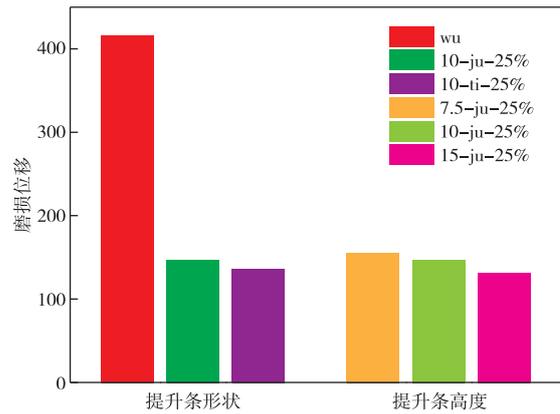


图 13 各组仿真前后体积损失量

Figure 13 Volume loss before and after simulation in each group

从图 13 中可以看出:1)以提升条形状为研究对象可知没有提升条时体积磨损最大,甚至还是只运行 50 s 的情况下,这也是没有提升条组运行 50 s 的原因,如果运行相同的时间,无提升条的筒体磨损严重的地方会直接被“磨穿”。梯形形状的体积磨损量最小。2)以提升条高度为研究对象可知球磨机衬板的体积磨损量随提升条高度的增加而减小。

当离散元模型结合 Archard 模型运行一段时间后,每个筒体模型元素都会产生一定的位移。通过对每个筒体元素的径向位移进行平方和计算,可以反映出筒体的磨损情况,不同组筒体的径向磨损如图 14 所示。

图 14 中都以极坐标方式来表示,极坐标角度是筒体与颗粒接触的外表面与筒体中心的角度,长度表示各角度下的径向磨损位移,用该值来表示磨损的大小。可以看出:1)各组衬板磨损情况大致相同,球磨机的筒体向逆时针方向旋转,可以观察到提升条迎面的磨损比背面更加严重;2)没有提升条组的径向磨损数值在有提升条组的径向磨损数值之上,而且无提升条只是模拟 50 s 的情况下说明在没有提升条的情况下,衬板的磨损程度达到最大;3)矩形提升条和梯形提升条的磨损相差不大,但提升条之外的筒体磨损矩形提升条大于梯形提升条所以总体筒体磨损矩形提升条大于梯形提升条;4)不同提升条高度对比下,15 mm 提升条磨损最严重,10 m 提升条磨损最轻,但提升条之外趋于 15 mm 磨损最轻,10 mm 磨损最严重。

经过对磨损结果与能谱结果的深入对比分析发现,磨损的大小排名结果与大颗粒耗散能量的数值排名结果竟然高度吻合,展现出了惊人的一致性,但

与大小颗粒的冲击能量毫无关系。产生这种现象的原因一方面是大颗粒携带的能量远远大于小颗粒,另一方面是 Archard 模型没有考虑物料对筒体的冲击可能导致显著的磨损。

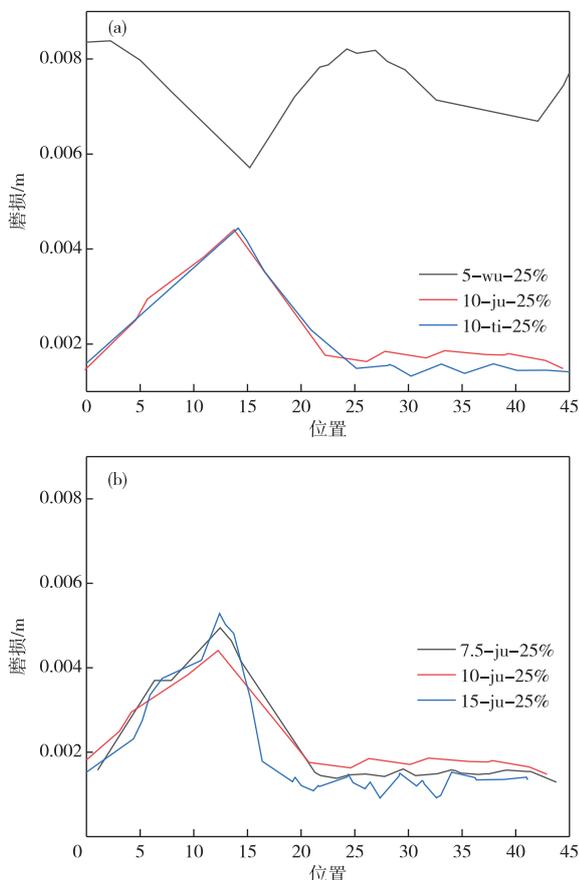


图 14 不同组筒体的径向磨损

Fig. 14 Radial wear of cylinders in different groups

3 结论

1) 在没有提升条的情况下,衬板的磨损程度达到最大。这是因为缺乏提升条的阻挡作用,颗粒与筒体之间的相对滑动较多,导致摩擦增大。同时,由于端盖效应的影响,颗粒的分布呈现出大颗粒在外、小颗粒在内的特点。值得注意的是,提升条不仅能够有效提高破碎效率,还能间接保护衬板,减少磨损。这是因为提升条能够改变颗粒的流动轨迹,减少颗粒与筒体之间的直接接触和摩擦。因此,在设计和使用破碎机时,应充分考虑提升条的作用,以实现高效破碎和减少衬板磨损的双重目标。

2) 通过对比不同形状的提升条,小颗粒的轴向分布在提升条作用下倾向于向筒体两端聚集,而大颗粒的轴向分布则保持不变。矩形提升条则有更大的衬板磨损。

3) 通过对比不同高度的提升条发现,随着提升条

高度的增加,高速运动的红色钢球数量增多,小颗粒的提升效果逐渐增强,同时筒体的摩擦磨损逐渐减小。

4) 将磨损结果与能谱结果结合分析发现, Archard 模型没有考虑物料对筒体的冲击可能导致显著的磨损,因此可能无法准确预测实际过程中球磨机的筒体磨损。为了改进模拟结果的准确性,需采用更复杂的磨损模型,研究和能够综合考虑多种磨损机制的模型,以便更准确地预测筒体的磨损行为。

参考文献

- [1] 李同清. 球磨机矿磨介质动力学行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI Tongqing, Study on charge dynamic behaviour of ball mills [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [2] DILBAS H, ÇAKIR Ö, YILDIRIM H. An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119118. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119118.
- [3] YIN Z X, PENG Y X, ZHU Z C, et al. Effect of mill speed and slurry filling on the charge dynamics by an instrumented ball [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(8): 1611-1616.
- [4] 罗春梅. 球磨机节能降耗新途径机理及应用研究[J]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
LUO Chunmei. Study on the mechanism and application of a new way of energy-saving and consumption-reducing of ball mill [J]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [5] 李晓波. 球磨机衬板材料及失效形式分析[J]. 水泥技术, 2020(2): 21-27.
LI Xiaobo. Analysis of lining plate material of ball mill and its failure mode [J]. Cement Technology, 2020(2): 21-27.
- [6] 王伟, 郝俊杰, 杨兴权, 等. 基于 ROCKY-DEM 的球磨机衬板设计[J]. 纯碱工业, 2022(4): 30-32.
WANG Wei, HAO Junjie, YANG Xingquan, et al. Design of ball mill liner based on ROCKY-DEM [J]. Soda Industry, 2022(4): 30-32.
- [7] 王著. 金属矿山球磨机衬板研究和应用进展[J]. 山东工业技术, 2017(18): 243.
WANG Zhu. Research and application progress of lining plates for metal mine ball mills [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2017(18): 243.
- [8] 陈剑锋, 肖飞凤. 球磨机的发展方向综述[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 94-97.
CHEN Jianfeng, XIAO Feifeng. The summarization of

- the developing trend of ball-mills [J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(8): 94-97.
- [9] KATUBILWA F M. Effect of ball size distribution on milling parameters[D]. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2008.
- [10] DOMINIK B. Discrete element method modeling of ball mills-liner wear evolution [D]. Liège: University of Liège, 2015.
- [11] CLEARY P W, OWEN P. Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear [J]. *Minerals Engineering*, 2018, 117: 42-62.
- [12] CLEARY PW, OWEN P. Effect of particle shape on structure of the charge and nature of energy utilization in a SAG mill [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 132: 48-68.
- [13] CLEARY PW. Effect of rock shape representation in DEM on flow and energy utilisation in a pilot SAG mill [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2019, 6: 461-477.
- [14] 倪旭. 干湿磨工况下球磨机衬板冲击摩擦磨损行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
NI Xu. Study on impact friction and wear behavior of ball mill under dry and wet conditions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [15] XU L, LUO K, ZHAO Y, et al. Influence of particle shape on liner wear in tumbling mills; a DEM study [J]. *Powder Technology*, 2019, 350: 26-35.
- [16] XU L, BAO S, ZHAO Y. Multi-level DEM study on liner wear in tumbling mills for an engineering level approach [J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 332-342.
- [17] KATINAS E, CHOTĚBORSKY R, LINDA M, et al. Sensitivity analysis of the influence of particle dynamic friction, rolling resistance and volume/shear work ratio on wear loss and friction force using DEM model of dry sand rubber wheel test [J]. *Tribology International*, 2021, 156: 106853. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106853.
- [18] 谢昌华. 组合型非球形 DEM 模型及球磨过程数值模拟方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
XIE Changhua. Combined non-spherical DEM model and numerical simulation study of ball milling process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [19] 张晋霞, 王研, 牛福生, 等. 基于 EDEM 与 BP 神经网络的平-摆筛参数化研究 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2024(1): 132-142.
ZHANG Jinxia, WANG Yan, NIU Fusheng, et al. Research on flat-pendulum sieve parameterization based on EDEM and BP neural network [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2024(1): 132-142.
- [20] 肖庆飞, 邵云丰, 周强, 等. 基于离散元法的半自磨机筒体衬板改型研究及应用 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(6): 63-70.
XIAO Qingfei, SHAO Yunfeng, ZHOU Qiang, et al. Research and application on the modification of the liner of semiautogenous mill based on discrete element method [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(6): 63-70.
- [21] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿 [M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
DUAN Xixiang, XIAO Qingfei. *Crushing and grinding* [M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [22] 袁文彬, 孙欣, 金凯, 等. 不同研磨介质填充率下球磨机内钢球碰撞研究 [J]. *矿冶工程*, 2023, 43(4): 57-60.
YUAN Wenbin, SUN Xin, JIN Kai, et al. Investigation on collision of steel balls in ball mills with varied filling rates of grinding media [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(4): 57-60.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 93 页)

- [12] 黄春海, 胡新红, 段瑶, 等. 湖南某高硫低品位铜矿选矿试验研究 [J]. *矿冶工程*, 2021, 41(3): 72-74.
HUANG Chunhai, HU Xinhong, DUAN Yao, et al. Mineral processing technology for high-sulfur lean copper ore from Hunan [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(3): 72-74.
- [13] 姜美光, 梁泽跃, 吕向文, 等. 云南某低品位斑岩型铜矿浮选回收试验研究 [J]. *矿冶*, 2024, 33(1): 46-51.
JIANG Meiguang, LIANG Zeyue, LYU Xiangwen, et al. Experimental study on flotation recovery of a low-grade porphyry copper mine in Yunnan [J]. *Mining and Metallurgy*, 2024, 33(1): 46-51.
- [14] 苟浩然, 曾海鹏, 黄红军, 等. 湖北某复杂低品位铜矿浮选试验研究 [J]. *矿冶工程*, 2023, 43(4): 85-88.
GOU Haoran, ZENG Haipeng, HUANG Hongjun, et al. Experimental study on flotation separation of low-grade copper ore from Hubei [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(4): 85-88.

(本文编辑 刘水红)