

基于离散元法的球磨机筒体衬板改型优化研究

李云啸^{1,2}, 肖庆飞^{1,2}, 国宏臣^{1,2}, 刘向阳^{1,2,3}, 周强^{1,2,4}, 王肖江^{1,2}

1. 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100070;
4. 矿冶过程自动控制技术国家(北京市)重点实验室, 北京 100070

中图分类号: TD921⁺.4; TD453 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0043-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.07.009

摘要 针对球磨机内能量利用率低、磨矿钢耗高的问题, 基于离散元法(DEM)仿真分析了不同衬板结构及衬板高度时钢球在磨机内的运动状态及碰撞能量分布。研究表明: 衬板结构及高度会显著影响磨机内颗粒的运动状态和能量分布; 不平滑衬板(筋波衬板和双筋衬板)提升载荷的作用强于平滑型衬板(单波衬板和双波衬板), 但不平滑型衬板的球磨机内钢球对衬板的冲击作用较强, 会增加衬板的磨损; 平滑型衬板中, 双波衬板能量分布最合理, 其钢球-钢球的碰撞能量最低, 为 52.10%, 能量利用率(钢球-矿石和矿石-矿石的碰撞能量之和在磨机碰撞总能量中的占比)最高, 为 21.10%。随着衬板高度逐渐增加, 高速运动的钢球数量增多, 大量的钢球冲击裸露衬板会加快衬板的磨损; 磨机内的碰撞总能量随着衬板高度的升高而增加, 且钢球-衬板和矿石-衬板的碰撞能量也在增加, 能量利用率在衬板高度为 60 mm 时最高, 为 21.10%, 说明衬板高度在 60 mm 时最佳。因此, 选择适宜的衬板结构和衬板高度, 能优化磨机的能量利用率, 改善磨矿环境、降低钢耗和节约磨矿成本。

关键词 球磨机; 衬板形状; 衬板高度; 碰撞能量分布; 离散元

引言

磨碎过程是选矿厂中动力消耗、金属材料消耗最大的作业, 磨矿作业的成本约占选厂成本的 50%^[1], 但有效破碎能量占磨机输入总能量的 0.5%~1.0%, 造成了极大的能源浪费^[2]。随着国内矿产资源逐渐枯竭, 磨矿“节能降耗”成为选矿厂亟待解决的问题。

在球磨过程中, 衬板是球磨机的关键部件, 具有保护磨机筒体和提升颗粒的作用, 对改变磨机颗粒运动状态及提高碰撞能量利用率具有极大影响^[3-4]。目前矿山球磨机使用的衬板结构主要包括平滑型衬板和不平滑型衬板, 球磨机衬板的结构和衬板高度是两个重要的影响因素, 衬板结构主要分为波形和条形, 不同的衬板结构会对球磨机中钢球和矿石的运动轨迹、有用功率和碰撞能量分布等造成一定的影响^[5]。衬板高度对钢球和矿石的提升作用有显著的影响, 衬板提升条可有效降低钢球在衬板表面的滑动, 改变钢

球的落回点和冲击角度, 使磨矿作用发生改变^[6]。

近年来, 离散元法凭借其优越的分析特性, 逐渐成为磨矿领域中不可或缺的研究方法, 为磨矿过程中块状颗粒的分析提供了必要的技术条件^[7-9], 被广泛应用于球磨机衬板改型及研究, 张谦^[6]使用离散元法分析提升条参数对载荷及钢球运动形态、磨机内部碰撞能量的影响规律, 以此确定半自磨机衬板的最佳参数。Hong S H 等^[10]对球磨机衬板提升条组数研究发现, 提升条具有防止滑动和加剧离心运动的作用, Hlungwani O 等^[11]利用离散元法研究了不同衬板形状下, 介质运动状态及其对球磨机磨矿性能的影响。刘建平^[12]对 $\Phi 10.37 \text{ m} \times 5.19 \text{ m}$ 半自磨机筒体衬板结构进行研究, 降低矿石和钢球冲击裸露衬板的概率, 衬板使用时间提高 30 d 以上。李占长等^[13]探索衬板参数对衬板使用情况的影响, 采用 66 块 3 圈(按高-平-高方式)替代全高波峰的布置方式, 提升条面角从 50°增加至 60°, 筒体衬板发生断裂时间由原来的 20 多天延长至 4 个

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(51964044); 云南省基础研究面上项目(202201AT070766); 云南省教育厅科学研究基金项目(2023J0125); 矿物加工科学与技术国家重点实验室矿冶过程自动控制技术国家重点实验室开放基金项目(BGRIMM-KZSKL-2022-01)(BGRIMM-KJSKL-2023-09)

作者简介: 李云啸(1998—), 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事碎磨理论与工艺, E-mail: 494345027@qq.com。

通信作者: 肖庆飞, 安徽宿松人, 博士, 教授, 主要从事碎磨理论与工艺, E-mail: 13515877@qq.com。

半月。唐新民等^[14]设计合适的筒体衬板结构,采用 160 mm 提升条代替原来 80 mm 提升条,磨机台时涨幅达 20% 以上。说明优化筒体衬板形状可降低钢球、物料对衬板的冲击作用,甚至提高产能,优化磨矿过程,这也为球磨机结构优化改型提供了方向和依据。

为降低磨矿成本,增加球磨机能量利用率,本文通过离散元法(DEM)对球磨机衬板结构及衬板高度进行研究,保证衬板其他参数不变,分析不同衬板结构和衬板高度时,球磨机内颗粒运动状态以及碰撞能量的分布,以此提高球磨机能量利用率,降低磨矿钢耗和成本。

1 实验

1.1 实验方法与原理

离散元法(Distinct Element Method, DEM)是一种处理非连续介质数值模拟问题的方法,可对球磨机内部钢球与矿石的运动情况进行可视化分析^[15]。该方法已被广泛用于研究各种颗粒系统,颗粒的运动用牛顿运动定律来描述。质点*i*的平动和转动运动的控制方程可以写成^[16]:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum (F_{ij}^n + F_{ij}^s + m_i g) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum (R_i \times F_{ij}^s + M_{ij}^r) \quad (2)$$

式中: v_i 和 ω_i 分别为颗粒的平动速度和角速度; m_i 和 I_i 分别为质量和转动惯量; g 是重力加速度; R_i 是一个从颗粒中心到它与颗粒*j*接触点的向量; F_{ij}^n 和 F_{ij}^s 分别为法向和切向接触力,由式(3)、式(4)可得:

$$F_{ij}^n = \left[\frac{2}{3} E \sqrt{R} \xi_n^{\frac{3}{2}} - r_n E \sqrt{R} \sqrt{\xi_n} (v_{ij} \cdot n_{ij}) \right] n_{ij} \quad (3)$$

$$F_{ij}^s = -\text{sgn}(\xi_s) \mu |F_{ij}^n| \left[1 - \left(1 - \frac{\min(\xi_s, \xi_{s, \max})}{\xi_{s, \max}} \right)^{3/2} \right] \quad (4)$$

式中: $E = Y/(1 - \sigma^2)$, Y 和 σ 分别为杨氏模量和泊松比; ξ_n 是颗粒*i*和*j*之间的重叠; n_{ij} 是颗粒*j*中心到颗粒*i*中心的单位矢量;对于单一尺寸的颗粒 $\bar{R} = R/2$; v_{ij} 是颗粒*i*和*j*接触时的相对速度; r_n 为与恢复系数 e 相关的法向阻尼常数; ξ_s 和 $\xi_{s, \max}$ 分别是颗粒在接触点的总切向位移和最大切向位移^[17]。式(2)中的 M_{ij}^r 是颗粒*j*作用在颗粒*i*上的滚动摩擦,由颗粒*j*作用在颗粒*i*上的滚动摩擦系数由 $-\min\{\mu_r |F_{ij}^n|, \mu_r |\omega_{ij}^n|\} \omega_{ij}^n$,表示,其中颗粒 μ_r 为滚动摩擦系数, ω_{ij}^n 为颗粒*i*和*j*在接触面上的相对角速度矢量, ω_{ij}^n 为 ω_{ij}^n 的单位矢量^[18]。

Cleary 等^[19]在模拟中采用碰撞能量损失,碰撞能量损失由颗粒间非弹性碰撞引起,可由式(5)计算得到:

$$E = E_n + E_s = \int_0^{t_{\text{contact}}} F_n d\xi_n + \int_0^{t_{\text{contact}}} F_s d\xi_s \quad (5)$$

式中: F_n 和 F_s 分别为颗粒间法向接触力和切向接触力;

t_{contact} 为碰撞过程的接触时间; E_n 和 E_s 分别为法向和切向碰撞能量损失; ξ_n 和 ξ_s 分别为法向和切向压缩位移。本文作者也通过碰撞能量损失描述碰撞能量。

1.2 模拟仿真试验设计

本文以 $\Phi 3.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 球磨机建立离散元仿真模型,球磨机工作参数见表 1。为降低模拟仿真时间,取该球磨机轴向厚度为 200 mm 的筒体代替整个球磨机来进行模拟仿真,在模型两端设置周期性边界条件,球磨机筒体模型见图 1,具体参数及材料参数见表 2。

表 1 $\Phi 3.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 球磨机工作参数
Table 1 Working parameters of $\Phi 3.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ ball mill

参数	Value
球磨机直径/m	3.6
球磨机参数/m	4.5
钢球充填率/%	41
最大钢球直径/mm	70
转速率/(r·min ⁻¹)	17.29

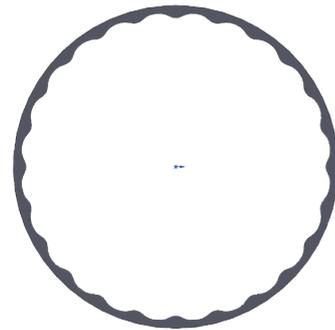


图 1 $\Phi 3.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 球磨机筒体模型图
Fig. 1 $\Phi 3.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ ball mill barrel model diagram

表 2 离散元模拟仿真参数
Table 2 Discrete element simulation parameters

参数	数值
矿石密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 250
钢球密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
矿石泊松比	0.16
钢球泊松比	0.30
矿石杨氏模量/Pa	2.07×10^{10}
钢球杨氏模量/Pa	7.00×10^{10}
恢复系数(矿石-矿石)	0.35
恢复系数(矿石-钢球)	0.40
恢复系数(钢球-钢球)	0.70
静摩擦系数(矿石-矿石)	0.68
静摩擦系数(矿石-钢球)	0.50
静摩擦系数(钢球-钢球)	0.25
滚动摩擦系数(矿石-矿石)	0.30
滚动摩擦系数(矿石-钢球)	0.05
滚动摩擦系数(钢球-钢球)	0.03

模型内钢球级配为 $m(\Phi 70 \text{ mm}) : m(\Phi 50 \text{ mm}) : m(\Phi 40 \text{ mm}) : m(\Phi 30 \text{ mm}) = 15 : 25 : 35 : 25$, 加入

Φ70 mm 钢球 368 个、50 mm 钢球 1 684 个、40 mm 钢球 4 603 个、30 mm 钢球 7 794 个、12 mm 的球形矿石模型 111 694 个,仿真时间 14.87 s。

球磨机衬板结构一般分为平滑型和不平滑型。平滑型衬板主要通过钢球的滑动产生的摩擦和剪切力带动颗粒发生磨矿作用,衬板表面受到较强的磨剥作用,但其对颗粒的提升作用较弱。波形衬板是一种常用的平滑型衬板;而不平滑衬板能够有效提升钢球与矿石,降低钢球在衬板表面的滑动,但衬板表面会受到较强的冲击作用^[20-21],不平滑型衬板常用长条形衬板。通过以下 4 种衬板(衬板高度均为 60 mm)探究不同衬板结构球磨机内的碰撞能量分布,衬板结构见图 2。探究了不同衬板高度(分别为 40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm)条件下球磨机内的碰撞能量分布。

2 结果与讨论

2.1 衬板结构数值模拟

2.1.1 颗粒运动状态分析

将磨机内颗粒按运动速度从快到慢分别用红色(7 m/s)和蓝色(0 m/s)渲染,时间均取磨机运转稳定后最后一圈任意时刻(13.80 s),4 种衬板球磨机内部颗

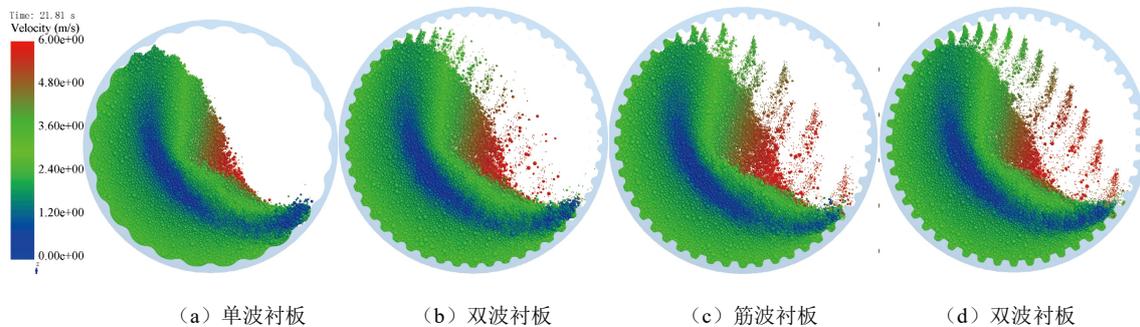


图 3 不同衬板结构球磨内部颗粒的运动状态
Fig. 3 Motion state of internal particles of ball mill of different liner structures

2.1.2 颗粒碰撞能量分析

磨机内介质携带的能量主要用于矿石的破碎、衬板和钢球的磨损^[22-24]。碰撞情况包括钢球-矿石、钢球-钢球、钢球-衬板、矿石-矿石和矿石-衬板。球磨机磨矿主要依靠钢球对矿石的冲击与研磨,矿石-矿石间的研磨也有少部分的磨矿作用,因此,以钢球-矿石和矿石-矿石的碰撞能量之和在磨机碰撞总能量中的占比表征能量利用率(计算碰撞能量利用率时并未考虑矿石-衬板的碰撞能量);钢球-钢球的碰撞和钢球-衬板的碰撞会增加钢球和衬板的磨损,对矿石磨矿有消极作用,应尽可能降低这部分能量的占比^[25-27]。

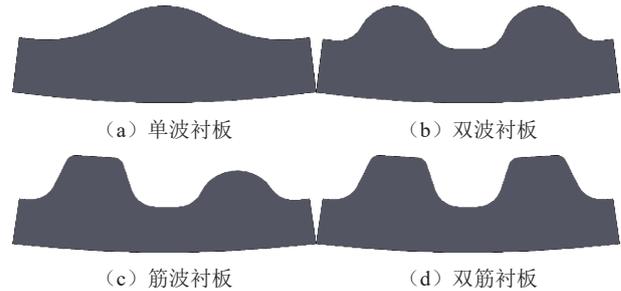


图 2 不同衬板结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of different liner structures

粒运动状态见图 3。由图 3 可知:(1)越靠近磨机内部的蓝色颗粒速度越小,此区域磨矿效果最差,应尽可能减少这种“肾形区”的存在;抛落式的钢球比泻落式的钢球运动速度快,携带了更多的能量,可在一定程度上增加矿石被破碎的概率。(2)单波衬板较平滑,钢球为泻落式,因此,高速运动的红色钢球数量最少,冲击效果最差,加之磨机内有大量的空白区域,此区域没有磨矿作用,磨矿效果自然较差。(3)筋波衬板和双筋衬板磨机内大量高速运动的红色钢球呈抛落式,磨机内的空白区域有所减少,有利于磨机有效容积的利用,但较多钢球冲击裸露的衬板,这部分能量会增加钢耗,属于有害能量。(4)双波衬板磨机内钢球呈抛落式,与单波衬板相比,高速运动的红色钢球数量增加,在保证冲击力的同时尽可能保护衬板,钢球运动状态合理,有利于改善磨机内部能量分布。

磨机内的碰撞总能量可以反映出颗粒在磨机内运动的剧烈程度,导出单波衬板、筋波衬板、双波衬板和双筋衬板在磨机内的碰撞总能量,分别为 184 722 J、210 964 J、210 992 J 和 226 499 J,图 4 为磨机稳定运行后最后一圈 3.47 s(11.40~14.87 s)的 4 种衬板磨机内不同类型的碰撞能量分布,将碰撞总能量与图 4 结合可知:(1)磨机内部钢球-钢球的碰撞能量占比最高,说明钢球与钢球之间的碰撞行为最剧烈,也说明磨机能量利用率确实较低;矿石-矿石的碰撞能量占比最低,矿石-矿石之间仅有微弱的研磨作用。(2)单波衬板碰撞总能量 184 722 J,在所有衬板中最低,但其钢球-钢球的碰撞能量占比在所有衬板中最高,为 57.70%,

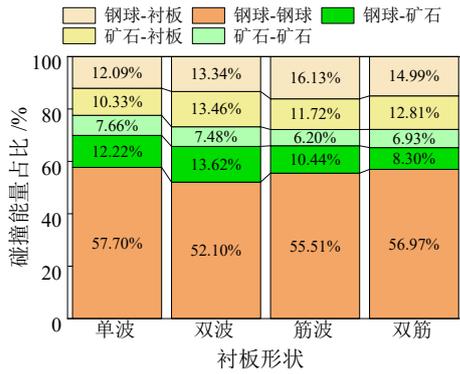


图 4 不同衬板结构下球磨机中碰撞能量分布
Fig. 4 Collision energy distribution in ball mill under different liner structures

会导致钢球钢耗偏高。(3) 双筋衬板和筋波衬板在球磨机内的碰撞总能量均较高,但其球磨机内钢球-衬板的碰撞能量占比高达 14.99% 和 16.13%,钢球-钢球的碰撞能量占比高达 56.97% 和 55.51%,而碰撞能量利用率仅有 15.23% 和 16.64%,双筋衬板和筋波衬板磨机内各类能量分布并不合理,碰撞总能量的提高反而加速了钢材的消耗。(4) 双波衬板碰撞总能量 210 992 J 并不是最高的,但其钢球-矿石的碰撞能量占比为 13.62%,在所有衬板结构中最高,而钢球-钢球和钢球-衬板的碰撞能量占比控制在较低的水平,其碰撞能量利用率为 21.10%,在所有衬板结构中最高,因此,双波衬板磨机内碰撞能量分布最合理。

球磨机内矿石的破碎主要是由碰撞引起的,碰撞能量大小和碰撞的频次决定了磨矿效果的好坏。对于特定的物料,只有当碰撞能量达到一个临界值 E_0 时,

破碎才会发生^[28]。能谱图是一种用于表征磨机内部碰撞环境的常规方法,钢球与矿石之间的碰撞会导致矿石破碎,因此碰撞能谱的变化与磨矿产品的变化有一定的关系,计算每次碰撞的能量损失,按照不同的碰撞能级进行分类,并统计每个能级的碰撞次数,最终构建出能量谱图^[29]。单波衬板、筋波衬板、双波衬板和双筋衬板磨机内不同钢球对矿石的碰撞能谱见图 5。由图 5 可知:(1) 钢球-矿石的碰撞能量分布在 $10^{-7} \sim 10$ J 之间,大部分碰撞能量分布在 $10^{-3} \sim 10^0$ J 量级范围内,碰撞能量在 $10^0 \sim 10$ J 量级分布较少且频次较低,说明磨机磨碎应以磨削为主。(2) 钢球-矿石的碰撞次数随着能量级和钢球直径呈规律性变化,钢球-矿石的碰撞能量次数随着碰撞能量级的增加而减少,同时也随着钢球直径的变小而增大,衬板的结构并没有显著改变不同尺寸钢球在磨机内的碰撞能级和碰撞次数。(3) 根据图 5 及矿石质量可计算出筋波衬板的单次碰撞最大比能耗最高,为 1 449 J/kg;单波衬板的单次碰撞最大比能耗最低,为 942 J/kg;双波衬板和双筋衬板单次碰撞最大比能耗分别为 1 398 J/kg 和 1 401 J/kg,双筋衬板和筋波衬板的单次碰撞最大比能耗较单波衬板和双波衬板高。

2.2 衬板高度仿真试验

2.2.1 颗粒运动状态分析

图 6 为双波衬板高度分别为 40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm 时球磨机内部颗粒运动状态图,由图 6

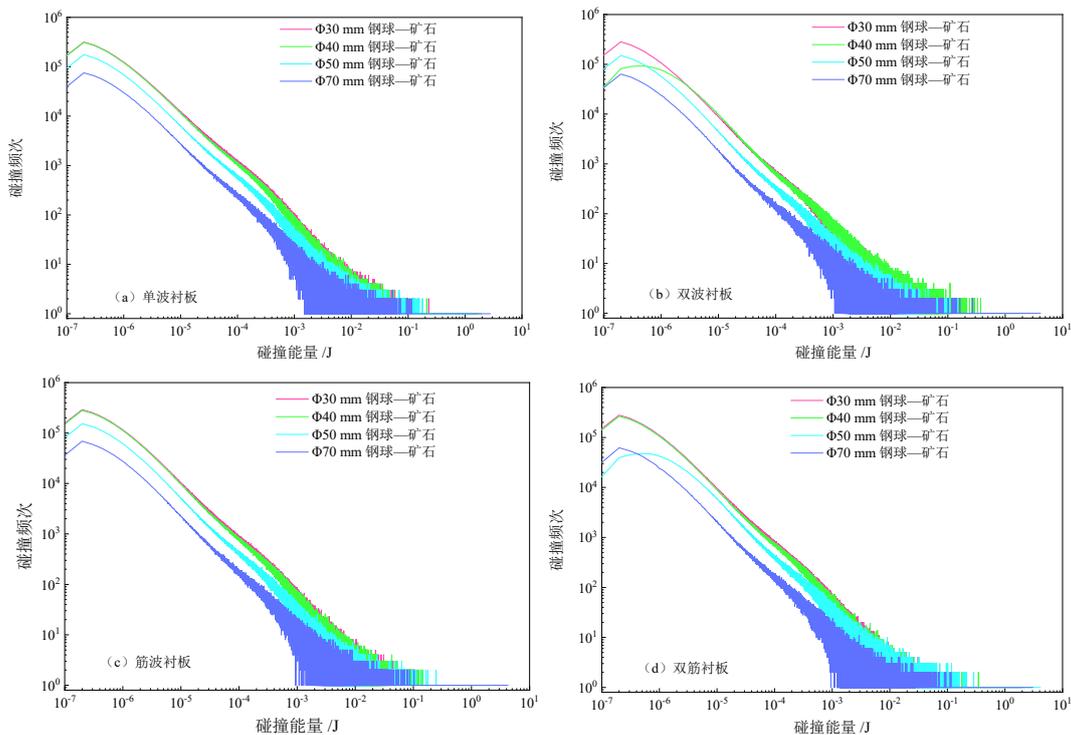


图 5 不同衬板结构磨机中钢球与矿石的碰撞能谱
Fig. 5 Collision energy spectrum of steel ball and ore in different liner structure mills

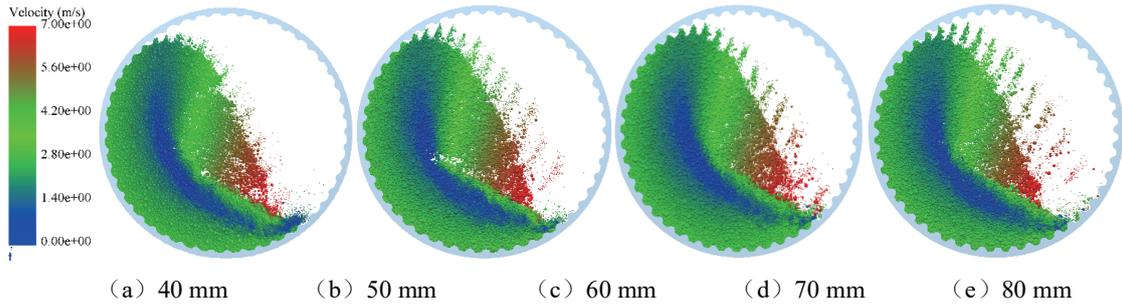


图 6 不同衬板高度时磨机内部颗粒的运动状态
 Fig. 6 The movement state of the particles inside the mill at different liner heights

可知: (1)随着衬板高度逐渐增加, 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)随着衬板高度逐渐增加, 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, 尤其是衬板高度达到 60 mm 后, 这种现象更加明显, 因此, 衬板高度增加可能会加剧衬板磨损。

2.2.2 颗粒碰撞能量分析

衬板高度 40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm 时磨机内的碰撞总能量分别为 185 179 J、192 688 J、210 993 J、215 309 J 和 231 654 J, 图 7 为不同衬板高度时磨机内不同尺寸钢球对矿石的碰撞能量分布, 由图 7 可知: (1)磨机内的碰撞总能量随着衬板高度升高而增大, 但能量利用率在衬板高度为 60 mm 时最高, 说明衬板高度并非越高越好。(2)钢球-衬板和矿石-衬

板的碰撞能量随着衬板高度升高而增大, 而矿石-矿石的碰撞能量却随着衬板高度升高而减小, 钢球-矿石的碰撞能量在衬板高度为 60 mm 时最高。

图 8 为不同衬板高度时球磨机内钢球-矿石的

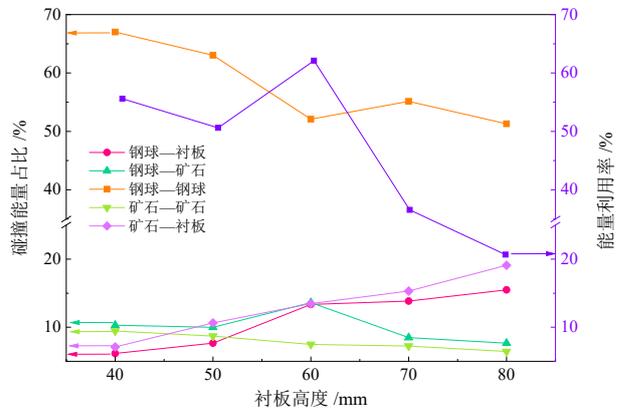


图 7 不同衬板高度碰撞能量分布
 Fig. 7 Collision energy distribution of different liner heights

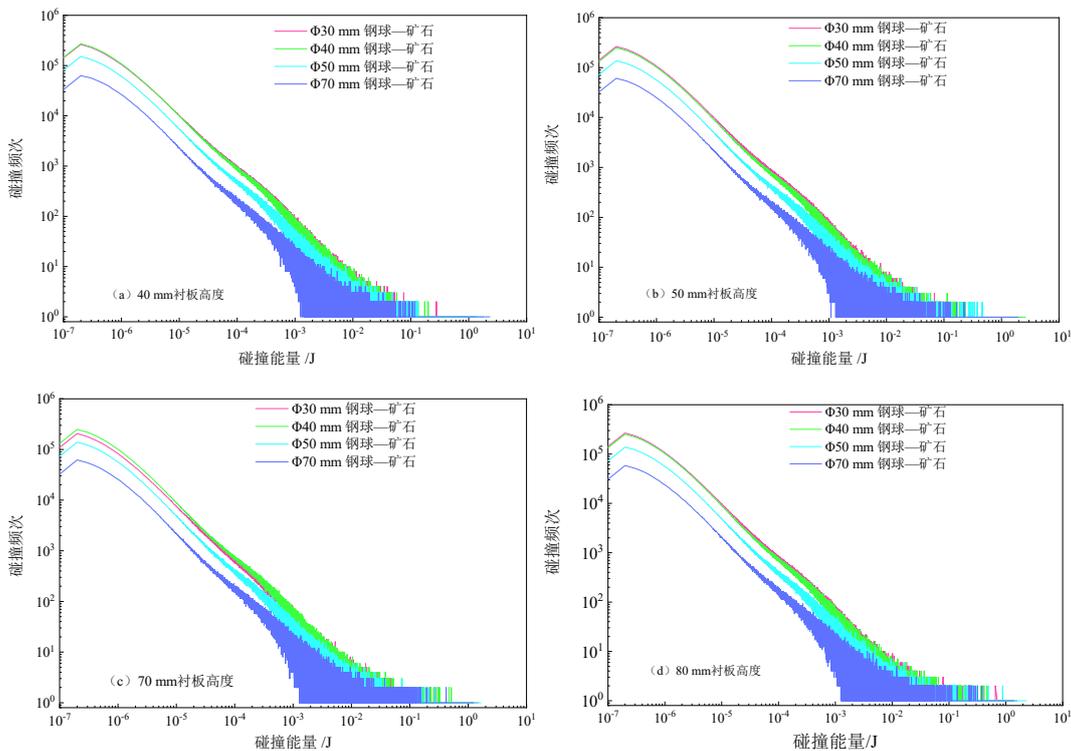


图 8 不同衬板高度时磨机中钢球与矿石的碰撞能谱
 Fig. 8 Collision energy spectrum of steel ball and ore in mill at different liner heights

碰撞能谱, 衬板高度 60 mm 见图 5(b), 由图 8 和矿石质量可计算出衬板高度 40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm 时单次碰撞最大比能耗分别为 789 J/kg、884 J/kg、1 401 J/kg、565 J/kg 和 786 J/kg, 这也说明过高的衬板并不会增大钢球对矿石的冲击力, 反而会加剧衬板的磨损。

3 结论

(1) 从颗粒运动状态来看, 不平滑型衬板的提升作用强于平滑型衬板, 即筋波衬板和双筋衬板提升作用强于单波衬板和双波衬板, 提升作用排序为: 双筋衬板>筋波衬板>双波衬板>单波衬板; 从碰撞能量分布来看, 对于不同结构的衬板, 磨机内的碰撞总能量随着提升作用的增强而增加, 钢球-衬板的碰撞能量占比也在增加, 但能量利用率在使用双波衬板时最高, 为 21.10%。碰撞总能量可以反映磨机内的颗粒的碰撞剧烈程度, 提高碰撞总能量的同时提高能量利用率势必可以增强磨矿效果。

(2) 从钢球运动状态来看, 随着衬板高度逐渐增加, 高速运动的红色钢球数量增多, 呈抛落式落回的钢球数量增多, 冲击裸露衬板的钢球数量也在增加, 会加快衬板的磨损; 从能量分布来看, 磨机内的碰撞总能量随着衬板高度的升高而增加, 钢球对衬板和矿石对衬板这类有害的碰撞能量也在增加, 能量利用率在衬板高度为 60 mm 时最高, 为 21.10%, 说明衬板高度在 60 mm 时最佳。

(3) 衬板结构和衬板高度对磨机内颗粒的运动状态和能量分布均有影响, 可通过选择适宜的衬板结构和衬板高度, 优化磨机的能量利用率, 改善磨矿环境, 降低钢耗和节约磨矿成本。

参考文献:

- [1] WANG M H, YANG R Y, YU A B. DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills[J]. *Powder Technology*, 2012, 223: 83-91.
- [2] 尹自信. 球磨机铁矿石颗粒破碎及粒度分布行为研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020: 1-5.
YIN Z X. Study of iron ore particle crushing and particle size distribution behavior in ball mill[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020: 1-5.
- [3] B DOMINIK, P PHILIPPE. A generic wear prediction procedure based on the discrete element method for ball mill liners in the cement industry[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 109: 55-79.
- [4] T PAUL, F JOCHEN, P MALCOLM, et al. Designing liners for performance not life[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 43-44: 22-28.
- [5] 赵亮, 王裕龙. 球磨机衬板形状对工作效率的影响分析[J]. *科技创新与应用*, 2017, 193(9): 126.
ZHAO L, WANG Y L. Analysis of the influence of ball mill liner shape on work efficiency[J]. *Science and Technology Innovation and Application*, 2017, 193(9): 126.
- [6] 张谦. 基于离散元法的喀拉通克 $\Phi 5.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 半自磨机筒体衬板形状优化及应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021: 20-22.
ZHANG Q. Optimization of cylinder liner shape of Karatunk $\Phi 5.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ semi-autogenous mill based on discrete element method and its application [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2021: 20-22.
- [7] P W CLEARY, R D MORRISON, D MATT. Prediction of slurry grinding due to media and coarse rock interactions in a 3D pilot SAG mill using a coupled DEM+SPH model[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 159: 1023-1036.
- [8] J I PEREIRA, P C MACHADO, J J PENAGOS, et al. Wear characterization from field and laboratory tests of pearlitic steels used for SAG mill liners[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 37-45.
- [9] P W CLEARY, O PHIL. 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.
- [10] S H HONG, B K KIM. Effects of lifter bars on the ball motion and aluminum foil milling in tumbler ball mill[J]. *Materials Letters*, 2002, 57(2): 275-279.
- [11] O HLUNGWANI, J RIKHOTSO, H DONG, et al. Further validation of DEM modeling of milling: effects of liner profile and mill speed[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16: 993-998.
- [12] 刘建平, 姬建钢, 陈松战, 等. 一种半自磨机筒体衬板的优化设计[J]. *矿山机械*, 2014, 42(10): 81-83.
LIU J P, JI J G, CHEN S Z, et al. Optimal design of cylinder liner of semi-automatic mill[J]. *Mining Machinery*, 2014, 42(10): 81-83.
- [13] 李占长, 黄雨, 付向上, 等. 大型半自磨机衬板的选材与制备[J]. *铸造技术*, 2019, 40(2): 143-146.
LI Z C, HUANG Y, FU X S, et al. Selection and preparation of liners for large semi-automatic mill[J]. *Casting Technology*, 2019, 40(2): 143-146.
- [14] 唐新民. 冬瓜山铜矿半自磨机筒体衬板和钢球的研究[J]. *化工矿物与加工*, 2013, 42(10): 20-25.
TANG X M. Study on cylinder liner and steel ball of semi-automatic mill in Dongguashan[J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2013, 42(10): 20-25.
- [15] 卢建坤. 基于离散单元法的大型球磨机介质运动分析及参数优化[D]. 洛阳: 河南科技大学机电工程学院, 2013: 49-55.
LU J K. Media motion analysis and parameter optimization of large ball mill based on discrete unit method [D]. Luoyang: College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, 2013: 49-55.
- [16] N V BRILLIANTOV, F SPAHN, J M. HERTZSH. Model for collisions in granular gases[J]. *Phys Rev E*, 1996: 53, 5382.
- [17] 钟文镇, 何克晶, 周照耀, 等. 粉末材料堆积的物理模型与仿真系统[J]. *物理学报*, 2009, 58(S1): 21-28.
ZHONG W Z, HE K J, ZHOU Z Y, et al. Physical model and simulation system for powder material stacking[J]. *Journal of Physics*, 2009, 58(S1): 21-28.
- [18] ZHU H P, YU A B. The effects of wall and rolling resistance on the couple stress of granular materials in vertical flow[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2003: 347-360.
- [19] P W CLEARY, R D MORRISON. Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24: 352-366.
- [20] 田秋娟. 基于离散元方法的大型球磨机工作性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 1-5.
TIAN Q J. Research on the working performance of large ball mill

- based on discrete element method [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 1–5.
- [21] P W CLEARY, D MORRISON. Comminution mechanisms, particle shape evolution and collision energy partitioning in tumbling mills[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 86: 75–95.
- [22] P W CLEARY, B MOTION. Axial segregation and power consumption in a full scale two chamber cement mill[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22: 809–820.
- [23] A SATO, J KANO, F SAITO. Analysis of abrasion mechanism of grinding media in a planetary mill with DEM simulation[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 21: 212–216.
- [24] PENG Y X, LI T Q, ZHU Z C, et al. Discrete element method simulations of load behavior with mono-sized iron ore particles in a ball mill[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(5): 1–10.
- [25] 李腾飞, 林蜀勇, 张博, 等. 不同转速率下球磨机内钢球的碰撞研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 251–256.
LI T F, LIN S Y, ZHANG B, et al. Study on the collision of steel balls in ball mills at different rotation rates[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(2): 251–256.
- [26] 张谦, 肖庆飞, 杨森, 等. 喀拉通克铜镍矿球磨机磨矿作业质量优化试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4): 100–105.
ZHANG Q, XIAO Q F, YANG S, et al. Experimental study on the quality optimization of ball mill grinding operation in Karatunk copper–nickel ore[J]. *Mineral Comprehensive Utilization*, 2020(4): 100–105.
- [27] 武煜凯, 肖庆飞, 高志勇. 多级配球降低半自磨中顽石积累及改善磨矿效果试验[J]. *稀有金属*, 2022, 46(5): 673–680.
WU Y K, XIAO Q F, GAO Z Y. Experiment on multi-stage ball distribution to reduce recalcitrant stone accumulation and improve grinding effect in semi-autogenous grinding[J]. *Rare Metals*, 2022, 46(5): 673–680.
- [28] MORRISON R D, SHI F, WHYTE R. Modelling of incremental rock breakage by impact–For use in DEM models[J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(3): 303–309.
- [29] CLEARY P W, ROB D, MORRISON R D, et al. Delaney. Incremental damage and particle size reduction in a pilot SAG mill: DEM breakage method extension and validation[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 128: 56–68.

Optimization of Barrel Liner Modification of Ball Mill Based on Discrete Element Method

LI Yunxiao^{1,2}, XIAO Qingfei^{1,2}, GUO Hongchen^{1,2}, LIU Xiangyang^{1,2,3}, ZHOU Qiang^{1,2,4}, WANG Xiaojiang^{1,2}

1. *Kunming University of Science and Technology. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Kunming 650093, China;*

2. *School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;*

3. *State Key; Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing 100070, China;*

4. *State Key Laboratory of Automatic Control Technology of Mining and Metallurgical Processes (Beijing), Beijing 100070, China*

Abstract: Aiming at the problems of low energy utilization rate and high grinding steel consumption in the ball mill, the motion state and collision energy distribution of steel balls under different liner structures and liner heights were analyzed based on discrete element method (DEM). The results showed that the structure and height of the liner significantly affected the motion state and energy distribution of particles in the mill. The effect of rough liners (rib liners and double rib liners) on load lifting was stronger than that of smooth liners (single wave liners and double wave liners), but leaving profound impact of steel balls on the liners in the ball mill of rough liners and increasing the wear. Among the smooth liners, the double wave liner had the most reasonable energy distribution, with the lowest 52.10% steel ball–steel ball collision energy, and the highest 21.10% energy utilization rate (the sum of the collision energy of steel ball–ore and ore–ore in the total collision energy of the mill). With the gradual increase of the liner height, the number of steel balls moving at high speed may increase, and the impact of a large number of steel balls on the exposed liner would accelerate the wear. The total collision energy in the mill increased with the expansion of liner height, with the incremental collision energy of steel ball–liner and ore–liner, bringing the highest 21.10% energy utilization rate at 60 mm liner height, indicating that the best liner height at 60 mm. Therefore, the selection of the appropriate liner structure and liner height could optimize the energy utilization of the mill, improve the grinding environment, reduce steel consumption and save grinding costs.

Keywords: ball mill; liner shape; liner height; collision energy distribution; DEM

引用格式: 李云啸, 肖庆飞, 国宏臣, 刘向阳, 周强, 王肖江. 基于离散元法的球磨机筒体衬板改型优化研究[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(4): 43–49.

LI Yunxiao, XIAO Qingfei, GUO Hongchen, LIU Xiangyang, ZHOU Qiang, WANG Xiaojiang. Optimization of barrel liner modification of ball mill based on discrete element method[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(4): 43–49.