

国家自然科学基金

云南某金矿半自磨钢球尺寸优化及离散元仿真模拟分析

谢浩松¹, 肖庆飞^{1,2}, 张志鹏¹, 任英东¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南昆明 650093;
2. 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

中图分类号: TD921¹.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0057-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.006

摘要 针对云南某金矿半自磨顽石(-80+25 mm)累积严重的问题,在分析矿石力学特性和给矿粒度组成的基础上,根据段氏球径半理论公式计算确定理论最佳钢球尺寸,以钢球尺寸为单一变量,进行实验室磨矿循环试验对比不同方案磨矿指标,并通过离散元仿真模拟分析进行验证。研究表明:该矿石平均普氏硬度较大,中等偏硬,同时存在脆性及韧性较大的矿石;在磨矿循环过程中推荐 Φ140 mm 方案的顽石累积趋势最小,4 次循环后,顽石产率最低,为 3.89%,较现场 Φ120 mm 方案降低 3.50 百分点,-2 mm 合格粒级及-0.074 mm 粒级产率最高,分别较现场 Φ120 mm 方案提高 8.40 和 3.15 百分点。推荐 Φ140 mm 方案较现场 Φ120 mm 方案顽石颗粒运动状态更活跃,碰撞能量分布更合理,介质对顽石单次碰撞比能耗及高能碰撞频次更高。从磨矿试验和离散元模拟仿真试验验证了推荐 Φ140 mm 方案半自磨降低顽石累积的有效性。

关键词 金矿;磨矿;半自磨;顽石累积;钢球尺寸;离散元

引言

半自磨机作为一种新兴磨矿设备,省掉了传统磨矿流程中的中细碎作业,简化了生产流程,设备投资成本更低,单机处理能力大幅提高,设备管理和维修成本更低,也更易于操作^[1-2]。半自磨机利用筒体衬板凹凸状的提升条带动磨介和物料一同做切向运动,根据磨机内部运动轨迹可分为抛落区、空白区、研磨区和肾型区。起磨矿作用的主要为抛落区和研磨区。抛落区介质与物料自最高点自由落体式下落,对衬板和物料产生巨大冲击作用,此区域以冲击破碎为主,在研磨区的介质与物料随筒体转动,内外层物料速度差导致介质与物料之间产生挤压及颗粒剪切破碎,产生研磨作用^[3-6]。Cleary 等^[7-9]认为半自磨机对矿石颗粒的破碎存在 5 种机制:一次冲击破碎,由多次能量较小的冲击造成增量破碎,矿石颗粒之间或颗粒与衬板之间相对滑动导致矿石表面的研磨和磨损,由于滑动接触产生的块状颗粒的角和边产生质量较大的磨损,由不规则颗粒棱角或边缘产生小规模体积断裂,并提出了一种基于离散元的实现累积损伤的方法,验证了

多次能量冲击造成累积损伤是半自磨机实现破碎的关键机制^[8]。半自磨机主要依靠大块矿石和少量钢球(一般充填率为 8%~16%)作为研磨介质,在合理的充填率下,使大块矿石和钢球抛落对矿石进行冲击破碎^[10]。颗粒间的非弹性碰撞引起碰撞能量损失,其计算方式如下^[11]:

$$E_n + E_s = \int_0^{t_{\text{contact}}} F_n d\zeta_n + \int_0^{t_{\text{contact}}} F_s d\zeta_s \quad (1)$$

式中: F_n 和 F_s 分别为颗粒间法向接触力和切向接触力, N; t_{contact} 为碰撞过程的接触时间, s; E_n 和 E_s 分别为法向和切向碰撞能量损失, J; ζ_n 和 ζ_s 分别为法向和切向压缩位移, mm。

大型半自磨机设计在国内磨机行业的发展并不成熟,仅仅依据“比例放大”原则会使磨机在作业时产生较大偏差,造成磨矿作用不佳。因而对大型半自磨机来说,不能根据小型试验磨机的测试结果直接分析,试验磨机的磨矿性能并不能完全反映大型磨机的磨矿性能。离散单元法是一种计算粒子运动和碰撞的数值方法。离散元法(DEM)已成为一种被广泛认可的有效解决粒状和不连续材料工程问题的方法。特别是在流体力学、岩石力学和粉碎等领域,本质上,

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(51964044); 云南省地方高校(部分)联合专项(2018FH001-051); 云南省教育厅基金(2019J0738)

作者简介: 谢浩松(1995—),男,四川巴中人,硕士研究生,主要从事碎磨理论与工艺的研究, E-mail: 805978814@qq.com。

通信作者: 肖庆飞(1980—),男,云南昆明人,博士,教授,主要从事碎磨理论与工艺的研究, E-mail: 13515877@qq.com。

DEM 是通过求解牛顿运动方程来重新求解质点运动, 并使用接触定律来求解颗粒间的运动和接触力^[12]。通过离散单元法 (DEM), 可以模拟介质的复杂运动, 研究磨机的碰撞能量、功率消耗以及衬板磨损等问题, 能够有效地对磨机的磨矿性能进行预测^[13]。Cleary 等^[18]提出了一种基于 DEM 预测矿石颗粒破碎粒度分布的方法, 该方法中母颗粒在碰撞和剪切作用下超过弹性阈值会累计损伤, 使颗粒断裂能减小, 当输入能量超过断裂能就会产生破碎, 生成子颗粒。Weerasekara 等^[14]在 EDEM 仿真模拟试验中通过改变磨机尺寸和给矿粒度, 发现给矿粒度特性对磨机功率和碰撞能量分布有着很大影响, 当磨机直径在 1.6~3 m 时, 系统对小于 11 mm 的矿石的碰撞能更高, 当磨机直径增大到 6 m 时, 大于 43 mm 的矿石承受的碰撞能量更高, 当磨机直径为 3 m 时粒级在 11~13 mm 的矿石承受的碰撞能量达到峰值。曲迪等人^[15]通过 EDEM 软件模拟现场工业半自磨机在不同充填率和临界转速下运转情况, 对比分析颗粒在不同条件下的运动状态、混合度以及冲击能在筒体衬板的分布情况, 结果表明: 转速对颗粒运动状态影响很明显, 随着转速提高, 抛落区域面积增大, 更多的颗粒直接砸击衬板, 而填充率影响相对较小, 仅泻落区面积有较明显增加。Rodriguez 等^[16]通过 DEM 研究不同操作变量对磨机内物料混合度的影响, 结果发现, 平均球径和矿石颗粒尺寸的相对差距对偏析程度的影响最大, 而差距越小混合越均匀。

云南某金矿磨矿工段采用半自磨和球磨组成的 SAB 磨矿工艺流程, 即原矿进入到半自磨机进行第一段磨矿, 半自磨排矿经 10 mm 圆筒筛, 筛上产品返回到原矿仓, 筛下产品进入到旋流器进行分级, 沉砂进入球磨机进行二段磨矿, 球磨排矿进入旋流器进行再次分级, 旋流器溢流的物料作为浮选作业的给矿, 磨矿分级工业流程如图 1 所示。选厂半自磨最先使用 $\Phi 150$ mm 钢球, 但钢球对衬板冲击作用剧烈, 衬板磨损严重, 钢球单耗偏高, 后生产现场半自磨改用 $\Phi 120$ mm 钢球, 但目前半自磨皮带返回顽石量 20%, 略大于正常的 15%~20% 水平; 处理量不稳定, 离处理量 6 000 t/d 的设计要求有一定差距, 结合矿石力学性质判断是由于半自磨钢球球荷不精确导致破碎力不足, 而造成半自磨排矿顽石量(-80+25 mm 粒级含量)偏高, 合格粒级(-2 mm)含量偏低。在此背景下, 本文以半自磨机钢球尺寸为研究对象, 为提高半自磨处理能力, 得到顽石处理能力更强, 排矿粒度更合理的钢球尺寸方案, 对半自磨给矿进行了力学性质试验, 基于段氏球径半理论公式确定半自磨最佳钢球尺寸, 研究半自磨不同钢球尺寸的磨矿效果, 进行实验室磨矿循环试验对比不同钢球尺寸磨矿效果, 借助 EDEM 离散元仿真模拟试验研究不同钢球尺寸下磨机内部颗粒运动状态、颗粒动能分布。

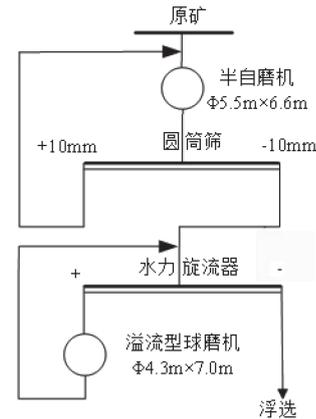


图 1 磨矿分级流程
Fig. 1 Flow diagram of grinding and classification process

1 实验室试验

1.1 物理力学性质试验

力学性质试验取材于该金矿各采矿点, 取 5 个具有代表性的形状较规则大块矿石, 进行单轴抗压强度的力学性质试验和密度试验, 分别测出该种矿石的单轴抗压强度、泊松比、静弹性模量及密度, 得出该矿石的各类物理力学性质的平均值见表 1。

表 1 矿石的力学性质测定结果
Table 1 The determination of mechanical properties of ores

矿块编号	1	2	3	4	5	平均值
密度/(g·cm ⁻³)	3.69	4.45	3.43	3.56	4.17	3.86
单轴抗压强度 $\sigma_{\text{单}}$ /MPa	148.00	94.70	81.93	83.17	73.80	96.32
静弹性模量 $E/10^4$ MPa	9.03	12.60	7.45	10.80	2.33	8.44
泊松比 μ	0.21	0.24	0.24	0.38	0.26	0.27

根据矿石物理力学性质测定结果可以得出: (1) 矿石的平均比重较大, 易沉积于磨矿分级循环中难以排出, 如未及时排出合格粒级易产生过粉碎现象; (2) 矿石的平均普氏硬度系数(普氏硬度系数 $f=\sigma_{\text{单}}/10$) 较大, 但软硬分布不均匀, 整体属于中等偏硬矿石; (3) 弹性模量平均值为 8.44×10^4 MPa, 矿石脆性较大, 平均泊松比为 0.27, 矿石整体韧性也偏大, 此类矿石外力作用下不易发生形变, 需综合考虑冲击破碎作用和磨剥作用以提高磨矿效果^[17]。

1.2 磨矿对比试验

首先, 在测定矿石力学性质的基础上通过理论计算确定合理的钢球尺寸。常见最大钢球尺寸计算经验公式包括 Fred C. Bond(邦德)公式、Rowland(Allis-Chalmers)公式和 Azzaroni 公式, 以上公式的计算均需要测量矿石的邦德功指数, 一些国家和地区并不采用邦德法测量矿石的功指数体系^[2], 因此, 段希祥运用破

碎力学原理和戴维斯钢球运动理论推导出了球径半理论公式^[1]:

$$D_b = K_c \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_e D_0}} d \quad (2)$$

式中: D_b —特定给矿粒度 d 所需的精确球径, cm; K_c —综合经验修正系数; ψ —磨机转速率, %; $\sigma_{\text{压}}$ —矿石单轴抗压强度, N/m²; ρ_e —钢球在矿浆中有效密度, g/cm³; D_0 —磨机“中间缩聚层”直径, cm; d —磨机给矿 95% 过筛粒度, cm。

根据经验公式, 其中颗粒直径 d 取顽石(-80+25 mm 粒级)的 95% 过筛粒度, 为 73.73 mm, 半自磨给矿粒度组成见表 2; 球磨机转速率 Ψ 取 76%, $\sigma_{\text{压}}$ 取平均抗压强度 9.632×10^6 N/m², 介质密度 ρ 取 7800 kg/m³, 磨机中间缩聚层直径为 5.0 m, 计算得精确钢球尺寸为 142.41 mm, 按生产规格取 140 mm。

表 2 半自磨给矿粒度组成

Table 2 Particle size of ore feed in semi-autogenous grinding mill

级别/mm	产率/%	筛上累积产率/%	筛下累积产率/%
+200	0.87	0.87	100
200~150	17.33	18.2	99.13
150~120	11.39	29.59	81.8
150~100	6.32	35.91	70.41
100~80	4.2	40.11	64.09
80~45	6.2	46.31	59.89
45~35	2.6	48.91	53.69
35~25	5.81	54.72	51.09
-25	45.28	100	45.28
总计	100		

我们制定出不同钢球方案进行磨矿对比试验, 包括 $\Phi 140$ mm 钢球方案、 $\Phi 130$ mm 钢球方案、 $m(\Phi 140 \text{ mm}) : m(\Phi 120 \text{ mm}) = 1 : 3$ 钢球方案和现场的 $\Phi 120$ mm 钢球方案。

磨矿对比试验在 $D \times L 450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 实验室球磨机进行, 为保证对比试验的可靠性, 其他磨矿参数均也与现场保持一致, 其中: 钢球和矿石的混合充填率为 30%, 而钢球充填率和矿石充填率分别为 13% 和 17% 左右, 不同钢球方案下装入钢球及矿石量见表 3。另外, 实验室磨矿试验为不连续磨矿, 为模拟生产现场半自磨连续磨矿, 预测半自磨顽石累积的情况, 磨矿试验采取磨矿循环对比试验: 磨矿循环时间设置为 120 min, 每次循环磨矿结束均筛出 -2 mm 合格粒级, 下次循环磨矿之前将半自磨给矿按上次循环减少量补充, 以此连续进行 4 次循环磨矿, 每次循环结束对磨矿产品进行全粒级筛分综合对比各钢球方案磨矿循环产品粒度分布, 确定最佳钢球级配方案。

表 3 磨矿对比试验方案

Table 3 Scheme of grinding comparison test

钢球方案	平均 尺寸/mm	钢球 个数	钢球 质量/kg	矿石 质量/kg
$\Phi 140$ mm	140	3	33.62	43.96
$\Phi 130$ mm	130	4	35.89	46.93
$m(\Phi 140 \text{ mm}) : m(\Phi 120 \text{ mm}) = 1 : 3$	125	1:3	32.38	42.34
$\Phi 120$ mm	120	5	35.29	46.15

1.3 4 种钢球级配方案磨矿效果综合比较

本试验通过实验室不连续的循环磨矿模拟现场连续磨矿, 通过 4 次循环中 -80+25 mm 顽石介质产率、-2 mm 合格粒级产率及 -20.074 mm 粒级产率等综合磨矿指标的变化趋势预测生产现场半自磨不同钢球级配方案的磨矿效果。

1.3.1 半自磨磨矿循环产品 -80+25 mm 顽石产率

在半自磨工业生产中, 通常将 2~100 mm 的矿石称为顽石^[2], 由于半自磨介质固有的破碎机理导致对该粒级的矿石破碎能力差, 生产中应尽量减少该粒级矿石产率。根据对该金矿生产现场考察, 本研究确定顽石介质粒度范围为 -80+25 mm, 磨矿循环试验中 -80+25 mm 顽石产率见图 2。半自磨给矿 -80+25 mm 顽石产率占 14.61%, 比例偏高, 易形成顽石累积。在 4 种钢球方案的磨矿循环对比试验中, 总体来看, $\Phi 140$ mm 方案的 -80+25 mm 顽石产率最低, 而 $\Phi 120$ mm 现场方案的 -80+25 mm 顽石产率最高, 第 4 次磨矿循环后, $\Phi 140$ mm 方案磨矿循环产品的顽石产率较 $\Phi 120$ mm 现场方案降低 3.50 百分点, 表明 $\Phi 140$ mm 方案对顽石的冲击破碎能力更强, 消除顽石积累的效果优于 $\Phi 120$ mm 现场方案。由于实验室磨机直径小, 受提升高度限制, 冲击力相对不足, 在不连续的循环磨矿中, 难以保证顽石产率的稳定, 而工业磨机直径大, 提升高度较高, 冲击力很大, 而且通过顽石破碎流程可实

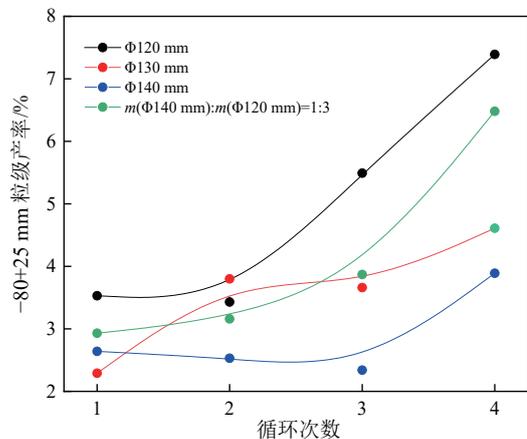


图 2 4 次磨矿循环试验顽石 (-80+25 mm) 产率

Fig. 2 The yield of hard rock (-80+25 mm) in products with four grinding cycles

现顽石累积水平的稳定。因此我们可以通过实验室磨机不连续的批次磨矿过程顽石产率升高的幅度判断各种钢球方案在工业磨机中对顽石破碎的效果。

1.3.2 半自磨磨矿循环产品-2 mm 合格粒级产率

半自磨排矿 95% 过筛的最大粒度为 3.63 mm, 证实了矿石脆性较大, 此类矿石在冲击破碎作用下的磨矿效果较好, 而 $\Phi 140$ mm 方案的钢球尺寸相对较大, 其冲击破碎作用于相对其他钢球方案更强, 通过提高顽石破碎概率, -2 mm 合格粒级自然也会有所提高。在 4 次循环磨矿试验中, $\Phi 140$ mm 方案的 -2 mm 合格粒级产率均最高, 通过从图 3 可以看出, 第 4 次磨矿循环后, $\Phi 140$ mm 方案的磨矿产品 -2 mm 合格粒级产率为 51.45%, 较 $\Phi 120$ mm 方案提高 8.40 百分点, 而 -2 mm 合格粒级产率的提高有利于提高半自磨处理量。

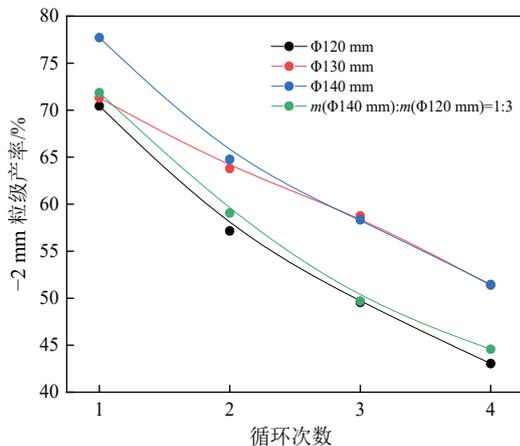


图 3 4 次磨矿循环试验合格粒级 (-2 mm) 产率
Fig. 3 The yield of qualified particle size (-2 mm) in products with four grinding cycles

1.3.3 半自磨 4 次循环试验后磨矿指标综合比较

通过实验室不连续磨矿循环试验模拟生产现场连续磨矿, 可以通过对比四种钢球方案第 4 次循环试验后磨矿产品的 -80+25 mm 顽石产率、-2 mm 合格粒级产率以及 -0.074 mm 粒级产率 (见图 4) 等指标综合判断磨矿效果的优劣。从图 5 可知, 对比四种钢球方案, 在 4 次磨矿循环后, $\Phi 140$ mm 方案磨矿产品的 -80+25 mm 顽石产率最低, 较 $\Phi 120$ mm 方案降低 3.50 个百分点; -2 mm 合格粒级和 -0.074 mm 粒级产率最高, 分别较 $\Phi 120$ mm 方案提高 8.40 和 3.15 个百分点。因此可以预测 $\Phi 140$ mm 方案在该选厂半自磨工业应用的磨矿效果最佳。

2 离散元仿真模拟试验

为进一步验证半自磨推荐 $\Phi 140$ mm 钢球方案相较于现场 $\Phi 120$ mm 方案在破碎顽石和提高磨矿效果的优势, 以该矿山 $\Phi 5.5 \text{ m} \times 6.6 \text{ m}$ 大型半自磨机为参照,

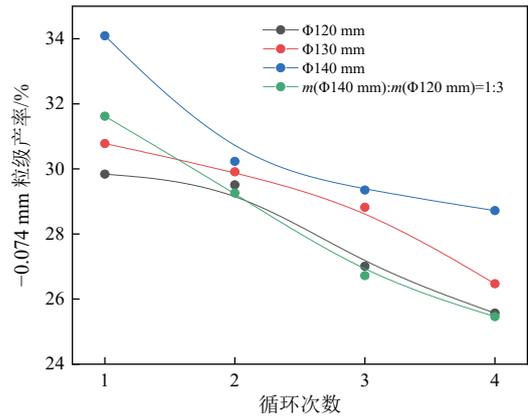


图 4 4 次磨矿循环试验 -0.074 mm 粒级产率
Fig. 4 The yield of -0.074 mm particle size in products with four grinding cycles

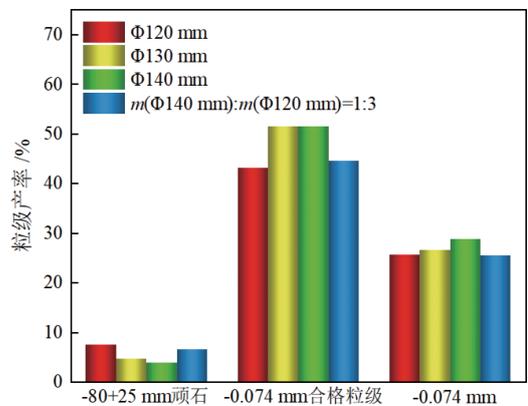


图 5 4 次磨矿循环后磨矿产品综合比较
Fig. 5 Comprehensive comparison of grinding product after four grinding cycles

建立离散元法仿真模型, 并以推荐 $\Phi 140$ mm 钢球方案和现场 $\Phi 120$ mm 方案分别进行半自磨模拟仿真对比试验。

2.1 半自磨机衬板模型建立

为降低模拟仿真时间成本, 且保证计算精度, 对 $\Phi 5.5 \text{ m} \times 6.6 \text{ m}$ 半自磨机筒体衬板模型进行简化设计, 该模型将磨机筒体抽象为具有钢材质的圆柱体, 筒体内壁附有衬板, 选取筒体中间具有代表性的 0.30 m 长度, 矿石充填率 17%, 介质充填率 13%。为更接近实际生产情况, 提高模拟仿真试验精度, 首先在 Solidworks 软件中建立半自磨机筒体衬板的物理模型, 再导入 EDEM 离散元软件中进行研究, 本文 Solidworks 软件绘制现场应用衬板导入 EDEM 的仿真模型及参数如图 6 所示。

2.2 离散元颗粒模型的建立

离散元颗粒模型中钢球用球体表示, 见图 7, 为模型简化, 矿石颗粒为更接近矿山矿石情况用不规则形状几何体表示, 见图 8。本次模拟所需用的半自磨介质颗粒尺寸分别为 140 mm、120 mm 钢球, 矿石颗粒

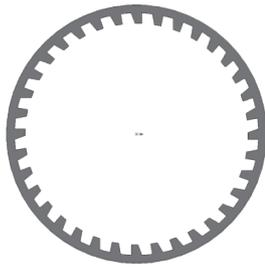


图 6 半自磨机筒体模型
Fig. 6 Cylinder model of semi-autogenous grinding mill

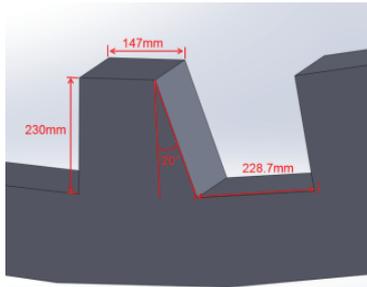


图 7 筒体衬板几何尺寸
Fig. 7 The geometry of cylinder liner



图 8 矿石颗粒模型
Fig. 8 Ore particle model

粒度为 200 mm、150 mm、120 mm、100 mm、80 mm、45 mm、35 mm 和 25 mm。其中将-25 mm 以下粒级全部折算到 25 mm 粒级中, 在保证计算准确性的基础上, 可有效降低服务器计算成本^[18]。模拟方案颗粒参数见表 4。

表 4 离散元颗粒模型个数
Table 4 Number of particle model in discrete element simulation

颗粒	质量比例/%	个数
200 mm 矿石	18.20	13
150 mm 矿石	11.39	54
120 mm 矿石	6.32	96
100 mm 矿石	4.20	122
80 mm 矿石	6.20	257
45 mm 矿石	2.60	876
35 mm 矿石	5.81	10 889
25 mm 矿石	45.28	113 043
现场方案 (Φ120 mm)	100.00	477
推荐方案 (Φ140 mm)	100.00	295

2.3 离散元仿真模型参数标定

本次仿真试验研究模拟选厂的半自磨机生产条件, 包括衬板结构参数, 半自磨机混合填充率为 30% (钢球填充率 13%, 矿石填充率 17%) 进行模拟, 探究半自磨机磨矿性能的差异, 从而为半自磨钢球尺寸的选用提供优化方案, 提高选厂半自磨磨矿效率。EDEM 仿真的过程中磨矿介质之间、矿石颗粒之间、磨矿介质与矿石之间、磨矿介质与筒体之间、矿石与筒体之间的相关参数对仿真结果至关重要。本次半自磨模拟仿真试验的碰撞模型中基本模型选择赫兹-明德林 (无滑移) 模型 (Hertz-Mindlin(no slip)), 摩擦模型选择标准滚动摩擦模型 (Standard Rolling Friction)。离散元仿真研究中涉及到的接触参数见表 5。

表 5 离散元仿真接触参数
Table 5 Contact parameters in discrete element simulation

颗粒模型	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
钢球-钢球	0.70	0.25	0.03
钢球-矿石	0.40	0.50	0.05
矿石-矿石	0.35	0.68	0.30

2.4 仿真试验结果分析

2.4.1 矿石颗粒运动状态

在离散元模拟仿真试验中, 当半自磨机运转达到稳定状态后, 两种钢球方案下磨机内部颗粒均呈现瀑布式抛落状态, 矿石的磨碎作用也以冲击作用为主, 符合半自磨磨矿机理^[19]。

从图 9 和图 10 中可以看出, 在不同钢球方案下, 颗粒载荷的运动状态呈现明显不同的变化, 用不同颜色代表颗粒运动速度, 红色区域运动速度最大, 而蓝色区域运动速度最小, 可以看出两种钢球方案下均在抛落区接近冲击点的位置颗粒运动速度最大, 破碎行为也最剧烈, 这部分也被称为“趾脚区”; 而在载荷内部有一块月牙形蓝色区域, 速度非常小, 该区域磨矿作用较弱, 也通常被称之为“肾型蠕动区”^[20]。对

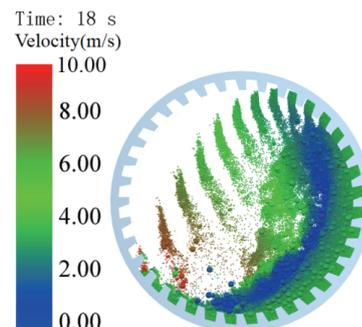


图 9 Φ120 mm 方案颗粒运动状态
Fig. 9 Motion state of particle in Φ120 mm scheme

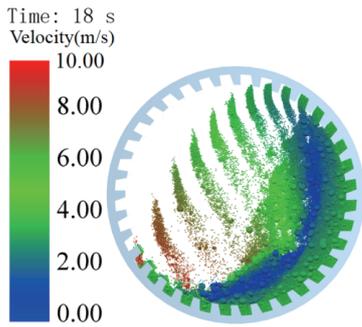


图 10 Φ140 mm 方案颗粒运动状态
Fig. 10 Motion state of Particle in Φ140 mm scheme

比可以看出,两种钢球方案的抛落区域均比较大,但Φ120 mm 方案的钢球重力较小,载荷对钢球提升作用较大,因此,钢球出现在抛落区域更多,对衬板的冲击磨损作用更大,且相较于Φ120 mm 方案,Φ140 mm 方案的“肾型蠕动区”面积更小,说明该区域颗粒活跃状态更好,其泻落区面积也更大,对矿石颗粒的摩擦和剪切作用也更强。另外,通过图 11 和图 12 对比两种方案在抛落区的顽石(80 mm、45 mm 和 35 mm)个数发现:Φ120 mm 方案位于抛落区的顽石个数为 1 087,而Φ140 mm 方案在抛落区的顽石个数为 1 153,较Φ120 mm 方案提高 6.07%,对顽石的冲击破碎作用更强,验证了半自磨机推荐Φ140 mm 方案较现场Φ120 mm 方案对于降低顽石积累的效果更好。

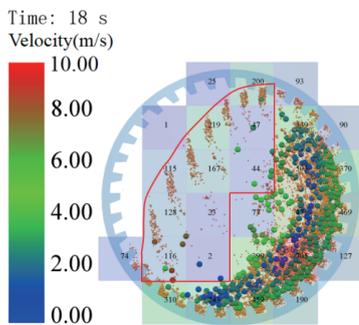


图 11 Φ120 mm 方案抛落区顽石个数
Fig. 11 Number of hard rock in the dropping area of Φ120 mm scheme

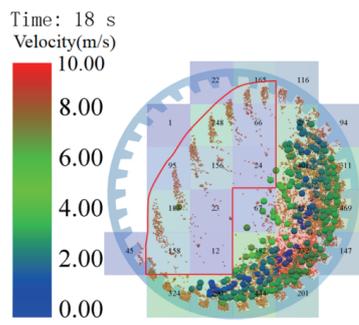


图 12 Φ140 mm 方案抛落区顽石个数
Fig. 12 Number of hard rock in the dropping area of Φ140 mm scheme

2.4.2 颗粒动能分布

本研究是在离散单元法的基础上对半自磨机的能耗进行分析计算,磨机筒体带动介质与矿石转动,并将能量传递到介质和矿石颗粒,颗粒间相互碰撞产生能量损失,因此必须通过提高作用于顽石破碎的碰撞能量利用率来优化磨矿效果。

经统计Φ120 mm 方案和Φ140 mm 方案分别在 10.6 s 和 11.2 s 以后颗粒总能量趋于稳定。取磨机运行稳定阶段的其中一个转动周期(14.60~18.97 s)的颗粒碰撞能量进行统计,半自磨机中大量颗粒随时发生碰撞并产生能量传递和损失,单次碰撞能量值太小并不会产生实际磨矿效果,这部分能量对钢球和衬板的磨损作用可以忽略不计,因此,我们只统计单次碰撞能量≥0.01 J 的数据,两种钢球方案下各种碰撞类型的能量分布数据及分布比例分别见表 6 和图 13。

表 6 半自磨机中不同类型碰撞能量分布
Table 6 Energy distribution of different collision types in semi-autogenous mill

钢球方案	总能量/J	对钢球/J	对矿石/J	对衬板/J
Φ120 mm	625 830.46	125 364.80	598 198.00	197 037.21
Φ140 mm	606 109.90	92 641.99	585 131.95	188 377.13

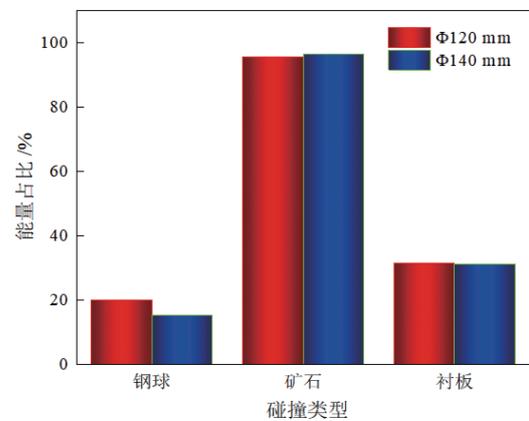


图 13 半自磨机中不同类型碰撞能量分布
Fig. 13 Energy distribution of different collision types in semi-autogenous mill

从表 6 和图 13 中碰撞能量分布情况可知:Φ140 mm 方案在运转过程中对钢球碰撞总能量为 92 641.99 J,占比为 15.28%,较Φ120 mm 方案降低 4.75 个百分点,可以判断这主要是由于 120 mm 钢球质量更小,相同转速率下,在抛落区分布更多,碰撞活动更加频繁和剧烈,且钢球直径偏小,其研磨面积更大,对钢球的磨损也较大,实际磨矿过程中球耗也会更高;Φ140 mm 方案对矿石碰撞总能量为 585 131.95 J,占比为 96.54%,仍较Φ120 mm 方案提高 0.96 百分点,其有效碰撞能量占比更高;Φ140 mm 方案下对衬板碰撞总能量为 188 377.13 J,较Φ120 mm 方案降低 8 660.08 J,能量占

比为 31.48%, 较 $\Phi 120$ mm 方案降低 0.30 百分点, 由于 $\Phi 120$ mm 方案下磨机内抛落区会有大量钢球直接砸到裸露的筒体衬板上, 会造成衬板磨损速度更快。因而, 从能量分布情况来看, 相较于 $\Phi 120$ mm 方案, $\Phi 140$ mm 方案的能量分布更加合理。

半自磨机主要以给矿中+100 mm 大块矿石和较少的钢球作为磨矿介质来破碎其他物料, 该工艺可降低钢耗并减少铁质进入磨矿产品, 因此本研究统计介质对顽石的累积碰撞能量包含了+100 mm 大块矿石与钢球两类介质对顽石的碰撞。对比两种钢球方案下介质与顽石碰撞累积能量分布, 如图 14 和图 15 所示。从对能量利用率的角度看, $\Phi 140$ mm 方案下介质与顽石碰撞累积能量为 23 532.91 J, 较 $\Phi 120$ mm 方案提高 4 838.65 J, $\Phi 140$ mm 方案下介质与顽石碰撞累积能量占碰撞总能量的 3.88%, 也较 $\Phi 120$ mm 方案提高 0.89 百分点, 说明 $\Phi 140$ mm 钢球方案相较于 $\Phi 120$ mm 方案能提供更多的能量作用于顽石破碎, 提高了碰撞能量利用率, 能够更有效地对顽石进行冲击和研磨以提高顽石破碎概率。

从表 7 中介质对顽石的碰撞比能耗的统计数据来看, $\Phi 140$ mm 方案下介质对 80 mm、45 mm 和 35 mm

三种粒级的顽石碰撞比能耗最大值均明显高于 $\Phi 120$ mm 方案, 对顽石的冲击和磨剥作用效果也会更强, 而 $\Phi 120$ mm 方案下介质对顽石的碰撞比能耗相对较小, 顽石破碎能力相对更弱, 实际上, 矿石粒度越小, 所需破碎能量更低, 而单位质量矿石所需断裂能越高, 这也导致矿石越细越难磨^[21], 因此, 顽石粒度越小, 达到破碎条件需要更高的比能耗。

表 7 两种钢球方案下顽石碰撞比能耗对比
Table 7 Comparison of specific energy consumption of stubborn stone collision in two steel ball schemes

统计数据	单次最大比能耗/(J·kg ⁻¹)			≥10 J/kg比能耗频次		
	80 mm	45 mm	30 mm	80 mm	45 mm	30 mm
$\Phi 120$ mm	55.07	77.94	225.73	61	301	1 791
$\Phi 140$ mm	71.26	88.50	254.74	65	186	2 465

通过统计介质对三种粒级顽石≥10 J/kg 比能耗频次发现: 整体来看, $\Phi 140$ mm 方案下介质对顽石碰撞比能耗≥10 J/kg 的次数为 2 716 次, 较 $\Phi 120$ mm 方案提高 563 次, 因此, $\Phi 140$ mm 方案下, 介质可以持续对顽石产生更高频次的高能有效碰撞, 并大幅提高对顽石颗粒的破碎概率。

3 结论

以云南某金矿半自磨机钢球尺寸为研究对象, 通过力学性质试验、实验室磨矿循环对比试验、以及 EDEM 离散元模拟仿真验证试验的结果对比分析, 得出半自磨机不同钢球尺寸对于改善顽石累积现象的不同效果, 有如下结论:

(1) 通过力学性质试验测定结果判断: 该金矿平均普氏硬度较大, 中等偏硬, 兼有脆性和韧性较大的矿石存在, 生产现场半自磨机现使用的钢球尺寸偏小, 本研究在测得力学性质和给矿粒度组成的基础上, 根据段式球径半理论公式算得半自磨最佳钢球尺寸为 140 mm。

(2) 实验室磨矿循环对比试验的 4 次磨矿循环中, 推荐 $\Phi 140$ mm 方案顽石累积趋势最小, 4 次循环后, 推荐方案 $\Phi 140$ mm 顽石产率最低, 较现场 $\Phi 120$ mm 方案降低 3.50 百分点; 在 4 次循环后, 推荐方案 $\Phi 140$ mm 的 -2 mm 合格粒级及 -0.074 mm 粒级产率均最高, 分别较现场 $\Phi 120$ mm 方案提高 8.40、3.15 百分点。

(3) 通过对推荐 $\Phi 140$ mm 方案和现场 $\Phi 120$ mm 方案进行半自磨 EDEM 模拟仿真对比试验, 从颗粒运动状态和碰撞能量利用率的角度验证了推荐 $\Phi 140$ mm 方案的合理性。推荐 $\Phi 140$ mm 方案下抛落区顽石个数较现场 $\Phi 120$ mm 方案提高 6.07%, 抛落区钢球砸击衬板的情况更少; 推荐 $\Phi 140$ mm 方案下对钢球和衬板碰撞总能量更小, 对矿石碰撞总能量更大, 对顽石碰撞能量占比也更高, 分布更合理; 推荐 $\Phi 140$ mm 方案

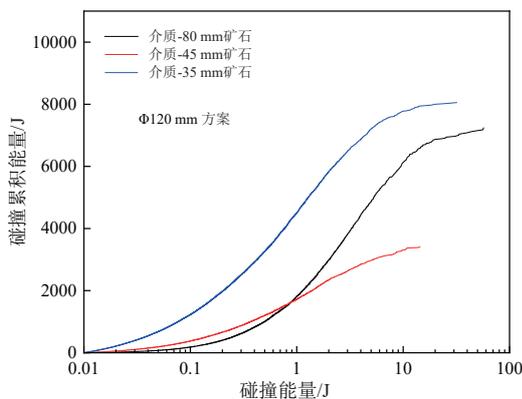


图 14 $\Phi 120$ mm 方案介质与顽石碰撞累积能量分布
Fig. 14 Cumulative energy distribution of collision between media and rock in $\Phi 120$ mm scheme

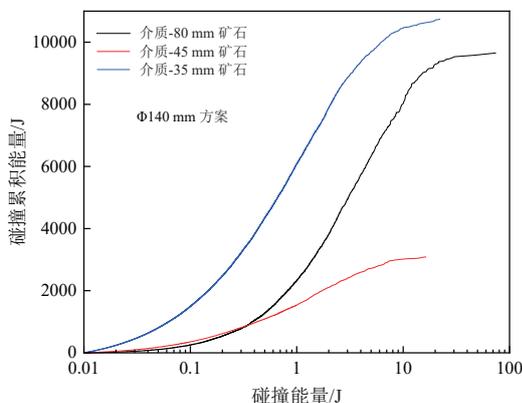


图 15 $\Phi 140$ mm 方案介质与顽石碰撞累积能量分布
Fig. 15 Cumulative energy distribution of collision between media and rock in $\Phi 140$ mm scheme

下介质对三种粒级的顽石单次碰撞比能耗均更高, 介质对顽石的高能有效碰撞频次更高。

参考文献:

- [1] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
DUAN X X, XIAO Q F. Ore crushing and grinding [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.8.
- [2] 黄治国, 方启学, 任翔, 等. 全自磨半自磨磨矿技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
HUANG Z G, FANG Q X, REN X et al. Full autogenous grinding and semi-autogenous grinding technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [3] 宗路, 李旭, 蔡改贫, 等. 基于响应曲面法的半自磨机磨矿能耗研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(4): 18-21+53.
ZONG L, LI X, CAI G P, et al. Study on energy consumption of semi-autogenous mill grinding based on response surface method[J]. Chemical Minerals and Processing, 2018, 47(4): 18-21+53.
- [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.
YIN Z X. Study of iron ore particle crushing and particle size distribution behavior in ball mill[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [5] 赵元, 马华庆, 赵永志. 研磨介质形状对球磨机特性影响的DEM模拟研究[J]. 矿山机械, 2020, 48(5): 38-45.
ZHAO Y, MA H Q, ZHAO Y Z. DEM simulation study on the effect of grinding media shape on ball mill characteristics[J]. Mining Machinery, 2020, 48(5): 38-45.
- [6] YU X P, XU N, ZHEN C Z, et al. Friction and wear of liner and grinding ball in iron ore ball mill[J]. Tribology International, 2017, 115: 506-517.
- [7] CLEARY P W, DELANEY G W, SINNOTT M D, et al. Inclusion of incremental damage breakage of particles and slurry rheology into a particle scale multiphase model of a SAG mill[J]. Minerals Engineering, 2018, 128: 92-105.
- [8] CLEARY P W, MORRISON R D, DELANEY G W. Incremental damage and particle size reduction in a pilot SAG mill: DEM breakage method extension and validation[J]. Minerals Engineering, 2018, 128: 56-68.
- [9] CLEARY P W, MORRISON R D. Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM[J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 352-366.
- [10] 乔文存, 姬建钢, 董节功, 等. 半自磨流程的优化措施研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(7): 91-96.
QIAO W C, JI J G, DONG J G, et al. Research on optimization measures of semi-autogenous grinding process[J]. Mining & Processing Machinery, 2014, 42(7): 91-96.
- [11] 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.
- [12] WEERASEKARA N S, POWELL M S, CLEARY P W, et al. The contribution of DEM to the science of comminution[J]. Powder Technology, 2013, 248: 3-24.
- [13] 付开进. 大型半自磨机磨矿性能仿真及参数优化[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
FU K J. Grinding performance simulation and parameter optimization of large semi-self-grinding mill [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] WEERASEKARA N S, LIU L X, POWELL M S. Estimating energy in grinding using DEM modelling[J]. Minerals Engineering, 2016, 85: 23-33.
- [15] 曲迪, 刘万华, 杨玉巍, 等. 基于离散元的半自磨机运行参数研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(2): 96-99.
QU D, LIU W H, YANG Y W, et al. Research on operation parameters of semi-autogenous mill based on discrete element[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(2): 96-99.
- [16] RODRIGUEZ V A, CARVALHO R M D, TAVARES L M. Insights into advanced ball mill modelling through discrete element simulations, Minerals Engineering, 2018, 127: 48-60.
- [17] 张谦, 肖庆飞, 王旭东, 等. 改善新疆某铜镍矿半自磨机顽石积累[J]. 过程工程学报, 2020, 20(9): 1089-1096.
ZHANG Q, XIAO Q F, WANG X D, et al. Improvement of refractory rock accumulation in a semi-autocycle mill in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(9): 1089-1096.
- [18] 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. Experimental study on reducing the accumulation of refractory stones in semi-autogenous grinding and improving the grinding effect[J]. Rare Metals, 2022, 46(5): 673-680.
- [19] 王肖江. 基于离散元法的武山铜矿半自磨介质优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
WANG X J. Research on medium optimization of semi-autogenous grinding in Wushan opper mine based on discrete element method [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [20] 王俊. 基于离散单元法的半自磨机工作性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.
WANG J. Research on performance of semi-autogenous mill based on discrete element method [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.
- [21] 何智文. 黄金选矿厂湿式半自磨机磨矿效率提升方法分析与实施[D]. 济南: 山东大学, 2018.
HE Z W. Analysis and implementation of grinding efficiency improvement method of wet semi-autogenous mill in gold concentrator [D]. Jinan: Shandong University, 2018.

Optimization of Steel Ball Size and Discrete Element Simulation Analysis of a Semi-autogenous Grinding Gold Mine in Yunnan

XIE Haosong¹, XIAO Qingfei^{1,2}, ZHANG Zhipeng¹, REN Yingdong¹

1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Ministry of Provincial Affairs, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: To address the problem of the serious accumulation of hard rock (-80+25 mm) in semi-autogenous grinding mill of a gold mine in Yunnan, The theoretical optimum size of steel ball was calculated by Duan's semi-theoretical formula of ball diameter which was based on the determination of mechanical properties and particle size of ore feed. The grinding cycle test was carried out with the steel ball size as a single variable, and grinding effect was verified by discrete element simulation analysis. The results showed that the average platts hardness of the ore is relatively large, which is medium to hard, and there are relatively large brittleness and toughness at the same time. The recommended $\Phi 140$ mm scheme had the lowest tendency to accumulate hard rock during the grinding cycle test. After 4 cycles, the hard rock yield was the lowest at 3.89%, 3.50 percentage points lower than the on-site $\Phi 120$ mm scheme, while the -2 mm pass grade and -0.074 mm grade yield were the highest, 8.40 and 3.15 percentage points higher than the on-site $\Phi 120$ mm scheme respectively. The recommended $\Phi 140$ mm scheme was more active than the on-site $\Phi 120$ mm scheme in terms of hard rock particle motion, more reasonable collision energy distribution, and higher energy consumption and frequency of high-energy collision for single collision of hard rock by the media. The effectiveness of the recommended $\Phi 140$ mm scheme for semi-autogenous grinding to reduce hard rock accumulation was verified from grinding tests and discrete element simulation tests.

Keywords: gold ore; grinding; semi-autogenous grinding; hard rock accumulation; steel ball size; discrete element method

引用格式: 谢浩松, 肖庆飞, 张志鹏, 任英东. 云南某金矿半自磨钢球尺寸优化及离散元仿真模拟分析[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 57-65.

XIE Haosong, XIAO Qingfei, ZHANG Zhipeng, REN Yingdong. Optimization of steel ball size and discrete element simulation analysis of a semi-autogenous grinding gold mine in yunnan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 57-65.