

基于磨矿动力学与离散元分析的磨矿介质优化实验研究

肖庆飞¹, 孙博远¹, 金赛珍^{1,3}, 武煜凯², 王梦涛¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628;
3. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室, 北京 102628

中图分类号: TD453 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)01-0028-11
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.08.019

摘要 采用磨矿动力学与离散元法(DEM)模拟仿真分别研究了钢球与钢段作为磨矿介质对多粒级矿石破碎效果及能量利用率的影响,并以此为基础在大红山铁矿三选厂细磨作业开展了工业实验研究。实验结果表明:与钢段相比,钢球作为磨矿介质时,对粗粒级破碎速率更大,磨矿产品中+0.15 mm 含量降低了 0.98 百分点,-0.074 mm 含量提高了 5.66 百分点;DEM 模拟仿真分析发现钢球的运动状态较钢段更为活跃,钢球方案中用于矿石破碎能量的占比为 65.41%,钢段方案为 61.29%,钢球方案用于矿石破碎的能量占比较钢段方案高 4.12 百分点,钢球方案用于破碎矿石的有效能量利用率更高;将钢球作为磨矿介质用于大红山铁矿三选厂后,旋流器溢流-0.074 mm 含量由 74.00% 增加至 81.71%,提升了 7.71 百分点,单位钢耗由 0.63 kg/t 降为 0.57 kg/t,降低了 9.52%,单位电耗从 11.46 kW·h/t 降至 10.13 kW·h/t,下降了 11.61%。通过磨矿动力学得出钢球、钢段级配方案,并通过 DEM 软件模拟仿真验证了钢球方案的磨矿效果要优于钢段,工业实验验证了模拟仿真结果的可靠性。

关键词 磨矿动力学;离散元仿真;磨矿介质;大红山铁矿;钢球;钢段

引言

磨矿作业是选矿厂中极其重要的工序,决定着选矿厂的生产能力^[1],且磨矿产品的粒度特性影响着选别指标^[2]。磨矿作业广泛应用于选矿、冶金、化工、电力等行业,选矿行业中的磨矿作业能耗占选厂能耗的 50% 以上^[3],全球约 2% 的电能消耗于选矿厂的磨矿作业^[4]。

磨矿作业的影响因素较多,如原矿性质、磨矿浓度、转速、充填率、磨矿介质制度等^[5-6],但事实上,大多数选矿厂仅通过调整介质制度来优化磨矿^[7-8]。目前,国内外磨矿介质制度优化主要分为磨矿介质形状和尺寸两个方面^[9-11]。汪聪等人^[12]通过钢球、钢段两种介质对黄铜矿和黄铁矿进行磨矿,结果表明,钢段可以提高黄铜矿和黄铁矿的浮选回收率,促进铜硫浮选分离。王旭东等人^[13]对大坪选厂的一段格子型球磨机的不同尺寸介质配比进行优化,将磨矿产品-0.074 mm 产率提高了 5.39 百分点。Dilek 等人^[14]研究了研磨介质形状对硬硼酸钙破碎参数的影响,结果

表明,与球体介质相比,在相同的实验条件下使用圆柱体研磨介质得到相同破碎参数的破碎速率更大。

磨矿动力学方程是评估磨矿质量的重要方法。通过磨矿动力学可描述磨矿速率和磨矿时间之间的关系,一些学者对磨矿动力学进行了研究。Kalumba 等人^[15]采用球形、立方体、半橄榄球形以及这三种介质的混合介质进行磨矿动力学实验,研究发现,在特定的磨矿环境中,不同形状研磨介质的混合会增加破碎率,但是,球形仍然是最有效的研磨介质。于建文等人^[16]根据磨矿动力学和线性叠加原理确定了球磨机研磨介质配比的方法。

DEM 模拟仿真技术对磨矿介质制度的理论和实践研究起到积极的推动作用。DEM 软件可对运行磨机中颗粒之间,以及颗粒与衬板之间的单次碰撞能量进行统计,且通过 DEM 软件中的后处理部分可清晰地显示出颗粒在磨机中的运动状态^[17]。通过模拟仿真过程中收集的数据可对不同磨矿介质制度下的磨矿效果进行定量分析,可为提高磨机磨矿效率提供一条有效途径。

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374269);矿冶过程智能优化制造全国重点实验室开放基金(BGRIMM-KZSKL-2023-2);院青年科技创新基金项目(04-2335)

作者简介: 肖庆飞(1980—),男,安徽宿松人,博士,教授,从事碎磨理论研究, E-mail: 13515877@qq.com。

通信作者: 王梦涛(1994—),男,河南汝南人,博士,讲师,主要从事碎磨理论与难处理矿产资源综合利用研究, E-mail: Wang_mt@foxmail.com。

本文针对大红山铁矿三选厂 SAB 磨矿流程中存在的磨矿细度不够、一次新生合格粒级含量偏低、分级质效率偏低的突出问题。通过磨矿动力学实验得出不同粒级所对应的最佳介质尺寸, 根据最佳尺寸与矿石不同粒级的含量得出介质级配。基于离散元法模拟分析不同介质下矿石-矿石、介质-矿石、介质-介质、介质-衬板、矿石-衬板的碰撞能量, 对比采用钢球与钢段介质的磨矿效果。最后通过工业实验验证模拟仿真结果的可靠性。

1 实验样品及研究方法

1.1 实验矿样

实验矿样取自云南玉溪大红山铁矿三选厂, 该选厂采用 SAB 磨矿流程, 由 1 台 $\Phi 8.53\text{ m}\times 4.27\text{ m}$ 半自磨、1 台 $\Phi 5.5\text{ m}\times 8.5\text{ m}$ 球磨机和 2 组 $\Phi 660\text{ mm}$ 旋流器组成。对磨矿分级系统中旋流器溢流、给矿、沉砂以及球磨机排矿分别进行取样、筛分。用 200 目标标准筛进行湿筛, 筛上产品用振筛机振筛, 并对筛下产品混合均匀后缩分出 50 g 进行水析, 粒度分析结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 该球磨机磨碎粗粒级 (+0.15 mm) 矿石与一次性新生成-0.074 mm 含量的能力均偏低, 磨机给矿中+0.15 mm 粒级与-0.074 mm 粒级矿物含量分别为 33.68%、35.68%, 磨矿产品中+0.15 mm 粒级与-0.074 mm 粒级占比分别为 23.35%、48.53%, 则磨碎粗级别矿石的能力为 30.67%, 一次性新生成-0.074 mm 含量仅为 12.85%。旋流器溢流-0.074 mm 级别含量为 75.35%, 以-0.074 mm 产率计算分级量效率为 40.07%, 分级质效率为 29.25%, 分级效率偏低, 返砂比为 208.72%。

1.2 研究方法

1.2.1 磨矿实验

磨矿实验包括磨矿动力学实验和全粒级磨矿实验。磨矿动力学实验在实验室 XMQ-锥形球磨机中进行, 矿样取自 $\Phi 660\text{ mm}$ 旋流器沉砂, 磨机规格 $D\times L$ (D 为磨机直径, L 为磨机长度) 为 $250\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, 介质充填率 30%, 矿样 0.50 kg, 介质 7.14 kg, 磨矿浓度 78%。根据球径半理论公式^[18] 计算结果可知最大钢球

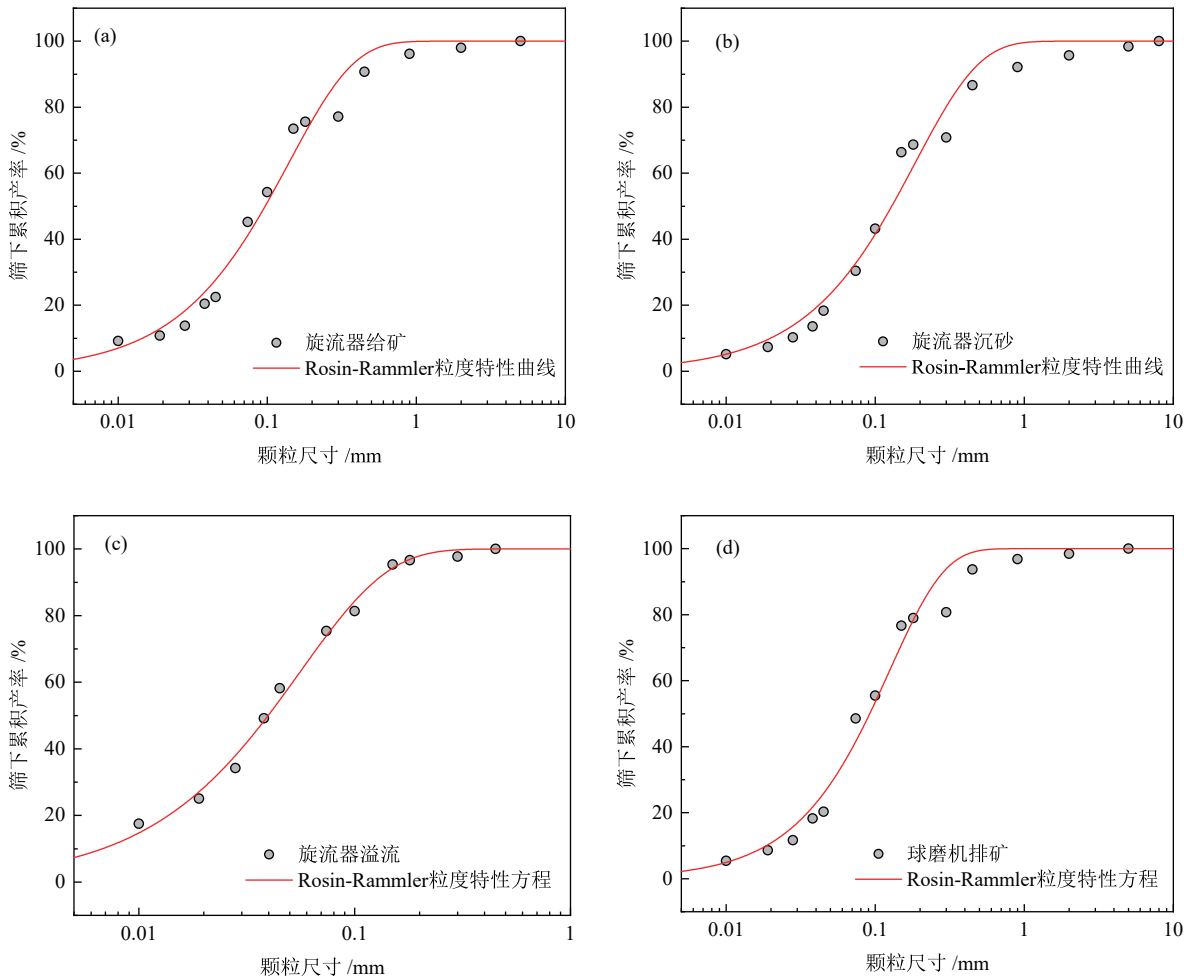


图 1 粒度特性曲线(a—旋流器给矿; b—旋流器沉砂; c—旋流器溢流; d—球磨机排矿)
Fig. 1 Particle size characteristic curve (a—cyclone feeding; b—cyclone sedimentation; c—cyclone overflow; d—ball mill discharge)

尺寸 $D_0=48.70$ mm, 取整为 50 mm, 因此, 设置钢球尺寸为 $\Phi 50$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 20$ mm, 设置钢段尺寸 $D \times L$ (D 为钢段直径, L 为钢段长度) 为 45 mm $\times$ 50 mm、 35 mm $\times$ 40 mm、 30 mm $\times$ 35 mm、 20 mm $\times$ 25 mm。对给矿中的不同单一粒级 $+5$ mm、 $-5+2$ mm、 $-2+0.9$ mm、 $-0.9+0.45$ mm、 $-0.45+0.3$ mm、 $-0.3+0.18$ mm、 $-0.18+0.15$ mm 进行湿式分批磨矿实验, 磨矿时间分别为 0.5 min、 1.0 min、 1.5 min 和 2.0 min。

根据磨矿动力学实验结果, 在 $D \times L$ 240 mm $\times$ 300 mm 实验室球磨机中进行全粒级磨矿实验, 对比钢球方案和钢段方案差异, 实验矿样为 $\Phi 660$ mm 旋流器沉砂, 磨矿介质按 30% 充填率计算为 19 kg, 每份矿样 1.5 kg, 磨矿质量浓度为 78%, 以选厂磨矿细度 75%~80% 为磨矿终点, 考察分析钢球与钢段对磨矿行为的影响。

1.2.2 离散元仿真

由于模拟仿真实际磨机尺寸计算量十分庞大, 为提高模拟仿真效率, 以大红山选厂 $\Phi 5.5$ m $\times$ 8.4 m 球磨机筒体衬板结构为基础, 设计 $\Phi 900$ mm $\times$ 300 mm 的磨机模型进行模拟实验, 其结构如图 2 所示。设置钢球尺寸为 $\Phi 50$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 20$ mm, 设置钢段尺寸 $D \times L$ 为 45 mm $\times$ 50 mm、 35 mm $\times$ 40 mm、 30 mm $\times$ 35 mm、 20 mm $\times$ 25 mm, 矿石颗粒为 5 mm 球形颗粒, 球磨机充填率 30%, 转速率设置为 75%。采用 DEM 软件进行数值模拟, 接触模型选择 Hertz-Mindlin (no slip) 模型, 表 1 为模拟中使用的材料参数, 表 2 为模拟中材料间的接触参数。

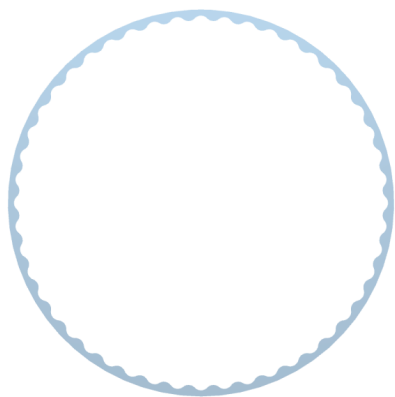


图 2 球磨机筒体结构模型
Fig. 2 Mill cylinder structure model

1.2.3 工业实验

在大红山铁矿三选厂铜系列开展磨矿介质优化工业实验研究, 为了更好地对比磨矿效果, 将工业实验分为实验前数据收集、介质替换和生产稳定期三个阶段, 重点监控选厂磨矿细度、钢球单耗和单位电耗三个指标。

表 1 DEM 模拟中使用的材料参数

Table 1 Material parameters used in the DEM simulations

名称	钢球	矿石
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800	3 100
泊松比	0.3	0.38
剪切模量/Pa	7.00×10^{10}	4.60×10^{10}

表 2 离散元仿真接触参数

Table 2 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-钢 (钢球、衬板)	0.7	0.4	0.01
矿石-钢 (钢球、衬板)	0.5	0.5	0.01
矿石-矿石	0.3	0.8	0.01

2 结果与讨论

2.1 磨矿介质对磨矿效果的影响

2.1.1 不同磨矿介质下磨矿动力学分析

磨矿动力学是描述被磨物料的磨碎速率与磨矿时间之间关系规律的一种模型, 对分析物料在磨矿过程中的粒级及能量变化具有重要作用。用钢球尺寸为 $\Phi 50$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 20$ mm, 钢段尺寸 $D \times L$ 为 45 mm $\times$ 50 mm、 35 mm $\times$ 40 mm、 30 mm $\times$ 35 mm、 20 mm $\times$ 25 mm 作为磨矿介质分别对不同粒级矿石样品进行磨矿动力学实验, 根据公式 (1) 对得出的数据进行一阶磨矿动力学方程拟合^[9], 其中 $m_1(t)$ 为 t 时刻最粗粒级的产率, 得到不同介质对不同粒级矿石样品的破碎速率 S_i , 结果如图 3~图 6 所示。

$$\ln[m_1(t)/m_0(0)] = -S_i t \quad (1)$$

由图 3 所示, 在短时间钢球研磨过程中, 矿石破碎行为均符合一阶磨矿动力学方程^[9], 每条直线的斜率代表该粒级的破碎速率 S_i , 当 $t=0$ 时, 各粒级矿石的拟合直线延长至纵坐标不通过零点, 即 $\ln[m_1(t)/m_0(0)] \neq 0$, 分析原因可能是筛分误差导致。将特定尺寸钢球下不同单粒级矿石的磨矿速率实验结果代入磨矿动力学方程中, 不同尺寸钢球下对特定给矿粒度破碎速率的影响如图 4 所示。

由图 4 可知, $\Phi 50$ mm 钢球在对 $-5+2$ mm 粒级矿石时破碎速率达到最大 0.76 min^{-1} 。小于 $-5+2$ mm 粒级, 钢球对矿石的破碎速率随着给矿尺寸的增大逐渐增大, 这是由于随着矿石尺寸的增加, 其裂纹和裂缝越多, 在力的作用下, 大矿块存在的裂纹及裂缝会优先扩展而发生宏观断裂, 即其机械强度降低幅度较大; 而随着矿石粒度的减小, 裂纹及裂缝减少, 矿石形状趋近于球形, 机械强度增大; 大于 $-5+2$ mm 粒级, 钢球对矿石的破碎速率随着给矿尺寸的增大而逐渐减

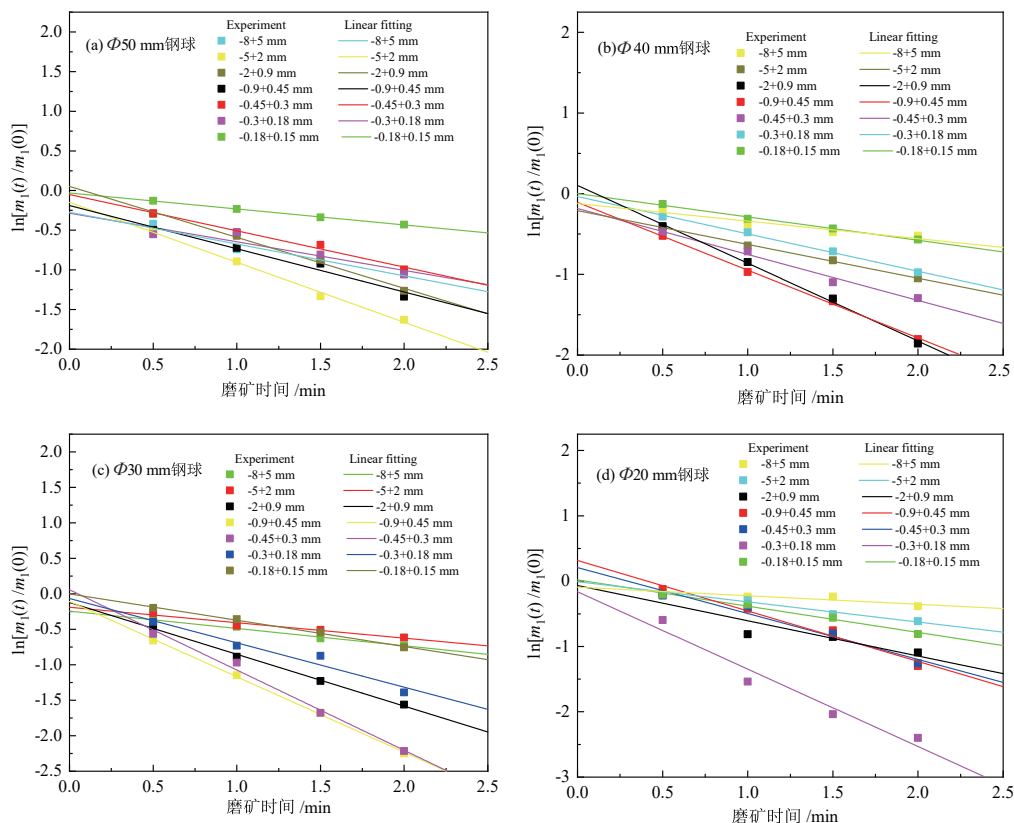


图 3 不同尺寸钢球对不同粒级铁矿石的破碎行为(a— $\Phi 50$ mm 钢球; b— $\Phi 40$ mm 钢球; c— $\Phi 30$ mm 钢球; d— $\Phi 20$ mm 钢球)
 Fig. 3 Crushing behavior of different size steel balls on iron ores with different particle sizes (a— $\Phi 50$ mm steel ball; b— $\Phi 40$ mm steel ball; c— $\Phi 30$ mm steel ball; d— $\Phi 20$ mm steel ball)

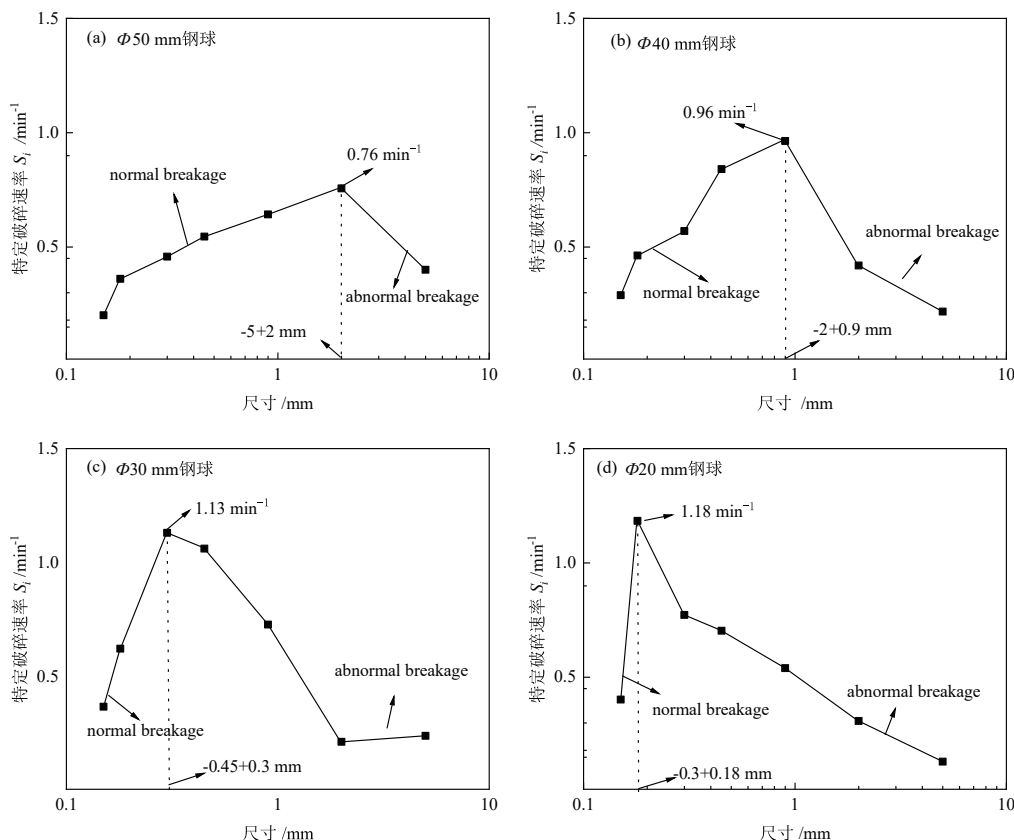


图 4 不同尺寸钢球下给矿尺寸对特定粒级破碎率的影响(a— $\Phi 50$ mm 钢球; b— $\Phi 40$ mm 钢球; c— $\Phi 30$ mm 钢球; d— $\Phi 20$ mm 钢球)
 Fig. 4 Effect of ore feeding size on specific crushing rate under different sizes of steel balls (a— $\Phi 50$ mm steel ball; b— $\Phi 40$ mm steel ball; c— $\Phi 30$ mm steel ball; d— $\Phi 20$ mm steel ball)

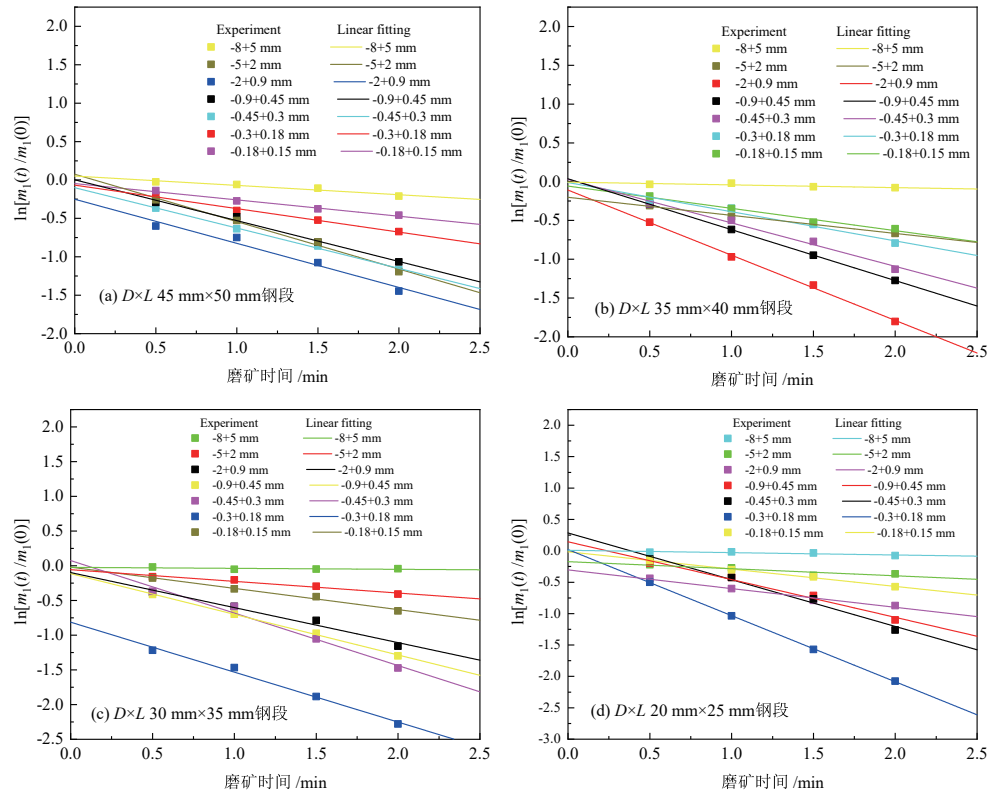


图 5 不同尺寸钢段对不同粒级铁矿石的破碎行为(a— $D \times L$ 45 mm×50 mm; b— $D \times L$ 35 mm×40 mm; c— $D \times L$ 30 mm×35 mm; d— $D \times L$ 20 mm×25 mm)

Fig. 5 Crushing behavior of different size steel cylinder on iron ores with different particle sizes (a— $D \times L$ 45 mm×50 mm; b— $D \times L$ 35 mm×40 mm; c— $D \times L$ 30 mm×35 mm; d— $D \times L$ 20 mm×25 mm)

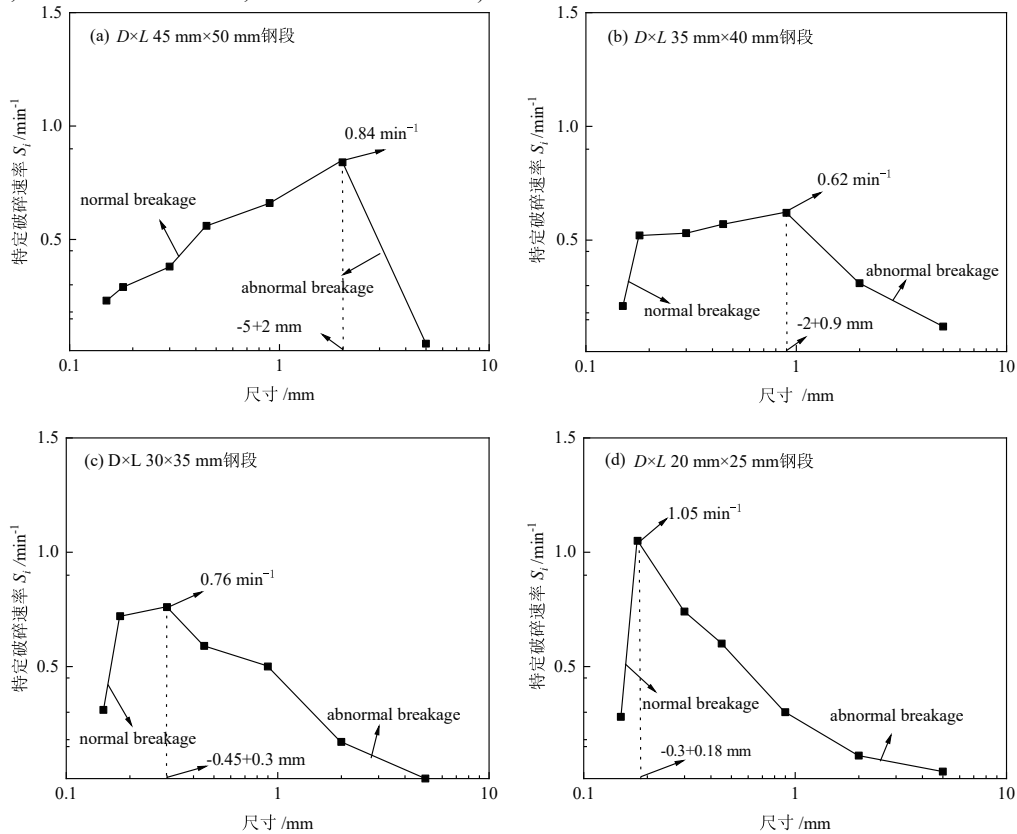


图 6 不同尺寸钢段下给矿尺寸对特定粒级破碎率的影响(a— $D \times L$ 45 mm×50 mm; b— $D \times L$ 35 mm×40 mm; c— $D \times L$ 30 mm×35 mm; d— $D \times L$ 20 mm×25 mm)

Fig. 6 Effect of ore feeding size on specific crushing rate under different sizes of steel cylinder (a— $D \times L$ 45 mm×50 mm; b— $D \times L$ 35 mm×40 mm; c— $D \times L$ 30 mm×35 mm; d— $D \times L$ 20 mm×25 mm)

小,一部分原因是矿石颗粒相较于 $\Phi 50\text{ mm}$ 钢球尺寸过大,磨矿介质携带的能量不足且难以破碎矿石,另一部分原因是相同介质充填率下大钢球个数较少,钢球之间孔隙率较大,钢球与矿石之间的碰撞次数较少,出现随机破碎现象。 $\Phi 40\text{ mm}$ 钢球在对 $-2+0.9\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 0.96 min^{-1} ; $\Phi 30\text{ mm}$ 钢球对 $-0.45+0.3\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 1.13 min^{-1} ; $\Phi 20\text{ mm}$ 钢球对 $-0.3+0.18\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 1.18 min^{-1} 。

图 5 与图 6 分别为不同尺寸钢段介质对铁矿石的破碎行为及给矿尺寸对特定粒度破碎率的影响。由图中数据可知,钢段对矿石破碎行为也均符合一阶磨矿动力学方程。 $D\times L\ 45\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 钢段在对 $-5+2\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 0.84 min^{-1} ,在小于 $-5+2\text{ mm}$ 粒度下, $D\times L\ 35\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 钢段在对 $2\sim 0.9\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 0.62 min^{-1} ; $D\times L\ 30\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 钢段在对 $-0.45+0.3\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎时速率达到最大 0.76 min^{-1} ; $D\times L\ 20\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 钢段在对 $-0.3+0.18\text{ mm}$ 粒级的铁矿石破碎速率达到最大 1.05 min^{-1} 。

对比不同尺寸钢球和钢段对不同粒度矿石的最大破碎速率,可以发现破碎 $+2\text{ mm}$ 粒级的矿石, $\Phi 50\text{ mm}$ 钢球最大破碎速率为 0.76 min^{-1} ,而 $D\times L\ 45\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 钢段最大破碎速率仅为 0.62 min^{-1} ,较钢球降低了 0.14 min^{-1} 。因此,钢球对粗粒级的破碎速率优于钢段。

2.1.2 磨矿介质级配方案研究

对于给定介质尺寸大小,矿石颗粒的破碎速率随着矿石粒度的增加而提高,然后达到最大值,这是该尺寸介质产生最佳粉碎作业的区域,此时磨矿效率最高。上述研究表明,采用钢球作为磨矿介质时, $\Phi 50\text{ mm}$ 对应 $-5+2\text{ mm}$ 粒度、 $\Phi 40\text{ mm}$ 对应 $-2+0.9\text{ mm}$ 粒度、 $\Phi 30\text{ mm}$ 对应 $-0.45+0.3\text{ mm}$ 粒度、 $\Phi 20\text{ mm}$ 对应 $-0.3+0.18\text{ mm}$ 粒度时能够产生最佳的磨矿效果;采用钢段作为磨矿介质时, $D\times L\ 45\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 对应 $-5+2\text{ mm}$ 粒度、 $D\times L\ 35\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 对应 $-2+0.9\text{ mm}$ 粒度、 $D\times L\ 30\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 对应 $-0.45+0.3\text{ mm}$ 粒度、 $D\times L\ 20\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 对应 $-0.3+0.18\text{ mm}$ 粒度能够产生最佳的磨矿效果。

将旋流器沉砂分为四个级别($+2\text{ mm}$ 、 $-2+0.45\text{ mm}$ 、 $-0.45+0.3\text{ mm}$ 、 $-0.3+0.15\text{ mm}$),扣除 -0.15 mm 合格粒级,筛分得到欠磨物料的级别产率。根据给矿粒度分布来指导配球。钢段的介质级配与钢球一致,各尺寸所占比例见表 3。

2.1.3 全粒级磨矿对比分析

实验选取规格为 $D\times L\ 240\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的实验室球磨机,实验矿样为 $\Phi 660\text{ mm}$ 旋流器沉砂,磨矿介质

表 3 球磨机介质级配
Table 3 Ball mill media gradation

粒级/mm	给矿 产率/%	扣除-0.2 mm后 待磨产率 $\gamma_{\text{待}}/\%$	钢球 尺寸/mm	钢段 尺寸/mm	比例/%
+2	4.33	12.85	50	45×50	15
-2+0.45	9.06	26.88	40	35×40	25
-0.45+0.3	15.78	46.82	30	30×35	45
-0.3+0.15	4.54	13.45	20	20×25	15
-0.15	66.30	—	—	—	—
合计	100.00	100.00	—	—	100

按 30 % 充填率计算为 19 kg,每份矿样 1.5 kg,磨矿浓度为 78%,为更好地对比分析钢球与钢段方案的磨矿效果,以现厂磨矿细度 75%~80% 为基础,经探索实验确定磨矿时间为 6 min 30 s。根据 2.1.2 节所得以钢球、钢段介质级配进行混合球径磨矿对比,并对钢球与钢段的磨矿效果进行对比,结果如表 4 所示。

表 4 球磨机钢球方案及钢段方案磨矿效果综合指标对比
/%

Table 4 Comprehensive index of grinding effect of ball mill steel ball scheme and steel cylpebs scheme

名称	钢球	钢段
粗级别 $\gamma_{+0.15\text{ mm}}$	0.47	1.45
可选级 $\gamma_{-0.15+0.019\text{ mm}}$	74.91	76.85
过细级 $\gamma_{-0.019\text{ mm}}$	24.62	21.70
$\gamma_{-0.074\text{ mm}}$	86.09	80.43

由表 4 的结果可知,由于钢段研磨面积比钢球大,且具有棒的选择性破碎的双重优点,能显著降低过粉碎,但钢段方案的冲击力明显不足,粗级别含量 $+0.15\text{ mm}$ 含量较高(为 1.45%),导致磨矿细度不够。钢球有强烈的冲击力,能有效地降低粗级别含量,粗级别含量 $+0.15\text{ mm}$ 含量较低(为 0.47%),较钢段方案降低了 0.98 百分点,且破碎力精确,磨矿产品中 -0.074 mm 含量提高了 5.66 百分点。

2.2 离散元仿真结果分析

2.2.1 磨机内物料之间的运动轨迹

根据球磨机内磨矿介质群运动规律,磨机内部不同区域的颗粒运动速度不同,在抛落区及研磨区颗粒运动速度较大,越靠近磨机中心,其运动速度逐渐减小并发生蠕动现象,磨矿介质运动状态不够活跃。借助 DEM 软件可观察到此区域呈现蓝色的“月牙状”,此区域因颗粒间剪切速度过小导致无法磨碎矿石,因此从蓝色区域面积的大小可大致判断磨矿效果的优劣。根据全粒级磨矿实验中介质配比方案进行模拟仿真分析,钢球以及钢段运动轨迹如图 7。

由图 7 可知,钢球方案的最大运动速度要远远高

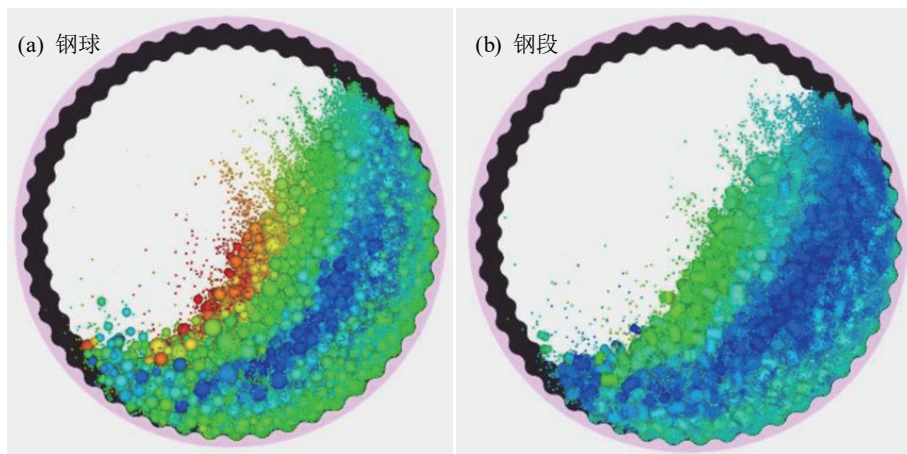


图7 不同介质方案下颗粒运动状态(a—钢球;b—钢段)

Fig. 7 Particle motion status under different media schemes (a—steel ball; b—steel cylpebs)

于钢段方案,运动状态活跃,且钢球方案蓝色区域面积明显小于钢段方案,因此钢球方案理论上磨矿效果更佳。磨矿介质表面积的大小影响其在介质层之间的运动,因此,钢段相较于钢球在具有较大表面积的同时,使得钢段之间的运动变得缓慢,因此其运动速度较低,钢段介质显然弱化了其冲击破碎的能力,强化了颗粒间的摩擦粉碎作用,因此钢段方案主要通过磨擦表面产生细颗粒,磨矿速率小且速率基本保持不变,那么这将导致磨机内能量的大量耗散,矿石的破碎效果变差,同时这也表明了钢段方案在保护细颗粒上具有很大的优势。钢球方案的介质运动速度大,有利于提高冲击粉碎概率,减少粗颗粒含量,同时球荷运动速度大,物料间的剪切破碎(物料间的速度差)也得到了强化,可产生更多的细颗粒,钢球方案的运动状态活跃,这将提高磨机内能量的利用效果,降低能耗。

2.2.2 碰撞能谱图分析

碰撞能谱图作为探究磨机内部能量分布规律及破碎机制的一种手段,并作为理论基础用来指导实际生产,矿石破碎主要由反复碰撞产生的疲劳磨损导致,其碰撞次数和碰撞能级的分布规律直接影响磨矿产品的粒度特性,因此统计不同碰撞能级下的碰撞次数并构建碰撞能谱图对分析磨矿过程中的破碎机制和产品粒度特性有着重要意义。

选取3个关键粒级, -0.15 细粒级, $-0.45+0.3$ mm 沉砂中含量最多, $+5$ mm 为粗粒级,以此评判磨矿效果。对于 -0.15 mm 的矿石,断裂能大于或者等于 $0.000\ 04$ J 时,可发生一次性破坏。由 $\Phi 660$ mm 旋流器沉砂粒度组成可知, $-0.45+0.3$ mm 粒级的矿石产率最大,此粒级矿石的破碎对磨矿效果的影响极大,以大于 0.45 mm 矿石断裂能 $0.001\ 080$ J 为标准评判其破碎能力,断裂能 $\geq 0.001\ 080$ J 时,可发生一次性破坏。对于 $+5$ mm 的矿石,断裂能 $\geq 1.481\ 688$ J 时,可发生一次性破坏。

如图8所示,对钢球和钢段的法向碰撞能量分析可知,无论是钢球还是钢段,磨矿介质与矿石在碰撞能级为 $10^{-8}\sim 10^{-7}$ 时碰撞次数增长速率较快,在碰撞能级 $10^{-7}\sim 10^{-4}$ 时碰撞次数增长速率达到最大,在大于 10^{-4} 的碰撞能级中碰撞次数迅速降低,只有少量碰撞发生。因此,球磨机内矿石的破碎行为主要是由较低能级的多次碰撞造成,高能级的一次性破碎碰撞只占少量。无论是 0.15 mm 的矿石还是 $-0.45+0.3$ mm 粒级的矿石,因其钢段介质表面积大的优势,磨矿介质的研磨能力得到强化,其切向碰撞能量达到矿石断裂能的碰撞次数较钢球高,而对于 5 mm 的矿石,钢段切向研磨能量大于矿石断裂能的碰撞次数低于钢球,显然钢段存在破碎力不足的缺陷。

从法向和切向碰撞能量综合来看,钢段较大的表面积,确实提升了磨矿介质的研磨能力,但也降低了其冲击破坏力,导致其磨矿速率低,磨矿产品中未磨细的含量也较多;而钢球的冲击能力较强,矿石破碎概率大,其磨矿速率高,可有效降低磨矿产品的粗级别含量,提高磨矿细度。

2.2.3 能量利用率分析

磨机运行过程中磨机内部存在矿石-矿石、介质-矿石、介质-介质、介质-衬板、矿石-衬板五种碰撞类型,求得每种碰撞能量占总能量的比值即可得到不同碰撞类型的能量利用率如表5所示。

从表5可知,钢球方案中介质对矿石的碰撞能量和矿石对矿石的碰撞能量占比分别为 61.02% 、 4.39% ,用于矿石破碎能量的占比为 65.41% ,钢段方案中介质对矿石的碰撞能量和矿石对矿石的碰撞能量分布率分别为 56.60% 、 4.69% ,用于矿石破碎能量的占比为 61.29% ,钢球方案用于矿石破碎的能量占比较钢段方案高 4.12 百分点。因此,钢球方案的破碎效果显然要优于钢段方案。钢球方案介质-介质碰撞能量占比为 26.35% 较钢段方案的 30.39% 降低了 4.04 百分点,这

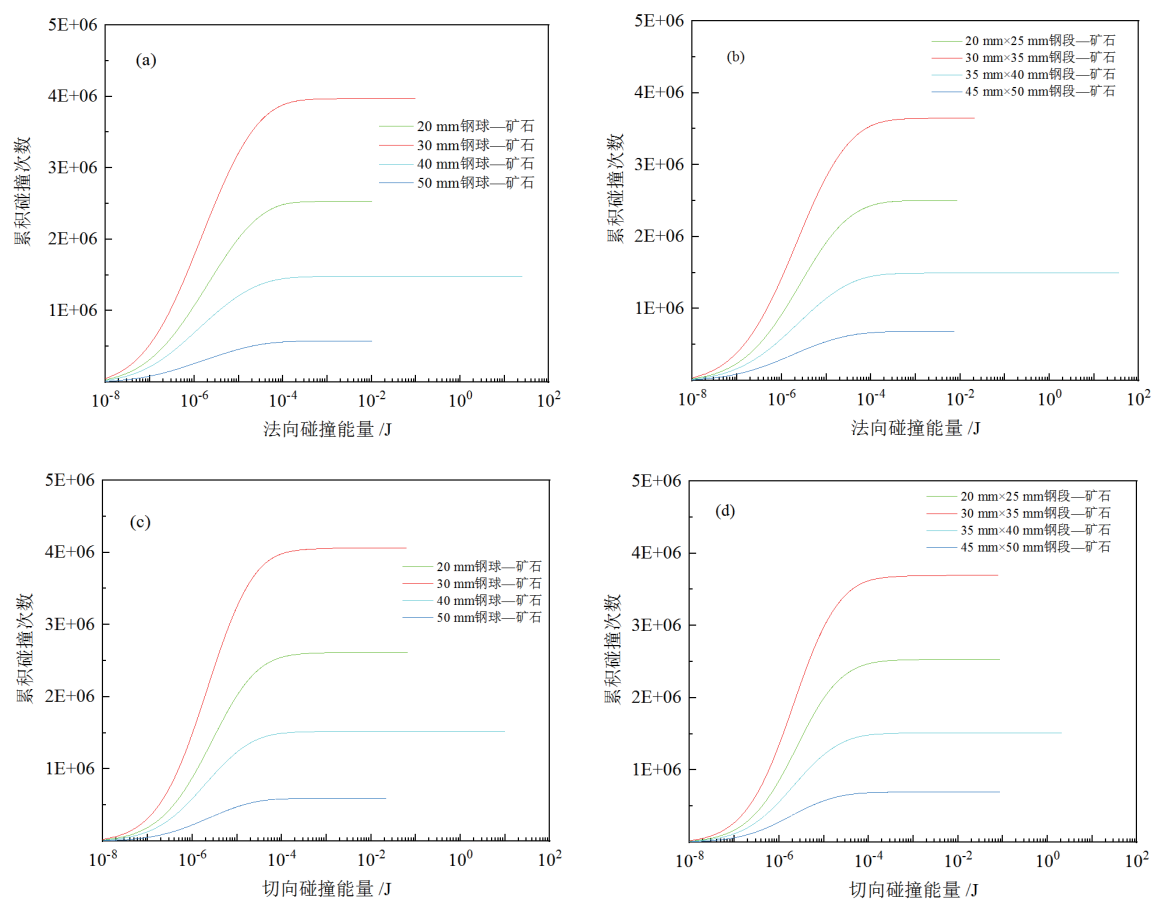


图 8 不同介质方案下颗粒碰撞能谱图
Fig. 8 Particle collision energy spectra for different media schemes

表 5 不同介质类型碰撞能量统计
Table 5 Collision energy statistics

碰撞类型	介质-矿石	介质-衬板	矿石-矿石	介质-介质	矿石-衬板	碰撞总能量
钢球/J	3 913.38	168.14	281.29	1 689.71	360.71	6 413.23
占比/%	61.02	2.62	4.39	26.35	5.62	100.00
钢段/J	2 454.63	101.25	203.34	1 317.87	259.56	4 336.65
占比/%	56.60	2.33	4.69	30.39	5.99	100.00

是由于钢段表面积较钢球大, 介质之间的接触碰撞机会及研磨面积大导致其能量的大量耗散, 造成磨矿介质的提前失效及磨损。介质-衬板以及矿石-衬板的碰撞能量会造成筒体衬板磨损或提前失效, 钢球方案中介质-衬板与矿石-衬板的碰撞能量占比之和为 8.24% 与钢段方案 8.32% 相差不大, 说明介质形状的不同, 并不会对衬板产生更严重的损耗。综合来看, 钢球方案碰撞总能量较高(6 413.23 J)且用于破碎矿石的有效能量利用率高于钢段方案, 并一定程度上降低了磨矿介质的损耗, 达到节能降耗的目的。

2.3 工业实验结果分析

实际生产中, 磨矿介质尺寸和配比越合理, 粗颗粒物料减少速度越快, 能量转化效率越高, 能耗越低。生产能力体现了选矿厂的效益, 而介质和电力的单位

消耗则代表了成本, 也就是说生产能力越高, 成本越低, 利润越好。分别统计工业实验时球磨机的生产能力、介质单耗和功率值, 对各种介质系统的经济效益进行比较。

2.3.1 选厂磨矿细度指标

工业实验期间, 三选厂铜系列的溢流细度见表 6。由表 6 可知, 三选厂铜系列球磨机工业实验期间, $\Phi 660$ mm 旋流器溢流-0.074 mm 含量达到了 81.71%, 较之前指标提升了 7.71 百分点, 改善了磨矿效果, 有利于改善后续选别指标。

2.3.2 选厂钢耗指标

从图 9 可知, 现场采用了磨矿特性实验确定的钢球方案后, 三选厂铜系列球磨机工业实验期间单位钢

表 6 溢流细度统计

Table 6 Overflow fineness statistics

时间	质量浓度/%	溢流细度/%	处理量/(t·h ⁻¹)
实验前	—	74.00	330.00
2021.07	38.54	81.95	325.50
2021.08	40.09	81.69	343.97
2021.09	39.00	82.22	336.43
2021.10	39.07	82.24	337.95
2021.11	43.47	79.06	341.12
2021.12	42.70	81.03	342.87
2022.01	39.20	83.57	332.87
2022.02	39.41	81.91	341.01
平均	40.19	81.71	337.72

耗为 0.57 kg/t, 较实验前的 0.63 kg/t 降低了 9.52%; 从 DEM 模拟仿真实验结果可知, 钢球方案与钢段方案介质-介质碰撞能量分布率分别为 26.35%、30.39%, 钢球方案较钢段方案低 4.04 百分点, 模拟结果与工业

实验数据印证了钢球方案对于降低钢球-钢球碰撞能量分布率, 降低磨矿介质损耗方面具有明显优势。

2.3.3 选厂电耗指标

由图 10 可知, 三选厂铜系列工业实验期间单位电耗为 10.13 kW·h/t, 较实验前 11.46 kW·h/t 下降了 11.61%; 结果表明现场采用了磨矿特性实验确定的钢球方案后, 可以有效降低选厂的单位电耗。

3 结论

(1) 磨矿动力学实验发现, 钢球对粗粒级的矿石破碎速率优于钢段; 全粒级磨矿时, 钢球能有效降低粗级别含量, 粗级别含量+0.15 mm 含量较低为 0.47 百分点, 较钢段方案降低了 0.98 百分点, 磨矿产品中-0.074 mm 含量提高了 5.66 百分点。

(2) DEM 软件模拟结果表明钢球方案的介质运动状态较钢段方案活跃; 钢球方案的碰撞总能量最高, 且用于破碎矿石的有效能量利用率最高。钢段较大

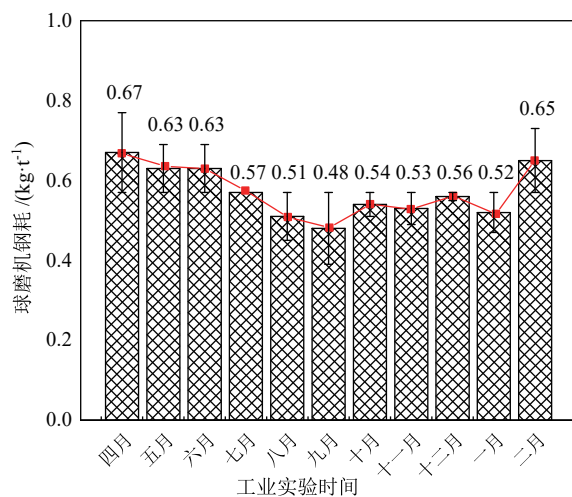


图 9 工业实验期间钢球消耗

Fig. 9 Steel ball consumption during industrial testing

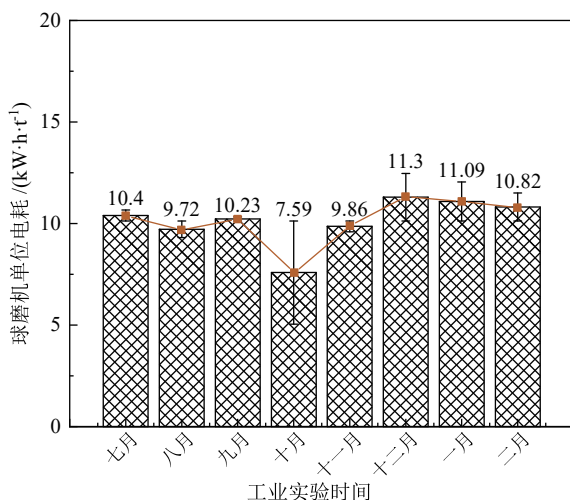
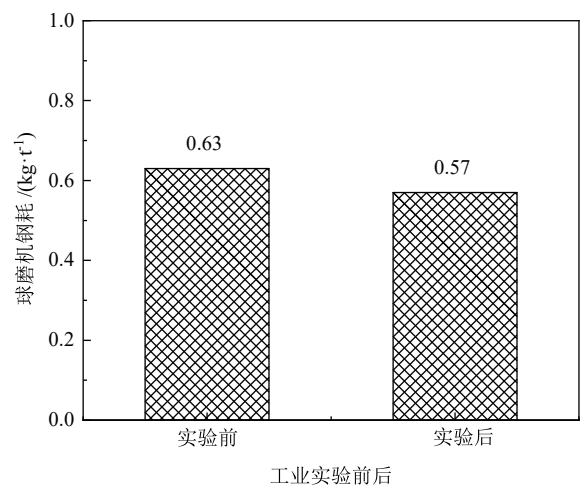
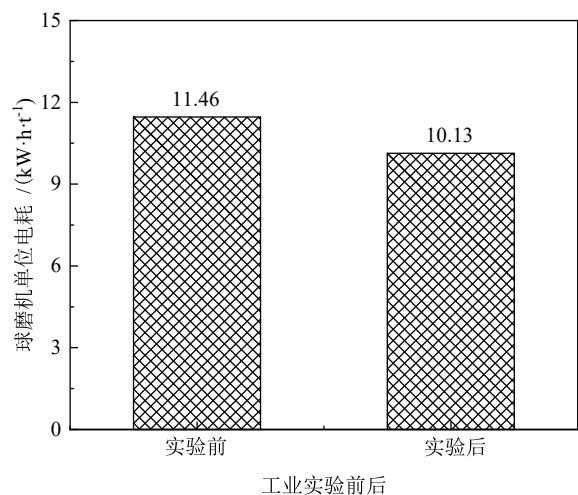


图 10 工业实验期间钢球消耗

Fig. 10 Steel ball consumption during industrial testing



的表面积, 确实提升了磨矿介质的研磨能力, 但也降低了其冲击破坏力, 导致其磨矿速率低; 钢球的冲击能力较强, 矿石破碎概率大, 有效提高磨矿细度。模拟仿真实验结果验证了钢球方案的可靠性。

(3) 现场采用了钢球方案后, 三选厂铜系列 $\Phi 660$ mm 旋流器溢流-0.074 mm 含量较之前 74.00% 提升了 7.71 百分点; 三选厂铜系列球磨机工业实验期间单位钢耗较之前的 0.63 kg/t 降低了 9.52%; 三选厂铜系列工业实验期间单位电耗较之前的 11.46 kW·h/t 下降了 11.61%。

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. Crushing and grinding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [2] 李雨晴, 谢峰, 徐凤平, 等. 精确化磨矿对钨矿粒度分布特性的影响[J]. 有色金属 (选矿部分), 2024(3): 76-82.
LI Y Q, XIE F, XU F P, et al. Effect of precision grinding on the particle size distribution characteristics of the tungsten ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(3): 76-82.
- [3] 母福生. 破碎及磨矿技术在国内外技术发展和行业展望 (一)[J]. 矿山机械, 2011, 39(11): 58-65.
MU F S. Technical development and prospect of crushing and grinding technology at home and abroad (I)[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(11): 58-65.
- [4] NAPIER-MUNN T. Is progress in energy-efficient comminution doomed?[J]. Minerals Engineering, 2015, 73: 1-6.
- [5] 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, 2013.
LU J K. Kinematical analysis & parameters optimization of large tumbling ball mill' media based on the discrete element method[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
- [6] 王彩霞, 肖庆飞, 段希祥. 特大型球磨机球荷工作参数优化研究[J]. 矿产综合利用, 2014(6): 45-48.
WANG C X, XIAO Q F, DUAN X X. Research on parameter optimization on excellent ball mill[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(6): 45-48.
- [7] 邓文, 王明飞, 常伟华. 云南某铅锌矿二段球磨机磨矿介质制度优化研究[J]. 云南冶金, 2022, 51(5): 56-60.
DENG W, WANG M F, CHANG W H. Optimization of grinding media system of two-section ball mill in a lead-zinc mine in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(5): 56-60.
- [8] 王彬, 任頔, 杜成, 等. 山西某铁矿厂一段球磨工艺指标优化研究[J]. 铜业工程, 2022(5): 26-30.
WANG B, REN D, DU C, et al. Optimization study on technological index of primary ball milling of an Iron mine in Shanxi province[J]. Copper Engineering, 2022(5): 26-30.
- [9] 何遼, 库建刚. 磨矿介质形状对石英砂粉碎参数的影响[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(5): 29-32.
HE K, KU J G. Grinding parameters of quartz sand with shape of medium[J]. China Power Science and Technology, 2019, 25 (5) : 29-32.
- [10] ZHANG X, HAN Y, GAO P, et al. Effects of grinding media on grinding products and flotation performance of chalcopyrite[J]. Minerals Engineering, 2020, 145: 106070.
- [11] 王国彬, 蓝卓越, 肖庆飞, 等. 选择性磨矿的主要影响因素浅析[J]. 有色金属 (选矿部分), 2021(4): 59-66+103.
WANG G B, LAN Z Y, XIAO Q F, et al. Analysis on main influencing factors of selective grinding[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(4): 59-66+103.
- [12] 汪聪, 邓建, 肖庆飞, 等. 磨矿介质形状对铜硫浮选分离的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(2): 573-585.
WANG C, DENG J, XIAO Q F, et al. Effect of grinding media shape on flotation separation of chalcopyrite and pyrite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(2): 573-585.
- [13] 王旭东, 肖庆飞, 张谦, 等. 大坪选厂磨矿介质制度优化实验研究[J]. 黄金, 2019, 40(8): 53-56.
WANG X D, XIAO Q F, ZHANG Q, et al. Experimental study on the optimization of grinding media regime in Daping concentrator[J]. Gold, 2019, 40(8): 53-56.
- [14] CUHADAROGU D, SAMANLI S, KIZGUT S. The effect of grinding media shape on the specific rate of breakage[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2008, 25(5/6): 465-473.
- [15] SIMBA K P, MOYS M H. Effects of mixtures of grinding media of different shapes on milling kinetics[J]. Minerals Engineering, 2014, 61: 40-46.
- [16] YU J, QIN Y, GAO P, et al. An innovative approach for determining the grinding media system of ball mill based on grinding kinetics and linear superposition principle[J]. Powder Technology, 2021, 378: 172-181.
- [17] 李云啸, 肖庆飞, 国宏臣, 等. 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 Y X, XIAO Q F, GUO H C, et al. 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.
- [18] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究[J]. 中国科学 (A 辑 数学 物理学 天文学 技术科学), 1989(8): 856-863.
DUAN X X. Theoretical calculation research on the size of steel balls in ball mills[J]. Scientia Sinica (Mathematical Physics Astronomical Technology Science, Volume A), 1989(8): 856-863.
- [19] GUOBIN W, QINGFEI X, QIANG Z, et al. An innovatory approach for determining grinding media system to optimize fraction compositions of grinding products based on grinding dynamics principle[J]. Powder Technology, 2024, 434: 119302.

Grinding Medium Optimization Based on Grinding Kinetics and Discrete Element Analysis

XIAO Qingfei¹, SUN Boyuan¹, JIN Saizhen^{1,3}, WU Yukai², WANG Mengtao¹

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

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;

3. National Key Laboratory of Intelligent Optimization Manufacturing for Mining and Metallurgy Process, Beijing 102628, China

Abstract: In this study, the effects of steel balls and steel cylpebs as the grinding media on the crushing behavior and energy utilization of multi-grain ores were investigated using grinding dynamics and discrete element method (DEM) simulation, and industrial experimental research was carried out based on the results. The results of grinding kinetics show that the effect of steel balls on the crushing rate of the coarse grain fraction was better than that of steel cylpebs. The content of +0.15 mm in the grinding product is reduced by 0.98% and -0.074 mm increased by 5.66% in the case of steel ball compared with that of steel cylpebs as the grinding medium. DEM analysis showed that the motion state of steel balls was more active than that of steel cylpebs. The percentage of energy used for ore crushing using steel balls and steel cylpebs as the grinding medium was 65.41% and 61.29%, respectively, with the former being 4.12% higher than the latter so that the effective energy utilization of steel balls for crushing the ore is higher. Based on the above results, after using steel balls as grinding media in the Dahongshan Iron Mine, the overflow -0.074 mm content of the cyclone increased from 74.00% to 81.71%, an increase of 7.71%, the unit steel consumption decreased by 9.52%, from 0.63 kg/t to 0.57 kg/t, and the unit power consumption decreased by 11.61%, from 11.46 kW·h/t to 10.13 kW·h/t. This study verified the validity of the steel ball scheme through grinding dynamics and discrete element analysis experiments and verified its accuracy through industrial tests.

Keywords: grinding kinetics; discrete element simulation; grinding medium; Dahongshan iron mine; steel ball; steel cylpebs

引用格式: 肖庆飞, 孙博远, 金赛珍, 武煜凯, 王梦涛. 基于磨矿动力学与离散元分析的磨矿介质优化实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(1): 28-38.

XIAO Qingfei, SUN Boyuan, JIN Saizhen, WU Yukai, WANG Mengtao. Grinding medium optimization based on grinding kinetics and discrete element analysis [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(1): 28-38.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn