

基于碎磨参数的介质优化及降低半自磨顽石积累实验研究

武煜凯^{1,2}, 王国强^{1,2}, 朱阳戈^{1,2}, 赵志强^{1,2}, 肖庆飞³, 罗思岗^{1,2}

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628;
3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD921.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)03-0102-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.03.011

摘要 针对某大型钨矿存在半自磨机顽石积累、产能提升幅度有限等问题, 在综合考虑不同测试方法下的碎磨参数及通过压载实验获得顽石粒级的基础上, 运用修正后的 Azzaroni 公式进行钢球直径精确计算, 并通过实验室实验进行合理性验证。研究表明: (1) 三种测试方法获得的碎磨参数结果均表明了该矿石的难磨剥特性但在描述矿石抗冲击性能上仍有区别; (2) 该矿石的顽石粒级为 -80+20 mm; (3) 半自磨机的最佳钢球方案为 $m(\Phi 130 \text{ mm}) : m(\Phi 110 \text{ mm}) = 1 : 1$ 。单一球径 $\Phi 130 \text{ mm}$ 中 +100 mm 充当自磨介质的矿石磨矿产品较选厂 $\Phi 120 \text{ mm}$ 钢球方案提高了 11.17 百分点, 顽石含量降低了 1.67 百分点; 混合球径 $m(\Phi 130 \text{ mm}) : m(\Phi 110 \text{ mm}) = 1 : 1$ 的 +100 mm 含量较单一球径 $\Phi 130 \text{ mm}$ 提高了 1 百分点, 顽石含量降低了 3.41 百分点, 验证了所计算的最大钢球直径方案的合理性, 并采用混合球径方案获得了更优的磨矿效果。

关键词 半自磨机; 顽石; 落重实验; Bond 球磨功指数; 力学性质; 钢球直径计算; 混合球径

引言

自磨机(AG)通过物料自身的相互碰撞摩擦且无需外加磨矿介质介入使矿石粉碎, 其以大块矿石(粒度一般为 -250+100 mm)作为磨矿介质, 但在处理硬矿石时极易产生顽石导致磨机处理能力下降。为弥补其磨矿能力的不足, 加入少量钢球(一般占磨机容积 5%~15%)可以提高磨矿效率, 此类磨机被称为半自磨机(SAG)^[1]。

磨机内部存在部分偏硬矿石, 在颗粒剪切和磨边角的双重作用下趋近椭圆形, 表面光滑, 且极难通过大块矿石的冲击作用使其粉碎, 粉碎速率低。此类矿石被称为顽石, 一般集中在 -80+15 mm 粒级(并非适用于全部矿山及自磨机或半自磨机设备)。因其尺寸较小, 不具备磨矿介质作用, 且难以通过格子孔排出, 易在磨机内部不断积累从而占据有效容积, 导致磨机处理能力下降^[2-4]。

研究表明, 半自磨机的磨矿机理重要性顺序为:

冲击粉碎>颗粒剪切>磨边角^[5-9]。半自磨机虽加入钢球介质期望解决顽石积累, 但在工业应用中, 因磨矿过程的“暗箱”属性, 有非线性、大迟滞和强耦合等特点^[10], 仍存在顽石积累现象。Morrells^[11]发现尽可能地减小半自磨机给料粒度 F_{80} 可提高处理能力, 降低能耗。谭文才等^[12]发现半自磨机给料中的超大块分布不合理会制约产能。王越等人^[13]通过调整格子板开孔率及排布方式、增大钢球尺寸及充填率能快捷有效地提高磨机处理能力。国宏臣等^[14]借助离散单元法(DEM)从碰撞能量的角度验证了调整介质级配可改善磨矿效果的可靠性, 缓解顽石积累。谢浩松等^[15]通过实验室实验和模拟仿真相结合的方式, 利用段式球径半理论公式调整钢球直径降低了半自磨机的顽石积累。其中, 磨矿介质尺寸及级配作为最易控制的因素之一^[16], 但针对半自磨机尚未有明确的理论或公式计算其最佳钢球直径, 因矿石碎磨特性参数的测试方法各有侧重, Azzaroni 公式、段式球径半理论公式只考虑单一测试结果, 其计算结果并不准确。

基于此, 本文通过单颗粒压载实验, 分析各窄粒

收稿日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374269); 院青年科技创新基金(04-2335)

作者简介: 武煜凯(1995-), 男, 山西平遥人, 硕士, 助理工程师, 主要从事碎磨理论与工艺研究, E-mail: wuyukai@bgrimm.com。

通信作者: 肖庆飞(1980-), 男, 安徽宿松人, 博士, 教授, 从事选择性磨矿理论与工艺, 颗粒离散元模拟仿真, E-mail: 13515877@qq.com。

级矿石间的断裂比能差异, 为精准判别顽石粒级提供理论依据, 并在综合考虑某大型钼矿的不同矿石碎磨参数测定结果的基础上进行钢球直径计算, 采用实验室实验进行合理性验证, 旨在解决半自磨机的顽石积累问题, 提高磨机处理能力, 为选厂提高磨矿效率、降本增效提供参考。

1 实验

1.1 矿石碎磨参数测定

1.1.1 单颗粒破碎实验

单颗粒破碎实验在落重实验仪上进行, 通过改变落锤的释放高度和落锤质量, 分别对 5 组窄粒级为 -63+53 mm、-45+37.5 mm、-31.5+26.5 mm、-22.4+19 mm 和 -16+13.2 mm 的单颗粒矿石进行不同能量水平下的冲击粉碎, 比能耗变化范围为 0.1~2.5 kW·h/t。

本次单颗粒破碎实验采用 t_5 值(小于原始粒度 1/5 的筛下累积产率)表征矿石颗粒的破碎程度, 其拟合参数用于球径计算。考虑到矿石破碎过程中粒度效应, 其 t_5 与颗粒粒度 x 及比能耗 E_{cs} 的关系如下^[17]:

$$t_5 = M[1 - e^{(-f_{mat}x^n E_{cs})}] \quad (1)$$

式中, E_{cs} 表示输入的粉碎能量, kW·h/t; M 和 f_{mat} 是拟合参数; M 值表示矿石粉碎产品中 t_5 的最大值, %; f_{mat} 值表示材料特性参数; x 表示颗粒粒度, mm; n 表示粒度效应。

另外, JKMRC 的标准落重一般采用 t_{10} 值(小于原始粒度 1/10 的筛下累积产率)表征矿石颗粒的破碎程度, 采用 $A \times b$ 来判断矿石的软硬, 其 t_{10} 与比能耗 E_{cs} 的关系如式(2)^[18]:

$$t_{10} = A[1 - e^{(-bE_{cs})}] \quad (2)$$

式中, A 和 b 是拟合参数; A 值表示矿石单次冲击粉碎产品中 t_{10} 的最大值, %; b 值表示材料特性参数。 $A \times b$ 值与矿石软硬程度的关系见表 1。

表 1 $A \times b$ 值与矿石软硬对照表

Table 1 Comparison table of $A \times b$ values with ore softness and hardness

特性	极硬	硬	中硬	中	中软	软	极软
$A \times b$	<30	30~38	38~43	43~56	56~67	67~127	>127

1.1.2 球磨功指数实验

邦德球磨功指数实验设备采用规格为 $\Phi 305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$ 的标准邦德球磨功指数实验磨机, 在给料粒度 -3.35 mm, 磨机转速 70 r/min, 保持各循环过程给矿量恒定 700 cm³ 的条件下进行闭路循环磨矿^[19]。Bond 球磨功指数 W_{ib} (kW·h/t) 由式(3)计算得出:

$$W_{ib} = \frac{4.906}{P_{100}^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (3)$$

式中, P_{100} 为实验筛孔尺寸, μm ; P_{80} 为产品中 80% 最大过筛粒度, μm ; F_{80} 为给料中 80% 最大过筛粒度, μm ; G_{bp} 为磨机每一转新生成合格粒级的含量, g/t。

邦德球磨功指数与矿石软硬程度之间的关系见表 2。

表 2 邦德球磨功指数与矿石软硬程度对照表

Table 2 Comparison table of bond ball mill work index with ore softness and hardness

特性	软矿石	中矿石	中硬矿石	硬矿石	极硬矿石
W_{ib} / (kW·h·t ⁻¹)	<8	8~14	14~20	20~25	>25

1.1.3 力学性质测定

对采场 435 致密花岗岩、390 热液角砾岩、375 热液角砾岩(石英含量高)、360 花岗岩、345 花岗岩五个采样点分别进行抗压强度(直径 48~54 mm, 高径比 2~2.5)和泊松比(高径比 1:2)岩石力学性能测定。普氏硬度系数与矿石软硬程度的关系见表 3。

表 3 普氏硬度系数与矿石软硬程度对照表

Table 3 Comparison table of protodyakonov coefficient with ore hardness and softness

特性	极硬	很硬	坚硬	较硬	普通	较软	软层	松软
f	20	15	8~10	5~6	3~4	1.5~2	0.8~1	<1

1.2 顽石粒级测定

采用 YAW-600 型液压伺服实验系统对直线振动筛筛上产品进行单颗粒压载实验。

在有限样本数量的前提下, 断裂概率可通过概率估算因子 P 进行估算^[20-21]:

$$P = \frac{i}{N+1} \quad (4)$$

式中, N 为实验样本数量; i 为对所有试样的强度数据进行升序排列后某一个颗粒强度在序列中的排名。

用 Logistic 函数模型描述同一粒级不同颗粒的断裂比能与断裂概率的关系, 拟合函数如式(5)^[22]:

$$P(E) = \frac{A_1 + A_2}{1 + \left(\frac{E^*}{E_{50}} \right)^{A_2}} \quad (5)$$

式中, $P(E)$ 为断裂概率; A_1 和 A_2 为拟合参数; E^* 为颗粒的断裂比能, J/kg; E_{50} 为断裂比能分布的中值, J/kg。

断裂比能的中值与矿石颗粒粒度的关系由式(6)给出^[22]:

$$E_{50} = \frac{E_{\infty}}{1 + k_p/k_s} \left[1 + \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^{\varphi} \right] \quad (6)$$

式中, E_s 、 d_0 、 ϕ 为拟合参数; d_p 为颗粒尺寸, mm; k_s 为钢的刚度, GPa; k_p 为颗粒材料的刚度, GPa。

1.3 半自磨机最大钢球尺寸计算

目前并未有明确的半自磨机钢球尺寸计算公式, 选厂常用 Azzaroni 公式进行估算, 计算公式如式(7):

$$D_b = \frac{4.5 \times F_{80}^{0.263} \times [\rho \times W_{ib}]^{0.4}}{(D \times v)^{0.25}} \quad (7)$$

本文在上述公式的基础上进行了优化, 对测定的三种矿石碎磨参数取平均值, 计算公式如式(8):

$$D_b = \frac{4.5 \times F_{80}^{0.263} \times [\rho \times \sum (M \times f_{mat} + W_{ib} + f)]^{0.4}}{(D \times v)^{0.25}} \quad (8)$$

式中, D_b 为最大钢球尺寸, mm; F_{80} 为半自磨机给矿中 80% 最大过筛粒度, μm ; ρ 为矿石密度, t/m^3 ; W_{ib} 为 Bond 磨矿功指数, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$; D 为半自磨机有效内径, m; v 为磨机转速, r/min ; f 为矿石普氏硬度系数。

1.4 实验室磨矿循环对比实验

磨矿循环对比实验在 $D \times L$ 为 $420 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ (D 为磨机直径, L 为磨机长度) 的实验室不连续球磨机中进行, 由于实验室为不连续磨矿, 基于相似性原理仅对趋势进行比较, 因整个磨机内部产品粒度组成基本一致, 磨机长度的影响能够排除, 可用此磨机来对比分析半自磨磨矿效果^[3]。磨矿试样取现场半自磨机给矿, 磨矿时间经探索实验确定为 55 min, 保证磨矿产品细度 -0.074 mm 级别产率 13% 左右 (与现场磨矿的细度相当)。通过磨矿循环对比实验模拟半自磨机中顽石颗粒的负面影响, 即磨 55 min 后, 将 -15 mm 合格颗粒排出, 然后按原矿粒度比例加入上一批实验减少的矿石量, 再磨 55 min; 如此往复, 连续进行四次循环。对各方案的磨矿产品 $+2 \text{ mm}$ 粒级进行格筛筛分, -2 mm 粒级缩分后取样 500 g 进行筛析及水析, 获得磨矿产品各粒级产率。

2 结果与讨论

2.1 矿石碎磨特性

值得注意的是, 单颗粒冲击破碎实验并不能很好地对应于磨机内部的颗粒群破碎; Bond 球磨功指数实验并不是生产回路中的功指数, 且对于任一给定回路, 两者之间的差异往往是很明显的^[23]; 力学性质测定均是采用强度较好的试件, 测定结果与实际偏大, 因此在评价矿石碎磨特性及优化钢球尺寸时应测试结果进行综合考量。

对单颗粒冲击粉碎实验结果进行拟合, 求解出 M 、 f_{mat} 、 A 、 b 的参数值并与磨剥参数 t_a 、Bond 球磨功指数结果一并列入表 4, 矿石力学性质测定结果见表 5。单颗粒冲击粉碎实验结果如图 1 和图 2 所示。

表 4 碎磨特性参数

Table 4 Comminution characteristic parameters

参数	M	f_{mat}	A	b	$A*b$	t_a	$W_{ib}/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1})$
取值	96.54	0.17	67.22	1.01	67.89	0.36	16.27

表 5 力学性质测定结果

Table 5 Mechanical property measurement results

样品	抗压强度 R/MPa	块体密度 $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	泊松比
345	104.00	2.59	/
360	185.00	2.63	/
375	77.50	2.62	0.34
390	90.60	2.59	0.25
435	137.00	2.63	/
均值	118.82	2.61	0.30

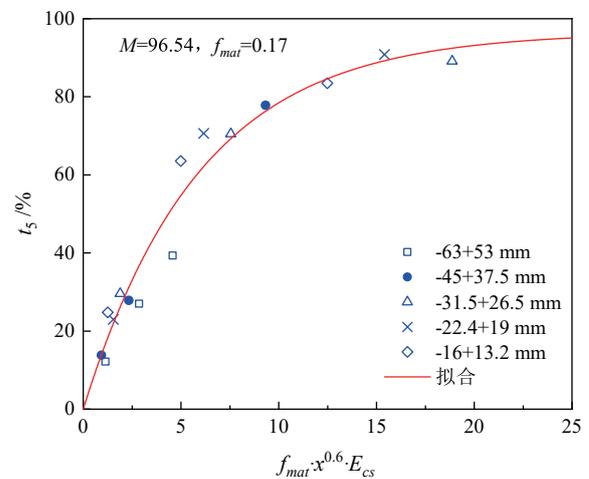


图 1 $M-f_{mat}-x$ 模型拟合单颗粒冲击破碎实验结果

Fig. 1 $M-f_{mat}-x$ model fitting of single particle impact crushing test results

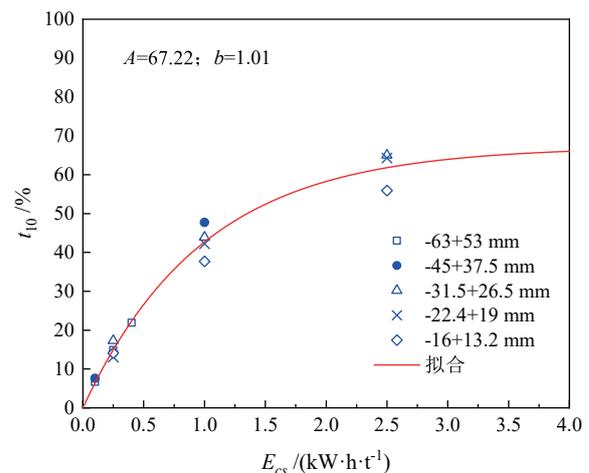


图 2 $A-b$ 模型拟合单颗粒冲击破碎实验结果

Fig. 2 $A-b$ model fitting of single particle impact crushing test results

单颗粒冲击破碎实验结果表明, 本矿石 ($A \times b$ 值为 67.89) 属中等偏软矿石, 矿石抵抗磨剥作用的能力 $t_a=0.36$ 属中等偏硬较难剥矿石, 粒度效应参数为 $n=$

0.60>0.50, 矿石抵抗冲击粉碎的能力随颗粒粒度的减小而增大; Bond 球磨功指数实验结果为 16.27kW·h/t 属中等偏硬矿石; 力学性质测定的平均普氏硬度系数 $f=R/10=11.88$ 属坚硬矿石, 平均泊松比 $\mu=0.30>0.24$ 为高韧性矿石。测定结果均表明了该矿石的难磨剥特性, 但在描述矿石的抗冲击性能上仍有区别。

2.2 顽石粒级

-20+15 mm、-30+20 mm、-40+30 mm、-60+40 mm 和 -80+60 mm 各粒级矿石的 E_{50} (断裂概率 50% 对应的断裂比能) 分别为 62.06 J/kg、875.38 J/kg、444.88 J/kg、288.21 J/kg、207.09 J/kg(图 3)。显然, 矿石在 -20+15 mm 到 -30+20 mm 粒级之间的断裂比能激增, 在 +20 mm 时矿石变得极难破碎, 因此将顽石粒级确定为 -80+20 mm。

另外, 对于特定矿石, 随着矿石颗粒粒径的增大, 其断裂比能的变化趋于平缓, 可视为特定常数值, 从图 4 的拟合结果可以看出这一趋势。

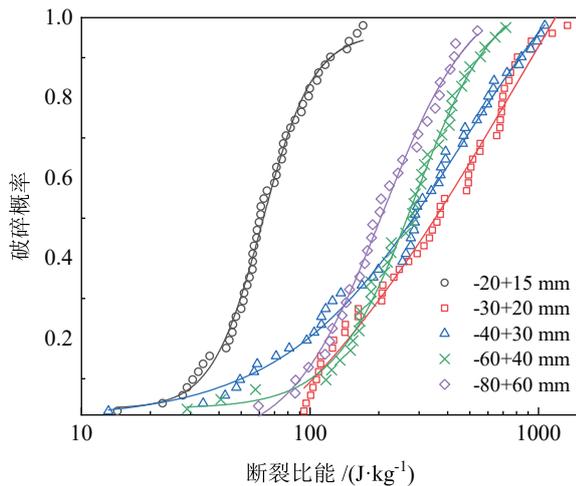


图 3 矿石断裂比能的 Logistic 函数分布
Fig. 3 Logistic function distribution of ore fracture specific energy

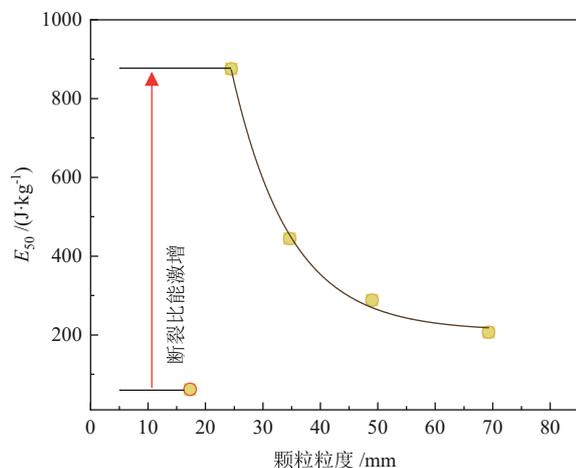


图 4 E_{50} 的幂函数拟合曲线
Fig. 4 Power function fitting curve of E_{50}

2.3 磨矿循环对比实验

将实验参数 $W_{ib}=16.27 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$, $M\times f_{ma}=16.41$, $f=11.88$ 及现场数据 $F_{80}=116370 \mu\text{m}$, $\rho=2.61 \text{ t}/\text{m}^3$, $D=10.97 \text{ m}$, $v=9.6 \text{ r}/\text{min}$ 代入式 8 计算, 计算结果为 130.46 mm, 取 130 mm 作为半自磨机最大钢球尺寸。

设 110 mm、120 mm(选厂)、130 mm、140 mm、150 mm 5 组单一球径方案, 同时按半自磨给矿中的顽石粒级(图 4 拐点在颗粒尺寸 40 mm 处, -80+40 mm 占 16.36%; -40+20 mm 占 15.53%) 确定 $m(\Phi 130 \text{ mm})$: $m(\Phi 110 \text{ mm})=1:1$ (质量比) 为推荐级配, 另设立 2 组平均球径为 $\Phi 130 \text{ mm}$ 的混合球径方案($m(\Phi 150 \text{ mm})$: $m(\Phi 110 \text{ mm})=1:1$ 、 $m(\Phi 140 \text{ mm})$: $m(\Phi 120 \text{ mm})=1:1$) 进行对比实验。单一球径实验结果如图 5, 混合球径实验结果如图 6。

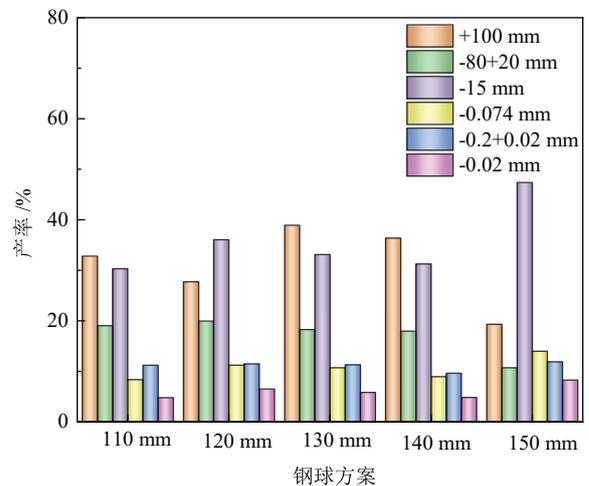


图 5 第 4 次磨矿循环产品(单一球径)
Fig. 5 Fourth grinding cycle products (single ball diameter)

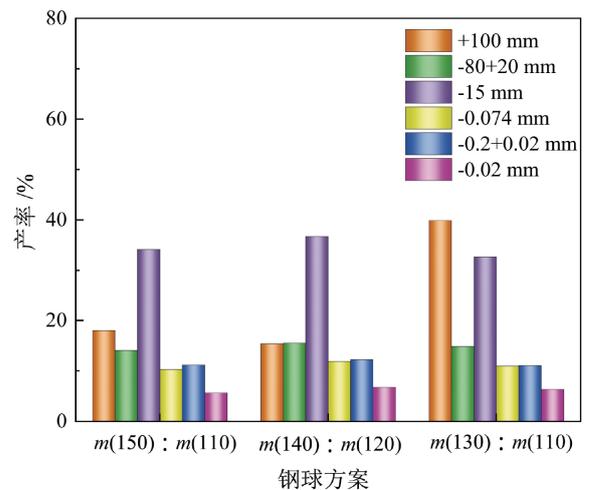


图 6 第 4 次磨矿循环产品(混合球径)
Fig. 6 Fourth grinding cycle products (mixed ball diameter)

单一球径实验结果表明:(1)5 组单一球径方案第四次循环产品中顽石 -80+20 mm 含量随着钢球尺寸的增大呈现先增加后减少的趋势, 顽石 -80+20 mm 含

量在选厂 $\Phi 120$ mm 钢球方案时达到最高为 19.94%，在 $\Phi 150$ mm 钢球方案时达到最低的 10.71%，但其 +100 mm 充当自磨介质的矿石含量也最低为 19.32%；(2)对比 $\Phi 110$ mm、 $\Phi 130$ mm 和 $\Phi 140$ mm 三组钢球方案， $\Phi 130$ mm 钢球方案中 +100 mm 充当自磨介质的矿石、-15 mm 合格粒级、-0.074 mm 及 -0.2+0.020 mm 中间可选粒级含量均最高，分别为 38.92%、33.13%、10.75% 及 11.32%，而顽石-80+20 mm 含量与 $\Phi 140$ mm 钢球方案相当，为 18.27%；半自磨机最大钢球尺寸为 130 mm 时，磨矿效果最佳。显然，增大半自磨机的钢球尺寸有助于减少顽石积累，且存在一个最佳的钢球尺寸，可在降低顽石量的同时使半自磨机保有足够的自磨能力。

混合球径实验结果表明：(1) $m(\Phi 140$ mm) : $m(\Phi 120$ mm)=1 : 1 方案在第四次循环产品中顽石-80+20 mm 含量最高达到 15.53%，顽石积累现象严重；而在 $m(\Phi 150$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1 方案中顽石-80+20 mm 含量虽达到最低的 14.07%，但其 +100 mm 充当自磨介质的矿石含量也偏低，为 18.01%，应舍弃该方案。(2) $m(\Phi 130$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1 方案中 +100 mm 充当自磨介质的矿石含量最高为 39.92%，顽石-80+20 mm 含量为 14.86%，合格粒级 -15 mm、-0.074 mm 含量分别为 32.66% 和 10.97%，此时磨矿效果最佳。

值得注意的是，混合球径 $m(\Phi 130$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1 的顽石-80+20 mm 含量较单一球径 $\Phi 130$ mm 降低了 3.41 百分点，+100 mm 充当自磨介质的矿石含量提高了 1 百分点。混合球径在保留足够冲击能力的同时，提高了碰撞频次，弥补了单一球径磨剥能力不足的缺陷。因此，半自磨机的最佳钢球方案为 $m(\Phi 130$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1。

3 结论

(1)碎磨参数测定结果均表明了该矿石的难磨剥特性($t_a=0.36$ 属中等偏硬较难剥矿石、 $\mu=0.30>0.24$ 为高韧性矿石、 $W_{ib}=16.27$ kW·h/t 属中等偏硬矿石)，但在矿石软硬的判断上仍有区别($A \times b=67.89$ 属中等偏软矿石、 $f=R/10=11.88$ 属坚硬矿石)。在评价矿石碎磨特性及优化半自磨机钢球尺寸时，应进行综合考量。

(2)通过测定各粒级矿石的 E_{50} 可精确判别顽石粒级，该大型铅矿的顽石粒级为 -80+20 mm。

(3)实验室磨矿循环对比实验结果表明，综合考虑矿石碎磨参数后所计算的最大钢球直径更为精确，单一球径 $\Phi 130$ mm 中 +100 mm 充当自磨介质的矿石磨矿产品较选厂 $\Phi 120$ mm 钢球方案提高了 11.17 百分点，顽石-80+20 mm 含量降低了 1.67 百分点；混合球径 $m(\Phi 130$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1 的 +100 mm 充当自磨介质的矿石磨矿产品较单一球径 $\Phi 130$ mm

提高了 1 百分点，顽石-80+20 mm 含量降低了 3.41 百分点。半自磨机的最佳钢球方案为 $m(\Phi 130$ mm) : $m(\Phi 110$ mm)=1 : 1 时可在保留足够冲击能力的同时，提高碰撞频次，弥补单一球径磨剥能力不足的缺陷，有助于降低顽石积累，提高磨矿效率，从而达到节能降耗的目的。

参考文献：

- [1] A. GUPTA, D. S. YAN. Chapter 9 – autogenous and semi-autogenous mills[M]. Elsevier B. V., 2006.
- [2] 尤腾胜, 李兆峰, 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.
YOU T S, LI Z F, HE R Q. Research on the properties of hard stones in semi autogenous grinding systems and their impact on system capacity[J]. China Mining Engineering, 2023, 52(1): 72–77.
- [3] 肖庆飞, 王国强, 杨芳, 等. 半自磨顽石做中矿再磨介质的应用研究[J]. 矿产保护与利用, 2017(3): 32–36.
XIAO Q F, WANG G Q, YANG F, et al. Research on the application of semi autogenous grinding refractory stone as a medium for intermediate ore re grinding[J]. Mineral Protection and Utilization, 2017(3): 32–36.
- [4] 黄国智, 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: 47–51.
HUANG G Z, FANG Q X, REN X, et al. Fully and semi autogenous grinding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 47–51.
- [5] A. R. HASANKHOEI, M. MALEKI-MOGHADDAM, A. HAJI-ZADEH, et al. On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design[J]. Minerals Engineering, 2019, 141(C): 105835–105835.
- [6] VOGEL L, PEUKERT W. Determination of material properties relevant to grinding by practicable lab-scale milling tests[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74: S329–S338.
- [7] P. W. CLEARY, G. W. DELANEY, M. D. SINNOTT, 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] R. D. MORRISON, P. W. CLEARY. Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill[J]. Minerals Engineering, 2004, 17(11): 1117–1124.
- [9] P. W. CLEARY, R. D. MORRISON, G. W. 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.
- [10] 郜峰. 球磨机负荷监测软件平台的设计与开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
GAO F. Design and development of a ball mill load monitoring software platform [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [11] A GIBLETT, S MORRELL. Process development testing for comminution circuit design[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2016(4).
- [12] 谭文才, 刘俊, 夏林, 等. 给料粒度分布对半自磨机的影响[J]. 矿山机械, 2019, 47(11): 36–40.
TANG W C, LIU J, XIA L, et al. The influence of feed particle size distribution on semi autogenous grinding machines[J]. Mining Machinery, 2019, 47(11): 36–40.
- [13] 王越, 苏祥玉, 邓海轩, 等. 某铅矿快捷提高半自磨处理量的有效途径[J]. 矿冶, 2022, 31(2): 47–52.

- WANG Y, SU X Y, DENG H X, et al. An effective way to quickly increase the semi autogenous grinding processing capacity of a molybdenum mine[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(2): 47-52.
- [14] 国宏臣,肖庆飞,李云啸,等.基于离散元法的多级配球提高半自磨机磨矿效率研究[J].*矿产保护与利用*, 2023, 43(4): 60-67.
GUO H C, XIAO Q F, LI Y X, et al. Research on improving the grinding efficiency of semi autogenous mills by multi-stage ball matching based on discrete element method[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2023, 43(4): 60-67.
- [15] 谢浩松,肖庆飞,张志鹏,等.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 H S, XIAO Q F, ZHANG Z P, et al. Size optimization and discrete element simulation analysis of semi autogenous grinding steel balls in a gold mine in Yunnan[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2023, 43(1): 57-65.
- [16] 国宏臣,周强,肖庆飞,等.勒洛四面体与传统磨矿介质对料层冲击破碎特性的对比研究[J].*矿产保护与利用*, 2023, 43(5): 107-113.
GUO H C, ZHOU Q, XIAO Q F, et al. Comparative study on the impact crushing characteristics of material layers between Leluo tetrahedron and traditional grinding media[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2023, 43(5): 107-113.
- [17] SHI F, KOJOVIC T. Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 82(3): 156-163.
- [18] GROUP T & E C. From Single Particle Impact Behaviour to Modeling of Impact Mills[J]. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry –Plant Equipment –Process Engineering –Biotechnology*, 2005, 28(10): 1077.
- [19] 王国强,刘建远,朱阳戈,等.基于矿石碎磨特性的设备选型及能耗分析[J].*矿山机械*, 2022, 50(1): 29-33.
WANG G Q, LIU J Y, ZHU Y G, et al. Equipment selection and energy consumption analysis based on ore crushing and grinding characteristics[J]. *Mining Machinery*, 2022, 50(1): 29-33.
- [20] 周强,汪轶凡,肖庆飞,等.不规则铜钼矿颗粒断裂强度分布实验研究[J].*矿产保护与利用*, 2023, 43(4): 33-42.
ZHOU Q, WANG Y F, XIAO Q F, et al. Experimental study on the distribution of fracture strength of irregular copper molybdenum ore particles[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2023, 43(4): 33-42.
- [21] 周强,肖庆飞,潘永泰.挤压作用下脆性物料断裂强度分布研究[J].*中国矿业大学学报*, 2022, 51(6): 1086-1095.
ZHOU Q, XIAO Q F, PAN Y T. Research on the distribution of fracture strength of brittle materials under compression[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(6): 1086-1095.
- [22] L. M TAVARES, R. P KING. Single-particle fracture under impact loading[J]. Elsevier B. V., 1998.
- [23] 骆忠,肖庆飞,方雨,等.基于钢球与矿石碰撞能量确定半自磨机钢球尺寸的方法:CN115138447A[P], 2022-10-04.
LUO Z, XIAO Q F, FANG Y, et al. Method for determining the size of steel balls in semi-automatic mills based on the collision energy between steel balls and ores: CN115138447A[P], 2022-10-04.

Experimental Study on Medium Optimization and Reduction of Semi-Autogenous Grinding Hard Stone Accumulation Based on Grinding Parameters

WU Yukai^{1,2}, WANG Guoqiang^{1,2}, ZHU Yangge^{1,2}, ZHAO Zhiqiang^{1,2}, XIAO Qingfei³, LUO Sigang^{1,2}

1. Mining and Metallurgical Technology Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;

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

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

Abstract: In response to the problems of hard rock accumulation and limited production capacity improvement in a large molybdenum mine using a semi-autogenous mill, the modified Azzaroni formula was used to accurately calculate the optimal steel ball diameter. Various crushing and grinding parameters obtained through different testing methods and compression experiments to measure hard rock particle size were incorporated into this calculation. The rationality was verified through laboratory experiments. The research results indicated that: (1) The crushing and grinding parameters obtained by the three testing methods consistently highlighted the difficult grinding and stripping characteristics of the ore, though variations in describing the impact resistance of the ore were observed; (2) The hard rock particle size of the ore was determined to be $-80+20$ mm; (3) The optimal steel ball scheme for a semi-autogenous mill was a 1 : 1 mass ratio of 130 mm and 110 mm diameters. Using a single ball diameter of 130 mm with a 100 mm diameter as the self-grinding medium resulted in an 11.17% increase in production compared to the existing 120 mm ball diameter scheme in the selection plant, and a 1.67% decrease in the content of hard rock $-80+20$ mm. The content of $+100$ mm with a mixed ball diameter of 130 mm and 110 mm in a 1 : 1 ratio increased by 1% compared to a single ball diameter of 130 mm, while the content of hard rock $-80+20$ mm decreased by 3.41%. This verified the accuracy of the calculated maximum steel ball diameter and achieved better grinding results using the mixed ball diameter scheme.

Keywords: semi-autogenous mill; hard rock; drop weight test; bond ball mill work index; mechanical properties; steel ball diameter calculation; mixed ball size

引用格式: 武煜凯, 王国强, 朱阳戈, 赵志强, 肖庆飞, 罗思岗. 基于碎磨参数的介质优化及降低半自磨顽石积累实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 102-108.

WU Yukai, WANG Guoqiang, ZHU Yangge, ZHAO Zhiqiang, XIAO Qingfei, LUO Sigang. Experimental study on medium optimization and reduction of semi-autogenous grinding hard stone accumulation based on grinding parameters[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 102-108.

投稿网址: <http://kcbhy.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

作者简介:



武煜凯(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 现就职于矿冶集团选矿研究设计所, 主要从事碎磨理论与工艺研究; 主持矿冶集团青年科技创新基金项目 1 项, 参与在国家自然科学基金面上项目 1 项, 参与矿冶过程自动控制技术国家(北京市)重点实验室开放基金项目 1 项, 主持并参与企业委托技术开发项目 20 余项; 发表 EI 论文 1 篇, 获授权发明专利 1 项。

通信作者简介:



肖庆飞(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现任昆明理工大学国土资源工程学院副院长兼科学技术院副院长, 校首批明德“卓越学者”, 云南省“兴滇英才支持计划”产业创新人才, 云南省高校选择性磨矿提质降耗科技创新团队带头人, 主要从事碎磨理论及工艺研究; 主持国家自然科学基金面上/地区项目、自然资源部、安徽省/青海省/云南省重点研发计划等项目 11 项, 主持企业委托技术开发项目 66 项, 科研成果已成功产业化应用于 100 多个大中型矿山选厂; 发表论文 110 余篇, 出版 5 部教材及专著, 其中副主编《碎矿与磨矿》(第三版)为“十二五”普通高等教育国家规划教材; 获授权 16 项国家发明专利, 获省部级科技进步一、二等奖 6 项, 省部级教学成果一、二等奖 2 项。