



Improving the accumulation of semi-autogenous grinding mill hard stones of a copper–nickel ore in Xinjiang

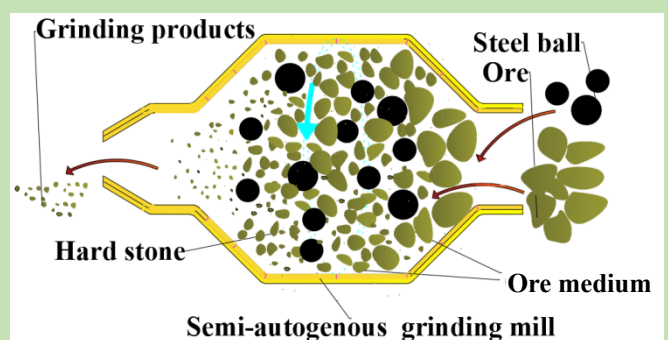
Qian ZHANG^{1,3}, Qingfei XIAO^{1,2,3*}, Xudong WANG^{1,3}, Sen YANG^{1,3}, Shuai MA^{1,3}

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

2. State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing 100070, China

3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract: Aiming at the problem that the semi-autogenous grinding mill of a copper–nickel ore in Xinjiang is seriously accumulated and the fineness of the grinding products is not up to standard, based on the determination of the mechanical properties of the ore, the fineness comparison of the semi-autogenous grinding mill grinding products was studied. In the method, the steel ball medium ratio was taken as a single variable, and the comparison test of the grinding index was carried out. The



discrete element method was used to verify the laboratory test conclusions. In the end, the optimal medium ratio scheme of the semi-autogenous grinding mill was determined as follows: $\phi 150:\phi 120=1:2$. The results showed that the average specific weight was 3.36 g/cm^3 , the average hardness coefficient was 7.93, the average static elastic modulus was $3.11\times 10^4\text{ MPa}$, the average poisson's ratio was 0.26, the ore was moderately hard as well as the ore with brittleness and toughness existed. Under the same grinding cycle conditions, the yield of 25~80 mm fraction of the hard stone grade gradually reduced in the recommended scheme of the semi-autogenous grinding mill. The plant scheme was reversed. After the three grinding cycles, the yield of 25~80 mm fraction of hard stone in recommended scheme was 4.19 percentage points lower than that in the plant scheme. The yield of three size fraction of +100, -2.5 and -0.074 mm were 0.25, 13.79 and 4.80 percentage points higher than that in the plant scheme respectively. Compared with the larger scheme, the recommended scheme showed better grinding ability as well. Under the same number of grinding cycles, the yield of 25~80 mm fraction of recommended scheme reduced by 3.36 percentage points, and the fineness of -0.074 mm increased by 2.24 percentage points. The sum of the normal energy utilization of the recommended 25~80 mm fraction was 56.19%, which was 1.82 and 2.30 percentage points higher than the plant scheme and the larger scheme respectively. The recommended scheme showed better hard stone crushing ability. The results of the simulation tests were consistent with the laboratory test results. Based on the comparison of the test results, the recommended scheme had obvious advantages. Ensuring the fineness of the grinding products was in a good level, the accumulation of hard stones was fully solved, which provided a method to learn for a similar problem for related factories and mines.

Key words: steel ball ratio; semi-autogenous grinding mill; hard stone accumulation; grinding product; fineness

收稿: 2019-11-14, 修回: 2020-01-03, 网络发表: 2020-02-06, Received: 2019-11-14, Revised: 2020-01-03, Published online: 2020-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51774157); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放研究基金资助项目(编号: 201707)

作者简介: 张谦(1993-), 男, 辽宁省铁岭市人, 硕士研究生, 矿物加工工程专业, E-mail: 2859380484@qq.com; 肖庆飞, 通讯联系人, E-mail: 13515877@qq.com.

引用格式: 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. 过程工程学报, 2020, 20(9): 1089–1096.

Zhang Q, Xiao Q F, Wang X D, et al. Improving the accumulation of semi-autogenous grinding mill hard stones of a copper–nickel ore in Xinjiang (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(9): 1089–1096, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219347.

改善新疆某铜镍矿半自磨机顽石积累

张 谦^{1,3}, 肖庆飞^{1,2,3*}, 王旭东^{1,3}, 杨 森^{1,3}, 马 帅^{1,3}

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. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100070

3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

摘 要: 针对新疆某铜镍矿半自磨机顽石积累严重, 磨矿产品细度不达标的问题, 在测定矿石力学性质基础上, 采用半自磨机磨矿循环的方法, 以钢球介质配比作为单一变量, 进行提高磨矿指标的磨矿对比研究, 并采用离散元方法验证实验结论, 最终确定半自磨机的最佳介质配比方案为 $\phi 150:\phi 120=1:2$ 。结果表明, 矿石比重平均值为 3.36 g/cm^3 , 硬度系数平均值为7.93, 弹性模量平均值为 $3.11\times 10^4\text{ MPa}$, 泊松比平均值为0.26, 矿石中等偏硬, 伴有脆性、韧性较大的矿石存在; 在相同磨矿条件下, 半自磨机的推荐方案顽石25~80 mm粒级产率逐渐减少, 现场方案反之。三次磨矿循环后, 推荐方案较现场方案25~80 mm粒级产率低4.19个百分点, +100, -2.5, -0.074 mm三个粒级产率分别提高了0.25, 13.79, 4.80个百分点; 与偏大方案相比, 推荐方案同样表现出较好的研磨能力, 在相同磨矿条件下, 三次磨矿循环后顽石25~80 mm粒级产率低3.36个百分点, -0.074 mm磨矿细度高2.24个百分点。推荐方案25~80 mm粒级法向碰撞能量利用率为56.19%, 较现场方案及偏大方案分别高1.82和2.30个百分点, 推荐方案较其他两个方案顽石破碎能力更好, 模拟仿真结果与实验结果一致。综合对比可知, 推荐方案具有明显的优势, 在保证磨矿产品细度维持在较好水平下, 充分解决了顽石积累的问题, 为相关厂矿同类问题提供可借鉴的方法。

关键词: 钢球配比; 半自磨机; 顽石积累; 磨矿产品; 细度

中图分类号: TD921+4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)09-1089-08

1 前 言

铜、镍作为重要的工业消耗品, 其需求量逐年增长。现阶段, 我国新疆地区铜镍矿产资源储量丰富, 但矿石结构复杂, 解离性差, 矿石利用率低, 还需长期依赖进口^[1-4]。磨矿作业是选别矿物的关键步骤, 强化磨矿作业过程可有效提升后续浮选作业选别效果, 对高效回收与利用铜镍矿资源具有重要意义^[5-8]。半自磨机是磨矿作业的核心设备, 因其固有的破裂机理而无法破碎某些尺寸的矿石, 这种尺寸级别称为临界尺寸, 通常在2~100 mm之间, 这部分矿石被称为顽石^[9], 根据现场调研, 确定新疆某铜镍矿选厂半自磨机顽石粒度范围为25~80 mm。顽石具有硬度高、难破碎且不具备磨碎其他矿石的特点, 通常在半自磨机内不断积累, 形成半自磨顽石积累现象。为了解决顽石积累占据半自磨机有效空间、恶化磨矿效果、降低磨机处理量等一系列问题^[10-12], 国内外学者在半自磨流程中增加了顽石处理作业。Triffett等^[13]、Markstrom^[14]和Li等^[15]在循环回路中增加顽石破碎机对顽石进行破碎, 有助于减少顽石含量, 提高磨机处理量。谭文才等^[16]和郑竞等^[17]指出以高压辊磨机作顽石破碎机, 有利于减小返回磨机的顽石粒度, 降低能耗。但增加工艺流程将直接提高选厂经济投入, 优化方案应

力求以最少的投入, 最大程度地提高经济效益。钢球作为半自磨机磨矿作业的重要实施载体, 主要作用对象为顽石, 可为磨碎顽石及其他粒级矿石提供适宜的冲击力及研磨力, 且其尺寸、配比等因素直接影响顽石及其他粒级矿石的解离行为能否发生, 对顽石及其他粒级矿石破碎情况优劣具有重要影响^[18,19]。因此, 改进半自磨机钢球介质尺寸及配比已成为强化矿物有效分离、改善顽石积累现象、增加选厂经济效益的一种有效方式。

新疆某铜镍矿半自磨-球磨-再磨磨矿系统有A、B两个系列, 由两台半自磨机、三台球磨机组成, 工艺流程如图1所示。目前, A系列用 $\phi 5.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ (5.5 m为半自磨机筒体直径, 1.8 m为半自磨机筒体长度)的半自磨机[沈阳重型机械集团有限责任公司(原沈阳重型机械厂)], 该半自磨机顽石积累严重、磨矿产品粒度特性差, 严重影响选厂生产效益。基于此, 本工作在不更改工艺流程的基础上, 对选厂A系列半自磨机钢球介质配比进行优化, 以期实现降低半自磨机顽石积累、提高磨矿指标及经济效益的目的。

2 实 验

2.1 实验材料

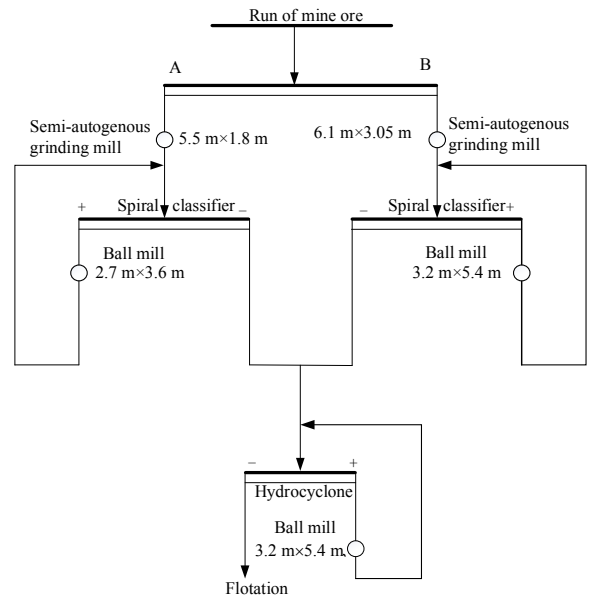


图 1 磨矿工艺流程图
Fig.1 Flow diagram of grinding process

实验材料取自新疆某铜镍矿, 为保证矿样具有代表性, 在各采矿点选取 6 块长、宽、高均约为 200 mm 的矿块, 供矿石力学性质检测使用; 在选厂取半自磨机给矿、排矿作为筛析矿样, 半自磨机给矿作为磨矿对比实验矿样。

2.2 实验方法

2.2.1 实验室磨矿对比实验

半自磨机内的顽石积累现象及磨矿效果与磨机工作变量参数有关, 当变量参数较多时, 为提高计算效率节省计算时间, 研究应着重考虑一种变量参数, 本实验以钢球介质配比作为单一变量。目前选厂用 $\phi 120$ (ϕ 为直径, mm)钢球介质配比方案, 因而, 选取 $\phi 120$ 钢球介质作为本次对比实验方案(现场方案)之一, 鉴于 $\phi 150$ 钢球是同类矿山半自磨机顽石处理的通用球径, 参考同类矿山钢球介质优化先进经验^[20], 采用 $\phi 150$ 作为对比实验方案(偏大方案)之一, 且基于在实验室模拟多组半自磨机磨矿实验操作性难度较大, 因此, 多级配球选择具有代表性的 $\phi 150:\phi 120=1:2$ 方案(推荐方案), 以上述三种典型的实验方案进行磨矿对比, 见表 1。

除钢球介质配比方案外, 其余实验条件根据现场实际生产情况确定, 并与现场实际生产保持一致, 实验条件见表 2。在前期准备工作基础上, 为进一步提高实验的准确性, 评测半自磨机内大块矿石实际磨碎情况, 判断顽石积累消除效果, 验证钢球介质配比的合理性, 需进行磨矿循环对比实验: 磨矿 60 min 后, 将-2.5 mm 粒

级矿石排出, 按原矿粒度比例加入实验减少的矿石量, 新加入矿石与+2.5 mm 粒级磨矿产品作为下一次磨矿循环原料, 再磨 60 min, 连续进行三次磨矿循环。实验结束后考察各方案的磨矿效果, +2.5 mm 磨矿产品进行干筛, -2.5 mm 取样 1 kg, 进行湿筛, -0.074 mm 矿样取 50 g 做水析, 对比各磨矿对比实验方案产品粒度组成, 确定最佳磨矿方案。

表 1 半自磨机磨矿方案对比
Table 1 Contrast of ball charge schemes of semi-autogenous grinding mill

Scheme	Ball ratio	Average diameter/mm
Plant scheme	$\phi 120$	120
Recommended scheme	$\phi 150:\phi 120=1:2$	130
Larger scheme	$\phi 150$	150

表 2 半自磨机实验条件
Table 2 Test conditions for semi-autogenous grinding mill

Test condition	Value
Type of mill/mm	$D\times L=450\times 450$
Weight of ore/kg	40.46
Weight of ball/kg	27.14
Working time/min	60
Transfer rate/%	75

2.2.2 模拟仿真实验

以该铜镍矿磨矿车间 $\phi 5.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 半自磨机为原型, 建立离散元法仿真模型。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, 模型见图 2。截取半自磨机 0.30 m 长度进行模拟, 仿真过程不计流体对仿真实验的影响。为更接近实际生产情况, 提高模拟仿真的精度, 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。同时, 将磨矿介质颗粒简化成球体, 其各特征尺寸取实际半自磨介质尺寸 150 和 120 mm, 因矿石多为不规则形状, 用多个规则的几何体合成一个不规则几何体, 具有代表性, 因而, 矿石颗粒采用粒度为 250, 200, 150, 100, 80, 45 和 25 mm 形成的不规则形状几何体表示, 模型见图 3, 主要模型参数见表 3。

3 结果与讨论

3.1 矿石力学性质分析

在磨矿过程中钢球与矿石间相互作用, 通过力学过程将矿石充分分离并磨至目标细度^[21]。因此, 制定合理的钢球介质配比还需对矿石力学性质进行测定分析, 结果见表 4。可以看出, 矿石平均比重为 3.36 g/cm^3 , 介于

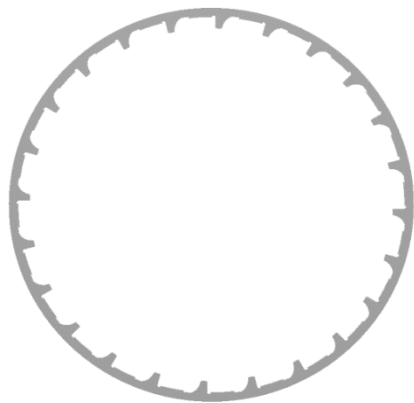


图 2 半自磨机筒体模型
Fig.2 Cylinder model of semi-autogenous grinding mill

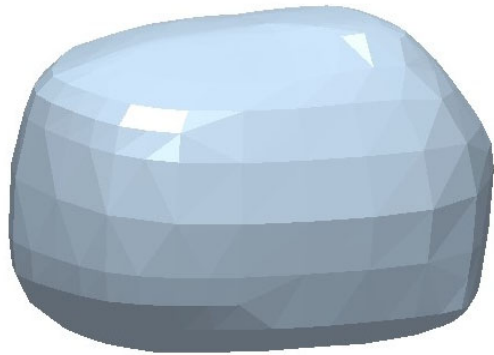


图 3 矿石颗粒模型
Fig.3 Ore particle model

表 3 颗粒模型参数

Table 3 Particle model parameters			
Particle model	Recovery factor	Coefficient of static friction	Coefficient of rolling friction
Steel ball-steel ball	0.70	0.20	0.01
Steel ball-ore	0.41	0.50	0.25
Ore-ore	0.35	0.56	0.05

2.5~4.0 g/cm³ 之间,属于中等比重矿石,易沉积,在磨矿分级循环中难以排出,随磨矿时间增加,未及时排出的合格粒级矿石与待磨矿石继续研磨,易加重过磨现象,影响磨机效率。根据公式 $f=\sigma_{\text{压}}/100$ [f 为普氏硬度系数, $\sigma_{\text{压}}$ 为单轴抗压强度(kg/mm²)] 进行 f 与 $\sigma_{\text{压}}$ 的数值关系转化,确定矿石平均硬度系数 f 为 7.93,表明矿石可磨

性较差、磨碎难磨性矿石需钢球提供的破碎力强度较大;矿石弹性模量平均值为 3.11×10^4 MPa,较脆性石灰石弹性模量大,表明矿石脆性偏大,矿石在外力作用下,直至破碎都无明显形状改变,而磨矿过程中球荷的冲击力和研磨力同时存在,此类矿石在冲击破碎的作用下磨碎效果较好;矿石泊松比平均值为 0.26,表明韧性偏大,矿石受到使其发生形变的力时抵抗能力较强,此类矿石在磨剥作用下具有较好的磨碎效果。矿石的力学性质作为研究钢球方案的重要依据,科学合理的制定钢球介质配比需综合考虑矿石间力学性质并非完全一致(如硬度大的难磨矿石、比重大的易过磨矿石、脆性及韧性伴生矿石)的情况下,矿石同时进入磨机时对磨矿产品的影响,减少磨矿效果差的现象。

表 4 矿石的力学性质测定结果

Table 4 The determination results of mechanical properties of ores							
Block number	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	Average
Specific weight/(g/cm ³)	3.06	3.05	3.23	3.16	4.56	3.11	3.36
Compressive strength, $\sigma_{\text{压}}/(\text{kg/mm}^2)$	753	699	1169	711	616	812	793
Static elastic modulus/ $\times10^4$ MPa	2.25	2.11	3.62	3.96	3.96	2.74	3.11
Poisson's ratio	0.30	0.26	0.24	0.26	0.22	0.27	0.26

3.2 半自磨机给矿及排矿粒度组成分析

半自磨机以矿石自身为介质,辅以 8%~10% 的钢球介质,通过对半自磨机给矿及排矿粒度组成进行筛析,考察矿石介质及钢球介质的工作情况,分析半自磨机顽石积累、磨矿产品粒度特性差的原因,结果如图 4 所示。可以发现,给矿-200 mm 粒级产率仅为 88.91%,表明半自磨机给矿粒度较粗,将给矿磨至合格粒度消耗的时间较长,钢球需提供的冲击力较大;给矿-100 mm 粒级产率为 69.73%,而+100 mm 粒级矿石可充当半自磨机矿石介质,磨矿过程中适当提高+100 mm 粒级矿石含量,

有利于提升矿石介质和钢球介质协同作用的磨矿效果;给矿 25~80 mm 顽石粒级产率占 27.69%,顽石级别占整体矿石比例偏高,钢球介质的主要作用对象为顽石,需充分发挥钢球介质的作用,阻止顽石在磨机内越积越多,避免顽石积累。排矿最大直径为 28.5 mm,粒度偏粗,表明半自磨机未能将粗粒矿石充分研磨;排矿-0.01 mm 粒级产率高达 3.10%,占-0.074 mm 粒级产率的 22.03%,粉矿等微细矿石含量较多,表明大量顽石存在于半自磨机中,磨矿机理由以冲击粉碎为主转变为以研磨、磨剥为主的细磨磨矿机理,加重粉矿产生的可能性。

综上, 钢球介质配比不合理是造成半自磨机顽石积累、导致磨矿产品粒度特性差的主要原因, 需对目前选厂应用的钢球介质配比进行优化改进。

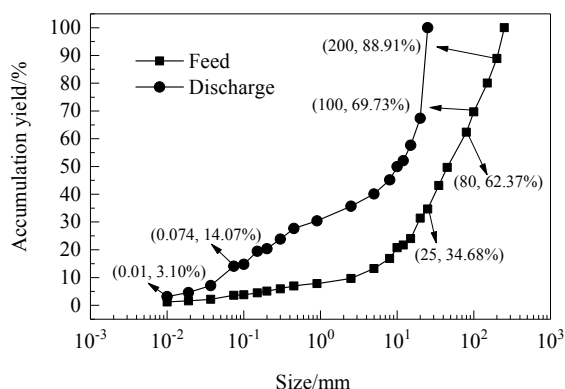


图4 半自磨机给矿及排矿粒度负累积曲线

Fig.4 Negative accumulation curves of semi-automatic grinding mill ore feed and discharge size

3.3 不同磨矿方案下半自磨机磨矿效果对比

实验过程是不连续磨矿过程, 现场生产是连续磨矿过程, 为使实验室实验结果与现场生产实际情况相吻合, 应进行多次磨矿循环实验, 且以最终(第三次)磨矿循环产品质量为考核标准, 为了对各方案磨矿产品质量作出较全面的评价, 选如下指标作为评判依据: +100 mm 粒级产率(%)评价矿石介质补充能力, 25~80 mm 粒级产率(%)评价磨机内顽石积累情况, -2.5 mm 粒级产率(%)评价合格粒子的生成情况, -0.074 mm 粒级产率(%)评价磨矿细度。

3.3.1 不同磨矿方案下矿石介质产率对比

对三种磨矿方案磨矿产品粒度组成进行筛析, 对比不同磨矿方案下矿石介质产率情况, 结果如图5所示。可以发现, 随磨矿循环次数增加, 推荐方案充当矿石介质的+100 mm 粒级产率逐次增多, 三次磨矿循环后, 达26.03%, 较现场方案高0.25个百分点, 表明前者较后者补充+100 mm 矿石介质的能力更强。与推荐方案相比, 偏大方案+100 mm 粒级产率逐次增高, 但增幅迅速减小, 在三次磨矿循环后, 矿石介质含量最低, 较推荐方案低4.78个百分点, 表明推荐方案优于偏大方案。这是由于偏大方案钢球平均直径及150 mm 钢球数量均高于推荐方案, 使粗粒级的粉碎率增加, 大量+100 mm 矿石进入磨机后因被磨碎而消耗掉, 导致其补充矿石介质的能力被严重削弱。同时, 根据磨矿动力学原理分析+100 mm 矿石的磨碎速率与研磨时间的变化规律可知, 矿石随磨矿次数增加越来越难磨。因而, 分别用推荐方案和

现场方案、推荐方案和偏大方案对比三次磨矿循环结果可知, 三个方案矿石介质+100 mm 粒级产率增长趋势将逐渐减小, 最终趋于稳定。综上, 为了减少矿石介质在半自磨机磨矿过程中的损失, 且不影响矿石介质对矿石的磨碎作用, 本实验应采用推荐方案作为最佳钢球配比方案。

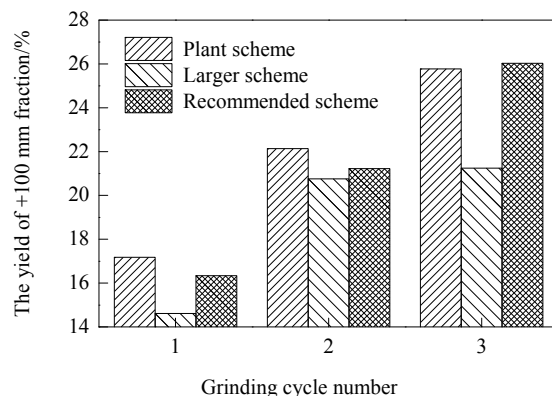


图5 三次磨矿循环产品中+100 mm 粒级产率

Fig.5 The yield of +100 mm fraction in products with three grinding cycles

3.3.2 不同磨矿方案下顽石产率对比

对不同磨矿方案磨矿产品粒度组成进行筛析, 对比不同磨矿方案下顽石产率, 结果如图6所示。可以发现, 推荐方案25~80 mm 顽石粒级产率逐次下降, 三次磨矿循环后顽石粒级产率最低, 降低至15.62%, 表明相同磨矿循环次数下, 推荐方案钢球配比合理, 钢球介质提供的能量能充分破碎顽石, 有效解决困扰半自磨磨矿过程的顽石积累问题; 与推荐方案相比, 三次磨矿循环后, 现场方案25~80 mm 顽石粒级产率高4.19个百分点, 这

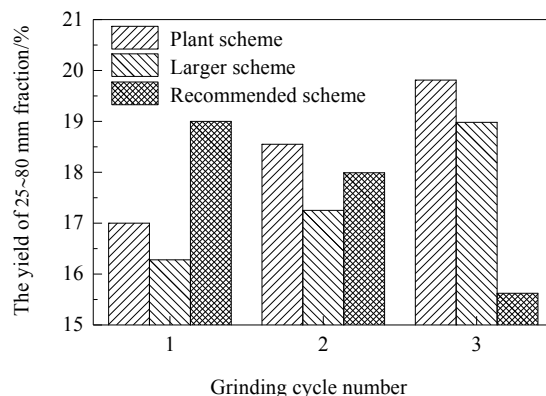


图6 三次磨矿循环产品中25~80 mm 粒级产率

Fig.6 The yield of 25~80 mm fraction in products with three grinding cycles

是由于现场方案钢球介质配比平均直径较小,介质直径小则冲击能量小,不能有效冲击粉碎顽石,且每次磨矿循环后顽石并未排出磨机外部,从而逐次累加使顽石粒级产率逐渐增多;与推荐方案相比,偏大方案 25~80 mm 顽石粒级产率逐次升高,三次磨矿循环后,顽石粒级产率高 3.36 个百分点,这是由于偏大方案矿石介质含量逐渐降低,暴露于磨机内的介质总量含量也逐渐减少,导致磨机磨矿效率偏低,造成顽石在磨机内不断积聚,顽石积累现象愈发严重。因此,本实验采用推荐方案为最佳钢球配比方案。

3.3.3 不同磨矿方案下合格粒子产率对比

对不同磨矿方案磨矿产品粒度组成进行筛析,对比不同磨矿方案下合格粒子产率情况,结果如图 7 所示。可以发现,三个磨矿方案-2.5 mm 粒级产率均逐次降低,由磨矿动力学原理可知,这是由于随磨矿循环次数增加,部分矿石表面裂纹呈逐渐减少的趋势,磨细矿石的难度逐渐增大,导致-2.5 mm 合格粒子产率逐次降低,且越粗的矿石这种现象越明显。三次磨矿循环后,半自磨机推荐方案合格粒子-2.5 mm 粒级产率显著高于其他方案,达到了 38.36%;与推荐方案相比,现场及偏大方案-2.5 mm 粒级产率分别低 13.79 个百分点、6.97 个百分点。表明推荐方案钢球介质与矿石表面作用时,可增加矿石表面裂纹出现的数量,降低磨细矿石的难度,弱化半自磨机磨矿产品合格粒级少的问题,提高了磨机产生合格粒子的可能性,将有效提高半自磨机磨矿产品合格粒子含量。因此,本实验应采用推荐方案作为最佳钢球配比方案。

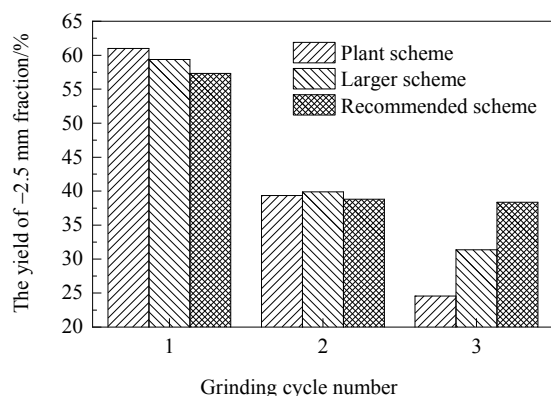


图 7 三次磨矿循环产品中-2.5 mm 粒级产率

Fig.7 The yield of -2.5 mm fraction in products with three grinding cycles

3.3.4 不同磨矿方案下磨矿细度对比

对不同磨矿方案磨矿产品粒度组成进行筛析,对比不同磨矿方案下磨矿产品细度情况,结果如图 8 所示。

可以发现,随磨矿循环次数增加,三个方案磨矿产品-0.074 mm 粒级产率均逐次降低,表明矿石难磨程度逐渐增加。三次磨矿循环后,推荐方案磨矿细度最高,为 20.42%,较现场方案高 4.80 个百分点,表明推荐方案更能有效磨碎矿石;与推荐方案相比,偏大方案-0.074 mm 粒级产率低 2.24 个百分点,这是由于偏大方案钢球介质直径大且个数少,则钢球介质与矿石的研磨面积较小,矿石受到的磨剥作用减小,不利于将矿石磨细;同时,由于偏大方案充当矿石介质的粒级产率低于推荐方案,造成待磨矿物破碎概率降低,产品中磨不细的粒级产率必然增大。因此,本实验推荐方案是最优的钢球介质配比方案。

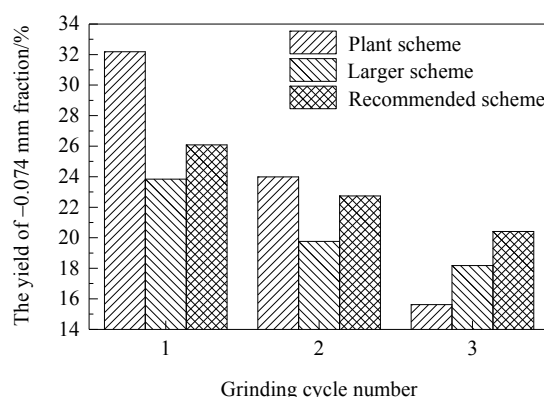


图 8 三次磨矿循环产品中-0.074 mm 粒级产率

Fig.8 The yield of -0.074 mm fraction in products with three grinding cycles

3.4 半自磨机钢球介质与矿石颗粒间碰撞行为分析

碰撞能量包含法向碰撞能量和切向碰撞能量,半自磨机钢球介质与矿石颗粒间主要通过相互冲击实现对矿石的破碎,而法向碰撞能量损失用于冲击破碎矿石,因而,本工作选择法向碰撞能量进行分析。磨机稳定运转后,取 13.08~16.35 s 时间段内钢球介质与矿石颗粒的法向碰撞能量分布情况,结果如图 9 所示。可以看出,磨机内发生的碰撞频次较多,主要集中在 10^{-6} ~ 10^{-5} J 低能量量级,且磨机内磨矿介质对矿石的碰撞次数随碰撞能量量级增加而减少,这是由于矿石发生 1 次碰撞破碎及约 2% 的碰撞产生累计破碎效应所需的能量位于高能量量级;同时,碰撞能量也随矿石粒度增加而减少,从而呈现出磨矿介质对 25~80 mm 矿石的碰撞次数多,与 +100 mm 矿石的碰撞次数少的趋势,这是由于磨机内大块矿石分布较少,小块矿石分布较多,矿石分布较多碰撞概率随之增加,碰撞频次也随之增加。通过对比不同磨矿介质的法向碰撞能量可以发现,不同磨矿介质对矿石的碰撞能量在 10^{-6} ~ 10^{-2} J 量级范围内的能量分布大致

相同,因而需要通过对比不同粒级法向能量利用率,评价不同磨矿方案磨矿效果的好坏。

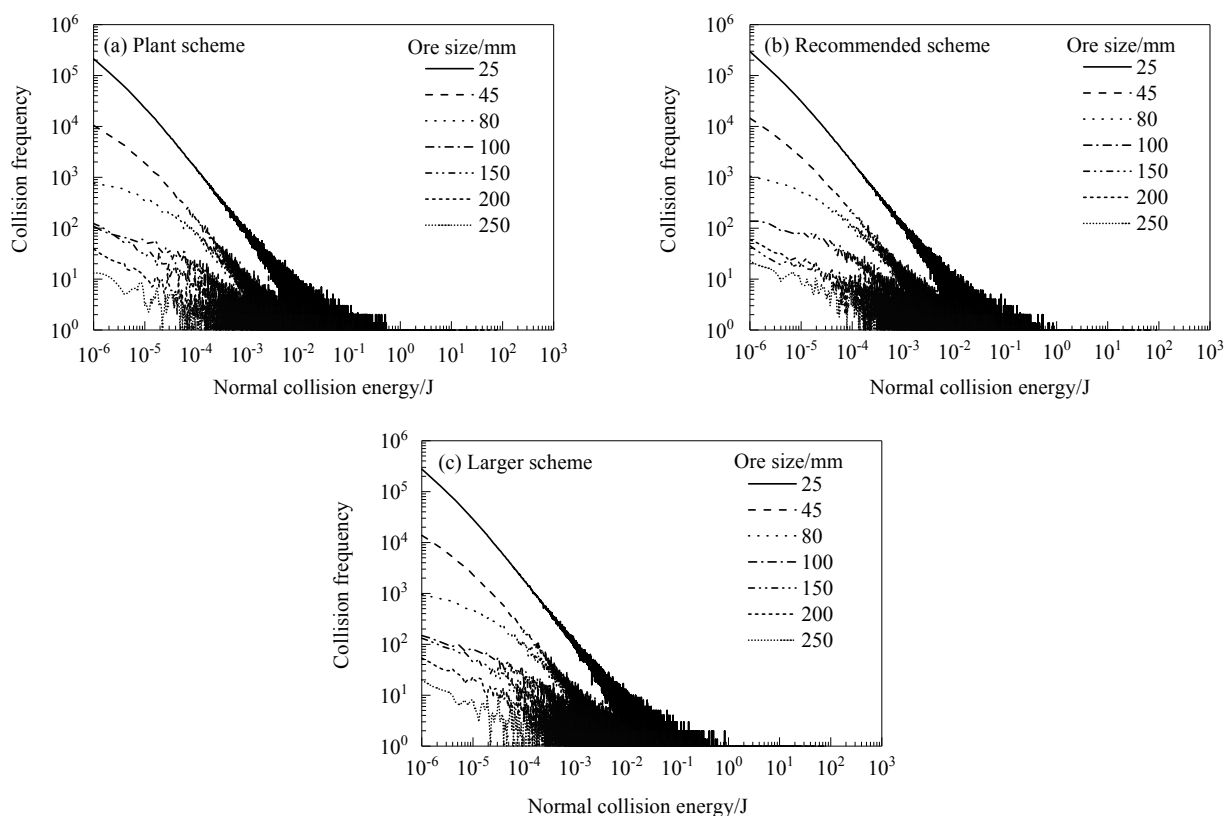


图 9 不同方案钢球介质与矿石的碰撞能量分布

Fig.9 Collision energy distributions between steel ball medium and ore in different schemes

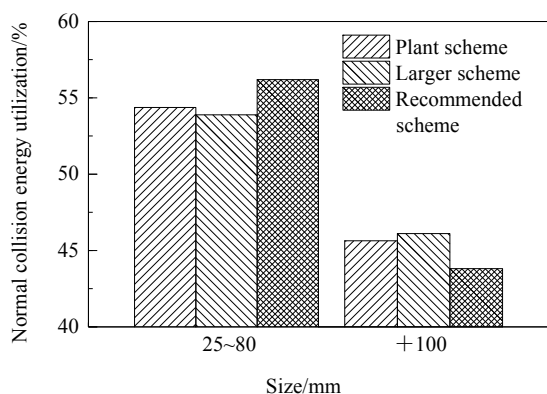


图 10 不同方案的法向碰撞能量利用率

Fig.10 Normal collision energy utilization of different schemes

不同方案的法向碰撞能量利用率如图 10 所示,可以发现,推荐方案 25~80 mm 粒级法向碰撞能量利用率为 56.19%,较现场方案及偏大方案分别提高了 1.82 和 2.30 个百分点,推荐方案+100 mm 粒级法向碰撞能量利用率为 43.81%,较现场方案及偏大方案分别低 1.82 和 2.30 个百分点。推荐方案较其他两个方案 25~80 mm 粒级法向碰撞能量利用率高,表明更多能量应用于顽石破

碎,表现出更好的顽石破碎能力,且可有效保护+100 mm 充当矿石介质的矿石在磨机中的含量,仿真分析结果与实验结果一致。

4 结 论

以钢球介质尺寸及配比作为研究对象,通过对原矿力学性质测定、现场矿样粒度筛析、磨矿对比实验、模拟仿真分析,探究改善介质配比对解决顽石积累问题的效果,得出如下结论:

(1) 该铜镍矿矿石中等偏硬、脆性及韧性较大,现有钢球介质配比方案未合理探究矿石性质对磨矿过程的影响,采用推荐方案 $\phi 150:\phi 120=1:2$ 作为半自磨机介质配比方案时,能充分降低半自磨顽石积累,取得良好的磨矿指标。

(2) 半自磨机推荐方案及现场方案+100 mm 粒级产率随半自磨机磨矿循环次数增加而不断增加,偏大方案逐次增高,但增幅逐渐减小,三次磨矿循环后,推荐方案较现场方案及偏大方案分别高 0.25 和 4.78 个百分点。

(3) 推荐方案 25~80 mm 顽石粒级产率随磨矿循环

次数增加呈下降趋势,现场及偏大方案反之,三次磨矿循环后,推荐方案 25~80 mm 顽石粒级产率较现场方案及偏大方案分别低 4.19 和 3.36 个百分点。

(4) 三个磨矿方案-2.5 mm 粒级产率随半自磨机磨矿循环次数增加而逐渐减少,但三次磨矿循环后,推荐方案-2.5 mm 粒级产率较现场方案及偏大方案分别高 13.79 和 6.97 个百分点。

(5) 三个磨矿方案-0.074 mm 粒级产率随磨矿循环次数增加而降低,三次磨矿循环后,推荐方案较现场方案及偏大方案分别高 4.80 和 2.24 个百分点。

(6) 推荐方案 25~80 mm 粒级法向碰撞能量利用率为 56.19%,较现场方案及偏大方案分别高 1.82 和 2.30 个百分点,推荐方案较其他两个方案表现出更好的顽石破碎能力,仿真分析结果与实验结果一致。

参考文献

- [1] 余良晖. 国内外镍资源供需格局分析 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(1): 155-162.
Yu L H. Supply and demand pattern analysis of nickel resources at home and abroad [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(1): 155-162.
- [2] Wang J B, Ju Y Y, Wang M X, et al. Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 146: 580-589.
- [3] 田尤, 杨为民, 申俊峰, 等. 中国铜资源产业形势分析及发展对策建议 [J]. 资源与产业, 2015, 17(4): 100-105.
Tian Y, Yang W M, Shen J F, et al. Situation and suggestions of China's copper resources industry [J]. Resources & Industries, 2015, 17(4): 100-105.
- [4] Zhang Y P, Zhao H T, Yu Y D, et al. Copper in-use stocks accounting at the sub-national level in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 147: 49-60.
- [5] Liu J, Long H, Corin K C, et al. A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores [J]. Minerals Engineering, 2018, 122: 339-345.
- [6] Farrokhpay S, Filippov L. Challenges in processing nickel laterite ores by flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 151: 59-67.
- [7] 赵敏捷, 方建军, 张铁民, 等. 响应曲面法优化某氧化铜矿硫化浮选 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(3): 532-538.
Zhao M J, Fang J J, Zhang T M, et al. Optimization of copper oxide by sulphidizing flotation based on response surface methodology [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(3): 532-538.
- [8] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿 [M]. 第 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 2-4.
Duan X X, Xiao Q F. Crushing and grinding [M]. 3th Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 2-4.
- [9] 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: 289-290.
Huang G Z, Fang Q X, Ren X, et al. Fully and semi autogenous grinding [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 289-290.
- [10] le Roux J D, Steinboeck A, Kugil A, et al. An EKF observer to estimate semi-autogenous grinding mill hold-ups [J]. Journal of Process Control, 2017, 51: 27-41.
- [11] 寇珏, 孙春宝, 刘洪均, 等. SABC 碎磨过程的模拟与优化 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(12): 1743-1747.
Kou J, Sun C B, Liu H J, et al. Simulation and optimization of the SABC comminution circuit [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(12): 1743-1747.
- [12] 杨世亮, 杨保东, 李隆德, 等. SABC 工艺在国内生产实践中的探索 [J]. 黄金, 2013, 34(3): 53-57.
Yang S L, Yang B D, Li L D, et al. Exploration of application of SABC process in domestic production practices [J]. Gold, 2013, 34(3): 53-57.
- [13] Triffett B, Veloo C, Adair B J I, et al. An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah copper bulk flotation circuit [J]. Minerals Engineering, 2008, 21: 832-840.
- [14] Markstrom S. Commissioning and operation of the AG mills at the Aitik expansion project [C]//International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology 2011. Vancouver: The Committee of International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, 2011: 62-75.
- [15] Li H J, Evertsson M, Lindqvist M, et al. Dynamic modeling and simulation of a SAG mill-pebble crusher circuit by controlling crusher operational parameters [J]. Minerals Engineering, 2018, 127: 98-104.
- [16] 谭文才, 刘俊, 姬建钢, 等. 高压辊磨机作为顽石破碎机的研究 [J]. 矿山机械, 2019, 47(6): 37-40.
Tan W C, Liu J, Ji J G, et al. Research on replacement of pebble crusher with HPGR [J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(6): 37-40.
- [17] 郑竞, 董节功, 张敏. 高压辊磨机用于顽石破碎作业的工艺研究 [J]. 矿山机械, 2018, 46(9): 37-42.
Zheng J, Dong J G, Zhang M. Study on technical feasibility of applying HPGR to pebble crushing [J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(9): 37-42.
- [18] 程旭, 武豪杰, 王泽红. 介质制度对磨矿过程影响的研究进展 [J]. 金属矿山, 2013, (9): 104-107.
Cheng X, Wu H J, Wang Z H. The research progress of effect on grinding media system on grinding process [J]. Metal Mine, 2013, (9): 104-107.
- [19] 杨福新. 半自磨机工作参数的优化研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013: 15-51.
Yang F X. Optimization research on the working parameters of half autogenous tumbling mill [D]. Changsha: Central South University, 2013: 15-51.
- [20] 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: 49-55.
Wang X J. Research on optimization of semi-self-grinding media for Wushan copper mine based on DEM [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 49-55.
- [21] 侯英, 印万忠, 朱巨建, 等. 不同碎磨方式下紫金山金铜矿石的磨矿动力学行为 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1127-1133.
Hou Y, Yin W Z, Zhu J J, et al. Grinding kinetic behaviors of Au-Cu ore from Zijinshan by different comminuting processes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1127-1133.