

云南某铅锌矿一段磨矿介质优化

杨芳, 朱从杰, 谢峰, 李博, 李秀

(昆明冶金研究院有限公司, 云南省选冶新技术重点实验室, 共伴生有色金属资源加压湿法冶金技术国家重点实验室, 云南 昆明 60031)

摘要: 对云南某铅锌矿石测定原矿力学性质、粒度组成并通过磨矿介质的对比实验来解决其一段球磨机处理量偏低、细度不达标、产品粒度组成不合理等问题。实验结果表明, 该矿石属于中硬偏软矿石, 软硬分布不均匀, 容重和韧性都偏高; 控制工艺参数与现场接近, 磨矿细度为 -0.074 mm 65% 时效果较佳; 采用 $\Phi 80\text{ mm}:\Phi 60\text{ mm}:\Phi 40\text{ mm}:\Phi 30\text{ mm}=20:25:25:30$ 钢球方案能提高磨矿效率和磨矿细度, 同时降低过磨粒级含量。

关键词: 铅锌矿; 球磨机; 球介质

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.005

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 02-0024-04

球磨机作为一种物料破碎设备, 处理量大、配置方便、维护简单等优势使其在国内外选矿行业得到广泛应用^[1-3]。研究人员经过大量的实验对比后发现, 在磨矿过程中, 对磨矿产品质量影响最大是磨矿介质制度, 其次才是充填率、磨矿浓度等^[4-5]。针对不同性质的矿石开展磨矿介质制度的研究能有效提高矿石的磨矿效果, 对相似类型矿石的磨矿具有重要意义^[6-8]。

云南某铅锌矿一段磨矿双系列选用 $\Phi 3.2\times 4.0\text{ m}$ 格子型球磨机与 2.4 m 双螺旋分级机构成闭路循环, 针对生产中存在磨机处理量偏低、磨矿细度不达标、磨矿产品粒度组成不合理等实际问题, 在实验室中开展了不同磨矿细度和介质配比的对比实验, 以探索到更为合适的磨矿介质制度来解决现场实际问题。

1 实验

1.1 实验取样

矿样取自云南某铅锌矿一段球磨机皮带给矿、排矿和螺旋分级机溢流、返砂, 取样三班, 每班均等间隔取样五次; 取长、宽、高均大于 250 mm 无明显裂痕且具代表性的原矿块进行矿石力学性质分析。

1.2 实验方法及内容

将矿样置于干燥通风环境下自然风干, 采用不同粒级筛网筛分, -2.5 mm 原矿采用堆积取对角法缩分, 再使用网格法取样筛分, -0.074 mm 矿样采用水析法分级, 整理记录数据。

在 $D\times L240\times 300\text{ mm}$ 的实验室不连续小型球磨机中进行对比实验, 装球 19.5 kg , 磨矿试样以皮带给矿与螺旋分级机返砂 $1:3$ 配矿 (按生产返砂比 300%), 每份试样 1.5 kg , 磨矿浓度为 50% 。

① 细度实验。选用现场生产使用的 $\Phi 80\text{ mm}:\Phi 60\text{ mm}:\Phi 40\text{ mm}=40:30:30$ 磨矿介质制度, 分别进行磨矿细度 (-0.074 mm) 为 60% 、 65% 、 70% 、 75% 的 4 组实验, 对磨矿产品筛分并整理记录数据。

② 配比实验。根据球径半理论公式, 结合矿石力学性质分析的结果, 计算出最大球径, 将 $+0.15\text{ mm}$ 待磨矿石按粒级含量重新分组并计算较佳磨矿介质配比见表 1, 制定实验所需四组方案见表 2。

$$D_b = K_c \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_e D_0}} d_f^{[9]}$$

式中: D_b —特定磨矿条件下给矿粒度 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 (%); $\sigma_{\text{压}}$ —岩矿单轴抗压强度 (kg/cm^2);

收稿日期: 2021-01-20

作者简介: 杨芳 (1993-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事选矿工艺研究及碎矿磨矿工作。

ρ_e —钢球在矿浆中的有效密度 (g/cm^3)； D_0 —磨内钢球“中间缩聚层”直径； d_f —磨机给矿 95% 过筛粒度 (cm)。

表1 球介质计算

Table 1 Calculation of ball medium				
级别/mm	给矿产率/%	扣除-0.15 mm后待磨产率 $\gamma_{\text{待}}$ /%	各组适宜球径/mm	推荐球比
-20+5	10.15	20.04	80	20
-5+0.45	12.32	24.32	60	25
-0.45+0.2	12.17	24.03	40	25
-0.2+0.15	16.03	31.64	30	30
-0.15	49.34	—	—	—
合计	100.00	100.00	—	100.00

表2 钢球配比实验方案

Table 2 Plans of ball ratio test		
方案	钢球配比	平均球径/mm
方案一	$\Phi 80\text{mm}:\Phi 60\text{mm}:\Phi 40\text{mm}=40:30:30$	62.0
方案二	$\Phi 80\text{mm}:\Phi 60\text{mm}:\Phi 40\text{mm}:\Phi 30\text{mm}=20:25:25:30$	50.0
方案三	$\Phi 80\text{mm}:\Phi 70\text{mm}:\Phi 50\text{mm}:\Phi 40\text{mm}=20:25:25:30$	58.0
方案四	$\Phi 70\text{mm}:\Phi 50\text{mm}:\Phi 40\text{mm}:\Phi 30\text{mm}=20:25:25:30$	45.5

在相同的设计磨矿条件下，分别对 4 组方案进行磨矿实验。将每种方案的磨矿产品+2.5 mm 进行严格的格筛筛分，-2.5 mm 缩分后取样 1 kg，然后进行套筛筛析及水析，记录整理数据。

2 结果与讨论

2.1 原矿力学性质

由表 3 可知，(1) 矿石容重偏差较大，平均容重为 $4.07 \text{ t}/(\text{g}\cdot\text{cm}^3)$ ，易沉积在磨矿分级循环中难以排出，产生过磨；(2) 矿石单轴抗压强度最大为 102.0 MPa，硬度较硬，最小为 22.0 MPa，非常软，且软硬分布不均匀，矿石平均单轴抗压强度 56.8 MPa，属于中等偏软矿石；(3) 泊松比平均值为 0.27，矿石总体表现较大韧性；(4) 该矿石磨矿过程中要考虑矿石容重大易离析，也要考虑

表3 原矿力学性质

Table 3 Mechanical property of ore				
原矿编号	单轴抗压强度/MPa	弹性模量 $10^5/(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2})$	泊松比	容重 $\text{t}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	46.3	2.43	0.33	4.35
2	22.0	1.70	0.27	4.33
3	102.0	3.02	0.22	3.52

少量矿块硬度大高韧性较难磨，还要兼顾特软矿石的存在，就必须在保证细度的情况下尽可能的避免过粉碎。

2.2 一段球磨粒度组成

根据选厂所取一段球磨机皮带给矿、排矿和螺旋分级机溢流、返砂的代表性试样，经筛分和水析处理后，具体数据见图 1~4。

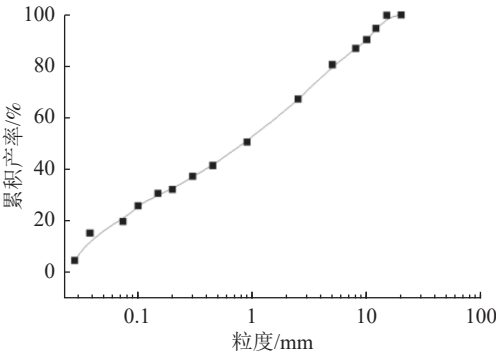


图1 给矿粒度负累积曲线

Fig.1 Passing accumulation curve of ore feed size

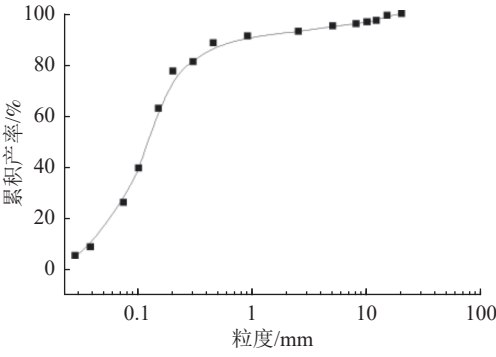


图2 排矿粒度负累积曲线

Fig.2 Passing accumulation curve of product size

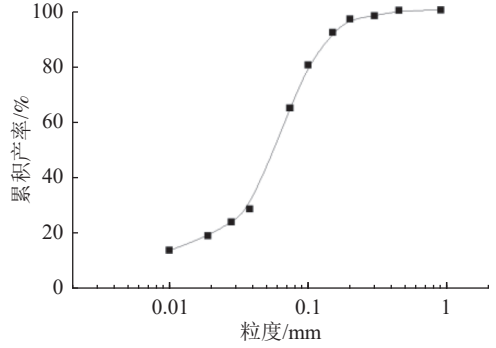


图3 溢流粒度负累积曲线

Fig.3 Passing accumulation curve of overflow size

由图 1~4 可知，(1) 磨机给矿 95% 过筛的最大粒度约 15.25 mm，-0.074 mm 15.08%，入料偏粗粉矿较多，矿石较软；(2) 返砂 95% 过筛的最

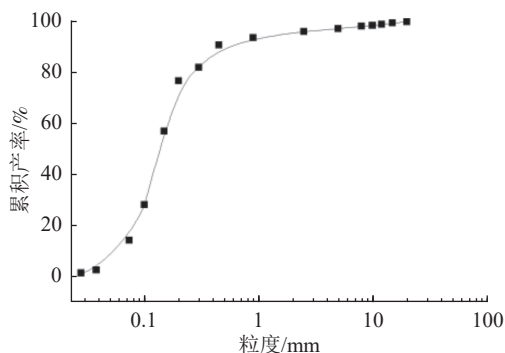


图4 返砂粒度负累积曲线

Fig.4 Passing accumulation curve of returned size

大粒度约 1.70 mm, -0.074 mm 14.50%, 但是 -0.15 mm (磨矿要求 -0.074 mm 70%, 相当于 0.15 mm 磨矿粒度) 含量高达 57.19%, 说明螺旋分级机分级效率偏低; (3) 溢流中 -0.01 mm 含量 13.59%, 过磨现象明显; (4) 返砂比 300% 计算的全给矿中 -0.074 mm 为 14.79%, 而排矿中 -0.074 mm 为 26.08%, 磨矿后新生成的 -0.074 mm 含量为 11.29%, 新生成合格粒级含量偏低。

2.3 磨矿对比实验结果

实验数据整理绘图, 使用如下表征评判各介质制度方案: ① $+0.15$ mm 粗粒含量, 判明球磨机待磨粒级剩余量 (%); ② $0.15 \sim 0.01$ mm 含量, 用于判明合格粒级含量 (%); ③ $0.1 \sim 0.028$ mm 产率判明球磨机磨矿产品中易选级别 (从该矿石浮选产品分析, 该粒级颗粒容易上浮) 生成情况 (%); ④ -0.074 mm 产率判明细磨能力 (%); ⑤ -0.01 mm 判明过粉碎情况 (%)。

2.3.1 细度实验

从图5可知, 随着磨矿细度的上升, $+0.15$ mm 产率逐步下降, -0.010 mm 产率逐步上升, $-0.15 \sim 0.010$ mm 中间可选级别含量也逐渐降低; (2) 随

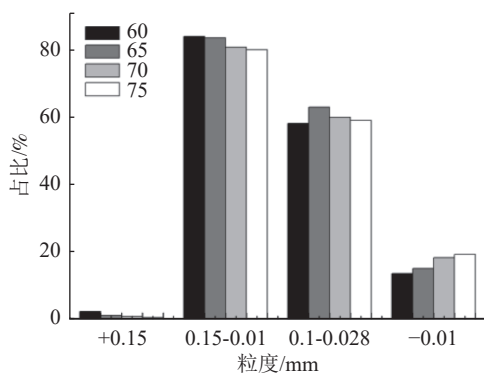


图5 磨矿细度实验结果

Fig.5 Result of grinding fineness test

着磨矿细度的上升, $-0.10 \sim 0.028$ mm 中间易选级别含量先上升后下降, 中间形成一个拐点, 以 65% 细度时最高, 此时磨矿综合效果较佳。

2.3.2 配比实验

从图6可知, (1) 方案一及方案三, $+0.15$ mm 不合格产率较推荐方案高, -0.074 mm 产率较低, 因此, 现厂方案及偏大方案应该舍弃。(2) 方案四, 中间易选级别 $0.10 \sim 0.028$ mm 产率最低, 其最大的好处在于 $+0.15$ mm 产率最小, 但相差不大。(3) 方案二, $+0.15$ mm 产率最低, 比方案一减少了 0.89 个百分点, -0.010 mm 产率较方案一降低 3.83 个百分点, -0.074 mm 含量提高 10.17 个百分点, 中间可选级别 $0.15 \sim 0.010$ mm 产率提高了 4.72 个百分点。综合各项指标, 推荐采用方案二。

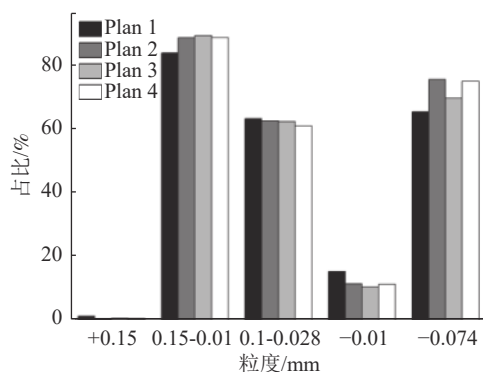


图6 磨矿介质配比实验结果

Fig.6 Result of grinding medium test

3 结 论

(1) 矿石平均容重为 4.16, 容重很大, 易沉积在磨矿分级循环中难以排出, 易产生过磨, 矿石平均普氏硬度系数 5.9, 软硬分布不均匀, 整体属于中硬偏软矿块, 矿石平均泊松比为 0.27, 总体表现为韧性较大。磨矿过程既要考虑矿石容重大易离析, 也要考虑少量矿块硬度大高韧性较难磨, 同时还要兼顾特软矿石的存在。

(2) 一段磨机给矿 95% 过筛的最大粒度为 15.25 mm, 粒度偏粗, -0.01 mm 含量 13.59%, 过磨现象明显, 以中间易选 $-0.10 \sim 0.028$ mm 级别含量为标准, 较佳磨矿细度确定为 -0.074 mm 65%, 介质配比的四个方案中, 综合各项指标采用方案二 $\Phi 80\text{mm}:\Phi 60\text{mm}:\Phi 40\text{mm}:\Phi 30\text{mm}=20:25:25:30$ 效果较佳。

参考文献：

- [1] Chen X S, et al. Constrained model predictive control in ball mill grinding process[J]. Powder Technology Lausanne, 2008.
- [2] 王泽红, 高伟, 刘高峰. 太钢尖山铁矿一段磨机介质优化研究[J]. 金属矿山, 2019, 519(9):107-111.
- WANG Z H, GAO W, LIU G F. Study on medium optimization of the first stage mill in Jianshan Iron Mine of TIGCO[J]. Metal Mine, 2019, 519(9):107-111.
- [3] 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 research on quality optimization of ball mills in Kalatong copper-nickel ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):100-105.
- [4] Markstrom S. Commissioning and operation of the AG mills at the aitik expansion project[C]International Autogenous And Semiautogenous Grinding Technology 2011. Canada: The Committee of International Autogenous And Semiautogenous Grinding Technology, 2011: 62-75.
- [5] 王晨晨, 黄朝德, 付金涛, 等. 青海某铅锌矿磨矿动力学实验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):59-61.
- WANG C C, HUANG C D, FU J T, et al. Experimental research on grinding kinetics for a lead-zinc ore in Qinghai[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):59-61.
- [6] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 139—169.
- DUAN X X, XIAO Q F. Gold Science and Technology [J]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 139-169.
- [7] 李炼, 戴思行, 王飞洋, 等. 改善赤铁矿磨矿效果的实验探索[J]. 矿产综合利用, 2019(1):61-65.
- LI L, DAI S X, WANG F Y, et al. Exploring of improving the grinding effects of hematite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):61-65.
- [8] 郭运鑫, 肖庆飞, 黄胤淇, 等. 提高永平铜矿一段球磨机磨矿效率的研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):135-138.
- GUO Y X, XIAO Q F, HUANG Y Q, et al. Research on raising the efficiency of ball grinding in one section of Yongping copper mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):135-138.
- [9] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 1989(4):9-11.
- DUAN X X. Theoretical Calculation of Ball Size for Ball Mill[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 1989(4):9-11.

Optimization Research about Primary Grinding Medium of Lead-Zinc Ore in Yunnan

Yang Fang, Zhu Congjie, Xie Feng, Li Bo, Li Xiu

(Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd, Yunnan Key Laboratory for New Technology of Beneficiation and Metallurgy, State Key Laboratory of Pressure Hydrometallurgical Technology of Associated Nonferrous Metal Resources, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: Mechanical properties and particle size composition of a lead-zinc ore in Yunnan were determined, and the problems such as low processing capacity of a section ball mill, substandard fineness and unreasonable particle size composition were solved through the contrast test of grinding medium. The experimental results show that the ore is medium hard and soft ore, with uneven distribution, and high bulk density and toughness. When the grinding fineness is 65% of -0.074 mm, the best effect is obtained. Plan of $\Phi 80\text{mm}:\Phi 60\text{mm}:\Phi 40\text{mm}:\Phi 30\text{mm}=20:25:25:30$ would improve grinding efficiency and grinding fineness, at the same time reduce the grinding grade levels.

Keywords: Lead-zinc ore; Ball grinding; Ball medium