

提高永平铜矿一段球磨磨矿效率的研究

郭运鑫¹, 肖庆飞¹, 黄胤淇², 王旭东²

(昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明, 650093)

摘要: 针对永平铜矿选矿厂一段球磨磨矿效率偏低的问题, 采用优化磨矿球荷特性的方法进行提高磨机处理量、-0.074 mm 利用系数和磨矿技术效率, 降低磨矿球耗的试验研究。实验室结果表明, 推荐介质制度 $\Phi 70:\Phi 60:\Phi 50:\Phi 30=30:20:25:25$ 与现场介质制度 $\Phi 80:\Phi 70:\Phi 60:\Phi 50:\Phi 40:\Phi 30=30:20:20:19:8:3$ 相比, 过粗粒级 $\gamma +0.20\text{mm}$ 低 47.07%, 磨矿细度 $\gamma -0.074\text{ mm}$ 高 3.96%; 将新的磨矿介质配比运用于工业试验, 优化后的 1[#] 球磨机与未优化的 2[#] 球磨机相比, 磨机处理量提高 1.1t/h, 磨机 -0.074 mm 利用系数及磨矿技术效率分别提高 5.29% 和 26.35%, 钢球单耗降低 6.51%, 达到了提高一段球磨磨矿效率的效果。

关键词: 磨矿效率; 球荷特性; 粒度; 磨矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.04.029

中图分类号: P618.45 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 04-0135-04

球磨机作为选矿厂关键的生产设备, 其材料和能源消耗的比例占选矿厂总成本的 45% 以上, 且其磨矿效率直接影响选矿厂的生产指标^[1-3]。磨矿效率的高低与磨矿介质配比有直接关系, 介质配比与矿石性质相适应时, 介质破碎力与矿石所需破碎的作用力较为匹配, 破碎所需能量最小, 磨矿效率最佳。江西铜业股份有限公司永平铜矿(下称“永平铜矿”)选矿厂碎磨系统为两个平行系列的常规三段一闭路破碎、两段闭路磨矿流程, 破碎产品 -9 mm 78% 以上, 一段溢流细度 -0.074 mm 60 ~ 70%, 再磨溢流细度 -0.045 mm 85% 以上。现有磨矿工艺参数是 80 年代根据当时情况确定, 当前矿石性质已发生较大变化, 自 2010 年以来, 随着露天转入凹陷开采, 井下开采矿石量逐年增加, 目前矿石硬度大大增加, 因此, 球磨机给矿的矿石物料性质有很大变化, 现有的磨矿介质制度不能满足生产的需要, 使磨机磨矿效率下降, 严重影响选矿厂生产^[4-5]。

1 试验

1.1 力学性质

试验矿石的主要力学性质见表 1。

表 1 试验样品主要力学性质

Table 1 Main mechanical properties of test sample

试验样品	密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度 (MPa)	平均强度 (MPa)	割线弹性模量 $E_{50}/10^4\text{MPa}$	E50 平均值 $E_{50}/10^4\text{MPa}$	割线泊松比 U_{50}	U_{50} 平均值
1 [#] 矿块	3.44	67.36	55.27	73.36	76.5	0.183	0.24
		42.40		57.83		0.268	
		56.06		98.31		0.275	
2 [#] 矿块	3.80	89.75	72.62	130.06	109.83	0.193	0.29
		63.14		100.69		0.337	
		64.94		98.74		0.34	
3 [#] 矿块	3.27	33.64	35.51	65.82	75.19	0.338	0.32
		38.67		67.38		0.335	

由表 1 可知: (1) 矿石密度平均值为 3.50 g/cm^3 , 密度较大, 在磨矿分级过程中需要注意离析现象;

(2) 由单轴抗压强度得出试验样品普氏硬度系数 f 的范围为 $3.36 \sim 8.98$, 平均值为 5.45, 属于中等偏软硬度矿石; (3) 矿石泊松比范围为 $0.183 \sim 0.337$, 平均值为 0.283, 属于韧性矿石。由试验样品的力学性质特点可以看出, 不同试验矿石的硬度及韧

收稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51774517), 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放研究基金专项资助 (201707)

作者简介: 郭运鑫 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为碎磨理论与工艺。

通信作者: 肖庆飞 (1980-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为碎磨理论与工艺, Email: 13515877@qq.com.

性差距较大，因此该矿石存在选择性磨矿现象，在试验室确定磨矿介质尺寸及比例时，要考虑到不同矿石力学性质的不同，即合理的磨矿介质制度才会有更好的磨机生产指标 [6-7]。

1.2 试验方法

根据矿石的力学性质及选厂磨机条件，计算出磨矿最大球径为 70 mm，制定的磨矿试验方案见表 2。选定磨机规格为 D×L 450 mm×450 mm，磨机内装钢球 100 kg，矿样 13 kg，介质充填率为 36.5%，磨机转速率为 75%，磨至磨矿产品 -0.074 mm 含量与现场相当 (65% 左右)，磨矿时间为 29 min，以各方案钢球配比进行磨矿试验，磨矿产品进行缩分，取样 1 kg 进行筛分，筛上矿样用标准套筛筛分其粒度组成，筛下矿样取 50 g 进行水析，最终得出各方案的粒度分布，进而计算各方案每个粒级之间的产率。

2 结果与讨论

2.1 实验室试验

表 2 磨矿试验方案
Table 2 Test schemes of ball mill

方案	介质配比	平均球径/mm
推荐方案	Φ70:Φ60:Φ50:Φ30=30:20:25:25	53.0
现场方案	Φ80:Φ70:Φ60:Φ50:Φ40: :Φ30=30:20:20:19:8:3	62.6
偏大方案	Φ80:Φ70:Φ60:Φ40=30:20:25:25	63.0
偏小方案	Φ60:Φ50:Φ40:Φ30=30:20:30:20	44.0

测定各磨矿方案磨矿产品的粒度组成，为了对各磨矿方案的优劣进行评判，选择如下几个评价指标：① $\gamma_{+0.20\text{ mm}}$ 为大于 0.20 mm 级别的含量，判别各方案磨碎粗粒的能力；② $\gamma_{-0.074\text{ mm}}$ 为小于 0.074 mm 级别的含量，判别各方案细磨能力；③ $\gamma_{-0.010\text{ mm}}$ 为小于 0.010 mm 级别的含量，判别各方案过粉碎情况。各方案磨矿指标综合比较见图 1。

由图 1 可知，(1) 偏大方案 +0.20 mm 粗粒级含量最高，-0.074 mm 粒级含量最低，说明偏大方案磨碎粗粒的能力和细磨能力都较差；(2) 偏小方案磨碎粗粒的能力与推荐方案相比偏

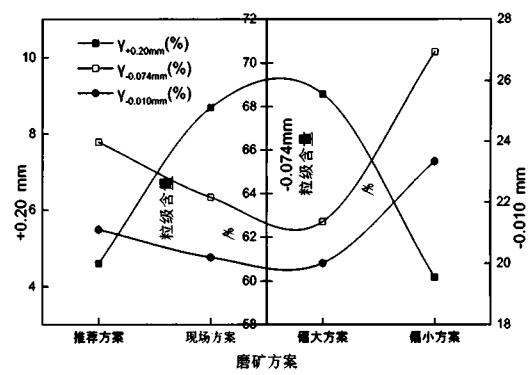


图 1 各方案磨矿效果综合比较

Fig. 1 Comprehensive comparison of the grinding effect of each scheme

低，但 -0.010 mm 过粉碎粒级含量比推荐方案高 10.62%；(3) 综合试验结果，偏大方案和偏小方案应该舍弃，最优的方案为推荐方案，其 +0.20 mm 粗粒级含量比现场方案低 47.07%，-0.074 mm 磨矿细度和现场方案相比高 3.96%。因此，推荐方案 Φ70:Φ60:Φ50:Φ30=30:20:25:25 为球磨机最优的磨矿方案。

2.2 工业试验

工业试验从 2016 年 6 月开始到 2017 年 2 月完成，对选厂 1# 磨机内钢球进行逐步替换，其中 2016 年 3 月至 4 月为试验前期，2016 年 6 月至 9 月为逐步替代期，2016 年 10 月至 11 月为试验期，2016 年 12 月至 2017 年 2 月为稳定期，对工业试验期间 1#、2# 磨机收集到的各项数据进行综合分析。

2.2.1 提高磨机处理量

工业试验各阶段 1# 及 2# 磨机处理量及旋流器溢流细度见图 2。

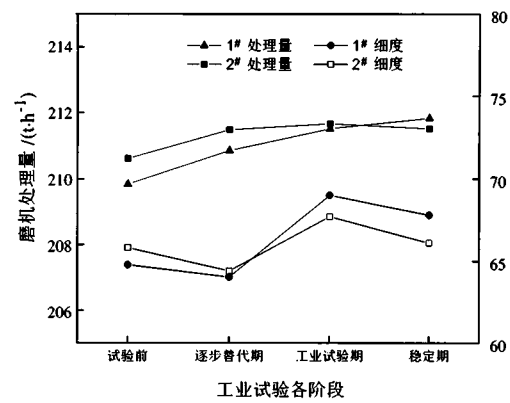


图 2 工业试验各阶段 1# 和 2# 磨机处理量及细度

Fig. 2 Milling capacity and fineness of 1# and 2# mills at various stages of industrial tests

由图2可知, 试验前, 1#磨机处理量与2#磨机相比低0.78 t/h, 在保证磨矿细度-0.074 mm不低于64%的前提下, 1#磨机处理量从逐步替代期到稳定期逐步提高, 由试验前的209.84 t/h提高到211.83 t/h, 提高了1.99 t/h, 相对2#磨机提高1.1 t/h; 在生产能力提高的同时, 1#磨机磨矿细度-0.074 mm由试验前低于2#磨机1.58%到稳定期高于2#磨机2.57%, 与试验前相比效果明显。

2.2.2 磨机 -0.074 mm 利用系数

在工业试验中, 1#及2#磨机唯一的变量是磨机内介质制度的不同, 因此1#及2#磨机的磨机-0.074 mm利用系数直接反映磨机内介质制度的不同对磨机磨矿效率的影响^[8]。工业试验各阶段1#、2#磨机-0.074 mm利用系数见图3。

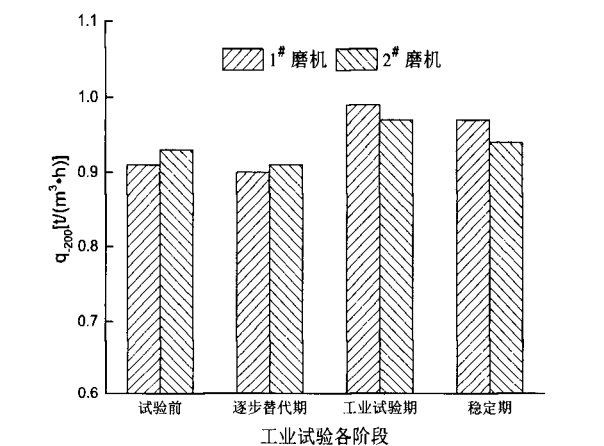


图3 工业试验各阶段1#及2#磨机-0.074 mm利用系数
Fig. 3 - 0.074 mm utilization factor for 1# and 2# mills at various stages of industrial tests

由图3可知, 1#磨机-0.074 mm利用系数从试验前到稳定期由0.91 t/(m³·h)提高到0.97 t/(m³·h), 提高了6.59%; 2#磨机-0.074 mm利用系数试验前为0.93 t/(m³·h), 试验后为0.94 t/(m³·h), 变化不大。且1#磨机-0.074 mm利用系数由试验前与2#磨机相比低2.20%到稳定期高3.09%, 相对提高5.29%, 整体来看, 1#磨机-0.074 mm利用系数有了明显的提高。

2.2.3 磨矿技术效率

1#、2#磨机试验前和试验期磨矿技术效率对比结果见图4。

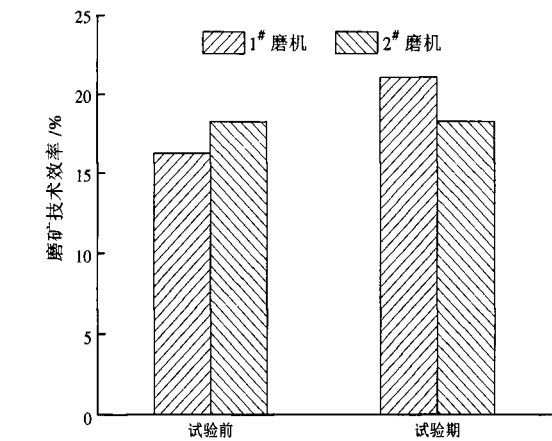


图4 1#及2#磨机试验前后磨矿技术效率
Fig. 4 Grinding technology efficiency before and after 1# and 2# mill tests

由图4可知: 推荐方案最大球径为70 mm, 相对于现场直径为80 mm的钢球来说, 对现场一段球磨粗粒级的磨碎效率更高, 且减轻了钢球的贯穿力, 减少了矿石的过粉碎^[9-10]。在试验前, 1#磨机的磨矿技术效率16.25%与2#磨机18.25%相比低10.96%, 经过逐步替代期到试验期, 2#磨机的磨矿技术效率为18.26%, 基本没有变化; 1#磨机的磨矿技术效率为21.07%, 与2#磨机相比提高15.39%, 说明新的磨矿介质制度明显提高了1#磨机磨矿技术效率。

2.2.4 磨机钢耗

工业试验各阶段粗磨球磨机单位钢球消耗见表3。

表3 工业试验各阶段粗磨球磨机介质单耗统计
Table 3 Media consumption statistics of coarse grinding ball mill at various stages of industrial tests

工业试验各阶段	钢球添加量/kg		原矿处理量/t		钢球单耗/(kg·t ⁻¹)	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#
试验前	168950	164520	137558.2	137477.99	1.228	1.197
逐步替代期	598500	603510	476804.79	493284.92	1.255	1.223
工业试验期	192024	202027	153988.98	155884.65	1.247	1.296

由表3可知: 新的球磨介质配比减轻了钢球的损耗, 试验前期1#磨机介质单耗1.228 kg/t比2#磨机1.197 kg/t高0.031 kg/t; 工业试验期1#磨机介质单耗1.247 kg/t比试验前期增加了0.019 kg/t, 比同期2#磨机1.296 kg/t低0.049 kg/t; 由于矿石可能变硬, 2#磨机单耗逐步增加, 工业试验后1#磨机介质单耗比2#磨机相当于降低0.08kg/t, 降幅为6.51%, 新的介质制度可显著降低单位球耗。

3 结 论

(1) 永平铜矿选矿厂的矿石普氏硬度系数 f 的范围为 3.36 ~ 8.98, 平均值为 5.45; 矿石泊松比范围为 0.183 ~ 0.337, 平均值为 0.283, 属于中等偏软硬度矿石且韧性较大。由矿石普氏硬度系数及泊松比范围可以看出, 不同矿石的硬度及韧性有较大的差距, 因此, 需精确磨机生产所需要的球径和球比。

(2) 根据球径半理论公式进行计算, 得到选厂 $\Phi 5.03 \times 6.4$ m 溢流型球磨机合理的磨矿介质尺寸配比 $\Phi 70:\Phi 60:\Phi 50:\Phi 30=30:20:25:25$ 作为磨机的推荐方案, 实验室试验结果表明, 推荐方案与现场方案相比, 过粗粒级 $\gamma +0.20$ mm 低 47.07%, 磨矿细度 $\gamma -0.074$ mm 高 3.96%, 推荐方案产品在磨矿细度提高的同时还降低了粗粒级含量, 说明推荐方案较现场方案粗磨效率有所提高。

(3) 工业试验结果表明, 1[#] 磨机采用新的补加球荷后与 2[#] 磨机相比, 磨机处理量提高 1.1 t/h, -0.074 mm 利用系数和磨矿技术效率分别提高 5.29% 和 26.35%, 钢球单耗降低 6.51%, 推荐方案与现场方案相比平均球径减少 9.6 mm, 在相同充填率的情况下研磨面积增大, 钢球个数增多, 矿物的破碎概率及生产率增大, 介质尺寸的减小还降低了磨矿介质之间及磨矿介质与衬板之间的冲击力,

磨矿介质单位能耗大幅降低, 因此, 合理的磨矿介质制度会有效提高球磨机粗磨磨矿效率。

参考文献:

- [1] 邓东锋. 某大型铜矿球磨机提高磨矿效率的实践研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2016(2):65-68.
- [2] 王国强, 肖庆飞, 王肖江, 等. 优化介质制度提高磨矿作业质量的试验研究 [J]. 黄金, 2017, 38(1):52-55.
- [3] 谢敏雄, 王宝胜. 三山岛金矿 MQG3.2m $\times$ 3.1m 球磨机高效运行的理论分析及综合评价 [J]. 国外金属矿选矿, 2009, 46(1):35-38.
- [4] Xiao Q, Kang H, Li B, et al. Optimization Study to the Ratio of Primeval Ball Loading in $\phi 4.0 \times 6.0$ m Overflow Ball Mill of Yingezhuang Gold Mine [J]. Aasri Procedia, 2014, 7:14-19.
- [5] 刘瑜. 柿竹园多金属矿 1500 吨 / 日选矿厂磨矿过程优化试验研究 [D]. 江西理工大学, 2015.
- [6] 郭万进. 提高霍各乞铜矿磨矿细度的实践 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2007(3):22-24.
- [7] 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, 42(9):104-107.
- [8] Zhang H, Liu J, Cao Y, et al. Effects of particle size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride[J]. Powder Technology, 2013, 246(3):658-663.
- [9] 刘青, 彭良振, 王宝, 等. 介质的尺寸和配比对球磨机磨矿粒度影响的研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2015(6):68-73.
- [10] 程旭. 一种新型异形介质对磨矿效果的影响研究 [D]. 东北大学, 2014.

Research on Raising the Efficiency of Ball Grinding in One Section of Yongping Copper Mine

Guo Yunxin ,Xiao Qingfei ,Huang Yinqi ,Wang Xudong

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of ball grinding in the first section of the dressing plant of yougping capacity of the mill, the utilization coefficient of -0.074 mm and the technical efficiency of grinding, and reduce the ball consumption of grinding by iptimizing the characteristics of grinding ball load. Laboratory results show when the recommended medium system is $\Phi 70: \Phi 60: \Phi 50: \Phi 30 = 30:20:25:25$ and the on-site medium system $\Phi 80: \Phi 70: \Phi 60: \Phi 50: \Phi 40: \Phi 30 = 30:20:19:8:3$, over-coarse-grain grade $\gamma +0.20$ mm low 47.07 percent points, grinding fineness $\gamma -0.074$ mm high 3.96 percent points. Industrial test results show, after adopting the new grinding ball charge characteristics, compared to unoptimized 2[#] mill, mill processing capacity is relatively increased 1.1t/h, -0.074 mm utilization factor and grinding technology efficiency is increased by 5.29 percent points and 26.35 percent points respectively, and steel ball unit consumption is decreased by 6.51 percent points, achieved the effect of improving the efficiency of one stage grinding.

Keywords: Grinding efficiency ; Ball charge characteristics; Granularity ;Grinding