

提高冬瓜山铜矿粗磨磨矿效率的对比试验研究

肖庆飞, 郭运鑫, 黄胤淇, 王旭东

(昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 针对冬瓜山铜矿粗磨产品细度及均匀性差, 磨矿技术效率和磨机利用系数低的问题, 以钢球、钢段、钢球+钢段(简称球段)介质方案进行磨矿对比试验。实验室结果表明: 推荐的介质制度与现场介质制度相比, 过粗粒级含量 $\gamma_{+0.15\text{mm}}$ 低 0.75 个百分点, 小于 0.074 mm 粒级含量 $\gamma_{-0.074\text{mm}}$ 高 6.74%, 磨矿技术效率及磨机 -200 目和 -100 目利用系数分别提高 2.17%、10.19% 和 1.84%; 钢段方案及球段方案磨矿产品粒度均匀性较差, 不适用于粗磨。因此, 推荐冬瓜山铜矿粗磨采用 $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$ 钢球介质配比方案, 可有效提高粗磨磨矿效率。

关键词: 磨矿介质; 粗磨; 磨矿效率; 铜矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.03.016

中图分类号: P618.45 文献标志码:A 文章编号: 1000-6532 (2020) 03-0100-05

磨矿在选矿厂中是重要的环节之一, 且其效率的高低直接影响选矿厂的生产指标^[1-2]。磨矿效率的判定主要体现在磨矿产品细度及均匀性和磨机利用系数等方面。而磨矿效率与磨矿介质形状、配比有直接关系, 不同形状磨矿介质会产生不同的力学行为, 不同的粒度特性, 因此有不同的磨矿效率^[3-4]; 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, 破碎所需能量小, 磨矿效率高^[5]。

安徽铜陵冬瓜山铜矿选矿厂原矿经粗碎后 -250 mm 进入 $\Phi 8.53\text{ m}\times 3.96\text{ m}$ 半自磨机中, 半自磨机产品经圆筒筛后分级, 筛下产物进入 $\Phi 660\text{ mm}$ 旋流器, 旋流器沉砂进入 2 台 $\Phi 5.03\text{ m}\times 8.3\text{ m}$ 溢流型球磨机进行粗磨, 粗磨设计分级溢流细度 -0.074 mm 70%, 现场只能达到 62% ~ 65%, 且粗粒级 +0.15 mm 含量及过粉碎粒级 -0.010 mm 含量

分别为 6.16% 和 18.95%, 产品粒度分布极不均匀, 对后续细磨及选别作业产生不利影响^[6]。因粗磨球磨机给矿 95% 过筛粒度仅为 4.24 mm, 与传统的粗磨给矿相比偏细, 细磨给矿相比偏粗, 因此, 在不改变选矿厂工艺流程的前提下, 对选矿厂磨矿介质制度进行优化。采用钢球、钢段、钢球+钢段 3 种介质及 3 种不同配比的磨矿介质进行磨矿试验, 分析各试验方案产品的粒度组成, 计算各方案的磨矿技术效率和磨机利用系数, 以便提高粗磨机的磨矿效率^[7-9]。

1 矿石性质

从冬瓜山铜矿采集块状矿石, 对其进行力学性质测定, 加工成的标准力学矿块试件的体积 (Vms)、质量 (Wms) 及容重 (UWms) 见图 1; 标准力学矿块试件的单轴抗压强度 (CSms)、割线弹性模量 (MEms) 及割线泊松比 (PRms) 见图 2。

收稿日期: 2019-05-13; 改回日期: 2019-05-27

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: 肖庆飞 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为碎磨理论与工艺。

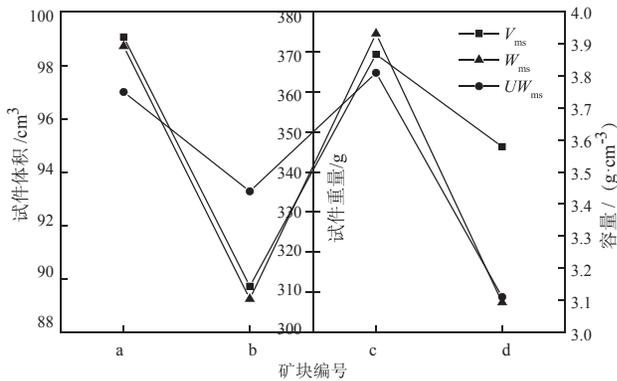


图1 矿块试件体积、质量及容重测定结果

Fig. 1 The volume, mass, and bulk density of specimens

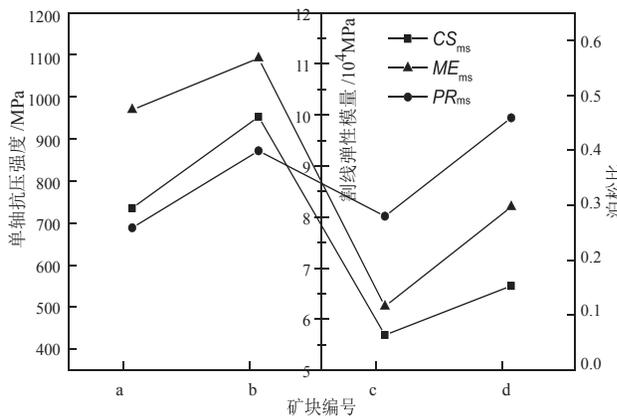


图2 试件单轴抗压强度、割线弹性模量及泊松比的测定结果

Fig. 2 Uniaxial compressive strength, secant elastic modulus, and Poisson's ratio of specimens

由图1和图2可知，(1) 尽管矿块大小和质量有所差别，但矿石容重最大值为 3.81 g/cm^3 ，最小值为 3.11 g/cm^3 ，平均值为 3.53 g/cm^3 ，在 $2.5 \sim 4 \text{ g/cm}^3$ 范围内，属于典型的中等密度矿石；(2) 由标准试件的单轴抗压强度可知，其普氏硬度系数 f 范围为 $4.34 \sim 9.53$ ，平均值为 6.68 ，为中等偏软硬度矿石；(3) 标准试件的割线弹性模量平均值为 $8.92 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，泊松比平均值为 0.349 ，为韧性较大矿石；(4) 总体分析可知，矿石较硬，韧性较大，对于较硬的矿石，需要足够的冲击力将其破碎，但破碎韧性较大的矿石则需要加强磨剥力。在确定磨矿方案时，要考虑矿石硬度及韧性两个因素的影响，以便确定更合理的研磨介质形状、尺寸及配比^[10-11]。

2 试验部分

2.1 试验材料

试验样品取自冬瓜山铜矿选矿厂 $\Phi 660 \text{ mm}$ 旋流器沉砂，样品重量 500 kg ，粒度组成见图3。

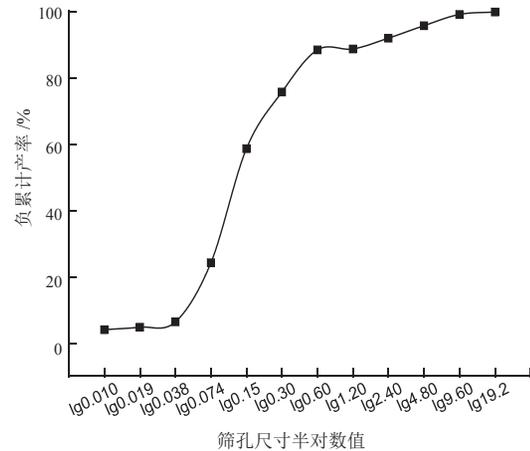


图3 粗磨给矿负累计粒度特性半对数曲线

Fig. 3 Semi-logarithmic curve of cumulative grain size characteristics of rough grinding

由图3可知，(1) 给矿95%过筛的最大粒度为 4.24 mm ，粒度较细，说明半自磨机有效减小了粗磨段磨机的入磨粒度；(2) 细度 -0.074 mm 及过粉碎 -0.010 mm 含量分别为 24.27% 和 4.03% ，细度较高，确定粗磨研磨介质制度时应尽量避免过粉碎；(3) $15 \sim 0.15 \text{ mm}$ 中间粒级含量为 41.31% ，这个粒级含量较高，应强化对该粒级的磨碎，尽可能保证该粒级磨至细粒级别中。

2.2 试验方法

试验采用规格为 $200 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ (直径 \times 长度) 的实验室湿式球磨机，磨机内装介质 14 kg ，矿样 1 kg ，介质充填率为 38.8% ，磨矿浓度为 78% ，磨机转速率为 75% ，磨矿产品 -0.074 mm 含量与现场相当 ($72\% \sim 73\%$)，磨矿时间为 7.75 min ，各磨矿方案见表1。磨矿产品进行筛分，筛上矿样进行筛析，筛下矿样进行水析，最终得出各方案的磨矿产品粒度分布。

表 1 磨矿试验方案

Table 1 Contrast of ball charge schemes of ball mill

方案	介质配比	平均球径 /mm
现场钢球方案	Φ 60:Φ 40:Φ 30=30:25:45	41.50
推荐钢球方案	Φ 60:Φ 40:Φ 30:Φ 25=25:15:25:35	37.25
钢段方案	50×60:40×50:35×40:25×30=25:15:25:35	43.00
球段方案 1	Φ 60:Φ 50:35×40:25×30=25:15:25:35	42.30
球段方案 2	50×60:40×50:Φ 40:Φ 30=25:15:25:35	43.00

3 结果与分析

为了直观的评判各方案的优劣, 选取以下评判指标: ① $\gamma_{+0.15\text{mm}}$ (%) 为 +0.15 mm 粒级产率, 判别各方案磨碎粗粒的能力; ② $\gamma_{-0.074\text{mm}}$ (%) 为 -0.074 mm 粒级产率, 判别各方案细磨能力; ③ $\gamma_{-0.010\text{mm}}$ (%) 为 -0.010 mm 粒级产率, 判别各方案过粉碎情况; ④ E 技 (%) 为磨矿技术效率, 其数值的高低可直接反映磨矿过程的好坏; ⑤ q_{-200} ($\text{t}/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) 和 q_{-100} ($\text{t}/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) 分别为磨机单位时间和单位体积产生的 -0.074 mm 粒级和 -0.15 mm 粒级的产量。

3.1 磨矿产品粒度均匀性

将磨矿产品中 $\gamma_{+0.15\text{mm}}$ (%)、 $\gamma_{-0.074\text{mm}}$ (%) 和 $\gamma_{-0.010\text{mm}}$ (%) 的粒级含量见图 4。

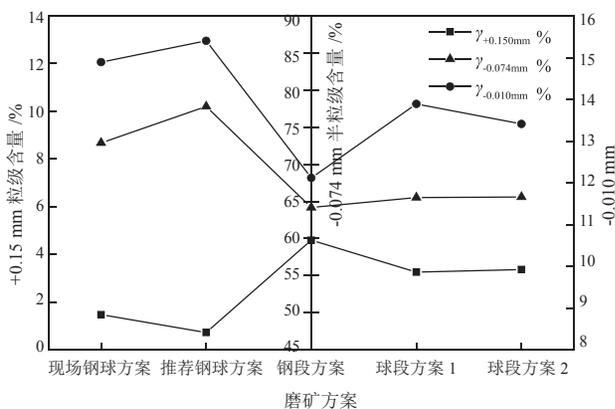


图 4 各方案磨矿效果对比

Fig. 4 Comparison of grinding effects of various schemes

由图 4 可知, (1) 在五个方案中, 钢段方案的 -0.010 mm 过粉碎粒级产率 12.12% 最低, 但

+0.15 mm 粗粒级产率最高, -0.074 mm 粒级产率最低, 说明钢段的磨碎粗粒及磨细矿物的能力都较差; (2) 现场方案与推荐方案相比 -0.010 mm 过粉碎粒级产率低 3.31%, 但 +0.15 mm 粗粒级产率高 0.75 个百分点, -0.074 mm 粒级产率低 6.74%; (3) 球段方案 1 和方案 2 的 +0.15 mm 粗粒级产率分别为 3.26% 和 3.27%, 比推荐方案高 2.53 和 2.54 个百分点; -0.074 mm 粒级产率分别为 65.53% 和 65.59%, 比推荐方案低 15.76% 和 15.68%; (4) 由此可知, 最优的方案为推荐方案 $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$, 其 +0.15 mm 粗粒级产率 0.73% 在所有方案中最低, -0.074 mm 粒级产率 77.79%, 在所有方案中最高。

3.2 磨矿技术效率

磨矿技术效率可以准确的从技术上评价磨矿过程的好坏, 是评价磨矿效率的重要指标 [1]。磨矿技术效率按公式 1 计算, 各方案磨矿技术效率对比结果见图 5。

$$E_{\text{技}} = \left(\frac{\gamma - \gamma_1}{100 - \gamma_1} - \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{100 - \gamma_2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 γ_1 — 待磨物料中小于粗粒级 (-0.15 mm 粒级) 含量; γ_2 — 待磨物料中小于过粉碎粒级 (-0.01 mm 粒级) 含量, γ — 磨机排矿中小于粗粒级 (-0.15 mm 粒级) 含量、 γ_3 — 磨机排矿中小于过粉碎粒级 (-0.01 mm 粒级) 含量。

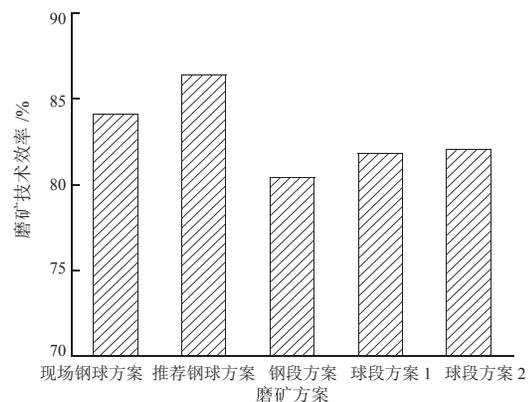


图 5 各方案磨矿技术效率

Fig. 5 Technical efficiency of each schemes

由图 5 可知, (1) 推荐方案磨矿技术效率

86.38% 较现场方案 84.10% 高 2.71%，说明推荐方案较现场方案更适合作为冬瓜山铜矿粗磨段的磨矿介质；（2）钢段方案的磨矿技术效率 80.43% 在五个方案中最低，比推荐方案低 7.40%，说明钢段在粗磨段的应用效果不如钢球，不能对粗磨段的矿物进行有效磨碎；（3）球段方案 1 和球段方案 2 的磨矿技术效率分别为 81.83% 和 82.07%，与钢段方案相比有所提高，说明加入部分钢球后磨矿效果有所提高，但与所推荐方案相比分别低 5.56% 和 5.25%，说明球段方案与推荐方案相比在冬瓜山铜矿粗磨段应用效果较差；（4）各方案的磨矿技术效率反映出在粗磨段，钢球可以更有效磨碎粗粒级并产生更多合格粒级，比钢段磨矿效果好^[12-13]。

3.3 磨机利用系数

磨机利用系数能消除磨机容积、给矿粒度及产品粒度的影响，以不同方案新生成的某个粒级的吨数来判断磨机工作的好坏^[14]。磨机利用系数按公式 2 计算，各方案磨机利用系数对比结果见图 6。

$$q_{-200} = \frac{Q \times (\gamma_2 - \gamma_1)}{V} \quad (2)$$

式中 q_{-200} — 磨机 -0.074 mm 利用系数； Q — 磨机每小时处理量，t/h； γ_1 和 γ_2 — 分别为磨机给矿和溢流中 -0.074 mm 粒级含量（本次试验表示实验室磨机给矿和排矿中 -0.074 mm 粒级含量），%； V — 磨机有效容积 $7.54 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

由图 6 可知，（1）各方案 q_{-200} 及 q_{-100} 变化规律是一致的，其中，钢段方案 q_{-200} 和 q_{-100} 分别为 $0.453 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $0.400 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ，在五个方案

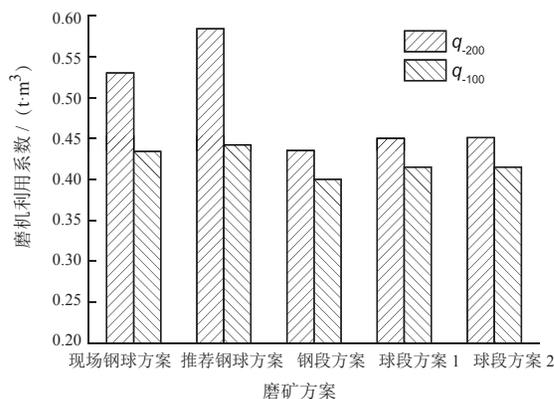


图 6 各方案磨机利用系数

Fig. 6 The utilization coefficient of grinding machine

中均最小，说明在应用钢段方案磨矿时，每小时每立方米磨机容积新生成 -200 目粒级及 -100 目粒级吨数均最小；（2）球段方案 1 和球段方案 2 的 q_{-200} 及 q_{-100} 相差不大，但与钢段方案相比有所提高，说明球段方案较钢段方案在同等条件下能生成更多的 -0.074 mm 粒级及 -0.15 mm 粒级；（3）推荐方案的 q_{-200} 值及 q_{-100} 值分别为 $0.584 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $0.442 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ，与现场方案 $0.530 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $0.434 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 相比，分别提高 10.19% 和 1.84%。

综上，采用 $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$ 配比，可有效提高冬瓜山粗磨效率，即可提高磨矿产品细度及均匀性、磨矿技术效率、磨机利用系数。

4 结 论

（1）由原矿块力学性质及球磨机给矿粒度组成的分析，计算出球磨机合理的研磨介质配比 $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$ 。

（2）钢段方案与球段方案在实验室粗磨段的磨矿效果较差，磨矿产品粒度均匀性和磨矿技术效率、磨机利用系数三个指标均较低，说明以线接触为主要施力方式的钢段并不适用于粗磨阶段。

（3）实验室试验结果表明，推荐方案与现场方案相比，+0.15 mm 粗粒级产率低 0.75 个百分点，-0.074 mm 粒级产率高 6.74%，磨矿技术效率提高 2.71%，磨机 -0.074 mm 粒级和 -0.15 mm 粒级利用系数分别提高 10.19% 和 1.84%，综合下来，采用 $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$ 配比。

参考文献：

[1] 肖庆飞, 王国强, 杨芳, 等. 提高球磨机粗磨效率的试验研究 [J]. 轻金属, 2017(4):1-3.
Xiao Q F, Wang G Q, Yang F, et al. Experimental Study on Improving Rough Grinding Efficiency of Ball Mill [J]. Light metals, 2017 (4) : 1-3.
[2] 李若兰, 庞建涛, 王灿霞, 等. 短圆柱型磨矿介质在胶磷矿磨矿工艺中的应用 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2015(1):80-82.
Li R L, Pang J T, Wang C X, et al. Application of Short Cylindrical Grinding Medium in the Grinding Process of Collophosphate Ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2015 (1) : 80-82.
[3] 张国范, 冯其明, 陈启元, 等. 铝土矿选择性磨矿中

- 磨矿介质的研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(4):552-556.
- Zhang G F, Feng Q M, Chen Q Y, et al. Study on Grinding Medium in Bauxite Selective Grinding [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2004, 35 (4) : 552-556.
- [4] 吴彩斌, 周意超, 程长敏, 等. 不同接触方式磨矿介质的钨矿磨矿动力学分析 [J]. 有色金属工程, 2016, 6(4):58-62.
- Wu C B, Zhou Y C, Cheng S M, et al. Dynamic Analysis of Tungsten Ore Grinding in Different Contact Media [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2016, 6 (4) : 58-62.
- [5] 李同清, 彭玉兴. 研磨介质形状对铁矿石磨矿动力学研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2018(1):84-89.
- Li T Q, Peng Y X. Study on the Shape of Grinding Medium on the Kinetics of Iron Ore Grinding [J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing, 2018 (1) : 84-89.
- [6] 侯英, 印万忠, 丁亚卓, 等. 不同破碎方式下产品磨矿特性的对比研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2014(1):5-8.
- Hou Y, Yin W Z, Ding Y Z, et al. Comparative Study on Grinding Characteristics of Products under Different Crushing Modes [J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing, 2014 (1) : 5-8.
- [7] Xiao QF, Kang HB, Song NP. Optimal research for the ratio of ball mill medium in Luanchuan molybdenum group CO. LTD [J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2014, 32(6) : 4617-4624.
- [8] 侯英, 丁亚卓, 印万忠, 等. 磨矿动力学参数对磨矿速度的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(5):708-711.
- Hou Y, Ding Y C, Yin W Z, et al. Effect of Grinding Kinetic Parameters on Grinding Speed [J]. Journal of Northeast University: Natural Science, 2013, 34 (5) : 708-711.
- [9] 邓禾淼. 冬瓜山铜矿提高半自磨机处理能力的生产实践 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2010(4):36-38.
- Deng H M. Production Practice of Improving the Processing Capacity of Semi-automatic Mill in Dongguashan Copper Mine [J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing, 2010 (4) : 36-38.
- [10] 钟晋, 郭永杰, 杜令攀, 等. 球磨机磨矿介质优化试验研究 [J]. 化工矿物与加工, 2016(5):28-30.
- Zhong J, Guo Y J, Du L P, et al. Experimental Study on Optimization of Grinding Medium for Ball Mill [J]. Chemical Minerals and Processing, 2016 (5) : 28-30.
- [11] 刘磊, 曹进成, 吕良, 等. 不同破碎方式下磨矿技术效率 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9):2565-2574.
- Liu L, Cao J C, Lv L, et al. Grinding Technology Efficiency under Different Crushing Modes [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (9) : 2565-2574.
- [12] 段希祥. 碎矿与磨矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012:134-139.
- Duan X X. Crushing and Grinding [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012:134-139.
- [13] 金弢, 李若兰, 郭永杰. 钢锻在磷矿磨矿中的应用研究 [J]. 化工矿物与加工, 2014(10):18-22.
- Jin T, Li R L, Guo Y J. Application of Steel Forging in Phosphate Ore Grinding [J]. Chemical Minerals and Processing, 2014 (10) : 18-22.
- [14] 王宝胜, 杨守斌, 高春国, 等. 三山岛金矿新立分矿选厂磨矿分级系统改造与应用 [J]. 黄金科学技术, 2010, 18(6):51-53.
- Wang B S, Yang S B, Gao C G, et al. Transformation and Application of Grinding Classification System in the New Separation and Concentrator of Sanshandao Gold Mine [J]. Gold Science and Technology, 2010, 18 (6) : 51-53.

Comparative Experimental Study on Improving the Grinding Efficiency of the Dongguashan Copper Mine

Xiao Qingfei, Guo Yunxin, Huang Yinqi, Wang Xudong

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

Abstract: In view of the poor fineness and uniformity of the coarse grinding products of the Dongguashan copper mine, the efficiency of grinding technology and the low utilization coefficient of the mill, the grinding comparison of the steel ball, steel section, steel ball + steel section (referred to as the ball section) medium scheme test. The laboratory results show that the recommended medium system is 0.75 percentage points lower than the coarse medium content $\gamma+0.15$ mm and less than 0.074 mm, the $\gamma-0.074$ mm high is 6.74%, the grinding technology efficiency and grinding. The utilization coefficients of the machine-200 mesh and -100 mesh were increased by 2.17%, 10.19% and 1.84%, respectively; the steel segment scheme and the ball segment scheme have poor particle size uniformity and are not suitable for rough grinding. Therefore, it is recommended to use the $\Phi 60:\Phi 40:\Phi 30:\Phi 25=25:15:25:35$ steel ball media ratio scheme for the coarse grinding of the Dongguashan copper mine, which can effectively improve the grinding and grinding efficiency. In this paper, the influence of grinding media on the grinding efficiency of the coarse grinding mill of the concentrator is studied. It has certain reference value and is recommended for acceptance.

Keywords: Grinding medium; Coarse grinding; Grinding efficiency; Copper mine