

优化冬瓜山铜矿磨矿产品粒度组成提高浮选指标研究

杨森^{1,3}, 肖庆飞^{1,2,3}, 康怀斌⁴, 马帅^{1,3}, 张谦^{1,3}, 王旭东^{1,3}

1. 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;
4. 铜陵有色集团控股有限公司冬瓜山铜矿, 安徽 铜陵 244031

中图分类号: TD921+.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)04-0070-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.07.003

摘要 针对冬瓜山入浮颗粒粒度较粗且粒度组成分布不合理问题, 基于磨矿产品的粒度分布及矿石力学性质对磨矿介质配比进行调整以优化入浮颗粒的粒度组成, 结果表明: 冬瓜山一段磨矿介质尺寸方案为 $m(\varphi 60) : m(\varphi 40) : m(\varphi 30) : m(\varphi 25) = 40 : 10 : 30 : 20$, 采用推荐方案可提高磨矿产品中 $-0.1 + 0.01$ mm 颗粒产率2.28%。推荐方案与现场方案磨矿产品经一粗两精两扫的浮选闭路对比试验, 推荐方案铜精矿回收率90.11%, 较现场方案提高1.34%, 精矿品位提高了0.94%。对浮选尾矿筛分并检测分析可知推荐方案磨矿产品在 $-0.1 + 0.01$ mm 颗粒中铜的回收效果优于现场方案, 利用推荐的介质配比方案优化磨矿产品粒度组成, 有效提高了冬瓜山选铜浮选指标。

关键词 磨矿; 粒度组成; 浮选

我国是铜资源消耗大国, 但同样是铜资源紧缺的国家, 对外依赖度超过60%, 所以对我国现有铜资源的综合利用尤为重要^[1]。磨矿是铜选别工艺中的重要环节, 磨矿产品粒度组成对浮选指标有着直接影响^[2-3]。入浮颗粒过粗, 有用矿物单体解离度不够, 无法得到有效选别, 会降低浮选精矿回收率及品位; 入浮颗粒过细, 导致磨矿产品泥化, 研究表明, 磨矿产品过细时主要脉石矿物蛇纹石以微细粒矿泥的形式吸附罩盖于较粗颗粒表面, 因表面电性差异从而导致了异相凝聚, 会阻碍了浮选药剂与黄铜矿的作用, 影响铜的上浮^[4], 不仅会增加磨矿作业能耗, 增加磨矿成本, 还会增大药剂用量, 影响最终精矿指标。通过优化介质配比强化磨矿作业选择性破碎作用, 可提高磨矿产品可选级产率, 大量实验研究和生产实践表明, 浮选回收率先随着磨矿产品细度增加而提高, 磨矿细度到达一定值后回收率会随着磨矿产品细度增加而降低, 故使磨矿产品粒度组成趋于合理能达到提高浮选回收率、精矿品位的目的^[5-8]。本文对冬瓜山铜矿磨矿作业进行介质配比优化, 以提高入选颗粒粒度组成均匀性, 进

而提升冬瓜山浮选指标及铜矿资源利用率, 提高经济效益。

冬瓜山铜矿采用一台半自磨加两台一段球磨和两台旋流器组成的磨矿循环系统, 溢流产品作为原矿进入浮选。但入浮原矿的粒度组成相比预期过粗且粒度组成分布不合理进而导致浮选指标达不到预期, 针对以上问题通过对一段磨矿作业的介质配比进行优化, 使磨矿产品粒度组成趋于合理, 以达到提高浮选指标的目的, 为冬瓜山铜矿选铜工艺提供技术支撑。

1 试验方案

1.1 矿石性质的测定

对冬瓜山不同采区矿石进行取样, 对样品容重、抗压强度、泊松比等力学性质进行测定, 为改善磨矿条件提供依据。选取一段磨矿球磨机进料对矿物相进行分析, 然后对现场浮选原矿中不同存在形式的黄铜矿在各个粒级的分布进行测定, 以确定入浮颗粒的适宜粒度组成。

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51774157); 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: 杨森(1995-), 男, 四川达州人, 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, 教授, 博士, 主要研究方向为碎磨理论与工艺, Email: 13515877@qq.com。

1.2 介质配比确定及磨矿对比试验

基于矿石性质对不同粒度矿石的适宜介质配比进行计算作为推荐方案,然后用推荐方案与现场方案进行对比试验,试样取自旋流器沉砂,对比试验在 $D \times L$ 350 mm \times 160 mm 的锥形球磨机中进行,装球 20 kg,磨矿质量浓度为 75%,每份试样 2.5 kg,最佳磨矿时间经探索试验确定为 15 min,对两组介质配比方案的磨矿产品粒度组成进行筛分测定。

1.3 浮选闭路试验

对介质配比方案磨矿产品进行一粗两精两扫的浮选闭路试验,试验药剂包括石灰、Z-200、丁基黄药、2#油、碳酸钠,试验在 XFD-0.75L 单槽浮选机中进行,两组试验条件一致,然后对浮选产品进行检测分析,对

表 2 矿物相分析结果

Table 2 Analysis results of mineral phase

Mineral facies	Chal copyrite	Pyrite	Magnetite	Serpentine	Talc	Uartz	Calcium iron garnet	Diopside
Content	2.11	4.59	3.40	5.83	2.16	6.58	22.59	12.00
Mineral facies	Calcite	Muscovite	Biotite	Plaster	Feldspar	Pyrrhotite	Other minerals	Total
Content	6.73	4.55	3.06	3.83	4.44	3.04	15.09	100.00

矿石主要以黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿和磁铁矿、钙铁石榴子石为主,其次为透辉石和石英、方解石、蛇纹石、白云母、黑云母、硬石膏、长石、滑石等。矿样中矿石种类较多,其中难磨矿石包括黄铜矿、石英等,易磨矿石包括蛇纹石、滑石、云母等。矿石种类较多且不同矿石可磨性不同,所以选择性磨碎不同矿石以增加待选矿物解离度显得尤为重要^[9-11]。

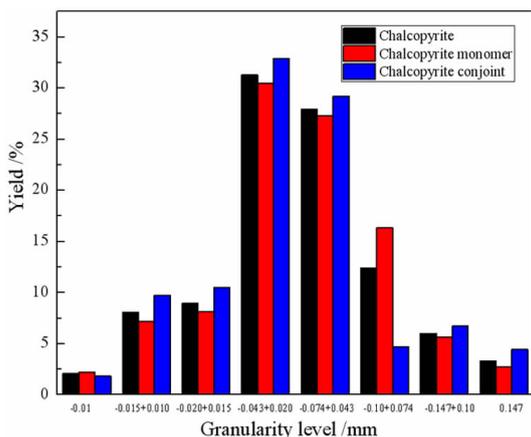


图 1 样品中黄铜矿在各粒级的分布

Fig. 1 Brass distribution in the samples

2.2 浮选原矿中黄铜矿的粒度组成

入浮原矿中黄铜矿的粒度组成与单体形式和连生

体形式存在的黄铜矿粒度测定结果见图 1。浮选尾矿进行粒度筛分、检测以查明两组磨矿方案黄铜矿在不同粒级损失程度,比较不同入浮颗粒粒度组成对浮选指标的影响。

2 结果与讨论

2.1 原矿的化学及物相组成

试样取自冬瓜山铜矿一段球磨机给矿,矿石多元素分析见表 1,矿物相分析见表 2。

表 1 矿石多元素分析结果

Table 1 Multi-element analysis results of run-of-mine ore

Element	Cu	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Content	0.795	21.62	9.89	30.89	3.98	15.90	4.53	0.92	0.24

体形式存在的黄铜矿粒度测定结果见图 1。

分析磨矿产品不同粒度分布中的黄铜矿含量可知,在 +0.10 mm 粒级中,黄铜矿的分布率为 9.30%。在 -0.010 mm 粒级中,黄铜矿的分布率为 2.07%,在 -0.10 + 0.010 mm 级别黄铜矿含量较高分布率高达 88.63%。现今冬瓜山浮选原矿细度仅为 70% 左右,黄铜矿的单体解离度为 66.06%,单体解离不充分。另外从黄铜矿在磨矿产品中分布特征可知,以连生体形式存在的黄铜矿的粒度与单体黄铜矿的粒度基本一致,都主要分布在 -0.10 + 0.010 mm 之间。所以,为更好地回收黄铜矿,原矿(溢流)样品还需要进一步细磨,并增加磨矿产品中 -0.10 + 0.010 mm 颗粒含量。

2.3 矿石力学性质

矿石是被细磨的对象,只有掌握了待磨矿石的力学性质,才能采取科学的操作条件,取得好的磨碎效果。对冬瓜山矿石进行力学性质分析,结果如表 3。

表 3 矿石主要力学性质

Table 3 Mechanical characteristics of rock

Mechanical Test weight properties $/(g \cdot m^{-3})$	Compressive strength $/(kg \cdot cm^{-2})$	Platts hardness coefficient (f)	Elastic Modulus $/(kg \cdot cm^{-2})$	Poisson's ratio (μ)	
Value	3.45	907.90	9.08	7.55×10^4	0.29

通过对矿石力学性质分析可知:矿石平均容重为 3.45 g/m³,属于中等容重较高矿石。矿石普氏硬度系数为 9.08,矿石属高硬度矿石。矿石弹性模量为 7.55 × 10⁴ kg/cm²,泊松比为 0.29,可知矿石韧性较高,属于高韧性矿石。通过对矿石力学性质测定,冬瓜山一段磨矿球磨机进料矿石容重较高且韧性大,在磨矿作业时应根据矿石性质调整介质制度以进行选择性磨碎,既要避免磨矿产品粒度过大也要避免过粉碎现象^[12-13]。

2.4 磨矿对比试验

球磨机介质尺寸及配比是影响磨矿的重要因素,因此要优化磨矿产品的粒度组成就需要计算出与矿石性质相匹配的钢球尺寸及配比,目前国内常用的是段希祥教授的球径半理论公式^[14]:

$$D_b = K_c \cdot \frac{0.5224}{\Psi^2 - \Psi^6} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_c D_0}} \cdot d_f \quad (1)$$

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/cm²); ρ_c - 钢球在矿浆中的有效密度 (g/cm³); D_0 - 磨内钢球“中间缩聚层”直径; d_f - 磨机给矿 95% 过筛粒度 (mm)。

本试验采用该公式来确定球磨磨碎 8 mm (最大给矿粒度为 8 mm) 给矿所需的精确球径。根据冬瓜山铜矿矿石性质及磨机参数可知, $d_f = 8$ mm; $K_c = 1.28$; 由 $\delta_i = 3.45$ 及磨矿浓度 $R = 75\%$ 求得 $\rho_n = 1.99$, $\rho_c = 5.81$; D_0 按公式计算得 $D_0 = 4.06$; 再根据矿石力学性质,按抗压强度及修正系数计算可求得 $D_b = 55.6$,取 60 mm 作为最终确定的最大球径。

表 4 一段球磨初装球比计算表

Table 4 The ball milling ball loading ratio in the first stage

Level /mm	Mineral yield /%	Yield after deduction -0.10 mm/%	Suitable ball diameter for each group/mm	Recommended ball ratio /%
+0.45	30.93	42.55	60	40
0.45~0.30	8.03	11.05	40	10
0.30~0.15	20.76	28.56	30	30
0.15~0.10	12.98	17.86	25	20
-0.10	27.31	—	—	—
Total	100.00	100.00	—	100.00

运用该公式,通过待磨粒级粒度分布,由表 4 可确定一段磨矿介质尺寸方案,得出基于冬瓜山铜矿力学性质得出推荐磨矿介质尺寸方案为 $m(\varphi 60)$: $m(\varphi 40)$: $m(\varphi 30)$: $m(\varphi 25)$ = 40 : 10 : 30 : 20,将推荐方案与现场方案 $m(\varphi 80)$: $m(\varphi 60)$: $m(\varphi 40)$ = 30 :

40 : 30 进行对比试验,磨矿产品粒度组成分布如图 2。

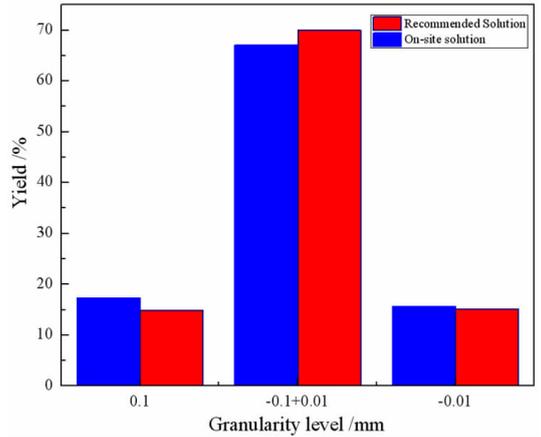


图 2 磨矿产品粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of grinding products

对磨矿产品筛析可得:推荐方案 -0.074 mm 产率为 73%,现场方案 -0.074 mm 产率为 70%,表明推荐方案可明显提高磨矿产品细度。由图 2 可知:推荐方案比现场方案 +0.1 mm 过粗粒级较现场方案降低 2.5 个百分点,过粗粒级含量降低,可减少铜在过粗粒级的损失。磨矿产品中 -0.1 + 0.01 mm 产率推荐方案比现场方案高 2.28%,磨矿产品 -0.1 + 0.01 mm 颗粒产率的提高是磨矿产品质量提升的直接体现。过粉碎级别 -0.01 mm 产率推荐方案比现场方案低 0.56%。由于现场方案相较于推荐方案钢球介质直径大且个数少,则钢球与矿石间的研磨面积较小,矿石受到的磨剥作用减小,不利于将矿石磨细,故试验推荐方案制度比现场方案更适合冬瓜山一段磨矿,推荐介质方案可有效优化冬瓜山磨矿产品的粒度组成。

2.5 浮选闭路试验

将两组磨矿介质配比方案的磨矿产品进行与现场浮选流程药剂制度相同的闭路浮选试验,浮选闭路试验流程见图 3,对浮选产品检测分析,结果如表 5。

表 5 浮选产品指标

Table 5 Flotation product index

Test plan	Products	Yield /%	Grade /%	Recovery rate /%
On-site solution	Concentrate	4.99	17.40	88.77
	Tailing	95.01	0.116	11.23
	Raw ore	100.00	0.98	100.00
Recommended Solution	Concentrate	4.88	18.34	90.11
	Tailing	95.12	0.103	9.89
	Raw ore	100.00	0.99	100.00

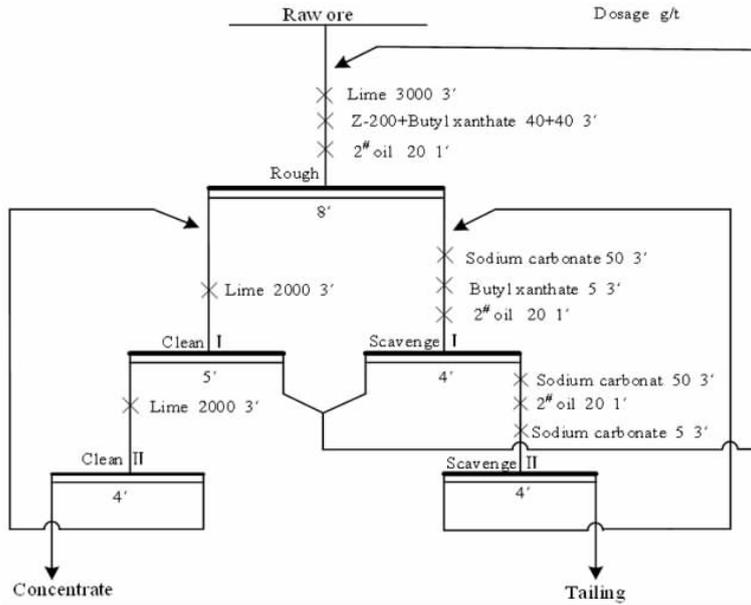


图 3 浮选闭路流程
Fig. 3 Closed circuit of flotation

由表 5 可知,推荐方案回收率为 90.11%,现场方案为 88.77%,推荐方案高出现场方案 1.34%,推荐方案铜精矿品位比现场方案高 0.94%,表明通过优化磨矿产品粒度组成可有效提高浮选回收率及铜精矿品位。

对两组方案的尾矿进行粒度筛分及铜金属量分析查明铜在不同粒级的分布率,以探明优化磨矿产品粒度组成对浮选指标影响的原因。结果如表 6。

表 6 尾矿铜分布

Table 6 Copper distribution in tailings

Test plan	Products	Yield /%	Grade /%	Copper distribution /%	Relative raw copper loss rate/%
On-site solution	Tailings +0.10 mm	17.05	0.219	31.64	3.55
	-0.01 + 0.10 mm	67.50	0.083	47.48	5.33
	-0.01 mm	15.45	0.16	20.95	2.35
	Total	100.00	0.118	100.00	11.23
Recommended Solution	Tailings +0.10 mm	14.92	0.166	24.28	2.40
	-0.01 + 0.10 mm	69.75	0.080	54.71	5.41
	-0.01 mm	15.33	0.14	21.04	2.08
	Total	100.00	0.102	100.00	9.89

由表 6 可知:(1)推荐方案尾矿中 +0.10 mm 粗粒级含铜品位比现场方案低 0.053%,相对于原矿铜损失较现场方案低 1.15%,且推荐方案粗粒级产率较现场方案小,有助于铜回收率增加;(2)推荐方案尾矿中 -0.10 + 0.01 mm 中间粒级铜分布率较高,主要是产率较大达 69.75%,但铜品位较现场方案低,说明推荐

方案中间粒级回收效果较好;(3)推荐方案尾矿中 -0.01 mm 过细粒级相对于原矿铜损失率较现场方案低 0.27%,证明降低 -0.01 mm 过细粒级产率可有效降低铜在微细粒级的损失。(4)通过对两组方案尾矿分析可知,推荐方案回收率提高主要原因在于:通过对磨矿产品粒度组成优化后使铜在 +0.1 mm、-0.01 mm 过粗、过粉碎粒级损失减少,即在 -0.10 + 0.01 mm 中间粒级铜回收增加。

3 结论

(1)通过对冬瓜山铜矿矿石性质分析,冬瓜山铜矿物相较为复杂;冬瓜山铜矿属于高韧性矿石,较为难磨。

(2)通过矿石力学性质以及给矿粒度特性确定冬瓜山铜矿一段磨矿介质尺寸方案为 $m(\varphi 60) : m(\varphi 40) : m(\varphi 30) : m(\varphi 25) = 40 : 10 : 30 : 20$ 。磨矿对比试验结果表明,推荐方案较现场方案提高磨矿产品 -0.1 + 0.01 mm 级别 2.28%, -0.074 mm 级别产率提高 3.1%,在提高细度的同时增加了中间级别产率。

(3)通过优化磨矿产品粒度组成均匀性可提高浮选回收率 1.34%,提高铜精矿品位 0.94%。对尾矿铜金属分布分析可得,推荐方案在 -0.1 + 0.01 mm 级别铜损失率比现场方案低 3.38%,证明优化入浮原矿粒度组成可有效提高冬瓜山铜矿浮选指标。

参考文献:

[1] 周平.新常态下中国铜资源供需前景分析与预测[D].北京:中国地

- 质大学(北京), 2015.
- [2] 苏敏, 窦培谦, 张瑞洋, 等. 谦比希铜矿中铜矿物的解离特性及其可浮性研究[J]. 金属矿山, 2019(4): 105 - 110.
- [3] 王素, 齐向红, 田江涛, 等. 河北省某铜尾矿综合回收试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(3): 113 - 117.
- [4] HOSSEINI, FORSSBERG. Studies on selective flotation of smithsonite from silicate minerals using mercaptans and one stage desliming[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2011, 120(2): 79 - 84.
- [5] 蒋婷婷, 熊巍. 江西地区铜矿工艺矿物学特征及选矿影响因素研究[J]. 中国金属通报, 2019(10): 70 - 72.
- [6] 薛季玮, 姚金, 唐远, 等. 粒度对蓝辉铜矿与黄铁矿浮选分离特性的影响[J]. 金属矿山, 2018(8): 73 - 78.
- [7] 汪太平, 肖庆飞, 李博. 冬瓜山铜矿一段磨矿产品粒度组成优化研究[J]. 矿产保护与利用, 2014(4): 22 - 26.
- [8] 康怀斌. 大山选厂浮选回收率与磨矿产品粒度均匀性的多元线性回归模型及应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [9] 杨金林, 莫凡, 周文涛, 等. 选择性磨矿研究概述[J]. 矿产综合利用, 2017(5): 1 - 6.
- [10] 王翠花, 支永勋, 李学忠. 选择性磨矿在萤石矿选矿工艺中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2013, 42(6): 37 - 39.
- [11] 邓禾森, 康怀斌, 肖庆飞. 改善冬瓜山铜磨矿效果提高铜回收率的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(1): 65 - 68.
- [12] 王改荣, 杨洪英, 佟琳琳, 等. 赞比亚卢安夏氧化铜矿工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 350 - 355.
- [13] 肖庆飞, 康怀斌, 张红华, 等. 优化球荷特性提高磨矿产品粒度均匀性的研究[J]. 矿产保护与利用, 2015(5): 25 - 28.
- [14] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 1 - 5.

Research on Optimizing Particle Size Composition of Grinding Products of Dongguashan Copper Mine to Improve Flotation Index

YANG Sen^{1,3}, XIAO Qingfei^{1,2,3*}, KANG Huaibin⁴, MA Shuai^{1,3}, ZHANG Qian^{1,3}, WANG Xudong^{1,3}

1. Provincial and Ministry Jointly Establish National Key Experiments for Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Kunming 650093, China;

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

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

4. Tongling Nonferrous Group Holding Co., Ltd. Dongguashan Copper Mine, Tongling 244031, China

Abstract: In order to solve the problem of coarse and unreasonable particle size composition distribution in Dongguashan, the particle size composition of floating particles was optimized by adjusting the proportion of grinding medium based on the particle size distribution of grinding products and the dynamics properties of ores. The results showed that the size scheme of one stage of grinding media in Dongguashan is $m(\varphi 60) : m(\varphi 40) : m(\varphi 30) : m(\varphi 25) = 40 : 10 : 30 : 20$. The yield of $-0.1 + 0.01\text{mm}$ particles in grinding mineral products could be increased by 2.28% used the recommended scheme. Compared with the recommended scheme and the field scheme experienced flotation closed circuit test with one rough and two fine sweeps, the recovery rate of copper concentrate used recommended scheme was 90.11%, which was 1.34% higher than that of the field scheme. And the concentrate grade used recommended scheme was 0.94% higher than that of the field scheme. According to the screening and detection analysis of the flotation tailings, the recovery of copper in $-0.1 + 0.01\text{mm}$ particles of grinding minerals in the recommended scheme was better than that in the field scheme. The recommended medium ratio scheme was used to optimize the particle size composition of grinding minerals, which effectively improved the flotation index of copper in Dongguashan.

Key words: grinding; particle size composition; flotation

引用格式: 杨森, 肖庆飞, 康怀斌, 马帅, 张谦, 王旭东. 优化冬瓜山铜磨矿产品粒度组成提高浮选指标研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 70 - 74.

Yang S, Xiao QF, Kang HB, Ma S, Zhang Q and Wang XD. Research on optimizing particle size composition of grinding products of Dongguashan copper mine to improve flotation index[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(4): 70 - 74.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn