

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2022.02.007

SLon-500 磁选机分离细粒铜钼混合精矿研究

张铂华¹, 邵延海¹, 熊 涛^{1,2}, 曾剑武¹,杨若瑜³, 孙培春¹, 官长平¹, 陈禄政¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 赣州金环磁选设备有限公司, 江西 赣州 341000;

3. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674400)

摘 要:针对黄铜矿与辉钼矿可浮性相近,易混合浮选,但分离浮选困难且药剂消耗大、生产成本低这一技术难题,在前大量研究工作基础上,提出“脉动高梯度磁选预选—浮选分离”细粒铜钼混合精矿的思路。介绍了 SLon-500 立环脉动高梯度磁选机使用新型优化磁介质预选分离细粒铜钼混合精矿的研究成果。结果表明,针对铜、钼品位分别为 26.18% 和 0.34%、-0.043 mm 占 84.28% 的细粒铜钼混合精矿进行分选,可以获得产率为 45.46%、含钼 0.076%、铜品位为 30.15% 和铜回收率为 52.34% 的铜精矿和产率 54.54%、铜品位 22.87%、钼品位 0.56% 和钼回收率 89.85% 的钼粗精矿,分离效果优异。研究成果为“脉动高梯度磁选预选—浮选分离”细粒铜钼混合精矿新技术工艺的工业化应用奠定了重要基础,有利于提高我国钼资源的开发利用水平。

关键词:SLon 立环脉动高梯度磁选机;黄铜矿;辉钼矿;铜钼分离

中图分类号:TD952 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-9492(2022)02-0053-05

Study on Separation of Fine Copper-Molybdenum Bulk Concentrate by SLon-500 Magnetic Separator

ZHANG Bohua¹, SHAO Yanhai¹, XIONG Tao^{1,2}, ZENG Jianwu¹,YANG Ruoyu³, SUN Peichun¹, GUAN Changping¹, CHEN Luzheng¹(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science
and Technology, Kunming 650093, China;

2. SLon Magnetic Separator Ltd, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

3. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Diqing 674400, Yunnan, China)

Abstract: Chalcopyrite and molybdenite have similar floatability and are easy to be mixed flotation, but separation flotation is difficult, reagent consumption is large and production cost is high. Based on a large number of previous research work, the idea of pulsating high gradient magnetic separation pre-flotation separation of fine copper-molybdenum mixed concentrate is put forward. Research results of SLon-500 vertical ring pulsating high gradient magnetic separator for pre-separation of fine copper-molybdenum bulk concentrate with new optimized magnetic medium are introduced. Results show that the separation of fine copper-molybdenum bulk concentrate containing 26.18% Cu, 0.34% Mo and 84.28% - 0.043 mm. Copper concentrate with yield of 45.46%, molybdenum content of 0.076%, copper grade of 30.15% and copper recovery of 52.34% and molybdenum rougher concentrate with yield of 54.54%, copper grade of 22.87%, molybdenum grade of 0.56% and molybdenum recovery of 89.85% can be obtained with excellent separation effect. The research results lay an important foundation for the industrial application of the new technology of pulsating high gradient magnetic separation preconcentration - flotation separation of fine copper-molybdenum bulk concentrate, and are conducive to improving the level of development and utilization of molybdenum resources in China.

收稿日期:2021-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874152);四川省科技厅项目(2018GZYZF0057)

作者简介:张铂华(1996-),男,山西晋中人,硕士研究生,主要从事资源综合利用和脉动高梯度磁选的理论与技术方面的研究。

通信作者:陈禄政(1978-),男,江西赣州人,博士,教授,主要从事脉动高梯度磁选的理论与技术研究。

Key words: SLon-500 vertical ring and pulsating HGMS separator; chalcopyrite; molybdenite; copper-molybdenum separation

钼是我国重要的战略资源,广泛应用于钢铁、机械、化工、电子、兵器、航天航空以及核工业等领域^[1]。根据《中国矿产资源报告 2019》,我国钼矿资源查明储量达 3 028.61 万 t,居世界第一,其中河南、安徽、黑龙江和内蒙古四省区的钼资源量占全国总钼资源的 54%^[2]。目前国内外钼精矿生产以斑岩型铜钼矿床和钼矿床为主,其中从斑岩型铜钼矿石生产的钼精矿,占世界钼产量的 50%左右^[3-4]。在斑岩型铜钼矿石中,铜、钼主要以共伴生黄铜矿(CuFeS_2)与辉钼矿(MoS_2)形式存在,多以微细粒形式嵌布于脉石矿物中^[5-6]。当前,国内外采用浮选的方法分离黄铜矿和辉钼矿,主要采用抑铜浮钼和抑钼浮铜两种工艺,我国多采用抑铜浮钼工艺^[7]。然而,黄铜矿与辉钼矿可浮性相近,抑铜需要消耗大量的硫化钠、硫氢化钠、硫化铵等药剂,导致生产成本较高,且存在药剂具有毒性、矿浆需要脱药和对环境产生污染等一系列难题^[8]。

高梯度磁选自 20 世纪 80 年代末以来已发展成为分选弱磁性矿石的一项关键性技术。尤其是 SLon 立环脉动高梯度磁选技术装备,具有占地面积小、分选效率高、生产成本低、易安装检修且介质不易堵塞等显著的技术优势,在国内外广泛应用^[9]。黄铜矿呈弱磁性,比磁化系数为 $0.844 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,辉钼矿呈逆磁性,比磁化系数为 $-0.001 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,两者存在磁性差异,理论上可以采用高梯度磁选法分离。根据分析,我们提出“脉动高梯度磁选预选—浮选分离”细粒铜钼混合精矿思路:首先应用 SLon 脉动高梯度磁选得到一定产率的低钼铜精矿,尾矿通过现有浮选分离工艺得到铜精矿和钼精矿,从而达到减少浮选药剂用量和降低生产成本的目的。

实际上,早在 20 世纪 90 年代就有脉动高梯度磁选铜钼分离的试验研究报导^[10],但迄今为止国内外仍没有将磁选技术有效应用于铜钼分离的工业应用报导。本文介绍 SLon-500 立环脉动高梯度磁选分离某细粒铜钼混合精矿的试验研究成果。

1 试样与方法

1.1 试样性质

试样取自中国铜业云南迪庆有色金属有限责

任公司普朗铜矿生产的细粒铜钼混合浮选精矿,经沉降脱水和晾干后备用。试样中铜矿物基本为黄铜矿(CuFeS_2),少量孔雀石及微量铜蓝和斑铜矿;钼矿物为辉钼矿。对试样进行了多元素化学分析和粒度分析,分析结果见表 1、2。由表 1、2 可知,试样中铜、钼品位分别为 26.18% 和 0.34%; -0.045 mm 和 -0.030 mm 粒级产率分别为 84.28% 和 63.65%,其中铜的分布率分别为 84.62% 和 64.18%,钼的分布率分别为 76.23% 和 58.03%。可以看出,试样中铜和钼呈微细粒分布。由于试样取自现场,残留药剂多,颗粒板结现象严重。因此,每次试验时控制给矿 $15 \sim 20 \text{ kg/h}$,进行脉动高梯度磁选分离。

表 1 试样多元素分析结果

Table 1 Results of multi-element analysis of sample /%

组分	Cu	Mo	Fe	S	Pb	Zn	Si	As
含量	26.18	0.34	24.00	25.00	0.02	0.05	2.00	0.07
组分	Ti	Al	Mg	Ca	K	P	Cl	
含量	0.10	0.90	0.30	0.10	0.20	0.08	0.02	

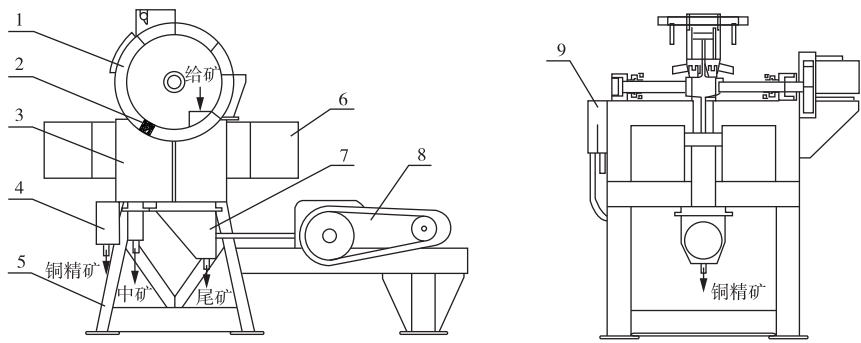
表 2 试样粒度分析结果

Table 2 Particle size distribution of sample /%

粒级/mm	产率	品位		回收率	
		Cu	Mo	Cu	Mo
+0.074	0.40	18.91	0.67	0.29	0.79
-0.074+0.045	15.32	25.71	0.51	15.05	22.98
-0.045+0.030	20.63	25.99	0.3	20.48	18.20
-0.030	63.65	26.4	0.31	64.18	58.03
合计	100.0	26.18	0.34	100.0	100.0

1.2 试验设备

试验所用设备为 SLon-500 连续式脉动高梯度磁选机,如图 1 所示,主要技术参数列于表 3。工作时,铜钼混合精矿矿浆给入磁选机内,在分选区进行脉动高梯度磁选。分选过程中,弱磁性的黄铜矿被磁介质所捕获,随分选环旋转带出分选区,在分选环顶部被冲洗下来,进入精矿收集槽成为铜精矿;逆磁性的辉钼矿和非磁性矿物穿过磁介质,从脉动斗流出成为钼粗精矿^[11]。



1—分选环;2—磁介质;3—磁轭;4—精矿收集斗;5—机架;6—激磁线圈;7—脉动斗;8—脉动机构;9—液位斗

图1 SLon-500 立环脉动高梯度磁选机

Fig. 1 SLon-500 vertical ring and pulsating HGMS separator

表3 SLon-500 连续式脉动高梯度磁选机的主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of SLon-500 vertical ring and pulsating HGMS separator

技术参数	磁场强度/T	分选环转速/(r·min ⁻¹)	脉动冲程/mm	脉动冲次/(r·min ⁻¹)	给矿浓度/%
调节范围	0~1.8	0.3~3.0	0~30	0~400	10~40

1.3 磁介质设计

针对待分选物料特征,应用磁介质优化设计原理与方法开发了一种新型磁介质,这是运用磁选有效分离铜钼的关键。如图2所示,该原理与方法包括丝径匹配计算、磁介质单丝捕获分析、介质多丝排列组合优化、介质设计与加工五个内容。其中,丝径匹配计算^[12]主要针对物料性质(目的矿物的比磁化率和粒度测定等)和分选条件(矿浆流过分选介质的固体浓度、矿浆流速和黏度等),应用介质丝径匹配新理论计算与待分选物料性质相匹配的

介质丝直径。单丝捕获分析^[13]是对理论计算的磁介质丝,应用单丝捕获试验分析法,在设置条件下分析磁介质丝捕获物料的特征,包括单位长度的捕获量等。多丝排列组合^[14]是对理论计算的介质丝,应用单元介质分析法,通过试验研究确定最佳的排列组合模式,主要包括介质多丝的间距和层数。磁介质设计与加工是选择前面理论计算的介质丝径和排列组合模式、技术设计和加工新型磁介质;新型介质通过捕获和分选试验可以对介质设计进一步校正。

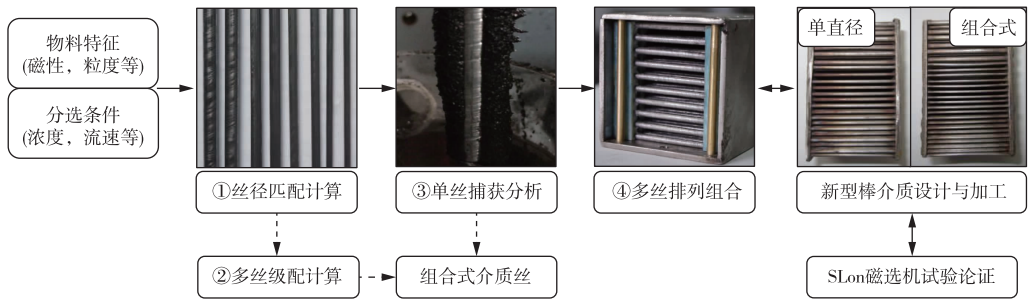


图2 磁介质优化设计原理与方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle and method of magnetic medium optimization design

1.4 评价方法

试验采用脉动高梯度磁选所得铜精矿和钼粗精矿的产率、铜和钼品位以及回收率,以及我们设定的钼去除率和分选效率指标全面评价分离指标。其中,钼去除率和分选效率分别用以下公式^[15]计算:

$$R_{Mo} = \frac{\beta_{F,Mo} - \beta_{Cu,Mo}}{\beta_{F,Mo}} \quad (1)$$

$$SE = \frac{\beta_{Cu,Cu} \cdot (\beta_{F,Cu} - \beta_{Mo,Cu}) \cdot (\beta_{F,Mo} - \beta_{Cu,Mo})}{\beta_{F,Cu}\beta_{F,Mo} \cdot (\beta_{Cu,Cu} - \beta_{Mo,Cu})} \quad (2)$$

式中, $\beta_{F,Cu}$ 和 $\beta_{F,Mo}$ 分别为细粒铜钼混合精矿的铜品位和钼品位, $\beta_{Cu,Cu}$ 、 $\beta_{Cu,Mo}$ 和 $\beta_{Mo,Cu}$ 分别为铜精矿的铜、钼品位和钼精矿的铜品位。

2 结果与讨论

2.1 给矿浓度的影响

给矿浓度影响矿浆黏度和分散程度。较低的给矿浓度有利于矿浆分散,可增加矿粒与磁介质的碰撞次数,从而提高精矿品位和回收率指标,但处理量

将下降。固定给矿量为 15~20 kg/h 和磁感应强度 1.5 T, 首先考察给矿浓度对铜钼分离指标的影响, 试验结果见表 4。由表 4 可知, 降低给矿浓度, 铜精矿钼品位下降, 在给矿浓度为 8% 时达到最低值, 同

时铜精矿铜回收率下降; 给矿浓度对钼粗精矿钼品位影响不大, 但对钼回收率产生明显影响, 随着给矿浓度升高, 钼粗精矿钼回收率持续下降。综合考虑, 给矿浓度选择 12% 左右。

表 4 给矿浓度对铜钼分离指标的影响

Table 4 Effects of feed concentration on separation indexes of copper and molybdenum

/%

给矿浓度	产品名称	产率	品位		回收率		钼去除率	分选效率
			Cu	Mo	Cu	Mo		
8	铜精矿	32.26	29.56	0.13	36.43	12.34	61.76	22.50
	钼粗精矿	67.74	24.57	0.44	63.57	87.66		
	给矿	100.0	26.18	0.34	100.0	100.0		
12	铜精矿	37.93	29.98	0.14	43.43	16.02	58.82	25.55
	钼粗精矿	62.07	23.86	0.46	56.57	83.98		
	给矿	100.0	26.18	0.34	100.0	100.0		
15	铜精矿	56.00	28.30	0.25	60.54	41.76	26.47	16.02
	钼粗精矿	44.00	23.48	0.45	39.46	58.24		
	给矿	100.0	26.18	0.34	100.0	100.0		

2.2 分选环转速的影响

取给矿浓度 12%, 其他试验条件不变, 分析分选环转速对铜钼分离指标的影响。由图 3 可知, 随分选环转速的增加, 铜精矿钼品位先上升, 在转速 2.0 r/min 后开始下降; 同时, 铜精矿铜回收率持续上升。钼粗精矿钼品位随分选环转速增加而上升, 在 2.5 r/min 达到顶点后略有下降; 钼粗精矿钼回收率先下降后上升, 在转速 2.0 r/min 时达到最低值后持续上升。由此可见, 分选环转速选择 3.0 r/min 比较合适。

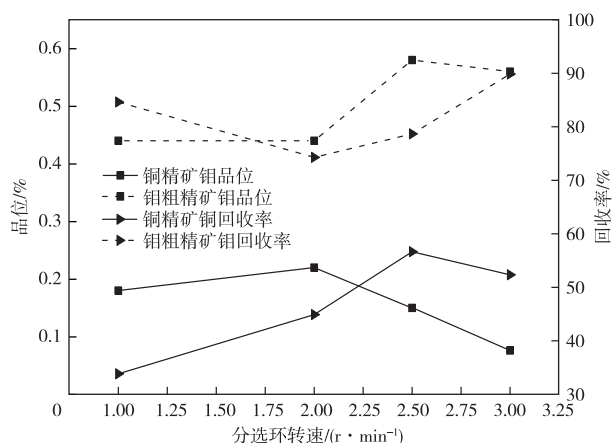


图 3 分选环转速对铜钼分离指标的影响

Fig. 3 Effects of rotation speed of separating ring on separation indexes of copper and molybdenum

脉动高梯度磁选机的分选环转速决定矿物分选时间, 同时影响处理量。由图 3 可知, 当分选环转速小于 2.0 r/min, 铜精矿钼含量高, 铜回收率低, 不利于铜钼混合精矿分选。分选环转速加快, 达到 3.0 r/min 时有利于提高分选指标, 铜精矿钼品位降到最低值、铜回收率也稳步上升; 钼粗精矿钼品位和钼回收率均呈上升趋势。因此, 选择 3.0 r/min 的分选环转速

有利于提升铜矿分离效果。

2.3 脉动冲次的影响

试验取给矿浓度 12%, 分选环转速 3.0 r/min, 其他试验条件不变, 分析脉动冲次对铜钼分离指标的影响。由图 4 可知, 随脉动冲次增加, 铜精矿钼含量先下降, 在 200 r/min 达到最低值以后上升; 与此同时, 铜精矿的铜回收率先上升, 在 200 r/min 达到最大值后下降。钼粗精矿的钼品位随脉动冲次的增加稳步上升, 而钼回收率先上升后下降, 在 200 r/min 时达到最大值。由此可见, 对该细粒铜钼混合精矿, 脉动冲次选择 200 r/min 时分离效果最佳。

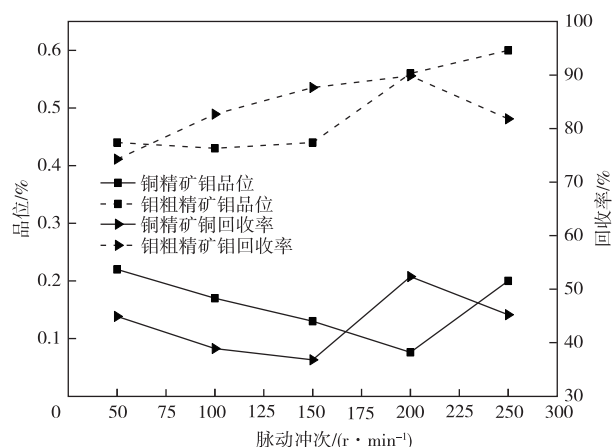


图 4 脉动冲次对铜钼分离指标的影响

Fig. 4 Effects of pulse number on separation indexes of copper and molybdenum

在 SLon 脉动高梯度磁选过程中, 脉动冲次确定矿浆的分散效果; 脉动冲次越高, 矿浆分散效果越好, 但作用于矿粒的脉动流体阻力也越大。由图 4 可知, 脉动冲次小于 200 r/min 时有利于提高分选指标, 铜精矿的钼含量稳步下降, 而钼粗精矿的钼品位上升,

说明此时脉动有利于提升铜钼分离效果。但是,当脉动冲次超过 200 r/min 时,作用于细粒黄铜矿的脉动流体阻力太大而无法被磁介质捕获,造成铜精矿的钼含量上升、铜回收率下降,且钼粗精矿钼回收率下降,说明太高的脉动冲次不利于矿物的分选。当脉动冲次为 200 r/min 时,可以获得产率为 45.46%、含钼 0.076%、铜品位 30.15% 和铜回收率 52.34% 的铜精矿和产率为 54.54%、铜品位 22.87%、钼品位 0.56% 和钼回收率 89.85% 的钼粗精矿,分离效果优异。

3 结论

1) 针对黄铜矿与辉钼矿可浮性相近,易混合浮选,但分离难度大且药剂消耗高、生产成本高的技术难题,提出“脉动高梯度磁选预选—浮选分离”细粒铜钼混合精矿的思路,探索经济有效分离细粒级铜钼混合精矿的新途径。

2) 采用新型磁介质,脉动高梯度磁选可以实现有效分选该细粒铜钼混合精矿。对铜、钼品位分别为 26.18% 和 0.34%, -0.043 mm 和 -0.030 mm 粒级占有率分别为 84.28% 和 63.65% 的细粒铜钼混合精矿,采用 SLon-500 立环脉动高梯度磁选机分选,可获得铜精矿产率 45.46%,含钼 0.076%,铜品位 30.15%,铜回收率 52.34%;钼粗精矿产率 54.54%,铜品位 22.87%,钼品位 0.56%,钼回收率 89.85% 的分选指标。

3) 研究成果为“脉动高梯度磁选预选—浮选分离”细粒铜钼混合精矿新技术的工业化应用奠定了基础,也有利于提高我国钼资源的开发利用水平。

参考文献

- [1] 张亮,杨卉芃,冯安生,等. 全球钼矿资源现状及市场分析[J]. 矿产综合利用,2019(3):11-16.
ZHANG Liang, YANG Huifen, FENG Ansheng, et al. Study on general situation and analysis of supply and demand of global molybdenum resource[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):11-16.
- [2] 张琳洲. 我国钼资源供需形势与对策选择[J]. 中国钼业, 2017, 41(3):1-5.
ZHANG Linzhou. Supply and demand situation of molybdenum resource and the countermeasures selection in China[J]. China Molybdenum Industry, 2017, 41(3):1-5.
- [3] 朱国庆. 铜钼分离技术现状及发展方向[C]//安徽省 2014 年青年地质学术讨论会论文集. 合肥:合肥地质学会, 2014:252-254.
ZHU Guoqing. Current status and development direction of copper-molybdenum separation technology [C]//Anhui Youth Geology Symposium 2014. Hefei: Anhui Geological Society, 2014:252-254.
- [4] LIU Y C, ZONG H, CAO Z F. Molybdenum removal from copper ore concentrate by sodium hypochlorite leaching[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2011, 21(1):61-64.
- [5] 王昊伟. 云南香格里拉铜钼矿选矿试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.
WANG Haowei. Experimental research on beneficiation of Shangri-La copper-molybdenum deposit in Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [6] 黄鹏亮,杨丙桥,胡杨甲,等. 铜钼分离技术研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5):50-55, 62.
HUANG Pengliang, YANG Bingqiao, HU Yangjia, et al. Progress on copper-molybdenum separation technology[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5):50-55, 62.
- [7] 何平波,孙仲元. 德兴铜矿铜钼混合精矿振动高梯度磁分离铜钼的研究(摘要)[J]. 国外金属矿选矿, 1986(9):22-25.
HE Pingbo, SUN Zhongyuan. Study on vibration high gradient magnetic separation of copper and molybdenum from copper-molybdenum mixed concentrate in Dexing copper mine (abstract) [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1986(9):22-25.
- [8] YIN Z G, SUN W, HU Y H, et al. Depressing behaviors and mechanism of disodium bis (carboxymethyl) trithiocarbonate on separation of chalcopyrite and molybdenite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 7(4):883-890.
- [9] 熊大和. SLon 立环脉动高梯度磁选机大型化研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(6):163-167.
XIONG Dahe. Scaling up and application of SLon vertical ring and pulsating high gradient magnetic separators[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(6):163-167.
- [10] 杨鹏,刘树貽,陈苾. 脉动高梯度磁选分离难选铜钼混合精矿的研究[J]. 矿冶, 1994, 3(2):31-35, 25.
YANG Peng, LIU Shuyi, CHEN Jin. A study on pulsating high gradient magnetic separation for refractory copper-molybdenum bulk concentrate [J]. Mining and Metallurgy, 1994, 3(2):31-35, 25.
- [11] 许金越. SLon 脉动高梯度磁选技术在赤泥除铁的应用及理论研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2009.
XU Jinyue. Application and theoretical study of SLon pulsating high gradient magnetic separation technology in removing iron from red mud [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2009.

- [48] MOHAMMADNEJAD S, PROVIS J, VAN DEVENTER J S J. Effects of grinding on the preg-robbing potential of quartz in an acidic chloride medium [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 52: 31-37.
- [49] LITTLE L, MAINZA A N, BECKER M, et al. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation [J]. *Minerals Engineering*, 2017, 111: 148-157.
- [50] FEWG D, ALDRICH C A. Comparison of the flotation of ore from the Merensky Reef after wet and dry grinding[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 60(2): 115-129.
- [51] GURSOY H, OTEYAKA B. The effect of grinding time on flotation of complex Cu-Zn sulphide ore in Jameson cell[C]//10th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO-Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, 2010, 683-690.
- [52] PALM N A, SHACKLETON N J, MALYSIAK V, et al. The effect of using different comminution procedures on the flotation of sphalerite[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(11/12/13): 1053-1057.
- [53] CHELGANI S C, PARIAN M, PARAPARI P S, et al. A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation: A review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 5004-5011.
- [54] SEKE M D, PISTORIUS P C. Effect of cuprous cyanide, dry and wet milling on the selective flotation of galena and sphalerite[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(1): 1-11.
- [55] XIA L Y, HART B R. Correlation between the hydrogen peroxide formed during grinding and the oxidized species present on the surface of sphalerite[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 130: 165-170.
- [56] JAVADI A. Formation of hydrogen peroxide by sphalerite [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 125: 78-85.
- (本文编辑 刘水红)

(上接第 57 页)

- [12] ZENG J W, TONG X, REN P, et al. Theoretical description on size matching for magnetic element to independent particle in high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 135: 74-82.
- [13] CHEN L Z, LIU W B, ZENG J W, et al. Quantitative investigation on magnetic capture of single wires in pulsating HGMS[J]. *Powder Technology*, 2017, 313: 54-59.
- [14] CHEN L Z, DING L, ZHANG H F, et al. Slice matrix analysis for combinatorial optimization of rod matrix in PHGMS[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 58: 106-109.
- [15] CHEN L Z, XIONG T, YANG R Y, et al. Pulsating HGMS for industrial separation of chalcopyrite from fine copper-molybdenum co-flotation concentrate[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 170: 106967. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106967>.
- (本文编辑 刘水红)