基于艾砂磨机和微泡浮选机协同的某斑岩型铜矿铜钼分离试验研究①

陈炫德，董明
（江西铜业股份有限公司德兴铜矿，江西 德兴 334224）

摘　要：采用艾砂磨机和微泡浮选机对国内某大型斑岩型铜矿进行了铜钼分离试验研究。经艾砂磨机再磨至 P_{80} 为 47 μm，在适宜的药剂制度下，经一粗二精一扫闭路浮选，获得了钼品位 47.25%、含铜 1.29%、钼回收率 63.04% 的钼精矿，较好地实现了铜、钼分离。

关键词：艾砂磨机；微泡浮选机；铜钼分离；铜；钼；浮选；斑岩型铜矿
中图分类号：TD923；TD952　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.025
文章编号：0253-6099(2026)03-0175-05

Experimental Study on Cu/Mo Separation of a Porphyry Copper Ore by ALC Mill Combined with Micro-bubble Flotation Machine

CHEN Xuande, DONG Ming
(*Dexing Copper Mine of Jiangxi Copper Co., Ltd., Dexing* 334224, *Jiangxi*, *China*)

Abstract: An experiment was carried out for separating copper and molybdenum in a porphyry copper ore by adopting ALC mill in combination with a micro-bubble flotation machine. Firstly, the raw ore was ground with ALC mill to a P_{80} 47 μm, and then subjected to a closed-circuit flotation consisting of one roughing, two cleaning and one scavenging with an appropriate reagent system, leading to the obtained molybdenum concentrate grading 47.25% Mo and containing 1.29% Cu, with recovery of 63.04% Mo. It is shown that a satisfactory separation of copper and molybdenum is actualized.

Key words: ALC mill; micro-bubble flotation machines; Cu/Mo separation; copper; molybdenum; flotation; porphyry copper ore

国内某大型斑岩型铜矿前端铜钼混合浮选过程中，磨矿和粗精矿再磨导致前端产出的铜钼混合精矿粒级整体较细，-74 μm 粒级占比达到 90%以上，P_{80} 约 60 μm，粒级分布不均匀，且由于部分钼矿物嵌布粒度较细，仍存在部分钼矿物和铜矿物连生等解离不充分的问题，这部分连生体需经进一步细磨才能实现有效的单体解离。然而，微细粒矿物具有质量小、比表面能大、活化能高、易氧化、对浮选药剂选择性吸附差、浮选速率低、易发生矿泥罩盖和机械夹杂等问题[1]，难以被高效分选回收，一直是选矿领域的突出难题。由于粒度过细，无法有效选别，大量有价矿物损失于尾矿中，造成资源浪费。当前国内外通过选矿设备来解决这一问题的途径，一是采用高效分级和细磨设备，在磨细较粗颗粒矿石的同时，避免细颗粒矿物被进一步磨细，目前艾砂磨机在这一方面有其优势；二是采用微细粒级专用浮选设备，微泡浮选机致力于解决微细粒浮选难题，其进气、进浆方式产生的强紊流和高速剪切作用产生的大量微泡，有利于微细粒矿物的浮选。本文基于艾砂磨机和微泡浮选机，对国内某大型斑岩型铜矿进行了试验研究。

1　矿样性质

试验矿样取自现场铜钼分离一段钼粗精矿，其化学多元素分析结果如表 1 所示。矿样中 Cu、Mo 品位分别为 19.94%和 15.29%，Fe、S 含量较高，结合镜下观察结果分析可知，粗精矿中部分辉钼矿仍与黄铜矿、黄

① **收稿日期**：2025-12-10
作者简介：陈炫德(1988—)，男，江西宜春人，工程师，主要从事有色金属矿山选矿设备应用实践工作。E-mail：361027464@qq.com
通信作者：董明(1988—)，男，江西上饶人，工程师，主要从事有色金属矿山选矿工艺应用实践工作。E-mail：Jx_dongming@163.com

铁矿毗邻连生。

表 1 矿样化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of ore sample %

Cu	Mo	Fe	S	Pb	As
19.94	15.29	24.55	34.82	0.007	<0.1
K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2
0.41	0.34	0.21	1.75	4.37	0.25

2 试验方法及试验设备

2.1 试验方法

使用实验型小型艾砂磨机与微泡浮选机,采用一次粗选的试验流程进行试验。试验原则流程如图 1 所示。采用陶瓷球为磨矿介质,避免传统钢球的铁污染;以硫化钠与 KMD128 组合为抑制剂,以煤油为钼捕收剂。抑制剂 KMD128 主要成分为假乙内酰硫脲(2-亚氨基四氢噻唑酮-4),其分子模型如图 2 所示。该药剂由昆明冶金研究院有限公司自主研发,于 2024 年在德兴铜矿新技术厂成功应用,它能大幅降低硫化钠用量,具有环境友好、经济效益显著的特点[2]。本次条件试验包括磨矿细度、抑制剂用量以及捕收剂用量试验。

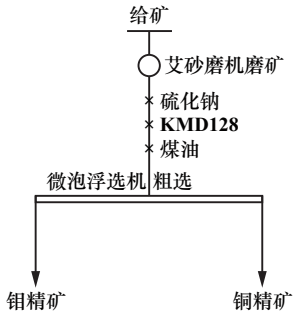


图 1 铜钼分离粗选试验流程

Fig. 1 Flowchart of roughing for Cu/Mo separation

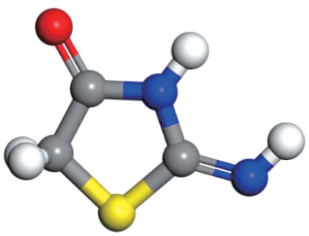


图 2 KMD128 分子模型

Fig. 2 Molecular model of KMD128

2.2 试验设备

2.2.1 艾砂磨机

艾砂磨机主要由电动机、减速机、主轴、搅拌盘、分级盘和筒体等部分构成。其核心工作部件包括一根主轴以及多个并排串装在主轴上的搅拌盘,尾端则装有分级盘[3]。其结构组成示意图见图 3。

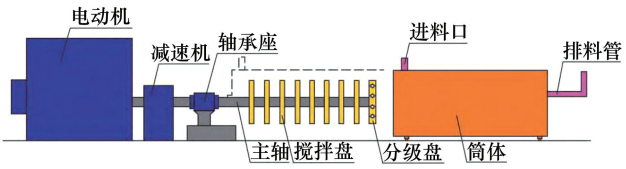


图 3 艾萨磨机结构组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ALC mill structure

艾砂磨机适用于各类矿物的细磨作业。其基于内部分级与选择性磨矿原理,能够以开路工艺产出既不过磨、也不欠磨的磨矿产品,具有高效节能、产品粒度分布集中、占地面积小等优点[4]。设备工作时,矿浆经隔渣处理后稳定给入艾砂磨机。主轴带动搅拌盘高速旋转,进而驱动筒体内的磨矿介质作绕轴公转与自转运动。在离心力作用下,矿物颗粒与磨矿介质按粒径从细到粗沿筒体径向分布,从而实现了“大介质研磨大颗粒、小介质研磨小颗粒”的选择性磨矿作用。此外,每两个相邻搅拌盘之间形成一个独立的磨矿区域。在一定的给矿压力推动下,矿浆在向后流动过程中颗粒逐渐变细,由此实现了内部分级与开路磨矿相结合的创新工艺[5-6]。

2.2.2 微泡浮选机

微泡浮选机工作原理如图 4 所示。高压矿浆自浮选机顶部注入,经喷嘴将其压能转化为高速射流,并在密封套管内形成负压,通过空气导管吸入空气。射流矿浆在裹挟气体进入下冲管的过程中,因流体强烈紊动,气体被剪切、分割为大量微细气泡,并与矿物颗粒持续碰撞、吸附,完成矿化。矿化气泡在下冲管底部涌出后,携带精矿上浮至矿浆表面形成泡沫层。泡沫在

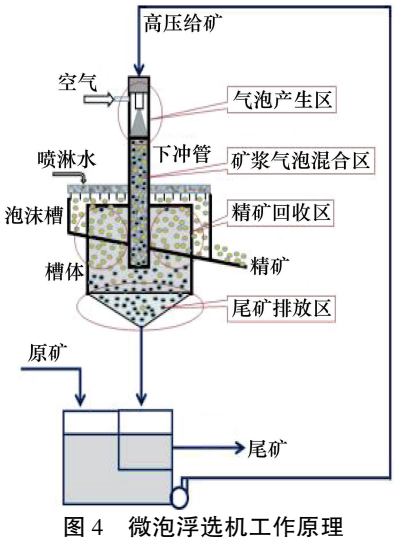


图 4 微泡浮选机工作原理

Fig. 4 Schematic diagram of micro-bubble flotation machine

上升过程中经冲洗水喷淋净化,最终进入精矿槽回收。尾矿则下行从底部排出,从而实现分选[7-8]。

3　试验结果与讨论

3.1　磨矿试验

3.1.1　磨矿细度试验

给矿(铜钼分离一段粗精矿)中铜钼连生体较多,需对粗精矿进行再磨,使连生体充分解离,提升精矿品位的同时保证钼金属在分离浮选中有效回收。按照现场药剂制度,固定硫化钠用量 800 g/t、KMD128 用量 200 g/t、煤油用量 30 g/t,按照图 1 所示流程,进行磨矿细度试验,结果如表 2 所示。粗精矿再磨产品细度较细,采用 P_{80}来表示磨矿产品细度。结果表明,随着磨矿细度增加(即 P_{80}值减小),钼精矿产率呈下降趋势,钼品位逐步升高,回收率先升高后降低,说明合适的再磨细度有助于连生体的解离,提高钼品位和回收率,但物料粒度过细,细粒级矿物无法得到有效回收,回收率降低。综合考虑品位及回收率,确定磨矿细度 P_{80}=47 μm 为宜。

表 2　磨矿细度试验结果

Table 2　Test results of grinding fineness

P_{80}/μm	产品名称	产率/%	Mo 品位/%	Mo 回收率/%
25	钼精矿	16.31	36.130	38.54
	铜精矿	83.69	11.230	61.46
	给矿	100.00	15.291	100.00
33	钼精矿	21.03	31.140	42.81
	铜精矿	78.97	11.080	57.19
	给矿	100.00	15.299	100.00
47	钼精矿	32.75	29.450	63.04
	铜精矿	67.25	8.410	36.96
	给矿	100.00	15.301	100.00
53	钼精矿	34.50	27.430	61.85
	铜精矿	65.50	8.910	38.15
	给矿	100.00	15.299	100.00

3.1.2　不同磨矿设备磨矿产品粒度组成对比

使用球磨机和艾砂磨机对粗精矿进行磨矿,控制磨矿细度 P_{80}为 47 μm,使用球磨机和艾砂磨机获得的磨矿产品粒度分布曲线如图 5 所示。艾砂磨机和球磨机磨矿产品均集中分布于易选粒级,但艾砂磨机磨矿产品集中分布在+20 μm 粒级,球磨机磨矿产品中-10 μm 难选粒级占比较高,会对回收率造成一定影响,说明艾砂磨机更适于该矿。

3.2　抑制剂用量试验

在抑铜浮钼过程中,抑制剂对铜的抑制效果[9-11]是实现铜钼分离的关键。根据现场使用经验,采用硫化钠与 KMD128 按质量比 4∶1混合作为铜的组合抑制剂。在磨矿细度 P_{80}为 47 μm,捕收剂煤油用量 30 g/t 条件下,考察了抑制剂用量对试验指标的影响,结果见图 6。结果表明,随着抑制剂用量从 600 g/t 增至 1 200 g/t,钼精矿品位与回收率均呈显著上升趋势;抑制剂用量 1 200 g/t 时,钼回收率达到峰值,钼品位也维持在较高水平;抑制剂用量超过 1 200 g/t 后,钼回收率开始呈下降趋势,而钼品位只有小幅提升。综合考虑钼精矿品位与回收率指标,确定粗选阶段硫化钠+KMD128 组合抑制剂的适宜用量为 1 200 g/t(其中硫化钠用量 960 g/t、KMD128 用量 240 g/t)。

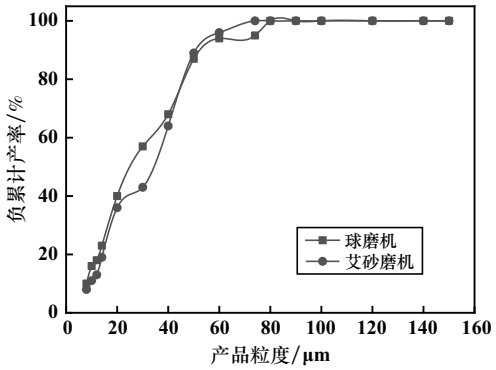


图 5　磨矿产品粒度分布曲线

Fig. 5　Particle size distribution curves of grinding products

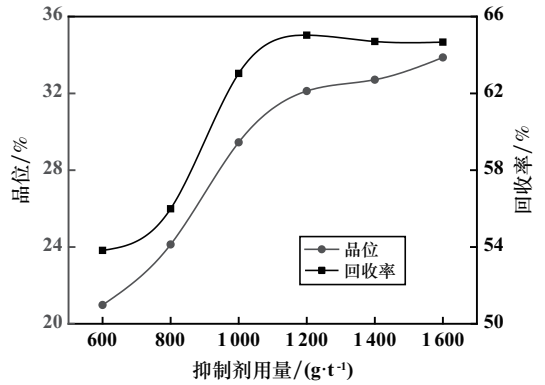


图 6　抑制剂用量试验结果

Fig. 6　Test result of depressant dosage

3.3　捕收剂用量试验

辉钼矿表面有一定天然疏水亲油性,浮选时使用脂肪烃类中性油如煤油即可成功浮出辉钼矿。但煤油用量过大,一是对回收效果并无明显改善,且药耗增大、不经济;二是会使浮选的选择性下降,还会使浮选泡沫变坏,产生“消泡作用”,严重时甚至会使整个浮选过程遭到破坏。因此,确定铜钼分离中煤油用量至关重要。在磨矿细度 P_{80}为 47 μm,抑制剂硫化钠用量 960 g/t、KMD128 用量 240 g/t 条件下,进行了捕收剂

煤油用量试验,结果见表3。结果表明,随着煤油用量增加,Mo品位降低,Mo回收率升高。综合考虑,确定煤油用量30 g/t为宜。

表3 捕收剂用量试验结果

Table 3 Test results of collector dosage

捕收剂用量/(g·t^{-1})	产品名称	产率/%	Mo品位/%	Mo回收率/%
10	钼精矿	29.50	32.410	62.52
	铜精矿	70.50	8.130	37.48
	给矿	100.00	15.293	100.00
20	钼精矿	30.25	32.150	63.57
	铜精矿	69.75	7.990	36.43
	给矿	100.00	15.298	100.00
30	钼精矿	31.00	32.120	65.03
	铜精矿	69.00	7.760	34.97
	给矿	100.00	15.312	100.00
40	钼精矿	31.25	31.870	65.12
	铜精矿	68.75	7.760	34.88
	给矿	100.00	15.294	100.00

3.4 闭路试验

在条件试验基础上,在不再磨、使用球磨机和艾砂磨机磨矿条件下,进行了闭路试验,试验流程见图7,结果见表4。其中球磨机和艾砂磨机磨矿产品的磨矿细度均控制在P_{80}为47 μm。结果表明,使用艾砂磨机磨矿,闭路试验获得了钼品位47.25%、钼回收率63.04%的钼精矿;与不再磨相比,钼品位提高了1.14百分点,钼回收率提高了5.05百分点;与球磨机磨矿相比,钼品位提高0.04百分点,钼回收率提高了0.33百分点。

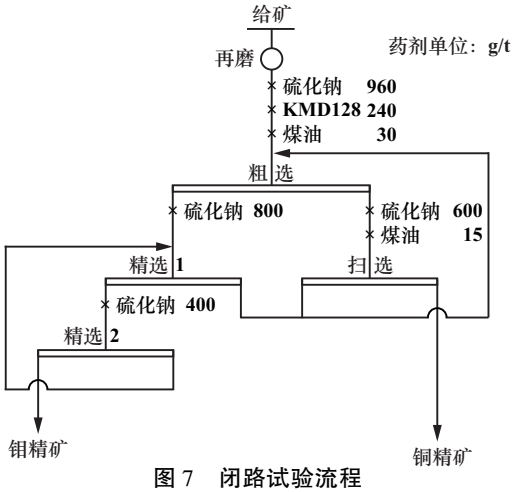


图7 闭路试验流程

Fig. 7 Flowchart for closed-circuit test

4 结论

1) 采用艾砂磨机和微泡浮选机,对国内某大型斑岩型铜矿进行铜钼分离,经艾砂磨机再磨至P_{80}为47 μm,

表4 闭路试验结果

Table 4 Closed-circuit test results

磨矿方式	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Mo	Cu	Mo
不再磨	钼精矿	19.23	1.63	46.11	1.57	57.99
	铜精矿	80.77	24.30	7.95	98.43	42.01
	给矿	100.00	19.94	15.29	100.00	100.00
球磨机	钼精矿	20.31	1.42	47.21	1.45	62.71
	铜精矿	79.69	24.66	7.16	98.55	37.29
	给矿	100.00	19.94	15.29	100.00	100.00
艾砂磨机	钼精矿	20.40	1.29	47.25	1.32	63.04
	铜精矿	79.60	24.72	7.10	98.68	36.96
	给矿	100.00	19.94	15.29	100.00	100.00

在适宜的药剂制度下,经一粗二精一扫闭路浮选,获得了钼品位47.25%、含铜1.29%,钼回收率63.04%的钼精矿,较好地实现了铜、钼分离。相同浮选条件下,使用艾砂磨机较不再磨精矿钼品位提高了1.14百分点,钼回收率提高了5.05百分点,较使用球磨机精矿钼品位提高了0.04百分点,钼回收率提高了0.33百分点。

2) 磨矿细度P_{80}为47 μm时,艾砂磨机和球磨机磨矿产品均集中分布于易选粒级,但球磨机磨矿产品中-10 μm难选粒级明显更多,这是球磨机磨矿产品回收率低于艾砂磨机磨矿产品的原因。

参考文献(References):

[1] 曹亦俊,闫小康,王利军,等. 微细粒浮选的微观湍流强化[J]. 矿产保护与利用, 2017,37(2):113-118.
CAO Yijun, YAN Xiaokang, WANG Lijun, et al. The micro-turbulence intensification on the fine minerals floatation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017,37(2):113-118.

[2] 彭远伦,杨若瑜,吕向文,等. 云南某斑岩型铜矿铜钼分离药剂制度优化研究及工业应用[J]. 矿业研究与开发, 2022,42(6):40-43.
PENG Yuanlun, YANG Ruoyu, LYU Xiangwen, et al. Optimization research on flotation reagent system for copper-molybdenum separation in a porphyry copper mine in Yunnan and its industrial application[J]. Mining Research and Development, 2022,42(6):40-43.

[3] 李平. 替代进口,艾砂磨机助力矿业高质量发展[N]. 中国矿业报, 2024-05-29(002).
LI Ping. Replacing imports: ALC mill helps high-quality development of mining industry[N]. China Mining News, 2024-05-29(002).

[4] 陈晓东,李韵琪. 艾砂磨及微泡浮选机在金矿选冶生产中的应用[J]. 有色金属设计, 2025,52(2):11-15.
CHEN Xiaodong, LI Yunqi. Application of ALC mill and microbubble flotation machine in gold ore dressing and smelting[J]. Nonferrous Metals Design, 2025,52(2):11-15.

[5] 张春田,孙希乐,邓庆超,等. 某超细粒级磁铁矿艾砂磨机三段磨矿半工业试验[J]. 现代矿业,2024,40(1):168-171.
ZHANG Chuntian, SUN Xile, DENG Qingchao, et al. Semi-industrial test of an ultra-fine grain size magnetite with three-stage grinding by Aisha mill[J]. Modern Mining, 2024,40(1):168-171.

[6] 陈晓东. 艾砂磨机在细磨中的应用[J]. 黄金, 2023,44(1):58-62.
CHEN Xiaodong. Application of ALC mill to fine grinding[J]. Gold, 2023,44(1):58-62.

[7] 杨宁,黄宇林,徐启云,等. 精锐微泡浮选机在上宫金矿的试验应用[J]. 黄金, 2021,42(4):67-70.
YANG Ning, HUANG Yulin, XU Qiyun, et al. Experimental application of Jingrui micro-foam flotation concentrator in Shanggong Gold Mine[J]. Gold, 2021,42(4):67-70.

[8] 陈晓东. 精锐微泡浮选机强化微细粒浮选的机理与实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1):112-116.
CHEN Xiaodong. Principle and practice of enhanced flotation performance of fine particles by JRF micro-bubble flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(1):112-116.

[9] CHEN J H, LAN L H, LIAO X J. Depression effect of pseudo glycolythiourea acid in flotation separation of copper-molybdenum[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23(3):824-831.

[10] 张曙光,简胜,唐鑫,等. 某含钼低品位硫化铜矿综合回收钼的选矿研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):48-51.
ZHANG Shuguang, JIAN Sheng, TANG Xin, et al. Comprehensive recovery of molybdenum resource from low-grade molybdenum-bearing copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):48-51.

[11] 田小松,褚力新,梁泽跃,等. 云南某铜钼混合精矿选别工艺流程设计改造与生产实践[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):76-79.
TIAN Xiaosong, CHU Lixin, LIANG Zeyue, et al. Improvement and production practice of Co/Mo separation process for Co-Mo bulk concentrate in Yunnan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):76-79.

引用本文:陈炫德,董明. 基于艾砂磨机和微泡浮选机协同的某斑岩型铜矿铜钼分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):175-179.
CHEN Xuande, DONG Ming. Experimental study on Cu/Mo separation of a porphyry copper ore by ALC mill combined with micro-bubble flotation machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):175-179.

(上接第 174 页)

[3] 惠博,杨耀辉. 攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿矿石性质研究及对选矿工艺的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(4):126-129.
HUI Bo, YANG Yaohui. Properties of olive-pyroxene vanadium-titanium magnetite ore in Hongge mining area of Panxi research and influence on mineral processing technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020,41(4):126-129.

[4] 陈福林,文永才,王志杰,等. 攀西某钒钛铁精矿提质技术研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):77-79.
CHEN Fulin, WEN Yongcai, WANG Zhijie, et al. Improving quality of vanadium-titanium iron concentrate in Panzhihua-Xichang region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):77-79.

[5] 曹玉川. 攀西某低品位钒钛磁铁矿选铁工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2023,44(3):114-117.
CAO Yuchuan. Experimental study on iron concentrate separation from a low-grade vanadium-titanium magnetite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2023,44(3):114-117.

引用本文:姜克冰. 攀西某钒钛磁铁矿选铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):170-174.
JIANG Kebing. Experimental study on iron beneficiation of a vanadium-titanium magnetite ore in Panxi region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):170-174.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2026 年 6 月