

浮选机尾矿再选工业试验研究

蒋丛国¹, 郦超¹, 杨维江¹, 刘保龙¹, 赵澳¹, 郭潇文¹, 张明²

(1. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674400; 2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

[摘要] 云南迪庆有色金属有限责任公司普朗铜矿属多金属超大型斑岩型铜矿, 工艺矿物学分析结果表明, 普朗铜矿浮选尾矿矿样中铜矿物主要富集在 +0.074 mm 粒级以及 -0.025 mm 粒级, 其中 +0.074 mm 粒级主要为含铜连生体。采用大型高效浮选机技术对普朗铜矿浮选尾矿再选进行试验研究, 结果表明, HIF-680 浮选机的浮选精矿经再磨后返回到主流程粗选作业的指标较好, 粗选回收率提高了 1.25 个百分点, 且再磨的最佳磨矿细度为 -0.074 mm 占比 77.64%。依托于大型高效浮选机技术的尾矿再选工程, 提高了资源利用率, 为选厂创造可观的经济效益。

[关键词] 斑岩型; 铜矿; 尾矿; 再选; 浮选机; 再磨

[中图分类号] TD456 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)06-0001-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.06.001

0 引言

普朗铜矿地处云南省迪庆藏族自治州香格里拉县, 属多金属超大型铜矿。自投产以来, 在矿石贫化品位下降、冰碛物混入及粗颗粒单体解离度低等多方面因素综合影响下, 实际生产浮选尾矿中铜品位一般在 0.05% ~ 0.07% 区间波动, 损失于浮选尾矿中的铜金属量达 6 100 ~ 8 500 t/a。据数据统计, 国内每年产生的铜尾矿高达 3 亿 t, 一方面因尾矿的大量堆存而造成生态环境的破坏, 另一方面也因尾矿中有价金属的综合利用率低而导致资源的浪费。随着国家对重要矿产资源的增储上产、资源的综合利用以及“双碳”政策的实施, 亟需相应的技术将尾矿中损失的铜金属变“废”为“宝”。铜尾矿中铜金属综合回收, 主要针对是粗、细两头粒级的回收, 细粒

级铜的回收主要存在的问题是泥化严重药剂消耗量大, 且细粒的铜矿物被氧化的几率增大, 以硫化物赋存的仅占 20%, 而粗颗粒则相反, 随着颗粒粒度的增加, 硫化铜的比例增大, 氧化铜或硫酸铜的比例降低。综合而言, 铜尾矿综合回收的本质在于对粗颗粒连生体的回收, 结合中矿再磨工艺, 才能综合回收尾矿中的有价金属。该工艺最大的问题在于经济技术指标最大化, 如果从尾矿中回收的粗粒连生体过多, 一方面磨矿及运行成本增加, 另一方面也影响主流程的精矿品位。目前尾矿再选技术主要有大型高效浮选机的应用及流态化技术的应用, 两者的本质目的是强化粗颗粒矿物的回收。利用重选与浮选相结合形成的流态化技术扩大了浮选的粒度上限, 由传统的 0.3 mm 的分选上限扩大至 0.3 ~ 1.0 mm, 有效提高了粗颗粒的综合回收效果, 而目前流态化技术在国内还处于起步阶段, 还未进行大规模推广应用, 而大型高效浮选技术的应用则趋于成熟, 尤其在大型选厂, 规模效益显著, 吨耗药剂降低, 单体设备的智能控制更容易实现, 设备的节能降耗优势更加显著^[1-4]。江西某铜矿采用世界单体容积最大的 680 m³ 浮选机在尾矿上进行铜尾矿再选回收, 工业试验期间, 铜总回收率提高约 1.48 个百分点, 为选厂创造了较大的经济效益^[5]。

1 铜尾矿物性分析

针对普朗铜矿尾矿再选, 首先对尾矿矿样的粒

[收稿日期] 2023-10-26

[第一作者] 蒋丛国(1991—), 男, 云南保山人, 大学本科, 选矿助理工程师, 主要从事选矿技术管理工作。

[通信作者] 杨维江(1993—), 男, 云南曲靖人, 大学本科, 选矿助理工程师, 主要从事选矿技术工作。

[基金项目] 政府间国际合作专项复杂金矿资源绿色高效选矿技术与装备研究(2022YFE01267002); 浮选机泡沫强制快速回收技术与装置(Y-JDFX-04-2133)

[引用格式] 蒋丛国, 郦超, 杨维江, 等. 浮选机尾矿再选工业试验研究[J]. 有色设备, 2023, 37(6): 1-5.

度组成及金属量分布进行了分析,筛析结果表明,尾矿产品中的铜呈粗细两头分布,主要赋存在 +0.074 mm 粒级以及 -0.025 mm 粒级产品中, +0.074 mm 粒级金属量占 36.6%, -0.025 mm 粒级金属量占 20.3%。生产过程中细粒级铜的单独回收面临诸多

问题,在现有技术条件下回收存在一定困难,为此需重点考虑 +0.074 mm 粒级中含铜连生体的回收。

随后对尾矿的主要成分进行了化学成分分析和镜下分析,化学成分分析结果见表 1。

表 1 矿样主要化学成分分析结果

化学成分	Cu	Pb	Zn	Mo	S	Fe	As
含量/%	0.068	0.060	0.033	0.003 1	0.25	2.03	0.011
化学成分	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	
含量/%	4.43	2.46	1.97	64.01	2.00	13.64	

尾矿化学成分分析结果表明,具备综合回收利用的主要是铜金属,含量为 0.068%,其它有价金属含量均较低,在现有技术条件下不具有经济效益。

普朗铜矿尾矿矿样工艺矿物学镜下鉴定表明,尾矿矿样中的黄铜矿、黄铁矿嵌布粒度细,单体解离的颗粒少,尤其是黄铜矿单体解离度小于 5%,与脉石矿物共生紧密,要想实现综合回收,后续必须通过再磨工艺实现黄铜矿一定程度的解离。

综合而言,尾矿矿样中的黄铜矿、黄铁矿嵌布粒度细,单体解离的颗粒少,尤其是黄铜矿单体解离度小于 5%,其粒度多数都小于 0.045 mm,多数黄铜矿分布在 0.005 ~ 0.035 mm 之间。黄铁矿的单体解离度约为 75%,黄铁矿粒度最大为 0.1 mm,多数分布在 0.01 ~ 0.06 mm 之间。如果对尾矿进行单独处理一方面设备投资相对较大,另一方面,难以产出合格铜精矿。将再选粗精矿返回主流程相对较为简单,易于现场生产改造,且有可借鉴的成功先例。

2 HIF-680 超大型浮选机在尾矿综合回收中的技术特征

新一代高效大型浮选机的整体结构如图 1 所示,较常规的大型浮选机存在 4 个方面的技术特征。

1) 运输区高度优化设计,降低粗颗粒矿物的脱附概率。采用先进的叶轮中置技术,一方面强化底部大循环,实现粗颗粒连生体的有效悬浮,增加粗颗粒矿物的碰撞矿化次数;另一方面有利于缩短运输区的高度,缩短粗颗粒矿物的运输距离,降低脱附概率,提高粗颗粒的回收效果。中置叶轮技术的应用对辅助设备投资运行也存在较大的优势,其所需要的充气压力减小约 40%,对风机的各项技术要求也



图 1 HIF-680 大型高效浮选机

降低。所配备的大扭矩减速机传动技术在叶轮中置的体系下,实现了 680 m³ 浮选机的在应对突然情况及短时间停机后的满载启动,此次设计的满负荷条件下再次启动前的停机时间 > 24 h,这一时间可满足所有的维修维护工作^[6-8]。

2) 先进的齿轮箱传动技术取代传统的皮带传动技术。传统的皮带传动技术能量传输效率低,皮带检修维护频繁,增加了运行维护成本。先进的齿轮传动技术有利于规避皮带传动的劣势,提高传动效率,增加主体设备的运行稳定性和可靠性。设备大型化后,浮选机轴转速变化幅度小,安装功率变化幅度大,不可避免的选择大极数、低效率电机。减速机传动技术的应用,可实现电机的立式安装,电机输出轴与减速机的输入轴通过法兰连接,有利于降低设备运行功耗,减少设备维护成本,提升选厂经济效益。

3) 智能化控制技术。大型浮选机的应用有利于对设备运行参数及操作参数进行集成控制,单体设备的智能化水平提升后,对于选厂智能专家系统的集成提供了基础保障,相关的智能检测和控制技术包括气量和液位自动控制系统、系统自我保护与

报警技术、泡沫图像技术及云端监视技术等。普朗铜矿 HIF680 超大型浮选机配备系统自我保护与报警功能,对功率、电流、温度等进行监控和故障诊断,并作出自动提示,电机超功率时可实现自动降频保护;安装的泡沫识别优化控制系统,对泡沫颜色 RGB 值、泡沫流速、溢流高度识别,并连锁液位控制实现自动优化控制。集成的云端监视系统,通过手机、终端 APP 云平台,实现对整个运行状态的远程监视^[10]。

4) 特制中间箱技术。680 m³ 浮选机工业试验系统是在现有生产流程基础上进行建设,为了减小对现有生产流程的影响,对试验系统给矿和排矿进行了针对性设计。生产流程的扫三 WEMCO330 的尾矿箱和 680 m³ 浮选机之间采用特制中间箱进行连接。该特制中间箱为四阀双切换机制,气动锥阀控制,可实现原生产流程与试验流程的快速切换,便于工业应用流程的切换。

3 工业试验研究

尾矿再选工程化应用的核心在于高效大型浮选装备应用与中矿再磨工艺优化的联合作用。对于尾

矿再选后的中矿产品同样面临着不同的选择,主要包括:①尾矿再选精矿单独处理,形成最终铜精矿;②再选精矿再磨后,合理产品返回主流程联合处理。综合而言,普朗铜矿浮选尾矿品位低,粗精矿产率小,单独处理存在设备投资大,难以形成合格的铜精矿产品,运行维护成本高,尾矿再选经济效益低等问题,再选精矿再磨后返回主流程,设备投资、运行维护成本最低,对主流程的影响最小,也便于现场的流程改造。为此工业试验阶段,再选精矿采用返回主流程的方式联合处理,同时在工业试验阶段开展再选精矿单独再磨和再选精矿与原矿合并给入球磨再磨对系统分选指标的影响研究,开展再选精矿再磨粒度对系统分选指标的影响,最终为尾矿再选工程化应用提供建设依据。

尾矿再选系统的设备配置主要是在主流程中增加 1 台 HIF-680 浮选机进行扫选,考虑到扫选精矿多为连生体,为使矿物充分单体解离,扫选精矿返回主浮选系统前,单独增加一段闭路磨矿,使用的设备为 KLM-280 立磨机,初设的再磨粒度为 -0.074 mm 占 60%,磨矿合格产品泵送返回主浮选流程;工艺设计流程见图 2。

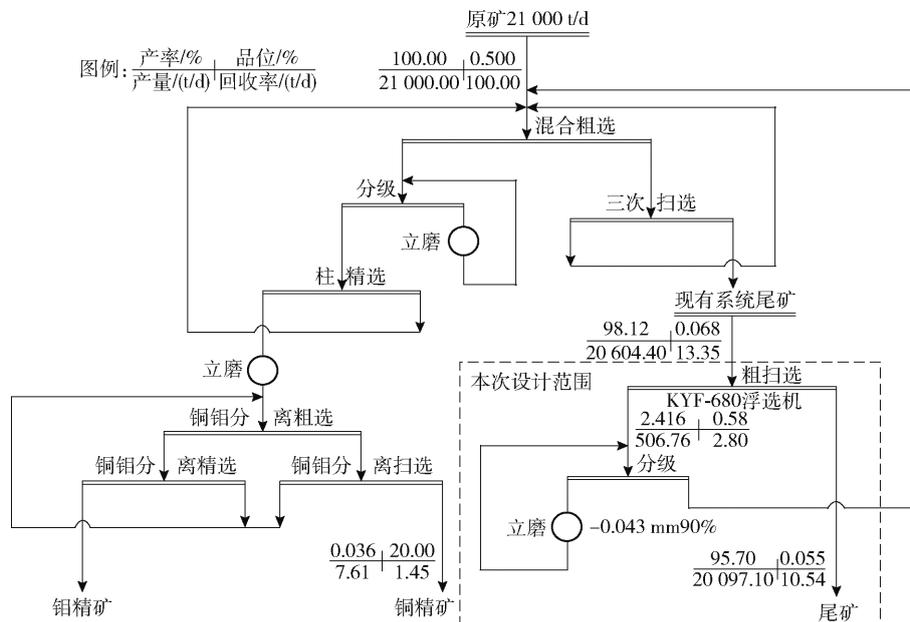


图 2 尾矿再选工艺设计流程图

3.1 再选精矿返回试验研究

针对 680 系统调试的指标情况及产品性质,选矿厂组织现场开展 680 精矿返回点的工业试验,主要探索 680 精矿返回粗选对粗选指标影响,并了解

返回精矿不磨及再磨的指标差异。

试验条件包括:①精矿直接返回粗选作业;②精矿再磨返回粗选作业(磨矿细度为 -0.074 mm 占 60%);③精矿返回球磨。工业试验期间不同条件

对系统指标的结果影响,通过累计班指标进行对比分析,在系统达到稳定后,累积考察 7 天现场班指标情况并进行统计,试验结果见表 2。尾矿再选段主要添加起泡剂和捕收剂,药剂制度为 MCO 用量 112.5 g/t,HCCL 用量 52.5 g/t。

表 2 返球磨机试验结果表

返回流程	名称	产率/%	品位/%	回收率/%
不开尾矿再选系统	精矿	12.92	2.32	84.74
	尾矿	87.08	0.062	15.26
	原矿	100	0.35	100
680 精矿再磨返粗选	精矿	13.25	2.25	85.99
	尾矿	86.75	0.056	16.41
	原矿	100	0.35	100
680 精矿直接返粗选	精矿	12.68	2.29	85.15
	尾矿	87.32	0.058	17.18
	原矿	100	0.34	100
680 精矿返球磨	精矿	13.15	2.26	84.66
	尾矿	86.85	0.062	17.97
	原矿	100	0.35	100

从试验结果可以看出,精矿直接返回球磨精矿品位 2.26%,回收率 84.66%,不开尾矿再选精矿品位 2.32%,回收率 84.74%,指标略微变差,主要原因在于再选上来的连生体在前端的球磨阶段未能起到充分的单体解离效果,粗粒连生体在系统中的循环负荷增加,且在粗选及精选段不能被回收而又流失在最终的尾矿中。精矿直接返粗选和再磨返粗选后在粗精品位相差不大的前提下粗选回收率都有所提升,其中,再磨返粗选的粗选回收率提高了 1.25 个百分点,精矿品位只降低了 0.07 个百分点,基本可以忽略不计。因此,将尾矿再选精矿再磨后返回粗选是合理的流程。

3.2 再选精矿再磨细度试验研究

为探究尾矿再选精矿的再磨细度变化对粗选指标影响,对 680 m³ 浮选机精矿产品开展了再磨磨矿细度试验,试验结果见表 3。

从曲线图可以看出,随着磨矿细度增加,铜回收率及精矿品位都呈上升趋势,当磨矿细度为 -0.074 mm 占 77.64%,回收率达到最好。继续增加磨矿时间,精矿品位继续上升,回收率呈下降趋势。综合考虑 680 精矿最佳磨矿细度为 -0.074 mm 占比 77.64%。

表 3 680 m³ 浮选机精矿磨矿试验

试验条件		产品名称	产率/%	品位/%	回收率/%	
磨矿时间/min	-0.074 mm 占比/%				个别	累计
0	35.79	精矿	29.40	2.06	45.91	45.91
		尾矿	70.60	1.01	54.09	100.00
		原矿	100.00	1.32	100.00	
2	69.42	精矿	10.30	6.87	59.27	59.27
		尾矿	89.70	0.54	40.73	100.00
		原矿	100.00	1.19	100.00	
4	77.64	精矿	8.18	10.27	68.53	68.53
		尾矿	91.82	0.42	31.47	100.00
		原矿	100.00	1.23	100.00	
6	84.64	精矿	5.76	10.86	50.51	50.51
		尾矿	94.24	0.65	49.49	100.00
		原矿	100.00	1.24	100.00	
8	90.33	精矿	5.18	12.22	51.06	51.06
		尾矿	94.82	0.64	48.94	100.00
		原矿	100.00	1.24	100.18	

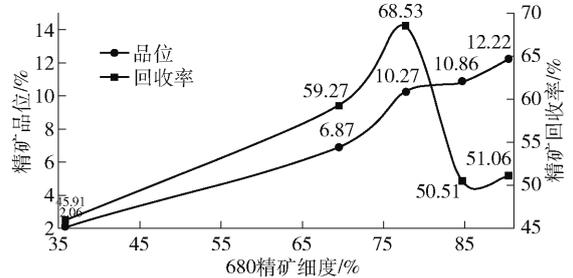


图 2 小型试验结果图

4 结论

1) 工艺矿物学镜下鉴定结果表明,普朗铜矿浮选尾矿矿样中的主要金属矿物为黄铜矿及黄铁矿但黄铜矿嵌布粒度极细,单体解离度小于 5%,且主要以包裹体或贫连生体的形式与脉石矿物紧密连生。

2) 粒度筛析结果表明,尾矿产品中的铜呈粗细两头分布,主要赋存在 +0.074 mm 粒级以及 -0.025 mm 粒级产品中,+0.074 mm 粒级金属量占 36.6%,-0.025 mm 粒级金属量占 20.3%,细粒级铜的单独回收面临诸多问题,在现有技术条件下回收存在一定困难,需重点考虑 +0.074 mm 粒级中含铜连生体的回收。

3) 尾矿再选的精矿经再磨后返回到粗选是最

佳的工艺流程,且再磨的最佳磨矿细度为 -0.074 mm 占比 77.64%。

综合而言,从工艺可行性和技术经济性分析来看,采用 HIF-680 超大型浮选机实施普朗铜矿尾矿再选工程是可行的。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 吴练荣,吴维虎,董桥峰,等. 云南普朗斑岩型铜矿伴生元素金、银、钼的赋存状态与分布规律[J]. 中国钼业,2021,45(5):11-17.
- [3] 赵吉堂,郑纪民,杨剑锋,等. 某大型斑岩型铜矿尾矿分级工业试验[J]. 现代矿业,2020,36(11):140-141+144.

- [4] 何琦,尹青临,卫召,等. 粗粒辉钼矿工艺矿物学及流态化浮选抛废研究[J]. 中国有色金属学报,2023,33(8):2729-2741.
- [5] 吴来生. 德兴铜矿尾矿再选回收工艺和应用研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [6] 沈政昌,杨义红,韩登峰,等. 680 m^3 充气式机械搅拌浮选机关键技术特点及其工业应用[J]. 有色金属(选矿部分),2020(1):105-112.
- [7] 张明,沈政昌,樊学赛,等. BGRIMM 浮选机放大方法与技术[J]. 有色金属(选矿部分),2020(1):98-104.
- [8] 何建成,沈政昌,韩登峰,等. 680 m^3 浮选机关键结构仿真分析[J]. 有色金属(选矿部分),2020(5):91-97.
- [9] 武涛,连晓圆,李阳,等. 一种浮选机智能移动终端的设计与开发[J]. 矿冶,2018,27(2):80-82.

Industrial experimental study on tailings reconcentration using flotation cell

JIANG Congguo, LI Chao, YANG Weijiang, LIU Baolong, ZHAO Ao, GUO Xiaowen, ZHANG Ming

Abstract: Pulang Copper Mine of Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd. is the multi-metal super large porphyry copper mine. The results of process mineralogy analysis show that the copper minerals mainly lost in the $+0.074$ mm and -0.025 mm fractions, and the $+0.074$ mm fraction is mainly copper-containing intergrowth. The large-scale high-efficiency flotation machine technology was used to study the re-concentration of flotation tailings in Pulang copper mine. The results show that the best results was achieved by returning the concentrate of HIF-680 flotation machine to rougher in main flow after regrinding. The rougher recovery increased by 1.25 percentage points, and the optimum grinding fineness of regrinding was -0.074 mm accounting for 77.64%. The tailings reconcentration project based on large-scale high-efficiency flotation machine technology improves the utilization rate of resources and creates considerable economic benefits for the plant.

Key words: porphyry; copper; tailings; reconcentration; flotation machine; regrinding

