

引用格式:韩志彬,马宠涵,李恒欠,等.大型钼矿浮选动力学测试及分析[J].有色设备,2025,39(4):75-82.

HAN Zhibin, MA Chonghan, LI Hengqian, et al. Flotation dynamics test and analysis of large molybdenum mine[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 75-82.

大型钼矿浮选动力学测试及分析

韩志彬¹, 马宠涵², 李恒欠², 侯孝安²

(1. 北矿机电(沧州)有限公司, 河北 沧州 061100; 2. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160)

[摘要] 在选钼流程中,柱机联合(浮选柱与浮选机联合使用)通常被认为是一种高效且具有优势的工艺流程,钼浮选回收面临着矿石嵌布粒度细、氧化程度高等特点。针对现有浮选流程,进行了选钼浮选柱、浮选机浮选动力学测试及分析。空气分散度测试表明各台浮选机、浮选柱空气分散度均大于2,空气在槽体截面上分散均匀,空气分散效果理想;气泡负载率测试表明粗粒级矿物上升运输过程中脱落概率小,回收效果较好,细粒级矿物未得到有效富集,回收效果较差;矿浆悬浮能力及气含率测试表明浮选机含气率总体分布相对均匀,槽内无明显的粒级分层现象,但存在轻微浓度分层现象;停留时间分布测试结果表明,实际浮选时间较理想浮选时间长,浮选机内部可能存在死区。

[关键词] 钼矿; 浮选; 空气分散度; 气泡负载率; 气含率; 矿浆悬浮; 停留时间分布

[中图分类号] TF841.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)04-0075-08

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.009

0 引言

钼是现代工业中不可或缺的战略金属,其独特的高温强度、耐腐蚀性及催化活性使其在高端制造、新能源和电子信息领域发挥关键作用。随着新能源革命的推进,钼基材料在风电齿轮箱、新能源汽车轻量化车身及氢燃料电池催化剂等领域的应用快速增长。2024年全球钼消费达28.6万t,其中新兴领域需求增速达18%。中国作为全球最大的钼资源国(储量占比39%),面临低品位矿占比81%、共伴生矿复杂等挑战,制约着资源高效开发。

辉钼矿(MoS_2)作为最主要的工业钼源,其浮选分离效率直接影响资源利用效益。然而,钼矿常与铜、铅、锌等硫化矿共生,且矿石嵌布粒度细、氧化程度高,导致传统浮选工艺面临选择性差、药剂消耗大等问题。浮选动力学研究通过量化矿物颗粒与气泡的碰撞-附着-脱落过程,为优化浮选流程提供关键参数。此外,充气速率与搅拌强度的动态调控可平衡回收率与精矿品位。

针对当前钼矿资源贫化、复杂化趋势,开展浮选

动力学测试对提升选矿效率具有重要意义^[1-3]。本研究以某中品位斑岩型钼矿为对象,通过系统分析停留时间分布、充气量、空气分散度、悬浮能力等对浮选指标的影响,建立动力学模型并优化工艺参数,旨在为类似矿山的提质增效提供理论依据与技术支撑。

1 浮选工艺及现状分析

陕西渭南地区某选矿厂设计处理能力为10000t/d,入选钼品位0.11%,浮选工艺流程采用钼铜混合浮选,钼粗扫尾矿选硫,选硫尾矿选铁,粗精矿再磨后精选,精尾矿选铜的工艺流程^[4]。

钼精矿的品位52%~57%,理论回收率可达到87.5%以上。其中,钼粗选平行配置2台 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱;三次粗扫选均采用2台KYF-100浮选机,共6台。

选厂设备投入使用超过10年时间,设备存在一定程度的老化以及指标下降问题,为优化选厂的生产指标,亟需对设备运行效能进行综合分析并精确掌握关键操作参数。开展浮选动力学分析,能够为现场工艺参数的精细化调整提供理论支撑,从而强

[收稿日期] 2025-03-11

[第一作者] 韩志彬(1988—),男,河北唐山人,高级工程师,硕士,主要从事选矿装备研究和开发工作。

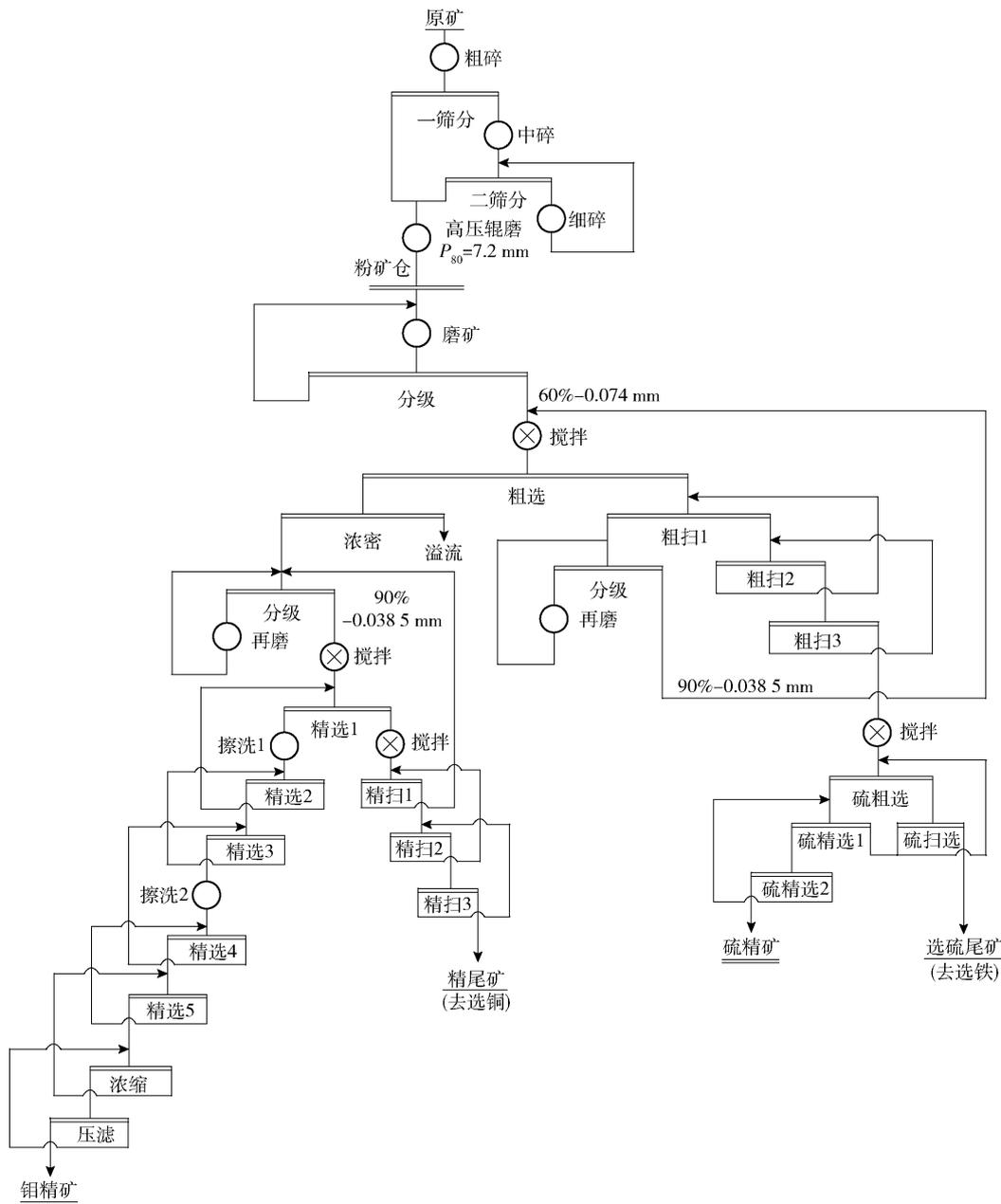


图 1 设计选矿工艺流程
Fig. 1 Mineral processing flow sheet design

化分选系统的适应能力与运行效率。需综合研判当前钼浮选工艺技术及配套装备的实际表现,有效辨识制约选别指标提升的主要环节,以此为后续浮选设备改造与工艺调整提供必要的的数据基础。

2 浮选动力学测试及分析

针对现有钼浮选系统正在使用的设备,需了解其分选能力并解析运行参数特性,本研究结合现场工况,对 2 台 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱及 6 套 KYF-100

浮选机进行了针对性的浮选动力学性能测试。本次测试重点针对以下 4 个方面进行评估:①浮选机的充气量及空气分散度测试;②矿浆相气泡负载率测试;③矿浆悬浮能力及气含率测试;④矿浆停留时间分布测试。

测试现场的设备流程如图 2 所示。

2.1 浮选机充气量和空气分散度

不同的矿物类型以及不同的浮选作业对充气量的需求存在较大差异,本次研究针对钼矿浮选流程

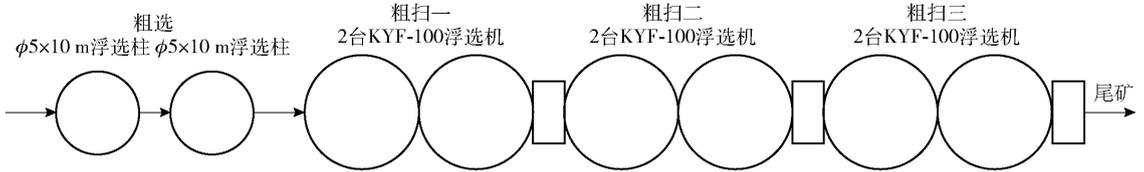


图2 钼粗扫选浮选柱、浮选机平面布置

Fig. 2 Layout of molybdenum rougher & scavenger flotation columns and flotation cells

中的关键作业环节,应用排水集气法收集气体,系统测定了充气量和空气分散度的特性^[5]。充气量(J_g)定义为每分钟从浮选机单位液面面积逸出的空气体积,是衡量设备充气性能的核心指标^[5]。空气分散度(η)用于量化浮选设备内部气体分布的均匀性,是评价叶轮-定子系统气体分散效能的关键参数^[2]。浮选设备内部空气能否实现均匀弥散,直接决定了气泡与矿物颗粒的接触效率,均匀的槽内空气分布可显著增加矿化过程的碰撞概率,从而有效改善浮选分选效率。浮选槽内气体的均匀分布是提升气泡与矿物颗粒接触效率的核心要素,不仅能显著提高矿物颗粒的有效碰撞概率,更能直接驱动浮选效率的优化提升^[6]。

2.2 矿浆相气泡负载率

气泡负载率(L)是浮选过程中的关键参数,定义为矿浆内气泡所负载矿物颗粒的总质量(m)与对应气泡群总体积(V)之比,即式(1)。

$$L = m/V \quad (1)$$

气泡负载率是量化矿浆中气泡对矿物颗粒携带能力的关键参数。该参数不仅能反映浮选药剂对矿化过程的影响,也可揭示浮选设备内流体动力学环境与矿化效率的关联^[7]。气泡负载率的测试过程采用专用测试装置气泡负载率测试仪完成^[8]。

2.3 矿浆悬浮能力及气含率

矿浆悬浮是指矿浆中的矿物颗粒所达到的悬浮状态。该状态对矿物颗粒与药剂的混合均匀性、颗粒-气泡的碰撞频率具有决定性影响。维持浮选机内矿物颗粒的有效悬浮是实现理想浮选工艺指标的基础保障^[9]。气含率定义为空气在矿浆-空气混合体系中所占据的体积百分比。这一参数不仅调控着气泡尺寸的分布特征,同时也显著影响着浮选速率及分选过程的选择性^[5,10-11]。浮选动力学受气含率的影响显著,存在一个优化区间。在此区间内,提高气含率通过增加单位体积气泡数量而提升动力学效率;超出此区间,过高的气含率则因显著缩短矿浆

在浮选机内的停留时间而产生负面效应。因此,操作不同类型浮选机时,必须依据其设计特点确定相应的最佳气含率。

矿浆悬浮能力和气含率测定采用深槽取样机气含率测试装置进行测定。

2.4 矿浆停留时间分布

矿浆停留时间 RTD (resident time distribution) 描述了矿浆从进入到离开浮选流程设备所消耗时间的分布特性,是表征矿浆在设备内流动状态的核心指标。RTD 与浮选设备的分选效率密切相关^[12]。

本次测试采用荧光示踪法来考察矿物颗粒从粗扫选一第 1 台浮选机入口到粗扫选三第 2 台浮选机出口(共 6 台浮选机)的持续时间。

先往粗扫选一的第 1 台 KYF-100 浮选机的给矿箱内快速倒入荧光染色剂,注意不要沾染在槽壁上,然后迅速在粗扫选三的第 2 台 KYF-100 浮选机尾矿箱处取样,取样时间共计 3 h,取样时间间隔设定 30 s ~ 10 min,采集样品共计 82 个。通过测定各样品中荧光剂的浓度,便可绘制出矿浆停留时间分布曲线图。

矿浆平均停留时间,即平均浮选时间,可借助以下积分表达式(2)求解。

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tC(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (2)$$

式中: t 为时间; $C(t)$ 为荧光浓度。

3 测试结果与分析

3.1 浮选机充气量和空气分散度的影响

本次测试选定粗选作业 2 号浮选柱和粗扫选三作业 1 号浮选机进行充气量测试。通过排水集气法测得 $\phi 5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 浮选柱及 KYF-100 浮选机的充气量数据,测试方法如图 3 所示,具体数据详见表 1。

鉴于现场空间限制,测试在每个槽体的横截面

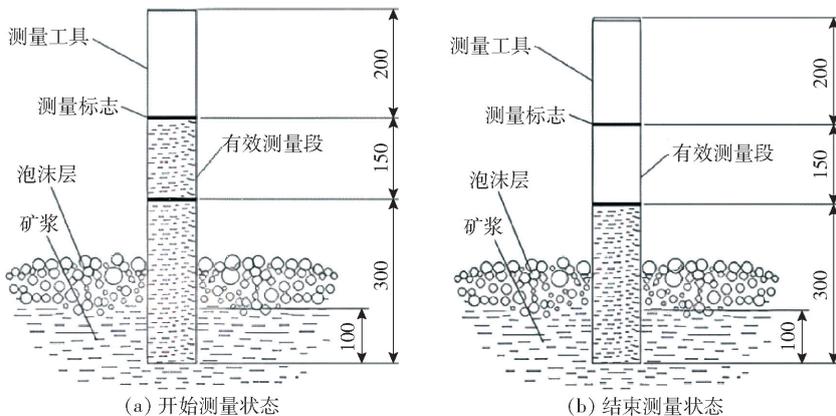


图3 排水集气法充气量测试示意

Fig. 3 Schematic diagrams of aeration volume test using drainage and gas collection method

上选取了空间分布相对均匀的 8 个测点(位置详见图 4)。相关测试数据集详见表 1。

表 1 浮选设备充气速率 J_g 及空气分散度 η

Table 1 Flotation equipment air filling volume J_g and air dispersion η

作业名称	设备	平均 时间/s	充气速率 J_g / ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$)	空气分 散度 η
粗选第 2 台	浮选柱	14.27	0.84	2.83
粗扫选一第 1 台	浮选机	30.11	0.40	6.09
粗扫选二第 1 台	浮选机	19.69	0.61	9.30
粗扫选三第 1 台	浮选机	19.85	0.60	10.33

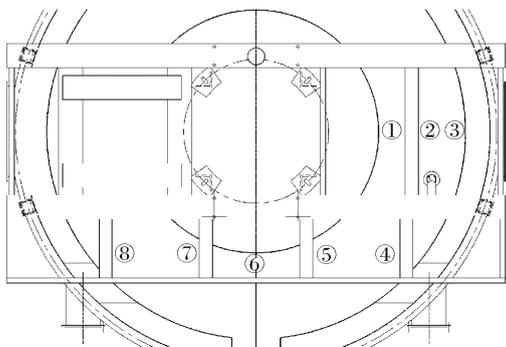


图 4 浮选机空气分散度及充气量测量点

Fig. 4 Flotation cell air dispersion and aeration measurement points

测量结果显示,粗选浮选柱与粗扫选 KYF-100 浮选机的空气分散度均超过 2.0,二者均展现出优异的空气分散性能。

为保证回收率,粗扫选作业通常采用较高的充气量。以黄铜矿浮选的粗选作业为例,充气量一般

设定在 $1.0 m^3 / (m^2 \cdot min)$ 。但是,由于不同矿物性质的差异,所需最佳充气量并非固定值。因此,建议现场对充气量进行微调,通过渐进式探索该参数与生产指标间的关联规律,进而优化生产实践。

3.2 矿浆相气泡负载率的影响

气泡负载率的测试位置如图 5 所示。对粗选浮选柱的溢流堰以下 0.9 m、0.6 m 截面和粗扫选一第 1 台浮选机溢流堰以下 0.85 m、0.55 m 截面进行取样,得到上升负载量和脱落负载量,并分别进行筛析,化验各粒级钼品位。

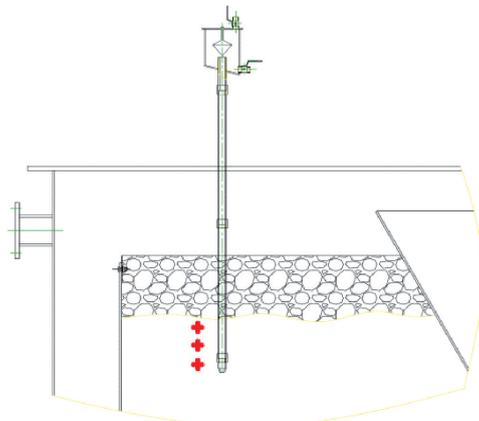


图 5 气泡负载率测试点

Fig. 5 Measurement positions of air bubble loading

粗选 $\phi 5 m \times 10 m$ 浮选柱内 2 个截面的矿浆样品的钼品位和气泡负载率见表 2,样品筛析各粒级的产率、钼品位和钼金属分布情况见图 6~8。

结果表明,粗选作业 $\phi 5 m \times 10 m$ 浮选柱中矿化气泡从距溢流堰 0.9 m 上升至 0.6 m 过程中,钼品位略微降低,但气泡负载率由 16.80 g/L 提高至

表2 粗选 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱气泡负载测试结果

Table 2 Rougher $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ Flotation column air bubble loading test results

参数	距溢流堰 深度/m	钼品位/ %	气泡负载率/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
取值	0.9	0.79	16.80
	0.6	0.68	23.82

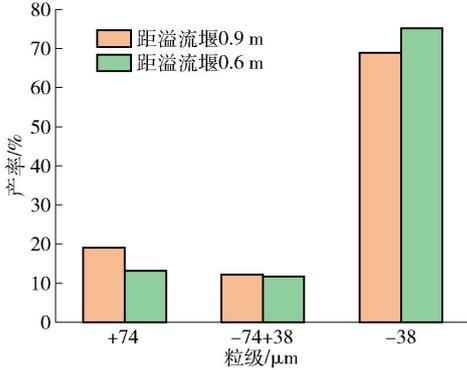


图6 粗选 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱气泡负载粒级产率分布

Fig. 6 Rougher $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ flotation column bubble loading particle sizes mass-pull distribution

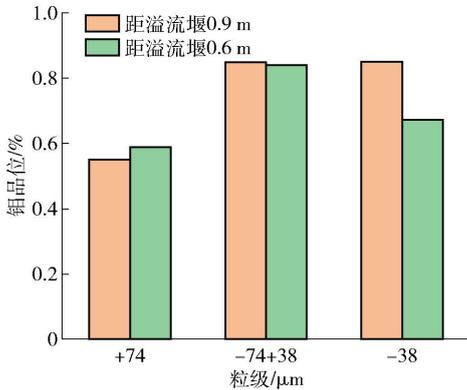


图7 粗选 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱气泡负载各粒级钼品位分布

Fig. 7 Rougher $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ flotation column bubble loading particle sizes Mo grade distribution

23.82 g/L;在此过程中部分 +74 μm 粒级固体颗粒从气泡脱落(图6),该粒级钼品位得到一定程度的富集(图7),但钼金属量占比降低(图8),表明大部分脱落颗粒为脉石,同时含有部分粗颗粒钼矿物连生体;大量自泡沫区脱落的低品位 -38 μm 粒级矿物颗粒在此过程又重新与上升气泡碰撞、粘附、上升(图6、图7),使得气泡单位面积携带固体颗粒增多,气泡负载率升高。

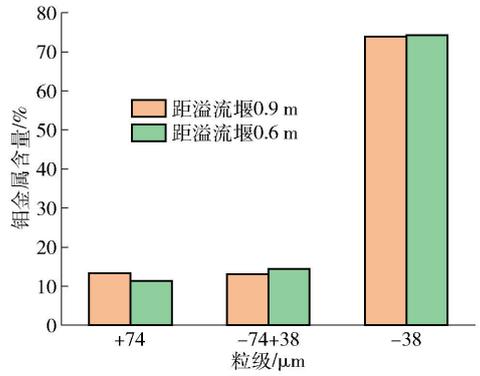


图8 粗选 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱气泡负载各粒级钼金属量分布

Fig. 8 Rougher $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ flotation column bubble loading particle sizes Mo metal content distribution

图6~图8可以得出,粗选 $\phi 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 浮选柱的矿化气泡中细粒级矿物产率和钼金属量占比较高,而粗粒级中则占比较低,表明柱内气泡对细粒级颗粒的粘附负载能力相对较好,实现大量细粒钼矿物上浮,而气泡对粗颗粒的负载能力较弱,部分粗粒钼矿物或连生体在跟随气泡上浮时脱落。

粗扫选一 KYF-100 浮选机内 2 个截面的矿浆样品,其钼品位与气泡负载率数据详见表3。同时,样品的筛析结果包括各粒级的产率、钼品位及钼金属分布,分别见图9、图10和图11。

表3 粗扫选一 KYF-100 浮选机气泡负载测试结果

Table 3 Test results of bubble loading in rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

参数	距溢流堰 深度/m	钼品位/ %	气泡负载率/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
取值	0.85	0.51	29.17
	0.55	0.41	31.93

从表3结果来看,粗扫选一作业 KYF-100 浮选机中矿化气泡从距溢流堰 0.85 m 上升至 0.55 m 过程中,气泡负载率和钼品位变化幅度不大,其中,气泡负载率为 29.17 ~ 31.93 g/L,表明气泡上升过程中,矿物颗粒与气泡的粘附性能良好,无明显脱落。

图9~图11表明,粗扫选一作业 KYF-100 浮选机中矿化气泡从距溢流堰 0.85 m 上升至 0.55 m 过程中,在不同截面取样的相同粒级产品的产率大致相同,但品位变化较大,其中, +150 μm 粒级的矿

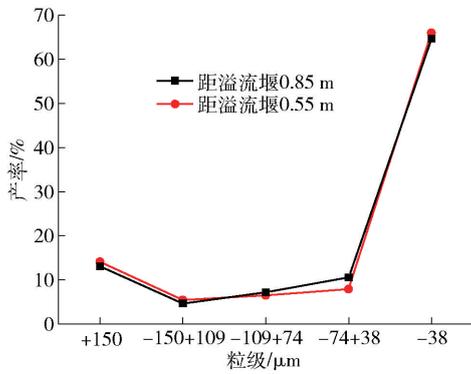


图9 粗扫选—KYF-100浮选机气泡负载测试各粒级产率分布

Fig. 9 Mass-pull distribution of each particle size in the bubble load test of rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

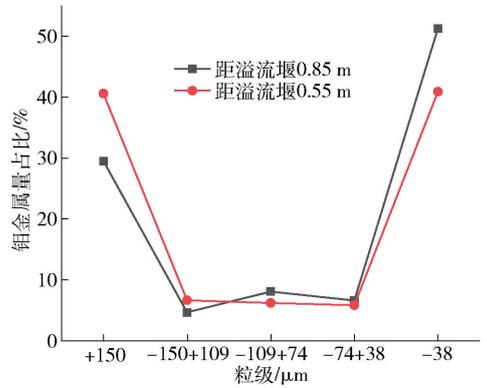


图11 粗扫选—KYF-100浮选机气泡负载测试各粒级钼金属量分布

Fig. 11 Mo metal content distribution of each particle size in the bubble load test of rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

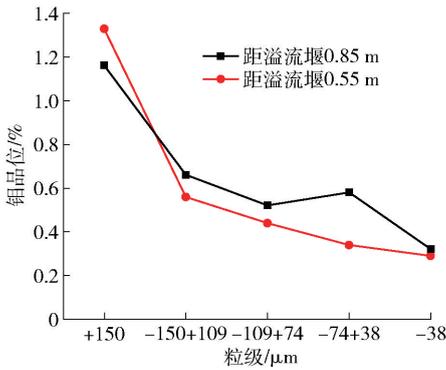


图10 粗扫选—KYF-100浮选机气泡负载测试各粒级钼品位分布

Fig. 10 Mo grade distribution of each particle size in the bubble load test of rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

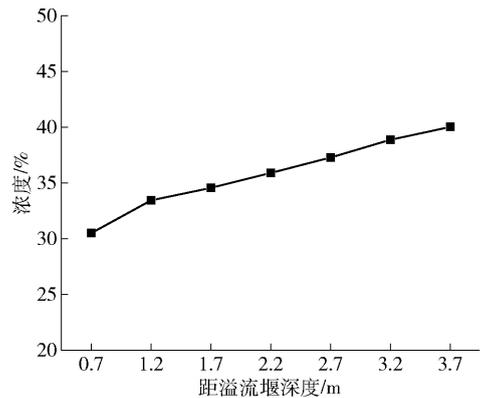


图12 粗扫选—KYF-100不同深度矿浆浓度分布
Fig. 12 Distribution of pulp concentration at different depths in rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

粒钼品位最高,且在上升过程中钼品位和金属量提高明显,表明粗粒级颗粒脱落以脉石为主,浮选机为粗粒钼矿物创造了良好的上浮条件,而-150 μm粒级钼品位较低,且矿化气泡在上浮过程中该粒级中钼矿物未得到有效富集,表明脉石和钼矿物均有不同程度的脱落。

3.3 矿浆悬浮能力及气含率的影响

选择粗扫选第1台浮选机作为测试对象,在距溢流堰3.7 m、3.2 m、2.7 m、2.2 m、1.7 m、1.2 m、0.7 m共7个矿浆界面,进行采样(间隔500 mm)检测含气率。然后,对样品进行筛析并化验各粒级的钼品位。粗扫选—KYF-100不同深度矿浆浓度分布、粒级悬浮特性和气含率分布如图12~14所示。

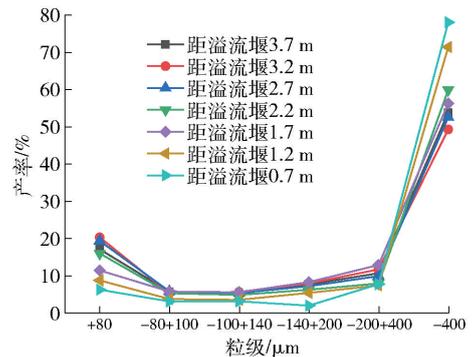


图13 粗扫选—KYF-100粒级悬浮特性
Fig. 13 Particle size suspension characteristics of rougher-scavenger I KYF-100 flotation cell

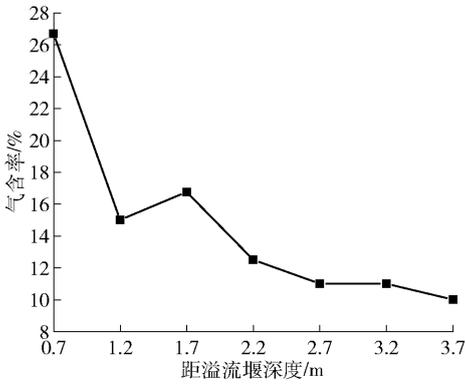


图 14 粗扫选—KYF-100 浮选机气含率分布

Fig. 14 Distribution of air hold-up in rougher-scavenger KYF-100 flotation cell

由图 12 可以得出,粗扫选—KYF-100 浮选机槽内矿浆的浓度随深度的减小而降低,取样最深处和最高处间浓度差值近 10%,存在轻微浓度分层现象。图 13 表明,各粒级的矿物颗粒在粗扫选—KYF-100 浮选机槽内分布较为均匀,无明显粗细颗粒分层现象。图 14 结果表明,粗扫选—KYF-100 浮选机不同深度截面上的气含率随深度的降低而逐渐增加,普遍维持在 10%~16.75%,其中距溢流堰 0.7 m 处受推泡锥影响且接近泡沫层,气含率达到最大,为 26.67%。

综上,此次测试表明粗扫选—KYF-100 浮选机气含率总体分布相对均匀,槽内无明显的粒度分层现象,但存在轻微浓度分层现象。可通过设备结构升级(叶轮/充气系统改造)及操作参数精准控制(转速/浓度/充气速率匹配),实现矿浆的均匀悬浮与高效分选。

3.4 矿浆停留时间分布的影响

2 次粗扫选试验结果如图 15 所示。图 15 显示,根据 2 次独立测试所得的荧光剂浓度绘制出的矿浆停留时间分布曲线十分近似,具有高度吻合性。经过计算,2 次 RTD 测试的矿浆停留时间分别为 46.13 min 和 43.69 min,其平均值为 44.01 min。由此得知,粗扫选流程配置的 6 台 KYF-100 浮选机,在现有的给矿条件下,矿浆平均停留时间(即平均浮选时间)为 44.01 min。

平均浮选时间的估算公式如式(3)所示。

$$t = nKV/Q \quad (3)$$

式中: n 为浮选机槽数; V 为浮选机几何容积; K 为浮选机有效容积系数(有色金属矿取 0.8~0.85); Q

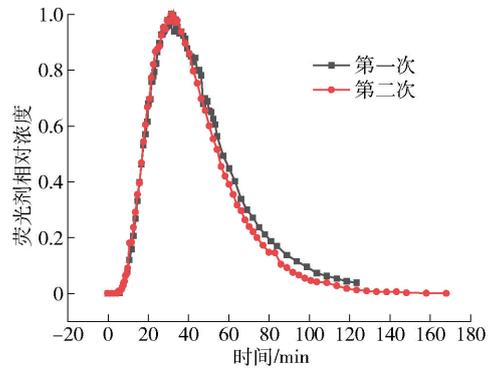


图 15 粗扫选作业 RTD 测试结果

Fig. 15 RTD test results of rougher and scavenger process

为矿浆体积流量。

本次测试 $n = 6$, $K = 0.85$, $V = 100 \text{ m}^3$, $Q = 13 \text{ m}^3/\text{min}$,平均浮选时间计算为 39.23 min。

本次测量值(44.01 min)为估算值(39.23 min)的 112.18%,表明 6 台 KYF-100 浮选机内可能存在停滞区(死区)。

4 结论

本次测试针对此选厂的浮选工艺流程,通过系统性的浮选动力学测试和分析,得出当前浮选工艺存在的不足,并阐明了钼浮选过程的动力学特性,主要结论如下。

1) 充气量和空气分散度:钼粗选作业的充气量为 $0.84 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,空气分散度为 2.83;粗扫选作业充气量为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,均表现出良好的空气分散效果。

2) 悬浮能力:钼粗扫选—KYF-100 浮选机粗槽内取样最深处和最高处矿浆浓度差值近 10%,存在轻微浓度分层现象,但无明显粗细颗粒分层现象。此外,矿浆气含率在普遍在 10%~16.75%,总体分布相对均匀。

3) 粗颗粒回收能力:粗选 $\phi 5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 浮选柱槽内气泡对细粒级矿物颗粒的负载能力较强,其钼金属量占比高达 73%,而对粗粒级矿物的回收能力较弱,表现为部分粗颗粒钼矿物或连生体在随气泡上升过程中出现脱落;粗扫选—KYF-100 浮选机中气泡对粗颗粒钼矿物的负载能力较强,粗粒级颗粒脱落主要以脉石为主。

4) 停留时间分布分析:针对 6 台 KYF-100 浮

选机进行的 2 次测试, 所得的停留时间分布曲线具有高度吻合性。经计算, 两次测试对应的矿浆停留时间依次为 46.13 min 和 43.69 min, 平均值为 44.01 min, 是理想停留时间的 112.18%, 表明部分 KYF-100 浮选机内部存在“死区”。

总的来说, 良好的空气分散效果以及矿浆悬浮能力表明浮选设备叶轮-定子核心系统的搅拌功能良好。2 种设备对不同粒级矿物回收能力的测试结果表明浮选柱对于细粒级矿物的回收效果良好, 浮选机对于粗粒级的回收有优势。停留时间分布测试表明浮选机内存在一定的“死区”, 矿浆在这部分区域的流动状态可能存在问题, 甚至有沉槽风险, 后续可根据此结论优化浮选机槽体的内部结构设计。

[参考文献]

[1] 杜春阳. 河南省嵩县雷门沟钼矿床矿石加工技术性能评价[J]. 有色矿冶, 2023, 39(4): 25-29.
 [2] 何荣权, 梅志, 杨少燕. 某钼矿选别工艺流程优化研究[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(3): 34-37.
 [3] 谢卫红, 叶岳华, 武钊. 某高硫难选铜钼矿浮选工艺优化及工业应用研究[J]. 云南冶金, 2024, 53(2): 58-63.

[4] 王漪靖. 金堆城钼业公司选矿工艺现状分析[J]. 中国钼业, 1999(6): 42-45.
 [5] 马宠涵, 樊学赛, 陈飞飞. 钽铁矿浮选动力学测试及分析[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(5): 8-14.
 [6] 樊学赛, 陈俊, 史帅星, 等. 钽铁矿浮选机动力学特性分析[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(2): 97-101.
 [7] 陈东, 夏晓鸥, 杨丽君, 等. 320 m³ 自吸气浮选机动力学性能研究和工程化[J]. 矿冶, 2019, 28(4): 118-125.
 [8] 韩登峰, 吴峰, 张福亚, 等. 气泡负载测量装置的创新及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1): 91-97.
 [9] 沈政昌, 卢世杰, 陈东, 等. 大型机械搅拌式浮选机槽内固体悬浮的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2009(4): 37-40.
 [10] 张跃军, 任林海, 陈飞飞, 等. 钼粗扫选作业 KYF-320 浮选机浮选动力学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 102-107.
 [11] 刘传国, 李争, 李洪昌, 等. 某铜钼钨矿选矿试验研究[J]. 中国矿山工程, 2008(1): 10-14, 43.
 [12] 姚明钊, 韩登峰, 朱振. HIF-130 浮选机在铜尾矿选铜中的设计与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5): 113-119.

Flotation dynamics test and analysis of large molybdenum mine

HAN Zhibin¹, MA Chonghan², LI Hengqian², HOU Xiaoran²

(1. BGRIMM MAT (Cangzhou) Co., Ltd., Cangzhou 061100, China;

2. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: In the molybdenum beneficiation process, the combined use of column and cell (joint application of flotation column and flotation cell) is generally regarded as an efficient and advantageous technological process. Molybdenum flotation recovery is faced with characteristics such as fine embedding particle size and high oxidation degree of ores. Aiming at the existing flotation process, the flotation dynamics tests and analyses of molybdenum flotation column and flotation cell were carried out. The air dispersion test shows that the air dispersion degrees of each flotation cell and flotation column are all greater than 2, the air is uniformly dispersed on the cross-section of the tank, and the air dispersion effect is ideal. The bubble loading rate test indicates that the shedding probability of coarse particle minerals during the upward transportation process is small, and the recovery effect is good, while fine particle minerals are not effectively enriched, and the recovery effect is poor. The slurry suspension capacity and gas holdup tests show that the overall distribution of gas holdup in the flotation cell is relatively uniform, there is no obvious particle size stratification in the tank, but there is a slight concentration stratification phenomenon. The residence time distribution test results show that the actual flotation time is longer than the ideal flotation time, and there may be dead zones inside the flotation cell.

Keywords: molybdenum ore; flotation; air dispersion degrees; bubble loading rate; gas holdup; slurry suspension; residence time distribution



accident flue and sent to the subsequent dust collection and desulfurization system. Based on the process flow and characteristics, the paper developed a spray cooling box for flash furnace emergency flue. High temperature flue gas enters from the bottom of the box and flows vertically upward. The atomized droplets are sprayed vertically downward through the nozzle and downward in the direction of flue gas flow. The two countercurrent contact, mix, and exchange heat in all directions. The tiny droplets quickly evaporate and vaporize under the effect of high temperature of flue gas. The sensible heat of flue gas is converted into latent heat of water vapor, which makes the flue gas temperature rapidly cool to the required temperature and then flow out through the top exhaust port. Through the practical verification of the flash furnace production in the copper smelting technology improvement and renovation project of a certain non-ferrous group, the overall layout is reasonable, the process flow is smooth, there is no liquid water in the cooling box, and various technical indicators meet the design requirements.

Keywords: copper smelting; flash furnace; accident flue; high temperature flue gas; spray cooling box



(上接第 74 页)

Study on corrosion resistance of copper/aluminum dissimilar metal diffusion welding joints

TIAN Jipeng^{1,2}, DING Yunlong^{1,2}, SHAO Wenjie^{1,2}, CUI Shiyi^{1,2}, ZHUANG Zhiguo³, HAN Bing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface, Anshan 114051, China;

3. Chongyi Zhangyuan Tungsten Co., Ltd, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In the study, the vacuum diffusion welding process was used to successfully weld T2 copper and 1060Al. The scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer were utilized to analyze the microstructure and phase composition of the diffusion layer. Corrosion immersion tests and research on the electrochemical corrosion performance were carried out in a 3.5wt% NaCl solution to study and compare the corrosion resistance of each diffusion layer and the base materials. The results show that a diffusion layer composed of the AlCu layer, Al₂Cu layer, and Al₄Cu₉ layer was formed at the interface of the T2 copper/1060Al vacuum diffusion joint. The corrosion resistance varied in different regions of the diffusion layer. The corrosion degree in the diffusion layer region on the copper side was relatively mild. In the diffusion layer region on the aluminum side, the pitting holes developed into pitting pits, and with the passage of time, irregular deep gullies were formed, which eventually developed into exfoliation corrosion. In terms of the corrosion resistance, the base materials and each diffusion layer were ranked as follows: T2Cu > Al₄Cu₉ > AlCu > Al₂Cu > 1060Al.

Keywords: copper/aluminum diffusion welding; diffusion layer; corrosion resistance; microstructure; dissimilar metals; welding; corrosion potential

