

引用格式:陈飞飞,李伟,张明,等. 锂云母、钛铁矿及黄铜矿浮选泡沫特性研究[J]. 有色设备,2024,38(3):45-49.

CHEN Feifei, LI Wei, ZHANG Ming, et al. Research on mineral flotation foam characteristics[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(3): 45-49.

# 锂云母、钛铁矿及黄铜矿浮选泡沫特性研究

陈飞飞<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 张明<sup>1,2</sup>, 郑诏星<sup>1,2</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;  
3. 重钢西昌矿业有限公司, 四川 西昌 615099)

**[摘要]** 泡沫区是浮选动力学中的一个重要分区,是实现有用矿物与脉石矿物最终分离的一个重要分区,控制着产品的产率、精矿品位及最终的回收率。选取三种典型矿物进行泡沫特性的分析研究,通过径向泡沫取样测试、泡沫流动性测试、泡沫载荷核算和药剂制度分析,剖析了锂云母、钛铁矿及黄铜矿的泡沫特性,提出了差异化泡沫强制回收的思路,为浮选泡沫产品的及时高效回收提供了指导。

**[关键词]** 浮选; 精矿再富集; 泡沫流动性; 泡沫载荷; 锂云母; 钛铁矿; 黄铜矿

**[中图分类号]** TD923 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)03-0045-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.007

## 0 前言

浮选是在气液固三相体系中对矿物进行回收的方法,是目前金属回收最广泛的方法<sup>[1]</sup>,80%有色金属矿和黑色金属矿采用浮选的方法进行综合回收。依据浮选机的结构及其内部形成的流畅结构,可以将浮选机分成4个不同的浮选动力学区域,包括搅拌混合区、运输区、分离区和泡沫区<sup>[2]</sup>。其中,有关搅拌混合区、运输区和分离区的研究比较充分,采用现代流体力学测试技术及计算模拟仿真技术实现了宏观层面搅拌功率、循环量、停留时间、气泡直径的预测,实现了在微观层面局部湍动能的分布和耗散、气液分散、涡尺度、颗粒与气泡碰撞矿化的研究<sup>[3-5]</sup>。泡沫区是实现有用矿物与脉石矿物最终分离的一个过程,控制着作业的产率、精矿的品位及最终的回收率<sup>[6-8]</sup>。稳定的泡沫层能够保证附着在气泡上的矿物颗粒不致脱落,使其随泡沫一起顺利流入泡沫槽内得到收集,合适的泡沫层厚度有利于实现精矿的再富集,保证得到最佳的精矿品位,适宜的泡沫停留时间则影响泡沫产品的回收率。然而有关

泡沫区的研究相对比较少,不同矿物不同作业泡沫流速大小、泡沫层厚度及泡沫最佳运输距离的确定基本以工程经验为主,缺乏理论指导,相关参数与浮选指标之间的关系研究不充分,不利于泡沫产品的及时高效回收。以湖南某铈矿为例,针对泡沫流动性差的问题,对SF-8浮选机刮板转速增加5 r/min后,铈精矿产率提高1.0 kg/min,每年多产铈精矿86.4 t,提高了选矿厂的综合回收率<sup>[9]</sup>。国外有关泡沫特性的研究开始比较早,Subrahmanyam TV于20世纪90年代开始泡沫稳定性的研究,Saeed farokhpay分析了泡沫层的结构和稳定性对精矿品位和回收率的影响,但到目前为止还未建立成套的泡沫层的应用理论<sup>[10-12]</sup>。国内相关的研究相对较少,刘惠忠等<sup>[13]</sup>研究了原矿品位、入料粒度、给矿流量、充气速率、泡沫流速等参数对泡沫层厚度的影响研究,结果表明入料粒度是最大的影响因素,其次是入料流量、充气速率,而泡沫流速等参数与泡沫层厚度呈弱相关趋势。刘万峰等<sup>[14]</sup>在某铜矿上开展了气泡在径向方向运动过程中粒极回收效果的影响研究,探究了运动过程中矿物的脱落和富集效果。

## 1 几种浮选泡沫收集方法

目前常用的浮选泡沫收集方法主要有刮板强制收集、推泡沫辅助自溢流和负压抽吸3种方式。浮

**[收稿日期]** 2024-03-26

**[第一作者]** 陈飞飞(1992—),男,江西吉安人,工程师,硕士,主要研究方向为选矿装备的优化及动力学测试。

**[基金项目]** “十四五”国家重点研发计划(2021YFC2903201)。

选泡沫负压抽吸装置作为一种新型的泡沫收集方式,抽吸泡沫效率更高,能简化泡沫槽等结构,同时兼具有消泡功能,但存在破坏泡沫层稳定性而削弱精矿再富集效果的问题,同时存在需要额外的能耗提供负压抽吸动力的缺陷。机械结构的泡沫强制刮泡对泡沫层的破坏程度较负压抽吸低,机械性能稳定,能耗低,但存在泡沫收集效率不及负压抽吸、对泡沫层有一定的破坏等劣势。泡沫自流则能较好地保持泡沫层的稳定性和再富集效果,但泡沫的排出速度受矿物性质和药剂制度的影响较大,泡沫排出效率低。浮选泡沫收集方式的选择,一方面应最大限度维持原有泡沫层的稳定性以及泡沫层的再富集效果,另一方面需要避免矿化气泡在泡沫层中的过渡停留,防止其影响矿物的综合回收。而不同矿物泡沫产品的及时高效回收所面临的难点不同,主要集中在泡沫再富集、泡沫产率、泡沫流速和消泡 4 个方面,为此需要充分研究不同矿物的泡沫特性,指导泡沫收集方式的应用,实现泡沫产品及时高效回收,进而提升选厂的经济技术指标。

## 2 不同矿物浮选泡沫特性研究

径向泡沫取样测试是在槽体径向方向布置多个测点,对泡沫层表层进行取样测试,通过分析矿化气泡在径向上的品位、粒度及金属含量分布的变化来评估泡沫层的再富集效果<sup>[15]</sup>。泡沫流动性测试是指单位时间内泡沫在泡沫层中的运输距离,表征矿化气泡的驻留时间。泡沫载荷是浮选机选型设计的核心原则之一,不同矿物的回收均需要保证泡沫载荷在合理范围内才能实现泡沫产品的高效回收,用来表征泡沫产率,其中溢流堰载荷是指单位时间单位溢流堰长度泡沫产品从浮选机内进入泡沫槽中的干矿量,截面积载荷是指浮选机水平截面上单位时间单位面积上承载的矿化气泡的干矿量。药剂制度是泡沫稳定性的核心影响因素,胺类或脂肪酸类药剂在处理氧化矿时,对细泥的捕收效果很好,进而导致泡沫稳定性增强,为此药剂制度影响泡沫消泡的难易程度。

### 2.1 钛铁矿泡沫特性研究分析

攀西地区钛铁矿选别工艺流程一般包括 1 次粗选、2 次扫选和 4 次精选,设备容积小,数量多,流程长。选取西昌某钛铁矿选厂 16 m<sup>3</sup> 浮选机进行泡沫特性研究,径向泡沫取样测点布置如图 1 所示,各取样点距溢流堰距离分别为 0 mm、200 mm、400 mm、

600 mm,各作业径向泡沫取样测试结果如图 2 所示。

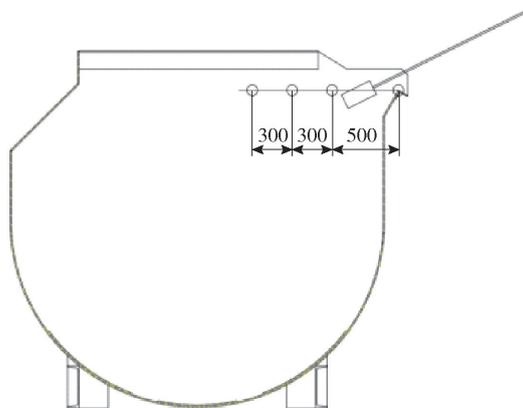


图 1 泡沫流动性取样测试点

Fig. 1 Sampling and testing points for foam liquidity

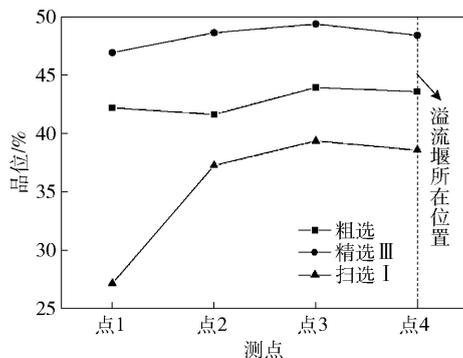


图 2 粗扫精选浮选机泡沫流动性测试结果

Fig. 2 Test results of foam fluidity of flotation machine for rough sweeping and cleaning

由图 2 可知,泡沫从槽体后推泡板到溢流堰的移动过程中,品位整体呈上升趋势,表明泡沫在向溢流堰移动过程中得到了一定的富集。分析粗选、精选 III 作业品位变化可知,点 3 是各取样点中的品位高点,表明粗选和精选 III 作业中第 2 台浮选机矿化气泡在泡沫层中由内向外的运动过程中存在驻留时间偏长、排出不顺畅的情况。

将小纸片平稳放到泡沫层表面,测量小纸片的运动速度,来表征泡沫的流速。粗选、扫选 I 及精选 II 第 2 台浮选机泡沫流速测试结果见表 1。

表 1 泡沫流动性测试

Table 1 Foam liquidity test

作业及序号	流速/(mm·s <sup>-1</sup> )
粗选 - 2	125
扫选 I - 2	114
精选 II - 2	132

现场观察及测试分析可知,各作业泡沫流速较快,在 114 ~ 132 mm/s 之间波动,不存在泡沫移动速度低的问题。

钛铁矿最终精矿产率大,一般在 36% 左右,泡沫量丰富,溢流堰载荷和截面积载荷急剧变大。通过核算,粗选和精选 I、精选 II 作业溢流堰载荷高达 11 t/h/m,截面积载荷高达 6 t/h/m<sup>2</sup>,远高于常规矿物选别的载荷。在药剂制度和含泥方面,现场主要采用的是脂肪酸类药剂,在选钛前设置有脱泥作业,为此泡沫的稳定性一般,不存在消泡困难的难题。

综合而言,钛铁矿的回收采用的是脂肪酸类捕收剂,选别之前均设有脱泥作业,泡沫能正常消泡,泡沫流动性流动性较好,但因存在泡沫产率大、泡沫载荷大,导致局部区域泡沫存在驻留时间长,不能及时排出的问题。因此,需要重点解决局部区域泡沫不能及时排出的问题。

## 2.2 宜春地区锂云母泡沫特性研究分析

宜春地区锂云母的选别过程中,工艺相对简单,一粗一扫两精就能达到选别要求。



图3 锂云母浮选泡沫状态

Fig. 3 Foam state of lithium mica flotation

某锂云母选厂粗、扫、精选作业浮选机泡沫流动性测试结果如表 2 所示。

表 2 泡沫流动性测试  
Table 2 Foam liquidity test

作业及序号	流速/(mm·s <sup>-1</sup> )
粗选-5	66.7
粗选-9	92.2
粗选-9	85.7
精选 I-2	31.4
精选 II-2	39.7
扫选-3	46.1
扫选-6	54.3

通过现场考察及数据分析可知,粗选作业泡沫

流速为 66.7 ~ 92.2 mm/s,扫选作业为 46.1 ~ 54.3 mm/s,精选作业为 31.4 ~ 39.7 mm/s,泡沫流速粗选 > 扫选 > 精选,泡沫整体流速偏低,流动性较差。

泡沫产率大,为 15% ~ 20%,粗选作业溢流堰载荷达到 4.2 t/h/m,高于常规硫化矿的泡沫载荷。在药剂制度和含泥方面,现场在酸性条件下采用阳离子捕收剂进行锂云母与长石分离,同时脉石矿物含有大量次生细泥,严重影响锂云母浮选回收效果和泡沫的稳定性。

综合而言,锂云母泡沫产率偏大(15% ~ 20%),泡沫干,含水量低,整体流动性较差(粗选作业泡沫流速为 66.7 ~ 92.2 mm/s,扫选作业 46.1 ~ 54.3 mm/s,精选作业为 31.4 ~ 39.7 mm/s),因此需要重点解决泡沫流动性及消泡 2 方面的问题。

## 2.3 安徽地区某黄铜矿泡沫特性研究分析

安徽地区某黄铜矿选厂为斑岩型黄铜矿,属于大型高硫矿床,综合回收铜铁硫元素,脉石矿物主要有含铜磁黄铁矿、滑石、蛇纹石、伴生易浮硅酸盐等。现场铜浮选采用一粗三扫一精一精扫作业进行铜回收,粗扫选采用的是 10 台 WEMCO-130 浮选机,设备配置为 3 + 2 + 3 + 2。选取粗扫选各作业第 1 台浮选机进行径向泡沫取样测试,在径向方向布置 4 个测点,其中点 4 为溢流堰所在的位置,取样点的布置如图 4 所示,品位分析结果见图 5。

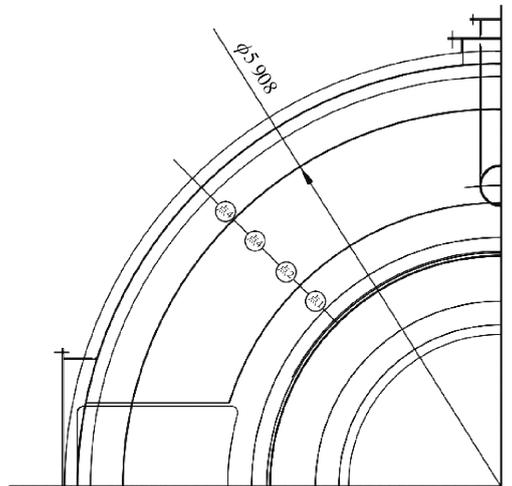


图4 径向泡沫槽取样

Fig. 4 Radial foam tank sampling

从作业趋势来看,从粗选至扫选作业品位不断降低,粗选和扫选 I 作业矿化气泡由内向外的运动过程中,品位先升高后降低再升高,整体呈上升趋势

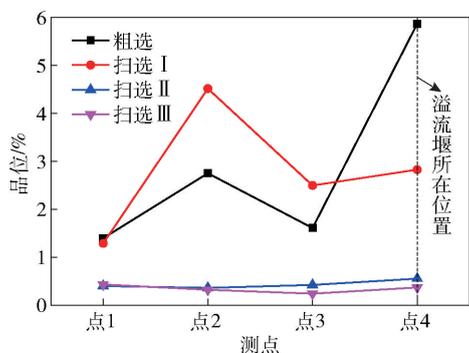


图5 各作业径向泡沫取样品位变化趋势

Fig. 5 Variation trend of radial foam sampling grade in each operation

势,这一富集过程主要是通过脉石脱落来实现,其中点2是品位的第二高点,初步判断粗选和扫选I第1台浮选机泡沫载荷偏大,驻留时间偏长,泡沫产品不能及时向外排出。

粗、扫、精选作业浮选机泡沫流动性测试结果如表3所示。

表3 泡沫流动性测试  
Table 3 Foam liquidity test

作业及序号	流速/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
粗选-1	115
扫选-1	130
精选-1	110

通过现场考察及数据分析可知,各作业泡沫流速整体偏大,流速较快。

通过核算可知,粗选作业泡沫产率最高,但也仅为8%,粗选作业核算的溢流堰载荷为 $1.26\text{ t/h/m}$ ,截面积载荷为 $1.17\text{ t/h/m}^2$ ,载荷为硫化铜矿物的平均值。在药剂制度和含泥方面,现场采用黄药类捕收剂进行捕收,同时脉石矿物中含一定的细泥,但选铜作业前存在脱泥作业,泡沫消泡容易。

综合而言,黄铜矿浮选作业产率低,溢流堰载荷和截面积载荷为硫化铜矿物浮选的平均值,泡沫流速快,消泡容易,但由于大型浮选机泡沫运输距离较长,在局部区域也存在驻留时间长、不能及时排出的情况。因此应该重点解决泡沫运输距离长、局部泡沫驻留时间长、不能及时排出的问题。

### 3 结论

通过不同矿物浮选泡沫特性的研究可知,依据

不同的情况需要对症下药,有针对性采用不同的泡沫强制回收方式才能达到最佳的回收效果。为此,本文提出了差异化泡沫强制快速回收的思路,针对流动性差、消泡困难的场景采用负压抽吸的方式高效回收泡沫产品;针对泡沫载荷大、泡沫运输距离长、流动速度偏低的场景采用机械结构强制刮泡的方式高效回收泡沫产品。

#### [参考文献]

- [1] 沈政昌. 浮选机发展历史及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(51):34-46.
- [2] 孙传尧, 史帅星, 韩登峰, 等. 充气机械搅拌式浮选机内浮选动力学过程分区模型[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3):411-418.
- [3] 沈政昌, 张明, 史帅星, 等. 充气自吸浆浮选机放大与动力学性能[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3):434-444.
- [4] 赵明珠, 谢佩, 戴惠新. CFD技术在浮选设备中的应用进展[J]. 黄金, 2023, 44(10):45-49.
- [5] 苏子旭, 李晓恒, 闫小康. CFD技术在浮选流场研究中的应用[J]. 中国科技论文, 2022, 17(1):90-98.
- [6] 李国胜. 浮选泡沫的稳定性调控及粉煤灰脱炭研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013.
- [7] 谢权, 聂登攀, 罗斌, 等. 胶磷矿浮选泡沫稳定性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(6):49-55.
- [8] 凌向阳. 泡沫稳定性及气-液界面颗粒运动对泡沫相浮选的影响机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [9] 周多样. 浅谈浮选机泡沫刮板装置的改进[J]. 矿山机械, 2011, 39(12):135-136.
- [10] Saeed Farrokhpay. The Significance of Froth Stability in Mineral Flotation—A review [J]. Advances in Colloid and Interface Science 166(2011):1-7.
- [11] T. V. SUBRAHMANYAM, ERIC FORSSBERG. Froth stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation—A Review [J]. International Journal of Mineral Processing, 23(1988):33-53.
- [12] M. H. MOYS. Residence Time Distributions and Mass Transport in the Froth Phase of the Flotation Process [J]. International Journal of Mineral Processing, 13(1984):117-142.
- [13] 刘惠中, 邓浩宗. 基于极限树回归的浮选泡沫层厚度预测[J]. 有色金属工程, 2023, 13(3):79-86.
- [14] 刘万峰, 王立刚, 孙志健, 等. 某铜矿粗扫选泡沫流动特性研究[J]. 矿冶, 2021, 30(1):16-20.
- [15] 余华富. 浮选机泡沫动态特征信息提取及泡沫层厚度控制模型研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2022.

## Research on mineral flotation foam characteristics of lithium mica ilmenite and chalcopyrite

CHEN Feifei<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, ZHANG Ming<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhaoxin<sup>1,2</sup>

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China; 2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100160, China; 3. Chonggang Xichang Mining Co., Ltd. Xichang 615099, China)

**Abstract:** The foam zone is an important section in flotation dynamics, serving as a process for the final separation of useful minerals from gangue minerals. It controls the yield of the product, the grade of the concentrate, and the ultimate recovery rate. In this study, three typical minerals were selected for the analysis and research of their foam characteristics. Through radial foam sampling tests, foam mobility tests, foam load calculations, and reagent system analysis, the foam characteristics of lithium mica, ilmenite, and chalcopyrite were analyzed. Based on these findings, a differentiated approach for forced recovery of foam was proposed, providing guidance for the timely and efficient recovery of flotation foam products.

**Key words:** flotation; concentrate re-cleaner; froth mobility; froth layer loading; lithium mica; ilmenite; chalcopyrite ▲

---

### 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591、63933053 联系。

《有色设备》编辑部