

浮选生产过程泡沫状态与药剂控制关系研究

张海洋^{1,2,3}, 王旭^{1,2,3}, 陆博^{1,2,3}, 刘洋^{1,2,3}, 宋涛^{1,2,3}

(1. 矿冶科技集团有限公司; 2. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室; 3. 矿冶过程自动控制技术北京市重点实验室)

摘要:针对泡沫状态与浮选药剂用量的对应关系,采用泡沫图像分析仪与液位计等在线检测设备对浮选生产过程中的泡沫状态进行量化处理,建立泡沫状态与浮选药剂控制之间的对应关系。基于量化后的泡沫特征变量,对浮选药剂用量给出了指导意见,并为后续开展浮选药剂智能控制提供了基础。经过长时间现场观察和大量数据分析,验证了理论研究的合理性,对于提高浮选生产过程的效率和稳定性具有重要意义。

关键词:泡沫状态;泡沫图像;检测设备;量化处理;浮选药剂;智能控制

中图分类号:TD923

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)03-0032-05

doi:10.11792/hj20240308

引言

浮选生产易受工艺流程、浮选机结构与性能、矿石性质、操作因素(矿浆浓度、温度等)及药剂制度等因素影响。其中,工艺流程和浮选机结构与性能在投产前经过反复论证,可较好满足生产运行条件,投产后不会轻易改动;而矿石性质不是一成不变的,不同时刻的矿石性质都会有差异,浮选生产过程中一般不会对每一时刻来矿进行化验分析,矿石性质的变化会给浮选生产带来巨大影响,造成生产不稳定和指标波动。操作因素在浮选生产过程中具有较大影响,需要时刻关注矿浆浓度及矿浆温度等因素变化,使其稳定在合理范围内^[1]。浮选药剂是浮选生产中必不可少的“参与者”,合理的药剂用量有利于提高选矿效率和金属回收率^[2]。泡沫表面物理特性与浮选工艺状态密切相关,泡沫颜色、泡沫形状、泡沫流速、泡沫稳定性及泡沫层厚度等物理特征是浮选生产操作效果的直观体现,本文研究重心为浮选药剂对浮选过程的影响,着重研究泡沫状态与药剂用量之间的对应关系及泡沫状态对浮选药剂控制的指导意义。

浮选药剂控制的关键在于根据当前或过去一段时间的泡沫状态进行判定,并相应调整药剂种类和用量,以提高浮选的选择性和回收率,实现预期选矿效果。目前,选矿厂车间通常依靠操作人员观察泡沫颜色、泡沫形状、泡沫流速、泡沫稳定性及泡沫层厚度等视觉特征进行控制调节,但人工观察泡沫存在时间和空间上的限制,无法与计算机实时控制有效结合,影

响浮选过程稳定和优化。此外,仅依赖操作人员对泡沫状态的主观观察进行判断和决策,缺乏客观统一的评判标准,导致不同浮选工人对泡沫状态评判存在差异,使得浮选生产处于不稳定状态,易导致生产指标波动和矿物资源浪费,给企业带来经济损失^[3]。因此,本文拟通过建立泡沫状态与浮选药剂控制的关联性,并进行量化处理,将二者的对应关系从定性转为定量,使泡沫状态可测、特征可量,从而实现生产过程可控。

1 泡沫状态与浮选药剂

1.1 泡沫状态

在浮选生产过程中,表面泡沫层的状态与浮选指标密切相关,研究表面层的泡沫颜色、泡沫形状、泡沫流速、泡沫稳定性及泡沫层厚度等因素具有重要意义。泡沫颜色取决于气泡表面附着的矿物和水膜颜色,其深浅反映了当前泡沫的浮选效果,是泡沫层的关键特征。泡沫形状包括泡沫面积、数量及大小分布,随着矿石性质、粒度和浮选药剂制度的变化而变化,直接影响浮选效果。泡沫流速对精矿产率和回收率至关重要,稳定的泡沫状态有利于矿物颗粒随气泡上升到液面表层,而稳定性差的泡沫会降低回收率。泡沫层厚度直接影响回收率和精矿品位,适当的泡沫层厚度有助于矿物二次富集,提高精矿品位。

1.2 浮选药剂

浮选药剂主要包括起泡剂、捕收剂和调整剂。起泡剂的作用是影响气泡的稳定性,阻止气泡兼并。捕

收剂则作用于矿物－水界面,提高矿物的疏水性,使矿物颗粒更牢固地附着在上浮气泡表面,以便回收。调整剂用于调节捕收剂与矿物表面相互作用,调整矿浆性质,提高目的矿物的选择性^[4]。这 3 种浮选药剂共同作用,实现了浮选过程中目的矿物的分离和回收^[5]。

2 药剂用量与泡沫状态的对应关系

- 1)起泡剂用量与泡沫状态的关系:适量起泡剂会产生富有弹性且稳定的泡沫,有利于矿物的回收。过量起泡剂会导致泡沫含水多、泡沫坚韧、夹带脉石矿物,影响精矿品位;用量过少则会使泡沫层变薄、容易破灭,降低精矿回收率^[6]。
- 2)捕收剂用量与泡沫状态的关系:过量捕收剂会使泡沫层致密、黏度高,含矿物量多但杂质增加,影响气泡特性;用量过少则泡沫表面光滑,泡沫中浮起的多是细粒矿物,粗粒矿物几乎全部流失于尾矿中,影响精矿回收率^[7]。
- 3)调整剂用量与泡沫状态的关系:以硫酸铵为例,过量调整剂会导致泡沫发脆但表面杂质少;用量过少则泡沫发黏、表面杂质多。调整剂的适量使用对泡沫状态和矿物回收至关重要。

3 泡沫状态量化处理

泡沫状态与药剂用量的对应关系主要包括药剂用量与泡沫颜色、泡沫形状、泡沫流速、泡沫稳定性及泡沫层厚度等方面的关系。要实现这些对应关系的量化,需要借助在线检测与分析系统进行泡沫图像和生产过程数据的采集和处理,用于指导浮选药剂控制。泡沫状态量化处理示意图见图 1。

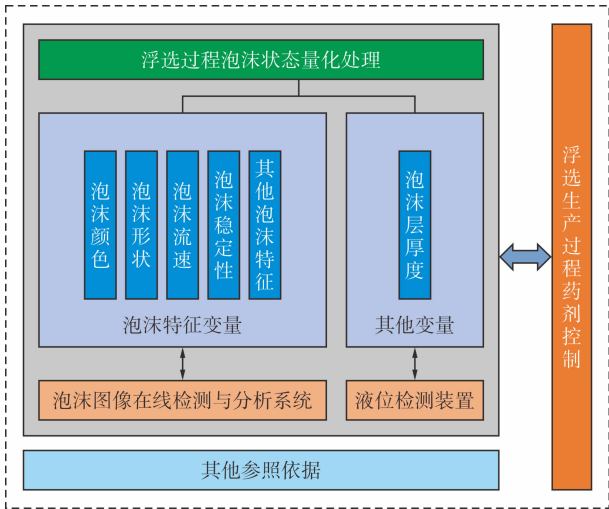


图 1 泡沫状态量化处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quantitative treatment of froth state

3.1 泡沫图像检测装置

采用泡沫图像分析仪作为浮选现场的泡沫图像检测与分析装置。该装置由图像采集模块和分析处理模块 2 部分组成。图像采集模块安装在浮选槽的特定位置,并配备高清摄像头,用于实时采集浮选槽表面的泡沫图像信息。这样可以取代人眼进行监测,并将图像信息传送到分析处理模块进行数据分析和泡沫特征变量提取。泡沫图像分析仪的采集模块和分析处理模块的实物示意图见图 2。

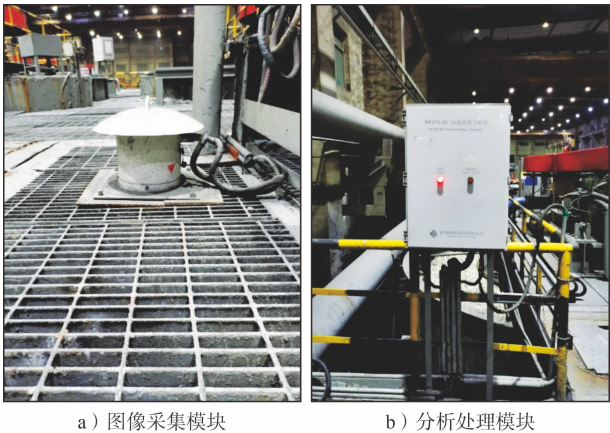


图 2 泡沫图像检测装置

Fig. 2 Froth image detection device

对泡沫图像分析仪检测到的泡沫状态进行量化处理。主要包括泡沫流速、泡沫形状、泡沫颜色和泡沫稳定性的量化处理。采用快速自适应阈值分割法和傅里叶变换,结合浮选泡沫运动规律,应用具有方向特性的图像跟踪算法对图像帧间进行快速多点匹配,根据匹配结果进行加权平均,计算泡沫流速。首先将彩色图像转换为灰度图,生成灰度加权平均值 Grey(灰度图),根据得到的灰度图,画出基于像素值变化的灰度直方图,按照从大到小的顺序对各个灰度值的像素个数进行依次叠加^[8]:

$$\sum_{x=x_1}^{x_{max}} \sum_{y=y_1}^{y_{max}} f(x,y) = f(x_{max},y_{max}) + \dots + f(x_1,y_1) \quad (1)$$

式中: x,y 为灰度值; $f(x,y)$ 为像素个数。

采用快速自适应阈值分割法,确定图像二值化阈值。将灰度值作为二值化阈值,对灰度图进行二值化处理。对连续的 2 帧图片进行初步匹配,剔除多余连通域。计算第 1 张图片待匹配连通域的圆心 $C(x_1,y_1)$ 至第 2 张图片上所有连通域圆心的距离 $d_k(d_1,d_2,\dots,d_n)$:

$$d_k = \sqrt{(x_{c_1} - x_{c_k})^2 + (y_{c_1} - y_{c_k})^2} \quad (k = 1 \sim n) \quad (2)$$

式中: x_{c_1} 和 y_{c_1} 分别为第 1 张图片待匹配连通域的圆心 $C(x_1,y_1)$ 的 x 轴和 y 轴坐标; x_{c_k} 和 y_{c_k} 分别为第 k 张图片上连通域圆心的 x 轴和 y 轴坐标。

取最小距离 d_{c_1} 所在的连通域为当前连通域的初步匹配成功连通域:

$$d_{c_1} = \min(d_1, d_2, \cdots, d_n) \tag{3}$$

在初步匹配的基础上,针对每个连通域,采用傅里叶变换和基本形态特征的方式,得到各个连通域的信息,尽可能保留特征明显的连通域,以备下一步进行精确匹配,减少匹配错误的概率。根据快匹配法准则和泡沫流速的方向性,采用图像跟踪的方式,进行快速多点匹配,得到连续 2 帧图像间对应的连通域。最后,根据匹配结果,按照式(4)和式(5),针对连通域面积进行加权平均,最终得到 x 轴和 y 轴方向的泡沫流速量化值 V_x 和 V_y ,现场生产中更多地关注 x 轴方向的泡沫流速 V_x 。

$$V_x = \left[\frac{S_{x_1}d_{x_{c_1}} - x_{c_2}(1) + S_{x_2}d_{x_{c_1}} - x_{c_2}(2) + \cdots + S_{x_n}d_{x_{c_1}} - x_{c_2}(n)}{S_{x_1} + S_{x_2} + \cdots + S_{x_n}} \right] / t_{span} \tag{4}$$

$$V_y = \left[\frac{S_{y_1}d_{y_{c_1}} - y_{c_2}(1) + S_{y_2}d_{y_{c_1}} - y_{c_2}(2) + \cdots + S_{y_n}d_{y_{c_1}} - y_{c_2}(n)}{S_{y_1} + S_{y_2} + \cdots + S_{y_n}} \right] / t_{span} \tag{5}$$

式中: S_{x_n} 为连通域面积; t_{span} 为匹配时间。

通过上述方法,成功实现了对泡沫流速的量化处理,将观察到的泡沫现象转化为数字表达。由于本文篇幅限制,未详细介绍泡沫形状、泡沫颜色和泡沫稳定性的量化处理方法。对于泡沫形状的量化处理,可参考王庆凯等^[9-11]提出的研究方法;对于泡沫尺寸的量化处理,可参考卢明等^[12-13]的研究方法;有关泡沫稳定性处理的方法,可参考谢权等学者的研究思路^[14-15]。

3.2 液位检测装置

在浮选过程中,矿石性质、矿浆浓度、药剂用量及给矿量和返回流量的波动都会对泡沫层厚度造成影响。泡沫层厚度直接影响精矿品位和回收率。本研究旨在探讨浮选药剂控制与泡沫状态之间的关系,需要实现对泡沫层厚度的在线检测。

目前,浮选液位检测仪器主要包括电容式、静压式、吹气式及浮子式液位计等。本文采用浮子式液位计,通过激光传感器、超声波传感器和浮球托盘来测量实际液位高度和泡沫层厚度。浮选液位检测设备的结构示意图^[16]见图 3。

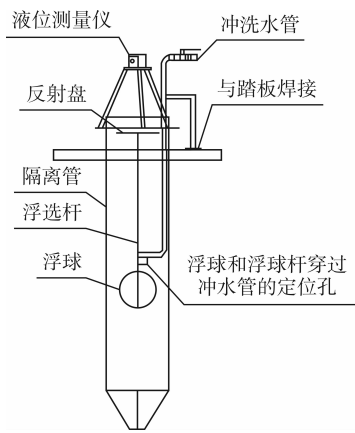


图 3 浮选液位检测设备结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of flotation liquid level detection device structure

该浮选液位检测设备的传感器支架通过法兰连接在浮选平台上。冲洗水管与液位支架通过 U 形螺栓固定,激光传感器则通过 2 个 U 形螺栓固定在隔离桶上方。滑杆通过 2 个悬臂的通孔固定在冲洗水管上,2 个悬臂距离较近。冲洗水管通过外接软管供水,冲洗水通过上下 2 个悬臂的通孔流出,对浮球进行冲洗。浮球则浮在矿浆表面上,带动托盘上下运动。通过激光传感器测量托盘的距离,从而间接计算出液位高度,并结合浮选槽的实际高度,进而计算出泡沫层厚度,这样实现了对泡沫层厚度的量化。浮子式液位计能够实时测量液位高度和泡沫层厚度,从而获取当前的液位高度和泡沫层厚度信息。泡沫状态描述与检测装置提取的泡沫特征变量对照见表 1。

表 1 泡沫状态描述与泡沫特征变量对照
Table 1 Comparison of froth state description and froth characteristic variables

序号	泡沫状态	泡沫特征变量	备注说明
1	泡沫流速	x 轴流速(y 轴流速)	垂直溢流堰的泡沫流速
2	泡沫形状	大泡数(中泡数、小泡数)	重点研究泡沫大小
3	泡沫颜色	颜色(H 值)、饱和度(S 值)、亮度(V 值)	将饱和度包含其中
4	泡沫稳定性	大泡稳定性(中泡稳定性、小泡稳定性)	按照大、中、小泡分类
5	泡沫层厚度	泡沫层厚度	实现泡沫层厚度的量化

3.3 药剂控制

药剂种类和用量的不同会产生不同泡沫状态。通过观察泡沫状态的变化,可以判断当前浮选工况,包括相应调整药剂的种类和用量,以确保

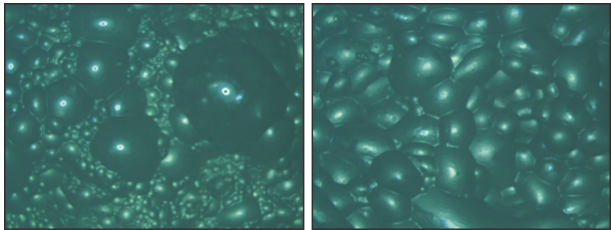
生产的稳定性和浮选指标。根据泡沫状态的量化实现方法,结合泡沫特征和其他检测变量,实现对浮选生产过程中的药剂控制。具体控制思路见表 2。

表 2 依据泡沫状态进行浮选药剂控制示例
Table 2 Examples of flotation reagent control based on froth state

序号	药剂种类	泡沫状态	浮选药剂调整
1	起泡剂	水膜带油光,泡沫紧密且坚韧,流速慢,颜色发黑,泡沫层厚	适量减少起泡剂用量
2	起泡剂	个别大泡,泡沫发脆,泡沫兼并严重,流速偏快,泡沫透亮,泡沫层薄	适量增加起泡剂用量
3	捕收剂	泡沫偏大,泡沫层致密,黏度高,颜色发黑,透明度低,泡沫流动性差	适量减少捕收剂用量
4	捕收剂	泡沫相对偏小,泡沫表面光滑,颜色偏淡,个别泡沫透亮,泡沫流速快	适量增加捕收剂用量
5	pH 调整剂	泡沫发脆,稳定性差,泡沫带矿量少	适量减少 pH 调整剂用量
6	pH 调整剂	泡沫发暗,泡沫黏度大,泥化严重	适量增加 pH 调整剂用量

4 工业验证

在某选矿厂浮选车间粗选作业安装泡沫图像分析仪和液位检测装置,并跟踪药剂用量的调整时间和调整量,通过长时间观察对比,验证了“泡沫状态与浮选药剂控制之间的量化关系”的合理性。本文选取 2023 年 7 月 19 日不同时刻的 2 张典型图片(见图 4)进行相关方面的介绍和说明,可以清晰地看出药剂用量不同所导致的泡沫颜色、形状和饱和度等方面的差异。



a) 药剂用量不足 b) 药剂用量正常
图 4 药剂用量调整前后的泡沫状态对比图
Fig. 4 Comparison diagram of froth state before and after reagent dosage adjustment

浮选现场安装的泡沫图像分析仪及液位检测装置可以实现不同药剂用量对应时刻泡沫状态的量化处理,获取各泡沫特征变量的具体数值。药剂用量调整前后的泡沫状态量化对照见表 3。

表 3 药剂用量调整前后泡沫状态量化对照
Table 3 Comparison of froth state quantification before and after reagent dosage adjustment

序号	泡沫特征变量		药剂调整前	药剂调整后
			数值	数值
1	泡沫颜色	颜色(H 值)	66.18	77.05
2		饱和度(S 值)	70.94	84.00
3		亮度(V 值)	117.50	120.68
4	泡沫形状	大泡个数占比	0.16	0.10
5		中泡个数占比	0.44	0.69
6		小泡个数占比	0.40	0.21
7	泡沫流速	x 轴流速/(mm · s ⁻¹)	120.50	81.03
8	泡沫稳定性	稳定性	0.14	0.21
9	泡沫层厚度	泡沫层厚度/mm	45.00	80.00

由表 3 可知:在药剂用量调整前后,泡沫状态的量化数值发生了明显变化。具体来说,药剂用量不足时,起泡效果差,泡沫表面带矿量少,泡沫较“脆”,具体表现为泡沫的饱和度(S 值)为 70.94,颜色(H 值)为 66.18,结果较差;而在药剂用量调整后,经过一段时间,泡沫状态逐渐恢复正常,泡沫的饱和度(S 值)和颜色(H 值)分别增加到 84.00 和 77.05。在泡沫形状方面,药剂用量调整前,存在个别大泡和大量小碎泡,大、中、小泡占比分别为 0.16、0.44 和 0.40;而药剂用量调整后,泡沫形状得到改善,大、小泡占比减少,中泡比例增加,泡沫尺寸更加均匀。泡沫流速方面,药剂用量调整前, x 轴泡沫流速为 120.50 mm/s,流速较快;而药剂用量调整后,泡沫流速有所减小,变为 81.03 mm/s。泡沫层厚度与流速成反比,药剂用量调整前泡沫层薄且流速快,药剂用量调整后,泡沫层厚度从 45.00 mm 增加至 80.00 mm。在泡沫稳定性方面,药剂用量调整前,泡沫中存在较多水泡,泡沫较“脆”,稳定性差,易破裂;药剂用量调整后,泡沫表面带矿量增加,黏度提高,稳定性提高,稳定性指数从 0.14 增加到 0.21。综上所述,通过对泡沫状态的量化分析,可以指导浮选药剂用量调整,建立起泡沫状态与浮选药剂控制之间的量化关系。

5 结 语

总结了起泡剂用量、捕收剂用量、pH 调整剂用量与泡沫状态的对应关系,并对泡沫状态进行了量化处理,提出了泡沫状态与浮选药剂控制之间的量化处理思路并举例证明研究思路的合理性。

在未来研究中,可以基于本研究提出的泡沫状态与浮选药剂控制之间的量化对应关系,建立浮选药剂智能控制平台,结合浮选生产过程中的泡沫状态,实现浮选药剂用量的自动化控制。在实际操作中,除关注泡沫状态外,还需要考虑矿石性质、矿浆浓度等各种影响因素,以确保生产的稳定性。在进行浮选药剂控制时,需要注意药剂用量控制、液位控制、充气量控

制等操作的优先级,从整体分析问题,选取最佳操作条件,最终实现稳定生产。

[参 考 文 献]

[1] 耿增显,柴天佑,岳恒. 浮选药剂智能优化设定控制方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2008,29(12):2 486 – 2 491.

[2] 梁运奇. 浮选药剂用量优化控制方法研究及工程实现[D]. 沈阳:东北大学,2020.

[3] 刘文礼,路迈西,王凡,等. 煤泥浮选泡沫图像纹理特征的提取及泡沫状态的识别[J]. 化工学报,2003(6):830 – 835.

[4] 王伟. 基于泡沫尺寸分布的铜粗选过程加药量预测控制[D]. 长沙:中南大学,2014.

[5] 宋水祥,罗溪梅,马鸣泽,等. 泡沫稳定性研究进展[J]. 矿冶,2019,28(1):30 – 34.

[6] 欧文军. 基于泡沫图像的浮选过程监控系统研究与实现[D]. 长沙:中南大学,2010.

[7] 王娜. 浅析有色金属选矿过程中浮选药剂的合理使用[J]. 科学技术创新,2019(19):180 – 181.

[8] 赵瑞,陆博. 在线图像分析系统在浮选优化控制中的应用[J]. 中国矿业,2019,28(增刊2):214 – 218.

[9] 王庆凯,高嵩,万洪涛,等. 泡沫图像分析仪在浮选控制中的应用[J]. 中国矿业,2015,24(增刊2):194 – 197.

[10] 刘金平,何捷舟,唐朝晖,等. 基于 WCGAN 的矿物浮选泡沫图像光照不变颜色提取[J]. 自动化学报,2022,48(9):2 301 – 2 315.

[11] 陈宁,黄璐,桂卫华,等. 泡沫图像统计建模与恒常颜色校正算法研究[J]. 控制理论与应用,2016,33(5):613 – 620.

[12] 卢明,桂卫华,彭涛,等. 浮选泡沫图像等效尺寸分布特征提取[J]. 控制与决策,2015,30(1):131 – 136.

[13] 许灿辉. 矿物浮选气泡速度和尺寸分布特征提取方法与应用[D]. 长沙:中南大学,2011.

[14] 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.

[15] 刘金平,王杰,周嘉铭,等. 一种基于气泡运动稳定性分析的铅锌浮选泡沫图像时空联合去噪方法:201811563903. 5[P]. 2023 – 06 – 23.

[16] 武涛,杨文旺,刘利敏,等. 一种浮选液位与泡沫层厚度检测装置:201520705091. 9[P]. 2016 – 02 – 10.

Study on the relationship between froth state and reagent control in flotation operation process

Zhang Haiyang^{1,2,3}, Wang Xu^{1,2,3}, Lu Bo^{1,2,3}, Liu Yang^{1,2,3}, Song Tao^{1,2,3}

(1. BGRIMM Technology Group;

2. State Key Laboratory of Intelligent and Optimized Manufacturing in Metallurgical Process;

3. Beijing Key Laboratory of Automatic Control Technology in Metallurgical Process)

Abstract: In this study, the correspondence between froth state and flotation reagent dosage was investigated by quantitatively analyzing the froth state in the flotation operation process using online detection equipment such as froth image analyzer and level gauge. The relationship between froth state and reagent control was established. Based on the quantified froth characteristic variables, guidance on reagent dosages was provided, laying a foundation for intelligent control of flotation reagents in the future. Through extensive on-site observations and data analysis, the rationality of the theoretical research was verified, which is of significant importance for improving the efficiency and stability of the flotation operation process.

Keywords: froth state; froth image; detection equipment; quantitative processing; flotation reagent; intelligent control