智能矿山

文章编号：1004-4051(2023)S2-0061-06 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230674

基于泡沫图像在线检测与分析系统的浮选控制方法研究与应用

沈 波[1]，张海洋[2,3]，王 旭[2,3]，陆 博[2,3]
（1. 新疆昆仑蓝钻矿业开发有限责任公司，新疆 和田 848000；
2. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
3. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室，北京 100160）

摘 要：针对浮选生产过程依靠人工观测难以保证监测数据准确性、及时性以及无法为优化控制系统提供可靠数据的问题，提出了一种基于泡沫图像在线检测与分析系统的浮选控制方法，经过现场实际应用，证明该方法具有一定的实用性以及指导意义。

关键词：浮选生产；优化控制；泡沫图像；在线检测；分析系统
中图分类号：TD76 **文献标识码：**A

Research and application of flotation control method based on foam image online detection and analysis system

SHEN Bo[1]，ZHANG Haiyang[2,3]，WANG Xu[2,3]，LU Bo[2,3]
（1. *Xinjiang Kunlun Blue Diamond Mining Development Co., Ltd., Hetian* 848000, *China*；
2. *BGRIMM Technology Group, Beijing* 100160, *China*；
3. *State Key Laboratory of Intelligent Optimized Manufacturing in Mining & Metallurgy Process, Beijing* 100160, *China*）

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to ensure the accuracy and timeliness of monitoring data and provide reliable data for optimizing the control system by relying on manual observation in the flotation production process, this paper proposes a flotation control method based on the online detection and analysis system of foam images. Through field application, this method has proved to be practical and instructive.

Keywords: flotation production; optimize control; foam image; online testing; analysis system

0 引 言

目前，浮选生产主要依靠有经验的工人通过人工巡检观察矿浆表面的浮选泡沫状态，包括泡沫的虚实、大小、颜色、光泽、形状、厚薄、强度、脆性与黏性等，结合其他在线检测变量，调整浮选槽的矿浆液位、充气量以及药剂添加量，使得浮选过程处于一种较稳定的状态。通过人工观察泡沫现象进行浮选生产过程控制的方法，存在多方面的实际问题。第一，操作人员很难实时监视和获取浮选泡沫的特征变化情况，会因巡检不及时，造成操作的延迟，从而

收稿日期：2023-09-15 **责任编辑：**聂虹

第一作者简介：沈波(1984—)，男，江西九江人，高级工程师，主要从事装备智能化应用方向的研究工作，E-mail: 270584683@qq.com。
通讯作者简介：张海洋(1991—)，男，山东滨州人，硕士，工程师，主要从事浮选过程优化控制方向的研究工作，E-mail: zhanghaiyang@bgrimm.com。

引用格式：沈波，张海洋，王旭，等. 基于泡沫图像在线检测与分析系统的浮选控制方法研究与应用[J]. 中国矿业，2023，32(S2)：61-66.
SHEN Bo, ZHANG Haiyang, WANG Xu, et al. Research and application of flotation control method based on foam image online detection and analysis system[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S2): 61-66.

导致产率不稳定，甚至出现沉槽和冒槽现象；第二，浮选操作工人的操作经验和水平不同，对浮选现象的认知和判断有差别，控制策略也不尽相同，无法保证浮选生产过程和指标的稳定；第三，通过操作工人观察泡沫现象获取的泡沫特征是一种感性认知，无法进行量化分析，会导致浮选生产过程控制的不确定性。随着我国浮选工艺自动化水平的提高，以及计算机视觉技术的快速发展，在浮选生产过程使用在线检测与分析系统成为可能，浮选泡沫图像在线检测与分析系统是利用计算机视觉技术，对浮选机矿浆表面泡沫图像进行实时的在线检测和分析，并提取相应的泡沫特征数据，解决传统工艺中依靠人工观测难以保证监测数据的准确性和及时性，无法为优化控制系统提供可靠数据的问题。本文研究借助泡沫图像在线检测和分析系统，进行浮选生产过程优化控制[1-2]。

1 研究现状

国内外针对泡沫图像特征提取以及分析系统在浮选控制上的应用具有大量研究，也取得了丰硕成果。桂卫华等[3]结合矿物选矿过程浮选泡沫特点，给出了基于机器视觉的泡沫图像关键特征提取与表征方法、关键参数在线检测和工况自动分类与识别等方面的进展研究，探讨了基于机器视觉的泡沫图像处理系统的实现。刘金平[4]将概率论、统计学习、模式识别等方法应用到图像信号处理和分析中，根据特定变换域的泡沫图像随机场表现出来的统计分布特性建立合理的图像统计分布模型，为图像分析和理解提供有效先验知识，基于建立的统计模型，解决泡沫图像表面颜色、气泡大小和表面随机纹理等视觉特征难以准确表征问题，并成功应用于矿物浮选过程的泡沫状态分类与生产工况智能识别中，实现浮选生产工况的机器鉴别与自动评价。LU 等[5]基于泡沫图像局部颜色特征和工艺参数融合信息的供矿类型识别模型和支持向量机分类方法，建立了铜粗精矿工况识别系统，并提出了级联识别方法，可以实现较准确地识别铜粗料中的工况。肖金林等[6]设计了浮选泡沫浮选监控系统，基于泡沫图像的在线监控和实时分析处理，可以对浮选泡沫状态进行客观评价，进而实现优化浮选过程的操作，降低药剂消耗量，提高资源回收率。张燕红等[7]采用中信重工研发的泡沫图像在线检测与分析系统，进行浮选控制，泡沫流速的稳定性、精扫尾矿品位与精矿品位的变化、精选给矿品位与精选回收率的变化均取得了较好的效果。Mesto 公司的 OCS@软件系统与图像在线分析系统集成在一起，包括磨矿和浮选两大功能模块。浮选部分基于图像分析技术的在线分析系统（VisioFrothTM、LasterFrothTM），采用专家系统来优化浮选机的矿浆液面、充气量、捕收剂的设定值，进而通过 DCS 系统来控制排矿阀、充气阀开度和捕收剂药剂泵的速度。

矿冶科技集团有限公司在多家选矿厂对泡沫图像在线检测与分析系统进行了研究与应用，浮选生产过程中实现了以泡沫图像在线检测与分析系统为主要检测机构，结合液位及充气量检测机构，对浮选机放矿锥阀和充气阀门联合控制的方案，该方案使得浮选机溢流速度维持在合理范围内，稳定了浮选产率，同时可以通过控制液面高度，使得泡沫层厚度维持在一定范围内，稳定浮选生产的精矿和尾矿品位，减少精矿品位波动以及泡沫现象的发生。

2 泡沫图像在线检测与分析系统

2.1 系统组成

本文采用 BFIPS-III 型泡沫图像在线检测与分析系统，该系统由分析仪控制箱和图像采集桶组成，具体可分为图像采集模块、图像处理模块和软件管理模块，具体系统组成如图 1 所示[6]。

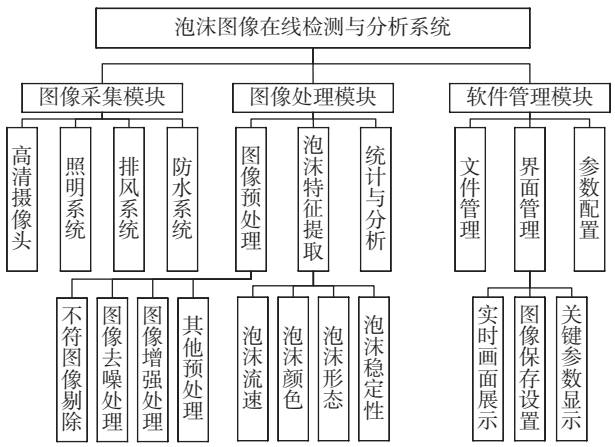


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Diagram of system composition

1）图像采集模块。该模块的硬件组成主要为高清摄像头、照明系统、排风系统以及防水系统，其中，高清摄像头用于实时采集浮选泡沫图像，并按需间隔某一固定时长进行图片保存；照明系统主要用于排除光照对图像采集的干扰，防水系统以及排风系统用于保证图像采集模块的稳定运行。

2）图像处理模块。该模块包括图像预处理、泡沫特征提取和统计与分析，其中，图像预处理主要是对不符图像剔除、图像去噪处理、图像增强处理，泡沫特征提取是泡沫图像在线检测与分析系统的核心内容，用于提取浮选操作最为关心的泡沫流速、泡沫

颜色、泡沫形态(包括泡沫面积和大小等)以及泡沫稳定性等特征变量，实现对这些变量的量化处理，用于后续浮选控制的参考依据。

3)软件管理模块。该模块由文件管理、界面管理和参数配置组成，其中，界面管理实现对实时采集画面的显示和相关操作，可以直观展示当前的泡沫现象以及系统分析处理后提取出的关键特征参数显示。

2.2　功能实现

系统采用的高速工业数字相机实时拍摄浮选泡沫图像，相机通过以太网与控制箱中的嵌入式图像处理单元相连，图像分析一体化电脑通过 Modbus TCP/IP 网络将现场实时采集分析浮选过程泡沫各类参数传送至浮选控制服务器或者通过工业现场总线传递给自动化系统(图 2)[8-9]。

在选矿厂浮选车间现场，按需在浮选机上配置泡沫图像在线检测与分析系统，系统图像采集模块安装在浮选槽的某一具有代表性的位置，通常在溢流堰附近位置。该系统可以实时获取浮选泡沫图像、连续对浮选泡沫图像处理分析，得到反映浮选泡沫状况的泡沫流速、泡沫颜色分量(HSV)、泡沫形态(大小泡个数、面积)及泡沫稳定性等特征参数，实现泡沫特征监测与泡沫质量量化评价。系统软件平台对连续的视频流进行实时处理分析，最终给出相对应的浮选过程健康性评价参数，供进一步优化控制决策。

3　浮选控制

浮选生产过程中以泡沫图像在线检测与分析系统为主要检测机构，结合液位及充气量检测机构，对浮选机放矿锥阀和充气阀门进行联合控制，使液位高度以及泡沫流速维持在合理区间波动，实现浮选单机产率稳定控制。单机产率稳定控制是结合泡沫图像在线检测与分析系统和传统的液位及充气量控制系统，对浮选机液位或充气量设定值进行自动调整的新型控制策略。

泡沫图像在线检测与分析系统可以实时获取浮选泡沫图像、连续对浮选泡沫图像处理分析，得到反映浮选泡沫状况的特征参数和泡沫移动速度。其中，浮选泡沫移动速度及方向是泡沫图像在线检测与分析系统检测的关键参数之一，也是进行浮选产率优化控制的基础。通过连续实时处理视频中的每一帧，通过泡沫特征匹配及方向预测技术，可实时计算出分为 24 个区域的泡沫位移及方向，从而计算出泡沫整体移动速度。

控制产率目前最好的方式是控制泡沫图像在线检测与分析系统测量的泡沫移动速度。因为泡沫移动速度在与产率的相关性上，明显优于浮选机液位。在关键节点上使用泡沫图像在线检测与分析系统对产率进行精细控制可使浮选机产率保持稳定，有助于对精矿品位的控制。产率控制通过对浮选机状态进行判断，在产率控制模式和传统液位-充气量控制模式之间自动无扰切换，可积极主动避免冒槽或沉槽现象，自动调整重建平衡。单槽产率控制以泡沫溢流速度为控制目标，预期实现浮选单机产率的稳定控制。产率控制模块的原理如图 3 所示。保证泡沫流速测量值稳定在期望控制范围内，控制规则见表 1。

4　现场应用

4.1　产率控制

基于泡沫图像在线检测与分析系统的浮选生产

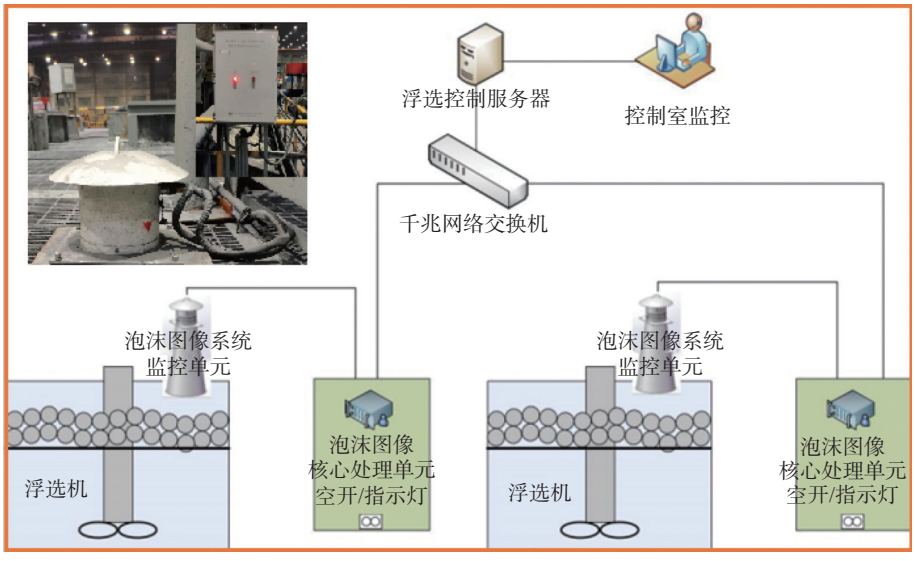


图 2　系统架构图

Fig. 2　Diagram of system architecture

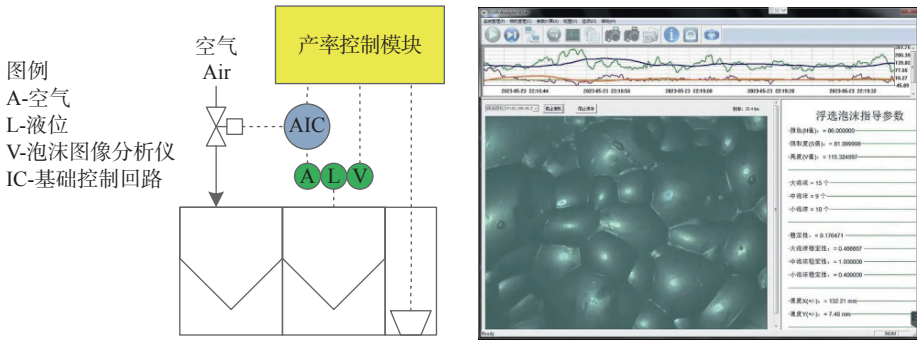


图 3 单机产率控制模块原理图

Fig. 3 Schematic diagram of single machine yield control module

表 1 单机产率控制规则

Table 1 Control rule of single machine production rate

序号	工况条件	动作
1	流速偏低且下降	大幅度抬高液位
2	流速偏低且稳定	小幅度抬高液位
3	流速偏低且上升	保持液位不变
4	流速适中且下降	较大幅度抬高液位
5	流速适中且上升	较大幅度降低液位
6	流速偏高且稳定	小幅度降低液位
7	—	—

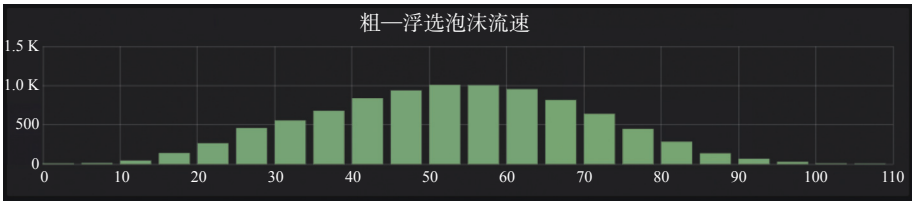
过程控制相对于通过人工现场巡检进行控制操作，泡沫流速更加稳定，浮选产率控制效果更加理想，为了更好地说明泡沫图像在线检测与分析系统的控制效果，分别选取系统应用前与应用后各 12 h(现场班组的值班时间)的泡沫流速历史数据进行统计分析，以直方图的形式进行量化对比两种情况下的控制效果。人工巡检手动控制情况下，泡沫流速分布情况如图 4。

由图 4(a)与图 4(b)对比可见系统应用情况下，粗—浮选泡沫流速呈现出更为理想的正态分布，数据集中性更好，70% 以上的情况下泡沫流速控制在 45～70 的典型区间内。人工手动控制情况下，泡沫流速数据分布则更为松散，多在 25～80 的区间内聚集。经计算得到，系统应用情况下泡沫流速的标准差约 22.3，相比于手动控制下的标准差 41.7，数据稳定性提高接近一倍。

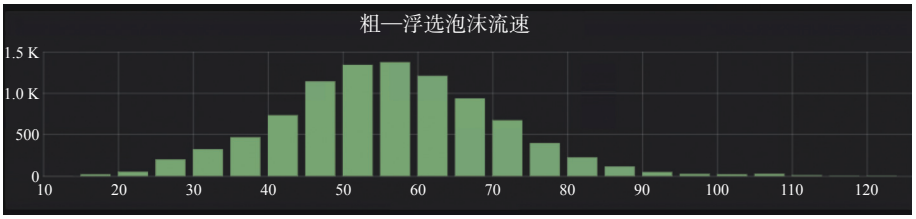
4.2 药剂添加指导

1)工况变化识别。根据泡沫图像在线检测与分析系统提取的泡沫颜色(HSV)，分别是色调(H)、饱和度(S)和亮度(V)，泡沫颜色和饱和度在某一时刻大幅下降，亮度值大幅增加，说明此时工况发生变化，需要对应调整各类浮选药剂添加量。泡沫现象的实时检测与分析，给浮选控制的及时有效控制提供了条件(图 5)。

2)药剂添加与泡沫特征的对应。浮选生产过程中，药剂添加往往与泡沫现象有着紧密的联系，药剂添加量的改变也会跟随泡沫现象的改变进行。以下以起泡剂添加量调整与泡沫现象关联性为例进行说明。浮选泡沫现象为泡沫紧实，泡沫偏小(小泡数量多)，泡沫流速慢(X轴流速)，颜色发黑(HSV 中的 H 值小)，对应药剂(起泡剂)调整方式为减少起泡剂的添加量，具体如图 6 所示。



(a) 人工巡检手动控制



(b) 系统投用自动控制

图 4 泡沫流速分布直方图

Fig. 4 Histogram of foam velocity distribution

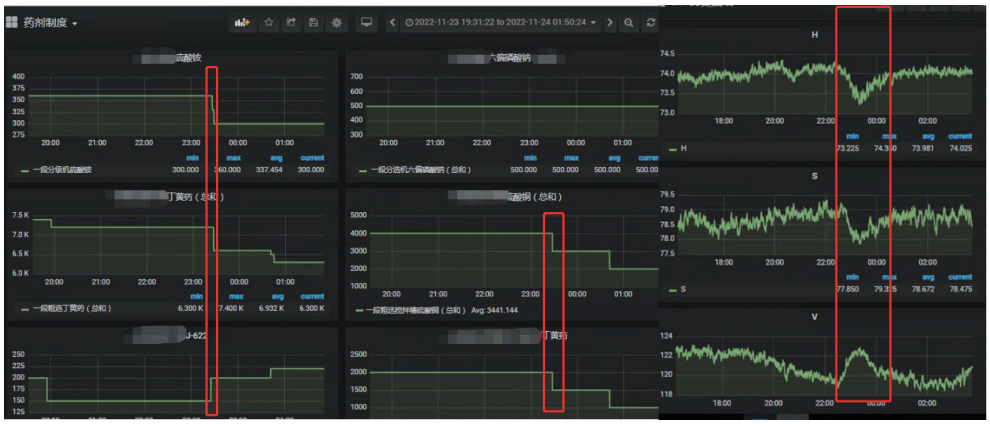


图 5　异常工况下药剂调整与泡沫特征的关系图

Fig. 5　Diagram of relationship between agent adjustment and foam characteristics under abnormal working conditions

图 6　药剂添加与泡沫特征对应关系

Fig. 6　Corresponding relationship between reagent addition and foam characteristics

在药剂添加量调整后隔一段时间，会发现泡沫现象会有改变，这种改变正是药剂调整后的效果。经过生产现场的长期观察以及大量数据的统计分析，理清了浮选泡沫特征与药剂添加调整的对应关系，找到了通过泡沫特征变量的量化值进行浮选药剂调整的控制方法，这一点具有重要意义。

5　结　语

基于泡沫图像在线检测与分析系统，并结合浮选液位和充气量等对浮选生产过程进行控制的方法，解决了传统工艺中依靠人工观测进行控制操作的准确性、及时性问题，将生产数据进行了量化处理，可为优化控制系统提供稳定可靠的实时数据。本文研究基于泡沫图像在线检测与分析系统的浮选控制方法在多个生产现场进行了应用测试，在稳定产率，减少指标波动以及药剂添加控制方面效果良好。

参考文献（References）：

[1] 吕健，徐升，蒋鑫，等. 浮选泡沫图像分析仪在某铜钼选厂的应用[C]//中国矿业科技文汇，2015.

[2] 张文康，刘丹，王春景，等. 矿物浮选泡沫图像监测控制技术现状及展望[J]. 化工自动化及仪表，2023，50(3)：285-290.
ZHANG Wenkang，LIU Dan，WANG Chunjing，et al. Current situation and prospect of mineral flotation foam image monitoring and control technology[J]. Chemical Automation and Instrumentation，2023，50(3)：285-290.

[3] 桂卫华，阳春华，徐德刚，等. 基于机器视觉的矿物浮选过程监控技术研究进展[J]. 自动化学报，2013，39(11)：1879-1888.
GUI Weihua，YANG Chunhua，XU Degang，et al. Research progress in mineral flotation process monitoring technology based on machine vision[J]. Journal of Automation，2013，39(11)：1879-1888.

[4] 刘金平. 泡沫图像统计建模及其在矿物浮选过程监控中的应用[D]. 长沙：中南大学，2013.

[5] LU M，XIE D，GUI W，et al. A cascaded recognition method for copper rougher flotation working conditions[J]. Chemical Engineering Science，2017，175：220-230.

[6] 肖金林，桂卫华. 浮选泡沫图像监控系统在冬瓜山铜矿的应用[J]. 科协论坛(下半月)，2012(6)：70-71，111.
XIAO Jinlin，GUI Weihua. Application of flotation foam image monitoring system in Dongguashan Copper Mine[J]. Science and Technology Association Forum，2012(6)：70-71，111.

[7] 张燕红，刘俊，陈冲，等. 浮选智能控制系统在某钼矿选厂的应

用[J]. 矿山机械, 2021, 49(9): 50-54.
ZHANG Yanhong, LIU Jun, CHEN Chong, et al. The application of flotation intelligent control system in a molybdenum ore beneficiation plant[J]. Mining Machinery, 2021, 49(9): 50-54.

[8] 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(S2): 194-197.
WANG Qingkai, GAO Song, WAN Hongtao, et al. Application of foam image analyzer in flotation control[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 194-197.

[9] 梁栋华. BFIPS-Ⅱ泡沫图像分析仪软件系统的设计与实现[J]. 矿冶, 2011, 20(4): 102-104.
LIANG Donghua. Design and Implementation of BFIPS-II foam image analyzer software system[J]. Mining and Metallurgy, 2011, 20(4): 102-104.