

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.04.020

复杂高品位硫氧混合铜浮选智能控制技术

张卿¹ 饶明生¹ 张林龙¹ 李钢强¹ 陆博² 邹国斌² 罗峰³

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200;

2. 矿冶科技集团有限公司, 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室,

矿冶过程自动控制技术北京市重点实验室, 北京 100160;

3. 福建金岳慧创智能科技有限公司, 福州 350000)

摘要: 复杂高品位混合铜浮选工艺一直以来是选矿领域的研究热点和难点之一。同时, 这种类型的浮选过程智能控制也属于行业空白。通过采用浮选过程专用的载流 X 荧光分析仪、泡沫图像分析仪对工艺过程在线监测, 得到了能反映混合铜浮选过程的重要工况参数, 实现了流程的工况诊断。进一步通过研究基于模糊规则的浮选药剂添加与浮选机的液位充气量控制, 实现了这一浮选流程的智能控制。研究形成的控制系统, 可连续、稳定、可靠地应用于穆索诺伊选矿厂的生产过程中, 获得了较为明显的经济效益。

关键词: 高品位混合铜浮选; 工况诊断; 智能控制

中图分类号: TD952; TD923; TP29

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2021)04-0129-06

Intelligent control technology of complex high-grade sulfur-oxygen mixed copper flotation

ZHANG Qing¹ RAO Ming-sheng¹ ZHANG Lin-long¹ LI Gang-qiang¹ LU Bo²

ZOU Guo-bin² LUO Feng³

(1. Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China;

2. Beijing Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, State Key Laboratory of Process

Automation in Mining & Metallurgy, BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. Fujian KINGKOP Intelligent Technology Co. Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The flotation process of complex and high-grade mixed copper has been one of the research hotspots and difficulties in the field of mineral processing. Meanwhile, this type of flotation of intelligent control is also a blank in the industry. In this paper, an online X-ray fluorescence analyzer and several forth image analyzers dedicated to the flotation process were used to monitor the process on-line, and important flotation parameters reflecting the mixed copper flotation process are obtained. It was also analyzed that the working condition diagnosis of the process. Furthermore, the intelligent control of this flotation process was developed by studying the addition of flotation reagents based on fuzzy rules of the flotation air and level control. The control system has been continuously, stably and reliably applied to the production process of the COMMUS, and it has obtained obvious economic benefits.

Key words: high-grade mixed copper flotation; working condition diagnosis; intelligent control

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0105000)

第一作者: 张卿, 博士, 高级工程师, 主要从事有色金属矿山
选冶工艺研究及生产运营管理工作。E-mail:
13133733@qq.com

通信作者: 陆博; E-mail: lu_bo@bgrimm.com

近年来, 浮选过程优化控制一直是选矿自动化行业研究的主要热点。通过智能化升级, 使浮选过程能够连续、高效、稳定的获得精矿产品是几代科技工作者追求的目标。浮选过程的自动控制由浅到深分为四个层次: 基础仪表层、单回路控制层、先

金属光泽较 1[#] 浮选机更少，泡沫一般情况下较 1[#] 也更小。7[#]、8[#]、9[#] 三槽泡沫为深绿色氧化物附着颜色，且颜色依次递减；14[#] 浮选机泡沫为深棕色，伴有少量黄色的细小泡沫。

1.2 基于品位分析技术的硫化铜产出率在线分析

在线品位分析技术对于浮选专家系统而言至关重要。一方面，实时的品位数据可以指导生产过程的药剂、液位充气量控制，根据各个流程的品位情况来调整作业精矿富集比，使得操作更加及时有

效；另一方面，通过在线的原精尾品位值与瞬时矿量计算流程关键节点的金属量，可以有效推算金属平衡，估算混合浮选中不同化合物的比例及变化情况，进一步精细化生产操作。

穆索诺伊选矿厂硫化铜含量与比例一直是破磨、浮选联动协同生产的关键性技术参数，通过在线分析技术的优化，结合流程的在线数据分析，找出一种瞬时硫化铜产率分析方法，有效指导生产过程中的配矿和硫化铜浮选生产。

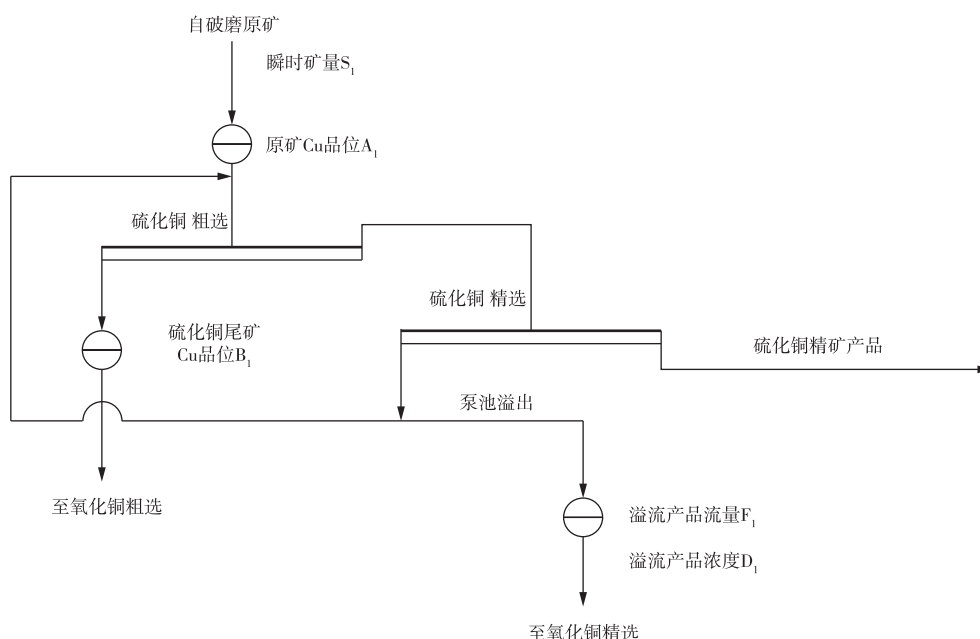


图2 t_1 时刻硫化矿产出率估算流程图

Fig. 2 Flowsheet for estimating sulfide ore output rate at t_1 moment

对于硫化铜生产过程而言，从原矿入选 1[#] 搅拌桶到 1[#]~5[#] 浮选机完成生产作业，其生产周期大约在 20~25 min。因此，在硫化铜粗选生产过程稳定的情况下，以 25 min 为测量周期，测量原矿和硫化铜尾矿具有明显跟随效果。进而我们得到了 t_1 时刻原矿品位测量值 A_1 ，以及以时间为序列的 25 min 前 t_0 时刻品位值 A_0 ，50 min 前的品位测量值 A_{-1} 、 A_{-2} 、…。根据原矿含水率 w_1 、硫精矿含水率 w_2 、矿石密度 p 以及每小时的硫化铜精矿均矿量 m_c ，可以得到原矿金属量 M_R 和硫化铜尾矿金属量 M_T ，见式 1。

$$\begin{cases} M_R = A_0(1-w) \int_{t_1}^{t_0} S_i dt \\ M_T = B_1[(1-w_1) \int_{t_1}^{t_0} S_i dt - \\ p \int_{t_1}^{t_0} F_i D_i dt - \frac{(1-w_2)(t_1-t_0)}{60} m_c] \end{cases} \quad (1)$$

于是有硫化铜产出率 K_S ，

$$K_S = (M_R - M_T) / M_R \quad (2)$$

根据长期生产实践经验，考虑到浮选过程复杂的物理化学反映过程，矿物的可浮性不仅与瞬时矿样的测量值有关，还与矿物缓慢变化的过程有关。所以，在硫化铜产出率的结果处理上，我们还引入了遗忘因子滤波^[4]，通过递归式的滤波方法，找到一种适合于硫化矿选矿过程中来料波动与缓慢理化反映的关系式(式 3)。

$$K_n = \sum_{i=0}^n \lambda^{n+1-i} k(i) \quad \lambda \in (0, 1] \quad (3)$$

通过实际生产分析，遗忘因子 λ 值取值在 (0.5, 0.7) 之间符合工况变化的趋势，满足自动控制对系统工况诊断的实际需要。

进一步地，通过磨矿处理量、含水率、实时的原矿铜品位数据，可以推算出实时的硫化铜金属产出量，将上述金属量按照班次累计，即可得到每班

硫化铜金属产出预测值。结合班次的袋装称重、化验统计数据,可以得到实际硫化铜金属产出量与预测金属量的对比关系,其精度满足生产过程统计需要,如图3所示。

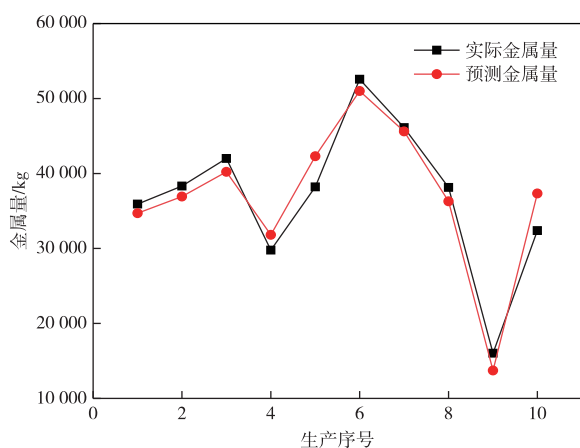


图3 班次统计的硫化矿实际金属量与预测金属量对比曲线

Fig. 3 Comparison curves of actual metal content and predicted metal contents of sulfide ore based on shift statistics

1.3 氧化铜泡沫分析与工况诊断技术

一般情况下,操作工在氧化铜浮选过程主要以观察泡沫形态和泡沫颜色为主,并辅助以泡沫消泡精矿析出的方法,观察浮选泡沫的生产指标。根据上述工作流程启发,针对图1中7#泡沫图像分析仪的泡沫特性与溢流泡沫品位,结合其测量变化周期内前后各25 min的泡沫图像特征均值,通过分析1周时间内的63组特征数据,得到了泡沫颜色-流速和品位工况分类关系模型,如图4所示。

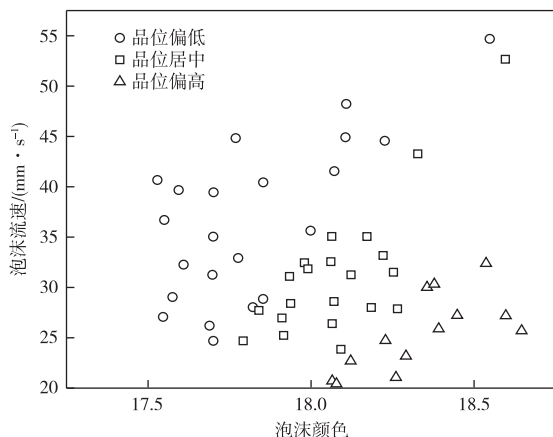


图4 7# 泡沫图像特征与在线品位测量关系图

Fig. 4 7# Forth image characteristics and online grade measurement diagram

根据上述工况分析可以得出,品位低中高的辅助决策区间分别为 $[21, 24.4]$ 、 $[24.5, 27.2]$ 、

$[27.3, 32]$,泡沫在线品位值与泡沫颜色正相关,与泡沫流速负相关。由于取样分析过程是瞬时过程,而泡沫图像的特征参数是过程平均值,同时需要将品位数据进行平滑滤波,用过渡过程反映整体的品位波动情况^[5,6]。

根据上述品位与图像特征关系模型,可以得到一条拟合直线 $y=33.3x-572.7$,当流速颜色计算值属于虚线内区间,即 $|e| \leq 7.08$ 时,为中等品位工况;当计算值 ≤ -7.09 时,为低品位区间;否则, $|e| \geq 7.08$ 时为高品位区间。因此,7#泡沫图像分析仪可以根据一段时间内泡沫的工况情况进行区间性工况分类,用于指导操作工加药。

按照相同的分析处理方法,对8#、9#泡沫图像分析仪根据类似的情况进行了数据建模及工况分类,通过设置合理的颜色和泡沫流速区间,来预测不同类型的溢流泡沫品位,从而进行合理的当前作业品位预测。

2 浮选优化控制技术

2.1 硫化铜粗扫选优化控制技术

总的来说,硫化铜粗选选别优化控制以浮选药剂控制为主,并根据泡沫的流动情况适当调整液位充气量,以便系统能够以较为恒定的速率产出精矿产品^[7]。该作业段主要以硫化铜精矿期望产率和实际产出率的优化控制目标来实现^[8]。其期望产率是在原矿中硫化铜、氧化铜比例未知的前提下,通过合理调整药剂及浮选机设定值,使原矿中的硫化铜在该选别段能收尽收,抑制硫化铜尾矿中硫含量。其主要控制变量根据粗扫选的泡沫颜色值和泡沫大小,来分别对药剂及液位充气量进行选择控制。优化系统控制框图如图5所示。

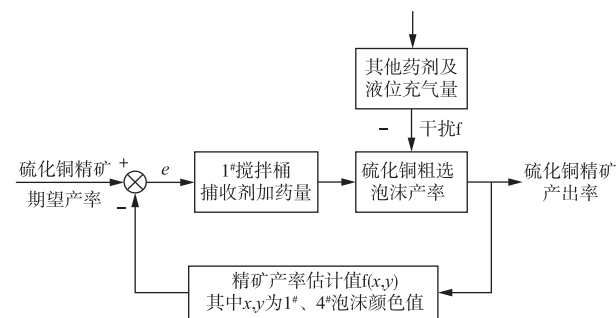


图5 硫化铜药剂优化控制系统控制框图

Fig. 5 Control block diagram of copper sulfide reagent optimization control system

对于硫化铜浮选段的优化控制与药剂自动控制，其使用效果与未投用优化控制之前的进步是十分明显的。对于一般的操作工巡检与操作，其决策依据是巡检测到该浮选槽及作业时，通过肉眼分析，试凑一个药剂或充气量的更改量，这个量值一般都是过量的；然后，经过 5~10 min 的作用时间后，再返回观察药剂作用的效果，逐步回调到自己认为比较理想的一个设定值。显而易见，这种操作有明显的缺点：第一，操作工根据巡检测到作业段的瞬时工况来调整操作，缺乏过渡过程的数据；第二，超调引起的不仅仅是药剂浪费、瞬时品位波动过大，更重要的是调整到稳态的时间变长，势必导致产品指标的波动加大。因此，浮选优化系统的检测与智能决策控制的优势为：

- 1) 多传感器实时检测实现了参数数字化，较人工分析更为精准。
- 2) 不间断测量可以精准捕获工况变化的过渡过程，使得控制决策依据更强。
- 3) 能够最大程度上弥补操作工巡检不及时所导致的工况恶化，提前判断并处理工况波动带来的系统扰动。
- 4) 降低不同班次不同操作人员带来的主观判

断引起的产品质量波动，使得生产过程标准化。

2.2 硫化铜精选串级协同控制

对于硫化铜精选段控制，主要的技术难点在于串级槽数多，浮选机的吞吐能力及流通能力不足，各槽的液位控制容易相互干扰，形成串级放大现象，破坏流程生产的稳定性。

串级浮选协同控制方法利用浮选机吞吐矿浆的惯性作用，将浮选液位的主要干扰因素作为前馈输入给控制器，后一级的控制器针对干扰因素的变化提前做出响应，有效提高单个液位回路的调节能力。将前一作业阀门开度的调整量作为当前作业控制器的前馈输入，能够较好地实现串级浮选各子工序整体的液位稳定，将工序内的多个作业串联成一个单元，提高整体的协同控制能力。硫化铜精选协同控制示意图如图 6 所示。

在完成上述协同控制策略的稳定控制之后，采用以硫精矿在线品位实时值为优化设定目标的控制决策^[9]。主要以在线品位测量数据为优化期望，通过设定品位设定值来调整液位的设定值，实现以恒精矿品位为控制目标的硫精矿系统优化控制，使硫化铜精矿产品达标。优化系统投用前后硫精矿品位分析仪实测统计数据见图 7。

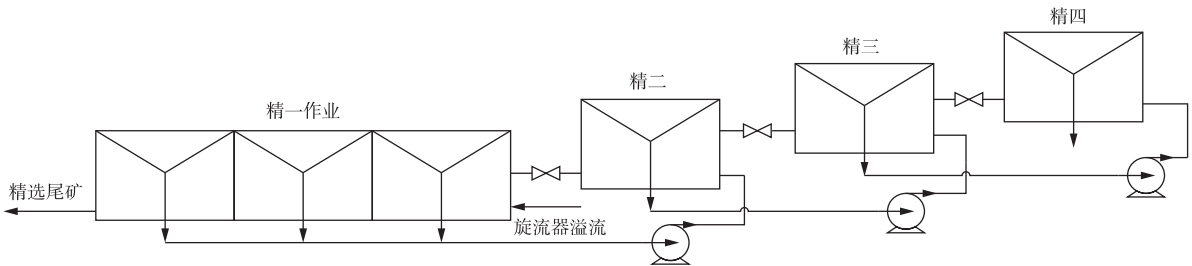


图 6 硫化铜精选协同控制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cooperative control of copper sulfide selection

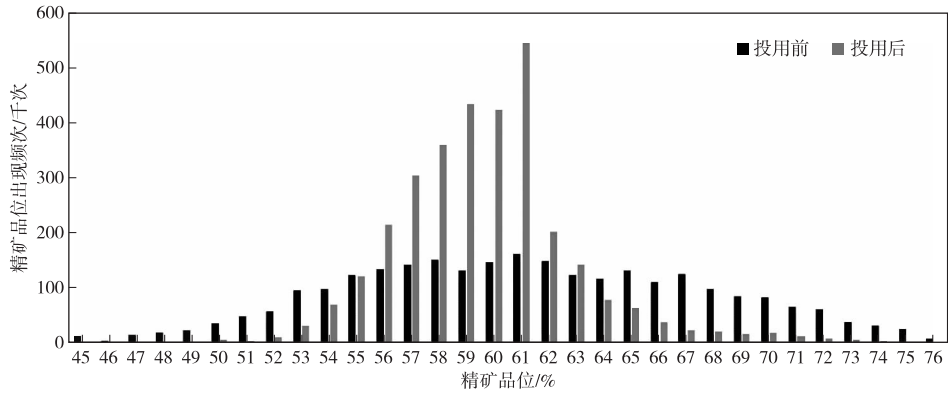


图 7 优化系统投用前后硫精矿品位分析仪实测统计

Fig. 7 Optimized control system statistics effect at the grade of sulfur concentrate

3 结论

1)通过在线品位分析仪分析在线铜品位数据与过程质量平衡进行硫化物金属量预测,推算出产品中硫化铜选别产出率,再结合硫化铜泡沫图像的颜色,供优化系统进行硫化铜作业工况预测。其预测结果可作为优化系统关键的输入参数,用于判断高硫和低硫状态,进行不同类型的参数自适应调整。

2)根据氧化铜段泡沫流速、泡沫大小与泡沫品位之间的关系,结合实际结果进行数学建模,所建模型可以有效预测氧化铜段泡沫铜品位的大致区间,为氧化铜浮选优化控制决策提供重要的传感信息。

3)分别根据泡沫颜色、大小特性,设计了一套浮选药剂自动控制系统,并根据浮选作业特点,将串级级联前馈控制应用于精矿浮选流程之中。该系统在穆索诺伊公司投用之后,浮选总回收率提高了1%;硫化铜精矿品位波动方差从投用前的11.3降低到了9.5,降幅达到了18.9%。系统投用半年以来,使用运转情况良好,控制的准确性与鲁棒性满足连续工业生产的需要。目前,该系统已经改变了各级操作管理人员的操作管理习惯,对于提升复杂混合型铜矿的浮选指标起到了显著的作用,为解决海外高品位混合型铜矿无人化、少人化、快浮快收需求和建设智能选厂奠定了技术基础。

参考文献

- [1] ALDRICH C, MARAIS C, SHEAN BJ, et al. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 96(1/2/3/4): 1-13.
- [2] 苏超,王旭.浮选流程智能控制系统开发与应用[J].铜业工程,2019(4):4-9.
SU C, WANG X. Development and application of intelligent control system for flotation processes[J]. Copper Engineering, 2019(4): 4-9.
- [3] MASSINAEI M, JAHEDSARAVANI A, TAHERI E, et al. Machine vision based monitoring and analysis of a coal column flotation circuit [J]. Powder Technology, 2018, 343(2019): 330-341.
- [4] 高鹰,谢胜利.变遗忘因子相关函数自适应滤波算法[J].系统工程与电子技术,2004,26(4):542-544.
GAO Y, XIE S L. Varing forgetting factor correlation function adaptive filtering algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(4): 542-544.
- [5] 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,2013:10-37.
LIU J P. Statistical modeling of froth images and its applications in the monitoring of the mineral flotation process[D]. Changsha: Central South University, 2013: 10-15, 34-37.
- [6] MARAIS C, ALDRICH C. Estimation of platinum flotation grades from froth image data[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(5): 433-41.
- [7] 王琳岩,李健,贾瑶,等.混合选别浓密过程双速率智能切换控制[J].自动化学报,2018,44(2):330-343.
WANG L Y, LI J, JIA Y, et al. Dual-rate intelligent switching control for mixed separation thickening process [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(2): 330-343.
- [8] 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):2486-2491.
GENG Z X, CHAI T Y, YUE H. Research on flotation reagent intelligent optimal setting control method [J]. Journal of Instrumentation, 2008, 29(12): 2486-2491.
- [9] MCCOY J T, AURET L. Machine learning applications in minerals processing: A review [J]. Minerals Engineering, 2019, 132: 95-109.