

浮选过程控制方法研究

刘晓青,程全,李晋,周小东

(周口师范学院 机械与电气工程学院,河南 周口 466001)

摘要:浮选过程特性复杂,为了避免人工操作的随意性和主观性,实时调整生产过程,确保其稳定顺利进行,对浮选工艺设备及某选矿厂整个工艺流程进行了分析。在此基础上,确定了控制目标,即保持加药量、给矿浓度、给矿量恒定。针对各自特点,制定了相应的控制策略,采用开/关电磁阀对加药量进行控制,采用PID控制器对给矿浓度进行调节,采用PI控制器对给矿量进行调节。某选矿厂红矿反浮选项目应用运行结果表明,可以维持浮选过程重要生产设备稳定运行,保持主要工艺参数稳定。

关键词:浮选过程;过程控制;PID控制;参数整定

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2016.05.004

中图分类号:TD989;TP273 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2016)05-0014-05

在当今国民经济发展过程中,矿产资源起着至关重要的作用,选矿作为矿产资源加工过程中的一个重要环节,其水平高低直接影响到矿物资源的回收率^[1]。选矿方法较多,主要有重选法、磁选法、电选法、浮选法,但不管采用哪种方法,其过程都要受到粒度大小的限制,过粗不利于分选,过细则难于回收^[2]。其中浮选法主要适用于细颗粒矿物的分选,它是根据矿物原料表面性质的差异,通过调节加药量、给矿量、给矿浓度等参数^[3],将矿浆分离成满足工艺需求的精矿和尾矿,从而实现有效分选的过程^[4]。我国矿石的普遍情况是,矿石品位相对较低、成分较复杂、且连生紧密,不便于直接分选,采用磨矿-磁选-浮选三个阶段相结合的工艺流程是提高选别指标的有效方法^[5],浮选便是其中一个重要生产过程。

当前,我国的基础自动化设施尚不够完善,自动化水平相对较低,一旦出现生产设备故障、工艺参数大幅波动等意外情况,无法及时对生产过程进行调整^[6]。结合某选矿厂的浮选柱红矿反浮选项目,本文以重要生产设备的安全稳定运行和主要工艺过程参数的稳定为首要目标,对浮选过程加以控制,最终使浮选过程工艺技术指标稳定,提升浮选流程的自

动化水平,提高产品质量,降低生产过程损耗,从而提高经济效益,增强企业市场竞争力。

1 浮选工艺描述

浮选设备有多种,其中浮选柱因其结构、流程简单,无机械搅拌器、耗能少,占地面积小、投资少,建设周期短、维护费用低,技术指标好等一系列优点,应用较为广泛。我国最早应用浮选柱的是选煤行业^[7],而将其应用到铁矿浮选过程中,尚处在初期阶段,该小节着重阐述浮选过程中的两个重要设备-浮选柱和浓密机,以及整个工艺流程。

1.1 浮选柱

气泡发生器作为浮选柱的一个重要组成部分,安装在柱底部^[8]。在浮力的作用下,气泡发生器产生的气泡自由上升;在重力的作用下,矿浆中的微重颗粒则自由下沉,向下移动的矿浆与自由上升的气泡逆流碰撞^[9]。对于正浮选而言,有用的疏水性矿粒附着在气泡上被捕获,待气泡上升到泡沫层聚集后排出,形成精矿,由浮选柱底部排出的即为尾矿;对于反浮选工艺,恰与之相反,精矿由浮选柱底部排出,尾矿则被收集到泡沫槽里^[10]。

收稿日期:2015-11-24

基金项目:国家自然科学基金(11405280);河南省重点科技攻关项目(132102210179,142102210599);河南省自然科学基金研究项目资助(152300410134)

作者简介:刘晓青(1984-),女,讲师,硕士,主要研究方向为复杂工业过程控制。

1.2 浓密机

浓密机主要用于浓缩矿浆,同时也可以缓存矿石,以保证生产需要的矿浆流量,并为浮选柱提供适当浓度的矿浆^[11],两者大小直接影响到生产工艺指标。前一工序生产的矿浆,加入絮凝剂混合后,经管道输送至浓密机。在重力的作用下,絮凝的矿浆朝着浓密机的底部自然沉降。行走小车带动耙子做有规律的圆周运动,以确保矿浆的悬浮态,并对矿浆进行浓缩缓冲,同时也可防止压耙。在耙子的作用下,自然沉降的絮凝矿浆在浓密机底部汇集,从而得到浓度较高的矿浆,经由底流泵输送入浮选柱。

1.3 工艺流程

单个浮选柱的分选能力有限,通常难以满足工艺技术指标要求,可考虑多台浮选柱串并联等工艺,本文即选用了一粗二扫反浮选工艺流程。

来自上道工序的上游浆,经由浓密机浓缩脱水,形成合适浓度的浓密机底流矿浆;再经由底流泵和输送管道送至搅拌桶,并加入活化剂、抑制剂、捕收剂进行充分搅拌调浆;与药剂充分相互作用后的矿浆,首先进入粗选浮选柱中(配置高度相对较低),初次浮选后,精矿直接被收集到精矿槽;粗选尾矿输送到一扫浮选柱进行扫选,其精矿作为中矿被收集到中矿槽;其尾矿输送至二扫浮选柱再次进行扫选,二扫精矿仍作为中矿被收集到同一个中矿槽,二扫尾矿即作为最终的尾矿,中矿槽中的矿浆再经泵打回至浓密机。

2 浮选过程控制目标与策略

影响浮选过程的主要因素有:矿物原料性质、采用的浮选设备和工艺流程、矿浆的调制、药剂的添加等。通常,在工艺流程确定的情况下,矿物原料的性质也是特定的。由于浮选生产过程中矿浆的特性变化较复杂,造成底流泵转速波动较大,导致给矿流量及浓度的波动超出工艺要求范围,影响选别工艺指标。目前,浮选过程中浓密机仍多采用人工控制,当工况变化时,很难实时精确调整,影响产品质量;浮选药剂用量也多根据经验人工确定,不利于有用矿物和脉石的充分分离。

针对上述问题,本研究提出给矿浓度、给矿量、药剂量的智能切换控制方法,结合某选矿厂实际浮选生产过程,控制目标如下:

给矿浓度: $33\% < x_1(k) < 36\%$

给矿量: $50 \text{ t/h} < x_2(k) < 55 \text{ t/h}$, 且要求给矿量波动尽量小即 $|x_2(k) - x_2(k-1)| < 3 \text{ t/h}$

药剂用量: 活化剂 $1520 \text{ mL/min} < x_3(k) < 1540 \text{ mL/min}$ 、抑制剂 $12010 \text{ mL/min} < x_4(k) < 12046 \text{ mL/min}$ 、捕收剂 $15063 \text{ mL/min} < x_5(k) < 15078 \text{ mL/min}$

其中, $|x_2(k) - x_2(k-1)|$ 为上一采样时刻和当前采样时刻给矿量差的绝对值,也即给矿量的波动。

针对上述控制目标,提出了由工艺参数设定和跟踪设定值控制组成的给矿浓度、给矿量、药剂量能切换控制结构见图1。其中,工艺参数设定控制采用基于案例推理的控制回路预设设定模块,工艺参数跟踪设定值控制则针对各自特点,对不同的对象采用不同的控制方法^[12]。

工艺参数设定控制模块:根据当前选矿条件及选别指标要求,从案例库中检索出相似案例,通过案例重用与修正得到当前新案例的最终解,即各工艺参数设定值。

工艺参数跟踪设定值控制模块:浓密机的生产工艺是一个具有滞后的较为复杂的环节,考虑用PID调节器进行控制。在浮选过程中,给矿箱相当于缓存设施,基本上无滞后,考虑用PI调节器进行控制。浮选过程中的给矿量是指干矿量,加药量的多少主要就取决于干矿量的多少,而实际生产过程中,较为方便测取的是给矿流量的大小,它的测量是由给矿管道上的流量计进行的,给矿量则可以通过给矿流量和浓度推算出来;故给矿量的控制通常通过给矿管道上调节阀开度大小的调节来实现;此外,基于某一时刻给矿流量可能突然波动较大,造成给矿量计算值与实际值偏离的情况,本文采用特定设定周期内给矿量的统计值作为当前给矿量。由于浮选药剂多数具有腐蚀性,且发粘、流动性差,若采用常规电动阀,执行机构容易发生堵塞,对浮选药剂的添加造成影响,故本文采用的执行机构为工作在开关方式的电磁阀。

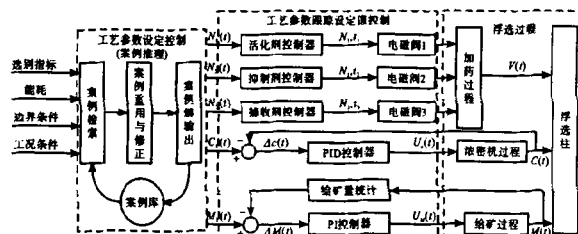


图1 浮选过程整体控制策略

Fig. 1 The control strategy of the floatation process

3 浮选过程控制方法

3.1 基于案例推理的工艺参数在线寻优算法

浮选过程具有非线性、工况时变复杂、大时滞等特性,很难通过建模的方法对给矿量、给矿浓度。

(1) 案例结构表示

加药量等工艺参数进行设定见表 1。案例推理技术恰是一种不依赖精确数学模型的推理技术。例结构,即由案例特征和案例解两部分组成,案例特征为浮选工况条件,案例解为个工艺参数设定值。

表 1 案例的表示结构

Table 1 Representation structure of cases

案例特征 F				案例解 R		
选别指标	能耗	边界条件	工况条件	给矿量	给矿浓度	加药量
f_1	f_2	f_3	f_4	r_1	r_2	r_3

(2) 案例检索

本文采用式(1)所示的最近相邻法求取案例的相似度,其中, C_N 为新案例, C_R 为案例库中案例; n 为案例特征个数; m_i 为第 i 个特征的权重。

$$\text{Sim}(C_N, C_R) = \sum_{i=1}^n m_i * \text{sim}(f_i^N, f_i^R) \quad (1)$$

$$\text{sim}(f_i^N, f_i^R) = \begin{cases} 1 - \frac{|f_i^N - f_i^R|}{\max(f_i^N, f_i^R)} & i \neq 6 \\ 1 - \frac{|f_i^N - f_i^R|}{3} & i = 6 \end{cases} \quad (2)$$

(3) 案例重用与修正

对于检索出的相似案例再做相应调整,即可得新案例的解,见式(3)。

$$R = \frac{\sum (Sim_i * R_i)}{\sum Sim_i} \quad (3)$$

式中, R 表示新案例的解; R_i 表示第 i 个案例的解。

3.2 工艺参数跟踪设定值控制算法

(1) 加药量控制

针对浮选药剂有腐蚀性、流动性差、发粘等特点^[13],本文选用的执行机构为工作在开/关方式的电磁阀。记 V_1 (mL/s) 为电磁阀的阀容,其含义是若电磁阀打开,每秒流出的药剂量为 V_1 ; V_2 药剂量的设定值; T 为电磁阀的工作周期, T_1 为一个工作周期内电磁阀的开启时间, T_2 为一个工作周期内电磁阀的关闭时间; T_0 为设定工作时间。

则在设定时间 T_0 内,要使加药量达到设定值,需要的电磁阀的数目为 $N =$

$$\begin{cases} \text{Int}(\frac{V_2}{T_0 V_1}) + 1, \frac{V_2}{T_0 V_1} \text{ 为非整数} \\ \frac{V_2}{T_0 V_1}, \frac{V_2}{T_0 V_1} \text{ 为整数} \end{cases}, \text{在此期间电磁阀的开}$$

$$\text{启时间为 } T_1 = \frac{V_2 T}{N T_0 V_1}, \text{ 其中: } T = T_1 + T_2.$$

实际运行表明,本文所采用的通过控制电磁阀的开启时间调整加药量的方法,可以保证浮选药剂的精确控制。

(2) 给矿浓度控制

针对本项目对浓密机生产过程提出的浓度要求,结合 PID 控制的优势,本文选用常规 PID 对浓密机排出的底流矿浆浓度进行调节,结构框见图 2。

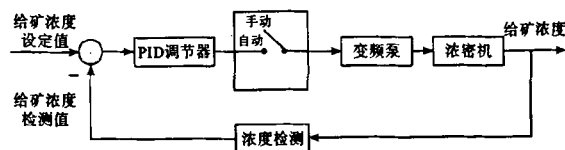


图 2 给矿浓度控制结构框

Fig. 2 The structure of the slurry consistency control loop

在该控制回路中,浓度设定值是输入,浓度检测值是输出;检测值与设定值的差值作为 PID 控制器的输入,变频器的频率作为 PID 控制器的输出,也即控制作用。此外还设置了自动和手动两种调节方式,自动方式下,通过 PID 进行调节;手动方式下,变频器的频率,也即控制作用可以人工设定。矿浆在压缩区的停留时间便决定了浓密机排出的底流矿浆的浓度,因此,通过调节变频器的频率,对底流泵的转速进行控制,即可以得到较为稳定的底流浓度。

在浓密机生产过程中,通过工程常用的测试法,可以得到底流泵频率-底流浓度的数学模型为 W

$$(s) = \frac{-4.5}{25s+1} e^{-6s}.$$

对 PID 控制器的参数进行整定并仿真,控制效果见图 3。

从图 3 可以看出,给矿浓度设定为 35.8% 时,给矿浓度过程值可以很好地跟踪设定,且超调量在允许范围之内,仿真表明,动静态特性均可以达到较理想的效果。

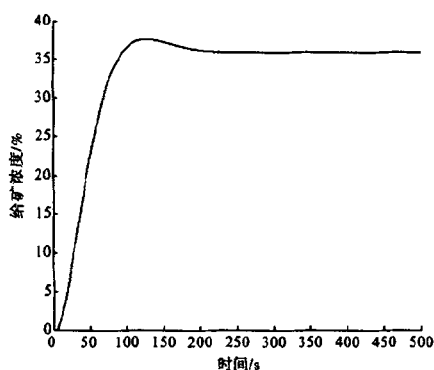


图3 给矿浓度阶跃响应曲线

Fig. 3 The step response curve of PID control for slurry consistency

(3) 给矿量控制

由于给矿过程基本上不存在滞后,故本文选用PI控制,结构框图见图4。

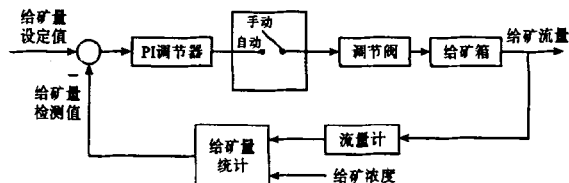


图4 给矿量控制结构框

Fig. 4 The structure of the supply ore mass control loop

其中,给矿量设定值为输入,给矿流量为输出,给矿量统计值为反馈。统计值与设定值的偏差作为PI控制器的输入,调节阀开度作为PI控制器的输出,也即控制作用,另外,调节阀开度大小同样可以由手动设定。下面为给矿量统计值的计算方法:

记铁矿石密度为 ε (g/cm^3 , 通常为常数), 某时刻 t_k 矿浆流量和浓度的采样值分别为 $V(k)$ 和 $c(k)$, 设定的采样周期 T_0 , 给矿量统计周期为 T 。则在统计周期 T 内, 给矿量统计值为 $M(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{\frac{T}{T_0}}$

$$\frac{V(k)}{1 + \frac{\varepsilon(1-c(k))}{c(k)}}$$

选用工程常用的测试法,可得到阀门开度-流量的数学模型 $W(s) = \frac{8.7}{5s+1}$ 。对PI控制器参数进行整定并仿真,控制效果见图5。

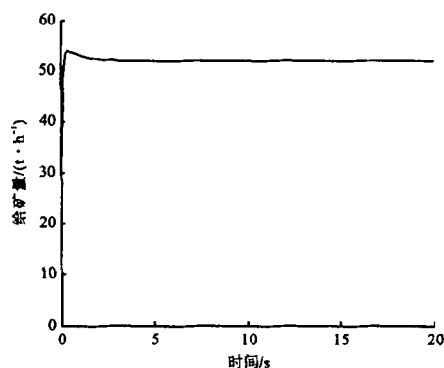


图5 给矿量控制阶跃响应曲线

Fig. 5 The step response curve of PI control for slurry mass

由图5可以看出,给矿量设定值为52.7 t/h时,给矿量能较好地跟踪设定值,达到较好的控制效果。

4 结 论

本文结合浮选过程工艺流程,提取了主要影响因素,并针对各自特点采用了不同的控制方法,将本控制系统应用到某选矿厂。长期运行结果表明,系统运行稳定,安全可靠,降低了工人的劳动强度,改善了劳动环境,减少了资源消耗,进而提升了企业竞争力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 耿增显,柴天佑. 基于案例推理的浮选过程智能优化设定[J]. 东北大学学报, 2008, 29(6): 761-764.
- [3] 桂卫华,陈志鹏,何明芳,等. 基于相关向量机的硫泡沫浮选液位软测量[J]. 控制工程, 2014, 21(1): 1-4.
- [4] 李海波,柴天佑,岳恒. 浮选过程自动控制系统[J]. 控制工程, 2013, 20(5): 796-799.
- [5] 李海波,郑秀萍,柴天佑. 浮选过程混合智能优化设定控制方法[J]. 东北大学学报, 2012, 33(1): 1-5.
- [6] 张勇,王介生,王伟. 专家控制方法在浮选过程中的应用[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1271-1274.
- [7] 赵新华,王光辉,匡亚莉,等. 基于 SVMR 的煤泥浮选智能优化控制系统研究[J]. 矿山机械, 2012, 40(8): 78-81.
- [8] 李淑艳,游维. 南芬选矿厂浓密机高效化改造的研究[J]. 金属矿山, 2005(11): 60-62.
- [9] 张海军,刘炯天,王永田. 矿用旋流静态微泡浮选柱的分选原理及参数控制[J]. 中国矿业, 2006, 15(5): 70-72.

- [10] 王伟之, 韩苗苗, 刘天一. 浮选柱在微细粒赤铁矿反浮选中的应用研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(9): 99-102.
- [11] 荣国强, 刘炯天, 刘莉君, 等. 旋流-静态微泡浮选柱液位自动控制系统设计[J]. 金属矿山, 2007(5): 62-64.
- [12] 柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(5): 506-515.
- [13] 刘少文, 蒙君荣, 陈文, 等. 颗粒尺寸与药剂性质对胶磷矿浮选过程的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(2): 25-30.

Research on Methods of Controlling Flotation Process

Liu Xiaqing, Cheng Quan, Li Jin, Zhou Xiaodong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou Henan, China)

Abstract: Flotation is a complex process. In order to avoid arbitrariness and subjectivity of manual operation, to adjust the production process in real time, consequently ensure the production process can be conducted stably and smoothly, flotation mechanism and the entire process of a concentrator are analyzed. On this basis, control objectives are identified, which is to keep the dosage, the concentration of the ore, the ore volume constant. For each characteristic, the corresponding control strategy is developed. On/off solenoid valves are used for control of dosage, PID controller is used to adjust the ore concentration, and PI controller is used to adjust the amount of ore. Applied to the project of 'anti-flotation of red ore for a concentrator, the result shows that it can maintain the stability of the important process parameters and stable operation of important production equipments in the flotation process.

Keywords: Flotation process; Process control; PID controller; Parameter tuning

(上接 25 页)

参考文献:

- [1] 孙体昌, 李定一, 张洞仙. 石灰与黄铁矿作用时间对抑制剂效果的影响及机理[J]. 有色金属: 选矿部分, 2002(2): 41-43.
- [2] 吴双桥. 低品位铅锌硫化矿铅锌分离试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(4): 15-17.
- [3] 陈锦金, 周德炎, 魏宗武, 等. 高铁泥化氧化铅锌矿的浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2007(5): 50-52.
- [4] 陈志强, 胡真, 叶威. 广东某铅锌矿铅锌分离试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2011(2): 8-10.
- [5] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [6] 汪庭成, 沈卫卫, 王玉莲, 等. 新疆阿舍勒铜矿强化锌硫分离的试验研究及生产实践[J]. 有色金属: 选矿部分, 2009(3): 1-4.

Experimental Research on Flotation of the Complex Refractory Lead, Zinc and Antimony Ore

Luo Zengxin, Lai Qiuxiang

(Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian, China)

Abstract: A combination of zinc sulfate and sodium sulfite cyanide-free process and novel organic inhibitors Q-Zn were used to separate lead-zinc minerals from the complex refractory lead, zinc and antimony ore. From the results of closed-circuit test a Pb-Sb concentrate with Pb grade of 25.32% and Pb recovery of 40.39%, antimony grade of 21.52% and Sb recovery of 62.69%; and a Zn concentrate with Zn grade of 44.81%, and Zn recovery 79.00%; sulfur grade of 32.28%, and S recovery of 49.13%, were obtained.

Keywords: Lead zinc antimony; Oxide ore; Cyanide-free; Separation of lead and zinc