浮选柱自动控制技术研究进展*

赵一帆[1]，廖寅飞[2]，马子龙[2]，刘长青[1]

(1. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州 221116；2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心，江苏 徐州 221116)

摘　要：从浮选柱运行参数及其控制原理出发，总结了当前浮选柱自动控制的研究成果和发展方向，详细介绍了浮选柱液位、充气量、给料量和喷淋水等参数的自动控制方法和技术，并探讨了未来浮选柱自动控制技术的发展趋势。

关键词：浮选柱；自动控制；研究现状；发展趋势

中图分类号：TD456　**文献标志码**：A　**文章编号**：1001－0076(2016)04－0064－04

DOI：10.13779/j.cnki.issn1001－0076.2016.04.013

Research Progress on Automatic Control Technology of Flotation Column

ZHAO Yifan[1]，*LIAO Yinfei*[2]，*MA Zilong*[2]，*LIU Changqing*[1]

(1. School of Chemical Engineering & Technology, CUMT, Xuzhou 221116, China; 2. National engineering research center of coal preparation and purification technology, CUMT, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on operation parameters and control principle of flotation column, the research status and development trend of flotation column automatic control were summarized. The automatic control methods and techniques of operation parameters, including liquid level, aeration rate, feed rate and spray water were elaborated. Moreover, the development trend of automatic control technology for flotation column was also discussed.

Key words: flotation column; automatic control; research status; development trend

浮选柱作为一种新型高效的选矿设备在煤炭、有色及黑色金属矿物、非金属及化工矿物分选领域的应用不断扩展[1]。近年来，随着控制方法、检测手段和执行机构的快速发展，浮选柱自动控制水平得到了显著的提高[2]，本文将总结当前浮选柱自动控制技术的研究现状，探讨浮选柱自动控制技术的发展方向。

1　浮选柱自动控制现状

根据控制效果，浮选柱的控制可分为稳定控制和最佳控制。稳定控制主要包括以下几个方面的内容：液位控制、进气量控制、入料量的控制、喷淋水的控制，其主要目的是使浮选柱在无人为因素影响的情况下能够在某个稳定的状态下工作，使浮选产品质量合格、产率稳定。稳定控制的关键是控制浮选柱矿浆的液位，而最佳控制的关键是在稳定控制的基础上，根据各分选过程的不同，随时调控各可调变量，使浮选柱处于最佳工作状态，分选效果达到最佳[3－6]。

1.1　液位控制

浮选柱液位自动控制系统的实现主要有两种方案[1,7]。

第一种是流速/液位方案。即通过调节设在尾

* **收稿日期**：2016－01－24

基金项目：江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150192)

作者简介：赵一帆(1992－)，男，河北新乐人，在读硕士研究生，主要研究方向是柱式分选理论与选矿过程设计。

矿管上的尾矿泵或阀门来直接调节尾矿排放量从而控制液位。这种控制方法对于大滞后和大惯性的浮选系统来说,其稳定性较差,容易引起系统的振荡,因此使用这种方法时,浮选柱对控制系统的依赖性较大,控制系统发生故障会影响整台设备的工作,但它调节速度快,能根据液位的变化及时响应,迅速作出反应,使液位尽快恢复平衡。王浩为[8]等研究发现这种方法的主要问题在于阀门的寿命比较短,阀芯易磨损,调节的精度变得较差。

第二种是静平衡方案。即采用 U 型管原理,将尾矿通过 U 型管引导到一个与受控液位等高的尾矿箱中,通过调节尾矿箱中尾矿排放口的高度来控制液位,这种控制方案的稳定性比较好,成本低、波动较小、浮选柱对控制系统的依赖性小等优点。这种方法通常用在选煤和非金属矿用浮选柱中。在选矿作业时,矿粒密度大,难以在静压作用下提升至高处,堆积在 U 型管底部,造成堵塞。

两种方案各有利弊,为达到更高的控制精度和可靠性,目前常选用流速/液位控制方案来设计液位自控系统[9],图 1 为浮选柱矿浆液位的控制原理图。

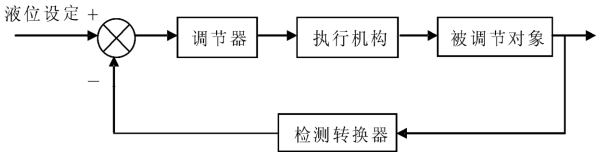

图 1　浮选柱矿浆液位的控制原理图

在图 1 中,调节器采用单回路数字调节器或采用 PID 控制器(或 DCS,或 PLC),执行机构采用电动或气动执行机构,调节器或执行机构根据生产规模及工艺条件要求选择相应部件,其中液位检测、转换器是矿浆液位调节回路实施的关键。樊伟锋[10]通过研究,设计出了模糊 PID 双模控制系统。该系统具有模糊控制的适应性强、响应快等优点,又具 PID 控制有精度高的优点,适合浮选柱液位这种大滞后大惯性的控制对象。郭西进[11]进一步研究把模糊 PID 双模控制系统,使其变的更加智能化,且具有一定的自适应性。

图 2 是采用超声波液位传感器测量矿浆液位的示意图。在浮选柱上安装两个超声波传感器,传感器对准浮选柱泡沫,用以测量泡沫的物位传感器对准浮球上相连的平板,平板通过连杆与浮子相连,当浮球上、下移动时,连杆通过导向杆带动平板上下相应移动,故检测出平板位移的变化即为矿浆液位的变化。

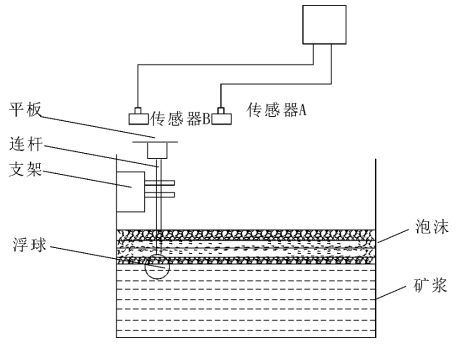

图 2　超声波液位传感器测量浮选柱矿浆液位示意图

用超声波传感器来测量矿浆物液位可避免测量的不稳定和不可靠的问题,同时两个超声波探头所测物位差即为泡沫层厚度。该系统能用于恶劣的测量环境中,通过国内实践,上述结构的超声波矿浆浮选柱液位传感器使用良好、免维护,给国内老矿山改造及新建选矿厂项目的浮选柱矿浆液位检测设计提供了一个很好的手段。董志勇[12]设计了一套泡沫层厚度自动控制系统。该系统上位机采用研华工控机,触摸屏选用西门子 SMART1000,控制器为西门子 S7 – 200PLC,传感器为超声波液位计,执行机构为电控液动推杆。通过合理设计,该厂浮选柱泡沫层厚度实现了闭环控制,液位稳定性得到了提高,保证了产品数质量指标。

1.2　进气量控制

进气量被认为是浮选柱控制中最灵活、最敏感的参数。目前浮选柱进气量检测控制系统主要有两种考虑方案,其一是直接在气泡发生器的吸气管路上安装涡街流量计和电动调节阀来控制浮选柱的进气量;其二,检测某段柱体内矿浆的压力差来计算出矿浆的含气率,进而可以调节安装在气泡发生器的进气管路上的电动调节阀,实现控制浮选柱的进气量的目的。昆明理工大学刘丹等[13]通过利用相应的硬件和“组态王”软件实现了浮选柱进气量的自动调节。该系统的核心是由 PID 控制器,再加上控制模块、传感器、蝶阀等外围电路和设备组成,通过组态王软件,实现浮选柱进气量参数的检测和自动控制。控制系统的主要结构如图 3 所示。

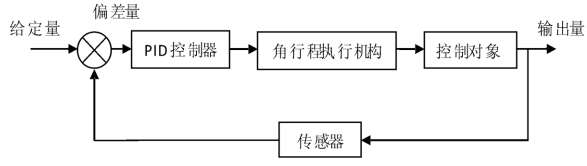

图 3　进气量控制系统结构图

1.3　给料量的控制

给料量的适量与稳定是提高分选效果的必要条件之一,给料量的大小影响浮选体系的平衡和药剂的消耗量,因此给矿量的大小也是影响分选效果的重要因素之一。研究发现给料量较小时,分选时间较长,精矿品位不高,回收率较高。随着给料量增大,分选时间缩短,精矿品位逐渐提高,回收率呈递减趋势,因此系统需有给料量的检测控制系统[14-15]。

中国矿业大学根据旋流-静态微泡浮选柱系统的工作原理和工作特点,研究了浮选柱给料量的自动控制策略。通过在给料泵出口管路上安装流量计来检测给料量,使用变频器控制给料泵的转速来实现控制给料量的目的,基本控制策略如图 4 所示。

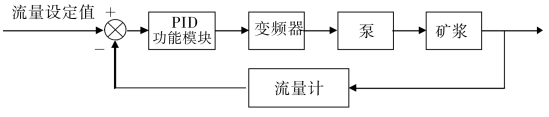

图 4　浮选柱给料量的基本控制策略

1.4　喷淋水的控制

喷淋水对泡沫层有洗涤冲刷作用,正浮选条件下可使夹杂于精矿泡沫中结合不牢固的非目的矿物从精矿中分离出来,然后使其进入矿浆中,最后从尾矿中排出。因此,喷淋水可强化泡沫的"二次富集"作用,从而提高精矿品位[16]。喷淋水的流量是通过流量计(旋转式流量计、孔板或磁流测量计)进行测定,并通过流量控制阀进行自动控制的。喷淋水控制允许流量缓慢变化,但是平稳地控制流量会得到更好的运行效果。额定的喷淋水量是估算的,应进行调节以产生适当的偏流率。流量取决于给料速率、给料品位、预计的浮选柱溢流的质量回收率。

2　浮选柱自动控制发展趋势

2.1　实时化

随着在线品位分析仪、浮选泡沫图像分析仪器等实时分析仪器的应用,将有效地解决浮选柱控制系统的一些问题。目前金川有色金属公司、安徽铜陵冬瓜山铜矿、云南会泽铅锌矿、辽宁鞍山大孤山铁矿等矿山已经引进了新型的 Courier 6SL 在线品位分析仪。金川有色金属公司选矿厂运用泡沫边缘探索法和分水岭 Flooding 方法对实时采集的浮选泡沫图像进行了分割,两种方法都达到了在工业中应用的程度[17]。刘文礼[18]等通过煤泥分批浮选试验,获取了大量浮选精煤泡沫数字图像,将图像数字处理技术应用到泡沫图像特征参数的提取上,提出了有效描述浮选泡沫结构特征的线邻域提取算法-空间灰度相关矩阵法,分析了各特征参数的物理意义及其随浮选时间(泡沫纹理)的变化关系,定性地指出了各泡沫特征参数与泡沫纹理的相关性。与此同时,WDPF 微机多道多探头在线品位分析仪也已在浙江平水铜矿、建德铜矿、安庆铜矿、南京栖霞山铅锌矿等矿山得到了推广应用[19]。

2.2　系统化

根据工艺要求设置压力和压差测量、液位测量、流量测量、矿浆浓度测量、气含率测量,pH 测量、密度测量、温度测量和导电性测量等检测回路,更全面地建立和实施有效的控制系统,增加浮选关键参数大屏幕显示装置等,逐步完善浮选柱的自动控制。章晓林等[20]开发了浮选柱的 DDC 监控系统,实现了对矿浆液位、加药量和给矿量等参数的实时监控。张晓峰等[21]设计了浮选柱多输入/多输出控制系统,它采用开物 2000 工业组态软件编制用户监控界面和 PLC 模块构建硬件系统,能够较好地实现水平充填介质浮选柱工作过程的稳定控制,减少了人工的干预量,保证产品质量的稳定,同时用工业组态软件作为开发操作界面的工具,使浮选柱系统的运行状态更直观,操作更简单。Mohanty[22]构建了浮选柱的 PLC 监控系统,上位机运行 SCADA 软件视频监控浮选柱泡沫状态,并实时采集显示浮选柱液位、进气量和给料量等运行参数。

浮选作为整个选矿过程的一部分,为实现选矿作业效益(目标产量、品位、回收率)的最大化,将其它作业的控制与浮选控制系统整合为选矿控制系统,实现整个选矿过程自动控制的系统化。如综合考虑:磨矿分级智能控制、浮选系统过程检测与控制、一段混合浮选的 pH 检测和控制、再磨旋流器给矿流量及给矿浓度检测、再磨旋流器中间箱压力检测、再磨砂泵液位控制等。

2.3　智能化

伴随着自动化技术和智能控制技术的不断进步,浮选柱自动控制的智能化也得到了很大的发展。模糊控制理论、神经网络控制理论以及遗传算法、粒子群优化算法,相继在浮选柱的自动控制中得到研究和应用[23-30]。Bergh[31]提出了浮选模糊管理控制的概念,同时设计了浮选柱的模糊监控系统,解决

了传统的 PID 控制在没有协调控制回路下控制效果差的问题。Núñez[32]研究了分层混合模糊策略在浮选控制中的应用,结果表明模糊控制器的回收率提高了约 10%。Maldonado[33]等采用模型预测控制策略(MPC)来解决浮选柱操作优化的问题,结果表明该预测控制器有利于浮选柱过程优化,达到了较好的控制效果。Chuk 等[34]利用泡沫密度估计和模糊推理开发了来防止泡沫突降(泡沫过载后暴跌)的专家系统。Aldrich 等[35]利用图像处理技术开发了基于浮选泡沫图像分析的浮选专家系统,按照精矿品位、回收率目标值,建立矿浆流量、液位、给气、给药、搅拌方式、给水等多参数建立的浮选应用专家系统。

3　结 语

运行参数控制效果的优劣直接关系着浮选柱分选效果的好坏,浮选柱自动控制是浮选柱技术发展的重要组成部分。国内外在浮选柱液位、进气量、给料量和喷淋水等运行参数控制方面取得了长足进步,实现了对浮选柱运行的稳定控制,同时实时化、系统化和智能化将成为浮选柱自动控制技术的发展趋势。

参考文献:

[1] 荣国强,崔雯. 浮选柱液位自动控制系统设计探讨[J]. 矿业工程,2007(6):35 -37.

[2] 顾宁清. 近年来浮选柱及其自动化简述[J]. 科技创新与应用,2012(29):122.

[3] 李玉西. 模糊与 PID 双模控制在浮选柱液位控制系统中的应用[J]. 矿冶,2008(1):73 -75.

[4] 宣乐信,曾云南. 选矿厂选别作业自动控制的进展[J]. 金属矿山,2008(1):7 -11.

[5] 杨文旺,武涛. 微处理量浮选柱液位控制系统的设计与研[J]. 有色金属:选矿部分,2011(6):53 -55,59.

[6] 张敏,张建强,刘炯天,等. 浮选柱泡沫层检测控制系统的研究[J]. 矿山机械,2010(19):107 -110.

[7] 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.

[8] 王浩为. 浮选柱液位自动控制系统设计[J]. 煤炭工程,2013(8):137 -139.

[9] 李振兴. 基于模糊控制器实现的浮选柱液面控制系统设计与研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008.

[10] 樊伟峰. 浮选柱液位控制研究[J]. 能源技术与管理,2013(5):125 -126.

[11] 郭西进,顾红超,吴刚. 浮选柱液位智能控制系统的研究[J]. 煤炭技术,2014(5):232 -234.

[12] 董志勇,李璐,王然风. 浮选柱泡沫层厚度自动控制系统的设计和实现[J]. 选煤技术,2013(1):75 -78.

[13] 刘丹,李世厚,文书明,等. 浮选柱充气量自动调节的研究[J]. 矿冶,2008(1):65 -67.

[14] 李振兴,文书明,罗良烽. 选矿过程自动检测与自动化综述[J]. 云南冶金,2008(3):20 -23.

[15] 胡业林,张斌. 浮选柱的检测与控制系统设计[J]. 中国煤炭,2000(5):25 -27.

[16] 陈文胜,刘炯天,李小兵,等. 旋流 - 静态微泡浮选柱浮选萤石的影响因素分析[J]. 金属矿山,2008(5):100 -102.

[17] 葛之辉,曾云南,赵宝坤. 选矿过程自动检测与自动化综述[J]. 中国矿山工程,2006(6):37 -42.

[18] 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,2003,54(6):830 -835.

[19] 李振兴,文书明,罗良烽. 选矿过程自动检测与自动化综述[J]. 云南冶金,2008(3):20 -24.

[20] 章晓林,张文彬. 浮选柱的 PC 计算机监控系统设计[J]. 矿冶工程,2005(4):39 -41.

[21] 张晓峰. 浮选柱多变量控制系统的设计及应用[D]. 长沙:中南大学,2010.

[22] Mohanty S. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column[J]. Journal of Process Control,2009,19(6):991 -999.

[23] 葛咸浩. 操作参数对浮选柱分选效果的影响[J]. 洁净煤技术,2013,19(3):6 -9.

[24] 程敢,曹亦俊,徐宏祥,等. 浮选柱技术及设备的发展[J]. 选煤技术,2011(1):66 -70.

[25] Swati Mohanty. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column[J]. Journal of Process Control, 2009,(19):991 -999.

[26] R. DEL VILAR, M. GREGOIRE, A. POMERLEAU. Automatic control of a laboratory flotation column[J]. Minerals Engineering,1999(3):291 -308.

[27] S. M. Vieira, J. M. C. Sousa, F. O. Durao. Fuzzy modelling strategies applied to a column flotation process[J]. Minerals Engineering,2005,(18):725 -729.

[28] 张国忠. 智能控制系统及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[29] 葛咸浩. 操作参数对浮选柱分选效果的影响[J]. 洁净煤技术,2013,19(3):6 -9.

[30] 黄光耀,冯其明,欧乐明,等. 微泡浮选柱控制专家系统的开发与应用[J]. 有色金属,2010(4):105 -108.

[31] Bergh L G, Yianatos J B. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes[J]. Journal of Process Control,2011,21(2):226 -234.

[32] Núñez F, Tapia L, Cipriano A. Hierarchical hybrid fuzzy strategy for column flotation control[J]. Minerals Engineering,2010,23(2):117 -124.

[33] Maldonado M, Desbiens A, Del Villar R. Potential use of model predictive control for optimizing the column flotation process[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009,93(1):26 -33.

[34] Chuk O D, Ciribeni V, Gutierrez L V. Froth collapse in column flotation:a prevention method using froth density estimation and fuzzy expert systems[J]. Minerals engineering, 2005,18(5):495 -504.

[35] Aldrich C, Marais C, Shean B J, et al. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision:A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010,96(1):1 -13.