

文章编号: 1004-4051(2023)S2-0092-05

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230580

## 水力旋流器控制方法研究及应用

邹敏红<sup>1,2</sup>, 刘道喜<sup>1,2</sup>, 周冶<sup>1,2</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室, 北京 102628)

**摘要:** 水力旋流器是一种连续作业的分级设备, 是选矿工业中最重要的设备之一。其利用离心力来加速颗粒的沉降速度, 通常与磨矿机组组成磨矿分级闭路流程, 分级效果对磨矿流程的效能有着非常重要的影响。本文从旋流器结构、工作原理及工作特点分析, 确定了水力旋流器分级效果的关键控制参数, 针对某选矿厂 SABC 磨矿流程设计开发一套旋流器串级控制策略和自动控制系统, 成功应用于工业现场, 实现水力旋流器稳定控制, 提高了水力旋流器溢流产品稳定性。

**关键词:** 水力旋流器; 磨矿; 分级; 串级控制; 控制系统

**中图分类号:** TD928 **文献标识码:** A

## Research and application of hydrocyclone control methods

ZOU Minhong<sup>1,2</sup>, LIU Daoxi<sup>1,2</sup>, ZHOU Ye<sup>1,2</sup>

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Optimized Manufacturing in Mining & Metallurgy Process, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Hydrocyclone is a continuous grading equipment and one of the most important equipment in the mineral processing industry. It uses centrifugal force to accelerate the settling speed of particles, usually forming a closed circuit grinding and grading process with a grinding machine. The grading effect has a very important impact on the efficiency of the grinding process. This paper analyzes the structure, working principle, and working characteristics of the hydrocyclone, and determines the key control parameters for the grading effect of the hydrocyclone. A set of cascade control strategy and automatic control system for the SABC grinding process of a certain beneficiation plant is designed and developed, which has been successfully applied in industrial sites to achieve stable control of the hydrocyclone and improve the stability of the overflow product of the hydrocyclone.

**Keywords:** hydrocyclone; grinding; grading; cascade control; control system

### 0 引言

选矿作业主要包括破碎筛分、磨矿分级、选别、产品处理等步骤, 破碎筛分和磨矿分级统称为选前准备, 目的是为选别流程提供合格细度的产品<sup>[1]</sup>。固体物料在磨机筒体内研磨成小颗粒, 再通过分级设备进行粗细分级, 分级得到细粒级产品必须要达到一定细度指标, 可以实现有用矿物与脉石矿物单体解离, 然后进入选别流程。

分级是根据物料颗粒在流体介质中沉降速度的差别把混合矿物分离成两种或两种以上产品的一种方法<sup>[2]</sup>。在选矿中流体介质通常是水, 当物料粒度过细不能有效筛分分离时, 一般采用湿式分级。因为流体介质中颗粒的速度不仅仅与粒度有关还与物料的比重和颗粒形状有关, 所以在利用重选机分选矿物的过程中分级原理极为重要, 分级机对磨矿流程的效能影响较大。

收稿日期: 2023-08-11 责任编辑: 聂虹

第一作者简介: 邹敏红(1988—), 女, 汉族, 硕士, 主要从事仪器仪表及自动化控制等方面的研究工作, E-mail: zouminhong@bgrimm.com。

引用格式: 邹敏红, 刘道喜, 周冶. 水力旋流器控制方法研究及应用[J]. 中国矿业, 2023, 32(S2): 92-96.

ZOU Minhong, LIU Daoxi, ZHOU Ye. Research and application of hydrocyclone control methods[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S2): 92-96.

### 1 水力旋流器原理分析

某选矿厂磨矿流程采用 SABC 流程, 设备联系图如图 1 所示, 主要设备有半自磨机、球磨机、破碎机、水力旋流器<sup>[4]</sup>。半自磨矿仓原矿通过重板给料机将固体物料分布在运输皮带上, 经皮带运输到半自磨机中, 同时添加一定比例的水, 保证一定的磨矿浓度来进行第一步研磨, 半自磨机的磨矿产品经过振

动筛分级之后, 筛下合格产品进入磨矿缓冲泵池, 筛上不合格产品通过运输皮带返回顽石仓, 然后进入破碎机, 破碎后矿石与新给矿一起重新给入半自磨机进行研磨, 磨矿泵池中的矿浆通过渣浆泵输送到旋流器进行分级, 合格产品进入下一个浮选环节, 不合格产品进入球磨机二次研磨, 球磨机磨矿产品进入磨矿泵池。

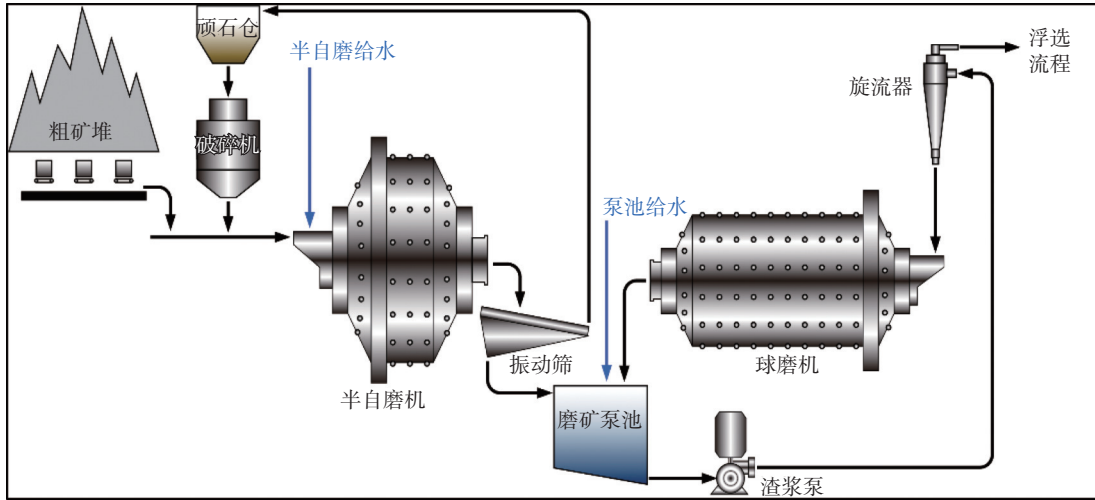


图 1 磨矿设备联系图

Fig. 1 Contact diagram of grinding equipment

水力旋流器<sup>[4]</sup>是一种连续作业的分级设备, 是选矿工业中最重要的设备之一, 在选矿中主要用作分级设备, 尤其在细粒分级作业中极为有效。其利用离心力来加速颗粒的沉降速度, 通常与磨矿机组成磨矿分级闭路流程, 分级效果对磨矿流程的效能有着非常重要的影响。它广泛用于闭路磨矿作业<sup>[5]</sup>, 但也可用于脱泥、除砂和浓密等其他作业。

典型的水力旋流器<sup>[6]</sup>如图 2 所示, 由一个圆锥形

容器构成, 其底部(沉砂口)敞开, 锥体上连接一个筒体, 筒体上部有一个切向给料口。圆筒顶部有盖板, 一个轴向溢流管穿过盖板。轴向溢流管有一段插入筒体内, 该管段可拆卸, 称之为旋流器溢流管, 用以防止给矿短路而直接进入溢流。

矿浆在一定压力下通过切向给料口给入, 这使矿浆产生漩涡运动, 进而使其在旋流器内产生旋流运动, 并沿垂直轴形成一个低压区。沿垂直轴还形成空气柱, 通常通过沉砂口同大气相连接; 但一部分空气柱是由从低压区溶液中析出的溶解空气所产生的。

水力旋流器作用的经典理论是旋流器内颗粒的流动方式受到两个反相作用力<sup>[7]</sup>: 一个是向外的离心力, 另一个是向内的拉力, 如图 3 所示。离心力可加速颗粒的沉降速度, 因而可按粒度、形状和密度对颗粒进行分离。沉降较快的颗粒被抛向器壁(此处速度最慢), 之后逐步流向沉砂口。由于拉力的作用, 沉降较慢的颗粒流向垂直轴线周围的低压区, 并向上运动, 最终经由溢流管进入溢流。

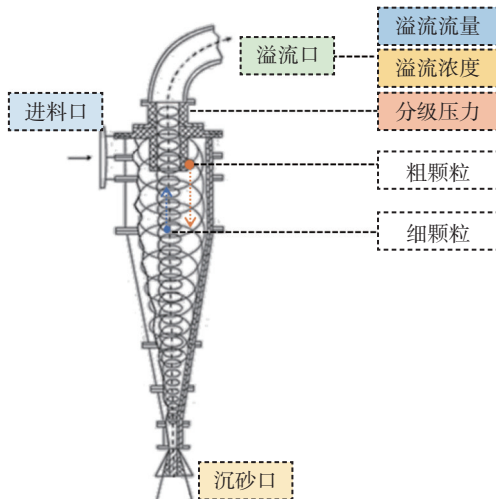


图 2 水力旋流器结构

Fig. 2 Hydrocyclone structure

### 2 水力旋流器控制

本文从水力旋流器工作原理出发, 结合现场实际生产数据进行分析, 设计一套水力旋流器控制策

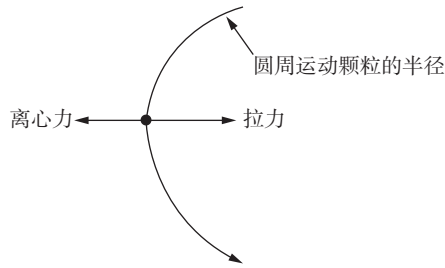


图 3 旋流器内颗粒受力分析

Fig. 3 Force analysis of particles in cyclone

略,在旋流器分级机理的基础上,根据泵池液位、分级压力、给矿流量、溢流粒度和浓度状态综合调整渣浆泵的频率和进料浓度,以实现旋流器分级控制<sup>[8]</sup>。

矿浆在压力作用下经给矿管沿柱体切线方向进入壳体,在壳内做回转运动,实现粗细分级,除设备因素外,分级效果的好坏与给矿浓度和分级压力密切相关。因此,旋流器分级的“质”和“量”相互耦合,在调整分级流量(液位)的过程中,分级粒度会相应变化;同样在调整分级浓度过程中,即使泵速不变,分级流量也会相应改变。

水力旋流器控制主要内容如下所述。

1)磨矿泵池液位与分级压力控制。选矿过程中磨矿泵池液位的控制要求比较严格,液位不能过高,否则容易冒槽;也不能过低,否则会抽空导致旋流器发生气喘。同时,分级压力要维持相对稳定,以保证分级效果的稳定。为实现此目标,充分利用泵池的缓冲空间,在工况小幅波动的情况下维持分级效果的稳定,而在工况发生迁移时及时调整以避免出现异常工况,从而保证泵池液位的安全和分级压力的稳定。

2)溢流粒度与浓度控制。溢流产品的浓度和粒度受旋流器入口浓度和分级压力等的影响,因此可通过调整旋流器给矿浓度和给矿压力把溢流粒度和浓度控制在一个合适的区间。

具体控制策略如下所述。

1)泵池液位控制<sup>[9]</sup>。通过在泵池上方安装雷达液位计实现液位检测,通过控制渣浆泵频率实现液位稳定。在磨矿过程中由于半自磨机排矿浓度未知,且可能会随着磨机工作状态变化,排矿量和排矿浓度发生变化,所以需要不断调整泵池补加水,保证磨矿泵池浓度的相对稳定。因此对于泵池内部矿浆而言,其输入是不确定的,同时泵池矿浆浓度的变化也会改变渣浆泵的输送能力,进而改变渣浆泵出量。对于磨矿泵池液位控制,常规的 PID 控制采用固定的参数,难以保证控制适应系统的参数变化和工作条件变化,得不到理想效果。

通常针对不确定系统,设计自适应模型可以适应不同的外部环境,自动调整控制回路参数,即实现在不同工况下控制功能稳定,提高了控制精度和系统适用性。自适应控制原理如图 4 所示,根据环境变化智能调节自身特性,使系统能按照设定的标准在最优状态。

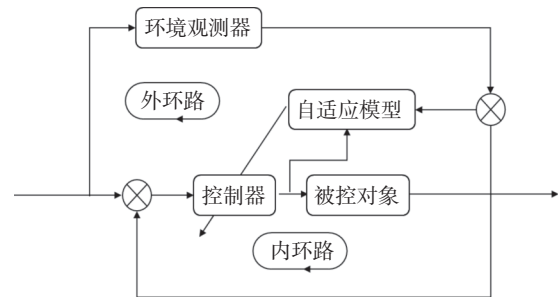


图 4 自适应控制原理

Fig. 4 Principle of adaptive control

2)旋流器控制。浓度控制基于状态区间控制,正常情况下,都是通过控制泵池补加水  $W$  实现旋流器给矿浓度在正常稳定区间  $N$ 。设定浓度多状态区间控制,共分为以下几个区间,较低区间  $L$ ,稳定区间  $N$ ,较高区间  $H$ 。当浓度处于正常区间  $N$  时,保持补加水  $W$  流量不变。当浓度处于区间  $L$  时,减少补加水  $W$  流量。当浓度处于区间  $H$  时,增加补加水  $W$  流量。溢流流量控制不可简单的设计为溢流流量与渣浆泵频率闭环控制系统,应充分考虑水力旋流器分级过程压力和流量以及矿浆密度的耦合关系。本文针对这一复杂特性设计串级控制器,实现旋流器溢流流量控制。

如图 5 所示,该控制策略优先保证矿浆浓度在合理范围内,设计原则是结合旋流器分级特点。矿浆浓度小则矿浆的黏度也随之降低,因而矿粒的沉降速度也随之加快,得到的溢流产品粒度细。上浆浓度高,分级效果较差,通过优先调整泵池补加水实现上浆浓度稳定。

由于旋流器分级特点,压力也会影响溢流粒度,矿浆在旋流器中旋转速度和离心力也越大,分级粒度也越细。确定分级粒度以后,就要求一定的压力与之相适应,压力过大则沉砂中混入的细粒增多,压力过小则溢流中混入的粗粒增多,这都会降低分级效率,因此在控制器设计时需要严格控制设定值下限。

### 3 现场应用

将设计开发好的旋流器自动控制系统部署在现场,观察工况变化时,控制器执行动作,控制效果如图 6 所示。

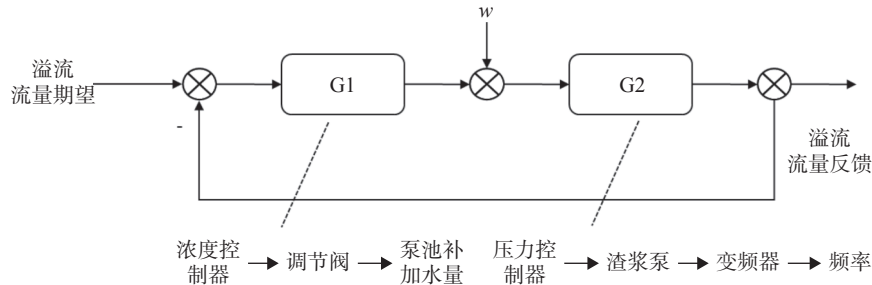


图 5 旋流器串级控制

Fig. 5 Cascade control of cyclone

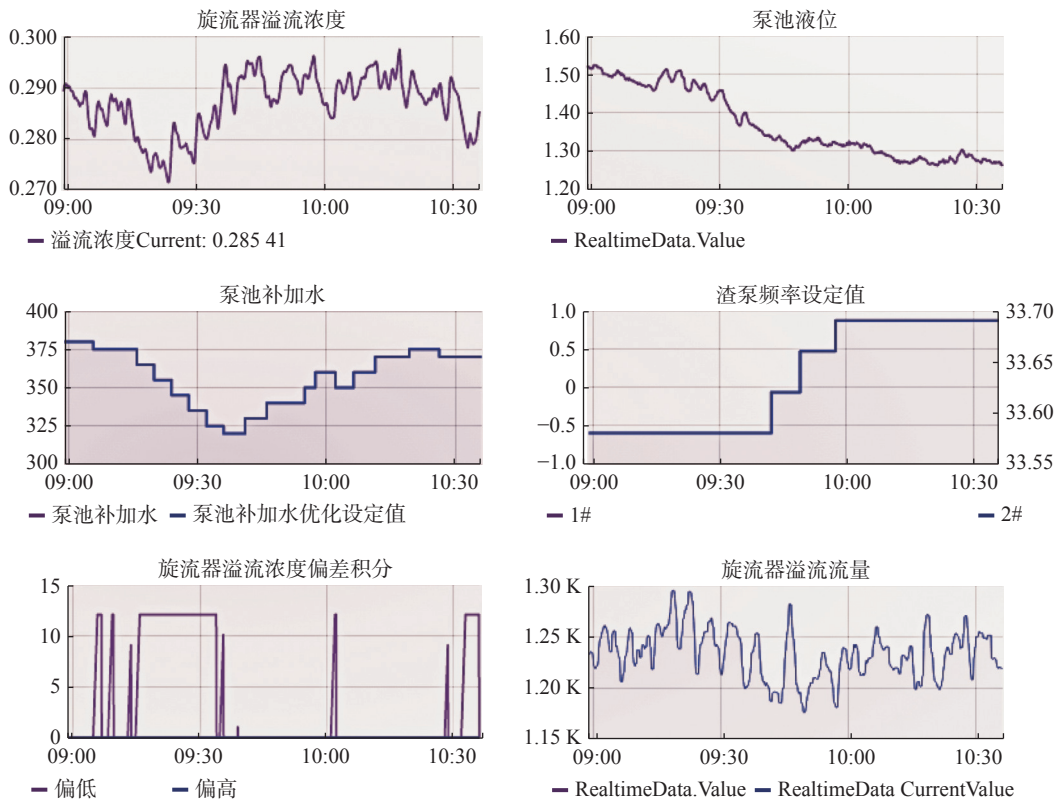


图 6 水力旋流器控制实时例

Fig. 6 Real-time example of hydrocyclone control

如图 6 所示, 时间轴为 9:00—9:30 旋流器溢流浓度偏低, 泵池液位处于正常范围(70%为 1.4 m), 这是优先保证旋流器溢流浓度, 通过连续调整补加水量, 提高溢流浓度; 9:30 后溢流浓度正常, 溢流浓度正常后, 这时泵池液位也处于弱调整区, 需要在保证浓度的同时通过缓慢增加补加水稳定液位, 由于溢流浓度的提高, 改变了旋流器分级效果, 旋流器溢流流量也出现下降, 这时需要少量提高渣浆泵频率, 达到新的稳态。

分别选取人工控制和自动控制两周样本数据统计分析, 图 7(a) 为人工控制时旋流器溢流流量分布直方图, 时间轴为 2022 年 6 月 11 日至 6 月 25 日, 图 7(b) 为自动控制系统连续投用时, 自动控制时旋

流器溢流流量分布直方图, 时间轴为 2022 年 7 月 11 日至 7 月 25 日。

从图 7 中可以看出, 人工控制旋流器溢流流量分布范围为 1 200~1 310 m<sup>3</sup>/h, 自动控制溢流流量分布范围为 1 200~1 290 m<sup>3</sup>/h, 自动控制下溢流流量分布更加紧密。通过对近 250 000 个数据进行分析计算, 人工控制下, 溢流流量平均值为 1 254 m<sup>3</sup>/h, 标准差为 34.45; 自动控制下, 溢流流量平均值为 1 242 m<sup>3</sup>/h, 标准差为 17.56。以标准差为稳定性评价指标, 稳定性提高约 49%。

#### 4 结语

本文从水力旋流器工作原理出发, 结合现场实际生产数据进行分析, 设计一套水力旋流器控制策

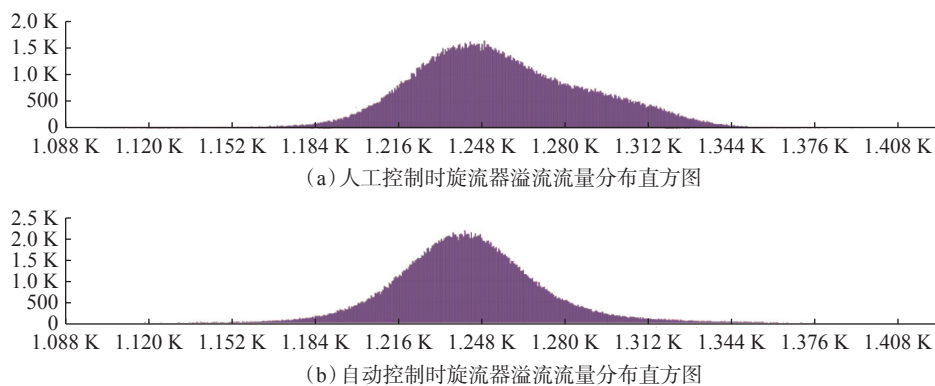


图 7 水力旋流器控制效果分析

Fig. 7 Analysis of hydrocyclone control effect

略,在旋流器分级机理的基础上,根据泵池液位、分级压力、给矿流量、溢流粒度和浓度状态综合调整渣浆泵的频率和进料浓度,实现旋流器分级控制。通过现场应用分析,水力旋流器自动控制有效改善了溢流流量等参数的稳定性。

#### 参考文献(References):

- [1] 魏转花,岳涛,黄雄,等.西藏某低品位含金复杂难选铜矿选矿工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2023(3):116-121.  
WEI Zhuanhua, YUE Tao, HUANG Xiong, et al. Study on mineral processing technology of a low-grade complex refractory gold-bearing copper ore in Tibet[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(3): 116-121.
- [2] WILLIAMS R A. Particle classification[J]. *Minerals Engineering*, 1993, 6(7): 803-804.
- [3] 李仕亮.碎磨新设备在选厂设计中应用的进展[J].矿冶,2020,29(1):82-85.  
LI Shiliang. Progress in application of new comminution equipment in concentrator design[J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29(1): 82-85.
- [4] 李枫,赵嵘广,邢雷,等.水力旋流器内固相颗粒运动行为分析[J].化学工程,2023,51(7):55-60.  
LI Feng, ZHAO Rongguang, XING Lei, et al. Analysis of solid particle's migration in hydrocyclone[J]. *Chemical Engineering*, 2023, 51(7): 55-60.
- [5] 杨佳伟,王庆凯,邹国斌.磨矿分级过程优化控制技术研究与应用[J].有色金属(选矿部分),2021(4):124-131.  
YANG Jiawei, WANG Qingkai, ZOU Guobin. Research and application of optimization control technology for grinding and classification process[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(4): 124-131.
- [6] 侯天瑞,魏德洲,张朔,等.窄粒级给矿条件下水力旋流器结构优化[J].矿冶,2022,31(3):126-131.  
HOU Tianrui, WEI Dezhou, ZHANG Shuo, et al. Structural optimization of hydrocyclones with narrow feed size[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(3): 126-131.
- [7] NAPIER-MUNN T J, MORRELL S, MORRISON R D, et al. Mineral comminution circuits their operation and optimisation[M]. Queensland: The University of Queensland, 1996.
- [8] 姜志华.智能旋流器的设计与现场应用[J].现代矿业,2023,39(6):24-26,38.  
JIANG Zhihua. Design and field application of intelligent cyclone[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(6): 24-26, 38.
- [9] 马莹,李志宏.选矿渣浆泵池液位智能模糊控制设计及应用[J].自动化技术与应用,2021,40(6):15-18.  
MA Ying, LI Zhihong. Design and application of intelligent fuzzy control for liquid level of mineral processing slurry pump pool[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2021, 40(6): 15-18.