

双涡耦合 - 导向平底旋流器在锡矿分选中的应用

丛龙斐¹, 王霄鹏¹, 周长春², 尹红兵³

(1. 威海尚品机械设备科技有限公司, 山东 威海 264200; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 3. 云南锡业股份有限公司, 云南 个旧 661000)

摘要: 为了提高云南锡业集团某分公司选厂 2000 t/d 系统一段磨矿分级效率, 对传统旋流器进料体和锥角进行优化与改造。通过单因素(压力、柱段长度、角锥比)试验并利用 Fluent 进行流体模拟, 深层次理解改造后旋流器内部流场的优化。试验结果表明: 旋流器内部分级力场得到明显改进, SSmax 500/GT-P 旋流器分级效率高出传统 Smax 500/GT-E 型旋流器 5% 左右, 磨矿循环负荷降低 150% 左右, 并且旋流器主体使用寿命增加 10% 左右。

关键词: 旋流器; 锡矿; CFD; 分离

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.02.032

中图分类号: TD926 文献标识码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 02-0177-05

水力旋流器目前主要应用在非均质固相的分离, 作用是将物料中粗细颗粒进行分离, 或者对料浆进行浓缩^[1-2]。刘培坤等^[3]对旋流器锥体结构的研究表明抛物线锥体结构旋流器的溢流浓度高, 分级精度高; 崔宝玉等^[4]通过 CFD 模拟研究了旋流器内空气柱的形成过程、空气柱特征等与物理试验高度吻合, 表明采用 CFD 对旋流器分级机理进行研究是可靠的; 张丹等^[5]通过 PIV 与 CFD 结合研究表明随旋流器锥角变小对柱段内轴向和切向速度的影响较小, 而锥段内旋流器和外旋流速度则显著增大, 对小颗粒的分级有促进作用。

在云南锡业集团某分公司选矿过程中应用旋流器作为主要分级设备与磨机构成闭路磨矿系统, 保证浮选等环节的入料粒度。但是因锡矿密度较大, 系统中等沉颗粒含量较高, 旋流器沉砂夹细量大、分级效率低^[6-7], 进而导致系统内循环量增加,

磨机处理量受到限制^[6-8]。

根据现场使用情况设计采用双涡耦合 - 导向进料体与平底筒体结合的新型旋流器, 替代原有锥形旋流器, 改善旋流器分级效果。

1 试验样品及研究方法

1.1 样品性质

样品采自旋流器给矿端, 样品经过混样、缩分后测试细度与浓度。测试结果见表 1。

表 1 样品性质
Table 1 Nature of samples

采样位置	矿物种类	给矿质量浓度	给矿细度	要求溢流细度
旋流器给矿端	锡矿原矿	70% ± 2%	-0.074 mm 25% ~ 28%	-0.074 mm ≥ 50%

1.2 研究方法

试验在选厂 2000 t/d 系统进行, 试验结果通过筛分试验进行测试与分析。该系统工艺采用两

收稿日期: 2018-11-29; 改回日期: 2018-12-28
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2017XKQY036)
作者简介: 丛龙斐 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事微细粒矿物分选研究以及旋流分离技术研发。

段闭路磨矿，一段使用 SSmax 500/GT-P 和 Smax 500/GT-E 两种型号旋流器（见图 1）与 MQY 3245 球磨机构成闭路磨矿。改造后采用 SSmax500/GT-P 改进型旋流器，由双涡耦合 - 导向进料体（进料体见图 2）与 180° 平底柱段构成，以下简称 A 型。该进料体特点是双圆周曲线流道结合下旋导向结构可引导矿浆在旋流柱体外旋转一周预先分级，矿浆内颗粒以有序状态进入旋流柱体内；原有工艺中采用 Smax 500/GT-E 传统型旋流器由导向螺旋线进料体（进料体见图 3）与柱段 +20° 锥段构成，以下简称 B 型。相比传统型旋流器，改进型旋流器去掉传统旋流器锥段结构并加长柱段，使用双涡耦合 - 导向进料体替换原有螺旋线进料体。二段磨矿使用 Smax350/GT-E 与 MQY3245 球磨机构成闭路是典型一段检查分级二段预先检查分级工艺。

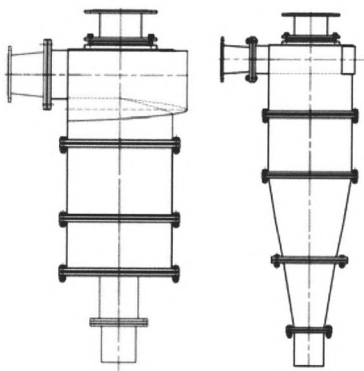


图 1 SSmax500/GT-P(左)和 Smax500/GT-E(右)
Fig. 1 Schematic diagram of SSmax500/ GT-P(left) and Smax500/ GT-E (right)

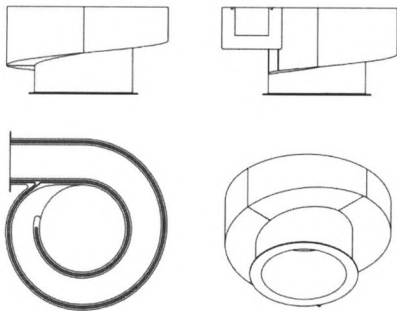


图 2 双涡耦合 - 导向进料体三视
Fig. 2 Three views of dual vortex coupling - guided feed body

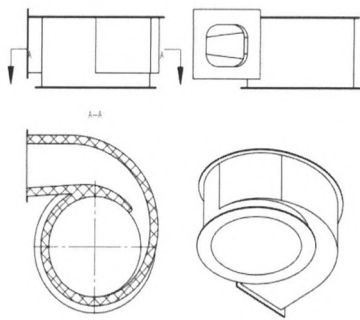


图 3 导向螺旋形进料体三视
Fig. 3 Three views of the guide screw feed body

试验结果分析中涉及旋流器分级质效率计算

公式为：

$$E = \frac{(\alpha - \theta) \times (\beta - \alpha)}{\beta \times (\beta - \theta) \times (100 - \alpha)} \times 100\%$$

α ——给矿中 -0.074mm 含量，%
 β ——溢流中 -0.074mm 含量，%
 θ ——沉砂中 -0.074mm 含量，%

2 试验结果与讨论

2.1 压力 (P) 单因素试验

试验时系统处理量维持在 75 t/h，溢流管直径 180 mm (0.36D，D 表示旋流器直径，下同)，底流口直径 120 mm (ds/do=0.66)，溢流管插入深度 371 mm (0.742D)，A 型旋流器柱段长度 1100 mm (2.20D) 分别在 0.06 Mpa、0.08 Mpa、0.1 Mpa、0.12 Mpa 压力条件下运行 A 与 B 两种型号旋流器，试验结果见图 4。

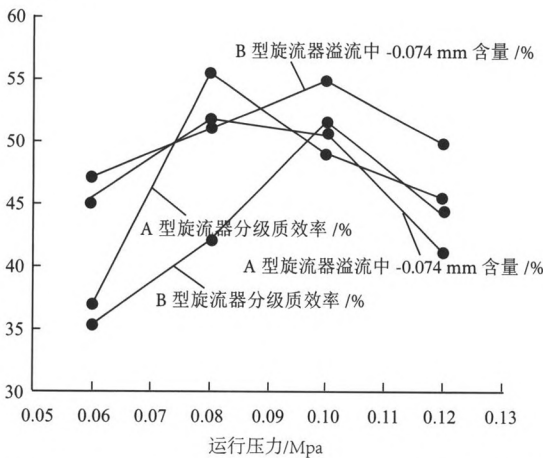


图 4 分级质效率和溢流中 -0.074 mm 含量随着压力 P 变化趋势
Fig. 4 Variation trend of mass efficiency and overflow -0.074 mm content with pressure (P)

见图 4 所示，A 型旋流器分级质效率随着运行压力的增加逐渐升高，在 0.08 Mpa 时达到最大值 56%，最后逐渐下降至 45.33%。B 型旋流器在运行压力 0.10 Mpa 时质效率达到最大值 51.71%。A 和 B 型旋流器溢流 -0.074 mm 含量均随着运行压力的升高先增加后降低，但是 B 型旋流器溢流细度整体优于 A 型旋流器。试验表明：A 型旋流器可在低运行压力条件下达到较佳分级效果，即 A 型旋流器运行能耗低。

2.2 柱段长度 (H) 单因素试验

A 型旋流器由双涡耦合 - 导向进料体与 180° 平底柱段构成，旋流器柱段长度决定颗粒在旋流器内停留时间和分级时间，从而成为影响旋流器分级效果和效率的重要因素。A 型旋流器柱段长度单因素试验，系统台时量维持在 75 t/h，溢流管直径 180 mm (0.36D)，底流口直径 120 mm (ds/do=0.66)，溢流管插入深度 371 mm (0.742D)，运行压力 0.08 Mpa，柱段长度分别在 900 mm (1.80D)、1000 mm (2.00D)、1100 mm (2.20D)、1200 mm (2.40D) 时运行 A 型号旋流器，试验结果见图 5。

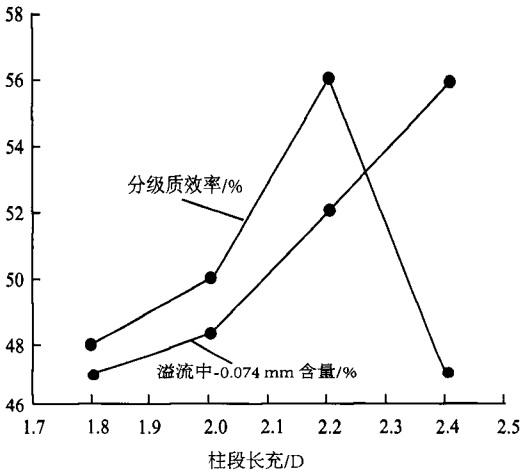


图 5 质效率和溢流中 -0.074 mm 含量随着柱段长度 H 变化趋势

Fig. 5 Variation trend of mass efficiency and overflow -0.074 mm content with column length (H)

见图 5 所示，A 型旋流器分级质效率随着柱段长度 H 的增加先升高再降低，在 H=2.20D 时达

到最大值 56.00%，随后逐渐下降至 47.00%。A 型旋流器溢流 -0.074 mm 含量均随着柱段长度 H 的增加逐渐增大至 56.00%，整体在 $H \geq 2.20D$ 时均能满足现场生产对一段分级细度的要求。

2.3 角锥比 (ds/do) 单因素试验

旋流器角锥比是沉砂口直径与溢流口直径的比值 (ds/do)，其决定了旋流器溢流和沉砂的分配比例，从而影响到旋流器的分级效果和分级效率。A 型旋流器柱段长度单因素试验，系统台时量维持在 75 t/h，柱段长度 1100 mm (2.20D)，溢流管插入深度 371 mm (0.742D)，运行压力 0.08 Mpa，溢流管直径 180 mm (0.36D)，底流口直径 80 mm (ds/do=0.44)、100 mm (ds/do=0.55)、120 mm (ds/do=0.66)、140 mm (ds/do=0.77) 时运行 A 型号旋流器，试验果见图 6。

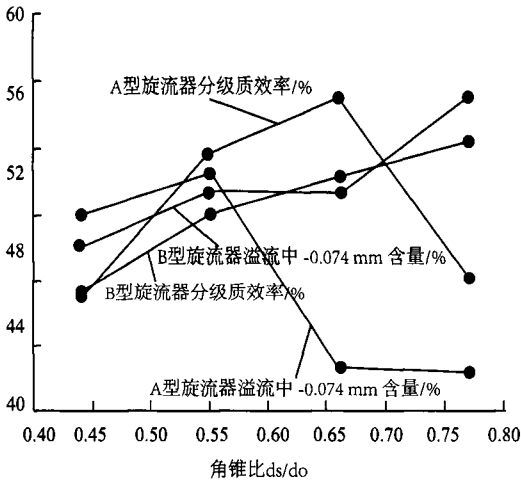


图 6 质效率和溢流中 -0.074 mm 含量随着角锥比 ds/do 变化趋势

Fig. 6 Variation trend of mass efficiency and overflow -0.074mm content with Angle - cone ratio (ds/do)

由图 6 曲线可知，A 型旋流器分级质效率随着角锥比 (ds/do) 的改变整体高于 B 型旋流器，A 型旋流器在 ds/do=0.66 时达到最大值 56.00%，此时 B 型旋流器为 42.33%。B 型旋流器在 ds/do=0.44 时达到最大值 52.45%。A 型旋流器相比 B 型可以在较大 ds/do 下达到最高分级效率，因此相同工况条件下 A 型旋流器易损件使用寿命增长 10%，见表 2。

表 2 旋流器沉砂口使用寿命统计

Table 2 Service life statistics of the sedimentation port of cyclone

名称	A 型	B 型
沉砂口使用寿命	5000 h	4500 h

注：寿命统计时间 2016 年 12 月 -2017 年 9 月，两台旋流器运行工况基本相同。

2.4 SSmax500/GT-P 型旋流器内部流体 CFD 模拟

为了更深层次的理解 A 型旋流器分级效率提高和磨损降低的原理，使用 SolidWorks 建立旋流器三维模型与模拟软件（ANSYS）结合对 A 型旋流器内部流场进行计算流体力学（CFD）模拟。使用 ANSYS 软件包内 Meshing 模块进行模型网格划分，旋流器内部流场属于典型的各相异性湍流，并且是高速旋转的准自由涡^[9]，Fluent 流体模拟条件采用 RSM 雷诺应力湍流模型；在仅考虑固液两相时，确定固相占 15%，选择 Mixture 模型，预测旋转流动采用 QUICK 离散格式，速度场和压力场的耦合采用 SIMPLE 算法来实现。根据旋流器实际工作状态设定边界条件：旋流器壁面为非滑移，近壁处速度为 0 m/s，且与周边没有能力和物质交换。同时，进口为速度进口，溢流口和沉沙口为压力出口，进口为恒定流速 10m/s，溢流口和沉砂口输出压力为大气压^[10]。模拟结果见图 7。

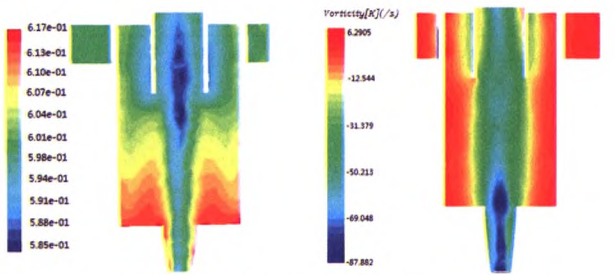


图 7 A 型旋流器内部流体浓密相（左）及流体速度（右）分析
Fig. 7 flow density phase (left) and flow velocity (right) analysis of type A cyclone

根据图 7（左）旋流器内 CFD 浓密相模拟结果表明：双涡耦合 - 导向进料体与平底筒体结合使物料预先分级，颗粒有序进入旋流器内并形成高浓度梯度流化床层，细颗粒分级后不易透过高浓度梯度流化床层而进入内旋流，而 B 型传统旋流

器不会形成高浓度梯度流化床层^[10]。

相比 B 型旋流器沉砂口切向速度^[9-10]，A 型旋流器沉砂口部位切向速度较大（图七右），使得细颗粒再次分级；B 型旋流器锥形体具有一定浓缩作用，旋流体内纵向力较大，使部分细颗粒物料进入沉砂，降低了旋流器分级效率。

3 结 论

（1）在锡矿一段磨矿分级流程中 A 型旋流器分级效率高于 B 型 5% 左右，主要原因是 A 型旋流器采用双涡耦合 - 导向进料体可使料浆于体外引导分级，并且内部可形成高浓度梯度流化床，分级性能优于 B 型。

（2）A 型旋流器达到较佳运行工况时运行压力低于 B 型旋流器，角锥比（ds/do）大，因此 A 型旋流器易损件使用寿命比 B 型旋流器长 10% 左右。

（3）针对云锡集团某选厂 A 型旋流器在 0.08 Mpa、溢流管直径 180 mm（0.36D）、底流口直径 120mm（ds/do=0.66）、溢流管插入深度 371mm（0.742D）时，分级质效率为 56%，运行能耗较低。

参考文献：

[1] 何庆浪，盛红光. 大山选矿厂 KrebsGmax 水力旋流器的应用研究 [J]. 矿产保护与利用 .2007 (5):35-37.
He Qinglang, Sheng Hongguang. Application of KrebsGmax Hydrocyclone in Dashan Concentrator [J]. Mineral Protection and Utilization, 2007 (5) : 35-37.
[2] 刘晋伟. 新型水力分级旋流器的结构设计与原理分析 [J]. 煤矿现代化, 2018, (1): 29-31.
Liu Jinwei. Structural Design and Principle Analysis of a New Type Hydro-graded Cyclone [J]. Coal Mine Modernization, 2018 (1) : 29-31.
[3] 刘培坤，姜兰越，杨兴华，等. 抛物线型旋流器分离特性的数值模拟和试验研究 [J]. 流体机械, 2015 (10):1-6.
Liu Peikun, Jiang Lanyue, Yang Xinghua, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Separation Characteristics of Parabolic Cyclone [J]. Fluid machinery, 2015 (10) : 1-6.

- [4] 崔宝玉, 魏德洲, 高淑玲. 等. 带空气柱的旋流器内流场的数值和试验研究 [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China. 2014, (24) 2642-2649.
- Cui Baoyu, Wei Dezhou, Gao Shuling, et al. Numerical and Experimental Study of Flow Field in Cyclone with Air Column [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China. 2014, (24) 2642 - 2649.
- [5] 张丹, 陈晔. 锥角对固 - 液水力旋流器流场及其分离性能的影响 [J]. 流体机械, 2009 (8):11-16.
- Zhang Dan, Chen Ye. Influence of Cone Angle on Flow Field and Separation Performance of Solid-liquid Hydrocyclone [J]. Fluid Machinery. 2009 (8) : 11-16.
- [6] 戚厚永. 大峪口磷选矿厂磨矿分级流程的评述 [J]. 矿产保护与利用, 2003 (4):29-31.
- Qi Houyong. Review of Grinding Classification Process in Dayyukou Phosphorus Concentrator [J]. Mineral Protection and Utilization, 2003 (4) : 29-31.
- [7] 明平田, 邢晴晴, 洪秋阳. 某低品位难选金矿选矿厂流程考察及诊断 [J]. 矿产综合利用, 2018 (1):128-132.
- Ming Pingtian, xing Qingqing, Hong Qiuyang. Process Investigation and Diagnosis of a Concentrant of a Low-grade Refractory Gold Ore [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2018 (1) : 128-132.
- [8] 张龙义, 罗平, 吴永生, 等. FX 型平底旋流器应用实践 [J]. 矿业工程, 2018 (2):40-42.
- Zhang Longyi, Luo Ping, Wu Yongsheng, et al. Application Practice of FX Flat Bottom Cyclone [J]. Mining Engineering, 2018 (2) : 40-42.
- [9] 任连城, 梁政, 钟功祥, 等. 基于 CFD 的水力旋流器流场模拟研究 [J]. 石油机械, 2005 (11):15-17.
- Ren Liancheng, Liang Zheng, Zhong Gongxiang, et al. Flow field Simulation of Hydrocyclone Based on CFD [J]. Petroleum Machinery, 2005 (11) : 15-17.
- [10] 崔宝玉. 水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究 [D]. 沈阳: 东北大学. 2014.
- Cui Baoyu. Numerical Experimental Study on Flow Field and Separation Process of Hydrocyclone [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.

Dual Vortex Coupling - Guide Flat-Bottom Cyclone Application in Tin Ore Separation

Cong Longfei¹, Wang Xiaopeng¹, Zhou Changchun², Yin Hongbing³

(1 Weihai Shangpin mechanical equipment technology Co. Ltd, Weihai , Shandong, China; 2 School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, China; 3YunnanTinCo., Ltd., Gejiu, Yunnan, China)

Abstract: In order to improve the classification efficiency of 2000 t system in YunnanTin Co. Ltd plant, the feed body and the cylinder body of the traditional cyclone were optimized and reformed. The single-factor (pressure, column length and angular cone ratio) test was conducted. Besides, Fluent simulation was used to understand the optimization of flow field in a deep level. The test results show that internal classification field of optimized hydrocyclone is obviously improved. The SSmax 500/GT-P cyclone classification efficiency higher 5% than traditional Smax 500/GT-E type cyclone. Grinding cycle is about 150% lower. The service life of the cyclone increased by 10%

Keywords: Hydrocyclone; Tin; CFD; Separation