

文章编号: 1004- 0609(1999)03- 0596- 05

# 异形水力旋流器的松散机理与分级特性<sup>①</sup>

韦鲁滨<sup>1,2</sup> 赵海<sup>1</sup> 杨小生<sup>1</sup> 黄彦华<sup>1</sup> 赵跃民<sup>2</sup>

(1. 中南工业大学 矿物工程系, 长沙 410083; 2. 中国矿业大学 能源利用和化学工程系, 徐州 221008)

**摘要:** 对异形水力旋流器分级特性进行了理论分析和实验研究。异形水力旋流器分级效果与工艺参数的关系总体趋势上与常规水力旋流器相同, 但在量值上存在一定差异。由于颗粒在异形水力旋流器内的回转曲率半径沿轨迹发生变化, 造成了颗粒沿旋流器径向振荡, 有利于细粒析出, 在预分级段利用异形旋流器的物料松散功能, 可获得良好的分级效果。

**关键词:** 水力旋流器; 颗粒分级; 物料分离机理

**中图分类号:** TD 454

**文献标识码:** A

水力旋流器由于结构简单、便于制作安装、易于操作等特点, 被广泛用于金属和非金属矿山及石油、化工等工业部门的物料分级和选别。当前, 水力旋流器的一个主要研究方向是从流体的宏观和微观结构来定量描述各相的相互作用和运动规律, 考察各类参数对分级效果的影响, 为水力旋流器的应用和改进提供理论依据<sup>[1~3]</sup>。

常规水力旋流器难以获得精确分级的主要原因在于短路流引起的粗粒夹带和底流引起的细粒夹带<sup>[4]</sup>。关于粗粒夹带, 研究者提出了不少改进措施<sup>[5~7]</sup>; 对于细粒夹带, 一般被认为是水力旋流器的固有缺陷而研究不多。本文作者设计了一种新颖的异形水力旋流器(也称变径旋流器), 取得了良好的分级效果<sup>[8]</sup>, 并针对异形旋流器的分级特性进行理论分析和实验研究, 以求拓宽该设备的适用范围和提供进一步的改进措施。

## 1 实验装置及实验方法

异形水力旋流器在总体结构上与常规水力

旋流器相似, 其上部的柱体、下部的锥体以及沉砂口、溢流口、给料口的设置也与常规水力旋流器无异。所谓异形水力旋流器是指旋流器的横截面形状不是常规的圆形, 其上部柱段的典型截面形状如图1所示, 外轮廓由两个半径不等的圆及两圆公切线构成。

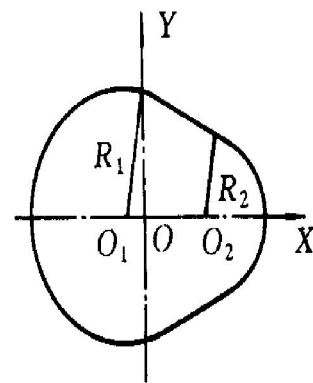


图1 异型旋流器横截面

Fig. 1 Cross section of abnormal hydrocyclone

异形旋流器实验系统如图2所示, 所采用的异形旋流器上部柱段的截面积等于规格为75 mm的常规旋流器相应的截面面积。

分级物料为纯石英矿粉, 密度为  $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 粒度组成如表1。

由于异形旋流器是一种新型设备, 缺乏相

① 国家自然科学基金资助项目 59774009, 煤炭科学基金资助项目 96- 10103 和江苏省青年科技基金资助项目 BQ96001

收稿日期: 1998- 08- 30; 修回日期: 1998- 10- 30 韦鲁滨(1962- ), 男, 副教授, 博士后

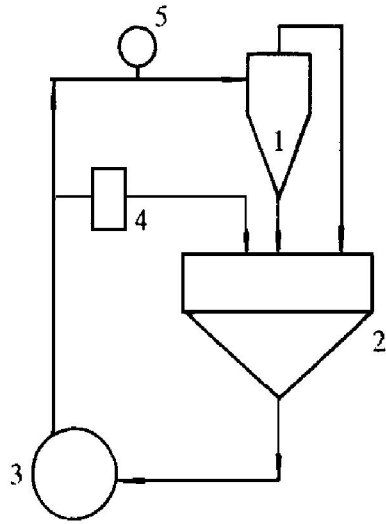


图2 实验装置图

Fig. 2 Test equipment

1—Hydrocyclone; 2—Container;

3—Pump; 4—Valve; 5—Pressure gauge

应资料, 为对其有较全面的认识, 对表2中所列的因素和水平进行了完全正交试验。

表1 分级物料的粒度组成

Table 1 Particle size of classified material

Size/ $\mu\text{m}$	Content/%
> 75	12.2
37~ 75	53.2
> 19~ 37	21.9
> 10~ 19	5.6
< 10	7.1

表2 完全正交试验因素水平表

Table 2 Level of test factors(mm)

Level	Diameter of vortex finder	Depth of vortex finder	Diameter of apex finder
1	25	70	10
2	21	60	8
3	17	50	6

实验时, 将石英粉按一定比例配水后倒入接料斗中, 启动砂泵, 待物料充分混匀且压力稳定后开始采样。采得的底流和溢流分别用淘析法进行粒度分析, 并将分析结果绘制成分配曲线。由于异形水力旋流器的分级特性与常规

旋流器有所不同, 现有的旋流器分配曲线校正公式则不一定适合于异形旋流器的分配曲线分布, 因此没有对分配曲线进行校正。本文中的分级可能偏差值及分配粒度  $d_{50}$  均由原始数据绘制的分配曲线求得。

## 2 异形旋流器的松散机理

根据水的不可压缩性及矿浆进入旋流器后将沿器壁做旋回运动, 并为便于讨论, 在同一平面轨道上, 做以下假设:

(1) 流体和粒子沿回旋轨道的切向速度大小不变, 只是方向改变, 其值为  $U_{f\alpha}$ ,  $\alpha$  表示切向。

(2) 流体沿回旋轨道法线方向的速度只是方向改变, 速率大小不变, 其值为  $U_{fn}$ ,  $n$  表示法向。

按图1所示异形旋流器的横截面形状, 根据曲率半径公式  $\rho = (1 + y'^2)^{3/2} |y''|^{-1}$ , 得到沿轨道各点曲率半径:

$$\rho = \begin{cases} R_1, & -a - R_1 < x < -a + \\ & R_1(R_1 - R_2)/(2a); \\ + \infty, & -a + R_1(R_1 - R_2)/ \\ & (2a) \leq x \leq a + R_2(R_1 - R_2)/(2a); \\ R_2, & a + R_2(R_1 - R_2)/(2a) < \\ & x < a + R_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $a$  为图1中两圆心  $O_1, O_2$  间的距离。

颗粒沿轨道的运动方程为:

$$F_b + F_d - F_c = \frac{1}{6} \pi \cdot \rho_s \cdot d^3 \frac{dU_{sn}}{dt} \quad (2)$$

式中  $F_b$  为有效浮力、由流体压力分布引起,  $F_d$  为流体曳力,  $F_c$  为离心力,  $U_{sn}$  为颗粒的法向加速度(向内为正);  $\rho_s$  为颗粒密度。

其中,  $F_d = \frac{\pi}{8} \cdot C \cdot d^2 \frac{U_{rn}^2}{\rho}$ , 这里,  $C$  为曳力系数;  $U_{rn}$  为颗粒与水流沿轨道法线方向相对速度,  $U_{rn} = U_{sn} - U_{fn}$ ;  $F_c = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_s \cdot d^3 \frac{U_{f\alpha}^2}{\rho}$ ;

$F_b = \frac{\pi}{6} \cdot \vartheta \cdot d^3 \cdot \frac{U_{fa}^2}{\rho}$ , 故式(2)可变为

$$\rho_s \frac{dU_{sn}}{dt} = \frac{3C}{4d} U_{rn}^2 \cdot \vartheta \cdot \frac{U_{fa}^2}{\rho} (\rho_s - \vartheta) \quad (3)$$

当颗粒法向加速度为0时, 即  $dU_{sn}/dt = 0$ , 得

$$\rho_0 = \frac{4d}{3C} \cdot \frac{\rho_s - \vartheta}{\vartheta} \cdot \frac{U_{fa}}{U_{rn}^2}, \quad (4)$$

这里  $U_{rn}$  为颗粒的径向终端速度。将式(3)与式(4)合并, 整理得

$$\frac{\rho_s \cdot \rho_0}{(\rho_s - \vartheta) U_{fa}^2} \cdot \frac{dU_{sn}}{dt} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$$

由式(4)知  $\rho_0$  是颗粒在法向受力平衡时的轨道曲率半径, 且

$$R_2 < \rho_0 < +\infty$$

当  $\rho > \rho_0$  时,  $dU_{sn}/dt > 0$ , 即颗粒法向加速度为正, 颗粒有进入内层轨道的趋势。

当  $\rho < \rho_0$  时,  $dU_{sn}/dt < 0$ , 即颗粒法向加速度为负, 颗粒有进入外层轨道的趋势。

上述分析表明, 在异型旋流器内, 颗粒的回转半径在粒子环绕一周时, 总是在  $R_2 \sim +\infty$  中变化。因此对同一颗粒, 在沿流线运动时, 时而有向内的加速度, 时而有向外的加速度, 从而整个粒群在这种振荡运动中得到了松散。

### 3 实验结果及讨论

通过方差分析发现底流口直径对分级粒度  $d_{50}$  的影响最大。图3为分级粒度  $d_{50}$  与底流口直径的关系曲线。由图3可见, 随着底流口直径的增大, 分级粒度减小, 这与我们通常对旋流器的认识<sup>[9]</sup>相符合。此外, 角锥比对分级粒度  $d_{50}$  也有一定的影响。实验表明: 其它条件不变时, 分级粒度  $d_{50}$  随着角锥比的增大而增大, 这也与常规旋流器的结论相同<sup>[9]</sup>。

底流口直径和溢流管直径对底流浓度都有较大影响。图4所示的是底流口直径与底流浓度的关系。由图4看出, 随着底流口直径的增大, 底流浓度减小。图5所示的是溢流管直径与底流浓度的关系。由图5可知, 随着溢流管直径的增大, 底流浓度开始时增大, 增大到一

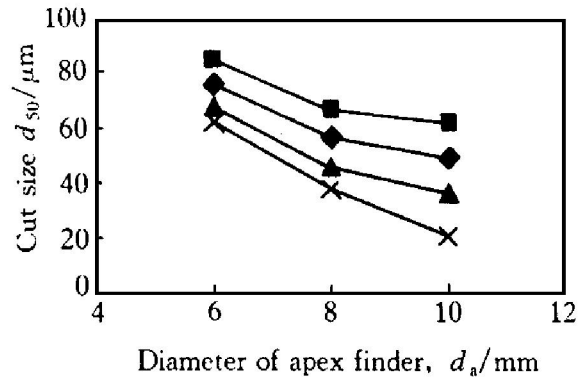


图3 底流口直径与分级粒度的关系

Fig. 3 Relation between apex finder and cut size  $d_{50}$

- $-d_v$  (Diameter of vortex finder) = 21 mm;  $H$  (Depth of vortex finder) = 70 mm;
- ◆  $-d_v = 25$  mm;  $H = 50$  mm;
- ▲  $-d_v = 21$  mm;  $H = 50$  mm;
- ×  $-d_v = 17$  mm;  $H = 70$  mm

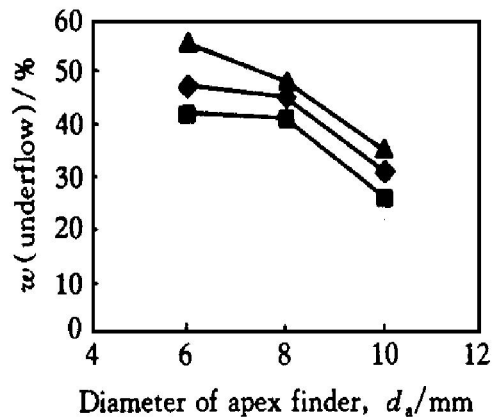


图4 底流口直径与底流浓度的关系

Fig. 4 Relation between diameter of apex finder and mass concentration of underflow

- $-d_v = 17$  mm;  $H = 70$  mm;
- ◆  $-d_v = 25$  mm;  $H = 60$  mm;
- ▲  $-d_v = 21$  mm;  $H = 60$  mm

定程度时减小。

溢流管的插入深度同样对底流浓度有较大影响, 图6为溢流管插入深度与底流浓度的关系曲线。由图6可知, 随着溢流管插入深度的增大, 底流浓度开始时增大, 然后又减小。

结合分级粒度和底流质量浓度的讨论可知, 底流口直径对分级粒度和底流质量浓度都具有较大影响。在规定的分级粒度下, 底流口直径变化受到限制, 要想获得较高的底流质量

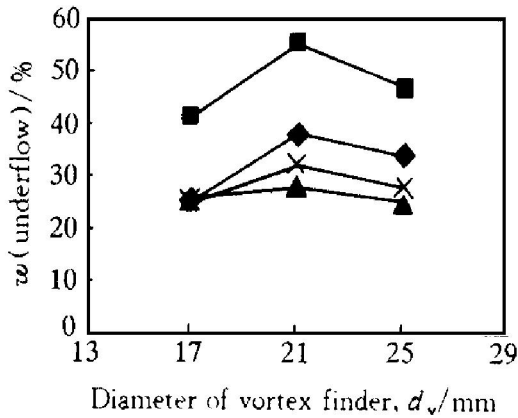


图5 溢流管直径与底流浓度的关系

Fig. 5 Relation between diameter of vortex finder and mass concentration of underflow

- $-H = 60$  mm,  $d_a = 6$  mm;
- ◆  $-H = 60$  mm,  $d_a = 8$  mm;
- ▲  $-H = 50$  mm,  $d_a = 10$  mm;
- ×  $-H = 50$  mm,  $d_a = 8$  mm

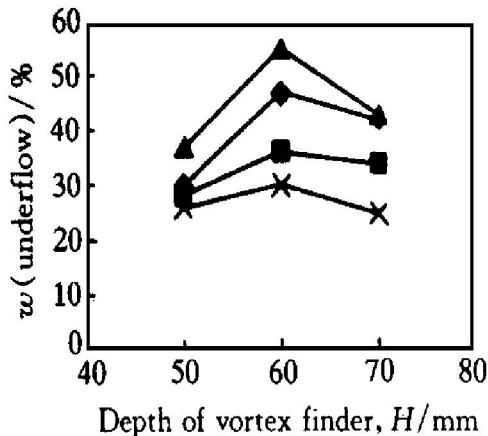


图6 溢流管插入深度与底流浓度的关系

Fig. 6 Relation between depth of vortex finder and mass concentration of underflow

- $-d_v = 21$  mm,  $d_a = 10$  mm;
- ◆  $-d_v = 80$  mm,  $d_a = 6$  mm;
- ▲  $-d_v = 21$  mm,  $d_a = 6$  mm;
- ×  $-d_v = 21$  mm,  $d_a = 6$  mm

浓度, 则选择适当的溢流管直径及插入深度成为关键。溢流管插入太深或太浅, 都难于获得较高的底流质量浓度。所以从浓缩的角度看, 要想获得最大的底流质量浓度, 需要寻找最佳的溢流管直径和插入深度。

利用异形旋流器对较细物料进行分级实验, 发现异形旋流器的分级效果不仅没有改善, 反而有些变差。推动物料颗粒在旋流器中

分级的主要原因是粒子受到的离心力和流体曳力。离心力的作用使得比水重的固体粒子有向旋流器边壁运动的趋势, 旋流器向心的径向水流又有使粒子向中心运动的趋势。粒度较大的粒子由于比表面积小, 受到的离心力大, 曳力较小, 从而有聚集在旋流器边壁并从底流口排出的趋势; 粒度较小的粒子由于比表面积大, 受到的离心力小, 曳力较大, 从而有趋向中心空气柱排出的趋势。在分级较粗物料时, 一定回转速度下粒子受到的离心力足够大, 提高分级效率的关键是如何避免固体粒子在旋流器上过早压实, 造成细颗粒难以析出, 因此应设法使床层形成一定程度的松散; 在分级较细物料时, 这种异形旋流器的固有缺陷就显示出来了。从图1中可以看出, 异形旋流器沿整个轴线的横剖面均为不规则的凸轮形。被分级物料在预选段(直柱段)得到一定程度的松散和分层, 而在分离排料段(锥段), 仍然不断受到松散和分层两个相反方向的作用。这一方面会造成已分层的物料受到松散的作用而发生粗粒的错配和溢流的短路; 另一方面, 整个矿浆沿非圆轨道回转时, 在凸轮小圆上受到的离心力最大, 而在凸轮直线段上不受离心力作用, 所受离心力的变化造成了旋流器内矿浆轴向速度不对称。直线段的轴向速度较大, 而两个凸轮端的轴向速度较小, 造成底流口附近水量在直线段的流量异常增大。即使整体底流质量浓度并不比常规旋流器有明显降低, 但两直线侧附近的质量浓度却下降很多, 造成了细粒物料的“底流短路”。

为了克服异形旋流器的缺陷, 在旋流器预选空间应有一定程度的松散作用而在分离排料段应维持粒子已有的分层这一指导思想下, 我们对原有的异形旋流器设计进行了改进, 如图7。上部预选段采用对称的异形设计, 由两个等径半圆及两圆的公切线组成, 下部的分离段是与常规旋流器相同的倒圆锥, 中间有一过渡段。

初步实验表明, 这种改进的异形旋流器与原异形旋流器相比, 分级效率有所提高。目前

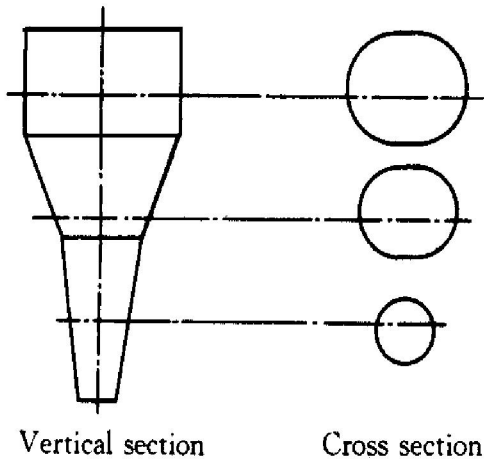


图7 改进的异形旋流器

Fig. 7 Improved abnormal hydrocyclone

正在做进一步的研究。

REFERENCES

1 Xu Jirun(徐继润) and Lu Qian(罗茜). The Chinese Jour-

nal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(3): 487.  
 2 Song Zhendong(宋振东). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(3): 492.  
 3 Zhang Pengfei(张鹏飞), Xu Demin(许德民) and Huang Shu(黄枢). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(3): 45.  
 4 Milin L, Hsieh K T and Rahamani R R. Minerals Engineering, 1992, 5: 779~ 794.  
 5 Kelsall D F. Trans Int Chem Engrs. 1952, 30: 78.  
 6 Van Duijn. Chem Eng Sci, 1983, 38: 651.  
 7 Rajamani K. Particulate Sci Tech, 1987, (5): 83.  
 8 Huang Yanhua(黄彦华) and Xu Jianben(徐建本). Mechanism of Mineral Processing(选矿机械), 1995, (1): 22~ 25.  
 9 Zhang Maojun(张卯均), Wang Lan(王岚), Wang Yongde(王永德) et al. Handbook of Mineral Processing(选矿手册). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 64~ 67.

**Looseness mechanism and classification characteristics of an abnormal hydrocyclone**

Wei Lubing<sup>1,2</sup>, Zhao Hai<sup>1</sup>, Yang Xiaosheng<sup>1</sup>, Huang Yanhua<sup>1</sup> and Zhao Yuemin<sup>2</sup>

1. Department of Mineral Processing Engineering,  
 Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

2. Department of Energy Utilization and Chemical Engineering,  
 China University of Mining Technology, Xuzhou 221008, P. R. China

**Abstract:** Theoretical analysis and experimental research about a new type hydrocyclone of abnormal structure were carried out. Its classification performance and technical parameters are the same as the normal one in collectivity trend, but different in quantity. The radial oscillation of the particles, as the result of particles changing gyration curvature radii along their tracks in hydrocyclone, is propitious to the thin particles to be separated out. It was showed that sufficient loosening of particles within the preseparation space of the abnormal structure hydrocyclone can make high classification efficiency.

**Key words:** hydrocyclones; particle size classification; material separation mechanism

(编辑 吴家泉)