

# 中心锥结构对水力旋流器内流场 及分离效率影响的研究\*

周嘉钰<sup>1,2</sup>, 鄢曙光<sup>1,2</sup>, 熊攀<sup>1,2</sup>, 刘玮寅<sup>1,2</sup>, 鲁聪<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**使用计算流体力学软件 FLUENT15.0 对中心锥上锥段底角为 40°、45°、50°、55° 水力旋流器进行了数值模拟, 通过数值分析研究中心锥结构对水力旋流器内流场及分离效率影响, 并考虑中心锥结构的磨损情况。模拟结果表明: 适当的减小上锥段底角能提高分离效率, 并改善上锥段的磨损情况, 而过小的上锥段底角反而会降低分离效率, 加重上锥段的磨损情况, 说明中心锥上锥段底角在 40° ~ 50° 之间存在着一个最佳角度, 该角度能够得到较高的分离效率以及较小的磨损。模拟结果也为进一步优化中心锥结构提供了参考。

**关键词:**水力旋流器; 计算流体力学; 中心锥结构; 磨损; 分离效率

中图分类号: TD452 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2018)06-0065-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.013

## Study on the Influence of Central Cone Structure on Flow Field and Separation Efficiency of Hydrocyclone

ZHOU Jiayu<sup>1,2</sup>, YAN Shuguang<sup>1,2</sup>, XIONG Pan<sup>1,2</sup>, LIU Weiyin<sup>1,2</sup>, LU Cong<sup>1,2</sup>

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** FLUENT 15.0, a computational fluid dynamics software, was used to numerically simulate the hydrocyclone with 40°, 45°, 50° and 55° of the upper cone angle of the central cone. The influence of central cone structure on flow field and separation efficiency in hydrocyclone are studied by numerical analysis, and taking into account the erosion status of the central cone structure. The simulation results indicate that proper reduction of the upper cone angle can improve the separation efficiency and improve the erosion status of the upper cone section, while too small upper cone angle will reduce the separation efficiency and increase the erosion status of the upper cone section. It can be seen that there is an optimum angle between the 40° and 50° of the upper cone angle of the central cone, which can result in higher separation efficiency and less erosion. The simulation results also provide a reference for further optimization of the central cone structure.

**Key words:** hydrocyclone; computational fluid dynamics; central cone structure; erosion; separation efficiency

水力旋流器由于其结构简单、运行成本低、占地面积小等优点在很多领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。空气柱是水力旋流器内特有的现象, 目前国内外学

者大多研究空气柱是关于空气柱的形状、尺寸、形成机理以及内部流场<sup>[4-6]</sup>。曹晓娟等<sup>[7]</sup>利用离散相模型研究空气柱的存在对分离粒度的影响, 结果表明,

\* 收稿日期: 2018-05-22

作者简介: 周嘉钰(1993-), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 从事水力旋流器的数值模拟研究。

空气柱的存在会使压力降增加和分级效率降低。褚良银等<sup>[8]</sup>利用中心固体棒占据空气柱位置来有效地消除空气柱,提高了分级效率。而张恒等<sup>[9]</sup>在固体棒上加一个固体双锥构成中心锥结构,与固体棒相比,中心锥结构水力旋流器能使分离精度和分离效率均得到提高。不过该结构会增大内部流体的流动阻力,需要对其结构进行优化。本文利用计算流体力学软件 FLUENT15.0 模拟研究中心锥结构对水力旋流器内流场及分离效率影响,并对不同中心锥结构的磨蚀情况做了分析,为进一步优化中心锥结构提供依据。

## 1 几何模型及求解参数设置

### 1.1 湍流模型

依据文献<sup>[10]</sup>报道,通过使用标准  $k-\varepsilon$ 、RNGk- $\varepsilon$ 、RSM 三种湍流模型对水力旋流器进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比,发现 RSM 湍流模型所获得流场参数与试验结果最为接近,因此本文选择雷诺应力(RSM)湍流模型。

### 1.2 磨蚀函数

离散相模型可以监视追踪颗粒对壁面的磨蚀情况,磨蚀率函数见式(1):

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^b}{A_{\text{face}}} \quad (1)$$

其中  $N_{\text{particles}}$  为粒子数;  $m_p$  为粒子的质量流量;  $f(\alpha)$  为侵入角函数;  $\alpha$  为颗粒对壁面的冲击角;  $C(d_p)$  为颗粒直径函数;  $v$  为颗粒相对于壁面的速度函数;  $b$  为速度指数;  $A_{\text{face}}$  为颗粒在壁面上的投影面积。

### 1.3 物理模型及网格划分

本文采用水力旋流器主要结构参数如图 1 所示,柱体直径  $D=50$  mm; 柱体高度  $h=60$  mm; 溢流管直径  $D_e=15$  mm; 溢流管插入深度  $S=30$  mm; 沉砂口直径  $B=10$  mm; 入口长度  $a=15$  mm; 入口宽度  $b=10$  mm; 锥角  $\theta=6^\circ$ 。中心锥主要结构参数如下,直径  $D_1=20$  mm, 中心锥结构固定杆直径  $D_0=5$  mm, 下锥段底角  $\beta=45^\circ$ , 四种中心锥结构仅上锥段底角  $\alpha$  不同,分别为  $55^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $40^\circ$ 。为方便比较,选取三条特征线  $Z_1=20$  mm 位于交界面上的圆柱段,  $Z_2=-100$  mm 和  $Z_3=-150$  mm 位于交接面下的锥段,用以研究不同特征线上中心锥结构对旋

流器内部流场参数的影响,分别标记为  $Z-1$ 、 $Z-2$ 、 $Z-3$ 。

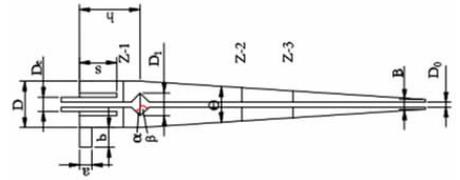


图 1 中心锥结构水力旋流器示意及特征线位置  
Fig. 1 Structural sketch and characteristic line location of the central cone structure of hydrocyclone

利用 ICEM CFD 软件对四种结构的水力旋流器模型进行六面体网格划分,生成的结构网格如图 2 所示,四个模型的网格数量均在 50 万左右。

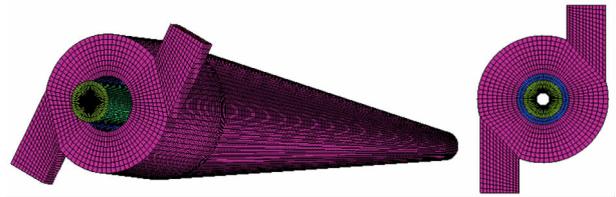


图 2 中心锥结构水力旋流器网格划分  
Fig. 2 Structure diagram of the central cone structure of hydrocyclone

### 1.4 边界条件设置

水力旋流器入口设为速度入口,连续相介质为水,流速为 3 m/s,设定颗粒入口处的射流源为面源,颗粒入口速度与液相入口速度相同,离散相密度为  $2\ 600$  kg/m<sup>3</sup>,且颗粒粒径分布服从 Rosin-Rammler 分布<sup>[11]</sup>;溢流及底流出口均为压力出口,压力设置为 0,设置溢流口为逃逸,底流口为捕集;压力-速度耦合方式为 SIMPLE,压力离散格式为 PRESTO。其他控制方程的离散格式均采用 QUICK 格式。设置重力加速度为  $9.81$  m/s<sup>2</sup>。

## 2 数值模拟结果

### 2.1 颗粒粒径累积分布

FLUENT 模拟中,当颗粒粒径分布要采用 Rosin-Rammler 分布函数时,其计算方法为利用经验公式对已知入口粒径计算得到的,其表达式见式(2):

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{D}\right)^S\right] \quad (2)$$

式中,  $F(d)$  代表颗粒粒径的累计分布;  $D$  为中位径 ( $\mu\text{m}$ );  $S$  为传播系数。

试验已知颗粒粒径累积分布如表 1 所示。

表 1 入口颗粒粒径累计分布

Table 1 Inlet particle size cumulative distribution

Range of sizes/ $\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$F(d)$
< 1	1	0.002
< 3.58	3.58	0.010
< 6.16	6.16	0.028
< 8.74	8.74	0.057
< 11.32	11.32	0.097
< 13.89	13.89	0.149
< 16.47	16.47	0.210
< 19.05	19.05	0.280
< 21.63	21.63	0.356
< 24.21	24.21	0.436
< 26.79	26.79	0.517
< 29.37	29.37	0.596
< 31.95	31.95	0.672
< 34.53	34.53	0.742
< 37.11	37.11	0.805
< 39.68	39.68	0.860
< 42.26	42.26	0.907
< 44.84	44.84	0.945
< 47.42	47.42	0.976
< 50	50.00	1.000

试验中当水力旋流器内颗粒粒径小于  $50\ \mu\text{m}$  时,经过计算可知,传播系数为 2.42,中位径为  $33.16\ \mu\text{m}$ ,由此可以得出颗粒粒径累计分布函数表达式见式(3):

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{33.16}\right)^{2.42}\right] \quad (3)$$

将该组试验颗粒粒径分布与颗粒粒径分布采用 Rosin - Rammler 分布函数所得粒径分布进行对比,可得图 3。

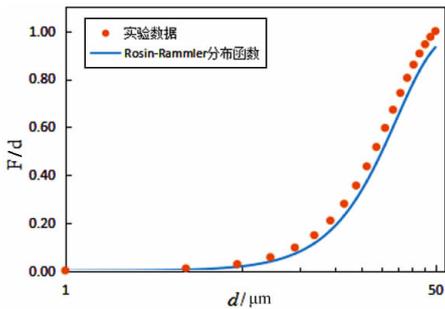


图 3 颗粒累计分布随粒径变化规律

Fig. 3 Cumulative distribution of the particles as a function of particle size

由图 3 可以看出,该组试验颗粒粒径分布与 Rosin - Rammler 分布函数规律相吻合,说明该组试验颗粒粒径分布服从 Rosin - Rammler 分布,也为后

面模拟结果的可靠性提供了依据。

## 2.2 压力分布

图 4(a)、4(b)和 4(c)分别为旋流器内  $x=0$  平面三条特征线 Z-1、Z-2 和 Z-3 上的压力分布图。

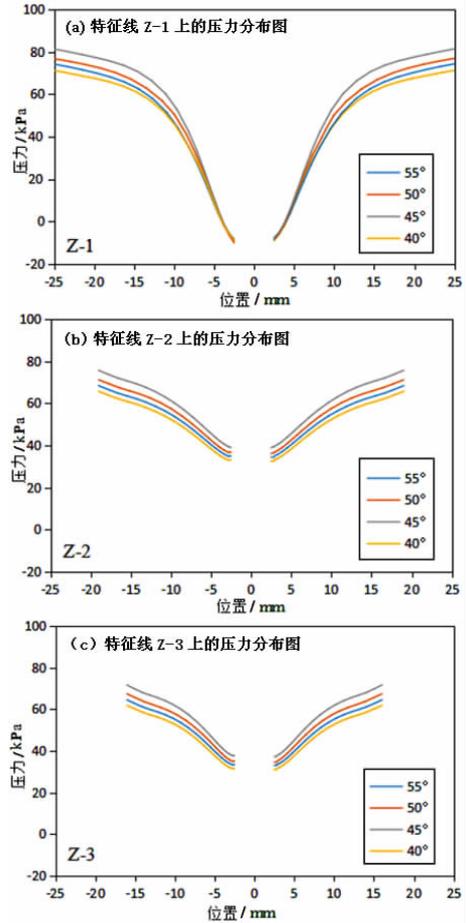


图 4 旋流器内  $x=0$  平面特征线上的压力分布图

Fig. 4 Pressure distribution on the  $x=0$  plane characteristic lines of hydrocyclone

由图 4 可以看出,水力旋流器内压力分布呈轴对称状态,旋流器内壁附近的压力最大,且为正值,沿径向方向压力值随半径的减小而降低,在柱体部分,到达中心区域附近,压力降低为负压,且在中心区域附近四种结构的压力无明显区别。而在锥体部分,特征线上的压力有明显区别,且径向上压力值随半径的减小而降低,但恒为正压。由图 4 还可以看出,与其他上锥段底角相比,上锥段底角  $45^\circ$  水力旋流器内径向压力梯度最大。由于径向压力梯度产生指向中心方向的力,使颗粒有向中心移动的趋势,这也是两相介质发生分离的重要原因之一<sup>[12]</sup>,说明适当的减小上锥段底角可以增大旋流器内径向压力梯

度从而增大颗粒所受指向轴心的径向力。

### 2.3 切向速度分布

图 5(a)、5(b)和 5(c)分别为旋流器内  $x=0$  平面三条特征线 Z-1、Z-2 和 Z-3 上的切向速度分布图。

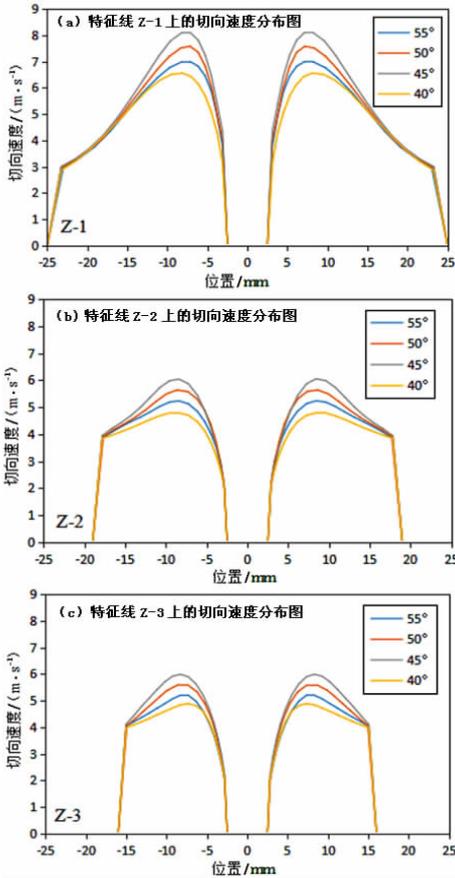


图 5 旋流器内  $x=0$  平面特征线上的切向速度分布图  
Fig. 5 Tangential velocity distribution on the  $x=0$  plane characteristic lines of hydrocyclone

由图 5 可以看出,对于相同中心锥结构的旋流器,柱体部分的最大切向速度要大于锥体部分的最大切向速度,因为中心锥结构的加入会导致液流进入溢流管的流动空间减小使流速变大。随着上锥段底角的减小,特征线上旋流器的最大切向速度先增大后减小,与其他上锥段底角相比,上锥段底角为  $45^\circ$  的旋流器内有更大的最大切线速度,说明适当的减小上锥段底角可以获得更大的最大切向速度,更大的最大切向速度也是降低旋流器分离粒度的有利条件之一。

### 2.4 循环流与短路流

图 6 为不同上锥段旋流器内水相的速度矢量在

$x=0$  平面的投影。

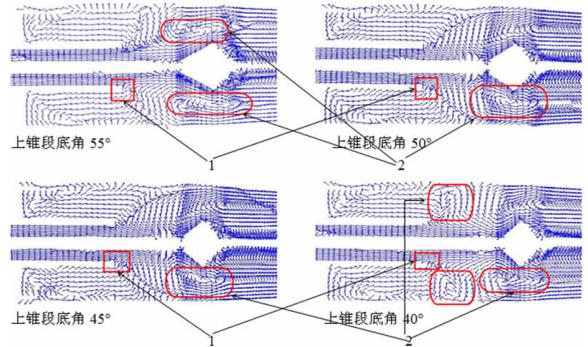


图 6 不同上锥段底角旋流器内水相的速度矢量在  $x=0$  平面投影

Fig. 6 Projection of the velocity vector of water phase inside hydrocyclones of different upper cone angle on the  $x=0$  plane

由图 6 可以看出,四种中心锥结构水力旋流器内都存在着明显的短路流和循环流。由图 6 还可以看出,当上锥段底角分别为  $55^\circ$ 、 $50^\circ$  和  $45^\circ$  时,旋流器内循环流仅存在于柱锥交接段,并且随着上锥段底角的减小,旋流器内循环流个数也随之减少,不过随着上锥段底角减为  $40^\circ$ ,旋流器内循环流存在于柱段和柱锥交接段两个区域内,循环流的个数也有所增加。

### 2.5 颗粒对中心锥结构的磨蚀结果

图 7 是不同中心锥结构的磨蚀云图。

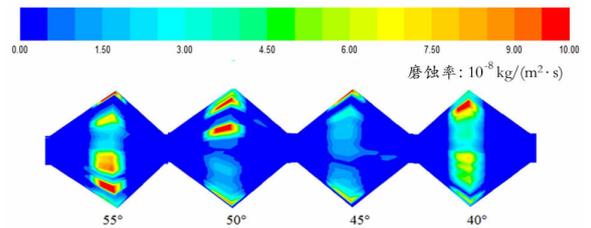


图 7 不同中心锥结构磨蚀云图

Fig. 7 Erosion clouds with the different central cone structure

根据图 7 所示的不同中心锥结构磨蚀云图可以发现,四种中心锥结构都出现了不同程度的磨蚀情况,而颗粒对中心锥上锥段的磨蚀作用尤为明显,原因在于中心锥结构的存在会阻碍柱体部分的液体流向锥体部分,使颗粒更容易在上锥段附近聚集,从而导致上锥段的磨损较为严重。由图 7 还可以看出,随着上锥段底角由  $55^\circ$  减至  $45^\circ$ ,上锥段的磨损情况也有所改善,不过随着上锥段底角进一步减至  $40^\circ$ ,上锥段的磨损情况反而更为严重,说明适当的减小上锥段底角可以有效地改善中心锥结构的磨损情

况,也可以提高中心锥结构的使用寿命。

## 2.6 旋流器压降及分离效率

旋流器分离效率为:

$$\eta = \frac{\text{底流口捕集的颗粒数}}{\text{入口处进入的总颗粒数}} \quad (3)$$

根据数值模拟得出的数据及公式(3),可得出不同上锥段底角旋流器的分离效率如表2所示。

表2 不同上锥段底角旋流器分离效率  
Table 2 Separation efficiency of different upper cone angle of hydrocyclone

角度/(°)	入口处进入的总颗粒数	溢流口逃逸的颗粒数	底流口捕集的颗粒数	分离效率/%
55	2 880	829	2 051	71.22
50	2 880	775	2 105	73.09
45	2 880	557	2 323	80.66
40	2 880	901	1 979	68.72

表3为不同上锥段底角压降及分离效率对比。由表3可以看出,上锥段底角由55°减小到50°,压降增加了6.21%,分离效率提高了1.87%;上锥段底角由50°减小到45°,压降增加了3.22%,分离效率提高了7.57%;上锥段底角由45°减小到40°,压降下降了18.88%,分离效率下降了11.94%,原因在于适当的减少上锥段底角有利于增大旋流器内切向速度从而提高分离效率,不过过小的上锥段底角,反而会使中心锥结构附近涡流增多,使其切向速度下降,降低了分离效率,说明上锥段底角在40°~50°间存在着一个最佳角度。

表3 不同上锥段底角旋流器压降及分离效率对比

Table 3 Comparison of the pressure drop and separation efficiency of different upper cone angle of hydrocyclone

角度/(°)	55	50	45	40
压降/Pa	50 412.15	53 543.92	55 267.78	44 835.52
分离效率/%	71.22	73.09	80.66	68.72

## 3 结论

(1)四种中心锥结构水力旋流器内压力场与速度场均呈轴对称分布。适当的减小上锥段底角能增大径向压力梯度和最大切向速度,有利于固液分离从而提高分离效率。

(2)结合速度矢量图和磨蚀云图可以得出,适当的减小上锥段底角可以减少循环流区域并改善中心锥上锥段的磨损情况,原因在于适当的减小上锥段底角可以减少柱锥交接段处的循环流区域,减少了颗粒与上锥段的碰撞,导致上锥段磨蚀情况得到改善。

(3)通过比较四种中心锥结构水力旋流器压降及分离效率可以得出,中心锥上锥段底角在40°到50°之间存在着一个最佳角度,该角度能够得到较高的分离效率,也为进一步优化中心锥结构提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 何庆浪,盛红光. 大山选矿厂 Krebs gMax 水力旋流器的应用研究[J]. 矿产保护与利用,2007(5):35-37.
- [2] 张鹏飞,谢海云,陈禄政,等. 水力旋流器在铁矿选矿中的应用及发展[J]. 新型工业化,2016,6(4):8-15.
- [3] 蔡有兴,孙学强. 水力旋流器超细分级研究[J]. 矿产保护与利用,1998(3):38-41.
- [4] 王志斌,褚良银,陈文梅,等. 基于高速摄像技术的旋流器空气柱特征研究[J]. 金属矿山,2010(8):140-143.
- [5] Cullivan J C, Williams R A, Dyakowski T, et al. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics [J]. Minerals engineering, 2004, 17(5):651-660.
- [6] 崔宝玉,魏德洲,翟庆祥,等. 水力旋流器内部流场的数值研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2014,35(6):894-897.
- [7] 曹晓娟,顾伯勤. 旋流器内空气柱形成与发展及其对分离的影响[J]. 流体机械,2009,37(1):28-33.
- [8] Chu L Y, Yu W, Wang G J, et al. Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core [J]. Chemical engineering & processing process intensification, 2004, 43(12):1441-1448.
- [9] 张恒,王卫兵,冯静安,等. 中心锥对水力旋流器性能影响[J]. 矿业研究与开发,2016,36(8):81-84.
- [10] 梁政,吴世辉,任连城. 论水力旋流器流场数值模拟中湍流模型的选择[J]. 天然气工业,2007(3):119-121,161.
- [11] 戴丽燕. 关于 Rosin-Rammler 粒径分布函数的研究[J]. 有色矿冶,2001,16(3):15-17.
- [12] 苏劲,袁智,侍玉苗,等. 水力旋流器细粒分离效率优化与数值模拟[J]. 机械工程学报,2011,47(20):183-190.

引用格式:周嘉钰,鄢曙光,熊攀,等. 中心锥结构对水力旋流器内流场及分离效率影响的研究[J]. 矿产保护与利用,2018(6):65-69.

ZHOU Jiayu, YAN Shuguang, XIONG Pan, et al. Study on the influence of central cone structure on flow field and separation efficiency of hydrocyclone [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6):65-69.