

具有中心插入物结构水力旋流器流场特性及分离性能研究

周嘉钰¹, 鄢曙光^{1,2}

- (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 对中心棒及辅助构件中心粗棒、中心锥和中心渐扩导管这四种中心插入物结构水力旋流器进行了数值模拟, 分析了添加中心插入物结构对传统水力旋流器内流场的影响, 对中心插入物结构以及传统水力旋流器的分级效率进行了比较。模拟结果表明: 与传统水力旋流器相比, 添加中心插入物结构能够提高旋流器内流场的稳定性并降低产品粒度粗细混杂程度。模拟结构也为进一步优化中心插入物结构提供了参考。

关键词: 水力旋流器; 计算流体力学; 中心插入物结构; 分离性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.01.040

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 01-0199-04

水力旋流器是利用离心力场进行两相流体分离的有效分离设备, 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^[1-2]。空气柱是固液水力旋流器内的一种独特的现象, 对旋流器的分离粒度、分级效率等分离特性有着重要的影响^[3-4]。曹晓娟等^[5]采用随机轨道模型研究了空气柱与分级效率之间的关系, 模拟结果表明, 空气柱的存在导致能耗增大及分级效率降低。徐继润等^[6]利用中心固体棒占据原来空气柱位置的方法来消除空气柱, 试验结果表明, 当中心固体棒完全占据空气柱位置时, 可使其内部能耗降低 50% 左右。Sripriya 等^[7]研究了具有空气柱和具有中心固体棒的旋流器内流场特性的差异, 结果表明, 添加中心固体棒结构有利于提高旋流器的分离效率。褚良银^[8]等研究了不同中心插入物结构对水力旋流器分离性能的影响, 试验结果表明, 适当的中心插入物结构能使水力旋流器分离性能得以改善。对于中心插入物结构的研究, 特别是具有辅助构件中心粗棒、中心锥和中心渐扩导管这三种中心插入物结构, 目前仅从旋流器分离性能的指标来研判这三种中心插入物结

构对旋流器分离效果的影响, 并没有对这三种中心插入物结构的旋流器内流场特性有充分的认识, 因此, 对具有中心插入物结构水力旋流器内流场特性的研究能够为进一步中心插入物结构的优化提供了依据。

1 几何模型及求解参数设置

1.1 湍流模型

依据文献[9]报道, 通过使用标准 k-ε、RNGk-ε、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 物理模型及网格划分

本文采用传统水力旋流器主要结构参数见图 1, 柱体直径 $D=75\text{ mm}$; 柱体高度 $h=105\text{ mm}$; 锥角 $\theta=20^\circ$; 溢流管直径 $d_o=25\text{ mm}$; 溢流管插入深度 $S=50\text{ mm}$; 底流口直径 $d_u=12.5\text{ mm}$; 入口长度 $a=29.92\text{ mm}$, 入口宽度 $b=10.5\text{ mm}$, 且长边所在面与旋流器轴线平行。四种中心插入物结构几何尺寸^[10]见图 2。

收稿日期: 2018-11-14

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

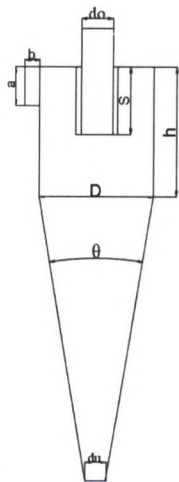


图 1 传统水力旋流器结构示意图
Fig.1 Structural sketch of traditional hydrocyclone

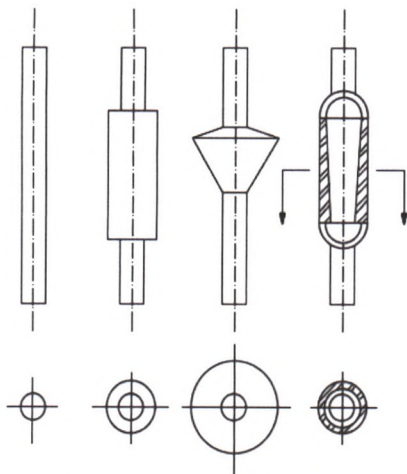


图 2 中心插入物结构示意图
Fig.2 Structural sketch of central insertion structure

中心棒结构及三种不同辅助构件结构主要参数如下：(1) 中心棒结构：仅为一根直径为 4mm 的固体棒 (2) 中心粗棒结构：固体粗棒直径为 14 mm，上端伸入溢流管下端所在面以上 10 mm，下端在底流口所在面以上 40 mm；(3) 中心锥结构：上锥段与下锥段顶角分别为 120° 和 60°，中心锥大端直径为 30 mm，且大端所在面与旋流器柱锥交界面重合。(4) 中心渐扩导管结构：导管外径为 14 mm，内径大端直径为 10 mm，内径小端直径为 6 mm (小端在下)，导管长度为 50 mm，小端所在面伸入溢流管下端所在面 5 mm。

1.3 边界条件设置

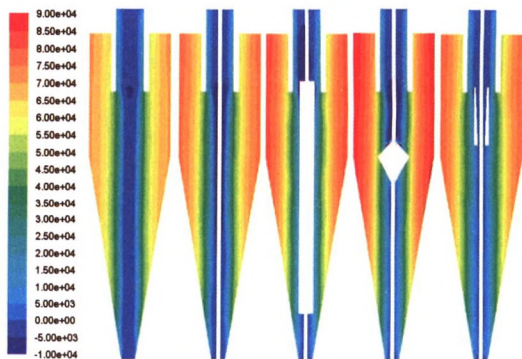
水力旋流器入口设为速度入口，连续相介质为水，流速为 4 m/s，设定颗粒入口处的射流源为面源，颗粒入口速度与液相入口速度相同，离散相密度为 2650 kg/m³，粒径分别为 1 μm、5 μm、10 μm、15 μm、20 μm、25 μm、30 μm、35 μm、

40 μm 和 45 μm；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/s²。

2 数值模拟结果

2.1 压力分布

图 3 为不同结构水力旋流器内 x=0 平面压力云图。



(a) 传统型 (b) 中心棒 (c) 中心粗棒 (d) 中心锥 (e) 中心渐扩导管

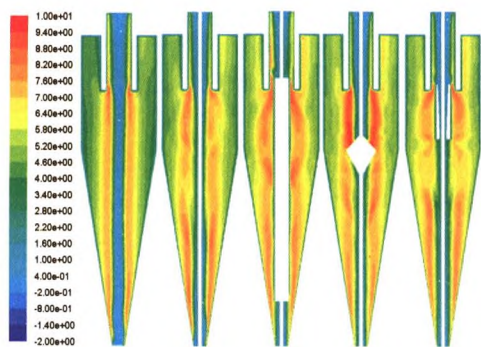
图 3 不同结构水力旋流器内 x=0 平面压力

Fig.3 Pressure contours inside different structure hydrocyclone in x=0 plane

由图 3 可以看出，不同结构水力旋流器内压力是以中心轴线为对称轴近似对称分布，沿径向上压力值随半径的减小而降低，水力旋流器从器壁沿径向形成压力梯度，正是由于压力梯度产生指向核心方向的力，使得颗粒有向核心运动的趋势，这也就是使颗粒沿径向运动最终使两相介质产生分离的原因之一^[11]。与传统水力旋流器相比，中心棒结构以及添加辅助构件结构水力旋流器内有更大的径向压力梯度，说明中心棒以及添加辅助构件结构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。由图 3 还可以看出，不同结构水力旋流器溢流口处都存在着一个负压很大的区域，正是由于溢流口处存在很大的负压，使得部分矿浆直接进入溢流产物从而产生短路流。尤其是中心锥结构的存在会导致液流进入溢流管的空间减小流速变大压力降低，中心锥结构水力旋流器溢流口处会形成负压更大的区域使短路流更加严重直接影响其分离效果。

2.2 切向速度分布

图 4 为不同结构水力旋流器内 x=0 平面切向速度云图。



(a) 传统型 (b) 中心棒 (c) 中心粗棒 (d) 中心锥 (e) 中心渐扩导管

图 4 不同结构水力旋流器内 $x=0$ 平面切向速度

Fig. 4 Tangential velocity contours inside different structure hydrocyclone in $x=0$ plane

由图 4 可以看出,不同结构水力旋流器内切向速度大体上呈轴对称分布。与传统水力旋流器相比,中心棒结构以及添加辅助构件结构水力旋流器内有更大的最大切向速度,说明中心棒结构以及添加辅助构件结构水力旋流器内可以获得更大的离心强度,而高离心强度也有利于降低旋流器分离粒度。由图 4 还可以看出,由于空气柱动态摆动对流场造成的影响,在底流口上端,传统水力旋流器内切向速度发生了明显的径向偏摆。中心棒结构的加入虽然可以起到一定稳定流场的作用,但并不能够完全消除流场的湍动,导致中心棒结构水力旋流器底流口上端切向速度也发生了径向偏摆,而中心粗棒、中心锥和中心渐扩导管三种辅助构件结构水力旋流器底流口上端切向速度几乎没有发生径向偏摆,说明适当的辅助构件结构可以进一步提高水力旋流器内流场的稳定性从而提升其分离性能。

2.3 短路流与循环流

图 5 为不同结构水力旋流器内 $x=0$ 平面流线图。



(a) 传统型 (b) 中心棒 (c) 中心粗棒 (d) 中心锥 (e) 中心渐扩导管

图 5 不同结构水力旋流器内 $x=0$ 平面流线

Fig. 5 Streamline diagram of $x=0$ plane in different structural hydrocyclones

由图 5 可以看出,不同结构水力旋流器内都有明显短路流和循环流的存在。由图 5 还可以看出,传统水力旋流器与中心棒结构水力旋流器内循环流分布情况大致相同,所不同的是中心棒结构的加入使得存在于传统水力旋流器左侧柱段和柱锥交接段的两个循环流减少为只存在于左侧柱锥交接段的一个循环流。与中心棒结构水力旋流器相比,在柱锥交接段处,中心粗棒结构水力旋流器内并没有循环流的存在。不过在锥段,尤其是在中心粗棒结构与旋流器锥段之间存在着数个循环流,原因在于中心粗棒结构会使得旋流器锥段空间减小导致未能进入底流管的那部分外旋流中的流体在中心粗棒结构与旋流器锥段之间作循环运动从而形成循环流。中心锥结构和中心渐扩导管结构水力旋流器柱锥交接段处都有呈轴对称分布的循环流的出现。而中心锥结构水力旋流器锥段,特别是中心锥下锥段附近形成了一定数量的小涡,说明中心锥结构的加入会影响旋流器内中心锥结构所在区域流场的稳定性。总体看来,与其他结构相比,中心粗棒结构水力旋流器内流场更趋于稳定,说明该结构更有利于提高流场的稳定性。

2.4 分级效率

相对分级效率可由下式 (1) 表示

相对分级效率 =

某一粒径不同中心插入物结构水力旋流器与传统水力旋流器分离效率之差
该粒径传统水力旋流器分离效率

(1)

图 6 为不同中心插入物结构相对分级效率曲线。

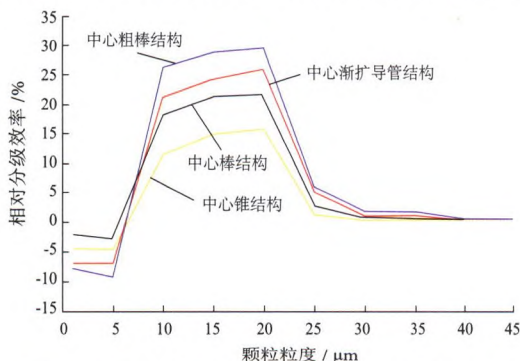


图 6 不同中心插入物结构相对分级效率曲线

Fig. 6 Relative classification efficiency curves of different central insertion structure

由图 6 可以看出,当颗粒粒度 $<8 \mu\text{m}$ 时,添加中心棒结构以及辅助构件结构均能够降低旋流器内细颗粒的分离效率从而使得更多细颗粒从溢流口流出,当颗粒粒度 $>8 \mu\text{m}$ 时,添加中心棒结构以及辅助构件结构则能够提高旋流器内粗颗粒的分离效率,说明中心棒结构以及辅助构件结构可以降低产品粒

度粗细混杂程度。由图 6 还可以看出, 与中心棒结构相比, 添加中心粗棒和中心渐扩导管两种辅助构件结构后水力旋流器的分级效率都得到了提高, 不过, 添加中心锥结构后旋流器的分级效率却降低了, 原因在于中心锥结构的加入会使得旋流器内短路流更加严重并且还会影响旋流器内其结构所在区域流场的稳定性从而导致旋流器分级效率的降低。

3 结 论

(1) 与传统水力旋流器相比, 添加中心棒及辅助构件结构可以增大旋流器内径向压力梯度和最大切向速度, 更有利于固液分离从而提高分离效率。

(2) 结合不同结构水力旋流器 $x=0$ 平面流线图可以看出, 与传统水力旋流器相比, 添加中心棒结构后, 旋流器内循环流的分布情况基本不变并且循环流个数还有所减少。而添加辅助构件结构后, 由于其结构特点的不同, 使得旋流器内循环流分布情况各不相同。总的来说, 添加中心棒及辅助构件结构有利于流场稳定性的提高。

(3) 通过比较中心插入物结构水力旋流器和传统水力旋流器的相对分级效率可以看出, 添加中心棒结构及辅助构件结构能够降低产品粒度粗细混杂程度。

参考文献:

- [1] 何秋芝, 秦研, 莫伟, 等. 利用水力旋流器对广西典型钙基膨润土的湿法提纯研究 [J]. 矿产综合利用, 2017(6):57-63.
- [2] 陈强, 刘佳, 邓元臣, 等. 高岭土使用直径 10mm 水力旋流器超细分级的研究 [J]. 非金属矿, 2011, 34(6):29-31.
- [3] 张静. 水力旋流器气液固流场的数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [4] Lim E W C, Chen Y R, Wang C H, et al. Experimental and computational studies of multiphase hydrodynamics in a hydrocyclone separator system[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(24):6415-6424.
- [5] 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.
- [6] 徐继润. 水力旋流器强制涡及内部损失的研究 [D]. 沈阳: 东北工学院 东北大学, 1989.
- [7] Sripriya R, Suresh N, Chakraborty S, et al. Improvement of performance efficiency of a hydrocyclone with design modification by suppressing air core[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28(1):225-231.
- [8] Chu L Y, Chen W M, Lee X Z. Effect of structural modification on hydrocyclone performance[J]. Separation & Purification Technology, 2000, 21(1):71-86.
- [9] 刘峰, 钱爱军, 郭秀军. 重介质旋流器流场湍流数值计算模型的选择 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(3):76-80.
- [10] 褚良银, 陈文梅, 李晓钟, 等. 水力旋流器结构与分离性能研究 (五)——强制涡区辅助件结构 [J]. 化工装备技术, 1999(1):22-25.
- [11] 蒋明虎, 李枫, 赵立新, 等. 水力旋流器径向压力场研究 [J]. 东北石油大学学报, 1999(1):60-62.

Study on Flow Characteristics and Separation Efficiency of a Hydrocyclone with Central Insertion Structure

Zhou Jiayu¹, Yan Shuguang^{1,2}

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

Abstract: The computational fluid dynamics software FLUENT15.0 was used to numerically simulate the four central insertion structure hydrocyclones of the central rod and auxiliary component central solid core,central cone and central inner diffuser.While an analysis performed to the influence of the addition of the central insertion structure on the flow field in the traditional hydrocyclone,and a comparison made to the classification efficiency of the central insertion structure and the traditional hydrocyclone.The simulation results indicate that compared with the traditional hydrocyclone, the addition of the center rod and the auxiliary component structure can improve the stability of the flow field in the cyclone and reduce the mixing degree of the product granularity.The simulation results also provide a reference for further optimization of the central insertion structure.

Keywords: Hydrocyclone;Computational fluid dynamics;Central insertion structure;Separation performance