

文章编号: 1673-5196(2020)01-0060-05

新型旋流分离一体机的分离性能分析

张 力, 张立华, 徐光亿, 贾存千, 韩文洁

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对旋流器无法对粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 左右的固相颗粒进行有效分离的问题, 提出了一种过滤分离与旋流分离相结合的新型结构, 并对内部流体速度场、压力场的变化和空气柱的稳定性进行了数值分析, 对过滤介质的过滤通量和分离效率进行了实验研究. 发现在相同操作参数和结构参数下新型旋流分离一体机具有更稳定的内部流场, 内部速度、压力降更大, 当粒径大于 $5\ \mu\text{m}$ 后旋流分离一体机的分离效率迅速提高, 在 $10\ \mu\text{m}$ 左右的固相颗粒的分离效率能够达到 $65\% \sim 85\%$, 而实验所用普通旋流器的分离效率在 60% 以下.

关键词: 旋流过滤; 细颗粒分离; 多孔介质

中图分类号: TV93 **文献标志码:** A

Analysis of separation performance of novel integral hydrocyclone

ZHANG Li, ZHANG Li-hua, XU Guang-yi, JIA Cun-qian, HAN Wen-jie

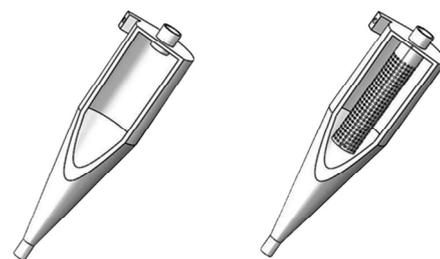
(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problem that there is no way for an ordinary cyclone to separate solid-phase particles with particle size about ten microns, a new structure of cyclone was presented for combined filtration separation with cyclone separation, the numerical simulation of the variation of velocity and pressure fields in the internal fluid and the stability of the air column there was carried out, and the filtration flux and separation efficiency of the filtering media were studied experimentally. It was found that the new integral filtering hydro-cyclone would have a more stable internal flow field, the internal velocity and pressure drop would be greater under condition of identical operation parameters and structure parameters. When the particle size was more than $5\ \mu\text{m}$, the separation efficiency of the hydrocyclone would be improved rapidly. The separation efficiency of solid particles of about $10\ \mu\text{m}$ in diameter could reach 65% to 85% and the average separation efficiency of ordinary cyclone used in experiment would be below 60% .

Key words: filtering with hydrocyclone; fine particle separation; porous medium

水力旋流器普遍应用于固液两相流的分离, 但是对于粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 左右的固体颗粒, 旋流器的分离效果不再显著^[1]. 目前主要通过减小旋流器结构尺寸, 即使用小型旋流器来提高分离效率^[2]. 但这必然导致分离速度的降低和成本的提高, 尤其在面对冶金废水、矿液分离^[3]、滴灌、喷灌这种需要大量处理并且颗粒粒径不大的情况时, 迫切需要一种大流量、高效率的旋流器. 本研究的主要思路是放弃使用小结构水力旋流器, 在旋流器溢流口底部安装不锈钢过滤网, 使离心分离与过滤分离在旋流器内同

时进行^[4-7], 结构示意图如图 1 所示, 图 1a 为普通旋流分离器, 图 1b 为改进后的旋流分离一体机. 本文



(a) 普通旋流分离器 (b) 改进后的旋流分离一体机

图 1 普通旋流器和旋流分离一体机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ordinary cyclone and integral mechanism of hydrocyclone

收稿日期: 2017-11-01

基金项目: 甘肃省中小企业创新基金(0703CCCA011)

作者简介: 张 力(1965-), 女, 甘肃兰州人, 副教授.

对该旋流分离一体机内部流场和分离效率进行研究,为以后系列化的设计提供理论依据与参考。

1 理论分析

根据 Darcy 定律和 Poiseuille 方程得到过滤速率方程:

$$\frac{dv}{A d\theta} = K_p \frac{\Delta p}{\mu L} \quad (1)$$

式中: A 为过滤面积; μ 为滤液黏度; L 为滤饼厚度; K_p 为渗透系数; Δp 为过滤压差。

由式(1)可以看出过滤面积、过滤压差和渗透系数是影响过滤速率的主要因素,因此旋流器内过滤介质的材料选用多层不锈钢编织网,因为这种材料具有阻力系数低、过滤精度高、耐高压、耐腐蚀等优点^[8]。过滤介质的形状设计为圆柱体,该形状的优点是在保证尽可能大的过滤面积的前提下,不破坏旋流器内的流场,相反因为圆柱体过滤介质的存在,旋流器内的空气柱会更加稳定^[9]。

如图 2 所示,过滤介质安装在溢流口底部,所用旋流器的参数为:圆柱段直径 $D=500$ mm,溢流口直径 $d_o=170$ mm,底流口直径 $d_u=150$ mm,进水口直径 $d_i=200$ mm,溢流管长度 $h_o'=100$ mm,溢流管插入深度 $h_o=60$ mm,过滤网长度 $h_f=240$ mm,过滤网直径 $d_f=180$ mm,圆柱段长度 $h_1=600$ mm,锥角 $\theta=20^\circ$ 。

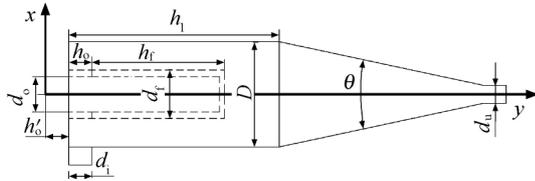


图 2 水力旋流器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of hydrocyclone

2 数学模型及模拟方法

2.1 数学模型

假设旋流分离一体机内的水为黏性不可压缩流体,常温下定常运动,考虑重力和旋流器壁的影响,不考虑表面张力^[10]。

由于在流体区域中多孔介质对流体的阻力作用,多孔介质模型通过在流体的动量方程中增加源项的方式实现对多孔介质的模拟^[11]。

源项方程为

$$S_i = \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \rho |v| v_j \right) \quad (2)$$

$$i = (x, y, z)$$

式中: D 为黏性阻力系数矩阵; C 为惯性阻力系数矩阵; v 为流体速度。

在进行多孔介质模拟时黏性阻力系数、惯性阻力系数和孔隙率是进行模拟计算的三个重要参数^[12],孔隙率由选择的过滤介质材料决定,黏性阻力系数和惯性阻力系数可在知道颗粒平均直径和孔隙率的前提下通过公式计算得到。在流体流动为湍流和 Re 的取值范围较宽时,黏性阻力系数和惯性阻力系数的计算公式可以采用半经验的 Ergun 公式:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150 v (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v + \frac{1.75 \rho (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v^2 \quad (3)$$

式中: D_p 为平均颗粒直径; L 为床层厚度; ϵ 为孔隙率。

黏性阻力系数和惯性阻力损失系数为

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150 (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} \quad (5)$$

2.2 模拟结果

本文采用 ICFM 对旋流器进行结构网格划分,通过 Fluent 软件进行流场模拟,如图 3 所示。

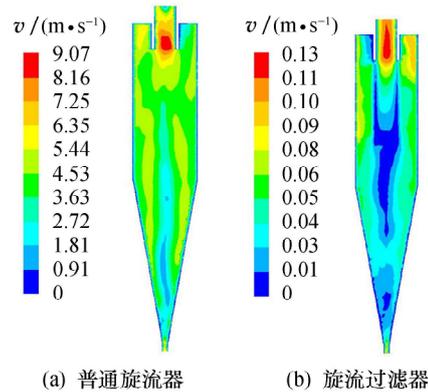


图 3 旋流器的速度分布

Fig. 3 Velocity distribution in hydrocyclone

图 3 为流体总速度在旋流器内的分布,图 4 为流体轴向速度在垂直于旋流器主轴的截面 $y=380$ 、 460 、 540 、 620 mm 与旋流器对称面的各相交线处分布图。从图 3 和图 4 中的速度分布可以明显看出流体流过旋流分离一体机内的过滤介质时,流体速度明显下降。此外,在过滤介质以下部分即圆锥段,流体速度比普通旋流器低。这是因为当流体通过过滤介质时,受到了惯性阻力导致速度下降。

通过对比图 5 和图 6 中的压力分布可以明显看出流体在流经旋流分离一体机内的过滤介质时,流

体压力存在阶梯下降现象,这是因为流体受到过滤介质内惯性阻力和黏性阻力的影响.

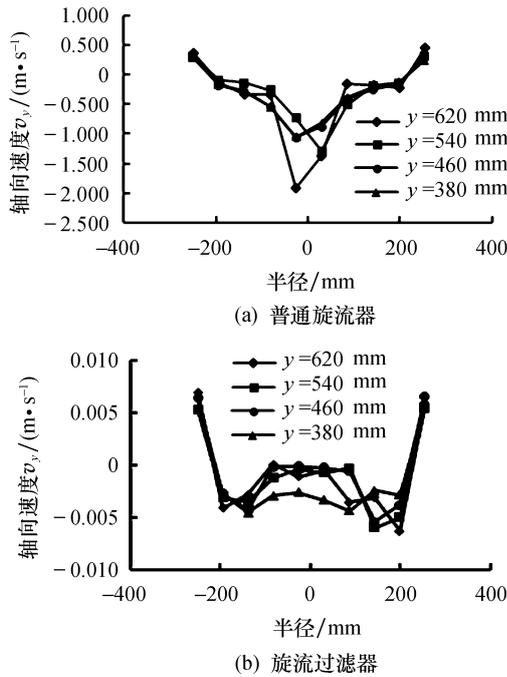


图 4 流体在各相交线的速度分布

Fig. 4 Fluid velocity distribution on each interceptive line

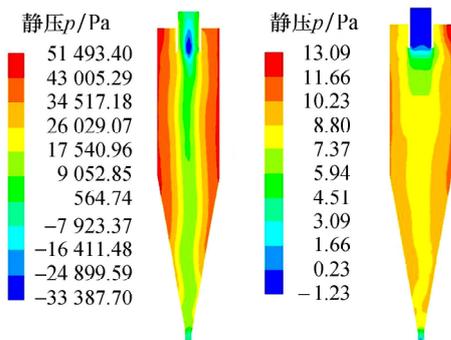


图 5 旋流器的静压分布

Fig. 5 Static pressure distribution in hydrocyclone

图 7 为通过 CFD 方法求得的旋流器内空气柱直径沿轴向的变化情况. 从图中可以看出,受旋流器内强旋流场的影响空气柱形状不规则,沿旋流器轴线偏摆. 由于空气柱形状不对称,内部流场不稳定,对旋流器内规律分布的固相颗粒的分离有很大的影响. 影响旋流器分离效率的一个最直接的原因就是:空气柱的随机摆动影响溢流口底部的环隙液流,导致溢流口各个方向的固相分布不均,降低分离效率^[13].

从图 7 可以明显看出旋流分离一体机内空气柱的稳定性优于普通旋流器,这是因为旋流分离一体机内圆柱形多孔介质对空气柱形状的随机变化起到了限制作用^[14].

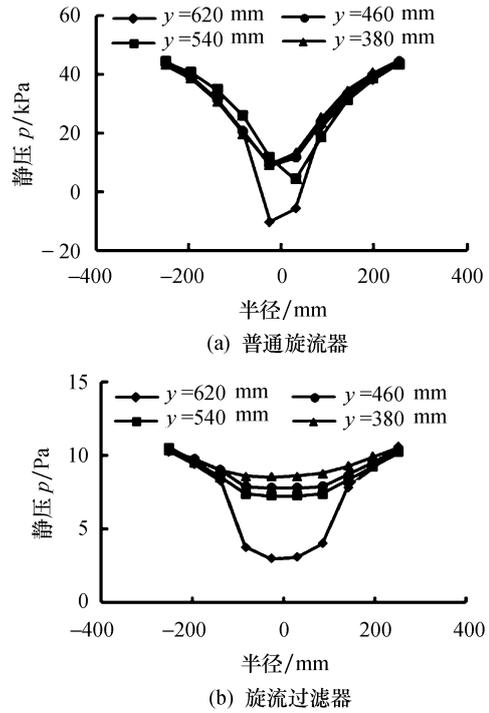


图 6 流体在不同截面的静压分布

Fig. 6 Fluid static pressure distribution on different sections

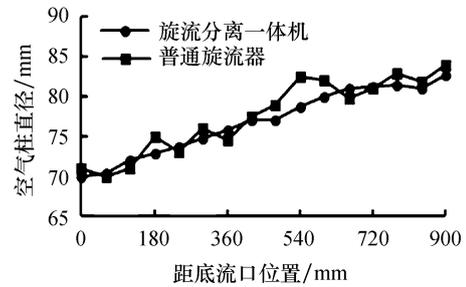


图 7 空气柱直径沿轴向的变化

Fig. 7 Axial variation of air column diameter

3 旋流分离一体机性能分析

实验所用设备如图 8 所示,本实验设计的旋流过滤一体机在溢流口底部安装圆柱形过滤介质,实现了将流体的强旋流分离与过滤分离过程结合^[15-16]. 过滤分离过程通过安装在溢流口底部的多孔介质实现. 本研究所采用的多孔介质材料为多层不锈钢编织网,这种过滤材料具有阻力系数低、流通性能高、过滤精度高、耐高压、耐腐蚀、使用寿命长等优点. 本实验将分析过滤介质对旋流器分离效率的影响.

3.1 过滤介质的阻力分析

由式(1)可知,减小过滤介质的阻力或增大推动力即提高过滤介质两侧的压力差均可提高过滤介质的过滤效率. 在多孔介质材料确定的情况下,过滤层滤饼的增长是导致过滤介质阻力变大的主要原因,



图 8 水力旋流器试验设备

Fig. 8 Hydrocyclone test device

目前十字剪切过滤技术和动态薄层过滤技术是限制滤饼增长最为有效的技术. 在旋流过滤一体机内部的多孔介质表面, 流体沿多孔介质的流出方向与流体的流动方向垂直, 这种过滤方式即为十字剪切过滤^[17]. 本次实验是通过实验的方式来研究在十字剪切过滤下过滤通量随时间的变化情况, 以此推测旋流过滤器长时间工作后其过滤性能的变化.

试验选用碳酸钙作为固相颗粒, 由 TALL-Coulter 粒度仪测定颗粒平均粒径为 $8 \mu\text{m}$ 液相水. 过滤介质压力差为 0.1 MPa , 进料质量浓度为 3 g/L , 过滤网孔径为 $5 \mu\text{m}$. 通过旋转流十字过滤流模拟泥沙水在旋流过滤器内的分离过程, 观察过滤介质的过滤通量随时间的变化情况, 进出口流量由电磁流量计测得.

通过实验可得如图 9 所示的过滤通量衰减曲线. 由图 9 可以得出, 在过滤初始阶段, 多孔介质的过滤通量随时间的增加逐步递减, 这是因为高速流体夹带固相颗粒流过多孔介质时, 必然会增大过滤阻力. 虽然流体通过过滤介质的过滤过程为无滤饼或微滤饼的十字剪切过滤, 但是在流体较大的剪切力作用下, 会有一部分固相颗粒破碎进入多孔介质, 堵塞多孔介质, 增加多孔介质的惯性阻力, 降低过滤通量^[18]. 当过滤过程进行一段时间以后, 过滤通量会保持在稳定值, 不再随时间变化, 这表明旋流分离器可以长时间稳定工作.

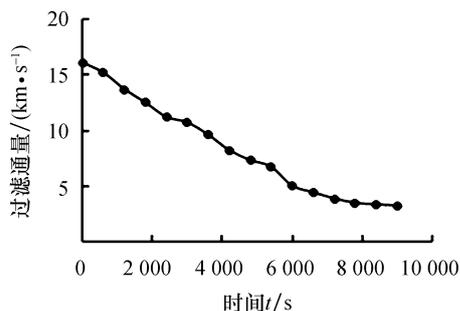


图 9 过滤通量衰减曲线

Fig. 9 Attenuation curve of filtration flux

3.2 分离效率分析

本次实验选用过滤网孔径为 $5 \mu\text{m}$, 进口压力为 0.1 MPa , 进料依然选用碳酸钙作为固相颗粒, 粒径分别为 $2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 \mu\text{m}$. 分别对普通旋流器和旋流分离一体机进行实验, 采用“抽滤-烘干-称量”的方法测定溢流和底流的固相浓度. 通过本次实验研究旋流分离一体机在分离 $10 \mu\text{m}$ 左右小颗粒时分离效率是否提高.

由图 10 可知, 当固相颗粒的直径远小于 $5 \mu\text{m}$ 时, 旋流分离一体机的分离效率比普通旋流器小, 这是因为在一体机内多孔介质的黏性阻力和惯性阻力会阻碍流体的流动^[19], 导致分离效率下降, 另外内部圆柱形过滤介质的存在也会削弱旋流器的内部流场, 降低分离效率. 当所分离的流体内固相颗粒接近 $5 \mu\text{m}$ 时, 旋流分离一体机的过滤效率最低. 这是因为固相颗粒粒径越接近 $5 \mu\text{m}$, 越有利于过滤层滤饼的增长, 过滤过程中滤饼是导致过滤效率降低的主要原因, 因此选用旋流一体机时, 工作环境应尽可能避开自身过滤网孔径范围. 当粒径大于 $6 \mu\text{m}$ 时, 一体机的过滤效率呈指数上升, 远远优于普通旋流器. 这是因为当粒径大于 $5 \mu\text{m}$ 后, 旋流器内部的强十字剪切抑制了过滤层滤饼的生成^[20], 此时多孔介质的过滤分离功能占主导地位, 因此分离效率迅速提高, 远远优于普通旋流器. 此种情况即为旋流分离一体机的理想工作环境.

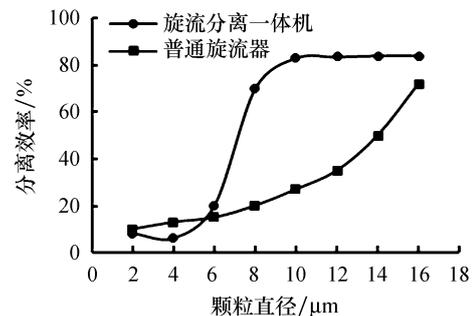


图 10 旋流器分离效率

Fig. 10 Separation efficiency of hydrocyclone

4 结论

本研究针对旋流器无法对粒径在 $10 \mu\text{m}$ 左右的固相颗粒进行有效分离的问题, 设计了在溢流口底部安装圆柱形过滤网结构的旋流过滤一体机. 利用 Fluent 进行了内部流场模拟, 设计了内部多孔介质的过滤通量实验和在相同条件下旋流分离一体机和普通流器对不同粒径颗粒的分离效率实验. 研究得出如下结论:

1) 流体在旋流过滤一体机内存在速度和压力

的下降,主要原因是过滤网会削弱旋流分离一体机内的准强制涡,流体在通过滤网时会受到多孔介质的黏性阻力和惯性阻力,因此应适当提高入口压力和流体速度。

2) 通过过滤通量实验可知,虽然内部过滤为十字剪切过滤,但仍会有一部分颗粒在强剪切力的作用下,破碎进入多孔介质导致过滤通量下降。虽然过滤通量在下降一定量后就会保持稳定,但在工作中应定时对过滤介质进行反冲洗,这将有助于提高旋流分离器的分离速度。

3) 在本实验中旋流分离一体机对粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 左右的固相颗粒的分离效率能够达到 $65\%\sim 85\%$,而实验所用普通旋流器分离效率在 60% 以下。旋流分离一体机对粒径大于其自身过滤网孔径 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的固相颗粒分离效率完全可以满足工作要求,但过滤网孔径应避免与流体中主要固相颗粒粒径相等。

参考文献:

- [1] 褚良银,陈文梅.水力旋流器结构与分离性能研究(二):溢流管结构[J].化工装备技术,1998,19(4):1-3.
- [2] 杨林娜.新型三产品水力旋流器设计与结构优选数值模拟研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [3] 李玲霞,黄显怀,乔建生.旋流分离工艺对溢流污水处理的效能研究[J].工业用水与废水,2012,43(3):44-52.
- [4] 孙凤玲,于传龙.利用旋液分离过滤器净化混合油的优越性[J].黑龙江粮食,2003(3):45-48.
- [5] 任连城,梁政,梁利平,等.过滤式水力旋流器方案设计[J].西南石油学院学报,2005,27(1):82-85.
- [6] 王志斌,陈文梅,褚良银,等.旋流器流场和结构对分离性能影响的研究进展[J].过滤与分离,2004,14(3):1-3.
- [7] 王升贵,陈文梅,褚良银,等.水力旋流器分离理论的研究与发展趋势[J].流体机械,2005,33(7):36-40.
- [8] 刘仁桓.旋流过滤器分离机理研究[D].青岛:中国石油大学,2011.
- [9] 吕宪俊,崔学奇,邱俊.水力旋流器的结构参数与分离性能研究[J].中国非金属矿工业导刊,2007,28(增刊):52-56.
- [10] 欧益宏,杜扬,周明来.柱型水力旋流器多相流场及分离过程的数值模拟[J].流体机械,2005,33(1):28-31.
- [11] 陆耀军.不同湍流模型在液-液旋流分离管流场计算中的应用及比较[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(2):105-109.
- [12] 韩占忠,王敬,兰小平.FLUENT:流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004.
- [13] 徐继润,罗茜.水力旋流器强制涡的不稳定性及消除措施[J].化工矿山技术,1991,20(1):31-34.
- [14] VIEIRA L G M, DAMASCENO J J R, BARROZO M A S. Filtration on hydrocyclone of optimized geometric relationships[J]. Materials Science Forum, 2008, 59(3):341-346.
- [15] VIEIRA L G M, DAMASCENO J J R, BARROZO M A S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(5):460-467.
- [16] TETSUYA Y, TAKUMA O, HIDETO Y, *et al.* Improvement of particle separation performance by new type hydrocyclone[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 158:223-229.
- [17] 褚良银,陈文梅,钟月华.不同过滤方式下过滤速率衰减模型研究[J].过滤与分离,1999(1):8-12.
- [18] SOUZA F J, VIEIRA L G M, DAMASENO J J R, *et al.* Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone[J]. Powder Technology, 2017, 107(3):259-267.
- [19] 钟声.新型多孔溢流管式水力旋流器的研究[D].大庆:东北石油大学,2012.
- [20] 唐学林,余欣,任松长,等.固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M].郑州:黄河水利出版社,2006.