

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181389

锥体开缝对水力旋流器固液分离性能的影响

段继海¹, 黄帅彪^{1,2}, 高昶^{1,2}, 陈阿强², 黄青山^{2,3}⁽¹⁾ 青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042; ⁽²⁾ 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛 266101;⁽³⁾ 中国科学院过程工程研究所, 绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190)

摘要: 设计了一种新型锥体切向开缝结构的水力旋流器, 并针对锥体开缝长度、位置、数量以及开缝型式对水力旋流器分离性能的影响开展了实验研究。研究表明: 锥体开缝会使水力旋流器的压降大幅降低; 开缝长度由 10 mm 增大到 50 mm 的过程中, 分离效率呈现先增大后减小的趋势, 开缝长度为 20 mm 时最佳; 第二条缝隙的开缝位置由锥体底部向上移动的过程中, 分离效率也呈现出先增大后减小的趋势, 距底部缝隙 80 mm 时分离效率最高; 保持出口截面积不变, 在底部开 6 mm 长的缝隙, 另外在最佳开缝位置处开一条长缝隙时的分离效率最高, 且与底部缝隙呈反方向分布是最优的开缝型式, 与常规水力旋流器对比, 在高流量下其分离效率仅降低了 1.48%, 但压降降低可达 36.84%, 节能效果显著, 具有重要的应用价值。

关键词: 分离; 实验验证; 流动; 水力旋流器; 开缝结构; 压降; 分离效率

中图分类号: TQ 028.54

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 05-1823-09

Influence of slit structure in hydrocyclone conical section on solid-liquid separation performance

DUAN Jihai¹, HUANG Shuaibiao^{1,2}, GAO Chang^{1,2}, CHEN Aqiang², HUANG Qingshan^{2,3}

⁽¹⁾ School of Chemical Engineering and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China; ⁽²⁾ Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, Shandong, China; ⁽³⁾ Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A new type of hydrocyclone with a tangentially slitted structure is designed. The experimental study on the effect of the length, position, number and style of the slit on the separation performance of the hydrocyclone is carried out. It is shown that compared with the traditional hydrocyclone, the pressure drop of the slit-cone hydrocyclone is significantly reduced. The separation efficiency of the hydrocyclone tends to increase at first and then decrease when the length of the slit increases from 10 mm to 50 mm, and an optimal slit length of 20 mm is observed. In the process of moving the 20 mm slit upward from the first 6 mm slit at the bottom of the cone, the influence of the second slit position on the separation efficiency of the hydrocyclone is similar to that of the slit length. That is to say, it tends to increase at first and then decrease, and there is an optimal distance of 80 mm between the first slit and the second one. When keeps the cross-section area of the slits equaling to that of

收稿日期: 2018-11-20 修回日期: 2019-02-26

通信作者: 黄青山 (1978—), 男, 博士, 研究员, qshuang@ipe.ac.cn

第一作者: 段继海 (1970—), 男, 博士, 副教授, duanjihai@qust.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0301701); 国家自然科学基金项目 (21878318; 91434114); 中国科学院科研装备研制项目 (YZ201641); 中国科学院关键技术人才项目 (Y8110519DM)

引用本文: 段继海, 黄帅彪, 高昶, 陈阿强, 黄青山. 锥体开缝对水力旋流器固液分离性能的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(5): 1823-1831

Citation: DUAN Jihai, HUANG Shuaibiao, GAO Chang, CHEN Aqiang, HUANG Qingshan. Influence of slit structure in hydrocyclone conical section on solid-liquid separation performance[J]. CIESC Journal, 2019, 70(5): 1823-1831

underflow in the traditional hydrocyclone under the conditions of optimized slit length and position, it is found that the separation efficiency of one slit in the cone is better than that of two, and the style of two-slits located at opposite direction is the best among all the cases investigated. Compared with the classical hydrocyclone, the separation efficiency in the optimal slit-cone hydrocyclone can decrease only 1.48% while the absolute pressure drop can reduce as high as 36.84% at a high flow rate. Therefore, it is a promising hydrocyclone for industrial applications to save energy consumption.

Key words: separation; experimental validation; flow; hydrocyclone; slit structure; pressure drop; separation efficiency

引 言

水力旋流器是一种应用非常广泛的分离和分级设备。同其他工业设备一样,水力旋流器经历了从实际应用到理论研究,然后到再发展的过程。水力旋流器在固-液、气-液、液-液、气-液-固、气-液-液和固-液-液分离等多个领域得到应用^[1-3],其具有结构简单、质量轻、分离效率高、无运动部件、维修费用低、易于调节与调控、占地面积小、处理量大、应用范围广、操作范围宽等诸多优点^[4],被广泛应用于石油^[5-9]、化工^[10-12]、煤炭^[13-14]、矿物分离^[15-16]、环境保护^[17]、废物处理^[18]等诸多领域。随着学者们对水力旋流器内部流场不断探索、结构参数的不断优化及其应用范围的不断拓展^[19-22],作为传统的低能耗分离设备,水力旋流器的分离性能也在不断改进,其应用范围也延伸到了更多的高新技术领域,比如生物技术^[23-25]、纳米技术^[26]、材料科学技术^[27]以及新型浆态床技术^[28]等,应用前景十分广阔。

分离效率和压降是衡量水力旋流器性能的两个最主要的指标。为了提高水力旋流器的分离性能,研究者们对水力旋流器的结构参数进行了大量研究,取得了丰硕的成果。研究发现,影响水力旋流器分离性能的结构参数主要包括入口结构^[29]、柱段结构^[30]、溢流管结构^[31]、底流管结构^[32]以及锥体结构^[33]等。研究结果表明,锥体是固液分离的主要区域^[33],主要参数包括锥长、锥角、锥段数量及锥段形状等。近年来,对锥体结构的研究取得了显著的进展。Hamdy等^[34]通过数值模拟研究发现,随着锥段长度的增大,锥角逐渐减小,颗粒停留时间变长,切割粒度减小,微细颗粒溢流比例减小,从而总的分离效率提高。Monredon等^[35-36]研究发现双锥结构可以增大混合液的切向速度,增强颗粒所受到的离心力,有利于固体颗粒的分离。Chu等^[37]比较了抛物线型、双曲线型、螺旋型、圆环型及常规直锥型锥段

对分离性能的影响,发现抛物线型的锥段在分离效率、处理能力、分离精度和压降方面相对有一定优势,但效果并不十分明显,且加工难度增大,故一般工业应用中仍采用直锥型锥段。Huang等^[38]进行了旋风除尘器锥体开缝的研究,发现在锥体下部开缝会提高细颗粒的分离效率。Mazyan等^[39]研究发现锥体开缝会显著改善小颗粒的气固分离效率,但数值模拟研究发现压降也有所增加。迄今为止,锥体开缝对水力旋流器中固液分离效率和压降影响的研究尚无报道。

众所周知,降低压降可显著降低固液分离的操作费用,同时亦可拓展其应用范围。例如在近年发明的新型浆态床反应器中^[28],将定向流动的内环流反应器^[40-43]与可廉价进行固液分离的水力旋流器^[31,33]结合在一起,实现了反应器内混合、反应和分离的过程强化,首套装置不仅实现了浆态床的连续化生产,而且可将直径大于57.9 μm 的氧化铝颗粒截留在浆态床反应器中,可大幅节省投资和操作费用,具有重要的应用前景。然而,在这种类型的反应器中,水力旋流器的入口所需推动力完全由内环流反应器中流体的势能和循环动力提供,远低于淤浆泵所提供的动力,压降的高低决定了水力旋流器能否真正实现固液分离的功能,因此,节能、高效的水力旋流器是其成功运行的首要条件。一般来说^[28],旋风除尘器的压降在0.5~1 kPa,而水力旋流器的压降甚至高达100~200 kPa,很可能是由于水力旋流器压降远高于旋风除尘器,导致在实际工业应用中有固体可循环利用的循环流化床而无固体可简单循环利用的浆态床。由上可知,在这种无须额外动力即可实现固液自动分离和循环的新型浆态床反应器中,进一步发展低能耗的水力旋流器变得非常重要。

为了提高水力旋流器的分离性能,本研究以筒体直径为50 mm的小直径水力旋流器为研究对

象^[31,33],在密封底流口的情况下,对水力旋流器的锥体进行了切向开缝、导流,并在锥体外部设计了一套筒从而收集从开缝处流出的浓缩物料。首先,本文对水力旋流器锥体底部开缝,定性研究了锥体开缝对水力旋流器分离性能的影响;其次,研究了锥体开缝长度对分离性能的影响,确定了最佳开缝长度;再者,在保持出口面积和无开缝水力旋流器相同的情况下,进行了锥体开缝位置的优化研究;最后,在最优开缝位置和长度的条件下,探讨开缝数量和开缝型式对水力旋流器分离性能的影响,从而确定了最优的锥体开缝结构。研究表明,这种开缝结构的水力旋流器在保持固液分离效率基本不变的情况下,可大幅降低水力旋流器的能耗,具有重要的工业应用价值。

1 实验部分

1.1 实验装置

本研究采用小直径水力旋流器,其结构如图1(a)所示,渐近线进口与圆柱段截面为18 mm×6 mm的矩形,溢流管插入深度60 mm。为了研究锥体开缝结构对水力旋流器分离性能的影响,本实验设计、加工了系列锥体开缝宽度为2 mm的新型水力旋流器,结构如图1(b)所示。根据锥体开缝的狭缝长度和开缝位置进行编号,如表1所示,其中 a' 、 c' 分别

表1 锥体开缝结构编号及对应尺寸

Table 1 Serial numbers defined for different slit-cones

Type	Cones with different slits structure				
	a/mm	b/mm	c/mm	a'/mm	c'/mm
A	0	0	0	0	0
B	26	0	0	26	0
C	10	0	0	10	0
D	20	0	0	20	0
E	30	0	0	30	0
F	40	0	0	40	0
G	50	0	0	50	0
H	6	20	20	6	20
I	6	40	20	6	20
J	6	80	20	6	20
K	6	120	20	6	20
L	6	160	20	6	20
M	6	200	20	6	20
N	6	80	46	0	0
O	6	80	0	0	46
P	6	80	40	6	0

代表 a 、 c 的轴对称位置。本研究设计的新型锥体开缝水力旋流器的柱段、入口形式、溢流管以及锥段长度都与常规水力旋流器一致,锥体开缝方向与水力旋流器内部流体流动方向相同,从而确保内部固含率较高的流体在经过锥体开缝位置处沿切向流出到外部套筒内,从而实现固体颗粒与清洁液体的分离。采用锥体切向开缝的方式可以在最大程度上保持水力旋流器内部流场的稳定,同时可将外旋流分离到锥壁上的颗粒从开缝处分离。

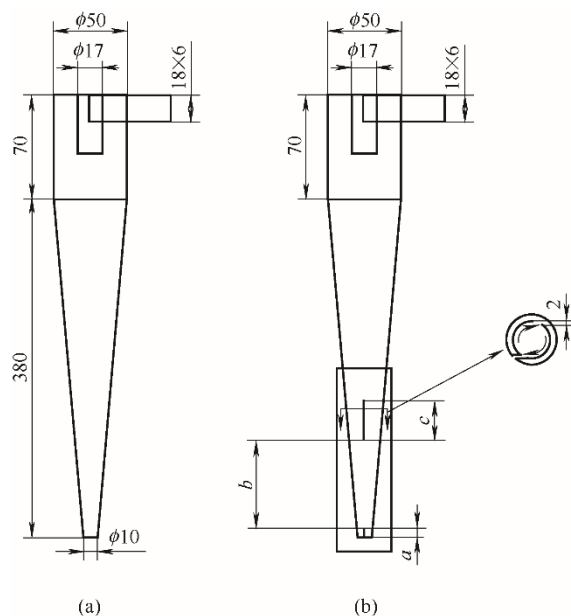


图1 传统和开缝水力旋流器的结构示意图

Fig.1 Sketch of traditional and slit-cone hydrocyclones

1.2 实验方法

为了减小实验误差,本实验数据均采用测量3次以上取平均值的方法来计算水力旋流器的分离效率。实验过程中进口与溢流口流量采用电磁流量计(型号:XFE025Y16F1BM1R)测量,进口和出口压力通过压力计测量并通过扩散硅压力变送器(型号:XFYL-800-1.6)转换成数字信号后读出。采用过滤称重法测量颗粒浓度,分别对溢流口与底流口取样进行抽滤、干燥和称重。通过称量样本干燥后砂子的质量计算分离效率。实验所用物料为质量分数为0.2%的棕刚玉细粉,物料的真实密度为 $3800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,物料M1的粒径中值 d_{50} 为 $15.63 \mu\text{m}$,物料M2的粒径中值 d_{50} 为 $28.59 \mu\text{m}$,这两种物料的粒度分布通过激光粒度分布仪(型号:BT-9300Z)测量,其分布如图2所示。

在实验中通过控制入口与溢流或底流管路上的阀门保持底流与入口进料流量之比为0.2不变,

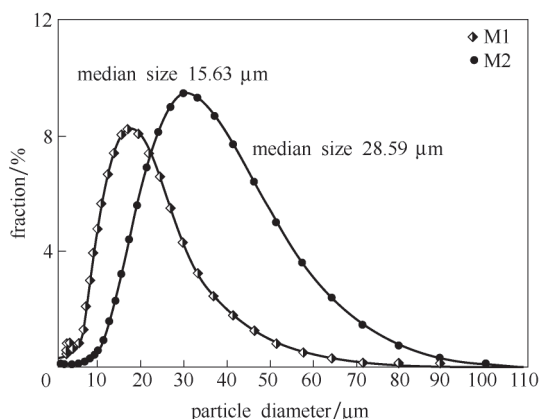


图2 两种实验物料的粒度分布

Fig.2 Particle size distributions of two kinds of tested particles

主要研究了水力旋流器锥体开缝长度、开缝位置、开缝数量及开缝型式对其分离性能的影响。其中, Type A代表图1(a)中所示的常规无开缝的水力旋流器; Type B表示在锥体底部开了长为26 mm缝隙的水力旋流器,从而保证锥段开缝的缝隙截面积与Type A中底流管的出口截面积相同,可进行开缝与否对分离性能的定性比较; Type C ~ Type G分别表示锥段底部开缝长度由10 mm不断增大到50 mm的水力旋流器,有利于确定最佳开缝长度; Type H ~ Type M表示不同开缝位置的水力旋流器,皆保留底部6 mm的缝隙防止底部颗粒的堵塞,同时保持在锥体开缝的总面积与常规水力旋流器底流管出口的截面积相同,将20 mm长的缝隙依次往上移动20、40、80、120、160、200 mm,有利于初步确定最佳的轴向开缝位置; Type N、Type O和Type P是具有最佳开缝位置和开缝长度但开缝数量及开缝型式不同的水力旋流器,有利于确定最佳开缝数量及开缝型式。

2 实验结果与讨论

2.1 锥体开缝对分离性能的影响

首先,本文进行了锥体开缝与否对固液分离性能的定性研究。锥体开缝的水力旋流器与常规水力旋流器分别用于分离两种不同粒度的物料(M1和M2)时,进口流量对分离效率和压降的影响如图3所示。对于两种不同粗细的物料,在相同进口流量下,锥体开缝水力旋流器的分离效率与常规水力旋流器相比均有不同程度的降低,但其压降也同样显著地减少。

从图中可以看出,对于较粗的物料M2,在进口

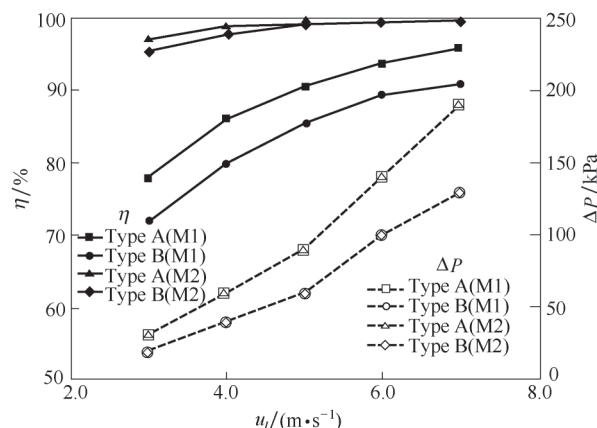


图3 两种不同物料下进口流速对传统和锥体开缝水力旋流器分离效率和压降的影响

Fig.3 Influence of fluid inlet velocity on separation efficiency and pressure drop with two different solid materials in traditional and slit-cone hydrocyclones

流速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,锥体开缝水力旋流器的分离效率为95.59%,压降为20 kPa,而常规水力旋流器分离效率为96.96%,压降为30 kPa,效率相差1.37个百分点,压降差值为10 kPa。随着进口流速不断地增大,锥体开缝水力旋流器与常规水力旋流器的分离效率都逐渐升高,在进口流速高于 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,二者的分离效率都高于99%,特别是在进口流速增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,二者分离效率均接近100%,差值仅为0.08个百分点,可以认为基本相同。因此,对于较粗的物料M2,锥体开缝水力旋流器与常规水力旋流器的分离效率基本一致,都可以基本实现完全分离,很难再对两种水力旋流器的分离效率进行对比。因此,在后续实验中,本研究选用较细的物料M1来进一步做两种水力旋流器的对比实验。

选用粒度较小的物料M1进行实验后,锥体开缝的水力旋流器的分离效率与常规水力旋流器相比有较为明显的差距,降低幅度比较明显。这两种水力旋流器在所有的实验流速下都无法实现物料的完全分离。在入口流速由 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 过程中,锥体开缝的水力旋流器与常规水力旋流器的分离效率都随着进口流速的增大而增大。在入口流速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,常规水力旋流器的分离效率和压降分别为77.91%和30 kPa,而锥体开缝的水力旋流器的分离效率和压降分别为71.78%和20 kPa。也就是说,在低流速下,锥体开缝的水力旋流器的分离效率比常规水力旋流器的分离效率要低6.13个百分点,但其压降比锥体开缝的水力旋流器也要低1/3左右。当入口流速增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

后,常规水力旋流器的分离效率和压降分别为95.68%和190 kPa,而锥体开缝的水力旋流器的分离效率和压降分别为91.12%和130 kPa。与常规水力旋流器相比,锥体开缝的水力旋流器随着流速的增加,其分离效率降低值从6.13个百分点减小至4.56个百分点,其压降降低幅度从33.33%减小至31.58%,减小的压降绝对值高达60 kPa。由上面的分析可知,锥体开缝的水力旋流器有一明显的优点,即在高入口流速下,在对微细物料分离效率保持基本不变的情况下可大幅降低分离的能耗。这对分离粒度要求相对宽松而对分离压降要求比较苛刻的场合如浆态床的混合与分离的过程强化等工艺过程^[28],显得尤为重要。

由以上分析可知,与常规水力旋流器相比,锥体开缝的水力旋流器分离效率有所降低,但能耗可大幅减少,不太适用于处理量较小并对分离效率要求苛刻的场合;处理量越大,能耗降低的绝对值越大。由于工业应用中水力旋流器处理量一般都较大,在对分离要求较低且处理量较大时^[28],锥体开缝对水力旋流器分离效率影响较小,能起到显著的节能降耗作用,具有重要的实际应用价值。值得注意的是,本研究发现锥体开缝的水力旋流器使固液分离效率略微降低但能耗会显著降低,与文献中^[38-39]的结论即气固分离效率和压降皆会增加是相反的。其原因可能是本研究的水力旋流器开缝结构与Mazyan等^[39]所用旋风分离器开缝结构有所不同。本研究所用水力旋流器底流管处完全封闭,被分离的物料完全从开缝处沿切向流出至外部的底流出口管,而Mazyan等^[39]的旋风除尘器其流体需流出较长的狭缝,故阻力较大,导致压降有所增加。此外,本研究锥体开缝后,流体流动路径变短,压力损失减小,因此,压降会显著降低。但是,锥体开缝后,未能在开缝处分离出去的颗粒仍会沿着外旋流向下做切向旋转运动。此时由于颗粒的切向速度降低对离心力影响较大,分离效果减弱,使部分颗粒被内旋流夹带从溢流排出,从而分离效率略微降低。

2.2 锥体开缝长度的优化

在常规水力旋流器的正常运行过程中,液固混合物中的浓缩重介质沿着水力旋流器的外壁螺旋向下做离心运动最后从底流口排出,密度较小的清洁介质物料则沿着内旋流从溢流口流出。对于新型锥体开缝的水力旋流器,重介质物料在离心力的

作用下运动到锥体壁面跟随外旋流向下运动,然后经过开缝位置处切向流出水力旋流器,最后进入到套筒内从底部排出。在这个过程中,锥体开缝的长度、开缝位置以及开缝数量和开缝型式的变化都会对水力旋流器的分离性能产生影响。为了验证不同开缝长度对水力旋流器分离性能的影响,本研究设计、加工了在锥体开两条对称切向缝隙且开缝长度由10 mm不断增大到50 mm的锥体结构,分别定义为Type C~Type G。不同开缝长度下,进口流量对水力旋流器分离效率和压降的影响关系曲线如图4所示。

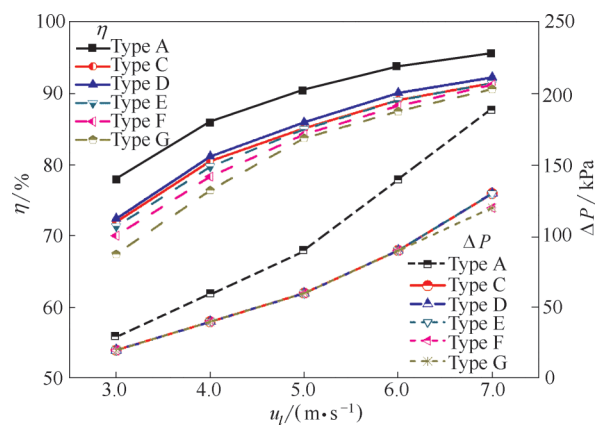


图4 不同开缝长度下进口流速对分离效率和压降的影响
Fig.4 Influence of fluid inlet velocity on separation efficiency and pressure drop with different slit lengths

由图可以看出,锥体开缝后,水力旋流器的分离效率与不开缝的常规水力旋流器相比有所降低;锥体开缝长度从10 mm增大到50 mm的过程中,水力旋流器的分离效率呈现先增大后减小的趋势,锥体开两条缝隙且其缝隙长度为20 mm的Type D结构具有最高的分离效率;相比于常规水力旋流器,锥体开缝水力旋流器的压降均显著降低,起到了很好的节能降耗作用,但锥体开缝后开缝长度变化对压降的影响不明显。定量地说,在进口流速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Type A的分离效率为77.91%,Type C~Type G结构所对应的分离效率分别为72.03%、72.47%、71.39%、70.06%、67.49%,与常规水力旋流器Type A相比,Type D的分离效率下降最小为5.44个百分点,Type G的分离效率下降最大为10.42个百分点;在入口流速增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Type A的分离效率为95.68%,Type C~Type G结构所对应的分离效率分别为91.49%、92.31%、91.47%、91.26%、90.68%,Type D的分离效率相比于Type A下降了3.37个百分点,而Type G的分离效率下降了5.00个百分点。

因此可以看出,随着入口流速的增大,锥体开缝的水力旋流器与常规水力旋流器的分离效率差值越来越小,Type D由5.44个百分点减小到3.37个百分点,Type G由10.42个百分点减小到5.00个百分点。锥体开缝后,压降降低比较明显:对Type D来说,入口流速从 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其压降从20 kPa增加至130 kPa,与常规水力旋流器相比,低流速时压降降低了33.33%,在高流速时降低了31.58%;开缝长度变化对压降变化影响并不显著,仅Type F和Type G的压降在高入口流量下有所下降,降低最大高达36.84%。

综上所述,开缝长度对水力旋流器的分离效率有显著的影响,开缝长度太小会降低颗粒从切向缝隙流出的概率,分离效率下降,而开缝长度增大相当于增大底流出口面积,大量的流体更易于从锥体切向缝隙流出,进入外部套筒内从底流排出,而实验过程中通过调节入口和出口阀门控制底流出口流量与进料流量之比为0.2,当调节底流出口阀门时,被分离的流体在套筒内受到压力增大,会反作用到锥体内部的流体,从而影响到流场的分布,进而影响分离效率,故存在一个最佳值。开缝长度为20 mm的Type D相较于其他开缝长度的水力旋流器,其分离效率更高。与常规水力旋流器Type A相比,开缝的Type D压降更低,能够节能30%以上。

2.3 锥体轴向开缝位置的优化

水力旋流器锥体开缝位置变化可能会对其分离性能产生一定的影响。在保持底部两条缝隙高度为6 mm的情况下,不断向上移动长20 mm的两条缝隙,从而确定轴向上的最佳开缝位置。入口流速对锥体六个不同开缝位置的水力旋流器的分离效率和压降的影响如图5所示。由图中可以看出,在开缝位置由Type H向上移动到Type M过程中,水力旋流器的分离效率呈现先增加后减小的趋势,在Type J也就是轴向上两条缝隙上移80 mm时分离效率达到最佳。但是,调节开缝位置到最佳后,其分离效率仍略低于常规水力旋流器;开缝位置的变化对水力旋流器的压降影响较为明显,开缝位置在向上移动的过程中,压降总体呈现下降的趋势。

相较于开缝长度对水力旋流器分离性能的影响,开缝位置对其影响更加明显。在入口流速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,常规水力旋流器Type A的分离效率为77.91%,Type J对应的分离效率为75.77%(相差2.14个百分点),而开缝长度考察中的Type D的分离效

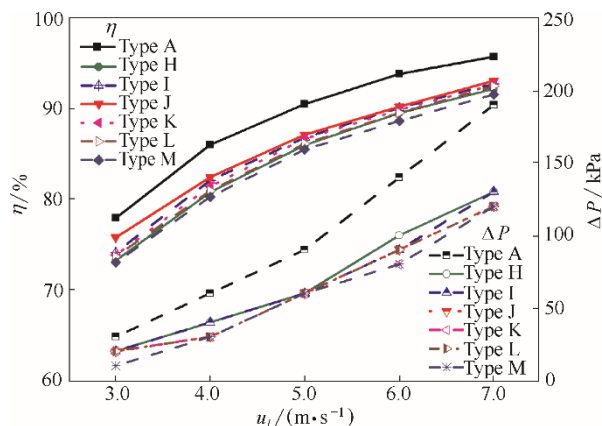


图5 不同开缝位置下进口流速对分离效率和压降的影响
Fig.5 Influence of fluid inlet velocity on separation efficiency and pressure drop with different slit locations

率与Type A的分离效率相差5.44个百分点;当入口流速增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,常规水力旋流器Type A和Type J的分离效率分别为95.68%和93.04%(相差2.64个百分点),而开缝长度考察中的Type D的分离效率比Type A下降了3.37个百分点。由此可知,将20 mm长的切向缝隙向上移动到80 mm位置处的Type J相比于Type D具有更好的分离效率。由图中可以看出,锥体开缝位置变化对水力旋流器压降影响也比较明显,与常规水力旋流器Type A相比,Type H~Type M的压降依次降低。在入口流速由 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的过程中,Type H的压降最高,Type M的压降最小。也就是说,将20 mm长的切向缝隙向上移动的过程中,压降呈现出下降的趋势,有时相差无几,而最大差别可达20 kPa。分离效率最高的Type J在入口流速为 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的压降为120 kPa,与常规水力旋流器相比,压降降低了36.84%,节能效果十分明显。综合分析可知,颗粒在水力旋流器内部随流体流动过程中,随着锥体直径的变小,颗粒运动速度增大,所受离心力增强,大颗粒首先被分离到器壁上,沿着外旋流向下做旋转运动,小颗粒也逐渐被分离到器壁上。从理论上来说,若能设计锥部开缝位置刚好至大量颗粒被分离到器壁之处,易使颗粒被分离出去,从而存在最佳的开缝位置。通过本研究发现,Type J的分离效率比其他位置处的分离效率要高,因此Type J的位置可能就是大量颗粒被分离到器壁时的位置。

通过本实验的研究可以发现,锥体开缝位置和长度变化都会对水力旋流器的分离性能产生影响,在最佳开缝位置以及最佳开缝长度时,皆可实现分离效率基本不变而压降降低36%以上(即绝对压降

可下降高达 70 kPa)的节能目标,这种新结构若用于多个水力旋流器串联体系,其整体节能效果将尤为可观。

2.4 锥体开缝数量及开缝型式的优化

基于以上对锥体开缝位置及开缝长度的实验研究,得出开缝长度和开缝位置变化都对水力旋流器的分离性能有显著影响。针对最佳开缝位置及最佳开缝长度,本研究进一步探讨在最佳开缝位置 b 等于 80 mm 处,保持出口截面积与不开缝水力旋流器相一致,在锥体分别开数量为 1 条和 2 条的缝隙,研究反向开缝和同向开缝等开缝型式对水力旋流器分离性能的影响,具体参数详见表 1 中 Type J、Type N、Type O、Type P。

不同进口流速下,开缝数量及开缝型式对水力旋流器分离效率及压降的影响如图 6 所示。由图可以看出,在锥体底部开两条 6 mm 的缝隙后,另外在轴向开缝位置 80 mm 处开一条 40 mm 缝隙的 Type P 的分离效率高于开两条 20 mm 缝隙的 Type J 的分离效率;在较低入口流速 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,二者分离效率相差 2.61 个百分点,当流速增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,分离效率差值逐渐减小到 0.59 个百分点。Type P 分离效果高于 Type J 的原因很可能是在最优开缝位置 80 mm 处,已经有大量固体颗粒在离心力的作用下随着外旋流沿着锥壁向下旋转运动,虽然 Type P 和 Type J 开缝处截面积相同,但 Type P 在最优位置处开一条缝隙比 Type J 在最优位置开两条对称缝隙在轴向上要长,从而导致固体颗粒在向下旋转运动过程中其可从缝隙流出分离器的停留时间更长。因此,颗粒从 Type P 缝隙流出的概率更大,导致 Type P 的分离效率高于 Type J,但二者压降并无明显差别。

由上可知,保持底流出口截面积不变的情况下,在锥体底部开两条 6 mm 缝隙后,在最优开缝位置处开一条长缝隙更有利于水力旋流器中的固液分离。为了更进一步研究开缝型式对水力旋流器分离性能的影响,本研究又设计加工了在锥体底部只开一条 6 mm 的切向缝隙后,在最优开缝位置 80 mm 处与底部 6 mm 缝隙同向或反向开一条 46 mm 缝隙,分别定义为 Type N 和 Type O。从图 6 的结果可以看出,反向开缝结构 Type O 的分离效率明显优于同向开缝的 Type N 结构;在入口流速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Type N 和 Type O 的分离效率分别为 76.76% 和 79.36% (相差 2.60 个百分点),当流速逐渐增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,二者分离效率分别为 93.30% 和 94.00%

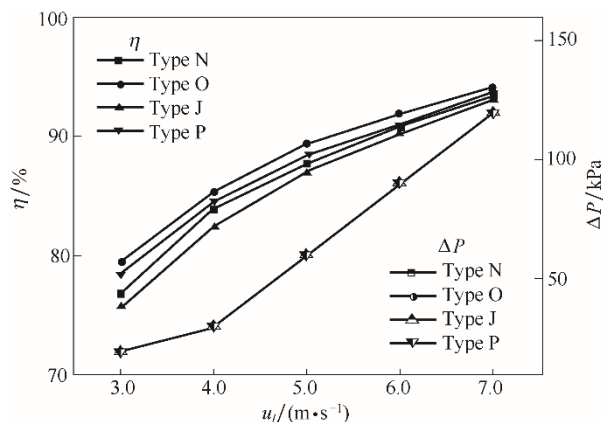


图6 不同开缝数量及开缝形式下进口流速对分离效率和压降的影响

Fig.6 Influence of fluid inlet velocity on separation efficiency and pressure drop with different slit numbers and styles

(相差 0.70 个百分点)。这两种结构其分离性能的差异很可能与水力旋流器锥体内非对称流场相关,即根据旋转流场经典的“转圈”理论^[44],含高固含率的重相“浆料带”在锥体内旋转下降的过程中,在反向一侧的开缝结构使重相“浆料带”与底流出口接触的机会更多,因此具有较高的分离效率。值得一提的是,在高流量下,Type O 结构相较于常规水力旋流器 Type A,其分离效率仅降低了 1.48 个百分点,但其绝对压降却降低了 70 kPa (即降低了 36.84%),节能效果非常显著。若能将这种结构应用到工业生产中,将大大节约能耗,降低生产成本。

3 结 论

(1)相较于传统固液分离水力旋流器,锥体切向开缝的水力旋流器可在保持分离效率基本不变的情况下大幅降低压降,节能效果显著,尤其适用于对分离效率要求不高的高处理量工况的固液分离。

(2)锥体开缝长度对水力旋流器的分离效率有一定影响,随着开缝长度由 10 mm 增大到 50 mm,水力旋流器的分离效率呈现先增大后减小的趋势,最优开缝长度为 20 mm,开缝长度变化对压降影响不明显。

(3)实验验证了锥体开缝位置变化对水力旋流器的分离性能有一定的影响,开缝位置由下向上的移动过程中,水力旋流器的分离效率呈现先增大后减小的趋势,在开缝位置 80 mm 处有最大的分离效率,同时其压降随着开缝位置向上移动的过程中呈

现减小的趋势。

(4)保持出口截面积不变的情况下,底部开缝长度为6 mm,另外在最佳开缝位置处开一条长的缝隙比开两条缝隙的分离效率高,且反向开缝结构比同向开缝结构的分离效率高,在高入口流量时对平均粒径为15.63 μm 微细物料的分离效率可高达94.00%,仅比传统水力旋流器分离效率降低1.48个百分点,但其绝对压降降幅却高达36.84%,具有重要的应用前景。

符 号 说 明

- a ——锥底部缝隙长度,mm
 a' —— a 轴对称位置缝隙长度,mm
 b —— a 与 c 两缝隙间隔长度,mm
 c ——锥段上部缝隙长度,mm
 c' —— c 轴对称位置缝隙长度,mm
 D ——筒体直径,mm
 ΔP ——压降,kPa
 u_i ——流体进口速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 η ——分离效率,%

参考文献

- [1] Bradley D. The Hydrocyclone: International Series of Monographs in Chemical Engineering[M]. Pergamon, London: Elsevier, 2013.
- [2] Svarovsky L, Thew M. Hydrocyclones: Analysis and Applications [M]. Letchworth, UK: Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] Svarovsky L. Solid-Liquid Separation[M]. London, UK: Elsevier, 2000.
- [4] 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, 2010, **49** (5): 460-467.
- [5] Mognon J L, da Silva J M, Bicalho I C, et al. Modular mini-hydrocyclone desilter type of 30 mm: an experimental and optimization study[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, **129**: 145-152.
- [6] Zhao L, Jiang M H, Xu B, et al. Development of a new type high-efficient inner-cone hydrocyclone[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, **90**(12): 2129-2134.
- [7] Zhao L, Li Y, Xu B, et al. Design and numerical simulation analysis of an integrative gas-liquid-solid separation hydrocyclone [J]. Chemical Engineering & Technology, 2015, **38**(12): 2146-2152.
- [8] 马艺,王振波,金有海.导叶式液液旋流器内油相浓度分布数值模拟[J].化工学报,2011, **62**(2): 420-426.
Ma Y, Wang Z B, Jin Y H. Simulation of oil-phase concentration field in vane-guided hydrocyclone[J]. CIESC Journal, 2011, **62**(2): 420-426.
- [9] 马艺,金有海,王振波.两种不同入口结构型式旋流器内的流场模拟[J].化工进展,2009, **28**(S1): 497-501.
Ma Y, Jin Y H, Wang Z B. Simulation the flow field in hydrocyclone with two different kinds of inlet structure[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, **28**(S1): 497-501.
- [10] Xu Y X, Liu Y, Zhang Y H, et al. Effect of shear stress on deoiling of oil-contaminated catalysts in a hydrocyclone[J]. Chemical Engineering & Technology, 2016, **39**(3): 567-575.
- [11] Huang Q S, Yang C, Yu G Z, et al. CFD simulation of hydrodynamics and mass transfer in an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model[J]. Chemical Engineering Science, 2010, **65**(20): 5527-5536.
- [12] 黄青山,张伟鹏,杨超,等.环流反应器的流动,混合与传递特性[J].化工学报,2014, **65**(7): 2465-2473.
Huang Q S, Zhang W P, Yang C, et al. Characteristics of multiphase flow, mixing and transport phenomena in airlift loop reactor[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(7): 2465-2473.
- [13] Chu K, Chen J, Yu A B, et al. Numerical studies of multiphase flow and separation performance of natural medium cyclones for recovering waste coal[J]. Powder Technology, 2017, **314**: 532-541.
- [14] Huang Q S, Zhang W P, Yang C. Modeling transport phenomena and reactions in a pilot slurry airlift loop reactor for direct coal liquefaction[J]. Chemical Engineering Science, 2015, **135**: 441-451.
- [15] 王剑刚,张艳红,白兆圆,等.进口尺寸对旋转流场分离特征的影响[J].化工学报,2014, **65**(1): 205-212.
Wang J G, Zhang Y H, Bai Z Y, et al. Effect of inlet size on separation flow field inside hydrocyclone[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(1): 205-212.
- [16] Wang H L, Zhang Y H, Wang J G, et al. Cyclonic separation technology: researches and developments[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, **20**(2): 212-219.
- [17] Son J H, Hong M, Yoo H C, et al. A multihydrocyclone water pretreatment system to reduce suspended solids and the chemical oxygen demand[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57** (7): 2996-3001.
- [18] Yu J F, Fu J, Cheng H, et al. Recycling of rare earth particle by mini-hydrocyclones[J]. Waste Management, 2017, **61**: 362-371.
- [19] Cullivan J, Williams R, 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.
- [20] Xu Y, Song X, Sun Z, et al. Simulation analysis of multiphase flow and performance of hydrocyclones at different atmospheric pressures[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, **51**(1): 443-453.
- [21] Wang L Y, Zheng Z C, Wu Y X, et al. Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, **21**(3): 408-414.
- [22] Olson T, van Ommen R. Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model[J]. Minerals Engineering, 2004, **17**(5): 713-720.
- [23] Santos S, Jones K, Abdul R, et al. Treatment of wet process hardboard plant VOC emissions by a pilot scale biological system [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **37**(3): 261-270.
- [24] Guo X, Yao L S, Huang Q S. Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae[J]. Bioresource Technology, 2015, **190**: 189-195.

- [25] Huang Q S, Jiang F H, Wang L Z, et al. Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms[J]. Engineering, 2017, **3**(3): 318–329.
- [26] Neesse T, Dueck J, Schwemmer H, et al. Using a high pressure hydrocyclone for solids classification in the submicron range[J]. Minerals Engineering, 2015, **71**: 85–88.
- [27] Fan P P, Peng H T, Fan M Q. Using a permanent magnetic field to manipulate the separation effect of a dense medium cyclone[J]. Separation Science and Technology, 2016, **51**(11): 1913–1923.
- [28] Yang T, Geng S J, Yang C, et al. Hydrodynamics and mass transfer in an internal airlift slurry reactor for process intensification[J]. Chemical Engineering Science, 2018, **184**: 126–133.
- [29] Hwang K J, Hwang Y W, Yoshida H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **85**: 62–68.
- [30] Mokni I, Dhaouadi H, Bournot P, et al. Numerical investigation of the effect of the cylindrical height on separation performances of uniflow hydrocyclone[J]. Chemical Engineering Science, 2015, **122**: 500–513.
- [31] 刘鸿雁, 王亚, 韩天龙, 等. 水力旋流器溢流管结构对微细颗粒分离的影响[J]. 化工学报, 2017, **68**(5): 1921–1931.
- Liu H Y, Wang Y, Han T L, et al. Influence of vortex finder configurations on the separation of fine particles[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(5): 1921–1931.
- [32] Ni L, Tian J, Zhao J. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function[J]. Separation and Purification Technology, 2016, **171**: 270–279.
- [33] 刘鸿雁, 韩天龙, 王亚, 等. 水力旋流器新型出口挡板结构对分离性能的影响[J]. 化工学报, 2018, **69**(5): 2081–2088.
- Liu H Y, Han T L, Wang Y, et al. Influence of new outlet configurations on hydrocyclone separation performance[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(5): 2081–2088.
- [34] Hamdy O, Bassily M A, El-Batsh H M, et al. Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, **46**: 81–97.
- [35] Monredon T, Hsieh K, Rajamani R. Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions[J]. International Journal of Mineral Processing, 1992, **35**(1/2): 65–83.
- [36] Vakamalla T R, Korupolu V B R, Arugonda R, et al. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model[J]. Separation and Purification Technology, 2017, **175**: 481–497.
- [37] Chu L Y, Chen W M, Lee X Z. Effect of structural modification on hydrocyclone performance[J]. Separation and Purification Technology, 2000, **21**(1/2): 71–86.
- [38] Huang A N, Ito K, Fukasawa T, et al. Classification performance analysis of a novel cyclone with a slit on the conical part by CFD simulation[J]. Separation and Purification Technology, 2018, **190**: 25–32.
- [39] Mazyan W, Ahmadi A, Brinkerhoff J, et al. Enhancement of cyclone solid particle separation performance based on geometrical modification: numerical analysis[J]. Separation and Purification Technology, 2018, **191**: 276–285.
- [40] 张立英, 黄青山. 气升式环流反应器的理论研究进展[J]. 过程工程学报, 2011, **11**(1): 162–173.
- Zhang L Y, Huang Q S. Research progress in the modeling theory of airlift loop reactor[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, **11**(1): 162–173.
- [41] Huang Q S, Yang C, Yu G Z, et al. 3-D simulations of an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model[J]. Chemical Engineering & Technology, 2007, **30**(7): 870–879.
- [42] Huang Q S, Yang C, Yu G Z, et al. Sensitivity study on modeling an internal airlift loop reactor using a steady 2D two-fluid model[J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, **31**(12): 1790–1798.
- [43] Yang C, Mao Z S. Numerical Simulation of Multiphase Reactors with Continuous Liquid Phase[M]. Amsterdam: Academic Press, 2014.
- [44] 金国森. 除尘设备设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Jin G M. Design of Dust Removal Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.