

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.003

导叶结构对直流导叶式气液分离器性能的影响

刘爱兰¹, 杨帆^{1,2}, 郭雪岩^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要:为了得到高效低阻的液滴分离装置,设计了不同结构的直流导叶式气液分离器模型,采用 FLUENT 软件中 RNG κ - ϵ 湍流模型和离散颗粒(DPM)模型,对不同导叶结构的分离器内流场进行模拟,得到了导叶结构参数对分离器内的压降特性、速度分布、以及不同粒径分离效率的影响规律。结果表明:导向叶片个数增加或者出口角的减小都能使分离器分离效率显著提高,但是分离器压降也会增大;随着颗粒粒径的增大,分离效率升高,当粒径大于 35 μm 时,分离效率几乎达到 100%;导向叶片个数越多,叶片出口角越小,分离效率越高。数值模拟结果为设计低阻、高效的分离器提供了理论依据。

关键词:直流导叶式气液分离器;导叶;分离效率;FLUENT 软件

中图分类号:TQ051.8 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)04-0011-07

Effect of Guide Vane Structure on Performance of Axial Gas-Liquid Separator

LIU Ailan¹, YANG Fan^{1,2}, GUO Xueyan^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Shanghai Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to obtain high efficiency and low resistance droplet separation device, different structures of axial vane type gas-liquid separators were designed. The fluent RNG κ - ϵ model and discrete particle model (DPM) were used to simulate the flow field inside the axial vane type gas-liquid separators, which obtained the influence rule of the guide vane structure parameters on the velocity distribution, the pressure drop and the separation efficiency. The results showed that the increase of the number of guide vanes and the decrease of the outlet angle could both improve the separation efficiency of the separator, but the pressure drop would increase as well; The separation efficiency raised with the increase of particle size, when the particle size was greater than 35 μm , the separation efficiency almost reached 100%, and the more the number of guide vanes and the smaller the outlet angle of the blade, the higher the separation efficiency. The simulation results provide theoretical basis for the design of low resistance and high efficiency separators.

Key words: axial vane type gas-liquid separator; guide vane; separation efficiency; FLUENT

气液分离器是回收烟气中残留液滴的装置,按气流流动方向主要分为逆流反转式分离器和直流(轴流)式分离器。其中直流式旋风分离器由 Umeny 于 1948 年提出^[1],结构简单,且压降较低,由于其分离效

率相对较低,提出后多年内未得到充分研究。近年来,随着经济飞速发展及全球能源逐渐枯竭,对节能降耗要求进一步提高,直流导叶式气液分离器又重新引起了研究人员的注意^[2]。

收稿日期:2015-12-29;修回日期:2016-03-25

基金项目:国家自然科学基金(51176127);上海市自然科学基金(13ZR1428700);上海市科学技术委员会科研计划项目(13DZ2260900)。

作者简介:刘爱兰(1990),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为计算流体力学。通信作者:杨帆,男,博士,副教授。E-mail:usstyf@126.com

直流导叶式气液分离器主要由导流锥体,导向叶片,旋流管本体以及排气管组成^[3]。工作时含液气流由轴向进入气液分离器,通过导流叶片产生向前的旋转运动,导向叶片给混合物提供一个切向加速度,从而形成分布于分离器内部的离心力场,在离心力场和重力场的联合作用下,密度大的液体向管壁流动,从下部液体出口流出,而净化后的气体则直接从中心的排气管流出。由于直流导叶式旋流器气液两相流从轴向进入,且旋流由导向叶片产生,没有改变气流的方向,导向叶片与流体之间摩擦力消耗较低,保持了主气流的稳定性,所以其压降较低。但是排气与排液方向一致,液滴不易及时排出,使得分离效率稍低一些;然而在分离效率相同时,直流导叶式气液分离器的压降比逆流反转式要低很多^[4-5]。

气液分离器内部的流动属于两相流动,分离过程复杂。许多研究人员用实验来测定旋流器内流场,由于实验方法耗费大量人力物力,结果不具有通用性,因此也很难设计出满足各种生产需要的气液旋流器。随着计算机技术的蓬勃发展,计算流体力学(CFD)得到广泛普及^[6-7],在国内,CFD技术的应用也逐渐由航空航天领域扩展到与流动和传热有关的各个行业^[8]。Boysan等人^[9]通过使用基于代数应力模型和标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型相结合的混合湍流模型模拟了工业流体的流动状态,发现标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型模拟强旋流场时会出现湍流黏度超限的现象。后来,Fraser等人^[10]提出了修正的 $\kappa-\varepsilon$ 模型模拟三维旋风分离器,证明模拟的结果与实验有较好的一致性。Hoekstra等^[11]对 $\kappa-\varepsilon$ 、RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型做了对比研究;Gong等^[12]采用RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型模拟了螺旋角对轴流式旋风分离器的影响,证明了该模拟方法的可靠性和精确性。计算流体力学(CFD)技术已被证明是用于旋风分离器内发生的两相流动和分离现象研究的有效工具。

本文利用计算流体力学方法,采用RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型及DPM模型对直流导叶式旋流器内部流场进行了数值计算,探索了导向叶片结构参数对旋流器内部流场、压降分布的影响及分离效率随粒径的变化情况。

1 模型建立及网格划分

1.1 物理模型

本文中研究的气液分离器几何模型结构示意图如图1所示。

气液分离器上部入口直径200 mm。分离段长度500 mm,排气管直径140 mm,叶片外缘直径与筒体直径相等为200 mm,内缘直径即轮毂直径为50 mm,叶

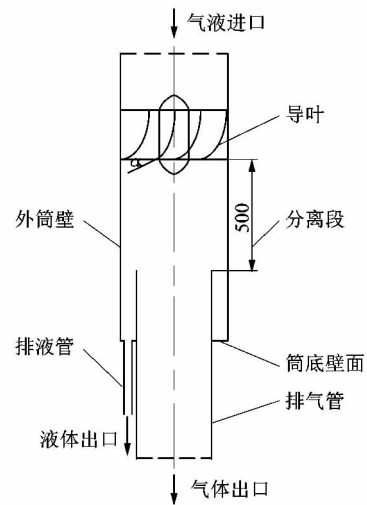


图1 直流导叶式气液分离器示意图

Figure 1 Schematic diagram of axial vane type separator

片宽度为85 mm,厚度为2 mm,高度为80 mm。其中 α 为叶片出口角,为叶片出口切向与水平方向的夹角。模拟过程中,主要改变叶片出口角和导向叶片个数。

1.2 网格划分

气液分离器内流体为气体和液滴,入口边界条件设置为速度进口,进口速度为6 m/s,气液分离器水出口和气体出口均为压力出口边界条件,参考压力为标准大气压。其余均设置为壁面无滑移边界条件。

本文主要采用结构网格划分方法,在靠近壁面和中轴线的区域网格间隔较小,在远离壁面的区域网格间隔较大。同时为更好地获得壁面处的流动情况,在分离器圆筒壁面处及叶片壁面划分了边界层网格,划分的网格总数为300万左右。网格划分见图2。

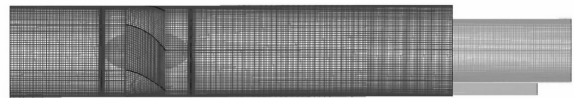


图2 直流导叶式气液分离器的网格划分

Figure 2 Grid of guide vane type gas-liquid separator

2 数值方法

2.1 湍流模型

气液分离器内流动为复杂的湍流流动,本文采用的湍流模型为RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型,该模型考虑了时均应变率对耗散的影响,因而对快速剪切流动以及存在湍流旋涡流动的问题而言,结果更加精确可靠^[13]。

2.2 DPM模型

本文采用FLUENT软件中DPM模型,对直流导叶

式气液分离器内气相流场中液滴运动轨迹进行数值模拟。DPM 模型又称颗粒轨迹模型,是指在欧拉坐标下计算获得连续相流场参数,再基于该流场,在拉格朗日坐标下积分计算获得单个颗粒的运动轨迹^[14]。FLUENT 中 DPM 模型假定离散相非常稀薄(离散相的体积分率低于 10%),因而计算时可以只考虑连续相对颗粒运动的影响,而不必考虑运动过程中颗粒体积分率对连续相的影响。本文研究的气液分离器内两相运动,液体离散相体积比相当小(低于 1%),且不考虑液相体积分率对连续相的影响,符合 DPM 模型使用的条件,因此在计算中将液滴视为颗粒,选用 DPM 模型对其运动轨迹进行追踪。

3 数值模拟结果及分析

3.1 叶片出口角对分离器性能的影响

在研究导叶出口角对直流导叶式气液分离器内部流场,压降特性及分离效率的影响时,保持叶片个数为 6,分别对叶片出口角为 25°, 35°, 45° 的分离器进行模拟。

3.1.1 叶片出口角对压降的影响

图 3 分别为不同叶片出口角下分离器内部纵截面静压云图及分离器压降随出口角变化的曲线图。从云图上可以看出,不同叶片出口角时,分离器内部的静压分布较为一致,进气口和排气口段的压强梯度变化不明显,较大的压强梯度主要体现在旋流叶片附近、叶轴后部中心区、出气管入口处等位置,从壁面向中心压强逐渐减小,最小压强出现在排气管进口,甚至出现负压。

分离器内压降损失主要是流体进出导叶时的损失、进入排气管时截面忽然缩小的损失及流体旋转时的动能损失。当导叶其他几何结构参数相同时,导叶出口角越小,流体的导叶出口截面积就越小,同时使流体流速增大,这些都会使流体离开导叶时局部阻力增大。因此,导叶出口角越小,压降损失就越大。

3.1.2 叶片出口角对速度的影响

为了研究不同导叶出口角时,流体经过导向叶片后产生的旋转强度的大小,在流体经过导向叶片并且在流出排气管前之间的分离段,平均截取了 $y=0$ 平面与 $z=-200\text{ mm}$, $z=-300\text{ mm}$, $z=-400\text{ mm}$, $z=-500\text{ mm}$ 4 个平面的交线(图 4),分析了不同导叶个数下 4 条线上的切向加速度与重力加速度的比值。

图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)依次为 $y=0$ 平面与 $z=-200\text{ mm}$, $z=-300\text{ mm}$, $z=-400\text{ mm}$, $z=-500\text{ mm}$ 平面的交线上不同位置切向加速度与重力加速度比值沿径向变化曲线。横坐标 x 为分离器径向坐标位置,

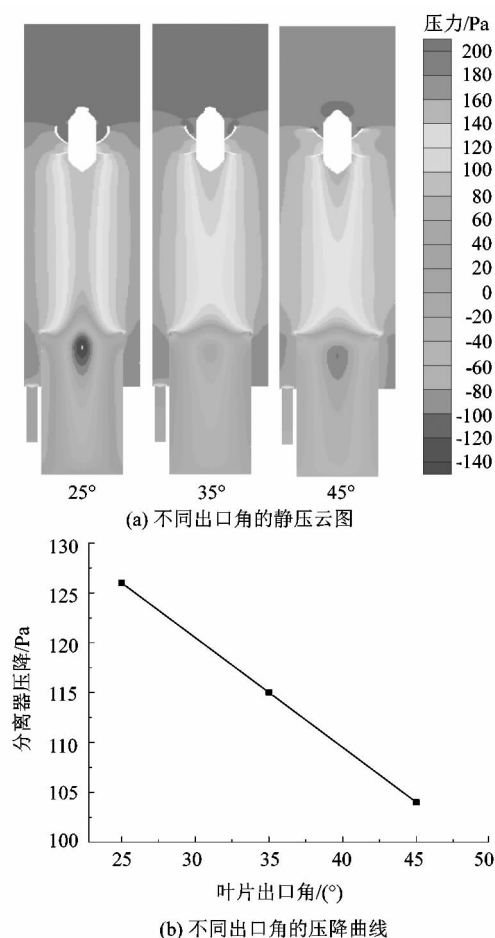


图 3 不同叶片出口角下纵截面静压云图及压降曲线图

Figure 3 Longitudinal sectional static pressure and pressure drop curves at different blades outlet angle

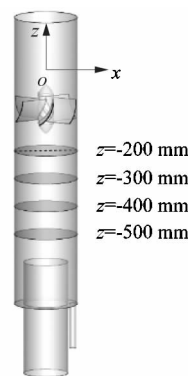


图 4 不同竖直高度的平面

Figure 4 Plane of different vertical height

纵坐标中 a 表示切向加速度, g 表示重力加速度。从图中可以看出,在分离段内,沿流体流动方向该比值总体趋势基本是减小的;导向叶片出口角对切向加速度的影响非常显著,出口角为 25° 时比值明显大于 35° 和

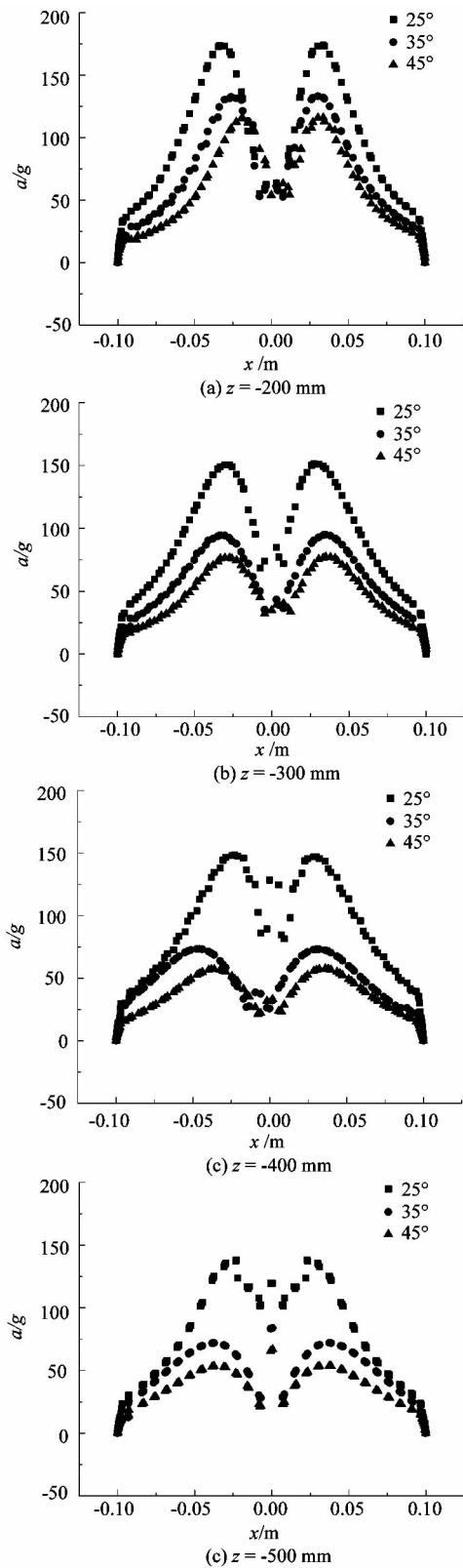


图5 不同导叶个数下切向加速度与重力加速度比值沿径向变化曲线

Figure 5 Changes of tangential acceleration and gravity acceleration ratio at different outlet angles

45°,而且出口角为25°的分离器比值减小的趋势比35°和45°的要缓慢,越靠近分离段下端,比值越小,减弱趋势也越缓慢;从图上也可以看出切向加速度与重力加速度比值沿径向方向先增大后减小,左右基本上呈对称分布。

当流体以一定的倾斜角度从导叶进入旋流器时,流体将产生倾斜向下的强旋湍流,并随着轴向向下,流动强度在筒壁摩擦力和流体黏性的作用下逐渐衰减。设叶片出口处的气体速度为 v_0 ,分离区内气体的轴向、切向速度分别为 v_t, v_z (忽略径向速度 v_r),则有下列关系式:

$$v_t = v_0 \cos \alpha, v_z = v_0 \sin \alpha. \quad (1)$$

由于 α 是锐角,故切向速度明显大于轴向速度, α 越小, v_t 越大。切向速度给流体提供离心力, v_t 越大促使液滴分离的离心力越大,所以随着叶片出口角的减小,切向加速度与重力加速度比值是增大的。但是在流动的过程中由于受到阻力及壁面摩擦力的影响,涡旋强度会逐渐减弱,所以比值总体趋势减小。切向加速度 $a = v_t^2/r$,在轴心附近,即使切向速度比较小,由于半径很小,切向加速度也会非常大,但是由于轴心扰动非常微弱,以及近壁面处的摩擦剪切的影响,所以切向加速度与重力加速度比值沿径向先增大后减小。但是旋流器的导叶出口角度也不能太小,虽然较小的出口角使得进口切向速度较大,但轴向速度过小,涡旋速度迅速衰减,液体没有充分的分离空间;而且轴向速度过小,会使部分未经分离的流体直接进入排气管,反而会使分离效率下降。

3.1.3 不同叶片出口角下分离效率随粒径的变化

通过 FLUENT 软件 DPM 模型,对不同叶片出口角分离器分离特性进行了相应的模拟。设置离散相为水,粒径变化范围为 $5 \sim 40 \mu\text{m}$,液体颗粒从入口表面入射,射入速度与气流入口速度相同,把图1中筒底壁面、液体出口及气液分离器筒壁底面设置为捕捉,即液体颗粒碰撞到筒壁底面后被捕捉,其他壁面设置为反弹,排气管出口设置为逃逸,装置的分效率可以通过下式计算得到:

$$\eta = \frac{N_t}{N_{in}} \times 100\%. \quad (2)$$

式中: N_t 代表从液体出口收集的液滴颗粒的数量, N_{in} 表示气液分离器入口释放的颗粒的总数量。

图6为3种出口角下,分离效率随液体粒径变化规律。当液滴粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 时,3种叶片出口角的分离效率差别不大,但是大于 $10 \mu\text{m}$ 时,同一液滴粒

径下随着导向叶片出口角的减小,分离效率明显增大;当粒径达到 $40\ \mu\text{m}$ 以上时,3种叶片分离效率接近100%。

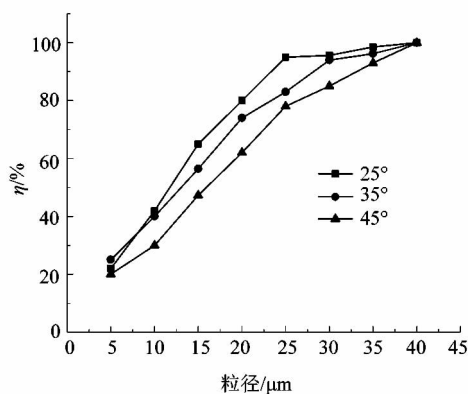


图6 不同导叶出口角下分离效率随粒径的变化曲线图

Figure 6 Curves of separation efficiency under different vane outlet angle changes with particle size

3.2 叶片个数对分离器性能的影响

在研究不同叶片个数对分离器内部分离性能的影响时,叶片出口角为 35° ,其他参数保持不变。得到了不同叶片个数下分离器内压降及分离器性能的规律。

3.2.1 叶片个数对分离器内部压降的影响

不同叶片个数分离器内部的压力云图及压降随叶片个数变化的曲线图如图7所示。

改变叶片数量时,分离器静压剖面图基准状态表现出极高的相似性,由于模拟过程中设置的叶片厚度比较小,可以忽略它对气流截面积的影响。一般来说,叶片个数越多,叶片之间的距离越小,受叶片阻力及边界层的影响,导向叶片对气流的造旋效果越好,越有利于分离;但同时造成的压力损失稍大一些,所以随着叶片个数的增多,装置的分离压降增大,但是由于在实际模拟过程中,对于壁面进行了简化的设置,弱化了壁面阻力及边界层的影响,在改变叶片数量时,模拟结果显示装置的静压云图基本相同,模拟的分离器内压降变化比实际压降变化也要小。

3.2.2 叶片个数对分离器内速度的影响

与不同导叶出口角一样,为了分析不同叶片个数对速度的影响,在分离段相同位置也截取了4条水平线分析沿径向方向切向加速度与重力加速度比值,如图8所示。

从图8可以看出,叶片个数越多,切向加速度与重力加速度比值越大,最大值接近150,而且在分离段内该比值总体趋势是逐渐减小的,这与流体经过导向叶

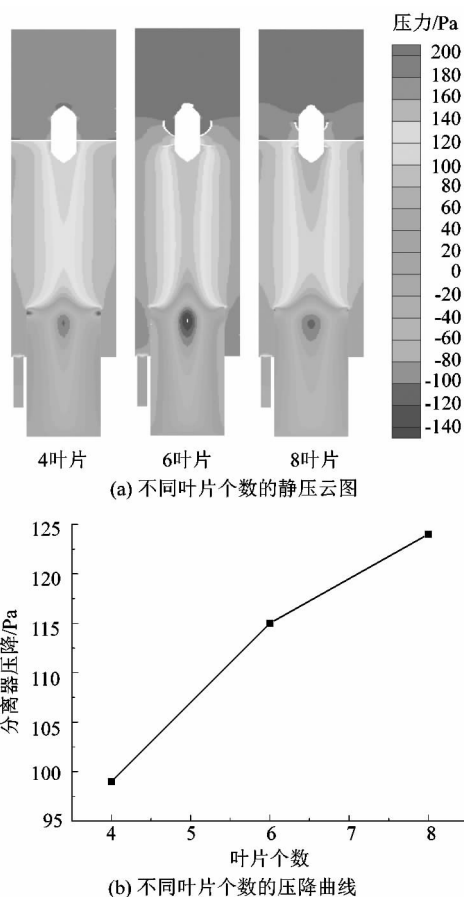


图7 不同叶片个数下纵截面静压云图及压降曲线图

Figure 7 Longitudinal sectional static pressure and pressure drop curves at different guide vane numbers

片后旋转强度逐渐变弱是相符的。该比值沿径向先增大然后减小,这是由于在分离器中心,气流受到的扰动较小,旋转强度也很小,从轴心向外由于导流叶片的导流作用,旋转强度逐渐增大,液滴受到的离心力越大,但是到近壁面处由于流体受到摩擦、剪切等力的作用,速度迅速降低。这使得水珠在从轴心被甩到壁面的过程中,受到的离心力先增大,接近壁面时又变得越来越小,避免了水珠被甩到壁面时与墙壁有较大的碰撞,有利于把气流中水滴收集到壁面。从图中还可以看出4叶片的分离器沿流动方向切向加速度与重力加速比值衰减较慢,靠近轴心的位置甚至还大于6叶片和8叶片,是因为4叶片旋转强度及压力损失比6叶片和8叶片都要小,减弱趋势也慢,使得流体在分离段下端还保持着较强的旋转趋势。

3.2.3 不同叶片个数下分离效率随粒径的变化

从图9可知,液滴粒径的大小对分离效率也有非常重要的影响,在粒径较小时,分离效率差别不是很大,但随着粒径增大到 $10\ \mu\text{m}$ 及以上时,分离效率明

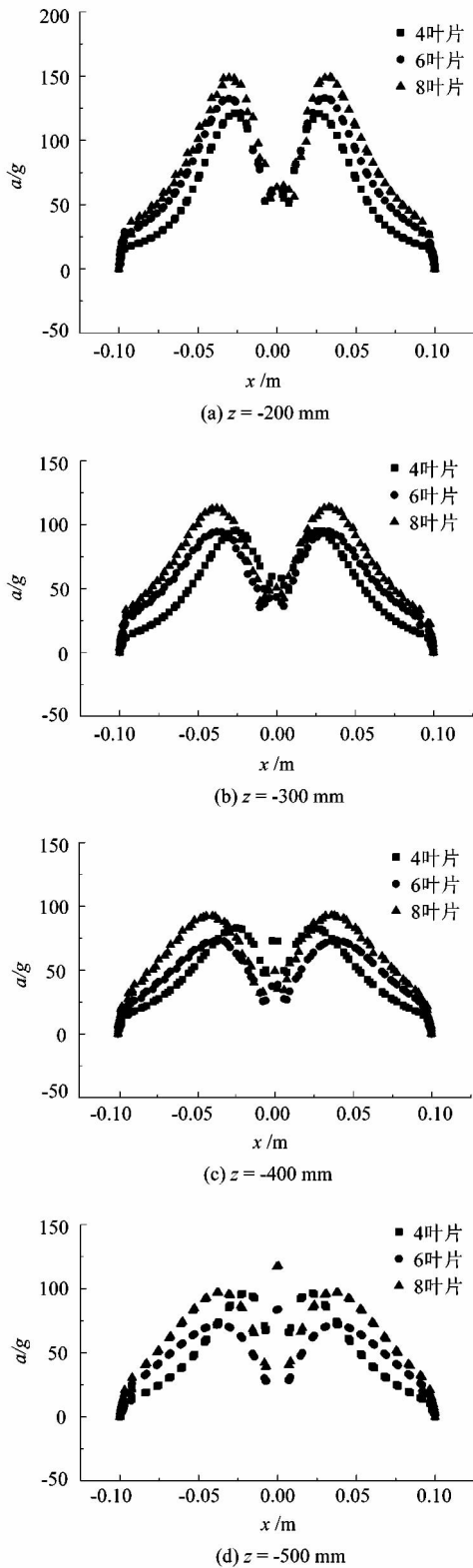


图8 不同导叶个数切向加速度与重力加速度比值沿径向变化曲线

Figure 8 Changes of tangential acceleration and gravity acceleration ratio at different number vanes

显升高,同一粒径下叶片个数增加,分离效率也越高;6叶片和8叶片的分离器随着液滴半径的增大分离效率比较接近,且比4叶片要高;当粒径达到30 μm以上时,3种叶片下的分离效率都达到了90%以上。

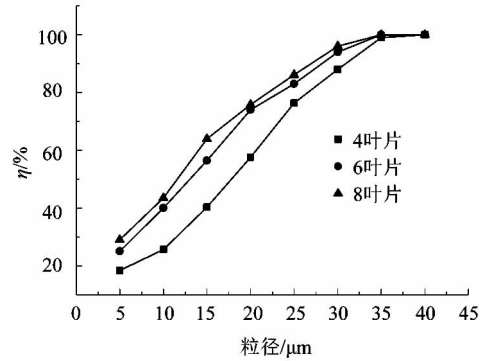


图9 不同导叶个数下分离效率随粒径的变化曲线
Figure 9 Curves of separation efficiency under different number guide vanes changes with particle size

4 结论

通过对不同导叶出口角及导叶个数的轴流导叶式气液分离器进行数值模拟,分析不同结构下分离器内压降特性,速度分布及不同结构下分离效率随颗粒粒径变化的规律,得到以下结论:

1) 随着叶片出口角的减小,分离器内相同位置切向速度逐渐增大,但是压降也成线性升高。同样,随着导叶个数的增加,分离器内相同位置切向速度也是逐渐增大的,但是压降并不成线性升高,压降升高速率是逐渐变慢的。

2) 在合适的粒径下,随着导向叶片出口角的减小或叶片个数的增加,颗粒分离效率明显提高,当粒径在15~30 μm范围内时,出口角每减小10°,分离效率就会增加10%左右。

3) 在不同叶片出口角或叶片个数情况下,轴流导叶式气液分离器的分离效率都会随着分离粒径的增大而提高。当颗粒粒径达到35 μm以上时,不同导叶结构下颗粒的分离效率几乎都达到了100%。

参考文献:

- [1] 陈明绍,吴光兴,张大中,等. 除尘技术的基本理论与应用[M]. 北京:中国建筑出版社,1981:155.
- [2] 满晓伟. 新型直流导叶式旋风管的性能研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东分校),2011:3.
- [3] 徐方成,洪华生. 导叶直流式旋风管分离性能的研究[J]. 厦门大学学报,2002,41(2):222-224.
- [4] 付双成,孙国刚,高翠芝. 导叶式直流旋风分离器的研究与应用现状[J]. 过滤与分离,2008,18(2):11-14.