

端盖与旋流子对轴流旋风分离器的性能影响

栾一刚, 张力敏, 胡筵晨, 孙涛

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了研究轴流旋风分离器性能的结构影响因素, 采用 Fluent 软件对装有不同内径端盖和不同种类旋流子的旋风分离器的流场进行了数值模拟, 同时用 Fluent 中的 DPM 模型分析了不同尺寸及种类的旋风分离器对水颗粒的分离效果。结果表明: 较小的端盖内径可以提高旋风分离器的分离效率, 但是带来更大的阻力; 旋流子叶片的螺旋角度是影响分离效率的主要因素, 螺旋角度越大则分离效率越高, 但是阻力也会随之增加; 叶片数量不是影响阻力的主要因素。

关键词: 轴流旋风分离器; 端盖; 旋流子; 阻力; 分离效率

中图分类号: TH237.5 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.004

[引用本文格式] 栾一刚, 张力敏, 胡筵晨, 等. 端盖与旋流子对轴流旋风分离器的性能影响[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 25-32. LUAN Yi-gang, ZHANG Li-min, HU Yan-chen, et al. Influence of end cover and cyclone on performance of axial flow cyclone separator [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 25-32.

Influence of End Cover and Cyclone on Performance of Axial Flow Cyclone Separator

LUAN Yi-gang, ZHANG Li-min, HU Yan-chen, SUN Tao

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to study the structural factors affecting the performance of the axial flow cyclone separator, Fluent software was used to numerically simulate the flow field in cyclone separator with end covers of different inner diameters and different types of cyclones. Meanwhile, DPM model in Fluent was used to analyze the separation effect of each cyclone separator of different sizes and types on water particles. The result shows that the smaller inner diameter of the end cover can improve the separation efficiency, but bring more resistance. The helical angle of the cyclone blade is the main factor affecting the separation efficiency. Larger helical angle can bring higher separation efficiency, but resistance will increase accordingly; the number of blades is not the main factor affecting the resistance.

Key words: axial flow cyclone separator, end cover, cyclone, resistance, separation efficiency

引言

旋风分离器是一种通过旋流子使来流气体产生旋流, 依靠旋转运动中的离心力来分离气体中含有

的颗粒物的设备, 可以作为船舶、车辆、直升机等发动机进气道的滤清装置, 其具有结构简单、维护成本低等优点。旋风分离器主要分为切流式和轴流式^[1]。两者主要区别在于进气方式不同, 前者为切向进气, 而后者为轴向进气。相比切流旋风分离器,

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2022-10-26

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-I-0007-0007)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-I-0007-0007)

作者简介: 栾一刚 (1981-), 男, 哈尔滨工程大学教授。

通讯作者: 孙涛 (1978-), 男, 哈尔滨工程大学副教授。

轴流旋风分离器具有阻力低、允许气体通流量大的优点,且轴流旋风分离器不会改变气流的主运动方向,因此便于在设备中安装^[2]。由于轴流旋风分离器没有额外的过滤层,且分离出的颗粒无法及时排出,因此对颗粒的过滤能力要弱于切流旋风分离器^[3]。

汤浩等人^[4]研究了轴流旋风分离器在不同工况下分离颗粒的性能,利用数值模拟的方法对比了不同进气角度和集尘管进口扫气压力下轴流旋风分离器的分离效率。田进云等人^[5]分析了轴流旋风分离器的切向速度分布情况,结合无量纲分析方法推导出了轴流旋风分离器的分离效率表达式,通过与 DPM 模型计算的结果进行比较,发现液滴直径较大时数据吻合较好。林秀丽等人^[6]用数值模拟方法分析了不同风速下叶片的形式和排尘间隙对旋风分离器阻力特性的影响,并在实验中测试了旋风分离器的分离效率。王劲莎等人^[7]研究了切流旋风分离器分离煤粉和水的性能。张珩等人^[8]采用 RSM 模型和 DPM 离散相模型研究了颗粒入口角度和速度对旋风分离器中“灰环”位置的影响。彭丽等人^[9]通过相应曲面法和正交实验法研究了旋风分离器的 7 个结构参数对其性能的影响。Cui 等人^[10]利用数值模拟的方法研究了三锥旋风分离器内的流场分布情况,并与单锥旋风分离器进行对比,发现三锥旋风分离器具有更清晰的颗粒分布情况的原因是其中心的湍流强度较大。而 Xiang 等人^[11]对旋风分离器内锥体的直径进行了研究,发现采用锥体的尺寸不同对分离效果存在不可忽略的差异。Yu 等人^[12]提出了一种内旋流子与外旋流子嵌套的新型旋风分离器,利用数值模拟和实验研究了这种新型旋风分离器内的流场分布情况与颗粒分离效果,并与传统的旋风分离器进行对比,发现双旋流子的结构具有更好的颗粒分离能力。如果旋风分离器具有多个旋流子,其布置方式除内外嵌套,还可以多级同轴,Feng 等人^[13]研究了 4 种不同结构的多级轴流式旋风分离器的颗粒分离效率和阻力特性,研究表明,当旋风分离器入口速度超过 7.9 m/s 后,分离效率显著降低。Chen 等人^[14]研究了一种两级旋风分离器的性能,研究过程中改变了旋流子的直径,而研究结果表明两级旋风分离器具有更高的分离效率。另外,旋风分离器作为一种用于过滤分离的部件,需要具有简单的结构和较小的体积。Zhao 等人^[15]提出了一种紧凑式旋风分离器,这种旋风分离

器在入口处能够实现颗粒在径向的非均匀分布,达到提高颗粒分离效率的目的。Yuan 等人^[16]设计了一种具有双入口的旋风分离器,基于 RSM 湍流模型和欧拉模型研究了分离器内的物质分离过程,研究表明,粘度是影响分离效率和分离器内流场稳定性的重要因素。

上述研究针对的是工作环境对旋风分离器的影响,而工作环境和结构共同对轴流旋风分离器性能影响的研究较少。本文采用了数值模拟的方法,以不同旋流子和不同端盖直径的旋风分离器为基础,研究其在不同工作环境下的性能。

1 数值模拟方案

1.1 DPM 模型介绍

对旋风分离器的数值模拟中涉及到空气和颗粒两相,采用 DPM 模型处理颗粒相。DPM 模型是一种基于 Lagrange 方法的离散相颗粒模型,可以用于跟踪颗粒运动的轨迹。研究中,颗粒相的流量远低于气体的流量,因此忽略颗粒对气体的影响。描述颗粒运动的方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_g - u_p) + g(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_x \quad (1)$$

式中: ρ_p —颗粒密度,kg/m³; ρ_g —气相密度,kg/m³; g —重力加速度,m/s²; u_p —颗粒相速度,m/s; u_g —气相速度,m/s; F_D —流体对颗粒的曳力,N; F_x —重力以外的其他力,N;下标 p—颗粒。

1.2 模型建立及网格划分

以某内径为 100 mm 的旋风分离器为基础,建立装有不同旋流子和端盖的模型并进行网格划分,旋风分离器模型如图 1 所示。

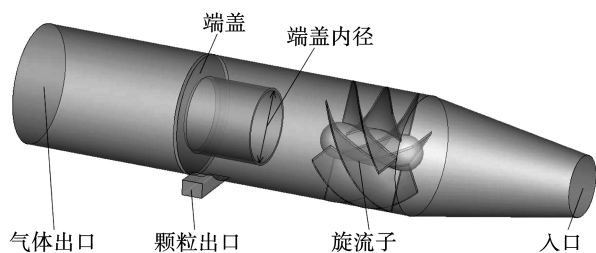
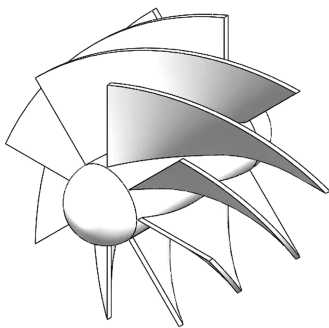


图 1 旋风分离器模型

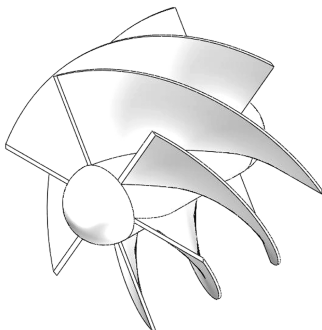
Fig. 1 Model of cyclone separator

原有的旋流子为 6 叶片、旋转角 120°,旋流子模型如图 2 所示,在此基础上修改叶片数量和螺旋角度^[17],同时修改的还有端盖的内径。原模型和修改后

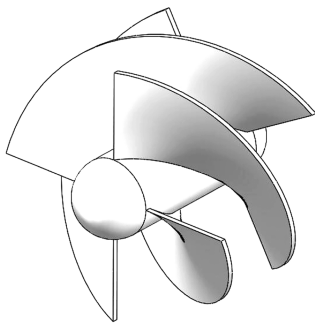
的模型分别编号为 A,B,C,D,E。其结构如表 1 所示。



(a) 8 叶片，螺旋角 90°



(b) 6 叶片，螺旋角 120°



(c) 4 叶片，螺旋角 150°

图 2 旋流子模型
Fig.2 Model of cyclone

表 1 旋风分离器模型的种类

编号		端盖内径/mm	旋流子	
			叶片数	螺旋角/(°)
A		50	6	120
B		60	6	120
C		70	6	120
D		60	4	150
E		60	8	90

在软件 ANSYS Workbench 中对模型进行网格划分。由于具有螺旋角度的旋流子上存在曲率较大的曲面,因此采用几何适应性好的非结构四面体网

格。在旋流子叶片前后缘等尺寸较小的位置对网格进行加密处理,并在近壁面处添加棱柱网格,以便计算中更好地处理近壁面的流动情况。图 3 为整体网格示意图。图 4 为近壁面处的棱柱网格示意图。

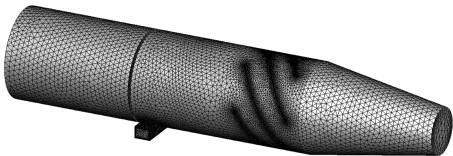


图 3 旋风分离器网格
Fig.3 Grid of cyclone separator

1.3 边界条件与网格无关性验证

采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,气体类型为理想气体,边界条件为速度入口,速度的取值为 3,4,5,6,7,10,15,20,25 m/s。气体和颗粒出口均为压力出口,与环境压力保持一致。设置离散相颗粒时,定义颗粒材料为液态水,颗粒直径取值 4,6,8,10 μm 。

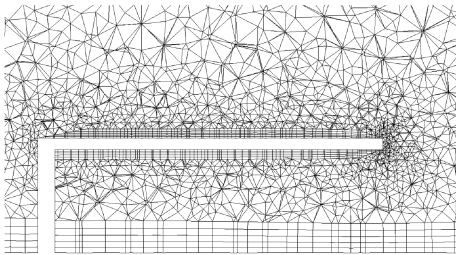


图 4 近壁面的棱柱网格
Fig.4 Prism grid near the wall

为了排除网格数量对计算精度的影响,且降低计算机的计算量,需要进行网格无关性验证。针对 B 模型,划分了 4 套不同数量的网格,取计算结果中的阻力作为对比的参数。如图 5 所示。

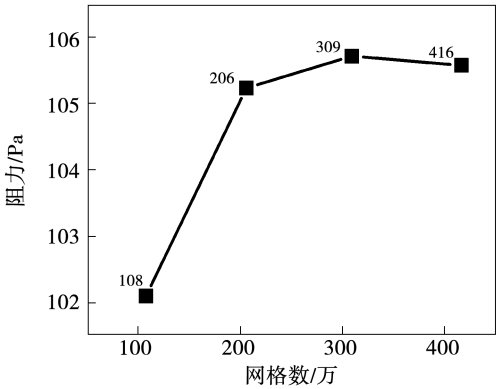


图 5 网格无关性验证
Fig.5 Grid independence verification

由图 5 可知,网格数量 108 万与 206 万时的阻力值相差较大,随着网格数量的进一步增加,阻力值的变化幅度降低。因此,选取 206 万网格数量对本文待研究的模型进行划分。

2 数值模拟结果分析

2.1 端盖内径对阻力特性的影响

由于颗粒出口排出的气体流量占比很小,因此不考虑颗粒出口的压力。定义旋风分离器的阻力为:

$$f = p_{in} - p_{out} \quad (2)$$

式中: p_{in} —旋风分离器入口压力,Pa; p_{out} —旋风分离器出口压力,Pa。

选取装有不同内径端盖的 A、B、C 3 个模型,将其在不同速度下阻力绘制成线图,如图 6 所示。从图 6 中阻力的分布和变化趋势可以看出,端盖内径为 50 mm 的 A 模型旋风分离器的阻力最大,其次是 60 mm 的 B 模型,70 mm 时的 C 模型阻力最小。

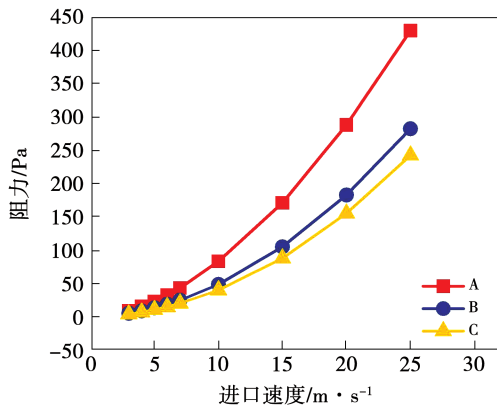


图 6 不同端盖内径下的阻力

Fig. 6 The resistance in different inner diameters of end cover

定义图 6 中任意两条曲线在纵轴方向上的均方根距离:

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^n (f_x - g_x)^2} \quad (3)$$

式中: f_x —进口速度为 x 时某条曲线对应的阻力值; g_x —进口速度为 x 时另一条曲线对应的阻力值; n —数据数量; x —进口速度。

根据式(3)计算出曲线 A、B 和 B、C 之间的均方根距离为: $d_{AB} = 65.911$, $d_{BC} = 17.487$ 。

由式(3)可知:模型 A 的阻力远高于 B、C,而后两者之间的阻力相差较小。

低速工况 3 ~ 7 m/s 时阻力上升幅度较小;速度提高到 10 ~ 25 m/s 时阻力上升幅度加大。高速工况下,端盖内径 50 mm 的 A 模型的阻力与阻力上升幅度远高于模型 B 和 C。

2.2 端盖内径对分离效率的影响

在对离散相的设置中,定义颗粒从气体出口流出为逃逸,从颗粒出口流出为捕捉。因此,旋风分离器的分离效率为:

$$\eta = \frac{n_0 - n_e}{n_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: n_0 —颗粒总数; n_e —逃逸颗粒总数。

图 7 为不同端盖直径下的分离效率。由图 7 可知,4 种颗粒直径下,A 模型的分离效率均高于 C 模型的分离效率。A 模型与 B 模型相比,颗粒直径为 6 和 8 μm 时分离效率基本一致,而其他两种粒径下的分离效率相差较大,且 B 模型的分离效率基本高于 C 模型的分离效率。

2.3 旋流子对阻力特性的影响

模型 B、D、E 具有相同内径的端盖,装有 3 种不同的旋流子,将上述 3 个模型计算结果中的阻力绘制成线图,如图 8 所示。

由图 8 可知,随着速度的增加,装有不同旋流子的阻力均呈现出逐渐上升的趋势。由式(3)可以计算出曲线 B、D 和曲线 D、E 之间的距离: $d_{BD} = 118.603$, $d_{DE} = 1984.144$ 。因此,模型 B、D 的阻力均超过了模型 E 的阻力。将 d_{BD} 与 d_{DE} 的值与 d_{AB} 和 d_{BC} 进行比较可知,旋流子种类的改变比端盖内径改变阻力提升更大。

从旋流子的结构来看,模型 B、D、E 采用的旋流子分别是:6 叶片、螺旋角 120°;4 叶片、螺旋角 150°;8 叶片、螺旋角 90°。根据阻力的计算结果,叶片数量不是影响阻力的主要因素,模型 D 的叶片数量虽然最少,但是其阻力最大。螺旋角度对阻力的影响较大。螺旋角度越大,旋流子的阻力越大。

为了进一步分析旋流子对旋风分离器阻力的影响,在旋风分离器内部选取若干垂直于流动方向的横截面^[18],求取这些平面上压力的平均值。

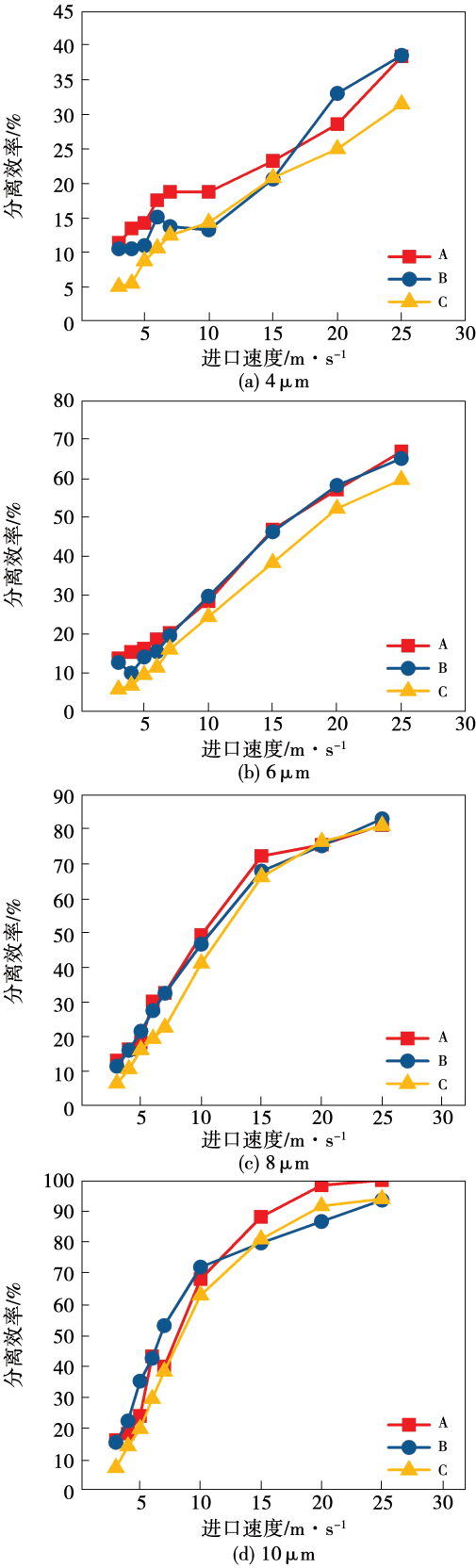


图 7 不同端盖直径下的分离效率

Fig. 7 Separation efficiency in different diameters of end cover

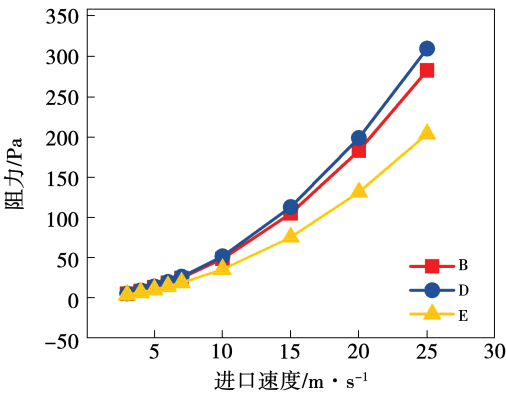


图 8 装有不同旋流子的分离器阻力

Fig. 8 The resistance of separator equipped with different cyclones

图 9 为横截面位置及编号。由图 9 可知,截面 0 为旋风分离器的入口,截面 9 为旋风分离器气体出口,截面 1~3 属于渐扩段,截面 3~5 位于旋流子上下游,截面 6 处于端盖和颗粒出口的位置,截面 7~8 在出口延长段位置。

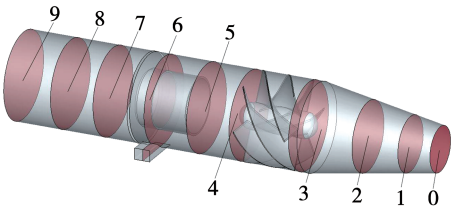


图 9 横截面位置及编号

Fig. 9 Section plane position and number

由图 10 所示的旋风分离器内部压力变化情况可以看出,气体的压力整体呈现出沿流动方向下降的趋势。其中,模型 B、D 中的气流在旋流子前后和端盖前后发生了大幅度的压力变化,而模型 E 中气体在旋流子处的压力变化很小。由于上述 3 种模型所采用的端盖内径相同,因此气体在端盖处的压力变化值基本一致。而改变旋流子后,3 种模型在端盖上游的压力分布情况具有明显的差异。

2.4 旋流子对分离效率的影响

旋流子可以使来流做旋转运动,即产生旋流。气流中的颗粒相在高速旋转中被甩向壁面从而达到两相分离的效果。因此旋流子的种类对旋风分离器的分离效率有很大的影响。比较 B、D、E 3 种模型

对不同粒径下颗粒的分离效果,如图 11 所示。

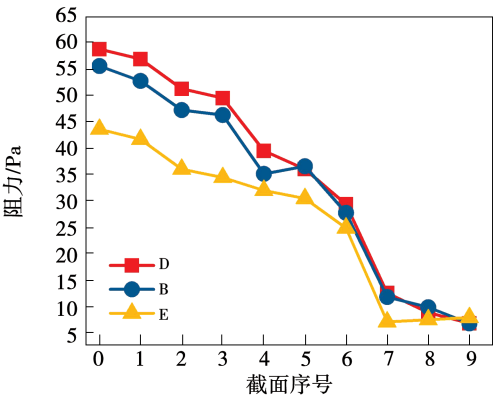


图 10 气体流动方向压力的变化

Fig. 10 The change of pressure in the direction of air flow

当颗粒直径为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 且进口速度小于 19 m/s 时,模型 D、E 的分离效率比较接近,模型 B 的分离效率较低;速度超过 19 m/s 后,3 个模型的分离效率基本一致。当颗粒直径进一步增加到 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 时,模型 D 的分离效率始终高于模型 B 和 E 的分离效率,而后两者的分离效率接近。在入口速度低于某一临界值时,B 的分离效率高于 E,随着颗粒直径的增加,该临界值逐渐降低。

由于气体与颗粒相做旋转运动的速度直接关系到颗粒的分离效率,因此比较旋流子下游气体的切向速度可以反映出旋流子与分离效率之间的关系。根据对旋风分离器内部截面的划分情况,选取位于旋流子下游的截面 5 作为观测点,比较 B、D、E 3 种模型在该截面上的切向速度分布。

由图 12 可知,截面 5 上的切向速度从轴心处沿半径方向逐渐增大,然后由于边界的作用而逐渐缩小。其中,模型 E 的各个位置的切向速度均小于模型 B 和 D;在靠近轴心的位置,D 模型的切向速度小于 B 模型的切向速度。在 0.025 m 半径之后,模型 D 的切向速度超过了模型 B 的切向速度。因此模型 D 的旋流子具有最佳的旋流效果,从而达到最高的分离效率,模型 B、E 的效率依次低于 D。根据 3 种模型安装的不同旋流子可知,螺旋角度更大的旋流子拥有更强的分离能力。

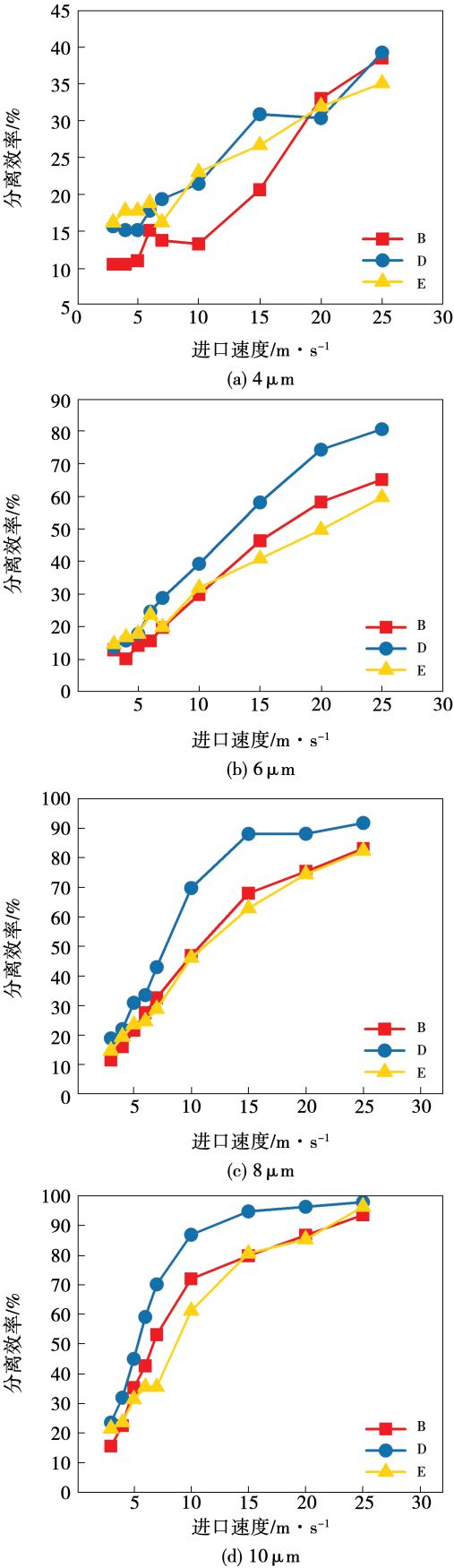


图 11 不同旋流子的分离效率

Fig. 11 Separation efficiency in different cyclones

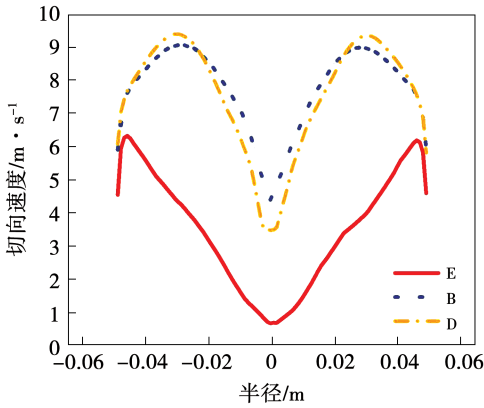


图 12 截面 5 的切向速度分布

Fig. 12 The distribution of tangential velocity on section plane 5

3 结 论

(1) 端盖内径越小,气体流经旋风分离器的阻力越大,并且随着气体流速的上升,阻力增加幅度也会上升。当端盖内径为 50 mm 时在各流速下的阻力最大,而端盖内径为 60 mm 和 70 mm 时阻力依次下降。

(2) 当颗粒直径较小时端盖直径为 50 mm 的旋风分离器具有最高的分离效率,端盖直径为 60 mm 和 70 mm 时旋风分离器的分离效率依次降低,但是随着颗粒直径的增加分离效率的差距逐渐降低。

(3) 旋流子的阻力主要影响因素是其叶片的螺旋角度,当旋流子叶片的螺旋角度为 150°时,尽管叶片数量为 4 个,但是其阻力最高,6 叶片、螺旋角 120°的旋流子的阻力仅次于前者,8 叶片、螺旋角 90°的旋流子阻力远低于前两种旋流子。

(4) 旋流子叶片的螺旋角度为 150°时,旋风分离器具有最高的分离效率。叶片螺旋角度为 120°的旋流子在空气流速在超过某一临界值后的分离效率会大于叶片螺旋角度为 90°的旋流子,且该临界值会随着颗粒直径的增大而减小。

参考文献:

[1] 栾一刚. 轴流旋风分离器数值模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2011.
LUAN Yi-gang. Numerical simulation and experimental study of

axial flow cyclone separator [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.

[2] 刘碧媛,冯健美,夏宗飞,等. 回流式两级分离轴流旋风分离器性能实验研究[J]. 西安交通大学学报,2017,51(7):84-89.
LIU Bi-yuan, FENG Jian-mei, XIA Zong-fei, et al. Experiment for partial reflux axial-flow cyclone separator with two stage separation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 84-89.

[3] 栾一刚,王 松,孙海鸥,等. 无节流器轴流旋风气液分离器性能研究[J]. 动力工程学报,2011,31(2):142-147.
LUAN Yi-gang, WANG Song, SUN Hai-ou, et al. Performance study of an axial-flow gas-liquid cyclone separator without throttleer [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(2): 142-147.

[4] 汤 浩,孙 鹏,刘文峰. 工作条件对轴流旋风分离器分离效率影响的数值研究[J]. 机械工程学报,2017,53(2):157-163.
TANG Hao, SUN Peng, LIU Wen-feng. Numerical study on the influence of working conditions on separation efficiency of an axial flow cyclone separator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 157-163.

[5] 田进云,田瑞峰,孙兰昕,等. 轴流旋风分离器特性数值研究 [C]//中国核科学技术进展报告. 北京:中国原子能出版社, 2013:658-663.
TIAN Jin-yun, TIAN Rui-feng, SUN Lan-xin, et al. Numerical study of characteristics of an axial flow cyclone separator [C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology. Beijing: China Atomic Energy Press, 2013: 658-663.

[6] 林秀丽,曹亚平,夏祉君,等. 轴流旋风分离器特性的数值模拟 [J]. 东北大学学报,2019,40(9):1360-1364.
LIN Xiu-li, CAO Ya-ping, XIA Zhi-jun, et al. Numerical simulation on characteristics of the axial flow cyclone separator [J]. Journal of Northeastern University, 2019, 40(9): 1360-1364.

[7] 王劲莎,董 敏,孔德霞. 新型高效旋风分离器的仿真模拟计算[J]. 汽车实用技术,2020,22:102-104.
WANG Jin-sha, DONG Min, KONG De-xia. Simulation calculation of a new efficient cyclone separator [J]. Automobile Applied Technology, 2020, 22: 102-104.

[8] 张 珩,韩志亮,王兴福,等. 基于 DPM 对旋风分离器内固体颗粒运动轨迹的模拟[J]. 山东化工,2020,49(20):127-129.
ZHANG Heng, HAN Zhi-liang, WANG Xing-fu, et al. Simulation analysis of particle trajectory in cyclone separator based on DPM [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(20): 127-129.

[9] 彭 丽,柳冠青,董 方,等. 基于 CFD-DPM 的旋风分离器结构设计优化[J]. 中国粉体技术,2021,27(2):63-73.
PENG Li, LIU Guan-qing, DONG Fang, et al. Structure optimization and design of cyclone separator based on CFD-DPM [J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(2): 63-73.

[10] CUI G,XIE W,ZHANG Y,et al. Study on separation performance of tri-cone water medium cyclone based on CFD[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization,2021,41(12):879 – 892.

[11] XIANG R B,LEE K W. Numerical simulation of flow patterns in cyclones of different cone dimensions[J]. Particle & Particle Systems Characterization,2005,22(3):212 – 218.

[12] YU G,DONG S,YANG L,et al. Experimental and numerical studies on a new double-stage tandem nesting cyclone[J]. Chemical Engineering Science,2021,236:116537.

[13] FENG J,CHEN W,WANG L,et al. Separation performance of new type of multi-stage axial cyclone used as demister in power plant emission system[J]. Journal of Dispersion Science and Technology,2020,41(11):1643 – 1656.

[14] CHEN J,YANG B,JIANG Z A,et al. Effect of external cyclone diameter on performance of a two-stage cyclone separator[J]. ACS Omega,2019,4(8):13603 – 13616.

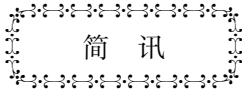
[15] ZHAO B,WANG D,SU Y. Performance improvement of cyclone separator by integrated compact bends[J]. Powder Technology, 2019,353:64 – 71.

[16] YUAN Xiao-ming,ZHAO Hui-jun,QU Jing-yi. Numerical simulation of double inlet cylinder cyclone using CFD[C]//Applied Mechanics and Materials I, Part 1: Trans Tech Publications, 2012:558 – 561.

[17] 杨维旺. 轴流导叶式旋风分离器气液分离特性的优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
YANG Wei-wang. Performance optimization of a cyclone separator with axial guide vane for gas-liquid mixture[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.

[18] 田进云. 轴流旋风分离器及其内部液滴碰壁性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
TIAN Jin-yun. Research on the character of axial cyclone separator and droplet impact on the wall [D]. Harbin:Harbin Engineering University,2014.

(姜雪梅 编辑)



简 讯

Ceres 公司与博世公司和林德工程公司
合作开展 1 MW 绿色氢示范项目

据官网报道,英国锡里斯电力公司(Ceres Power Holdings PLC)是燃料电池和电化学技术领域全球领先开发商之一,已与德国的博世公司和林德工程公司签订合同,将就其固体氧化物电解池(SOEC)技术的性能、成本和操作功能的验证开展合作。两家德国公司计划从 2024 年准备开始为期两年的 1 MW SOEC 系统演示验证,该系统将设在德国斯图加特的博世工厂。其目的是展示该技术可提供一种获得低成本绿色氢的高效途径,并在难以脱碳的工业部门发挥重要作用。

目前,Ceres 公司已投入 1 亿英镑用于 SOEC 技术的开发。其首个 100 kW 电解槽模块目前正在测试中,初步结果表明,该技术能够以低于 40 kWh/kg 的效率电解制氢,超过现有的低温技术效率约 25%。此次合作的愿景是为固体氧化物电解槽设定新的行业标准,从而得到广泛的工业应用。通过 Ceres 公司的独特技术与博世公司在规模化制造方面的优势以及林德工程公司在制氢、加工、分销和储存方面的专业技术的结合,三方建立合作伙伴关系,使其技术更具竞争力,并为大规模市场采用做好准备。

(孙嘉忆摘译自 <https://hydrogen-central.com>)