

# 双入口旋风分离器速度流场及分离效率数值模拟研究

马翎凯<sup>1,2</sup>, 刘旭辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

<sup>2</sup>湖北省油气钻井工具工程技术研究中心, 湖北 荆州

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

为了探究双切向入口旋风分离器气相流场特性以及气液分离效率, 本文采用数值模拟的研究方法, 使用CAD技术模拟了双切向入口旋风分离器速度流场分布以及粒径大小对分离效率影响规律。研究发现: 速度流场在尾端的分布相较于单入口旋风分离器, “摆尾”现象减弱, 且呈现良好的对称性; 外部自由涡速度以较大速度向下运动, 最大可达9.4 m/s, 内部强制涡先以2 m/s速度向上运动, 到达溢流口附件速度发生突变, 达到入口速度的两倍以上; 在本文研究的小型分离器结构尺寸下, 对于小粒径液滴的分离效果远不如大粒径液滴, 且临界分离粒径的大小在1~3 μm之间。

## 关键词

气液分离, DPM模型, 双切向入口, 旋风分离器, 天然气除液

# Numerical Simulation Study on Velocity Flow Field and Separation Efficiency of Double Inlet Cyclone Separator

Lingkai Ma<sup>1,2</sup>, Xuhui Liu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

<sup>2</sup>Hubei Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Tools, Jingzhou Hubei

Received: May 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to explore the internal flow field characteristics and gas-liquid separation efficiency of

double tangential inlet cyclone, this paper adopts the research method of numerical simulation, and uses CAD technology to simulate the velocity field distribution of double tangential inlet cyclone and the influence law of particle size on separation efficiency. The study found that: compared with the single inlet cyclone separator, the “wiggling tail” phenomenon was weakened and the distribution of velocity field at the tail end showed good symmetry; the velocity of the external free vortex moved downward with a large velocity, up to 9.4 m/s, and the internal forced vortex moved upward with a velocity of 2 m/s, and the velocity of the overflow port annex changed abruptly, reaching more than twice the inlet velocity; under the structure size of the small separator studied in this paper, the separation effect of small particle size droplets was far less than that of large particle size droplets, and the critical separation particle size was between 1~3  $\mu\text{m}$ .

## Keywords

Gas-Liquid Separation, DPM Model, Double Tangential Inlet, Cyclone Separator, Natural Gas Liquid Removal

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

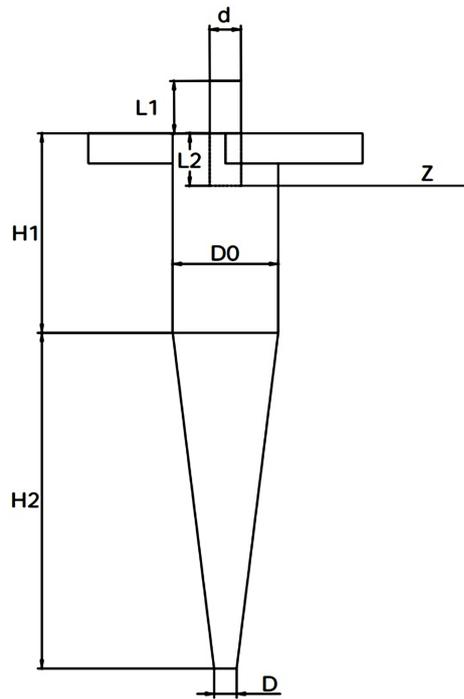
天然气在运输和开采过程中, 易混入液态水、重烃等杂质, 这些杂质在一定程度上会侵蚀管道, 进而造成管道破裂引发危险事故, 而且还会影响天然气的输送效率, 引起不必要的损耗, 增大设备维护成本[1]。因此, 对于天然气与液态水的气液分离从而提高天然气的品质, 显的至关重要。带有液滴的天然气切向进入旋风分离器后, 在装置内做旋转运动, 旋转的天然气使得液滴受到离心力作用被旋转到装置内壁, 受重力作用沿内壁下滑至底流口被排出[2]。传统直切单入口旋风分离器因其结构简单、分离性能好等优点在工业中使用广泛, 但其内部流场呈现不对称性, 排气管末端出现短路流现象比较严重。袁惠新[3]等研究发现双入口型旋风分离器相比于单入口型旋风分离器在切向速度、轴向速度和径向速度上有良好的轴对称性, 分离效率较高。周云龙[4]经过数值模拟确定了多入口气液旋流分离器的最佳入口数量为对称双入口。本文通过数值模拟研究双入口型旋风分离器气相速度流场特性及不同粒径下的分离效率, 为旋流分离器的进一步研究提供一定的参考。

## 2. 几何模型建立与网格划分

旋风分离器结构包括入口、旋流腔、锥形筒、底流口、溢流筒, 如图 1 所示。而分离器入口结构、旋流腔直径、锥形筒锥角、底流口直径、溢流口直径对旋风分离器的属性产生极大影响, 各个结构相互关联, 改变任一结构参数都会影响内部流场及分离效率, 因此选取合适的尺寸至关重要。

本文所研究的分离器以 starimand 型旋风分离器为基础模型, 液滴的分离粒径在 10  $\mu\text{m}$  以下, 所以选取微型旋风分离器。参考文献[5]中分离器结构参数研究, 尺寸选取如表 1 所示。

由于旋风分离器内流场的复杂性较强, 在进行离散化处理时很难使用常用的结构化网格, 为保证计算精度及收敛性, 本文采用非结构化四面体网格对计算域进行加密处理, 同时为了减小计算量和提高收敛速度, 经过网格无关性检验, 单元尺寸取 2 mm, 总体网格划分格数超过 24 万时, 溢流口的压力降基本保持稳定, 网格划分如图 2 所示。



**Figure 1.** Geometric model of cyclone separator  
**图 1.** 旋风分离器几何模型

**Table 1.** Size scale (mm)  
**表 1.** 尺寸表(mm)

$d$	$D$	$D_0$	$H_1$	$H_2$	$L_2$	$L_1$
15	11	50	95	160	25	25



**Figure 2.** Cyclone separator grid division  
**图 2.** 旋风分离器网格划分

### 3. 数值模拟过程

#### 3.1. 工作原理

在旋风分离器内，液滴受气相流场的影响，在径向受到向外的离心力；同时液滴随高速旋转的气相

流场盘旋, 受到向心流场的空气曳力。空气曳力与离心力方向相反, 液滴能否从气相流场中分离出来取决于两种力的大小。

分离器内, 液滴受到的曳力和离心力为:

$$F_a = \frac{\pi}{6} d^3 \rho \frac{\mu_w^2}{r} \quad (1)$$

$$F_L = 6\pi\mu_w d \quad (2)$$

式中:  $F_a$  为离心力;  $\rho$  为液滴的密度;  $\mu_w$  为液滴黏度;  $r$  为旋转半径;  $d$  为液滴直径;  $F_L$  为空气曳力;  $\mu$  为液滴黏度

当  $F_a > F_L$  时, 液滴受到离心力的作用效果大于空气曳力, 液滴会从气相场中被甩到壁面, 从而实现分离效果; 当  $F_a \leq F_L$ , 液滴受到空气曳力大于离心力, 液滴此时对气相流场的追随性较好, 会随空气从溢流口排出, 不能实现液滴的分离。

液滴从气相流场中被分离出来主要取决于离心力的大小, 由式 1, 式 2 可知, 液滴粒径  $D$  是影响离心力和曳力大小的关键参数。因此, 对于液滴必然有一个临界粒径  $D_p$ , 当液滴粒径  $D > D_p$ , 液滴受到向外的离心力大于向内的力, 液滴向壁面运动, 当  $D < D_p$ , 液滴会随气相流场从中心上升至溢流口。结合式(1), 式(2)可知:

$$D_p = 2\sqrt{\frac{36\mu r}{\mu_w \rho}} \quad (3)$$

### 3.2. 控制方程

旋风分离器中的流场属于强旋流场, 复杂性较强, 湍流运动表现为各向异性。而雷诺应力模型(RSM)对于高速旋转的流场具有良好的预测效果[6]。RSM 模型相比较 K-ε 模型的两方程约束, 增加了连续形方程、动量方程、雷诺运输方程, 形成五方程的控制约束, 精确度要更好, 更加全面的考虑了弯曲流线、旋转和漩涡流, 尤其是在强旋流的模拟方面能够得到更加精确的结果[7]。因此, 选取 RSM 更能符合分离器内的流场模拟, 其基本方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{\mu}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\mu}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{\mu}_i \bar{\mu}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{\mu}'_i \bar{\mu}'_j \right) \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\mu_i$  为瞬时速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $\bar{\mu}_i$  为平均速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $\bar{\mu}'_i \bar{\mu}'_j$  为雷诺应力分量; 下角标  $i, j, k = 1, 2, 3$ ;  $x_i$  为空间位置, 无量纲;  $\bar{p}$  为平均压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为流体动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

雷诺应力模型运输方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\mu}'_i \bar{\mu}'_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{\mu}_k \bar{\mu}'_i \bar{\mu}'_j)}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (6)$$

式中:  $D_{ij}$  为扩散项, Pa/s;  $P_{ij}$  为应力产生项, Pa/s;  $G_{ij}$  为浮力产生项, Pa/s;  $\varphi_{ij}$  为应力应变再分配项, Pa/s;  $\varepsilon_{ij}$  为离散相, Pa/s;  $F_{ij}$  为旋转系统产生项, Pa/s。

本文研究的旋风分离器主要用于气相夹液的处理工况, 液滴的质量流量为 0.3 kg/s, 液相的体积分数占比小于 10%, 所以采用 DPM 模型来控制液滴的运动轨迹, 液滴作为离散相从两侧入口跟随连续相流场进入计算域, 通过跟踪每一个颗粒的轨迹来研究其分离效率, DPM 模型控制方程如下[8]:

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = F_D(u_i - u_{p,i}) - \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g_i + F_i \quad (7)$$

式中:  $u_p$  为颗粒速度, m/s;  $u$  为颗粒所在位置连续相的速度, m/s;  $\rho_p$  为颗粒密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g_i$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $F_i$  为颗粒所受其他作用力, m/s<sup>2</sup>;  $F_D(u_i - u_{p,i})$  为颗粒在  $i$  方向的单位质量曳力, m/s<sup>2</sup>。

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为流体黏度, Pa·s;  $d_p$  为颗粒直径, m;  $C_D$  为液滴曳力系数;  $Re_p$  为颗粒雷诺数。

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

### 3.3. 参数设置

两入口设置为速度入口(velocity-inlet), 速度大小为 5 m/s, 溢流口的湍流按照充分发展处理, 设置为出流边界(outflow), 底流口在实际工作中和集液罐连接, 故在模拟过程中边界条件设置为壁面(wall), 分离器壁面为绝热无滑移条件。压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 压力插值方式采用二阶迎风格式进行离散化处理。为了模拟结果的准确性, 本文作出如下假设:

- 1) 忽略液滴和液滴之间的作用力;
- 2) 不考虑液滴的碰撞、破碎、聚合;
- 3) 液相流场与连续流场仅为单向耦合, 即仅考虑空气对液滴的影响作用, 忽略液滴对空气的影响。

液滴的密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>, 均匀的从分离器入口射入, 速度与连续相速度相等; 液滴运动到壁面时, 认为液滴被反射参与到下一个旋转场的计算, 设置壁面离散相边界条件为反射(reflect); 设置溢流口离散相边界条件为逃逸(escape); 底流口离散相边界条件为捕获(trape)。

## 4. 模拟结果分析

### 4.1. 气相流场模拟

旋风分离器内部是一个两相强旋流流场, 液滴的分离依托于气相流场[9]-[11]。故本文重点研究气相速度流场规律, 为后续研究气液两相分离机理奠定一定的理论基础。

图 3 为气相流体速度云图, 从图中可知, 速度流场在尾端的分布相较于单入口旋流分离器, “摆尾”现象减弱, 呈现良好的对称性; 外层气流速度以较大速度向下运动, 最大可达 9.4 m/s, 内层气流先以 2 m/s 速度向上运动, 在溢流口附件速度大小发生突变, 最大速度达到初始速度的两倍以上, 此时形成复杂流场, 气体流经溢流筒时, 有效流通面积减小导致气流速度的急增, 产生能量损失, 湍流耗散率增大[12]-[14]; 同时也可以发现, 气体在进入分离器时, 部分气流直接从溢流口流出, 在气液两相运动过程中, 这会导致一部分液滴跟随气流从溢流筒排出形成短路流, 从而影响分离效率。

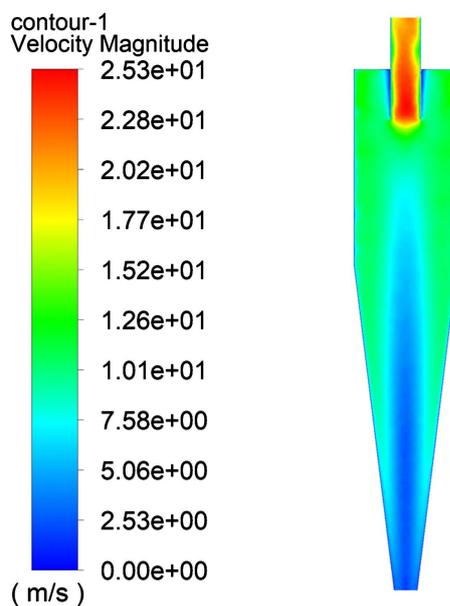


Figure 3. Gas phase velocity cloud diagram  
图 3. 气相速度云图

切向速度在气液分离过程中占主导地位, 液滴在切向速度的带动下旋转。由图 4 可以看出, 切向速度在分离器内的分布沿中心轴线呈良好的轴对称性, 整个涡旋运动由中心轴线方向上的上行强制涡和中心外部区域下行准自由涡构成。切向速度在溢流口附件发生突变, 这表明速度波动剧烈, 受到短路流作用液滴更容易跟随气体从溢流筒排出, 未能参与到离心分离过程。从图 5 可以看出切向速度在近壁面处为 0, 沿径向方向至轴心处, 切向速度大致呈现先增大后减小的趋势, 在轴心处减小到最小, 整个切向速度分布呈现良好的对称性, 大致呈现“M”型, 并且速度全部大于 0, 代表气相流场的旋转方向相同; 外部的准自由涡切向速度较大, 液滴更容易被分离出来。

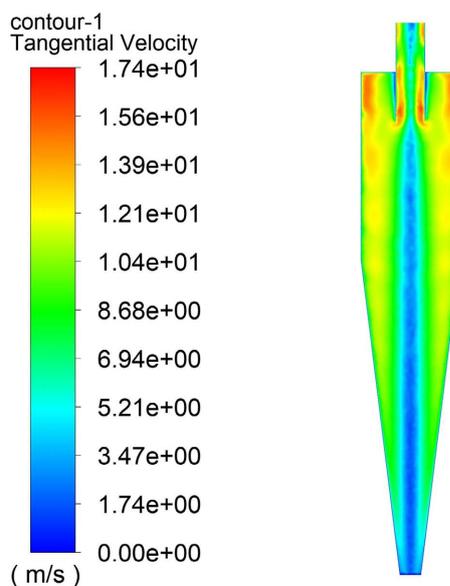
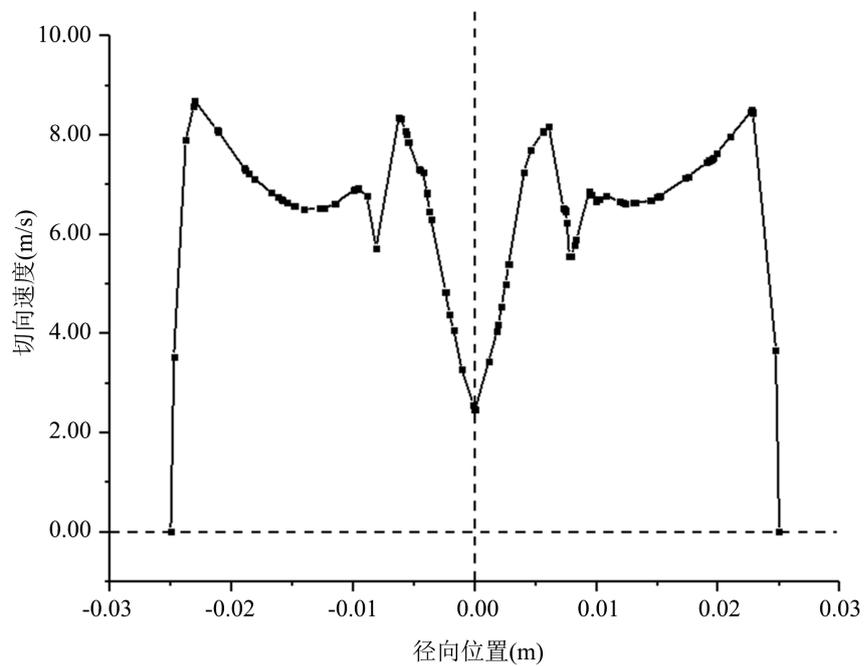
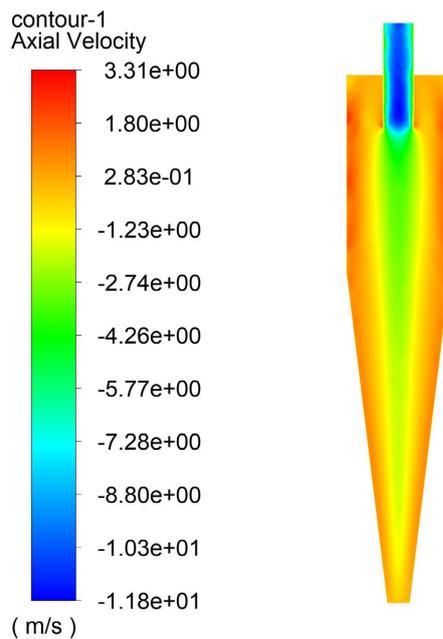


Figure 4. Tangential velocity cloud diagram  
图 4. 切向速度云图



**Figure 5.** Radial distribution curve of tangential velocity on Z-section  
**图 5.** Z 截面上的切向速度径向分布曲线

轴向速度在分离器内的分布呈现良好的对称性,这是由分离器的结构所决定的。由图 6 和图 7 可知,轴向速度的方向发生了明显变化,外部自由涡旋流向下运动,中心处强制涡旋流向上运动,所以气流的走向是由轴向速度决定的;在 Z 截面的径向位置上,外部自由涡轴向速度最大可至 2 m/s,沿半径向轴心处呈现先增大后减小趋势,而中心强制涡由两边向中心轴心速度呈现递增趋势,最大速度可达 15 m/s。



**Figure 6.** Axial velocity cloud  
**图 6.** 轴向速度云图

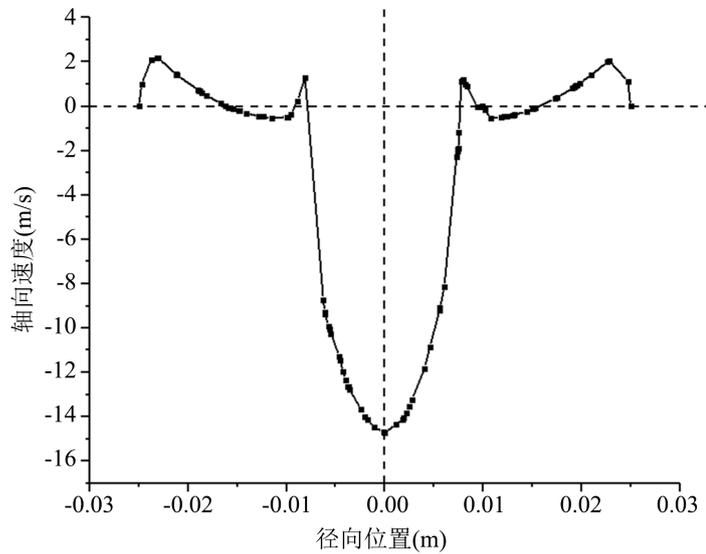


Figure 7. Radial distribution curve of axial velocity on Z-section

图 7. Z 截面上的轴向速度径向分布曲线

如图 8 所示, 径向速度分布整体来说较为稳定, 速度的变化较小, 出现较大速度变化区域为溢流口附近, 溢流口区域的速度方向呈现向心性, 速度大小为 3.67 m/s。由图 9 可知, 在 Z 截面上, 溢流口区域速度方向为正, 呈现离心性, 并且速度大小小于溢流口区域速度, 这表明, 在溢流口区域的短路流现象严重, 颗粒从溢流口逃逸的可能性较大, 同时分析可得, 颗粒此时所受的曳力大于离心力; 中心强制涡的径向速度大小沿半径向轴向方向上呈现先增大后减小趋势, 最大可达到 4.5 m/s, 然后减小至 1 m/s。

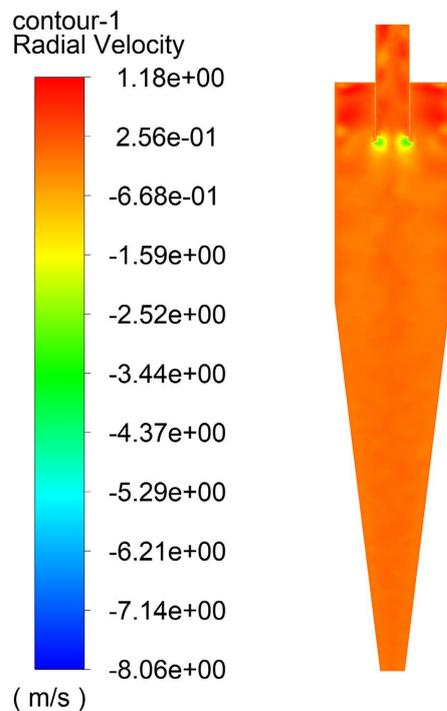
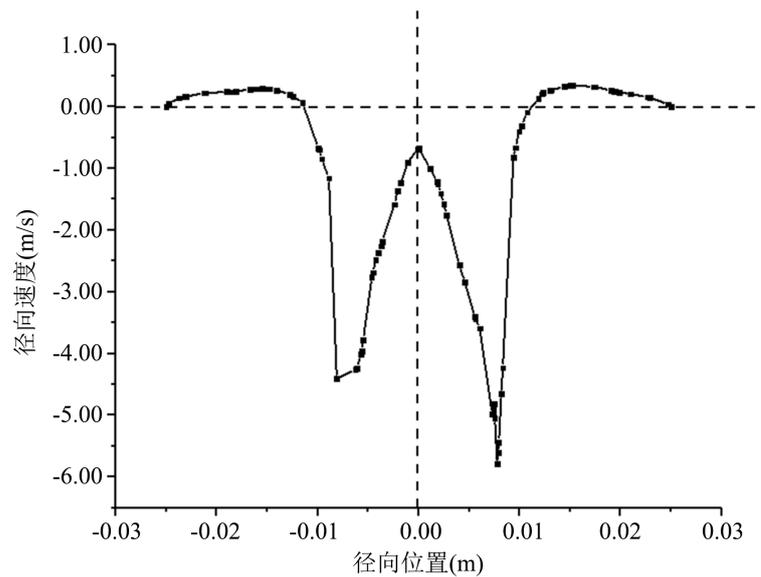


Figure 8. Radial velocity distribution cloud map

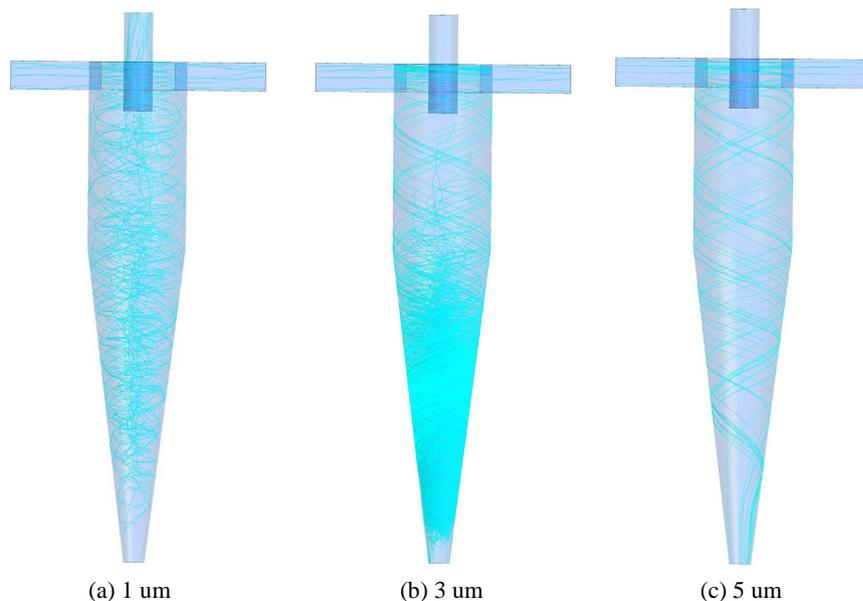
图 8. 径向速度分布云图



**Figure 9.** Radial velocity distribution curve on Z-section  
**图 9.** Z 截面上的径向速度径向分布曲线

#### 4.2. 气液分离效率分析

取 16 个服从均一分布粒径大小的液滴, 分别模拟不同粒径在 5 m/s 入口速度条件下的液滴运动轨迹, 从图 10(a)可以看出 1  $\mu\text{m}$  液滴对气流的追随性较强, 当运动到底部锥体段时液滴跟随内部气流向上运动从溢流口逃逸; 3  $\mu\text{m}$  液滴进入锥体段时分离时间相对较长, 一段时间后一部分液滴被直接分离被底流口捕获, 另一部分液滴被甩到壁面从壁面滑下最终被捕获; 5  $\mu\text{m}$  液滴分离时间相对较少, 全部液滴被分离出来在底流口被捕获; 结合图 10(a)~(c)分析可得: 随着粒径增大, 分离效果也逐渐增强, 液滴在分离器内停留时间也相对减少。



**Figure 10.** The trajectory of droplets with different particle sizes  
**图 10.** 不同粒径液滴运动轨迹

图 11 展示了入口速度与不同粒径颗粒的分离效率关系。从图中可知, 随着入口气速的增大, 分离效率呈现递增的趋势; 基于本文所研究的分离器结构尺寸下, 对于超过 1  $\mu\text{m}$  粒径的液滴有着较为良好的分离效果; 小粒径的液滴对于气流的追随性较好不容易被分离出来; 结合图 8 和图 9 预测临界粒径在 1~3  $\mu\text{m}$  之间且超过临界粒径的液滴具有良好的分离效果; 对于 10  $\mu\text{m}$  粒径的液滴, 当入口气速超过 10  $\text{m/s}$  时, 分离效果达到了 100%。

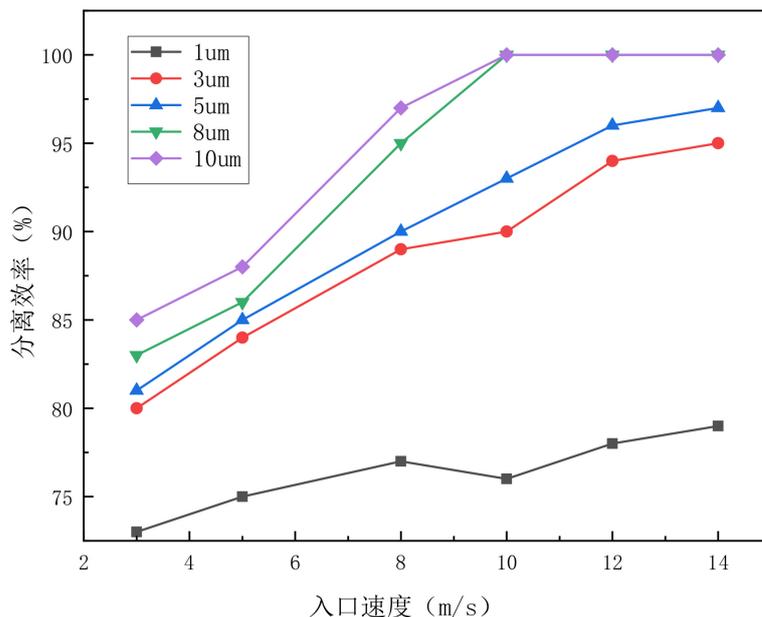


Figure 11. Separation efficiency curve

图 11. 分离效率曲线

## 5. 结论

1) 双切向入口旋流分离器相较于单入口旋流分离器速度流场呈现良好的轴对称性, 在锥筒尾端的“摆尾”现象有所减弱。

2) 溢流口区域的流场较为复杂, 能量损耗、分离效率低大多源于溢流口区域发生了短路流现象, 如何减小溢流口区域的短路现象和二次流问题是提高分离效率的关键因素之一。

3) 基于本文所研究的分离器结构尺寸下, 随着液滴粒径的增大, 分离效率呈现增高趋势, 但对于小粒径液滴的分离效果不如大粒径液滴, 临界粒径的大小在 1~3  $\mu\text{m}$  之间。

4) 在本文分离器结构尺寸下, 当入口气速超过 8  $\text{m/s}$ , 对于 10  $\mu\text{m}$  粒径液滴的分离具有非常好的分离效果。

## 参考文献

- [1] 李腾, 孙治谦, 王朝磊, 等. 微型双蜗式气液旋流分离器数值模拟研究[J]. 石油机械, 2022, 50(6): 98-105.
- [2] 张美凤, 常重喜, 纳红卫, 等. 旋风分离器内湿蒸汽两相流动分析[J]. 发电设备, 2022, 36(5): 328-332.
- [3] 袁惠新, 石斌磊, 付双成, 等. 旋风分离器矩形入口高宽比对流场及性能的影响研究[J]. 流体机械, 2019, 47(5): 39-43.
- [4] 周云龙, 米列东, 杨美. 气液旋流分离器切向入口数量优化的数值模拟[J]. 矿山机械, 2013, 41(10): 103-107.
- [5] 冯钰润. 螺带式旋流分离器结构设计及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.

- 
- [6] 苗春雨, 邢雷, 李枫, 等. 紧凑型气液旋流分离器结构参数显著性分析[J]. 石油机械, 2023, 51(5): 86-93.
- [7] Yang, L., Zhang, J., Ma, Y., *et al.* (2019) Experimental and Numerical Study of Separation Characteristics in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone. *Chemical Engineering Science*, **214**, Article ID: 115362. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115362>
- [8] 米列东. 气液旋流分离器结构优化的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2014.
- [9] 张磊. 气液旋流分离器流场特性及分离性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [10] Wei, Y., Song, J., Shi, M., *et al.* (2005) Numerical Simulation of the Asymmetric Gas Phase Flow Field in a Volute Cyclone Separator. *Progress in Natural Science*, **15**, 98-104. <https://doi.org/10.1080/10020070512330014>
- [11] 崔益华, 张颖翀, 张建辉, 等. 进口条件对旋风分离器性能影响研究[J]. 起重运输机械, 2022(16): 26-29.
- [12] 吴旭湘. 基于 CFD 的气液旋流分离器流场模拟与结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [13] 蔡禄, 孙治谦, 朱丽云, 等. 气液旋流分离技术应用研究进展[J]. 石油机械, 2021, 49(1): 102-109.
- [14] Marcinkiewicz, J. (2021) The Numerical Modeling of Gas Movement in a Single Inlet New Generation Multi-Channel Cyclone Separator. *Energies*, **14**, Article No. 8092. <https://doi.org/10.3390/en14238092>