

级联双蜗式气液旋流分离器结构设计

朱佳丽¹, 谌 泉¹, 熊 林²

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²中国石油川庆钻探工程有限公司川东钻探公司越创机电公司, 重庆

收稿日期: 2025年6月17日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

在油气开采中, 柱状气液旋流分离器常用于井口流体的初级分离, 以快速脱除天然气中的液态烃和水。其结构紧凑、无运动部件及低维护成本的特点, 使其在低气液比、低流速工况下表现出显著优势, 但在高气液比及高流速工况条件下, 受湍流强度增强及短路流现象加剧的影响, 柱状气液旋流分离器分离性能会变差。因此, 针对高气液比工况, 基于传统柱状气液旋流分离器设计一种级联式气液旋流分离器具有一定的理论和现实意义。

关键词

级联双蜗式气液旋流分离器, 数值模拟, 结构优化

Structural Design of Cascaded Double-Scroll Gas-Liquid Cyclone Separator

Jiali Zhu¹, Xiao Chen¹, Lin Xiong²

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Yuechuang Electromechanical Company, Sichuan East Drilling Company, PetroChina Sichuan Qing Drilling Engineering Co., Ltd., Chongqing

Received: Jun. 17th, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

In oil and gas production, columnar gas-liquid cyclone separators are often used for primary separation of wellhead fluids to quickly remove liquid hydrocarbons and water from natural gas. Its compact structure, no moving parts and low maintenance cost make it show significant advantages under low gas-liquid ratio and low flow rate conditions. However, under high gas-liquid ratio and high flow rate conditions, the separation performance of the columnar gas-liquid cyclone separator

will deteriorate due to the enhanced turbulence intensity and the intensified short-circuit flow phenomenon. Therefore, for high gas-liquid ratio conditions, it has certain theoretical and practical significance to design a cascade gas-liquid cyclone separator based on the traditional columnar gas-liquid cyclone separator.

Keywords

Cascaded Double-Scroll Gas-Liquid Cyclone Separator, Numerical Simulation, Structural Optimization

Copyright © 2025 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

旋流分离器具有结构紧凑、分离效率高以及制造维护成本低等优点，在油气开发、矿产开采及诸多化工行业中获得了广泛应用。在天然气工业中，气液分离技术具有重要作用，已成为天然气集输流程中一个不可或缺的组成部分，展现出了广泛的应用价值。国内外的研究者们对之也做了大量的研究工作。寇杰[1]等研究了入口倾角和液相粘度对气液旋流分离器分离性能的影响。Erdal [2]等采用数值模拟方法，探究了柱状气液旋流分离器内部的流场分布状况。研究指出轴向速度分为上行流和下行流，靠近筒体边缘一侧为下行流，靠近分离器筒体轴心一侧则为上行流。Wang [3]等对传统的柱状气液旋流分离器(GLCC)进行了创新设计，改进了内锥结构。新的设计适用于高含气率和高流速的工况。利用响应面法进行优化，确定了分离器的最优结构参数。Martignoni [4]等通过 CFD 方法研究旋风分离器的几何结构对其性能参数的影响。Misiulia [5]等通过数值模拟得到旋风分离器的分离效率和压降均随入口角度的增大而降低的研究结果。陈娟[6]等深入探究了分离器内部流场特性，对比了采用中心布置与偏移布置的排气管设计所带来的影响。研究发现，经过优化设计后，液滴的离心力显著增强。金向红[7]等研究发现，扩散锥形排气管可以减弱短路流的影响，抑制排气管内壁液膜的形成和轴向爬升，有利于提高分离器分离性能。杨兆铭[8]等设计了级联旋流气液分离装置，研究发现，装置入口的单一设置导致内部流场非轴对称，表现为筒体的几何轴心与流场旋转中心不重合。入口截面积和升气管直径越小，流场的不稳定程度越小。

气液旋流分离器分离原理如下：气液两相由入口进入旋流腔后做螺旋向下运动，由于气液两相的密度相差较大，密度更大的液相受到的离心力远大于密度较小的气相，在离心力的作用下液相向壁面移动，被壁面捕获后形成液膜，液膜在重力作用下沿壁面向下流动进入底流口；气相则往分离器筒体轴心汇聚，形成中心气核，然后进入溢流口，在此过程中未被分离的液相会随气相一同由溢流口排出分离器。

因此本文基于多级分离思想，针对高气液比的特殊工况，设计并优化一种级联气液旋流分离器，实现对气液两相的二级分离，探究其在高气液比这一特殊工况下的分离特性，这对此类设备的研究与应用具有重要意义。

2. 级联双蜗式气液旋流分离器几何模型

参照 Zhao [9]提出的等效转化方法初步确定分离器的直径等各部分尺寸，该法将锥形旋风筒转换为等效圆柱体，以解决颗粒在锥形段与圆柱段运动距离不均的问题，保证转化后的柱状旋风分离器与原柱状旋风分离器的有效旋风长保持一致，使二者的颗粒收集距离保持一致。转化后的柱状旋风分离器如图 1 所示。

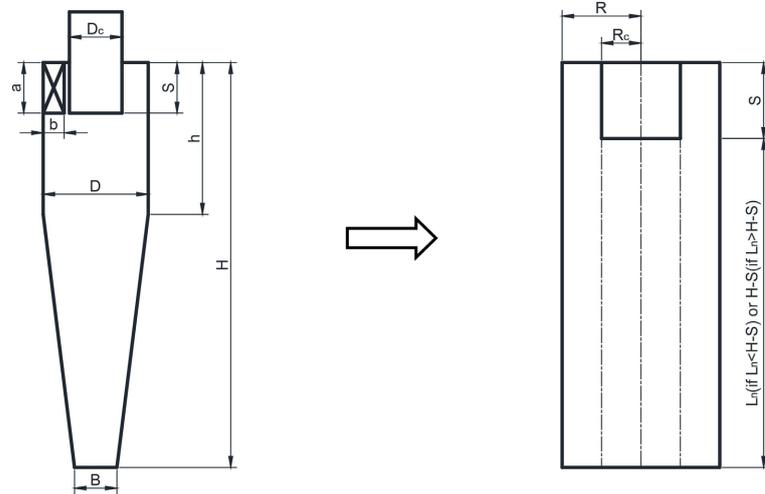


Figure 1. Equivalent conversion size
图 1. 等效转化尺寸

在气液旋流分离器的设计中，尺寸的确定是关键环节，尤其是筒体半径这一核心参数。等效转化方法的等效半径计算公式如下[8]：

$$V_{cs} = \frac{\pi D^2 h}{4} + \frac{\pi D^2 (S + L_n - h)}{4} \left[1 + \frac{D_c}{D} + \left(\frac{D_c}{D} \right)^2 \right] (L_n \leq H - S) \quad (1)$$

$$D_c = D - \frac{(D - B)(S + L_n - h)}{H - h} \quad (2)$$

$$\frac{L_n}{D} = 2.3 \frac{D_c}{D} \left(\frac{D^2}{ab} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$R = \left[\frac{V_{cs}}{\pi(S + L_n)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

或

$$V_{cs} = \frac{\pi D^2 h}{4} + \frac{\pi D^2 (H - h)}{4} \left[1 + \frac{B}{D} + \left(\frac{B}{D} \right)^2 \right] (L_n \geq H - S) \quad (5)$$

$$R = \left[\frac{V_{cs}}{\pi H} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中： V_{cs} ——有效分离空间，m；

D ——圆柱段筒体直径，m；

S ——排气管内置深度，m；

L_n ——自然旋风长，m；

h ——圆柱段筒体高度，m；

D_c ——排气管直径，m；

B ——底流口直径，m；

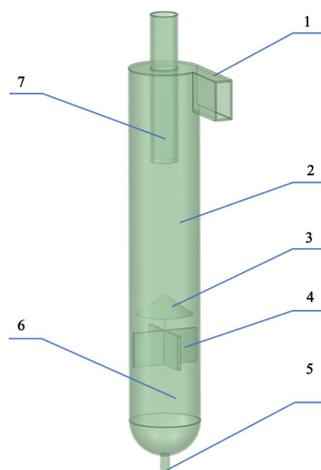
H ——分离器筒体总高度，m；

a ——矩形截面入口高度, m;

b ——矩形截面入口宽度, m;

R ——等效半径, m。

本研究选择加长排气管, 利用排气管中产生的二级旋流对气液进行二次分离, 使得气液分离更加彻底, 提高分离器的分离性能。级联气液旋流分离器设计方案如图 2 所示。



1. 矩形直切入口, 2. 主分离空间, 3. 止旋锥, 4. 止旋片, 5. 液相出口, 6. 液池, 7. 排气管

Figure 2. Schematic diagram of the structure of a secondary gas-liquid cyclone separator

图 2. 级联式气液旋流分离器结构示意图

级联式气液旋流分离器的主分离区由三部分构成, 一是排气管与分离器筒体壁面之间起预分离作用的环形分离空间, 二是排气管下方的主分离空间, 三是排气管内部的二级分离空间, 简化后的几何模型如图 3 所示。简化后的几何模型尺寸如表 1 所示。

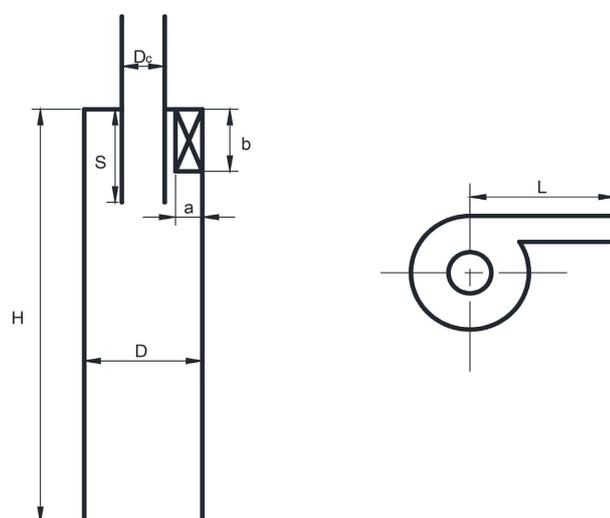


Figure 3. Simplified baseline geometric model

图 3. 简化后基准几何模型

Table 1. Simplified geometric model dimensions**表 1.** 简化后几何模型尺寸

尺寸名称	符号	数值	单位
筒体直径	D	220	mm
筒体高度	H	800	mm
矩形入口高度	a	120	mm
矩形入口宽度	b	50	mm
矩形入口长度	L	270	mm
排气管直径	Dc	80	mm
排气管内置深度	S	180	mm

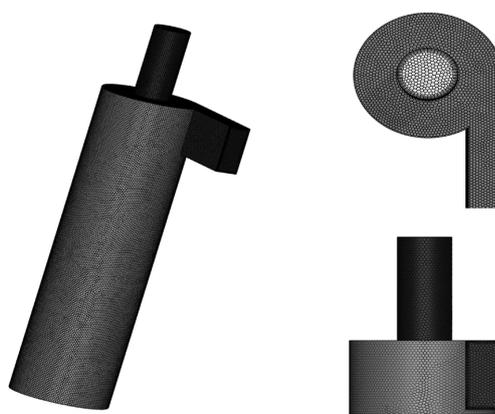
3. 级联级联双蜗式气液旋流分离器数值模拟

1) 数值模型

由于气液旋流分离器中流体的流动为三维强旋流，具有明显的强湍流特征，本研究将选用雷诺应力模型(RSM)对旋流分离器内部的流场展开数值模拟，该模型对于复杂各向异性湍流涡旋、旋转等现象能实现准确预测。另外，根据高气液比工况下气液旋流分离器的分离性能，液相的体积分数小于 10%，适用于离散颗粒模型(DPM)。

2) 网格模型及求解设置

网格模型的构建对数值模拟的精确度与效率具有重要影响。通常情况下，网格数量越多，则数值模拟的精度越高，但是模拟所需的时间也随之增加。因此网格的划分应在计算精度和计算时间上取得平衡，即在保证计算精度的前提下减少网格数量，以节约时间成本。本研究采用 Fluent Meshing 划分网格，划分方法设置为 poly-hexcore (六面体核心 - 多面体辅助)。为确保近壁面处的计算精度，设置了边界层对网格进行加密处理；同时，考虑到内部流场分布存在差异，对速度梯度较大的区域也进行了针对性的加密。网格划分细节如图 4 所示。

**Figure 4.** Mesh partitioning**图 4.** 网格划分

入口边界条件设置为 Velocity-inlet，即速度入口。连续相为空气，其黏度和密度分别为 1.79×10^{-5} Pa·s 和 1.225 kg/m^3 ；离散相为水，其黏度和密度分别为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 998.6 kg/m^3 。气相和液相入口速度

均为 5~20 m/s, 液滴粒径为 1~10 μm , 液相, 气相体积含液率为 1%~10%。湍流方法设置为 Intensity and Hydraulic Diameter。气相出口设置为 outflow, 按照两相流动充分发展处理。由于设置了止旋锥将主分离空间和液相出口隔开, 在简化的模型中可将液相出口视作壁面, 液滴到达此处被捕获。壁面边界条件设置为 no slip boundary conditions, 即无滑移边界条件。近壁面处设置为标准壁面函数。

在 Fluent 流体模拟中相关求解设置如表 2。

Table 2. Solution settings

表 2. 求解设置

数值解法	格式
离散格式	QUICK
压力差值方法	PRESTO!
压力速度耦合方案	SIMPLEC
湍动能	Second order upwind
湍流耗散率	Second order upwind
雷诺应力	First order upwind

3) 模型验证

网格模型的构建对数值模拟的精确度与效率具有重要影响。通常情况下, 网格数量越多, 则数值模拟的精度越高, 但是模拟所需的时间也随之增加。在进行网格无关性验证的过程中, 选择五种不同网格数量的模型进行数值模拟, 以进出口压降作为判断依据, 图 5 展示了网格数量对分离器压降的影响。由图可知, 压降随网格数量的增加而升高, 在达到网格数量最大值时, 随着网格数量的进一步增加, 压降变化微小, 整体趋于稳定。

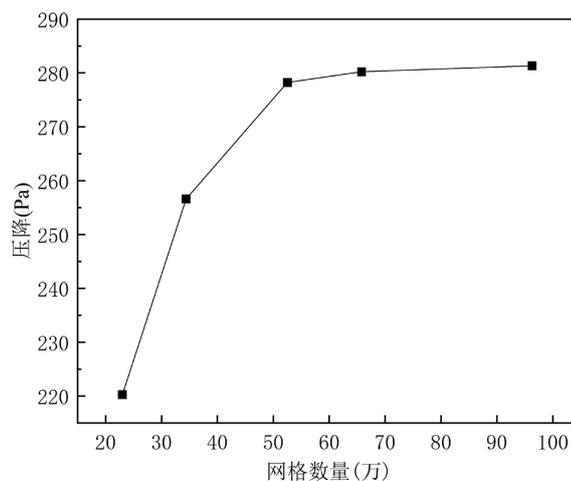


Figure 5. Pressure drop across the separator at different grid quantities

图 5. 不同网格数量时分离器压降

为验证本文模拟结果的可靠性, 选择对 Hoekstra [10]等提出的旋流分离器建模并进行计算, 将模拟得到的切向速度和轴向速度数据与 Hoekstra 的 LDA 实验结果进行对比, 图 6 为对比结果。由图可知, 模

拟数据与实验数据误差在可控范围内, 呈现较高的一致性, 且两者的发展趋势基本相同, 证明了本文所采用的数值模拟方法所得结果的准确性较高, 能够准确地预测分离器的流场特征和分离性能。

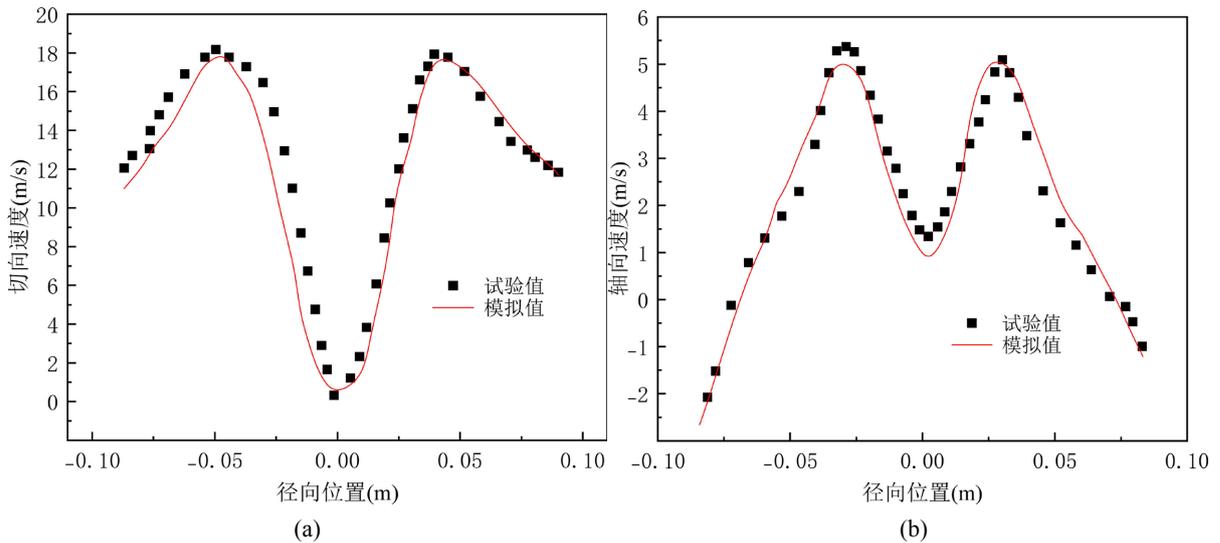


Figure 6. Simulation results compared with experimental results
图 6. 模拟结果与实验结果对比

4. 级联双蜗式气液旋流分离器结构优化

4.1. 排气管结构优化

旋流分离器的排气管通常设计为直圆管结构, 并且在现场采用的柱状气液旋流分离器(GLCC)排气管位于旋流腔内部的长度为零。四种排气管结构如下图 7 所示:

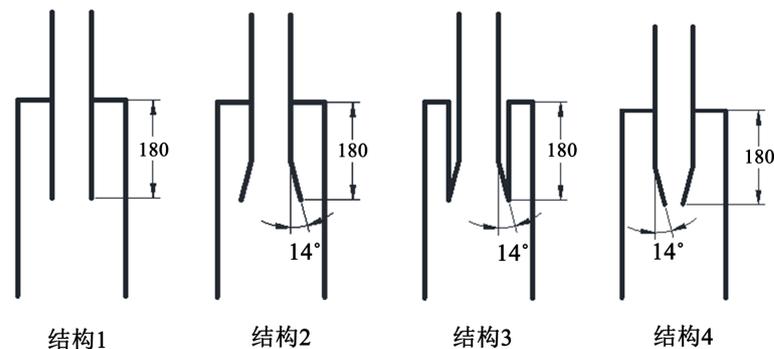


Figure 7. Exhaust pipe structure
图 7. 排气管结构

通过改变结构 2 的排气管与分离器筒体连接处的外壁结构, 可得到结构 3 所示的新结构。参照传统的旋风分离器, 设计了锥形排气管结构, 其结构 4 所示。

1) 不同排气管结构对速度场的影响

从图 8 中可以看出, 不同结构排气管对分离器筒体内切向速度分布无影响, 对于相同排气管结构, 切向速度随轴向高度的增加而小幅增大, 不同 z 坐标截面处切向速度由轴心沿径向向外, 先增大后减小,

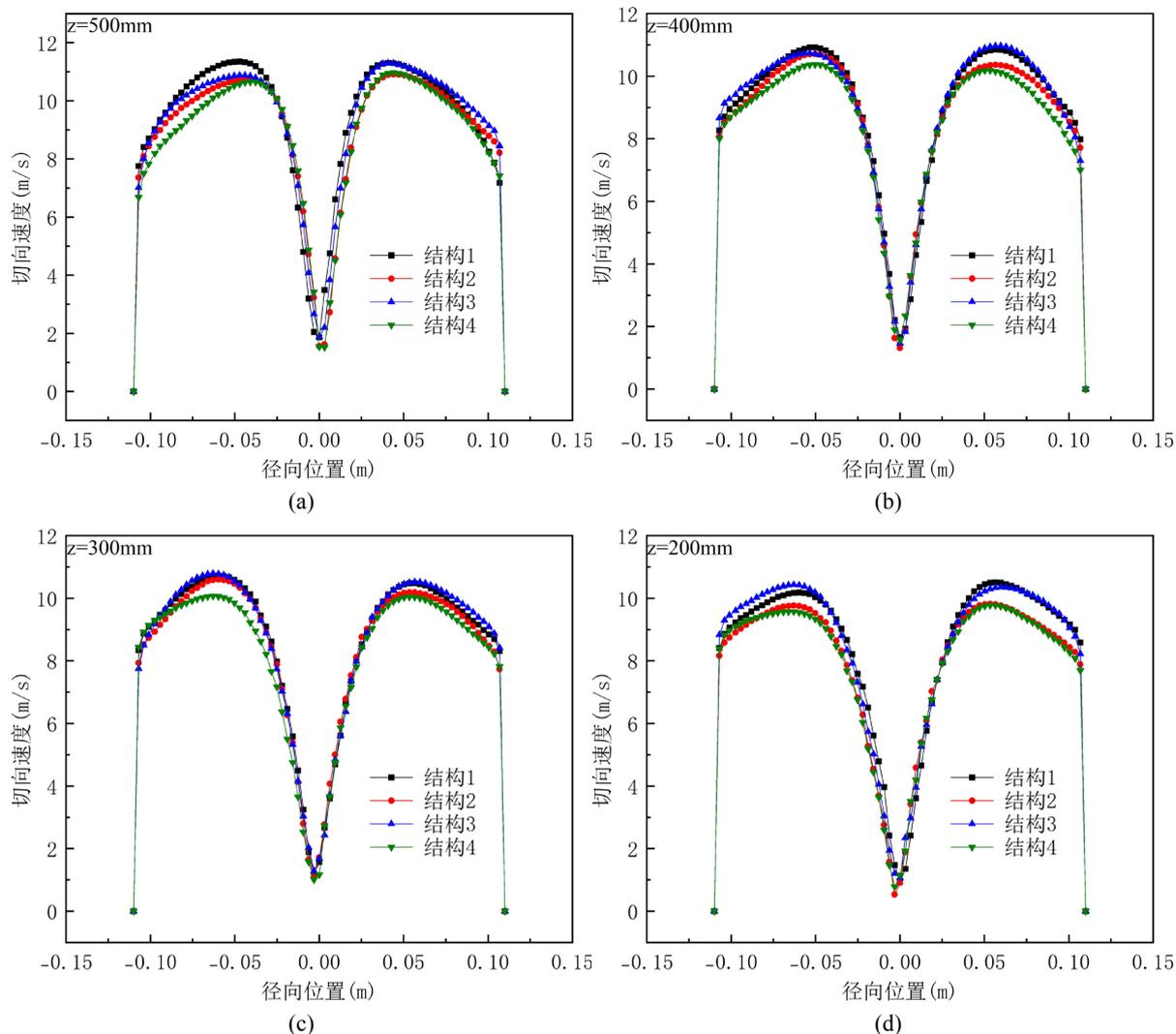


Figure 8. Tangential velocity at each section for different exhaust pipe structures

图 8. 不同排气管结构时各截面的切向速度

整体呈“M”型分布。从整体上看，在同一截面位置处结构 1 与结构 3 切向速度相差较小，且均大于结构 2 和结构 4，最大值位于 $z = 500 \text{ mm}$ 截面处且达到 11.5 m/s 左右。在同一截面位置处，结构 4 的切向速度整体最小，切向速度最小峰值位于 $z = 200 \text{ mm}$ 截面且为 9.5 m/s 左右。同时可以看到， $z = 500 \text{ mm}$ 截面位置处切向速度整体波动幅度较大，这是由于该截面靠近排气口，受短路流影响强于其它截面处，流场不稳定导致速度波动强于其它截面处。总体上看原始结构 1 切向速度较大，液滴所受离心力也更强，更有利于分离，但是扩散锥形排气管可以减轻短路流的影响，分离器的分离性能还需根据压降和分离效率综合分析。

2) 不同排气管结构对压降的影响

从图 9 中可以看出，结构 1 和结构 2 的压降相差不大，均小于结构 3 和结构 4，结构 3 的压降小于结构 4 而大于结构 1 和结构 2，结构 4 的压降最大。

3) 不同排气管结构对分离效率的影响

从图 10 中可以看出，分离效率最高为结构 2，结构 3 的分离效率高于结构 4 和结构 1，结构 4 的分

离效率最低。结构 4 分离效率最低是因为其锥形排气出口使得短路流流量增加，加强了短路流的影响，使部分液滴不经过分离空间而直接进入排气管，导致分离效率下降。

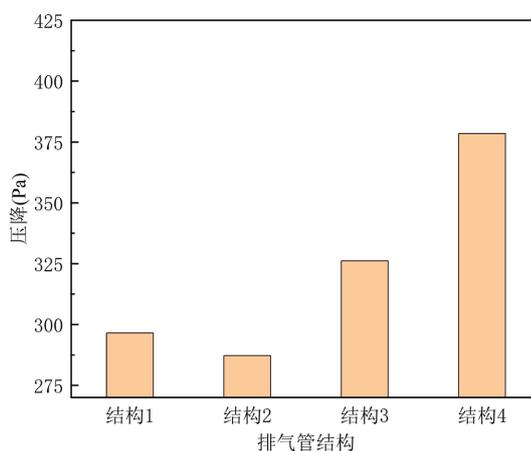


Figure 9. Pressure drop for different exhaust pipe structures

图 9. 不同排气管结构时

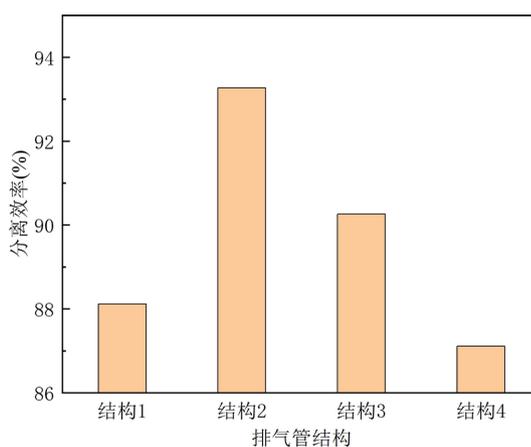


Figure 10. Separation efficiency with different exhaust pipe structures

图 10. 不同排气管结构时分离效率

4.2. 入口结构优化

现对图 11 所示的 4 种入口结构形式的旋流分离器进行模拟，其中结构 1 为等截面矩形入口；结构 2 为渐缩截面矩形入口，矩形截面沿入口速度方向逐渐缩小；结构 3 为等截面圆形入口；结构 4 为新月形入口，与结构 2 相似，只是截面形状变为新月形。同时选取 $Y=0$ mm 截面上 $Z=200$ mm、 $Z=300$ mm、 $Z=400$ mm、 $Z=500$ mm 四个截面，以对比分离器中不同位置处的速度场等的变化情况。

1) 入口结构对速度场的影响

如上图 12 不同入口结构时各截面的切向速度曲线。从图中可以看出，不同入口结构对切向速度的分布形式无影响，切向速度仍然保持中间低两边高的“M”形分布。然而在数值上，不同入口结构导致了显著的速度差异。结构 2 渐缩截面矩形直切入口的切向速度最大，渐缩流道加速效应明显，在入口流速相同的情况下，相比于结构 1 等截面矩形直切入口，各截面位置处切向速度提升约 9%，这是因为渐缩入口的流道截面积是逐渐缩小的，在入口流量不变的情况下，流体流速会逐渐增大。结构 4 新月形入口切向

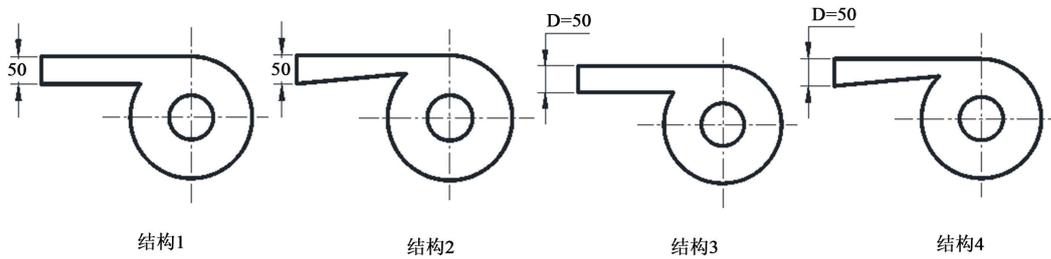


Figure 11. Entry structure
图 11. 入口结构

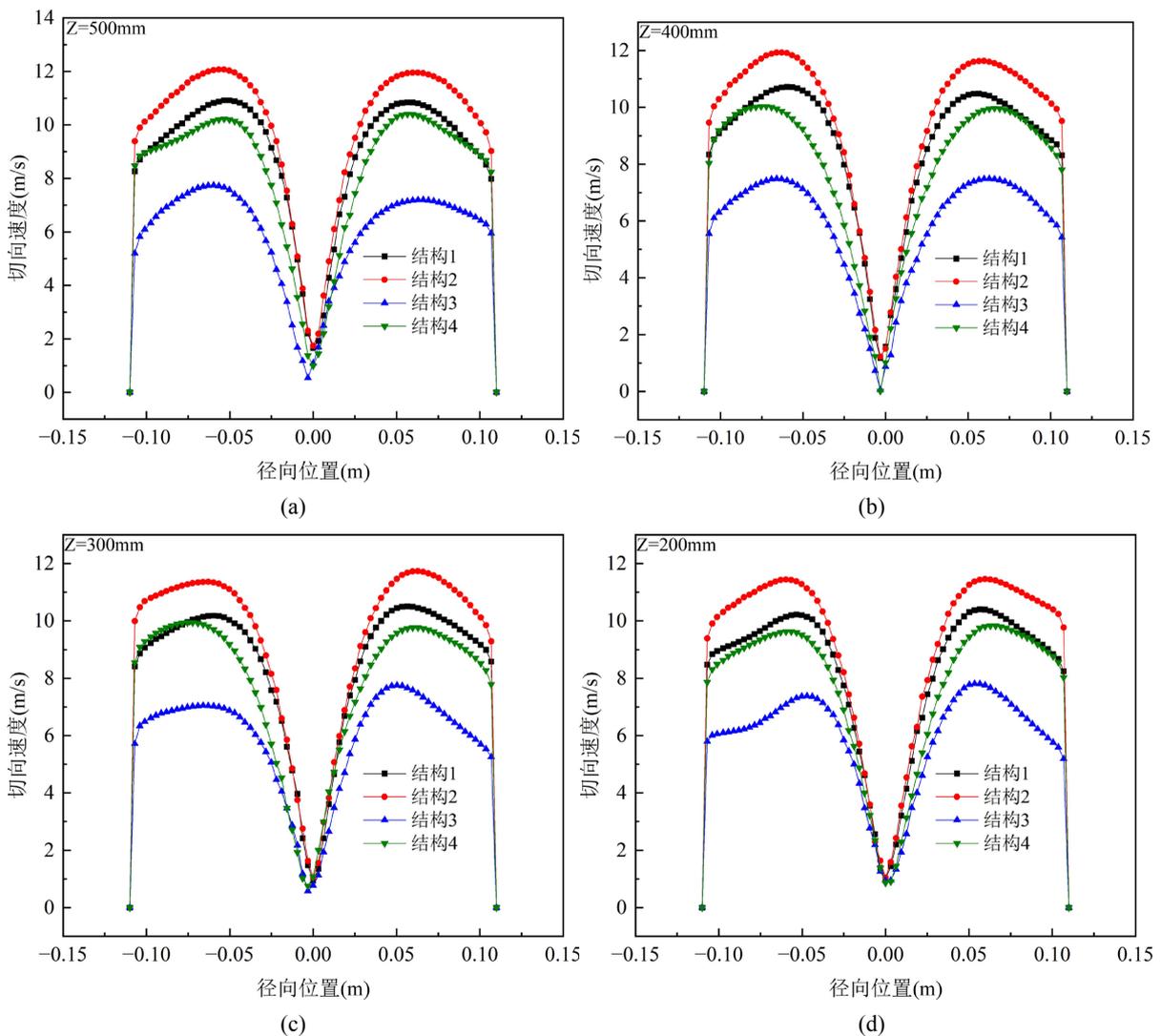


Figure 12. Tangential velocity at each section for different inlet structures
图 12. 不同入口结构时各截面的切向速度

速度大于结构 3 也是基于同样的原因。结构 3 等截面圆形直切入口切向速度速度最小，且从图中可以看出其各截面位置处切向速度曲线对称性明显不如其它入口结构，这是由于圆形入口造成的湍流扰动强于其它三种结构，形成局部湍流和涡流，动能损失增大，故而切向速度明显小于其它三种结构，这对分离

是不利的。结构 2 和结构 4 二者入口同为渐缩截面，且入口水力直径和入口速度等操作参数均相同，但是结构 2 切向速度比结构 4 高约 20%，这是由于结构 2 渐缩截面矩形直入口形状规则，造成的湍流扰动弱于结构 4，流场的均匀性和稳定性均强于结构 4，动能损失也弱于结构 4，因而结构 2 切向速度整体大于结构 4。

2) 入口结构对压降的影响

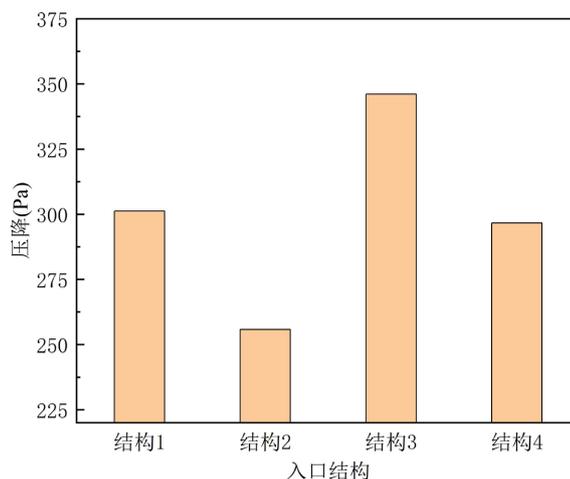


Figure 13. Pressure drop with different inlet structures
图 13. 不同入口结构时压降

图 13 为不同入口结构形式时分离器的压降。从图中可以看出压降由低到高依次为结构 2、结构 4、结构 1 和结构 3。与结构 1 相比，结构 2 为渐缩形入口，入口流道截面积逐渐缩小，在相同工况条件下，结构 2 入口气速变大，流体在直入口处因突然扩张产生强烈的剪切效应和涡流耗散，导致流体在分离器入口与筒体连接处的局部压损增大，同时入口气速增大也会导致筒体内部的动能增加，摩阻损失增大，从而增加压降。

3) 入口结构对分离效率的影响

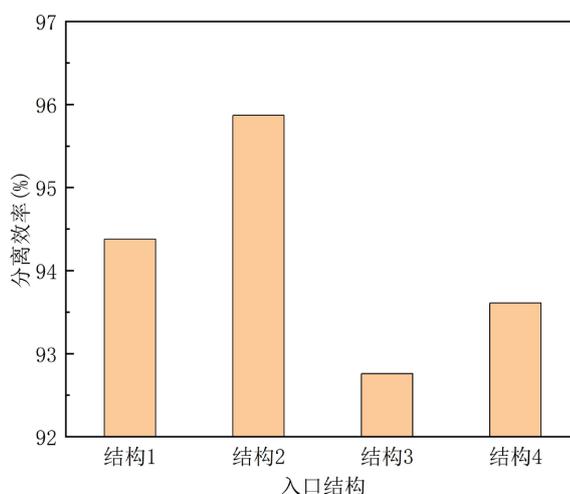


Figure 14. Separation efficiency with different inlet structures
图 14. 不同入口结构时分离效率

从图 14 中可以看出,分离效率由高到低依次为结构 2、结构 1、结构 4 和结构 3。结构 2 与结构 1 相比,渐缩的截面有助于增加流体在入口处的切向速度,从而增强液相所受离心力大小,促进液滴向壁面迁移,提高分离效率。

5. 结论

本文针对高气液比工况,采用等效转化方法,将柱锥旋风分离器结构尺寸向柱状旋流分离器进行等效转化,设计了级联双蜗式气液旋流分离器。构建了气液两相 CFD 模型,湍流模型选择 RSM 模型,选用 DPM 模型模拟液滴轨迹,确定了数值模拟边界条件和求解设置,完成了网格无关性验证和数值模型准确性验证。

本文讨论了不同结构参数对二级气液旋流分离性能的影响,对于直圆管形排气管、扩散锥形排气管、基于扩散锥形排气管改进的排气管、倒锥形排气管四种排气管结构而言,扩散锥形排气管压降最低而分离效率最高,优选扩散锥形排气管。同时选择截面矩形直切入口、渐缩截面矩形直切入口、等截面圆形入口和新月形入口四种入口结构形式进行分离性能对比,研究显示选用渐缩截面矩形直切入口时,分离器压降最低而分离效率最高,优选渐缩截面矩形直切入口。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新计划项目(YKJCX2420136)。

参考文献

- [1] 寇杰, 宫敬, 曹学文. 圆柱式气液旋流分离器的性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008(4): 99-102, 108.
- [2] Erdal, F.M., Shirazi, S.A., Shoham, O. and Kouba, G.E. (1997) CFD Simulation of Single-Phase and Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *SPE Journal*, **2**, 436-446. <https://doi.org/10.2118/36645-pa>
- [3] Wang, S., Jiang, M., Zhang, S., Yu, S., Lu, M. and Zhao, L. (2024) Multi-objective Optimization of a Novel Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Based on Response Surface Methodology. *Chemical Engineering Research and Design*, **212**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.10.030>
- [4] Martignoni, W.P., Bernardo, S. and Quintani, C.L. (2007) Evaluation of Cyclone Geometry and Its Influence on Performance Parameters by Computational Fluid Dynamics (CFD). *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **24**, 83-94. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322007000100008>
- [5] Misiulia, D., Andersson, A.G. and Lundström, T.S. (2017) Effects of the Inlet Angle on the Collection Efficiency of a Cyclone with Helical-Roof Inlet. *Powder Technology*, **305**, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.050>
- [6] 陈娟, 卢啸风, 胡清, 等. 排气管偏置分离器分离性能的数值模拟[J]. 化工进展, 2011, 30(6): 1182-1187.
- [7] 金向红, 金有海, 王振波, 等. 气液旋流分离器排气管结构试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 108-113.
- [8] 杨兆铭, 陈建磊, 韩云蕊, 等. 二级旋流气液分离装置设计与流场特性模拟[J]. 过程工程学报, 2018, 18(6): 1198-1209.
- [9] Zhao, B. (2012) Prediction of Gas-Particle Separation Efficiency for Cyclones: A Time-of-Flight Model. *Separation and Purification Technology*, **85**, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.006>
- [10] Hoekstra, A.J. (2000) Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators. Delft University of Technology, Delft.