

基于 CFD 的涡旋分离装置流动特性研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2006

李 浩 石德伦 魏 黎
方晓光 张 鹏 万鑫强

湖北中烟工业有限责任
公司武汉卷烟厂
湖北 武汉 430068

摘要:为提升碎料分离回收效率并降低原料损耗,设计了一种新型涡旋分离装置。该装置通过结构创新有效强化了旋涡场的稳定性与分离选择性,为资源回收领域提供了新的技术方案。首先,采用计算流体力学(CFD)方法,对该装置在不同负压条件下的流场特性进行了系统的三维数值模拟分析,重点考察了压力分布、速度矢量等关键参数。模拟结果表明,该装置能够形成明显分层的旋涡流场,在-10~-13 kPa负压范围内实现最佳的气固分离效率与旋涡强度匹配。研究结果不仅为涡旋分离装置的结构优化与运行参数设定提供了理论依据,更为相关设备的设计改进指明了方向,对推动绿色制造与资源循环利用具有重要的工程应用价值。

关键词: 涡旋分离; 流体力学; 压力分布; 速度矢量

中图分类号: TH47 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2026)02-0041-08

引文格式: 李 浩, 石德伦, 魏 黎, 等. 基于 CFD 的涡旋分离装置流动特性研究 [J]. 包装学报, 2026, 18(2): 41-48.

1 研究背景

近年来,随着工业领域向绿色制造和资源循环利用方向转型,生产过程中产生的大量碎料与副产品的回收再利用已成为行业可持续发展的关键课题。一方面,高效分离并回收这些物料能够显著降低原料损耗,缓解供应链波动带来的压力,同时减少固体废弃物的处置成本;另一方面,这些物料本身仍具有较高的再利用价值,其有效回收对于提升整体资源利用率、增强产业经济效益与环境效益具有双重意义^[1]。然而,传统分离工艺在精度方面仍面临瓶颈,成品中往往掺杂一定比例的杂质,这些杂质多被直接作为废弃物处置,不仅造成资源浪费,也增加了生产成本与环境负担^[2]。与此同时,劳动力成本的持续上涨与传统生产模式的局限性,促使生产流程向全程机械化、自动化方向演进。

近年来,随着物联网、人工智能等先进技术的渗透,智能化装备在工业生产中的应用日益广泛,这些技术不仅为产业现代化提供了支撑,也对高性能、高适应性的专用分离与加工设备提出了更高要求^[3]。然而,目前广泛应用的分离与回收技术仍存在明显短板,需要在高分离效率、低压力损失和低功耗之间找到平衡点。尽管风选、筛分、气流分级等传统方法在一定程度上提升了分离精度,但其普遍存在能耗偏高、设备结构复杂、压力损失大、分离效率受发动机进气状态影响大、对不同物料适应性有限等问题,难以完全契合当前绿色制造与资源循环利用所强调的高效、低耗、灵活的应用需求^[4]。针对以上问题,本文提出一种新型涡旋分离装置,该装置系统整合切向进气结构、圆弧形导流面与分叉式流道设计,在增强旋流稳定性的同时提升分离选择性,实现了结构简化与能效优化的双重目标。

收稿日期: 2025-09-22

作者简介: 李 浩, 男, 高级工程师, 主要从事设备维修及技术改造, E-mail: 3312959868@qq.com

2 工作原理

2.1 装置结构

本文设计的涡旋分离装置主要由3个功能单元构成,分别为气体输送单元、涡旋分离单元与收集单元,其整体结构如图1所示。在满足工程实用性与可制造性的前提下,模型重点保留了影响流场特性与分离性能的关键几何特征。

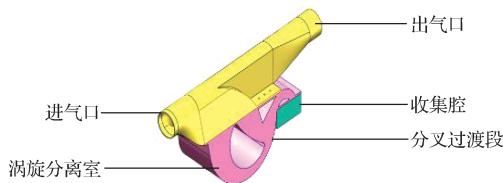


图1 新型气固分离装置
Fig. 1 New type separation device

气体输送单元通过特定角度的切向进气口导入携尘气流,为旋涡场的形成提供充分的切向动量与初始动能。该设计避免了传统轴向进气导致的流场紊乱,确保了气流在进入分离区域前已具备明确的旋转趋势。涡旋分离单元作为装置的核心功能区,由涡旋分离室、圆弧导流段及分叉过渡段共同构成。涡旋分离室为旋转流场的发展提供了充分空间;圆弧导流段对气流进行平滑引导,有效降低局部湍流耗散,保持旋涡稳定性;分叉过渡段则通过截面形状的渐变设计,将旋转流场平稳导向收集区域。该单元的协同作用能够在装置内部形成稳定的强制涡与自由涡组合流场,为不同粒径颗粒的分离创造理想动力学条件。收集单元由收集腔与出料通道组成,位于流场径向最外侧。在强离心力作用下,质量较大的颗粒被甩至壁面附近,经由收集腔捕获并集中于出料通道排出。而未被截留的细微颗粒与净化后的气体则继续沿轴向运动,最终通过顶部出气口排出系统,从而实现气固两相高效且连续地分离。该结构设计在保证分离性能的同时,简化了传统多级分离装置所需的复杂内部构件,不仅降低了制造成本与维护难度,也为后续基于CFD的流场精细化分析与结构参数优化奠定了清晰的几何基础。

2.2 流动机理分析

新型涡旋分离装置的核心工作机理是利用特定结构的旋涡流场产生高强度离心力,实现气固两相的高效分离。其工作过程可分为3个阶段:旋涡形成与强化、离心分离与颗粒迁移、气固分流与收集。

研究表明,旋涡的强度与稳定性主要受进气速度、人口角度及系统负压等关键参数协同影响,其中旋涡流场的稳定性对分离效率具有决定性作用。在旋涡流场核心分离区域,固体颗粒受到强大的离心力作用。该力指向装置壁面方向,其大小与颗粒质量、切向速度平方及旋涡半径成比例。不同粒径与密度的颗粒因此获得差异化的径向迁移速度,从而实现有效分离。较粗或较重的颗粒迅速被甩至壁面附近,并在近壁区二次流与重力作用下沿壁面向下运动。与此同时,装置内部的气流分布经过专门设计,通过控制轴向速度分量与径向压力梯度,在壁面区域形成向下的“颗粒输送流”,有效引导已分离颗粒向底部收集腔持续移动,避免颗粒在分离区再悬浮或堆积。气流路径的合理设计与流动稳定性的控制是保障持续高效分离的关键。通过优化导流段的曲率与分叉过渡段的扩散角度,能够显著减少流动分离、涡流脱落等不良扰动,使整个流场在空间上分布均匀,在时间上保持稳定。如图2所示,经优化后的流场显示出规整的层状涡结构,速度梯度分布合理,能量耗散集中于有效分离区域。这种设计不仅使颗粒分离路径更加可控,也降低了整体压损,实现了分离效率与能耗之间的优化平衡。



图2 气体流动路径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the gas flow path

3 流动特性

3.1 数值模型

为深入探究装置内部复杂的流动规律,本文采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法,对所涉及的气体流动过程开展了系统性的数值模拟研究^[5]。分析过程严格遵循流体力学基本控制方程组。

质量守恒方程(又称连续性方程)构成了描述流动的基础,用以确保流场的质量守恒^[6],其表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为流体在三维直角坐标系 x 、 y 、 z 方向的速度分量, m/s ; ρ 为流体的物质密度, kg/m^3 ; t 为时间, s 。

方程(1)描述了单位体积内流体质量随时间的变化率与净流入质量之间的平衡关系, 是后续动量与能量方程分析的重要前提。

动量守恒方程是描述流体运动的核心控制方程之一。其数学形式为牛顿第二定律在流体微元上的应用, 具体表述为

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: P 为微元体所受静压力, N ; μ 为流体动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的单位体积力, N/m^3 。

以上方程完整地描述了气流在压力驱动、黏性耗散及惯性作用下的运动规律^[7]。

能量守恒方程是描述流体系统中能量传递与转换的根本规律, 其控制方程具体表述为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho T u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T 为流体温度, $^\circ\text{C}$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$, 用于模拟湍流引起的动量扩散效应; σ_k 为湍流普朗特数, 为无量纲参数, 关联湍流黏度与湍流动能的扩散; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$; G_b 为浮力效应引起的耗散项, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$, 描述动能向热能的不可逆转换; Y_M 为可压缩湍流中, 由膨胀脉动导致的耗散项, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$; S_k 为自定义的

源项。

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中的湍流耗散率输运方程是雷诺平均纳维-斯托克斯方程组(RANS)方程组的关键方程之一, 其表达式为^[8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_s} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1s} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3s} G_b) - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_s, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 , 代表湍流动能转化为热能的速率; C_s 为耗散率普朗特数, 无量纲; C_{1s} 、 C_{2s} 、 C_{3s} 为根据典型流动实验标定的经验常数^[9], 无量纲; S_s 为自定义源项。

公式(5)和(6)共同构成封闭系统, 描述了湍流能量从产生、输运到最终耗散的全过程。通过联立求解, 可以确定湍流黏度, 从而实现对复杂湍流流动的定量模拟与分析。

3.2 湍流模型

本研究以不可压缩流体运动方程为基础, 建立数值模型。其中, 不可压缩连续性方程^[10]与 RANS 方程^[11]构成理论核心。RANS 方程通过时间平均将流动分解为时均量与脉动量, 并采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[12]进行湍流闭合。该模型对湍流黏度施加可实现性约束, 适用于旋涡及分离流动的稳定模拟。

在数值求解策略上, 采用有限体积法(FVM)对控制方程进行空间离散。该方法能严格保证计算单元上的质量、动量与能量守恒。具体离散格式为: 对流项采用二阶迎风格式, 在保证计算稳定性的同时兼顾精度; 扩散项采用具有二阶精度的中心差分格式。对于压力与速度之间的强耦合关系, 求解时应用了 SIMPLEC 算法进行解耦, 并在高压差工况下引入欠松弛因子, 有效抑制了迭代初期的数值振荡, 加速了收敛进程。

计算域的网格生成是影响模拟精度与效率的关键环节。如图 3 所示, 整体计算域的主体部分采用了高质量的结构化六面体网格^[13]。此类网格具有计算精度高、收敛性好的优点。为精确捕捉关键区域的流动细节, 在圆弧导流段、流道分叉区以及出口收集口等几何形状复杂、预期存在强剪切或分离流的区域, 实施了局部网格加密, 确保了边界层分辨率及涡结构演变的准确模拟, 为后续的定量机理解析奠定了可靠的数值基础。

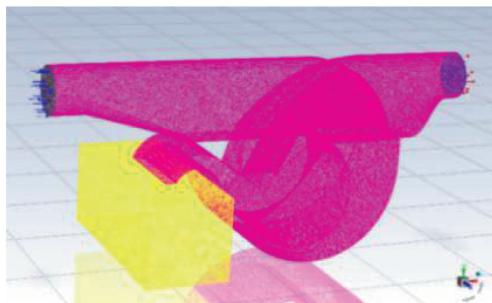


图3 涡旋分离装置流体域网格
Fig. 3 Grid of the fluid domain of the vortex separation device

3.3 气压工况

在常温下，空气流动马赫数较低^[14]，采用不可压缩流体模型以保证计算效率与工程精度。入口设为环境常压，壁面采用无滑移边界条件以考虑黏性影响^[15]。结合风机性能曲线与管路阻力特性分析，实际运行负压约为-4~16 kPa。其中，-4 kPa 对应于较低负荷或阻力较小的运行状态；-10 kPa 左右为当前常用设计工况的上限附近，是典型的高负荷稳定运行条件；-13 kPa 属于可实现的中高负压区间，通常用于强化某些工艺环节的气流需求；而-16 kPa 则逼近系统可承受的极限负压，多用于评估在过度抽吸条件下可能出现的流动分离、涡旋增强等非理想流场结构变化，具有重要的参考价值。

为系统考察不同负压水平对内部流动的影响，将出气口静压(P_b)分别设定为-4, -10, -13, -16 kPa 等典型值，依次对应低负压、中负压、较高负压及极限负压 4 种工况。每种工况均独立设置边界条件与求解参数，旨在对比分析压力变化对流速分布、湍流特征及压力梯度的影响规律(见表 1)。

表1 气压工况

Table 1 Atmospheric pressure conditions

工况	出气口静压/kPa	目的
C1	-4	观察是否存在分离与回流
C2	-10	评估旋涡强化与分流变化
C3	-13	强化工艺环节气流需求
C4	-16	检验过度抽吸与结构失配风险

4 仿真分析与讨论

4.1 典型工况下的流动特性

以工况 C2 ($P_b = -10 \text{ kPa}$) 为例，选取装置内部 $z=0 \text{ m}$ (基准截面) 与 $z=0.05 \text{ m}$ (邻近截面) 两个典型高度，分析其压力与流动速度的分布特征，结果如

图 4 所示。

根据流场压力分布特征可知，在进口气水平延伸段，气流静压整体维持较高水平，接近入口设定的常压边界条件，表明该区域流通截面较为平缓，气流未发生明显加速，动能变化较小。随着气流进入圆弧导流段，由于流动路径发生急剧弯曲，出现明显的局部加速过程，压力随之迅速下降，压力最低点出现于圆弧段中后部，其值约为出口设定负压值的一半，表明此时动能显著增大，静压转换为动能的趋势较为突出。在圆弧段末端，气流在结构拐点处分流，呈现两股明显的流动分支。其中一部分气流转向进入收集腔，由于腔体截面突扩与流向骤然改变，局部形成明显的低速旋涡和回流区，导致该区域压力出现一定程度的回升。模拟结果显示，收集腔中部压力约为-1319 Pa。另一部分气流则沿上方主通道继续流向出气口，形成主要的排气流路，其速度较高，静压沿程持续降低，最终与出口负压边界匹配，构成系统中气流输运的主干路径。

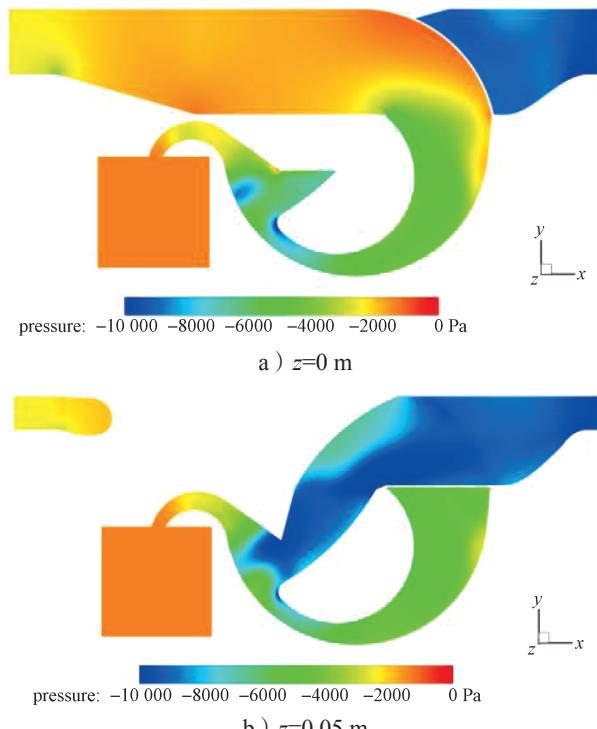
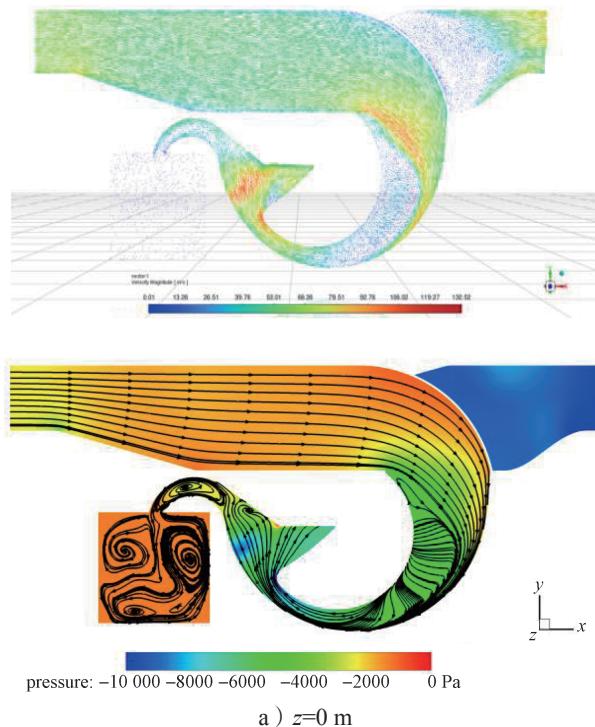


图4 装置内部压力分布
Fig. 4 Pressure distribution inside the device

在收集腔内，气流速度分布呈现出显著的梯度特征(见图 5)。在贴近腔壁的区域，由于壁面无滑移条件，气流速度迅速降低，形成明显的边界层。与此同时，在腔体中心区域，流场速度相对较高，但伴随

着复杂的涡旋运动，特别是在结构拐角处容易形成稳定的二次流。这种速度分布结构加剧了颗粒物在腔体内的不均匀悬浮状态，使得较大粒径的颗粒更易在壁



面附近沉降，而细颗粒则可能跟随核心气流继续运动，从而对分离过程产生选择性影响。

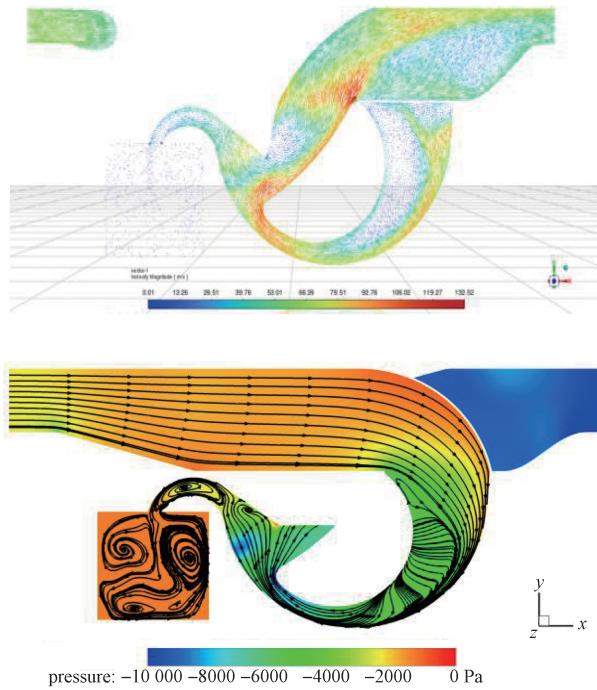


图 5 装置内部速度矢量分布

Fig. 5 Velocity vector distribution inside the device

在圆弧段末端，流动实现了关键分流：内侧气流与部分主流进入出气通道高速排出，外侧气流则偏转进入收集腔。这一分流是气固分离的流动基础。出气口负压是影响分流效果的核心因素：负压过大时，抽吸过强，易造成气流“短路”进入出气通道，并增强回流，可能将已分离颗粒重新卷吸；负压过小时，气流动能不足，分流不清晰、不稳定，导致分离不彻底，降低效率。因此，需将负压控制在合理范围，以兼顾分流强度与收集效果。

在收集腔入口区域，进入的气流会形成一个显著的逆时针方向旋涡。然而，该旋涡的空间结构并非完全对称，存在一定的不均匀分布，这种非对称性可能干扰颗粒的稳定沉降路径，从而削弱整体的回收效率。为了提高分离性能，需对收集腔的入口几何形状或导流结构进行针对性优化，以减弱乃至消除这种不理想的涡旋不对称性，从而增强分流过程的稳定性与流场均匀性，为颗粒物高效捕集创造更有利的流体条件。

4.2 不同负压条件下的流动特性

为系统评估不同负压条件对装置内颗粒悬浮特性的影响，本研究选取了 4 组具有代表性的出口静压工况进行数值模拟与对比分析（见图 6~7），其值分别为 -4 kPa （低负压）、 -10 kPa （中负压）、 -13 kPa （较高负压）及 -16 kPa （极限负压），以涵盖实际运行中的主要压力区间。

如图 6 所示，左边为 $z=0 \text{ m}$ 时气压分布，右边为 $z=0.05 \text{ m}$ 时气压分布。可以观察到，在不同负压条件下，系统内部静压从进气口至出气口均呈现连续下降的分布形态，表明主流方向上的压力驱动特征保持一致。然而，随着出气口设定负压的增大（即从 -4 kPa 逐步降至 -16 kPa ），整个流场的压力梯度显著增强，低压区域明显向下游扩展。这是因为气压流动由压差驱动，出口背压越低，进出口之间的总压差越大，对气流的推动力就越强，从而导致流场内部各处的气流速度相应增大。这一规律为理解不同负压工况下流速变化及能量传递特性提供了理论依据。

如图7所示,左边为 $z=0\text{ m}$ 时速度矢量分布,右边为 $z=0.05\text{ m}$ 时速度矢量分布。当流速过低时,气流难以在结构拐角处形成稳定偏转,导致分流不清;当流速过高时,大部分气流惯性增强,直接进入出气口,显著减少进入收集腔的流量,削弱分离效果。这

表明,系统内压力与速度存在紧密的相互制约关系,出口负压决定流速,而流速又控制分流效率。因此,在实际运行中,需在压力设定与流速响应之间寻求平衡,而非一味追求高负压,从而实现气固分离性能的最优化。

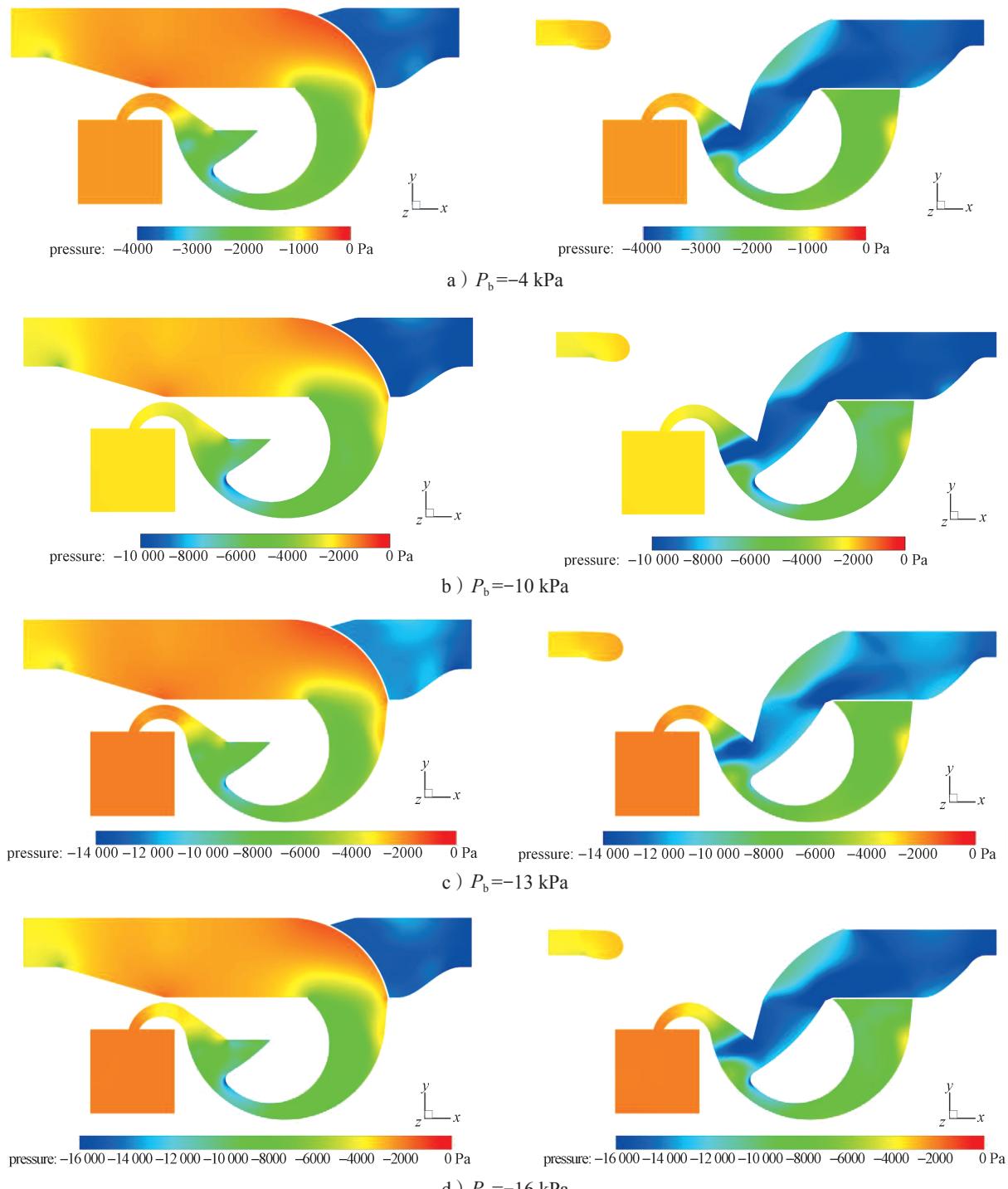


图6 不同负压驱动下装置内部压力分布

Fig. 6 Pressure distribution of the device under different negative pressure drives

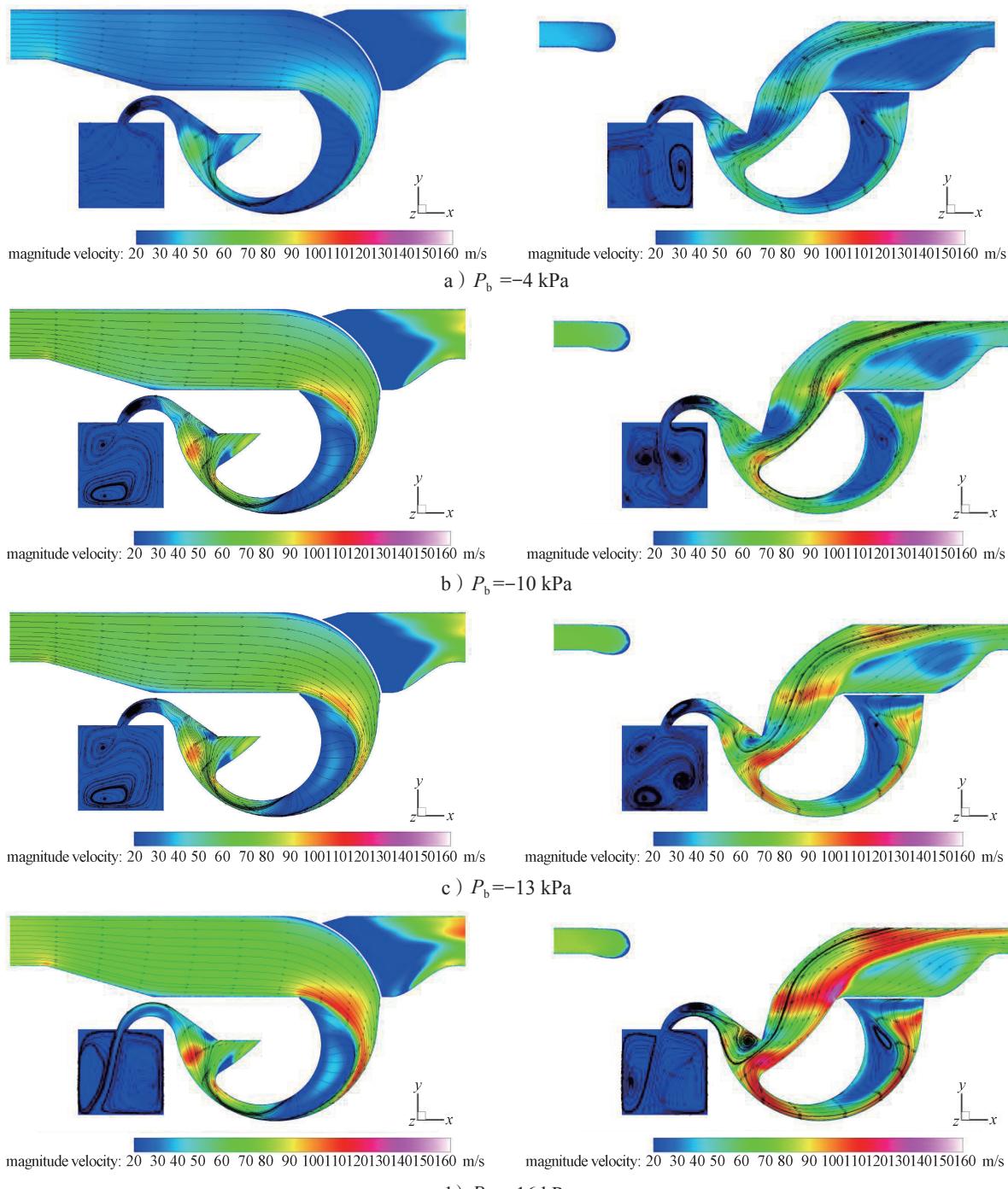


图 7 不同负压驱动下装置内部速度矢量分布

Fig. 7 The internal velocity vector distribution of the device under different negative pressure drive

5 结语

本文针对碎料分离效率较低的问题, 进行了新型涡旋分离装置的流动特性分析。通过 CFD 方法的数值模拟, 研究了不同负压条件下装置内部的流动特性。分析结果表明, 装置通过切向进气、圆弧导流与

分叉过渡的结构设计, 能够有效诱导稳定旋涡并实现气固分流。不同负压条件下, 装置的流动拓扑结构保持一致, 但速度场强度和分流特性存在显著差异。综合分析表明, 负压工作区间为 $-10 \sim -13$ kPa 时, 可实现旋涡强度与分流稳定性之间的平衡。本研究为分离装置的性能优化和运行参数选择提供了理论依据,

具有降低原料损耗、提高回收效率和推动绿色制造的应用潜力。未来的研究可进一步结合更精细的数值模型，并通过实验验证模拟结果，以不断提升装置性能的可靠性。

参考文献：

- [1] 雷 港, 余南辉, 范吉军, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的米糠碎米分离装置的试验研究 [J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 76–83.
- [2] 胡 瑜, 王锁芳, 梁晓迪. 基于响应曲面法的涡旋管分离器结构优化 [J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(3): 166–171.
- [3] 熊 斌, 卢啸风. 不同高度旋风分离器内气固流动的数值模拟 [J]. 电站系统工程, 2024, 40(5): 11–13, 16.
- [4] 赵海超, 顾从汇, 杜明铺, 等. 细颗粒物在旋风分离器内流动特性 [J]. 化学工程, 2023, 51(1): 68–73.
- [5] 夏寿敏, 谭志洪, 刘振峰, 等. 轴流旋风除尘器内气固分离特性的数值模拟 [J]. 南昌大学学报(工科版), 2022, 44(2): 132–139, 167.
- [6] 丁志奇, 吴益名. CFD 数值模拟在油气集输系统中的应用研究 [J]. 化学工程与装备, 2025(5): 103–105, 135.
- [7] 谢周平, 何明智, 赵 鹏, 等. 基于 CFD 的旋风分离器结构参数性能研究 [J]. 工程机械, 2025, 56(2): 43–49.
- [8] 乐建波, 潘玉安, 高文杰, 等. 基于 CFD 的旋风分离器陶瓷颗粒与气体分离性能数值模拟 [J]. 辽宁化工, 2023, 52(7): 974–978.
- [9] 徐健炜, 王 娜, 廖 宇, 等. 基于 Fluent 的某卷烟机搭口胶枪喷嘴流体仿真分析 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 36–41.
- [10] 肖颖喆, 罗景明. 基于结构与功能可变的纸包装容器可持续设计方法解析 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 16–21, 74.
- [11] 廖泽顺, 滑广军, 谢 勇, 等. 纸浆模塑吸浆模具背腔气流均匀性的数值模拟 [J]. 包装学报, 2016, 8(1): 41–48.
- [12] 宋文杰, 张熙梁, 郭 洁, 等. 基于 CFD 的矿井巷道火灾烟气蔓延仿真 [J]. 计算机仿真, 2025, 42(10): 474–478.
- [13] 崔功卓, 巩 雪, 李 泽, 等. 导向滚轮式快递分拣系统设计与仿真优化 [J]. 包装学报, 2025, 17(2): 55–61.
- [14] 饶 俊, 曾广胜. 基于 FLUENT 软件对三螺杆挤出机混合特性的模拟与分析 [J]. 包装学报, 2016, 8(1): 36–40.
- [15] 钟振宇, 陈柏雨, 蒋 勤. 高低跌坎消力池三维水流运动特性数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9533–9541.

(责任编辑: 廖带莲)

CFD Study on Flow Characteristics of Vortex Separation Device

LI Hao, SHI Delun, WEI Li, FANG Xiaoguang, ZHANG Peng, WAN Xinqiang

(Hubei China Tobacco Industry Co., Ltd. Wuhan Cigarette Factory, Wuhan 430068, China)

Abstract: To improve the separation and recovery efficiency of crushed materials and reduce raw material loss, a novel vortex separation device was designed. This device effectively enhanced the stability and separation selectivity of the vortex field via structural innovation, thereby providing a new technical solution for the sector of resource recovery. Firstly, the computational fluid dynamics (CFD) method was adopted to conduct a systematic three-dimensional numerical simulation analysis on the flow field characteristics of the device under different negative pressure conditions, with a focus on investigating key parameters such as pressure distribution and velocity vector. The simulation results demonstrate that the device can form a distinctly layered vortex flow field, and achieve an optimal matching between gas-solid separation efficiency and vortex intensity within the negative pressure range of $-10 \sim -13$ kPa. The research results not only provide a theoretical basis for the structural optimization and operating parameter setting of vortex separation devices, but also indicate the direction for the design improvement of relevant equipment, which bears significant engineering application value for advancing green manufacturing and resource recycling.

Keywords: vortex separation; fluid mechanics; pressure distribution; velocity vector