

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.030

排尘管结构对旋风分离器性能影响的数值模拟研究

陈晓青^{1a,1b}, 谢文玉^{1b}, 宋志敏², 郑石红², 梁家豪^{1a,1b}, 张涛^{1a}, 丁家正^{1a,3}

(1. 广东石油化工学院 a. 能源与动力工程学院; b. 环境科学与工程学院, 广东 茂名 525000;

2. 中国石化中科(广东)炼化有限公司, 广东 湛江 524081;

3. 中国石油大学(北京) 化学工程与环境学院, 北京 102249)

摘 要:通过改变 Swift 型旋风分离器排尘管顶部和底部直径比,得到不同锥形排尘管结构的旋风分离器。采用雷诺应力模型和离散项模型,研究不同排尘管结构对旋风分离器内部流场和气固分离性能的影响。数值模拟结果表明:当锥形排尘管顶部和底部直径比为 2:1 时,旋风分离器筒体切向速度升高,压降降低,可一定程度缓解涡壳摆动现象。与标准 Swift 型旋风分离器相比,锥形排尘管旋风分离器对 5 μm 和 10 μm 粒径颗粒的分离效率分别提高了 31.6 个百分点和 12.88 个百分点。

关键词:旋风分离器;数值模拟;排尘管结构;流场特点;分离效率

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0164-05

Numerical Investigation of Influence of Dust Chimney Structure on Cyclone Separator Performance

CHEN Xiaoping^{1a,1b}, XIE Wenyu^{1b}, SONG Zhimin², ZHENG Shihong², LIANG Jiahao^{1a,1b}, ZHANG Tao^{1a}, DING Jiazheng^{1a,3}

(a. School of Energy and Power Engineering; b. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong

University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China; 2. Zhongke (Guangdong) Refinery & Petrochemical

Company Limited, Sinopec Corporate, Zhanjiang 524081, China; 3. College of Chemical Engineering and Environment,

China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: A series of cyclone separators with different dust chimney structure were obtained by adjusting the ratio of the top and bottom diameters of the Swift cyclone separator. The impact of dust chimney structure on the flow field and gas-solid separation performance of cyclone separator were investigated using the Reynolds Stress Model and the Discrete Phase Model. The numerical simulation results show that when the ratio of the top and bottom diameters of the dust chimney is 2:1, the tangential velocity in cyclone barrel increases and the pressure drop decreases, which alleviates the flapping motion of vortex cone. Compared with the standard swift cyclone separator, the separation efficiency of the conical cyclone separator for particles with diameters of 5 μm and 10 μm increases by 31.6percent and 12.88percent respectively.

Keywords: cyclone separator; numerical simulation; dust chimney structure; flow field feature; separation efficiency

0 引言

旋风分离器因其能耗低、结构简单、适应性强等优点,被广泛应用于石油化工、建筑、机械和环保等领域的气固分离^[1-2]。其工作机制为含尘气流由切向入口进入分离器,在高速旋转形成强烈的三维湍流旋流场作用下,固体颗粒受离心力影响沿器壁向下运动并最终由排尘管排出,净化气体则随内涡流由顶部排气管逸出。然而,旋风分

离器内部流场属于典型的三维强湍流旋流系统,流场的非轴对称性和不稳定性会导致瞬时速度大幅波动,易形成不对称流场及涡核摆动等复杂现象,从而造成气流偏心并降低分离效率^[3-4]。

为了提高分离效率,促使内部流场轴对称性和稳定性的提升,学者们提出了多种结构优化措施,包括采用收缩进口结构^[5]、单侧或双侧对称进口^[6-7]、增设导流板^[8]及稳涡器^[9]等。但这些改进方法在提升性能的同时,往往导致旋风分离器

基金项目:国家自然科学基金面上项目(22278434);广东省教育厅特色创新项目(2022KTSCX089);茂名市科技计划项目(2022S041;2023015);广东石油化工学院人才引进项目(RC-XJ2022000302;RC-XJ2022000702)

第一作者简介:陈晓青(1993—),女,广东韶关人,讲师,博士,研究方向为高分子材料成型和环境污染治理,chenxiaoping0710@163.com。

结构复杂化并增加制造成本。因此,在保持结构简单的前提下,通过优化关键部件参数以提升分离性能,仍是该领域的重要研究方向。当前关于旋风分离器结构优化的研究多侧重于入口、筒体和排气管等参数对性能的影响。彭丽等^[10]利用 CFD-DPM 方法系统分析了入口高度、入口宽度、排气管直径和插入深度等结构参数对性能的影响,指出其对分离效率具有显著作用。文献[1]发现大蜗壳进口结构对微细颗粒的分离更为有利。刘洪亮^[11]发现旋风除尘器总高度越高,除尘效率越高。王乐勤等^[12]揭示了筒体长度对分离效率呈先升后降的规律。谢周平等^[13]应用数值模拟确定了最佳结构参数范围,实现了分离效率大于 90%。此外,研究还表明旋风分离器总高度、排气管插入深度等都会对涡核分布及气固分离过程产生重要影响。然而,作为旋风分离器核心部件之一,排尘管结构对内部流场特性及气固分离效能的影响仍缺乏系统深入的研究。实际应用中,排尘管结构的不合理设计易导致局部涡流、压力异常和颗粒二次夹带,制约了整体分离效率的提升^[14]。因此,系统分析排尘管结构参数变化对旋风分离器性能的影响具有重要理论意义和工程应用价值。

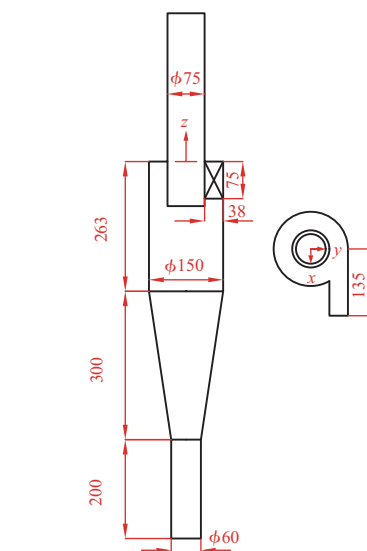
本研究采用 CFD 数值模拟方法,针对不同排尘管结构对旋风分离器内部流场与分离性能的影响进行了系统研究。研究成果可为旋风分离器排尘管的结构优化与高效分离器设计提供理论支持和工程参考。

1 数值模拟方法

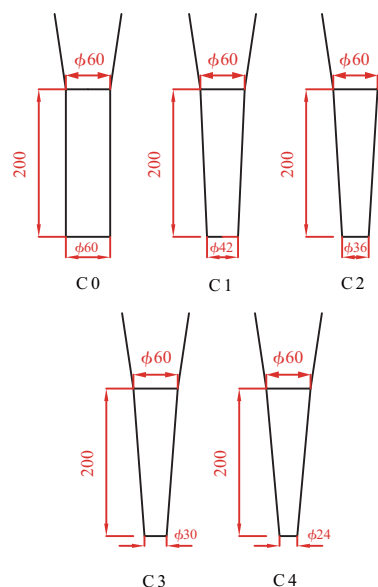
1.1 几何模型和网格划分

实验以 Swift 型旋风分离器为研究对象,结构尺寸如图 1(a) 所示。通过改变排尘管顶部和底部直径的比值得到不同结构的旋风分离器,其中 C0 为标准 Swift 型旋风分离器排尘管结构,C1、C2、C3 和 C4 为锥形排尘管旋风分离器,其排尘管顶部和底部直径比值依次为 1.4、1.7、2.0 和 2.5 (图 1(b))。图 1 中各尺寸单位为 mm。

旋风分离器几何模型以蜗壳顶板标高为起点,利用 Gambit 4.6 软件对旋风分离器的计算区域划分为多个六面体子块,用 Map 方式划分面网格,流动变化剧烈区域如壁面的网格局部加密,然后通过 Hex 生成六面体体网格。经网格无关性验证(图 2),确定不同结构旋风分离器的网格数约为 18 万。



(a) Swift型旋风分离器结构尺寸



(b) 不同旋风分离器的排尘管结构参数

图 1 Swift 型旋风分离器结构尺寸和不同旋风分离器的排尘管结构参数

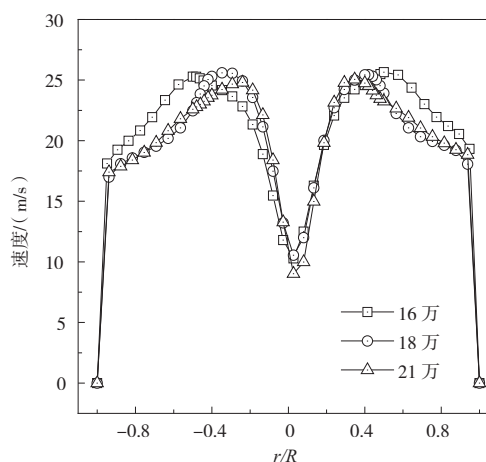


图 2 不同网格数下的气体速度分布

1.2 数值模拟方法

利用 FLUENT16.0 对旋风分离器的气固流场进行模拟计算。气相模拟采用适用于旋风分离器强旋转流场模拟的雷诺应力模型(RSM),压力梯度项采用 PRESTO 方法处理,对流项采用 QUICK 差分格式离散,速度和压力的计算方法采用 SIMPLE 算法^[15]。旋风分离器进气口设置为速度进口,入口速度为 20 m/s,排气管出口为压力出口,出口压力为标准大气压(101 325 Pa),其余边界设置为无滑移的固体壁面。气固两相模拟采用离散项模型(DPM)^[16]。以进口截面为颗粒入射面源,排气管出口截面为逃逸边界,排尘口截面为捕集边界。旋风分离器环形空间、筒体、锥体和排尘管的反弹系数分别为 0.95、0.80、0.70 和 0.50^[17]。颗粒假定为球形,密度和入射流量分别为 2 780 kg/m³ 和 0.01 kg/s。计算采用非稳态模型,入射时间和计算时间分别为 5 s 和 15 s。

2 结果与讨论

2.1 排尘管结构对旋风分离器气相流场的影响

切向速度是旋风分离器中的一个重要参数,切向速度越大,颗粒受到的离心力越强,越有利于颗粒的分离。图 3 为不同排尘管结构下旋风分离器 $x=0$ 截面的切向速度云图。旋风分离器(C0—C4)的切向速度由中心至壁面处大致为先增大后减小,其结果与 SU 等^[18]的研究结论一致。切向速度对称轴和几何中心的偏移程度受轴向位置的影响,靠近排尘管的区域摆动最为明显。将传统旋风分离器的圆筒排尘管(C0)改为锥形排尘管(C1—C4),可在一定程度上缓解旋风分离器内气体的非轴对称流动。相比其他旋风分离器,C3 在旋风分离器筒体和锥体区域的切向速度更高,切向速度对称轴与几何中心的偏移最小,这有利于提高旋风分离器的气固分离效率^[19]。

图 4 为不同排尘管结构下旋风分离器在 $x=0$ 截面上的静压分布云图。旋风分离器的静压分布与 SU 等的研究结果一致,靠近旋风分离器壁面的静压较大,而中心区的静压较小,低于大气压强。从图 4 可知,排尘管结构改变旋风分离器的静压大小和分布。旋风分离器排尘管中心负压区的降压随着排尘管锥度的增加呈先减少后增加的趋势。C3 排尘管静压最小,此时气体的动能越大,越有利于固体颗粒的分离。

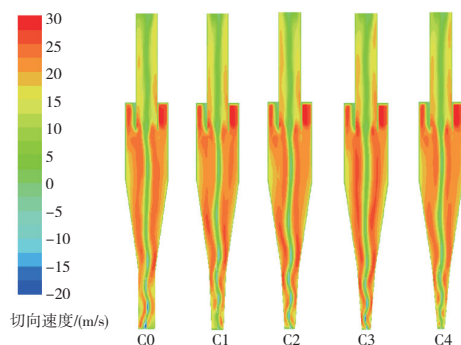


图 3 不同排尘管结构旋风分离器的切向速度分布图

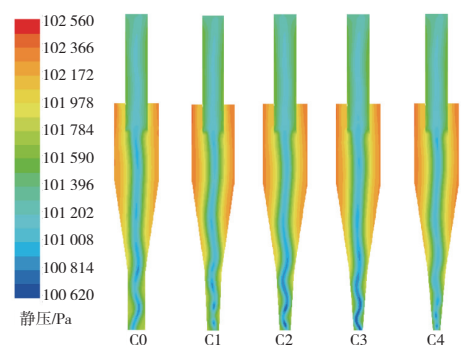


图 4 不同排尘口结构旋风分离器的静压分布图

为进一步定量考察不同排尘管结构对旋风分离器流场的影响,分别在 $Z=-190$ mm、 $Z=-380$ mm 和 $Z=-570$ mm 截面上取过中心直线,对比不同排尘管结构下旋风分离器的切向速度和静压的变化情况,结果如图 5 所示。其中, $Z=-190$ mm、 $Z=-380$ mm 和 $Z=-570$ mm 截面分别位于旋风分离器筒体、锥体和排尘管。从图 5(a)可以看出,旋风分离器内的切向速度曲线与文献[8]的研究结果相似,在中心区域呈刚性涡,外侧为准自由涡,且旋转中心偏离旋风分离器的几何中心。涡核中心偏离的程度依次为:排尘管>锥体>筒体。这表明排尘管的结构显著影响旋风分离器的切向速度分布。随着排尘管底部半径的减小(C0—C4),反向气流的切向速度增加。切向速度在排尘管位置的变化幅度尤为显著。这一现象可能源于排尘管锥度的增加,不仅减少了旋风分离器的阻力,还促进了反向气流的生成,从而实现了较高的切向速度。相比旋风分离器 C0 和 C4、C1—C3 在排尘管区域($Z=-570$ mm)的切向速度偏离几何中心的幅度最小。特别地,C3 的反向气流切向速度最大,具有更高的颗粒的离心力,更有利于颗粒的分离。

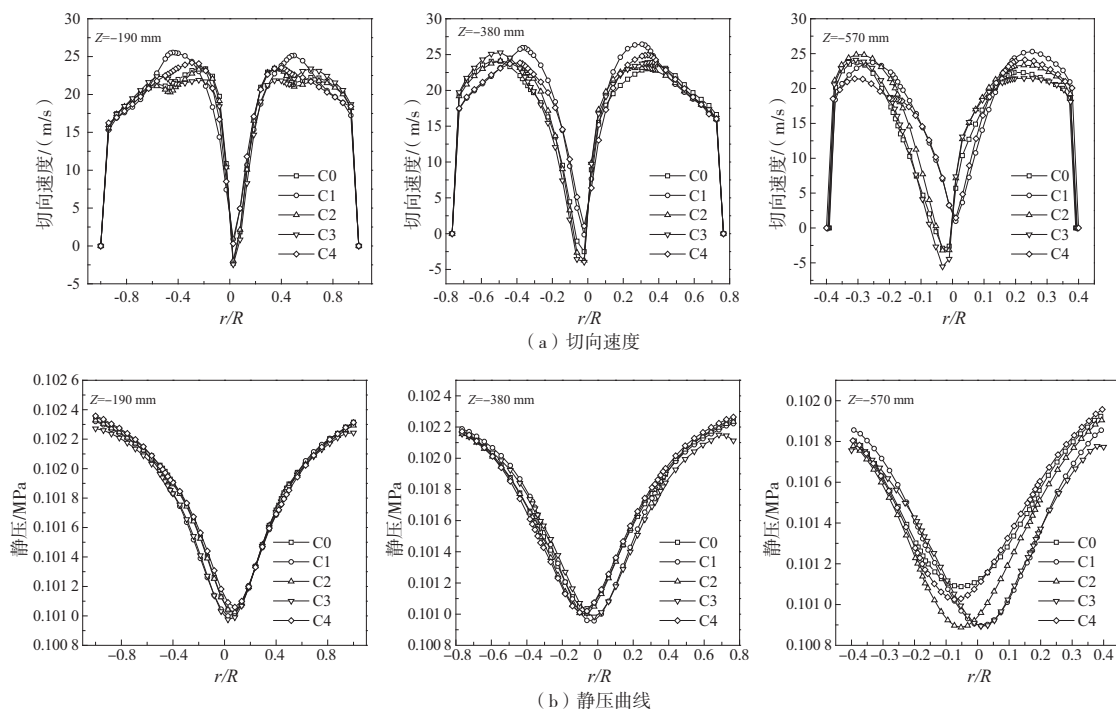


图5 切向速度和静压曲线

从不同截面的静压曲线图(图5(b))可知,旋风分离器的静压分布呈中间低、两边高的特点,在分离器的中心区域出现负压区。与切向速度分布规律相似,不同高度下静压的对称轴偏离旋风分离器几何中心的程度不同,越靠近排尘管区域的静压偏离程度越大。相比其他旋风分离器,C3的静压对称轴在筒体、锥体和排尘管区域偏离几何中心的幅度最小。此外,C3的压降为1 139.73 Pa,小于C0的1 154.11 Pa;C1的压降为1 180.47 Pa;C2的压降为1 156.00 Pa;C4的压降为1 174.07 Pa。压降的降低有助于降低旋风分离器的阻力系数,降低能耗^[20]。以上结果表明,排尘管结构由圆柱形改为锥形可缓解单入口旋风分离器内的非轴对称流动,这降低旋风分离器的压降。当排尘管顶部与底部的半径比为2:1(即C3结构参数)时,流场改善效果最好。

2.2 排尘管结构对气固分离性能的影响

为了进一步分析锥形排尘管对旋风分离器内颗粒运动情况的影响,以常规旋风分离器(C0)为对照,分析锥形排尘管旋风分离器C3(排尘管顶部与底部的半径比为2:1)内1 000个粒径3 μm 、5 μm 和10 μm 的颗粒运动轨迹。结果表明,排尘管结构对粒径3 μm 和10 μm 颗粒的运动轨迹影响不大;粒径5 μm 颗粒在旋风分离器C0很容易被上行气流进入低压区,最后从排气管逃逸,而颗

粒进入旋风分离器C3后,沿壁面螺旋向下,最终在排尘口被捕集。

图6为常规旋风分离器(C0)和锥形排尘管旋风分离器(C3)的分离效率。C0和C3对粒径3 μm 颗粒的分离效果较差,分离效率小于5%。相比C0,C3对5 μm 的小粒径颗粒和10 μm 的大粒径颗粒的分离效率分别提高31.6个百分点和12.88个百分点。此结果与文献[1]结果相似,旋风分离器的结构参数对粒度较粗颗粒的分离效率影响较小,而对细颗粒影响显著。以上结果表明,排尘管结构从圆筒改造为锥形,可提高旋风分离器的分离效率,对小粒径颗粒分离效率的提升效果显著。为进一步确保数值模拟结果的准确性并验证其在实际应用中的有效性,后续研究应引入额外的实验验证。

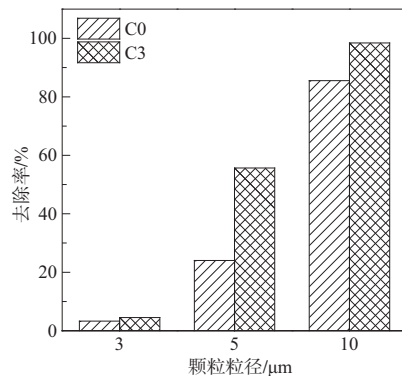


图6 不同结构旋风分离器的分离效果

3 结语

本文利用 RSM-DPM 模型研究不同排尘管结构对 Swift 型旋风分离器流场和气固分离性能的影响。数值模拟结果表明排尘管结构改变旋风分离器切向速度和静压分布。当排尘管结构由圆筒改造为锥形,可提高旋风分离器圆筒内切向速度,降低旋风分离器压降,一定程度缓解旋风分离器涡核摆动现象。锥形排尘管顶部和底部直径比值为 2:1 时,旋风分离器具有更高的筒体切向速度和较小的压降,对 5 μm 和 10 μm 粒径颗粒的分离效率分别提高 31.6 个百分点和 12.88 个百分点,提升效果显著。研究结果为旋风分离器气固效率提升提出可行的结构优化方案,也为旋风分离器的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 杨柳松,刘云峰,孙璐璐,等. 旋风分离器分离效率关键影响因素研究[J]. 矿山机械,2022,50(2):44-49.
- [2] 李亚龙,段红燕,陈鹏飞,等. 内置滤袋旋风器的设计及数值模拟[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):144-147.
- [3] LIU ZL, JIAO J Y, ZHENG Y, et al. Investigation of turbulence characteristics in a gas cyclone by stereoscopic PIV[J]. AIChE Journal,2006,52(12):4150-4160.
- [4] 吕智,吴晓明. 旋风分离器在不同工况下分离效率的仿真分析[J]. 机电工程,2014,31(11):1390-1395.
- [5] 乐敏. 旋风分离器进气管结构改进的数值模拟研究[J]. 流体机械,2019,47(10):14-19.
- [6] 赵兵涛,沈恒根,张吉光. 旋风器进口结构的优化及其性能的试验研究[J]. 化工机械,2003,30(4):195-197,205.
- [7] 魏培,杨森,尤燕妮. 入口结构对旋风分离器性能的影响[J]. 安全与环境学报,2021,21(3):1257-1262.
- [8] 梁家豪,李阳,孔祥功,等. 导流板对旋风分离器内气固两相分离性能的影响[J]. 过程工程学报,2014,14(1):36-41.
- [9] 高助威,王娟,王江云,等. 内构件技术在旋风分离器内的应用进展[J]. 石油学报(石油加工),2019,35(2):393-402.
- [10] 彭丽,石战胜,董方,等. 基于 CFD-DPM 的旋风分离器性能参数影响研究[J]. 华电技术,2020,42(12):43-48.
- [11] 刘洪亮. 里齐隧道通风除尘系统内旋风除尘设备除尘性能优化研究[J]. 铁道建筑技术,2025,(4):66-70.
- [12] 王乐勤,郝宗睿,王循明,等. 筒体长度对旋风分离器内流场影响的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2009,30(2):223-226.
- [13] 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):43-49,8-9.
- [14] 钟欣. 新型组合式微旋风分离器结构性能研究[D]. 上海:华东理工大学,2019.
- [15] KOYUNOĞ LU C, GÜNDÜZ F, KARACA H, et al. Developing an adaptive catalyst for an FCC reactor using a cfd rsm, cfd dpm, and cfd ddpm-em approach[J]. Fuel,2023,334:126550.
- [16] FATAHIAN H, FATAHIAN E, ERFANI R. Square cyclone separator:performance analysis optimization and operating condition variations using CFD-DPM and taguchi method [J]. Powder Technology, 2023, 428:118789.
- [17] 万古军,魏耀东,薛晓虎,等. 温度对旋风分离器内颗粒浓度分布影响的模拟[J]. 燃烧科学与技术,2008,14(6):562-568.
- [18] SU Y X, ZHENG A Q, ZHAO B T. Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance[J]. Powder Technology, 2011,210(3):293-303.
- [19] LIU P K, CHEN B, HOU D X, et al. Study on the separation performance of a two cylindrical section hydrocyclone under various height ratios [J]. ACS Omega,2024,9(19):21569-21579.
- [20] 伍永福,栗志,张学锋,等. 雾化焙烧制备超细颗粒用旋风分离器优化模拟[J]. 中国粉体技术,2023,29(6):39-49.

收稿日期:2023-11-24