



旋风分离器流场分布特性的研究进展

李杰¹, 张纹郁¹, 赵跃¹, 邱仰杰², 申文辉², 张遵乾¹

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210; 2. 新疆昆仑钢铁有限公司, 新疆五家渠 831300)

摘要:为提升旋风分离器在除尘系统中的性能,本文系统阐述旋风分离器内部流场分布特性的研究进展。通过利用CFD软件对速度场及压力场进行数值模拟,揭示流场规律;利用测量仪器对流体瞬时物理量进行测量,揭示流场特性;围绕速度场与压力场,深入探讨其对压降能耗以及颗粒分离效率的作用规律。结果表明:切向速度是决定分离效率的关键参数,而轴向与径向速度会分别引发“顶灰环”和“短路流”现象,影响颗粒的去向;压降则受物理构造、流体性质与操作参数的控制,且与速度的大小息息相关。在保证速度场优化目标不受影响的条件下,应减小压降。优化进料口的结构与尺寸是增大切向速度,抑制“顶灰环”和“短路流”现象重要的方法;优化溢流管几何参数和调节流体性质(如温度、湿度)是提升旋风分离器分离效率与减小压降的有效路径;研究表明,结合数值模拟与人工智能算法可实现高精度性能预测与低成本设计优化,为钢铁行业的节能减排提供理论依据与技术支持。

关键词:旋风分离器; 气固两相流; 离心力; 分离效率

中图分类号:TF08;X701.2

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0001-13

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.053

Research progress on flow field distribution characteristics of cyclone separators

LI Jie¹, ZHANG Wenxi¹, ZHAO Yue¹, QIU Yangjie², SHEN Wenhui², ZHANG Zunqian¹

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;

2. Xinjiang Kunlun Iron and Steel Co., Ltd., Wujiaqu 831300, Xinjiang, China)

Abstract: In order to improve the performance of cyclone separator in dust removal system, the research progress on the internal flow field distribution characteristics of cyclone separator is systematically expounded. The CFD software is used to numerically simulate the velocity field and pressure field, and the flow field law is revealed. The instantaneous physical quantities of fluids are measured by measuring instruments to reveal the flow field characteristics; Focusing on the velocity field and pressure field, the effect of velocity field on pressure drop energy consumption and particle separation efficiency is deeply discussed. The results show that tangential velocity is the key parameter to determine the separation efficiency, while the axial and radial velocity will cause the phenomenon of “top gray loop” and “short circuit flow”, respectively, which affect the direction of the particles. The pressure drop is controlled by the physical structure, fluid properties and operating parameters, and it depends on the velocity. Under the condition that the velocity field optimization target is not affected, the pressure drop should be reduced. Optimizing the structure and size of the feed port is an important method to increase the tangential velocity and suppress the phenomenon of “top gray loop” and “short circuit flow”. Optimizing the geometric parameters of the overflow pipe and adjusting the fluid properties (such as temperature and humidity) are effective ways to improve the separation efficiency and reduce the pressure drop of the cyclone. The results show that the combination of

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 唐山市重点研发计划资助项目(22150232J); 第六师五家渠市科技计划资助项目(2410)

作者简介: 李杰(1982—), 男, 博士, 研究员, 从事冶金节能与资源综合利用方面的研究。

通信作者: 张遵乾(1986—), 男, 博士, 副教授, 从事冶金节能与资源综合利用方面的研究。

numerical simulation and artificial intelligence algorithms can achieve high-precision performance prediction and low-cost design optimization, and can provide theoretical basis and technical support for energy conservation and emission reduction in the steel industry.

Key words: cyclone separator; gas-solid two-phase flow; centrifugal force; separation efficiency

工业生产会产生大量如 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等粉尘颗粒, 这些粉尘颗粒被排放至大气中将与空气中的水蒸气结合形成许多大气污染物^[1]。其中, $PM_{2.5}$ 是雾霾天气形成的主要因素, 此外, 其可以吸附空气中的多环芳烃, 使得人类肺癌发病率增大^[2]。为了促进工业绿色高效发展, 在工业生产中使用更为高效节能的除尘方式显得尤为重要。根据生态环境部的要求, 烧结机机头及球团焙烧烟气中颗粒物排放质量浓度的限值为 10 mg/m^3 , 而目前钢铁行业烧结机机头粉尘质量浓度一般为 $25 \sim 50 \text{ mg/m}^3$, 球团烟气中颗粒物质量浓度一般为 $30 \sim 100 \text{ mg/m}^3$ ^[3-4]。

目前常用的除尘方式主要有袋式除尘、旋风除尘以及电除尘等, 其中电除尘技术被大量研究与改进, 其在烧结机机头烟尘治理中的应用日趋成熟^[5]。旋风分离器作为工业生产中常用的气固分离设备, 其特殊的内部构造, 使得流体进入除尘器内部时, 混合流体在切向引力的作用下沿着内壁面运动, 颗粒在运动过程中与壁面发生碰撞, 在自身重力以及气流的推动下运动至除尘器底部。当流体中的空气相流动至除尘器底部时, 除尘器中心区域的负压作用, 会形成向上的漩涡, 最终使得分离后的流体从分离器的溢流管流出^[6]。旋风分离器内部是一个典型的 Rankine 涡结构, 一部分是沿近壁面向下运动的准自由涡, 另一部分是沿分离器中轴线左右摆动的准刚性涡^[7]。在对两相流分离过程以及两相流运动模型的研究中, 流场分析是最重要的研究方法。由于计算机资源不足的问题, 目前大多数对于旋风分离器的数值模拟研究主要着眼于稳定时均流场的计算与分析, 对于瞬时动态流场的研究略显不足。为了更加深入了解分离器分离过程中动态流场的分布特性, 需要探究动态流场的形成机制以及流场动态变化的影响因素, 并从理论的角度研究动态流场的分布对分离效率的影响, 从而为提高分离性能提供技术支撑。

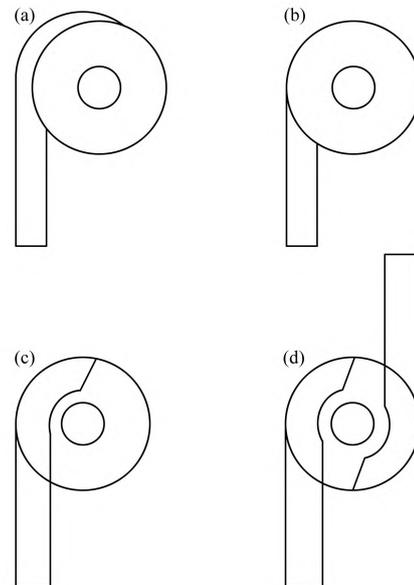
1 旋风分离器结构特点

旋风分离器结构较为简单, 主要由进料口、筒体、锥体、排尘口、灰斗以及排气管等组成, 模型示意如图 1 所示。根据进料口结构的不同, 可将旋风除尘器划分成切线式、蜗壳式、螺旋面式和对称入口式等类型。不同进料口结构的旋风分离器如图 2 所示。



图 1 旋风分离器基本结构

Fig. 1 Basic structure of cyclone separator



(a) 切线式; (b) 蜗壳式;

(c) 螺旋面式; (d) 对称入口式

图 2 不同进料口结构的旋风分离器

Fig. 2 Cyclone separators with different inlet structures

目前对于旋风分离器流场的研究,大都是利用计算流体力学(CFD)的方法对内部速度场以及压力场进行模拟,或是使用测量仪器对流体的瞬时物理量进行测量^[8-10]。基于CFD方法,袁惠新等^[11]对天然气脱蜡旋风分离器的气液两相流场进行了模拟,指出其分离效率受溢流管插入深度与颗粒粒径的影响,并对设计结构参数进行了优化;范军领等^[12]则基于拉格朗日-欧拉方法,对旋风分离器内部的局部磨损情况进行了计算,发现“ α 型”结构中倾斜式入口可减缓内旋流对粒子的干扰,削弱“顶灰环”现象形成,从而改善分离效率并减小壁面磨损。在使用测量仪器对流场进行研究方面,解明等^[13]通过热线/热膜风速仪(HWFA)和压力传感器对瞬时切向速度和瞬时压力的波动情况进行了测量,发现瞬时速度脉动受湍流和旋转摆动共同作用,从而导致流场的不稳定性;XIONG等^[14]使用皮托管对旋风分离器内部流体的流速进行了测量,并使用气溶胶光谱仪对气固两相流中的颗粒物浓度以及粒径分布进行了分析;徐一等^[15]使用相位多普勒颗粒测速仪对颗粒相速度进行测量,揭示了强旋流湍流下颗粒运动的速度分布特性,并验证了PDPA技术在气固两相测量中的可行性;PENG等^[16]采用频闪仪和高时间分辨率的压力测量设备,发现旋风分离器内部涡流端的结构变化显著影响压降和流场稳定性。旋风分离器流场研究表明,数值模拟可有效预测流场规律,仪器测量则揭示关键流场特性。二者结合是实现高效优化设计的关键路径,可以深化对机制的理解并提升优化性能。

2 旋风分离器分布特性及其优化

2.1 速度场

2.1.1 切向速度

旋风分离器内部速度场主要以切向速度为主。流体在做旋流运动时切向速度为颗粒相提供向心力,颗粒相在离心效应的作用下与器壁发生碰撞,继而在重力与气流曳力的双重作用下被分离出来。旋风分离器颗粒相流动模型如图3所示。对于速度的大小,早期的试验研究大都使用LDV(激光多普勒测速仪,主要通过追踪颗粒所释放的多普勒

信号测量速度大小)进行测量。而使用LDV对旋风分离器内部速度的测量可以追溯至1990年ZHOU等^[17]的研究。

旋风分离器内部切向速度的分布遵循Rankine涡的流动规律,切向速度随半径的增大先增后减,在刚性涡与自由涡的交界面附近达到最大值。在Rankine涡不稳定性的作用下,切向速度在不同时刻会出现波动变化,并且波动的幅值会随着径向位置的不同而变化。为此,宋健斐等^[18]、解明等^[13]、王迪等^[19]以及孙立强等^[20]使用流场测量工具对瞬时切向速度的脉动幅值和频率进行了研究,结果表明:瞬时切向速度的脉动值受气体的湍流脉动和旋转流摆动所产生的低频脉动影响。在流体从外部的自由涡向内部刚性涡的转化过程中,切向速度受旋转流摆动的影响越来越大。在旋转流摆动与气流湍流脉动的共同作用下,瞬时切向速度在自由涡与刚性涡的交界面达到峰值。

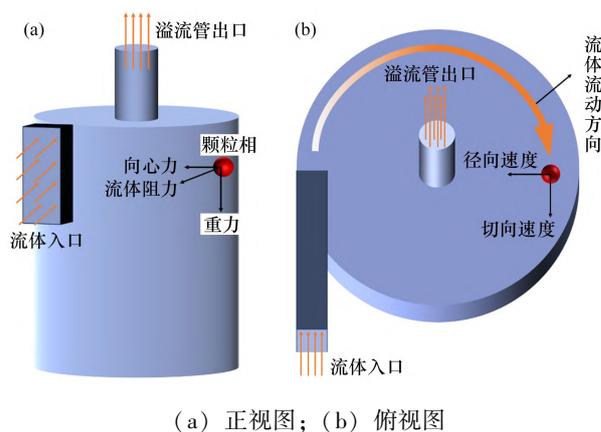


图3 旋风分离器颗粒相流动模型

Fig. 3 Particle phase flow model of cyclone separator

切向速度是旋风分离器性能好坏的关键因素,主要表现在切向速度越大,分离效率越高。在这个结论的基础上,研究人员通过增大旋风分离器内部切向速度的方式进行分离器性能优化的研究^[21-23]。在控制流量一定的情况下,研究人员采用减小流体流过的截面面积,使其在收缩作用下获得更大的边界速度。李永健等^[24]在不改变进料口基本模型的情况下,在进料口中设置不同角度的挡板,使得流体在进料管道与筒体的临界位置在收缩作用下获得更大的速度。刘岗辉等^[25]通过在入料管道设置收缩角的方式使得新型分离器相

比于传统的 Lapple 型分离器获得更大的入口流速, 从而使得流体在分离器内部流动时获得更大的切向速度。杜慧娟等^[26]同样用设置入口收缩角的方式优化流场内的切向速度, 并对不同收缩角的分离器模型进行了数值模拟, 结果表明: 随着收缩角的增大, 流体由于收缩作用所获得的缩口速度和切向速度越大, 分离器的分离效率越好。QIAN 等^[27]在研究入口截面角度与溢流管插入深度对分离性能的影响时, 得出一定的入口截面角度能够增加外部自由涡的切向速度, 从而提高分离效率。但是相比于改变流体流经截面面积的方式, 改变入口截面角度只能在一定范围内提升分离器性能。

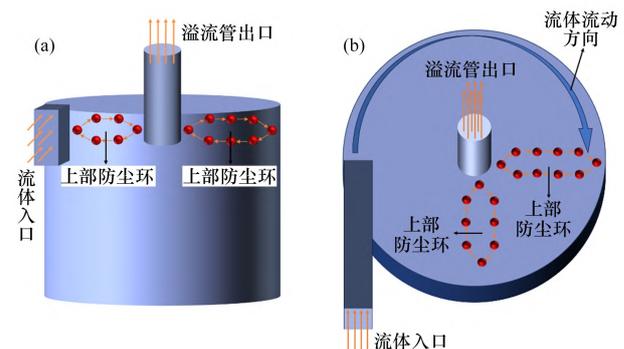
改变旋风分离器进料口的结构与尺寸是获取更大切向速度最主要的优化方法。切向速度作为气固两相流在旋风分离器中流动最重要的速度分量, 其大小决定了颗粒所受向心力的大小, 该值越大便会使得更多的颗粒在向心力的作用下与壁面碰撞进而被捕获。切向速度场分布的对称性也会对旋风分离器的运行产生一定影响: 较大切向速度附近的壁面会在颗粒高速运动下磨损得更为严重, 切向速度场在横截面上分布的对称轴心偏离几何中心会对上升流与下降流的摆动产生影响。

2.1.2 轴向速度

轴向速度与切向速度都是影响颗粒相分离的重要因素。颗粒相在离心作用下被甩向壁面, 其在气流曳力作用下会具有一个向下的轴向速度。早期研究者在研究分离器性能时, 并未着重于研究轴向速度对分离性能的影响。近年来, 众多研究人员使用数值模拟与试验测量的方法对旋风分离器内部速度场的轴向分量进行了研究^[28-30], 结果表明: 在远离进料口时, 轴向速度在相应高度截面的径向上呈轴对称分布, 表现为几何中心处轴向速度最大, 沿着径向向外逐渐减小。除此之外, 轴向速度在近壁面处方向向下, 而在几何中心附近时方向向上, 从而表明, 旋风分离器内部流体的流动分为向下的自由涡与向上的刚性涡。

在对旋风分离器性能优化的研究中, “顶灰环”现象的存在严重影响旋风分离器的分离效率, 如图 4 所示。“顶灰环”现象形成的主要原因是, 当旋风分离器内漩涡轴向曳力大于颗粒相重力时,

部分颗粒相在向下运动的过程中, 在内部刚性涡旋转向上的作用下被气流携带并进入溢流管与筒体的中间区域, 从而形成了以颗粒相为主的“灰环”。“顶灰环”现象对旋风分离器性能的主要影响在于, 其会使得颗粒相在筒体顶板处聚集, 大量颗粒相在不断的环形运动过程中对筒体产生磨损, 从而影响分离器性能。



(a) 正视图; (b) 俯视图

图 4 “顶灰环”现象示意

Fig. 4 The phenomenon diagram of top gray ring

为了减小“顶灰环”现象对旋风分离器性能的影响, 众多研究人员对旋风分离器结构进行了一系列优化, 并结合数值模拟的方式对其进行了研究^[12,31-33]。为了更好地计算粒子的运动情况, XUE 等^[34]采用随机粒子追踪模型 (SPTM) 和粒子-源-单元格 (PSIC) 方法对颗粒相进行数值模拟, 计算结果表明: 颗粒相在经过旋风分离器的分离作用后, 会在分离器的筒体部分形成两股质量浓度不同的“尘带”, 并且在筒体顶部的挡板位置形成非轴对称的“尘环”。WEI 等^[35]在相同条件下对比了具备梯形入口的旋风分离器与常规旋风分离器的分离效果, 发现梯形入口分离器能够在一定程度上改善“顶灰环”现象。在此基础上, 范军领等^[12]研究了“顶灰环”现象对“ α 型”入口旋风分离器内部的磨损情况, 发现该分离器入口向下倾斜了一定角度, 有效地减弱了内旋流上升对刚进入粒子的影响, 从而消除了“顶灰环”现象。在一定程度上“顶灰环”现象会对器壁产生磨损, 但“灰环”在经过一定时间的累积后便会在重力的作用下落下。为了更加深入地了解“顶灰环”的形成以及其对分离器性能的影响, 曹鸣谦等^[36]对“顶灰环”的脱落现象以及脱落周期进行了预测, 结果

表明:“顶灰环”的脱落主要与轴向曳力和重力的大小有关,当重力大于轴向曳力时,颗粒相便会在纵向上有一个向下的轴向速度,“灰环”便会脱落。

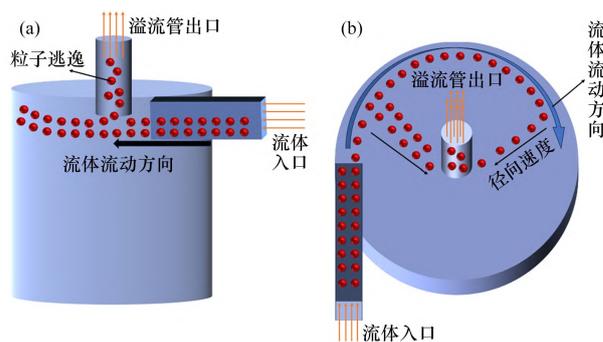
轴向速度场在筒体最顶端至溢流管最低端之间的分布较为重要,在优化过程中该区域内轴向速度与上升流的方向相反,且向下的值越大,颗粒受到向下的轴向曳力便会越大,颗粒便不容易在溢流管与壁面的环形区域形成环流。除此之外,轴向速度场在横截面上分布的对称性对于颗粒的分离十分重要。轴向速度场的轴心偏离几何中心,会使得下降流受到上升流的影响,部分颗粒便会在上升流的作用下从溢流管逃逸。

2.1.3 径向速度

在对旋风分离器内部速度场的研究中,除了切向速度与轴向速度,众多研究人员还对径向速度进行了大量的研究^[37-42]。径向速度的存在不直接影响旋风分离器的分离效率,所以在旋风分离器性能优化与流场分析研究中,研究者往往会忽略径向速度的影响。HE等^[43]使用粒子图像测速仪(PIV)对分离器内部粒子流的瞬时速度进行了测量,研究了旋风分离器内部径向速度场的分布规律。结果表明,径向速度整体上呈正负值交替出现的分布规律。由于内部刚性涡的不稳定性,在几何中心处涡核会不停摆动,在不同高度截面上径向速度的分布有所不同,该值的方向(表现为正负值)也有所不同。

径向速度对旋风分离器的影响主要体现在,颗粒相存在方向向几何中心的径向速度,尤其是当混合流体从入口刚进入分离器内部时,在径向速度和内部上升流的作用下,部分颗粒相会直接从溢流管“逃逸”,从而形成“短路流”现象,如图5所示。除此之外,在筒体与溢流管之间环形区域之间,如果向心的径向速度过大,颗粒相在上升气流的作用下做循环运动。

为了减少“短路流”现象对分离器分离效率的影响,研究人员对旋风分离器的几何构型进行了改进,并使用CFD软件对旋风分离器内部流场进行了模拟,并结合测量工具对其进行验证^[44-47]。李振才等^[48]在传统单入口直切式旋风分离器的基础上,设计了一种对称双入口式分离器,并使用



(a) 正视图; (b) 俯视图

图5 “短路流”现象示意

Fig. 5 The schematic diagram of short circuit flow phenomenon

数值模拟方法将两种分离器的“短路流”情况进行了对比,结果表明:对称双入口式分离器内部速度场具有更好的对称性,并且径向速度更小,从而减少了“短路流”现象的发生。在此基础上,ZHAO等^[49]设计了一种阿基米德螺旋式入口的旋风分离器,并使用该物理模型进行了气固两相流的数值模拟,发现该进料口能够较好地改善径向速度分布的对称性,减少由于“短路流”现象而从溢流管“逃逸”的固体颗粒。颗粒相在螺旋式进料口处的运动方式,类似于传统分离器中筒体部分的运动方式。颗粒相会在离心力的作用下被甩向近壁面处,使得近壁面处颗粒相的质量浓度增加、越靠近几何中心部分的颗粒相越少,从而达到预分离的目的。霍鑫东^[50]在对渐扩式升气管对旋风分离器性能的研究中发现,升气管下端入口附近存在较大的径向速度是产生“短路流”最主要的原因,并且当升气管的渐扩率为1.1时,“短路流”现象的影响降到最低。

径向速度场分布的优化途径主要集中于使用对称性进料口以及能够在分离过程开始前减小径向速度的进料结构。因此,径向速度场分布的重点研究位置应当集中在溢流管最低端及其下方。在优化过程中应当尽量减小向几何中心的径向速度值,并且保证径向速度场分布的对称性,以减少“短路流”现象的发生。

在对旋风分离器的流动特性研究以及性能优化的过程中,当前研究将流体速度场的分布特性及其变化作为重点方向,而忽略了速度场变化的同时也伴随着压力场的变化。压力场的变化必然

会导致压降的不同,从而使得流体在流动的过程中对旋风分离器内部产生磨损,影响器械的使用时间。故在研究与应用中应当注意以下几点:①由于瞬时切向速度的组成较为复杂且湍流脉动无规律可循,实际中要充分考虑瞬时速度的脉动值对流场的影响,不能以时均速度场代表整个旋风分离器内部速度场的分布;②在提高对分离效率影响最大的切向速度的同时,不能过度影响径向速度和轴向速度流场的分布;③在通过改变入口结构的方式来优化速度场时,应当注意入口结构不同导致的压力场变化;④由于旋风分离器在不同使用场景时所分离的颗粒粒径不同,在开发特定使用场景的旋风分离器时,要全面考虑气相速度场分布对不同粒径颗粒运动轨迹的影响。

2.2 压力场

压降是衡量旋风分离器性能的重要指标,代表了流体在分离器内部的能量耗散情况。压降通常是指旋风分离器进料口与排尘口的局部效应以及壁面摩擦所导致的压力损失。研究人员建立了许多不同的压降计算模型。其中,有根据旋风分离器进料口长宽比与溢流管直径建立的压降计算模型,如 SHEPHERD 等^[51]和 CASAL 等^[52]开发的模型,这些计算模型并未考虑操作参数以及壁面摩擦所产生的过程损失等影响,所以其只能够在特定类型旋风分离器的计算中使用。为了建立能够在各种类型旋风分离器中进行压降分析的计算模型,KARAGOZ 等^[53]在分离器颗粒分离效率模型的基础上,考虑壁面粗糙程度、雷诺数以及各种操作参数,建立了一种新型的压降计算模型,该模型能够在雷诺数确定的条件下更加准确地估算压降。在此模型基础上,NAKHA EI 等^[54]开始注重研究气体温度这一操作参数对压降的影响,并利用数值模拟的方法进行预测,预测结果与试验结果的误差在 3% 左右。

在试验中旋风分离器的压降主要使用皮托管^[55]、激光多普勒测速仪^[56](LDV)以及多点压力传感器等测量。旋风分离器的压降主要分为静压压降与动压压降两部分,其中静压主要通过压力测量工具进行测量,而动压的大小主要与速度大小有关。总压、静压以及动压在旋风分离器内部

的分布总体看来均具有对称性的,其中总压的分布从集合轴心向壁面方向随着半径的增大而增大;动压的大小与速度大小有关,故动压的分布与速度场的分布类似,在几何轴心与近壁面处的值最小,在自由涡与刚性涡的交界面值最大;静压的大小分布与总压大体上相同,但静压在集合轴心附近会出现负值,这是旋风分离器内部形成刚性涡的主要原因。

旋风分离器中的压降越大,不仅代表流体在分离器内部机械能的损失越大,还会使得分离器的运行成本升高。旋风分离器轴心属于负压区域,在运行期间锥底的负压延伸到灰斗内,便会使得已经分离出来的颗粒相在上升流的作用下再次返回分离器内(如图 6 所示),从而影响分离器的效率。压降系数和静压差的大小会受分离器的自然旋风风长的影响。自然旋风风长主要是指溢流管底端至漩涡尾端的长度,代表了分离器的有效分离空间。但是由于旋风分离器内部湍流的复杂性,自然旋风风长的大小不仅会受到筒体直径、溢流管长度以及筒锥比等参数的制约,还会受入口流速、雷诺数等操作参数的影响^[57]。

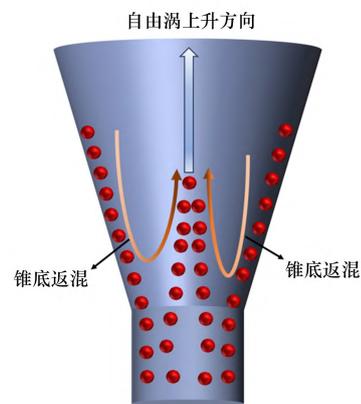


图 6 锥底返混现象示意

Fig. 6 The schematic diagram of cone bottom back mixing phenomenon

众多研究人员围绕降低分离器内部压降这一目标进行了大量试验与模拟。KAYA 等^[58]利用切向入口型旋风分离器研究了入口速度以及溢流管尺寸两个变量对压降系数和静压差的影响,发现压降会随溢流管直径的减小而增大。主要原因在于,溢流管直径的减小会使得气体在溢流管入口处产生更多压缩损失,与此同时气体流速也会在

压缩作用下增加,这一点在 XIANG 等^[59]的研究中也被证明。赵学观等^[60]在研究中将溢流管尺寸会对内部流场产生较大影响这一结论应用到大豆脱粒过程所使用旋风分离器的开发中,并对旋风分离器溢流管进行了优化。张文华等^[61]、王卫兵等^[62]在前人研究的基础上,对溢流管进行了改进,通过在溢流管上设置缝隙来达到降低压降的目的。KARAGOZ 等^[63]抛弃了传统旋风分离器的设计,将原有的筒锥构型改造成了筒体+涡旋限制器的组合,通过涡旋限制器来调节漩涡长度,并将其与传统旋风分离器进行对比试验,结果表明:当两者漩涡长度相同时,新型分离器的压降比传统分离器高,但是新型分离器可以通过调节涡旋限制器改变漩涡长度,使得在压降相同的情况下,达到更高的分离效率。旋风分离器的结构会对压降产生较大影响,流体自身的物理特性也会影响流场分布。李凯等^[64]将气体性质作为变量研究了旋风分离器内部流场的变化,结果表明:气体密度和黏度都会对旋风分离器内部压降造成较大影响,并且压降会随着气体黏度的增加而减小。压降减小的原因在于:气体黏度的增加会使得切向速度减小;由于动压的降低,出口处静压便会相对增加,压降自然便会减小。

在减小压降的优化应用中,首先需要探究影响压降的因素,包括旋风分离器的物理构造、流体自身性质以及操作参数等。压降的变化与速度息息相关,速度的变化代表了动压的变化。根据伯努利(Bernoulli)方程的解释,动压与静压的和在一定情况下是一个定值,即动压与静压在一定条件下能够相互转化。故在减小压降的优化中,要充分考虑优化过程中速度的变化,在保证速度场优化目标不受影响的条件下达达到减小压降的目的。

2.3 分离效率

分离效率是衡量旋风分离器性能的另一个重要指标,是在研究与应用中最重要的优化目标。分离效率的计算主要分为两部分:①颗粒的分离比例;②分离器的切割直径。切割直径是指在分离过程中分离效率大于50%的颗粒直径,表示了分离器能够有效分离的最小颗粒直径。目前在旋风分离器分离效率的研究中,众多研究人员开发

了许多模型来预测分离器的分离效率,而影响旋风分离器分离效率的主要结构因素有溢流管直径及其插入深度、筒体长度与锥体长度,流体性质方面主要有颗粒粒径与浓度^[65]。NIU 等^[66]同时考虑了结构参数、操作参数以及流体性质三方面对分离效率的影响,构建了对航天热泵系统中所用旋风分离器的一维计算模型。ZHAO^[67]则在以往飞行时间模型的基础上,充分考虑二次涡对颗粒流体停留时间的影响,并根据试验数据进行修正,建立了一种高精度的颗粒分离效率预测模型。李庆生等^[68]、李昌剑等^[69]使用响应曲面优化方法,建立以筒锥比、排尘口与筒体直径比例以及溢流管与筒体直径比例为主要影响因素的分离效率预测模型。预测结果显示,三者对分离效率影响的由大到小的顺序:溢流管直径、排尘口直径、筒体高度。PARK 等^[70]将几何参数作为输入变量,利用机器学习算法预测旋风分离器的切割直径。结果表明:模型的相关系数相比使用多元线性回归提高了32.5%。在此基础上,刘金鹏等^[71]在切割直径预测模型中增加了环形空间中雷诺数作为输入,建立了具有更高精度的BR-BPNN分割粒径模型。

通过将影响旋风分离器分离效率的各方面因素作为输入变量,使用不同的人工智能算法模型进行预测,能够在理论上分辨出不同方面因素对分离效率影响的大小,并且在已有模型的基础上进行相关改进,能够得到更加精确的数学模型。在旋风分离器分离效率的各个影响因素中,影响最大的是结构参数。结构参数直接决定了内部漩涡的漩涡长度以及分离空间,而操作参数以及流体性质对流场的影响较小,故研究人员多以改变旋风分离器主要构型以及结构参数的方法来优化分离效率。梁延玺等^[72]在对旋风分离器的优化过程中,通过改变在筒体轴向的入口位置来模拟其对旋风分离器的影响,证明当入口位置低于溢流管最下端时,流场的稳定性不仅会被破坏,顶部环流的程度还会增加,进而分离效率受到影响。高助威等^[73]从涡平衡角度出发,研究不同溢流管直径对近壁面出涡状态的影响,发现在分离器近壁面处因涡线闭合所产生的回流区与滞留区会严

重影响分离效率,而在一定范围内改变溢流管直径能够使得涡流达到平衡,从而提高分离效率。李杰等^[74]对溢流管壁面厚度进行了相应研究,发现溢流管壁面厚度的增加会减少流体在环形空间的可流动区域,导致部分颗粒直接从溢流管流出,从而降低分离效率。

溢流管的尺寸参数会对分离效率产生较大影响。在一定范围内减小溢流管直径有利于促进分离器顶部灰环的脱落,而溢流管壁面厚度的增加则能够在保证上升流正常从溢流管流出的前提下,减小灰环的“生存空间”,所以正确地选用和设置溢流管是提高分离效率最重要的方式之一。李文琦等^[75]在进行气固两相流试验中,将气体温度作为影响因素,在两相流进入分离器前对其进行加热,研究不同温度下颗粒的总分离效率以及不同粒径的分离效率,研究结果表明:颗粒的总分离效率会随着温度的升高而降低,但小于切割直径的颗粒分离效率却会随着温度升高而升高。LI 等^[76]则将流体湿度作为研究对象,在其他条件一定的情况下,增加一定湿度有利于总分离效率的提高。HUANG 等^[77]利用 CFD 软件研究了 10 种不同颗粒负载量情况下分离效率的变化情况,结果表明:随着颗粒负载量的增加,大颗粒能够将更多小颗粒携带而下,除此之外更多小颗粒的存在也会促进团聚现象的发生。由此可见,流体性质也是影响分离效率的重要因素。温度的升高有利于加快颗粒相的运动速率,提高在运动中小颗粒与大颗粒之间的碰撞概率,同时流体自身湿度的增加也会促进小颗粒“成长”为大颗粒,使得颗粒在更大重力的作用下落入排尘口,所以通过改变流体自身物理特性也能够达到提高分离效率的目的。

在提高旋风分离器分离效率的优化中,除了通过改变分离器基本构型(如溢流管尺寸参数等)之外,既要探究同相之间的相互作用及其影响因素,还要考虑不同相之间的相互作用。在气固两相流中,颗粒相之间的碰撞作用会对分离效率产生较大影响。流体温度与湿度能够使得流体中小颗粒“成长”为大颗粒,其中流体自身速度也会对颗粒自身运动以及颗粒与颗粒之间的碰撞产生一定影响。故在研究流体自身温度、湿度对颗粒分

离效率时,可以通过在一定程度上改变流体流速,从而获取更大的分离效率和切割直径。

3 旋风分离器在钢铁行业的应用

作为常用的除尘设备,旋风分离器在钢铁生产工艺中的应用十分广泛。一般来说,烧结机机头的烟气温度为 130 ~ 150 °C,而球团烟气的温度范围为 150 °C 左右,高炉炉顶的温度范围为 100 ~ 250 °C。对于烧结机,其正常工作的烟气流量一般为 90 ~ 100 m³/min,含尘量为 0.5 ~ 3.0 g/m³,含水量为 10% ~ 15%。表 1 为两个钢厂烟气粉尘量、流量以及粒度的各项参数,用来分析旋风分离器的除尘效率。由表 1 可见,旋风分离器对首钢球团烟气的除尘率达到了 90%,对浦项高炉烟气的除尘率也达到了 85%。

表 1 钢厂粉尘量参数

Table 1 Dust quantity parameters of steel plant

项目	含尘量/ (g·m ⁻³)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	平均粒 度/μm	旋风分离器 的除尘率/%
首钢球团烟气	12	200 000	10	90
浦项高炉烟气	15	646 550	87	85

4 结语

旋风分离器作为常用的气固分离设备,其内部复杂的流场结构对分离效率与能耗水平具有决定性影响。本文系统阐述旋风分离器在速度场、压力场及分离效率等方面的研究进展,并结合数值模拟与试验研究成果,得出以下几点结论:

(1) 旋风分离器的切向速度是影响分离效率的关键参数。切向速度越大,分离效率也就越高。而轴向速度与径向速度则在“顶灰环”与“短路流”等现象中起到重要作用,三者的协同分布决定了旋风分离器的分离性能。

(2) 结构的优化是提升性能的核心途径,改变旋风分离器进料口的结构与尺寸是获取更大切向速度最主要的优化方法。旋风分离器入口的形状对轴向速度与径向速度均有影响,其优化在一定程度上能避免“顶灰环”与“短路流”等现象发生。在提升分离效率的同时,应关注压降变化对系统能耗与颗粒回流的影响,实现性能与能耗的

优化平衡,在保证速度场优化目标不受影响的条件下达到减小压降的目的。

(3) 除了改变分离器基本构型之外,既要探究同相之间的相互作用及其影响因素,还要考虑非同相之间的相互作用。在气固两相流中,流体温度与湿度能够使得流体中的小颗粒成长为大颗粒,颗粒相与颗粒相的碰撞作用也会对分离效率产生较大影响。在研究流体自身温度湿度对颗粒分离效率时,可以通过在一定程度上改变流体流速,从而获取更大的分离效率和切割直径。

(4) 现实中对于旋风分离器基本结构的改造难度较大且成本较高,而利用数值模拟方法可以通过计算机代替实际的模型改造,大大节省研究人员的时间和精力,并且能够在理论和实践两方面证明几何模型的实用性与准确性。除此之外,可以结合机器学习以及人工智能算法,建立更为准确的旋风分离器性能预测模型,实现低成本的参数优化设计。

参考文献:

- [1] 惠立锋. 燃煤电厂超低排放 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 实验室采样对比分析[J]. 中国电力,2021,54(2):190-196.
HUI Lifeng. Comparative analysis of $PM_{10}/PM_{2.5}$ laboratory sampling for ultra-low emission of coal-fired power plants[J]. Electric Power,2021,54(2):190-196.
- [2] 张少红,于少华. $PM_{2.5}$ 的来源、危害及防治措施研究[J]. 环境科学与管理,2014,39(7):92-94.
ZHANG Shaohong, YU Shaohua. Sources, harm and prevention control measures of $PM_{2.5}$ pollution[J]. Environmental Science and Management,2014,39(7):92-94.
- [3] 罗水源,赵海宝,袁伟锋,等. 双V型均流式电除尘技术改造及流场优化[J]. 烧结球团,2024,49(5):124-129.
LUO Shuiyuan, ZHAO Haibao, YUAN Weifeng, et al. Modification and flow field optimization of double V type current-sharing electrostatic precipitator technology[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(5):124-129.
- [4] 刘立,姚群,陈志炜,等. 高湿高腐蚀球团烟气袋式除尘试验[J]. 钢铁,2020,55(8):187-192.
LIU Li, YAO Qun, CHEN Zhiwei, et al. Treatment of high humidity and high corrosive pellet flue gas with bag filter [J]. Iron & Steel,2020,55(8):187-192.
- [5] 吴圣兵. 电除尘器在南(京)钢烧结机头烟气除尘中的应用[J]. 烧结球团,2006,31(3):52-55.
WU Shengbing. Application of ep to treat the main duct waste gas of Nangang sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing,2006,31(3):52-55.
- [6] ELSAYED K, LACOR C. The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES[J]. Computers & Fluids,2013,71:224-239.
- [7] IOZIA D L, LEITH D. The logistic function and cyclone fractional efficiency[J]. Aerosol Science and Technology, 1990,12(3):598-606.
- [8] 潘传九,靳兆文,冯秀. 旋风分离器的螺旋导流和防返混[J]. 化工进展,2012,31(6):1215-1219.
PAN Chuanjiu, JIN Zhaowen, FENG Xiu. Spiral diversion and anti-backmixing of cyclone separator [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2012,31(6):1215-1219.
- [9] 于洲,马春元. 动态旋风分离器数值模拟及实验研究[J]. 化工进展,2014,33(7):1684-1690;1696.
YU Zhou, MA Chunyuan. Numerical simulation and experimental study of dynamic cyclone separator [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(7):1684-1690;1696.
- [10] 曹万秋. 旋风分离器气相流场数值模拟分析[J]. 轻金属,2022(5):59-62.
CAO Wanqiu. Numerical simulation analysis of gas phase flow field for cyclone separator [J]. Light Metals, 2022 (5):59-62.
- [11] 袁惠新,方毅,付双成. 天然气脱蜡旋风分离器分离效率的模拟[J]. 化工进展,2014,33(1):43-49.
YUAN Huixin, FANG Yi, FU Shuangcheng. Numerical simulation of the separation efficiency of natural gas dewaxing cyclone separator [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2014,33(1):43-49.
- [12] 范军领,何昊,张攀,等. 局部磨损对 α 型旋风分离器内流场及分离性能的影响[J]. 化工进展,2022,41(8):4025-4034.
FAN Junling, HE Hao, ZHANG Pan, et al. Effect of local erosion on flow field and separation performance of α -type cyclone separator [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2022,41(8):4025-4034.
- [13] 解明,孙立强,宋健斐,等. 旋风分离器内气相旋转流动态特性分析与表征[J]. 化工进展,2022,41(7):

- 3455 - 3464.
- XIE Ming, SUN Liqiang, SONG Jianfei, et al. Analysis and characterization of gas swirling flow dynamic characteristics in a cyclone separator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7): 3455 - 3464.
- [14] XIONG Z Y, JI Z L, WU X L. Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones[J]. Powder Technology, 2014, 253: 644 - 649.
- [15] 徐一, 周力行, 曹东. 旋流数为 1.0 的强旋湍流两相流动的 PDPA 实验[J]. 化工学报, 2000, 51(1): 39 - 44.
- XU Yi, ZHOU Lixing, CAO Dong. Experiment on strongly swirling turbulent gas-particle flows with swirl number of 1.0[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2000, 51(1): 39 - 44.
- [16] PENG W, HOFFMANN A C, DRIES H W A, et al. Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: The nature of the vortex end[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(24): 6919 - 6928.
- [17] ZHOU L X, SOO S L. Gas: Solid flow and collection of solids in a cyclone separator[J]. Powder Technology, 1990, 63(1): 45 - 53.
- [18] 宋健斐, 孙立强, 解明, 等. 旋风分离器内气相旋转流不稳定性的实验研究[J]. 化工学报, 2022, 73(7): 2858 - 2864; 3299.
- SONG Jianfei, SUN Liqiang, XIE Ming, et al. Experimental study of instability of gas-phase swirling flow in cyclone[J]. CIESC Journal, 2022, 73(7): 2858 - 2864; 3299.
- [19] 王迪, 孙立强, 周发威, 等. 窜气对旋风分离器流场动态特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(9): 2076 - 2083.
- WANG Di, SUN Liqiang, ZHOU Faqi, et al. Effect of gas leakage on the dynamic characteristics of flow field in cyclone separator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(9): 2076 - 2083.
- [20] 孙立强, 王迪, 宋健斐, 等. 旋风分离器有无灰斗对气相流场动态特性的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(6): 2202 - 2210.
- SUN Liqiang, WANG Di, SONG Jianfei, et al. Effect of ashless separator on dynamic characteristics of gas phase flow field in cyclone separator[J]. CIESC Journal, 2019, 70(6): 2202 - 2210.
- [21] 张蕾蕾, 陈延信, 赵博, 等. 一种新型下排气旋风分离器的数值模拟[J]. 流体机械, 2021, 49(10): 50 - 58.
- ZHANG Leilei, CHEN Yanxin, ZHAO Bo, et al. Numerical simulation of a new type of cyclone with down exhaust outlet[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(10): 50 - 58.
- [22] WU Jingping, ZHANG Yanhong, WANG Hualin. Numerical study on tangential velocity indicator of free vortex in the cyclone[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 132: 541 - 551.
- [23] WANG S Y, LI H L, WANG R C, et al. Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(2): 227 - 239.
- [24] 李永健, 王建军, 金有海. 入口挡板对旋风分离器内流动分布影响的试验研究[J]. 当代化工, 2011, 40(3): 311 - 313.
- LI Yongjian, WANG Jianjun, JIN Youhai. Experimental research on influence of inlet baffle on flow fields in cyclone separator[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(3): 311 - 313.
- [25] 刘岗辉, 王卫兵, 喻俊志, 等. 旋风分离器入口上侧收缩角对流场影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 173 - 178.
- LIU Ganghui, WANG Weibing, YU Junzhi, et al. Influence of necking angle on upper side of the inlet on flow field of cyclone separator[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 173 - 178.
- [26] 杜慧娟, 王川保, 马红和, 等. 入口收缩角度对旋风分离器分离性能的影响[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 43 - 48; 72.
- DU Huijuan, WANG Chuanbao, MA Honghe, et al. Influence of inlet necking angle on separation performance of cyclone separator[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 43 - 48; 72.
- [27] QIAN F P, ZHANG M Y. Effects of the inlet section angle on the flow field of a cyclone[J]. Chemical Engineering & Technology, 2007, 30(11): 1564 - 1570.
- [28] 张乐辉, 范军领, 高飞, 等. 旋风分离器锥体局部磨损对内流场及性能的影响[J]. 高校化学工程学报, 2023, 37(5): 717 - 728.
- ZHANG Lehui, FAN Junling, GAO Fei, et al. Effects of cone local erosion on the flow field and performance of

- cyclone separators[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2023, 37(5): 717-728.
- [29] SHI B C, WEI J J, CHEN P Z. 3D turbulent flow modeling in the separation column of a circumfluent cyclone[J]. Powder Technology, 2013, 235: 82-90.
- [30] 王锁芳, 赵浩宇, 柴金孟, 等. 出口结构对轴流式旋风分离器性能影响的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(2): 759-767.
WANG Suofang, ZHAO Haoyu, CHAI Jinmeng, et al. Numerical simulation of the effect of export structure on the performance of axial flow cyclone separator[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(2): 759-767.
- [31] 袁世威. 螺旋导流强化旋风分离器性能的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
YUAN Shiwei. Study on the performance of spiral diversion to enhance cyclone separator. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [32] 李玉玺. 基于 OpenFOAM 的流化床及旋风分离器流动特性模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
LI Yuxi. Simulation study on flow characteristics of fluidized bed and cyclone separator based on OpenFOAM [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [33] 董振洲. 出入口结构及入口气速对旋风分离器内旋流非稳态特性的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
DONG Zhenzhou. Influence of inlet and outlet structure and inlet gas velocity on the unsteady characteristics of cyclone flow in cyclone[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [34] XUE X H, SUN G G, WAN G J, et al. Numerical simulation of particle concentration in a gas cyclone separator[J]. Petroleum Science, 2007, 4(3): 76-83.
- [35] WEI Q, SUN G G, JIAO Y N, et al. The effect of inlet shape on separation performance and flow-field characteristics in a gas-solid cyclone separator[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2019, 14(5): e2339.
- [36] 曹鸣谦, 陈建义, 樊晓琦, 等. 旋风分离器环形空间顶灰环的流动特性[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(1): 183-192.
CAO Mingqian, CHEN Jianyi, FAN Xiaoqi, et al. Flow characteristics of top ash ring in cyclone separator[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2024, 40(1): 183-192.
- [37] HREIZ R, GENTRIC C, MIDOUX N. Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(12): 2521-2539.
- [38] DEMIR S, KARADENIZ A, AKSEL M. Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones [J]. Powder Technology, 2016, 295: 209-217.
- [39] LI W S, HUANG Z Q, LI G, et al. Effects of different cylinder roof structures on the vortex of cyclone separators[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 296: 121370.
- [40] 张子慧, 董思捷, 姜云超, 等. 喉管直径对旋风分离器性能影响的仿真研究[J]. 流体机械, 2021, 49(1): 59-66.
ZHANG Zihui, DONG Sijie, JIANG Yunchao, et al. Numerical study of the effect of hollow throat diameter on the performance of cyclone separator[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(1): 59-66.
- [41] 黄志强, 李万松, 叶闯, 等. 筒体顶板对旋风分离器性能的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3424-3433.
HUANG Zhiqiang, LI Wansong, YE Chuang, et al. Effect of the top plate of a cylinder on the performance of a cyclone separator[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3424-3433.
- [42] 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.
WEI Pei, YANG Miao, YOU Yanni. Impact of the inlet structure on the performance of the cyclone separator [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 1257-1262.
- [43] HE M Y, ZHANG Y H, MA L, et al. Study on flow field characteristics in a reverse rotation cyclone with PIV[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 126: 100-107.
- [44] ZHANG Z H, YAN S J, DONG S J, et al. Study of the short-circuit flow and circulation flow's impact on separation performance of cyclone separator with volute-helical inlet [J]. Advanced Powder Technology, 2024, 35(1): 104281.
- [45] WANG Z T, SUN G G, YUAN S W, et al. Effect of number of inlets on performance and flow field of large-

- scale cyclone separators[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2022, 17(6): e2836.
- [46] 王晨雯. 旋风分离器内短路流的流动特征与形成机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
WANG Chenwen. Study on flow characteristics and formation mechanism of short-circuit flow in cyclone [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [47] 王佳音. 旋风分离器几何结构改进及增设内构件的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
WANG Jiayin. Study on improvement of geometric structure and addition of internal components of cyclone [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [48] 李振才, 刘雪东, 李欣疏, 等. 直切单双进口旋风分离器流场及颗粒分离特性的数值模拟[J]. *中国粉体技术*, 2016, 22(4): 13–18.
LI Zhencai, LIU Xuedong, LI Xinshu, et al. Numerical simulation of flow field and characteristics of particle separation of a straight single inlet and a double inlet cyclone separator[J]. *China Powder Science and Technology*, 2016, 22(4): 13–18.
- [49] ZHAO Q, HOU D X, CUI B Y, et al. Development of an integrated multichannel inlet for improved particle classification in hydrocyclones[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(12): 4546–4561.
- [50] 霍鑫东. 二次曲线渐扩升气管对旋风分离器流场和分级特性影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
HUO Xindong. Study on the influence of quadratic curve gradually expanding airpipe on flow field and classification characteristics of cyclone separator[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [51] SHEPHERD C B, LAPPLE C E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1939, 31(8): 972–984.
- [52] CASAL J, MARTÍNEZ BENET J M, VALENCIA LEONARDO E. Cálculoy diseño de ciclones[J]. *Ingeniería Química*, 1989(239): 115–124.
- [53] KARAGOZ I, AVCI A. Modelling of the pressure drop in tangential inlet cyclone separators[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(9): 857–865.
- [54] NAKHAEI M, LU B N, TIAN Y J, et al. CFD modeling of gas-solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures[J]. *Processes*, 2020, 8(2): 228.
- [55] ZHOU Y, ZHAO M F, MA C Y. Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2014, 228(5): 536–549.
- [56] 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(4): 20–24.
PENG Weiming. Numerical simulation and experimental research on the flow pattern in tangential inlet cyclone [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2001, 32(4): 20–24.
- [57] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 旋风分离器自然旋风长的影响因素[J]. *石油学报(石油加工)*, 2019, 35(3): 613–620.
GAO Zhuwei, WANG Juan, WANG Jiangyun, et al. Influence factors of the natural cyclone length in cyclone separators[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2019, 35(3): 613–620.
- [58] KAYA F, KARAGOZ I. Experimental and numerical investigation of pressure drop coefficient and static pressure difference in a tangential inlet cyclone separator [J]. *Chemical Papers*, 2012, 66(11): 1019–1025.
- [59] XIANG R B, LEE K W. Effects of exit tube diameter on the flow field in cyclones [J]. *Particulate Science and Technology*, 2008, 26(5): 467–481.
- [60] 赵学观, 徐丽明, 高连兴, 等. 基于 Fluent 的大豆脱粒机旋风分离器模拟与优化[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(增刊1): 80–87.
ZHAO Xueguan, XU Liming, GAO Lianxing, et al. Simulation of soybean thresher cyclone separating and cleaning system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(Suppl 1): 80–87.
- [61] 张文华, 李东来, 刘秀林, 等. 溢流管开缝对旋流器分离性能影响研究[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(6): 857–865.
ZHANG Wenhua, LI Donglai, LIU Xiulin, et al. Research on influence of overflow pipe slit on separation performance hydrocyclone [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(6): 857–865.
- [62] 王卫兵, 孙亚权, 冯静安, 等. 缝隙式排气管对旋风分离器的性能影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(11): 1201–1210.
WANG Weibing, SUN Yaquan, FENG Jing'an, et al. Effect of slot vortex finder on the performance of cyclone

- separator[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(11): 1201 - 1210.
- [63] KARAGOZ I, AVCI A, SURMEN A, et al. Design and performance evaluation of a new cyclone separator[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 59: 57 - 64.
- [64] 李凯, 陈登宇, 朱锡锋. 气体性质对旋风分离器性能影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 179 - 183; 195.
- LI Kai, CHEN Dengyu, ZHU Xifeng. Numerical simulation of the effect of gas property on the performance of cyclone separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 179 - 183; 195.
- [65] 钱玉宝, 郭旭涛, 邱腾煌. 旋风分离器气固流动特性数值模拟研究[J]. 轻金属, 2024(1): 18 - 24; 34.
- QIAN Yubao, GUO Xutao, QIU Tenghuang. Numerical simulation research on gas-solid flow characteristics of cyclone separator[J]. Light Metals, 2024(1): 18 - 24; 34.
- [66] NIU Z T, FU Z D, YANG Q, et al. Modeling and analysis of cyclone separation efficiency based on spacecraft heat pump system[J]. Microgravity Science and Technology, 2023, 35(1): 11.
- [67] ZHAO B T. Prediction of gas-particle separation efficiency for cyclones: A time-of-flight model[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 85: 171 - 177.
- [68] 李庆生, 张译峰. 基于响应曲面法的蜗壳式旋风分离器分离效率[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(1): 96 - 99.
- LI Qingsheng, ZHANG Yifeng. Separation efficiency of volute cyclone based on response surface method[J]. China Powder Science and Technology, 2015, 21(1): 96 - 99.
- [69] 李昌剑, 陈雪莉, 于广锁, 等. 基于响应曲面法径向入口旋风分离器的结构优化[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(1): 24 - 31.
- LI Changjian, CHEN Xueli, YU Guangsuo, et al. Structure optimization of cyclone separator with radial-inlet based on response surface methodology[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(1): 24 - 31.
- [70] PARK D, GO J S. Design of cyclone separator critical diameter model based on machine learning and CFD[J]. Processes, 2020, 8(11): 1521.
- [71] 刘金鹏, 赵兵涛, 钱魏锋, 等. 基于 BP 神经网络的旋风分离器分割粒径模化与预测[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 671 - 677.
- LIU Jinpeng, ZHAO Bingtao, QIAN Weifeng, et al. Modeling and prediction of particle cutoff size of cyclone separator based on BP neural network[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(2): 671 - 677.
- [72] 梁延玺, 孙宝福, 吴健懋. 入口位置对旋风分离器性能的影响[J]. 轻金属, 2023(5): 15 - 20.
- LIANG Yanxi, SUN Baofu, WU Jianmao. Effect of inlet position on the performance of the cyclone separator[J]. Light Metals, 2023(5): 15 - 20.
- [73] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 基于 Q 判据的不同排气管直径旋风分离器内部涡分析[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(6): 1172 - 1180.
- GAO Zhuwei, WANG Juan, WANG Jiangyun, et al. Vortex analysis for cyclone separators with different vortex finder diameters based on QCriterion[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2018, 34(6): 1172 - 1180.
- [74] 李杰, 马欣, 赖科, 等. 排气管内置壁面厚度对旋风分离器性能的影响[J]. 流体机械, 2018, 46(9): 24 - 30.
- LI Jie, MA Xin, LAI Ke, et al. Effect of built-in wall thickness of exhaust pipe on cyclone separator performance[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(9): 24 - 30.
- [75] 李文琦, 陈建义. 旋风分离器高温性能试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(3): 97 - 100; 105.
- LI Wenqi, CHEN Jianyi. Experimental research of cyclone performance at high temperature[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 97 - 100; 105.
- [76] LI Y, QIN G L, XIONG Z Y, et al. The effect of particle humidity on separation efficiency for an axial cyclone separator[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(4): 724 - 731.
- [77] HUANG Anni, ITO K, FUKASAWA T, et al. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 90: 61 - 67.