

基于流场特性数值模拟的袋式除尘器关键结构设计研究综述

张珈旗,董忠红* (长安大学,道路施工与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要: 流场特性是影响袋式除尘器净化效果、除尘效率和使用寿命的关键因素,是优化或评价设备设计合理性的依据.本文在袋式除尘器工作原理分析基础上,明确了目前袋式除尘器研发中需要解决的关键问题,阐述了袋式除尘器内部流场数值模拟方法、流场特征评价指标、以及流场分布的关键影响因素,并重点归纳总结了常见结构设计因素对袋式除尘器流场特性的基本影响规律.以期通过该综述,可以为改善袋式除尘器内部流场性能的用户提供可以参考的结构设计方法.

关键词: 袋式除尘器; 流场分析; 结构设计; 计算流体力学(CFD)

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)06-2530-11

Review on key structure design of bag filter based on numerical simulation of flow field characteristics. ZHANG Jia-qi, DONG Zhong-hong* (Key Laboratory of Road Construction and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China). *China Environmental Science*, 2022,42(6): 2530~2540

Abstract: Flow field characteristics are the key factors affecting the purification effect, dust removal efficiency and service life of bag filter, and are the basis for optimizing or evaluating the rationality of equipment design. Based on the analysis of the working principle of the bag filter, this paper clarifies the key problems to be solved in the current research and development of the bag filter, expounds the numerical simulation method of the internal flow field of the bag filter, the evaluation index of the flow field characteristics, and the key influencing factors of the flow field distribution, and emphatically summarizes the basic influence law of the common structural design factors on the flow field characteristics of the bag filter. It is hoped that this review can provide reference structural design methods for users to improve the internal flow field performance of bag filter.

Key words: bag filter; flow field analysis; structure design; computational fluid dynamics(CFD)

袋式除尘器具有除尘效率高^[1-3]、超细粉尘捕集效果佳^[4-5]、运行阻力相对较低^[6]、颗粒排放浓度低^[4]、能够适应不同机组风量范围^[7-8],在工业除尘领域得到广泛应用^[9].但是在工程应用中,袋式除尘器易发生灰斗二次扬尘^[10]、过滤元件寿命低^[3]和过滤效率衰减严重等行业共性问题^[2].而除尘箱体内部气流分布不均匀和工作阻力偏高是产生以上问题的主要原因^[5,7,11-15].鉴于此,对袋式除尘器内部流场进行分析研究,提出解决这些问题的结构设计方法,是十分必要的.目前研究袋式除尘器内部流场的主要方法有实验研究法、理论分析法和数值模拟法^[16-17].实验方法效率低、成本高,难以深入研究不同因素对流场特征影响规律及多因素耦合效应,理论分析法往往对袋式除尘器模型进行简化处理使结果有较大偏差.随着计算机性能的不断提高,基于 CFD 数值模拟方法越来越受到重视,能弥补实验研究方法和理论分析方法的不足^[3,18-19],在产品研发、优化设计和方案评比中得到广泛应用^[16].

袋式除尘器利用过滤元件将含尘气体中的粉尘

颗粒、污染物颗粒或液滴进行分离捕集^[11].因此,国内外学者往往从过滤元件和设备结构两大方面研究袋式除尘器内部流场特征及其影响规律.对结构设计因素的研究主要从过滤元件的结构及其空间布局、均流导流装置的结构及其空间布局和其他结构等方面进行讨论^[2,4,7,12,18,20-31].Croom^[32]1996 年就已经提出改进袋式除尘器进气口和导流板的结构是提高除尘效率有效途径,为研究除尘器效率提升提供了思路.之后,郑辉^[33]采用 CFD 数值模拟方法研究袋式除尘器内部流场特性,发现改进结构设计和空间布局可以有效改善气流分布均匀性.桑亮等^[34]对袋式除尘器气流分布进行模拟实验,以相对均方根值为评价指标,发现梯形和栅格导流板均可以提高除尘设备内部流场均匀性,且梯形导流板较栅格导流板更易于改善除尘器流场性能,建议进行结构优化设计时优先考虑.以上学者,分别采用模拟试验方法和数值模拟方法对除尘器流场进行研究而获

收稿日期: 2021-11-18

* 责任作者, 教授, dzhong@chd.edu.cn

得相似结论,一方面说明改进结构设计是改善除尘器流场均匀性,提高除尘效率的有效途径,另一方面也证明 CFD 数值模拟方法的科学性和可靠性。

为深入了解基于流场特性数值模拟方法的袋式除尘器关键结构设计影响的研究现状,本文对不同结构设计因素对袋式除尘器内部流场性能的基本影响规律研究进行归纳总结,聚焦袋式除尘器研究的主要领域和方法,探讨解决袋式除尘器热点问题的结构设计方法,并对未来的研究工作提出建议和展望。

1 袋式除尘器内部流场问题简述

袋式除尘器基本组成有灰斗、过滤元件和箱体,含尘气体由进风口进入,通过与过滤元件作用后获得清洁气体,由出风口排出,被分离的粉尘颗粒落入灰斗,其中过滤元件是除尘器核心构件,含尘气体通过过滤元件发生筛滤效应^[11,35]、碰撞效应^[8,12]、钩附效应^[8,36]、扩散效应^[12]、重力沉降^[17]和静电作用^[8,35]等复杂作用^[37]。

含尘气体与过滤元件之间的过滤作用效果越好,袋式除尘器的除尘效率越高,然而袋式除尘器内部易发生的灰斗二次扬尘^[10]和过滤元件寿命降低^[3]

问题会影响其作用效果^[2],使设备工作效率衰减严重,除尘箱体内部气流流速高、气流分布不均匀和工作阻力偏高是产生以上问题的主要原因^[5,7,11-15],可归纳于表 1。

表 1 袋式除尘器常见问题的产生原因		
Table 1 Causes of common problems in bag filter		
原因	结果	参考文献
气流分布均匀性差	气流冲刷局部过滤元件表面,破坏其结构,降低使用寿命	[9,18]
	气流产生局部漩涡场,使其运动紊乱,降低除尘效率	
	气流各处流速分布不均匀,使灰斗内易产生二次扬尘	
	气流紊乱产生湍流耗散,增加能量损失	
	气流流量分配不均,使过滤元件上粉饼层成形不均,压降不均	
工作运行阻力偏高	降低除尘效率和过滤元件寿命,增加经济成本和能源消耗	[38]
局部高速射流	加深工作阻力偏高和气流分布均匀性差的恶性影响	[39]

工程上评价袋式除尘器性能的指标不仅包括除尘效率,还有设备运行阻力和经济成本等指标在内,具体的见表 2。

表 2 袋式除尘器性能的工程评价指标
Table 2 Engineering evaluation index of bag filter performance

评价指标	指标简述	参考文献
除尘效率	总效率:分离的所有粉尘颗粒量与进入设备粉尘颗粒总量之比	[17,40]
	分级效率:分离的某一直径粉尘颗粒量与进入设备的该直径粉尘颗粒总量之比	
工作阻力	结构阻力、过滤元件滤料阻力与粉尘层阻力之和	[17]
经济成本	设备制造费用和运行维护费用	[41]

为提高袋式除尘器的除尘效率,降低其运行阻力和经济成本,就有必要改善前文提出的工作阻力偏高、气流均匀性差和流量风速大的缺点。

2 袋式除尘器内部流场数值模拟研究方法简述

2.1 基于 CFD 的数值模拟方法

计算流体力学(CFD)是利用大型计算机对研究对象进行数学建模,采用设定的数值分析方法来研究流体流动的各类力学问题,从而达到预测整个流场流动状态的目的^[16,42-45]。

利用数值模拟方法研究除尘器内部流场特性的,较早的有 Nielsen^[46]建立电除尘器的物理模型,模

拟气流分布板对气流组织的影响。Aroussi 等^[47]利用 CFD 数值模拟方法研究袋式除尘器中单个滤筒工作时粉尘颗粒的运动,并用实验研究的结果验证 CFD 数值模拟方法能有效地模拟粉尘颗粒的运动轨迹。Cagna 等^[48]运用 CFD 数值模拟方法研究 2D 条件下袋式除尘器的内部流场分布情况,并用工程中的实际参数验证其数值模拟结果的正确性。郑辉等^[49]指出使用实际工程尺寸建立模型是降低结果偏差的有效手段。党小庆等^[50]分别利用 CFD 数值模拟方法和实验研究方法对直通式袋式除尘器进行对比研究,所得的整个箱体的流量分配、每个滤袋单元处理风量、滤袋迎面气流速度大小和分布等数据

结果基本相吻合,进一步说明 CFD 数值模拟方法和软件运用于实际工程中的可行性.

2.2 袋式除尘器内部流场数值模拟模型

2.2.1 湍流模型 根据雷诺数可判断出,大部分实际工况中气流流动状态为湍流,而目前针对湍流流动的数值计算方法有直接数值计算(DNS)和非直接数值计算^[11].工程应用中更关注湍流所导致的平均流场变化规律,因此普遍采用非直接的数值计算方法^[7].RANS 方法是非直接计算方法中最常用的,分为 Reynolds 应力模型和涡黏性模型^[42].因为前者计算工作量较大,所以研究者更多采用涡黏性模型.

其中,两方程模型是目前最常用的涡黏性模型,建立了湍动能 k 与湍流耗散率 ϵ 之间的函数关系^[21],包括以下三种形式:

Standard $k-\epsilon$ 模型具有较好的稳定性、精确性和经济性,较为符合工程计算^[7],余欢^[7]和孙小云^[21]使用该模型进行了一定研究,但是该模型在强旋流和绕弯曲壁面流动中有一定的失真.RNG $k-\epsilon$ 模型是一种高雷诺数模型,是对第一种模型的修正^[21].Realizable $k-\epsilon$ 模型是对上述两种方程的补充,被有效用于不同类型流动模拟,如射流和混合流,能更精确地预测尾流扩散和平板射流等问题,任美姚^[11]使用该模型进行了研究.

目前为止,没有一种湍流模型适用于任何工况,在建立湍流模型时,需要根据研究问题的特征进行选择,并通过试验验证所建立模型的可靠性.

2.2.2 离散相模型 含尘气体中气体为连续相,灰尘颗粒物为离散相.故模拟除尘器过滤的颗粒物,需引入离散相模型(DPM).离散相模型对于稳态和非稳态流动,可以考虑离散相多种作用力,预

报连续相中由于湍流涡旋的作用对颗粒造成的影响.通过建立离散相模型,可以在后处理中获得颗粒物的轨迹,以辅助分析内部流场流动特征^[42].但是 DPM 忽略了颗粒与颗粒之间的相互作用力和体积分数对连续相的影响.因此当研究的含尘气流中颗粒物之间影响不容忽视时,不适合采用 DPM 模型^[21,42].

也有研究者为简化模拟模型,忽略离散相作用力而直接进行数值模拟的.余欢^[7]和任美姚^[11]只研究了气流均匀性而未考虑所含粉尘颗粒物及其特性对内部流场的影响,故未使用离散相模型.

2.2.3 多孔介质模型 对过滤元件的数值模拟需建立多孔介质区域和多孔跳跃模型.多孔跳跃模型(Porous Jump)是多孔介质区域的一维简化模型,具有良好的收敛性和鲁棒性,该模型将过滤元件简化为面区域而非体区域.任美姚^[11]采用了该模型进行滤袋简化处理,需要考虑的参数有过滤介质的渗透率、厚度和压降系数^[11].而余欢^[7]使用多孔介质区域模型以简化滤筒装置,需要设置过滤元件的粘性阻尼系数和惯性阻尼系数.

孙小云^[21]认为多孔跳跃介质只能反映出滤袋内外的压力跳跃,无法描述对气体通过滤料的速度和形态,因此在研究袋式除尘器整机性能时采用更贴合实际的多孔介质模型来模拟滤袋,而仅在研究单袋室的内部流场分布时采用多孔跳跃介质.

2.3 袋式除尘器数值模拟结果的评价指标

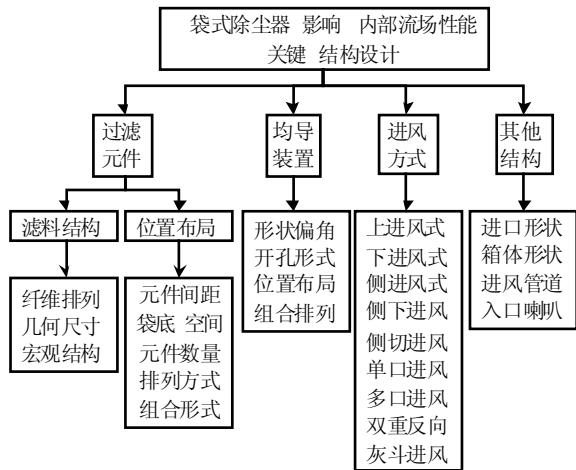
数值模拟不仅可以获得等值线图、矢量图和云图等结果,查看相关物理量分布,还可以获得各节点物理量数值解以进行其他相关计算处理^[18,51],评价指标如表 3.

表 3 气流均匀性的评价指标
Table 3 Evaluation index of airflow uniformity

评价指标	评价指标含义	备注	参考文献
速度相对均方根	测点气流速度与平均速度的差异	该值对速度场的均值较灵敏	[8, 16]
流量分配系数	各过滤元件处理流量与平均处理气体流量的比值	该值越接近 1,气流越均匀	[8, 10, 14]
最大流量不均幅值	单个过滤元件的最大流量分配系数与单个过滤元件的最小流量分配系数之差	该值越小,流量分配越均匀	[14]
综合流量不均幅值	所有过滤元件的流量分配系数与 1 之差的绝对值的平均值	较全面考虑各过滤元件的流量偏差	[3, 10, 14]
处理风量的相对均方根值	各过滤元件处理风量的相对大小	值越大表示气流分布越均匀	[52]
压降	整体运行压降(进出口压力值差)和各过滤元件运行压降(过滤元件的内外压力之差)	压降越小越好	[17, 44]

3 袋式除尘器结构设计对内部流场性能的影响

袋式除尘器流场性能的结构设计影响因素有过滤元件的结构及其位置布局、均流导流装置的结构及其布局和其他结构等内容,如图 1 所示。



3.1 过滤元件结构及其位置布局对袋式除尘器内部流场性能的影响

3.1.1 过滤元件结构 国内外研究者基于数值模拟的方法,对滤袋和滤筒两种过滤元件主要从微观和宏观尺度来研究本体结构对袋式除尘器内部流场特性的作用,以及对过滤效率的影响。

滤袋为柔性元件,对于其滤料结构研究主要集中在微观纤维排列方面,Qian 等^[53]使用基于 CFD-DEM 气体-固体流特性的数值模拟模型,过滤元件的单位面积过滤带数量不变前提下,即滤料纤维数量固定,纤维直径增大易形成枝晶结构,滤料介质孔隙率降低。粉尘颗粒沉积在纤维介质表面,在长时间工作下,颗粒物会导致枝晶坍塌,堵塞介质孔隙,导致压降增加。因此,在考虑颗粒沉积和枝晶坍塌时,过滤元件的运行压降随着纤维直径的增加而增加。值得说明的是,当研究条件变化时,即过滤元件单位面积的纤维数量随纤维直径的增大而减小时,纤维之间形成的孔隙尺寸增大,但单位面积孔隙率减小,并且比表面积减小,使颗粒不易与纤维接触而被吸附,虽然减小了运行压降,但是降低了过滤效率。

Wang 等^[54]在 CFD 数值模拟的基础上引入 Lattice Boltzmann-Cellular Automata(LB-CA)充满粒子流的概率模型进行研究,结果发现纤维交错排列模型的滤袋的过滤性能优于纤维并行排列模型的过滤元件.Li 等^[55]应用 CFD 对基于几种不同细度的梯度排列的滤料纤维进行研究,设计了几种不同排列方式,认为并联设计梯度排列相较于交错设计梯度排列,使设备具有较低的过滤效率和运行压降。迎尘面细密排列利于提高过滤效率,而背尘面稀疏排列有利于降低运行压降。总体而言,当改变滤袋纤维结构或者排列方式时,提高过滤元件的过滤效率会增加工作压降,因此在工程应用中不能一味地提高过滤效率,否则工作压降过高会增加能耗,长期工作更会破坏过滤元件至系统失效,反而降低了过滤效率。

滤筒为刚性元件,对于其结构研究主要集中在滤芯微观结构方面,吴利瑞等^[56]分析滤筒的直径、褶皱数、褶皱高和褶皱边夹角之间的关系,认为褶皱数、褶皱高和褶皱边夹角对滤筒的过滤性能影响较大,不能忽略。查文娟等^[57]在 CFD 的数值模拟的基础上结合响应面法分析褶皱高、褶皱间距和过滤风速对褶皱式滤芯阻力的影响,结果表明三者对其均有影响,获得显著性水平从大到小依次为过滤风速、褶皱间距和褶皱高。黄乃金等^[58]在 CFD 数值模拟的基础上引入随机多层纤维过滤介质算法进行研究,发现随滤筒的褶尖角增大,过滤元件压力损失先减小后增加;而过滤元件的过滤效率还与颗粒直径、袋式除尘器的过滤机理有关,归纳于表 4。

表 4 滤筒式过滤元件褶尖角变化对过滤效率的影响
Table 4 Effect of the change of the fold angle of the filter element on the filtration efficiency

颗粒直径	主导作用的过滤机理	过滤效率
<1μm	扩散效应	随褶尖角增大而减小
>1μm	惯性作用	随褶尖角增大而增大

在宏观关结构方面,过滤元件主要分为滤袋和滤筒,其结构差异^[7]如表 5 所示。唐胜卫^[59]总结,滤袋式过滤元件除尘效率高、可分离粉尘颗粒种类多和应用范围广,而滤筒式不仅除尘效率高、而且过滤元件运行压力损失较低、入口含尘气体的粉尘颗粒浓度范围广和结构紧凑易安装。

表 5 常规滤袋和滤筒的结构对比
Table 5 Structure comparison of conventional filter bag and filter tube

过滤元件	结构相同点	结构不同点	性能差异
滤袋	均由滤料、袋笼和支架组成	未对滤料进行折叠处理	滤袋的过滤面积明显要低于同结构尺寸的滤筒
滤筒		将滤料经过折叠成褶形,再用支架支撑	

丁瑞星等^[60]就滤筒式和横插扁袋式两种不同过滤元件的袋式除尘器进行对比研究.同样工况下前者的除尘效率高于后者,且过滤元件运行阻力较低,设备工作过程更稳定,但是滤筒式的经济成本相对较高.赵欢等^[61]获得圆形滤筒和锥形滤筒工作过程中的过滤元件的运行压力损失和流场速度变化,结果表明结构改变后的锥形滤筒工作时气流按表面积分配更加均匀,同时因为一端面直径变大,故使得气流流速降低,压力损失也降低.张亚蕊等^[62-63]研究常规圆形式和内部附有锥体结构的新型圆形式滤筒式过滤元件,结果表明新型式的气流分布更加均匀,过滤性能也有所提高,工作运行阻力有所降低,并且随着锥体高度和锥顶半径的增大,滤筒内部的压力分布逐渐变得均匀,压力损失也逐渐减小.

以上几种新结构,虽然改善了内部流场性能,但没有总效率或分级效率的模拟,建议建立离散相模型,添加结构优化后的除尘效率对比分析.

丁倩倩^[64]在 CFD 数值模拟的基础上引入简化的欧拉模型-代数滑移混合模型(Algebraic Slip Mixture Model,ASMM)进行研究发现,随着滤袋长度的增加,除尘器内部流场的均匀性提高,但是滤袋过长时易产生二次扬尘的影响.然而该研究在进行不同袋长模型分析时,并未严格做到控制变量法的要求,不仅袋长参数不同,箱体尺寸等参数也随之变化.余欢等^[65]就不同滤筒长度对滤筒除尘器内部流场的影响做了相关研究,发现长滤筒的除尘器在较高风速过滤下,阻力大且增长速度快.其原因在于,随着滤筒长度增加,底部空间减小,不利于风流的均布,而短滤筒下部的大空间更利于风流扩散均布.

过滤元件的底面直径和长度对气流流场的影响不是独立的,以上研究说明只研究长度参数而忽略底面直径参数的影响,在多种不同的工程应用中参考价值较小,故在之后研究中,应考虑两者对气流流场影响的耦合效应,通过模拟研究获得底面直径与长度参数优化匹配.

3.1.2 过滤元件的位置布局 对于过滤元件的位

置布局结构的研究一般有优化过滤元件间距、过滤元件与灰斗的间距(即袋底空间)、过滤元件的数量、过滤元件的排列方式等等内容.邓晓飞^[66]研究滤袋间距对除尘器内部气流的影响,结果表明小间距的过滤元件表面气流上升速率明显大于较大间距的,而流场流速过高会降低滤袋过滤性能和破坏过滤元件,因此采用的滤袋间距不宜过小.张樱^[67]研究滤袋布局问题中袋底空间除尘器内部流场的影响,结果表明适当降低滤袋至灰斗的距离可以使各过滤元件气流处理量均匀分配,并且能够提高远离进风口位置的过滤元件的过滤效率,然而过低的距离会产生二次扬尘的不良现象.唐奇等^[68]研究滤袋布局问题中最佳滤袋数量的问题.但是过滤元件的最佳数量问题是过滤元件间距、袋底空间、过滤元件的排列方式等等问题的综合,因此单独研究过滤元件数量而不讨论其主要结构参数的影响规律,缺少实际意义.

余欢^[7]鉴于前文已述的滤筒式和滤袋式两种过滤元件的优缺点,提出滤筒滤袋混合装配的改造思路以提高除尘效率和降低经济成本.在使用基于 CFD 的数值模拟办法进行研究分析,结果表明滤筒滤袋按比例混装时的流量分配系数低于全为滤筒式或全为滤袋式的,并且混装改造的确有利于降低阻力.余欢在提出滤筒滤袋混装改造的同时,还考虑到滤筒滤袋的位置布局对设备过滤性能的影响,结果表明:滤筒靠近出风口位置有利于流量更加均匀分配,同时滤筒滤袋间隔分布也有利于气流均布.对于该结论,虽然余欢的模拟研究和实验研究均证明了该结论的正确性,但是在实际应用工程中,滤筒和滤袋的元件参数相差较大,在同一箱体内所受作用不平衡,在长时间的工作过程中,会使柔性结构的滤袋元件提前发生损坏,而使整个系统失效.所以该结论能否应用到实际工程中还有待商榷,若将该结论应用到实际工程设计中,应当考虑到长期工况下的结果,而不能仅以短期内的数据结果为结论.

安蓉蓉等^[69]研究过滤元件常规正方形排列方

式和转角正方形排列方式,如图 2 所示,结果表明转角正方形排布的流量分配系数的波动幅度较小,因此气流分布均匀性较好.分析其原因是该方式可以使气流绕过滤元件后在背风侧的尾流冲刷过滤元件以防止积灰,提高过滤性能.

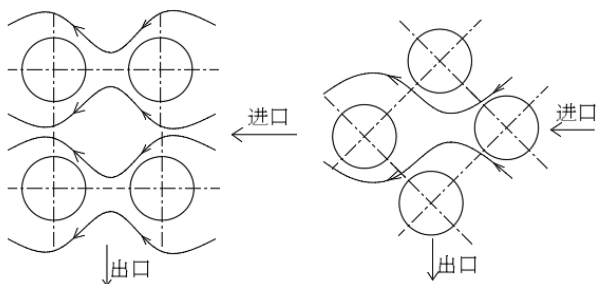


图 2 滤袋的常规正方形排列方式(左)和转角正方形排列方式(右)^[69]

Fig.2 The conventional square arrangement of the filter bag (left) and the corner square arrangement of the filter bag (right)

因为采用 CFD 数值模拟方法难以准确建立过滤元件微观的纤维结构模型,所以对其的研究常忽略或简化个别条件,使所得结果有误差.尽管如此,过滤元件结构的优化设计是改善设备流场特性的一个有明显作用的方法,是研究袋式除尘器关键结构设计对内部流场特性影响因素的一个重要领域.

3.2 箱体局部结构设计对袋式除尘器内部流场性能的影响

3.2.1 均流导流装置 导流装置是为改变气流方向,使之沿期望的方向流动.均流装置是为了改变气流流速.除尘器入口高速射流气流不仅使流场气流均匀性变差,影响除尘效率,而且冲刷过滤元件甚至破坏元件结构,降低滤袋或滤筒的使用寿命,使除尘系统过早失效,为了降低这些负面影响,在除尘器入口常常设置相应的均流导流装置.Schroorten 等^[70-71]在进风口位置添加装置来改善内部气流组织,得到良好的效果.汪家琮等^[72]研究在袋式除尘器的进风口增添双八字形导流板结构和挡板结构的设计以避免气流冲刷,实现更均匀的气流分布.李少华等^[73]设计几块逐渐下降的导流板,实现对射流的分流以改变气流方向和速度,使箱体内气流分布均匀,有效地减少气流对部分滤袋的冲刷,提高滤袋寿命.黄莺等^[74]研究经折流板进风、经气流分布板进风和经导流板下进风的袋式除尘器内部气流分布,建立三种设备的物理模型,如图 3 所示,借助 CFD 数值

模拟获得速度分布图和涡流速度分布图,结果表明后两者的气流均匀性比第一种方案好,且结构形式简单紧凑.

张相亮^[75]设计了 15° 夹角的斜向导流板结构,研究获得气流均布板的结构参数对进气均匀性的影响显著性水平从大到小依次为板长、偏角、板数、导流板上部至灰斗平面高度和均布板递增长度,该研究对结构设计有指导意义,为实际工程中除尘器均流导流装置的优化指明了方向.

Lima 等^[76]研究不同气流均布板偏角对袋式除尘器进风口高速射流影响的改善效果影响,获得其工况下最佳结构参数为 20° .虽然该文章在进风管道口中增加了挡板以改变气流方向并降低流速,使气流对袋底冲刷影响明显减弱,但是该结构是否会加深流场紊乱程度并未通过速度云图或流线图进行说明.

王宪^[77]提出增添垂向双导流板的结构,随着导流板距进风口底部高度的减小,综合流量不均系数先减小后增加.张彦婷等^[78]也研究袋式除尘器入口导流板排列角度对设备内部流场的影响,随着角度的调节,导流板角度从上到下增大,气流均匀性得到改善.郭志勇^[79]研究散射装置的大小对滤筒除尘器内部流场特性的影响:随着散射装置底面直径由小增大,综合流量不均系数先减小后增加.以上根据工况不同,存在一个最佳值使得袋式除尘器内部气流分布更加均匀.

孙小云^[21]对于分风装置进行研究,指出分风屏开孔率的大小对袋室运行阻力、袋室分风均匀性和滤袋表面速度没有显著影响,但是开孔率增加会提高袋间气流的上升速度.焦伟俊^[80-81]研究四种类型的袋式除尘器箱体分风屏结构(T 字型方孔分风屏、I 字型方孔分风屏、L 字型方孔分风屏、T 字型百叶窗分风屏)对内部流场的影响,该分风屏适用于大型集成袋式除尘器箱体内,将对内部流场特性的研究从单个小箱体提升到多个大箱体层面,为之后的研究提供了新思路.

值得注意均流导流装置降低气流速度和改变气流方向的同时,也会造成流体能量损失,因此,所设计结构的科学性往往需要根据其对设备压降阻力的影响进行模拟研究.不仅要按照上述研究获得气流均匀性系数,分析流场均匀性,还要进行压力场分

析,综合评价结构优化后的性能.

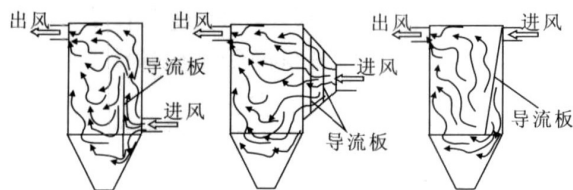


图3 经折流板进风(左)、经气流分布板进风(中)和经导流板下进风(右)示意图^[74]

Fig.3 Illustrations for inlets (left) through baffles, (middle) through airflow distributors and (right) through deflectors

3.2.2 进风方式 胡峰^[82]研究下进风式、侧进风式和上进风式三种传统进风方式的大型袋式除尘设备,并提出改进建议:对于下进风式的应该降低进口风速以使得袋式除尘器内部流场更加均匀;对于侧进风式的应该在气流入口处添加气流渐扩装置.陈红超^[83]对比在相同条件下传统侧进风方式和侧下进风方式对除尘设备的影响,结果表明侧下进风式的气流分布较为均匀,但是会在灰斗处产生涡流而产生二次扬尘现象.

谭志洪等^[84]对比在相同条件下灰斗进风方式和传统侧进风式袋式除尘器内部流场,综合得出侧进风式的气流分布较为均匀,而灰斗进风式袋式除尘器容易产生二次扬尘等问题.对于该文章提出的灰斗进风方式缺少科学研究价值,因为灰斗作为收集被过滤后的颗粒物的装置,若同时进行进风工作,必然会引起干涉,发生二次扬尘等问题.因此类似于此研究是为了模拟而模拟,缺少研究价值.

Pereira 等^[85]提出侧切向进风和双重反向进风方式,如图 4 所示,研究表明单下进风式和双重反向进风方式的袋式除尘器的内部流场较为均匀.最后作者又指出,袋式除尘器内部中心位置的过滤元件的质量流量受进风位置和方向结构变化的影响较小.Rocha 等^[86]研究进气口数对袋式除尘设备内部流场的影响,如图 5 所示,结果指出三重进风口相比于传统的单进风口可以使设备内部流场气流分布均匀,降低气流流速和设备的运行压力损失.总而言之,袋式除尘器进风方式的优化设计是改善设备内部流场特性的重要部分,除了研究传统的三种进风方式,还有将进风结构优化设计与新型进风方式联合研究,进行多因素耦合数值模拟,探索更优的改善方式.

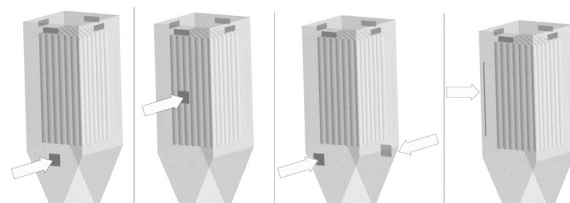


图4 单下进风式、侧进风式、双重反向进风式和侧切向进风式示意^[85]

Fig.4 Illustrations of single inlet, side inlet, double reverse inlet and side tangential inlet

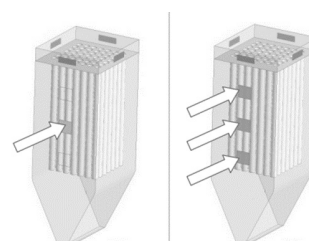


图5 传统的单进风口与三重进风口^[86]

Fig.5 Traditional single inlet and triple inlet

3.2.3 其他结构 除了改变袋式除尘器的进风方式和增添导流板的结构设计,改变进气口结构和箱体结构也是一种提高设备内部流场性能的方式.高广德等^[87]针对下进风式袋式除尘器的四棱台式进口和直管式进口的进口结构进行研究,发现同样条件下四棱台式进口结构的袋式除尘器内部射流现象明显减轻,气流分布较均匀,压力损失较小.郭志勇^[79]针对上进风式滤筒除尘器将方形箱体改变成圆形箱体,指出改成圆形结构可以提高滤筒的利用率,流量分配也较为均匀,解决了方形箱体空间利用率低和过滤元件气体处理量分配不均的问题.孙小云^[21]研究发现随着进风管道口的长与高的比值增大,袋式分风就越均匀,但是加宽进风管道会增大除尘设备的占地空间.吴维峰^[88]对侧进风式袋式除尘器增添入口喇叭口和双层气流均布板装置,研究双层气流均布板在喇叭口中的相对位置对设备内部气流分布的影响,结果表明:第二层均布板更靠近入口方向,会使入射气流最大速度降低;减小两个均布板间的间距,会使袋式除尘器内每个滤袋的气流分布更加均匀,也会使整体的滤袋磨损减小.总之,影响袋式除尘内部流场特性的关键结构设计并不局限于箱体内部,特殊情况下箱体外附件结构设计也是重要研究方向.

4 结语

综上,各类关键结构设计均能不同程度地改善

袋式除尘器内部流场特性,但是作用机理和改善对象等各有不同.在过滤元件结构方面,可通过改变物理参数和排列模型,以减小元件过滤阻力,从而改善流场特性.在均流导流装置方面,可通过优化结构、位置布局和组合模型,以降低射流速度,实现气流流量分配均匀,从而降低压降并改善流场.在进气结构方面,带渐扩装置的侧进风方式优于下进风方式,新型进风方式优于传统进风方式,多重进风口结构优于单进风口结构.在其他结构方面,也有诸如圆形箱体代替方形箱体的优化设计.

总而言之,各种结构设计是围绕着均匀气流分布、减小工作阻力和降低风速来改善流场特性,以提高除尘效率和降低成本,实现解决袋式除尘器卡脖子问题的目标.

基于目前流场特性分析的袋式除尘器关键结构设计相关研究,存在以下问题并提出研究建议:

一是过滤元件滤料微观结构的物理模型和材料的化学反应过程难以精确模拟,该问题是构建精准 CFD 模型的前提条件,尤其是对进行过滤元件附件的细观尺度流场分析,具有决定性影响.

二是均流导流装置结构设计类同化严重,与除尘器局部流场特征相关性不足.可引入熵产分析理论进行局部能量损失评估研究,以更好的分析均流导流装置的优化性能.

参考文献:

- [1] 姚 群,宋七棣,陈志炜.2020 年袋式除尘行业发展评述和展望 [J]. 中国环保产业, 2021,(3):19-22.
Yao Q, Song Q D, Chen Z W. Review and prospect of bag dust removal industry in 2020 [J]. Environmental Protection Industry in China, 2021,(3):19-22.
- [2] 毛 锐,刘根凡,邓 翔,等.布袋除尘器结构改进的数值模拟研究 [J]. 环境工程, 2015,33(3):77-81.
Mao R, Liu G F, Deng X, et al. Numerical simulation of structural improvement of bag filter [J]. Environmental Engineering, 2015,33(3): 77-81.
- [3] 潘 伶,杨燕珍.袋式除尘器内部流场的数值模拟 [J]. 环境工程学报, 2012,6(8):2750-2754.
Pan L, Yang Y Z. Numerical simulation of internal flow field of bag filter [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012,6(8):2750-2754.
- [4] 王玉红,姚 群,陈志炜.我国袋式除尘行业技术新进展 [J]. 工业安全与环保, 2020,46(6):65-70.
Wang Y H, Yao Q, Chen Z W. China's bag dust removal industry technology new progress [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2020,46(6):65-70.
- [5] 黄 进,林 翎,鄢建国.重点行业除尘器能效限定值及能效等级国家标准研究 [J]. 标准科学, 2017,(6):77-81.
Huang J, Lin L, Li J G. National standard research on energy efficiency limits and energy efficiency grades of precipitators in key industries [J]. Standard Science, 2017,(6):77-81.
- [6] 阮竞兰,张 双,张海红.基于 FLUENT 对袋式除尘器气流流场的数值模拟 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015,36(4):16-19.
Ruan J L, Zhang S, Zhang H H. Numerical simulation of airflow field of bag filter based on FLUENT [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015,36(4):16-19.
- [7] 余 欢.基于 CFD 数值模拟的袋式除尘器提效降阻技术研究 [D]. 泉州:华侨大学, 2018.
Yu H. Research on the technology of improving efficiency and reducing resistance of bag filter based on CFD numerical simulation [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.
- [8] 李为浩.直通式下进风袋式除尘器内流场研究及结构优化 [D]. 太原:太原理工大学, 2016.
LI W H. Research on flow field and structure optimization of straight-through down inlet bag filter [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [9] 任美桃,王 怡,杨宏刚,等.基于气流均匀分配的下进风袋式除尘器灰斗结构优化 [J]. 过程工程学报, 2017,17(6):1156-1162.
Ren M T, Wang Y, Yang H G, et al. Structure optimization of down-inlet bag filter dust hopper based on uniform airflow distribution [J]. Process Engineering Journal, 2017,17(6):1156-1162.
- [10] 董阳昊,梁 珍,沈恒根.上进风内滤式袋式除尘器的流场优化分析 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021,47(3):112-119.
Dong Y H, Liang Z, Shen H G. Optimization analysis of the flow field of the upper inlet air filter bag filter [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2021,47(3):112-119.
- [11] 任美桃.下进风袋式除尘器内部流场模拟与结构优化 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
Ren M T. Internal flow field simulation and structural optimization of down inlet bag filter [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [12] 李 贞,曹辰雨,任建兴,等.袋式除尘器的除尘特性分析 [J]. 上海电力学院学报, 2013,29(4):379-382.
Li Z, Cao C Y, Ren J X, et al. Analysis of dust removal characteristics of bag filter [J]. Journal of Shanghai Electric Power University, 2013, 29(4):379-382.
- [13] 张相亮,沈恒根,周 睿,等.袋式除尘器进气均布板结构参数对气流分布的影响分析 [J]. 环境工程, 2012,30(4):76-79.
Zhang X L, Shen H G, Zhou R, et al. Analysis of the influence of structural parameters of inlet uniform plate on airflow distribution in bag filter [J]. Environmental Engineering, 2012,30(4):76-79.
- [14] 付海明,赵友军.袋式除尘器流场动态测试及优化 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010,41(2):799-806.
Fu H M, Zhao Y J. Flow field dynamic test and optimization of bag filter [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010,41(2):799-806.
- [15] 李少华,宋 阳,王铁营,等.下进风袋式除尘器内部流场的数值模拟 [J]. 东北电力大学学报, 2015,35(1):12-17.

- Li S H, Song Y, Wang T Y, et al. Numerical simulation of internal flow field of down inlet bag filter [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2015,35(1):12-17.
- [16] 李萌萌.基于 CFD 对袋式除尘器流场的数值模拟分析 [D]. 武汉:武汉科技大学, 2010.
- Li M M. Numerical simulation analysis of flow field of bag filter based on CFD [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- [17] 柴旭昇.袋式除尘器气流均匀性及优化的数值模拟研究 [D]. 衡阳:南华大学, 2015.
- Chai X S. Numerical simulation on airflow uniformity and optimization of bag filter [D]. Hengyang: Nanhua University, 2015.
- [18] 王 磊,张 严,裴海龙,等.袋式除尘器内流场的数值模拟研究进展 [J]. 能源与环境, 2019,(4):16-17.
- Wang L, Zhang Y, Pei H L, et al. Research progress on numerical simulation of flow field in bag filter [J]. Energy and Environment, 2019,(4):16-17.
- [19] 何鸿展,宋翀芳,潘武轩,等.基于 CFD 的防风抑尘网非均匀孔隙率的优化研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(6):1697-1704.
- He H Z, Song C F, Pan W X, et al. Optimization of non-uniform porosity of windbreak and dust suppression network based on CFD [J]. China Environmental Science, 2016,36(6):1697-1704.
- [20] 栾一刚.轴流旋风分离器数值模拟与实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011.
- Luan Y G. Numerical simulation and experimental study on axial cyclone separator [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [21] 孙小云.袋式除尘器主要结构对分风性能影响的数值模拟研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2018.
- Sun X Y. Numerical simulation of the influence of the main structure of the bag filter on the wind separation performance [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [22] 杨 腾.计算流体力学软件在袋式除尘系统的应用 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2018,(4):6-8.
- Yang T. The application of computational fluid dynamics software in bag dust removal system [J]. Sulfide Design and Powder Engineering, 2018,(4):6-8.
- [23] 张国权.轴流式旋风除尘器 [J]. 东北工学院学报, 1978,(1):53-63.
- Zhang G Q. Axial-flow cyclone dust collector [J]. Journal of Northeast Institute of Technology, 1978,(1):53-63.
- [24] 乐文毅,段超龙,谢冬明.组合袋式除尘器的内部流场模拟 [J]. 环境工程, 2020,38(5):120-125.
- Le W Y, Duan C L, Xie D M. Internal flow field simulation of combined bag filter [J]. Environmental Engineering, 2020,38(5):120-125.
- [25] 闫 雪,刘兴成,沈恒根.含尘烟气净化用滤料性能测试与分析 [J]. 环境工程, 2018,36(8):92-97.
- Yan X, Liu X C, Shen H G. Performance test and analysis of filter media for dust-containing flue gas purification [J]. Environmental Engineering, 2018,36(8):92-97.
- [26] 王振华,沈恒根,薛婷婷.燃煤电厂用新型高分子复合滤料性能的测试 [J]. 产业用纺织品, 2013,31(9):13-15.
- Wang Z H, Shen H G, Xue T T. Performance test of new polymer composite filters for coal-fired power plants [J]. Industrial Textiles, 2013,31(9):13-15.
- [27] 刘美玲,姚宇平,王 勇.袋式除尘器滤料过滤性能研究 [J]. 电力科技与环保, 2012,28(2):23-25.
- Liu M L, Yao Y P, Wang Y. Research on filtration performance of bag filter [J]. Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(2):23-25.
- [28] 李慧芳,陈慰来,隋伟东,等.玄武岩纤维复合材料过滤性能的研究 [J]. 现代纺织技术, 2013,21(4):11-14.
- Li H F, Chen W L, Sui W D, et al. Study on filtration performance of basalt fiber composites [J]. Modern Textile Technology, 2013,21(4): 11-14.
- [29] 赵振兴.超细玻璃纤维针刺复合滤料的耐高温性能研究 [D]. 青岛:青岛大学, 2014.
- Zhao Z X. Study on the high temperature resistance of superfine glass fiber acupuncture composite filter material [D]. Qingdao: Qingdao University, 2014.
- [30] 田新娇,柳静献,毛 宁,等.基于海岛纤维的新型滤料实验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017,38(8):1163-1166.
- Tian X J, Liu J X, Mao N, et al. Experimental study of new filter materials based on island fibers [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2017,38(8):1163-1166.
- [31] 刘兴成,沈恒根.不同后整理工艺方法对袋式除尘器滤料过滤性能的影响 [J]. 环境工程学报, 2016,10(4):1913-1918.
- Liu X C, Shen H G. Effect of different finishing methods on filtration performance of bag filter [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016,10(4):1913-1918.
- [32] Croom M L. New developments in filter dust collection [J]. Chemical Engineering, 1996,103(2).
- [33] 郑 辉.火电厂袋式除尘设备的机理分析与总体方案设计 [D]. 北京:华北电力大学(北京), 2005.
- Zheng H. Mechanism analysis and overall scheme design of bag dust removal equipment in thermal power plants [D]. Beijing:North China University of Electric Power (Beijing), 2005.
- [34] 桑 亮,杨景玲,孙体昌.脉冲喷吹袋式除尘器气流分布模拟实验研究 [J]. 能源与环境, 2006,(2):27-30.
- Sang L, Yang J L, Sun T C. Simulation experiment on airflow distribution of pulse jet bag filter [J]. Energy and Environment, 2006, (2):27-30.
- [35] 要 璇,俞亚昕.袋式除尘技术与装备发展探究 [J]. 现代制造技术与装备, 2017,(6):135-136.
- Yao X, Yu Y X. Research on the development of bag dust removal technology and equipment [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017,(6):135-136.
- [36] 张 哲,李彩亭,李珊红.下进风内滤式袋式除尘器流场的模拟与优化 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(3):344-347.
- Zhang Z, Li C T, Li S H. Simulation and optimization of flow field of bag filter under inlet [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020,42(3):344-347.
- [37] 张殿印,王海涛.除尘设备与运行管理 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- Zhang D Y, Wang H T. Dust removal equipment and operation management [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [38] 王加东,范 兰.脉冲布袋除尘器的常见故障及其原因分析 [J]. 环境工程, 2013,31(S1):422-423.

- Wang J D, Fan L. Common faults of pulse bag filter and their causes [J]. *Environmental Engineering*, 2013,31(S1):422-423.
- [39] 李萌萌,幸福堂,陈增锋.基于 CFD 对袋式除尘器流场的分析 [J]. *工业安全与环保*, 2011,37(1):19-20.
- Li M M, Xing F T, Chen Z F. Analysis of flow field of bag filter based on CFD [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2011, 37(1):19-20.
- [40] 黄雅琴,李彩亭,李珊红,等.旋风-布袋复合除尘器优化和除尘效率的数值模拟 [J]. *环境工程学报*, 2020,14(8):2222-2231.
- Huang Y Q, Li C T, Li S H, et al. Numerical simulation of cyclone-bag composite dust collector optimization and dust removal efficiency [J]. *Environmental Engineering Journal*, 2020,14(8):2222-2231.
- [41] 王 宇,刘丽冰,张 磊,等.基于遗传算法的袋式除尘器脉冲喷吹清灰自适应模糊控制 [J]. *环境工程学报*, 2020,14(1):154-164.
- Wang Y, Liu L B, Zhang L, et al. Adaptive fuzzy control for pulse injection cleaning of bag filter based on genetic algorithm [J]. *Environmental Engineering Journal*, 2020,14(1):154-164.
- [42] 何 川.CFD 基础及应用 [M]. 1st.重庆:重庆大学出版社, 2015.
- He C. The basis and application of CFD [M]. 1st. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.
- [43] Computational fluid dynamics technologies and applications [M]. INTECH Open Access Publisher.
- [44] 王鲁平.直流式旋风除尘器的数值模拟与实验研究 [D]. 北京:清华大学, 2015.
- Wang L P. Numerical simulation and experimental study of DC cyclone dust collector [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [45] 刘伟冬.旋风滤筒复合除尘器的结构与内部流场数值模拟分析 [D]. 青岛:青岛科技大学, 2017.
- Liu W D. Structural design and numerical simulation analysis of internal flow field of composite cyclone filter [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017.
- [46] Nielsen N F, Lind L. Numerical modeling of gas distribution in electrostatic precipitation; presented at the 8th international conference on electrostatic precipitation [C]//Birmingham. U.S.A: Southern Company Services. Inc. Publication Services, 2001.
- [47] Aroussi A, Simmons K, Pickering S J. Particulate deposition on candle filters [J]. *Fuel*, 2001,80(3):335-343.
- [48] Cagna M, Boehle M. Application of CFD methods for the simulation of the flow through a filter in dependency of the operating time [J]. *Fluids Engineering Division*, 2002,257(1):1013-1017.
- [49] 郑 辉,芮晓明,常连生.袋式除尘设备气流分布的数值模拟 [J]. *现代电力*, 2005,(3):46-49.
- Zheng H, Rui X M, Chang L S. Numerical simulation of airflow distribution of bag filter equipment [J]. *Modern Power*, 2005,(3):46-49.
- [50] 党小庆,高蕊芳,马广大,等.直通式袋式除尘器气流分布数值分析 [J]. *环境工程*, 2007,(4):38-40.
- Dang X Q, Gao R F, Ma G D, et al. Numerical analysis of airflow distribution in straight through bag filter [J]. *Environmental Engineering*, 2007,(4):38-40.
- [51] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞.精通 CFD 工程仿真与案例实战 [M]. 2ed.北京:人民邮电出版社.
- Li P F, Xu M Y, Wang F F. Familiar with CFD engineering simulation and case practice [M]. 2nd. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press.
- [52] 王 建,沈恒根.袋式除尘器的模块化结构设计及模拟试验分析 [J]. *建筑热能通风空调*, 2020,39(7):78-81.
- Wang J, Shen H G. Modular structure design and simulation test analysis of bag filter [J]. *Building Thermal Energy Ventilation and Air Conditioning*, 2020,39(7):78-81.
- [53] Qian F, Huang N, Zhu X, et al. Numerical study of the gas-solid flow characteristic of fibrous media based on SEM using CFD-DEM [J]. *Powder Technology*, 2013,249:63-70.
- [54] Wang H, Zhao H, Wang K, et al. Simulation of filtration process for multi-fiber filter using the Lattice-Boltzmann two-phase flow model [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013,66:164-178.
- [55] Li W, Shen S, Li H. Study and optimization of the filtration performance of multi-fiber filter [J]. *Advanced Powder Technology*, 2016,27(2):638-645.
- [56] 吴利瑞,茅清希,梅红生,等.滤筒结构优化试验研究 [J]. *环境工程*, 2003,(3):39-41.
- Wu L R, Mao Q X, Mei H S, et al. Experimental study on structural optimization of filter tubes [J]. *Environmental Engineering*, 2003, (3):39-41.
- [57] 查文娟,钱付平,鲁进利,等.基于阻力的 V 型褶式滤芯结构参数的响应面法优化 [J]. *过程工程学报*, 2013,13(5):771-775.
- Zha W J, Qian F P, Lu J L, et al. Response surface method optimization of V-fold filter structure parameters based on resistance [J]. *Process Engineering Journal*, 2013,13(5):771-775.
- [58] 黄乃金,钱付平,查文娟,等.基于微观结构的褶式滤芯拟态化模型及其过滤性能的数值模拟 [J]. *过程工程学报*, 2014,14(3):402-408.
- Huang N J, Qian F P, Zha W J, et al. Numerical simulation of folding filter pseudomorphic model based on microstructure and its filtration performance [J]. *Process Engineering*, 2014,14(3):402-408.
- [59] 唐胜卫.滤筒除尘器与袋式除尘器性能的比较分析 [J]. *过滤与分离*, 2016,26(3):46-50.
- Tang S W. Comparative analysis of performance of filter cartridge and bag filter [J]. *Filtration and Separation*, 2016,26(3):46-50.
- [60] 丁瑞星,王修川.滤筒式与横插扁袋式除尘器的技术经济比较 [J]. *洛阳工学院学报*, 2000,(2):84-87.
- Ding R X, Wang X C. Techno-economic comparison of filter cartridge and transversely inserted flat bag filter [J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology*, 2000,(2):84-87.
- [61] 赵 欢,林忠平,廖明月.滤筒阻力分析及优化 [J]. *洁净与空调技术*, 2015,(1):1-6.
- Zhao H, Lin Z P, Liao M Y. Analysis and optimization of filter resistance [J]. *Cleaning and Air Conditioning Technology*, 2015,(1):1-6.
- [62] 张亚蕊.新型滤筒除尘器性能的全尺度数值模拟研究 [D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2016.
- Zhang Y R. Full-scale numerical simulation of the performance of a new type of filter dust collector [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2016.
- [63] 张亚蕊,韩云龙,钱付平,等.新型滤筒除尘器性能的数值模拟 [J]. *过程工程学报*, 2016,16(1):48-54.
- Zhang Y R, Han Y L, Qian F P, et al. Numerical simulation of the performance of the new filter cartridge precipitator [J]. *Process Engineering Journal*, 2016,16(1):48-54.

- [64] 丁倩倩.不同袋长脉冲袋式除尘器流场的数值模拟及优化研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2016.
Ding Q Q. Numerical simulation and optimization of flow field of pulse bag filter with different bag length [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [65] 余 欢,于瑞莲,蔡伟龙,等.滤筒长度对滤筒除尘器内流场的影响数值模拟研究 [J]. 广东化工, 2017,44(11):1-3.
Yu H, Yu R L, Cai W L, et al. Numerical simulation study on the influence of filter tube length on the flow field in the filter tube precipitator [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017,44(11):1-3.
- [66] 邓晓飞.循环流化床锅炉电袋组合式除尘器的设计计算 [D]. 南京: 东华大学, 2009.
Deng X F. Design and calculation of electric bag combined dust collector for circulating fluidized bed boiler [D]. Nanjing: Donghua University, 2009.
- [67] 张 樱.袋式除尘器数值模拟研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2013.
Zhang Y. Numerical simulation of bag filter [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [68] 唐 奇,李珊红,李彩亭,等.滤袋数目对翼形上进风袋式除尘器内流场影响的数值模拟研究 [J]. 环境工程学报, 2014,8(8):3349-3354.
Tang Q, Li S H, Li C T, et al. Numerical simulation of the influence of the number of filter bags on the flow field in the wing inlet bag filter [J]. Environmental Engineering Journal, 2014,8(8):3349-3354.
- [69] 安蓉蓉,刘雪东,刘文明,等.金属纤维袋式除尘器内部气流场均匀性分析 [J]. 中国粉体技术, 2020,26(3):22-30.
An R R, Liu X D, Liu W M, et al. Analysis of airflow field uniformity in metal fiber bag filter [J]. China Powder Technology, 2020,26(3):22-30.
- [70] Ji Z, Li H, Wu X, et al. Numerical simulation of gas/solid two-phase flow in ceramic filter vessel [J]. Powder technology, 2008,180(1/2): 91-96.
- [71] Schrooten T, Esser R, Knop K, et al. Optimising plant components using flow simulations [J]. Zkg international, 2009,62(3):6-7.
- [72] 汪家琼,刘根凡,邓 翔.FLUENT 软件在布袋除尘器挡板和导流板设计中的应用 [J]. 石油化工设备, 2008,(5):71-73.
Wang J Q, Liu G F, Deng X. The application of FLUENT software in the design of baffle and guide plate of bag filter [J]. Petrochemical Equipment, 2008,(5):71-73.
- [73] 李少华,王坤玉,格日勒,等.袋式除尘器气流分布均匀性的数值模拟 [J]. 电站系统工程, 2009,25(2):17-18.
Li S H, Wang K Y, Ge R L, et al. Numerical simulation of airflow distribution uniformity of bag filter [J]. Power Plant System Engineering, 2009,25(2):17-18.
- [74] 黄 莺,杨 彦.袋式除尘器进风结构型式对气流分布影响数值模拟分析 [J]. 现代矿业, 2009,25(6):56-58.
Huang Y, Yang Y. Numerical simulation analysis of the influence of inlet structure type of bag filter on airflow distribution [J]. Modern Mining, 2009,25(6):56-58.
- [75] 张相亮.灰斗进风袋式除尘器气流均匀性的模拟实验研究及应用 [D]. 南京:东华大学, 2012.
Zhang X L. The simulation experiment research and application of air flow uniformity of hopper inlet bag filter [D]. Nanjing: Donghua University, 2012.
- [76] Lima W F, Huebner R. Optimization of air distribution in a baghouse filter using computational fluid dynamics [J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2019,9(4).
- [77] 王 宪.滤筒除尘器流场分析 [D]. 西安:长安大学, 2017.
Wang X. Flow field analysis of filter cartridge precipitator [D]. Xi'an: Chang 'an University, 2017.
- [78] 张彦婷,张丽丽.布袋除尘器内部导流装置设计优化研究 [J]. 节能与环保, 2018,(10):62-63.
Zhang Y T, Zhang L L. Research on optimization design of internal diversion device of bag filter [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2018,(10):62-63.
- [79] 郭志勇.上进风式滤筒除尘器流场特性研究 [D]. 西安:长安大学, 2018.
Guo Z Y. Study on Flow Field Characteristics of Upward Inlet Filter Dust Collector [D]. Xi'an: Chang 'an University, 2018.
- [80] 焦伟俊,谭志洪,熊桂龙,等.侧进风袋式除尘器分风屏组合优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2020,(2):113-116.
Jiao W J, Tan Z H, Xiong G L, et al. Optimization design of air separator combination for side inlet bag filter [J]. Mechanical Design and Manufacture, 2020,(2):113-116.
- [81] 焦伟俊.侧进风袋式除尘器的数值模拟与优化 [D]. 南昌:南昌大学, 2019.
Jiao W J. Numerical simulation and optimization of side inlet bag filter [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [82] 胡 峰.进风方式对袋式除尘器内气流组织的影响 [D]. 南京:东华大学, 2007.
Hu F. Effect of air inlet mode on airflow organization in bag filter [D]. Nanjing: Donghua University, 2007.
- [83] 陈红超.袋式除尘器除尘空间气流组织和浓度场的研究 [D]. 南京: 东华大学, 2011.
Chen H C. Study on airflow organization and concentration field in dust removal space of bag filter [D]. Nanjing: Donghua University, 2011.
- [84] 谭志洪,叶 青,刘丽冰,等.进风方式对袋式除尘器流场影响的数值模拟与分析 [J]. 水泥, 2012,(2):24-28.
Tan Z H, Ye Q, Liu L B et al. Numerical simulation and analysis of the influence of air inlet mode on the flow field of bag filter [J]. Cement, 2012,(2):24-28.
- [85] Pereira T W C, Marques F B, Pereira F D A R, et al. The influence of the fabric filter layout of in a flow mass filtrate [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,111:117-124.
- [86] Rocha S M S, Marques F B, Pereira F R, et al. Applications of CFD techniques in the design of fabric filters [J]. Chemical Engineering Transactions, 2014,39:1369-1374.
- [87] 高广德,张彦婷.下进气式袋式除尘器内部流场的模拟 [J]. 环境工程, 2008,(5):58-59.
Gao G D, Zhang Y T. Simulation of internal flow field of lower intake bag filter [J]. Environmental Engineering, 2008,(5):58-59.
- [88] 吴维峰.袋式除尘器内部流场数值模拟分析研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
Wu W F. Numerical simulation analysis of internal flow field of bag filter [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2019.

作者简介: 张珈旗(1998-),男, 陕西汉中,长安大学硕士研究生,研究方向为气体流场仿真分析。