

中文引用格式:杨宏刚,李奥,曹莹雪,等.非均匀渗透率对滤袋表面过滤风速分布的影响研究[J].中国安全科学学报,2025,35(7):91-97.

英文引用格式:YANG Honggang, LI Ao, CAO Yingxue, et al. Study on influence of non-uniform permeability on filtration velocity distribution of filter bag surface [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 91-97.

非均匀渗透率对滤袋表面过滤风速分布的影响研究^{*}

杨宏刚^{1,2,3}副教授,李奥^{2,3},曹莹雪^{1,2,3}副教授,孟晓静^{1,2,3}教授,王金宵^{2,3}

(1 绿色建筑全国重点实验室/西安建筑科技大学,陕西 西安 710055;2 西安建筑科技大学 资源工程学院,陕西 西安 710055;3 西安市工业职业危害评价与防治技术重点实验室,陕西 西安 710055)

中图分类号:X964

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1188

基金项目:绿色建筑全国重点实验室自主研究课题基金资助(LSZZ-Y202418)。

【摘要】为解决袋式除尘器滤袋表面过滤风速分布不均匀的问题,提出一种新的非均匀渗透率滤袋设计方法,利用 Fluent 软件 and 用户自定义函数(UDF),模拟在设计过滤风速(1.0 m/min)条件下,非均匀渗透率对滤袋表面过滤风速分布的影响。结果表明:均匀渗透率滤袋的过滤风速沿滤袋轴向自底部向上逐渐增加,且过滤风速分布均匀性随滤袋长度的增加而降低;通过优化长度为 5、7、10 m 等 3 种不同滤袋的渗透率,滤袋表面过滤风速的最大值分别从 1.60、2.32 和 3.34 m/min 降至 1.30、1.31 和 1.38 m/min,并显著提升了滤袋表面过滤风速分布的均匀性指数,且指数分别从 0.736、0.459、0.210 提升至 0.854、0.868、0.892。

【关键词】 袋式除尘器; 滤袋表面; 过滤风速; 非均匀渗透率; 均匀性指数

Study on influence of non-uniform permeability on filtration velocity distribution of filter bag surface

YANG Honggang^{1,2,3}, LI Ao^{2,3}, CAO Yingxue^{1,2,3}, MENG Xiaojing^{1,2,3}, WANG Jinxiao^{2,3}

(1 State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 3 Xi'an Key Laboratory of Occupational Hazard Assessment and Prevention Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to address the issue of uneven filtration velocity distribution on the filter bag surface in a baghouse dust collector, a new design method for filter bags with non-uniform permeability was proposed. Using Fluent software and User-Defined Function (UDF), the impact of non-uniform permeability on the filtration velocity distribution across the bag surface was simulated under the design filtration velocity condition (1.0 m/min). The results indicate that the filtration velocity of uniformly permeable filter bags gradually increases along the axis of the bag from bottom to top, and the uniformity of filtration velocity distribution decreases with the increase in bag length. By optimizing the permeability of

filter bags with different lengths of 5, 7 and 10 m, the maximum filtration velocity on the surface of filter bags is reduced from 1.60, 2.32 and 3.34 m/min to 1.30, 1.31 and 1.38 m/min, respectively. Moreover, the uniformity index of filtration velocity distribution on the surface of the filter bag is significantly improved, from 0.736, 0.459, 0.210 to 0.854, 0.868, 0.892, respectively.

Keywords: baghouse dust collector; filter bag surface; filtration velocity; non-uniform permeability; uniformity index

0 引言

随着国家对工业粉尘和烟尘治理标准的持续提高,袋式除尘技术得到了快速发展和广泛应用^[1-2]。袋式除尘器以其过滤效率高、适用范围广和维护便捷等优势,已成为各行业工业粉尘和烟尘控制的主流设备^[3-4]。尽管如此,气流分布不均、颗粒物冲刷^[5]和喷吹气流偏斜^[6]等问题仍然普遍存在,不仅造成袋式除尘器滤袋局部的过早磨损,也影响了袋式除尘器的整体性能。

已有研究证实,滤袋表面过滤风速不均匀分布是导致滤袋局部磨损的关键因素^[7-9]。其中,张景霞等^[7]研究发现,袋式除尘器内的气流倾向于沿滤袋外壁迅速“爬升”,导致袋间静压场和过滤风速沿滤袋高度方向递增;PARK 等^[8]研究表明:滤袋长度的增加会加剧过滤风速分布不均匀的程度,尤其是长度大于 10 m 的滤袋,上部 30% 的区域承担了超过 70% 的风量负荷;颜翠平等^[9]指出,滤袋表面不均匀的过滤风速分布会加速滤袋的局部磨损。

已有研究主要针对袋式除尘器内添加气流分布装置、改变滤袋几何结构等优化方式来提升滤袋表面过滤风速分布的均匀性,例如:董昊阳等^[10]通过改变进、排气口位置和添加导流板的方式等,改善滤袋表面过滤风速的均匀性;THERON 等^[11]结合数值模拟和试验方法,探究了褶皱滤袋几何参数对除尘器压降和流场的影响,发现小褶高、大褶宽的褶皱滤袋表面过滤风速分布更均匀;何杰等^[12]通过增加滤袋的上半部褶数,提升了滤袋表面过滤风速分布的均匀性;杨宏刚等^[13]也通过均匀地加密滤袋上部 30% 区域的孔隙率,有效提升了过滤风速分布的均匀性。

上述这些优化手段虽然在一定程度上改善了滤袋表面过滤风速的分布,但在滤袋表面过滤风速分布均匀性方面的提升效果并不显著,因此,笔者拟提出一种新的非均匀渗透率滤袋设计方法,即通过调整整条滤袋的非均匀渗透率,进一步提升滤袋表面过滤风速分布的均匀性,从而延长滤袋的使用寿命,并提高整体除尘效果。

1 滤袋非均匀渗透率设计方法

1.1 袋式除尘器模型构建

以 PARK 等^[8]所研究的针刺式聚酯单滤袋模型为原型,着重研究单个滤袋除尘器表面的过滤风速的分布特征。

袋式除尘器的结构如图 1 所示,为消除水平方向气流对滤袋表面过滤风速分布产生的影响,需要简化袋式除尘器模型。该模型由上箱体及中箱体 2 部分组成,进风口位于中箱体下平面,气流从进风口进入滤室,经滤袋过滤后进入上箱体,净化后的气体经出风口排出。模型的尺寸在 xyz 方向分别表示为:上箱体 560 mm×560 mm×5 000 mm;中箱体 560 mm×560 mm×(5 000 mm+滤袋长度);滤袋长度分别为 5 000、7 000 和 10 000 mm,直径为 160 mm,厚度为 2.2 mm,仅布置 1 条,滤袋位于 xy 平面正中心位置,滤袋底部距离进风口 5 000 mm。

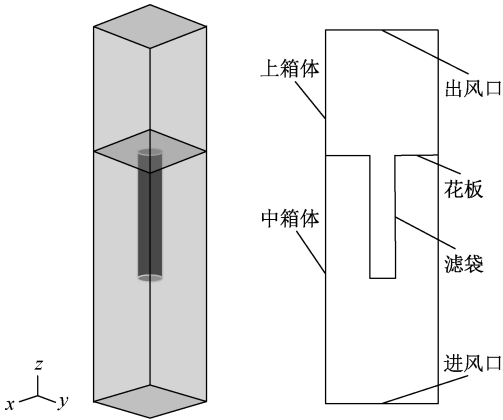


图 1 袋式除尘器结构

Fig. 1 Structure diagram of bag dust collector

1.2 边界条件

长度为 5、7 和 10 m 的 3 种不同滤袋的设计过滤风速均为 1 m/min,除尘器的处理风量分别约为 147、206 和 294 m³/h,进口边界条件选择速度入口,依据进风口尺寸,进风口风速分别约为 0.13、0.18 和 0.26 m/s;出口边界条件选择压力出口,出口压

力为 1 个标准大气压,对应环境大气压力。滤袋设置为多孔区域,滤袋厚度为 2.2 mm,花板、箱体以及滤袋底部均设置为固体壁面,所有壁面采用无滑移条件,壁面函数使用可缩放壁面函数。压力-速度耦合采用压力关联方程的半隐式方法(Semi-implicit Method for Pressure-linked Equations,SIMPLE)算法,使用压力交错选项处理压力梯度项,动量项、湍流动能项和湍流耗散率项均为二阶迎风格式。

1.3 控制方程与模型有效性验证

假定流场条件为不可压缩、稳态、等温和湍流等,模拟选择 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型求解。其湍动能及耗散率运输方程为^[14]:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu_s \varepsilon}} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; k 为湍动能,m²/s²; u 为流体速度,m/s; x 为空间坐标,m; 下标 i,j 为空间直角坐标系下的方向; μ 为分子动力黏度,Pa · s; μ_t 为

表 1 压降试验值和模拟值对比

Table 1 Comparison of experimental and calculated pressure drop values								
工况	3 m(Case1)		10 m(Case3)		12 m(Case5)		15 m(Case7)	
来源	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文
试验值/Pa	24.0	—	90.0	—	140.0	—	150.0	—
模拟值/Pa	22.3	22.9	83.7	94.6	147.5	138.1	162.0	164.7
相对误差/%	7.08	4.58	7.00	5.11	5.36	1.36	8.00	9.80

1.4 过滤风速的分布均匀性指标

由于相对均方根值对速度场的不均匀值反应比较灵敏,故文中采用速度相对均方根值作为评价滤袋表面过滤风速分布均匀性的指标^[15],计算公式为:

$$\varphi = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{v_i - v_a}{v_a} \right)^2} \quad (3)$$

式中: φ 为速度相对均方根值,表示各测点的气流速度和平均速度的离散程度,取[0,1], φ 值越大表示气流分布均匀性越好, φ 值为 1 时表明气流为完全均匀的理想状态; v_i 为监测面的过滤风速,m/s; v_a 为监测面的平均过滤风速,m/s; n 为监测面数量。

为量化滤袋表面过滤风速分布的均匀性,沿滤袋轴向方向选取 20 个监测面,监测面的位置分别在

湍流运动黏度,m²/s; σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能的湍流普朗特数与耗散率的湍流普朗特数; G_k 为由层流速度梯度而产生的湍动能,kg/(m · s³); ε 为湍动能耗散率,m²/s³; C_1 、 C_2 为经验常数; S_ε 为用户定义的耗散率源项,m²/s³; μ_s 为分子运动黏度,m²/s; 在 Fluent 中,作为默认值常数, $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.9$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

为确保数值模拟结果的准确性,文中通过对比数值模拟与试验结果中的压降数据,验证了模型的有效性。针对长度为 10 m 的滤袋进行了网格划分,参考 PARK 等^[8] 的 Case 3 工况网格量,最终采用 617 万网格进行计算。同时,文中还对 PARK 等^[8] 研究的长度为 3 m(Case 1)、12 m(Case 5)和 15 m(Case 7)滤袋进行了相同方式的网格划分。在滤袋所在的中箱体区域内,网格数量随滤袋长度的增大而增多,而其他区域内的网格数量则保持不变。PARK 等^[8] 研究的 Case 1、Case 3、Case 5 和 Case 7 工况下的试验与模拟压降数据的对比见表 1,由表 1 可知:数值模拟与试验数据吻合良好。因此,文中在进行长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋数值模型的研究时,采用相同的网格划分方法和参数设置,确保了数值模型的有效性。

表 1 压降试验值和模拟值对比

工况	3 m(Case1)		10 m(Case3)		12 m(Case5)		15 m(Case7)	
来源	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文	PARK 等 ^[8]	本文
试验值/Pa	24.0	—	90.0	—	140.0	—	150.0	—
模拟值/Pa	22.3	22.9	83.7	94.6	147.5	138.1	162.0	164.7
相对误差/%	7.08	4.58	7.00	5.11	5.36	1.36	8.00	9.80

长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋自身高度的 2.5%,7.5%,12.5%,… ,92.5%,97.5% 处,在每个监测面的 4 个方向取 4 个监测点,以这 4 个点上垂直于滤袋方向上的速度平均值作为监测面的过滤风速,共 20 个监测面过滤风速,来计算滤袋表面过滤风速的均匀性指数。监测面与监测点选取如图 2 所示,图 2 中 h 为滤袋高度,m; L 为滤袋长度,m。

1.5 非均匀渗透率关系式

PARK 等^[8] 的研究表明:均匀渗透率滤袋的表面过滤风速沿滤袋高度方向递增,文中拟通过非均匀调整滤袋的渗透率,使得滤袋表面的气流重新分布,以下为滤袋非均匀渗透率关系式的开发过程。

袋式除尘器的滤袋可以被视为一种多孔介质材料,采用多孔介质模型模拟滤袋的过滤情况,滤袋渗透率的计算过程应满足 Darcy 公式^[16]:

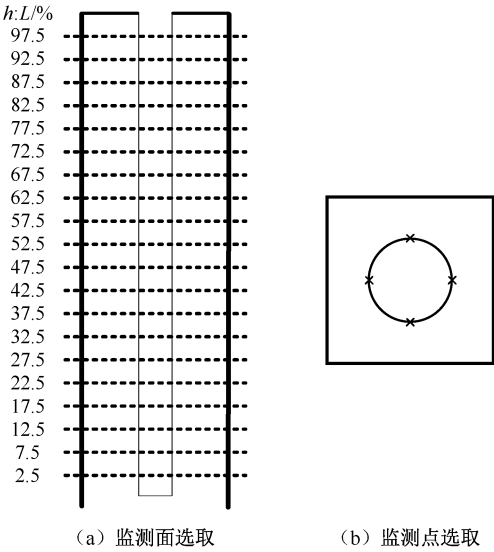


图2 监测面与监测点选取

Fig.2 Schematic diagram of monitoring surface and monitoring point selection

$$\Delta p = \left(\frac{\mu}{\alpha} v_n + C_2 \frac{1}{2} \rho v_n^2 \right) \Delta m \quad (4)$$

式中： μ 取 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ； α 为过滤介质的渗透系数，取 $4.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ； C_2 为压力跳跃系数，取值为 $0^{[5]}$ ； v_n 为垂直于过滤介质表面的速度， m/s ； Δm 为过滤介质的厚度，取 0.002 m 。

为深入解析滤袋内外压差沿高度方向的分布特征，文中通过拟合不同高度处滤袋内外压差的变化曲线， Δp_1 、 Δp_2 、 Δp_3 分别是长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋的压差曲线关系式。

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= 0.825 \, 1 h^2 - 1.650 \, 2 h + 12.101 \, 1 \quad (5) \\ \Delta p_2 &= 0.916 \, 7 h^2 - 3.025 \, 3 h + 10.084 \, 2 \quad (6) \\ \Delta p_3 &= 0.091 \, 7 h^3 - 1.008 \, 4 h^2 + 4.033 \, 7 h - 10.084 \quad (7) \end{aligned}$$

文中设计的过滤风速 $v_0 = 1.0 \text{ m/min}$ (0.017 m/s)，将其作为优化目标，因此，上述关系式在求解中应满足的约束条件为：

$$v_n = v_0 = 1.0 \text{ m/min} \quad (8)$$

联立式(4)、式(8)以及压差曲线关系式可以得出长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋非均匀渗透率满足的关系式为：

$$\alpha_1 = \frac{6.563 \, 33 \times 10^{-10}}{0.825 \, 1 h^2 - 1.650 \, 2 h + 12.101 \, 1} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{6.563 \, 33 \times 10^{-10}}{0.916 \, 7 h^2 - 3.025 \, 3 h + 10.084 \, 2} \quad (10)$$

$$\alpha_3 = \frac{6.563 \, 33 \times 10^{-10}}{0.091 \, 7 h^3 - 1.008 \, 4 h^2 + 4.033 \, 7 h - 10.084 \, 2} \quad (11)$$

利用 Fluent 软件中的 DEFINE_PROFILE 宏，将式(9)一式(11)编写为用户自定义函数 (User-Defined Function, UDF)。通过在 Fluent 软件中的用户自定义窗口加载并编译该 UDF，从而实现滤袋非均匀渗透率的精确调整^[17]。

1.6 模拟工况设计

为揭示滤袋长度以及非均匀渗透率设计方法对滤袋表面过滤风速分布的影响，选取长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋进行研究，具体的工况设计见表 2。

表2 模拟工况设计

Table 2 Design of simulated working conditions

工况序号	L/m	$v_0/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	过滤面积/ m^2	过滤风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	α/m^2
1	5	1	2.45	0.040 8	0.13	4.30×10^{-11}
2	5	1	2.45	0.040 8	0.13	式(9)
3	7	1	3.43	0.057 2	0.18	4.30×10^{-11}
4	7	1	3.43	0.057 2	0.18	式(10)
5	10	1	4.90	0.081 6	0.26	4.30×10^{-11}
6	10	1	4.90	0.081 6	0.26	式(11)

2 非均匀渗透率对过滤风速分布的影响

2.1 滤袋长度对过滤风速分布的影响

1) 滤袋表面过滤风速分布。为探究不同长度滤袋表面的过滤风速分布情况，运用 Fluent 软件，对

图 1 中袋式除尘器内部流场进行模拟，运用 Tecplot 软件后处理模拟结果，得到了 $x = 0.28 \text{ m}$ 处 yz 平面上滤袋表面过滤风速的分布云图，如图 3 所示，过滤风速取自垂直于滤袋表面 Y 方向的速度。由图 3 可以看出，3 种长度滤袋表面的过滤风速均沿轴向呈不均匀分布状态，且袋式除尘器底部的过滤风速很小，顶部的过滤风速很大。

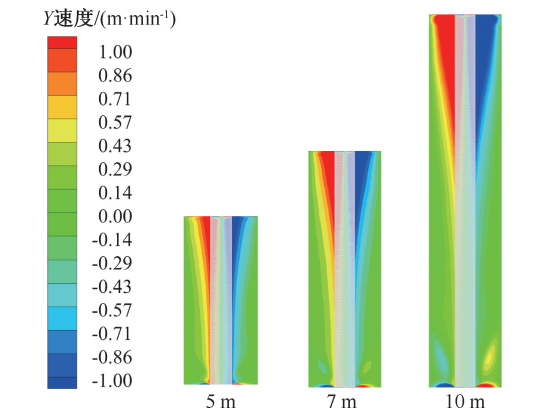


图 3 不同长度滤袋表面过滤风速分布云图

Fig.3 Nephogram of filtration velocity distribution on the surface of different length filter bags

对同一袋式除尘器而言,长度影响其表面过滤风速的分布,随着滤袋长度的增加,滤袋表面过滤风速沿轴向分布的不均匀性显著加剧。进气流量大部分聚集在袋式除尘器顶端,导致滤袋顶部一直承受着高速气流的冲刷,加速滤袋的局部磨损。而除顶部外的绝大部分滤袋只承担了少部分处理风量,滤袋的大部分过滤面积未得到有效利用。

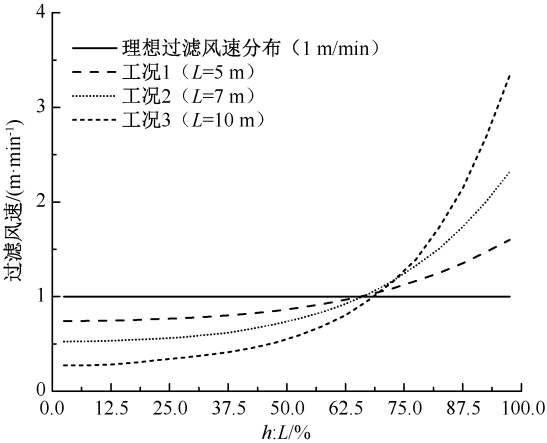


图 4 不同长度滤袋表面过滤风速分布曲线

Fig.4 Distribution curve of filtration velocity on the surface of different length filter bags

为更直观、定量地得到滤袋表面过滤风速的变化特征,运用 Origin 软件绘制所选取 20 个点的过滤风速曲线,得到了滤袋表面过滤风速的分布曲线。长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋的表面过滤风速变化曲线和理想情况下大小为 1 m/min 的过滤风速均布直线图如图 4 所示。由图 4 可以看出,理想状态下滤袋表面的过滤风速均匀分布,最大程度上发挥了滤袋的过滤性能。而长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋的过滤风速由滤袋底部向顶部逐步增

加,在滤袋顶部过滤风速达到了最大值。此外,过滤风速分布不均的情况随滤袋长度的增加变得愈加明显,过滤风速的最大值显著增大。过滤风速均大约在滤袋高度 70% 处超过了理想过滤风速,滤袋下部 70% 的过滤面积未得到有效利用,滤袋表面过滤风速的最大值分别为 1.60、2.32 和 3.34 m/min,均大幅超过了设计过滤风速。

2) 滤袋表面过滤风速均匀性评价。利用式(3)计算不同长度滤袋表面过滤风速分布的均匀性指数,结果见表 3。

表 3 不同长度滤袋的过滤风速分布均匀性指数

Table 3 Uniformity index of air velocity distribution of filter bags of different lengths

L/m	5	7	10
φ	0.736	0.459	0.210

由表 3 可知:随着滤袋长度的增加, φ 值一直在减小,随着滤袋长度的增加,滤袋表面过滤风速分布均匀性变差。当滤袋长度为 10 m 时, φ 值仅为 0.210,滤袋表面的过滤风速的分布均匀性极差。滤袋长度越大,其表面过滤风速的分布均匀性越差,通过增加滤袋长度而获得的过滤面积未得到有效的利用,因此,提升滤袋表面的过滤风速的均匀性不仅可以有效地利用滤袋的过滤面积,也有助于减缓滤袋的局部磨损。

在此前的研究^[13]中,通过调整孔隙率,对滤袋上部 30% 区域进行局部加密,有效提升了滤袋过滤风速分布的均匀性。受此启发,通过对整条滤袋进行非均匀渗透率调整,进一步提升滤袋表面过滤风速分布的均匀性。

2.2 滤袋非均匀渗透率对过滤风速分布的影响

1) 滤袋表面过滤风速分布。在调整 3 种长度滤袋的渗透率之后,分别截取 $x=0.28$ m 的 yz 平面云图,来研究非均匀渗透率调整对滤袋表面过滤风速分布均匀性的影响。

对比图 3 与图 5 可以看出,非均匀渗透率调整使得除尘器内气流场重新分布,滤袋表面过滤风速的分布均匀性显著提高。滤袋表面过滤风速不再过多的聚集在滤袋上部 30% 处,而是更为均匀的分布在滤袋表面,以减缓滤袋的局部磨损,使得滤袋的过滤面积得到了更为有效的利用。

非均匀渗透率调整后,长度为 5、7 和 10 m 等 3 种不同滤袋的表面过滤风速分布曲线如图 6 所示。相比于图 4 的过滤风速曲线,图 6 中的过滤风

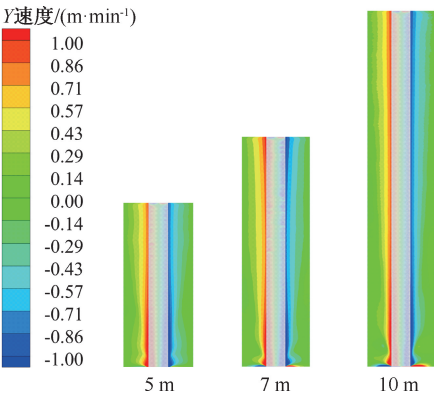


图5 调整渗透率后滤袋表面过滤风速分布云图
Fig.5 Nephogram of filtration velocity distribution on the surface of filter bag after permeability adjustment

速曲线分布在理想过滤风速(1 m/min)周围,可以看出非均匀渗透率调整后滤袋的过滤风速分布均匀性有了显著提升。滤袋上部30%区域的处理风量在减小,下部的处理风量在增加,滤袋的过滤面积得到了有效利用。长度为5、7和10 m等3种不同滤袋的过滤风速最大值由1.60、2.32和3.34 m/min减小到1.30、1.31和1.38 m/min,避免了滤袋局部承受高速气流的冲刷。

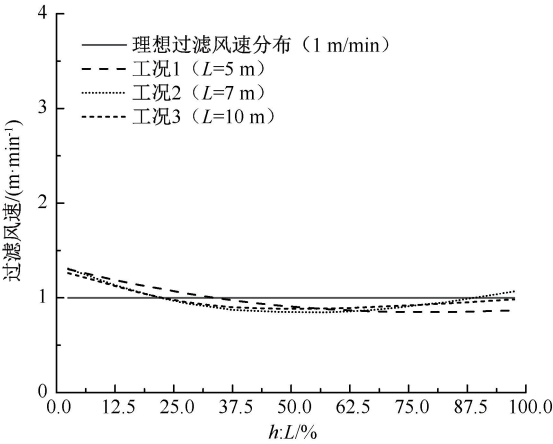


图6 非均匀渗透率滤袋表面过滤风速分布曲线
Fig.6 Distribution curve of filtration velocity on the surface of filter bag after permeability adjustment

2) 滤袋表面过滤风速均匀性评价。为定量分析非均匀渗透率调整对滤袋表面过滤风速分布均匀性的提升效果,依据式(3)计算滤袋表面过滤风速分布均匀性指数,并将其与均匀渗透率条件下滤袋过滤风速均匀性指数进行对比,具体结果见表4。

表4 非均匀渗透率下过滤风速均匀性指数变化
Table 4 Variation of surface filtration velocity uniformity index under heterogeneous permeability

L/m	未调整 α 前的 φ	调整 α 后的 φ	φ 变化率/%
5	0.736	0.854	16.0
7	0.459	0.868	89.1
10	0.210	0.892	324.8

从表4可以看出,滤袋表面过滤风速分布的不均匀性表现在随着滤袋长度的增加而增大,在进行非均匀渗透率调整后,长度为5、7和10 m等3种不同滤袋过滤风速分布均匀性有了不同程度的提升,均匀性指数均在0.8左右,均匀性的提升效果也与滤袋长度成正相关,提升效果较为显著。

3 结 论

1) 随着滤袋长度的增加,其表面过滤风速分布不均匀性显著加剧,特别是滤袋顶部区域承担了大部分风量负荷,表明单纯增加滤袋长度并不能直接转化为更大的有效过滤面积;有效的过滤面积不仅取决于滤袋的物理尺寸,还受到风量负荷分配的影响。

2) 基于达西公式和压差随滤袋高度的变化关系,以设计过滤风速(1 m/min)为优化目标,提出一种滤袋非均匀渗透率设计方法。该方法能显著改善不同长度滤袋表面过滤风速的分布均匀性。

3) 通过调整不同长度(5、7和10 m)滤袋的非均匀渗透率,可将滤袋表面最大过滤风速分别降低至1.30、1.31和1.38 m/min,均匀性指数相应提升至0.854、0.868、0.892。

参 考 文 献

[1] 刘学军,姚群,陈志炜,等. 2023年除尘行业评述及发展展望[J]. 中国环保产业, 2024(5):17-22.
LIU Xuejun, YAO Qun, CHEN Zhiwei, et al. Review and development prospects of dust removal industry in 2023 [J]. China Environmental Protection Industry, 2024(5):17-22.

[2] 易玉枚,李显杰,廖可兵,等. 滤料脉冲喷吹清灰效果评价指标的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7):135-139.
YI Yumei, LI Xianjie, LIAO Keping, et al. Research on cleaning effect evaluation index for pulse-jet cleanable fabric filter [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7):135-139.

[3] 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, 95.

- LE Wenyi, DUAN Chaolong, XIE Dongming. Simulation of interior flow field in the composite bag filter [J]. Environmental Engineering, 2020,38(5):120–125,95.
- [4] 张珈旗,董忠红. 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[J]. 中国环境科学, 2022,42(6):2 530–2 540.
- ZHANG Jiaqi, DONG Zhonghong. Review on key structure design of bag filter based on numerical simulation of flow field characteristics [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2 530–2 540.
- [5] 林秀丽,胡晓峰,闫彩莲,等. 基于调整局部滤袋渗透率的袋式除尘器流量分配方法[J]. 煤炭学报, 2024,49(7):3 007–3 016.
- LIN Xiuli, HU Xiaofeng, YAN Cailian, et al. Flow distribution method of bag filter based on adjustment of local filter bags permeability [J]. Journal of Coal Science, 2024,49(7):3 007–3 016.
- [6] 吕娟,颜翠平,袁彩云,等. 喷吹压力与喷吹距离对长滤袋清灰效果的研究[J]. 安全与环境学报, 2016,16(3):285–288.
- LYU Juan, YAN Cuiping, YUAN Caiyun, et al. Effect of the pulse pressure and the jet distance on the cleaning performance of the long pulse-jet filter bag [J]. Journal of Safety and Environmental Science, 2016,16(3):285–288.
- [7] 张景霞,沈恒根,方爱民,等. 袋式除尘器气流组织的数值模拟分析[J]. 中国环保产业, 2007(12):27–29.
- ZHANG Jingxia, SHEN Henggen, FANG Aimin, et al. Numerical simulation on air distribution in bag-filter [J]. China Environmental Protection Industry, 2007(12):27–29.
- [8] PARK S, JOE Y H, SHIM J, et al. Non-uniform filtration velocity of process gas passing through a long bag filter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,365:440–447.
- [9] 颜翠平,李世龙,毛文浩,等. 金属滤袋除尘器流场特征研究和优化[J]. 金属矿山, 2023(7):142–152.
- YAN Cuiping, LI Shilong, MAO Wenhao, et al. Study on flow field characteristics and optimization of metal fiber filter [J]. Metal Mine, 2023(7):142–152.
- [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 Yanghao, LIANG Zhen, SHEN Henggen. Flow field optimization analysis of bag filter with upper air inlet and internal filtration[J]. Journal of Donghua University:Natural Science, 2021,47(3):112–119.
- [11] THÉRON F, JOUBERT A, LE COQ L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter [J]. Separation and Purification Technology, 2017,182:69–77.
- [12] 鲁进利,何杰,庄乾双,等. 基于 CFD 的双褶数滤袋阻力特性的数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2022,28(3):59–67.
- LU Jinli, HE Jie, ZHUANG Qianshuang, et al. Numerical simulation of resistance characteristics of double pleated filter bag based on CFD [J]. China Powder Technology, 2022,28(3):59–67.
- [13] 杨宏刚,李津瑾,曹莹雪,等. 超长滤袋局部加密对滤袋表面过滤风速分布的影响[J]. 安全与环境学报, 2024,24(7):2 641–2 647.
- YANG Honggang, LI Jinjin, CAO Yingxue, et al. Effect of local densification of ultra-long filter bags on the distribution of filtration velocity on the surface of filter bags [J]. Journal of Safety and Environmental Science, 2024,24(7):2 641–2 647.
- [14] FENG Xinyue, GENG Fan, TENG Haixu, et al. Dust dispersion during the pulse-jet cleaning process with the diffuser effect of the cartridge filter [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(14):41 486–41 504.
- [15] 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):1 156–1 162.
- REN Meitao, WANG Yi, YANG Honggang, et al. Structural optimization for hopper of bottom inlet bag filter based on airflow uniform distribution [J]. Journal of Process Engineering, 2017,17(6):1 156–1 162.
- [16] 闫彩莲,林秀丽,胡隆基,等. 圆筒和褶皱滤袋过滤风速分布的数值模拟分析[J]. 环境工程, 2024,42(3):225–232.
- YAN Cailian, LIN Xiuli, HU Longji, et al. Numerical simulation analysis of filtration velocity distribution of cylindrical and pleated filter bags [J]. Environmental Engineering, 2024,42(3):225–232.
- [17] 邢志祥,赵垒,欧红香,等. 基于 FLUENT 平台的 LPG 储罐热响应源项设计[J]. 中国安全科学学报, 2014,24(2):41–46.
- XING Zhixiang, ZHAO Lei, OU Hongxiang, et al. Source item design and verification for thermal response of LPG storage tank based on FLUENT simulation [J]. China Safety Science Journal, 2014,24(2):41–46.



作者简介: 杨宏刚 (1981—),男,陕西岐山人,博士,副教授,主要从事职业危害(粉尘)防治理论与技术研究。E-mail: yanghonggang@xauat.edu.cn。