doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250008

正弦循环风流对玻纤滤料过滤效率的影响

林秀丽，李文月，孙国华，柳静献
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：为探究玻纤滤料在正弦循环风流作用下对50~300 nm颗粒物的过滤性能，以4种不同等级的玻璃纤维空气过滤材料为研究对象，通过实验探究正弦循环风流频率、振幅、中心过滤风速对滤料效率的影响，并总结出循环风流作用下效率随频率变化的计算公式. 结果表明：正弦循环风流条件下滤料的过滤效率低于相应恒流条件下；在相同的中心过滤风速下，滤料的过滤效率随循环风流频率的增加而降低；在相同的正弦风流频率下，中心过滤风速和滤料等级越低，效率下降的趋势越明显；其他条件相同时，过滤风速的振幅越大，效率下降也越大. 本研究对正确认识循环风流对不同等级一般通风用过滤材料效率的影响具有指导意义.

关 键 词：正弦循环风流；过滤效率；风流频率；风流振幅；玻纤滤料
中图分类号：X 964 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)04-0144-09

Influence of Sinusoidal Cyclic Airflow on Filtration Efficiency of Glass Fiber Filter Media

LIN Xiu-li, *LI Wen-yue*, *SUN Guo-hua*, *LIU Jing-xian*
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIN Xiu-li, E-mail: linxiuli @mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the filtration performance of glass fiber filter media on particles ranging from 50 nm to 300 nm under sinusoidal cyclic airflow, four different grades of glass fiber air filter media were selected as research objects. The influence of frequency, amplitude, and central filtration air velocity of sinusoidal cyclic airflow on the efficiency of filter media was explored through experiments, and a calculation formula for filtration efficiency under sinusoidal cyclic airflow as a function of frequency was summarized. The results indicate that the efficiency of the filter media under sinusoidal cyclic airflow is lower than that under corresponding constant airflow. Under the same central filtration air velocity, the filtration efficiency of the filter media decreases as the frequency of the cyclic airflow increases. Under the same frequency of sinusoidal cyclic airflow, the lower central filtration air velocity and the grade of filter media lead to a more pronounced decrease in efficiency. A higher amplitude of the filtration air velocity leads to a greater decrease in efficiency when other conditions are equal. This study provides guidance in understanding the influence of cyclic airflow on the efficiency of different grades of filter media for general ventilation.

Key words: sinusoidal cyclic airflow; filtration efficiency; airflow frequency; airflow amplitude; glass fiber filter medium

随着工业化和城市化进程的加快，颗粒物污染问题日益严重，生产和生活中常常使用空气过滤器来降低颗粒物的危害[1]. 过滤材料作为空气过滤器的核心，主要的性能参数包括阻力和过滤效率，其中过滤效率是过滤产品分级的重要依据，决定了滤料能否满足净化要求[2-3]. 依据现行滤料测试标准，效率测定在稳定气流下进行，但过滤材料的实际使用场景很复杂，极可能是非稳

收稿日期：2025-01-21
基金项目：国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFC2503201)；辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220352).
作者简介：林秀丽(1974—)，女，辽宁抚顺人，东北大学副教授，博士生导师.
通信作者：林秀丽，E-mail：linxiuli @mail.neu.edu.cn.

定风流环境.例如汽车内燃机进气口过滤器,在不同行驶工况下会经历不同的振荡气流.对于暖通空调(HVAC),当空调室内的冷热负荷和污染负荷发生变化,利用自动控制系统对室内送风量进行调节时,纤维过滤器也会经历不稳定的流动.这些动态变化的风流都可能导致过滤材料的效率发生变化,影响其使用效果[4].因此,对过滤材料在变风流条件下的效率进行研究,对于正确认识其对滤料效率的影响,经济有效地使用过滤材料具有重要的理论和现实意义.

在动态风流条件下对过滤材料效率的研究主要集中在口罩过滤方面.Stafford等[5]在仅有吸入风流下测试了呼吸器滤芯的穿透率,发现该滤芯在最易穿透粒径(most penetrating particle size, MPPS)下的穿透率高于相应稳态风流条件.Eshbaugh等[6]在4种循环流动条件下,使用0.02, 2.9 μm单分散颗粒测量了N95和P100口罩的穿透率,得出颗粒穿透率高于平均流量下而低于峰值流量下.Bahloul等[7]评估了在仅吸入条件下多分散NaCl颗粒通过口罩滤料的穿透率,认为口罩滤料的MPPS穿透率与稳态风流条件相比会相等或更高.Wang等[4]采用正弦循环风流模型模拟成人呼吸模式,认为呼吸频率的增加会导致细颗粒的穿透率增加.Wang等[4]还测试了两种玻璃纤维和一种驻极体过滤材料在正弦循环流动条件下的穿透率,振荡频率分别为6,24,40 $\mathrm{min^{-1}}$,结果表明,随着振动频率的增加,颗粒穿透率增大.以上主要针对呼吸防护用过滤材料开展研究,气流方向有正反双向变化.

目前,针对一般通风用空气过滤材料在动态风流下效率特性的研究较少.Rivers等[8]为了解变风量情况下HVAC系统滤袋的运行情况,测试了31种不同型号滤袋的性能,使用从0.47~0.94 $\mathrm{m^3/s}$线性锯齿模式变化的风流模拟HVAC系统风流,发现该条件下只有效率极低滤袋的穿透率明显低于稳态风流条件下.Zhou等[9]应用计算流体力学技术在微观尺度上研究了玻璃纤维滤料在正弦流动条件下的过滤性能,结果表明正弦风流下滤料的过滤效率比稳态风流下的要小.

综上,动态风流条件下滤料的效率较稳定流动时会发生变化,但变化规律需要进行研究,特别是风速单向周期变化的动态风流对不同等级一般通风用空气过滤材料过滤效率影响的实验研究还有待开展.

本文通过实验对4种不同等级的玻纤滤料在动态循环风流作用下对50~300 nm范围内颗粒物的过滤效率进行研究,为认识动态过滤风流对通风用过滤材料效率的影响提供依据.

1　纤维过滤机理

一般纤维过滤材料是由许多单根纤维经过一定的排列构成的,所以对其过滤效率的研究要从单纤维入手[10].单纤维理论认为气溶胶粒子被纤维捕集的作用机理有5种,分别为惯性碰撞、拦截、扩散、重力和静电[11].本文研究的颗粒物粒径较小,滤料本身不带电,所以重力和静电的影响可忽略.

惯性碰撞[12]过滤机理单纤维效率公式:

$$E_{\mathrm{I}}=\frac{St^3}{St^3+0.77St^2+0.22},St=\frac{Cu\rho_{\mathrm{p}}ud_{\mathrm{p}}^2}{18\mu d_{\mathrm{f}}}.$$

扩散[13]过滤机理单纤维效率公式:

$$E_{\mathrm{D}}=\frac{2.9}{Ku^{1.3}}Pe^{-2/3}+0.624Pe^{-1},$$

$$Ku=\alpha-\frac{\alpha^2}{4}-\frac{\ln\alpha}{2}-\frac{3}{4},Pe=\frac{ud_{\mathrm{f}}}{D}.$$

拦截[14-15]过滤机理单纤维效率公式:

$$E_{\mathrm{R}}=\frac{1}{2Ku}\left[2(1+R)\ln(1+R)-(1+R)+\frac{1}{(1+R)}\right],$$

$$R=\frac{d_{\mathrm{p}}}{d_{\mathrm{f}}}.$$

式中:ρ_{p}为气体密度,$\mathrm{kg/m^3}$;u为气流速度,m/s;d_{p}为粒子直径,m;μ为气体动力黏性系数,kg/(m·s);d_{f}为纤维直径,m;α为纤维填充率;D为颗粒的扩散系数,$D=\frac{k_{\mathrm{B}}TCu}{3\pi\mu d_{\mathrm{p}}}$;$k_{\mathrm{B}}$为玻尔兹曼常数,$k_{\mathrm{B}}=1.38\times10^{-23}$ J/K;T为绝对温度,K;Cu为库宁汉修正系数,$Cu=1+Kn\left[1.275+0.40\exp(-1.10/Kn)\right]$;$Kn$为粉尘的Knudsen数,$Kn=\frac{2\bar{\lambda}}{d_{\mathrm{p}}}$,$\bar{\lambda}$为气体分子平均自由程,$\bar{\lambda}=0.66\times10^{-7}$ m.

单纤维的总效率$E_{\mathrm{f}}=1-(1-E_{\mathrm{I}})(1-E_{\mathrm{D}})(1-E_{\mathrm{R}})(1-E_{\mathrm{DR}})$.其中,$E_{\mathrm{DR}}=E_{\mathrm{D}}+E_{\mathrm{R}}+1.24\frac{R^{2/3}}{Ku^{1/2}Pe^{1/2}}$.

根据单纤维理论,纤维过滤材料在恒定的过滤风速下效率的计算式为

$$E=1-\exp\left(\frac{-4\alpha E_{\mathrm{f}}t}{\pi d_{\mathrm{f}}(1-\alpha)}\right).\tag{1}$$

式中t为滤料厚度,m.

通过碰撞、扩散、拦截机理的计算公式可知,

影响过滤效率的因素主要包括过滤材料的性能、颗粒物的特性和过滤的风流条件[16].风流条件是影响过滤效率的重要因素,对碰撞和扩散都有影响.而对于50~300 nm的颗粒物来说,扩散和拦截对过滤效率的影响占主导地位.本研究重点关注循环风流对扩散效应的影响.

2 实验方案

2.1 实验装置

本研究的测试系统如图1所示,该系统按功能可分为粒子发生与筛分、粒子计数与滤料测试和流量调节控制三部分.

在雾化气溶胶发生器的作用下,质量分数1%的氯化钠溶液会变成带有一定湿度的亚微米级氯化钠颗粒被发出,经过干燥后的颗粒被扫描迁移率粒度仪(DMA,TSI)筛分,即可得到与设定粒径大小相近的粒子,这些粒子在中和器的作用下去除静电并随着风流进入检测部分.

检测部分使用尺寸为1 000 mm×ϕ106 mm的不锈钢管道(有效过滤直径102 mm),能够有效保证干燥筛分后气溶胶粒子的扩散,也能最大程度地避免管壁对粒子的静电吸附.采用冷凝粒子计数器(CPC,TSI3776)测量得到滤料上下游粒子数的平均值,进而计算滤料的过滤效率.

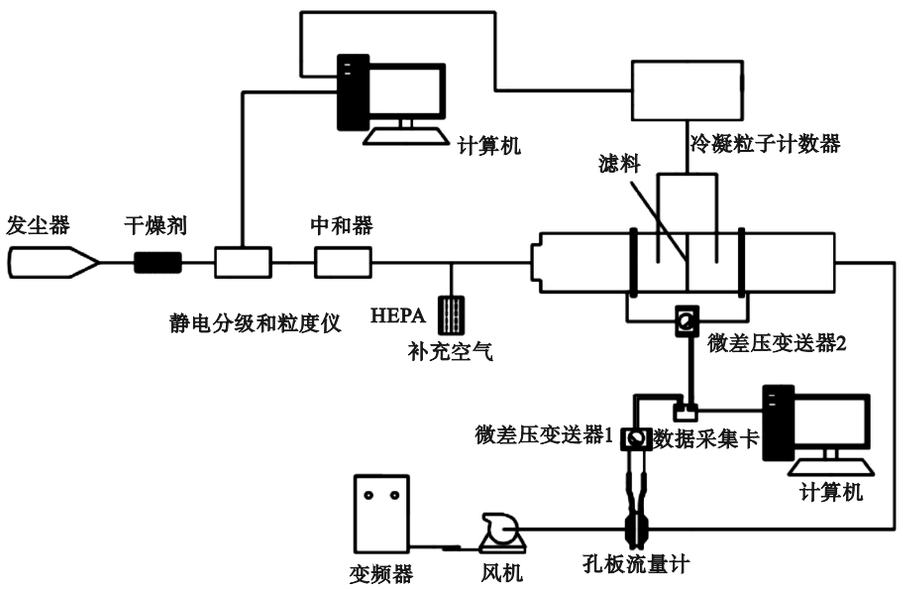


图1 滤料效率测试系统图

Fig. 1 Diagram of test system for filter medium efficiency

使用孔板流量计测量管道内流量,微差压变送器1(JYB-DW-A-1k,昆仑海岸)测得孔板阻力,并通过自制的可反馈孔板流量的控制软件对风机进行变频调控,使测试管道内流量满足设定需求,相对误差小于2%.微差压变送器2(JYB-DW-A-1k,昆仑海岸)安装在滤料上、下游10 mm处,用于实时监测过滤材料的阻力变化.

2.2 实验条件

4种玻璃纤维空气过滤材料基本参数见表1.根据《气体净化用纤维层滤料》[17]对滤料进行等级划分,在过滤风速为20 cm/s,颗粒粒径为0.4 μm条件下,1#滤料等级低于中效,2#和3#滤料为中效,4#滤料为亚高效.图2为过滤材料的扫描电子显微镜图像.

表1 过滤材料基本参数

Table 1 Basic parameters of filter media

滤料	单位面积质量 $g\cdot m^{-2}$	厚度/mm	平均孔径/μm	平均纤维直径 μm	填充率	透气度 $m^3\cdot m^{-2}\cdot min^{-1}$	过滤效率 %
1#	74.204 9	0.618 9	152.5	9.17	0.046 1	40.30	26.146 3
2#	70.671 4	0.542 0	119.7	7.66	0.050 2	26.36	62.862 2
3#	70.671 4	0.537 0	65.7	4.87	0.050 6	18.96	70.182 2
4#	67.137 8	0.504 0	47.1	3.94	0.051 2	10.92	98.549 7

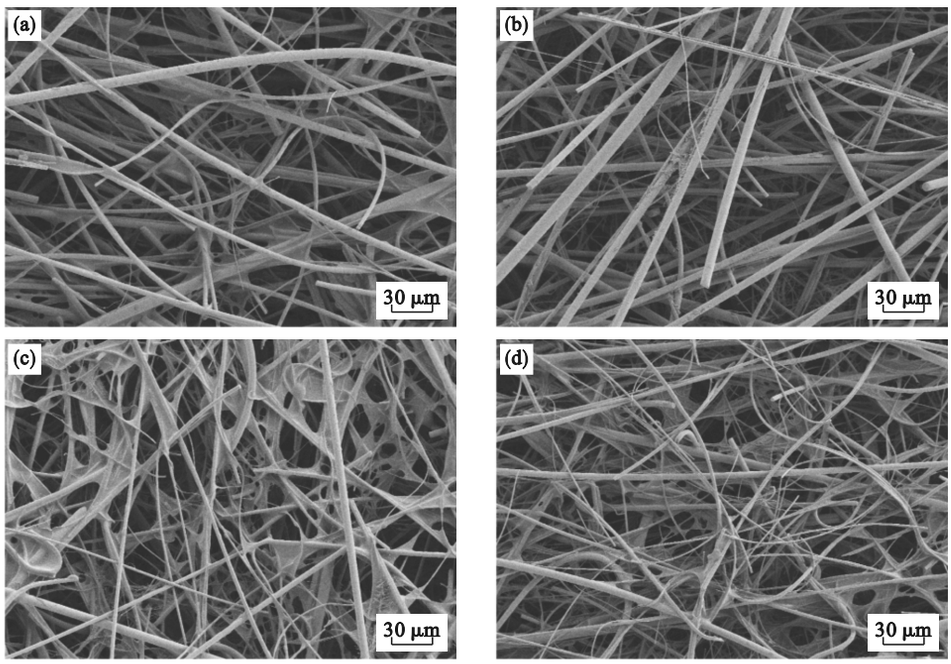


图2　洁净滤料的扫描电子显微镜图像

Fig. 2　Scanning electron microscope image of clean filter media

(a)—1#; (b)—2#; (c)—3#; (d)—4#.

实验过程中,通过程序控制风机制造正弦循环风流,使瞬时过滤风速呈正弦形式变化,变化情况满足:

$$u_{\sin}=\bar{u}+A\sin 2\pi ft. \tag{2}$$

式中:$u_{\sin}$为瞬时过滤风速,cm/s;f为动态流频率,min^{-1}.

风速的正弦变化如图3所示,通过改变风速频率或振幅获得不同正弦循环风流.将循环风流的平均过滤风速称为中心过滤风速(下同),作为稳态时所对应的基础风速,一个周期内动态流与稳态流的过滤风量相同,可进行滤料过滤性能的对比.

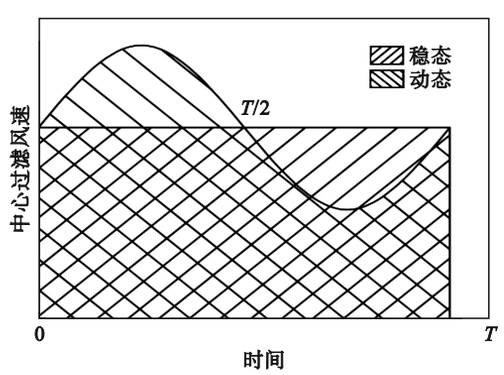


图3　动态流和稳态流条件下的过滤风速

Fig. 3　Filtration air velocity under dynamic flow and steady-state flow conditions

实验测量在不同正弦风速条件下4种过滤材料对粒径50,100,150,200,250,300 nm颗粒物的过滤效率,对比分析正弦循环风流对过滤材料效率性能的影响.实验所用具体风速条件如表2所示.在正式进行实验研究前,为确定颗粒负荷对滤料过滤性能的影响,进行了4种过滤材料在实验流量下第一个和最后一个周期的滤料阻力测试.以3#滤料在测试颗粒粒径为150 nm,中心过滤风速为10 cm/s,频率为6 min^{-1}的循环流条件下获得的实验结果为例,所得曲线如图4所示.可以看出,第一个和最后一个周期的过滤压降曲线基本保持不变,说明颗粒载荷对实验介质过滤性能的影响可以忽略不计.

表2　动态风流实验工况

Table 2　Experimental conditions under dynamic airflow

$\bar{u}$/(cm·s^{-1})	A/(cm·s^{-1})	f/min^{-1}
5	3	6
		12
		24
7	3	6
		12
		24
10	3	24
	5	24

进行滤料效率测试时,在每个样品上、下游分别采样1 min,获得上、下游平均粒子数,并通过公式$\eta=1-\frac{n_{下}}{n_{上}}$($n_{上}$,$n_{下}$是上、下游粒子数)计算滤料的效率.每种测试滤料选择3块样品,求取效

率的平均值.

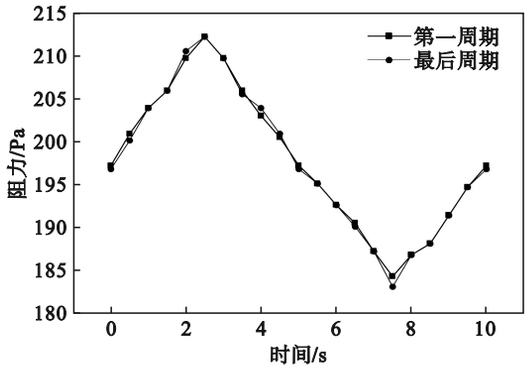


图4 3#滤料在第一个和最后一个周期的阻力

Fig. 4 Resistance of 3# filter medium in the first and last cycles

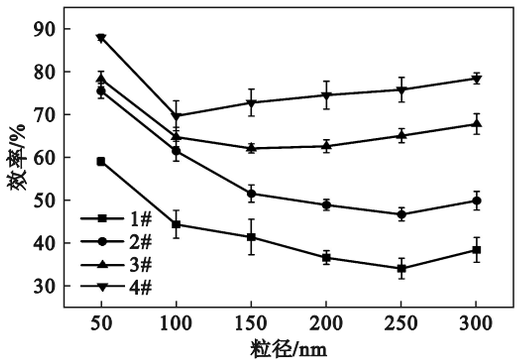


图5 过滤风速为5 cm/s时4种滤料的效率曲线

Fig. 5 Efficiency curves of four types of filter media at filtration air velocity of 5 cm/s

3 结果与讨论

3.1 稳定风流下滤料的过滤效率

实验测得过滤风速为5 cm/s,过滤粒子粒径为50,100,150,200,250,300 nm条件下4种滤料的过滤效率,如图5所示.各等级滤料效率随粒径的增大先降低再升高,均存在最低点,每个最低效率所对应的粒径就是最易穿透粒径(MPPS).但每种滤料的MPPS都有所差别,这是因为各等级滤料的基本参数不同,内部纤维结构各有特点,使得其效率曲线不完全相同,但整体的变化规律一致.

由图5可知,在本研究条件下,1#滤料效率最低,整体在60%以下,2#,3#,4#滤料的效率依次增高,2#滤料的效率在50%~70%之间,3#滤料的效率在60%~80%之间,而4#滤料的效率最高,在70%~90%之间.结合滤料的基本特性和电镜图分析可知,这是由于1#滤料等级最低,纤维排列最松散,内部空隙大,填充率最小,纤维平均直径最大,在过滤过程中整体过滤效率最低.随着滤料等级提高,滤料对于颗粒物的各种效应不断增强,对应的整体效率也依次增加[18].

利用单纤维效率计算公式,计算实验所用滤料在过滤风速5 cm/s,过滤粒子粒径为50,100,150,200,250,300 nm时的单纤维总效率,并绘制成曲线如图6所示.

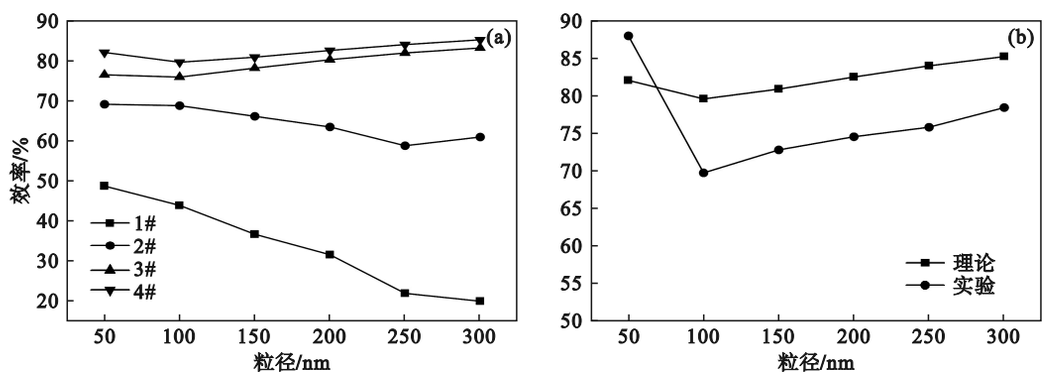


图6 过滤风速为5 cm/s时,4种滤料的理论效率和4#滤料理论-实验效率对比

Fig. 6 Comparison between theoretical efficiency of four types of filter media and theory-experimental efficiency of 4# filter medium at filtration air velocity of 5 cm/s

(a)—理论效率;(b)—理论-实验效率对比.

由图6可知,理论效率与实验测得效率的差在10%以内,说明实验结果与理论基本相符.以4#滤料为例,计算数据和测量数据达到了较好的一致性,数值差异可能是由滤料制作不均匀带来的参数误差导致的,在可接受的范围内.通过理论公式计算可知,4种滤料对于50~300 nm颗粒的过滤作用,扩散和拦截是主要的过滤机制,单纤维扩散效应的数量级为10^{-2},拦截效应的数量级为10^{-5}~10^{-3},惯性碰撞效应的数量级为10^{-10}~10^{-6}.因此,扩散效应大于拦截效应,二者均远大

于惯性碰撞.

3.2　正弦循环风流频率对效率的影响

为探究风流频率对滤料效率的影响,实验测得4种滤料在过滤风速为(5±3)cm/s,频率为0,6,12,24 min^{-1}条件下的过滤效率,结果见图7.对于4种过滤材料,循环流动条件下的过滤效率均低于相应的稳定流效率,整体效率随风流频率的增加而下降.当流体振荡频率从0 min^{-1}增加到24 min^{-1}时,1#滤料对MPPS的过滤效率从34.195 1%降低到26.144 8%,相对减小量超过20%.同样条件下,2#,3#,4#滤料对MPPS的过滤效率分别从46.807 1%,62.129 5%,69.721 1%降低到40.995 7%,58.252 4%,65.473 3%,相对减小量依次为12.42%,6.24%,6.09%.

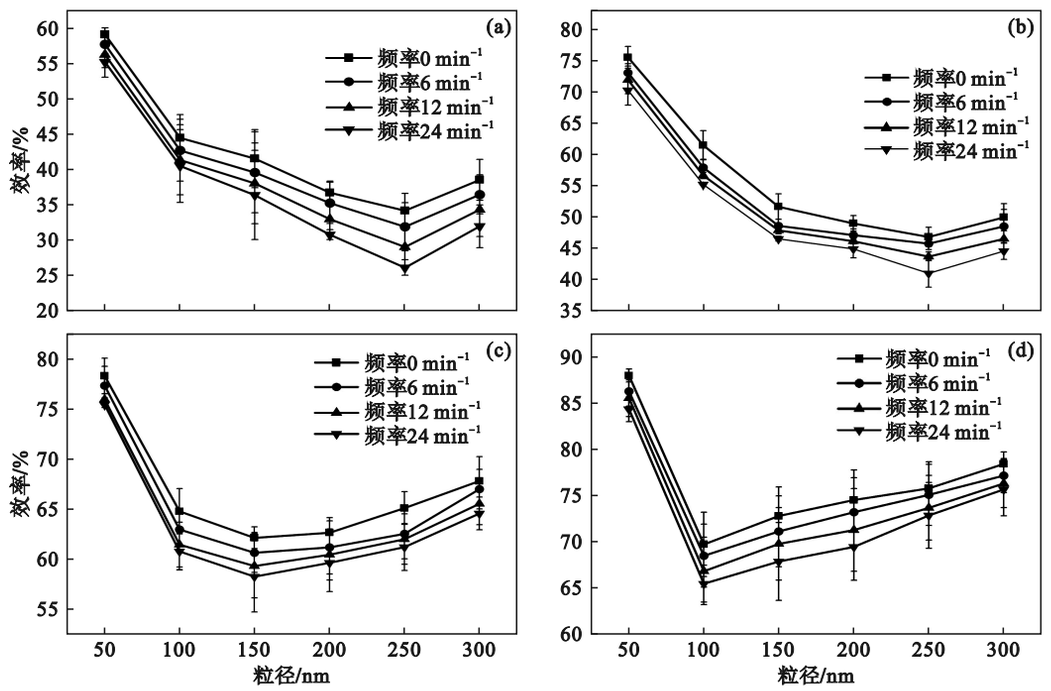


图7　中心过滤风速5 cm/s 条件下频率对滤料效率的影响

Fig. 7　Effect of frequency on filter medium efficiency at central filtration air velocity of 5 cm/s

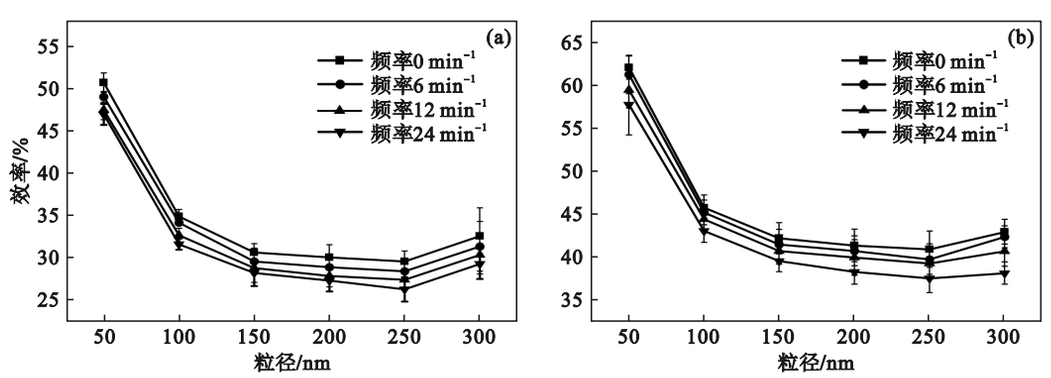
(a)—1#; (b)—2#; (c)—3#; (d)—4#.

上述现象可能是因为正弦流的变化削弱了颗粒的扩散效应.随着振荡频率的增加,过滤风流的流动加速度增加,颗粒物在通过相同的"路径"时,其与滤料的接触时间大大减少,颗粒收集量减少,因此过滤效率有所降低[5].

3.3　正弦循环风流中心过滤风速和滤料等级对效率的影响

为探究正弦循环风流中心过滤风速对滤料效率的影响,实验在与3.2节相同的条件下测得中心过滤风速7 cm/s时4种滤料的效率,如图8所示.

与图7对比可知,在5 cm/s中心过滤风速条件下,随着风流频率的增加,滤料的过滤效率下降趋势明显,而在7 cm/s中心过滤风速条件下,尽管随频率增加,滤料的过滤效率也有下降趋势,但下降的幅度较低风速时减小.例如1#滤料效率降低最多的粒径变为200 nm,各频率的相对下降值分别为3.94%,7.38%,9.15%,下降的幅度小于5 cm/s时的3.97%,10.14%,16.18%.



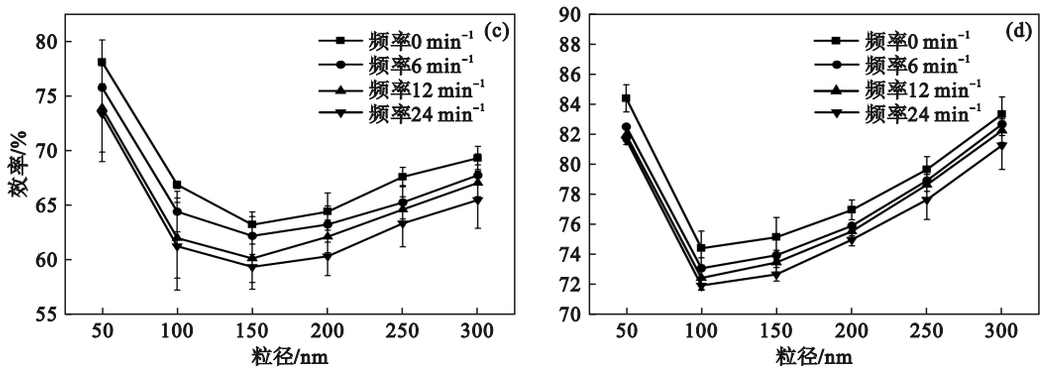


图8 中心过滤风速7 cm/s条件下频率对滤料效率的影响

Fig. 8 Effect of frequency on filter medium efficiency at central filtration air velocity of 7 cm/s

(a)—1#; (b)—2#; (c)—3#; (d)—4#.

风速的增大减小了正弦风流频率对过滤效率下降的影响.这可能是因为在低风速情况下,颗粒的扩散作用较明显,颗粒在滤料中停留的时间更长,有充足的时间与滤料接触,降低了颗粒通过滤料的概率,从而提高了滤料的过滤作用.然而,在较高风速下,颗粒与滤料接触概率减小,造成滤料的过滤效率下降.因此在叠加了频率导致效率下降情况之后,低风速对应的效率变化更明显[19].

由图8可知,当风流频率从0增加到24 min^{-1}时,1#滤料在MPPS=250 nm的过滤效率从29.567 3%降低到26.294 0%,2#滤料从40.852 5%降低到37.473 9%,3#滤料从63.220 6%降低到59.383 9%,4#滤料从74.398 5%降低到71.928 8%,相对减小量依次为11.07%,8.27%,6.07%,3.32%.

综合图7和图8,对于不同等级的滤料,各频率条件下的滤料效率较稳态效率的下降程度也不同,从图中可以看出,低等级的滤料效率随频率增加下降趋势更明显.这是因为对于低等级1#滤料,其填充率低、孔径大,正弦流动条件下不断变化的流场对扩散效应的削弱更强,颗粒物通过滤料时加速度增加,"路程"却缩短,导致颗粒物在滤料表面和内部的停留时间减少,因此,低等级滤料的效率受正弦风流频率的影响更大.

3.4 正弦循环风流振幅对效率的影响

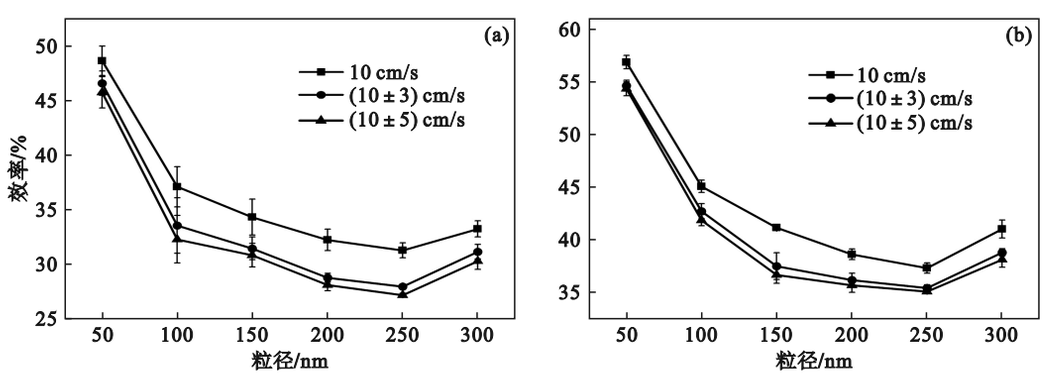
为探究正弦风流振幅对滤料效率的影响,改变正弦循环风流的振幅,在同一频率,相同中心风速,不同振动幅度条件下,对4种滤料的效率进行对比.图9是中心风速10 cm/s,频率为24 min^{-1}时,幅度分别变化3,5 cm/s时,4种滤料的效率测试结果.

由图9可知,滤料的过滤效率随风流波动幅度的增大而减小,1#滤料在频率24 min^{-1}时,振幅5 cm/s时整体效率比3 cm/s时下降1%左右.

这是由于振幅不同时通过滤料的整体风速大小不同,大风速对小颗粒的扩散效应有更显著影响.大的波动幅度使得颗粒扩散更快,使更多颗粒通过滤料,导致滤料效率下降[9].

3.5 频率对效率影响计算公式的简单求解

为描述循环流动条件下频率对效率的影响,根据实验数据拟合出经验计算公式.以1#滤料在5 cm/s时的实验数据为例,首先将各频率的效率与稳态的效率作比,得到各粒径对应的$E_{cyclic}/E_{constant}$比值,再进行线性拟合,拟合结果见图10,直线的斜率和截距见表3.



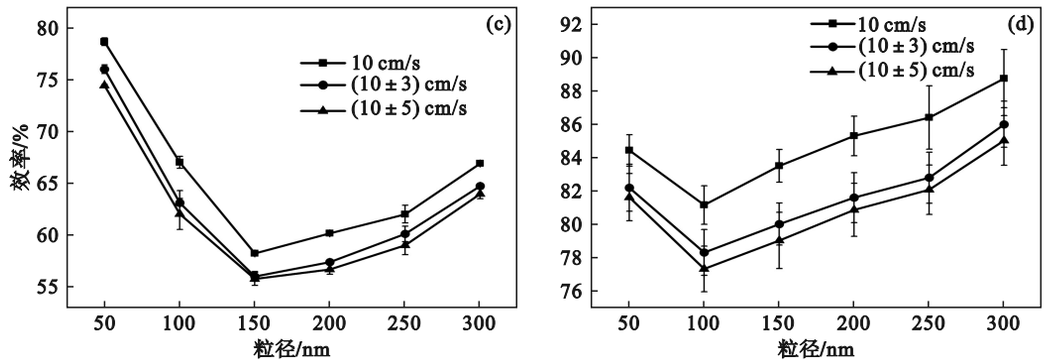


图9　中心过滤风速10 cm/s ,频率24 min^{-1}条件下振幅对滤料效率的影响

Fig. 9　Effect of amplitude on filter medium efficiency at central filtration air velocity of 10 cm/s and frequency of 24 min^{-1}

(a)—1#; (b)—2#; (c)—3#; (d)—4#.

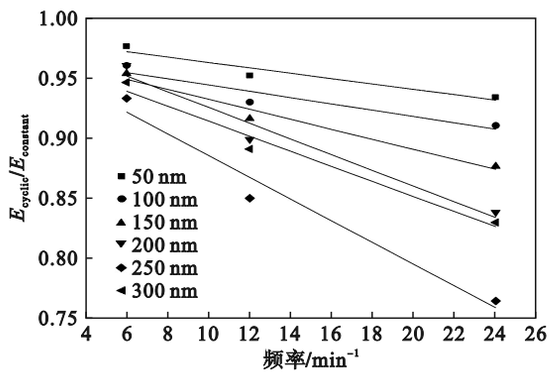


图10　1#滤料效率比值在风速5 cm/s时对频率的线性拟合

Fig. 10　Linear fit of 1# filter medium efficiency ratio to frequency at filtration air velocity of 5 cm/s

计算出斜率和截距的平均值,得到式(3):

$$E_{cyclic}=\left(0.978\,4-0.005\,133f\right)E_{constant}. \quad (3)$$

利用拟合公式求得1#滤料在频率6 min^{-1}时的效率,与实验所得结果对比如图11所示,结果基本吻合.

再利用上述方法求得2#,3#,4#滤料在风速(5±3)cm/s时效率关于频率变化的拟合公式:

$$E_{cyclic}=\left(0.976\,4-0.003\,148f\right)E_{constant}, \quad (4)$$

$$E_{cyclic}=\left(0.982\,9-0.001\,552f\right)E_{constant}, \quad (5)$$

$$E_{cyclic}=\left(0.991\,4-0.001\,860f\right)E_{constant}. \quad (6)$$

表3　线性拟合的斜率和截距

Table 3　Slope and intercept of linear fit

粒径/nm	50	100	150	200	250	300
拟合斜率	−0. 002 23	−0. 002 61	−0. 004 14	−0. 006 53	−0. 009 03	−0. 006 26
拟合截距	0. 984 95	0. 970 00	0. 973 35	0. 990 50	0. 975 45	0. 976 40

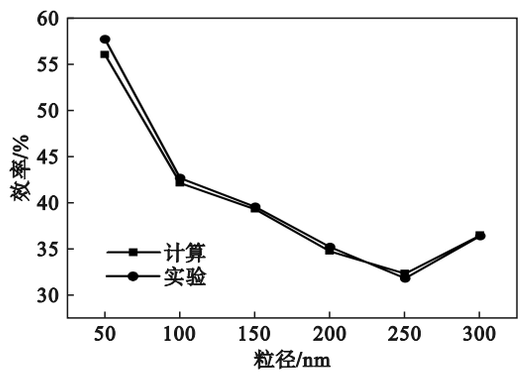


图11　中心过滤风速5 cm/s,频率6 min^{-1}条件下计算效率与实验效率对比

Fig. 11　Comparison of calculation efficiency and experimental efficiency under central filtration air velocity of 5 cm/s and frequency of 6 min^{-1}

4　结　　论

1) 在正弦循环风流条件下滤料的过滤效率低于相应的恒流条件下的效率,过滤风速的频率对滤料的过滤效率有显著影响.在相同中心过滤风速条件下,滤料的过滤效率随循环风流频率的增加而降低.

2) 在相同正弦风流频率条件下,滤料等级越低,中心过滤风速越低,效率随频率下降的趋势越明显.等级最低的1#滤料在过滤风速为(5±3)cm/s时,效率随频率的下降最明显,相对下降值最高达到23.54%.

3) 在相同中心过滤风速和频率条件下,过滤

风速的振幅越大,效率下降越明显.在其他条件相同时,4种滤料在过滤风速为(10±5)cm/s时的效率均低于(10±3)cm/s时的效率.

参考文献:

[1] 林秀丽,赵一璇,柳静献. 荷尘速率对非高效过滤材料阻力特性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(7):1056-1063.
(Lin Xiu-li, Zhao Yi-xuan, Liu Jing-xian. Effect of dust loading rate on pressure drop characteristics of non-high efficiency filter media [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2022, 43(7): 1056-1063.)

[2] 柳静献,毛宁,孙熙,等. 我国除尘滤料历史、现状与发展趋势综述[J]. 中国环保产业,2020 (11): 6-18.
(Liu Jing-xian, Mao Ning, Sun Xi, et al. Summary of the history, current situation and development trend of dust removal and filter materials in China [J]. *Environmental Protection Industry in China*, 2020(11): 6-18.)

[3] Wang Q, Golshahi L, Chen D R. Advanced testing method to evaluate the performance of respirator filter media[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2016, 13(10): 750-758.

[4] Wang P, Chen D R. Filter media performance under the oscillating flow condition[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2019, 132:1-11.

[5] Stafford R G, Ettinger H J, Rowland T J. Respirator cartridge filter efficiency under cyclic- and steady-flow conditions [J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1973, 34(5): 182-192.

[6] Eshbaugh J P, Gardner J D, Richardson A W, et al. N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2009, 6(1): 52-61.

[7] Ali B, Alireza M, Fariborz H, et al. Evaluation of N95 filtering facepiece respirator efficiency with cyclic and constant flows [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2014, 11(8): 499-508.

[8] Rivers R, Murphy D J Jr. Air filter performance under variable air volume conditions[J]. *ASHRAE Transactions*, 2000, 106(2): 131-144.

[9] Zhou B, Xu Y, Chen L P, et al. Filtration performance of glass fibrous air filter media under sinusoidal flow condition [J]. *Building and Environment*, 2020, 183:107182.

[10] Friedlander S K. Theory of aerosol filtration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1958, 50(8): 1161-1164.

[11] Lastow O, Podgorski A. Advance in aerosol filtration: single-fibrous collection efficiency[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997:26-50.

[12] Stechkina I B, Fuchs N A. Studies on fibrous aerosol filters I. calculation of diffusional deposition of aerosols in fibrous filters[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1966, 9(2): 59-64.

[13] Fuchs N A, Stechkina I B. A note on the theory of fibrous aerosol filters[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1963, 6(1): 27-30.

[14] Pich J. The effectiveness of the barrier effect in fiber filters at small Knudsen numbers[J]. *Staub-Reinhaltung der Luft*, 1966, 26: 1-4.

[15] Stechkina I B, Kirsch A A, Fuchs N A. Studies on fibrous aerosol filters. Ⅳ. calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1969, 12(1): 1-8.

[16] Zhang X, Ma J Y, Nie X X, et al. Establishment of air fiber filtration model based on fractal theory and analysis of filtration performances [J]. *Materials Today Communications*,2023, 34: 105301.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. 气体净化用纤维层滤料: GB/T 35754—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. Fiber layer filter material for gas purification: GB/T 35754—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.)

[18] Leung W W F, Hung C H, Yuen P T. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 71(1): 30-37.

[19] Xu Z L. Fundamentals of air cleaning technology and its application in cleanrooms[M]. Berlin: Springer, 2013.