doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250015

高湿环境下纤维层复合N95防尘口罩容尘性能的试验研究

常德强，刘兴华，朱 彤，柳静献
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：针对N95防尘口罩在高湿高尘环境中初始阻力大、使用寿命短的问题，通过将纤维层过滤材料与N95口罩复合，探究相对湿度（RH）与纤维层结构对口罩容尘性能的协同提升机制. 结果表明：相对湿度增加通过液桥效应促进粉尘层形成疏松结构，显著延长材料达到终阻力（100 Pa）的时间；复合材料通过优化粉尘赋存空间与拦截路径显著提升容尘量，其中N95+G3较单一N95在50% RH下容尘量提升105%，在90% RH下提升63%，达到7 663. 2 g·m^{-2}. 研究进一步构建复合材料容尘增加量与面密度、厚度、纤维直径以及环境相对湿度的定量关系式，揭示了纤维层结构参数与相对湿度的协同作用. 该研究为高湿环境下N95口罩的优化设计及容尘性能提升提供了参考，对矿山、纺织等场景的职业健康防护具有实际应用价值.

关 键 词：防尘口罩；高湿环境；高尘环境；容尘性能；过滤阻力
中图分类号：X 964 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026（2026）05-0110-09

Experimental Study on Dust-Holding Performance of Fiber-Layer Composite N95 Dust Masks in High-Humidity Environments

CHANG De-qiang, *LIU Xing-hua*, *ZHU Tong*, *LIU Jing-xian*
（School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHANG De-qiang, E-mail: changdeqiang@mail.neu.edu.cn）

Abstract: To address the issues of high initial resistance and short service life of N95 dust masks in high-humidity and high-dust environments, the synergistic enhancement mechanism of relative humidity (RH) and fiber-layer structure on the dust-holding performance of masks was investigated by combining fiber-layer filter materials with N95 masks. The results indicate that an increase in RH promotes the formation of a loose structure in the dust layer through the liquid bridge effect, significantly extending the time for the material to reach the final resistance (100 Pa); the composite material significantly enhances the dust-holding capacity by optimizing the dust storage space and interception paths; specifically, compared with that of the single N95 mask, the dust-holding capacity of N95+G3 is increased by 105% at 50% RH and by 63% at 90% RH, reaching 7 663. 2 g·m^{-2}. Furthermore, a quantitative relationship between the dust-holding capacity increment of the composite material and areal density, thickness, fiber diameter, and environmental RH was established, revealing the synergistic effect of the structural parameters of the fiber layer and RH. This study provides a reference for the optimal design and dust-holding performance enhancement of N95 masks in high-humidity environments and has practical application value for occupational health protection in scenarios such as mines and textile mills.

Key words: dust mask; high-humidity environment; high-dust environment; dust-holding performance; filtration resistance

收稿日期：2025-03-04
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC2503201）；国家自然科学基金资助项目（52174215）；辽宁省教育厅基本科研项目（LTKMZ20220354）.
作者简介：常德强（1979—），男，山东夏津人，东北大学副教授，博士生导师.
通信作者：常德强，E-mail：changdeqiang@mail.neu.edu.cn.

尘肺病是我国目前最严重的职业病，截至2022年底，中国累计报告职业性尘肺病92.6万余例，约占所有职业病的90%[1]. 据国家卫健委统计，2023年新增职业性尘肺病患者8 051例，约占新增职业病病例的67%[2]. 由于工程措施的限制，一些生产场所中粉尘浓度难以降到接触限值以下，此时佩戴个人防护用品是保护接尘工人健康的最后一道防线[3].N95自吸过滤式防尘口罩是目前应用最广泛的防尘口罩，同时该型口罩也常用于居民防雾霾及预防呼吸道传染病[4]，并且其效果好于一般的医用口罩[5]. 美国劳工部1995年提议医院采用N95型防尘口罩以防范肺结核等呼吸系统传染病[6]. 然而，在防尘口罩使用中，经常处于高湿环境，例如矿山井下、有雾天气，或是纺织印染等行业中的高湿车间. 在这类高湿环境下，N95防尘口罩存在呼吸阻力高、阻力上升过快、使用寿命短等问题[7-8]，亟需有效解决方案.

研究者针对改善N95防尘口罩防护性能的研究，主要集中于提高过滤效率、降低呼吸阻力以及改善口罩佩戴的适合性方面，但忽视了对于提升容尘性能的研究，也忽略了环境相对湿度（RH）这一重要因素[9]. 梁海英等[10]采用孔径为0.4 μm、面积为0.5 m^2的重离子微孔膜作为滤芯，研制出一款梳格结构的新型N95防尘口罩滤芯，其过滤效率为99.7%，呼吸阻力为180 Pa，结果符合GB 2626—2019的要求[11]. 朱金佗等[12]以10~205 nm的NaCl气溶胶为测试介质，在相同大小的测试流量下，循环流量模式下颗粒物的穿透率显著高于恒定抽气流量模式；随吸气流量的升高，受测N95防尘口罩的穿透率呈线性增加，吸气阻力呈正抛物线升高而质量因子呈幂指数降低.Zhuang等[13]发现脸长和脸宽对杯状N95防尘口罩的适合性影响很大. 程文娟等[14]测定了自吸过滤式防尘口罩对代表性成年人的适合性：口罩的形状和受试者脸部尺寸对口罩适合性有影响，折叠型口罩适合性与头面部尺寸相关性不大，而杯状口罩适合性与头面部尺寸相关性较大. 为此余艳艳等[15]提出为保证自吸过滤式防尘口罩的防护效果，其设计需考虑国人脸型特点，劳动者选择自吸过滤式防尘口罩时应进行适合性测定.

在考虑相对湿度因素时，当前研究主要聚焦于相对湿度对N95口罩性能的作用机制.Mahdavi等[16]研究了N95防尘口罩在不同相对湿度环境下对亚微米级氯化钠粉尘的过滤性能，研究发现，随着环境相对湿度的增加，口罩的过滤性能会逐步下降. 这一现象主要归因于现代口罩材料普遍采用的驻极体纤维过滤材料. 在高相对湿度环境下，空气中的水分会中和过滤材料纤维上的驻极电荷，导致静电吸附捕尘功能减弱甚至失效，进而降低口罩的过滤效率.Belkin[17]进一步证实了在高相对湿度环境下，口罩过滤材料纤维之间的间隙容易被堵塞，会增加气溶胶通过口罩的阻力，从而影响工人的正常使用.Newnum[18]发现，当粉尘在过滤器上累积形成网状结构的滤饼时，理论上阻力会随滤饼的增长而线性增加，但在实际情况下，随着相对湿度的增加，阻力却呈现出减小的趋势.Gupta等[19]指出，随着空气相对湿度的增加，颗粒间的黏附力增强，口罩上的高水分会堵塞过滤纤维之间的空隙，导致呼吸阻力增加，进而影响口罩的整体性能.Mostofi等[20]的研究指出了相对湿度对驻极体口罩过滤材料过滤效率的影响，但是关于相对湿度对口罩容尘性能的综合影响，目前尚缺乏深入的研究. 因此，急需对环境相对湿度如何影响防尘口罩容尘量的性能进行探究.

综上，当前关于在高湿高尘环境中N95防尘口罩容尘性能的研究仍显不足，同时，针对如何在高湿度条件下有效提升N95防尘口罩容尘量的探索也尚待深入. 因此，本文选取常用的N95防尘口罩以及与3种纤维层过滤材料分别复合后的新型N95防尘口罩作为研究对象，探究N95口罩的容尘能力与环境相对湿度以及复合材料结构之间的关联性，旨在为N95防尘口罩的进一步改进与优化提供科学依据和参考.

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

本文选用某公司的9502+型自吸过滤式N95防尘口罩. 该口罩为3层结构，口罩最外层为具有疏水特性的无纺布纤维材料，中间核心过滤层由经过静电处理的聚丙烯熔喷纤维构成，可通过静电吸附增强过滤效果，内层选用普通无纺布材质，旨在吸湿透气，提供持久的佩戴舒适度[21-22]. 口罩各层的SEM图像分别如图1a~图1c所示，可见中间过滤层的纤维直径明显小于内、外两层，可保证其对颗粒物具有较高的过滤效率.

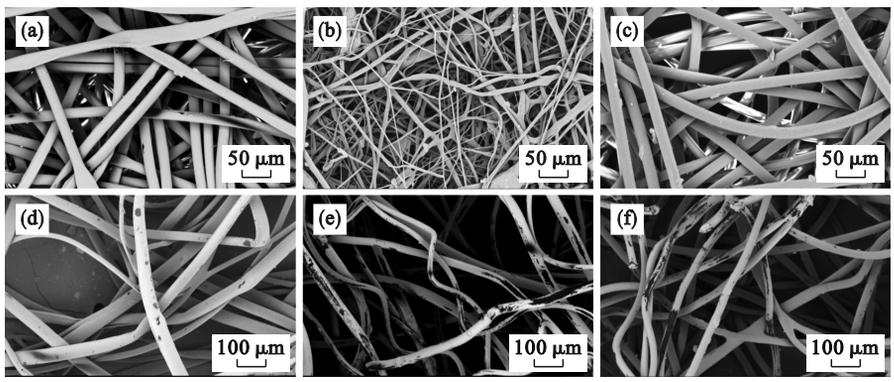


图1 N95口罩与3种空气过滤材料的SEM图像

Fig. 1 SEM images of N95 masks and three air filtration materials

(a)—N95外层;(b)—N95中间层;(c)—N95内层;(d)—G1;(d)—G2;(d)—G3.

为通过复合方式提高口罩的容尘性能,本文选取3种具有不同厚度、面密度与纤维直径组合的聚酯纤维过滤材料(G1,G2,G3),构成结构参数梯度序列,以系统研究纤维层结构对复合材料容尘性能的影响规律.3种材料的SEM图像如图1d~图1f所示,基本性能参数如表1所示,可知三者纤维直径由小到大依次为G3,G2,G1,纤维密集程度由疏到密依次为G1,G2,G3.将N95口罩与G1,G2,G3裁剪制成直径为13 cm的圆形平板试样,并将G1,G2及G3分别与N95口罩进行叠加复合;其中,纤维层过滤材料在上,首先迎尘,作为初级过滤,N95在后,作为过滤效率的保证级.

表1 3种纤维层过滤材料的基本性能参数表

Table 1 Basic performance parameters of three fiber-layer filter materials

编号	平均厚度	面密度	纤维平均直径(平均值±标准差)
	mm	$g\cdot cm^{-2}$	μm
N95	1.373	0.020 77	5.02±2.61(中间核心过滤层)
G1	2.170	0.015 98	59.36±2.05
G2	2.845	0.020 19	38.67±3.12
G3	4.475	0.030 93	28.26±3.32

1.2 试验装置与方法

1.2.1 试验装置

试验装置如图2所示,主要由发尘器(自制)、气流通道、高温高压蒸汽发生器(220V-3000W,佛山市欧卡电热设计有限公司)、热式气体质量流量计(JY-RS-50,江苏进源仪表有限公司)、抽风机(2RB810H17,上海展高电器有限公司)等组成.风机将空气吸入竖向管道内,发尘器发出的粉尘均匀分布于整个竖直管道中,随气流经过被测试样.在试样上下有静压测孔与压差计(Testo 512,德图仪器)相连接,检测试样的过滤阻力.试样下游夹具上安装有高效滤膜,用于捕集未被试样捕集的粉尘.热式气体质量流量计用于检测气体流量,通过变频控制器(CDI-E180,德力西(杭州)变频器有限公司)控制风机转速,以达到模拟不同风速下测试受试材料过滤性能的目的.

高湿度试验使用高温高压蒸汽发生器进行相对湿度调节,将产生的湿空气先通入缓冲瓶去除水滴,再将湿空气通入装置竖直管道入口.通入湿空气前预先启动风机,保持设定流量.通过调整蒸汽发生器流量控制装置内相对湿度分别保持在设定的50%,60%,70%,80%,90%,使用湿度计(GSP-8A,江苏省精创电气股份有限公司)实时监测湿度,相对湿度稳定后进行发尘.

1.2.2 试验粉尘

使用的试验粉尘为滑石粉,其粒径分布(使用BT-9300LD激光粒度分布仪,丹东百特仪器有限公司测定)如图3所示,该粉尘的10%累积粒径D_{10}为2.304 μm,中位粒径(50%累积粒径)D_{50}为8.523 μm,90%累积粒径D_{90}为26.410 μm,可见其粒度分布较宽但相对集中,细颗粒占比较高.为保证充分分散,试验前将滑石粉置于热风循环烘箱(FD240,德国宾德热工机械有限公司)中干燥,设置温度为105 ℃并干燥4 h以除去水分.

在矿山井下、隧道施工等作业场所,粉尘浓度时常超标,短时接触浓度可能远高于国家规定的职业接触限值[23].为了在实验室条件下高效评估口罩的容尘性能并模拟高粉尘负荷工况,本文采用了加速试验方法,并设定发尘器为最大发尘浓度,实测质量浓度为17.41 $g\cdot m^{-3}$.

1.2.3　洁净状态阻力特性测试

为对比不同材料在初始状态下过滤阻力与风速的关系,测试4种材料(N95,N95+G1,N95+G2及N95+G3)在洁净状态下(室内温度20 ℃,30%RH)的阻力特性,测试风速分别为20,40,53,60,80及100 mm·s^{-1}.试验重复进行3次以确保数据的可靠性,并最终取3次测量结果的平均值作为最终数据.

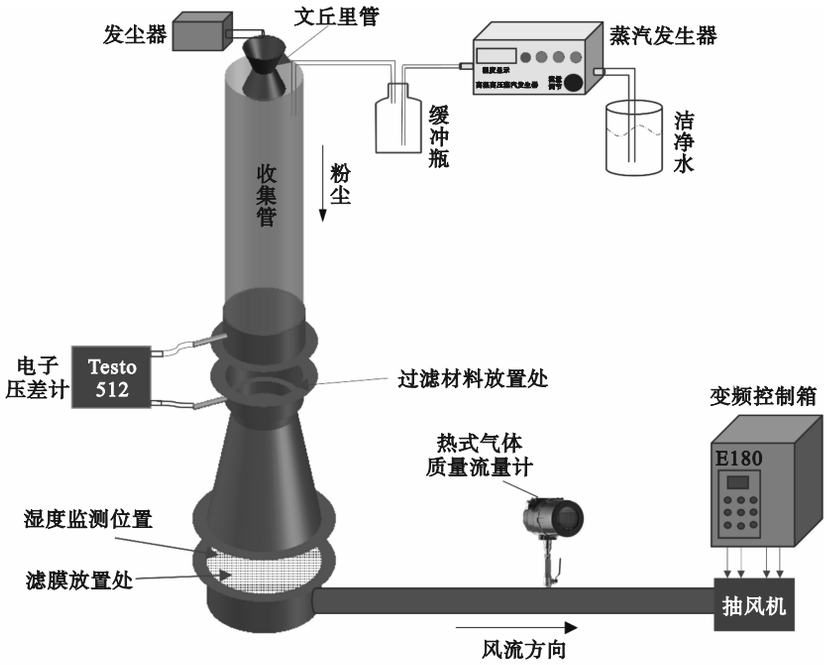


图2　试验装置图

Fig. 2　Diagram of test device

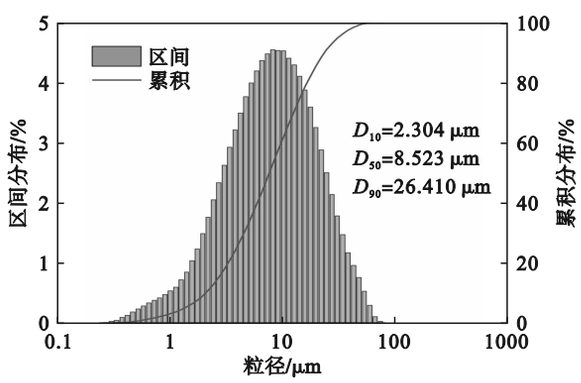


图3　滑石粉粒径分布

Fig. 3　Particle size distribution of talc powder

1.2.4　容尘性能测试

考虑到口罩在佩戴情况下的过滤风速,本文使用的平板试样选择在53 mm·s^{-1}的风速下进行测试,试样实际过滤面积为40 cm^2,对应流量为12.72 L·min^{-1}.发尘后开始进行测试,期间保持流量恒定,每隔30 s记录一次试样阻力,当阻力达到100 Pa时停止试验.容尘量的计算如式(1)所示:

$$W=\frac{m_2-m_1}{S}. \tag{1}$$

式中:W为容尘量,g·m^{-2};S为过滤面积,m^2;m_2为试验后试样的质量,g;m_1为试验前试样的质量,g.

过滤材料的容尘量是指其在达到一定阻力或失效前所能捕获并容纳的颗粒物总量.在材料的初始阻力不同时,不同材料到达给定阻力的增量也就存在差别,单独使用容尘量就无法全面地反映材料本身的容尘性能.因此,本文定义容尘性能综合评价指标Q_{DHC},即材料在测试条件下单位阻力增长对应的容尘量.Q_{DHC}越高代表单位阻力增长时材料容纳的粉尘量越大,能更好地反映材料的容尘性能,如式(2)所示:

$$Q_{DHC}=\frac{W}{\Delta P}. \tag{2}$$

式中:Q_{DHC}为容尘性能综合评价指标;ΔP为过滤材料在容尘量W测试条件下的阻力增加值,Pa.容尘性能综合评价指标Q_{DHC}可以消除测试终止阻力选取对材料容尘量测试结果的影响,从而更加准确地表征过滤材料本身的容尘性能.

2　结果与讨论

2.1　洁净状态下口罩材料及复合材料的阻力特性

在洁净状态下,4种材料的过滤阻力随风速

的变化如图4所示,误差棒代表标准偏差.4种材料的过滤阻力与风速均具有明确的线性关系,且试验最大风速下估算的雷诺数远小于1,表明在测试条件下气流通过过滤材料时呈现层流状态[24],这与理论预期吻合,即在忽略粉尘负载的理想条件下,层流通过过滤介质的阻力与风速确实呈线性相关[25-26].也说明了研究所选用的过滤材料孔隙分布均匀、纤维结构稳定,具有较好的工艺质量.

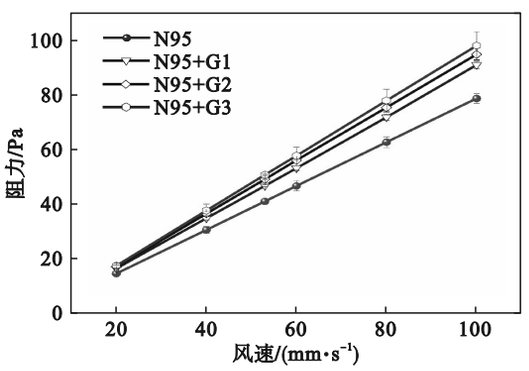


图4 不同风速下材料的洁净状态阻力特性

Fig. 4 Resistance characteristics of materials in clean state under different wind speeds

相较于N95口罩材料,3种复合过滤材料的阻力略有增加.在53 mm·s^{-1}风速下,N95口罩材料的过滤阻力为40.6 Pa,分别与G1,G2及G3复合后,其过滤阻力分别提升了4.1,5.3及7.9 Pa,相较原始阻力分别增长了10.10%,13.05%及19.46%.风速-阻力特性曲线的斜率直接反映了风速对过滤材料阻力的影响,由图4可知,几种复合过滤材料阻力特性曲线斜率由大到小为N95+G3>N95+G2>N95+G1.这可归因于阻力增长速率与所复合的纤维层过滤材料的厚度、填充率等特性之间的关联性.由表1可以看出,3种空气过滤材料中G3厚度最大,面密度最大,纤维也是最细的,然后依次是G2,G1.厚度越大,气流通过过滤材料的路径变长,同时纤维分布越密集,对气流的阻挡作用增强,从而导致阻力随风速增长速率大.

2.2 相对湿度对口罩材料及复合材料容尘量的影响

不论空气中是否存在粉尘,相对湿度都能影响口罩过滤材料的性能.不同相对湿度下4种材料的初始阻力如图5所示,50%湿度下4种材料初始阻力依次为40,44,47,49 Pa,90%RH时4种材料初始阻力已分别达到50,54,57,59 Pa,4种过滤材料的洁净状态阻力均随着相对湿度的提升而增大.一方面,相对湿度增加会提高空气的黏滞系数,导致通过滤材的黏滞阻力相应上升;另一方面,高湿度下在过滤材料表面会形成水膜,增加空气流动阻力,导致初始阻力上升[19].

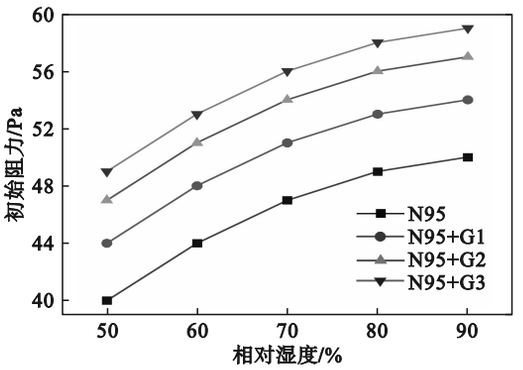


图5 4种材料初始阻力变化

Fig. 5 Initial resistance variation of four materials

在粉尘环境中,水蒸气可以影响颗粒物附着方式和粉尘层的形成,进而影响材料在容尘过程中的阻力增长速率.不同相对湿度下4种过滤材料容尘阻力的变化如图6所示.在试验的几个相对湿度下,4个试样的容尘阻力曲线都出现了交叉,说明容尘过程中材料的阻力增长速率与其初始阻力出现反转,即测试试样的初始阻力越小,其阻力增长速度越快,进而试样N95的容尘阻力逐渐赶超了其他3种复合材料.可以看出,增加的复合层虽然提高了材料的初始阻力,但也显著降低了材料在容尘过程中的阻力增长速率.4种试样的容尘阻力增长速率从高到低依次为N95>N95+G1>N95+G2>N95+G3,与4种试样的初始阻力排序完全相反.

在相对湿度由50%增加到60%,70%,80%,90%时,试样N95达到终阻力100 Pa所需时间从21 min分别提高到36,50,71,87 min,即随着相对湿度的增加,试样N95达到终阻力所需的时间显著延长,90%RH下容尘到终阻力的时间为50%RH环境下的4.1倍.与此同时,3种复合试样N95+G1,N95+G2,N95+G3在高湿度环境下达到终阻力的时间也明显增加,空气相对湿度从50%增加到90%时,对应的阻力增长时间增加了2倍多.这意味着相对湿度的增加减缓了所有试样的容尘阻力上升速率,使材料在达到终阻力前可以承载更多的粉尘,进而增大了所有试样的容尘量.众所周知,在确定的气流速度下,通过过滤材料的阻力是由纤维层和颗粒层对气流的限制造成的[27-28].在环境湿度较低时,粉尘颗粒具有较好的分散性,容易进入纤维层内部,堵塞气流通道;

同时,形成的粉尘层结构较为致密,对空气的阻力较大.随着相对湿度的提高,空气中的水蒸气含量增加,在颗粒间及颗粒和纤维间形成液桥,使得粉尘颗粒与过滤材料纤维间的黏附力增强,这种黏附力的增加有利于颗粒在过滤材料上形成稳定的粉尘层结构[29],使之具有更大的孔隙率,从而减缓了压降的增长速度,提高了容尘量[30].

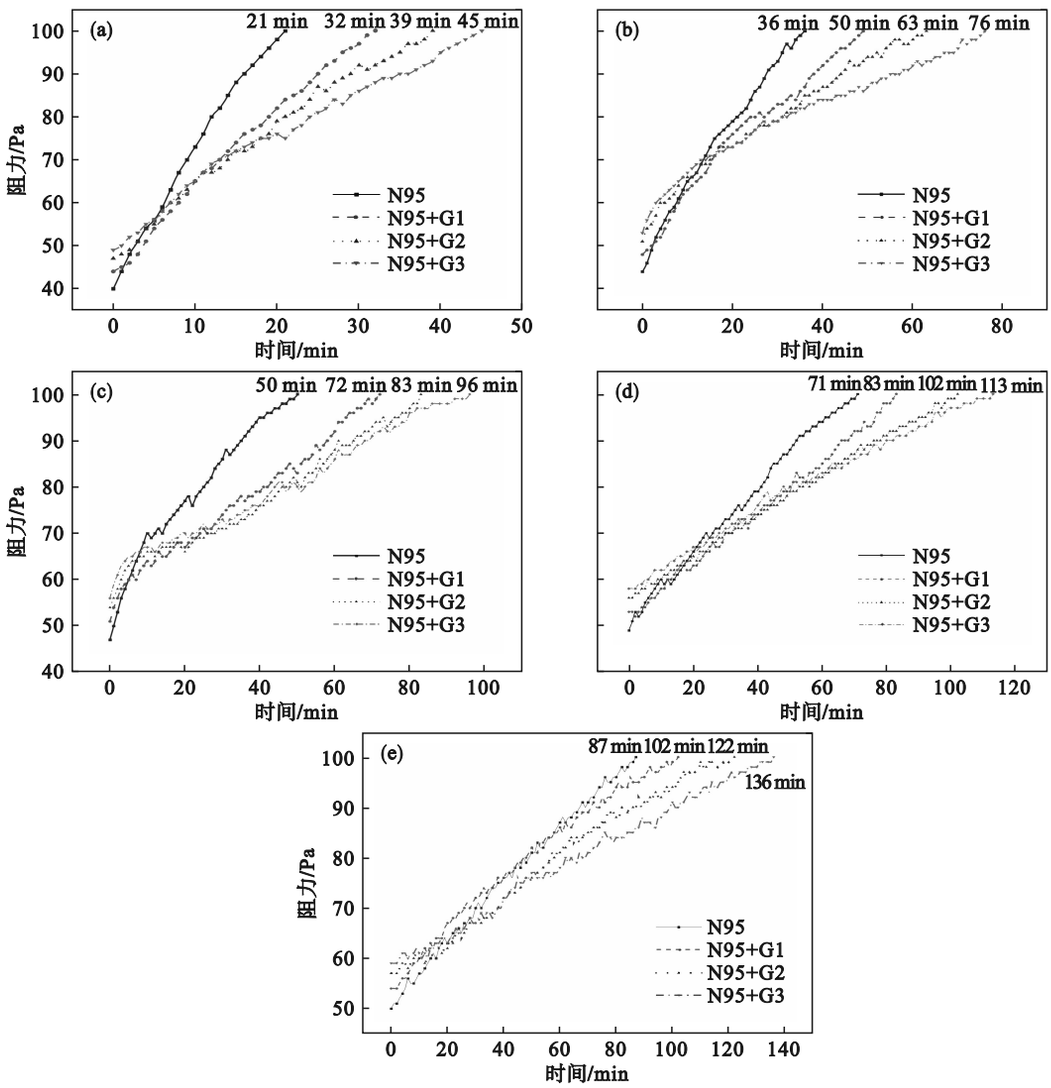


图6　过滤材料容尘阻力在5种相对湿度下的变化

Fig. 6　Variation of dust-holding resistance of filter materials under five RHs

(a)—50%RH; (b)—60%RH; (c)—70%RH; (d)—80%RH; (e)—90%RH.

对比表2中不同相对湿度下4种试样的容尘量,可以发现,相较于50%RH下的容尘量,在60%,70%,80%,90%RH下N95试样的容尘量分别提升了67%,133%,223%,317%,N95+G1的容尘量分别提升了66%,120%,191%,242%,N95+G2的容尘量分别提升了61%,112%,168%,218%,N95+G3的容尘量分别提升了54%,123%,176%,238%.可以看出,相对湿度对N95试样容尘量的影响要大于N95+G1,N95+G2,N95+G3这3个复合试样.从前文的分析可知,要提升材料的容尘量就需要形成疏松的粉尘层结构,G1,G2,G3就是因为具有比N95更加疏松的纤维层结构,使捕集的粉尘由N95试样表面的致密薄层变为竖向分布的疏松厚层,内部存在更多的空隙和通道,降低了空气通过的阻力,从而降低了容尘阻力增长速率,提高了容尘量.由此可知,高湿度与复合纤维层使容尘量提升的机理是类似的,在与N95复合的纤维层过滤材料已经将粉尘竖向分布变疏松的基础上,相对湿度对N95+G1,N95+G2,N95+G3复合试样容尘量的影响就没有对单独N95试样那么显著.因此,与N95试样相比,N95+G1,N95+G2,N95+G3容尘量的提升幅度在50%RH时分别为52%,91%,101%,90%RH时则分别为25%,46%,63%.

表2 不同相对湿度下4种过滤材料的容尘量

Table 2 Dust-holding capacities of four filter materials under different RHs

相对湿度/%	容尘量/(g·m^{-2})			
	N95	N95+G1	N95+G2	N95+G3
50	1 130.40	1 714.15	2 155.28	2 267.00
60	1 890.10	2 845.49	3 480.25	3 874.30
70	2 630.35	3 765.83	4 575.55	5 063.60
80	3 655.88	4 986.60	5 765.98	6 261.95
90	4 709.20	5 867.05	6 861.55	7 663.20

尽管相对湿度影响了3种复合材料容尘量的提升幅度,但是纤维层过滤材料与N95试样的复合对其容尘量的提升效果是确切和显著的.在试验条件下,G1,G2,G3与N95复合后的容尘量分别达到了N95试样的1.25~1.62,1.46~1.91和1.63~2.01倍.可知,3种纤维层过滤材料中,G3与N95复合后容尘性能提升的幅度最大,其次是G2,G1.这是因为在厚度方面G3>G2>G1,而厚度越大的纤维层过滤材料能够为捕集的粉尘提供更多的赋存空间,使得粉尘颗粒间的空隙变大,空气流通的阻力变小;在纤维直径方面G1>G2>G3,纤维越细,对颗粒物的捕集效率也就越高;粉尘通过厚度大的过滤材料的路径长,与纤维接触机会增多,被捕获的可能性也相应提高;另外,G3材料面密度最大,纤维分布最为密集,其次是G2,G1,越密集的纤维网络能够更有效地拦截粉尘颗粒,减少粒子的穿透率,这些特性使得G3材料的过滤效率高于G2,G1,使得更少的粉尘穿透G3落到N95材料上,同时延缓了纤维层材料后侧N95材料的阻力增长.因此,3种纤维层过滤材料中厚度最大、纤维分布最密集的G3与N95材料复合,能够更好地捕获与拦截粉尘颗粒,从而表现出最优的容尘性能.

2.3 复合材料结构对容尘量的影响分析

在不同相对湿度条件下,不同纤维层过滤材料试样与N95的复合材料容尘性能呈现出显著差异,这一现象归因于复合的纤维层过滤材料本身结构的不同.从前文的分析可知,影响容尘性能的纤维层过滤材料结构参数主要是厚度H、纤维直径D以及面密度ρ这3个关键因素.因此,与纤维层过滤材料复合后的容尘量增加量ΔW的相关性可以表示为

$$\Delta W \sim f(H,\ D,\ \varphi,\ \rho). \tag{3}$$

式中:ΔW为容尘增量,kg·m^{-2};H为空气过滤棉的厚度,mm;D为空气过滤棉的纤维直径,μm;ρ为纤维层过滤材料的面密度,kg·m^{-2};φ为环境相对湿度.

可以发现,$\frac{\Delta W}{\rho}$为无量纲量,$\frac{H}{D}$为无量纲量,环境相对湿度RH本身就是一个无量纲量.通过试验数据拟合的结果如图7所示,回归关系式的决定系数R^2=0.915 44,可知拟合的关系式可以很好地表征各无量纲参量间的相关性.

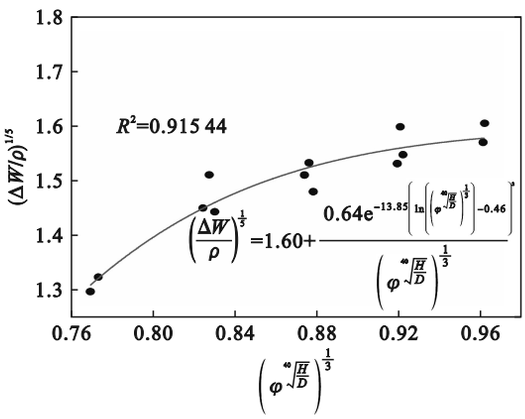


图7 无量纲量的拟合相关性

Fig. 7 Fitting correlation of dimensionless quantities

因此,可以构建出N95口罩复合纤维层过滤材料后的容尘增量与纤维层过滤材料面密度、厚度、纤维直径以及环境相对湿度的关系式如下:

$$\left(\frac{\Delta W}{\rho}\right)^{\frac{1}{5}}=1.60+\frac{0.64e^{-13.85\left(\ln\left(\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)-0.46\right)^2}}{\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}}. \tag{4}$$

即复合材料的容尘增量:

$$\Delta W=\left(1.60+\frac{0.64e^{-13.85\left(\ln\left(\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)-0.46\right)^2}}{\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^5\cdot\rho. \tag{5}$$

化简得

$$\Delta W=\left(1.60+0.034\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}-13.85\ln\left(\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)+11.74}\right)^5\cdot\rho. \tag{6}$$

对式(6)的单调性进行分析,设$x=\left(\varphi\sqrt[40]{\frac{H}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}$,$0<x<1$,设$y=\Delta W/\rho$,得

$$y=(1.60+0.17x^{-13.85\ln x+11.74})^5. \tag{7}$$

对式(7)求导后可知,y在x的取值区间内随x

的增大而增大.因此,该关系式能很好地表征试验现象:对于特定纤维层过滤材料,其厚度、纤维直径以及面密度均为定值,随着相对湿度的增加,纤维层过滤材料与N95口罩所构成的复合材料的容尘能力会相应增强.进一步地,当环境相对湿度与纤维层过滤材料面密度一定时,纤维层过滤材料的厚度与纤维直径之比越大,其容尘量也随之增大.此外,该关系式通过量化多种影响容尘量的因素,为选择具有更高容尘性能的N95复合材料提供了科学依据.具体而言,采用面密度较大且厚度与纤维直径比值较大的纤维层过滤材料,与N95口罩复合后,将能展现出更好的容尘性能.

2.4　容尘性能综合分析

为更好地评价不同材料的容尘性能,消除材料初始阻力和终止阻力的影响,本文采用前文定义的容尘性能综合评价指标Q_{DHC}对4种试样的容尘性能进行对比分析.由该指标的定义可知,Q_{DHC}值越高,代表过滤材料在测定风速下的容尘能力越强.不同相对湿度下4种材料的Q_{DHC}对比如图8所示.

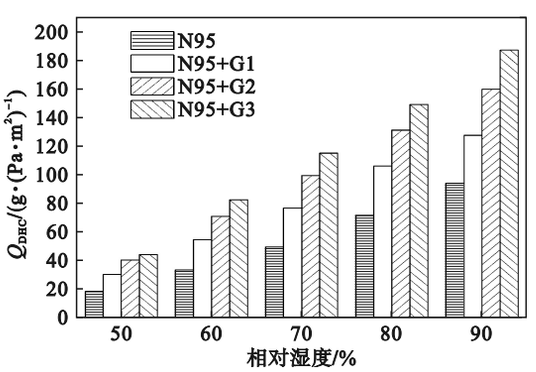


图8　不同相对湿度下4种材料容尘性能综合评价指标对比

Fig. 8　Comparison of comprehensive evaluation indexes for dust-holding performance of four materials under different RHs

可以看出,随着相对湿度的增加,4种材料容纳粉尘的能力有显著提升.在50%RH下,N95+G1,N95+G2,N95+G3的容尘性能综合评价指标分别为N95的1.62,2.16,2.36倍;在90%RH下的提升幅度虽然略有下降,N95+G1,N95+G2,N95+G3的容尘性能综合评价指标仍能达到N95的1.35,1.70,1.98倍.因此,相同相对湿度下,4种材料的综合容尘性能由高到低依次为:N95+G3>N95+G2>N95+G1>N95.由此可见,N95口罩与纤维层过滤材料复合后的初始阻力虽然略有提高,但整体容尘性能的提升更加显著,可以有效延缓口罩的容尘阻力增长速度,延长口罩在不同相对湿度环境下的使用时间,提高作业人员佩戴期间的舒适性.

3　结　　论

1)相对湿度显著减缓阻力增长速率并提升容尘量.在粉尘环境中,相对湿度增加通过液桥效应促进粉尘层形成疏松结构,显著延长材料达到终阻力(100 Pa)的时间.N95口罩在90%RH时的阻力增长时间为50%RH下的4.2倍.同时,湿度提升使N95的容尘量在90%RH下达到4 709.2 g·m^{-2},较50%RH提升317%;复合材料N95+G3容尘量提升幅度达238%,验证了相对湿度对粉尘层孔隙率的调控作用.

2)复合纤维层材料显著优化容尘性能.与N95口罩复合的纤维层(G1/G2/G3)通过增加粉尘赋存空间和优化拦截路径,显著提升容尘量.在50%RH下,N95+G3的容尘量较N95提升101%;容尘性能综合评价指标Q_{DHC}为N95的1.98~2.36倍.G3因最大厚度(4.475 mm)和最细纤维直径(28.26 μm),表现出最优性能,其容尘量在高湿环境下达7 663.2 g·m^{-2}.

3)构建的容尘量关系式揭示了面密度、厚度与纤维直径比值的关键作用.该模型表明,选择较高面密度、大厚度与纤维直径比的纤维层(如G3)材料与N95复合,可最大化容尘性能,为口罩材料定量化改进提供理论参考.

4)复合纤维层设计(尤其是G3)有效延长了口罩在高湿高尘环境中的使用寿命,减少更换频率.该方案适用于矿山、纺织等典型场景,兼顾防护效率与佩戴舒适性,对降低职业健康风险具有显著的实际意义.

参考文献:

[1] 黄心如.我国尘肺病问题多主体协同治理机制与运行演化研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
(Huang Xin-ru. Multi-agent collaborative governance mechanism and operation evolution research of pneumoconiosis problem in China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.)

[2] 国家卫生健康委员会规划发展与信息化司.2023年我国卫生健康事业发展统计公报[J].中国病毒病杂志,2024,14(5):416-424.
(Department of Planning, Development, and Information Technology, National Health Commission of the People's Republic of China. Statistical bulletin of China's health development in 2023 [J]. *Chinese Journal of Viral*

Diseases, 2024, 14(5): 416-424.)

[3] Jia Z J, Ai Z T, Cao S C, et al. Effectiveness of respiratory protective equipment on source control of exhaled pollutants [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 86: 108742.

[4] Lawrence R B, Duling M G, Calvert C A, et al. Comparison of performance of three different types of respiratory protection devices [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2006, 3(9): 465-474.

[5] Kiely P M, Lian K Y, Napper G, et al. Influenza A (H1N1) and infection control guidelines for optometrists [J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2009, 92(6): 490-494.

[6] Fitzsimons J A . OSHA gives green light to use 'N95' respirators. occupational safety and health administration [J]. *Aids Alert*, 1995, 10(12): 154.

[7] Yang A K, Cai L L, Zhang R F, et al. Thermal management in nanofiber-based face mask [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3506-3510.

[8] Xu Y Q, Zhang X M, Hao X B, et al. Micro/nanofibrous nonwovens with high filtration performance and radiative heat dissipation property for personal protective face mask [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 423: 130175.

[9] 周福宝, 袁亮, 程卫民, 等. 矿井粉尘职业健康防护技术2013—2023年研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 5-15.
(Zhou Fu-bao, Yuan Liang, Cheng Wei-min, et al. Research progress on occupational health protection technology of mine dust from 2013 to 2023 [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(12): 5-15.)

[10] 梁海英, 吴振东, 刘永辉, 等. 重离子微米孔膜防尘口罩滤芯的研制[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(sup1): 745-748.
(Liang Hai-ying, Wu Zhen-dong, Liu Yong-hui, et al. Research on filter elements of microporous heavy-ion track-etched membrane for anti-dust mask [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(sup1): 745-748.)

[11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器: GB 2626—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
(State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Respiratory protection non-powered air-purifying particle respirator: GB 2626—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.)

[12] 朱金佗, 王亮, 何新建, 等. N95级个体防尘呼吸器仿真试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 165-172.
(Zhu Jin-tuo, Wang Liang, He Xin-jian, et al. Analogue simulation and experimental study on N95 individual dust prevention respirator [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(12): 165-172.)

[13] Zhuang Z Q, Coffey C C, Ann R B. The effect of subject characteristics and respirator features on respirator fit [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2005, 2(12): 641-649.

[14] 程文娟, 余艳艳, 余丹, 等. 自吸过滤式防尘口罩适合性与头面部尺寸关系分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2012, 30(5): 352-355.
(Cheng Wen-juan, Yu Yan-yan, Yu Dan, et al. The relationship between fit characteristics of two kinds of self-inhalation air-purifying dust respirators and head-face dimensions of subjects [J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2012, 30(5): 352-355.)

[15] 余艳艳, 程文娟, 余丹, 等. 自吸过滤式防尘口罩的适合性测试及改进[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2012, 30(5): 348-351.
(Yu Yan-yan, Cheng Wen-juan, Yu Dan, et al. Fit test and improvement of self-inhalation air-purifying dust respirator [J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2012, 30(5): 348-351.)

[16] Mahdavi A, Haghighat F, Bahloul A, et al. Particle loading time and humidity effects on the efficiency of an N95 filtering facepiece respirator model under constant and inhalation cyclic flows [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2015, 59(5): 629-640.

[17] Belkin N L. A century after their introduction, are surgical masks necessary?[J]. *AORN Journal*, 1996, 64(4): 602-607.

[18] Newnum J D. The effects of relative humidity on respirator performance [D]. The University of Iowa, Master of Science (MS), 2010.

[19] Gupta A, Novick V J, Biswas P, et al. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1993, 19(1): 94-107.

[20] Mostofi R, Bahloul A, Lara J , et al. Investigation of potential affecting factors on performance of N95 respirator [J]. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 2011, 28(1): 26-39.

[21] Fadare O O, Okoffo E D. Covid-19 face masks: a potential source of microplastic fibers in the environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 140279.

[22] Wu J W, Zhou H J, Zhou J Y, et al. Meltblown fabric vs nanofiber membrane, which is better for fabricating personal protective equipments [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, 36: 1-9.

[23] 中华人民共和国卫生部. 工业企业设计卫生标准: GBZ 1—2010[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
(Ministry of Health of the People's Republic of China. Hygienic standards for the design of industrial enterprises: GBZ 1—2010 [S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010.)

[24] Permana I, Agharid A P, Wang F. Performance improvement through CFD and field measurement in a unidirectional airflow cleanroom for wafer manufacture[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 100: 111715.

[25] Segovia J M, Huang C H, Mamishev M, et al. Performance of textile mask materials in varied humidity: filtration efficiency, breathability, and quality factor [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9360.

[26] Hinds W C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles [M]. Hoboken: Wiley, 2012: 1-504.

[27] Novick V J, Monson P R, Ellison P E. The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1992, 23(6): 657-665.

[28] Brown R. C. Review modern concepts of air filtration applied to dust respirators.[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1989, 33(4): 615-644.

[29] Zhou G Y, Low Z X, Feng S S, et al. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122952.

[30] Pan Z Y, Ou Q S, Romay F J, et al. Study of structural factors of structure-resolved filter media on the particle loading performance with microscale simulation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 304: 122317.