

# 多功能石墨烯熔喷空气过滤芯的制备与表征

闫森<sup>1</sup> 卢林<sup>2</sup> 岳海生<sup>2</sup> 牛钰清<sup>1</sup> 韩玲<sup>1</sup>

1. 西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048

2. 四川索玛新材料科技有限公司, 四川 成都 610400

**摘要:**本研究以聚丙烯(PP)和石墨烯母粒为原料,基于熔喷和插层技术,制备了PP熔喷布1<sup>#</sup>试样、双组分过滤棉2<sup>#</sup>试样及石墨烯熔喷布3<sup>#</sup>试样,并进一步制备了空气过滤芯。系统表征了PP熔喷布、双组分过滤棉及石墨烯熔喷布的拉曼光谱[确认2<sup>#</sup>试样含聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、3<sup>#</sup>试样含石墨烯]与热稳定性(3<sup>#</sup>试样初始热分解温度显著高于1<sup>#</sup>试样),并基于3类滤材的性能数据优化过滤效率、抗菌、抗病毒及甲醛去除率等多种核心功能指标,成功开发出兼具优异抗病毒、抗菌活性与高效除甲醛能力的高性能空气过滤芯。该滤芯可应用于室内空气净化、车内空气净化及工业过滤等领域,为有效应对复合空气污染挑战提供了技术方案。

**关键词:** 石墨烯;熔喷布;空气过滤芯;过滤;抗菌;除甲醛

中图分类号:TS 174

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)10-0027-10

## Preparation and characterization of multifunctional graphene melt-blown air filter cores

Yan Sen<sup>1</sup>, Lu Lin<sup>2</sup>, Yue Haisheng<sup>2</sup>, Niu Yuying<sup>1</sup>, Han Ling<sup>1</sup>

1. School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Sichuan Suoma New Material Technology Co., Ltd., Chengdu 610400, Sichuan, China

**Abstract:** In this study, polypropylene (PP) and graphene masterbatch were used as raw materials to prepare PP melt-blown nonwoven fabric 1<sup>#</sup> sample, bicomponent filter cotton 2<sup>#</sup> sample, and graphene melt-blown nonwoven fabric 3<sup>#</sup> sample based on melt-blown and intercalation technologies, and air filter cores were further fabricated. The Raman spectra of PP melt-blown nonwoven fabric, bicomponent filter cotton, and graphene melt-blown nonwoven fabric were systematically characterized [confirming that 2<sup>#</sup> sample contained polyethylene terephthalate (PET) and 3<sup>#</sup> sample contained graphene], and their thermal stability was also analyzed (which showed that the initial thermal decomposition temperature of 3<sup>#</sup> sample was significantly higher than that of 1<sup>#</sup> sample). Based on the performance data of the three types of substrates, various core functional indicators including filtration efficiency, antibacterial activity, antiviral activity, and formaldehyde removal

基金项目:除甲醛抗菌型石墨烯空气过滤材料研究(2025KJ-088)

收稿日期:2025-05-30

作者简介:闫森,男,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为气凝胶空气过滤

通信作者:韩玲,副教授,han.ling@xpu.edu.cn

rate were optimized, and a high-performance air filter core with excellent antiviral and antibacterial activities as well as efficient formaldehyde removal capability was successfully developed, which could be applied in fields such as indoor air purification, in-vehicle air purification, and industrial filtration, providing a technical solution for effectively addressing the challenge of complex air pollution.

**Keywords:** graphene; melt-blown nonwoven fabric; air filter core; filtration; antibacterial; formaldehyde removal

随着工业化进程的加速和城市化进程的持续推进,空气污染问题日益严重,其严重危害着人类健康和生态环境。空气中的颗粒物(PM)、有害气体(如甲醛、苯等)以及微生物(如细菌、病毒等)污染,已成为影响人类健康的突出问题<sup>[1-4]</sup>。当前空气净化领域,常规空气过滤芯主要功能集中于过滤颗粒物,而在抗菌、抗病毒及除甲醛等方面存在明显不足,难以满足人们日益增长的健康防护需求<sup>[5-6]</sup>。与此同时,当前社会生活中经空气传播的病毒频现,因此,开发一款兼具高效物理过滤与生物防护功能的多功能空气过滤芯十分紧迫。

传统空气过滤材料以聚丙烯(PP)熔喷布为主,利用超细纤维(直径2~5 μm)交错形成的三维网状结构,进一步实现对颗粒物的机械拦截<sup>[7-8]</sup>,再经驻极处理实现对颗粒物的高效过滤。然而,普通PP熔喷滤芯能实现基础颗粒过滤,其热稳定性差、驻极的电荷容易在湿热环境中发生散逸,且无抗菌抗病毒能力,对甲醛等挥发性有机物的吸附能力有限,故难以满足日益严格的室内空气高质量要求<sup>[9-11]</sup>。

石墨烯具有独特的二维纳米结构和高比表面积等特性,在过滤过程中其不仅能通过物理屏障作用有效阻挡微小颗粒,还可以利用范德华力捕获甲醛分子并将其固定在吸附剂表面,从而实现甲醛的高效去除<sup>[12-13]</sup>;此外,其纳米级尖锐边缘能够破坏微生物细胞膜,实现抗菌功能;同时,石墨烯能够干扰病毒的吸附和侵入,抑制病毒复制,具有抗病毒作用<sup>[14-15]</sup>。近年来,石墨烯改性滤芯多通过用静电纺或石墨烯类杂化方式实现。例如,Li等<sup>[16]</sup>通过静电纺丝制备氧化石墨烯/聚丙烯腈(GO/PAN)复合膜,并发现该膜对PM<sub>2.5</sub>的过滤效率可达99.97%,且压降仅为8 Pa;郑茜璞等<sup>[17]</sup>制备的石墨烯/PAN/PP复合膜对金黄色葡萄球菌的抑菌率最高可达92%,且在风速0.4 m/s条件下,对空气中PM<sub>2.5</sub>等可吸入颗粒物的过滤效率

达99.2%;赵倩等<sup>[18]</sup>指出银(Ag)、金属有机骨架(MOF)等抗菌剂虽然可以提升口罩材料的抗菌性,却难以兼顾过滤阻力;浙江大学研究团队开发的石墨烯口罩,对PM<sub>2.5</sub>的过滤效率为96.4%,对大肠埃希菌的抑菌率为99.8%,该口罩兼具高效颗粒拦截、抗菌及挥发性有机物(VOCs)去除功能。当前研究表明,石墨烯在空气过滤领域的应用多集中于单一性能优化,而如何通过材料设计与工艺创新,将石墨烯的多重优势(如高效物理拦截、甲醛催化降解、广谱抗菌抗病毒等)整合于滤芯中,实现关键功能的协同增效与性能平衡,仍是本领域有待攻克的重要课题。

本研究对四川索玛新材料科技有限公司通过熔喷-纤维插层工艺制备的石墨烯熔喷滤材开展系统表征,包括拉曼光谱与热稳定性分析等;并基于该基材及PP熔喷布、双组分过滤棉的功能特性,对由此加工而成的多功能石墨烯熔喷过滤芯进行性能优化,重点提升其过滤效率、抗菌、抗病毒及甲醛去除率等核心指标,以期获得兼具病原体灭活与化学污染去除能力的过滤芯,广泛应用于室内、车载空间及工业空气净化系统。

## 1 测试与表征

### 1.1 原料及试样制备

原料:PP母粒[熔融指数为1 200 g/(10 min)],石墨烯母粒[熔融指数为800 g/(10 min)],石墨烯/聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)复合短纤维(长度3~8 mm,线密度1.5~3.0 dtex)。

滤材试样的制备:PP熔喷布(1<sup>#</sup>试样,面密度25 g/m<sup>2</sup>)、双组分过滤棉(2<sup>#</sup>试样,面密度40、50、60、100、120 g/m<sup>2</sup>)和石墨烯熔喷布(3<sup>#</sup>试样,面密度25 g/m<sup>2</sup>)均由四川索玛新材料科技有限公司制备。其中,1<sup>#</sup>试样为纯PP熔喷布,采用熔喷技术制备;2<sup>#</sup>

试样为双组分过滤棉,通过在线插层工艺制备,即在石墨烯/PP 复合熔喷纤维成网过程中,将石墨烯/PET 复合短纤维在线引入熔喷射流,与 PP 超细纤维相互缠结,短纤维主要分布于 PP 熔喷基体纤维

网络内部,形成具有三维稳定结构的复合滤材(制备流程见图 1);3# 试样为石墨烯熔喷布,采用 PP 与石墨烯母粒熔融共混+熔喷技术制备,石墨烯均匀分散于 PP 熔喷基体中。

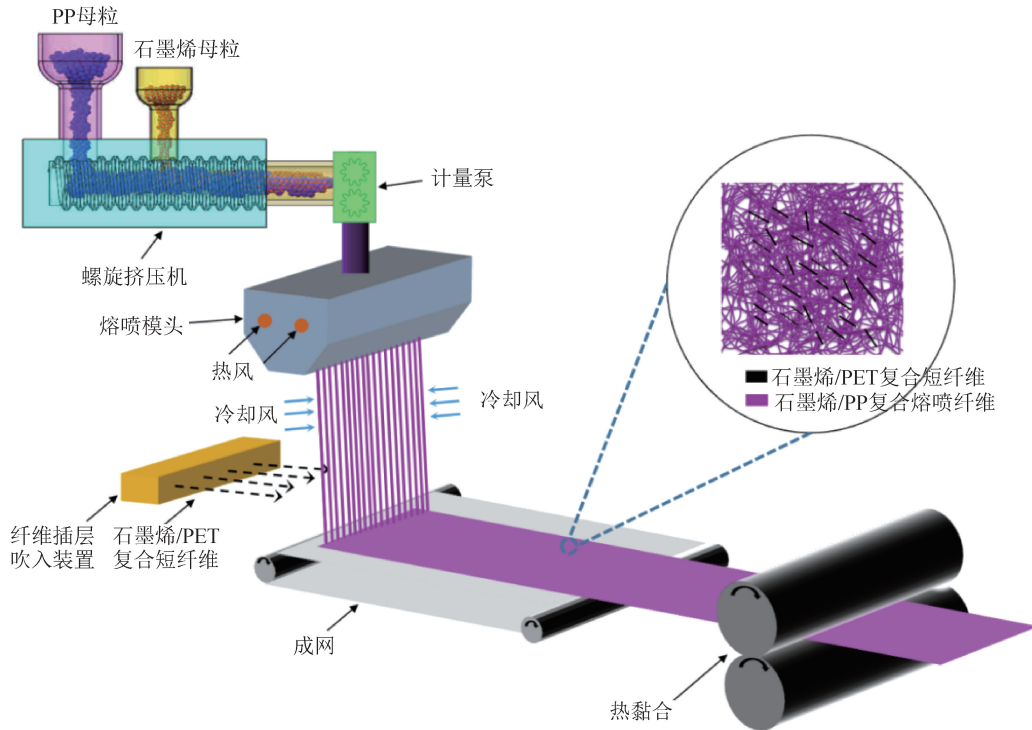


图 1 双组分过滤棉的制备示意  
Fig. 1 Illustration of preparation of bicomponent filter cotton

## 1.2 测试与表征

### 1.2.1 拉曼光谱测试

根据 GB/T 33252—2016《纳米技术 激光共聚焦显微拉曼光谱仪性能测试》标准,采用 LabRAM HR800 型拉曼光谱仪,设置激光器波长为 514 nm,拉曼位移范围为 500~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,试样尺寸为 5 mm×5 mm,分别对 3 种试样进行测试,以分析不同试样的成分结构。

### 1.2.2 热重分析测试

根据 GB/T 37631—2019《化学纤维 热分解温度试验方法》标准,采用 METTLER TGA2 型热重分析仪,在氮气气氛下进行测试。升温速率为 15  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,测试温度范围分别为 25~800  $^{\circ}\text{C}$  (1# 试样)、25~600  $^{\circ}\text{C}$  (2# 试样)和 25~1 000  $^{\circ}\text{C}$  (3# 试样)。通过观察试样质量随温度的变化,分析试样在不同测试温度下的热分解情况。

### 1.2.3 过滤性能测试

过滤性能测试参照 GB/T 14295—2019《空气过

滤器》标准。测试在相对湿度为(90±5)%、温度为(20±5)  $^{\circ}\text{C}$  的环境条件下进行,采用 TSI 8130 型自动化滤料测试仪,使用计数中位径为(0.26±0.075)  $\mu\text{m}$  的氯化钠气溶胶,气体流量为 32 L/min、测试面积为 100  $\text{cm}^2$ 。过滤效率( $\eta_a$ ,%)如式(1)所示:

$$\eta_a = \left(1 - \frac{C_d}{C_u}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_u$  为上游气溶胶质量浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $C_d$  为下游气溶胶质量浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2.4 甲醛去除率测试

甲醛去除率测试严格依据 JC/T 1074—2021《室内空气净化功能涂覆材料净化性能》标准在规定的试验舱环境条件下进行,即温度为(25±1)  $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为(50±5)%。本研究采用自制的双舱式动态甲醛测试系统(图 2),评估滤材对甲醛的过滤性能:该装置由一个 30  $\text{cm}^3$  的密闭测试舱构成,舱内被划分为上下两层,中间用于安装待测滤材,下层

布置甲醛发生源,上层连接外置风机。测试时,风机在舱内形成由下至上的稳定气流,迫使下层的甲醛气体持续穿透滤材;甲醛在穿透滤材过程中,被滤材中含有的功能组分(如石墨烯)吸附或催化去除,净化后的气体进入上层。通过实时测定滤材进口(下层舱)与出口(上层舱)的甲醛平均质量浓度,根据式(2)计算滤材的甲醛去除率( $\eta_b, \%$ ),根据式(3)计算单位时间单位面积的甲醛去除量( $Q, \text{mg/h}$ ):

$$\eta_b = \left(1 - \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$Q = (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) \times F \quad (3)$$

式中: $C_{\text{in}}$  为下层舱的甲醛平均质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $C_{\text{out}}$  为上层舱的甲醛平均质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $F$  为风机产生的气体体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。



图2 双舱式动态甲醛测试系统

Fig. 2 Dual-chamber dynamic formaldehyde testing system

### 1.2.5 抗菌性能测试

根据 GB/T 20944.3—2008《纺织品 抗菌性能的评价 第3部分:振荡法》标准,测试试样对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌和白念珠菌的抗菌性能。每个试样烧瓶内的活菌浓度( $K, \text{CFU}/\text{mL}$ )按式(4)计算(结果保留2位有效数字),抑菌率( $Y, \%$ )按式(5)计算(结果保留2位有效数字):

$$K = Z \times R \quad (4)$$

式中: $Z$  为2个平板菌落数的平均值; $R$  为稀释倍数。

$$Y = \frac{W_1 - Q_1}{W_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $W_1$  为对照样 18 h 振荡接触后烧瓶内活菌浓

度的平均值,  $\text{CFU}/\text{mL}$ ;  $Q_1$  为抗菌样 18 h 振荡接触后烧瓶内活菌浓度的平均值,  $\text{CFU}/\text{mL}$ 。

### 1.2.6 抗病毒性能测试

根据 ISO 18184:2025 *Textiles—Determination of Antiviral Activity of Textile Products* (《纺织品 纺织品抗病毒活性的测定》)标准,测试试样对甲型流感病毒(A/PR/8/34 株 H1N1)的抗病毒性能,选用 MDCK 细胞作为宿主细胞。通过病毒抑制率( $R, \%$ )指标量化评估试样的抗病毒效果,其中病毒抑制率按式(6)计算。

$$R = (A - C)/A \times 100\% \quad (6)$$

式中: $A$  为未经抗病毒处理试样接种后及时回收的病毒滴度(用 50% 组织培养感染剂量表征)平均值,  $\text{mL}$ ;  $C$  为经抗病毒处理试样接种规定时间后回收的病毒滴度平均值,  $\text{mL}$ 。

## 1.3 石墨烯纤维插层工艺

### 1.3.1 插层技术定义

本文中,插层(intercalation)特指在熔喷纤维尚未完全固化、仍处于高弹态时,将经表面处理的石墨烯/PET 复合短纤维借助高速气流,强行楔入在线生产且未接收成网的石墨烯/PP 复合熔喷纤维之间,形成“主纤维-短纤维-主纤维”的三维互锁网络结构。该过程不同于传统层状材料的离子/分子插层,而是通过机械-气流耦合,实现微米-纳米尺度的纤维间物理嵌合,同步提高比表面积、孔隙梯度及功能组分含量。

### 1.3.2 插层技术具体工艺步骤与参数

将石墨烯/PET 复合短纤维在标准温湿度(20 °C、65% RH)下经精开松机开松、高速梳理机梳理后,由纤维插层吹入装置定量喂入。该装置安装在熔喷模头喷丝孔下方 5~20 cm 处,通过环缝式喷嘴以 2~50 m/s 的压缩气流速度将石墨烯/PET 复合短纤维沿 15°~90° 的可调角度连续吹入石墨烯/PP 复合熔喷纤维中(图 1)。在熔喷工艺的热牵伸气流(速度 420 m/s)作用下,石墨烯/PET 复合短纤维被充分分散并嵌入石墨烯/PP 复合熔喷纤维之间,形成三维梯度插层结构;随后经辊筒接收、冷风快速冷却成网,再经分切、收卷工序,制得石墨烯质量分数为 1%~10% 的多功能石墨烯复合材料。工艺参数经正交试验优化后可知:石墨烯/PET 复合短纤维质量分数含量为 5%、吹送速度为 30 m/s、喷嘴距纤维流为 10 cm、吹送角度为 45° 时,可实现石

墨烯/PET 复合短纤维随机-取向协同分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉曼光谱结果分析

如图 3 所示,拉曼光谱分析结果表明:1<sup>#</sup>试样在 2 750~3 250  $\text{cm}^{-1}$  范围内呈现显著的 C—H 伸缩振动特征峰,具体峰位为 2 850  $\text{cm}^{-1}$  和 2 920  $\text{cm}^{-1}$ ,为 PP 的典型特征峰;2<sup>#</sup>试样除 PP 特征峰外,在 1 729  $\text{cm}^{-1}$  处检测到酯基(C=O)伸缩振动峰,2 960  $\text{cm}^{-1}$  处检测到 C—H 伸缩振动特征峰,充分证实了 PET 的存在,但石墨烯的 D 峰强度较低;3<sup>#</sup>试样在 1 327  $\text{cm}^{-1}$  处出现明显的 D 峰,该峰由  $\text{sp}^3$  杂化碳原子的缺陷诱导振动引起<sup>[19]</sup>,证实 3<sup>#</sup>试样中成功引入了石墨烯成分,但 D 峰强度较弱,表明石墨烯含量较低。

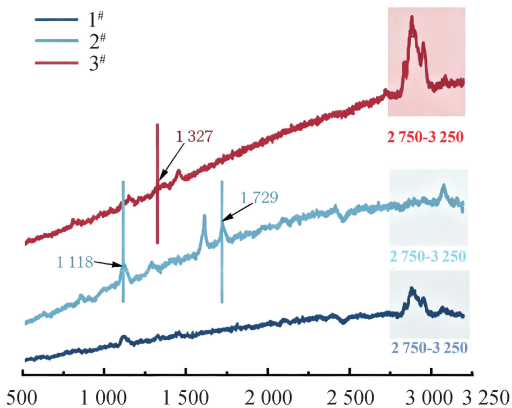


图 3 3 类滤材的拉曼光谱

Fig. 3 Raman spectra of three types of filter materials

### 2.2 热性能分析

对 3 类滤材进行热性能分析(图 4),其中,2<sup>#</sup>试样面密度选择 40  $\text{g}/\text{m}^2$ ,旨在排除高面密度下纤维堆叠对热量传递的干扰,避免因纤维层过厚导致的热阻差异掩盖材料本征热稳定性,以更精准地体现石墨烯与 PET、PP 组分的协同作用对热稳定性的增强效应。结果表明,3<sup>#</sup>试样展现出显著优于常规材料的热稳定性,具体表现为初始热降解温度可达 414  $^{\circ}\text{C}$ (质量保留率为 98.64%),比 1<sup>#</sup>试样(326  $^{\circ}\text{C}$ )和 2<sup>#</sup>试样(355  $^{\circ}\text{C}$ )分别高出 88  $^{\circ}\text{C}$ 和 59  $^{\circ}\text{C}$ ;主分解阶段延后至 467  $^{\circ}\text{C}$ (质量保留率达 49.09%),且高温区表现出更快的分解速率(DTG 峰值 473  $^{\circ}\text{C}$ ,质

量损失速率 2.46%/ $^{\circ}\text{C}$ )。这种优异的性能主要源于石墨烯独特的物理化学特性:首先,石墨烯纳米片层在熔喷布中形成的三维网络结构有效阻隔了热量传递,延缓了聚合物分子链的热运动;其次,石墨烯出色的导热性能使材料在高温区热量分布更均匀,促使分子链同步断裂,表现为更集中的分解峰;最后,石墨烯在高温下形成的稳定碳骨架(800  $^{\circ}\text{C}$ 质量残余率为 0.34%)进一步提升了材料的高温稳定性。相比之下,2<sup>#</sup>试样因含有热稳定性较好的 PET,其性能介于 1<sup>#</sup>试样和 3<sup>#</sup>试样之间,但缺乏石墨烯的多重增强效应。结果表明,2 种石墨烯复合工艺均能有效提升材料热稳定性。

### 2.3 过滤性能分析

为了合理对比 3 类滤材的过滤性能,本文采用面密度为 120  $\text{g}/\text{m}^2$  的 2<sup>#</sup>试样进行试验,该规格为 2<sup>#</sup>试样在过滤性能测试中的代表性工艺参数,便于直接对比不同材料的过滤能力差异。分析 3 种滤材对不同粒径的 NaCl 颗粒的过滤效率[图 5a)],以及不同面密度的 2<sup>#</sup>试样的过滤效率[图 5b)]发现,3<sup>#</sup>试样展现出最优异的  $\text{PM}_{0.3}$  过滤效率(98.2%)。这主要得益于以下几个关键因素:首先,石墨烯独特的二维纳米片层结构在熔喷布中形成了更为精细的三维网络结构,这种结构显著增加了材料的比表面积,为颗粒物提供了更多的接触和捕获位点。其次,通过精准调控插层工艺,石墨烯/PET 复合短纤维在石墨烯/PP 复合熔喷纤维中的均匀分布形成了多尺度的纤维-片层复合结构,这种结构既能保持适宜的孔隙率以维持较低的过滤阻力,又能通过纳米片层边缘对气流产生的微扰动增加颗粒与纤维的碰撞概率,从而显著增强过滤效率。值得注意的是,虽然 2<sup>#</sup>试样通过增加面密度提升了过滤效率,但其对  $\text{PM}_{0.3}$  的过滤效率(96.3%)仍低于 3<sup>#</sup>试样,这说明仅增加材料用量难以显著提升过滤效果,而石墨烯的纳米增强效应更显著。特别地,3<sup>#</sup>试样在实现超高过滤效率(对  $\text{PM}_{0.5}$  达 99.9%)的同时,仍能保持合理的过滤阻力,这归功于石墨烯插层工艺优化了纤维网络的孔隙分布,既保留了足够的通孔结构维持气流畅通,又通过纳米片层构建了高效的颗粒拦截网络。相比之下,1<sup>#</sup>试样由于缺乏精细的结构调控,其对  $\text{PM}_{0.3}$  的过滤效率最低(85.0%)。测试结果充分证实了石墨烯插层技术在提升过滤材料过滤

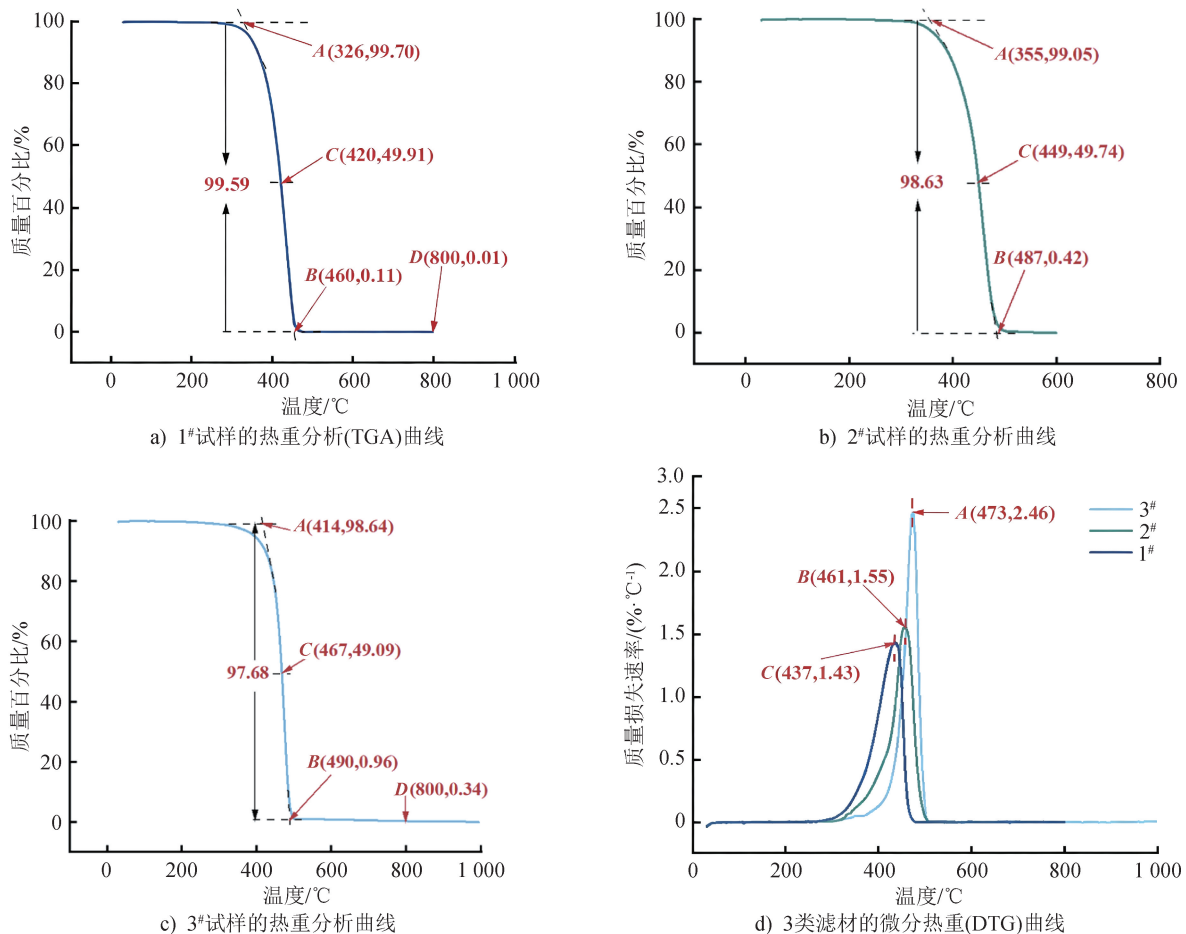


图4 3类滤材的热性能分析

Fig. 4 Thermal performance analysis of three types of filter materials

性能方面具有独特优势,即在不显著增加面密度和过滤阻力的前提下,通过纳米结构设计可进一步提升过滤效率。

为进一步评估3类滤材在空气过滤芯中的应用价值,分别对 $0.5\ \mu\text{m}$ 气溶胶进行过滤[图5c]。 $0.5\ \mu\text{m}$ 是气溶胶中典型的“最难过滤粒径”,该尺寸颗粒因扩散效应较弱和惯性碰撞尚未生效而拦截难度最高。结果显示:3类滤材的过滤效率均不小于99.1%,说明滤材具备对细微污染物的核心净化能力;3类滤材的过滤阻力均不大于 $17.1\ \text{Pa}$ ,说明气流通过滤材时的能量损耗低,滤材具备高效低阻的实用性特征和效率-阻力平衡性能,滤材适合在空气过滤芯中应用。

#### 2.4 除甲醛性能分析

石墨烯因其独特的二维蜂窝状晶格结构和超高比表面积而呈现出高效吸附性能。相同质量的石墨烯与活性炭相比,石墨烯对甲醛的饱和吸收量是活

性炭饱和吸收量的116倍<sup>[20-21]</sup>。采用自制的双舱式动态甲醛测试系统(图2),以3#试样为待测滤材,1#试样作为对照组,实时测定滤材进口(下层舱)与出口(上层舱)的甲醛浓度,并依据式(2)计算得出滤材的甲醛去除率。试验结果表明:3#试样在1 h内甲醛去除率较1#试样提升40%,延长测试时间至2 h,3#试样的甲醛去除率可达97%以上,表明石墨烯成分的增加可有效提高滤材的甲醛去除率。

#### 2.5 抗菌性能分析

通过对表1抗菌试验数据的深入分析发现,3#试样展现出的高效广谱抗菌性能(抑菌率均 $\geq 99\%$ )主要源于石墨烯独特的抗菌机制:首先,石墨烯纳米片层锋利的边缘能够物理切割细菌细胞膜,导致革兰氏阴性菌(如大肠埃希菌)和革兰氏阳性菌(如金黄色葡萄球菌)的细胞内容物泄漏<sup>[22]</sup>,这解释了试样活菌浓度分别降至 $3.6 \times 10^2\ \text{CFU/mL}$ 和 $<1\ \text{CFU/mL}$ 的现象;石墨烯凭借疏水作用及 $\pi-\pi$ 堆

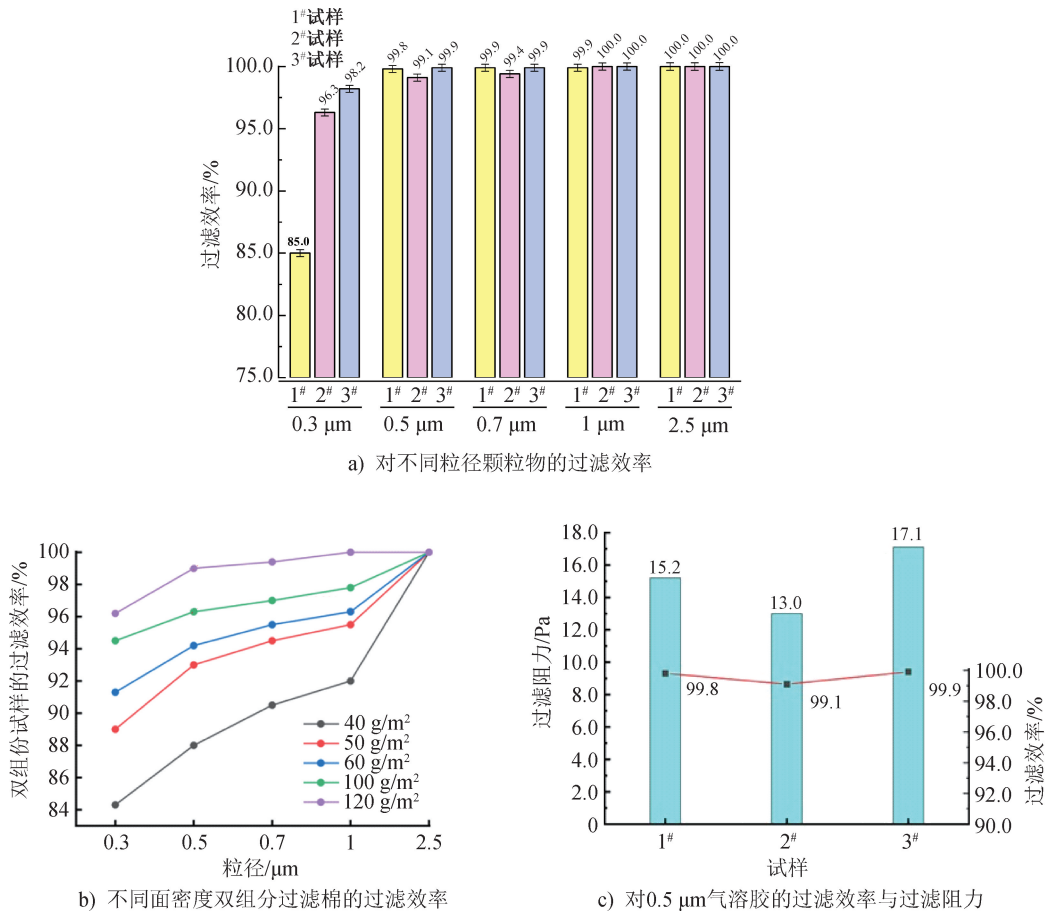


图 5 3 类滤材的过滤性能分析

Fig. 5 Filtration performance analysis of three types of filter materials

积作用与微生物脂质膜紧密结合,导致膜因张力失衡而破裂<sup>[23]</sup>;同时其催化生成的活性氧(ROS)可进一步氧化膜脂及胞内关键酶,干扰白念珠菌的呼吸链与能量代谢,最终导致细菌死亡<sup>[24]</sup>。这种“物理-

化学-界面”协同作用实现了试样抗菌性能远超行业标准(抑细菌率 $\geq 70\%$ ,抑真菌率 $\geq 60\%$ ),该滤材在医疗防护和空气过滤等需要高效抑菌的领域具有重要的应用潜力。

表 1 3# 试样的抗菌测试结果

Tab. 1 Antibacterial test results of 3# sample

试验菌种	初始活菌浓度/ (CFU·mL <sup>-1</sup> )	18 h 后活菌浓度/(CFU·mL <sup>-1</sup> )		抑菌率/%
		对照样	抗菌样	
大肠埃希菌	2.4×10 <sup>4</sup>	4.5×10 <sup>7</sup>	3.6×10 <sup>2</sup>	99
金黄色葡萄球菌	2.4×10 <sup>4</sup>	5.4×10 <sup>6</sup>	<1	>99
白念珠菌	1.9×10 <sup>4</sup>	4.1×10 <sup>5</sup>	6.5×10 <sup>2</sup>	99

## 2.6 抗病毒性能分析

病毒抑制率是评估材料抗病毒性能的关键指标。病毒抑制率反映了材料对病毒的抑制或灭活能力<sup>[25-27]</sup>,病毒抑制率高代表材料能高效减少病毒数量,降低人体感染风险。由表 2 可以看出;3# 试样对甲型流感病毒表现出优异的抗病毒性能,病毒抑制

率可达 92.09%,说明 3# 试样能有效降低病毒滴度,可以减少具有完整感染能力的病毒数量,从而降低感染概率,抑制病毒的感染能力。分析其原因在于,石墨烯的高比表面积和广谱抗菌特性使其能够有效吸附并抑制病毒的活性,使石墨烯熔喷布具有高效的抗病毒性能。

表 2 3<sup>#</sup>试样病毒抑制率

Tab. 2 Antiviral activity rates of 3<sup>#</sup> sample

测试病毒及宿主	测试分组	病毒滴度/mL			平均值	病毒抑制率/%
		试验 1	试验 2	试验 3		
甲型流感病毒	0 h 对照组	$9.35 \times 10^5$	$9.35 \times 10^5$	$2.00 \times 10^6$	$1.29 \times 10^6$	92.09
A/PR/8/34 株 H1N1	8 h 对照组	$6.32 \times 10^5$	$4.28 \times 10^5$	$6.32 \times 10^5$	$5.64 \times 10^5$	
宿主: MDCK 细胞	8 h 测试组	$9.35 \times 10^4$	$9.35 \times 10^4$	$1.18 \times 10^5$	$1.02 \times 10^5$	

### 2.7 空气过滤芯的制备及其性能分析

为了验证石墨烯熔喷布制成的汽车用空气过滤芯的性能,本研究基于石墨烯熔喷布的不同结构与复合工艺,制成 3 类车用石墨烯滤芯,并与某品牌商用滤芯进行性能对比。其中:G-1 采用 3 层复合结构,其中间层为具有独特熔喷结构的 3<sup>#</sup>试样,上下层为 1<sup>#</sup>试样;G-2 同样采用 3 层复合结构,上层为 3<sup>#</sup>试样,中间层为 PP-PET 插层结构(PP 与 PET 纤维层交替排列,经热压复合制成,兼具透气性与结构稳定性),下层为 1<sup>#</sup>试样;G-3 为通过 PP 与石墨烯母粒共混工艺制备而成的 3<sup>#</sup>试样;G-4 为某品牌汽车空气滤芯,其作为对照组用于性能对比。为直观展示产品特征,各类滤芯的实拍照片见图 6。

#### 2.7.1 过滤性能分析

由图 7 可知,G-1 展现出卓越的过滤性能,其对  $PM_{0.3}$  和  $PM_{2.5}$  的过滤效率分别高达 99.63% 和

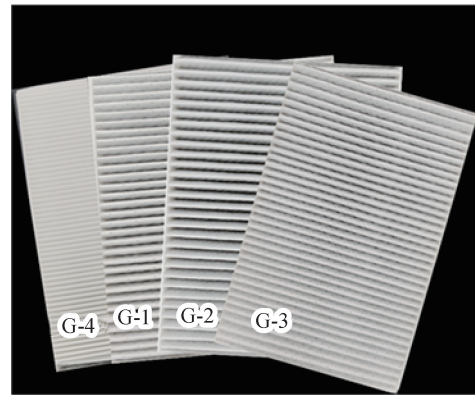


图 6 各类滤芯实拍照片  
Fig. 6 Real photos of various filter cores

100.00%,且过滤阻力为 16.76 Pa。特别值得注意的是,G-1 对  $PM_{0.3}$  的过滤效率(99.63%)远超对比样 G-4(5.99%);对  $PM_{0.5}$  的过滤效率(100.00%)也显著高于 G-4(10.99%)。上述结果表明,G-1 的性能符合国标对超高效空气过滤材料的要求。

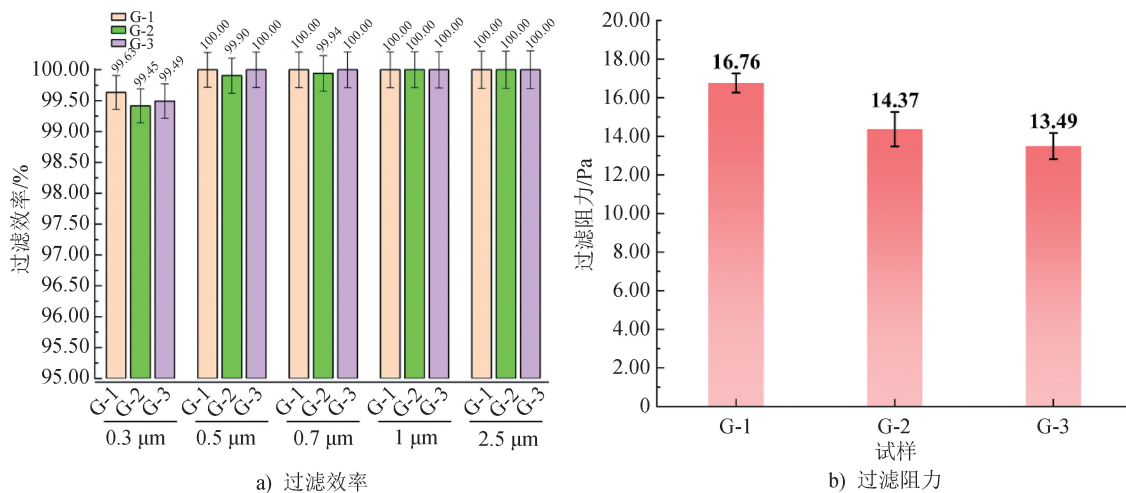


图 7 各类滤芯的过滤性能  
Fig. 7 Filtration performance of various filter cores

#### 2.7.2 除甲醛性能分析

由图 8 可知:G-1 甲醛去除率为 95.52%;G-2 甲醛去除率为 92.12%,但单位时间去除甲醛量最多;

G-3 甲醛去除率 76.25%,单位时间去除甲醛量最少;对照样 G-4 几乎无除甲醛功能。

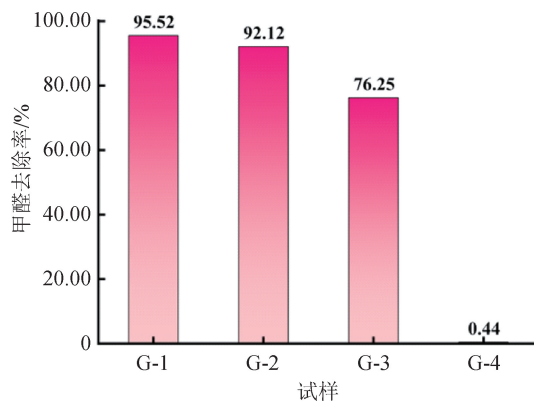


图 8 各类滤芯的除甲醛性能

Fig. 8 Formaldehyde removal performance of various filter cores

### 3 结论

本研究成功采用熔融共混工艺制备了石墨烯熔喷布,并以其为核心材料开发了汽车用空气过滤芯。结果表明,石墨烯熔喷布具有优异的  $PM_{0.3}$  过滤效率(98.2%)、良好的热稳定性、抗菌防病毒功能(广谱抑菌率  $\geq 99\%$ ,对甲型流感病毒抑制率达 92.09%)。所制成的空气过滤芯对  $PM_{0.3}$  的过滤效率高达 99.63%,对  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{0.5}$  的过滤效率均达 100.00%,同时保持较低的过滤阻力( $\leq 16.76$  Pa)属于国标级超高效空气过滤材料;此外还具有显著的除甲醛功能,去除率可达 95.52%。综上所述,本研究开发的石墨烯熔喷布及其制成的空气过滤芯,集  $PM_{0.3}$  超高效颗粒物拦截、卓越热稳定性、广谱高效抗菌抗病毒以及优异的甲醛去除能力于一体,可应用于高性能空气净化领域,如车内空气净化器、医疗洁净环境通风系统、个人防护装备(如高效口罩)以及需综合防护颗粒物、化学污染物与微生物的场景中,产品具有广阔的应用前景。

#### 致谢

本研究由西安工程大学与四川索玛新材料科技有限公司共同合作完成。特别感谢四川索玛新材料科技有限公司在石墨烯原料供应、熔喷工艺关键技术开发与试样制备方面提供的重要技术支持与资源保障;同时感谢西安工程大学测试分析中心提供的实验平台及横向合作项目(2025KJ-088)的科研基金支持。



期刊采编平台



中国知网下载

#### 参考文献

- [1] LIU C, CHEN R J, SERA F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities[J]. The New England Journal of Medicine, 2019, 381(8): 705-715.
- [2] CINCINELLI A, MARTELLINI T. Indoor air quality and health[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(11): 1286.
- [3] WOLKOFF P. Indoor air humidity, air quality, and health - an overview[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2018, 221(3): 376-390.
- [4] 王文朋, 沈惠平, 黄云彪, 等. 大气  $PM_{2.5}$  细颗粒物污染状况及对人体健康的影响[J]. 上海预防医学, 2015, 27(5): 290-294.
- [5] 钱么, 郑宇婷, 梁紫茵, 等. 高效空气过滤材料的研究现状及发展趋势[J]. 纺织科技进展, 2023(1): 16-20.
- [6] 吴波伟, 吕惠娇, 钱么. 空气净化器用纤维过滤材料的应用及发展[J]. 天津纺织科技, 2021(3): 50-52.
- [7] YU Y, XIONG S W, HUANG H, et al. Fabrication and application of poly (phenylene sulfide) ultrafine fiber[J]. Reactive and Functional Polymers, 2020, 150: 104539.
- [8] CHU K H, PARK M, KIM H Y, et al. Preparation and characterization of polypropylene non-woven fabrics prepared by melt-blown spinning for filtration membranes[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2014, 35(6): 1901-1903.
- [9] 倪冰选, 张鹏, 朱锐钿, 等. 口罩用聚丙烯熔喷非织造布过滤性能的研究[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(5): 72-75.
- [10] TOMASZEWSKA J, JAKUBIAK S, MICHALSKI J, et al. A polypropylene cartridge filter with hematite nanoparticles for solid particles retention and arsenic removal[J]. Applied Surface Science, 2016, 366: 529-534.
- [11] XIAO Y X, SAKIB N, YUE Z H, et al. Study on the relationship between structure parameters and filtration performance of polypropylene meltblown nonwovens[J].

- Autex Research Journal, 2020, 20(4): 1-8.
- [12] BINDU M, PERIYAT P. Graphene and its derivatives for air purification: a mini review [J]. Results in Engineering, 2024, 21: 101809.
- [13] 程熠, 王坤, 元月, 等. 石墨烯纤维材料的化学气相沉积生长方法[J]. 物理化学学报, 2022, 38(2): 40-54.
- [14] 许景威, 陈国华. 石墨烯基气凝胶吸附材料在空气净化领域的研究进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 661-670.
- [15] 周蒙, 朱亚琼. 石墨烯在生物医用领域的应用研究进展[J]. 中国战略新兴产业, 2025(6): 80-82.
- [16] LI J, ZHANG D Z, YANG T T, et al. Nanofibrous membrane of graphene oxide-in-polyacrylonitrile composite with low filtration resistance for the effective capture of PM<sub>2.5</sub> [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 551: 85-92.
- [17] 郑茜璞, 张威. 石墨烯/PAN 静电纺/PP 纤维针刺复合空气过滤材料的制备[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(5): 14-18.
- [18] 赵倩, 陈锦苗, 邱长玉, 等. 口罩用抗菌空气过滤材料的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(2): 1-8.
- [19] STUBROV Y, NIKOLENKO A, STRELCHUK V, et al. Structural modification of single-layer graphene under laser irradiation featured by Micro-Raman spectroscopy [J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 297.
- [20] 熊进辉, 苏柑锚, 胡谦, 等. 室内甲醛污染物吸附影响因素及其吸附材料研究进展[J]. 林产工业, 2022, 59(11): 37-44.
- [21] 原卫华. 甲烷/甲醛-石墨烯吸附性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [22] 安静, 郭桂真, 罗青枝, 等. 石墨烯和石墨烯基纳米复合材料的制备及在生物医疗领域的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(3): 142-147.
- [23] TU Y S, LV M, XIU P, et al. Destructive extraction of phospholipids from *Escherichia coli* membranes by graphene nanosheets [J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(8): 594-601.
- [24] LIU S B, ZENG T H, HOFMANN M, et al. Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: membrane and oxidative stress[J]. ACS Nano, 2011, 5(9): 6971-6980.
- [25] JUNG Y, HWANG J, CHO H, et al. Graphene quantum dots as potential broad-spectrum antiviral agents [J]. Nanoscale Advances, 2025, 7(7): 2032-2038.
- [26] SEIFI T, REZA KAMALI A. Antiviral performance of graphene-based materials with emphasis on COVID-19: a review [J]. Medicine in Drug Discovery, 2021, 11: 100099.
- [27] IANNAZZO D, GIOFRÈ S V, ESPRO C, et al. Graphene-based materials as nanoplatforms for antiviral therapy and prophylaxis [J]. Expert Opinion on Drug Delivery, 2024, 21(5): 751-766.

.....

(上接第 19 页)

- [29] 程宁波, 缪东洋, 王先锋, 等. 用于个人热湿舒适管理的功能纺织品研究进展[J]. 纺织学报, 2022, 43(10): 200-208.
- [30] 吴杰. 智能监护服设计与可靠性评价[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [31] 张妍. 电加热服装的服用性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.

.....

(上接第 26 页)

- [12] MORTON W E, HEARLE J W S. Optical properties [M]//Physical properties of textile fibres. Amsterdam: Elsevier, 2008: 690-708.
- [13] HALPIN AFFDL J C, KARDOS J L. The Halpin-Tsai equations: a review [J]. Polymer Engineering & Science, 1976, 16(5): 344-352.
- [14] 陈旭旭, 王荣武. 基于卷积神经网络的非织造材料三维点云重建[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(4): 50-57.
- [15] LEE K, KIM D, KIM J. Computational modeling of multiscale air filter media consisting of nano- and microfibers[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(11): 9415-9425.