

# PTFE覆膜口罩的过滤性能

柳静献<sup>1</sup>, 周肖童<sup>1</sup>, 赫伟东<sup>1</sup>, 赵翰鹏<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;  
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 标准计量研究所, 北京 100081)

**摘要:** 聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)覆膜口罩作为新型呼吸防护用品, 在职业健康领域得到广泛关注, 然而在高湿环境中其过滤性能的稳定性有待明确. 通过过滤效率和过滤阻力的测试对PTFE覆膜口罩进行了耐湿性能评估, 并与熔喷布口罩进行对比. 结果表明: 经高湿环境后PTFE覆膜口罩的过滤效率最大降幅为3.20%, 而熔喷布口罩的最大降幅仅为0.44%, 测试过程中两种口罩的过滤阻力均无显著变化; PTFE膜的纤维直径(20~150 nm)与孔径(100~350 nm)远小于熔喷布的纤维直径与孔径, 其主要基于机械过滤机理捕集颗粒物; 在高湿环境中, 具有静电吸附性能的熔喷布更易实现高效低阻. 研究结果为合理选用PTFE覆膜口罩提供了指导.

**关键词:** 口罩; PTFE膜; 过滤性能; 孔径; 纤维直径

中图分类号: TS 174 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1469-07

## Filtration Performance of PTFE Membrane Coated Mask

LIU Jing-xian<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-tong<sup>1</sup>, HE Wei-dong<sup>1</sup>, ZHAO Han-peng<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Standards & Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane coated mask, as a new type of respiratory protective equipment, has received extensive attention in the field of occupational health. However, the stability of filtration performance of PTFE membrane coated mask in the high humidity environment needs to be determined. The moisture resistance of PTFE membrane coated masks is evaluated by the tests of filtration efficiency and pressure drop, and compared with nonwoven masks. The results show that the maximum reduction of the filtration efficiency of PTFE membrane coated masks is 3.20% after the high humidity environment, while the maximum reduction of nonwoven masks is only 0.44%, and there is no significant variation in the filtration pressure drop of the two types of masks during the test process. The fiber diameter (20~150 nm) and pore size (100~350 nm) of PTFE membrane are much smaller than those of nonwovens, which is mainly based on the mechanical filtration mechanism to capture particles. In high humidity environment, nonwoven with electrostatic adsorption performance is easier to achieve high filtration efficiency and low pressure drop. The results of this study provide a guidance for the rational selection of PTFE membrane coated masks.

**Key words:** mask; PTFE membrane; filtration performance; pore size; fiber diameter

近年来, 由于空气污染和新型冠状病毒的影响, 口罩成为公众关注的焦点. 口罩作为一种卫生防疫用品, 用于过滤进入口鼻的空气, 阻挡有害气体、粉尘、飞沫以及病毒等<sup>[1]</sup>, 从而达到个人

防护的目的.

新冠肺炎疫情期间, 口罩需求量激增, 常用的聚丙烯熔喷布口罩供不应求. 为缓解口罩供应紧张的局面和降低环境压力, 科研机构 and 学者研

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2503200, 2022YFC2503201); 国家自然科学基金资助项目(52304210); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301022).

作者简介: 柳静献(1966-), 男, 河北元氏人, 东北大学教授, 博士生导师.

发出 PTFE 覆膜口罩<sup>[2]</sup>。口罩历经 3 次变革,由最初的纱布口罩到疫情防控期间最常用的熔喷布口罩再到最新问世的覆膜口罩。

已经被传统熔喷布口罩替代的纱布口罩,利用纱布材料制作而成,制作工艺简单,清洗消毒后可重复使用,但孔径、纤维直径和厚度都比较大,过滤效率低,只能拦截空气中的大粒径颗粒物,无法阻挡空气动力学当量直径小于或等于  $2.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 的小粒径颗粒物<sup>[3-4]</sup>。纱布口罩阻尘原理是机械过滤(物理过滤),即颗粒物撞到纱布上,大粒径颗粒物被阻挡在纱布里,而小粒径颗粒物,特别是直径小于  $2.5\ \mu\text{m}$  的颗粒物沿着纱布空隙进入呼吸道,从而危害人体健康,降低防护效果。熔喷布口罩是目前最常用的防护型口罩,利用聚丙烯纤维制作而成,在不增加过滤阻力的前提下过滤效率显著提高<sup>[5-6]</sup>。但其制作工艺较复杂,生产速度相对较慢。熔喷布口罩的阻尘原理包括物理过滤和静电吸附,两者共同作用可实现高效过滤的效果。熔喷布作为其核心过滤层,经过驻极处理后会储存一定量的电荷,通过静电作用可对小粒径颗粒物,特别是直径小于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒物进行吸附,而大粒径颗粒物可直接通过物理过滤作用阻隔。覆膜口罩是新冠肺炎疫情期间研发的新型防护口罩,其核心过滤层采用超薄 PTFE 膜制成,纤维直径为数十至数百纳米,孔径为数百纳米,生产工艺简单,生产速度较快。覆膜口罩的阻尘原理是物理过滤,通过核心过滤层 PTFE 薄膜的孔径大小及分布来阻隔空气中的细小颗粒物,无需静电驻极<sup>[7-8]</sup>。PTFE 薄膜产能大,在突发公共卫生事件中可作为传统熔喷布口罩的替代品,前景十分广阔。但目前仍存在一些问题,例如在高湿环境下佩戴覆膜口罩,呼吸阻力增长速度较快<sup>[9-10]</sup>,原因可能是在高湿环境下气溶胶沉积将 PTFE 薄膜的部分孔隙堵塞;此外,PTFE 薄膜易损坏,如果不小心中揉搓口罩,可能对 PTFE 薄膜有破坏作用,使口罩失效。

聂孙建等<sup>[11]</sup>研究了 4 种 PTFE 薄膜、2 种覆膜方式(胶覆、热覆)对 PTFE/无纺布复合过滤材料性能的影响,发现用孔径为  $5.95\sim 9.09\ \mu\text{m}$ 、厚度为  $1\ \mu\text{m}$  的薄膜为原料,采用胶覆方式制备的 PTFE/无纺布复合过滤材料的通气阻力要比热覆的低,且当过滤风量为  $95\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  时对粒径为  $0.33\sim 0.36\ \mu\text{m}$  的颗粒过滤效率达到 99%。朱怀球等<sup>[12]</sup>测试了不同过滤材料制成的口罩样品,对比了过

滤性能和压差指标,发现 PTFE 覆膜过滤材料可代替熔喷布生产口罩,口罩重复使用 3 次后,颗粒物过滤效率下降 15% 以内,是应急时期口罩过滤材料的可替代材料。汪泽幸等<sup>[13]</sup>利用聚酰亚胺纳米纤维膜制备可重复使用口罩的核心过滤材料,发现所制备的口罩防护性能指标超过 KN 95 级口罩的技术要求,且历经 50 次洗涤后过滤效率与呼吸阻力依然超过 KN 90 级防护口罩的技术要求,分析过滤效率下降的原因是纳米纤维膜表面的耐磨性不足。严杰等<sup>[14]</sup>研究发现 PTFE 覆膜口罩经沸水煮、75% 酒精和 84 消毒液 3 种消毒方式分别重复消毒 20 次后,粒径为  $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$  的颗粒过滤效率下降值在 5% 以内,实验数据表明 3 种处理方式对口罩过滤效率的影响程度:84 消毒液 > 沸水煮 > 75% 酒精。目前对 PTFE 覆膜口罩的测试形式比较单一,测试风量大多为  $85\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  或  $95\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,测试粒径大多为  $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 。而人体在不同工作强度时所需空气量不同,空气尘的粒径也是多分散的,所以在不同过滤风量时测试不同粒径颗粒的过滤性能对评价口罩的优异具有更全面的参考价值。

本文以市面上常见的熔喷布口罩、PTFE 覆膜口罩为研究对象,通过在不同过滤风量下对这些口罩的过滤性能(过滤效率、过滤阻力)进行测试,对比覆膜口罩和传统熔喷布口罩之间性能的差异,以期对口罩的合理选择提供依据。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 样品的制备

本实验选用 8 种市面上常见口罩作为测试样品进行对比,其中 1#, 2#, 3#, 4#, 5# 为 PTFE 覆膜口罩,核心过滤层为 PTFE 薄膜;6# 为医用外科口罩,7#, 8# 为 N95 防尘口罩,核心过滤层均为聚丙烯熔喷布。8 种口罩的基本性能参数如表 1 所示。

### 1.2 实验装置与实验过程

本实验对传统熔喷布口罩和 PTFE 覆膜口罩的过滤性能进行对比,通过口罩的层数、型式、口罩厚度,核心过滤层的孔径、纤维直径以及口罩的过滤效率、过滤阻力和品质因数对口罩进行表征。其中,利用 YG(B)141D 数字织物厚度仪在  $200\ \text{cN}$  的压力下测试口罩厚度;采用 Zeiss Ultra Plus 场发射扫描电子显微镜观察口罩核心过滤层的表面形貌,并通过 Image-Pro Plus 和 Image-J 软

件分别测量其孔径和纤维直径.

表 1 口罩的基本性能参数  
Table 1 Basic performance parameters of masks

种类	试样编号	核心过滤层	层数	型式	口罩厚度/mm	核心过滤层参数	
						孔径/nm	纤维直径/nm
PTFE 覆膜口罩	1#	PTFE 薄膜	4	平面型	0.44	313.83	87.69±45.85
	2#	PTFE 薄膜	4	平面型	0.51	137.30	65.12±24.60
	3#	PTFE 薄膜	4	平面型	0.49	203.14	69.60±21.76
	4#	PTFE 薄膜	4	平面型	0.48	146.40	58.00±28.75
	5#	PTFE 薄膜	5	立体型	0.48	153.67	43.60±10.37
医用外科口罩	6#	熔喷布	3	平面型	0.51	5 590	2 920±1 150
N95 防尘口罩	7#	熔喷布	4	立体型	1.91	4 060	3 200±1 590
	8#	熔喷布	3	立体型	1.20	5 260	5 020±2 610

为了测试口罩的过滤效率和过滤阻力,自行搭建一套过滤性能测试装置,如图 1 所示,口罩样品夹持在圆形夹具中.为模拟口罩的真实工况,采用大气尘为测试尘源,实验开始 2 min 后进行测试,以保证实验装置管道内的气体已排尽.过滤效率测试仪器为 TSI 9306-V2 手持式激光粒子计数器,采集颗粒物粒径为 0.3, 0.5, 1.0, 2.5 和 5 μm,在 15, 50 和 85 L·min<sup>-1</sup> 的过滤风量下分别测试口罩上游和下游管道的颗粒数量,通过式 (1) 计算其过滤效率;过滤阻力测试仪器为压差

计,当过滤风量为 15, 30, 50, 70, 85 和 95 L·min<sup>-1</sup>, 相对湿度为 30%~35% 时,测试口罩的过滤阻力.为评估口罩的综合过滤性能,通过口罩过滤效率与过滤阻力计算其品质因数.

$$\eta = \frac{c_u - c_d}{c_u} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:η 为过滤效率;c<sub>u</sub>, c<sub>d</sub> 为口罩上游、下游颗粒物在单位体积内的数量,个/cm<sup>3</sup>.

$$Q = -\frac{\ln(1 - \eta)}{\Delta F}, \quad (2)$$

式中:Q 为品质因数;ΔF 为过滤阻力.

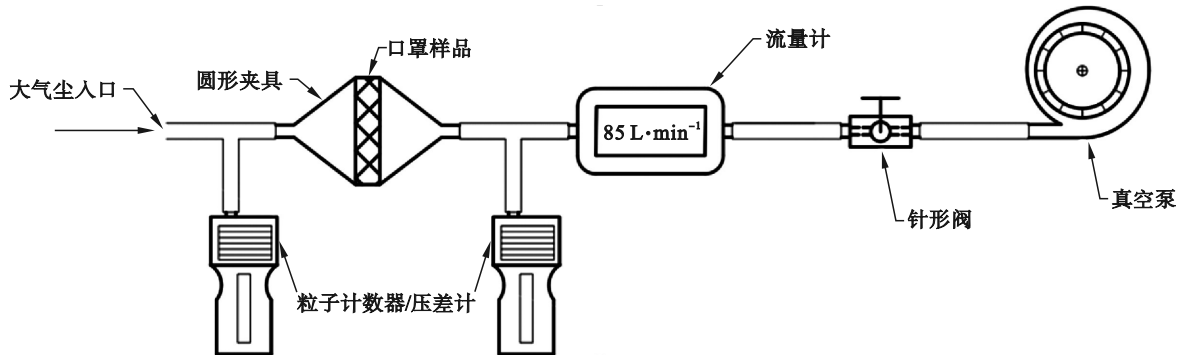


图 1 过滤性能测试装置

Fig. 1 Test device of filtration performance

## 2 结果与讨论

### 2.1 口罩的过滤性能

测试气体流量需根据人体的呼吸状态选取.目前通常以劳动强度的高低划分不同的作业等级,不同的劳动强度直接影响人体的呼吸强度.不同作业等级对应所需气体流量见表 2.

表 2 不同劳动强度时人体呼吸所需空气流量和氧气流量  
Table 2 The flow rate of air and oxygen required for human breathing at different labor intensities

作业等级	所需空气流量	所需氧气流量
	L·min <sup>-1</sup>	L·min <sup>-1</sup>
休息	6~15	0.2~0.4
轻作业	20~25	0.6~1.0
中等作业	30~40	1.2~1.6
重作业	40~60	1.8~2.4
极重作业	40~80	2.5~3.0

中等作业条件下人体呼吸所需的空气流量为  $30\sim 40\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $32\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  通常作为中等劳动强度人体呼吸平均所需空气流量. 由于人体呼吸速率并非呈均匀呼吸状态, 而是呈正弦呼吸规律, 人体瞬时空气吸入流量约为平均吸入流量的  $\pi$  倍, 约为  $95\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . 欧洲防护标准<sup>[15]</sup>采用  $95\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  作为过滤测试风量, 该风量可作为极端条件下口罩防护性能的测试风量, 而中国防护标准<sup>[16]</sup>选取  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  作为过滤测试风量. 本文选取在休息 ( $15\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ )、重作业 ( $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 以及接近极端工作状态 ( $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 时测试口罩的过滤性能.

### 2.1.1 口罩在 $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风量下的过滤性能

口罩在  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  过滤风量下的过滤效率、

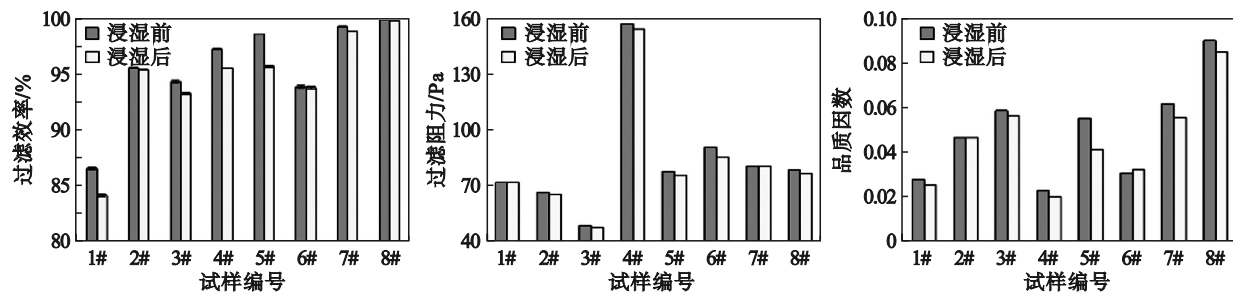


图2 口罩在  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的过滤风量下浸湿前后的过滤性能

Fig. 2 Filtration performance of masks before and after soaking at filtration air flow of  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

口罩经高湿环境再晾干后过滤效率均出现不同程度的下降, 5#口罩过滤效率下降最大, 为 2.94%; 8#口罩过滤效率下降最小, 为 0.06%. 过滤效率下降可能是 1#~5#覆膜口罩核心过滤层的 PTFE 膜发生轻微变化导致的; 而熔喷布口罩过滤效率下降可能是由于核心过滤层的熔喷布经高湿环境后电荷量轻微衰减, 静电吸附作用受到影响导致的. 过滤阻力在同等过滤风量下经高湿环境晾干后无明显变化, 原因是口罩经水浸泡后并没有显著改变纤维的表观结构<sup>[19]</sup>. 目前一般采用达西 (Darcy) 定律研究材料的过滤阻力, 根据该定律, 材料的过滤阻力与材料的密度、厚度、体

积、纤维直径、纤维排列方式等结构因素及过滤风量和流体动力学黏度等有关<sup>[20]</sup>.

### 2.1.2 口罩在 $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风量下的过滤性能

从 5 种 PTFE 覆膜口罩中选取 4 种口罩 (1#, 2#, 4# 和 5#), 对其过滤性能进行测试, 测试结果如图 3 所示.  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  过滤风量下的过滤效率高于同种口罩在  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  过滤风量下的过滤效率, 并且在  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的过滤风量下口罩经高湿环境晾干后过滤效率下降最大为 2.92%, 最小为 0.53%. 对比图 2 可见, 同种口罩  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  过滤风量下的品质因数明显高于  $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  过滤风量下的品质因数.

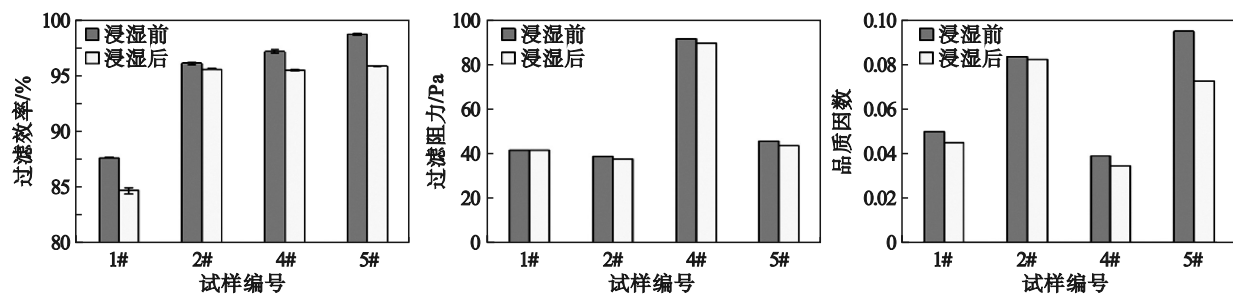


图3 PTFE 覆膜口罩在  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的过滤风量下浸湿前后的过滤性能

Fig. 3 Filtration performance of PTFE membrane coated masks before and after soaking at filtration air flow of  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

2.1.3 口罩在 15 L·min<sup>-1</sup> 过滤风量下的过滤性能

4 种 PTFE 覆膜口罩在 15 L·min<sup>-1</sup> 过滤风量下的过滤性能如图 4 所示,PTFE 覆膜口罩经高湿环境后对粒径为 0.3 μm 颗粒的过滤效率下降最大为 3.2%,最小为 0.6%。在同等过滤风量下,PTFE 覆膜口罩经高湿环境后过滤效率均有所下降,过

滤阻力无明显变化,所以品质因数也均有一定的下降。同一种口罩相较于 85 和 50 L·min<sup>-1</sup>,在 15 L·min<sup>-1</sup> 过滤风量下的过滤效率最高,过滤阻力最低,品质因数最高。在过滤性能的测试中,过滤风量越小,过滤效率越高;过滤阻力越低,品质因数越高。

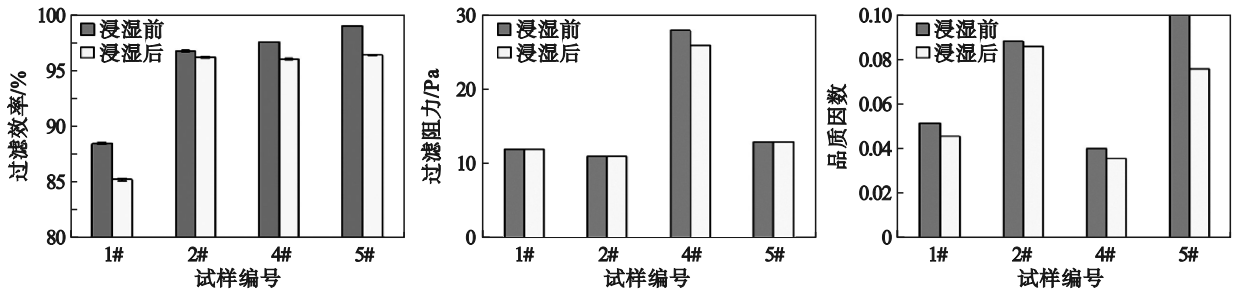


图 4 PTFE 覆膜口罩在 15 L·min<sup>-1</sup> 的过滤风量下浸湿前后的过滤性能

Fig. 4 Filtration performance of PTFE membrane coated masks before and after soaking at filtration air flow of 15 L·min<sup>-1</sup>

2.2 口罩浸湿前后的过滤效率

在 85 L·min<sup>-1</sup> 的过滤风量下浸湿前后不同口

罩对粒径为 0.3~5 μm 颗粒的过滤效率进行分析,结果如图 5 所示。

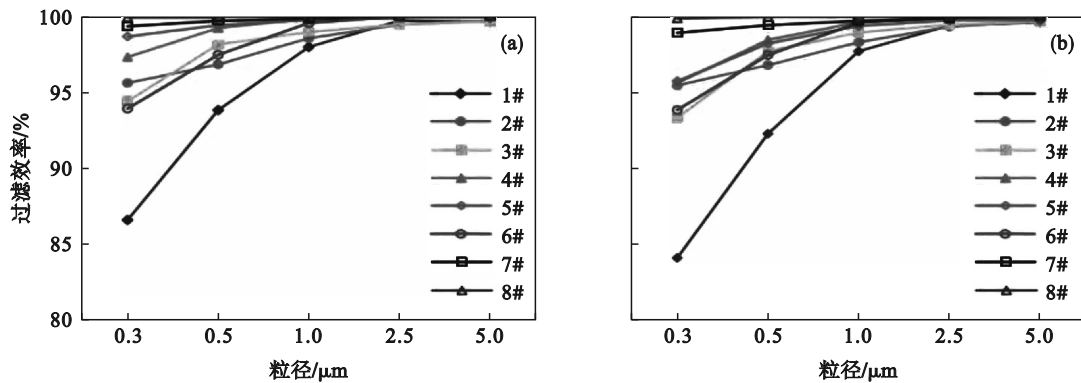


图 5 口罩在 85 L·min<sup>-1</sup> 的过滤风量下浸湿前后的过滤效率

Fig. 5 Filtration efficiency of masks before and after soaking at filtration air flow of 85 L·min<sup>-1</sup>  
(a)—浸湿前; (b)—浸湿后。

由图 5 可知,随着粒径的增大(≥0.3 μm),过滤效率不断升高。当粒径≥2.5 μm 时,8 种口罩浸湿前后的过滤效率达到 99%。7#和 8#两种 N95 口罩浸湿前的过滤效率均能达到 99%,浸湿后 7#口罩过滤效率最低值为 98.90%,而 8#口罩过滤效率最低值仍能达到 99.86%。覆膜口罩研究目前尚属起步阶段,过滤性能参差不齐,核心过滤层的高透膜有待进一步完善提高。

2.3 口罩核心过滤层的表面微观形貌

8 种口罩的核心过滤层的 SEM 图像如图 6 所示。从图中能够明显看出覆膜口罩和熔喷布口罩的差异之处,PTFE 膜(1#~5#)纤维直径为 20~150 nm,孔径为 100~350 nm;熔喷布(6#~8#)纤维直径为 1.5~8 μm,与 PTFE 膜的纤维直径相

差 1~2 个数量级,孔径为 4~6 μm。熔喷布的纤维直径和孔径比 PTFE 膜的纤维直径和孔径大 1~2 个数量级,但是熔喷布口罩的过滤性能却不亚于 PTFE 覆膜口罩,主要是因为二者的过滤机理不同,PTFE 覆膜口罩的过滤机理是物理(机械)过滤,而熔喷布口罩除物理过滤外,起主要过滤作用的是静电吸附,通过静电吸附小粒径颗粒物以实现高效过滤的效果。

5 种 PTFE 覆膜口罩的 SEM 图像如图 7 所示。从图中能够明显看出 1#口罩核心过滤层的 PTFE 膜纤维更加稀疏,且孔径和纤维直径比另 4 种口罩大,所以过滤效率明显低于另 4 种覆膜口罩。5#口罩核心过滤层的纤维直径和孔径更小更均匀,所以 5#口罩的过滤性能更好。

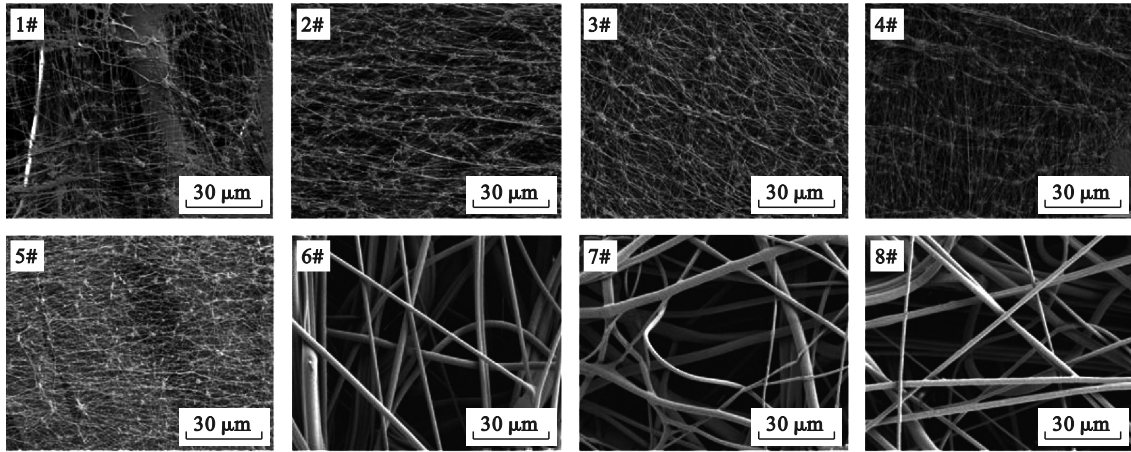


图6 8种口罩核心过滤层的SEM图像

Fig. 6 SEM images of the core filter layer of 8 kinds of masks

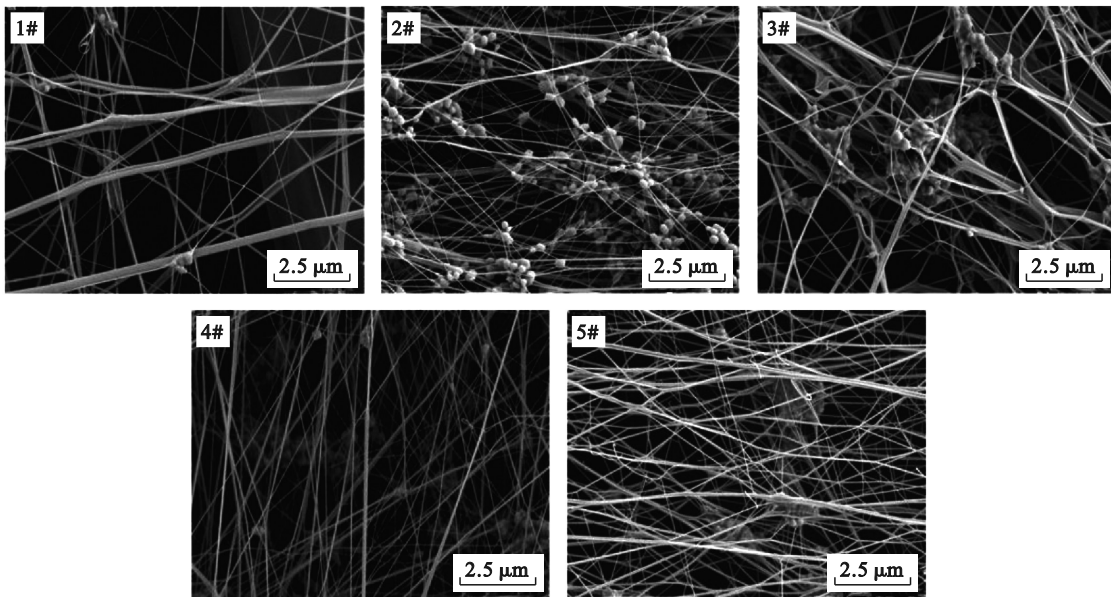


图7 5种PTFE覆膜口罩核心过滤层的SEM图像

Fig. 7 SEM images of the core filter layer of 5 kinds of PTFE membrane coated masks

### 3 结 论

1) 由于PTFE覆膜口罩和熔喷布口罩过滤机理的不同,核心过滤层的纤维直径和孔径相差1~2个数量级. PTFE覆膜口罩核心过滤层的纤维直径为20~150 nm,孔径为100~350 nm;熔喷布口罩核心过滤层的纤维直径为1.5~8 μm,孔径为4~6 μm.

2) PTFE覆膜口罩和熔喷布口罩经高湿环境晾干后过滤效率均出现不同程度的下降. 在85 L·min<sup>-1</sup>的过滤风量下,PTFE覆膜口罩过滤效率下降最大为2.94%,最小为0.14%;熔喷布口罩过滤效率下降最大为0.44%,最小为0.06%. 出现下降是PTFE覆膜口罩核心过滤层发生轻微变化

导致的;而熔喷布口罩是由于核心过滤层熔喷布经高湿环境后电荷量轻微衰减,静电吸附作用受到影响.

3) PTFE覆膜口罩和熔喷布口罩经高湿环境晾干后过滤阻力无明显变化,原因是口罩经过水浸泡后并没有显著改变纤维的表现结构.

4) 同等粒径下,过滤风量越大,过滤效率越低,过滤阻力越大,品质因数越低.

#### 参考文献:

- [1] Phan T L, Ching C T S. A reusable mask for coronavirus disease 2019 (COVID-19) [J]. *Archives of Medical Research*, 2020, 51(5): 455-457.
- [2] Hu S, Tian H C, Zhang S J, et al. Fabrication of a high-performance and reusable planar face mask in response to the COVID-19 pandemic [J]. *Engineering*, 2022, 9: 101-110.

- [ 3 ] Li X Z, Gong Y. Design of polymeric nanofiber gauze mask to prevent inhaling PM 2.5 particles from haze pollution [J]. *Journal of Chemistry*, 2015, 2015: 460392.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Yao B G, Wang Y X, Ye X Y, et al. Impact of structural features on dynamic breathing resistance of healthcare face mask [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 743-753.
- [ 6 ] Kilic A, Shim E, Pourdeyhimi B. Electrostatic capture efficiency enhancement of polypropylene electret filters with barium titanate [J]. *Aerosol Science Technology*, 2015, 49(8): 666-673.
- [ 7 ] Zhao P F, Soin N, Prashanthi K, et al. Emulsion electrospinning of polytetrafluoroethylene (PTFE) nanofibrous membranes for high-performance triboelectric nanogenerators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(6): 5880-5891.
- [ 8 ] Mortazavi M, Fazeli A, Moghaddam S. Scalable bonding of nanofibrous polytetrafluoroethylene (PTFE) membranes on microstructures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(1): 015001.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 聂孙建, 梁燕, 周冠辰, 等. 聚四氟乙烯复合过滤材料的覆膜工艺及其性能 [J]. *现代纺织技术*, 2022, 30(2): 85-92. (Nie Sun-jian, Liang Yan, Zhou Guan-chen, et al. The film laminating technology and properties of PTFE composite filter materials [J]. *Advanced Textile Technology*, 2022, 30(2): 85-92.)
- [ 12 ] 朱怀球, 叶翔宇, 刘芙蓉. 聚四氟乙烯覆膜材料用于口罩过滤材料的可行性研究 [J]. *现代纺织技术*, 2020, 28(6): 1-4. (Zhu Huai-qiu, Ye Xiang-yu, Liu Fu-rong. Feasibility study of using PTFE-coated membrane as filter materials for masks [J]. *Advanced Textile Technology*, 2020, 28(6): 1-4.)
- [ 13 ] 汪泽幸, 吴桂林, 吴璠, 等. 可重复使用防护口罩的制备与性能评估 [J]. *棉纺织技术*, 2021, 49(9): 71-74. (Wang Ze-xing, Wu Gui-lin, Wu Fan, et al. Preparation and property evaluation of reusable protective face mask [J]. *Cotton Textile Technology*, 2021, 49(9): 71-74.)
- [ 14 ] 严杰, 赵素花, 陆海明, 等. ePTFE 纳米膜口罩可重复使用消毒测试的衰减性研究 [J]. *中国科技信息*, 2020, 14: 77-78. (Yan Jie, Zhao Su-hua, Lu Hai-ming, et al. Attenuation study of reusable disinfection test of ePTFE nanomembrane mask [J]. *China Science and Technology Information*, 2020, 14: 77-78.)
- [ 15 ] Respiratory protective devices-filtering half masks to protect against particles-requirements, testing, marking; BS EN 149: 2001+A1: 2009 [S/OL]. <https://www.lisungroup.com/wp-content/uploads/2020/05/BS-EN-149-2001A1-2009-Standard-Free-Download.pdf>.
- [ 16 ] 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: 12. (Standardization Administration. Respiratory Protection-Non-powered air-purifying particle respiration; GB2626—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 12.)
- [ 17 ] Bui T T, Shin M K, Jee S Y, et al. Ferroelectric PVDF nanofiber membrane for high-efficiency PM0.3 air filtration with low air flow resistance [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 640: 128418.
- [ 18 ] Lee K S, Hasolli N, Jeon S M, et al. Filter layer structure effect on the most penetrating particle size of multilayered flat sheet filter [J]. *Powder Technology*, 2019, 344: 270-277.
- [ 19 ] Whyte H E, Joubert A, Leclerc L, et al. Reusability of face masks: influence of washing and comparison of performance between medical face masks and community face masks [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 28: 102710.
- [ 20 ] 肖慧明, 陈钢进, 张树文. 溶剂溶胀对聚丙烯熔喷非织造布过滤性能的影响 [J]. *材料研究学报*, 2009, 23(5): 513-517. (Xiao Hui-ming, Chen Gang-jin, Zhang Shu-wen. Influence of solvent swelling effect on filtration efficiency of melt-blown polypropylene electret nonwoven web used as air filter [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2009, 23(5): 513-517.)