

口罩过滤性能及其影响因素分析

郭颖赫^{1,2,3} 李冬辉¹ 孙志钜² 邱乾胜⁴ 柳静献⁴

1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
2. 浙江宇邦滤材科技有限公司, 浙江 海宁 314400;
3. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159;
4. 东北大学 滤料检测中心, 辽宁 沈阳 110819

摘要:科学佩戴口罩是防止颗粒物及气溶胶对人体健康产生威胁的重要手段,而口罩的性能决定了防护效果。收集了市场上常见的 12 种不同类型的口罩,分析其结构特点,并通过设置 3 种不同的流量,模拟分析人体在低速呼吸、正常呼吸和高速呼吸状态下口罩对颗粒物的过滤效率及阻力。研究表明:随着测试流量的增加,口罩对颗粒物的过滤效率呈下降趋势。12 种口罩中,KN95 型口罩、N95 型防尘口罩和 KN90 型口罩的过滤性能较稳定,可用于对防护要求较高的场所。活性炭口罩和 2 层棉布口罩的防护效果较差,不宜作为防护口罩应用于医疗领域。研究结果为公众合理选用口罩提供参考。

关键词:口罩;过滤效率;流量;过滤性能;阻力;静电势

中图分类号:TS 176

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)04-0033-09

Analysis of filtration performance of masks and its influencing factors

Guo Yinghe^{1,2,3}, Li Donghui¹, Sun Zhiju², Qiu Qiansheng⁴, Liu Jingxian⁴

1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Zhejiang Yubang Filter Material Technology Co., Ltd., Haining 314400, Zhejiang, China;

3. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China;

4. Filter Test Center, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: Wearing masks scientifically is an important method to prevent the threat of particulate matters and aerosols on humans, and the performance of masks determines the protective effect. Twelve different types of commonly used masks were collected, and the structural characteristics of different masks were analyzed. By setting three different flow rates to simulated human low-speed breathing, normal breathing, and high-speed breathing states, the filtration efficiency and resistance of different types of masks to particulate matters were analyzed. The results showed that the filtration efficiency of masks on particulate matters decreased with the increase of test flow rates. Among the 12 types of masks, KN95 masks, N95 masks and KN90 masks demonstrated more stable filtration performance, which could be used in places with higher protection requirements. The protective effect of activated carbon masks and 2-layer cotton masks was poor, and they were not suitable to be used as protective masks in the medical field. The research results can provide references for the

基金项目:浙江省博士后科研项目择优资助二等资助(ZJ2023129);高牢度纳米纤维复合滤料研发项目资助(60800020013);沈阳理工大学高层次人才科研支持经费资助(1010147001101)

收稿日期:2024-02-21

作者简介:郭颖赫,女,1992年生,副教授,研究方向为工业除尘技术、过滤材料,guoyh@sylu.edu.cn

public to choose masks reasonably.

Keywords: mask; filtration efficiency; flow rate; filtration performance; resistance; electrostatic potential

随着我国工业化及城市化的推进,颗粒物污染对人体健康造成的威胁已不容忽视^[1-3]。颗粒物污染的来源极其广泛,如工业烟气排放^[4-5]、汽车尾气排放^[6-8]、生活垃圾焚烧^[9-11],甚至日常生活中的烧烤排烟^[12-13]等,都会引起颗粒物污染。口罩是个人防护用品中用于防止人体吸入颗粒物的重要手段^[14-17]。近年来,新型冠状病毒疫情的出现加深了人们对口罩的认识。合理使用口罩不仅可以阻挡人体对颗粒物的吸入,还能有效防止病毒传播。市场对口罩的巨大需求促进了口罩行业的发展。然而,不同类型口罩对颗粒物的过滤效果差别较大。

阻力和过滤效率是评价口罩过滤性能最重要的2个指标^[18]。口罩对颗粒物的过滤效率直接反映其防护效果;而阻力大小则可用于表征佩戴口罩后的透气程度,阻力越大,则口罩的透气性越差。钱辉等^[19]探究了防护口罩使用条件、材质、驻极方式等因素对颗粒物过滤效率的影响,研究结果显示,熔喷非织造布过滤层的过滤效率是影响口罩过滤效率的直接因素。冯智等^[20]探究了用于制备口罩的聚丙烯熔喷非织造布纤维层结构与过滤效率的关系,结果显示,纤维直径及其均匀程度影响熔喷非织造布的过滤效率和阻力。全琼瑛等^[21]探究了防护口罩结构参数与过滤性能之间的关系,得出平均孔径与纤维直径对过滤效率的影响最显著。戴有刚等^[22]研究证实了阻力对口罩的防护效果有显著影响,阻力越大,防护效果越差。

本文收集了市场上常见的12种不同类型的口罩,并为模拟人体低速呼吸、正常呼吸和剧烈呼吸3种状态,设置了3种不同的气体流量,分别测试3种不同的气体流量下不同类型口罩对颗粒物的过滤效率与阻力,分析市场上常见口罩的性能和特点,评估口罩的防护效果。研究旨在为公众合理选用口罩提供参考。

1 材料与方法

1.1 口罩试样

本文收集得的12种口罩的具体信息如表1

所示。

1.2 性能测试

1.2.1 过滤效率

使用TSI 9306型手持式激光粒子计数器测试口罩对颗粒物的过滤效率,分别测试经口罩试样过滤前后的颗粒物个数,通过式(1)计算口罩试样对颗粒物的过滤效率(η)。测试粉尘为大气尘,测试的颗粒粒径为0.3~10.0 μm ,该粒径范围涵盖大气环境常用监测指标 $\text{PM}_{2.5}$ (直径小于或等于2.5 μm 的颗粒物)及口罩的最易穿透粒径0.3 μm 。根据标准EN 149:2001+A1:2009 *Respiratory protective devices—Filtering half masks to protect against particles—Requirements, testing, marking*,分别模拟测试人体在低速呼吸、正常呼吸和剧烈呼吸状态下口罩的过滤效率,将测试流量分别设置为29.4、44.1和88.3 L/min。测试前将口罩裁剪为直径为5 cm的圆形试样,每个试样测试5次,结果取平均值。

$$\eta = (N_{\text{上游}} - N_{\text{下游}}) / N_{\text{上游}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_{\text{上游}}$ 为测试粉尘中的颗粒物个数; $N_{\text{下游}}$ 为经口罩试样过滤后剩余的颗粒物个数。

1.2.2 阻力

使用压差计测试3种不同流量(29.4、44.1和88.3 L/min)下不同类型口罩的阻力,每种口罩试样测试5次,结果取平均值。

1.2.3 静电势

采用FMX-003型静电测试仪测试口罩的表面静电势,每种口罩试样测试5次,结果取平均值。








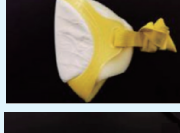



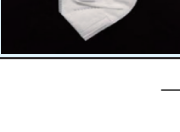
2 结果与分析

2.1 口罩结构

本文测试的12种口罩试样的结构如图1所示。其中,2层结构的口罩仅9号1种,且2层结构材料均为棉布;3层结构的口罩有1号、2号、4号、5号、6号、8号和10号7种,其中1号、2号、4号、5号、6号口罩均为非织造布+高效静电滤料+非织造布的层合结构,8号海绵口罩由海绵层+静电滤料+非织造布层合而成,10号口罩由3层棉布层合而成;

表 1 口罩试样的具体信息

Tab. 1 Detail informations of mask samples

试样编号	名称	生产厂家	实物图
1 号	KN95 型口罩	海氏海诺	
2 号	N95 型防尘口罩	美国 3M	
3 号	KN90 型口罩	锦绣粤兴	
4 号	一次性立体口罩	日本 Iris	
5 号	医用外科口罩	卓亚医疗	
6 号	一次性口罩	盾字一号	
7 号	活性炭口罩	—	
8 号	海绵防尘口罩	洁盾	
9 号	2 层棉布口罩	鸿昌	
10 号	3 层棉布口罩	鸿昌	
11 号	儿童非医用口罩	安克林	
12 号	呼吸阀过滤口罩	安克林	

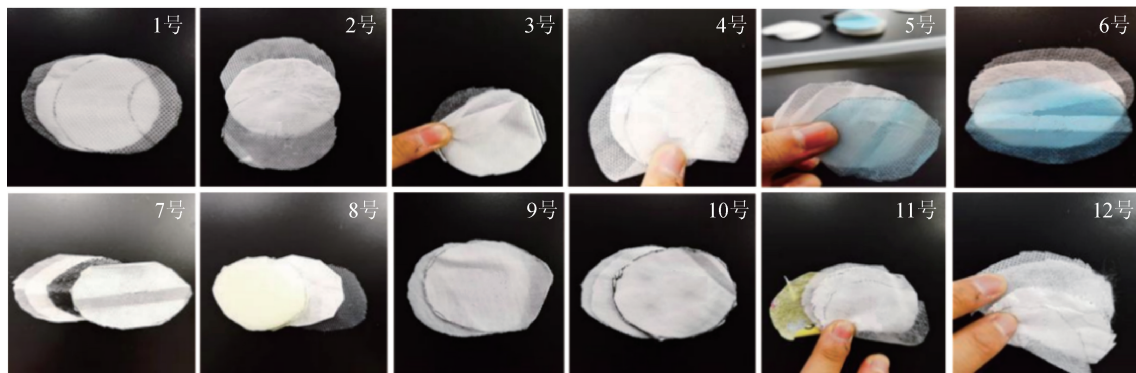


图1 口罩试样的结构
Fig. 1 Structure of mask samples

4层结构的口罩有3号、7号、11号和12号4种,其中3号、11号、12号均为普通非织造布+熔喷非织造布+静电滤料+普通非织造布的层合结构,7号为非织造布+活性炭层+静电滤料+非织造布的层合结构。参照 GB/T 24218. 2—2009《纺织品 非织造布

试验方法 第2部分:厚度的测定》,对12种不同类型的口罩进行厚度测量,结果如表2所示。由表2可以看出,12种口罩中最厚的是1号口罩,最薄的是6号口罩。

表2 口罩厚度测试结果

Tab. 2 Test results of mask thickness

试样编号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
厚度/mm	2.65± 0.30	2.23± 0.25	2.45± 0.21	0.53± 0.19	0.61± 0.22	0.48± 0.16	0.52± 0.22	4.10± 1.29	1.10± 0.11	1.60± 0.15	1.10± 0.14	1.30± 0.18

2.2 口罩过滤性能

2.2.1 低速呼吸状态

为模拟测试人体低速呼吸时口罩对颗粒物的过滤效果,将测试用气体流量设置为 29.4 L/min。在该流量下测试 12 种不同类型口罩对粒径为 0.3~10.0 μm 的颗粒物的过滤效率,结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,除 8 号和 9 号口罩外,其余口罩对粒径为 3.0~10.0 μm 的颗粒物均具有较高的过滤效率,且不同口罩对该粒径范围内颗粒物的过滤效率差异不大,因此,后文不再对该粒径范围内颗粒物的过滤效率作详细分析。0.3 μm 是大多数口罩的最易穿透粒径,选择口罩对粒径为 0.3 μm 颗粒物的过滤效率作为评判口罩过滤效率的主要指标。12 种口罩中,2 号口罩对颗粒物的过滤效率最高,对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 99%。1 号、3 号、4 号和 12 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 94%。对粒径为 0.3 μm 颗粒物的过滤效率按照由大到小排序,依次为 3 号、1 号、4 号、12 号。5 号口罩和 6 号口罩对全粒径范围内

颗粒物的过滤效率均大于 79%,且 5 号的过滤效率大于 6 号的。11 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 75%。8 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 60%。9 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 22%。10 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 63%,其与 2 层棉布的 9 号口罩相比,增加了 1 层棉布,对颗粒物的过滤效率大幅提升。7 号口罩对全粒径范围内颗粒物的过滤效率均大于 31%。低速呼吸测试条件下,2 号口罩对粒径为 0.3~10.0 μm 颗粒物的过滤效率最高,9 号口罩的过滤效率最低,两者对粒径为 0.3 μm 颗粒物的过滤效率差值高达 77%。表明低速呼吸时,N95 型防尘口罩(2 号口罩)具有最佳防护效果,2 层棉布口罩(9 号口罩)的防护效果最差;2 层棉布口罩与活性炭口罩(7 号口罩)对粒径为 0.3 μm 颗粒物的过滤效率均低于 30%,不宜作为呼吸防护用品使用。

2.2.2 正常呼吸状态

为模拟测试人体正常呼吸时口罩对颗粒物的过

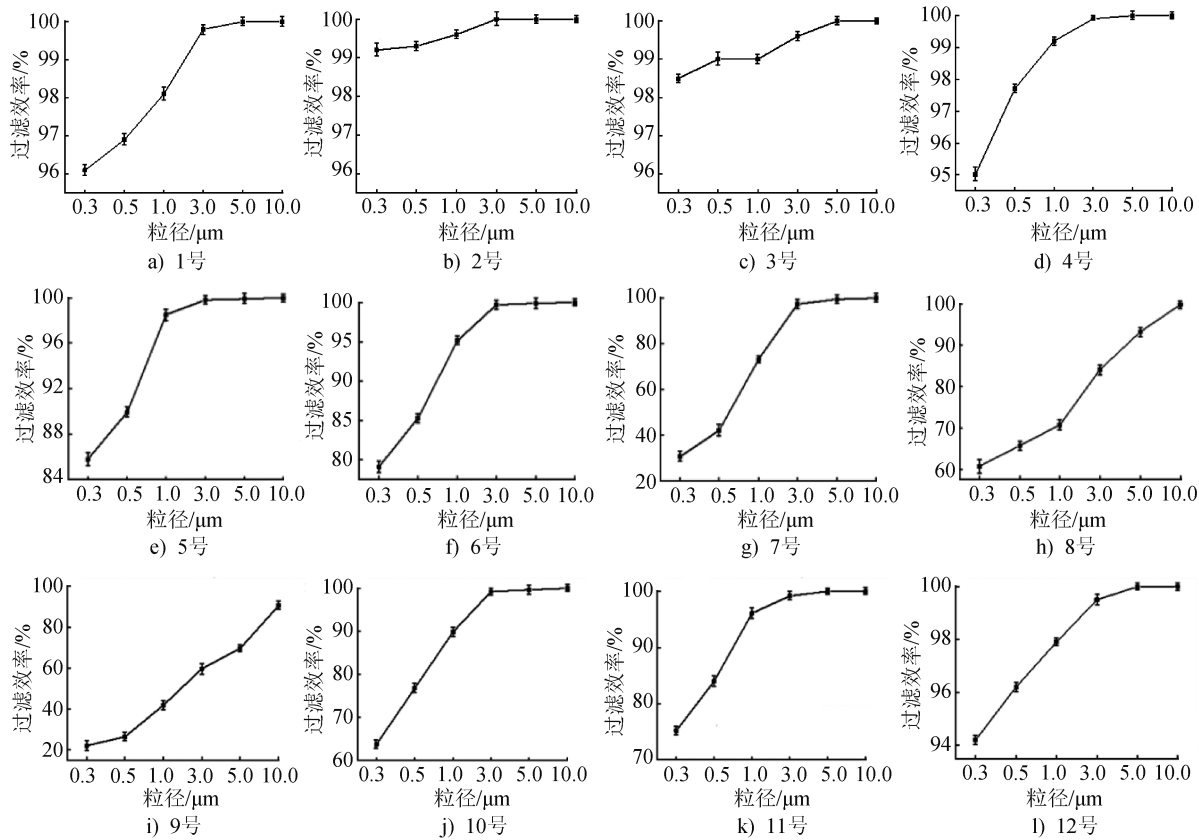


图 2 低速呼吸时口罩的过滤效率
Fig. 2 Filtration efficiency of masks during low-speed breathing

滤效果,将测试用气体流量设置为 44.1 L/min。在该流量下测试 12 种不同类型口罩对粒径为 0.3~10.0 μm 的颗粒物的过滤效率,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,12 种不同类型的口罩对颗粒物过滤效率由大到小排序依次为 2 号、3 号、1 号、4 号、12 号、5 号、6 号、11 号、8 号、10 号、7 号、9 号。与低速呼吸状态下的相比,正常呼吸状态下,12 种不同类型的口罩对颗粒物的过滤效率均有不同程度的下降。以最易穿透粒径(0.3 μm) 颗粒物的过滤效率下降情况作为主要比较对象进行分析,结果发现,1 号~12 号口罩对颗粒物的过滤效率依次下降了 0.7%、0.4%、1.5%、1.2%、2.4%、2.4%、2.9%、5.5%、2.9%、5.0%、1.9%、2.8%。正常呼吸测试条件下,12 种不同类型的口罩中,2 号口罩对颗粒物的过滤效率最大,9 号口罩对颗粒物的过滤效率最小。与低速呼吸测试条件下的测试结果相比,过滤效率降幅最大的为 8 号口罩,降幅最小的为 2 号口罩。与低速呼吸状态下的测试结果类似,正常呼吸状态下,N95 型防尘口罩(2 号口罩)的防护

效果最佳,2 层棉布口罩(9 号口罩)的防护效果最差。随着呼吸程度增加,海绵防尘口罩(8 号口罩)的防护效果下降明显,因此选择呼吸防护用品时,需慎重考虑。

2.2.3 剧烈呼吸状态

为模拟测试人体剧烈呼吸时口罩对颗粒物的过滤效果,将测试用气体流量设置为 88.3 L/min。在该流量下测试 12 种不同类型口罩对粒径为 0.3~10.0 μm 的颗粒物的过滤效率,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,12 种不同类型口罩对颗粒物过滤效率由大到小排序依次为 2 号、3 号、1 号、4 号、12 号、5 号、6 号、11 号、8 号、10 号、7 号、9 号。与正常呼吸状态相比,剧烈呼吸测试条件下,12 种不同类型口罩对颗粒物的过滤效率呈下降趋势。以最易穿透粒径(0.3 μm) 下颗粒物的过滤效率下降情况作为主要比较对象进行分析,结果发现,1 号~12 号口罩对颗粒物的过滤效率依次下降了 0.5%、0.1%、1.2%、2.4%、1.9%、3.7%、4.5%、2.3%、9.7%、9.9%、4.0%、1.6%。剧烈呼吸测试条件下,2 号口

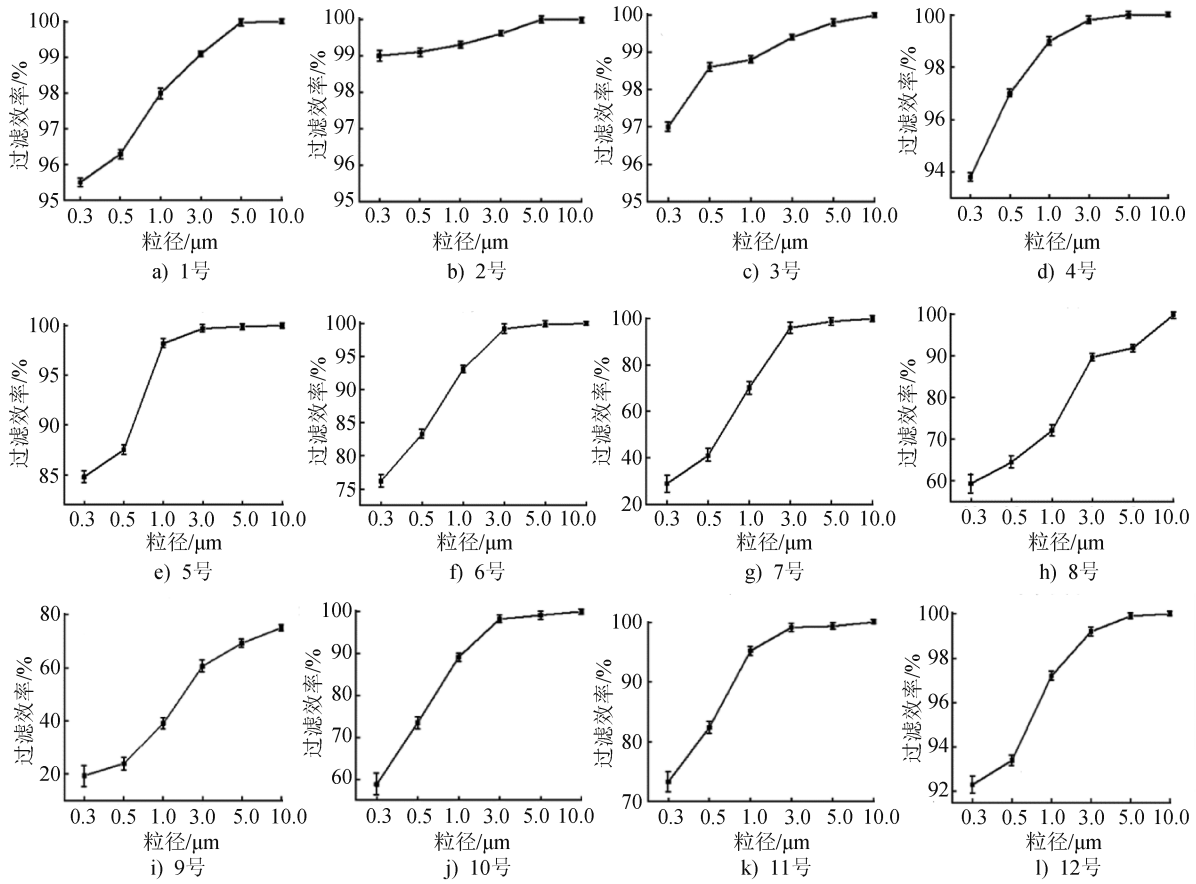


图3 正常呼吸时口罩的过滤效率
Fig. 3 Filtration efficiency of masks during normal breathing

罩对颗粒物的过滤效率最大,9号口罩对颗粒物的过滤效率最小,该结果与低速呼吸、正常呼吸测试条件下的结果一致。与正常呼吸测试条件下的测试结果相比,过滤效率降幅最大的为10号口罩,降幅最小的为2号口罩。剧烈呼吸时,2层棉布口罩(9号口罩)和活性炭口罩(7号口罩)对粒径为0.3 μm颗粒物的过滤效率均低于22%,不可作为防护用品使用;海绵防尘口罩(8号口罩)和3层棉布口罩(10号口罩)对粒径为0.3 μm颗粒物的过滤效率均低于60%,对防护要求较高的场所需谨慎选用;N95型防尘口罩(2号口罩)仍具有最佳防护效果,推荐作为呼吸防护用品使用。

综上,本文测试的12种不同类型口罩中,2号口罩(N95型防尘口罩)在3种测试流量下对颗粒物均具有最高的过滤效率,9号口罩(2层棉布口罩)在3种测试流量下对颗粒物的过滤效率均最低。对比图2~图4可以看出,随着测试流量的增大,12种口罩对颗粒物的过滤效率均呈下降趋势,

其中,2号口罩的过滤效率降幅最小,10号口罩的降幅最大。本文测试的颗粒物粒径范围涵盖大多数病毒、细菌等微生物的粒径范围,过滤效率测试结果能够反映口罩的防护性能。由测试结果可知:活性炭口罩、2层棉布口罩对颗粒物的防护效果较差,这2种口罩不可作为防护用品用于日常医疗防护;随着气体流量增加,海绵防尘口罩和3层棉布口罩的过滤效率下降幅度较大,表明这2种口罩在呼吸频率较快时使用,防护效果有衰减的可能,日常防护使用时需谨慎选用;一次性立体口罩、医用外科口罩、一次性口罩及儿童非医用口罩对粒径为0.3~10.0 μm颗粒物的过滤效率均高于69%,且在不同气体流量下的过滤效率相对稳定,在日常防护中可适当选用;KN95型口罩、N95型防尘口罩和KN90型口罩的性能较稳定,可用于对防护要求较高的医疗场所^[23-24]。

2.3 口罩阻力

为模拟测试人体低速呼吸、正常呼吸及剧烈呼

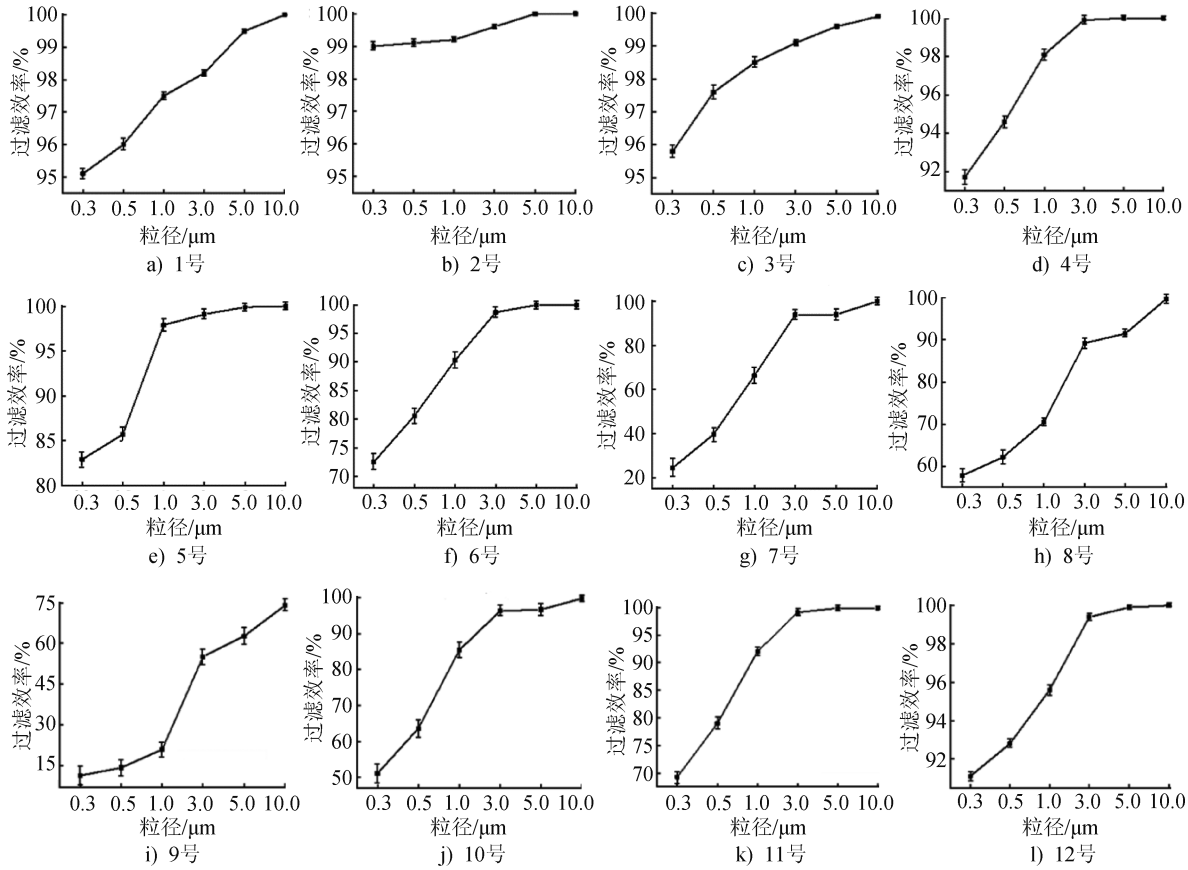


图 4 剧烈呼吸时口罩的过滤效率
Fig. 4 Filtration efficiency of masks during deep breathing

吸状态下口罩的阻力, 分别在气体流量为 29.4、44.1 和 88.3 L/min 下测试 12 种不同类型口罩的阻力, 测试结果如图 5 所示。随着测试流量的增加, 口罩的阻力呈上升趋势; 由低速呼吸变为正常呼吸时的阻力增长幅度小于正常呼吸变为剧烈呼吸时的阻力增长幅度。3 种呼吸状态下, 阻力最大的均为 1 号口罩(KN95 型口罩), 阻力最小的均为 9 号口罩(2 层棉布口罩)。低速呼吸时, 1 号口罩和 9 号口

罩的阻力分别为 40.0 Pa 和 12.5 Pa。正常呼吸时, 1 号口罩和 9 号口罩的阻力分别为 58.0 Pa 和 17.5 Pa。剧烈呼吸时, 1 号口罩和 9 号口罩的阻力分别为 120.0 Pa 和 42.5 Pa。随着测试流量的增加, 不同类型口罩阻力的增长幅度不同, 但 3 种测试流量条件下, 12 种口罩的阻力大小排序相同, 由大到小依次为 1 号、3 号、2 号、5 号、4 号、7 号、12 号、10 号、11 号、6 号、8 号、9 号。

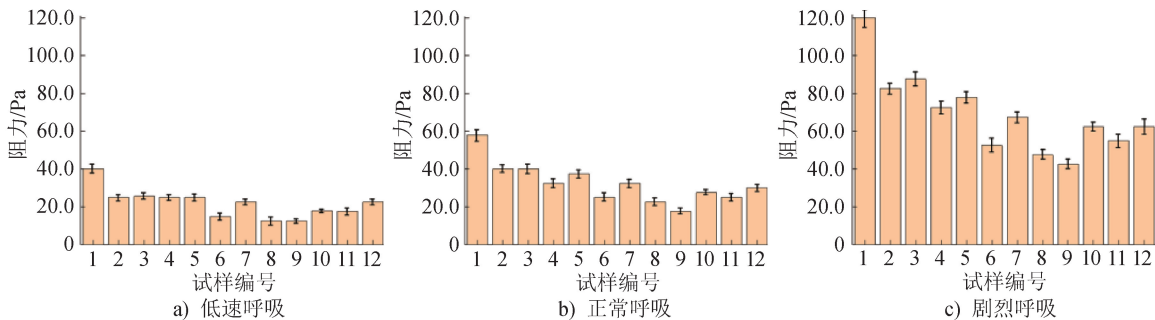


图 5 不同类型口罩在不同测试流量下的阻力
Fig. 5 Resistance of different types of masks under different test flow rates

2.4 口罩静电势

为了更好地表征口罩的过滤性能,测试了12种口罩的静电势,结果如表3所示。可以看出,12种不同类型的口罩中,1号、2号、3号及4号口罩的静电势均大于1 000 V,这4种口罩对颗粒物的过滤效率均高于92%(图2~图4);7号、8号、9号、10号口罩的静电势均小于50 V,这4种口罩对粒径0.3 μm

颗粒物的过滤效率均低于60%(图2~图4)。静电势是影响口罩过滤性能的重要指标^[25],在不增加阻力的前提下,增大口罩的静电势,可进一步提升口罩的过滤性能。2号口罩的阻力小于1号(图5)的,过滤效率则高于1号(图2~图4)的,是因为2号口罩具有更高的静电势,其更大的静电吸附效应提高了口罩捕集颗粒物的效率。

表3 口罩静电势

Tab.3 Test results of electrostatic potential for masks

试样编号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
静电势/V	1 072±126	1 158±131	1 001±96	1 225±179	850±99	820±82	41±27	38±11	15±10	16±8	662±79	782±113

3 结论

为分析常见口罩的性能和特点,评估其防护效果,本文选取了市面上常见的12种不同类型的口罩,分析了其结构,测试了口罩试样的厚度和静电势,并模拟人体低速呼吸、正常呼吸和剧烈呼吸状态,测试了12种口罩在不同气体流量下对颗粒物的过滤效率及阻力,得出如下主要结论:

(1)12种不同类型口罩中,海绵防尘口罩的厚度最大,为(4.10±1.29)mm;活性炭口罩厚度最小,为(0.52±0.22)mm。口罩厚度对口罩的过滤性能无直接影响。

(2)N95型防尘口罩对粒径为0.3 μm 颗粒物的过滤效率大于99%,2层棉布口罩对粒径为0.3 μm 颗粒物的过滤效率低于20%。随着测试流量的增加,口罩对颗粒物的过滤效率呈下降趋势,其中,N95型防尘口罩对粒径为0.3 μm 颗粒物的过滤效率降幅最小;3层棉布口罩对粒径为0.3 μm 颗粒物的过滤效率降幅最大。

(3)口罩阻力测试结果显示,KN95型口罩的阻力最大,剧烈呼吸状态下的阻力为120.0 Pa;2层棉布口罩的阻力最小,剧烈呼吸状态下的阻力为42.5 Pa。

(4)口罩的静电势与过滤效率具有相关关系,阻力相同的情况下,增大口罩的静电势可进一步提升口罩过滤性能。

(5)12种不同类型的口罩中,活性炭口罩和2层棉布口罩的防护效果较差,不适宜用于医疗防护场所;KN95型口罩、N95型防尘口罩和KN90型

口罩的性能较为稳定,可用于对防护要求较高的场所。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] KARANJIKAR S R, SENA A S, MANEKAR P, et al. Utilization of graphene and its derivatives for air & water filtration: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50(5): 2007-2017.
- [2] 徐玉康,朱尚,靳向煜. 聚四氟乙烯耐腐蚀过滤材料结构特征及发展趋势[J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 161-171.
- [3] 郭颖赫,赫伟东,柳静献. 聚对苯二甲酸乙二醇酯纳米纤维膜/涤纶针刺毡过滤复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(3): 572-577.
- [4] 陶晖. 用于大气污染控制的袋式除尘和非织造滤料[J]. 产业用纺织品, 2005, 23(1): 27-35.
- [5] 柳静献,毛宁,孙熙,等. 我国袋式除尘技术历史、现状与发展趋势综述[J]. 中国环保产业, 2022(1): 47-58.
- [6] LIU Y, CHEN H B, LI Y, et al. Exhaust and non-exhaust emissions from conventional and electric vehicles: a comparison of monetary impact values[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 331: 129965.
- [7] 张衍,王庆龙. 中国汽车尾气控制政策的减排效果研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 98-109.
- [8] 相彩琴. 汽车尾气污染:环境隐形杀手的治理问题[J]. 资源节约与环保, 2015(11): 89-90.

- [9] 沈华鑫,程江,谢颖诗,等. 垃圾分类背景下厨余垃圾剔除比例对生活垃圾焚烧厂 NO_x 排放的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 3957-3966.
- [10] 王荔,钟日钢,陈德珍,等. 生活垃圾焚烧炉应急处置医疗废物对炉渣和烟气排放影响研究[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(6): 1-7.
- [11] 张春飞,朱宝飞,胡彦弢,等. 两种生活垃圾焚烧炉飞灰的理化特性分析[J]. 环境科技, 2022, 35(5): 8-13.
- [12] 马春蕾,闫晓丽,庄晓虹,等. 烧烤烟气中挥发性有机物的释放规律及健康风险评价[J]. 环境保护科学, 2014, 40(6): 126-130.
- [13] 金怡,王家骏. 谈谈街头烧烤烟气污染问题[J]. 环境保护科学, 1995, 21(1): 65-74.
- [14] HE W D, GUO Y H, LIU J X, et al. Filtration performance degradation of in-use masks by vapors from alcohol-based hand sanitizers and the mitigation solutions [J]. *Global Challenges*, 2021, 5: 2100015.
- [15] HOSSAINI H, PIRSAHEB M, BARZEGAR A, et al. Performance evaluation of surgical, N95 and FFP2 respiratory masks by manikin-based sampling system for assessing the protection against airborne dust [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13(12): 101619.
- [16] 韩旭,张寅江,杨瑞. 医用防护口罩过滤层性能的对比与分析[J]. 产业用纺织品, 2014, 32(10): 30-36.
- [17] 柳静献,朱梦玉,常德强. 消毒方式对 N95 口罩过滤性能及表面电势的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3158-3164.
- [18] 李俊,伍文静,孙金玺,等. 电纺制备聚丙烯腈/聚偏氟乙烯复合纤维膜及其空气过滤性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(3): 741-748.
- [19] 钱辉,杨森,彭琪琪,等. 防护口罩颗粒物过滤效率影响因素研究分析[J]. 中国测试, 2020, 46(增刊 2): 30-34.
- [20] 冯智,何彩婷,崔中雪,等. 口罩用聚丙烯熔喷布的结构与过滤性能研究[J]. 中国纤检, 2023(3): 108-112.
- [21] 全琼瑛,应伟伟,祝成炎. 非织造医用防护口罩过滤材料结构与过滤效率关系的研究[J]. 上海纺织科技, 2015, 43(7): 1-2.
- [22] 戴有刚,孙祖军,成松涛. 通气阻力对口罩防护性能的影响[J]. 纺织报告, 2022, 41(12): 17-20.
- [23] 徐小方,王燕慧,宋丛珊,等. 医用口罩与非医用口罩标准差异分析[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(12): 43-51.
- [24] 刘芳,赵庆珠,黄钰,等. 一次性防护口罩、防护服检测标准和技术要求解析[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(11): 29-36.
- [25] RORNAY F J, LIU B Y H, CHAE S J. Experimental study of electrostatic capture mechanisms [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 28: 224-234.

(上接第 10 页)

- [68] QIU J K, YU T H, ZHANG W F, et al. A bioinspired, durable, and non-disposable transparent graphene skin-electrode for electrophysiological signal detection [J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(8): 999-1007.
- [69] LIU W L, CHEN C H, HAI W Q, et al. Laser-induced graphene conductive fabric decorated with copper nanoparticles for electromagnetic interference shielding application[J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2023, 40(6): 571-579.
- [70] SUN B H, MCCAY R N, GOSWAMI S, et al. Gas-permeable, multifunctional on-skin electronics based on laser-induced porous graphene and sugar-templated elastomer sponges [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(50): 1804327.
- [71] MAITHANI Y, MEHTA B R, SINGH J P. PEDOT : PSS-treated laser-induced graphene-based smart textile dry electrodes for long-term ECG monitoring [J]. *New Journal of Chemistry*, 2023, 47(4): 1832-1841.
- [72] FLEURY A, ALIZADEH M, STEFAN G, et al. Toward fabric-based EEG access technologies: seamless knit electrodes for a portable brain-computer interface [C]// *IEEE Life Sciences Conference (LSC)*. New York: IEEE, 2017: 35-38.
- [73] PAIVA A, CARVALHO H, CATARINO A, et al. Development of dry textile electrodes for electromiography a comparison between knitted structures and conductive yarns [C]// *9th International Conference on Sensing Technology (ICST)*. New York: IEEE, 2015: 447-451.
- [74] PITOU S, MICHAEL B, THOMPSON K, et al. Hand-made embroidered electromyography: towards a solution for low-income countries [J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3347.