

功能性口罩研究进展

Development of research on functional masks

俞航, 孙亦筑, 张一凡, 王佩文

YUN Hang, SUN Yizhu, ZHANG Yifan, WANG Peiwen

商洛学院健康管理学院, 陕西 商洛 726000

摘要: 佩戴口罩能有效阻断传染源, 是预防呼吸道传染疾病的重要举措, 同时佩戴口罩还能阻挡空气中的颗粒物, 减少有害颗粒或气体的吸入。而功能性口罩是具有高效性、舒适性、可降解性、功能可再生与重复性以及个性化等特征的口罩统称。基于国内民众对功能性口罩的需求, 汇总了国内外关于功能性口罩的研究现状, 分析了活性炭口罩、中草药口罩、纳米纤维薄膜口罩、抗菌抗病毒型口罩、可生物降解型口罩、自清洁型口罩、智能口罩等 7 种功能性口罩的优越性和应用潜力, 提出该类口罩在现实使用中的不足, 并对未来发展趋势进行了展望, 旨在为研发便捷、多功能并存、满足个性化需求的新型口罩提供参考依据。

关键词: 常用口罩; 功能性口罩; 呼吸道传染病; 职业防护; 研究进展

中图分类号: R168 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2024)04-0540-06

引用: 俞航, 孙亦筑, 张一凡, 等. 功能性口罩研究进展[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(4): 540-545.

口罩佩戴在口鼻部, 能起到阻止有毒有害气体、粉尘等作用。日常佩戴口罩已成为居民自我保护的有效措施之一, 可有效阻断呼吸道传染疾病在人际间传播。新型冠状病毒疫情暴发以来, 口罩发挥了至关重要的作用, 它从传播途径阻断了病毒的传播, 降低了居民感染新型冠状病毒的风险^[1]。现阶段, 疫情防控进入常态化阶段, 很多人在日常生活、工作中佩戴口罩已成为习惯。医用外科口罩、一次性使用的医用口罩、医用防护口罩等在生活中使用频率较高, 但它们在佩戴过程中常常存在易潮湿、透气性差、口罩内容易产生异味等情况, 长时间佩戴会出现呼吸不畅、头疼、胸闷、皮肤过敏等不良反应, 降低了口罩的佩戴率。近年来, 活性炭口罩、中草药口罩等功能性口罩相继出现, 它们在疏水性、透气性和舒适性等方面的优势引起了人们的关注, 但防护性能可能打了折扣。本文拟对目前功能性口罩的研究现状进行综述, 旨在为研发可便携、多功能并存、满足个性化需求的新型口罩提供参考依据。

1 功能性口罩概念和分类

功能性口罩是具有高效性、舒适性、可降解性、

功能可再生与重复性以及个性化等特征的口罩统称^[2]。功能性口罩区别于常见口罩的特点是, 它们在满足基本防护需求的同时, 能够实现抗菌抗病毒、除臭保鲜、增强舒适性等功能, 满足佩戴者在不同场景下的需求。医用外科口罩、一次性使用的医用口罩等常见口罩具有行业标准和适用范围, 口罩质量和安全性有保障, 相比之下, 功能性口罩缺乏行业标准, 市场上的功能性口罩质量、价格、外观等参差不齐, 影响佩戴者选用。目前, 功能性口罩主要包括活性炭口罩、中草药口罩、纳米纤维薄膜口罩、抗菌抗病毒型口罩、可生物降解型口罩、自清洁型口罩、电子智能口罩等^[3]。

2 功能性口罩的研究进展

2.1 活性炭口罩

活性炭口罩是指在普通口罩中加入活性炭, 凭借活性炭的吸附能力, 减少外部污染物进入人体。研究发现, 活性炭防护口罩可有效防止有害气体或粒径为 5 μm 的颗粒进入人体, 防护效果远高于普通口罩^[4], 并且长时间佩戴, 也能维持较高的防护效果^[5]。与此同时, 活性炭口罩吸附室内残留甲醛气体的能力较强^[6]。李一帆^[7]、陶玥^[8]先后研制了活性炭负载光催化防雾霾空气净化口罩和载银活性炭口罩, 经实验, 前者对 $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 阻隔效率达到

基金项目: 2022 年国家级大学生创新创业训练计划项目 (S202211396025)

作者简介: 俞航 (1993—), 男, 硕士, 讲师

87.80%, 高于一次性活性炭口罩的 69.03%; 佩戴后者 1 h 后, 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和白色念珠菌的阻隔效率均超过 99%, 抗菌性能优异。

部分活性炭口罩已经在市场上出现, 比如 3M 有限公司的 9542 头戴式活性炭口罩、9541 耳戴式活性炭口罩; 以及国内一些医疗用品公司研制的一次性活性炭口罩、硅胶活性炭面罩等。不可忽视的是, 大多数活性炭口罩的研发和推广还在起步阶段。近几年, 国内多家单位共同制定了 T/ZJOSH 00002—2021《活性炭除异味口罩》团体标准, 为活性炭口罩在安全生产和职业健康领域的使用奠定了参考依据。

目前来看, 活性炭口罩存在三个方面的不足。一是活性炭口罩的防护效果会随污染物在活性炭表层的积聚而下滑, 需定期更换或清洗才能继续发挥吸附作用^[7]。二是活性炭口罩不适用于雨天、湿度大的夏季等潮湿环境使用, 此时口罩吸附效果较差^[5]。三是活性炭口罩成本低, 但推向市场的活性炭口罩活性炭含量高低不等, 且价格出入很大, 影响佩戴者的购买意愿。整体而言, 活性炭口罩具有广阔的发展前景, 佩戴者对健康意识的增强和对个性化产品的需求将推动活性炭口罩质量和功能不断优化。

2.2 中草药口罩

中草药口罩在我国古代称为“闻吸疗法”, 其预期是通过嗅闻药物气味, 使气味通过经脉进入全身各个部位, 进而调理机体的阴阳平衡, 起到防治疾病的作用^[9]。李利丹等^[10]制备了中草药口罩, 将医用纱布口罩浸没于大青叶和板蓝根制成的中草药原液中, 随后烘干并在表面覆盖一层无药物的无菌纱布。实验结果显示, 该口罩可使 93% 以上的流感病毒失去感染性。董艳等^[11]以当归、冰片和细辛等制成的头疼宁口罩可治疗偏头痛, 提高了患者生活质量。付宝慧等^[12]以薄荷、辛夷和防风制成的中草药口罩, 能改善变应性鼻炎的症状。张璐千等^[13]自制了中草药抗霾口罩, 中草药成分以薄荷、辛夷、甘草、板蓝根、百部为主, 该口罩过滤 $PM_{2.5}$ 的效率在 50% ~ 90% 之间, 同时能润肺护肺和防治呼吸系统疾病。王欠等^[14]以天麻、葛根、茯苓和当归为原材料研制出一款缓解老年人长时间佩戴口罩而产生头晕、胸闷症状的新型中草药口罩。

中草药口罩在佩戴时不受时间和地点的限制, 且在提高患者依从性和生活质量方面有优势。存在的缺点主要包含三个方面, 一是缺乏佩戴中草药口罩期间的安全性探索和分析, 部分佩戴者可能出现气味不适、头晕、恶心等不良反应; 二是缺乏中草药

口罩行业标准, 无法规范和引导行业发展^[15]; 三是中草药口罩当中的中草药往往从多成分、多靶点发挥作用, 而其明确的作用机制阐释明显不足, 缺少科学的数据支撑。

市场上现有的中草药口罩较少, 目前主要有某科技有限公司推出的一次性中药口罩和某医疗卫生用品公司推出的连花清瘟爆珠号口罩, 佩戴者可选择性不高。尽管目前中草药口罩的市场有限, 但随着中草药口罩制作工艺的不断改进和成本的降低, 中草药口罩有可能会在更广泛的领域得到应用, 尤其是对于一些患有偏头痛、鼻炎等疾病的患者, 中草药口罩能够为他们提供更多的选择空间。

2.3 纳米纤维薄膜口罩

国家纳米科技创新研究院推出了恩伊纳米防护口罩^[16], 其原理是在口罩纳米纤维膜中加入抗菌剂, 抗菌效果显著。随着静电纺丝工艺日渐成熟, 聚偏氟乙烯、聚丙烯腈等静电纺丝纳米纤维滤材相继被开发出来。近年来, 梁晓天等^[17]研制了静电纺丝纳米纤维膜抗菌口罩, 该口罩盐性和油性介质过滤效率分别为 99.8% 和 97.8%, 大肠杆菌、白色念珠菌和金黄色葡萄球菌抑菌率均 > 97%。赵磊等^[18]研制了 4 款防雾霾纳米纤维膜口罩, 它们均能过滤 0.3 μm 颗粒物, 过滤效果达 99%, 同时呼吸时透气效果舒适, 适合雾霾或空气污染较重的场合佩戴。李俊丽^[19]对纳米纤维膜先后进行脱氟处理、羟基化反应、卤胺化改性和氯化处理, 该款纳米纤维膜口罩对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌抗菌效果超过 99.9%, 对 $PM_{0.3}$ 去除效率达到 99.93%, 且通气阻力仅为 79 Pa。严杰等^[20]验证了膨体聚四氟乙烯 (expanded PTFE, ePTFE) 纳米纤维膜口罩的可重复性, 使用三种常见消毒方式分别进行 20 次重复试验, 该口罩过滤性能稳定, 过滤效率达到 95% 以上。其次, El-Atab 等^[21]开发了柔性纳米纤维多孔膜, 过滤效率高、透气性好, 还可重复使用。目前, 纳米纤维膜的最新研究包括多功能静电纺丝纳米纤维膜、高效低阻静电纺丝纳米纤维膜、复合抗菌静电纺丝纳米纤维膜和聚偏氟乙烯/聚砜 (PVDF/PSU) 复合抗菌纳米纤维膜等^[22]。

纳米纤维薄膜口罩的缺点, 一是当环境中空气湿度大时, 水蒸气容易在纳米纤维薄膜表面形成水膜, 此时纳米纤维薄膜口罩的通气阻力会迅速增高^[23]; 二是与现有成熟的技术相比, 纳米纤维薄膜的滤材价格和技术成本较高; 三是针对纳米纤维薄膜的毒性、稳定性以及生物相容性并没有进行系统的考察和验证^[24], 是否会出现不可预见的毒副作用尚不清楚。

目前,海氏海诺集团有限公司推出的纳米膜防护口罩、捷克 RESPILON 纳米纤维科技有限公司推出的 RrepiRaptor 口罩、Supield 科技有限公司推出的纳米循环使用防护口罩、兴和株式会社推出的三次元 4D 纳米口罩相继投入市场。但是纳米纤维膜口罩的大多数研究成果来自高校或研究院,且基本处于实验室研究阶段。在未来的实际生产过程中,高校、研究院应和企业加强合作,根据市场实际需求加快纳米纤维膜口罩的产业化生产。其次,从技术上看纳米纤维膜口罩重视过滤效率、呼吸阻力和抗菌性能的同时,还应向 PM_{2.5} 防护等市场进军,以提升竞争力^[25],降低其高成本带来的不利影响。

2.4 抗菌抗病毒型口罩

抗菌抗病毒型口罩是通过改变口罩涂层和薄膜来实现的,比如铜基抗菌抗病毒涂层和薄膜、银基抗菌抗病毒涂层和薄膜、二氧化钛基抗菌涂层和薄膜等^[26]。Kumar 等^[27]利用浸渍涂层技术,同时融入铜元素,制备出新型抗菌抗病毒口罩,能限制变形链球菌和大肠杆菌的生长,并且体外实验证实该口罩对已侵入细胞的病毒有抑制作用。Kharaghani 等^[28]通过原位法合成聚丙烯腈/银纳米纤维薄膜,研制出可洗涤的抗菌型口罩,口罩抗菌效果显著,能有效阻止细菌从人到环境以及环境到人的双向传播。魏玮等^[29]利用静电纺丝技术制备了聚丙烯腈/二氧化钛复合抗菌薄膜,抗菌测试显示其能抑制大肠杆菌生长。Ahmed 等^[30]开发了二氧化钛涂层口罩,二氧化钛颗粒溶液对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出较强的、迅速的抑制作用。Horváth 等^[31]报道了基于二氧化钛纳米颗粒的光消毒口罩,其具有较强的抗菌活性,且该口罩可重复使用 1 000 多次。Kumar 等^[32]利用二硫化钼纳米片制备出具有抗菌活性和光热性能的抗菌口罩。阳光照射下,口罩表面温度快速提升到 77 °C,并在 3 min 内实现了自我消毒,显著减少口罩表面附着的细菌数量。曾语晴^[33]利用石墨烯的结构特点,开发出新型石墨烯口罩,该口罩对大肠杆菌抑菌率达 99.8%,对 0.1 μm 的细菌和病毒过滤效果达 97%。Shan 等^[34]介绍了一种电热口罩,其原理是将具有导电和导热性的石墨烯涂覆到含有导电布带的熔喷无纺布上。低电压下,石墨烯涂层可快速产生热量至 80 °C 以上,杀死附着在过滤层和口罩表面的常见病毒。Zhong 等^[35]报道了 N95 口罩增加具有疏水特性的银纳米颗粒和石墨烯复合涂层,其防护效果明显优于现有的个人防护设备。阳光照射 1 min,口罩表面温度提高到 80 °C 以上,能杀死积聚在口罩表面的细菌和病毒。此外,

季铵盐、卤化物等制成的有机抗菌抗病毒口罩相继出现,据报道它们抑制细菌和病毒的速度快、效率高^[36]。目前,国内出现了一些基于上述研究的已成型口罩,例如某科技有限公司推出了氧化铜防护口罩;上海某科技有限公司研发出石墨烯复合抗菌抗病毒口罩;某医疗器械集团有限公司推出了季铵盐口罩。

其他面料和工艺方面,陈志鹏等^[37]采用超细莫代尔纤维和超细氧化锌抗菌涤纶为原料,开发出单面拒水抗病毒口罩,其抗菌抗病毒性能优于医用外科口罩,金黄色葡萄球菌和大肠杆菌抑菌率分别为 97.33%和 93.87%,并且口罩抗病毒活性值为 2.27,抗病毒活性率高达 99.47%。Khandaker 等^[38]将聚己内酯纳米纤维布用于口罩当中,该口罩能够捕获空气中颗粒物和细菌。梁鑫花等^[39]运用针织全成形编织技术,采用抗菌纱线编织成的抗菌口罩具有良好的抗菌效果,经过 50 次洗涤后,该口罩金黄色葡萄球菌抗菌率 > 99%,白色念珠菌抗菌率 > 93%,大肠杆菌抗菌率 > 81%。整体来看,抗菌抗病毒型口罩的发展潜力巨大,主要从抗菌抗病毒涂层或薄膜方面进行改进,具有较好的社会效益和经济效益,有望成为未来口罩改进的新方向。

抗菌抗病毒型口罩的缺点包括下列四个方面:一是缺少抗菌抗病毒涂层和薄膜脱落时,对佩戴者吸入风险的评估。二是由于银离子本身的特性,银基抗菌抗病毒涂层和薄膜易发生氧化还原反应^[40],进而会产生变色影响佩戴体验,同时银离子对人体存在潜在危害,易造成环境污染^[40]。石墨烯抗菌抗病毒涂层和薄膜的光热性能通常无法被佩戴者精准控制,佩戴时可能存在温度过高的风险^[3]。有机抗菌抗病毒口罩存在耐热性差,容易产生耐药性。三是抗菌抗病毒型口罩价格高昂,每只几十到几百元不等。四是目前抗菌抗病毒型口罩的过滤效果和呼吸阻力尚未有研究提及。

市场上,瑞士 HeiQ 公司设计出 HeiQ MetallIQ 口罩并申请专利,其核心是将微量的铜转化为蒸气,使其均匀沉积在纤维表面以实现抗菌抗病毒的作用。此外,国内多家单位共同制定了 T/CSTE 0011—2020《抗菌抗病毒口罩》团体标准,使抗菌抗病毒口罩的生产和使用更加规范。可以预见,各类抗菌抗病毒口罩将不断更新、升级。从安全性的角度看,佩戴者更倾向于天然来源、植物提取等非化学合成的抗菌抗病毒型口罩,这确实对抗菌抗病毒型口罩提出了更高要求。但不可忽视的是,天然抗菌抗病毒型口罩存在着起效时间短、效果不稳定等问题。

2.5 可生物降解型口罩

聚乳酸是一种新型可生物降解的材料,为研发可生物降解口罩奠定了基础。He等^[41]基于静电纺丝技术,以聚乳酸为原材料,开发出可生物降解的口罩,PM_{0.3}过滤效率达99.996%,同时具有更低的通气阻力(104 Pa)^[42]。随后,Wang等^[43]同样利用静电纺丝制备了可生物降解的聚氨酯口罩,过滤效率达99.8%,通气阻力仅为52 Pa。Patil等^[44]报道了另一种可生物降解口罩,其过滤层由无针电纺聚乳酸和中草药提取物制备而成。与传统口罩相比,该口罩透气性强,通气阻力为35.78 Pa,细菌过滤效率为97.9%。与此同时,该口罩在牛粪生物降解浆料的浸泡下有较强的生物降解特性。邓桂荣等^[45]以聚乳酸无纺布和聚乳酸熔喷布制成新型口罩,需氧环境下口罩的生物降解率为66.4%。Choi等^[46]开发出可生物降解、高性能纤维口罩,其原料包括微纤维、纳米纤维和壳聚糖,该口罩过滤效果接近N95口罩,清除PM_{2.5}的效率高达98.3%,即使潮湿环境下对PM_{2.5}的清除依旧高效;佩戴时呼吸舒适,通气阻力仅为59 Pa。更重要的是,该口罩埋入堆肥土壤4周内可被完全分解。

可生物降解型口罩具备优异的生态兼容性和生物可降解性等优势^[47],对推动环境的可持续发展具有重要意义。其不足主要有:一是现有的研究大都集中于制备的层面,对可生物降解型口罩的降解周期、降解速率、防潮性能等方面的探索较少;二是将各类可降解材料用于可生物降解型口罩的生产仍缺乏技术支撑^[45];三是各企业可降解材料生产规模较小,生产成本低,规模化、高性能技术还亟待提高。

目前市场上可生物降解型口罩种类较少,但在不断开发中。某医疗用品股份有限公司开发的可生物降解口罩,根据测试,180 d时降解率达到95%。但国内企业在可生物降解型口罩领域的专利申请数量有限^[48]。随着国家政策的引导和佩戴者环保意识的增强,未来市场上可生物降解型口罩将会越来越多。不过,不能仅局限于需氧堆肥和厌氧堆肥条件下的降解,未来需要继续研究其他生物降解环境,开发多元化的可生物降解的新型口罩。

2.6 自清洁型口罩

自清洁型口罩的研制,实现了口罩的可重复使用,能有效减轻资源浪费。聚氨酯口罩具有良好的弹性、舒适性、柔软性和阻隔性,但其表面亲水性强,容易导致口罩透气性差^[3]。Ray等^[49]开发了疏水硅溶胶涂层,该涂层具有防滴、疏水和自清洁特性。Kumar等^[50]将双通道喷雾辅助纳米涂层应用于外科

口罩,开发出自清洁口罩,阳光照射下,该涂层温度迅速升高到70℃以上,并产生大量自由基,破坏直径100 nm左右的病毒样颗粒,使口罩实现自我清洁且可重复使用。Pal等^[51]通过回火双模激光诱导机制,提出超薄石墨烯涂层,该涂层处于超疏水状态时,进入的水滴会被反弹,这种疏水性对呼吸道飞沫有很好的阻碍作用,在阳光照射下可以迅速提高温度至85℃,使口罩实现自我清洁,重复使用。王惠^[52]开发了光驱动超疏水自修复口罩,具有优异的超疏水性能,对金色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的抑制率分别提高至50.11%和60.44%;该口罩显示出优异的光热杀菌性能,模拟日光照射下口罩表面温度迅速升至80℃,当照射10 min时金色葡萄球菌存活率仅为10.55%,铜绿假单胞菌存活率仅为9.51%;此外,全血黏附和自清洁实验结果证实,该口罩具有优异的防污损性能^[52]。

目前,国内市场上尚未出现自清洁口罩,专利申请量也是寥寥无几。自清洁型口罩具有绿色低碳、高效抗菌等特点,但是当光线不足时,其自我清洁效果可能大打折扣,极端天气下甚至可能完全失效。如何在黑暗环境下同样发挥自清洁功能,仍须进一步探索。与此同时,降低自清洁型口罩的研制成本、实现产业化应用,还面临着诸多挑战。

2.7 智能口罩

国内智能口罩的研究主要集中在防霾方面,创新程度不高。国外学者研究成果颇丰,研究内容有简单的体温、心率、血氧饱和度、呼吸频率、CO₂监测,也有防御空气传播的病原体、新型冠状病毒肺炎患者核酸监测等复杂功能。Fakir等^[53]设计了一款智能口罩,可测量佩戴者皮肤温度和呼吸温度,准确率较高。Goar等^[54]研制了热成像系统集成的智能口罩,它能自动测量佩戴者在公共场所密切接触到的人群各自的体温。Lazaro等^[55]发明一款监测体温和呼吸频率的智能口罩,该口罩通过非侵入式双热通量系统测量体温,同时增加了热敏电阻测量呼吸频率。Ye等^[56]介绍了一种轻型零功耗智能口罩,其能实时监测佩戴者咳嗽情况,识别佩戴者是否正确佩戴口罩,同时追踪潜在的传染者。Selvadass等^[57]开发了另一款新型智能口罩,该口罩配备了LM35温度传感器,除监测体温和呼吸频率外,还包含警戒系统,若未与附近的人群保持必要的物理距离,该系统将向患者发出警报。Pan等^[58]开发的远程呼吸监测口罩,一方面最大限度地减少与患者密切接触的风险,另一方面帮助医护人员实时监测冠状病毒引起的肺炎症状以及心率、血氧饱和度和血压的

波动情况。Escobedo 等^[59]设计了能无线监测 CO₂ 的智能面罩,用于了解长期佩戴口罩对机体可能产生的不良影响。Kalavakonda 等^[60]构想了一种用于主动防御空气传播病原体的智能口罩,通过使用机载颗粒物传感器感应口罩附近不同大小的空气颗粒,以压电致动器产生的喷雾来装载附近的气溶胶颗粒,使其迅速降落到地面,从而智能化地减少佩戴者周围的颗粒物。程智等^[61]设计一款集智能送风、雾霾监测、除湿散热等功能为一体的多功能口罩,运用半导体传感器和气压传感器为主的电子设备进行组接,该口罩具有防雾霾、可重复佩戴、除湿散热快、安全性强等优势。

但智能口罩面临着很多问题。一是智能口罩造价昂贵,滤芯等模块需要定期更换;二是智能口罩装有传感器、电池等部件,不宜携带;三是智能口罩存在续航不足的问题,续航时间通常是几个小时^[62];四是智能口罩对颗粒物等的过滤效率还有待优化。在国内外市场中,智能口罩已被分为两类:无防疫功能和具有防疫功能,使用场所和使用人群显著不同。“全民健康”理念的不断加深,将促使人工智能、大数据等高新技术深度融合,智能口罩的发展拥有很大的空间。未来可设计自动消毒、重复利用、可录音扩音、可实时翻译等功能的智能口罩^[63],多方面满足市场的使用需求。

3 小结与展望

未来功能性口罩的开发可以从四个方面入手:一是加大口罩滤材的研发投入,将传统非织造织物材料与新型材料相结合,开发出能更好地平衡高效与低阻的复合滤材,同时口罩结构设计尽可能符合面部曲线,以提高口罩的过滤效率和舒适度;二是明确功能性口罩对人体和环境的具体影响机制,并及时开发出环境友好且安全的功能性口罩;三是在优化现有功能性口罩性能的同时,迫切需要集成新技术、新工艺,以开发具有多重功能且价格容易被消费者所接受的新型口罩;四是从产业角度看,加强标准法规的建设,规范功能性口罩产业的发展。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

[1] 张敏,刘刚,陈蕾,等. 新型冠状病毒疫情对大众口罩使用认知的影响[J]. 实用预防医学, 2021, 28(6): 734-736.
 [2] 陈凤翔,翟丽莎,刘可帅,等. 防护口罩研究进展及其发展趋势[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(2): 1-12.
 [3] 刘若锦,邢娣娣,甄晓兰,等. 新型冠状病毒防护功能性口罩

的研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2023, 44(1): 97-106.
 [4] 陈剑峰. 活性碳纤维物理化学特性及在口罩中应用[J]. 粘接, 2022, 50(8): 111-114.
 [5] 王雷瑶. 日常防护口罩颗粒物净化效果研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
 [6] 邹祎萍,邹美玲. 改性活性炭口罩吸附甲醛的研究[J]. 广州化工, 2017, 45(5): 55-57.
 [7] 李一帆. 活性炭复载光催化防雾霾空气净化口罩的研制[J]. 当代化工研究, 2016(9): 80-81.
 [8] 陶玥. 载银活性炭纤维的制备与应用性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
 [9] 李欣,曾小娟,艾崇文,等. 中药口罩沿革及应用研究进展[J]. 养生保健指南, 2021(47): 293-294.
 [10] 李利丹,蒋美娟,张琳琳,等. 中药药性口罩的制备及其抗 H1N1 流感病毒的实验研究[J]. 中国病原生物学杂志, 2013, 8(5): 397-398.
 [11] 董艳,吴永江,潘渭樵,等. 自制头痛宁口罩治疗偏头痛 50 例疗效观察[J]. 浙江中医杂志, 2014, 49(5): 325-326.
 [12] 付宝慧,王得帅,占思颖,等. 中药口罩缓解变应性鼻炎症状自身对照试验研究[J]. 新中医, 2019, 51(4): 208-211.
 [13] 张璐千,张会,李甲亮,等. 一种防护 PM_{2.5} 的中药型口罩研发[J]. 广州化工, 2015, 43(24): 67-68.
 [14] 王欠,田辉,陈政羽,等. 缓解老年人头晕胸闷口罩的研制[J]. 全科护理, 2023, 21(5): 703-705.
 [15] 韩健勇,蒋益萍,韩婷,等. 防疫中药大健康产品概述及展望[J]. 药学实践杂志, 2022, 40(5): 433-436.
 [16] 张超星,边文越,王海名,等. 世界主要国家纳米科技发展前瞻/部署分析研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(10): 1142-1149.
 [17] 梁晓天,谢晓倩,李康,等. 静电纺纳米纤维抗菌口罩的研制及性能研究[J]. 中国个体防护装备, 2022(4): 4-8.
 [18] 赵磊,张帅帅,陈贵翠,等. 防雾霾纳米滤芯及其口罩的开发与生产[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(11): 13-14.
 [19] 李俊丽. 高效低阻 PVDF 纳米纤维膜的制备及口罩滤芯应用[D]. 郑州: 中原工学院, 2023.
 [20] 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.
 [21] EL-ATAB N, QAISER N, BADGHAISH H, et al. Flexible nanoporous template for the design and development of reusable Anti-COVID-19 hydrophobic face masks [J]. ACS Nano, 2020, 14(6): 7659-7665.
 [22] 张展,陈品源,晋艺,等. 口罩用纳米纤维膜的最近进展研究[J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(4): 88-89.
 [23] 刘学洋. PVDF/PSU 复合抗菌纳米纤维空气过滤材料的制备及其在口罩中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
 [24] 刘若锦,甄晓兰,邢娣娣,等. 纳米技术在新型冠状病毒肺炎诊断、治疗和防护领域的研究进展 [J]. 医疗卫生装备, 2022, 43(6): 88-96.
 [25] 时钢印,高秋菊. 基于专利视角的口罩用纳米纤维膜发展研究[J]. 材料导报, 2020, 34(z1): 552-556.
 [26] 王洁,叶雨晴,李源,等. 基于无机纳米材料的抗菌抗病毒功能涂层和薄膜[J]. 化学学报, 2022, 80(9): 1338-1350.
 [27] KUMAR A, SHARMA A, CHEN Y, et al. Copper@ZIF-8 core-

- shell nanowires for reusable antimicrobial face masks [J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(10):2008054.
- [28] KHARAGHANI D, KHAN M Q, SHAHRZAD A, et al. Preparation and in-vitro assessment of hierarchical organized antibacterial breath mask based on Polyacrylonitrile/Silver (PAN/AgNPs) nanofiber[J]. *Nanomaterials*(Basel), 2018, 8(7):461.
- [29] 魏玮,戴一鸣,石瑾.一种高透气性杀菌口罩内膜的制备及其抗菌性能的研究[J]. *江西化工*, 2021, 37(6):95-99.
- [30] AHMED O B, ALAMRO T. Evaluation of the antibacterial activities of face masks coated with titanium dioxide nanoparticles [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):18739.
- [31] HORVÁTH E, ROSSI L, MERCIER C, et al. Photocatalytic nanowires-based air filter: towards reusable protective masks [J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(40):2004615.
- [32] KUMAR P, ROY S, SARKAR A, et al. Reusable MoS₂-modified antibacterial fabrics with photothermal disinfection properties for repurposing of personal protective masks [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(11):12912-12927.
- [33] 曾语晴. 石墨烯纤维抗病毒口罩面料的开发与实践[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, 49(6):146-147.
- [34] SHAN X, ZHANG H, LIU C, et al. Reusable self-sterilization masks based on electrothermal graphene filters [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(50):56579-56586.
- [35] ZHONG H, ZHU Z, YOU P, et al. Plasmonic and superhydrophobic self-decontaminating N95 respirators [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7):8846-8854.
- [36] 沈霞,杨好,陈晨,等. 抗菌/抗病毒非织造布及其测试标准探究[J]. *纺织报告*, 2022, 41(10):49-51.
- [37] 陈志鹏,张新斌,周橙,等. 抗病毒针织口罩面料的开发[J]. *针织工业*, 2022(9):1-5.
- [38] KHANDAKER M, PROGRI H, ARASU D T, et al. Use of polycaprolactone electrospun nanofiber mesh in a face mask [J]. *Materials*(Basel), 2021, 14(15):4272.
- [39] 梁鑫花,丛洪莲,黄娴,等. 针织全成形抗菌防护口罩的开发与性能研究[J]. *丝绸*, 2021, 58(7):117-121.
- [40] 吴生英,彭光佳,孙彤,等. 抗菌、抗病毒涂料的发展现状及其在医院中的应用[J]. *中国医院建筑与装备*, 2021, 22(6):94-97.
- [41] HE H, GAO M, ILLÉS B, et al. 3D printed and electrospun, transparent, hierarchical polylactic acid mask nanoporous filter [J]. *Int J Bioprint*, 2020, 6(4):278.
- [42] WANG L, GAO Y, XIONG J, et al. Biodegradable and high-performance multiscale structured nanofiber membrane as mask filter media via poly (lactic acid) electrospinning [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2022, 606(2):961-970.
- [43] WANG J, LIU S, YAN X, et al. Biodegradable and reusable cellulose-based nanofiber membrane preparation for mask filter by electrospinning [J]. *Membranes*(Basel), 2021, 12(1):23.
- [44] PATIL N A, GORE P M, JAYA P N, et al. Needleless electrospun phytochemicals encapsulated nanofibre based 3-ply biodegradable mask for combating COVID-19 pandemic [J]. *Chem Eng J*, 2021, 416:129152.
- [45] 邓桂荣,高亮,刘东满,等.一种新型口罩在两种堆肥条件下的生物降解性比较[J]. *中国塑料*, 2023, 37(3):88-93.
- [46] CHOI S, JEON H, JANG M, et al. Biodegradable, efficient, and breathable multi-use face mask filter [J]. *Adv Sci*(Weinh), 2021, 8(6):2003155.
- [47] 程怡昕. 聚乳酸/聚己内酯纳米纤维膜用于口罩滤材的研究[D]. 青岛:青岛大学, 2022.
- [48] 何飘,黄艺涓.基于专利视角的可降解医疗防护纺织品[J]. *纺织科技进展*, 2023(8):4-7.
- [49] RAY S S, PARK Y I, PARK H, et al. Surface innovation to enhance anti-droplet and hydrophobic behavior of breathable compressed-polyurethane masks [J]. *Environ Technol Innov*, 2020, 20:101093.
- [50] KUMAR S, KARMACHARYA M, JOSHI S R, et al. Photoactive antiviral face mask with self-sterilization and reusability [J]. *Nano Lett*, 2021, 21(1):337-343.
- [51] PAL K J R, KYZAS G Z, KRALJ S, et al. Sunlight sterilized, recyclable and super hydrophobic anti-COVID laser-induced graphene mask formulation for indelible usability [J]. *J Mol Struct*, 2021, 1233:130100.
- [52] 王惠. 基于超疏水-光学疗法协同抗菌材料的制备及性能研究[D]. 吉林:吉林大学, 2021.
- [53] FAKIR M H, YOON S E, MOHIZIN A, et al. Prediction of individual dynamic thermal sensation in subway commute using smart face mask [J]. *Biosensors*(Basel), 2022, 12(12):1093.
- [54] GOAR V, SHARMA A, YADAV N S, et al. IoT-based smart mask protection against the waves of COVID-19 [J]. *J Ambient Intell Humaniz Comput*, 2022, 12:1-12.
- [55] LAZARO M, LAZARO A, VILLARINO R, et al. Smart face mask with an integrated heat flux sensor for fast and remote people's healthcare monitoring [J]. *Sensors*(Basel), 2021, 21(22):7472.
- [56] YE Z, LING Y, YANG M, et al. A breathable, reusable, and zero-power smart face mask for wireless cough and mask-wearing monitoring [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4):5874-5884.
- [57] SELVADASS S, PAUL J J, BELLA MARY I T, et al. IoT-Enabled smart mask to detect COVID19 outbreak [J]. *Health Technol*(Berl), 2022, 12(5):1025-1036.
- [58] PAN L, WANG C, JIN H, et al. Lab-on-mask for remote respiratory monitoring [J]. *ACS Mater Lett*, 2020, 2:1178-1181.
- [59] ESCOBEDO P, FERNÁNDEZ-RAMOS M D, LÓPEZ-RUIZ N, et al. Smart facemask for wireless CO₂ monitoring [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1):72.
- [60] KALAVAKONDA R R, MASNA N V R, MANDAL S, et al. A smart mask for active defense against airborne pathogens [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):19910.
- [61] 程智,黄国杰,汤询,等.基于智能电子系统的多功能口罩设计研究[J]. *鞋类工艺与设计*, 2022, 2(17):169-171.
- [62] 陈恩乐,张佳栋,于晓达,等.新型口罩过滤材料的多功能化研究[J]. *轻纺工业与技术*, 2022, 51(5):112-114.
- [63] 龚之,应响峰,姜波.智能口罩在新型冠状病毒感染疫情防控中的应用[J]. *医疗卫生装备*, 2023, 44(4):66-70.

收稿日期:2023-11-23