

医用口罩防护有效性的智能指示标签研究进展

陈亿洋, 张新林, 杨丹, 张静怡, 刘辉, 石佳子, 李东立, 付亚波
(北京印刷学院 印刷包装材料与技术北京市重点实验室, 北京 102600)

摘要: **目的** 为解决人们日常佩戴口罩中的防护有效性问题, 阐述医用口罩过滤机理和过滤效率, 综述智能指示标签在智能口罩方面研究现状和应用进展。**方法** 从医用口罩的防护性能出发, 分析医用口罩中智能指示标签的应用现状, 分别对气体、湿度和病毒进行了智能指示标签方面的研究综述。依据酸碱指示剂颜色变化、湿敏效应、抗原-抗体特异性结合等, 以实时监测湿度、CO₂含量及病毒成分, 从而判定医用口罩的防护性能。**结论** 阐明了智能标签在医用口罩防护有效性指示方面的研究进展和工作机理, 为智能标签在医疗防护方面的创新应用提供了思路。

关键词: 医用口罩; 过滤效率; 影响因素; 智能指示标签

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0162-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.020

Research Progress of Intelligent Indication Labels for Medical Mask Protection Effectiveness

CHEN Yi-yang, ZHANG Xin-lin, YANG Dan, ZHANG Jing-yi, LIU Hui,
SHI Jia-zi, LI Dong-li, FU Ya-bo

(Beijing Key Lab of Printing & Packaging Materials and Technology, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to elaborate the filtration mechanism and efficiency of medical masks, and review the current research status and application progress of intelligent indication labels in medical masks, so as to improve the protection efficiency of masks in daily use. Firstly, from the protective performance of medical masks, the application status on intelligent indication labels in medical masks was analyzed. Then, based on acid-base indicator color change, moisture-sensitive effect, antigen-antibody specific binding, a research in intelligent indication labels on them was conducted for gas, humidity and virus respectively to monitor real-time humidity, CO₂ content and virus composition. Thus the protective performance of medical masks was determined. The research progress and working mechanism of intelligent labels in indication of protection effectiveness are clarified, providing ideas for innovative application of intelligent labels in medical protection.

KEY WORDS: medical mask; filtration efficiency; influencing factors; intelligent indicating label

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 北京市教委面上研究项目(KM202010015005); 北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划青年拔尖人才项目(CIT&TCD201904050); 北印校级科研项目(Ec202202, Eb202104, 27170122011); 北京市大学生创新训练项目(22150122036)

作者简介: 陈亿洋(1998—), 女, 硕士生, 主攻活性与智能包装技术。

通信作者: 张新林(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为智能包装与防伪技术; 付亚波(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为活性智能包装材料与防护技术。

由于疫情对人体健康和日常生活造成影响, 医用口罩的佩戴已经成为了人们出行的标配, 但是人们在佩戴过程中不能对口罩的防护有效性进行直观判断, 往往会出现以下情况: 口罩仍具备防护有效性时将口罩抛弃; 或因为累计佩戴时间过长, 口罩防护性受损, 但仍在佩戴使用。因此需要对口罩使用过程中的防护有效性有一定的判定依据。目前, 用于医用口罩防护有效性的智能指示标签的研究较少, 因此智能标签与口罩结合的研究在未来有很大的发展潜力。智能标签主要分为 2 种: 诊断检测类和信息技术类^[1]。本文主要涉及的是具有检测功能的标签, 包括气体指示标签、病毒指示标签等, 可通过标签颜色的变化来判定相应监测结果; 而信息技术类的标签, 如无线射频识别标签 (RFID) 等, 其可与二氧化碳 (CO₂) 气体柔性传感器等结合, 以获取更详细的信息数据。

医用 N95 口罩和医用外科口罩的理论佩戴使用时效为 4~6 h^[2], 从口罩使用期限内的影响因素入手, 使用智能传感器监测实时状态和运用比色指示标签判定是否具备防护有效性能。综上, 在不影响口罩防护性能的前提下, 可以将智能指示标签与医用口罩结合使用; 随着互联网和智能数字化的逐渐普及, 智能指示标签也将与信息技术结合, 实现信息交互功能, 使用者能通过智能设备获得相关数据, 同时可以向设备进行状态反馈, 为人们日常在佩戴口罩出行时带来更多便利。

1 口罩的材料结构与过滤机理

口罩的功能主要是防御外界的颗粒物和病菌等, 而口罩类型的不同会导致抵御能力的不同^[3]。医用外科口罩、N95 口罩对细菌过滤效率大于 95%^[4-5], 对非油性颗粒分别大于 30%和 95%^[6-7]。差异有: 外观形状, 导致贴合程度有所差异; 过滤层厚度、面密度越大, 防御能力越好; 纤维直径越小, 孔径越大, 过滤效率越低^[8]。过滤的一般类型可以有固-液或固-气分离^[9], 过滤层的防护效能原理如图 1 所示, 包括: 布朗运动^[10-11]、物理拦截^[12]、惯性冲击^[13]、静电吸附^[14-15]、沉降作用^[16], 例如当病毒等试图穿过口罩时, 往往会因为静电吸附效应吸附在纤维表面。

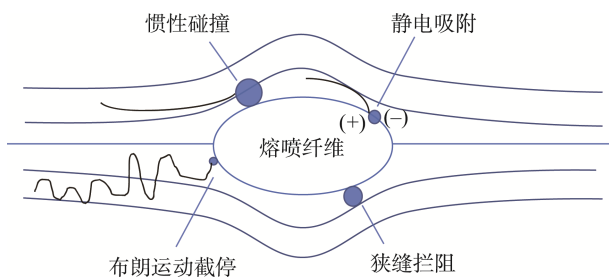


图 1 熔喷纤维防护效能示意图^[12]
Fig.1 Diagram of melt blown fiber protection efficiency^[12]

医用 N95 口罩呈拱状设计, 与面部紧密贴合, 可防止颗粒物等产生的不良感染^[17], 其过滤层面密度约为 55~60 g/m²。其材料结构^[18]: 最外层为非织造的聚丙烯 (PP), 具备疏水性, 阻隔外界水分; 第 2 层为熔喷形成的非织造布 PP 过滤层, 能有效过滤外界非油基颗粒物, 抑制气溶胶穿过^[19]; 第 3 层为改性的聚丙烯腈纤维支撑层, 起到构造口罩轮廓和支撑的作用; 最内层仍为非织造 PP, 防止了口罩内部水分进入到过滤层中, 以延长口罩使用寿命^[20]。医用外科口罩过滤层面密度约为 20~30 g/m², 材料结构如图 2 所示^[21], 中间层数越多, 阻隔功能越好。医用外科口罩的纤维直径、平均孔径普遍大于 N95 口罩的, 平均厚度、面密度普遍小于 N95 口罩的^[22]。

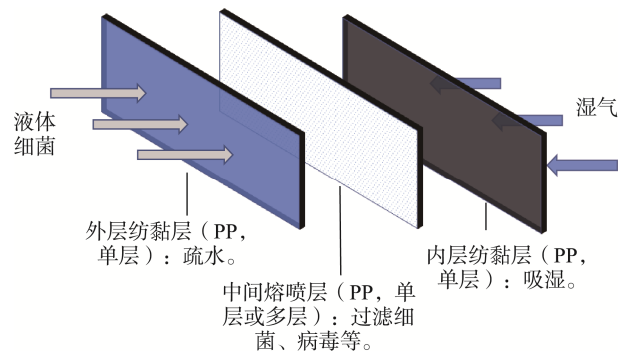


图 2 医用口罩的普遍结构示意图^[21]
Fig.2 Structural diagram of general medical masks^[21]

2 基于医用口罩有效防护性的智能指示标签研究

影响医用口罩过滤效率的因素(如图 3 所示)^[23]: 湿度, 高湿的气氛环境下静电荷不易储存; 气体成分, 如 CO₂, 呼出的气体成分轻微溶胀熔喷布表面, 加速电荷逸出; 病毒、颗粒物, 过滤层纤维吸附颗粒

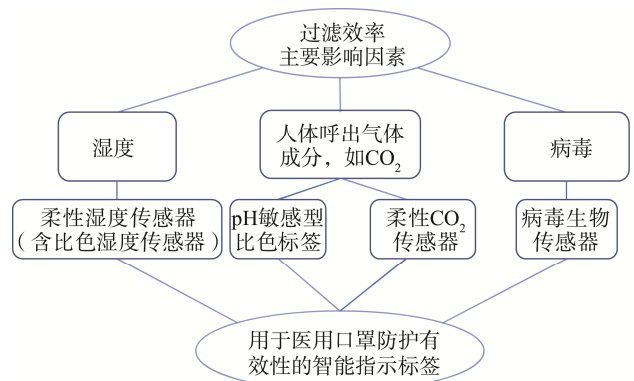


图 3 过滤效率影响因素
Fig.3 Factors affecting filtration efficiency

影响储电吸附。依据医用口罩理论使用时效最低时长为预警点来进行智能监测。在众多影响因素中,湿度、CO₂、病毒含量是智能指示标签较易监测的类型,除了能使用依据颜色变化来预估湿度和CO₂含量的比色标签,还能使用柔性传感器来获得湿度和CO₂捕获量的准确数值。此外,当口罩上吸附有呼吸道病毒时,生物传感器也能灵敏高效地检测出来。因此,湿度、CO₂吸附含量的度量以及是否含有特定目标病毒将成为判定医用口罩使用时限内防护有效性的重要依据。

2.1 柔性湿度传感器

长时间佩戴口罩,湿气汇集,易滋生细菌,造成呼吸道疾病,危害人体健康。一般在相对湿度为50%以下时,电荷更易储存^[24]。为了测量医用口罩防护的有效性,将正常成年人在最低理论使用时长下,平稳呼吸所测得的湿度比色情况或湿度阻值为基准点。当人体处于不同环境状态,例如,佩戴口罩运动时,通气量将急速上升,从5 L/min增加到100 L/min以上,且呼吸频率也会加快,此时口罩吸收的水分将增多,往往很快就不能起到防护效果,这时测得与4 h正常呼吸状态下的颜色变化相匹配或湿度值相适应时,可大致判断其防护性可能处于无效状态,起到直观的预警作用。因此,不仅可以通过对湿度比色标签的颜色变化情况进行比对,也可以运用柔性传感器来监测湿度含量,通过湿度引起的电阻等变化指标来达到对湿度的监测^[25-26]。如今有很多研究将湿度传感器置于口罩内部,通过电阻变化来观察佩戴者的呼吸频率变化,或进行湿度监测。

王思睿^[27]用喷墨打印技术将银油墨打印到柯达相纸等无湿敏材料上。为了探讨PVA与纸基结合后对灵敏度的影响,在纸基表面增加100 μm厚的PVA薄膜,当相对湿度从30%增加到90%时,纸基介电常数从3.2增到4.2,PVA介电常数从6.1增到41,比纯纸基传感器偏移量增加190 MHz,比PET基膜厚为100 μm的PVA传感器偏移量增加140 MHz。此外,研究将RFID技术融入其中,能做到无接触式的快速信息获取及储存,远程监测口罩湿度环境。

Yang等^[28]采用光刻和磁控溅射法制备了一种基于MoO₃纳米片的柔性湿度传感器,当相对湿度从0增到100%时,快速响应和恢复时间分别小于0.4 s和2 s;当相对湿度从0增到40%时,快速响应和恢复时间分别小于0.3 s和0.5 s;在0°~120°弯曲1 500次后,测得电阻仍然相对稳定;CO₂不会对测得的电阻产生影响,器件对湿度监测具备高选择测试性。这类柔性传感器与口罩结合使用时,可应用于常规湿度变化和呼吸状态的监测,可以追踪使用者的环境状态。

Zeng等^[29]制备成一种基于水凝胶(STH-3)的湿度传感器。PAM能形成共价交联网络,在淀粉的—OH

和聚合物链上的—NH₂之间形成氢键,提高水凝胶的力学性能。该水凝胶在相对湿度为35%~97%的条件下,灵敏度能从560%到4 417%,在1 000次50%压力应变后有耐久性。综上,基于淀粉DN水凝胶的湿度传感器,可应用于监测口罩内湿度等方面,并在环保、生物相容等领域具备应用潜能。

Turkani等^[30]通过丝网印刷,将银油墨印于PET基底后,将FMWCNT/HEC油墨作为湿度敏感层沉积在IDT上,获得一种新型功能化FMWCNT/HEC复合湿度传感器。环境的相对湿度直接决定了MWCNT上吸附的水分子量,从而导致电阻的改变。实验设计FMWCNT的质量分数从1.25%到2.5%不等,FMWCNTs和HEC质量比从1:4到1:6不等。实验发现质量分数为2.5%的FMWCNTs及 $m(\text{FMWCNTs}):m(\text{HEC})$ 为1:6的传感器具备最高相对电阻响应;在温度为25℃、相对湿度为80%的环境下电阻变化率为290%,响应时间为20 s。

为了更加直观地观测到湿度的变化情况,可通过标签的颜色变化进行综合检测,与柔性比色湿度传感器相关的研究如下:Zheng等^[31]制备了一种天然生物材料丝素蛋白(SF)薄膜基湿度传感器。其传感机理为SF膜的高吸水性导致SF膜与电极之间进行 $\text{H}_2\text{O}+\text{H}_3\text{O}=\text{H}_3\text{O}^++\text{H}_2\text{O}$ 的表面吸附现象。发现最佳性能SF薄膜厚度约为23 μm,在相对湿度为59%~95%内动态响应增大,响应/恢复时间间隔为100 s。在相对湿度为85%下,灵敏度约为750%。湿度从40%到90%过程中,SF薄膜从淡黄色变为蓝色;人体呼吸过程从干燥到潮湿,薄膜颜色变化为中间蓝色区域逐渐变成灰绿色,周边区域紫红色逐渐变成蓝色,可见这类传感器有运用于口罩环境监测的潜能。

Chen等^[32]用具有亲水基团和含光活性二苯甲酮基团的PBD-PEGE与纤维素纳米晶体(CNC)组合,制备成了湿度响应的光子晶体(PC)薄膜。实验发现随着PBD-PEGE含量增加,薄膜的 λ_{max} 从538 nm红移至611 nm;详细研究CNC/PEG/B-1发现,随着相对湿度从30%增加到100%,螺距从328 nm增加到422 nm,复合膜颜色从蓝变为绿、黄、橙,再到深红。这是因为当CNC膜吸水溶胀,螺距增大,反射光颜色改变。PC薄膜可应用于智能传感器等技术上。

Meng等^[33]将甘油(G)、木糖醇(X)和山梨醇(S)分别与纤维素纳米晶体(CNC)结合,制备了柔性湿敏薄膜,分别记为CNC-G、CNC-X和CNC-S。当相对湿度增加,薄膜颜色分别由浅蓝色变为橙色,由浅蓝色变为粉红色,由浅绿色变为红色。CNC-S的 $\Delta\lambda_{\text{max}}$ 增加最多,为249 nm,这是因为在潮湿环境下,这类薄膜易吸收水分子,内部结构溶胀,颜色发生变化。这类薄膜多用于监测环境湿度的变化,并在柔性比色湿度传感器等领域有应用潜能。以上比色湿度传感器均有监测口罩湿度状态的潜力。

2.2 CO₂ 智能指示标签

人体呼出的气体如 CO₂、唾沫等都不利于静电荷储存^[23]。一般每次出气量为 10 mL/kg, CO₂ 体积分数约为 4%, 溶于水后呈弱酸性, pH 值约为 5~6^[34]; 人体呼吸频率为 16~20 次/min, 预估一个 50 kg 的正常成人 4 h 呼出的 CO₂ 约 96 L。基于湿型 CO₂ 气敏类智能变色标签的原理——CO₂ 溶于水汽后引起 pH 敏感染料颜色改变^[35-36], 可知: 标签捕捉到 CO₂ 后, 会产生化学反应发生色变^[37], 在平稳呼吸状态下, 通过观察颜色的变化判断医用口罩使用时长, 还可使用柔性气体传感器安装在口罩呼吸通道处测量 CO₂ 浓度, 推断口罩是否具备防护有效性。

2.2.1 pH 敏感型比色标签

Pereira 等^[38]研究了基于添加了花青素的 PVA/壳聚糖聚合物的时间温度指示剂 (TTI), 使用 TG-DSC、FT-IR 以及溶胀指数 (Si) 等进行表征, 通过 CIE Lab 标度测量不同 pH 值来反映酸碱性情况。TTI 以 pH 为 6.1 的颜色为设定点, 随 pH 值从低到高, 颜色从亮红色变为亮绿色。壳聚糖无毒、抗菌, 与安全且可生物降解的 PVA 结合时, 力学性能显著提升, 例如在口罩上使用时也不会造成安全隐患。

邢月^[39]以流延法制成 PLA 基底膜, 在指示剂中加入质量分数为 3% 的 NaOH 溶液, 使 pH 为 9, 初始颜色呈绿色。结果表明在 CO₂ 体积分数从 0.2% 升至 15% 的过程, 以 3 mL 溴百里香酚蓝和甲基绿为指示剂, 添加了 0.04 g 甲基纤维素的指示卡从绿色过渡到黄绿色再到黄色, 最后变为橙红色。可见此指示标签颜色变化明显, 当运用于口罩上时便于比对。

Zhang 等^[40]在纤维素纸上丝网印刷了比色标签, 研究团队设计合成了 2 种基于蒽醌和偶氮生色团的 pH 敏感反应性染料, 设定为: D-1, 在温度为 5~10 °C 和 pH 为 6.0~6.5 条件下, 反应 3~4 h; D-2, 在 0~5 °C 条件下, pH 值为 1.5、2.5 和 3.5 时, 分别反应 1 h。染料具有硫乙基磺基酮和单氯洛嗪基团, 能与纸纤维素中的 -OH 基团形成共价键, 一般环境下无法溶解, 印制清晰。这类标签能够保证口罩表面在使用时不受外界环境破坏, 更好地反映变色范围。

胡云峰等^[41]以普鲁兰多糖为成膜基底, 结合甲基红和溴百里香酚蓝指示剂以及甘油制成指示标签, 随着 CO₂ 浓度增加, 颜色变化由蓝到橙最后到红。研究了加入不同量普鲁兰多糖和甘油对色差值的影响, 倒板量都为 6 mL, 经过响应面交互分析后, 表明在 5% 的甲基红和溴百里香酚蓝混合溶液 (体积比为 3:2) 中, 加入 75 g/L 的普鲁兰多糖和 20 g/L 的甘油时, 响应色差值最佳 (为 18.21), 与预测值靠近, 表明此类响应面优化稳定标签颜色技术检测准确可信, 检测结果符合要求。

Xu 等^[42]运用喷墨印刷技术, 利用含天然染料花

青素和姜黄素的油墨制备了一种与 QR 码结合的 PH 敏感型比色指示标签。在花青素乙醇 (ATH) 与姜黄素乙醇 (CR) 体积比分别为 4:1、1:1 和 1:4 的混合溶液中, 体积比为 4:1 混合溶液颜色变化更明显。此指示标签具有数据载体和传感器的双重功能, 进行视觉观测和实时智能设备监测。当运用于口罩防护有效性检测时, 既能直观观测标签颜色变化, 也能从手机上看到实时数据。

2.2.2 柔性 CO₂ 传感器

Barauskas 等^[43]将聚醚酰亚胺 (PEI) 喷墨打印于电容式微加工超声换能器 (CMUT) 表面进行修饰, 制备出 CO₂ 传感器, 喷墨打印串行接口安装了一个 0.3MP 的 USB 摄像光反馈系统, 通过光干涉法和 AFM 数据测量薄膜厚度, 发现厚约 200 nm 的 PEI 膜最佳。将厚约 190 nm 的 PEI 膜传感器从 N₂ 换至 CO₂ 环境, 偏移超过 23.2 kHz, 证明可用于 CO₂ 检测。对于 CMUT 改性, 在疏水性方面将最小功能化区域降至 150 nm, 在亲水性方面将最小平均厚度控制在 100 nm, 改变印刷 PEI 膜时的粗糙度, 以更易于制备传感器。

Ando 等^[44]制备了基于石墨烯层和 PEDOT/PSS 的柔性湿度传感器, PEDOT-PSS 具有良好机械弹性、导电性。sp²杂化碳原子堆积的石墨烯具有良好导电性, 根据气体吸收量与电导率变化的关系得出, 当 CO₂ 含量增加, 电导率增加; 在 50 °C 和 60 °C 下, 响应度分别为 4.0×10⁶ μΩ/Ω 和 4.7×10⁶ μΩ/Ω。当传感器置于 CO₂ 环境一段时间后, 器件不可完全逆转, 可应用在预警和成本较低的物件上。

Lin 等^[45]将 CNT (p 型) 从 SiO₂/Si 衬底转移到聚酰亚胺 (PI) 衬底上, 制备了一种基于 CNT 的气体传感器。CNT 具有高比表面积和吸附气体分子的孔隙, 能高效吸附目标分子, 产生电子信号转换, 在 CO₂ 还原性气体中时, 阻力增加。当 CO₂ 体积分数为 0.005%、0.01%、0.02%、0.04% 和 0.08% 时, 该传感器灵敏度分别为 0.89%、1.15%、1.43%、1.82% 和 2.23%。当表面凸起产生拉伸应力时, 电阻增加, 但影响不大, 响应良好。

Gupta 等^[46]将不同量抗坏血酸 (AA) 滴加到氧化石墨烯 (GO) 溶液中, GO 溶液从棕色被还原成白色, 制成 AArGO25、AArGO50 和 AArGO100 的 rGO 悬浮液, 在 QCM 基板的 Ag 电极上滴注成膜, 制成柔性 CO₂ 传感器。其原理是吸附在表面的 O₂⁻ 与 CO₂ 分子反应生成 CO₃⁻, 空穴载流子浓度增加, 电阻降低。实验表明 AArGO25 有最多数量的 OFG、最高边缘功能性和抗团聚性, 对 CO₂ 体积分数为 0.05% 的灵敏度为 50 Hz/μg, 响应最高为 1 000 Hz, 快速响应和恢复时间分别为 26 s 和 10 s。

2.3 病毒生物传感器

口罩除了能隔绝灰尘等颗粒物的进入外, 也对病

毒有一定的隔绝作用^[47-48],如今由于疫情对人们日常出行的影响,口罩的吸附抵御作用也愈发重要。当人体暴露在病毒环境或携带病毒已确认感染,可以使用智能生物传感器进行数据监测,通过检测呼吸道病毒能够起到预警与防护的作用。

田冰等^[49]探讨了利用纳米金粒子(AuNPs)过氧化物酶活性的比色传感器,AuNPs酶活性能使过氧化氢(H_2O_2)形成羟自由基,催化底物变色或者产生荧光反应,例如将无色TMB氧化成蓝色oxTMB。反应包含2种类型:靶标吸附,通过改变AuNPs表面性质,改变AuNPs酶活性;靶标-适配体,适配体单链DNA经过碱基配位,改变AuNPs表面,靶标与适配体结合,间接影响AuNPs酶活性。

以石墨烯为基材的光学生物传感器对人体病毒检测快速、高敏感,其中在比色生物传感器中GO有着 H_2O_2 酶活性,稳定性更高^[50]。Zhan等^[51]依据AuNP过氧化物酶制备了AuNPs-GO杂交株,制备过程如图4所示,AuNPs-GO有类似过氧化物酶的活性,添加后能观察到颜色变化。研究表明,即使有化学分子附着于其表面,利用 Hg^{2+} 仍能增强过氧化物酶活性,使无色底物TMB变色,能高效灵敏地检测出呼吸道合胞病毒(RSV),检测限为0.04 pg/mL。

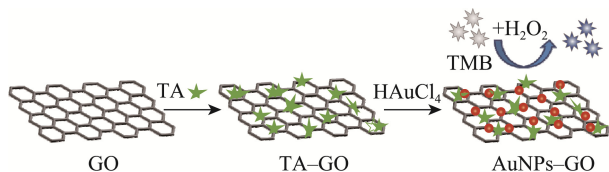


图4 AuNPs-GO共轭物的制备过程^[51]

Fig.4 Procedure for preparation of AuNPs-GO conjugates^[51]

Nguyen等^[52]用CRISPR技术将冻干无细胞(FDCF)传感器嵌入硅橡胶和硅织物中,制成了柔性生物传感器。实验将DNA或RNA编码的基因工程添加到FDCF中,其水化激活后,与靶标结合由黄色变为紫色;或通过荧光检测MRSA或SARS-CoV-2等病毒的存在。传感器有4个模块:储液器、采集垫、3个基于微流控的蜂巢形 μ PAD反应区、实现目测读数的侧向层析试条(LFA)。该传感器可用于气溶胶中SARS-CoV-2一类病原体的检测,90 min后可知检测结果。此类传感器可用于口罩内,置于呼气通道前方,能实现远程操作,减少工作人员的感染。

Prainito等^[53]制备了一种用于检测SARS-CoV-2刺突蛋白的纸基聚二乙炔(PDA)生物传感器。对含有PCDA-NHS摩尔分数分别为10%、20%和30%的PDA生物传感器进行研究,每组暴露在0~1 000 ng/mL的SARS-CoV-2刺突蛋白溶液中,当特定抗体与目标蛋白结合时, π 共轭体系破坏,颜色由蓝色变为红色。结果表明摩尔分数为10%的PCDA-NHS效果最优,PDA传感器能检测1~100 ng/mL的刺突蛋白,结合智

能手机应用软件,使用预编程序能在几秒钟内计算出红移(RCS)百分比。当传感器足够灵敏时,能置于口罩内部通过唾沫来进行检测。

3 结语

目前,医用口罩很少能做到防护有效性的监测和智能设备端的实时数据掌握。本文首先对医用口罩材料结构、过滤机理、过滤效率等进行了探讨,可知医用口罩结构材料为疏水性的PP内外层和PP熔喷布的过滤中间层;过滤机理为布朗运动、惯性冲击、物理拦截、静电吸附和沉降作用;医用N95口罩的过滤效率高于医用外科口罩的。

随着人们对医用口罩防护有效性越来越在意,在不影响口罩使用性能的情况下,可以将智能指示标签与医用口罩结合使用,将病毒生物传感器与 CO_2 敏感型可视化比色标签多功能结合,使得在监测 CO_2 浓度的同时检测是否含有目标病毒的存在。伴随数字化的普及,智能指示标签被赋予信息交互功能,与RFID技术、NFC技术等共同使用,这类具备信息交互功能的智能指示标签更加便利,能达到数据信息的实时监控。但是,考虑到厂家制备口罩和器件的成本问题以及消费者购买商品的成本影响,未来将智能指示标签与口罩结合的发展道路充满挑战。意将成本较低的纸质变色标签运用到医用外科口罩上,而成本较高的柔性传感器件可用于N95口罩中。如果未来智能标签的相关技术更加完备,可以解决成本问题,那么用于医用口罩的智能指示标签也将会有更广阔的市场。

参考文献:

- [1] 许文才. 智能包装与智能标签[J]. 标签技术, 2017(1): 59-61.
XU Wen-cai. Smart Packaging and Smart Labels[J]. Label Technology, 2017(1): 59-61.
- [2] 戚雅萍, 郑永韬, 邱慧丽, 等. 不同环境人群医用外科口罩佩戴时长与菌落总数的相关性研究[J]. 浙江医学教育, 2021, 20(4): 49-52.
QI Ya-ping, ZHENG Yong-tao, QIU Hui-li, et al. Study on the Correlation between the Wearing Time of Medical Surgical Masks and the Total Number of Bacterial Colonies in the Population of Different Environments[J]. Zhejiang Medical Education, 2021, 20(4): 49-52.
- [3] BORAIEY M A. An Analytical Model for the Effective Filtration Efficiency of Single and Multiple Face Masks Considering Leakage[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2021, 152: 111466.
- [4] 李梅, 于丽丽, 郭芳. 环境试验对医用外科口罩颗粒

- 过滤效率的影响[J]. 中国医疗器械信息, 2019, 25(15): 17-17.
- LI Mei, YU Li-li, GUO Fang. Effect of Environmental Testing on Particle Filtration Efficiency of Medical Surgical Masks[J]. China Medical Device Information, 2019, 25(15): 17-17.
- [5] 孙明波, 李勇, 余洋, 等. 环境试验对医用外科口罩细菌过滤效率的影响[J]. 中国医疗器械信息, 2018, 24(11): 36-37.
- SUN Ming-bo, LI Yong, YU Yang, et al. Effect of Environmental Testing on Bacterial Filtration Efficiency of Surgical Masks[J]. China Medical Device Information, 2018, 24(11): 36-37.
- [6] 李宝林. 医用口罩质量控制与应急管理[J]. 中国医药科学, 2020, 10(14): 231-238.
- Li Bao-lin. Quality Control and Emergency Management of Medical Masks[J]. China Medicine and Pharmacy, 2020, 10(14): 231-238
- [7] WANG Wen-xia, CHEN Ting-ting, LI Zhen, et al. Comparison of Filtration Efficiency and Respiratory Resistance of COVID-19 Protective Masks by Multi-National Standards[J]. American Journal of Infection Control, 2022, 50(5): 516-524.
- [8] DARBY S, CHULLIYALLIPALIL K, PRZYJALGOWSKI M, et al. COVID-19: Mask Efficacy is Dependent on both Fabric and Fit[J]. Future Microbiology, 2021, 16: 5-11.
- [9] 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.
- QUAN Qiong-ying, YING Wei-wei, ZHU Cheng-yan. Study on Relation between Structure and Filtration Efficiency of Nonwoven Medical Protective Masks[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2015, 43(7): 1-2.
- [10] FU Xiang-yun, YU Hong-wei. Brownian Motion of a Test Particle with a Normal Classical Velocity in Space-time with a Plane Boundary[J]. Communications in Theoretical Physics, 2007, 47(5): 847-850.
- [11] LI Tong-cang, KHEIFETS S, MEDELLIN D, et al. Measurement of the Instantaneous Velocity of a Brownian Particle[J]. Science, 2010, 328(5986): 1673-1675.
- [12] 林汉京. 战疫利器——熔喷织物与防护口罩[J]. 化工管理, 2020(10): 6-8.
- LIN Han-jing. The Weapon for Epidemic Prevention: Melt Blown Fabric and Medical Protective Mask[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(10): 6-8.
- [13] ZHU C, LIN C H, CHEUNG C S. Inertial Impaction-Dominated Fibrous Filtration with Rectangular or Cylindrical Fibers[J]. Powder Technology, 2000, 112(1-2): 149-162.
- [14] VALENCIA-OSORIO L M, ALVAREZ-LAINEZ M L. Global View and Trends in Electrospun Nanofiber Membranes for Particulate Matter Filtration: A Review[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(10): 2100278.
- [15] 康少冉, 李志健, 吴海伟, 等. 驻极修饰聚丙烯熔喷专用料的制备及性能[J]. 现代塑料加工应用, 2022, 34(2): 27-30
- KANG Shao-ran, LI Zhi-jian, WU Hai-wei, et al. Preparation and Properties of Etched-Modified Polypropylene Melt Spray Material[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(2): 27-30
- [16] 杨帆, 白艳红. 新冠肺炎防护口罩材料研究概述[J]. 广州化工, 2022, 50(1): 29-31.
- YANG Fan, BAI Yan-hong. Overview on Materials of Novel Coronavirus Pneumonia Epidemic Protective Masks[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(1): 29-31.
- [17] ADANUR S, JAYSWAL A. Filtration Mechanisms and Manufacturing Methods of Face Masks: An Overview[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(3): 3683S-3717S.
- [18] ZHOU S S, LUKULA S, CHIOSSONE C, et al. Assessment of a Respiratory Face Mask for Capturing Air Pollutants and Pathogens Including Human Influenza and Rhinoviruses[J]. Journal of Thoracic Disease, 2018, 10(3): 2059-2069.
- [19] WU Jun-wei, ZHOU Hong-jia, ZHOU Jing-yi, 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.
- [20] GARCIA R A, STEVANOVIC T, BERTHIER J, et al. Cellulose, Nanocellulose, and Antimicrobial Materials for the Manufacture of Disposable Face Masks: A Review[J]. Bioresources, 2021, 16(2): 4321-4353.
- [21] 黎倩雨, 陈廷. 医用防护口罩舒适性研究现状[J]. 毛纺科技, 2022, 50(7): 102-112.
- LI Qian-yu, CHEN Ting. Research Status of Comfort of Medical Protective Masks[J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(7): 102-112.
- [22] 姜玫瑰, 张鹏, 宫继成. 基于实际大气颗粒物环境的口罩防护作用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 354-360.
- JIANG Mei-jie, ZHANG Peng, GONG Ji-cheng. Study on Filtration Efficiency of Facemask for Atmospheric

- Particulate Matter in Real Environment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, 58(2): 354-360.
- [23] 石艺涵, 张星, 黄晨, 等. 医用外科口罩实际佩戴时间对其防护性能的影响[J]. *纺织导报*, 2021(11): 68-71.
SHI Yi-han, ZHANG Xing, HUANG Chen, et al. Influence of Actual Wearing Time on the Protective Efficiency of Surgical Masks[J]. *China Textile Leader*, 2021(11): 68-71.
- [24] 王明芳, 周凤. 基于环境因素的驻极熔喷布及静电纺丝膜性能研究[J]. *辽宁丝绸*, 2022(2): 1-3.
WANG Ming-fang, ZHOU Feng. Study on Properties of Electret Meltblown Fabric and Electrospun Film Based on Environmental Factors[J]. *Liaoning Tussah Silk*, 2022(2): 1-3.
- [25] MANJUNATHA S, MACHAPPA T, RAVIKIRAN Y T, et al. Polyaniline based Stable Humidity Sensor Operable at Room Temperature[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2019, 561: 170-178.
- [26] 李玉林. 电阻式湿度传感器技术及相关专利分析[J]. *电子世界*, 2017(8): 131.
LI Yu-lin. Resistance Humidity Sensor Technology and Related Patent Analysis[J]. *Electronics World*, 2017(8): 131.
- [27] 王思睿. 可印刷无芯片 RFID 湿度传感器研究[D]. 大连交通大学, 2020: 50-74.
WANG Si-rui. Research on Printable Chipless RFID Humidity Sensor[D]. Dalian Jiaotong University, 2020: 50-74.
- [28] YANG Jue-han, SHI Rui-long, LOU Zheng, et al. Flexible Smart Noncontact Control Systems with Ultrasensitive Humidity Sensors[J]. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 2019, 15(38): 1902801.
- [29] ZENG Sheng, ZHANG Jun-yao, ZU Guo-qing, et al. Transparent, Flexible, and Multifunctional Starch-Based Double-Network Hydrogels as High-Performance Wearable Electronics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 267: 118198.
- [30] TURKANI V S, MADDIPATLA D, NARAKATHU B B, et al. A Highly Sensitive Printed Humidity Sensor Based on a Functionalized MWCNT/HEC Composite for Flexible Electronics Application[J]. *Nanoscale Advances*, 2019, 1(6): 2311-2322.
- [31] ZHENG Yi-qiang, WANG Li-li, ZHAO Lian-jia, et al. A Flexible Humidity Sensor Based on Natural Biocompatible Silk Fibroin Films[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(1): 2001053.
- [32] CHEN Huang-huang, HOU Ai-qin, ZHENG Chang-wu, et al. Light- and Humidity-Responsive Chiral Nematic Photonic Crystal Films Based on Cellulose Nanocrystals[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(21): 24505-24511.
- [33] MENG Ya-hui, CAO Yun-feng, JI Hai-rui, et al. Fabrication of Environmental Humidity-Responsive Iridescent Films with Cellulose Nanocrystal/Polysols[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 240: 116281.
- [34] VELICHKOVA K, VATZKITCHIEVA M, SAVOV P, et al. Behavior of the Parameters Characterizing the Air Quality in an Enclosed Classroom Ventilated either by a Fan or Naturally[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2075(1): 130017.
- [35] 郭鹏飞, 何昊葳, 付亚波, 等. 气敏类智能包装标签技术的研究进展[J]. *包装工程*, 2018, 39(11): 13-18.
GUO Peng-fei, HE Hao-wei, FU Ya-bo, et al. Research Progress of Gas Sensitive Smart Packaging Labels[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(11): 13-18.
- [36] ZHANG Y, LIM L T. Colorimetric Array Indicator for NH₃ and CO₂ Detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 3216-3226.
- [37] 赵彬. 食品新鲜度智能指示卡的研究进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(3): 128-135.
ZHAO Bin. Research Progress of Intelligent Indicator for Food Freshness[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(3): 128-135.
- [38] PEREIRA V A, DE ARRUDA I N Q, STEFANI R. Active Chitosan/PVA Films with Anthocyanins from Brassica Oleraceae (Red Cabbage) as Time- Temperature Indicators for Application in Intelligent Food Packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 180-188.
- [39] 邢月. 以 CO₂ 为特征气体的新鲜度比色指示卡的研究[D]. 天津: 天津科技大学: 23-50.
XING Yue. Study on the Colorimetric Indicator Card of Gas Freshness with CO₂[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology: 23-50.
- [40] ZHANG Hong-juan, HOU Ai-qin, XIE Kong-liang, et al. Smart Color-Changing Paper Packaging Sensors with pH Sensitive Chromophores based on Azo-Anthraquinone Reactive Dyes[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 286: 362-369.
- [41] 胡云峰, 位锦锦, 梁晶, 等. 以普鲁兰多糖为载体的 CO₂ 型指示标签的研制[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(2): 75-80.
HU Yun-feng, WEI Jin-jin, LIANG Jing, et al. Development of CO₂ Type Indication Label with Pullulan Polysaccharide as Carrier[J]. *Storage and Process*, 2019,

- 19(2): 75-80.
- [42] XU Yuan, LIU Zhang-ming, LIU Rui, et al. Inkjet-Printed pH-Sensitive QR Code Labels for Real-Time Food Freshness Monitoring[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(33): 18453-18462.
- [43] BARAUSKAS D, PELENIS D, DZIKARAS M, et al. Inkjet-Printed Functionalization of CMUT-Based CO₂ Sensors[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(6): 2288.
- [44] ANDO B, BAGLIO S, DI P G, et al. Direct Printing of a Multi-Layer Sensor on Pet Substrate for CO₂ Detection[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 557.
- [45] LIN Z D, YOUNG S J, CHANG S J. CO₂ Gas Sensors Based on Carbon Nanotube Thin Films Using a Simple Transfer Method on Flexible Substrate[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(12): 7017-7020.
- [46] GUPTA M, HAWARI H F, KUMAR P, et al. Functionalized Reduced Graphene Oxide Thin Films for Ultrahigh CO₂ Gas Sensing Performance at Room Temperature[J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2021, 11(3): 623.
- [47] ZHANG K, VILCHES T N, TARIQ M, et al. The Impact of Mask-Wearing and Shelter-in-Place on COVID-19 Outbreaks in the United States[J]. *International Journal of Infectious Diseases: IJID: Official Publication of the International Society for Infectious Diseases*, 2020, 101: 334-341.
- [48] WANG Qiang, YU Chao-ran. The Role of Masks and Respirator Protection Against SARS-CoV-2[J]. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2020, 41(6): 746-747.
- [49] 田冰, 武焯, 钟玉洁, 等. 基于金纳米颗粒过氧化物酶活性的比色传感器在食品安全检测中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 274-279.
- TIAN Bing, WU Xuan, ZHONG Yu-jie, et al. Application of Colorimetric Sensor Based on AuNPs Peroxidase Activity in Food Safety Detection[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(4): 274-279.
- [50] VERMISOGLU E, PANACEK D, JAYARAMULU K, et al. Human Virus Detection with Graphene-Based Materials[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 166: 112436.
- [51] ZHAN Lei, LI Chun-mei, WU Wen-bi, et al. A Colorimetric Immunoassay for Respiratory Syncytial Virus Detection Based on Gold Nanoparticles-Graphene Oxide Hybrids with Mercury-Enhanced Peroxidase-Like Activity[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2014, 50(78): 11526-11528.
- [52] NGUYEN P Q, SOENKSEN L R, DONGHIA N M, et al. Wearable Materials with Embedded Synthetic Biology Sensors for Biomolecule Detection[J]. *Nature Biotechnology*, 2021, 39(11): 1366-1374.
- [53] PRAINITO C D, ESHUN G, OSONGA F J, et al. Colorimetric Detection of the SARS-CoV-2 Virus (COVID-19) in Artificial Saliva Using Polydiacetylene Paper Strips[J]. *Biosensors*, 2022, 12(10): 804.

责任编辑: 曾钰婵