



Research  
Coronavirus Disease 2019—Article

## 新冠病毒肺炎疫情期间口罩能否经热水泡灭毒后重复使用?

王丹<sup>a</sup>, 孙宝昌<sup>a</sup>, 王洁欣<sup>a</sup>, 周芸芸<sup>b</sup>, 方彦<sup>b</sup>, 陈倬为<sup>b</sup>, 岳卫华<sup>c</sup>, 刘思敏<sup>c</sup>, 刘克洋<sup>c</sup>, 曾晓飞<sup>a</sup>, 初广文<sup>a</sup>, 陈建峰<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

<sup>b</sup> Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China

<sup>c</sup> Beijing Institute of Medical Device Testing, Beijing 101111, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 26 May 2020

Revised 28 May 2020

Accepted 29 May 2020

Available online 27 June 2020

#### 关键词

口罩  
可重复使用  
新冠病毒肺炎  
净化  
绿色发展

### 摘要

新冠病毒肺炎疫情期间, 口罩成为不可或缺的防控利器 and 战略物资。如何科学、安全、有效地重复使用口罩, 让每一只口罩发挥最大效能, 数倍甚至十倍以上地提高防护口罩的有效使用时间, 是疫情防控所急需解决的关键科技问题。我们提出了“口罩荷电再生重复使用”的技术方法, 并开展了再生口罩性能评价。首先将使用后的口罩浸泡在56 °C以上热水中30 min进行消毒处理, 随后采用普通家用电吹风机等对“失效”的口罩进行吹干荷电处理, 使口罩可重新荷电而再生静电效应。对市售的三类典型口罩(一次性医用口罩、医用外科口罩、KN95级防护口罩)进行“热水泡灭毒+荷电再生”处理, 实验证明其过滤层微观结构和口罩抗渗水性均无明显变化, 再生口罩对非油性颗粒物的过滤效率满足相关口罩指标要求。相关研究结果为新冠病毒肺炎疫情期间的口罩荷电再生重复使用提供了参考。进一步研究了真人佩戴过程对不同初始性能的口罩的性能演变。浙江闰土股份有限公司在2月20日至3月30日期间应用“口罩荷电再生重复使用技术”, 将原先每个员工每日发放一个一次性医用口罩, 改为每个员工每三日发放一个一次性医用口罩, 节约口罩12.25万只, 降低了公司的口罩使用量, 也确保了防疫工作的正常开展。本文基于真实佩戴口罩的研究, 建立了基于荧光纳米颗粒渗透探伤的口罩检测新方法, 为可重复使用口罩材料设计、结构优化和性能综合评价提供参考。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 研究背景

新冠病毒肺炎疫情期间, 口罩成为不可或缺的防控利器 and 战略物资, 是保障人民群众健康的盾牌。2020年1月20日, 中国工程院院士、国家卫生健康委员会高级别专家组组长钟南山在中央电视台《新闻1+1》节目中明确指出戴口罩对于新冠病毒防护是有用的[1]。1月22日, 国家卫生健康委员会在国务院新闻办公室新闻发布

会提倡“口罩文明”, 建议一定要戴口罩, 并指出“戴口罩既是对自己的防护, 也是对其他人的保护”[2]。然而, 根据国家工业和信息化部公开报道的数据, 我国口罩的产能在1月23日仅为每天800万只, 到2月2日产能达到每天1000万只。这与全国14亿人口相比, 口罩的供需存在数量级差距。根据国家卫生健康委员会2月4日发布的《不同人群预防新型冠状病毒感染口罩选择和使用技术指引》, 在新冠病毒肺炎疫情期间, 推荐超市、

\* Corresponding author.

E-mail address: [chenjf@mail.buct.edu.cn](mailto:chenjf@mail.buct.edu.cn) (J.-F. Chen)

商场、机场、地铁、室内办公等民用场所的普通群众佩戴一次性医用口罩或医用外科口罩[3]。因此，医用口罩呈现出“民用化”的趋势，大量出现在车站、机场、商场、公园等公共场所。与此同时，该技术指引中明确提出“新型冠状病毒感染的肺炎流行期间，在保障公众健康的前提下，可适当延长口罩使用（使用时间、使用次数）”“其他风险类别（低风险和较低风险）暴露人员佩戴的口罩可反复多次使用”。然而，我国有关口罩产品的国家和行业标准，主要是针对口罩一次性使用的性能制备做了规范和要求，对于如何考核其可重复使用性能并没有具体规定。一次性医用口罩和医用外科口罩作为普通人民群众使用最多的口罩类型，其产品标准对于口罩佩戴时间、使用次数、重复使用后性能等与“反复多次使用”直接相关的技术指标，并无明确规定和要求。事实上，在新冠病毒肺炎疫情期间如何对口罩进行消毒净化后重复使用？消毒净化对口罩性能有何影响？重复使用次数是多少？重复使用的注意事项是什么？这些问题在此之前，均无科学理论和实验数据支撑。在口罩物资匮乏时，广大人民群众甚至一线医护人员，自发地重复使用口罩，在一定程度上缓解了口罩荒，但也容易带来自身防护风险。因此，在保证安全的情况下，让每一只口罩发挥最大效能，数倍甚至十倍以上地提高防护口罩有效使用时间，是疫情防控所急需解决的关键科技问题。

一次性医用口罩、医用外科口罩、医用防护口罩及防尘口罩通常是利用带有静电的熔喷无纺布作为过滤层材料，实现对超细颗粒的阻隔。通过静电吸附把空气中的微小颗粒吸引到纤维表面，其过程就像铁屑被吸引到磁铁上一样。在微尺度上，由于过滤层纤维之间的间距远大于细菌病毒和气溶胶/液滴的尺寸，难以直接通过机械过滤的方式来高效阻挡纳米尺度的颗粒。因此，口罩中间的静电层对于携带病毒、细菌等微粒或飞沫防护起到重要作用。口罩使用过程中，因细菌病毒在静电层的沉积以及哈气（水汽）等导致荷电层静电的消除，都会损伤其过滤效果，甚至失效。因此，新冠病毒肺炎疫情期间若想重复使用口罩，需要重点考虑两点问题：一是如何在不破坏口罩材料及微观结构的情况下，杀死或者去除沉积到口罩上的新冠病毒；二是重新恢复口罩过滤层电荷或将外界电荷转移过滤层（即荷电再生），以保证重复使用的口罩仍具有一定的颗粒物阻隔效果。2020年2月14日，科学网报道了我们北京化工大学科研团队关于新冠病毒肺炎疫情应急时期口罩重复使用的初

步研究成果[4]：通过实验发现采用便携式静电发生器对普通一次性医用平面对无纺布口罩进行二次荷电处理，使其再生静电效应而达到可重复使用的现象，提出了“口罩热水泡灭毒+荷电再生”的技术方法。首先将使用后的口罩置于56℃以上热水泡30 min消毒处理，随后采用电吹风机、电风扇、电子点火器等对“失效”的口罩进行吹干荷电处理，通过“纸屑吸附”检验口罩重新荷电情况[4]。根据国家卫生健康委员会于2020年2月6日发布的《新型冠状病毒肺炎防控方案（第四版）》，56℃条件下30 min可有效杀灭新冠病毒[5]。荷电再生处理有助于恢复口罩过滤层静电，从而使其具有高的颗粒物过滤性能。

本文报道了对三类典型口罩（一次性医用口罩、医用外科口罩、KN95级防护口罩）“热水泡灭毒+荷电再生”的实验研究和性能评价结果。通过静电测试，揭示了口罩过滤层材料“荷电再生”前后静电量变化规律。采用扫描电子显微镜（SEM）研究口罩再生前后的微观结构，采用静水压法测试了口罩再生前后的抗渗水性。对三类典型口罩进行“热水泡灭毒+荷电再生”处理后，参照相关产品标准的测试方法，研究了再生口罩对100 nm氯化钠颗粒物以及细菌气溶胶的过滤效率。针对材料质量良好的KN95级防护口罩，开展口罩耐高温性试验，首先将口罩置于高压蒸汽灭菌装置中，经121℃蒸汽处理30 min，然后干燥荷电再生，对口罩的微观结构、渗水性和过滤效率等性能进行了实验分析。针对实际佩戴后口罩的重复使用性能评价，提出了荧光纳米颗粒渗透检测方法，相关实验测试结果为新冠病毒肺炎疫情期间口罩重复使用提供了参考。

## 2. 实验部分

### 2.1. 实验材料

实验口罩包括市售一次性医用口罩（恒天嘉华非织造有限公司）、医用外科口罩（亿信医疗器械股份有限公司、安邦卫材有限公司、豫北卫材有限公司）、KN95级防护口罩（3M公司、韩国进口KF94级口罩）。相应品牌的口罩记为JH、YX、AB、YB、3M和KF。

### 2.2. 热水泡及荷电再生处理

实验选用了家用铝盆、塑料饭盒及不锈钢保温杯三种容器，具体实验操作：在室温为20℃环境中，将烧开的沸水直接倒入装有口罩的容器中，加入的水量至容

器总容量的4/5, 利用水银温度计测量水温。随后盖上容器盖, 使口罩在热水中浸泡30 min后, 打开容器盖并再次测量水温。将口罩从热水中取出, 甩掉表面液滴, 平放在干燥的绝缘材质表面, 用电吹风机吹烘10 min将口罩吹干并荷电。

### 2.3. 过滤层材料静电量测试

采用SIMCO手持式静电测试仪, 测试口罩静电量。将待测物悬空挂在绝缘定位组件上, 远离其他带静电物体, 以免受其他静电场干扰。测量平面口罩时需将口罩铺展开并悬挂固定。测试人员在测量前先用清水洗手, 以去除手部静电, 随后手持静电测试仪, 探头由远及近接近口罩待测量部位, 至两激光圆点重合, 数值稳定后读取并记录静电量示数。

### 2.4. 抗渗水性测试

采用布氏漏斗抽滤装置, 将口罩试样外表面朝上, 内表面紧靠在布氏漏斗底端, 开启真空抽滤系统, 气流量为 $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。从距离待测样20 cm的高度将100 mL水在20 s内淋洒于口罩表面, 继续保持抽滤3 min, 观察抽滤瓶内是否有液体滴下。随后移走口罩上方的水, 关掉真空抽滤系统, 从抽滤孔架取下口罩, 观察口罩内表面液体渗透情况。

### 2.5. 过滤效率测试

采用TSI 8130 设备, 测量口罩样品对NaCl颗粒物的过滤效率。检测温度条件为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 $(30 \pm 10)\%$ , NaCl颗粒物浓度为不超过 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 计数中位径为 $(0.075 \pm 0.020) \mu\text{m}$ , 粒度分布几何标准偏差不大于1.86。检测系统中具有中和颗粒物的电荷的装置。对于KN95级防护口罩, 检测流量设置为 $(85 \pm 4) \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; 对于一次性医用口罩和医用外科口罩, 检测流量设置为 $(30 \pm 2) \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 气流通过的截面积为 $100 \text{ cm}^2$ 。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 热水泡灭毒

在国家卫生健康委员会发布的《新型冠状病毒肺炎防控方案(第四版)》中, 明确指出 $56^\circ\text{C}$ 条件下30 min可有效杀灭新冠病毒[5]。新型冠状病毒作为一种包膜病毒, 它的包膜具有识别宿主细胞的功能, 在病毒感染

过程中起重要作用。在高温下, 病毒的包膜蛋白会发生变性, 使病毒失去感染能力。因此高温处理是杀灭病毒的有效途径[5]。图1展示了本实验用于盛装热水并浸泡口罩的三种容器: 铝盆、塑料饭盒及不锈钢保温杯。在室温为 $20^\circ\text{C}$ 环境中, 将刚烧开的沸水直接倒入装有口罩的三种不同容器中, 实测水温约 $90^\circ\text{C}$ , 并随着放置时间的增长, 水温有所下降。30 min以后, 测试结果表明铝盆和塑料饭盒中的水温降至约 $60^\circ\text{C}$ , 不锈钢保温杯中的水温维持在 $85^\circ\text{C}$ 以上[图1(b)]。因此, 热水泡口罩的方法易于实现。与75%酒精喷洒、紫外线辐照、过氧化氢蒸气等消毒方法相比, “热水泡灭毒”更适宜居家操作。此外, 热水泡处理有助于消除口罩异味, 使口罩重复佩戴时有更加舒适的体验。图1(c)展示了佩戴4 h后的口罩, 在热水泡前后的照片。尽管从肉眼观察, 口罩表面并无明显变化, 但在紫外灯照射下, 口罩内侧的部分位置可呈现出明亮的“污渍”荧光显影, 这主要是来源于积攒在口罩表层或中间层的细菌(脸部或口腔呼出)自发荧光。经热水泡处理后的口罩, 在紫外灯照射下观察不到明显的“污渍”, 证明了热水泡处理有助于口罩清洁和消除异味。

### 3.2. 荷电再生前后口罩静电量变化规律

口罩通常包括三层结构[图2(a)]: 外层有阻水作用, 可以防止飞沫进入口罩里面, 近口鼻的内层用于吸湿, 中间的过滤层是经过特殊驻极处理的熔喷无纺布, 能够有效阻隔颗粒物。根据口罩类型的不同, 中间过滤层的厚度为 $100\sim 1000 \mu\text{m}$ [图2(b)], 纤维丝直径为 $1\sim 10 \mu\text{m}$ [图2(c)]。口罩对颗粒物的过滤机理包括布朗扩散、拦截、惯性撞击、重力沉降和静电吸附, 其中静电吸附是口罩同时实现对纳米颗粒的高过滤特性和低气体阻力的关键。口罩经热水泡处理, 会引起过滤层静电消失。因此, 重复使用口罩需考虑口罩过滤层荷电再生的问题。本文研究了口罩荷电再生前后中间过滤层静电量变化。实验采用的口罩为医用外科口罩, 过滤层材料为熔喷无纺布。可以看到, 热水泡处理后的口罩过滤层静电消失, 干燥环境下经10 h晾干, 静电量可恢复至新口罩的60% [图2(d)], 这是由于晾干过程中空气流动引起口罩纤维内部微摩擦以及空气与纤维的摩擦, 使过滤层材料积累静电。采用更加高效的方法, 即使用电吹风吹烘10 min吹干荷电, 可使口罩静电量恢复至新口罩的90% [图2(e)]。针对口罩实际佩戴过程的静电测试可以发现, 采用电吹风荷电再生的口罩, 其中间过滤

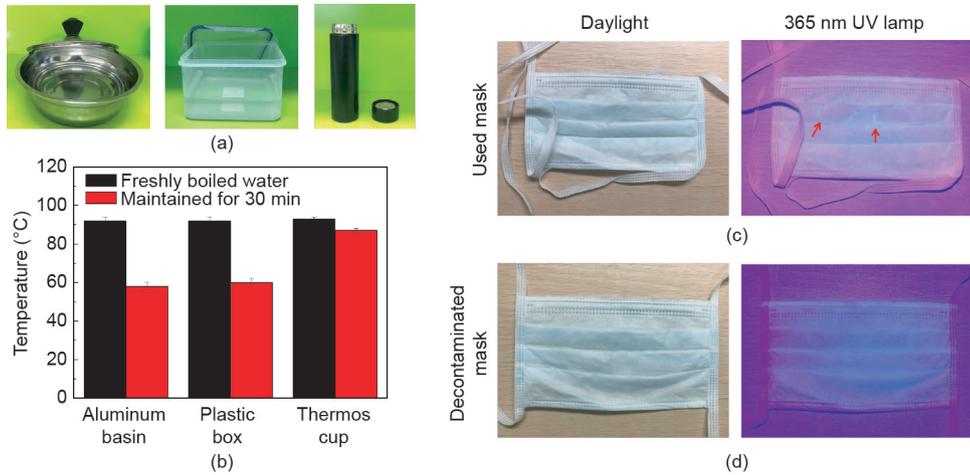


图1. (a) 用于盛装热水并浸泡口罩的三种容器: 铝盆、塑料饭盒及不锈钢保温杯; (b) 将开水倒入不同容器后的水温及在室内密封放置30 min后的水温; (c) 佩戴后的口罩经热水泡处理前后在日光灯和紫外灯下的照片。

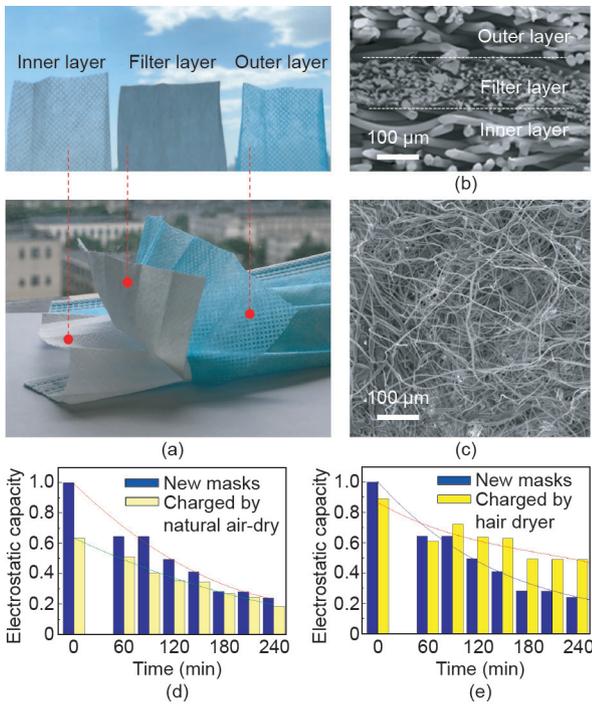


图2. (a) 典型医用外科口罩的三层结构; (b) 典型医用外科口罩三层结构截面的扫描电镜照片; (c) 典型医用外科口罩中间过滤层的扫描电镜照片; (d) 热水泡灭毒处理后在干燥环境下经10 h晾干后口罩及新口罩中间过滤层静电量随佩戴时间的变化; (e) 热水泡灭毒处理后在经电吹风吹烘10 min吹干荷电后, 口罩及新口罩中间过滤层静电量随佩戴时间的变化。

层静电量衰减规律与新口罩实际佩戴的衰减规律一致。因此表明, 电吹风吹烘处理对口罩荷电可行、有效。与晾干相比, 电吹风能够迅速移除热水泡处理后口罩的水分, 更快速恢复纤维的静电吸附能力, 其适用于潮湿地区和潮湿天气环境下口罩的快速荷电再生。此外, 在有大量水分的潮湿微环境中, 细菌微生物的繁殖迅速, 通

过电吹风对热水泡灭毒后口罩进行快速吹干荷电, 可避免长时间晾干过程中细菌微生物的繁殖, 可降低口罩重复使用的生物学风险。

### 3.3. 抗渗水性、微观结构及微生物指标

医用口罩外层具有抗渗水性能, 可有效防止飞沫等进入口罩里面以及细菌滋生, 因此, 口罩的抗渗水性是保持医用口罩对微生物的阻隔防护效果的关键因素。本研究中通过静水压试验[图3 (a)], 证明新口罩和再生一次的口罩均具有良好的抗渗水性, 即口罩内层没有观察到润湿现象[图3 (b)]。即使是“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”重复处理10次的医用外科口罩, 在实验测试中仍能够保持良好的抗渗水特性, 表明“热水泡+荷电再生”循环10次过程中, 并未破坏口罩用聚丙烯材料的表面疏水性, 也未对口罩纤维排布产生明显的破坏。进一步通过扫描电子显微镜观察再生口罩的外层[图3 (c)]和过滤层[图3 (d)], 可以发现再生口罩的微观结构无明显损伤。

### 3.4. 口罩过滤效率

口罩作为阻隔微生物、飞沫、花粉等颗粒物在人与环境间传播的具有一定保护功能的用品, 其对颗粒物的过滤效率是检测其应用性能的重要指标之一。已有的口罩产品国家标准和行业标准中, 根据口罩的适用范围需求, 对细菌过滤效率、非油性颗粒物过滤效率等指标有明确的规定。本研究中通过“热水泡灭毒+电吹风荷电再生”对口罩进行处理, 即将口罩置于65 °C的热水中浸泡30 min, 随后用电吹风吹烘10 min吹干并荷

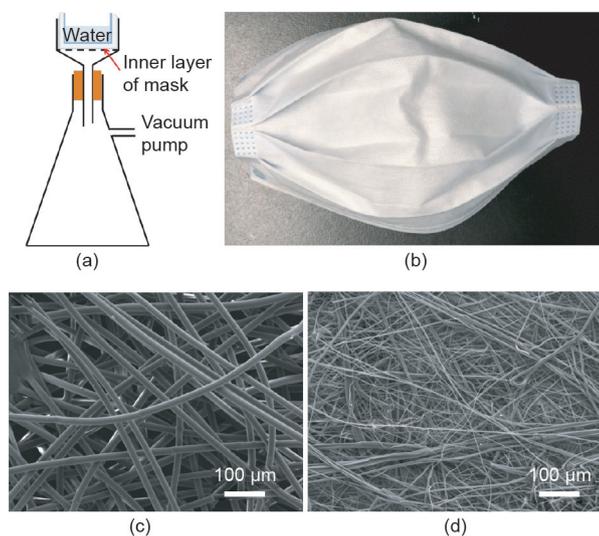


图3. (a) 静水压法测试口罩防水性示意图; (b) 测试后的口罩内层照片; 再生口罩的外层 (c) 和过滤层 (d) 的扫描电镜照片。

电, 针对三种典型口罩 (一次性医用口罩、医用外科口罩、KN95级防护口罩), 按照相应标准测试颗粒物过滤效率和细菌过滤效率。细菌过滤效率 (bacterial filtration efficiency, BFE) 是指在规定的条件下, 口罩滤除含菌颗粒物的能力。在《一次性医用口罩》(YY/T 0969—2013) 和《医用外科口罩》(YY 0469—2011) 行业标准中, 对细菌过滤效率的要求是不低于95%。本研究表明, 市售一次性医用口罩 (JH) 和医用外科口罩 (YB) 经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”处理一次后, 再生口罩的细菌过滤效率均大于95%, 符合相关标准中过滤效率指标要求。颗粒物过滤效率 (particle filtration efficiency, PFE) 是指在规定的条件下, 口罩滤除颗粒物的能力。在《一次性医用口罩》(YY/T 0969—2013) 行业标准中未对颗粒物过滤效率做明确要求, 但在《医用外科口罩》(YY 0469—2011) 行业标准, 要求非油性颗粒物过滤效率不低于30%。本研究表明, 市售医用外科口罩 (YB) 经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”处理一次后, 再生口罩对非油性氯化钠颗粒物过滤效率不低于92%, 符合相关标准中过滤效率指标要求。对于KN95级防护口罩, 根据《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》(GB 2626—2019) 国家标准, 在规定的检测流量设置为  $(85 \pm 4) \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下, 口罩对非油性颗粒物过滤效率应不低于95%。本研究表明, 市售KN95级防护口罩 (包括3M公司产品和韩国进口KF94级口罩) 经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”处理一次后, 再生口罩对非油性氯化钠颗粒物过滤效率均大于95% [图4 (b)], 符合相关标准中过滤效率指标要

求。为研究聚丙烯口罩多次“热水泡+荷电再生”后性能, 实验中针对市售5种品牌型号的口罩进行了“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”重复10次处理, 并测试了再生10次后口罩对非油性颗粒物的过滤效率, 与新口罩相比, 再生10次的口罩过滤效率与新口罩相当, 表明该类口罩经多次“热水泡+荷电再生”处理后, 仍具有与新口罩接近的颗粒物阻隔性能。进一步的, 针对材料质量良好的KN95级防护口罩, 开展了口罩耐高温性试验, 将医用防护口罩置于高压蒸汽灭菌装置中, 经121 °C高压蒸汽处理30 min。实验过程中应用牛皮纸袋或带透气孔的饭盒等对口罩进行保护, 避免高压蒸汽直接喷射口罩造成纤维结构的损坏。高压蒸汽灭菌处理后的口罩, 采用电吹风机吹烘10 min荷电或干燥环境下晾干使荷电恢复。实验测试表明, 经121 °C高压蒸汽处理30 min并荷电再生后, 3M公司防护口罩和韩国进口KF94级口罩的过滤效率分别为99.2%和96.6% [图4 (c)]。上述实验研究表明, 再生口罩对于阻隔微生物、飞沫、花粉等颗粒物在人与环境间传播具有显著作用。

### 3.5. 真实佩戴对口罩性能的影响

为研究真人佩戴过程对不同口罩的影响, 本研究中对不同志愿者累计佩戴8 h的口罩经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”后的过滤性能进行了测试。研究发现, 对于医用外科口罩 (15个样品), 不同志愿者佩戴8 h后口罩过滤效率差异显著, 与新口罩相比, 再生口罩的颗粒物过滤效率衰减0.5%~12%; 对于KN95级防护口罩 (10个样品), 不同志愿者佩戴8 h, 口罩过滤效率与新口罩相当, 均符合相关标准中对于颗粒物过滤效率大于95%的要求。需要注意的是, 我们在实验中发现, 某些志愿者佩戴后的口罩, 由于皮肤油脂渗透造成口罩表面纤维疏水性变化, 导致口罩的抗渗水性有所下降。图5 (a) 展示了新口罩外层表面的4个液滴 (包括两个纯水液滴和两个荧光碳点的水相分散体的液滴)。从图中可以看到, 在365 nm紫外光激发下, 两滴纯水并没有荧光, 而两滴荧光碳点的水相分散体呈现出明亮的荧光。将液滴除去以后, 口罩表面没有残存的荧光材料 [图5 (b)], 表明口罩外层材料具有良好的抗渗水性。然而, 如果口罩材料沾染油污, 可能会损伤其抗渗水性。本文提出了一种基于荧光纳米颗粒渗透探伤的方法对口罩进行检测, 即将超小尺寸荧光纳米碳点 (<5 nm) 水相分散体 [6], 通过雾化器喷洒到被测口罩外层表面,

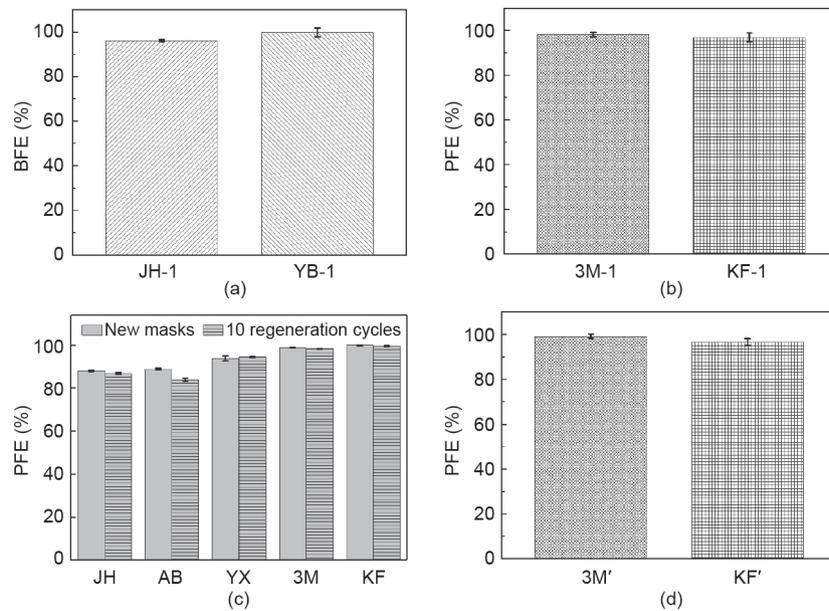


图4. (a) 一次性医用口罩 (JH) 和医用外科口罩 (YB) 经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”处理一次后的细菌过滤效率; (b) 市售 KN95 级防护口罩 (包括 3M 公司产品和韩国进口 KF94 级口罩) 经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”处理一次后, 对非油性氯化钠颗粒物的过滤效率; (c) 5 种品牌型号的新口罩和口罩经“热水泡 (30 min)+电吹风荷电 (10 min)”重复 10 次处理后对非油性颗粒物的过滤效率, 其中, 一次性医用口罩 (JH) 和医用外科口罩 (AB, YX) 的颗粒物过滤效率测试依据 YY 0469—2011 标准, 气流量为  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , KN95 级防护口罩 (3M, KF) 的颗粒物过滤效率测试依据 GB 2626—2019, 气流量为  $85 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d) KN95 级防护口罩 (3M, KF) 经  $121^\circ\text{C}$  高压蒸汽处理 30 min 并荷电再生后的过滤效率。

荧光纳米颗粒水相分散体通过毛细作用渗入到口罩表面缺陷中, 在紫外线照射下通过荧光成像, 观察缺陷迹痕的渗透探伤。实验发现, 新口罩的内层无明显荧光现象 [图 5 (c)], 表明其具有良好的抗渗水性。而对于沾染过油溶性物质的口罩, 由于材料疏水性变化, 荧光纳米颗粒在“损伤”部位富集, 因此能够观察到明显的荧光 [图 5 (d)]。该研究对于可重复使用材料开发和口罩设计提供参考。

### 3.6. 典型应用示范

浙江闰土股份有限公司是一家拥有 4000 多名员工, 专业生产和经营分散、活性染料及化工中间体等化工产品的大型股份制上市企业。在 2020 年 2 月中旬, 企业复工面临口罩短缺难题。根据相关政策规定, 在新冠病毒肺炎疫情期间, 工人从事企业生产需佩戴口罩。但是, 在 2020 年 2~3 月期间, 市场上口罩供应难以满足全面复工复产的需求, 存在“一罩难求”的局面。浙江闰土股份有限公司的科技人员参考科学网关于“口罩荷电再生重复使用”技术的科普报道[4], 并自行开展实验进行验证, 证明了口罩经“热水泡+荷电再生”的有效性。因此企业管理层决定, 推荐员工应用口罩荷电再生重复使用技术, 安全、高效地使用口罩。在 2020 年 2 月 20 日

至 3 月 30 日期间, 将原先每个员工每日发放一个一次性医用口罩, 改为每个员工每三日发放一个一次性医用口罩, 节约口罩 12.25 万只, 降低了公司的口罩使用量, 也确保了防疫工作的正常开展[7,8]。

## 4. 总结

新冠病毒肺炎疫情期间, 口罩是不可或缺的防控利器 and 战略物资, 是保障人民群众健康的盾牌。随着新冠病毒肺炎疫情在全球持续蔓延, 世界范围内抗击新型冠状病毒的口罩防护装备将面临长期短缺, 给全球疫情防控造成巨大困难。在疫情全球蔓延之初, 被中国等亚洲国家当作防疫必备的口罩, 一直未得到欧美国家重视, 但是随着疫情的大规模暴发和无症状感染者的出现, “口罩文明”已逐渐成为各国共识[9]。越来越多的研究表明, 佩戴口罩对疫情防控具有重要意义[10]。因此在全球范围内, 口罩产品的供需矛盾仍旧十分突出, 如何在保证安全的情况下, 让每一只口罩发挥最大效能, 数倍甚至十倍以上地提高防护口罩的有效使用时间, 是疫情防控所急需解决的关键科技问题。我们研究团队在 2020 年 2 月中旬提出口罩荷电再生重复使用技术方法, 即首先将口罩置于大于  $56^\circ\text{C}$  热水中浸泡 30 min, 随后用电吹

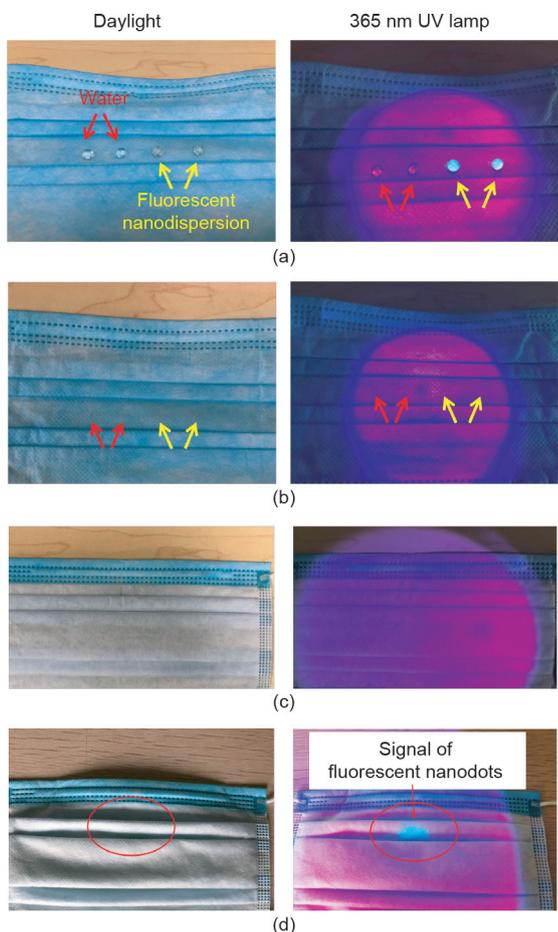


图5. (a) 医用口罩外层液滴（两个纯水液滴和两个荧光碳点的水相分散体的液滴）在日光灯和紫外灯下的照片；(b) 除去液滴后的口罩外层在日光灯和紫外灯下的照片；经荧光纳米颗粒渗透探伤方法检测后新口罩内层 (c) 和油滴玷污后的口罩内层 (d) 在日光灯和紫外灯下的照片。

风机吹烘约10 min吹干并荷电，为解决新冠病毒肺炎疫情应急时期口罩再生重复使用问题，提供了一种简便易行的方法思路。在本文中，进一步总结了对三类典型口罩（一次性医用口罩、医用外科口罩、KN95级防护口罩）“热水泡灭毒+荷电再生”的实验研究和性能评价结果。通过科学实验和标准测试表明，经“热水泡(30 min)+电吹风荷电(10 min)”重复10次后，再生口罩的过滤效率仍与新口罩保持相当。需要注意的是，为了满足口罩防护制品的需求，国内外的科学家都在研究新的技术方案。例如，美国内布拉斯加州大学医疗中心使用紫外线对N95口罩进行消毒后重复使用，而Bioquell公司利用汽化形式的过氧化氢对N95口罩进行净化处理[11]。美国4C公司研究人员和斯坦福大学教授团队的研究认为在温度为85 °C的条件湿热处理30 min，是一种有潜

力的N95口罩消毒净化方法，紫外线辐照可能会对口罩材料的强度等造成不良影响[12]。

与紫外线辐照、过氧化氢蒸气消毒机、恒温恒湿箱等“高科技”方法相比，我们团队提出的“热水泡灭毒+荷电再生”的技术方案更适宜居家操作，且有助于口罩表面清洁和消除异味，获得更加舒适的佩戴体验。实验研究表明，电吹风荷电方法可使口罩过滤层静电量恢复至新口罩的90%，与自然晾干荷电再生的方法相比，电吹风能够迅速移除热水泡处理后口罩的水分，更快速恢复纤维的静电吸附能力，适用于潮湿地区和潮湿天气环境下口罩的快速荷电再生，且可避免潮湿环境下细菌微生物的繁殖，降低口罩重复使用的生物学风险。针对三类典型口罩（一次性医用口罩、医用外科口罩、KN95级防护口罩），经“热水泡(30 min)+电吹风荷电(10 min)”后，结果表明，再生口罩与新口罩具有相当的抗渗水性、微观结构和过滤效率。对于质量良好的KN95级防护口罩，实验结果表明，经121 °C蒸汽处理30 min并荷电再生后的口罩，过滤效率与新口罩相当。系列实验结果表明，再生口罩对于阻隔微生物、飞沫、花粉等颗粒物在人与环境间传播具有显著作用。开展了真人佩戴过程对不同初始性能的口罩的性能演变的研究，发现对于医用外科口罩，不同志愿者佩戴8 h后口罩的过滤效率差异显著，再生口罩与新口罩相比，颗粒物过滤效率衰减0.5%~12%；对于KN95级防护口罩，不同志愿者佩戴8 h，经121 °C蒸汽处理30 min并荷电再生后，再生口罩过滤效率大于95%。研究发现佩戴者皮肤分泌物对口罩渗水性的影响，建立了基于荧光纳米颗粒渗透探伤的口罩检测新方法。在新冠病毒肺炎疫情期间，许多研究者关注口罩的可重复使用，以及可重复使用口罩的研发。一些学术团体已经制定《可重复使用民用口罩》(T/BJFX 0001—2020)、《可重复使用日常防护口罩》(T/CSTM 00387—2020)等团体标准，相关的可重复使用口罩产品正在走向市场[13]。我们希望本文能够为推动缓解应急时期口罩短缺，以及可重复使用口罩材料设计、结构优化提供借鉴和参考。

## 致谢

感谢国家重点研究计划项目的资助(2020YFC0844800)。

## Compliance with ethics guidelines

Dan Wang, Bao-Chang Sun, Jie-Xin Wang, Yun-Yun Zhou, Zhuo-Wei Chen, Yan Fang, Wei-Hua Yue, Si-Min Liu, Ke-Yang Liu, Xiao-Fei Zeng, Guang-Wen Chu, and Jian-Feng Chen declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] [How is the COVID-19 going?] [video]. Beijing: China Central Television; 2020 Jan 20 [cited 2020 May 1]. Available from: <http://tv.cctv.com/2020/01/20/VIDEZRZF7PWXb80z86QyB0db200120.shtml>. Chinese.
- [2] Qu T, Wang BY. [The National Health Commission of the People's Republic of China suggested wearing a mask to promote "mask civilization"] [Internet]. Beijing: XinhuaNet; 2020 Jan 22 [cited 2020 May 1]. Available from: [http://www.xinhuanet.com/2020-01/22/c\\_1125493839.htm](http://www.xinhuanet.com/2020-01/22/c_1125493839.htm). Chinese.
- [3] [Joint Prevention and Control Mechanism of the State Council: technical guidance on the selection and use of masks for different population to prevent novel coronavirus] [Internet]. Beijing: Joint Prevention and Control Mechanism of the State Council in Response to the Novel Coronavirus Pneumonia; 2020 Feb 4 [cited May 1]. Available from: [http://www.gov.cn/xinwen/2020-02/05/content\\_5474774.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-02/05/content_5474774.htm). Chinese.
- [4] Cheng W. [Can't buy mask? It can be reused after regeneration treatment!] [Internet]. Beijing: ScienceNet; 2020 Feb 14 [cited 2020 May 1]. Available from: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/2/435754.shtm>. Chinese.
- [5] National Health Commission of the People's Republic of China. [Prevention and control program of COVID-19 (4th edition)]. Beijing: General Office of National Health Commission of the People's Republic of China; 2020 Feb 6 [cited 2020 May 1]. Available from: <http://www.nhc.gov.cn/jkjs3577/202002/573340613ab243b3a7f61df260551dd4/files/c791e5a7ea5149f680fdb34dac0f54e.pdf>. Chinese.
- [6] Wang D, Wang Z, Zhan Q, Pu Y, Wang JX, Foster NR, et al. Facile and scalable preparation of fluorescent carbon dots for multifunctional applications. *Engineering* 2017;3(3):402–8.
- [7] Cheng W. [Technology of reuse of masks helps to fight against virus] [Internet]. Beijing: ScienceNet; 2020 Apr 28 [cited 2020 May 1]. Available from: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/4/439043.shtm>. Chinese.
- [8] Liu Y. Charge regeneration to make full use of each mask [Internet]. Beijing: Science and Technology Daily; 2020 Apr 29 [cited 2020 May 1]. Available from: [http://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-04/29/content\\_444079.htm](http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-04/29/content_444079.htm). Chinese.
- [9] Feng S, Shen C, Xia N, Song W, Fan M, Cowling BJ. Rational use of face masks in the COVID-19 pandemic. *Lancet Respir Med* 2020;8(5):434–6.
- [10] Leung NHL, Chu DKW, Shiu EYC, Chan KH, McDevitt JJ, Hau BJP, et al. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat Med* 2020;26:676–80.
- [11] Mackenzie D. Reuse of N95 Masks. *Engineering* 2020;6(6). in press. doi: 10.1016/j.eng.2020.04.003.
- [12] Liao L, Xiao W, Zhao M, Yu X, Wang H, Wang Q, et al. Can N95 respirators be reused after disinfection? How many times?. *ACS Nano* 2020;14(5):6348–56.
- [13] Zhang Z, Xing Y. New reusable face masks in production [Internet]. Beijing: China Daily; 2020 Mar 2 [cited 2020 May 1]. Available from: <https://www.chinadailyhk.com/article/122864>.