

## News & Highlights

### N95 口罩重复使用

Dana Mackenzie

Senior Technology Writer

随着COVID-19在美国的大流行进入第二个月(2020年4月),通常只为一次性使用的医用防护口罩这一最简单的医疗用品已经供不应求。现在,为了满足日益迫切的需求,中国和美国的工程师正在研究新的技术方案,使医院现有的防护口罩能够通过消毒净化处理以后,达到可重复使用(图1)[1]。其中一些技术方案需要专门的消毒净化设备,但也有一些方法简单易行,适合居家操作(图2)[2,3]。

如何有效杀死病毒?当病毒不在人体内时,这不是什么难事。哈佛大学陈曾熙公共卫生学院流行病学助理教授Michael Mina说:“最简单的方法就是戴上口罩,让病毒在人体外待两周。我们知道病毒在体外存活不会超过十天左右。”然而,这样一个缓慢的解决方案并不特别实用。



图1. N95口罩,如图中所示的“干净”口罩,使用Bioquell (Horsham, Pennsylvania) Z-2设备(见图2)经过过氧化氢蒸汽消毒净化处理后,在杜克大学医院(Durham, North Carolina)重复使用[1]。来源:杜克大学,经许可。

快速杀灭病毒的方法有5种:辐射、熏蒸、热水、蒸汽或烘烤病毒。每种方法都可以有效杀死病毒,但并不一定是成功对口罩进行消毒净化的标准方案。对于口罩净化,需要确保在消毒净化处理后,具有像新口罩一样具有防护功能。根据美国最大的N95口罩制造商3M

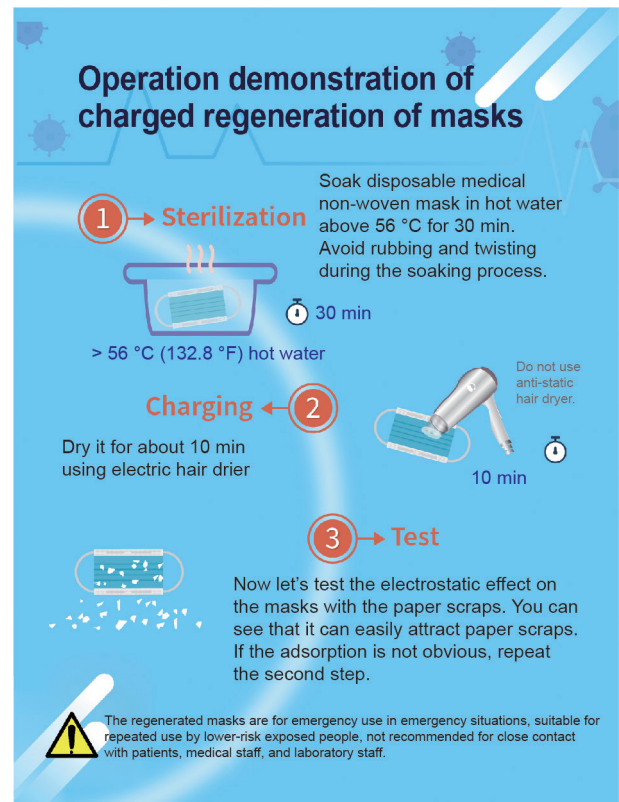


图2. 北京化工大学陈建峰教授及其合作者提出的,适用于非医疗环境下、家庭使用的口罩“再生处理”技术方法[2,3]。来源:陈建峰教授团队提供。

公司（Maplewood, MN）的一份技术公告，好的口罩消毒净化方法应该满足以下四个条件：①有效杀灭目标微生物，比如引起疫情的COVID-19病毒；②不损坏口罩的过滤性能；③不影响口罩的适配性；④对口罩佩戴者是安全的[4]。

一些口罩消毒处理方法并不能满足上述条件。例如，微波炉加热处理，有可能使口罩材料部分熔化[5]。酒精和漂白剂会破坏口罩内层材料的静电，而静电对于维持口罩的过滤功能至关重要[5,6]。N95过滤层的孔隙率接近90%，因此纤维需要依靠静电的帮助以捕获微小粒子，从而达到95%以上的过滤效率[6,7]。

## 1. 紫外线辐射和熏蒸

上述五种方法中的第一种——紫外线辐射（UV），目前已被美国内布拉斯加州林肯市的内布拉斯加州大学医学中心使用[8,9]。他们的技术方案是将两个紫外光源（UVC）组成的辐射塔（每个辐射塔有8根紫外灯管）置于墙壁涂有反射涂料的房间里（图3）[9]。将口罩挂在房间内的晾衣绳上进行紫外线辐射消毒处理，每个房间可放置90个口罩。测试结果表明，15 min的紫外线辐射可以杀死病毒[9]。

第二种方法是熏蒸。美国北卡罗莱纳州达勒姆市杜克大学医院已使用由Bioquell公司（位于宾夕法尼亚州霍尔沙姆市）制造的基于过氧化氢蒸气的口罩消毒净化系统，并对其进行测试[1]。根据所使用的机器系统的区别，过氧化氢的浓度可以累积到300~750 ppm



图3. 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，供医务人员重复使用[9]。使用过的口罩挂在两个紫外线组成的辐射塔之间的晾衣绳上，每个辐射塔有8根紫外灯管；经紫外线辐射15 min处理，可以杀死病毒，且单批次可处理90个口罩。来源：内布拉斯加州大学，经许可。

（1 ppm=1×10<sup>-6</sup>），并保持20 min。该方法最耗时的部分是脱气流程；通常需要4 h以后，口罩净化室的气体浓度才能达到安全范围。但此后的口罩使用是安全的，过氧化氢能够分解成氧气和水。使用Bioquell Z-2过氧化氢蒸气发生器（图4），杜克大学医院每批次可对1250个口罩进行消毒净化，每12 h可消毒净化2500个口罩[1]。

但紫外线和过氧化氢方法所需的设备，并非是所有医院已有的。Mina说：“全球范围内口罩资源短缺令人担心，对其进行有效的重复使用将具有重要意义。我会鼓励我的同事考虑口罩重复使用的解决方案，特别是能够适用于不需要上述高科技装置系统的医院所采用的方案。”





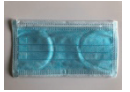


## 2. 热水加热和蒸汽

在没有紫外线辐射和过氧化氢蒸气装备的情况下，有三种可能的解决方案可用于口罩消毒净化：热水加热、水蒸气和烘烤。在2020年2月中旬，北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室主任陈建峰领导的一个研究团队，提出了一种对一次性使用口罩进行“再生处理”的方法[2,3]。该方法是专门为居家操作设计的，包括两个步骤（图2）。第一步是将用过的口罩浸泡在温度大于56℃（通常为60~80℃）的热水中30 min。温度和时间的确定是基于中华人民共和国国家卫生健康委员会《新型冠状病毒肺炎防控方案（第四版）》中“56℃，30 min可有效灭活病毒”的指导意见[2]。第二步是用普通电吹风（非抗静电吹风机）对口罩进行吹干荷电处理



图4. 使用Bioquell公司（位于宾夕法尼亚州霍尔沙姆市）的过氧化氢蒸气发生器，杜克大学医院的工作人员每批次可对1250个口罩进行消毒净化，每12 h可消毒净化2500个口罩，以供重复使用[1]。Battelle（位于俄亥俄州哥伦布市）制造和运营的放大版本的口罩消毒净化系统，每天可以对8万个口罩进行消毒净化处理，足够供应多家医院及医院系统的口罩重复使用[10]。来源：杜克大学，经许可。

表1 新口罩和再生口罩对0.1 μm颗粒物过滤效率测试[2]，测试方法和条件依据中华人民共和国国家标准GB 2626—2006

口罩类型	状态	口罩数量	0.1 μm颗粒物过滤效率（范围）/%	口罩照片
KF94 (Air Puri)	新	3	98.6 (97.4~99.9)	
	再生1次	3	98.1 (97.7~98.5)	
一次性医用口罩 (Hubei Lexin)	新	5	46.5 (45.8~46.8)	
	再生1次	5	46.0 (44.3~47.2)	
医用外科口罩 (Henan Yubei)	新	5	76.9 (73.9~78.5)	
	再生1次	5	75.5 (74.9~77.0)	
	再生10次	5	76.2 (73.7~77.9)	

10 min，以恢复对口罩材料过滤功能至关重要的静电电荷。第三步是纸屑检验，通过观察再生口罩对碎纸屑的静电吸附现象，检验口罩荷电情况。如果可以观察到明显的静电吸附现象，可认为口罩静电电荷恢复。

该研究团队发现，口罩在经过热水泡消毒净化1次以及10次循环后，口罩的过滤效率和气流阻力基本与新口罩相当（表1）[2]。尽管如此，该研究团队特别提醒，这种口罩重复使用的方法仅推荐在口罩急剧短缺时，低风险个人选择使用，不推荐医疗环境等人员使用[2,3]。

2020年3月，陈建峰研究团队采用高压蒸汽灭菌设备处理口罩，并研究了医用防护口罩重复使用的可行性。高压蒸汽灭菌设备是在大多数医院和诊所用来对手术器械进行灭菌消毒的常用设备。陈建峰说：“121 °C蒸汽处理30分钟，几乎可以杀死所有的细菌、病毒等病原体微生物。”高压蒸汽灭菌也被美国疾病控制和预防中心认定为医疗器械领域应用最广泛、最可靠的一种消毒灭菌方法[11]。

该研究团队对口罩进行高压蒸汽灭菌和“充电”再生的初步实验测试表明，使用过的口罩经消毒净化处理后仍能够保持过滤效果。陈建峰研究团队的成员王丹说：“我们对经志愿者佩戴8小时后的某公司产N95口

罩，进行高压蒸汽灭菌及荷电再生处理后，测试结果表明再生口罩对0.1微米颗粒物的过滤效率仍保持在99%以上。”陈建峰、王丹和他们所在的研究团队，目前正在优化基于高压灭菌器的方法的工艺参数及密合性等其他测试，以确定该过程对N95口罩综合性能的影响。陈建峰说：“采用实际佩戴后的口罩进行研究测试，对于验证口罩重复使用技术方法的有效性和广泛适用性非常重要。”

### 3. 烘烤及各种技术方案的比较

最后，斯坦福大学材料科学与工程系教授崔屹领导的斯坦福大学和4C Air公司（位于加利福尼亚州，森尼维尔）研究团队，对口罩进行了烘烤的实验研究[6,7]。他们目前提出的标准方法是将口罩在75 °C下烘烤30 min。“有的人认为湿度越高，杀灭病毒的速度就越快”，崔屹说，因此他们也在试验不同湿度和不同温度的口罩。85 °C或100 °C的温度也能起到很好的作用，但崔屹说“125 °C就太高了”。在这个温度下，聚丙烯的性能开始下降。

烘烤方法能否有效杀灭全部的病毒，是其中的一个不确定因素。此前的研究中病毒均在“液体缓冲液或

介质中”，旧金山Vitalant研究所的研究人员Jing Jin说。Jing Jin目前与崔屹教授合作开展口罩重复使用相关研究。为了确保烘烤方法能够有效杀灭病毒，Jing Jin正在研究干热处理对聚丙烯纤维布材料上病毒的影响。尽管到4月中旬才有可能完成相关实验，但她说：“我非常有信心，75 °C条件下30 min的处理足够了。”

假设所有的方法在杀灭病毒方面都是同样有效的，那么具体方案的选择便取决于其他因素。因此，崔屹和他的合作者（包括诺贝尔物理学奖获得者、斯坦福大学物理和分子生物学教授朱棣文，与崔屹同为4C Air公司的共同创始人）比较了辐射、蒸汽和烘烤对口罩性能的影响。

崔屹说，口罩经紫外线辐射消毒净化10次后，仍旧可以保持过滤性能（过滤效率和压差）。但在经过20次紫外线辐射消毒净化处理后，口罩性能“退化了不少”。“我们对使用紫外线辐射消毒的技术方案很谨慎，因为紫外线的穿透深度比较有限。口罩具有三维结构，所以有些病毒细菌可能在口罩内部，必须要用非常高的剂量辐射才能完全消毒。”

对于蒸汽加热，崔屹团队使用了每次10 min的循环，其中蒸汽来自于烧杯中沸腾的水蒸气，相比之下，陈建峰团队使用了30 min的高压灭菌循环。崔屹说，他们发现在3次10 min的蒸汽处理后，口罩性能没有下降，但在经过10个10 min的蒸汽处理后，口罩过滤效率下降到80%。这种情况下，它已经不再是N95级别的口罩了。

如上所述，北京化工大学陈建峰研究团队仍在评估多次高压蒸汽灭菌处理后口罩的有效性。斯坦福大学崔屹研究团队的结果与陈建峰研究团队的结果不一致，可能是因为崔屹研究团队没有在多次循环处理中用吹风机给口罩“充电”和（或）两组之间蒸汽处理过程工艺参数的差异。所以，目前看来，陈建峰研究团队的高压蒸汽灭菌方法至少能使口罩重复使用一次，但其对口罩多次消毒净化处理的效果还有待证实。

在崔屹研究团队的测试结果中，干热烘烤处理后口罩的性能最好，是紫外线辐射、蒸汽和烘烤三种方法中唯一的一种即使在20次重复处理，仍能够使口罩过滤效率、压差和密合性保持在较高水平的方法。崔屹的研究团队没有进行过氧化氢熏蒸试验，但杜克大学医院的研究人员已经计划对N95口罩进行30次循环的净化和再利用[1]，其主要的限制因素是口罩耳带/头带的老化变性（30次循环后，口罩耳带/头带变松，难以使口罩达到密合性要求）。

## 4. 供给和需求

在应急情况下，美国食品和药物管理局于2020年3月29日批准了放大版的杜克大学医院所采用的Bioquell口罩消毒净化装置，该装置方案已于2016年获得批准。由Battelle（俄亥俄州哥伦布市）制造和生产的更大版口罩消毒净化装置（基本上是一个装有存放口罩的架子和一个过氧化氢汽化器的改良运输集装箱）可用于多达20次循环处理的口罩消毒和重复使用[10]。Battelle系统已经部署在马萨诸塞州、俄亥俄州和纽约，每天可以消毒净化8万个口罩，足以供应多家医院甚至医院系统[12]。

尽管如此，截至3月27日，3M公司仍然坚持认为在对口罩重复处理5~10次时“没有任何消毒方法达到上述四项标准”[4]。在4月初更新的说明中[13]中，3M公司指出，过氧化氢和其它消毒净化方法仍在评估中，不建议对口罩进行烘烤、蒸汽或高压灭菌处理，相关技术方法均有可能导致“过滤性能的显著下降”。

无论如何，当前对于口罩资源的需求非常迫切。在2020年3月初，美国的国家战略储备有大约4200万个口罩，仅为流行病疫情期年需求的1% [14]。如果疫情期间确实像预计的一样需要35亿个口罩，这一点“库存”将在半周内消耗殆尽。

在供应方面，3M公司此前在全球范围内每年生产5亿个口罩。自新型冠状病毒疫情流行以来，该公司的产量已经翻了一番[15]。3月31日，3M公司再次承诺将全球产量翻番，并在美国达到每年6亿个口罩的产量[16]。即便如此，将这一口罩供应（6亿）与潜在需求（35亿）相比，仍有明显差距。因此口罩的多次重复非常必要。美国在缩小供需差距方面已经得到了一些帮助。据报道，波士顿市已于4月2日收到了来自中国的120万个口罩，并且有更多的口罩正在运送途中[17]。

但这一慷慨的礼物，与可能通过净化和再利用而获得的口罩数量相比，也是微不足道的，而口罩重复使用的策略正得益于美国和中国科学家的研究成果。

## References

- [1] Schwartz A, Stiegel M, Greeson N, Vogel A, Thomann W, Brown M, et al. Decontamination and reuse of N95 respirators with hydrogen peroxide vapor to address worldwide personal protective equipment shortages during the SARS-CoV-2 (COVID-19) pandemic. *Appl Biosaf* 2020; in press.
- [2] Cheng W. [Can't buy mask? It can be reused after regeneration treatment! ] [Internet]. Beijing: ScienceNet; 2020 Feb 14 [cited 2020 Apr 6]. Available from: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/2/435754.shtm>. Chinese.
- [3] Zhang Z, Xing Y. New reusable face masks in production [Internet]. Hong Kong: China Daily; 2020 Mar 2 [cited 2020 Apr 6]. Available from: <https://www.chinadailyhk.com/article/122864>.

- [4] 3M. Disinfection of filtering facepiece respirators [Internet]. Technical Bulletin; 2020 Mar [cited 2020 Apr 3]. Available from: <https://multimedia.3m.com/mws/media/18165760/disinfection-of-disposable-respirators-technical-bulletin.pdf>.
- [5] Viscusi DJ, Bergman MS, Eimer BC, Shaffer RE. Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg* 2009;53(8):815–27.
- [6] Liao L, Wang X, Yu X, Wang H, Zhao M, Wang Q, et al. Can N95 facial masks be used after disinfection? And for how many times? [Internet]. Stanford: Learnly Anesthesia/Stanford AIM Lab COVID-19 Evidence Service; [cited 2020 Apr 2]. Available from: <http://stanfordmedicine.app.box.com/v/covid19-PPE-1-2>.
- [7] Price A, Chu LF. Addressing COVID-19 face mask shortages (v 1.3), March 2020. [Internet]. Stanford: Learnly Anesthesia/Stanford AIM Lab COVID-19 Evidence Service; [cited 2020 Apr 2]. Available from: <http://stanfordmedicine.app.box.com/v/covid19-PPE-1-2>.
- [8] Kolata G. As Coronavirus looms, mask shortage gives rise to promising approach [Internet]. New York: New York Times; 2020 Mar 20 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.nytimes.com/2020/03/20/health/coronavirus-masks-reuse.html>.
- [9] Lowe JL, Paladino KD, Farke JD, Boulter K, Cawcutt K, Emodi M, et al. N95 filtering facepiece respirator ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) process for decontamination and reuse [Internet]. Lincoln: University of Nebraska; [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.nebraskamed.com/sites/default/files/documents/covid-19/n-95-decon-process.pdf>.
- [10] Battelle CCDS Critical Care Decontamination System™ being deployed to meet urgent need for personal protective equipment for nation's healthcare workforce [Internet]. Columbus: Battelle Press Office; 2020 Mar 28 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.battelle.org/newsroom/press-releases/press-releases-detail/battelle-ccds-critical-care-decontamination-system-being-deployed-to-meet-urgent-need-for-personal-protective-equipment-for-nation-s-healthcare-workforce>.
- [11] Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities (2008) [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; 2016 Sep 18 [cited 2020 Apr 6]. Available from: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/sterilization/steam.html>.
- [12] Ostriker R. Boston hospitals getting 'game-changer' machine that sterilizes 80 000 protective masks a day [Internet]. Boston: Boston Globe; 2020 Apr 2 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.bostonglobe.com/2020/04/02/metro/boston-hospitals-getting-game-changer-machine-that-sterilizes-80000-protective-masks-day>.
- [13] 3M. Decontamination methods for 3M N95 respirators [Internet]. Technical Bulletin; 2020 Apr [cited 2020 Apr 4]. Available from <https://multimedia.3m.com/mws/media/18248690/decontamination-methods-for-3m-n95-respirators-technical-bulletin.pdf>.
- [14] Lovelace Jr B. HHS clarifies US has about 1% of facemasks needed for 'full-blown' coronavirus pandemic [Internet]. New York: CNBC; 2020 Mar 4 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.cnbc.com/2020/03/04/hhs-clarifies-us-has-about-1percent-of-face-masks-needed-for-full-blown-pandemic.html>.
- [15] Gruley B, Clough R. How 3M plans to make more than a billion masks by end of year [Internet]. New York: Bloomberg Businessweek; 2020 Mar 25 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-03-25/3m-doubled-production-of-n95-face-masks-to-fight-coronavirus>.
- [16] 3M. Putting healthcare workers first during the coronavirus outbreak [Internet]. Maplewood: 3M News Center; 2020 Apr 1 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://news.3m.com/blog/3m-stories/3m-responds-2019-novel-coronavirus>.
- [17] Hightower K. New England Patriot's plane delivers 1.2 million N95 masks from China to Massachusetts [Internet]. New York: Time; 2020 Apr 2 [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://time.com/5814865/new-england-patriots-plane-masks/>.