

医用口罩辐照灭菌工艺的可行性与风险评估

许零¹ 苏智阳² 周丽娟³ 陈功¹ 洪紫坚³ 吴晶³
黄敏⁴ 石留音⁵ 李宏伟¹ 吴沥豪¹

¹(厦门大学公共卫生学院 分子疫苗学与分子诊断学国家重点实验室 厦门 361102)

²(厦门市食品药品评审认证与不良反应监测中心 厦门 361003)

³(金日制药(中国)有限公司 厦门 361100);⁴(厦门鑫科高能电子有限公司 厦门 361100)

⁵(弓立(厦门)医疗用品有限公司 厦门 361100)

摘要 为验证采用辐照技术对医用口罩进行辐照灭菌的可行性,本研究针对一次性使用医用口罩、医用外科口罩、医用防护口罩三种市售医用口罩辐照灭菌(10 MeV加速器)及辐照对口罩不同层材料性能的影响进行了系统研究。通过扫描电镜、通气阻力测定、力学性能测试、颗粒过滤效率测定和微生物指标测定等表征方法,详细测定了医用口罩辐照灭菌后表面形貌、透气性能、力学性能、过滤性能和微生物指标的变化。结果表明:三种医用口罩经辐照后,电子束对医用口罩熔喷层的微观物理结构没有明显辐照损伤;同时,通气阻力未见明显变化;辐照灭菌前除医用防护口罩外,大部分样品的微生物指标符合GB15979—2002标准的要求,所有样品经4 kGy吸收剂量辐照后均灭菌成功。然而,一个关键指标,即颗粒过滤效率,在辐照后显著降低。为阐明其机理及力图恢复医用口罩的过滤效率,利用静电发生器对其进行荷电再生后,颗粒过滤效率回升至初始的60%~90%。辐照后的口罩颗粒过滤效率虽然在静电发生器充电再生后得到大幅度回升,但口罩的拉伸强度、断裂伸长率和颗粒过滤效率在辐照后都发生了不可逆转的变化,说明在以静电过滤效率为主要过滤原理的口罩生产工艺条件下,辐照灭菌作为主要灭菌手段并不适用,只有不依赖静电过滤的新型口罩才可以采用辐照灭菌工艺。

关键词 医用口罩,辐照灭菌,颗粒过滤效率

中图分类号 TS177

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0016

Feasibility and risk assessment of radiation sterilization processing for medical masks

XU Ling¹ SU Zhiyang² ZHOU Lijuan³ CHEN Gong¹ HONG Zijian³ WU Jing³
HUANG Min⁴ SHI Liuyin⁵ LI Hongwei¹ WU Lihao¹

¹(State Key Laboratory of Molecular Vaccinology and Molecular Diagnostics, School of Public Health,
Xiamen University, Xiamen 361102, China)

²(Xiamen Food and Drug Evaluation Certification and Adverse Reaction Monitoring Center, Xiamen 361003, China)

基金资助:福建省科技计划高校产学研合作项目(2021Y4007)、厦门大学科研成果落地转化项目、第五轮福建省卫生教育联合攻关计划(2019-WJ-36)和厦门市海洋与渔业发展专项资金项目(18CYY007HJ04)资助

第一作者:许零,女,1971年8月出生,2005年于日本东京工业大学获博士学位,现任厦门大学公共卫生学院教授,博士生导师,主要从事生物医用高分子功能材料的合成、机理与应用基础研究,E-mail: lingxu@xmu.edu.cn

收稿日期:初稿 2022-01-26;修回 2022-02-08

Supported by Science and Technology Program on the Integration of Industry, Education and Research of Fujian, China (2021Y4007), Scientific Research and Conversion Project of Xiamen University, the Fifth Round of Fujian Health Education Joint Key Project (2019-WJ-36) and Xiamen Ocean and Fisheries Development Special Fund Project (18CYY007HJ04)

First author: XU Ling (female) was born in August 1971, and obtained her doctoral degree from Tokyo Institute of Technology in 2005. Now she is a professor and doctoral supervisor at the School of Public Health, Xiamen University, engaging in the research on the synthesis, mechanism and application of biomedical polymer functional materials, E-mail: lingxu@xmu.edu.cn

Received 26 January 2022; accepted 08 February 2022

³(Xiamen Goldsun Pharmaceutic Co. Ltd., Xiamen 361100, China)⁴(Xiamen Xinke High Energy Electronics Co. Ltd., Xiamen 361100, China)⁵(Gongli (Xiamen) Medical Products Co. Ltd., Xiamen 361100, China)

ABSTRACT In order to verify the technological feasibility of radiation sterilization for medical masks, three types of medical masks, namely, single-use, surgical, and protective masks, were sterilized by electron beam irradiation using a 10 MeV accelerator. The surface morphology, air permeability, mechanical properties, filtration performance, and microbiological criteria of the sterilized medical masks were investigated. After irradiation, no clear damage on the morphology of the melt-blown, inner, and outer layers of the medical masks (data not shown) was observed. Moreover, the air permeability showed no distinct change. The microbiological criteria of single-use and surgical masks met the requirements of the GB 15979-2002 standard; however, those of the protective masks did not. All samples were successfully sterilized after irradiation with an absorbed dose of 4 kGy. Moreover, the particle filtration efficiency, which is a key factor, was significantly decreased after irradiation. To elucidate the mechanism and to determine the filtration efficiency of the medical masks, electrostatic generators were used to charge and regenerate the masks. The particle filtration efficiency reached 60% – 90% of the original value after treatment. Although the particle filtration efficiency of the irradiated masks was considerably recovered after charging and regeneration, the tensile strength at break, elongation at break, and particle filtration efficiency of the masks underwent irreversible decrement after irradiation. The results indicate that damage to the melt-blown layers occurred owing to the radiation degradation of polypropylene fibers. Moreover, because the function of medical masks mainly depends on the electrostatic filtration efficiency, radiation sterilization was not found to be a suitable sterilization method, and radiation sterilization processing can only be applied to a novel mask that does not rely on electrostatic filtration.

KEYWORDS Medical mask, Irradiation sterilization, Particle filtration efficiency

CLC TS177

2020年初,新型冠状病毒(SARS-CoV)引发的肺炎疫情在全球范围内爆发并迅速蔓延。2020年3月11日,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)举行新闻发布会宣布新型冠状病毒爆发为全球大流行^[1]。彼时全球的口罩库存和生产能力都远不能满足需求,医护人员处于高风险的环境下,医用口罩被认为是最为有效的阻隔病毒传播的手段之一。目前,常用的医用口罩主要有一次性使用医用口罩、医用外科口罩和医用防护口罩等^[2]。口罩的防护作用主要依靠熔喷布孔径过滤和静电吸附作用,就其防护效果而言,医用防护口罩>医用外科口罩>一次性使用医用口罩。目前,口罩灭菌方法的研究主要集中在化学方法(过氧化氢、二氧化氯、漂白剂、酒精、肥皂溶液和环氧乙烷、臭氧去污等)和物理方法(干法/蒸汽热处理、紫外线灭菌、电子束和 γ 射线等)^[3-5]。以传统的环氧乙烷灭菌为例,该灭菌方式需要进行长达两周的灭菌和解析,严重阻碍口罩的供应速度;环氧乙烷的毒性对生产环境和周边

环境都造成了很大的危害,对人类的健康产生了不良影响^[6];极易改变或降低滤料纤维的静电特性,进而影响微粒的过滤水平^[7]。辐照灭菌作为生产效率高、工艺安全可靠的灭菌技术,近几十年来被广泛用于医药和食品等领域^[8]。辐照灭菌是美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)认可的医疗用品终端灭菌方法,其优势主要包括:过程无需解析时间,操作简便,可连续处理,从而显著缩短灭菌周期,大幅提升灭菌处理效率;电离辐射能量高、穿透力强、杀菌彻底,可实现产品包装后消毒灭菌,避免微生物二次污染;无环氧乙烷排放、无污染、无残留,是一种绿色环保消毒灭菌技术^[9]。目前,发达国家生产的一次性医疗用品中,40%~50%都经过辐照灭菌处理,由此可见辐照灭菌是一种安全可靠的方法,它能有效杀死包括炭疽在内的细菌和病毒^[7]。医疗用品辐照灭菌在常温常压下,依托辐射加工装置对包装好的一次性医疗用品、卫生用品、手术器械、医用敷料等进行辐照,从

而达到消毒、灭菌的目的。以医用口罩灭菌为例，用环氧乙烷灭菌常规需要 14 d，即使加速解析也需要数天，产能严重满足不了当前疫情防控的需求，环氧乙烷残留也给医护人员、生产操作人员和环境带来很大危害；而采用辐射灭菌工艺，单箱产品几分钟即可完成辐照灭菌，一个集装箱产品大约几小时可完成，无残留和危害。有研究证实 SARS-CoV 可通过 10 kGy 吸收剂量下的辐照进行灭活^[10]。

本研究团队受厦门市疫情防控指挥部委托，对三种医用口罩辐射灭菌工艺适应性进行了研究，以期对医用口罩等卫生防护用品辐射灭菌的可行

性及风险提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

一次性使用医用口罩（弓立医疗用品有限公司，规格：10 盒×2 层×50 片/盒）、医用外科口罩（弓立医疗用品有限公司，规格：10 盒×2 层×50 片/盒）、医用防护口罩（弓立医疗用品有限公司，规格：6 盒×3 层×20 片/盒）。三种口罩的分层结构图如图 1(a)~(c)所示，三者均为正常生产包装。

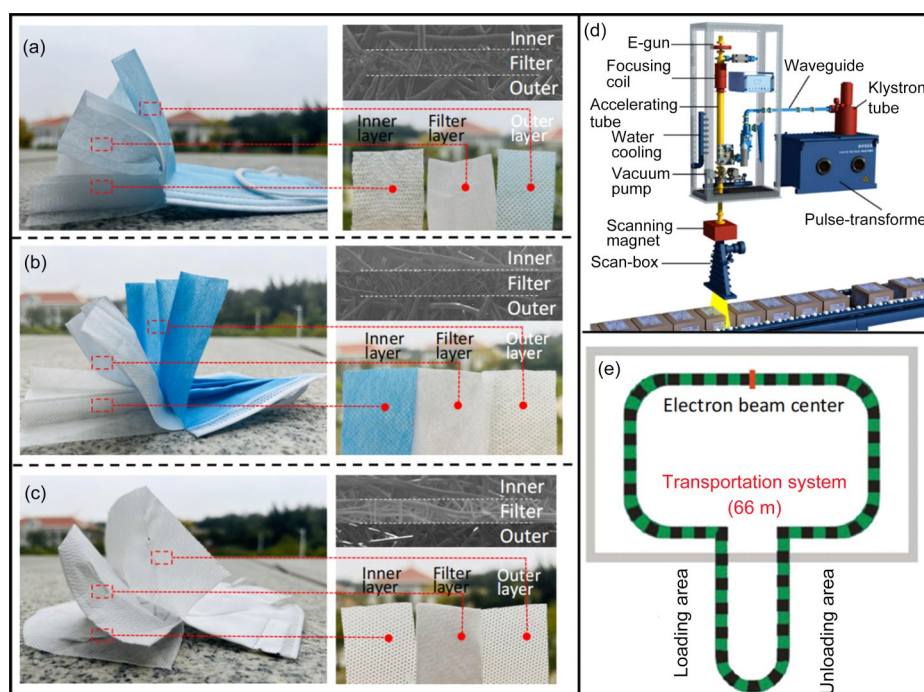


图1 一次性使用医用口罩(a)、医用外科口罩(b)、医用防护口罩(c)的典型三层结构;辐照设备(d)及运输系统(e)示意图
Fig.1 Typical three-layer structure of single-use medical masks (a), medical surgical masks (b), and medical protective masks (c); schematic diagram of irradiation equipment (d) and transportation system (e)

辐照采用同方威视电子加速器辐照加工系统（10 MeV/20 kW），其构成如图 1（d）所示。加速器主要性能指标：电子束能量 10 MeV；平均束流的最高流强 2 mA；束流平均功率 20 kW；扫描宽度 300~850 mm（可调）；输运速度 10~180 mm/s（可调），辐照容器为 800 mm×800 mm×110 mm 托盘，输运传送装置如图 1（e）所示，全长为 66 m，采用辊轴输运系统。

1.2 辐射条件

对三种医用口罩进行电子束辐射灭菌适应性研究。由厦门鑫科高能电子有限公司开展电子束辐射灭菌，对吸收剂量为 0 kGy（未辐射）、

4 kGy、6 kGy、8 kGy、10 kGy、12 kGy、16 kGy、20 kGy 和 25 kGy 的样品开展辐射灭菌工艺验证，并进行对比研究；由弓立医疗及金日制药共同完成对辐射样品的检测，托盘上辐照的每个实验组每个样品各取样一盒进行实验，产品性能分别依据 GB 19083—2010^[11] 以及 YY 0469—2011^[12]、YY/T 0969—2013^[13] 进行测试。

1.3 测试和表征

1.3.1 扫描电子显微镜（Scanning electron microscope, SEM）测试

采用 Leica CPD300 型扫描电子显微镜对样品外表面微观形貌进行分析，其工作电压为 15 kV，

倍率为100。将口罩熔喷过滤层的样品剪成小块,用导电胶固定在样品台上,喷金处理,然后在电镜下观察样品的表面形态结构。

1.3.2 通气阻力测试

依据 GB 19083—2010 以及 YY 0469—2011、YY/T 0969—2013 行业标准,采用 TSI 8130 自动滤料测试仪,测定三种口罩在常规条件下的通气阻力。

1.3.3 拉伸强度和断裂伸长率测试

口罩样品制备为哑铃型样条,长120 mm,宽25 mm,采用 TA-XT plus 质构仪,夹持距离(200±1) mm,以100 mm/min 恒定伸长速率拉伸样品直至断裂,对不同剂量辐照前后的口罩样品进行拉伸性能测试,每个样品测量3次^[14]。

1.3.4 颗粒过滤效率测试

依据 GB 19083—2010 以及 YY 0469—2011、YY/T 0969—2013 行业标准,采用 TSI 8130 自动滤料测试仪,测量口罩样品对 NaCl 颗粒物的过滤效率。检测温度条件为(25±5) °C,相对湿度为(30±

10)%, NaCl 颗粒物浓度不超过 200 mg/m³。

1.3.5 微生物指标测试

准确称取(10±1) g 样品,剪碎后加入到200 mL 灭菌生理盐水中,充分混匀,制成1:20的样品匀液。用无菌吸管吸取上述供试液各1 mL,分别放入5个无菌平皿中,及时将冷却的营养琼脂培养基倾注于平皿,每个平皿15~20 mL,并转动平皿使其混合均匀;待琼脂凝固后,将平板翻转倒扣1 h 以上,置于(35±2) °C 生化培养箱中倒置培养48 h 参考 GB 15979—2002^[15] 附录B 的标准进行细菌菌落总数的计数,以及金黄色葡萄球菌、溶血性链球菌、大肠杆菌和绿脓杆菌的判定。

2 结果与讨论

2.1 吸收剂量对医用口罩不同层形貌的影响

为研究电子束辐照后医用口罩的熔喷过滤层是否会直接断裂产生细微裂纹,对三种口罩进行了 SEM 测试,结果见图2。

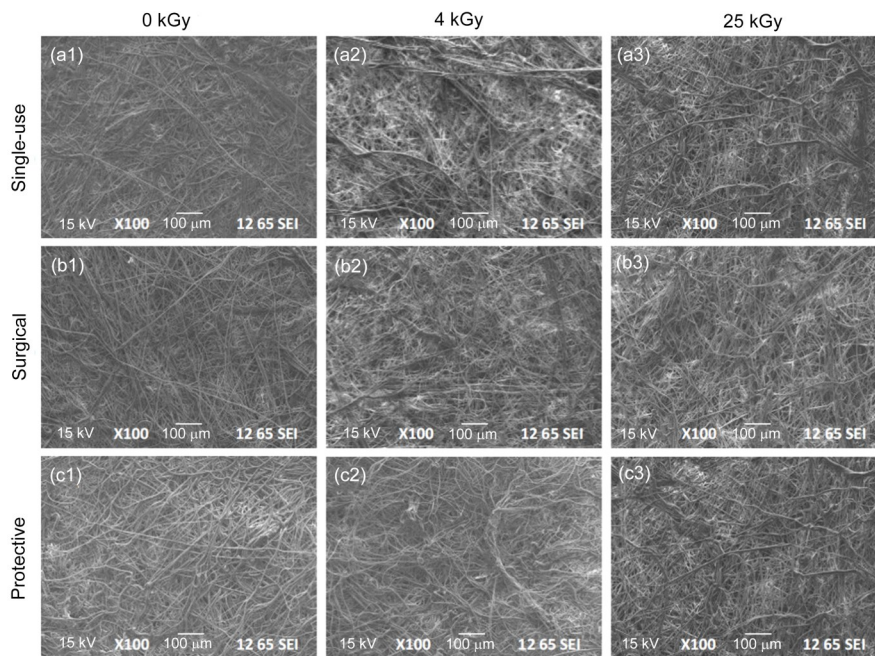


图2 0 kGy、4 kGy、25 kGy 吸收剂量下,一次性使用医用口罩(a1)~(a3)、医用外科口罩(b1)~(b3)、医用防护口罩(c1)~(c3)的熔喷过滤层的SEM形貌

Fig.2 SEM imagines of the meltblown filter layer of single-use medical masks (a1)~(a3), medical surgical masks (b1)~(b3), and medical protective masks (c1)~(c3) at absorbed doses of 0 kGy, 4 kGy, and 25 kGy

图2显示,在不同吸收剂量下,三种市售医用口罩的熔喷过滤层的外表面微观形貌均没有显著变化,说明吸收剂量在25 kGy 内,电子束对医用口罩的外表面材料的微观物理结构没有明显辐照损伤,辐照后没有产生裂纹,医用口罩的微观结

构没有发生直接断裂。

2.2 吸收剂量对医用口罩通气阻力的影响

除了防护指标外,佩戴的舒适性也是评价口罩指标的重要因素^[16]。口罩的透气性是影响佩戴

舒适度的主要因素之一，如若透气性不好，使用不当易引发一系列不良后果。对辐照后三种口罩的通气阻力进行测试，结果见图3。可以看出，医用防护口罩的通气阻力值最大，其次为医用外科口罩，一次性使用医用口罩的通气阻力最小。

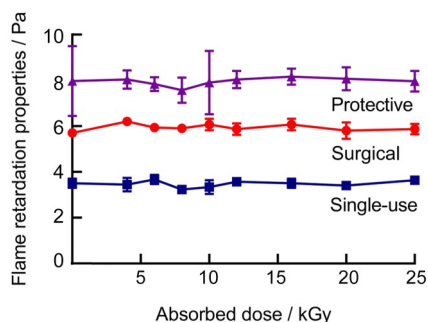


图3 不同吸收剂量(0~25 kGy)下一次性使用医用口罩、医用外科口罩和医用防护口罩的通气阻力

Fig.3 Ventilation resistance of single-use medical masks, medical surgical masks, and medical protective masks under different absorbed doses (0~25 kGy)

非织造布通常借助于物理、化学等方法将纤维、纱线缠结形成^[17]，一般呈现单纤维网络状构造。对于纺织面料，纱线之间的空隙与织物透气

性密切相关，辐照后三种市售医用口罩的通气阻力变化趋势显示，在辐照灭菌之后各组口罩的通气阻力未见显著变化，说明在辐照后，口罩中的单纤维层结构、功能完好，电子束对口罩的宏观结构和防护功能没有太大的破坏。

2.3 吸收剂量对医用口罩拉伸强度和断裂伸长率的影响

出于实际应用考量，口罩应满足一定强度抵抗撕裂应力，所用材料必须保证一定的拉伸强度和断裂伸长率。由图4可知，三种市售医用口罩在受到辐照后，其拉伸强度和断裂伸长率均受到一定影响。其中，一次性使用医用口罩的拉伸强度和断裂伸长率受辐照影响最小；医用外科口罩的内层、外层伴随吸收剂量升高，拉伸强度下降最为显著。表明在电子束辐照过程中，三种口罩的防潮无纺布层、熔喷过滤布层和长纤维无纺布层在分子结构上形成了不同程度的损伤，结合SEM的结果分析，应当是辐照导致了聚丙烯分子链发生断裂^[18]。

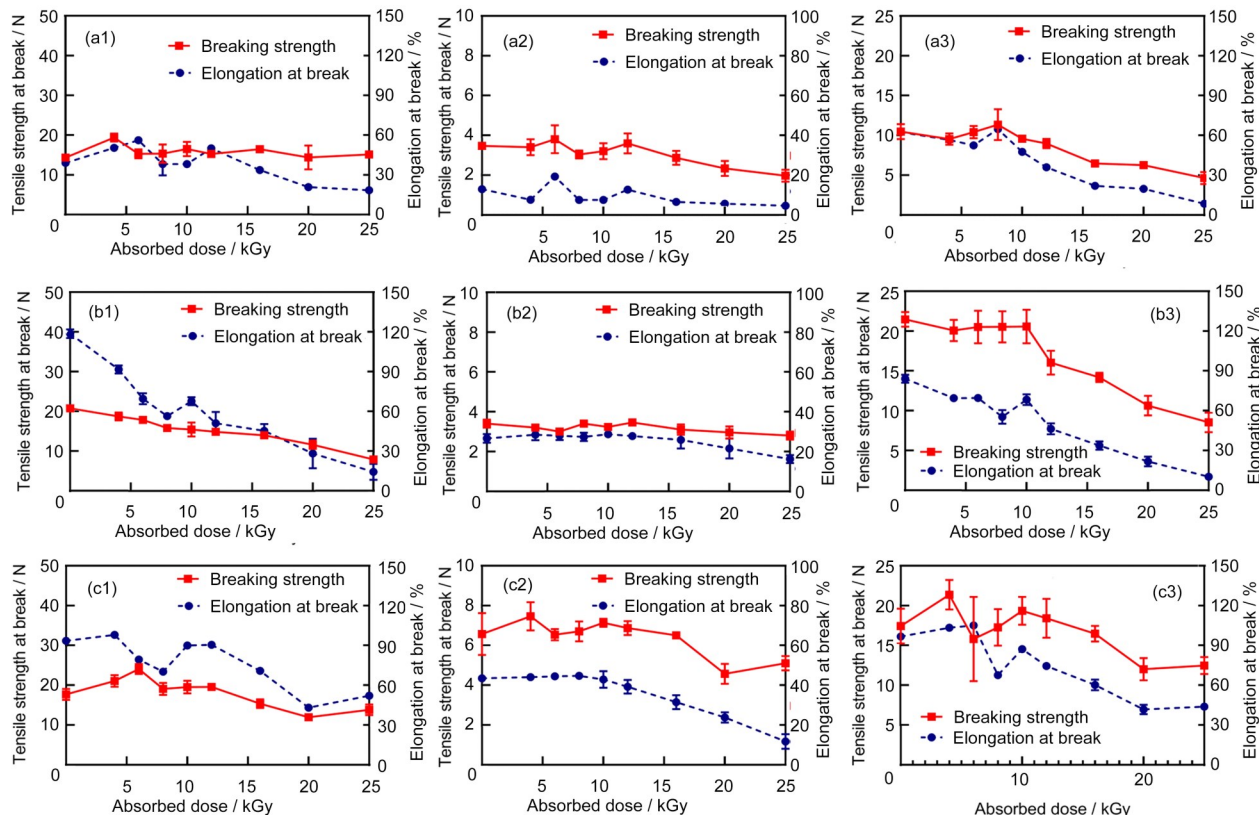


图4 不同吸收剂量(0~25 kGy)下一次性使用医用口罩(a1)~(a3)、医用外科口罩(b1)~(b3)、医用防护口罩(c1)~(c3)不同层的拉伸强度和断裂伸长率

Fig.4 Tensile strength at break and elongation at break of different layers of single-use medical masks (a1)~(a3), medical surgical masks (b1)~(b3), and medical protective masks (c1)~(c3) under different absorbed doses (0~25 kGy)

2.4 辐照及荷电再生对医用口罩颗粒过滤效率的影响

口罩能阻隔微生物、飞沫、花粉等颗粒物在人与环境间传播,具有一定的保护功能,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^[19]。口罩内的带正电荷颗粒通过布朗运动与熔喷纤维发生惯性碰撞后,与熔喷纤维界面上的负电荷产生静电力,进而产生吸附和拦截的作用^[20]。

辐照后三种口罩的颗粒过滤效率降至初始的25%~50%,且受吸收剂量的影响不大(图5),说

明口罩在电子束作用下过滤效率降低的最主要影响是电子与物质的相互作用,电子在辐照后的口罩材料中产生电离或者激发,释放出轨道电子,形成自由基等改变原来的分子结构,自由基或者其他激发态基团能构成新的分子形式,使得分子链断裂或者原子错位,进而导致静电作用力丧失^[21]。利用静电发生器对其进行荷电再生后,颗粒过滤效率大幅度回升至初始的60%~90%,且受吸收剂量的影响不大,但是和其初始颗粒过滤效率相比仍降低不少,不难看出熔喷布的结构和强度在较低的吸收剂量下应该也受到了破坏。

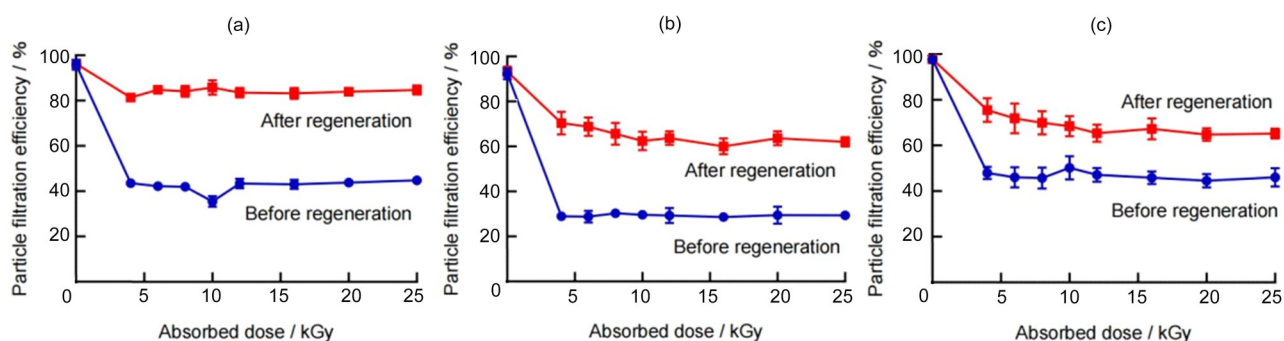


图5 不同吸收剂量(0~25 kGy)下及荷电再生对一次性使用医用口罩(a)、医用外科口罩(b)、医用防护口罩(c)颗粒过滤效率的影响

Fig.5 Effects of charged regeneration on the particulate filtering efficiency of single-use medical masks (a), medical surgical masks (b), and medical protective masks (c) under different absorbed doses (0~25 kGy)

2.5 微生物指标

本实验中,一次性使用医用口罩和医用外科口罩在辐照前后的微生物指标均符合放行标准,即细菌菌落总数小于20 cfu/g,未检出金黄色葡萄球菌、溶血性链球菌、大肠杆菌和绿脓杆菌等致病菌。医用防护口罩的初始细菌菌落总数为

36 cfu/g,在4 kGy的吸收剂量下辐照可对其进行灭菌。说明在规范的口罩生产环境下,可以达到卫生指标,但仍然存在一定的生物安全隐患。弓立医疗是厦门生产口罩的老厂和大厂,一些紧急上马的中小型口罩生产企业生产的口罩微生物指标可能会更差一些,因此对口罩进行灭菌是有必要的。

表1 不同吸收剂量下一次性使用医用口罩、医用外科口罩、医用防护口罩的微生物指标
Table 1 Microbiological criteria of single-use medical masks, medical surgical masks, and medical protective masks under different absorbed doses

	剂量 / kGy	细菌菌落总数 / ≤20 cfu/g	金黄色葡萄球菌	溶血性链球菌	大肠杆菌	绿脓杆菌
	Dose	TPC	菌 SA (-)	GBS (-)	<i>E. coli</i> (-)	<i>P. aeruginosa</i> (-)
一次性使用	0	<20	—	—	—	—
医用口罩	4	<20	—	—	—	—
Single-use	6	<20	—	—	—	—
medical	8	<20	—	—	—	—
masks	10	<20	—	—	—	—
	12	<20	—	—	—	—
	16	<20	—	—	—	—
	20	<20	—	—	—	—
	25	<20	—	—	—	—

续表

	剂量 / kGy	细菌菌落总数 / ≤ 20 cfu/g	金黄色葡萄球菌 SA(-)	溶血性链球菌 GBS(-)	大肠杆菌 <i>E. coli</i> (-)	绿脓杆菌 <i>P. aeruginosa</i> (-)
	Dose	TPC				
医用	0	<20	—	—	—	—
外科口罩	4	<20	—	—	—	—
Medical	6	<20	—	—	—	—
surgical	8	<20	—	—	—	—
masks	10	<20	—	—	—	—
	12	<20	—	—	—	—
	16	<20	—	—	—	—
	20	<20	—	—	—	—
	25	<20	—	—	—	—
医用	0	36	+	+	—	—
防护口罩	4	<20	—	—	—	—
Medical	6	<20	—	—	—	—
protective	8	<20	—	—	—	—
masks	10	<20	—	—	—	—
	12	<20	—	—	—	—
	16	<20	—	—	—	—
	20	<20	—	—	—	—
	25	<20	—	—	—	—

3 结论

本试验初步确立了弓立医疗在当前条件下生产的三种医用口罩辐射灭菌的不适用和适宜剂量范围。医用口罩的厚度、面密度、孔隙率、平均孔径、纤维直径等均会影响其过滤效率^[22]。

在现有以PP作为熔喷布主要原材料，以静电过滤效率为主要过滤原理的口罩生产工艺条件下，辐射灭菌作为主要灭菌手段并不适用。而在新冠疫情和未来不可知的病毒风险仍将威胁人类的时候，对口罩的需求将持续较长时间，而环氧乙烷灭菌的弊端尚无法消除，在此社会需求下，开展新型口罩生产工艺开发、探索绿色高效的灭菌技术及口罩生产材料的研发是很有必要的，研发耐辐照的熔喷布原料和不依赖于静电过滤效率的口罩生产工艺具有很好的前景。对于后续的研究有一定的启示意义。

作者贡献说明 许零提出了本文的研究思路和实验方案。苏智阳、周丽娟、洪紫坚、吴晶、石留音、李宏伟参与材料准备、实验方案的讨论及口罩辐照前后数据测定分析。黄敏为确定辐射条件提供了指导。许零、陈功、吴沥豪完成论文初稿的写作。许零是项目的构思者及负责人，指导整

个论文的撰写与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 1 韩一芳, 张锦海, 汪春晖, 等. 严重急性呼吸综合征冠状病毒2检测方法的研究进展[J]. 医学研究生学报, 2021, **34**(2): 205-210. DOI: 10.16571/j.cnki.1008-8199.2021.02.018.
HAN Yifang, ZHANG Jinhai, WANG Chunhui, *et al.* Research progress of detection methods for severe acute respiratory syndrome coronavirus 2[J]. Journal of Medical Postgraduates, 2021, **34**(2): 205-210. DOI: 10.16571/j.cnki.1008-8199.2021.02.018.
- 2 全琼瑛, 应伟伟, 祝成炎. 非织造医用口罩防护性能评价[J]. 上海纺织科技, 2015, **43**(4): 63-64. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2015.04.022.
QUAN Qiongying, YING Weiwei, ZHU Chengyan. Evaluation on the protective property of non-woven medical-use face masks[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2015, **43**(4): 63-64. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2015.04.022.
- 3 Kumar M, Mazur S, Ork B L, *et al.* Inactivation and safety testing of Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus[J]. Journal of Virological Methods, 2015,

- 223: 13-18. DOI: 10.1016/j.jviromet.2015.07.002.
- 4 Liao L, Xiao W, Zhao M, *et al.* Can N95 respirators be reused after disinfection? how many times? [J]. ACS Nano, 2020, **14**(5): 6348-6356. DOI: 10.1021/acsnano.0c03597.
- 5 Viscusi D J, Bergman M S, Eimer B C, *et al.* Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2009, **53**(8): 815-827. DOI: 10.1093/annhyg/mep070.
- 6 Gilding D K, Reed A M, Baskett S A. Ethylene oxide sterilization: effect of polymer structure and sterilization conditions on residue levels[J]. Biomaterials, 1980, **1**(3): 145-148. DOI: 10.1016/0142-9612(80)90037-X.
- 7 Rubio-Romero J C, Pardo-Ferreira M D C, Torrecilla-García J A, *et al.* Disposable masks: disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic [J]. Safety Science, 2020, **129**: 104830. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104830.
- 8 吕长鑫, 何晓慧, 冯叙桥. 超高压灭菌技术在保障食品品质及安全性的应用现状与展望[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, **4**(5): 1335-1341. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2013.05.007.
LYU Changxin, HE Xiaohui, FENG Xuqiao. Application and prospect of ultra-high pressure sterilization technology on food quality and safety[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, **4**(5): 1335-1341. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2013.05.007.
- 9 孙建宇. ^{60}Co - γ 射线辐照灭菌在中药及制剂中的应用研究[J]. 中国药师, 2006, **9**(5): 464-465. DOI: 10.3969/j.issn.1008-049X.2006.05.040.
SUN Jianyu. Application of ^{60}Co - γ ray irradiation sterilization in traditional Chinese medicine and preparations[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, **9**(5): 464-465. DOI: 10.3969/j.issn.1008-049X.2006.05.040.
- 10 Feldmann F, Shupert W L, Haddock E, *et al.* Gamma irradiation as an effective method for inactivation of emerging viral pathogens[J]. The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 2019, **100**(5): 1275-1277. DOI: 10.4269/ajtmh.18-0937.
- 11 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 医用防护口罩技术要求: GB 19083—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for protective face masks for medical use: GB 19083—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- 12 国家食品药品监督管理总局. 医用外科口罩: YY 0469—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
State Food and Drug Administration. Surgical mask: YY 0469—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- 13 国家食品药品监督管理总局. 一次性使用医用口罩: YY/T 0969—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
State Food and Drug Administration. Single-use medical face masks: YY/T 0969—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- 14 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 非织造布试验方法 第3部分: 断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法): GB/T 24218.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Textiles—Test methods for nonwovens—Part 3: Determination of tensile strength and elongation (strip method): GB/T 24218.3—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- 15 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 一次性使用卫生用品卫生标准: GB 15979—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Hygienic standard for disposable sanitary products: GB 15979—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- 16 蒋璐蔓, 余艳艳, 荣烽, 等. N95过滤式防尘口罩防护性能与受试者主观评价的相关分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2013, **31**(9): 649-653. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2013.09.002.
JIANG Luman, YU Yanyan, RONG Yi, *et al.* Protective performance and subjective evaluation of N95 filtering-facepiece respirators[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2013, **31**(9): 649-653. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2013.09.002.
- 17 Tarafder N, 刘丽妍, 王瑞. 针刺非织造布不同参数与拉伸性能及硬挺度之间的关系[J]. 产业用纺织品, 2003, **21**(9): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2003.09.013.
Tarafder N, LIU Liyan, WANG Rui. Correlation between

- different parameters and tensile and stiffness properties of needle punched nonwoven fabrics[J]. *Technical Textiles*, 2003, **21**(9): 34-38. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-7093.2003.09.013.
- 18 杨晨光, 赵全, 王谋华, 等. 伽马射线辐照对聚丙烯超临界二氧化碳发泡的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2018, **36**(1): 010301. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2018.rrj.36.010301.
YANG Chenguang, ZHAO Quan, WANG Mouhua, *et al.* Gamma-ray irradiation effects on scCO₂ foaming behavior of polypropylene[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2018, **36**(1): 010301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rrj.36.010301.
- 19 姚红. 防尘口罩过滤效率探析[J]. *中国个体防护装备*, 2002(2): 30-31. DOI: 10.16102/j.cnki. cppe.2002.02.014.
YAO Hong. Analysis on the filtration efficiency of dust masks[J]. *China Personal Protection Equipment*, 2002(2): 30-31. DOI: 10.16102/j.cnki. cppe.2002.02.014.
- 20 肖春平. 熔喷聚丙烯驻极体非织造材料晶相结构与电荷储存特性相关性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- XIAO Chunping. Study on the relativity of crystal structure and charge storage properties of melt-blown polypropylene non-woven fabric[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017.
- 21 史中梁. 10 MeV 工业辐照调制器的设计与控制实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
SHI Zhongliang. 10 MeV industrial radiation modulator design and control to achieve[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- 22 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. DOI: 10.16549/j. cnki. issn. 1001-2044.2015.07.001.
QUAN Qiongying, YING Weiwei, ZHU Chengyan. Study on relation between structure and filtration efficiency of nonwoven medical protective masks[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2015, **43**(7): 1-2. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2015.07.001.