

# 可循环利用的医用防护服研发现状及趋势

贾镛蔚<sup>1</sup>, 王鸿瑞<sup>2</sup>, 刘后洋<sup>2</sup>, 陈艳亭<sup>2</sup>, 张正国<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>上海第二工业大学智能制造与控制工程学院, 上海

<sup>2</sup>北方民族大学医学技术学院, 宁夏 银川

<sup>3</sup>北方民族大学化学与化学工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年4月11日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月30日

## 摘要

针对一次性医用防护服在大规模卫生应急或疫情防控过程中使用量大, 废弃后对医疗垃圾处理企业和环境容量带来威胁等问题, 为节约医用防护服原材料和减少医疗废弃物产生量, 本文对可循环使用的医用防护服研发现状和发展趋势进行了调查, 对医用防护服的材料、洗消要求、性能评价进行了综述。通过对国内外可循环使用的医用防护服发展趋势进行分析, 提出了一些建议如对可循环使用的医用防护服材料、防护性能、舒适性、废弃物处理等领域尽快建立国内统一标准, 提高国内相关生产、研发企业的积极性和创新能力等, 为强化我国应对卫生应急事件的应变能力提供了参考。

## 关键词

循环利用, 医用防护服, 环境, 医疗废弃物, 趋势

# Research Status and Trend of Recyclable Medical Protective Clothing

Rongwei Jia<sup>1</sup>, Hongrui Wang<sup>2</sup>, Houyang Liu<sup>2</sup>, Yanting Chen<sup>2</sup>, Zhengguo Zhang<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai

<sup>2</sup>School of Medical Technology, North Minzu University, Yinchuan Ningxia

<sup>3</sup>School of Chemistry and Engineering, North Minzu University, Yinchuan Ningxia

Received: Apr. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2023; published: May 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In view of the large use of disposable medical protective clothing in large-scale health emergency

\*通讯作者。

文章引用: 贾镛蔚, 王鸿瑞, 刘后洋, 陈艳亭, 张正国. 可循环利用的医用防护服研发现状及趋势[J]. 材料科学, 2023, 13(5): 472-480. DOI: 10.12677/ms.2023.135050

or epidemic prevention and control process, and the threat to medical waste treatment enterprises and environmental capacity after waste, this paper investigates the research and development status and trend of recyclable medical protective clothing in order to save the raw materials of medical protective clothing and reduce the production of medical waste. Materials, decontamination requirements and performance evaluation of medical protective clothing are reviewed. Based on the analysis of the development trend of recyclable medical protective clothing at home and abroad, some suggestions are put forward, such as establishing unified domestic standards for recyclable medical protective clothing materials, protective performance, comfort, waste disposal and other fields as soon as possible, improving the enthusiasm and innovation ability of relevant domestic production and research and development enterprises. It provides reference for strengthening our ability to respond to health emergency.

## Keywords

Recycling, Medical Protective Clothing, The Environment, Medical Waste, Trend

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2020 年至 2022 年的新型冠状病毒肺炎疫情在世界范围内快速蔓延, 该疫情持续时间长、影响范围广, 对全世界人民生命健康和经济都带来了深刻影响。在应对传染性极强的卫生应急事件中, 医用防护服对于防止病毒、细菌感染有着重要作用。目前大多数医用防护服是一次性使用, 而防护服是由聚丙烯和聚酯等塑料合成纤维制成, 大量一次性医用防护服的使用对防护服供应和医疗垃圾处理过程带来重大挑战。此外, 一次性医用防护服透气透湿性能差、舒适性低, 长时间穿着给医务工作者也带来了较多不便, 而且作为医疗垃圾丢弃后不但污染环境, 还需浪费大量人力物力处理[1] [2] [3]。可循环使用医用防护服的出现, 为解决以上问题提供了新的思路, 不但可以提高穿着的舒适度, 同时循环利用也可大大节约成本, 减少浪费, 保护环境, 是未来医用防护服发展的趋势所在。本文重点对可循环使用医用防护服的材料研发进展、标准和性能要求、洗消要求、性能评价进行了调查。

## 2. 可循环使用医用防护服的研究现状

本可循环使用医用防护服又称可重复型或复用型医用防护服, 该类型防护服对面料、生产工艺、洗消次数、物理性能等方面要求更严格, 通常价格高于一次性医用防护服, 但是重复利用时性价比较高。在应对突发性重大公共卫生事件时, 可循环使用医用防护服通过简单洗消就可以投入使用, 对一次性防护服库存量少、订货周期长或交通不便的地区是较好的备选方案。

国内医用一次性防护服主要是由普通聚丙烯(PP)无纺布、SMS (Spunbond + Meltblown + Spunbond Nonwovens)无纺布、覆膜无纺布、透气无纺布或复合材料制成的一次性防护服, 主要品牌如图 1 所示。近 3 年, 新冠疫情的爆发让很多国家都陷入了医用防护服产量不足的困境, 医用一次性防护服使用 4 小时就要更换, 而且一旦被污染必须立刻更换, 不得循环利用。这也造成大量的医疗垃圾, 给医用一次性防护服的供给和环境问题带来较多麻烦。可循环使用的医用防护服给解决这个问题带来了曙光, 只不过由于缺乏相关成熟的技术, 而且监管要求非常严格, 可循环使用医用防护服研究进展较缓慢。



**Figure 1.** Some brands of medical disposable protective clothing  
**图 1.** 部分品牌的医用一次性防护服

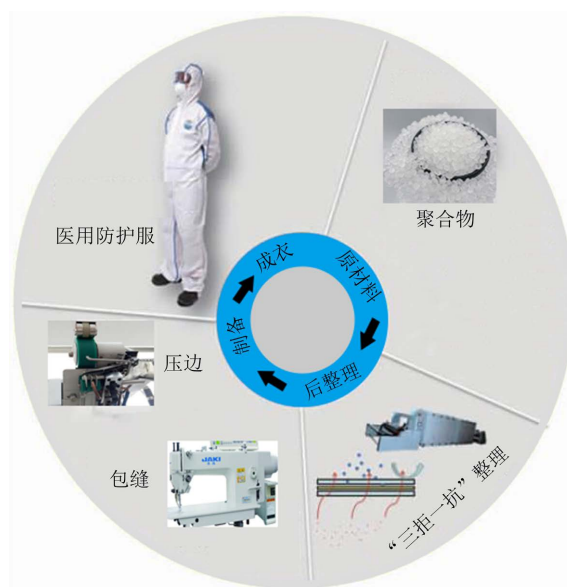
袁建强等[4]选择涤纶材料中的全涤塔夫绸面料并掺杂导电丝，反面采用贴合 PTFE 膜，最后在反面叠加一层聚丙烯梭织布，既保证了防护服的舒适性，又实现了防护抗菌、耐水洗功能，经过了过滤效率、透湿量、断裂强力、断裂伸长率、抗合成血液穿透性、抗渗水性、表面抗湿性、抗静电性等测试，性能良好。陈毓姝等[5]对可循环防护服材料 PTFE 复合膜织物进行了洗消测试，对“涤纶斜纹基布 + 微孔 PTFE 薄膜 + 经编网眼布”三层复合结构进行测试后发现，采用质量浓度 100 mg/L 的过氧乙酸进行洗消处理，洗消达到 20 次时防护面料依然可保持良好的抗渗水性、断裂强力、过滤效率。赖军等[6]以防静电高密涤纶长丝面料为外层、PU 高透膜为阻隔层、涤纶长丝经编面料为内层，采用湿气固化反应型聚氨酯(PUR)热熔胶双面点式复合方式制备了可循环使用的医用防护服面料，经过 10 次洗涤(60℃水温)后，其抗静水压可达 9.8 KPa，阻隔性能、抗合成血液穿透性能、防水性能以及防静电性能均达到 GB 19082-2009《医用一次性防护服技术要求》，但未能考虑消毒、灭菌流程对面料防护性能和舒适性能的影响，且透气性能仅为 0.4 mm/s。

可循环使用医用防护服为了及时导走静电，面料最外层要纺织编入导电纤维，但是在洗消过程中，易造成导电纤维断裂并破坏阻隔膜，对细菌、病毒等的阻隔性能直线下降。姚登辉等[7]结合炭黑导电丝和亲水涤纶长丝原料织成了经编面料，与聚四氟乙烯微孔膜复合加工成为可循环使用医用防护服面料，经过一系列实验，在长达 80 次水洗涤后，该类型面料的物理防护性能仍满足国标参数。

可循环使用的医用防护服具有耐洗性强，物理机械强度高，抗损伤性强等突出性能，结构为三层复合材料，不再采用传统医用一次性防护服使用的单层无纺布涂层材料，虽然成本较高但其断裂强度和防渗性要求是医用一次性防护服标准的 10 倍以上，织物材料具有更高的人体舒适度。在生产工艺领域，新型可循环使用医用防护服在传统工艺基础上(如图 2)，前襟翼上采用魔术贴密封工艺，而不是传统一次性医用防护服的一次性不干胶粘贴技术，该工艺可以保证循环利用清洗后仍能达到密封效果。且经过清洗、高温消毒等措施即可循环使用，使用寿命通常为 10~20 次。可循环使用医用防护服结构如图 3 所示。

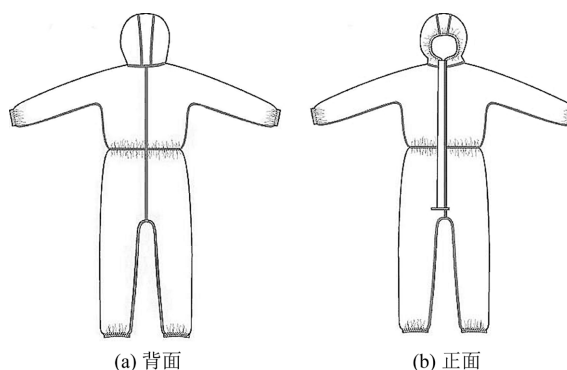
Snigdha 等[8]研究发现，可循环使用的防护服对环境的影响远小于一次性防护服，例如，使用可循环使用的防护服可以减少自然资源能源消耗(≈64%)、温室气体排放(≈66%)和固体废物产生(≈84%)。同时对六种可循环使用和一次性外科纺织品的生命周期进行了比较研究。结果表明，与一次性手术服和手术布相比，可循环使用的手术服和手术布消耗更多的自然资源能源(≈200%~300%)和水(≈250%~330%)，但碳足迹(≈200%~300%)更低，产生的挥发性有机物和固体废物(≈750%)更少。此外，一件可循环使用的防护服需要≈36.1 克的包装，而一次性防护服需要 ≈57.8 克的包装，这最终转化为可循环使用手术服的总能耗和温室气体排放为 8%，而同样的一次性手术服则为 13%。Yang 等[9]提出了一种新型的医学防护服材料，使用湿法纺丝制备了其具有增强水分吸收功能的聚(丙烯酸-共丙烯酰胺)/聚乙烯醇超吸收纤维

(PAAAM/PVA 纤维)材料。并由 PAAAM/PVA 纤维, 竹浆纤维(BPF)和乙烯-丙烯并排纤维(ESF)堆叠而成的超吸收性复合层。通过将超吸收层粘到强抗静电聚丙烯非织造织物的内表面上, 获得了新型的一次性医用防护复合织物。所得的复合织物具有优异的对汗液的吸收和保持能力, 最高为 12.3 g/g 和 63.8%, 最大吸湿率为 1.04 g/h, 高于常规材料的吸湿率(仅 0.53 g/h)。新型材料的透湿性达到 12638.5 g/(m<sup>2</sup>·d)为常规材料的 307.6%。该新型材料可有效降低防护服内部的湿度, 并显著提高医护人员的舒适度。Zhang 等[10]通过浸涂技术和简单有效的热带粘合工艺制备了一种具有可调孔隙率的聚酯/聚酰胺(PET/PA6)双组分微丝织物, 用于舒适的医用防护服。C6 基氟碳聚合物赋予样品优异的疏水性(酒精接触角, 130°~128°); 同时, 通过调整热带粘合过程的温度和压力, 使样品的孔隙率适应在 64.19%~88.64%的范围内。此外, 由于孔隙率和表面疏水性可调, 样品还表现出优异的柔软度得分(24.3~34.5)、良好的透气性(46.3~27.8 mm/s)和高静水压力(1176~4130 Pa)。



**Figure 2.** Processing technology of traditional medical protective clothing

**图 2.** 传统医用防护服加工工艺



**Figure 3.** The one-piece type recyclable medical protective clothing structure

**图 3.** 连体式可循环使用医用防护服结构

由表 1 可知, 可循环性使用医用防护服与医用一次性防护服相比有着不可替代的优势[11] [12]。

**Table 1.** Comparison of two types of protective clothing**表 1.** 两种防护服的比较

性能比较	一次性使用医用防护服	可循环性使用医用防护服
微生物指标	单个无菌包装	可无菌供应
是否洗消	否	需洗消
使用次数	单次	多次
使用成本	成本高	成本低
资源节约	浪费资源，不环保	节约资源又环保
性能指标	透气性差，穿着舒适度差	透气性好，着身舒适
潜在风险	不当的处理会污染环境， 并对可能伤害使用者的化学残留物进行消毒	使用过期产品时 可能对使用者造成伤害

### 3. 论相关标准和性能要求

#### 3.1. 国内外相关标准

除 2020 年，国家药品监督管理局为应对新冠疫情中暴露的医用防护服短缺问题，及时联合山东省医疗器械产品质量检验中心、北京医疗器械检验所等多家单位制订了医药行业的推荐性标准——YY/T 1799-2020《可重复使用医用防护服技术要求》。在该标准中，规定了可循环使用医用防护服的材料(材质)、性能参数、机械性能分级办法、污染液体气溶胶穿透试验办法等信息。北京科思佳科技有限责任公司、北京邦维高科特种纺织品有限公司等已成功生产可循环使用医用防护服，在经过彻底消毒杀菌后，防护服可循环使用 10 次。

美国也把医用防护服分为一次性和可循环使用防护服，施行标准为 2018 年美国消防协会制订的 NFPA 1999-2018 “Standard on Protective Clothing and Ensembles for Emergency Medical Operations”。该标准要求检测防护服之前对其进行 25 次洗消、干燥等处理，规定了在紧急医疗操作中使用防护服和防护组合的设计要求、性能要求和实验方法。在美国医疗器械促进协会发布的 ANSI/AAMI PB70: 2012 “用于卫生保健设施的防护服装和窗帘的液体阻隔性能和分类”中有关于在医疗环境中使用的防护服和防护布的液体阻挡层性能和分类的规定，该规定适用于一次性和可循环性使用医疗防护服。欧盟现在施行的 BS EN14126: 2003 “防护服抗感染剂的性能要求和试验方法”也规定了抗传染防护服的性能要求和实验方法。目前国际上较通用的医用防护服标准是美国国家职业安全卫生研究所(NIOSH)标准和欧盟的 EN 标准。表 2 为中美欧医用防护服标准中的防护性能进行简单比对[13] [14]。

#### 3.2. 性能要求

可循环使用医用防护服的基本特点为可以被重复处理和循环利用，所以在洗消处理前后均应对其进行性能评价。根据我国现行的 YY/T 1799-2020《可重复使用医用防护服技术要求》，可循环使用医用防护服的性能要求应包含抗渗水性、抗合成血液穿透性、表面抗湿性、断裂强力、断裂伸长率、过滤效率等方面[15] [16]，详情见表 3。

可循环性：按照厂家提供的有效使用次数进行清洗消毒循环利用后，防护服结构应无明显变化，弹力带、拉链等部位功能正常；面料不存在明显分层，且无起泡、破损现象；粘接或热粘接等零件处理加工后，光滑、密封、不存在气泡、表面无脱落等。性能仍然满足上述要求。同时，环氧乙烷灭菌防护服中的环氧乙烷残留量不应超过 10 μg/g。

**Table 2.** Comparison of medical protective clothing standards in China, the United States and Europe  
**表 2.** 中美欧医用防护服标准对比

国家	中国	美国	欧盟
标准名称	GB 19082-2009 医用一次性防护服技术要求	NFPA 1999-2018 急救医疗手术用防护服	ANSI/AAMI PB70:2012 医疗保健设施中使用的防护服和防护布的液体阻挡层性能和分类 EN 14126:2003 防护服防病毒防护服的性能要求和试验方法
液体阻隔性	防水性 静水压 (GB/T 4744) ≥17 cm H <sub>2</sub> O 表面抗湿 (GB/T 4745) ≥3 级	冲击穿透静水压 (AATCC42) 表面抗湿(AATCC 22) 整体喷淋 ASTM F 1359a (不透水)	冲击穿透静水压 (AATCC42) 耐静水压 AATCC127 静水压(ISO FDIS 16603, ISO FDIS 16604) 渗透时间(附录 A) 气溶胶渗透 (ISO/DIS22611)
	抗合成血液穿透性 GB 19082-2009 附录 A ≥1.75 kPa (2 级)	ASTM F 1359 (不透过)	手术衣/洞巾等系列 (4 级) ASTM F1671 (不透过) ASTM F1670 (不透过) ISO 16603
微生物穿透性	无	试样及接缝处需通过 ASTM F 1671 hi-X 174 抗菌液体试验噬菌体不透过	ASTM F 1671 hi-X 174 噬菌体不透过 附录 A
过滤效率	GB 19082-2009 5.7 条款 ≥70%	无	无 固体颗粒渗透 (ISO/DIS 22612)

**Table 3.** Performance and key parameters of protective clothing  
**表 3.** 防护服性能和关键参数

性能	关键参数
抗渗水性	防护服关键部位静水压应不小于 3.5 kPa。
透湿量	防护服材料透湿量应不低于 3000 g/(m <sup>2</sup> ·d)
抗合成血液穿透性	防护服抗合成血液穿透性应不小于 3.5 kPa
表面抗湿性	防护服外侧面沾水等级应不小于 3 级要求
断裂强力	防护服关键部位材料的横向和纵向断裂强力应不低于 250 N
断裂伸长率	防护服关键部位材料的横向和纵向断裂伸长率应不低于 15%
接缝强力	防护服接缝处材料的断裂强力不低于 125 N
过滤效率	防护服关键部位材料及接缝处对非油性颗粒的过滤效率应不低于 80%
抗静电性	防护服的带电量应不高于 0.6 μC/件
微生物指标	出厂前经过 Co 60 辐射消毒后, 防护服须符合 GB 15979-2002 中的微生物指标要求(见表 4)

**Table 4.** Microbial indicators of protective clothing**表 4.** 防护服微生物指标

细菌菌落总数 CFU/g	大肠菌群	绿脓杆菌	溶血性链球菌	真菌菌落总数 CFU/g
≤200	不得检出	不得检出	不得检出	≤100

#### 4. 医用防护服的材料

基于各种纺粘-熔纺材料,无纺布 PE 和 PP 织物是一次性 PE 的主要原料。这些材料很难替代,特别是在卫生和健康方面需要大量的物资。然而,它可以与一些天然的、再生的或可生物降解的纤维结合使用,这些纤维可以被生物降解和/或可以提供可循环使用的特性。此外,目前在生产医用防护产品中使用的某些化学品/添加剂的替代为采用综合方法消除每一种持久和破坏性材料提供了机会。此外,使用石墨烯等新材料制造 PPE 可能有助于实现具有增强力学性能的可持续产品[17]。

COVID-19 大流行导致个人防护装备消费量增加,随后对这些产品的焚烧将反过来导致碳排放增加,这也是一个问题。因此,纺织业现在有机会设计新型的环境可持续保护服装,这种服装可洗可循环使用,这可能会减少造成环境污染的医疗废物的数量。我们迫切需要研究对废物进行消毒和分离/减少传染性废物与一般废物混合的新技术。此外,使用可生物降解聚合物(如聚乳酸)和回收聚合物制造防护服和回收当前一次性塑料制成的防护服产品将有助于减少对环境的影响,并支持向更可持续的防护服和循环经济的转变。防水和透湿的功能是可循环使用医用防护服材料应具备的必要条件,对保护医疗人员安全有重要意义。按照织物加工工艺的不同可分为涂层织物、高密织物和层压织物,在医用防护服的制备上都有应用。医用防护服材料主要采用具有高阻液、高透湿、高阻菌等功能的层压织物或涂层织物制作。除了材料本身的选择,还可以对材料进行优化、改性,也可以达到加工目的。

由于医院工作人员的个人防护设备(PPE)很容易因与受感染患者的直接接触而受到污染,因此诊所中由污染物介导的传播风险大大增加。在这种情况下,设计一种减少此类传播的方法至关重要。Keum 等[18]报道了一种抗菌、抗病毒和抗生物污染的三重功能聚合物,该聚合物可以很容易地涂覆在医用防护服的表面,以有效防止 PPE 上的病原体污染。通过简单喷涂三官能聚合物聚(甲基丙烯酸十二烷基酯(DMA)-聚(乙二醇)甲基丙烯酸酯(PEGMA)-季铵)的水溶液,在 PPE 表面形成涂层。为了确定防污和抗菌官能团的最佳比例,我们使用四种不同比例的聚合物进行了防污、抗菌和抗病毒测试。使用以下方法评估防污和杀菌结果金黄色葡萄球菌,一种典型的致病菌,可引起上呼吸道感染。无论摩尔比如何,聚合物涂层的 PPE 表面在与病原体接触后不久就显示出相当大的抗粘附(≈65%~75%)和抗菌(≈75%~87%)功效,并保持其能力至少 24 小时,这是对于一次性个人防护用品来说已经足够了。使用冠状病毒进行的进一步抗病毒测试显示,以两种特定比例(3.5:6:0.5 和 3.5:5.5:1)的聚(DMA-PEGMA-QA)涂覆的 PPE 获得了良好的结果。此外,使用两种最有效的聚合物比率进行的生物相容性评估显示,在鼠中没有可识别的局部或全身炎症反应,表明这种聚合物有可能立即用于该领域。

##### 4.1. 高密织物

论目前国内开发了多种新型的复合材料,可用于可循环使用手术衣、手术单、防护服的制作。在 1940 年起源于英国的文泰尔织物基础上,使用复合材料技术可以很好地改进织物的防水性和抗撕裂性能。这种复合材料是由两层聚酯长丝纤维、导电长丝纤维编织而成,中间有三防一透一阳的抗菌膜复合材料,是一种特殊的复合制造工艺将三种材料制成一种防水、防渗透、防污染、透湿、防细菌的复合材料。复合制造工艺如图 4 所示。由超细涤纶长丝或尼龙纤维制成的高密度织物,具有显著的优点,可具有普通织物的 20 倍的密度,再经过拒水整理技术,如化学、轧光等,可以使它的孔径最小化,变得更致密,对

液滴、微生物、粉尘具有更佳的阻隔效果。在对以往高密织物资料的功能与其他材料的对比中发现, 具有较高的透湿性、透气性、悬垂性和柔软性的高密织物, 因其高生产成本, 易撕裂、不耐磨和耐水压性低的缺陷, 被限制了使用范围。

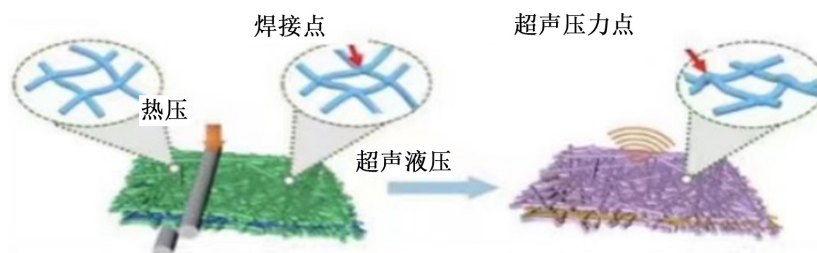


Figure 4. Schematic diagram of the composite manufacturing process

图 4. 复合制造工艺示意图

## 4.2. 涂层织物

主该类织物是在普通织物的表面涂覆一层或若干层疏水的高分子材料, 该高分子材料不透水, 所以除了可保持纤维织物本身所具有的柔软性特点, 还可使织物具有特定的防水功能。应用不同性能高分子聚合物材料, 能够得到不同功能、用途的织物, 如消防用防水、隔热织物, 夜晚发出荧光的荧光织物或标志, 水上救援用的救生衣等。

## 4.3. 层压织物

通过胶粘剂、热熔等方法, 把防水透气的薄膜与一层或多层面料压到一起合并为一种可加工织物, 虽然这种织物加工工艺较复杂, 但它集合了各层的优点, 是一种用途很广的复合材料。防水透湿层压面料主要由聚四氟乙烯(PTFE)薄膜、聚酯(PET)薄膜和普通织物组成, 所用高分子、聚合物薄膜包括亲水膜和微孔膜。郝新敏等[19]研制了一种多功能防护服, 其隔离层为 PTFE 复合膜, 具有防水、抗菌、拒水、阻燃、抗静电、透湿、对血液和病毒有良好的阻隔性能。蔡玲玲等[20]通过静电纺丝将弹性体聚氨酯和低表面能氟化聚氨酯引入聚醚砜纤维中来制造可高压灭菌的三元电纺纳米纤维膜, 对防护服选用材料的透湿性能有较大的改善。

## 5. 结语

本文从可循环使用医用防护服的材料研究进展, 可循环使用医用防护服的国内外标准、性能要求及材料等方面进行了调查。介绍了可循环使用医用防护服的发展现状。在医用防护服的研发过程中, 从最初的单层材料到现在出现的具有多层功能材料复合而成的多功能材料体系, 从最初单一功能的织物到现今可进行水洗和多次水洗功能复合, 同时还有许多新技术的应用, 这些都为防护服行业提供了更多可能性。我国处于疫情防控常态化的时期, 医用防护服在疫情阶段的使用逐渐减少, 但此类防护服的研究并不针对疫情发展时期, 其研究对今后医疗卫生产业、环保产业健康发展有重要意义。因此, 研制更多高性能、高防护、高安全、可循环使用的防护面料纺织品, 不仅能填补市场空缺, 而且能促进医疗卫生事业的发张, 具有重要的社会价值。

## 基金项目

北方民族大学青年人才科研启动项目(2019KYQD44), 北方民族大学大学生创新团队项目(2023 年揭榜挂帅项目); 宁夏青年科技托举人才项目(2019TJGC015)。



## 参考文献

- [1] 高沈嘉俊, 许晓芸, 刘颖, 等. 医用防护服的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(7): 79-84.
- [2] 叶晓睿, 马勇, 赵建, 等. 一次性医用防护非织造材料研究进展及展望[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(11): 9-13.
- [3] 韩玲, 马英博, 胡梦缘, 等. 改善医用一次性防护服热湿舒适性的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(4): 75-78.
- [4] 袁建强, 任炳, 刘艳梅, 卢春丹, 陆利新. 可循环使用医用防护服面料的研究与开发[J]. 染整技术, 2021, 43(4): 50-51+60.
- [5] 陈毓姝, 唐虹, 张成蛟, 高强, 崔振华. 可循环使用医用防护服面料的洗消性研究[J/OL]. 棉纺织技术: 1-5. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1132.TS.20230329.0859.002.html>, 2023-04-25.
- [6] 赖军, 王刚, 唐世君, 等. 夏季新冠防护服用高透湿高阻隔材料关键技术及产业化[Z]. 威海: 威海迪尚医疗科技有限公司, 2020-05-23.
- [7] 姚登辉, 许增慧, 吕水君, 等. 复用医用手术服面料的工艺研究[J]. 纺织科学研究, 2019(6): 92-95.
- [8] Snigdha, Hiloidhari, M. and Bandyopadhyay, S. (2023) Environmental Footprints of Disposable and Reusable Personal Protective Equipment—A Product Life Cycle Approach for Body Coveralls. *Journal of Cleaner Production*, **394**, Article ID: 136166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136166>
- [9] Yang, L., Liu, H., Ding, S., et al. (2020) Superabsorbent Fibers for Comfortable Disposable Medical Protective Clothing. *Advanced Fiber Materials*, **2**, 140-149. <https://doi.org/10.1007/s42765-020-00044-w>
- [10] Zhang, H., Cao, Y., Zhen, Q., et al. (2022) Facile Preparation of PET/PA6 Bicomponent Microfilament Fabrics with Tunable Porosity for Comfortable Medical Protective Clothing. *ACS Applied Bio Materials*, **5**, 3509-3518. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00447>
- [11] 闫钧, 高文静, 张丹丹, 等. 可循环使用医用防护服的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(6): 160-163.
- [12] 兰岚, 王晓晨, 王作松, 等. 新型高舒适医用防护服穿着舒适性及防护性能研究[J]. 预防医学论坛, 2022, 28(1): 28-31.
- [13] Afroj, S., Britnell, L., Hasan, T., et al. (2021) Graphene-Based Technologies for Tackling COVID and Future Pandemics. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2107407. <https://doi.org/10.1002/adfm.202107407>
- [14] Ponomarenko, L.A., Belle, B.D., Jalil, R., et al. (2013) Field-Effect Control of Tunneling Barrier Height by Exploiting Graphene's Low Density of States. *Journal of Applied Physics*, **113**, Article ID: 136502. <https://doi.org/10.1063/1.4795542>
- [15] Forkan, S., Nazmul, K., Shaila, A., et al. (2018) High Performance Graphene-Based Natural Fibre Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 34502-34512. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13018>
- [16] 郝新敏, 张建春. PTFE/聚酯复合膜 SARS 防护与透湿机理的研究[C]//第三届功能性纺织品及纳米技术应用研讨会论文集. 北京: 中国纺织科学研究院, 2003: 290-297.
- [17] Cai, L.L., Xu, L., Si, Y., et al. (2022) Autoclavable, Breathable, and Waterproof Membranes Tailored by Ternary Nanofibers for Reusable Medical Protective Applications. *ACS Applied Polymer Materials*, **4**, 556-564. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c01460>
- [18] Keum, H., Kim, D., Whang, C.-H., et al. (2022) Impeding the Medical Protective Clothing Contamination by a Spray Coating of Trifunctional Polymers. *ACS Omega*, **7**, 10526-10538. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04919>
- [19] 郝新敏, 张建春, 郭玉海, 等. 拉伸工艺对膨体 PTFE 薄膜微孔结构的影响[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(4): 26-29.
- [20] 蔡玲玲. 基于三元纳米纤维的可耐高温高压式医用防护材料的研制[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2022.