

医用防护纺织品的热湿舒适性能研究进展

曹栋露 付少海 周 文

江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122

摘 要:综述了医用防护纺织品热湿舒适性能的研究进展,从材料改性与结构设计两个核心维度梳理了提升该性能的技术路径。在材料层面,重点介绍了超吸湿复合材料、相变材料及辐射降温材料等通过本征特性调节热湿交换的研究进展;在结构层面,阐述了静电纺丝纳米纤维膜、多层梯度结构及非对称润湿性界面等通过物理构型优化传质传热过程的设计策略。探讨了上述技术在医用防护服、医用防护口罩及医用敷料等典型纺织品中的应用现状与效果。分析了当前研究面临的关键问题,并对未来医用防护纺织品智能化的发展方向提出了展望,以期为高性能医用防护纺织品的研发与应用提供参考。

关键词: 医用防护纺织品;热湿舒适性能;医用防护服;医用防护口罩;医用敷料

中图分类号:TS171

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)08-0015-11

Research progress on thermal and moisture comfort performance of medical protective textiles

Cao Donglu, Fu Shaohai, Zhou Wen

College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract: The research progress on thermal and moisture comfort performance in medical protective textiles was reviewed, and the technical pathways for improving this performance were summarized from two core dimensions: material modification and structural design. At the material level, research advances in regulating thermal and moisture exchange through the intrinsic properties of super-absorbent composites, phase change materials, and radiative cooling materials were highlighted; at the structural level, the design strategies of electrospun nanofiber membranes, multi-layer gradient structures, and asymmetric wettable interfaces by optimizing mass and heat transfer processes through physical configuration were elaborated. The current application status and effectiveness of the aforementioned technologies in typical textile products such as medical protective clothing, medical protective masks, and medical dressings were further explored. The key challenges in current research were analyzed, and future directions for the intelligent development of medical protective textiles were proposed, with the aim of providing a reference for the research and

基金项目:江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20241630)

收稿日期:2026-02-27 修回日期:2026-03-26

作者简介:曹栋露,男,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为医卫防护纺织品的设计开发及应用,1173121636@qq.com

通信作者:周文,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为功能性防护纺织材料的设计、制备及其应用,wenzhou@jiangnan.edu.cn

application of high-performance medical protective textiles.

Keywords: medical protective textile; thermal and moisture comfort performance; medical protective clothing; medical protective mask; medical dressing

在突发公共卫生事件促进人们安全防护意识提升与临床诊疗技术飞速发展的双重背景下,医用防护纺织品已成为保障医护人员健康安全与公共卫生体系稳定运行的战略物资^[1]。医用防护纺织品通常指在医疗、卫生防疫及相关救护场景中,用于阻隔病原体、体液、颗粒物等有害物质,保护穿戴者免受物理、化学或生物性侵害的一类功能性纺织品。医用防护纺织品可划分为两大类^[2]:一类是直接接触皮肤伤口的纺织品,主要包括伤口敷料、纱布、绷带等;另一类是具有防水、透气、柔软、舒适、隔菌、过滤等性能的防护与过滤纺织品,主要包括手术帽、手术罩、手术巾、手术衣、病床床单、枕头、病服、防护服、遮蔽帷帘、揩拭布以及医用过滤布等。此类纺织品的设计初衷聚焦高效的屏障防护性能^[3],旨在最大限度地降低人体暴露于各类侵害物的风险。

然而,随着穿戴时间的延长和应用场景的复杂化,医用防护纺织品的防护性能与穿戴舒适性之间的矛盾日益凸显^[4]。尤其在应对高强度、长时间的医疗作业时,由防护纺织品导致的服装微气候热湿蓄积问题已成为制约作业效能与人体健康的关键瓶颈^[5]。人体产生的代谢热与汗液若无法有效透过防护材料层散发,会导致体表温度升高、湿度饱和,进而形成高温高湿的微环境^[6]。这不仅容易引发显著的生理负荷,如心率加快、体温调节功能紊乱、脱水甚至热应激,还会诱发心理上的不适感与焦虑情绪,进而降低医护人员的操作敏捷度与判断准确性,成为潜在的医疗安全隐患。这一问题在医用防护服、医用防护口罩及医用敷料这3种典型产品中尤为突出:防护服因穿着时覆盖全身,易导致体表热量与汗液大面积积聚^[7];防护口罩因口鼻区域呼吸湿热气体的循环滞留,加剧了面部微环境的温升与湿度饱和^[8];医用敷料因创面渗出液与皮肤代谢产物的共同作用,在覆盖区域形成高湿闷热的局部微环境,不利于患者伤口的愈合^[9]。3种产品虽应用场景不同,但其热湿舒适性问题核心,均指向材料层面热湿传递本征能力不足与结构层面构型设计欠佳所导致的服装微气候失衡。

近年来,围绕医用防护纺织品热湿舒适性的研究已取得显著进展。研究热点主要集中于新型纺织材料的开发,如借助相变材料^[10]捕获并储存人体代谢余热,抑制防护服内部温度骤升现象,搭配防护服的吸湿结构能够削弱湿度波动,延长人体热湿舒适窗口期,缓解穿戴过程中的闷热不适感。同时,在结构设计上,引入微纳网络及异质仿生等创新结构,并结合超吸湿复合材料^[11],以便在不削弱防护性能的前提下显著提升医用防护纺织品的热湿舒适性,实现对皮肤微环境温湿度的协同与自适应调控。上述技术路径已分别在医用防护服、医用防护口罩及医用敷料中得到了不同程度的探索与应用,具备在保障穿戴者人身安全的前提下显著改善穿戴者热湿舒适体验的潜力。此外,部分学者开始借助暖体假人试验与数值模拟技术,建立热湿传递模型^[12],以预测“人体-医用防护纺织品-外环境”微气候的动态变化。

本研究以医用防护服、医用防护口罩与医用敷料3种典型医用防护纺织品为切入点,围绕材料改性和结构设计这两条技术主线,系统梳理了提升医用防护纺织品热湿舒适性能的研究进展,厘清了相关技术与成果的发展脉络,分析了当前研究中面临的关键问题,并在此基础上展望未来智能化、个性化与系统化的发展方向,以期后续高性能医用防护纺织品的迭代升级提供参考。

1 医用防护服的热湿舒适性能研究

医用防护服作为医护人员在接触患者、处理污染物及应对突发公共卫生事件时所穿戴的关键个体防护装备,其设计核心在于通过特定的材料与结构设计,形成一道能够双向隔离病原微生物、有害体液及气溶胶的屏障,旨在保障穿戴者不受外界环境中有害物质的侵害。然而,这层物理屏障在有效阻断外部威胁的同时,也从根本上阻断了人体与外界环境之间正常的热湿交换路径。医护人员在高强度、长时间的工作状态下代谢产生的热量与汗液会大量

积聚于防护服与体表之间的微气候区内,若无法及时导出,便会迅速形成高温高湿的饱和微环境。这种热湿蓄积现象不仅会引发心率加快、体温调节负荷加重乃至热应激等生理反应,还会因闷热黏腻感导致穿戴者操作敏捷度下降并产生焦躁心理^[13-14],所以在保障生物安全的基础上,必须提升医用防护服的热湿舒适性。为改善医用防护服热湿舒适性不足的现状,可采用超吸湿复合材料、相变材料、一体化结构设计等技术。

1.1 超吸湿复合材料

超吸湿复合材料是为解决医用防护装备内部高热湿环境问题而开发的新型功能材料,该材料将具有超强吸湿能力的功能性组分(如吸湿性盐类或配合物)嵌入到柔性高分子聚合物基体中,形成一种兼具高吸湿容量、良好力学性能和可重复使用特性的复合材料。其核心技术在于通过材料复合实现高效的水分管理:当材料置于防护服内侧时,功能性组分利用浓度差作为驱动力,像“海绵”一样快速吸收

人体皮肤蒸发出的汗液蒸汽,从而显著降低防护服内的湿度,促进汗液的持续蒸发并带走热量,实现被动降温。

Yang 等^[15]研发了一种新型的柔性超吸湿复合材料,可直接贴在防护服的内侧,能够快速吸收汗液蒸发出的湿气,促进汗液蒸发,达到给人体降温的目的。该材料具有良好的力学性能,制作成本低,能重复使用,具有广泛的应用潜力,可帮助医护人员、消防人员和军人等提升穿着防护服时的热湿舒适性。Su 等^[16]以高成膜性聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)为基材,掺入中空介孔二氧化硅纳米颗粒(hollow mesoporous silica nanoparticles, HMSN)作为交联网络平台,并加入高吸湿性氯化钙,合成了一种可应用于防护服内侧的超吸湿复合薄膜(图 1)。该薄膜单位面积吸湿量可达 157 g/m^2 ,能在 1 h 内将防护服内部湿度从 90%降至约 40%,同时使皮肤温度降低 1.5°C ,保持皮肤微环境平衡。这种吸湿性薄膜具有可重复使用特性与可降解特性。

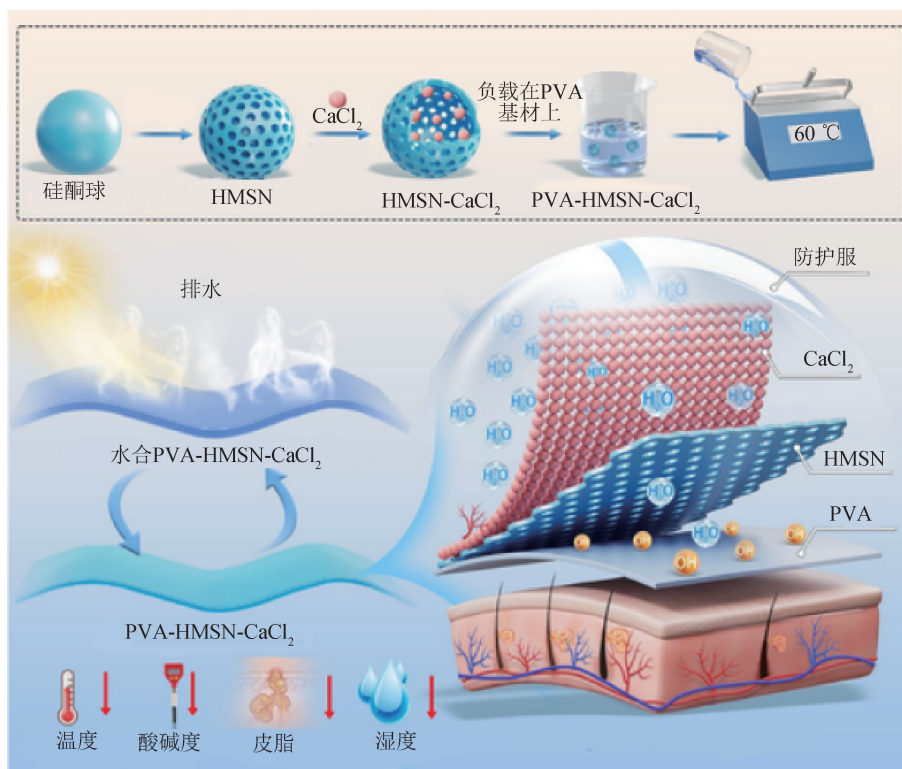


图 1 超吸湿复合薄膜的制备及其透湿透气性能示意^[16]

Fig. 1 Preparation of super-absorbent composite film and schematic of its moisture permeability and air permeability performance^[16]

1.2 相变材料

相变材料可利用自身物理状态的可逆转变特

性,在其相变温度点附近吸收或释放大量潜热,从而精准调控环境温度并维持温度恒定。其技术原理在

于利用材料在固-液等相态转变过程中的等温吸热与放热特性:当环境温度升高至相变点时,相变材料吸收热量并从固态熔化为液态,在此过程中自身温度保持恒定,从而起到缓冲升温的作用;反之,当环境温度降低,材料则释放储存的热量并从液态凝固为固态,起到放热和延缓降温的作用。该技术最初是由美国国家航空航天局为实现宇航服温控功能开发的,如今已广泛应用于医用防护材料、运动服装、床上用品等领域。

Meng 等^[17]采用非溶剂诱导相分离技术,以氟化聚氨酯为基体,通过 CaCl_2 的协同驱动作用,结合喷涂工艺构建了具有微纳多级网络结构的透气防护织物(图 2)。该织物的平均孔径仅为 $1.03\ \mu\text{m}$,能够有

效阻隔细菌和病毒载体,静水压高达 $12.86\ \text{kPa}$;同时,其孔隙率高达 69% ,实现了透气透湿性能优异,透气率 $14.24\ \text{mm/s}$ 、透湿率 $7.92\ \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,为缓解防护服热湿舒适性不足的难题提供了新思路。与传统商用防护服材料相比,该织物在保持同等防护等级的前提下,透气性提升约 30% 。在产业化应用方面,已有企业发布了针对防护服的商用纺织品。例如,苏州净尚净美电子科技有限公司于 2026 年初发布了搭载双向智能调温技术的新型多功能面料^[18],通过表面负载的微米级相变微胶囊,实现了对面料微环境温度的主动感知与调节,面储能密度为 $1\ 500\sim 2\ 000\ \text{J}/\text{m}^2$,可有效减轻穿戴者的冷热应激反应,适用于医疗手术室、洁净车间、实验室等需长时间作业场景。

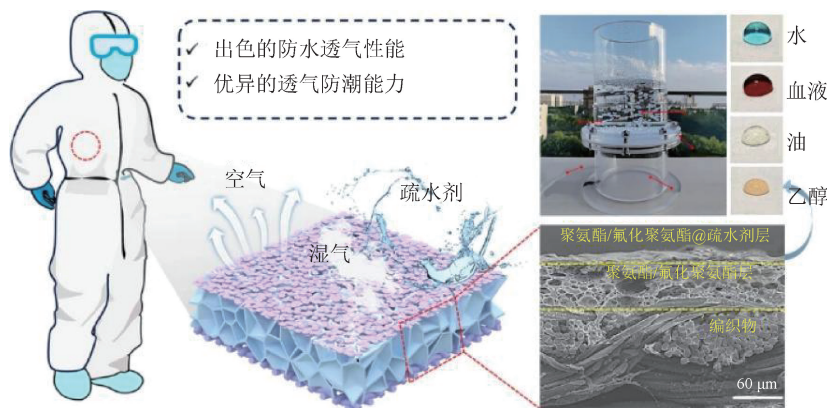


图 2 透气防护织物^[17]

Fig. 2 Breathable protective fabric^[17]

值得注意的是,部分相变材料具有腐蚀性,可能对医用防护材料的防护性能造成不利影响^[19],如何在确保防护性能的前提下,有效利用相变材料改善医用防护服的热湿舒适性,仍是当前研究需要解决的关键问题之一。

1.3 辐射降温材料

物体与环境之间的热交换形式包括热对流、热传导和热辐射。辐射降温材料通过调控热辐射能力和热反射能力,增加热的散发、减少热的吸收,从而实现被动降温^[20]。其核心在于对材料光谱特性的精确调控:一方面,在材料中构筑微纳级孔洞结构或嵌入二氧化硅(SiO_2)、二氧化钛(TiO_2)等无机颗粒,利用米氏散射效应最大化反射太阳光以减少热输入;另一方面,利用聚合物基体中 $\text{C}-\text{F}$ 、 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 等化学键的振动,使材料在中红外大气窗口具有高发射率,以强化热输出。

Huang 等^[21]报道了一种兼具高透气性、主动抗菌特性和日间辐射冷却功能的生物防护复合纳米纤维膜(图 3),该材料嵌入 Ag/SiO_2 纳米粒子后,长波红外发射率可达 92.3% 。人体覆盖该材料后,皮肤表面温度比覆盖普通医用防护材料低 $13.6\ ^\circ\text{C}$,同时对 $\text{PM}_{0.3}$ 的过滤效率高达 99.96% ,可无线实时监测人体异常生理活动。Zhai 等^[22]通过非溶剂诱导相分离法构建分级多孔涂层,开发出一种基于微纳聚乙烯纤维的辐射冷却非织造布,实现了高达 93.8% 的太阳光反射率和 96.4% 的中红外发射率,阳光直射下降温幅度可达约 $13\ ^\circ\text{C}$,且兼具自清洁性和耐洗涤特性。

上述研究未提及在室内无阳光照射时材料的降温效果。医用防护服主要在室内使用,缺乏太阳直射辐射,也缺乏有效的空气对流。在这种情况下,辐射降温材料主要通过向室内环境辐射散热,而室内

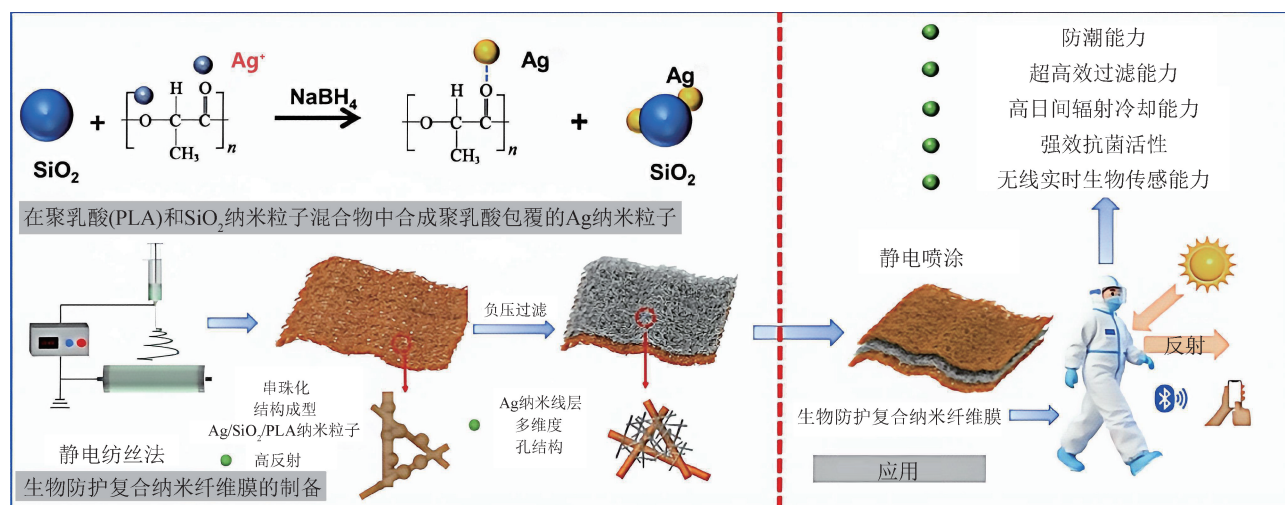


图 3 生物防护复合纳米纤维膜^[21]

Fig. 3 Bioprotective composite nanofiber membrane^[21]

环境温度往往与人体相近,其净辐射交换热量可能极为有限。

在实际应用当中,应根据不同场景选取合适的材料。如超吸湿材料更适用于与皮肤直接接触、需要处理汗液或渗出液的场景。而相变材料在应对间歇性热冲击或需要维持恒定温度的场景中更具优势,但其时效性缺陷需通过微胶囊化等技术克服。辐射降温则在户外全天候场景中展现出显著优势,但对环境依赖性强。

1.4 一体化医用防护服结构

针对传统防护服“防护与舒适难以兼得”这一固有矛盾,研究者们提出了一体化结构设计理念,旨在提升医用防护服的热湿舒适性。传统医用防护服多采用多层材料简单叠加的“组装式”设计,该设计虽能通过致密阻隔层(如聚四氟乙烯复合膜、聚乙烯透气膜等)实现病毒与体液的有效隔离,但往往以牺牲透湿透气性为代价,导致内部热湿蓄积,使穿戴者极易产生闷热感并引发热应激^[23]。

针对传统组装式医用防护服热湿蓄积及穿脱不便等问题,研究人员通过主体材料的重组,开发了一款新型一体化医用防护服^[24]。该防护服采用全封闭一体式设计,将面屏、呼吸部件与头罩深度集成;袖口设为内外双层并配置指环以防滑脱;裤腿与袜子一体连接,以强化靴裤接缝处的防护。与传统商品化防护服的对比评估显示,新型防护服的透气性提升至 120 mm/s,出汗量减少 30%,皮肤温度降低

1.2℃,皮肤浸渍发生率降低 45%,且穿脱时间由 5 min 缩短至 3 min。上述发现为在不损害防护性能的前提下提升医用防护服的舒适性提供了实用策略。

2 医用防护口罩的热湿舒适性能研究

医用防护口罩在医疗环境中可过滤空气中的颗粒物、飞沫、血液及体液等潜在传染性物质,以保护佩戴者免受呼吸道感染,其高效的过滤效率与良好的面部密合性是发挥防护性能的基础。然而,为达到严密防护而采用的多层过滤结构,长时间佩戴时,面部覆盖区易形成相对封闭的微环境:呼气时释放的湿热气流部分被过滤材料截留而难以迅速排出,吸气时外界干燥冷空气的进入亦受限,导致口罩内部热量与水分持续蓄积,形成高温高湿的微环境。这种热湿负荷的蓄积不仅会引起面部皮肤温度升高、潮红及屏障功能受损,还会因呼吸阻力感知增强和闷热感,诱发佩戴者频繁调整口罩佩戴位置,可能破坏口罩与面部的密合性并削弱防护效果。因此,如何在保证亚微米级颗粒过滤效率稳定的前提下,通过纤维改性与结构优化来降低呼吸阻力、提升湿热传递速率,已成为平衡防护性能与佩戴舒适性的核心研究议题。

2.1 表面接枝改性技术

表面接枝改性是一种在不改变材料本体性能的

前提下,通过化学键合在材料表面引入特定功能的聚合物链或官能团^[25],从而赋予其新理化性质的改性技术。该方法先利用高能辐照、等离子体处理或化学引发剂在惰性基材表面产生活性位点;随后引入功能性单体,使其在活性位点处经共价键发生聚合反应,形成牢固附着在材料表面的接枝层。在提升医用防护口罩热湿舒适性方面,近期研究主要聚焦于通过表面接枝引入季铵盐等功能性物质,以抑制微生物代谢并维持透湿性能,从而缓解长时间佩戴导致的热湿蓄积问题。

Sorci 等^[26]利用紫外光引发接枝技术,在 N95 口罩常用的聚丙烯熔喷布纤维表面共价接枝季铵盐聚合物,形成超薄接枝涂层。由于该涂层几乎未改变纤维间的孔隙结构,改性口罩在气流阻力、透气性以及水蒸气透过率等关键热湿舒适性指标上,与原口罩相比无显著差异。这表明医护人员佩戴此类口罩时,不会因表面改性而承受额外的闷热感或呼吸阻力。此外,接枝改性赋予材料的广谱抗菌活性,能够通过抑制微生物代谢减少湿热负荷,防止透气透湿性能随佩戴时间延长而衰减。

2.2 等离子体处理技术

等离子体处理技术通过等离子体中高能活性粒子与材料表面的相互作用,实现材料的物理与化学改性。一方面,高能粒子通过物理轰击刻蚀材料表面,清除污染物并形成微观粗糙结构;另一方面,通过引入氧气、氮气等反应性气体,可在材料表面引入羟基、羧基、氨基等极性官能团,实现表面化学活化和亲水改性,且该技术不改变材料本体的力学性能。

Wang 等^[27]利用氧等离子体刻蚀技术对聚乳酸电纺膜进行选择处理,在原本疏水的纤维膜表面构建出直径为 6 mm 的亲水微区,使纤维膜表面的水接触角从 131.8°显著降至 38.3°,并结合 MXene 光热材料,成功开发出 Janus 光热舒适口罩。该设计利用等离子体刻蚀形成的亲水微区作为“单向阀”,将呼出湿气从疏水层定向导出并富集于亲水区域,同时结合 MXene 的光热效应,处理后的纤维膜在 1 kW/m² 的光辐照度下,仅需 1.9 s 即可使局部温度从室温升至 62 °C,液滴蒸发效率相较于原纤维膜提升 5 倍,口罩内部湿度可稳定维持在 30% 的舒适区间(较传统商用口罩降低 50%),同时保持了其原有的优异过滤性能和生物相容性。这一研究展

示了等离子体处理技术在实现口罩表面精准区域功能化改性、优化湿气管理方面的潜力,为提升医用防护口罩的热湿舒适性提供了技术思路。

2.3 静电纺丝制备技术

通过高压静电场对聚合物溶液或熔体进行拉伸,可制备出直径为纳米至微米级的超细纤维,并通过纤维随机堆叠形成具有高孔隙率、高比表面积和相互连通孔道结构的膜材料^[28]。与传统纤维相比,静电纺纳米纤维膜具有表面积体积比大、孔径小、通用性强、孔洞连通性更好等优点,这种极薄的膜结构能在实现高效物理过滤的同时降低呼吸阻力与闷热感。何小龙等^[29]指出静电纺丝纳米纤维膜口罩的研究方向包括耐用型、抗菌型、挥发性有机化合物吸附型和可降解型等,未来发展将聚焦良好的抗湿性能、优异的舒适性以及多污染物协同拦截性能。静电纺丝技术在平衡高效防护与热湿舒适性方面具有巨大的发展潜力和应用前景。

3 医用敷料的热湿舒适性能研究

医用敷料是一种用于覆盖和保护皮肤创面,具有暂时性皮肤替代物作用,促进伤口愈合的医用材料或器械。其目的在于为创面愈合提供最佳的物理、化学和生物环境^[30]。敷料的基本功能包括物理覆盖以隔离外界污染、吸收创面渗出液、控制出血、防止感染,并维持一个有利于细胞增殖和迁移的湿润微环境。传统医用敷料虽然能吸收大量渗出液,但缺乏锁水能力,一旦吸收液体,液体容易在受压时回渗到伤口周围,导致皮肤角质层过度水合,不仅破坏健康皮肤屏障,还会增加感染风险。同时,其水蒸气透过率较低,汗液和渗出液的蒸发受阻,使敷料与伤口之间形成高湿度环境,闷热感加剧^[31]。为应对此问题,生物性敷料、水凝胶非织造布敷料与智能响应型敷料应运而生。

3.1 生物性敷料

生物性敷料由高分子材料与生物活性物质经高新技术方法组合而成,其不仅作为物理屏障覆盖创面,更能通过材料本身的生物相容性以及负载的活性因子,主动干预并促进伤口愈合过程。生物性敷料通常设计为双层的非对称润湿性界面结构:外层采用高分子材料构建类皮肤的屏障功能,内层则选

用胶原、壳聚糖、藻酸盐等天然生物高分子材料,兼具良好的吸水性、透气性、黏附性和抗菌止血作用,能在吸收创面渗液的同时维持局部湿润环境。Li 等^[32]开发了一种热响应型纳米纤维敷料,利用癸酸在接近体温时的相变特性实现体温触发的药物双相释放,同时,其聚丙烯腈网络展现出优异的湿气管理能力,水蒸气透过率达 $2\ 780.5\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\ \text{h})$,较商用敷料提升约 23%,有效平衡了渗液吸收与保湿需求。具体而言,该敷料的亲水性与成胶特性使其既能迅速吸收多余液体保持创面干爽,又避免了因过度干燥而产生牵拉刺痛感,实现了“润而不湿”的舒适平衡。

值得注意的是,生物性敷料的生物相容性缺乏

深入验证,其在经过长期使用后对人体的不良影响值得更深入、系统的安全性评价。

3.2 水凝胶非织造布敷料

水凝胶基非织造布是一种将水凝胶材料的高吸湿保湿特性与非织造布的三维多孔结构相结合的新型多层梯度结构创面敷料。其核心创新在于利用毛细效应与拉普拉斯压力协同作用^[33],实现渗出液的快速垂直排水,同时通过调控自由水、中间水与结合水的比例来改变蒸发焓,从而在伤口愈合的炎症期实现快速排出多余液体,在增殖期与重塑期适度减缓水分蒸发,达到全周期动态阶梯式湿度管理。

Gao 等^[34]构建了一种新型的水凝胶非织造布(图 4)作为敷料的吸收层。其非对称润湿性界

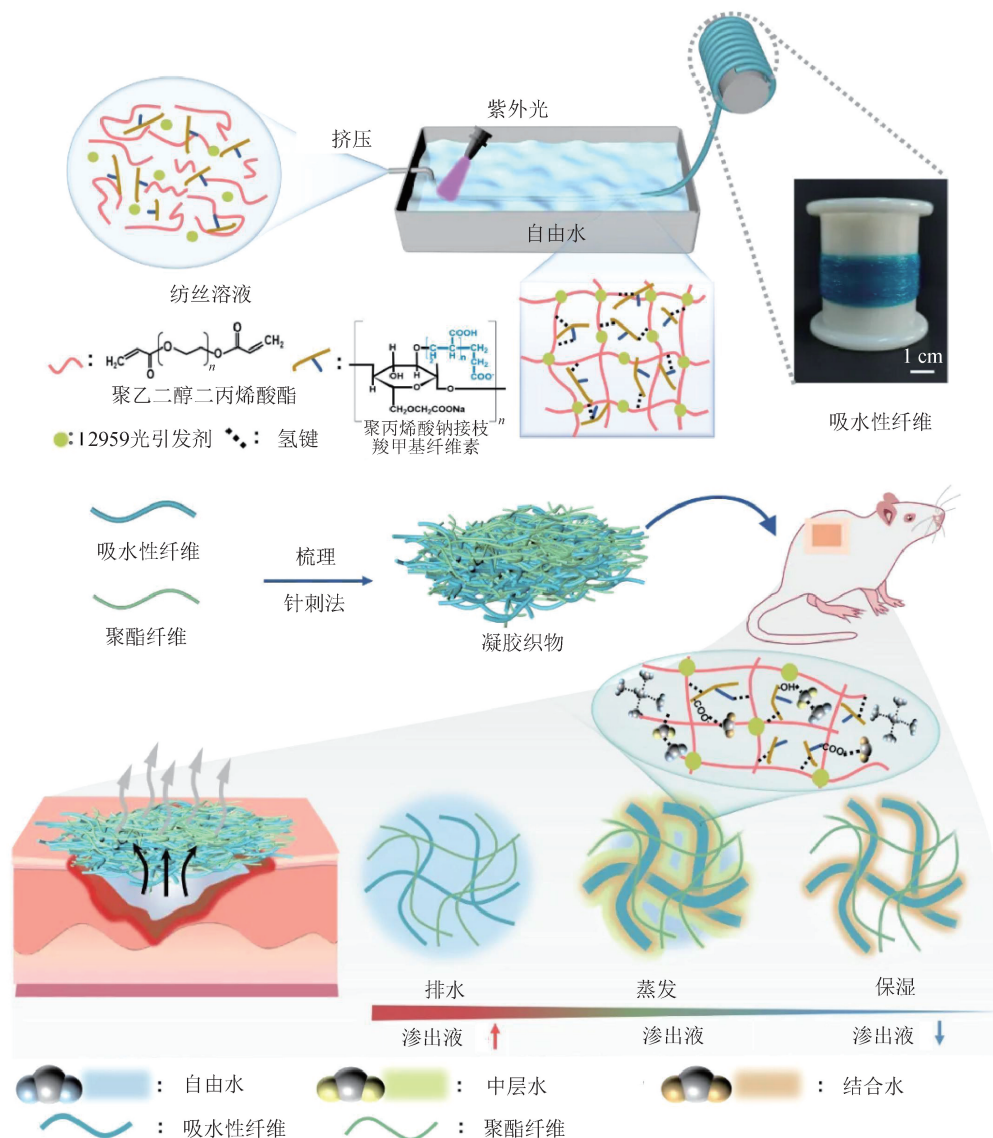


图 4 新型水凝胶非织造布的制备与应用示意图^[34]

Fig. 4 Schematic diagram of preparation and application of new hydrogel nonwovens^[34]

面^[35]能在渗液高峰期将黏稠的渗出液于数秒内吸离创面,减少闷热感;创面愈合进入中后期时,该敷料能自动调整保湿水平,避免干燥牵拉带来的刺痛和瘙痒。这种“主动适配”的湿度管理模式,显著提升了患者在整个愈合周期内的舒适度。该水凝胶非织造布敷料能够支撑高渗液伤口的全愈合周期,无需频繁更换,为临床创面护理提供了高效、便捷的新方案。

不过这种材料的制备工艺相对复杂,涉及动态原位聚合纺丝、半互穿网络构建等多步流程,可能带来较高的生产成本和批次稳定性挑战。此外,虽然该敷料在渗液管理方面实现了全阶段覆盖,但对于感染性伤口或慢性难愈创面,其单一的热湿管理功能尚不足以应对复杂的病理环境,仍需结合抗菌、抗感染等功能性改性方能满足临床多样化需求。

3.3 智能响应型敷料

在医用敷料领域,智能响应型敷料的研究已成为当下的热点,其核心设计理念在于模拟皮肤的自调节功能,使医用敷料能够主动感知创面微环境的动态变化,并据此做出可控的响应性干预,从而实现按需治疗与个性化管理^[36]。Gefen 等^[37]对比了亲水性纤维敷料(Hydrofiber®)与聚氨酯泡沫的导热

系数变化,发现前者具有显著的水分响应性导热能力;在 15% 的相对湿度条件下,其导热系数是聚氨酯泡沫的 4.6 倍;在 40 ℃ 条件下仅需 10% 的相对湿度即可达到 3.39 W/(m·K) 的导热系数。这种湿度响应的双相转变特性使其能够有效促进皮肤散热、降低局部热量积聚,所构建的热湿舒适微环境还有助于降低压力性损伤风险。

从产业化视角来看,智能响应型敷料已成为全球医用敷料企业布局的重点方向。英国 Convatec 公司基于亲水性纤维技术开发的 AQUACEL® 系列敷料^[38],其核心技术为湿敏热管理。2025 年,该公司推出了此系列的新一代产品 Aquacel™ ConvaFiber™,并获得了美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)的上市许可。其优异的水分响应导热性有助于改善敷料-皮肤界面的热量散发,减轻局部热量积聚。

4 总结

基于不同原理制备的材料或结构适用于不同的场景。每种材料或结构既具有独特的优势,也存在一定的局限性。常用材料汇总对比如表 1 所示。

表 1 医用防护纺织品主要的材料类型、优缺点及适用场景

Tab. 1 Main material types, advantages and disadvantages, and applicable scenarios of medical protective textiles

材料类型	核心原理	主要优势	局限性	适用场景
超吸湿复合材料	浓度差驱动吸湿,降低微环境湿度	吸水容量高、降湿迅速、可重复使用	长期吸湿后需再生,可能影响材料力学性能	医用防护服、防护口罩内层等
相变材料	固-液相变等温吸/放热,缓冲温度波动	温控效果显著,储能密度较高	部分材料有腐蚀性,长期循环稳定性待验证	医用防护服、医用敷料等
辐射降温材料	高太阳光反射+高中红外发射,被动散热	无能耗降温,兼具抗菌、过滤功能	室内环境辐射换热热量有限,依赖冷空间视场	医用防护服、口罩外层等
静电纺丝纳米纤维膜	高孔隙率,连通孔道,低阻力高通量	过滤效率高、透气透湿性好、结构可调	力学强度相对较低,生产效率待提升	防护口罩滤层、敷料基材等
多层梯度结构	梯度孔径/润湿性,定向导湿排热	兼顾阻隔与舒适,整体集成度高	工艺复杂,成本较高,批次稳定性面临挑战	医用防护服、医用敷料等
非对称润湿性界面	单向导湿,定向排出湿热气	精准湿气管理,降低闷热感	界面结合强度需优化,长期使用稳定性待验证	防护口罩、伤口敷料等

当前,医用防护纺织品的热湿舒适性能研究已从单一的材料改性拓展至“材料-结构-功能”协同创新的系统化阶段。在材料层面,超吸湿复合材料、相变材料与辐射降温材料的引入,显著提升了防护纺织品的主动热湿调控能力,实现了从仅注重高阻隔

性能而忽视热湿舒适性能逐渐转向高阻隔-高舒适性协同并重的跨越;在结构层面,静电纺丝纳米纤维膜、多层梯度结构及非对称润湿性界面的设计,通过优化传热路径,在维持高效阻隔性能的同时有效降低了热湿蓄积。上述技术在医用防护服、医用防护

口罩及医用敷料 3 种典型医用防护纺织品中的应用研究表明,材料本征特性与物理构型的协同优化,可在保障生物安全防护等级的前提下显著改善穿戴者的热湿舒适体验,为高性能医用防护纺织品的开发奠定理论与技术基础。

5 挑战与展望

5.1 挑战

尽管医用防护纺织品热湿舒适性研究取得了显著进展,但仍面临若干关键问题亟待突破。

防护性能与舒适性能之间的矛盾尚未根本解决,高阻隔要求材料具备致密结构、小孔径与连续阻隔层,而高通量透湿则需要材料拥有高孔隙率、连通孔道的结构特征。因此,二者对材料微观结构的诉求在物理层面存在天然的矛盾。一般来说,高阻隔性能的实现往往会导致透湿性能的下降。部分改性材料在提升透湿散热能力的同时,也可能对阻隔效率或力学强度产生不利影响,而如何在多性能指标间实现最优平衡仍是技术难点。

现有研究多集中于单一材料或结构的实验室评价,缺乏对“人体-医用防护纺织品-外环境”复杂系统中热湿耦合传递过程的系统认知与动态模拟,导致研究成果向实际应用转化的效率较低。此外,当前热湿舒适性的评价体系尚不完善,缺乏统一、量化的标准指标与模拟人体实际使用工况下的测试方法,限制了不同研究成果之间的横向比较与性能优化方向的精准定位。当下前沿的研究成果普遍存在批量化制备程度不高的问题,不利于材料的产业化推广。

5.2 展望

未来,医用防护纺织品的热湿舒适性能研究应聚焦智能化、个性化与系统化三大方向。在智能化方面,可进一步开发生理响应型材料,如集成温湿度传感器与自适应调节单元的智能防护系统,实现对皮肤微环境的实时监测与按需调控。在个性化方面,结合人体工效学与数字孪生技术,建立基于个体生理特征与作业场景的防护纺织品定制化设计平台,提升穿戴适配性与舒适体验。在系统化方面,构建涵盖材料设计、结构优化、性能评价与应用验证的全链条研究体系,推动多尺度热湿传递模型的建立与标准化测试方法的完善,以加速高性能医用防护纺织品的工程化应

用与产业化升级,为应对突发公共卫生事件与提升日常医疗作业效能提供坚实保障。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] Jiang C T, Chen D Y, Zhang R, et al. Improved medical protective clothing comfort for medical staff facing high-intensity infectious diseases[J]. *Frontiers in Public Health*, 2025, 13: 1643043.
- [2] Rajendran S, Anand S C. *Advances in smart medical textiles: treatments and health monitoring* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016: 94-113.
- [3] Alomari A, Heryanto H, Tahir D, et al. Radiation shielding properties of Fe-Cu@cellulose composites synthesised via sol-gel method for sustainable X-ray protection[J]. *Materials Today Sustainability*, 2026, 33: 101309.
- [4] Gu Z H, Su Y, Fan Y W, et al. Analyzing thermal-moisture comfort and thermal protective performance of phase change materials dripped protective clothing[J]. *Fire and Materials*, 2024, 48(8): 847-857.
- [5] Zheng M R, Yang J Y, Wang B, et al. Integrated thermal-wet comfort textile of bioinspired sweat transportation and triboelectric evaporation for personal perspiration management[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(41): 15089-15097.
- [6] Zhang Q, Ding L, Zhou J Q, et al. Human metabolic heat production under varying atmospheric and oxygen pressures during submaximal cycling [J]. *iScience*, 2026, 29(2): 114819.
- [7] Wang F, Guo W L, Tian Y, et al. Effect of ambient temperature and humidity changes on micro-environment and thermal comfort of medical protective clothing[J]. *Building and Environment*, 2025, 271: 112602.
- [8] Wu J W, Zhou N, Zhang Z H, et al. A heterogeneous-structure facial mask for thermal and humidity regulation in cold environments [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 11523.
- [9] Zhang Z C, Wu H J, Sathishkumar G, et al. A multilayered responsive dressing for programmable

- exudate control and regenerative therapy of infected wounds[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(7): e14784.
- [10] 朱方龙, 樊建彬, 冯倩倩, 等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析[J]. *纺织学报*, 2014, 35(8): 124-132.
- [11] Luo Q, Zhang T C, Chen M S, et al. Freshwater harvester with ultra-high yield by super-hygroscopic composite under extremely low humidity environment [J]. *Small*, 2025, 21(29): 2503948.
- [12] Zhao Y D, Xu Y H, Fan J T. A coupled heat and moisture transfer model for smart clothing with temperature adaptive porosity and thermal emissivity [J]. *Building and Environment*, 2026, 290: 114181.
- [13] 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.
- [14] Tumram N K. Personal protective equipment and personal cooling garments to reduce heat-related stress and injuries [J]. *Medico-Legal Journal*, 2020, 88(S1): 43-46.
- [15] Yang J C, Zhang X P, Koh J J, et al. Reversible hydration composite films for evaporative perspiration control and heat stress management[J]. *Small*, 2022, 18(14): 2107636.
- [16] Su M H, Hou X Y, Li N, et al. New super-absorbent composite film for improving the hot and humid environment inside anti-epidemic protective clothing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2026, 11(4): e00908.
- [17] Meng N, Hu Y E, Zhang Y F, et al. Highly permeable and liquid-repellent textiles with micro-nano-networks for medical and health protection[J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17: 208.
- [18] 苏州企业汇. 净尚净美推出新型恒温洗手服面料 助力医护服装性能升级 [EB/OL]. (2026-03-16) [2026-03-21]. <http://zxqyh.2500sz.com/doc/2026/03/16/1200715.shtml>.
- [19] 随明俐, 刘艺, 冯栗, 等. 相变材料在医用防护服中的应用前景[J]. *科技与创新*, 2022(13): 156-158.
- [20] 李晗, 张恒, 甄琪, 等. 辐射降温纤维材料的成型工艺及其应用研究进展[J]. *毛纺科技*, 2023, 51(2): 119-128.
- [21] Huang X C, Zhao B, Liu C, et al. Breathable, active antibacterial, and Ag/SiO₂-enhanced daytime radiative cooling PLA nanofabric electronic for bio-protection and wireless health monitoring [J]. *Materials & Design*, 2025, 259: 114909.
- [22] Zhai Y L, Li J X, Su X L, et al. Subambient daytime radiation cooling protective materials based on micro-nano polyethylene fibers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(32): 46208-46217.
- [23] 郝新敏, 张建春, 杨元. 医用多功能防护服研究与发展[J]. *中国安全科学学报*, 2005, 15(6): 80-84.
- [24] Jiang H H, Cao B, Zhu Y X. Improving thermal comfort of individual wearing medical protective clothing: two personal cooling strategies integrated with the polymer water-absorbing resin material [J]. *Building and Environment*, 2023, 243: 110730.
- [25] 张蓉, 赵立环, 王玉稳, 等. 超细纤维合成革透湿、透气性能研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(10): 18-26.
- [26] Sorci M, Fink T D, Sharma V, et al. Virucidal N95 respirator face masks via ultrathin surface-grafted quaternary ammonium polymer coatings [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(22): 25135-25146.
- [27] Wang X Y, Qu L J, Song Y C, et al. Janus photothermal comfortable face mask for environmental pollutant monitoring[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(33): 30455-30465.
- [28] Suen L K P, Guo Y P, Ho S S K, et al. Comparing mask fit and usability of traditional and nanofibre N95 filtering facepiece respirators before and after nursing procedures [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, 104(3): 336-343.
- [29] 何小龙, 康玉堂, 邹栋, 等. 静电纺丝纳米纤维膜呼吸防护口罩研究进展[J]. *化工进展*, 2025, 44(3): 1496-1504.
- [30] 王心茹, 张杰, 单金玉, 等. 细菌纤维素基抗菌医用敷料的制备及其在伤口愈合领域的应用[J]. *纺织科学研究*, 2024(10): 29-37.
- [31] Kezic S, De Boer F, Metwally N K A, et al. Skin barrier biomarkers in patch-induced and clinical allergic and irritant contact dermatitis[J]. *Contact Dermatitis*, 2026, 94(4): 317-326.
- [32] Li X S, Zhou W L, Chen H X, et al. Multi-hierarchical assemble nano-fibrous dressing for burn wound ultra-fast healing with dynamical exudate regulation, thermal management, and non-leaching sterilisation [J]. *Polymer*, 2024, 308: 127393.

- [33] 曾林泉. 刺激响应型水凝胶在纺织中的应用进展(待续)[J]. 染整技术, 2019, 41(6): 9-12.
- [34] Gao Y, Yin S, Guo Y, et al. Hydrogel-based nonwoven with persistent porosity for whole-stage hypertonic wound healing by regulating of water vaporization enthalpy[J]. Biomaterials, 2025, 316: 123036.
- [35] 彭新月, 侯科如, 计雅婷, 等. 非对称润湿性 Janus 织物的制备及应用进展[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(8): 44-53.
- [36] Dong R N, Guo B L. Smart wound dressings for wound healing[J]. Nano Today, 2021, 41: 101290.
- [37] Gefen A, Fisk J, Bunker J, et al. Moisture-responsive thermal conductivity properties of hydrofiber versus polyurethane foam: implications for pressure injury prevention[J]. International Wound Journal, 2026, 23(2): e70849.
- [38] Convatec. Convatec secures US and European regulatory clearance for Aquacel™ ConvaFiber™ wound care innovation [EB/OL]. (2025-07-24) [2026-03-21]. https://www.convatecgroup.com/media/press-releases/2025/convatec-secures-us-and-european-regulatory-clearance-for-aquacel-convafiber-wound-care-innovation/?utm_source=b-and-b&utm_medium=test,article&utm_campaign=test,charlies-story-mouldable&utm_term=interessen_gesundheit-pflege&utm_content=newsletter,newsletter.

欢迎订阅 2027 年《产业用纺织品》

《产业用纺织品》(月刊),大 16 开,全彩色印刷,定价 12.00 元/册,全年 144.00 元,中国标准连续出版物号 ISSN 1004-7093,邮发代号 4-492。

《产业用纺织品》创刊于 1983 年,由教育部主管,东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办,中国产业用纺织品行业协会协办,东华大学期刊中心编辑出版,月刊,是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一;为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊,已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台等;多次入编《中文核心期刊要目总览》;现为 CACJ 中国应用型核心期刊;入选《纺织领域高质量科技期刊分级目录(2025 版)》T3 级;知网 CI 指数位居纺织科学技术类期刊 Q2 区;获评上海市高校特色科技期刊;被 EBSCO 数据库收录;“综述”栏目入选第七届华东地区期刊“优秀栏目”。

秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风,《产业用纺织品》致力于建设高质量、高水平一流学术期刊。

期刊以“产业用纺织品”为特色,主要刊登国内外有关纺织品的综述文章,科研与生产技术报告,报道相关领域的新产品、新材料、新技术及新设备,并介绍相关的专利、标准、测试方法,以及相关领域的行业动态、市场信息等。

2027 年,《产业用纺织品》重点选题方向包括高品质非织造材料、安全防护与应急救援用纺织品、航空航天用高性能纺织品、海洋产业与渔业用纺织品、医疗健康用纺织品、交通运输用纺织品、土工建筑用纺织品、过滤用纺织品等,欢迎自荐栏目主持人。热忱欢迎国内外纺织高等院校师生、科研人员、产业用纺织行业相关企业工程技术人员等将优秀研究论文发表在《产业用纺织品》上。

《产业用纺织品》承接相关广告,并热忱为客户宣传,欢迎有意者来电或 E-mail 联系。

地址:上海市延安西路 1882 号
东华大学出版社楼 207 室
电话:021-62378228
E-mail: techtex@dhu.edu.cn
采编平台: <https://cyyf.cbpt.cnki.net>



欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net> techtex@dhu.edu.cn