

防水透湿功能织物的开发与应用

张梦丹 刘燕华 李华为 陈宇凡 肖学良

江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要: 防水透湿织物能够防止液态水的渗透, 同时允许水蒸气通过, 确保良好的透湿性。这类织物根据生产工艺的不同, 可以分为高密织物、涂层织物和层压复合织物。高密织物通过紧密的织造结构实现防水透湿功能; 涂层织物表面施加有疏水性微孔涂层; 层压复合织物则是通过将防水透湿膜与织物结合来达到防水透湿效果的。由于防水透湿织物的优异性能, 它们在众多领域都有应用, 具备高防水透湿性能的织物常用于户外运动服装、防护服和伤口敷料。不同应用领域对织物的防水透湿性能有不同要求, 因此, 如何在满足防水性能的同时保持织物的透湿性, 是当前研究和探讨的热点问题。

关键词: 防水透湿; 织物; 高密; 层压; 涂层; 应用

中图分类号: TS195.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)08-0026-09

Development and application of waterproof and moisture permeable functional fabrics

Zhang Mengdan, Liu Yanhua, Li Huawei, Chen Yufan, Xiao Xueliang

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

Abstract: Waterproof and moisture permeable fabric can prevent the penetration of liquid water, while allowing water vapor to pass through, ensuring good moisture permeability. This type of fabric can be classified into high-density fabric, coated fabric and laminated composite fabric according to different production processes. High-density fabrics achieve waterproof and moisture permeable functions through tight weaving. Coated fabrics feature a hydrophobic microporous coatings applied to their surface. Laminated composite fabrics achieve waterproof and moisture permeable effects by combining waterproof and moisture permeable membranes with fabrics. Due to the excellent performance of waterproof and moisture permeable fabrics, they are widely used in many fields. Fabrics with high waterproof and moisture permeable properties are often used in outdoor sportswear, protective clothing and wound dressings. Different application fields have different requirements for the waterproof and moisture permeable properties of fabrics. Therefore, how to maintain the moisture permeability of fabrics while meeting the waterproof property requirements is a current hot topic of

基金项目: 中国博士后科学基金第 74 批面上资助(2023M742677); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25_1328)

收稿日期: 2025-12-01

作者简介: 张梦丹, 男, 1999 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为高性能纤维及智能纺织品, 17550630317@163.com

通信作者: 肖学良, 教授, 主要研究方向为功能面料的设计开发, xiao_xueliang@jiangnan.edu.cn

research and discussion.

Keywords: waterproof and moisture permeable; fabric; high-density; laminate; coating; application

体力活动过程中,人体会分泌汗液,若这些汗液未及时蒸发到空气中,会导致衣物内层湿度增加,并引起不适感^[1]。具有防水透湿功能的织物能够阻挡外部的液态水(如雨水)渗透至皮肤表面,同时允许皮肤散发的水蒸气透过织物,可提高消费者的穿着舒适度^[2]。

防水透湿织物根据生产工艺可分为 3 种主要类型,即高密织物、涂层织物和层压复合织物^[3]。高密织物由密集排列的纱线制成,织物孔隙较小,可有效阻挡雨水^[4];涂层织物通过在基布上涂覆含微孔的防水涂料实现防水透湿功能^[5];层压复合织物则是由防水透湿膜与织物通过层压工艺复合而成的^[6]。例如,织物与使用聚氨酯(PU)^[7]制备的防水透湿静电纺丝薄膜层压复合后,可具备优良的透湿性和防水性能。研发者正致力于开发薄膜和涂层材料,控制孔径及其分布,以增强织物的防水透湿性能^[8],同时赋予织物隔热、抗菌、吸附和自清洁等功能。兼顾防护性的同时,如何有效提升织物的舒适度,是当前面临的挑战^[9-10]。

防水透湿织物在多个领域都有重要应用。在雨天或雪天等恶劣天气条件下,防水透湿服装成为外出的优选装备。除日常生活外,户外运动、救援行动、化学试验、医疗卫生及智能穿戴服装^[11]等专业领域,都对衣物的防水透湿性能提出明确要求。因此,对织物的防水透湿性能进行深入研究显得尤为重要。

1 防水透湿性能评估标准

1.1 防水性能

织物防水性能是指织物阻止水分润湿或渗透的能力。防水性能可通过静水压来表征,该压力是衡量织物防水性的关键指标^[2]。织物能够承受的静水压越大,其防水性能越好。可根据 GB/T 4744—2013《纺织品 防水性能的检测和评价 静水压法》进行测试^[12]。织物的静水压(ΔP , Pa)可通过 Young-Laplace 方程计算^[13]:

$$\Delta P = \frac{4\gamma_{LG} \cos \theta_{adv}}{d_{max}} \quad (1)$$

式中: γ_{LG} 为水表面张力, N/m; d_{max} 为织物中最大孔隙的直径, m; θ_{adv} 为水在织物表面的前进接触角, 是衡量材料亲疏水性的重要指标。

1.2 透湿性能

织物的透湿性能是指织物允许气态物质(主要是空气和水蒸气)通过其结构孔隙,从织物一侧传递到另一侧的能力。对于功能面料而言,透湿性的核心是水蒸气的传递能力,即身体产生的汗液能够快速以水蒸气的形式散发到外界,从而保持皮肤舒适。织物的透湿性主要通过水蒸气透过率 [W_{VTR} , g/(m²·24 h)] 来量化,即在特定温度和湿度环境下,一天内透过单位面积面料的水蒸气质量。根据 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分:吸湿法》,其代表性测试方法为透湿杯称量法,并按式(2)计算^[14]:

$$W_{VTR} = \frac{\Delta m}{S \times t} \times 24 \quad (2)$$

式中: Δm 为试验过程中的质量变化量, g; S 为测试面积, m²; t 为测试时间, h。

防水透湿织物的显著特征是可靠自身结构设计和表面处理,抵抗水分从外部渗透,同时将内部水蒸气排出。织物的水蒸气透过率越高,则汗液能更快地从皮肤表面蒸发,皮肤保持干爽,穿着舒适度提升。本研究以水蒸气透过率作为评估织物透湿性的标准,并综述了多种加速水蒸气向外传递的织物制备技术,旨在减少由汗液潮湿引起的穿着不适感。

2 防水透湿织物的制备

2.1 高密织物

高密织物可选亲水性或超细合成纤维原料制备,多采用平纹织造工艺^[15]。该织造方式使纱线间排列紧密,这极大地缩小了纱间间隙,能在显著增强织物对雨水阻隔能力的同时,保留良好的透湿性。然而,现有研究在高密织物透湿性与防水性能的协同调控方面仍存在不足。

高密织物也可选长绒棉为原料,采用精梳纱线以高密度牛津结构织造,该类织物干燥状态下孔隙相对较大,可允许水蒸气通过;遇水后棉纤维逐渐膨胀,织物孔隙显著缩小,可有效阻止液态水渗透。因此,即使未经特殊防水整理,该织物也能在限制水分渗透的同时允许水蒸气透过,实现防水透湿功能^[16]。此外,高密织物还可以使用合成纤维长丝纱线进行织造,并通过涂覆硅胶或防水剂来增强防水性能。英国锡莱研究所研发的 Ventile 织物是早期典型的高密防水透湿织物,但该织物防水性能有限,且织造成本偏高^[17]。安昱盈等^[18]选用涤纶和锦纶纱线制备高密织物,并探究了织物的防水透湿性能。试验结果表明,该织物防水性能优异,水蒸气透过率可达 $6\ 000\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\ \text{h})$ 。然而,随着织物紧度提升,其透湿性能呈衰减趋势,表明高密织物在提升防水性能的同时难以兼顾透湿性能,易造成穿着舒适度下降,故高密织物的透气透湿短板亟待改进。

2.2 涂层织物

涂层织物具备优异的防水性能,但其透湿性较差,这限制了其在防水透湿服装中的应用。为解决这一难题,研究人员致力于开发出能够保持良好防水透湿效果的微孔涂层。在织物基布上涂覆含有微孔结构的涂料,可使织物具备防水透湿性能。微孔涂层的微观结构与微孔膜高度相似,内部包含许多细小且相互连通的通道。这些通道的尺寸显著小于雨滴的最小直径,因此能够有效阻挡雨滴的渗透。同时,涂层经过合理的孔隙结构设计,可允许水蒸气通过,从而平衡了防水与透湿的需求^[19]。

涂层织物的制备方法多样,如浸渍涂层法。Bramhecha 等^[20]以柠檬酸和聚乙二醇合成的功能性多元醇为原料,制备新型水性聚氨酯。将这种聚氨酯作为纺织涂料,涂覆于棉织物上,能够赋予织物良好的防水透湿性能。Zhao 等^[21]选择具有小孔径和高孔隙率的锦纶 6 纤维膜作为基底,使用含有长烃链的无氟水基烷基丙烯酸酯对锦纶 6 纤维膜进行涂覆,构建了高疏水表面,所得织物具备良好的防水透湿性能。除了浸渍涂层法,筛网涂层法亦被广泛应用。Ghezal 等^[22]在以涤纶为外层、棉为内层的双面针织物上,使用木质框架和带有矩形孔的网筛进行涂料涂覆。选择丙烯酸和氟碳树脂作为涂料,制备防水透湿织物,其中丙烯酸中的亲水基团可保证水

蒸气分子的顺利通过,而氟碳树脂则提供拒水效果。此外,气相沉积技术也被用于制备涂层织物。Chang 等^[23]利用气相沉积技术制备了一种疏水性二氧化硅-聚二甲基硅氧烷(SiO_2 -PDMS)膜,加热后 PDMS 转化为蒸汽并沉积在二氧化硅纳米纤维表面,形成了水接触角达 135° 的疏水层。这种涂层不仅赋予了二氧化硅纳米纤维良好的疏水性,而且不影响纤维膜的多孔结构,因此该膜展现出良好的防水透湿性能。当前研究中微孔涂层的设计和制备技术尚未完全满足防水透湿性能的平衡需求,可进一步探索微孔结构的优化技术,以实现更高效的水蒸气传输和更优异的防水性能。此外,涂层可能会影响织物的柔软性和舒适性,涂层材料的硬度、厚度以及涂层工艺都会对织物原有的柔软手感产生负面影响。因此,在涂层设计中,保持织物的柔软性和舒适性是一个重要的考量因素。

2.3 层压复合织物

2.3.1 防水透湿膜的介绍

防水透湿膜是一种聚合物材料,可有效阻隔液态水渗透,并允许水蒸气分子通过。这类薄膜可分为亲水性无孔膜^[24]和疏水性微孔膜^[25]。其中,亲水性无孔膜内部无孔隙结构,依靠亲水官能团吸附水分,并通过扩散作用将水蒸气从湿度较高的一侧传递到另一侧。疏水性微孔膜则具备微小孔隙,其孔径小于液态水滴的直径,大于水蒸气分子的直径,既可阻隔液态水渗入,又能保障水蒸气分子的正常渗透通过。具有代表性的是聚四氟乙烯(PTFE)微孔膜,尽管 PTFE 微孔膜在防水透湿方面表现出色,但其制造过程复杂,能源消耗高,且不易降解。因此,寻找新的原料和制备方法,开发兼具环保与防水透湿性能的薄膜,是当前材料科学领域的一个重要研究方向。

2.3.2 防水透湿膜的制备

防水透湿膜的制备工艺包括熔融挤出、双轴拉伸^[26]、等离子体诱导聚合^[27]、静电喷涂和静电纺丝^[28]等技术。其中静电纺丝技术因其生产设备简单、成本低廉、材料相容性好,以及能够直接制备纳米级纤维,已成为近年来生产防水透湿膜常用的生产工艺之一^[29-30]。然而,静电纺丝过程中射流的不稳定性以及纤维的随机排列可能影响膜的力学性能。为了提高膜的防水透湿性能和力学性能,可采

用掺杂处理^[31]和热处理等方法。热处理能改变膜的结构和性能,促使纤维间形成紧密结构,创造出致密的膜层,从而提升膜的防水透湿性能^[32]。Xing 等^[33]结合静电纺丝与静电喷涂技术,制备了具备防水透湿性的热塑性复合纳米纤维膜。静电喷涂技术维持了纳米纤维膜的多孔性,其孔隙在允许水蒸气透过的同时,还能阻挡液态水的渗透。复合纳米纤维膜加热处理后,膜中的聚乙烯醇缩丁醛发生熔融,促使纤维间实现有效黏结,减小纤维膜的最大孔径,从而增强防水能力。合适的掺杂剂或热处理工艺可进一步优化薄膜的防水透湿性能。随着防水透湿膜的广泛应用,绿色无毒、可降解材料的开发亦受到研究学者关注。

2.3.3 层压复合织物的制备

层压复合织物的制备一般采用层压工艺,并借助黏合剂将织物与防水透湿膜复合。该制备方法可实现功能整合与性能强化,不同材料的理化特性互补并产生复合效应,赋予复合织物防水透湿功能^[34]。

层压复合织物的层压工艺包括热压、热熔、机械复合和化学黏合等多种方法,涉及的纺织基材料包括棉、羊毛等天然纤维^[35-36],以及涤纶(PET)、聚酰胺(PA)、聚酰亚胺(PI)等合成纤维^[37]。Liu 等^[38]采用热压工艺,开发了一种 3 层结构的新型防水透湿防护服面料。该防护服面料外层为涤纶(PET)面料,中间层为防水热塑性聚氨酯(PU)膜,内层为亲肤、舒适、透湿的棉非织造布。其防水透湿机制为:当身体产生的水分通过内层织物接触到中层膜时,涂层热塑性聚氨酯膜上的亲水基团会吸附水分子。这些水分子在一定的温湿度梯度下会从高湿度区域向低湿度区域扩散,通过“吸附-扩散-脱附”的过程,实现高效的透湿性能。然而,该复合面料的 3 层结构增加了生产的复杂性,且经过热压工艺后可能会影响到织物的原始透湿性能。Li 等^[39]采用静电纺丝和水热处理技术制备了纳米纤维网,将该纳米纤维网与非织造布层压至涤纶机织物上,所得层压复合织物经过试验证实了其出色的防水性能和卓越的透湿性能。

此外,部分研究还关注环境影响和可持续性,旨在推动层压复合织物技术向更加环保和经济高效的方向发展。Zhou 等^[40]在纺丝溶液中引入掺杂剂,

优化了防水透湿膜的性能,并采用乳液静电纺丝技术成功制备了具有高疏水性的乙醇溶性聚氨酯(EPU)/氟化聚氨酯(FPU)/三羟甲基丙烷三(2-巯基乙酸酯)(TTMA)防水透湿纤维膜,如图 1a)所示。通过添加含氟掺杂剂,制备的纳米纤维膜层压复合织物展现出优异的静水压及较高的水蒸气透过率。上述方法所用掺杂剂中含氟,不利于环保,因此,无氟掺杂剂的研究也受到科研工作者的关注。Li 等^[41]采用静电纺丝技术结合一步浸涂工艺制备了聚丙烯腈(PAN)/嵌段异氰酸酯预聚物(BIP)@水性羟基丙烯酸树脂(HAR)防水透湿纤维膜,如图 1b)所示,纤维膜与织物层压复合后,表现出理想的防水透湿性,且具有优异的环保性能。

层压工艺的优化和材料筛选,为开发具有特定性能的层压复合织物提供了可行途径。层压复合织物的相关研究虽然已经取得了一定的进展,但仍面临着生产过程复杂、成本管控困难以及透湿性能难以稳定维持等挑战。

3 应用

3.1 户外运动服装

在大雨或大雪伴随气温骤降等极端天气条件下,人们外出时穿着的衣物需具备保温、防水以及适当的透湿性能,从而在保证穿着舒适度的同时,避免潮湿和寒冷环境引发的疾病。运动品牌如安踏、波司登和乔丹等已在微孔型防水透湿面料的研发上取得进展^[42]。该面料具有防风雨的功能,静水压达到 12 748.645 Pa,可以免遭雨水浸湿,避免冷风穿透身体。同时该面料轻盈、高效透气,其水蒸气透过率可达 6 000 g/(m²·24 h),可使身体时刻保持干爽,减轻运动负担。此外,该面料保暖效果较好,可避免体表温度迅速下降,能适应多种环境,可作为全年户外运动的经典穿搭。户外运动服装如何实现其防水透湿性能一直是现阶段学者的研究热点^[43-44]。

如图 2 所示,Zhao 等^[45]采用热固化工艺制造了无氟、高效、可生物降解的改性醋酸纤维素(TCA)膜。该膜可通过热处理促使交联剂与高聚物的活性基团发生反应,生成聚氨酯基团,从而赋予 TCA 膜防水透湿性能。TCA 膜适应性好,易与锦纶织物、聚丙烯腈织物或棉织物复合,满足户外运动服装面

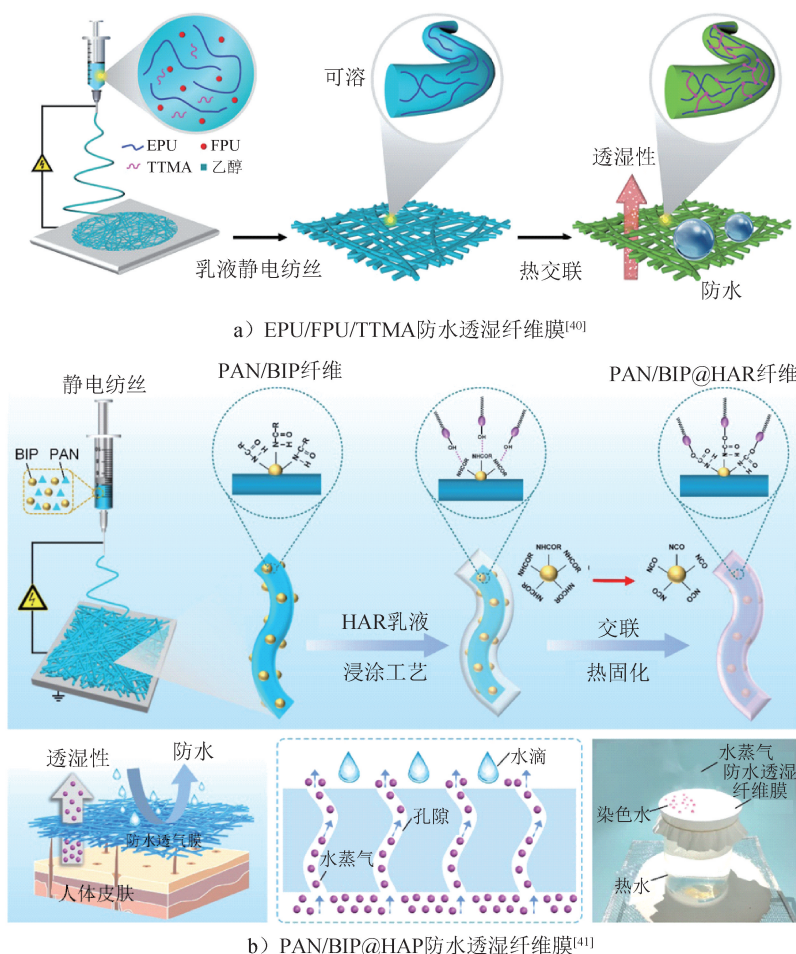


图1 防水透湿纤维膜制备示意

Fig. 1 Preparation schematic for waterproof and moisture permeable fiber membranes

料防水透湿的功能需求。在户外运动服装的实际应用中,需综合考虑材料的防水性、透湿性、整体舒适性以及成本效益。对热处理前后织物的防水透湿性能进行测试,结果表明,处理后织物的静水压达到102.9 kPa,水蒸气透过率为12 300 g/(m²·24 h)。TCA膜复合织物的环保特性和优良的防水透湿性能,使其成为户外运动服装的理想选择。

3.2 防护服

防护服种类繁多,根据不同的应用场景和防护需求,可分为隔热防护服、御寒防护服、医用防护服、水域防护服和军用防护服等^[46-47]。这些防护服必须具备防水透湿的特性,以确保在极端环境下,保障医护人员、消防员、士兵和警察等工作人员的人身安全与穿着舒适性^[48-49]。

防护服主要由聚丙烯、涤纶等合成纤维制成,特别是医用防护服,在大量使用后多作为医疗废弃物

处理,易造成环境污染。开发可循环使用的防护服可以显著减少医疗废弃物的产生,减轻环境负荷。Li等^[50]在聚酰亚胺静电纺丝纳米纤维膜表面涂覆一层超薄的聚二甲基硅氧烷,制备出一种防水透湿复合材料。该复合材料经过乙醇、含氯溶液和紫外线消毒处理后,仍可保持良好的疏水性、过滤效率和透气性,且具备可重复使用性,能够减少资源浪费,是制备防水透湿防护服的理想候选材料(图3)。

防护服具有防水、透湿和抗菌^[51]等多种功能,然而,这些功能往往以牺牲衣物的柔软性为代价。医用防护服,在经历多次循环灭菌后,其防水和透湿性能仍面临挑战^[52]。由于穿着防护服的工作人员需要频繁进行大幅度活动,因此在不损害防护功能的前提下,提高穿着的灵活性、舒适性及重复使用性是亟待解决的问题。

3.3 伤口敷料

伤口敷料在阻隔外界液体与伤口接触的同时,

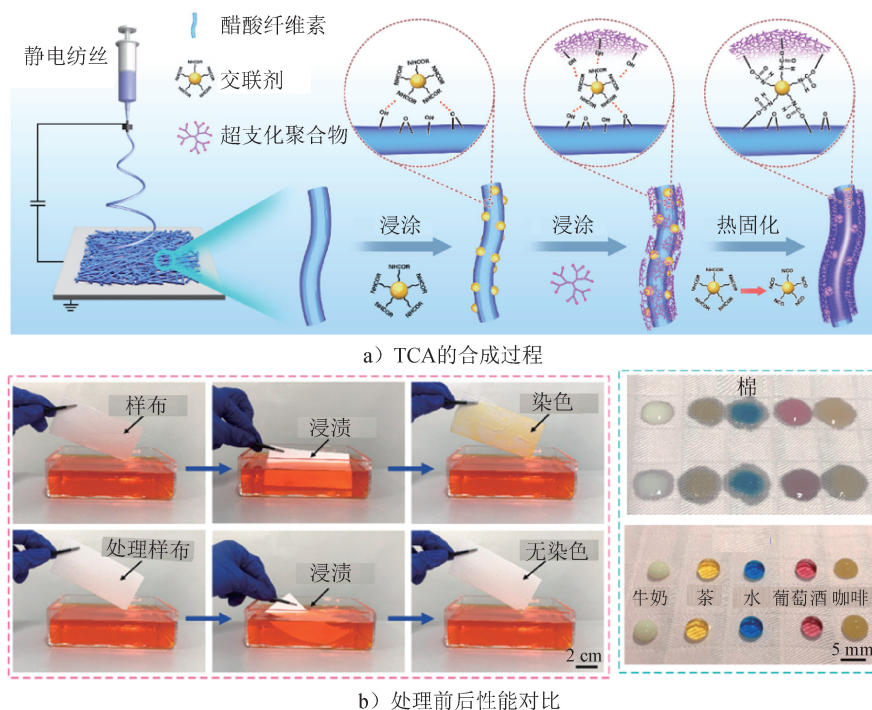


图 2 TCA 膜复合织物^[45]
Fig. 2 TCA membrane composite fabric^[45]

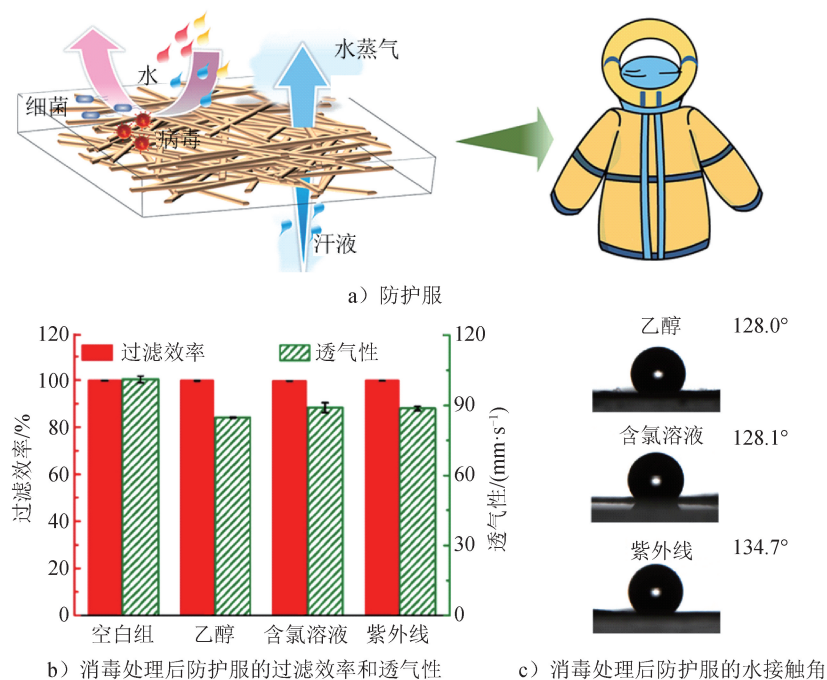


图 3 防护服的防水透湿性^[50]
Fig. 3 Waterproof and moisture permeability of protective clothing^[50]

必须具备优良的透湿性,以避免因过度潮湿而使伤口恶化。防水透湿织物在伤口护理领域具有巨大的应用潜力^[53]。

黄莹莹^[54]采用静电纺丝技术制备聚乙烯醇纳米纤维,并用戊二醛进行交联以增强其结构稳定性,开发出一种兼具防水透湿性和良好力学性能的伤口

敷料。如图4所示,Yue等^[55]利用静电纺丝技术,将EPU、FPU和麝香草酚(Thymol)沉积在织物表面形成纳米纤维膜。该纤维膜具备优良的防水透湿性能和较高的抗菌活性,为伤口敷料的应用提供了新

的可能性。当前研究正聚焦新材料的深入探索,旨在开发一种既柔软舒适,又兼具防水透湿、抗菌及可降解特性的伤口敷料,以期在提升患者使用舒适度的同时,增强敷料的临床实用性。

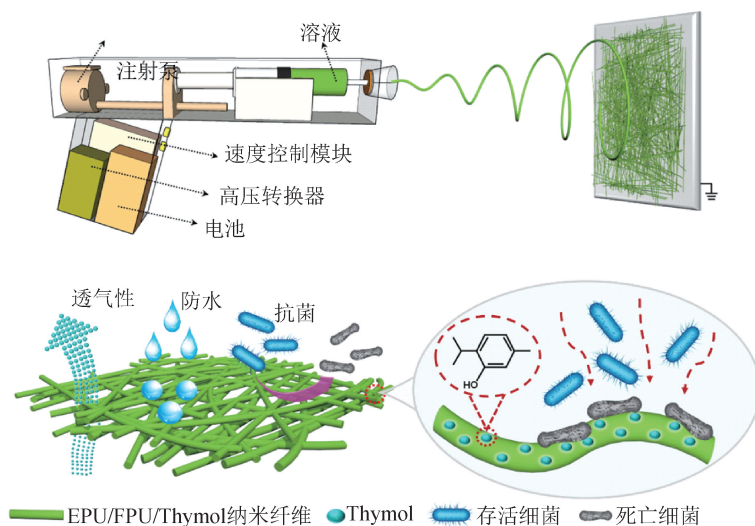


图4 EPU/FPU/Thymol 纳米纤维膜^[55]

Fig. 4 EPU/FPU/Thymol nanofiber membrane^[55]

4 结论

防水透湿织物的制备方法多样,每种方法均有其独特的优势与局限性。高密织物虽在防水性能方面表现优异,但因织物孔隙较小,难以兼顾透湿性能。涂层织物通过在表面施加疏水性微孔涂层实现防水,然而涂层可能堵塞孔隙,影响透湿性。层压复合织物通过复合防水透湿膜,并选择适当的黏合剂获得良好的透湿性,这使得层压复合织物在市场上占据主导地位。可以根据不同的应用需求和对防水透湿性能的具体要求,合理选择制备方法。

防水透湿织物因其能阻隔水分的同时允许水蒸气散发的特性,在多个领域得到广泛应用。应用在户外运动服装领域,如登山服和滑雪服,可抵御恶劣天气并保持透湿性能,户外活动时还可保证穿着舒适度。在防护服领域,这种织物的防水透湿特性对确保工作人员在恶劣或特殊环境下的安全至关重要。此外,它也适用于伤口敷料,能在提供防水保护的同时保持透湿性。防水透湿织物还可用于家用纺织品(如床垫套和枕头套)、户外装备(如帐篷、睡袋和背包),以及鞋材纺织品(如登山鞋和雪地靴),应

用前景广阔,市场潜力巨大。未来的防水透湿织物研究与发展将致力于实现高效环保、增强耐久以及多功能集成的目标,旨在满足日益增长的多样化应用需求。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 雷诗微, 师文钊, 刘瑾妹, 等. 纯棉织物雾化拒水整理工艺[J]. 印染助剂, 2024, 41(1): 7-11.
- [2] Chang Y W, Liu F J. Review of waterproof breathable membranes: preparation, performance and applications in the textile field [J]. Materials, 2023, 16(15): 5339.
- [3] Tehrani-Bagha A R. Waterproof breathable layers – a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 268: 114-135.
- [4] 余彤, 王雪燕. 防水透气功能纺织品技术及其性能要求的分析[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2015, 32(4): 102-105.
- [5] Meena M, Kerketta A, Tripathi M, et al. Thermally stable

- poly (urethane-imide)s with enhanced hydrophilicity for waterproof-breathable textile coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(28): e52508.
- [6] 宋丽伟, 金肖克, 缪永达, 等. 响应面法优化 e-PTFE 膜层压复合织物的热压工艺[J]. *现代纺织技术*, 2025, 33(4): 33-42.
- [7] 张莉彦, 侯钦正, 徐锦龙, 等. 熔体微分静电纺热塑性聚氨酯防水透湿透气超细纤维膜的制备及其性能研究[J]. *毛纺科技*, 2022, 50(12): 1-10.
- [8] Sheng J L, Li Y, Wang X F, et al. Thermal inter-fiber adhesion of the polyacrylonitrile/fluorinated polyurethane nanofibrous membranes with enhanced waterproof-breathable performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 158: 53-61.
- [9] 仇慧丽, 杨群, 崔进, 等. 防水透湿膜在纺织上的应用及研究进展[J]. *现代纺织技术*, 2023, 31(2): 244-255.
- [10] Mukhopadhyay A, Midha V K. A review on designing the waterproof breathable fabrics part I: fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2008, 37(3): 225-262.
- [11] Wang S Y, Huang H Z, Liu C, et al. Waterproof and breathable graphene-based electronic fabric for wearable sensors[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7(11): 2200149.
- [12] 崔永艳. 纺织品透湿性的测试方法及影响因素探讨[J]. *纺织检测与标准*, 2023, 9(1): 4-8.
- [13] Jiang Q, Wang Y X, Xie Y L, et al. Silicon carbide microfiltration membranes for oil-water separation: pore structure-dependent wettability matters [J]. *Water Research*, 2022, 216: 118270.
- [14] Si Y, Fu Q X, Wang X Q, et al. Superelastic and superhydrophobic nanofiber-assembled cellular aerogels for effective separation of oil/water emulsions[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 3791-3799.
- [15] 范余娟, 金志学, 付重先, 等. 低 DPF 超细锦纶 6 纤维的制备及其性能[J]. *纺织导报*, 2022(6): 24-26.
- [16] 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.
- [17] 王悦鹏, 董洁, 孙润军, 等. 防水透湿织物的研究进展[J]. *棉纺织技术*, 2025, 53(3): 82-87.
- [18] 安昱盈, 温润, 徐广标. 户外睡袋用面料防水透湿性能的评价[J]. *丝绸*, 2020, 57(7): 66-71.
- [19] Meng Q B, Lee S I, Nah C, et al. Preparation of waterborne polyurethanes using an amphiphilic diol for breathable waterproof textile coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, 66(4): 382-386.
- [20] Bramhecha I, Sheikh J. Development of sustainable citric acid-based polyol to synthesize waterborne polyurethane for antibacterial and breathable waterproof coating of cotton fabric [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(47): 21252-21261.
- [21] Zhao J, Wang X F, Xu Y Q, et al. Multifunctional, waterproof, and breathable nanofibrous textiles based on fluorine-free, all-water-based coatings[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(13): 15911-15918.
- [22] Ghezal I, Moussa A, Ben Marzoug I, et al. Investigating waterproofness and breathability of a coated double-sided knitted fabric [J]. *Coatings*, 2022, 12(10): 1572.
- [23] Chang M J, Chai X J, Cui W N, et al. Facile fabrication of electrospun silica nanofibrous membrane with hydrophobic, oleophilic and breathable performances[J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(4): 760-766.
- [24] Anatoly C, Pavel Z, Tatiana C, et al. Water vapor permeability through porous polymeric membranes with various hydrophilicity as synthetic and natural barriers [J]. *Polymers*, 2020, 12(2): 282.
- [25] 马池, 张泾龙, 侯琳, 等. 聚四氟乙烯在产业用纺织品领域的加工及应用进展[J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(3): 1-7.
- [26] Kurumada K I, Kitamura T, Fukumoto N, et al. Structure generation in PTFE porous membranes induced by the uniaxial and biaxial stretching operations [J]. *Journal of Membrane Science*, 1998, 149(1): 51-57.
- [27] Kim S Y, Kanamori T, Shinbo T. Preparation of thermal-responsive poly (propylene) membranes grafted with N-isopropylacrylamide by plasma-induced polymerization and their water permeation [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 84(6): 1168-1177.
- [28] 杨森, 王荣武. 聚醚砜微纳米纤维防水透湿材料的制备及性能分析[J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(1): 30-37.
- [29] Gong X B, Yin X, Wang F, et al. Electrospun nanofibrous membranes: a versatile medium for waterproof and breathable application[J]. *Small*, 2023, 19(2): 2205067.
- [30] 朱豆豆, 付少海, 张继超. 基于静电纺丝技术的防水透湿微纳米纤维膜研究进展[J]. *服装学报*, 2023, 8(2): 95-101.
- [31] Yu Y G, Liu Y, Zhang F L, et al. Preparation of waterproof and breathable polyurethane fiber membrane modified by fluorosilane-modified silica[J]. *Fibers and*

- Polymers, 2020, 21(5): 954-964.
- [32] Ren G H, Li Z Z, Tian L L, et al. Environmentally friendly waterproof and breathable electrospun nanofiber membranes via post-heat treatment [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 658: 130643.
- [33] Xing X W, Zhang X Y, Fang J, et al. One-step fabrication of strengthened breathable composite nanofiber membranes by electrospinning/electrospraying for highly waterproof application [J]. Polymer, 2023, 289: 126481.
- [34] 胡满钰. EVA 胶膜层压复合织物的制备及其湿传导性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [35] 金星, 王俊胜, 商珂, 等. 干式水域救援服用复合织物的性能研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(5): 694-698.
- [36] 孙琪琪. 层压复合羊毛织物服用性能及其环境适用性研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [37] 史进霞. 聚酰亚胺/聚四氟乙烯膜层压复合织物的制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [38] Liu Y B, Wang Q, Zhang T Y, et al. Fabrication of breathable superhydrophobic composite fabric with moisture permeability and weak-electric-field bactericidal ability designed for protective clothing applications [J]. Materials & Design, 2024, 237: 112612.
- [39] Li P P, Zhang Q, Chadyagondo T T, et al. Designing waterproof and breathable fabric based on polyurethane/silica dioxide web fabricated by electrospinning [J]. Fibers and Polymers, 2020, 21(7): 1444-1452.
- [40] Zhou W, Yu X, Cao L T, et al. Green and ethanol-resistant polyurethane nanofibrous membranes based on an ethanol solvent for waterproof and breathable textiles [J]. Advanced Sustainable Systems, 2020, 4(9): 2000105.
- [41] Li P H, Feng Q, Chen L X, et al. Environmentally friendly, durably waterproof, and highly breathable fibrous fabrics prepared by one-step fluorine-free waterborne coating [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8613-8622.
- [42] 罗耀发. 水性微孔型防水透湿膜的开发及在羽绒服面料中的应用[J]. 纺织导报, 2023(2): 30-33.
- [43] 赵艳娇, 葛爱雄, 张伟. 防水透气型膜复合面料应用研究及分析[J]. 纺织检测与标准, 2022, 8(6): 36-39.
- [44] Liu Q X, Huang J, Zhang J M, et al. Thermal, waterproof, breathable, and antibacterial cloth with a nanoporous structure [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(2): 2026-2032.
- [45] Zhao J, Zhu W X, Wang X F, et al. Fluorine-free waterborne coating for environmentally friendly, robustly water-resistant, and highly breathable fibrous textiles [J]. ACS Nano, 2020, 14(1): 1045-1054.
- [46] 肖阳阳, 石佩玉, 丁水萍, 等. 消防员灭火防护服外层织物的疏水耐液态危化品涂层研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(6): 43-52.
- [47] 周琦. 消防服用组合织物热防护性与热湿舒适性综合评价[J]. 服装学报, 2021, 6(2): 102-107.
- [48] Chen X X, Li M, Yu M, et al. Preparation and performance study of waterproof and breathable layer of alginate/aramid-based fabrics and flame-retardant multilayer combination [J]. Designed Monomers and Polymers, 2024, 27(1): 1-14.
- [49] 彭淑娟, 樊瑞雪, 齐晓玲, 等. 闪蒸法非织造布研究进展及应用[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(8): 11-16.
- [50] Li Y, Zhong L B, Zhang Q J, et al. Highly breathable and durable waterproof polyimide electrospun nanofibrous membrane for potential reusable protective clothing application: preparation, characterization and performance [J]. Journal of Membrane Science, 2024, 693: 122354.
- [51] Bramhecha I, Sheikh J. Antibacterial and waterproof breathable waterborne polyurethane functionalised by graphene to develop UV and NIR-protective cotton fabric [J]. Carbon Trends, 2021, 4: 100067.
- [52] Gao H C, Chen Y, Wei M C, et al. Autoclavable nanofiber laminated fabrics with waterproof and breathability for reusable medical protective textiles [J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(24): 23496-23505.
- [53] 李露露, 谢光银, 周朝钢. 弹性医用敷料基布的开发及性能研究[J]. 纺织科技进展, 2020, 42(3): 12-15.
- [54] 黄莹莹. 功能性防水透气医用敷料的研究及制备[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [55] Yue Y P, Gong X B, Jiao W L, et al. In-situ electrospinning of thymol-loaded polyurethane fibrous membranes for waterproof, breathable, and antibacterial wound dressing application [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 592: 310-318.