离子凝胶在可穿戴传感纺织品中的应用研究进展

刘宝宝，陈 慧

（河南科技职业大学，河南 周口 466000）

摘 要：离子凝胶可以调控离子电导率，具有较高的柔韧性，可用于制备可穿戴传感纺织品。制备的可穿戴传感纺织品因舒适透气、柔韧贴合且信号实时响应等优点，在医疗健康、人机交互、功能防护等领域具有较大的应用潜力。离子凝胶由具生物相容性的聚合物交联骨架与离子载体构成，可以利用构成设计、填料添加或微观结构优化电学性能、力学性能及稳定性。在离子凝胶的制备工艺中，溶液浇注与光固化工艺适于小规模生产，湿法纺丝工艺能够促进纤维产业化，静电纺丝工艺适于制备高透气贴肤膜，双网络工艺能够提升抗疲劳性，但各工艺均存在一定的局限。将离子凝胶制备的可穿戴传感纺织品应用于医疗领域，具备温度及应变双模监测能力，但集成难度高，稳定性不足；应用于人机交互领域，可满足柔性触控需求，但驱动效率较低，易受干扰；应用于功能防护领域，能够起到抗冲击、热管理及紫外线屏蔽防护作用，但需要兼顾防护性与贴合性。未来，研究重点应集中在多功能离子凝胶的开发，制备能够融合能量收集与AI自供能的智能穿戴传感纺织品，解决目前环境稳定性差、耐久性不足及信号串扰的问题。

关键词：离子凝胶；可穿戴传感纺织品；柔性传感；多模态监测；人机交互

中图分类号：TP212 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3360（2026）09-0199-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.035

Application Research Progress of Ionogels in Wearable Sensing Textiles

LIU Baobao, CHEN Hui

(Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Ionogels can regulate ionic conductivity and possess high flexibility, making them suitable for the fabrication of wearable sensing textiles. The wearable sensor textiles produced offer significant potential for application in fields such as healthcare, human-computer interaction and functional protection, owing to their comfort, breathability, flexibility , form-fitting and real-time signal response. Ionogels are composed of a biocompatible polymer crosslinked framework and an ionic carrier, and their electrical, mechanical, and stability properties can be optimized through compositional design, filler addition, or microstructural. Among the preparation processes for ionogels, solution casting and photocuring are suitable for small-scale production; wet spinning facilitates fiber industrialization; electrospinning is well-suited for preparing highly breathable and skin-conforming films; and the dual-network process enhances fatigue resistance. However, each process has certain limitations. When applied in the medical field, wearable sensing textiles based on ionogels offer dual-mode monitoring capabilities for temperature and strain, but they face challenges such as high integration difficulty and insufficient stability. In human-machine interaction, they can meet the demands for flexible touch control, yet their actuation efficiency remains low and they are susceptible to interference. For functional protection applications, they provide impact resistance, thermal management, and UV shielding, but a trade-off between protection and conformability must be addressed. In the future, research efforts should focus on the development of multifunctional ionogels, the fabrication of intelligent wearable sensing textiles that integrate energy harvesting and AI-driven self-powering, and the resolution of current issues including poor environmental stability, insufficient durability, and signal crosstalk.

Keywords: Ionogels; Wearable sensing textiles; Flexible sensing; Multimodal monitoring; Human-machine interaction

可穿戴传感纺织品具有舒适、透气[1]、柔韧贴合度高、信号实时响应等特点，规避了碳基导电材料及传统金属材

收稿日期 Submitted date 2025-09-16；修回日期 Revised date 2025-10-12；录用日期 Accepted date 2025-11-10

基金项目：河南省高等学校人文社会科学研究一般项目（2027-ZDJH-274）；河南科技职业大学教改一般项目（HKZDJGB2024045）；河南省高等教育教学改革研究与实践项目（2024SJGLX0629）

联系人，2298440467@qq.com

引用本文：刘宝宝，陈慧．离子凝胶在可穿戴传感纺织品中的应用研究进展[J]．塑料科技，2026，54(9)：199－204．

Citation：LIU B B, CHEN H. Application research progress of ionogels in wearable sensing textiles[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 199-204.

料因刚性过高引起的在穿戴过程中大幅形变/应变造成的监测信号漂移[2],在医疗健康监测、人机交互及功能防护中展现出良好的应用潜力[3-5]。离子凝胶兼具可调控的离子电导率[6]与柔韧性,能够适配人体运动形变或应变,是医疗健康监测、人机交互及功能防护的可穿戴传感纺织品的理想材料,广泛应用于生理信号采集、运动监测、柔性织物触觉界面构建等[7-9]。

本文综述离子凝胶结构、性能、制备工艺及其在可穿戴传感纺织品中的应用研究进展,为功能集成化可穿戴传感纺织品的开发提供参考。

1 离子凝胶的结构与性能

1.1 离子凝胶的结构

离子凝胶主要由凝胶网络骨架与离子载体组成。凝胶网络骨架多为合成聚合物或离子凝胶与交联剂形成的网络结构,具备良好的生物相容性与可降解性。该类聚合物包括聚(乙烯-共-四氟乙烯)、聚甲基丙烯酸、聚乙烯醇、聚丙烯酰胺等。离子载体由离子液体(IL)或电解质溶液构成,在复合体系中充当填充相。IL具有非挥发性、电化学窗口宽、冰点低等特性,其在凝胶网络中具有较高的离子密度及迁移率;电解质溶液多为水合盐或盐类溶液,通常需要与水共存形成水凝胶载体,因此易挥发,易冻裂,在实践中需要严格控制凝胶含水量[10-11]。离子凝胶多以混合或复合方式调控材料的形状结构(如微孔、串珠结构等),或以添加导电填料(如碳纳米材料等)的方式提升离子凝胶电容效应,从而拓展导电路径[12]。密度决定材料的孔隙率,使材料形成三维网状支撑骨架。离子填充相以连续相填充骨架孔隙,形成“骨架包裹离子相”的互穿结构。骨架与填充相间存在一定间距的界面层,聚合物链段通过相互作用调整构象,形成有序过渡区,实现结构稳定。

1.2 离子凝胶的性能

1.2.1 电学性能

离子凝胶电学性能的机理源于“聚合物网络-离子载体”复合结构,该结构内部离子在电场、应变或压力刺激下迁移,因此离子凝胶的电导率受离子浓度、路径连通性、凝胶网络孔隙大小等多种因素影响[13-14]。据此可以将离子凝胶传感细分为3种机制:一是双电层机制。当凝胶受压时,内部网络发生形变,或填料与电极间距缩短,或引起凝胶微观结构改变。为克服上述形变,凝胶离子沿电场方向定向迁移。在凝胶与电极界面处,离子因无法穿过界面而堆积,形成双电层,双电层的变化可借助输出的电容型信号或电阻-电容型复合信号进行表征,从而实现对外界压力的检测。二是电阻变化机制。应变或压力使凝胶内部有效电导路径断裂、拉长或压缩,导致电阻发生改变,从而以电阻变化表征外界刺激。该机制多应用于填充导电颗粒或碳基材料的混合凝胶。三是耦合机制。温湿度、溶剂活度等与凝胶网络相互作用,引起结构形变,同时形变反过来调整凝胶温湿度、溶剂活度,从而对外界刺激作出反应。

1.2.2 力学性能

离子凝胶的力学性能可直接影响可穿戴传感纺织品的弯折、拉伸、压缩、缝合等服用性能,其力学性能由凝胶网络骨架、离子载体、填料与结构设计协同决定。凝胶网络骨架是由共价交联或物理缠结形成的凝胶基础力学架构,该框架受骨架分子链的柔性、聚合度及交联密度等因素影响。离子载体与骨架间的氢键、静电等界面作用力能够减少分子链团聚,增强凝胶网络韧性,同时IL的低挥发性可避免传统水凝胶因失水引发的材料脆化。在离子凝胶中引入填料能够抑制裂纹扩展,双网络中的刚性次级网络与柔性主网络可因应力分散而提升抗疲劳性,网络中的动态交联键可断裂重组以缓冲外力冲击[15-16]。

1.2.3 稳定性

离子凝胶交联网络通过调整交联密度改善稳定性,其中聚合物的亲水基团能够与IL的阳离子或阴离子形成强配位键,锁定溶剂分子;离子间的库仑力能够增强网络致密性,阻止溶剂挥发或相分离,解决凝胶水分丢失与结晶问题。需要注意的是,交联密度过高会引起凝胶的脆化。同时,离子凝胶部分体系中聚合物链的结晶区或疏水缔合作用,能够进一步加固网络骨架,提升结构稳定性。此外,外界温湿度、pH值及施加的机械应力均可对离子凝胶的稳定性产生影响,如温度过高会降低分子间作用力,pH值过高或过低则会引起亲水基团解离,破坏静电平衡,降低稳定性[17-18]。

2 离子凝胶的制备工艺

制备工艺的差异直接影响离子凝胶的微观结构、电学性能、力学性能及稳定性。为了与可穿戴传感纺织品适配,离子凝胶的制备工艺应满足以下条件:一是生产的连续化与规模化;二是微结构可控;三是多功能性嵌入;四是环境友好。目前离子凝胶的主要制备工艺包括溶液浇注与光固化工艺、湿法纺丝工艺、静电纺丝及双网络工艺。

2.1 溶液浇注与光固化工艺

溶液浇注与光固化是制备离子凝胶最常用的工艺,溶液浇注法适用于大面积柔性膜,光固化法适用于快速原位成形体系。图1为光固化杂化凝胶制备方法[19]。将聚合物单体、交联剂、光引发剂与IL或电解质混合均匀后倒入模具,利用加热或紫外线辐照引发交联聚合,制得三维离子凝胶网络[19]。上述工艺操作简单,产品厚度与形状可控,适合实验室小规模制备;缺点是难以制备连续长纤维或纱线,力学性能有限,不利于可穿戴纺织品制备[19]。

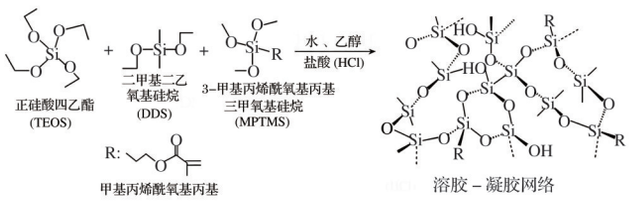


图1 光固化杂化凝胶制备方法

Fig.1 Preparation method of photocurable hybrid gel

随着工艺的进步，光固化等工艺已经与3D打印技术充分结合，并取得较好的应用效果。谢灏荻等[20]利用丙烯酰胺(AAm)、丙烯酸羟乙酯(HEA)及氯化胆碱(CHCL)制备一种可聚合低共熔溶剂(PDES)，以此为基材，利用数字光处理3D打印技术在紫外线辐照下引发自由基聚合，制备低共熔离子凝胶[P(HEA-*co*-AAm)-CHCL]。图2为离子凝胶3D打印工作原理[20]。结果表明：当可聚合单体与CHCL的物质的量之比为3.5∶1.0时，该离子凝胶离子电导率可达1.1×10^{-2} S/m；在此基础上，调整AAm与HEA的物质的量之比为1.0∶2.5，凝胶可见光透过率高达90%，应变系数达0.74，拉伸强度与断裂伸长率分别为2.81 MPa和1 200%。该研究可实现传感性能与循环性能的平衡，但3D打印与光固化的结合工艺仍有待优化。

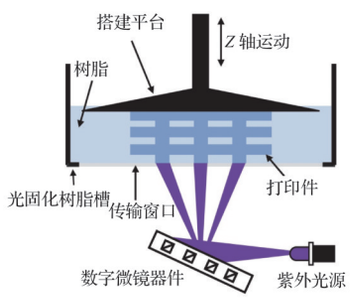


图2 离子凝胶3D打印工作原理

Fig.2 Working principle of iongel 3D printing

2.2 湿法纺丝工艺

湿法纺丝的主要流程为：将聚合物与IL共混制成纺丝液，经纺丝机喷出，注入凝固浴进行溶剂交换，使聚合物链凝固，IL被限域在纤维内，制成可拉伸、捻合的连续纤维。该工艺能够生产连续纤维，纤维直径、力学强度可控；缺点是生产工艺参数严苛，溶液黏度、凝固浴条件需要精准控制。LU等[21]采用湿法纺丝制备丝素@IL@甘油纤维，图3为湿法纺丝工艺流程。结果表明：该纤维拉伸强度超过500 MPa，延展性超过200%，电导率可达0.1 S/m，适用于危险识别。该工艺推动离子凝胶实现“纱线化、织物化”的制备；缺点是设备精准度要求较高。

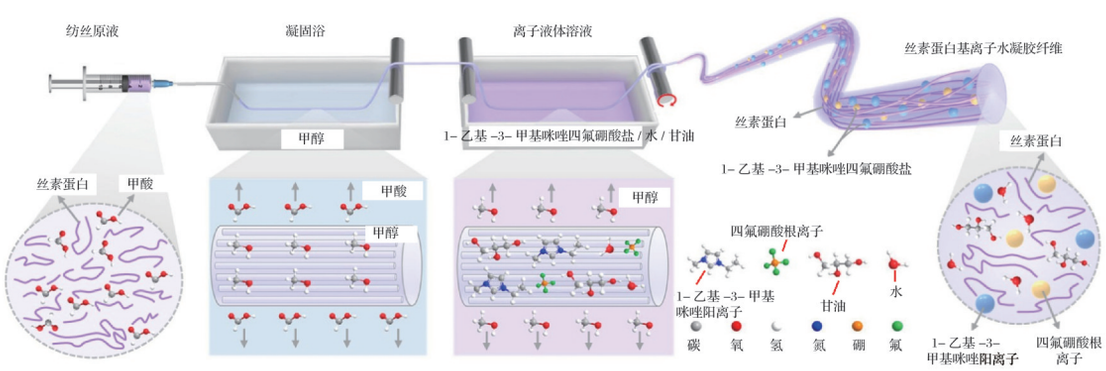


图3 湿法纺丝工艺流程

Fig.3 Process flow of wet spinning

2.3 静电纺丝工艺

静电纺丝是借助高电压将聚合物@IL溶液拉伸制成纳米纤维，沉积成无纺膜或纤维网。采用该工艺制备的纤维膜体薄、透气、比表面积大、舒适性良好，能够直接贴合于皮肤；缺点是生产效率低，难以规模化制备，膜体力学强度有限，不适合高负荷应用场景。CHEN等[22]采用静电纺丝工艺制备IL@热塑性聚氨酯(TPU)纳米纤维薄膜，应变检测限低至0.1%，温度灵敏度可达2.75%/℃，透气性良好，适用于呼吸与脉搏监测传感织物。ZHAO等[23]采用静电纺丝开发超薄离子凝胶纳米纤维膜，图4为静电纺丝纤维膜工艺流程。结果表明：该纳米纤维膜厚度低于100 μm，拉伸率可达300%，适合大幅形变的贴肤传感织物。

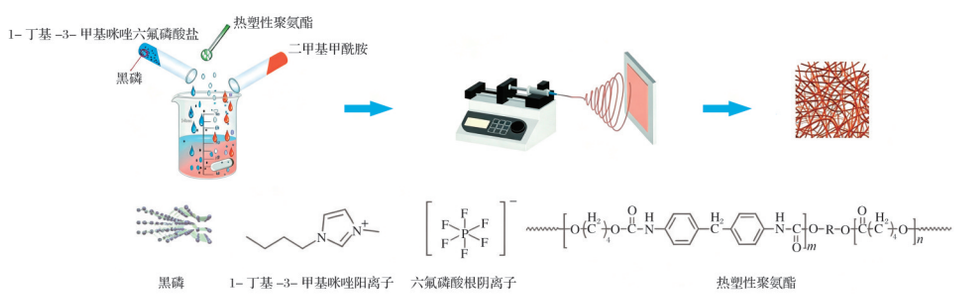


图4 静电纺丝纤维膜工艺流程

Fig.4 Process flow of electrospinning fiber membrane

2.4 双网络工艺

双网络凝胶由刚性网络与柔性网络构成，其中刚性网络为凝胶提供强度，柔性网络实现能量耗散与高延展性。具体制备工艺为：以化学交联形成刚性第一网络，再以物

理交联构建柔性第二网络，其间将IL原位包埋于网络孔隙中，形成互穿或半互穿的双网络结构。此外，也可由动态共价键构建双网络，该工艺使包埋的IL为自由移动的阴阳离子提供传输通道，基于离子迁移-形变响应的耦合效应提升材料的电导率，从而实现对力学或环境信号的精准传感。采用该工艺制备的离子凝胶兼具强度、柔性、抗裂纹扩展及耐疲劳性，适合多次循环与洗涤环境。孙靖先[24]将双网络构与原位光聚合法相结合，分别制备琼脂糖、丙烯酸羟乙酯双网络离子凝胶。结果表明：制备的双网络离子凝胶的断裂伸长率可达700%，拉伸强度仅为0.37 MPa，有待提升。张路[25]将制备4种不同电荷网络的双网络凝胶分别浸泡于[EMIM][DCA]与[EMIM][BF_4] IL中进行IL交换，而后掺杂银纳米线网格制成复合离子凝胶。结果表明：制备的聚(2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸)基离子凝胶透光率超80%，掺杂银纳米线后电导率从1.3×10^{-3} S/m提升至3.5×10^{-3} S/m，传感器应变灵敏度系数达23.0，可监测关节运动；缺点是拉伸强度仅为0.27 MPa。赖佳亮[26]采用“一锅法”构筑聚乙烯醇-戊二醛-聚(丙烯酸-*co*-丙烯酰胺)[Poly(AA-*co*-Am)]双网络有机-水凝胶，其中戊二醛交联的聚乙烯醇为第一网络，物理交联的Poly(AA-*co*-Am)为第二网络。将支链淀粉引入Poly(AA-*co*-Am)凝胶网络，制成具有可逆黏附性能的支链淀粉/Poly(AA-*co*-Am)有机-水凝胶。结果表明：该凝胶拉伸率超2 000%，压力传感器灵敏度高达8.77 kPa^{-1}，压力检测范围0~196 Pa，响应时间缩短至0.1 s，能够实现人体运动的实时无线监测；缺点是部分交联剂存在生物安全隐患，无线系统功耗优化空间较大。

3 离子凝胶在可穿戴传感纺织品中的应用

3.1 医疗健康

离子凝胶将IL固定在柔性高分子网络中，使凝胶兼具离子导电性、柔性、透气性、可拉伸性等，能够作为医疗健康传感监测纺织品的材料。TIE等[27]将丙烯基单体与IL混合，经紫外线引发聚合，制得一种物理交联(无共价交联)离子凝胶。结果表明：该凝胶具有高透明度(透明度92%，厚度为1 mm)、高拉伸性(可伸长至2 017%)及良好的循环稳定性(在50%应变下循环1 000次)与自修复能力(裂痕数分钟内完成闭合)。利用该凝胶制成的透明自修复离子凝胶传感器，具备温度及应变双模监测，能够监测温度、面部表情、关节弯曲等变化，应变响应区间相对较宽(600%)，性能稳定；缺点是将该凝胶集成到纺织品的难度较高，在汗液、洗涤等使用场景下的稳定性和界面可靠性仍有待研究。WANG等[28]利用湿法纺丝工艺将TPU和IL的混合液纺制成离子凝胶纤维，并将其织入织物，用于制备可穿戴应变及温度双模传感纺织品。结果表明：该纤维在0~700%拉伸区间内的电阻响应呈线性变化(相关系数0.997)，最低检测应变为0.05%，响应及恢复时间分别为0.173 s和0.120 s，具有较高的灵敏度。此外，该纤维的“S形”设计能够避免温度检测的应变干扰，在30%的应变下，温度误差低于±0.15 ℃。此工艺制备离子凝胶的纤维形态易于整合进纺织品，兼顾双模态检测的快速响应及线性变化稳定性；缺点是纤维-织物界面电极连接可靠性、耐疲劳性、耐湿性及洗涤稳定性仍须验证。WANG等[29]在丝织物上原位构建双网络离子凝胶，制备丝织物基离子凝胶应变、温度及触觉多模态传感织物。结果表明：该传感织物的机械强度与断裂韧性分别可达11.3 MPa与2.53 MJ/m^3，温度电阻系数低至-3.17 $℃^{-1}$，应变灵敏度为1.19，具有机械性能强、功能多样、环境适应能力强的特点；缺点是灵敏度相对有限，信号耦合处理复杂。ZHAO等[30]制备“串珠状”结构离子凝胶纤维，并在自制模具中织成传感纺织品。结果表明：该方法实现离子凝胶传感与纺织品一体化，纺织品自身即为传感器，具有集成度高、透气性好的特点；缺点是稳定性和接口可靠性较弱。YAN等[31]以核碱基为离子凝胶交联单元，制备腕带型传感器。结果表明：该传感器在30 d连续监测中信号衰减低于5%，具有良好的稳定性和环境抗扰能力，能够作为制备心电(ECG)及温度监测纺织品的材料；缺点是制作成本高，难以量产。YANG等[32]采用微气泡法制备高孔隙率离子凝胶，将其应用于柔性压力传感。结果表明：该传感孔隙率达95%以上，灵敏度高达684.4 kPa^{-1}，响应及恢复时间分别为0.092 s和0.084 s，能够检测从手指脉搏(<1 kPa)到脚底(>500 kPa)的压力信号，具有较高的灵敏度、较短的响应时间与较宽的压力范围；缺点是作为柔性膜结构，整合到纺织品时需要优化几何与接口稳定性。DONG等[33]利用浸渍将双网络离子凝胶原位聚合于棉针织布内，制备一种压力传感可穿戴纺织品。结果表明：该传感器在足底使用场景中表现出较高的灵敏度(86.90 kPa^{-1})和良好的耐久性，能够用于监测人体关节运动及步态。

离子凝胶在医疗健康可穿戴传感纺织品领域，兼具良好的柔韧性、舒适性、透气性和较强的可设计性，同时兼顾较高灵敏度和较快响应速度；缺点是信号易发生漂移，易受应用环境干扰，疲劳寿命短、耐久性及接口(电极-纺织-凝胶)稳定性差，难以规模化生产。

3.2 人机交互

通过虚拟及增强现实技术，采用离子凝胶制备的可穿戴传感纺织品可在一定程度上实现柔性贴合与可拉伸触控、触觉反馈的人机交互。XU等[34]采用浸渍法在纺织品上铺设银纤维导电网络，经原位聚合将电中性离子网络(IL+聚合物前驱体)固定于纺织结构孔隙，形成离子凝胶层，制备在纺织基底上原位生长的离子电界触控面板。结果表明：该触控面板柔韧性较好，不易变形，与人体皮肤贴合性良好，机械强度可达114 MPa，从银纤维(<0.003 g)到金属块(>10 kg)均可稳定工作，具有极强的抗加载干扰能力；缺点是工艺较复杂，对织物结构与电路布线要求较高。YAO等[35]将离子凝胶层与可拉伸纺织层整合，经微结构设计(微孔、通道、驱动电极布局)制备穿戴传感纺织品。结果表明：该纺织品将织物结构与电致驱动、电渗透机制、离子

驱动机制相结合，实现织物在形变/压变等触觉信号的反馈，适合作为贴肤人机界面材料；缺点是反馈信号强度弱，能耗高，驱动延迟。ZHANG等[36]将线形离子凝胶线材按辫子结构交错扣合，编织成可伸缩或可弯曲的可穿戴传感纺织品。结果表明：采用该结构设计的传感纺织品结构柔韧，有助于应力分散和结构稳定，适合于运动或形变检测；缺点是响应延迟，触控精度较差，控制和驱动复杂性较高。LIU等[37]在纤维或织物中引入光敏分子与纳米颗粒，同时注入离子凝胶，形成导电网络，制成可穿戴传感纺织品。结果表明：该纺织品在光照与形变共同作用下，能够产生可控电信号响应，该器件在交互界面设计中具有接口可编程与记忆响应特性；缺点是响应速度慢，功耗高，环境稳定性差。WANG等[38]以采用静电纺丝工艺制备的银纳米线-聚合物复合纤维作为外层电极，将一层类似砂纸的离子凝胶层夹在两层负载银纳米线的聚合物纳米纤维薄膜之间，开发一种三明治结构的离子凝胶触控与应变传感器。结果表明：该器件能够作为可穿戴触控或交互传感模块，具有较高的响应速度，能够用于高精度触控及压力检测。该设计结构简洁，工艺简单；缺点是耐磨性差。CHEN等[39]利用液态金属填充空心多孔纤维结构作为中轴，外围则包覆离子凝胶膜，作为触控层，设计一种纤维型电交互传感器。结果表明：该传感器在实现压力、温度、电触控的多功能交互的同时提升了接口交互能力；缺点是液态金属安全与稳定性差，纤维系统整合复杂性高。

离子凝胶可应用于人机交互可穿戴传感纺织品的触控、触觉反馈、光响应、温度与压力检测等多模态交互领域；缺点是离子界面驱动效率仍较低，信号易受温湿度等因素影响。

3.3 功能防护

离子凝胶还兼具高吸能性与结构可重构性等特性，可将其应用于可穿戴纺织品的抗冲击、紫外线屏蔽、热管理等功能防护领域。HUANG等[40]采用单步聚合法构建氢键与离子偶极相互作用网络。结果表明：制成的离子凝胶具有坚韧、透明、自愈等特性，在高速冲击下可吸能超过80 MJ/m^3，能够保护关键电子组件或纺织片段免受冲击损害；缺点是柔性与贴合性在防护结构中难以平衡，使其无法直接用于整件纺织品防护层。WANG等[41]将单体、IL和引发剂混合，以IL为柔化剂，调控聚合物网络中离子与聚合物的相互作用，而后经紫外固化制得玻璃态离子凝胶涂层。结果表明：该凝胶涂层在玻璃态下仍具有高压缩强度(在98%压缩应变时，极限压缩强度为2.3 GPa)与高能量吸收能力(断裂韧性高达1 219 MJ/m^3)，在高压快速冲击测试中表现出81.9%的能量耗散率(在70%压缩应变下)。该凝胶涂层厚度为500 μm，能够在冲击试验中有效保护玻璃基材不被破坏；缺点是凝胶为玻璃态涂层，其柔性和贴合性有限，在扭曲或大弯曲应用场景中的耐久性与疲劳稳定性仍须检验。LYU等[42]以高强度纤维或织物为骨架，将其与聚(丙烯酸-共-丙烯酰胺)/1-乙基-3-甲基咪唑三氟甲磺酸盐离子凝胶结合后进行固化，制成纤维增强型复合离子凝胶(FRCI)。结果表明：当FRCI厚度为1 mm时，纤维质量分数约为33.9%。此时，材料兼具高强高模、高撕裂韧性及高导电敏感性，在10 000次弯曲循环下仍无裂纹，不仅能够提供冲击防护，还能监测冲击强度，适用于冲击防护或传感可穿戴纺织品；缺点是凝胶厚度较大(1 mm)，影响纺织品舒适透气性。

CAO等[43]在IL掺杂液晶弹性体(LCE)网络中制备能够兼具温差响应(热电势约为25.8 mV/K)与形变驱动(可抓取)的热致响应/热电离子凝胶纤维。结果表明：该纤维适用于热管理与自适应热防护织物；缺点是机械稳定性有待改善。WANG等[44]利用离子凝胶前驱体溶液将纺织基底湿润，引发固化，制备了一种兼具透气性、防水性、抗紫外线性和传感能力的离子纺织品(i-textile)。结果表明：该织物在保持舒适透气性的同时兼具离子导电、电学传感及紫外防护性，在经过20次洗涤或以30%张力进行300次拉伸循环后仍能保持较好的电学稳定性，可用于运动监测传感器；缺点是该织物仅能阻挡部分紫外线，防护性能有限。HAO等[45]在离子凝胶中引入紫外线吸收剂单体，引发聚合反应，形成具有紫外线吸收功能的共聚网络，制备具有紫外线过滤与自愈功能的离子凝胶皮肤。结果表明：该凝胶皮肤兼具形变、温度和压力感知功能，可显著提高紫外线防护性能；缺点是紫外线吸收剂的引入影响离子迁移和整体导电性能。

离子凝胶在可穿戴传感纺织品的抗冲击、热管理及紫外线防护等多功能融合方面具有较大潜力，但在防护性与稳定性方面仍有待进一步研究。

4 结论

离子凝胶兼具柔性与传感性，在医疗健康、人机交互及功能防护等可穿戴传感纺织品领域展现出较大的应用潜力，但在实践应用中仍存在环境稳定性不足、耐久性缺乏和信号串扰等问题。未来，离子凝胶在可穿戴传感纺织品中的研究与应用可聚焦以下两大方向：一是通过开发双网络、自修复及多功能离子凝胶，同步提升材料的机械性能与环境适应性；二是将能量收集技术与AI算法相结合，构建自供能多模态智能纺织系统，助力可穿戴传感产品实现产业化。

参考文献

[1] 廖丽芳. 柔性可纺织涂碳纤维导电/传感性能研究[D]. 杭州：浙江理工大学, 2010.
[2] 王跃. 柔性透气电极的制备及其可穿戴摩擦电传感应用研究[D]. 南京：南京邮电大学, 2022.
[3] 吴钦鑫. 用于医用防护服的静电纺SiO_2/PVDF辐射降温纳米纤维膜以及传感系统的集成[D]. 上海：东华大学, 2021.
[4] 王梦琦. 基于可穿戴传感网络的泳姿监测与识别系统设计[D]. 上海：东华大学, 2022.
[5] 阮小莹, 贾可, 王胜男, 等. 可穿戴拉伸传感织物的研究进展[J]. 传感

器与微系统, 2021, 40(10): 10-13.
[6] 熊杰焘, 何荣祥, 曹一平. 高电导率抗冻离子凝胶的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊 1): 522-528.
[7] 张颖澳. 天然聚合物基柔性可穿戴离子凝胶的设计及其在人体运动健康监测中的应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
[8] 董裕, 李秋瑾, 巩继贤, 等. 离子凝胶-织物基柔性压力传感器制备与应用[J]. 针织工业, 2023(7): 23-27.
[9] 仲晓迪. 基于离子凝胶的可穿戴TENG传感器的制备及其人体行为识别应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
[10] 王平. 离子凝胶传感器及其自供电功能的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
[11] 罗欢. 聚合物/离子液体复合体系的分子链动力学与结晶行为研究及离子凝胶的制备[D]. 成都: 四川大学, 2022.
[12] 张士进. 离子液体掺杂弹性电子纤维构筑及其传感可穿戴性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2024.
[13] 吴延昊. 多功能聚合物基柔性离子导体的制备及其在柔性传感器中的应用[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
[14] 刘廷诉. 基于离子导电弹性体的多功能力敏传感器[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
[15] 赵苑, 尚琼, 刘现玉, 等. 离子导电凝胶在柔性压力与应变传感器中的应用及研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(9): 58-69.
[16] 王雨青. 抗疲劳聚乙烯醇离子凝胶的制备及其应变传感应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
[17] 郭浩宇, 郭传飞. 离电型电子皮肤: 材料、器件、系统及应用[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(5): 789-806.
[18] 靳力, 鞠苏, 贺雍律, 等. 聚合物离子凝胶基体体系、改性方法及应用研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(8): 89-101.
[19] 刘云鸿, 李光吉, 罗熙雯, 等. UV光引发表面接枝两性离子水凝胶层的制备及抗细菌黏附性能[J]. 高等学校化学学报, 2013, 34(6): 1527-1535.
[20] 谢灏荻, 张世杰, 刘灏, 等. 光固化3D打印可聚合低共熔导电凝胶[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 7-12.
[21] LU H J, ZHANG Y, ZHU M J, et al. Intelligent perceptual textiles based on ionic-conductive and strong silk fibers[J]. Nature Communications, 2024, 15: 3289.
[22] CHEN J W, WANG F, ZHU G X, et al. Breathable strain/temperature sensor based on fibrous networks of ionogels capable of monitoring human motion, respiration, and proximity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(43): 51567-51577.
[23] ZHAO H D, XIAO X F, JIN S P, et al. Breathable, durable, and ultrathin ionogel fiber sensors for strain and temperature sensing based on TPU and few-layer black phosphorus[J]. Materials Today Nano, 2025, 29: 100599.
[24] 孙靖先. 离子凝胶基柔性应变传感器研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
[25] 张路. 柔性传感银纳米线复合双网络离子液体凝胶的研制[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
[26] 赖佳亮. 耐温、保湿、导电凝胶的构筑及其柔性传感器[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
[27] TIE J F, MAO Z P, ZHANG L P, et al. Highly transparent, self-healing and adhesive wearable ionogel as strain and temperature sensor[J]. Polymer Chemistry, 2022, 13(27): 4064-4075.
[28] WANG F, CHEN J W, CUI X H, et al. Wearable ionogel-based fibers for strain sensors with ultrawide linear response and temperature sensors insensitive to strain[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(26): 30268-30278.
[29] WANG S, NING J L, PU J Y, et al. Ultrastrong silk fabric ionogel-sensor for strain/temperature/tactile multi-mode sensing[J]. Nano Materials Science, 2025, 7(3): 316-325.
[30] ZHAO Z M, JIANG H Y, YUAN H M, et al. Self-woven ionogel textile from beads-on-string fibers for highly sensitive sensor using a self-generated mold strategy[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 513: 162507.
[31] YAN X R, ZHAO R R, LIN H J, et al. Nucleobase-driven wearable ionogel electronics for long-term human motion detection and electrophysiological signal monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(2): 2412244.
[32] YANG Z W, WANG J X, WAN X, et al. Microbubble-based fabrication of resilient porous ionogels for high-sensitivity pressure sensors[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2024, 10: 177.
[33] DONG Y, LI Q J, ZHAO Z Q, et al. A wearable pressure sensor based on ionogel/textile for human motion monitoring[J]. Fibers and Polymers, 2022, 23(8): 2351-2363.
[34] XU R D, SHE M H, LIU J X, et al. Skin-friendly and wearable iontronic touch panel for virtual-real handwriting interaction[J]. ACS Nano, 2023, 17(9): 8293-8302.
[35] YAO K M, ZHUANG Q N, ZHANG Q, et al. A fully integrated breathable haptic textile[J]. Science Advances, 2024, 10(42): eadq9575.
[36] ZHANG P D, LI Q J, SUN Y J, et al. A braided construction of ionogels as a wearable sensor for human motion monitoring[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 364: 114794.
[37] LIU Z D, WU J C, WANG M, et al. A light-driven ionogel fabric synapse with strain-insensitivity and broadband response for textile photoperception[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(2): e10021.
[38] WANG J, CUI X H, SONG Y J, et al. Flexible iontronic sensors with high-precision and high-sensitivity detection for pressure and temperature[J]. Composites Communications, 2023, 39: 101544.
[39] CHEN J W, ZHU G X, WANG J, et al. Multifunctional iontronic sensor based on liquid metal-filled ho llow ionogel fibers in detecting pressure, temperature, and proximity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(5): 7485-7495.
[40] HUANG X Y, ZHU H Q, LI L F, et al. Tough, transparent, self-healing ionogel with exceptional moisture and impact resistance[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2025, 43(9): 1483-1495.
[41] WANG J Y, ZHANG S L, LI L L, et al. Glassy ionogels with high compressibility and strength for impact protection[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2025, 122(15): e2417978122.
[42] LYU X L, YU K, ZHANG H Q, et al. Tough fiber-reinforced composite ionogels with crack resistance surpassing metals[J]. Nature Communications, 2025, 16: 4005.
[43] CAO L Q, SUN T T, ZHAO H R, et al. An actuatable ionogel thermoelectric fiber with aligned mesogens-induced thermopower for four-dimensional dynamically adaptive heat harvesting[J]. Nature Communications, 2025, 16: 5445.
[44] WANG M, WANG X R, HE Z X, et al. Stretchable, washable, and anti-ultraviolet i-textile-based wearable device for motion monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(10): 13052-13059.
[45] HAO S, ZHANG TJ, CHEN X H, et al. Synthesis of UV-filtering, self-healing, and self-adhesion multifunctional ionogel for multimodal sensation ionic skins by electron beam irradiation[J]. ACS Materials Letters, 2025, 7(4): 1250-1259.