
清华大学张如范团队 Nat. Commun.：多功能辐射制冷气凝胶纤维织物

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42240.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

清华大学张如范团队 Nat. Commun.：多功能辐射制冷气凝胶纤维织物

。近日，清华大学化工系张如范副教授课题组在多功能辐射制冷织物研究方面取得重要进展，设计并制备了一种具有径向梯度多孔结构的细菌纤维素气凝胶纤维织物，成功解决了气凝胶纤维力学强度与冷却性能难以兼顾的矛盾，并实现了辐射冷却、力学防护与运动监测的一体化集成。为辐射制冷气凝胶纤维及户外个人热管理多功能纺织品提供了一种通用、可持续且可扩展的制备方法。

nature communications

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾

[nature](#) > [nature communications](#) > [articles](#) > article

Article | [Open access](#) | Published: 26 September 2026

Multifunctional Aerogel Fiber Radiative Cooling Fabric for Outdoor Personal Thermal Management

[Linan Feng](#), [Kangkang Wang](#), [Aike Xi](#), [Zhenyu Guo](#), [Weiyin Su](#), [Siming Zhao](#), [Ya Huang](#), [Zhuojing Zhao](#) & [Rufan Zhang](#) 

2026年9月26日，该工作发表在Nature Communications上，论文标题为用于户外个人热管理的多功能气凝胶纤维辐射冷却织物（Multifunctional Aerogel Fiber Radiative Cooling Fabric for Outdoor Personal Thermal Management）。论文通讯作者为清华大学化工系张如范副教授，第一作者为清华大学化工系博士后冯李楠。

【背景介绍】

辐射制冷（Radiative cooling）是一种利用热辐射实现降温的被动制冷技术，可以在强阳光照射下

实现零能耗的亚环境制冷，有望成为传统高耗能制冷设备（如空调）的替代方案，对缓解能源危机和全球变暖具有重要意义。辐射制冷织物通过反射太阳辐射并利用大气透明窗口将人体热量辐射至外太空，可实现零能耗降温，在个人热管理领域具有广阔前景。

然而，传统织物很难同时满足高效冷却、力学强度和传感功能等多重需求。气凝胶纤维因其高孔隙率和良好的辐射冷却能力受到关注，但其多孔结构往往导致机械强度不足，限制了实际穿戴应用。细菌纤维素作为一种可持续生物基材料，具有高结晶度、低热导率和丰富的表面官能团，但其折射率适中，光散射效率有限，难以直接实现高太阳反射率。因此，如何在保持气凝胶纤维高孔隙率的同时提升其力学性能，并赋予其多功能集成能力，是该领域亟待解决的关键问题。

【本文亮点】

- 1、提出梯度凝固浴湿法纺丝技术，在单根纤维内部构筑致密褶皱外壳+多孔内核的径向梯度结构，解决了气凝胶纤维力学强度与冷却性能难以兼顾的矛盾。
- 2、梯度多孔结构通过多尺度光散射协同作用，使织物太阳反射率达到94.7%，中红外发射率达到97.3%，户外降温效果比商用棉织物低8.5 °C。
- 3、外壳微米级褶皱通过弹性变形耗散冲击能量，内核纳米纤维网络提供机械支撑，拉伸强度达50 MPa，抗冲击性能比对照样品提升42.8%。
- 4、基于该织物的自供电传感器可实时监测人体运动状态，在出汗环境下仍能清晰识别，为智能运动纺织品提供了新思路。

【图文解析】

本工作中，作者通过梯度凝固浴湿法纺丝技术，使细菌纤维素溶液依次经过高浓度和低浓度凝固浴，在单根纤维内部形成致密褶皱外壳与多孔内核的径向梯度结构。高浓度凝固浴使纤维表面快速相分离，形成致密褶皱外壳；低浓度凝固浴则使内部缓慢相分离，形成有序多孔内核（图1a-d）。图中还给出了织物的实物照片、太阳反射率与红外发射率光谱，以及与棉、羊毛、DS-BCAF等织物的性能对比雷达图。结果显示，GP-BCAF织物的太阳反射率达到94.7%，中红外发射率达到97.3%（图1e-f）。

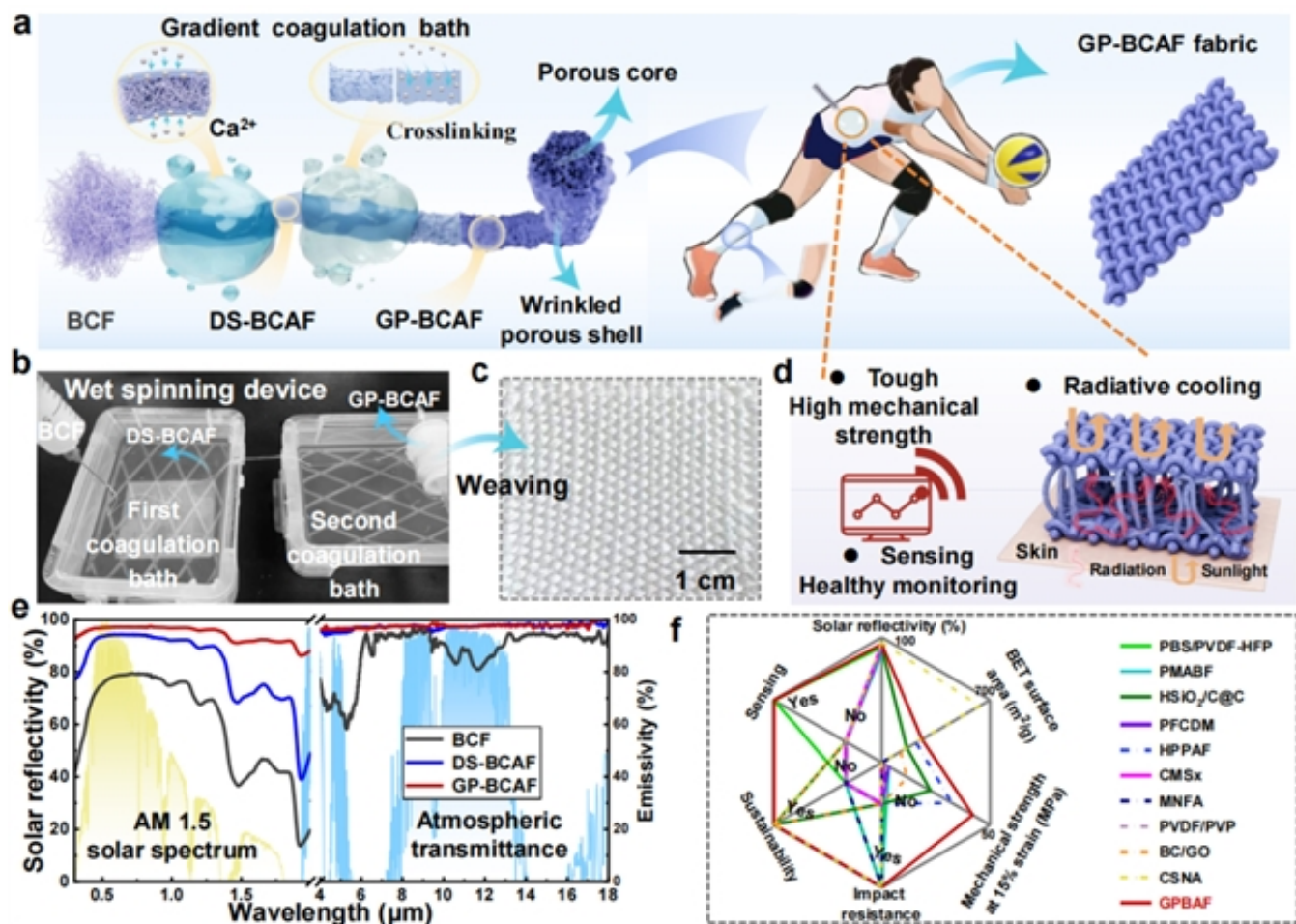


图1. GP-BCAF织物的制备与表征

FTIR和XPS结果证实，硅烷化处理后纤维表面成功引入了Si-O-Si和Si-C键，且修饰贯穿整个纤维截面（图2a-c）。SEM图像显示，DS-BCAF纤维呈光滑壳层结构，而GP-BCAF纤维具有明显的褶皱外壳和多孔内核（图2d-g）。XRD谱图表明，GP-BCAF的结晶结构发生了适度变化（图2h）。BET测试进一步显示，GP-BCAF的比表面积和孔体积均高于DS-BCAF，孔径分布覆盖微孔、介孔和大孔，为多尺度光散射提供了结构基础（图2i-j）。

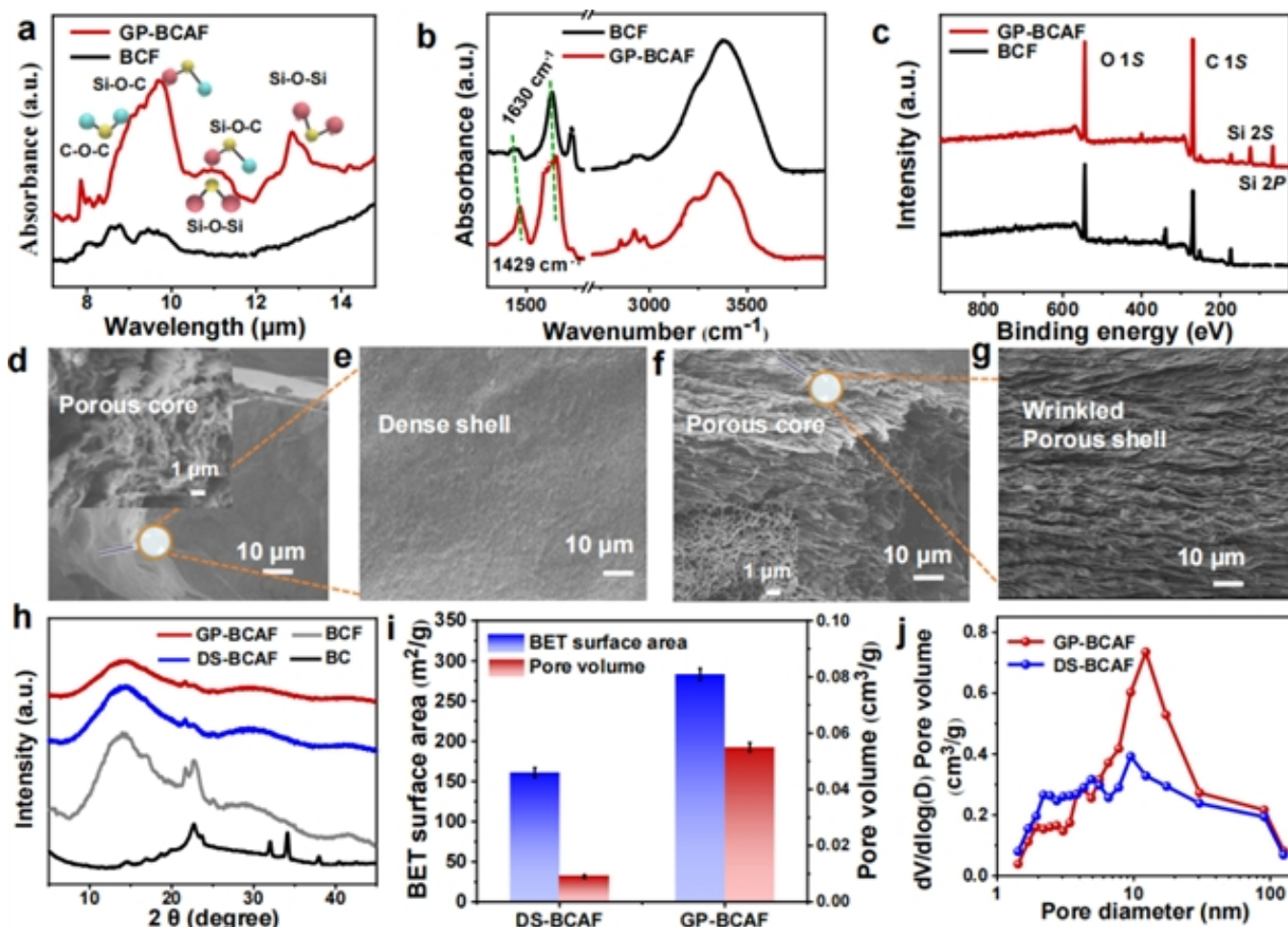


图2. GP-BCAFs的化学和结构表征

透气性和水蒸气透过率测试表明，GP-BCAF织物的舒适性与棉织物相当（图3a-c）。在2025年9月7日北京户外测试中，GP-BCAF织物在太阳照射下的最终温度比棉织物低8.5 $^{\circ}\text{C}$ ，比羊毛低6.2 $^{\circ}\text{C}$ ，比DS-BCAF低1.8 $^{\circ}\text{C}$ （图3d-g）。人体前臂测试进一步显示，覆盖GP-BCAF织物的皮肤温度比裸露皮肤低7.4 $^{\circ}\text{C}$ ，比棉织物低2.8 $^{\circ}\text{C}$ ，比DS-BCAF低1.4 $^{\circ}\text{C}$ 。上述结果验证了该织物在真实户外环境中的高效降温能力（图3h-j）。

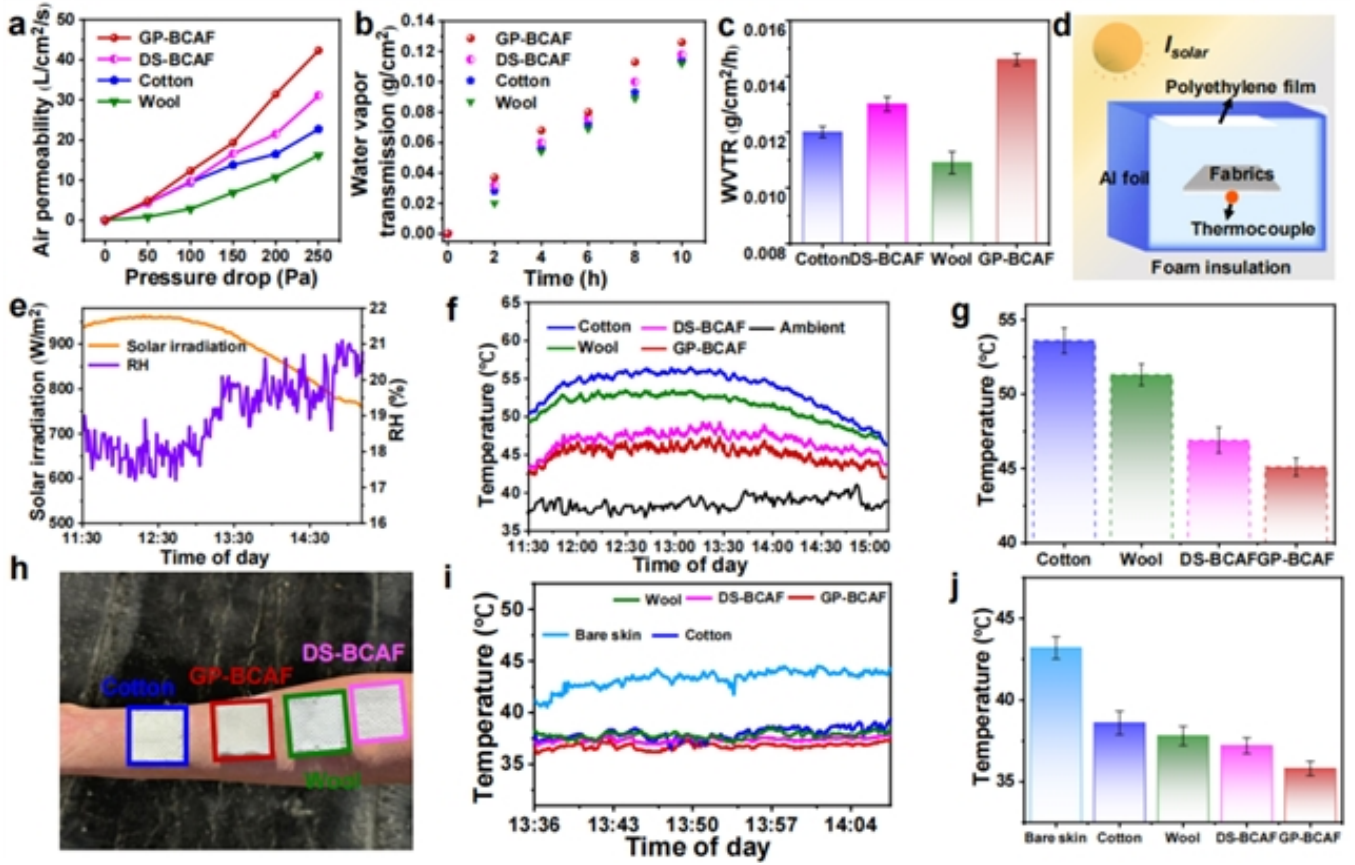


图3. 织物的舒适性与户外降温性能

应力-应变曲线显示，GP-BCAF的拉伸强度达到50 MPa，断裂伸长率为23%，均显著高于DS-BCAF（图3a-b）。单根纤维可承受100 g拉伸载荷而不断裂（图3c）。模拟结果表明，梯度多孔结构能有效分散应力，避免应力集中（图3d-e）。落锤冲击测试中，GP-BCAF织物的峰值冲击力比DS-BCAF低42.8%，缓冲时间更长，表明其具有更好的动态防护性能（图3f-h）。

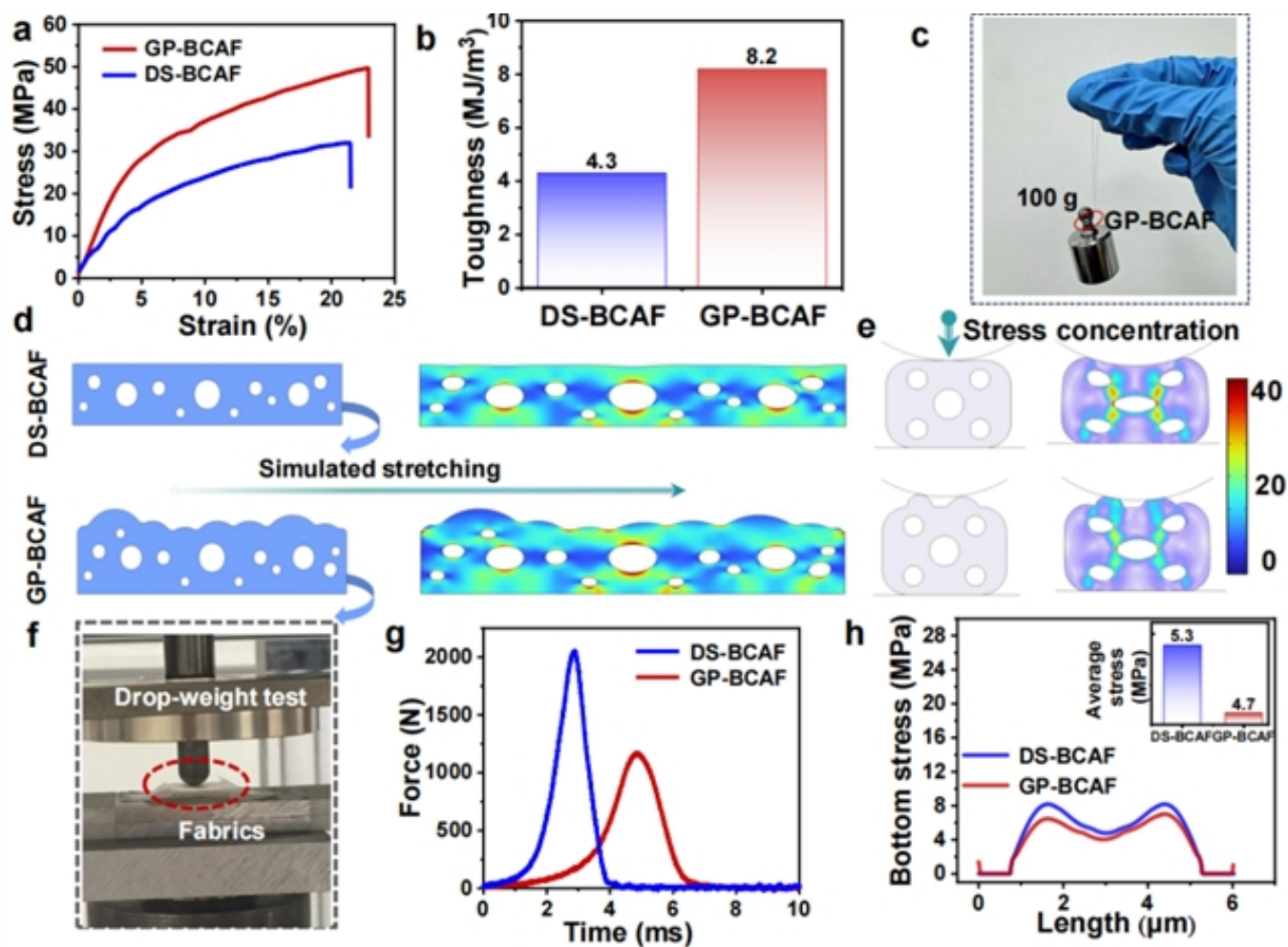


图4. 织物的机械性能与抗冲击性能

该织物可通过连续纺丝和编织实现规模化制备，并具有良好的柔软度和柔韧性（图5a-e）。将其集成到摩擦纳米发电机中，可实时监测运动、静止、冲击及冲击后继续运动等不同状态下的电压信号，且在出汗环境下仍能清晰识别（图5f-i）。冲击对比照片显示，GP-BCAF织物能有效保护木板免受冲击损伤。红外热像图进一步表明，在户外阳光下穿着GP-BCAF织物时，皮肤表面温度明显低于对比织物。

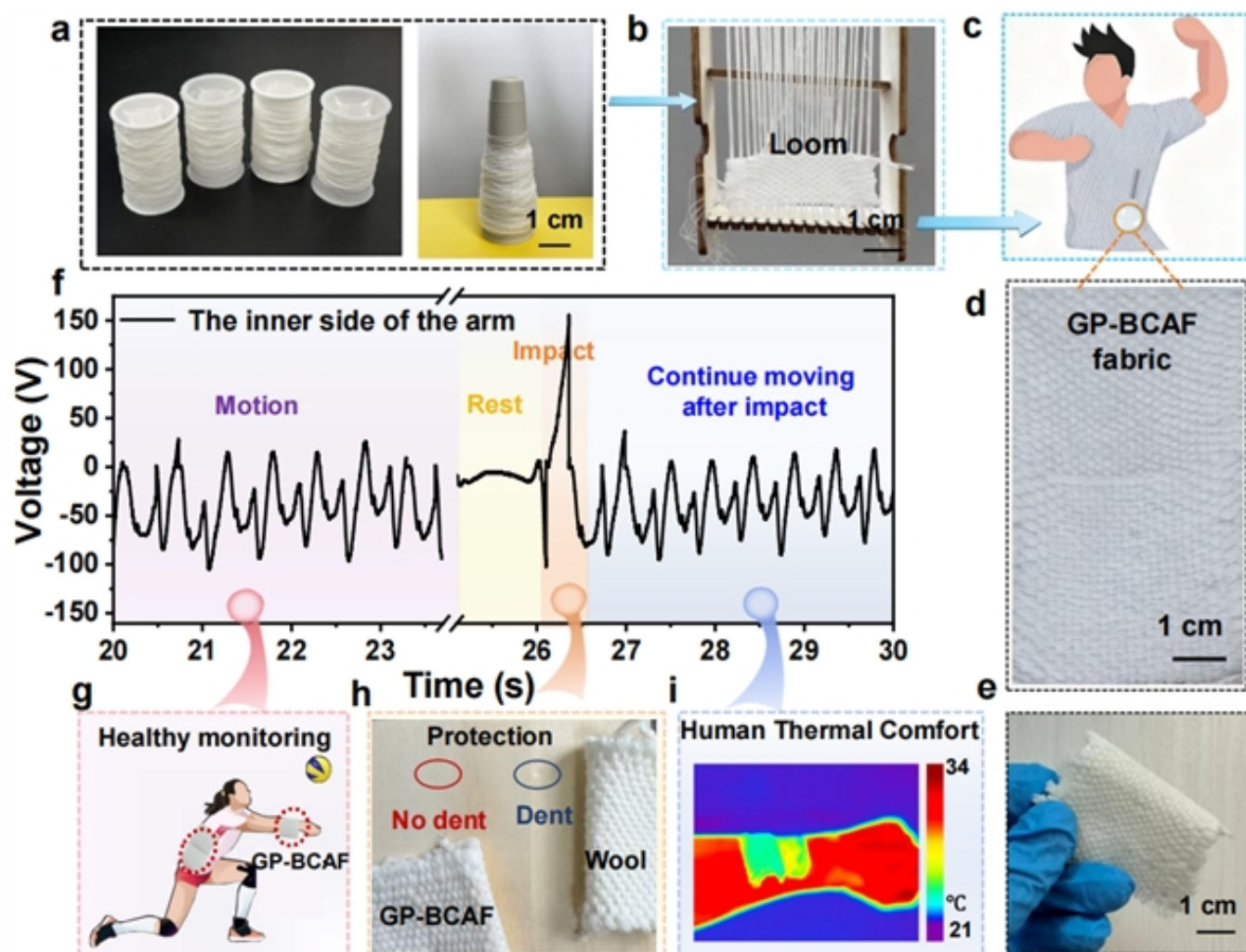


图5. GP-BCAF织物的多功能应用及性能

本工作为高性能辐射冷却气凝胶纤维的连续化制备提供了新方法，也为多功能智能户外热管理纺织品的的设计提供了新思路。

原文链接：

<https://doi.org/10.1038/s41467-026-77997-w>

通讯作者介绍：

张如范，清华大学化学工程系长聘副教授、特别研究员、博士生导师、国家高层次青年人才计划入选者、中国颗粒学会青年理事、中国化学会奖励推荐委员会委员，Smart Materials and Devices客座主编, Coatings、Processes编委，SusMat、Carbon Future、Carbon Energy、Carbon Neutralization、Carbon and Hydrogen、Particuology、Clean Energy及Exploration青年编委。主要从事纳米碳材料以及光热调控纳米材料的可控制备与性能表征及应用等方面的研究，共发表论文164篇，其中以第一/通讯作者身份在Science、Nature Nanotechnology、Nature Sustainability、Science Advances、Nature Communications、J. Am. Chem. Soc.、Angew. Chem. Int. Ed.、Advanced Materials等国际知名期刊发表论文一百多篇。主持军委科技委重点项目、军委科技委基础加强项目、国家

自然科学基金委面上项目、中石化重点项目等项目十余项。申请发明专利20余项，撰写学术专著7部。曾获中国纺织工业联合会科学技术奖自然科学奖一等奖(2026)、第五届青山科技奖(2026)、中国颗粒学会自然科学一等奖(2024)、中国石油和化学工业联合会科技进步二等奖(2025)、中国石油和化学工业联合会青年创新奖(2024)、中国石油和化学工业联合会首届彤程青年研发基金(2023)、中国纺织工业联合会自然科学二等奖(2024)、中国化工学会侯德榜化工科学技术青年奖(2019)、中国化学会青年化学奖(2018)、《麻省理工科技评论》中国区35岁以下科技创新35人(2018)、中国新锐科技人物(2018)、中国材料研究学会全国超材料优秀青年学者(2024)、全球华人化工学会未来化工学者(2024)、美国工程化科学协会杰出创新奖(2025)、瑞士乔诺法(Chorafas)青年研究奖(2015)等奖励。

来源：Nature Communications

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发