

## 蓬松结构相变纤维应用于人体冷防护\*

戴鹤男<sup>1)2)</sup> 张施慧<sup>2)</sup> 邓成鑫<sup>2)</sup> 史全<sup>2)</sup> 张志华<sup>1)</sup>  
刘汉卿<sup>2)</sup> 寇艳<sup>2)†</sup> 魏争<sup>1)‡</sup>

1) (大连交通大学材料科学与工程学院, 大连 116028)

2) (中国科学院大连化学物理研究所, 热化学实验室, 大连 116023)

(2025年9月5日收到; 2025年10月28日收到修改稿)

相变纤维作为人体热量管理领域的新型功能材料, 其应用价值日益凸显. 然而, 现有研究体系存在显著的局限性: 基于湿法纺丝工艺制备的单根相变纤维和静电纺丝技术构建的相变纤维薄膜, 因其结构致密性不足导致隔热性能欠佳, 难以有效阻遏寒冷环境下的体温散失. 针对这一技术瓶颈, 本研究突破传统材料体系限制, 创新性地采用静电纺丝技术将聚乙二醇引入聚丙烯腈纤维体系, 通过非溶剂诱导相分离过程, 成功制备出兼具相变温度调节特性和高效隔热性能的蓬松结构相变纤维. 蓬松纤维内部形成的多孔结构可构建高效冷屏蔽层, 其热导率低至  $0.0395 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 同时, 聚乙二醇相变组分赋予材料优异的相变潜热 ( $80.6 \text{ J/g}$ ), 实现了温度调节与隔热保温的协同作用. 该材料表现出优异的结构与热稳定性, 在经历 500 次热循环后仍保持稳定的相变性能, 并在温度低于  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时具备良好的热可靠性. 即使在相变熔点以上, 材料仍能有效防止相变组分泄漏. 同时, 其良好的机械性能可满足弯曲、压缩 ( $668.7 \text{ Pa}$ ) 及拉伸 ( $253.5 \text{ kPa}$ ) 等多种形变需求, 未发生结构塌陷. 人体热管理实验进一步证实, 其冷防护性能显著优于传统棉花材料. 本研究不仅提供了一种“储热-隔热”一体化纤维的创新制备方案, 更从原理上拓展了相变纤维在热管理中的设计维度, 为开发高性能可穿戴冷防护材料提供重要的解决方案和理论指导.

**关键词:** 蓬松结构相变纤维, 聚乙二醇, 聚丙烯腈, 人体冷防护**DOI:** 10.7498/aps.75.20251213**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251213

## 1 引言

相变纤维作为个人热量管理领域的前沿解决方案, 通过相变材料 (phase change materials, PCMs) 的可逆相变过程实现动态温度调控, 在可穿戴热管理系统中展现出显著的应用潜力<sup>[1-3]</sup>. 当前研究主要集中于两类体系: 基于湿法纺丝工艺制备的单根相变纤维<sup>[4-8]</sup> 和通过静电纺丝技术构建的相变纤维薄膜<sup>[9-13]</sup>. 然而, 这些现有体系存在显著

的技术瓶颈, 其热管理机制仅依赖 PCMs 的相变潜热, 而纤维的结构设计未能协同解决隔热问题, 严重制约了相变纤维在寒冷环境下的应用性能.

传统天然纤维 (如羊毛、棉花) 虽然凭借其固有的蓬松多孔结构展现出良好的隔热性, 但在与 PCMs 复合时面临显著的技术挑战. 例如, 通过真空浸渍或化学接枝等复合工艺会严重损害纤维的柔韧性和穿着舒适性<sup>[14-16]</sup>. 另外, 天然纤维的吸湿特性会显著降低材料的隔热性能<sup>[17]</sup>. 相比之下, 合成纤维具有独特的综合优势: 优异的防潮性能保障

\* 辽宁省科技联合计划 (批准号: 2024JH2/102600006)、辽宁省自然科学基金 (批准号: 2025-MS-057, 2025-BS-0135) 和国家自然科学基金 (批准号: 22503101, 52171229, 52572022, 12204084) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kouyan@dicp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhengwei@djtu.edu.cn

了材料在潮湿环境下的稳定性, 轻质特性满足穿戴舒适性需求, 而低热导率则提供了卓越的隔热基础, 这些特性使其成为当前最具发展前景的隔热材料<sup>[18-21]</sup>. 然而, 合成纤维与 PCMs 复合时容易发生不可逆的结构塌陷和 PCMs 泄漏问题, 这些技术瓶颈凸显了开发兼具高效相变储能和结构稳定性的新型冷防护材料的迫切需求<sup>[22]</sup>.

基于此, 本研究通过静电纺丝技术协同非溶剂诱导相分离 (nonsolvent-induced phase separation, NIPS) 策略, 成功构建了具有蓬松结构的聚乙二醇/聚丙烯腈相变纤维, 实现了相变调温和保温隔热的双重冷防护功能. 通过纤维间搭建的气穴结构, 形成高效的冷屏蔽层, 实现  $0.0395 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的超低热导率. 聚乙二醇相变组分的引入赋予材料优秀的相变潜热 ( $80.6 \text{ J/g}$ ), 超过 500 次的热循环稳定性, 并在温度低于  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时保持热稳定. 即使在相变熔化温度以上, 该材料仍不会发生泄漏风险. 此外, 其良好的机械性能可满足弯曲、压缩 ( $668.7 \text{ Pa}$ )、拉伸 ( $253.5 \text{ kPa}$ ) 等复杂的形变需求. 在实际的人体热管理实验中, 该材料的冷防护性能显著优于传统天然棉花, 内部最大温差高达  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ . 该研究有望为开发新一代智能冷防护纺织品提供重要的解决方案和理论指导.

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料

聚乙二醇 (PEG) ( $M_w \approx 800$ ), 聚丙烯腈 (PAN) ( $M_w \approx 149000-151000$ ) 购自上海阿拉丁科技有限公司; N, N-二甲基甲酰胺 (DMF) 购自广州光华科技有限公司; 所有材料未经进一步处理, 直接用于样品制备.

### 2.2 蓬松结构相变纤维的制备

首先, 将 PEG 和 PAN 以 5:5, 6:4 和 7:3 的质量比溶解于 DMF 溶剂中, 配制质量浓度为 10% 的预纺丝溶液. 随后, 将上述溶液装入 10 mL 注射器中, 在 80% 的相对湿度条件下以  $3 \text{ mL/h}$  的进料速率进行静电纺丝. 静电纺丝设置正极电压为  $18 \text{ kV}$ , 针头与收集器之间的距离为  $15 \text{ cm}$ . 纺丝结束后, 将相变纤维置于  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中干燥处理, 以去除水分和溶剂, 从而得到蓬松结构的 PEG/PAN 相变纤维.

## 2.3 表征与测试

使用 Empyrean-14 型 X 射线衍射仪 (XRD) 在  $40 \text{ kV}$  和  $40 \text{ mA}$  的测试条件下分析材料的分子结构. 通过 JEM-2100 型扫描电子显微镜 (SEM) 在  $3 \text{ kV}$  的电压下研究材料的结构和微观形态. 使用 Discovery 差示扫描量热仪 (DSC) 在氮气 ( $\text{N}_2$ ) 气氛下以  $50 \text{ mL/min}$  的流速进行测试, 以分析材料的相变性能. 通过在相变区域外推 DSC 曲线来确定相变温度, 同时根据与相变相关的热流变化计算相变焓. 其中, 温度精度在  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  以内, 焓测量的标准精度在  $\pm 1\%$  以内. 通过热常数分析仪 (TC3100) 测量了相变纤维的热导率. 每个样品在室温下测量 3 次, 然后将结果取平均值, 仪器的精度为  $\pm 3\%$ . 使用 TA-SDT Q600 型热重分析仪 (TG) 在  $\text{N}_2$  气氛下以  $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$  的升温速率在  $50-600 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内评估了材料的热稳定性. 采用自建的自动加热和冷却装置对相变纤维的热循环稳定性进行测试, 样品在  $0-50 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内进行加热和冷却<sup>[23]</sup>. 每经历 100 次循环, 使用 DSC 进行相变潜热测试, 直至 500 次循环结束. 使用拉伸强度测试仪 (DR-502) 对材料的拉伸应力-应变 ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲线进行测试. 利用动态机械分析仪 (DMA Q800) 测试了材料的压缩应力-应变 ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲线. 在冷防护应用实验中, 使用便携式温度记录仪 (LY-RTH1000B) 和热红外成像仪 (TiS75+) 对材料的温度进行测定, 温度的测量精度估计在  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内.

## 3 结果与讨论

### 3.1 制备原理与材料展示

在静电纺丝制备过程中, 纺丝液的相均匀性是确保后续纤维组分均匀性的关键. 如图 1(a) 所示, 将不同 PEG/PAN 质量比的纺丝液静置 6 h 后进行观察. 结果表明, 当 PEG/PAN 质量比为 5:5 和 6:4 时, 纺丝液均保持优异的相均匀性, 未出现明显的相分离现象. 然而, 当 PEG/PAN 质量比增至 7:3 时, 纺丝液出现了明显的分层现象. PEG 作为蓬松结构相变纤维的核心储能材料, 其负载量直接决定了材料的储能密度. 为保证纺丝液的长期稳定性, 同时实现相变组分的最优负载, 最终确定 PEG/PAN 质量比为 6:4 为最佳纺丝液配比, 该比例为后续制备高性能相变纤维奠定基础.

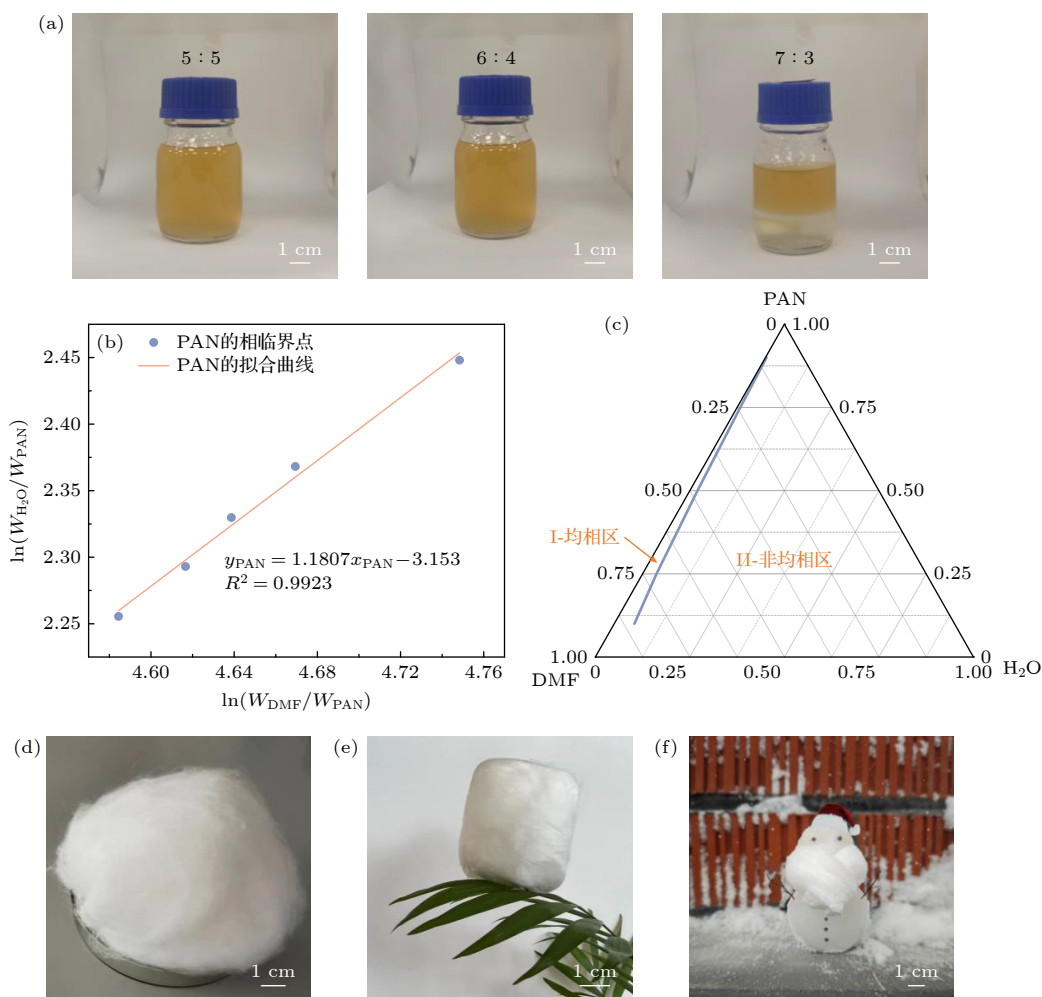


图 1 蓬松结构相变纤维的制备原理和展示照片 (a) PEG/PAN 纺丝液组成为 5:5, 6:4, 7:3 时的相稳定性展示; (b) PAN-H<sub>2</sub>O-DMF 的浊点曲线; (c) PAN-H<sub>2</sub>O-DMF 体系的三元相图; (d) PEG/PAN 相变纤维的展示照片; (e) 超轻的 PEG/PAN 相变纤维立于树叶表面; (f) 在寒冷环境下 PEG/PAN 相变纤维穿戴于雪人的冷防护演示照片

Fig. 1. Preparation principle and demonstration photographs of fluffy structure phase change fibers: (a) Demonstration of phase stability for PEG/PAN spinning solutions with different mass ratios (5:5, 6:4, and 7:3); (b) cloud point curve of the PAN-H<sub>2</sub>O-DMF system; (c) ternary phase diagram of the PAN-H<sub>2</sub>O-DMF system; (d) photograph of phase change fibers; (e) the ultra-lightweight PEG/PAN phase change fibers standing on a leaf surface; (f) cold protection demonstration of the PEG/PAN phase change fibers applied on a snowman under freezing conditions.

聚合物-溶剂-非溶剂三元体系的分相行为是形成蓬松结构纤维的关键机制<sup>[22,24,25]</sup>, 本研究采用浊点滴定法对 PAN-H<sub>2</sub>O-DMF 三元体系的分相行为进行系统研究. 在该体系中, PAN 可溶于良溶剂 DMF 形成均相溶液, 而 H<sub>2</sub>O 作为 PAN 的非溶剂, 将其加入会诱导 PAN 发生相分离. 浊点滴定实验步骤如下: 首先分别配制体积分数为 0, 15%, 30%, 45% 和 60% 的 DMF 水溶液作为滴定剂. 同时, 配制质量分数为 1% 的 PAN/DMF 溶液作为待滴定的均相标准溶液. 滴定过程在 25 °C 的恒温环境下进行, 将滴定液缓慢滴加至标准溶液中, 直至溶液从澄清变至浑浊, 且经摇晃后浑浊现象仍持

续存在, 此时判定为滴定终点. 记录所消耗的滴定液体积, 计算并绘制浊点线性曲线和 PAN-H<sub>2</sub>O-DMF 体系的三元相图. 详细的实验步骤和计算过程见参考文献<sup>[26]</sup>.

如图 1(b) 所示, 浊点线性曲线的线性相关系数 ( $R^2$ ) 大于 0.99, 表明实验数据与经验模型高度符合. 据此绘制 PAN-H<sub>2</sub>O-DMF 三元相图 (图 1(c)), 浊点曲线将相图清晰地划分为均相区 (I) 与非均相区 (II). 其中, 均相区为单相体系, 此时三元相均匀混合; 而非均相区代表多相区域, 表示体系发生相分离. 该体系的非均相区面积显著大于均相区, 说明 H<sub>2</sub>O 对于 PAN 具有极强的固化能力.

在静电纺丝过程中,雾化的非溶剂 ( $H_2O$ ) 与射流中的溶剂 (DMF) 发生快速交换,诱导 PAN 发生剧烈的非溶剂诱导相分离,使其在纺丝路径中迅速固化,最终在收集器上形成蓬松的纤维结构. 这种基于非溶剂诱导相分离原理制备的 PEG/PAN 相变纤维,通过精确调控相分离动力学过程实现蓬松、超轻的特性,其可以轻松地立于树叶表面,展现出在寒冷环境下用于人体冷防护的应用潜力 (图 1(d)—(f)).

### 3.2 分子结构和微观结构

图 2 展示了 PEG/PAN 相变纤维的 XRD 衍射图谱. 在  $2\theta = 19^\circ, 23^\circ$  处观察到两个强烈而尖锐的衍射峰,其位置与 PEG 的特征峰一致,表明 PEG 已成功负载于纤维体系中 [23,27,28]. 此外,采用 SEM 对纯 PAN 纤维和 PEG/PAN 复合相变纤维的微观形貌进行表征. 如图 3(a) 所示,静电纺丝法制备的 PAN 纤维具有均匀的纤维直径. 在 PEG/PAN 复合材料体系中,SEM 图像 (图 3(b)) 清晰显示 PEG 紧密附着于 PAN 纤维表面. PEG 通过分子间相互作用与聚合物纤维建立紧密的结合.

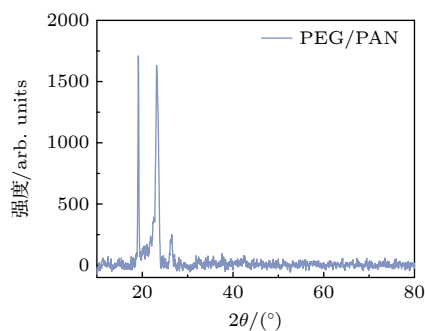


图 2 PEG/PAN 相变纤维的 XRD 图  
Fig. 2. XRD image of PEG/PAN phase change fibers.

### 3.3 相变性能和热性能

固-液 PCMs 的形状稳定性是制约其实际应用的关键性能指标. 图 4(a), (b) 分别展示了纯 PEG 和蓬松结构 PEG/PAN 相变纤维在  $20^\circ C$  和  $40^\circ C$  的宏观形貌变化. 在  $20^\circ C$  (低于 PEG 相变温度) 时,两种材料均保持固态,表现出良好的形状稳定性. 然而,当温度升至  $40^\circ C$  (高于 PEG 相变温度) 时,纯 PEG 因完全熔融渗透至滤纸表面. 相比之下,PEG/PAN 相变纤维仍能保持稳定的蓬松结构,未观察到明显的 PEG 泄漏. 这种显著的形状稳定性

差异主要归因于 PAN 纤维基体与 PEG 的分子间相互作用,能够有效限制熔融态 PEG 的流动,即使在高温环境下仍能保持优异的结构稳定性 [29].

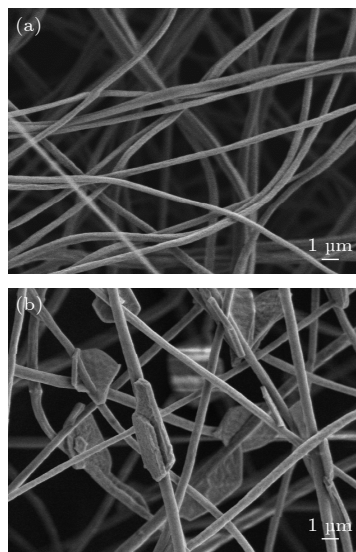


图 3 (a) 纯 PAN 纤维和 (b) PEG/PAN 相变纤维的 SEM 图  
Fig. 3. SEM images of (a) pure PAN fibers and (b) PEG/PAN phase change fibers.

相变材料通过在低温环境下释放热量,在高温环境下存储热量的可逆相变过程,实现热能的高效存储与调控. PEG/PAN 相变纤维的主动热管理性能主要由其相变特性决定,其 DSC 曲线如图 4(c) 所示,相应的相变热参数汇总于表 1. 纯 PEG 的熔化起始温度 ( $T_m$ ) 为  $25.1^\circ C$ . 与 PAN 复合后,复合相变纤维表现出与纯 PEG 相似的吸热和放热行为,其  $T_m$  略微降低至  $21.8^\circ C$ ,这一温度仍处于人体舒适温度范围内,表明材料适用于人体热管理应用. 潜热 ( $\Delta H$ ) 是衡量相变材料储能性能的核心指标,直接影响热管理系统的能量密度. 虽然 PAN 基体本身不贡献潜热,导致 PEG/PAN 复合相变纤维的潜热有所降低,但其熔化焓 ( $\Delta H_m$ ) 和结晶焓 ( $\Delta H_c$ ) 仍保持在  $80.6 J/g$  和  $71.3 J/g$  的较高水平,表明 PEG/PAN 相变纤维具有优异的储能能力.

在寒冷环境中,材料的隔热特性对人体生理防护起着至关重要的作用. 通过有效阻隔热传导,将人体核心温度维持在安全的温度范围内,从而预防冻伤乃至致命性低体温症的发生. 在此,通过热常数分析仪 (TC3100) 对样品的热导率进行分析. 如图 4(d) 所示,PEG/PAN 相变纤维在室温条件下 ( $25^\circ C$ ) 展现出接近空气的极低热导率 ( $0.0395 W/(m\cdot K)$ ),与文献 [3,30–34] 中已报道用于冷防护

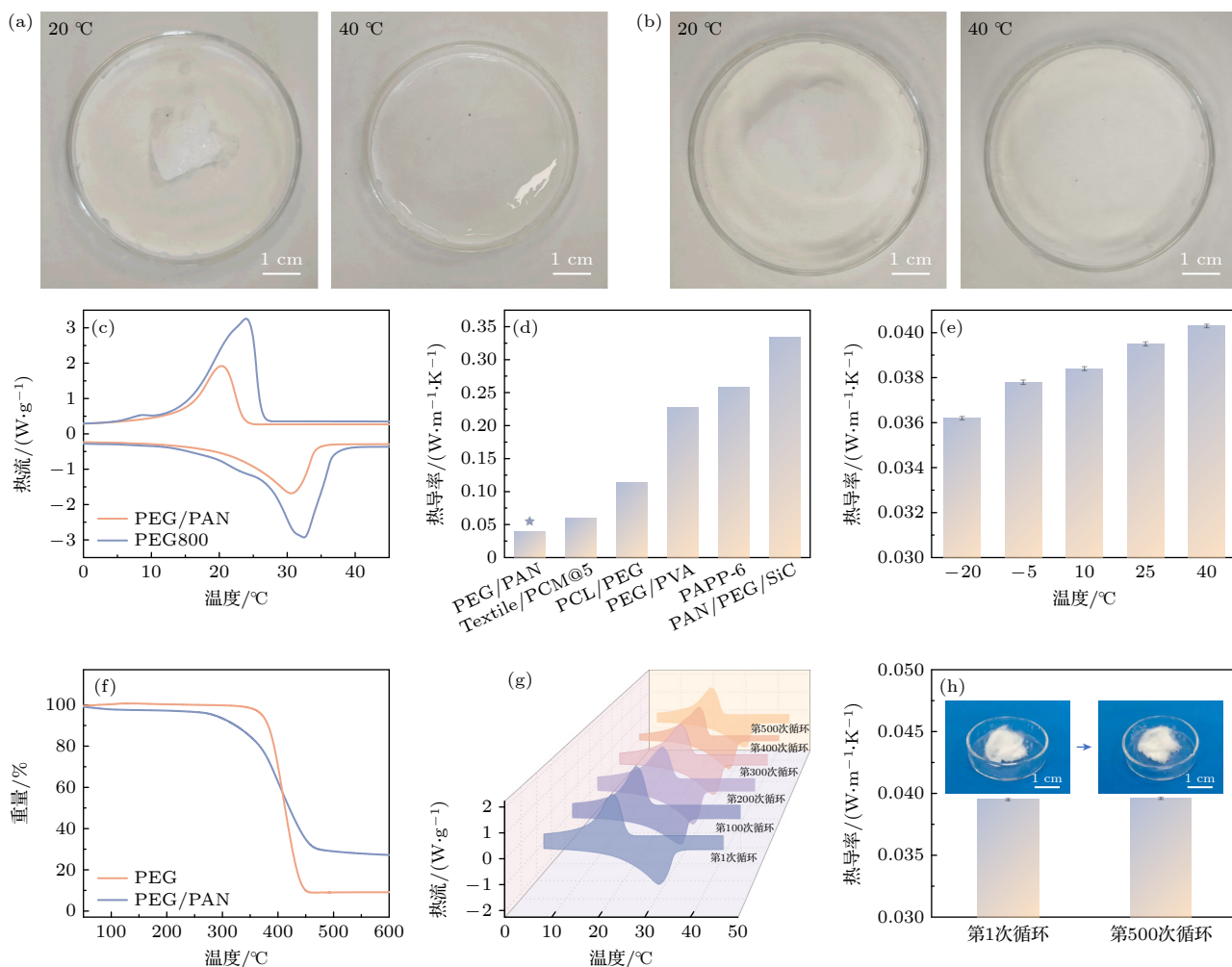


图4 PEG/PAN相变纤维的相变性能和热性能 (a) 纯PEG和(b) PEG/PAN相变纤维在20 °C和40 °C的宏观形貌数码照片; (c) 纯PEG和PEG/PAN相变纤维的DSC曲线; (d) 本研究PEG/PAN相变纤维与文献中报道的用于冷防护相变织物在热导率性能的对比如[3,31-34]; (e) PEG/PAN纤维在-20—40 °C的热导率变化图; (f) 纯PEG和PEG/PAN相变纤维的TG曲线; (g) PEG/PAN相变纤维经历1—500次热循环的DSC曲线; (h) PEG/PAN相变纤维经历热循环前后的热导率

Fig. 4. Phase change performance and thermal properties of PEG/PAN phase change fibers: Digital photos of the macroscopic morphology of (a) pure PEG and (b) PEG/PAN phase change fibers at 20 °C and 40 °C; (c) DSC curves of pure PEG and PEG/PAN phase change fibers; (d) comparison of thermal conductivity between the PEG/PAN phase change fibers in this study and phase change fabrics reported for cold protection in the literature<sup>[3,31-34]</sup>; (e) thermal conductivity of PEG/PAN phase change fibers from -20 °C to 40 °C; (f) TG curves of pure PEG and PEG/PAN phase change fibers; (g) DSC curves of PEG/PAN phase change fibers after different numbers of thermal cycles; (h) thermal conductivity of PEG/PAN phase change fibers before and after thermal cycles.

表1 PEG/PAN相变纤维的相变热参数

Table 1. Phase change thermal parameters of PEG/PAN phase change fibers.

样品名称	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
PEG	25.1	152.4	26.1	146.6
PEG/PAN	21.8	80.6	23.5	71.8
第100次循环	21.8	80.1	23.5	71.3
第200次循环	21.7	79.4	23.4	70.6
第300次循环	21.7	80.3	23.5	71.1
第400次循环	21.9	80.1	23.6	70.0
第500次循环	21.8	79.4	23.6	70.5

的相变织物相比具有明显的低导热优势, 这得益于其独特的三维多孔结构设计. 相较于传统单根相变纤维或相变纤维薄膜依赖固态传导的局限, 蓬松结构的相变纤维通过纤维间搭建的气穴结构, 在固、气热传导的协同作用下, 形成高效的热阻断层: 对外能有效屏蔽冷空气侵入, 对内可以抑制人体热量散失. 为模拟实际应用环境, 我们进一步研究了材料在-20—40 °C的宽温区范围内的热传导行为. 如图4(e)所示, PEG/PAN相变纤维的热导率具有显著的温度响应特性: 当环境温度从

40 °C 降至 -20 °C 时, 其热导率从 0.0403 W/(m·K) 降至 0.0362 W/(m·K), 这一现象有助于 PEG/PAN 相变纤维在低温环境下提供更优异的隔热性能, 为极地装备、特种防护服等低温隔热领域的应用提供了重要支撑.

热稳定性是评估材料安全性能的关键参数. 通过热重分析 (TGA) 在 N<sub>2</sub> 气氛下对 PEG/PAN 复合相变纤维的热分解行为进行研究, 实验结果如图 4(f) 所示. PEG/PAN 相变纤维的热分解起始温度约为 300 °C, 显著高于其相变温度范围. 复合材料的热失重过程主要归因于 PEG 组分的分解. 因此, PEG/PAN 相变纤维在 300 °C 以下具有出色的热稳定性, 完全满足实际应用中的安全需求.

相变纤维在保暖服装中的长期适用性高度依赖其热循环稳定性. PEG/PAN 相变纤维经历不同循环次数后的 DSC 曲线如图 4(g) 所示, 相应的相变热参数如表 1 所示. 经过 500 次完整的熔融-结晶循环后, 材料的相变温度仍保持相对稳定, 相变潜热衰减率低于 1.5%. 另外, 纤维的蓬松结构依然维持良好, 因此热导率未发生衰减 (图 4(h)). 上述结果充分证明了该材料优异的循环耐久性和实际应用价值.

### 3.4 机械性能

机械性能是决定蓬松结构相变纤维实际应用

价值的关键因素, 直接影响其在穿戴领域的适用性. 材料须具备适宜的柔性以确保人体穿戴舒适度, 同时应保持足够的抗变形能力以承受日常存放和身体活动产生的机械应力. 如图 5(a) 所示, PEG/PAN 相变纤维优异的柔韧性确保了穿戴的舒适性, 其不仅能完美贴合手指关节等复杂曲面, 在经历多次弯曲-恢复后仍能保持完整的结构形貌. 进一步的拉伸 (图 5(b)) 和压缩测试 (图 5(c)) 表明, 该材料具有优秀的拉伸应变 (36.1%) 和极高的极限拉伸强度 (253.5 kPa). 在 40% 的压缩应力下, PEG/PAN 相变纤维表现出高达 668.7 Pa 的出色压缩应力. 这些优异的机械性能使其能够充分适应人体运动或日常存储时产生的各种复杂形变.

### 3.5 人体冷防护实验

为系统评估蓬松结构 PEG/PAN 相变纤维在低温环境下的冷防护性能, 本研究设计了如图 6(a) 所示的应用实验. 将两个相同规格的小玻璃瓶 (50 mL) 外侧分别包裹 2 g 天然棉花和 PEG/PAN 相变纤维, 放置于 36 °C 的恒温环境下保持热平衡 30 min, 以模拟人体体温. 随后将实验装置转移至寒冷的户外环境 (5 °C), 通过内置热电偶实时监测瓶内温度变化, 所得温度随时间变化曲线绘制于图 6(b). 在低温暴露过程中, 包裹两组样品的瓶内温度均呈现下降趋势, 但包裹 PEG/PAN 蓬松

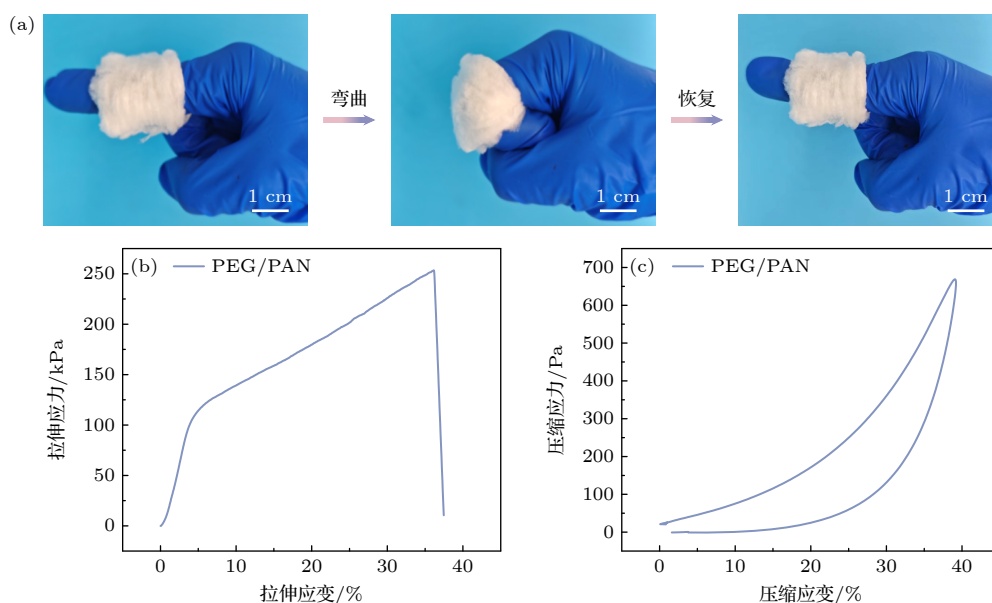


图 5 PEG/PAN 相变纤维的机械性能 (a) PEG/PAN 纤维的柔性展示图; (b) 拉伸应力-应变曲线; (c) 压缩应力-应变曲线  
 Fig. 5. Mechanical properties of PEG/PAN phase change fibers: (a) Flexible display diagram of PEG/PAN fibers; (b) stretch stress-strain curve; (c) compression stress-strain curve.

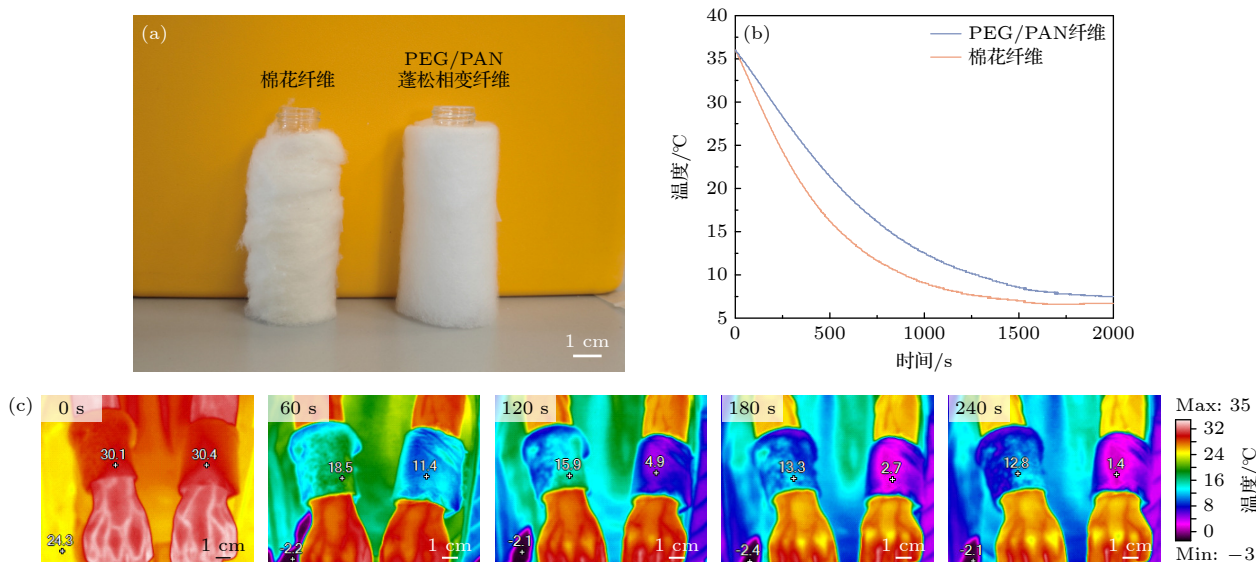


图6 PEG/PAN相变纤维的人体冷防护实验 (a)冷防护实验展示图; (b)温度-时间变化曲线; (c)棉花和PEG/PAN相变纤维应用于人体的热红外成像图

Fig. 6. Personal cold protection experiments of PEG/PAN phase change fibers: (a) Cold protection experiment diagram; (b) temperature-time variation curves; (c) the thermal infrared imaging of the real human body using cotton and PEG/PAN fibers.

纤维的温度衰减速率显著低于棉花,最大温差高达4℃。这一结果充分证明,PEG/PAN蓬松相变纤维的冷防护性能显著优于传统的天然棉花。

为进一步验证该材料应用于人体的实际冷防护效果,将其与天然棉花分别穿戴于人体,对其冷屏蔽性能进行对比测试。如图6(c)所示,将实验人员双手手腕分别包裹相同质量的棉花(左侧)和PEG/PAN相变纤维(右侧),在室温(25℃)下保持热平衡5 min后,暴露于-2℃的户外环境中。采用红外热成像仪实时监测材料的表面温度变化,图片中色彩的梯度变化可以直观展示纤维材料的冷防护性能。在240 s的低温暴露过程中,PEG/PAN相变纤维始终维持着更低的表面温度,与天然棉花相比温差高达11.4℃。这种显著的温度差异主要源于外部的寒冷环境与包裹天然棉花的人体皮肤之间更快的热交换速率。综上所述,与天然棉花相比,PEG/PAN相变纤维提供了更出色的冷防护效果。

## 4 结论

综上所述,本研究通过静电纺丝技术结合非溶剂诱导相分离策略,成功开发了一种蓬松结构的相变纤维(PEG/PAN)。该材料克服了传统单根/薄膜类相变纤维冷屏蔽性不足的缺陷,实现了相变调温和保温的双重冷防护功能。三维多孔的蓬松结构

赋予其超低的热导率(0.0395 W/(m·K)),能显著抑制人体在寒冷环境下的热损失。静电纺丝技术实现了PEG组分的高效负载(80.6 J/g),并解决了固-液相变材料易泄漏的技术难题。测试结果表明,PEG/PAN相变纤维具有卓越的热循环稳定性(500次热循环)和优秀的热稳定性( $\leq 300$ ℃),以适用于长期而安全的应用。此外,该材料具有优秀柔韧性以适应人体复杂的关节轮廓,以及良好的机械性能可承受压缩(668.7 Pa)、拉伸(253.5 kPa)等形变过程,满足实际穿戴需求。在真实的寒冷环境中,其冷防护性能显著优于传统天然棉花。本研究不仅为开发新一代智能冷防护纺织品提供了可行的解决方案,其新型的纤维结构设计理念也为高性能相变纤维的开发奠定了理论基础,在极地装备、医疗保温及智能服装等领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Ahn Y H, DeWitt S J A, McGuire S, Lively R P 2021 *Ind. Eng. Chem. Res.* **60** 3374
- [2] Wu W W, Song Q Q, Li N, Wang Y, Yu J R, Hu Z M 2024 *J. Appl. Polym. Sci.* **141** e55034
- [3] Ma Y Q, Shen J F, Li T, Sheng X X, Chen Y 2024 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **276** 113078
- [4] Bao Y Q, Lyu J, Liu Z W, Ding Y, Zhang X T 2021 *ACS Nano* **15** 15180
- [5] Cao H, Xu Z G, Zhang T, Zhao Y 2023 *Chem. Eng. J.* **478** 147389
- [6] Yang K, Duan C, Ma R T, Liu X S, Meng Z X, Xie Z Y, Ni

- Y H 2024 *Carbohydr. Polym.* **346** 122649
- [7] Xiao J F, Wang Z L, Chen Q Q, Zhou Y H, Xu Z Q, Wang Y, Jiang X L, Zhang A X, Saeed H A M, Xu T, Yang H J 2024 *ACS Appl. Energy Mater.* **7** 4494
- [8] Toomey M D, Kanbargi N, Kearney L T, Hinton H, Gupta S, Sawafta R, Naskar A K, Sharma J 2024 *Adv. Eng. Mater.* **26** 2400012
- [9] Suárez-García A, Arce E, Alford L, Luhrs C C 2023 *Renew. Sustain. Energy Rev.* **187** 113648
- [10] Gu B, Li G, Zhang Q, Pan H D, Duan M F, Weng L Q, Zhao D L 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2412089
- [11] Ji R, Zhang Q F, Zhou F X, Xu F, Wang X D, Huang C W, Zhu Y C, Zhang H Z, Sun L X, Xia Y P, Lin X C, Peng H L, Zou Y J, Chu H L 2021 *J. Energy Storage* **40** 102687
- [12] Patel D, Wei W, Singh H, Xu K, Beck C, Wildy M, Schossig J, Hu X, Hyun D C, Chen W, Lu P 2023 *ACS Sustainable Chem. Eng.* **11** 11570
- [13] Aksoy S A, Yilmaz D, Maleki H, Rahbar R S, Barani H 2024 *J. Energy Storage* **101** 113849
- [14] Kumar A, Kebailli I, Boukhris I, Vaish R, Kumar A, Park H K B, Joo Y H, Sung T H 2023 *Sci. Rep.* **13** 5923
- [15] Sheng N, Rao Z H, Zhu C Y, Habazaki H 2020 *Sol. Energy Mater. Solar cells* **205** 110241
- [16] Dirlik-Uysal D, Mínguez-García D, Bou-Belda E, Gisbert-Payá J, Bonet-Aracil M 2024 *Appl. Sci.* **14** 4725
- [17] Islam S, Hasan B 2025 *SPE Polym.* **6** e10167
- [18] Liu C, Wang S, Wang N, Yu J Y, Liu Y T, Ding B 2022 *Nano-Micro Lett.* **14** 194
- [19] Xu H Y, Wang S, Gong X B, Yang M, Liu X Y, Zhang S C, Yu J Y, Ding B 2022 *Compos. Commun.* **29** 101024
- [20] Yang W K, Liu H, Du H Y, Zhang M Y, Wang C F, Yin R, Pan C F, Liu C T, Shen C Y 2023 *Sci. China Mater.* **66** 2829
- [21] Liu X H, Hou G K, Zhao J H, Zhao W J, Xu Q B, Zheng X H, Liu Z, Lai Y K 2023 *Chem. Eng. J.* **465** 142826
- [22] Xu C W, Yue C J, Yao Y, Yu Y, Li L R, Liu X D 2024 *J. Energy Storage* **84** 110991
- [23] Kou Y, Sun K Y, Luo J P, Zhou F, Huang H B, Wu Z S, Shi Q 2021 *Energy Storage Mater.* **34** 508
- [24] Zhao L, Wu H Y, Jiao W L, Yin X, Si Y, Yu J Y, Ding B 2021 *Compos. Commun.* **25** 100681
- [25] Chen X, Xu Y, Zhang W X, Xu K L, Ke Q F, Jin X Y, Huang C 2019 *Nanoscale* **11** 8185
- [26] Liu M H, Shen H L 2018 *Plastomer* **47** 108 (in Chinese) [刘美惠, 沈惠玲 2018 塑料 **47** 108]
- [27] Deng C X, Dong H S, Sun K Y, Kou Y, Liu H Q, Jian W W, Shi Q 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2212259
- [28] Li Y G, Sun K Y, Kou Y, Liu H Q, Wang L, Yin N, Dong H S, Shi Q 2022 *Chem. Eng. J.* **429** 132439
- [29] Yang J L, Zhang T Y, Wang S L, Wang S S, Ding H Y, Xie J H, Xu D J, Huang Q, Liu C C 2025 *Vacuum* **238** 114214
- [30] Strnad J, Vengar 1984 *Eur. J. Phys.* **5** 9
- [31] El Majd A, Sair S, Ousaleh H A, Bouhaj Y, Belouaggadia N, Younsi Z, El Bouari A 2024 *J. Energy Storage* **95** 112681
- [32] Zhang S Y, Yue J Y, Yang J L, Chai X S, Feng Z G, Zhang A Y 2023 *J. Textile Res.* **44** 11 (in Chinese) [张少月, 岳江昱, 杨家乐, 柴晓帅, 冯增国, 张爱英 2023 纺织学报 **44** 11]
- [33] Xu J, Chen L, Wang J Y, He Y 2024 *Polym. Mater. Sci. Eng.* **40** 134 (in Chinese) [徐瑾, 陈龙, 王金玉, 何燕 2024 高分子材料科学与工程 **40** 134]
- [34] Chen G, Shi T T, Zhang X G, Cheng F, Wu X W, Leng G Q, Liu Y G, Fang M H, Min X, Huang Z H 2020 *Polymer* **186** 122012

## Fluffy structured phase change fibers for human body cold protection\*

DAI Henan<sup>1)2)</sup> ZHANG Shihui<sup>2)</sup> DENG Chengxin<sup>2)</sup> SHI Quan<sup>2)</sup>  
ZHANG Zhihua<sup>1)</sup> LIU Hanqing<sup>2)</sup> KOU Yan<sup>2)†</sup> WEI Zheng<sup>1)‡</sup>

<sup>1)</sup> (School of Materials Science and Engineering, Dalian JiaoTong University, Dalian 116028, China)

<sup>2)</sup> (Thermochemistry Laboratory, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

( Received 5 September 2025; revised manuscript received 28 October 2025 )

### Abstract

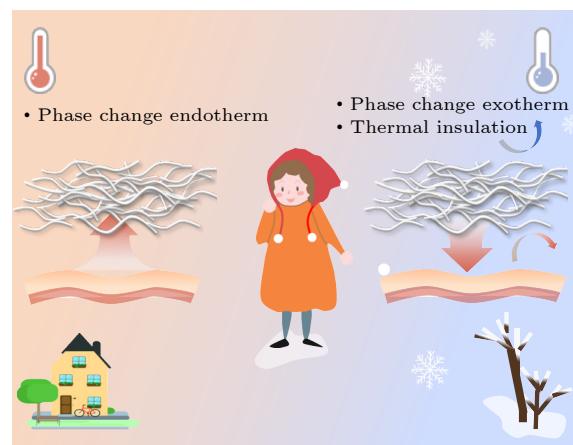
Phase change fibers, as an advanced functional material for human body thermal management, have significant potential for practical applications. However, current research systems face critical limitations: traditional phase change fibers prepared via wet spinning and electrospun phase change fiber films encounter insufficient thermal insulation due to their structural compactness deficiencies, thereby failing to effectively

\* Project supported by the Science and Technology Joint Plan of Liaoning Province, China (Grant No. 2024JH2/102600006), the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (Grant Nos. 2025-MS-057, 2025-BS-0135), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 22503101, 52171229, 52572022, 12204084).

† Corresponding author. E-mail: [kouyan@dicp.ac.cn](mailto:kouyan@dicp.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhengwei@djtu.edu.cn](mailto:zhengwei@djtu.edu.cn)

prevent body heat loss in cold environments. To tackle this technical challenge, this work breaks through traditional material system limitations by innovatively employing electrospinning technology to integrate polyethylene glycol (PEG) into polyacrylonitrile (PAN) fiber systems. We successfully fabricate fluffy structured phase change fibers that integrate both phase change thermoregulation and thermal insulation functions using the principle of non-solvent-induced phase separation. The internal porous structure of the fluffy fibers constructs an effective cold protection layer, exhibiting an ultra-low thermal conductivity of 0.0395 W/m·K. At the same time, the PEG phase change component provides a high latent heat of 80.6 J/g, achieving a synergistic effect of temperature regulation and thermal insulation. The material exhibits excellent structural and thermal stability: maintaining stable phase change performance after 500 thermal cycles and exhibiting exceptional thermal reliability up to 300 °C. Even above the phase change melting point, the material effectively prevents leakage of the phase change component. Furthermore, it possesses sufficient mechanical properties to withstand various deformations such as bending, compression (668.7 Pa), and stretching (253.5 kPa) without structural collapse. Practical application evaluations further demonstrate that the material's cold protection performance significantly exceeds that of natural cotton. This study not only provides an innovative strategy for fabricating integrated "heat storage-thermal insulation" fibers, but also conceptually expands the design dimensions of phase change fibers in thermal management, offering important solutions and theoretical guidance for developing high performance wearable cold protection



materials.

**Keywords:** fluffy structure phase change fibers, polyethylene glycol, polyacrylonitrile, human body cold protection

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251213](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251213)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251213](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251213)