

保暖功能纤维的开发及应用

肖学良¹, 陈宇凡¹, 李海燕², 张典堂¹, 肖燕²

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 吴江福华织造有限公司, 江苏 苏州 215228)

摘要:介绍了保暖功能纤维的保暖性、柔软性、舒适性等基本性能, 论述其在保暖材料领域的重要性。回顾国内外关于保暖功能纤维的研究进展, 将其依据保暖机理分为被动保暖纤维和积极保暖纤维两大类, 并从结构设计、制备材料、保暖机理及性能特点等角度进行对比分析。归纳保暖功能纤维在防寒保暖、医疗保健、智能穿戴等领域的应用, 指出保暖功能纤维开发面临的问题和未来发展方向。分析认为, 未来可以通过改进保暖功能纤维的制备工艺, 完善其发热及蓄热机理, 进一步提升纤维的保暖性能, 并拓展其应用领域。

关键词: 保暖; 功能纤维; 发热; 蓄热; 导热性能

中图分类号: TS 102.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2025)01-0001-08

Development and Application of Thermal Insulating Functional Fibers

XIAO Xueliang¹, CHEN Yufan¹, LI Haiyan², ZHANG Diantang¹, XIAO Yan²

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wujiang Fuhua Weaving Co., Ltd., Suzhou 215228, China)

Abstract: This paper introduced the basic properties of thermal insulating functional fibers namely thermal insulation, softness and comfort, then discussed its importance in the field of thermal insulating materials. It reviewed the recent research progress on thermal insulating functional fibers at home and abroad, and divided the fibers into passive thermal fibers and active thermal fibers according to thermal insulating mechanism, which were compared and analyzed from the perspective of structural design, preparation materials, thermal insulating mechanism and performance characteristics. It summarized the application of thermal insulating functional fibers in cold insulation, medical care, intelligent wearable device and other fields. The problems and future development direction of thermal insulating functional fibers were pointed out. It was concluded that the thermal insulation performance can be further improved and the application field can be expanded by improving the preparation process of thermal insulating functional fiber and improving the mechanism of heating and heat storage in the future.

Key words: thermal insulating, functional fibers, heat-generating, heat-storage, thermal conductivity

在极寒地区, 低温会严重影响人们日常的生产活动, 因此维持体温恒定极为重要。传统的保暖服装为了实现更好的保暖性能, 通常采用多层结构, 因此较臃肿且厚重, 不仅影响美观, 而且会限制穿着者的行动。随着新型材料的发展, 人们在寒冷环境中的保暖方式从传统被动隔热逐步转变为主动

发热及蓄热, 在此背景下, 保暖功能纤维应运而生。保暖功能纤维制成的保暖服装较为轻便, 保暖性、舒适性、功能性均较好。根据保暖原理, 可将保暖功能纤维分为被动保暖纤维和积极保暖纤维两大类。文中归纳总结了两大类保暖纤维的研究现状, 并展望其未来发展趋势。

收稿日期: 2024-07-28; 修订日期: 2024-10-13。

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2023M742677); 江苏省生态纺织工程技术研发中心开放基金项目(YGKF202207); 浙江省清洁染整技术研究重点实验室开放基金项目(QIRZ2201)。

作者简介: 肖学良(1984—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为功能纺织品及可穿戴电子服装。

Email: xiao_xueliang@jiangnan.edu.cn

1 被动保暖纤维

被动保暖纤维的保暖机理是通过纤维材料将人体与环境阻隔,以减少热传导、热对流及热辐射,进而降低人体的热损失^[1]。因此,层级结构设计以及纤维材料本身的导热系数、孔隙率、比表面积调控等成为被动保暖纤维的主要研究方向。传统的冬季服装(如棉服、羽绒服、呢绒大衣等)主要采用天然纤维作为保暖层,这些材料是被动保暖纤维的典型代表。随着研究人员对新材料适纺性的不断探索以及现有工艺的不断提升,许多新型被动保暖纤维开始崭露头角,如气凝胶纤维、异形纤维等。

1.1 气凝胶纤维

气凝胶是一种基于三维交联网络结构的多孔固体材料,其结构由纳米孔洞和纳米骨架构成,从而赋予气凝胶低密度、高孔隙率、大比表面积、低导热系数等特性,使热量难以在气凝胶内以“气—固”形式传导^[2-3]。在此背景下,研究人员^[4-6]尝试通过湿法纺丝、冷冻纺丝及微流控纺丝等技术将气凝胶加工成一维纤维状,在保留气凝胶特有性能的同时赋予其优良的柔韧性、可织性及机械性能,进一步拓宽气凝胶材料的应用领域。

1.1.1 制备材料 传统的气凝胶纤维制备材料主要包括硅酸盐、金属氧化物和聚合物等,这些材料因具有独特的理化性质(如高比表面积、低导热率和良好的化学稳定性)而被广泛应用于气凝胶纤维的生产中。随着人们对环境可持续性和成本效益的关注,生物质纺丝原料的开发成为新热点。ZHOU J 等^[4]以稻草为原料提取纤维素纳米纤丝(cellulose nanofibrils, CNF)以制备气凝胶纤维,并验证了稻草、秸秆及壳聚糖等成本低且加工耗能少的生物质材料用于工业化连续制备气凝胶纤维的可行性,具体制备过程如图 1 所示。

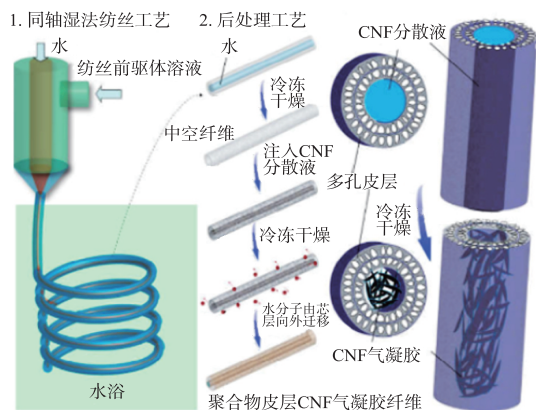


图 1 生物质基气凝胶纤维制备过程

Fig. 1 Preparation of biomass-based aerogel fibers

开发新型制备材料是气凝胶纤维多样化和功能化的基础,其可以直接催生出有机气凝胶纤维、无机气凝胶纤维及有机/无机杂化气凝胶纤维。

1.1.2 结构设计 在保暖纤维研究中,异质结构设计是一种常见的保暖性能优化策略,该方法可以结合不同材料的优良特性,从而增强纤维的综合性能。许多异质结构的设计思路来源于仿生学,如身处极寒环境的北极熊,其毛发具有独特的核壳结构,中空内核能够封装大量静止空气,外壳可以维持内部空气的稳定性,这种结构能有效抑制热量散失。WU M R 等^[5]受北极熊毛启发,通过两步冷冻纺丝法制得具有核壳结构的气凝胶纤维(见图 2),其热导率仅为 $(26.9 \pm 1.8) \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,远低于尼龙、羊毛及涤纶等常见被动保暖纤维的热导率。除此之外,珊瑚等海洋生物的多孔与分支结构、昆虫翅的鳞片与绒毛结构、植物表皮的微纳米级纹理结构,也对气凝胶纤维的异质结构设计具有启发作用。

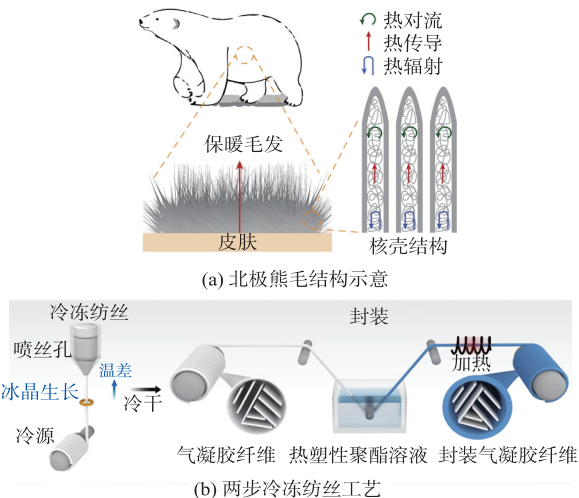


图 2 仿北极熊毛气凝胶纤维的制备过程

Fig. 2 Preparation of polar bear hair-like aerogel fibers

异质结构设计通常会降低纤维的力学性能,而平衡气凝胶纤维的保暖性能与力学性能是一大研究难题。以微流控纺丝法为代表的新型纺丝工艺能够精准设计成纤的系统级结构,从而解决这一问题。双交联微流控纺丝工艺流程如图 3^[6]所示。

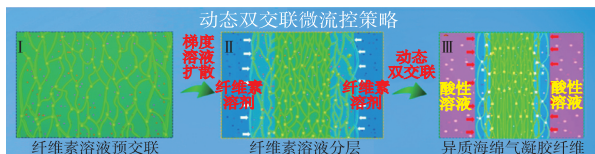


图 3 双交联微流控纺丝工艺流程

Fig. 3 Dual-crosslinking microfluidic spinning process flow

该工艺能够在纤维微观层面上实现结构的梯度变化,与此同时,纤维的内部结构保持了较高的

强度和韧性,而外部的多孔结构则保有大量的空气层,可以有效阻止热量传递,从而在不降低力学性能的前提下,最大化提升隔热效果。

1.2 异形纤维

异形纤维表面光路如图 4^[7]所示。异形纤维的截面形状多样且不规则,这种特性使得光线在纤维间会多次反射和折射,增加了光线在纤维内的滞留时间,进而提升了吸光及蓄热能力。与常规的圆形截面纤维相比,异形纤维具有独特的几何结构,纤维间的空隙更大,因此在织物中可以形成更多的空气层^[8]。这些空气层不仅起到良好的隔热作用,还能使织物更加轻盈且保暖。

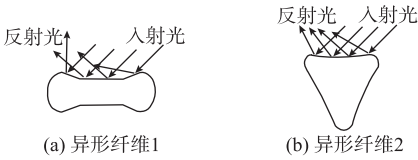


图 4 异形纤维表面光路

Fig. 4 Surface light path of profiled fibers

1.2.1 异形中空纤维 异形中空纤维具有独特的中空孔洞结构,如三角形、星形、十字形等^[9]。与传统的中空纤维相比,异形中空纤维能够更有效地捕获和固定空气,并形成隔热屏障,减少热量的流失。不仅如此,传统中空纤维受限于形态结构,抗压能力较差,其中空度会随着使用过程中的反复机械作用不断下降,使得保暖性逐渐减弱。WANG H Y 等^[10]提出一种具有三角形中空多孔结构的聚丙烯腈纤维(见图 5),相较于圆形中空结构,三角结构具有抗压缩能力强、结构稳定等优点。此外,异形中空结构中的高密度气态空隙会破坏纤维传热途径的连续性,进一步降低纤维的热导率^[11]。

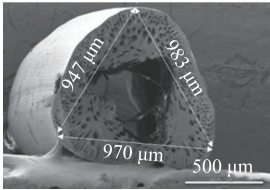


图 5 异形中空纤维截面结构

Fig. 5 Cross section structure of profiled hollow fiber

1.2.2 异形截面纤维 异形截面纤维的设计突破了传统截面纤维的局限性,通过引入差异化的截面形状,赋予纤维卓越的保暖性和舒适性。例如,德国的 Dralon 腈纶纤维具有哑铃形截面,使得纤维之间无法紧密结合在一起,从而形成众多微小的空气隔层,这些空气隔层在织物中累积,极大地增强了 Dralon 织物的蓬松度和保暖性^[12]。与之类似的还有具有三叶草形截面的 Trilobal 纤维、具有星形截

面的 Polar Fleece 纤维、具有“W”形截面的 Technofine 纤维等。上述截面设计均旨在通过增加纤维间的空隙来提升保暖性。

2 积极保暖纤维

近年来研究开发积极保暖纤维成为新趋势,此类纤维的核心优势在于其能量转换能力,能够根据环境温度或者人体需要,储存或吸收电能、化学能、太阳能并转化为热能,以实现人体微气候动态调节^[13]。根据发热的原理,一般可分为吸湿发热纤维、相变蓄热纤维、电能发热纤维及光能发热纤维^[14]。

2.1 吸湿发热纤维

吸湿发热纤维能够响应人体皮肤表面的温度和湿度变化,通过吸收人体的潜汗及显汗,产生吸湿热以实现保暖效果。当纤维吸收水分至饱和时,放热停止;释放水分后,纤维可再次吸收水分,从而重复放出热量^[15]。

2.1.1 发热机理 纤维吸湿发热主要通过两种途径产生:①纤维极性基团与水分子通过氢键结合,使水分子从动态转变为静态,水分子的动能转化为热能并释放出来;②纤维吸收气态水,使水分子从水蒸气转化为液态水并释放热量。人体活动过程中的微气候条件受出汗状态、热量传递及水分传递等诸多因素影响,在纤维吸湿发热过程中,两种吸湿发热途径往往同时存在。然而目前吸湿发热纤维的开发与研究多是基于单一吸湿发热途径,缺乏对人体复杂微气候条件和纤维吸湿发热性能之间交互作用机制的探究,导致吸湿发热织物产热过多且不均匀^[16]。ZHANG L M 等^[17]基于二维热湿耦合模型提出了一种吸湿发热机理,更加完整地呈现织物吸湿和产热过程,并对依托该机理研发的吸湿发热织物进行放热性能评估,证实该机理在延缓发热及提升均匀性等方面具有明显优势。综上,应深入探讨不同吸湿发热途径的相互作用及其对吸湿发热纤维性能的影响,并开发新的实验技术和模拟方法,以更准确地模拟和评估纤维在实际应用中的吸湿发热性能。

2.1.2 发热性能 大多数纤维材料在吸收水分时会产生热量,释放出吸湿热的多少因材料而异。例如,回潮率高的羊毛纤维比回潮率低的合成纤维产生更多吸湿热,这表明纤维的吸湿性对其加热性能有重要影响^[18]。因此,提升纤维材料的吸湿性是吸湿发热纤维的关键研究方向。东洋纺公司开发的 EKS 吸湿发热纤维(以下简称 EKS 纤维)是在聚丙烯酸分子上交联大量羧基、羟基和氨基等亲水基团

制成,标准回潮率约为 23%,具有优良的吸湿性^[19-20]。程明丽^[21]通过对比 EKS 纤维与其他纤维,发现 EKS 纤维表面沟槽较多,亲水基团丰富,结晶度低,证实了其优异的吸湿发热特性。此外,纤维结构也会影响其吸湿发热性能。杨媛媛等^[22]基于改性腈纶制得一种吸湿发热包芯纱,相较于普通腈纶,该改性腈纶表面具有不规则的凹槽,能够增加纤维的表面积并保持毛细孔隙的水分含量,从而增强其吸湿发热效果。

因此,纤维材料的吸湿性对其发热性能起着至关重要的作用。通过优化吸湿发热纤维的化学组成和微观结构,可以显著提升其吸湿和发热性能。

2.2 相变蓄热纤维

相变材料在临界相变温度下能通过物相变化储存和释放热能,因而被广泛应用于热调控领域^[23]。相变材料蓄热机理如图 6^[24]所示。当环境温度降低时,相变材料会释放储存的热量,以起到保温效果;当环境温度升高时,相变材料会吸收储存的热量,以实现蓄热功能。相变蓄热纤维的制备主要基于“固-液”相变材料,其理论体系和技术相对成熟且应用较广,但是“固-液”相变材料仍存在缺陷,即液态时易泄露,进而降低相变蓄热纤维的热密度^[25]。目前,“固-液”相变材料的泄露问题主要通过封装解决,常用的封装方法包括微胶囊法和皮芯纺丝法。

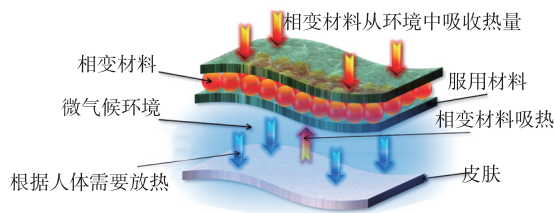


图 6 相变材料蓄热机理

Fig. 6 Heat storage mechanism of phase change materials

2.2.1 微胶囊法 微胶囊法是利用具有核壳结构的微米级固体微胶囊颗粒包覆相变材料的一种方法,可以避免相变材料出现泄露、腐蚀及相分离等问题^[26]。在此过程中,微胶囊主要作为功能材料同纤维基质相结合,制得相变蓄热纤维。目前常用的结合方式有两种:①将微胶囊加入湿法纺丝、熔融纺丝及静电纺丝等纺丝工艺的前驱体溶液中进行共混纺丝;②采用浸渍、喷涂、旋涂等方法,直接将微胶囊附着于纤维表面。陈瑜^[27]采用真空浸渍法,将相变微胶囊负载至具有薄壁中空结构的木棉纤维上,制得一种储放热性能较好的相变蓄热纤维。选用具有优异保暖效果的纤维(如木棉纤维)作为

纤维基质^[28],可以实现被动保暖材料与积极保暖材料的结合,这是目前高性能保暖纤维材料的主要开发思路之一。此过程可以防止微胶囊相变材料泄露,但包覆在其表面的被动保暖材料也限制了热能的传导,进而导致相变材料潜热储存和释放迟滞^[29]。

2.2.2 皮芯纺丝法 皮芯纺丝法是以高分子聚合物为外部皮层,内部嵌入相变材料作为芯层,制得具有芯鞘结构相变蓄热纤维的方法。相较于微胶囊,芯鞘结构能够封装更多的相变材料,且提供了更为直接和高效的热传导路径,对蓄热性能影响更小。ZHANG X 等^[30]通过皮芯纺丝法制得的相变蓄热纤维能够快速释放与储存潜热(见图 7),从而实现高效的动态热调节。然而,相变材料在失去壳材料的保护后,性能易受纺丝工艺的影响。例如,在熔融纺丝过程中,过高的加工温度易使相变材料发生热降解,进而降低其热焓^[31];在湿法纺丝过程中,乳化液种类或浓度选用不当易使相变材料形成颗粒簇,进而降低纤维的热机械性能^[32]。

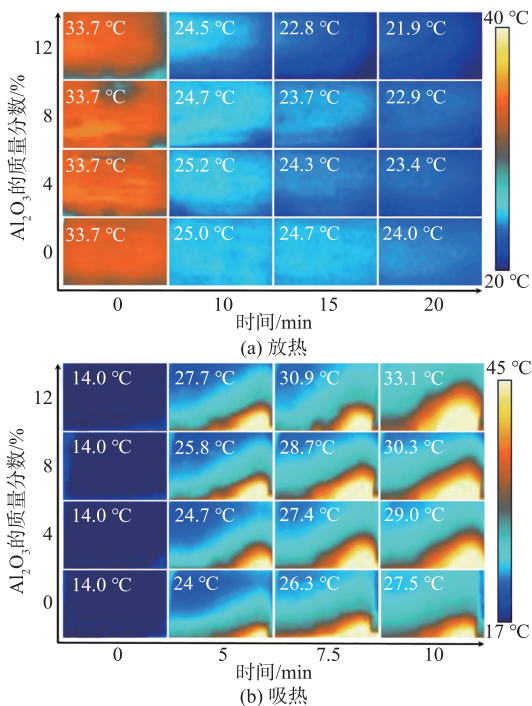


图 7 相变蓄热纤维吸放热过程

Fig. 7 Heat absorption and release process of phase change heat storage fibers

2.3 电能发热纤维

相较于其他积极保暖纤维,电能发热纤维的优势主要在于其能够通过改变输入电压等方式主动调控发热进程,这种可控性使得穿着者可以根据个人舒适度或外界环境的变化实时调整服装的温度。依据基材的不同,电能发热纤维可分为金属类电热纤维、碳系电热纤维和高聚物电热纤维^[33]。

2.3.1 金属类电热纤维 金属类电热纤维通常是将不锈钢、银及铜等延展性较好的金属加工成金属纤维,再与普通纤维混纺制得的金属电热纤维;或是通过电镀、电涂沉降及磁控溅射等工艺将金属以涂层形式附着于普通纤维表面,制得的金属涂层电热纤维^[34-35]。李雅芳^[36]将基于镀银纱线制备的电加热服装在-20℃条件下加热至33℃,该过程仅消耗功率34.84 W,证明电能发热纤维将电能转换为热能的效率非常高。金属类电热纤维的热力学性能普遍较好,但是易出现热老化、氧化、镀层脱落等问题,限制了其在复杂环境下的应用。

2.3.2 碳系电热纤维 与传统金属材料相比,以碳纤维为代表的碳系材料成本更低,变形能力更好,热膨胀系数更小,并且在加热时会产生有益于健康的远红外线,这使得碳纤维成为制作电热纤维的理想基材^[37-38]。XIONG Y 等^[39]制得了一种碳纤维基电热纤维,其电热性能和结构稳定性俱佳,在施加5 V 周期性电压时,温度变化范围稳定。

2.3.3 高聚物电热纤维 导电高聚物兼具高分子材料的特性和金属的导电特征。高聚物电热纤维与金属类电热纤维相比,制备方法更简单;与碳系材料相比,工艺成本更低^[40-41]。常用于制备电热纤维的导电高聚物有聚(3,4-乙烯二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐)、聚苯胺、聚吡咯等。李沂蒙等^[42]制得了一种具有聚吡咯涂层的电热纤维,该纤维在施加7 V 电压时的峰值温度可达95℃(见图8)。该类纤维一般具有出色的导电性能与抗拉伸能力,适用于制备电热手套、电热袜及电热围巾等高弹性电热服饰。

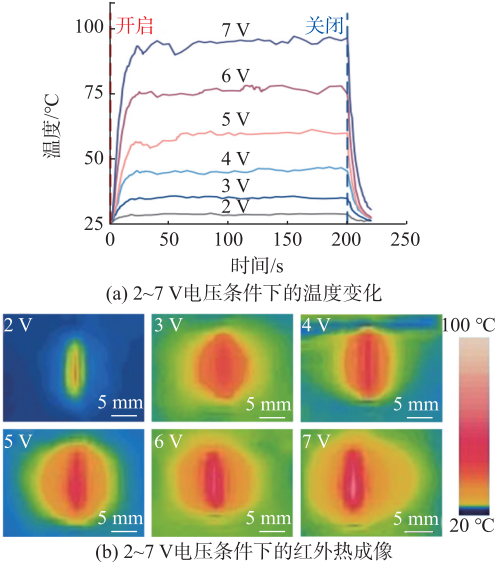


图8 聚吡咯基电能发热纤维温度变化
Fig. 8 Temperature change of polypyrrole-based electrothermal fibers

2.4 光能发热纤维 光能发热纤维能够吸收太阳光中的可见光,并将光子的能量转化为热能,同时能反射人体自身发射出的远红外线,因此具有优良的保暖及蓄热性能^[43-44]。与相变蓄热纤维类似,光能发热纤维多是由纤维基质与光热材料结合制得,故按照光热材料区分,其可分为无机材料基光能发热纤维和共轭聚合物基光能发热纤维。

2.4.1 无机材料基光能发热纤维 金属、金属氧化物、金属碳化物等无机材料因其表面等离子体共振作用而具有高效光吸收特性,已被广泛应用于光热转换领域。尽管无机材料具有优良的光热转换性能,但相当一部分无机材料与纤维材料结合困难,进而制约了无机材料基光能发热纤维的发展。例如,碳化锆(ZrC)纤维等陶瓷材料基纤维受限于加工温度,仅能通过静电纺丝联合热解工艺进行小规模制备。相比之下,二硫化钼(MoS₂)因其较低的工艺要求和较广的可见光吸收波段成为制备光能发热纤维时使用较多的无机光热材料^[45-46]。CAO Y M 等^[47]通过热风浸渍法将MoS₂空心纳米球附着于棉纤维表面,所制得的光热纤维在冬日下午阳光的照射下温度峰值可达53℃(见图9)。ZHANG Z H 等^[48]采用同轴湿法纺丝工艺将MoS₂及正十八烷引入纤维素纳米纤维,制得相变光热纤维,光热转换及蓄热性能明显优于常见纤维。

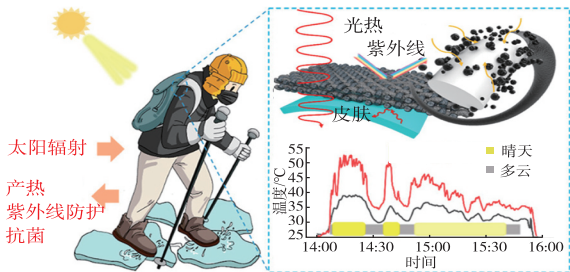


图9 MoS₂基光能发热纤维结构和表面温度变化
Fig. 9 Structure and surface temperature change of MoS₂-based photothermal fibers

2.4.2 共轭聚合物基光能发热纤维 共轭聚合物具有较强的光捕获能力,是一种理想的光热转换材料。共轭聚合物通常具有较窄的带隙,能够有效吸收近红外光,其在二甲基亚砜、低分子量醇、N,N-二甲基甲酰胺等极性溶液中能够迅速形成纳米颗粒,通过常用纺丝方法即可与纤维基底稳固结合。例如,典型的共轭聚合物——聚吡咯可通过喷涂法、浸渍法及原位聚合法等工艺与纤维素纤维高效结合,或是通过静电纺丝法直接制成聚吡咯光能发热纳米纤维膜。

3 保暖功能纤维的应用现状

保暖纤维的功能性使其应用场景并不局限于制作防寒保暖服装。吸湿发热、相变蓄热、电能发热及光能发热等功能的实现,使得保暖功能纤维在医疗保健及智能穿戴等领域也有较为广泛的应用^[49]。

3.1 防寒保暖

保暖功能纤维在防寒保暖领域发挥着重要作用。相较于天然纤维,保暖功能纤维往往更加轻盈且保暖效果更佳,能够让穿着者保持舒适体感,以有效应对低温环境。由封装气凝胶纤维(encapsulated aerogel fiber, EAF)制成的毛衫与常见保暖服装的保暖性能对比如图10^[5]所示。由图10可以看出,EAF毛衫的表面温度最低,即人体热量散失最少,因此其保暖性能优于羽绒服、羊毛衫和棉衫,且EAF可以有效减少服装质量和体积,有望改变当前被动保暖服装厚重臃肿的现状。在高纬度及高海拔地区的恶劣环境下,积极保暖纤维能够进一步提升保暖效果,例如,基于碳纤维制成的电加热服可满足边防部队在 $-45 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极寒环境中执行巡逻、瞭望、潜伏等任务时的保暖要求^[50]。

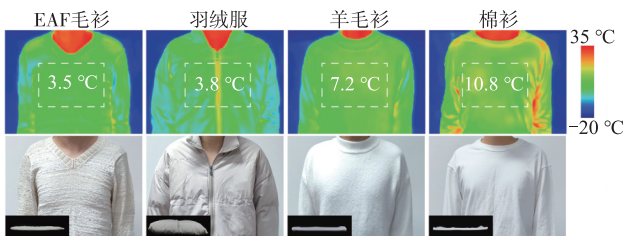


图10 EAF毛衫与常见保暖服装在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 寒冷环境中的保暖性能对比

Fig. 10 Comparison of thermal performance between EAF sweater and common warm clothing in $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ cold environment

3.2 医疗健康

医疗健康领域应用较多的保暖功能纤维多属积极保暖纤维。该类纤维的发热功能可以在理疗器件、电热护具、温控床品等医疗器件中发挥重要作用(见图11^[51])。基于电能发热纤维制备的电热手套、护腕、护膝等电热理疗器件,能够通过加热来扩张血管系统和周围的胶原蛋白组织,以缓解关节疼痛或雷诺现象^[52-53](见图12^[42])。朱欣怡^[54]基于石墨烯纤维开发了一系列具有抗菌功能的吸湿发热针织面料,可有效抑制常见细菌,适用于制备医疗保健场所使用的手术衣、治疗巾及床上用品。

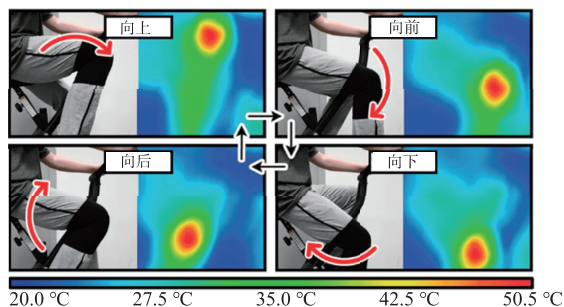


图11 电能发热纤维基理疗器件

Fig. 11 Physiotherapy devices based on electrothermal fibers



图12 热疗用电能发热纤维

Fig. 12 Electrothermal fibers used for thermotherapy

3.3 智能穿戴

目前,空调、地暖及新风系统等热调节设备均用于调节环境温度,无法直接调节人体温度^[55]。由于不同人对热舒适体验的要求不同,集中调温策略难以兼顾环境温度与人体温度^[56]。纤维材料作为人体与周围环境热量交换的媒介,直接影响人体皮肤周围的微气候,是个人热管理的重要环节。相变蓄热纤维特有的调温功能使其能够根据环境温度主动进行双向温度调节,可用于制备智能调温服装^[57]。WANG R Q等^[58]提出一种三重形状记忆变色相变纤维,实现了热/冷环境下人体智能热管理的可视化。

4 结 语

随着全球变暖,极寒天气频发使得人们对保暖服装的品质要求愈来愈高,保暖功能纤维作为保暖服装的基材,其性能直接关系到成衣的保暖效果。因此,研究和开发保暖性、舒适性及功能性俱佳的保暖功能纤维成为亟待解决的问题。目前,保暖功能纤维的相关研究主要集中在纤维制备、纤维改性、机理分析及结构设计等方面,已经取得了一系列创新成果。然而,在实际应用过程中,保暖功能纤维仍然存在一些不足,具体表现在以下几个方面:

1)材料相互作用的机理不明确。在实际应用中,保暖功能纤维通常与其他纺织材料结合使用,各材料间的交互作用显著影响整体保温性能。然而,目前对此类交互作用机理的理解尚不充分,亟

需更多实验和理论研究来揭示其机理,以提升纤维保暖性能。

2) 多维结构分析的范围不全面。保暖功能纤维的性能受其多维度结构的影响,涵盖从微观至宏观的各个层面。然而,当前对于不同维度结构间综合作用机制的理解仍不成熟。为了全面分析并优化纤维的保暖特性,未来需深入探讨各个尺度结构对保暖性能的具体贡献,并阐明它们相互作用的机制以起到更优的保温效果。

3) 附加功能集成的影响不清晰。目前,保暖功能纤维的相关研究多集中在保暖性能方面,并已取得显著进展。然而,针对透气性、防水性和抗菌性等关键性能的整合,仍需进一步研究和优化。未来研究的目标是开发出一种集多种优势性能于一体的纤维材料,满足多样化的应用场景和需求。

参考文献:

[1] 孙艳丽. 相变微胶囊低温防护复合织物的结构设计及传热模型研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.

[2] 李猛猛. 聚酰亚胺气凝胶纤维的制备及其性能[D]. 上海: 东华大学, 2023.

[3] HAREL E, GRANWEHR J, SEELEY J A, et al. Multiphase imaging of gas flow in a nanoporous material using remote-detection NMR[J]. *Nature Materials*, 2006, 5: 321-327.

[4] ZHOU J, HSIEH Y L. Nanocellulose aerogel-based porous coaxial fibers for thermal insulation [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104305.

[5] WU M R, SHAO Z Y, ZHAO N F, et al. Biomimetic, knittable aerogel fiber for thermal insulation textile[J]. *Science*, 2023, 382 (6677): 1379-1383.

[6] LI Q H, YUAN Z H, ZHANG C, et al. Tough, highly oriented, super thermal insulating regenerated all-cellulose sponge-aerogel fibers integrating a graded aligned nanostructure [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(9): 3516-3524.

[7] ZHANG H H, SHEN Y, EDGAR K J, et al. Influence of cross-section shape on structure and properties of Lyocell fibers [J]. *Cellulose*, 2021, 28(2): 1191-1201.

[8] WANG L, CHI W L, LIU C Y, et al. Large-scalable polar bear hair-like cellular hollow fibers with excellent thermal insulation and ductility[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139 (42): 53018.

[9] 衣卫京, 肖红. 中空纤维的技术现状和发展展望[J]. *合成纤维*, 2004, 33(增 1): 15-17, 20.
YI Weijing, XIAO Hong. Technical status and development prospect of hollow fiber [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2004, 33 (Sup 1): 15-17, 20. (in Chinese)

[10] WANG H Y, XI R F, LI Y Y, et al. The thermal and light performance of triangular hollow porous polyacrylonitrile fibers reinforced by inorganic salt [J]. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2022, 653: 130033.

[11] 赵金洋, 顾学峰, 赵连英. 中空保暖纤维在三线衬垫织物中的应用及其性能研究[J]. *丝绸*, 2023, 60(6): 25-32.
ZHAO Jinyang, GU Xuefeng, ZHAO Lianying. Study on the application and properties of hollow polyester fibers in three-yarn

fleecy fabrics [J]. *Journal of Silk*, 2023, 60 (6): 25-32. (in Chinese)

[12] 李萍. Dralon 腈纶/黏胶混纺纱及其针织面料的性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.

[13] 陈的. 不同保暖材料的保暖机理与性能研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2019.

[14] 宁翠娟. 新型保暖纤维的研究与应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2021, 46(6): 57-61.
NING Cuijuan. Research and application of new thermal fibers [J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2021, 46(6): 57-61. (in Chinese)

[15] 刘津玮, 王波, 刘滨璐, 等. 吸湿发热纤维的研究现状及发展趋势[J]. *山东纺织科技*, 2021, 62(3): 48-50.
LIU Jinwei, WANG Bo, LIU Binlu, et al. Research status and development trend of hygroscopic heating fiber [J]. *Shandong Textile Science and Technology*, 2021, 62 (3): 48-50. (in Chinese)

[16] 张文欢. 服装局部与整体热阻、湿阻之间的关系研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2018.

[17] ZHANG L M, CHENG L D, ZHANG R Y, et al. Evaluation on thermal and wet comfort properties of hygroscopic exothermic knitted fabric based on moisture diffused-transmission mechanism [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2024, 115 (10): 1822-1836.

[18] CUI Y, GAO S Y, ZHANG R Y, et al. Study on the moisture absorption and thermal properties of hygroscopic exothermic fibers and related interactions with water molecules [J]. *Polymers*, 2020, 12(1): 98.

[19] 马正升. 新型多功能吸湿发热纤维的制备及应用[J]. *天津纺织科技*, 2018(2): 41-46.
MA Zhengsheng. Development and application of new-type multi-functional moisture-absorbing and heat-gener ating fiber [J]. *Tianjin Textile Science and Technology*, 2018 (2): 41-46. (in Chinese)

[20] 于伟东. 纺织材料学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2006.

[21] 程明丽. EKS 纤维的性能研究及其保暖针织面料开发[D]. 上海: 东华大学, 2022.

[22] 杨媛媛, 苏森, 鲁佳亮, 等. 吸湿发热机织面料的设计与性能 [J]. *上海纺织科技*, 2024, 52(1): 41-45, 59.
YANG Yuanyuan, SU Miao, LU Jialiang, et al. Design and properties of moisture absorption and heat generation woven fabric [J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2024, 52 (1): 41-45, 59. (in Chinese)

[23] GUO Y H, HOU T, WANG J, et al. Phase change materials meet microfluidic encapsulation [J]. *Advanced Science*, 2024, 11 (37): 2304580.

[24] PRAJAPATI D G, KANDASUBRAMANIAN B. A review on polymeric-based phase change material for thermo-regulating fabric application[J]. *Polymer Reviews*, 2020, 60(3): 389-419.

[25] XU F D, ZHANG T, XU Z G, et al. Solid-solid phase change fibers with enhanced energy storage density for temperature management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 79: 110190.

[26] 陈云博. 再生甲壳素稳定的 Pickering 乳液构筑相变微胶囊及其在纺织品中的应用[D]. 上海: 东华大学, 2022.

[27] 陈瑜. 相变微胶囊木棉纺织品的制备及其调温性能的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2023.

[28] 董激文, 李素英, 陈蕾, 等. 木棉纤维絮片制标中关键指标的确立[J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(6): 42-50.
DONG Jiwen, LI Suying, CHEN Lei, et al. Establishment of key

- indexes in the formulation of wadding of kapok fiber standard[J]. *Technical Textiles*, 2023, 41(6): 42-50. (in Chinese)
- [29] GIRO-PALOMA J, MARTÍNEZ M, CABEZA L F, et al. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1059-1075.
- [30] ZHANG X, XIE R, HU W X, et al. Microfluidic fabrication of core-sheath composite phase change microfibers with enhanced thermal conductive property [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(23): 15769-15783.
- [31] CHERIF C, TRAN N H A, KIRSTEN M, et al. Environmentally friendly and highly productive bi-component melt spinning of thermoregulated smart polymer fibres with high latent heat capacity [J]. *Express Polymer Letters*, 2018, 12(3): 203-214.
- [32] WANG Y, YAO J M, ZHU G C, et al. A novel method for producing bi-component thermo-regulating alginate fiber from phase change material microemulsion [J]. *Textile Research Journal*, 2020, 90(9/10): 1038-1044.
- [33] 王维杰, 曹良波, 郭荣辉. 导电纤维的发展现状及应用[J]. *纺织科学与工程学报*, 2024, 41(1): 101-110.
WANG Weijie, CAO Liangbo, GUO Ronghui. Development status and applications of conductive fibers [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2024, 41(1): 101-110. (in Chinese)
- [34] 刘旭华, 苗锦雷, 曲丽君, 等. 用于可穿戴智能纺织品的复合导电纤维研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(1): 67-83.
LIU Xuhua, MIAO Jinlei, QU Lijun, et al. Research progress of composite conductive fiber in wearable intelligent textiles[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 67-83. (in Chinese)
- [35] 杨莹莹. 金属丝/桑蚕丝织物的制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
- [36] 李雅芳. 基于镀银纱线的加热织物制备及其热力学性能研究与仿真[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [37] XIA Y, CAI P, LIU Y N, et al. A low-cost and high-efficiency electrothermal composite film composed of hybrid conductivity fillers and polymer blends matrix for high-performance plate heater [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2021, 50(6): 3084-3094.
- [38] DARZI M E, GOLESTANEH S I, KAMALI M, et al. Thermal and electrical performance analysis of co-electrospun-electrospayed PCM nanofiber composites in the presence of graphene and carbon fiber powder[J]. *Renewable Energy*, 2019, 135: 719-728.
- [39] XIONG Y, LI Y C, CHEN C L, et al. The surface structure origin of carbon fiber with enhanced electrothermal properties prepared by modification of graphene coating [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(8): 4288-4298.
- [40] 刘婉玲. 基于芳纶织物的电磁屏蔽复合材料制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [41] GRANCARIC A M, JERKOVIC I, KONCAR V, et al. Conductive polymers for smart textile applications[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, 48(3): 612-642.
- [42] 李沂蒙, 李雯昕, 刘晓莉, 等. 聚吡咯基本征可拉伸导电纤维构建及电热理疗应用[J]. *高分子学报*, 2024, 55(3): 309-319.
LI Yimeng, LI Wenxin, LIU Xiaoli, et al. Construction of stretchable conductive fibers based on polypyrrole and their application in electrothermal therapy [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2024, 55(3): 309-319. (in Chinese)
- [43] 王云仪, 黄婉蓉. 冬季户外服装的功能设计及用户需求匹配度分析[J]. *服装学报*, 2023, 8(6): 513-520.
WANG Yunyi, HUANG Wanrong. Functional design and user demand matching degree analysis of winter outdoor clothing[J]. *Journal of Clothing Research*, 2023, 8(6): 513-520. (in Chinese)
- [44] 袁生潮, 梁慧芳, 戴国笠, 等. 户外帐篷材料的发展现状与展望[J]. *现代纺织技术*, 2024, 32(6): 142-150.
YUAN Shengchao, LIANG Huifang, DAI Guoli, et al. Development status and prospect of outdoor tent materials[J]. *Advanced Textile Technology*, 2024, 32(6): 142-150. (in Chinese)
- [45] XU J N, TAN Y L, DU X S, et al. Cellulose nanofibril/polypyrrole hybrid aerogel supported form-stable phase change composites with superior energy storage density and improved photothermal conversion efficiency[J]. *Cellulose*, 2020, 27(16): 9547-9558.
- [46] YANG X D, YANG Y B, FU L N, et al. An ultrathin flexible 2D membrane based on single-walled nanotube-MoS₂ hybrid film for high-performance solar steam generation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(3): 1704505.
- [47] CAO Y M, ZHENG M, LI Y F, et al. Smart textiles based on MoS₂ hollow nanospheres for personal thermal management [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 13(41): 48988-48996.
- [48] ZHANG Z H, MAO H, KONG Y Y, et al. Re-designing cellulosic core-shell composite fibers for advanced photothermal and thermal-regulating performance[J]. *Small*, 2024, 20(14): 2305924.
- [49] ZUO X W, ZHANG X J, QU L J, et al. Smart fibers and textiles for personal thermal management in emerging wearable applications [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(6): 2201137.
- [50] 佟攻, 张雅丽, 唐世君. 边防部队电加热服的研制与功能评价[J]. *服装学报*, 2021, 6(5): 457-462, 470.
TONG Mei, ZHANG Yali, TANG Shijun. Development and function evaluation of electric heating suit for frontier troops [J]. *Journal of Clothing Research*, 2021, 6(5): 457-462, 470. (in Chinese)
- [51] WANG Y X, YU Z, MAO G Y, et al. Printable liquid-Metal@PDMS stretchable heater with high stretchability and dynamic stability for wearable thermotherapy[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1800435.
- [52] BROSSEAU L, YONGE K A, ROBINSON V, et al. Thermotherapy for treatment of osteoarthritis [J]. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2003, 89(12): 694-695.
- [53] DAWIT H, ZHANG Q, LI Y M, et al. Design of electro-thermal glove with sensor function for raynaud's phenomenon patients[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 377.
- [54] 朱欣怡. 石墨烯针织物的制备及发热抗菌性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [55] PENG Y C, CUI Y. Advanced textiles for personal thermal management and energy[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 724-742.
- [56] PENG Y C, CHEN J, SONG A Y, et al. Nanoporous polyethylene microfibres for large-scale radiative cooling fabric [J]. *Nature Sustainability*, 2018(1): 105-112.
- [57] 沈雷, 孙滢. 智能可穿戴领域研究现状和发展趋势[J]. *服装学报*, 2023, 8(2): 125-133.
SHEN Lei, SUN Tian. Intelligent wearable research status and its development trend[J]. *Journal of Clothing Research*, 2023, 8(2): 125-133. (in Chinese)
- [58] WANG R Q, HE Y J, XIAO Y Y, et al. Weavable phase change fibers with wide thermal management temperature range, reversible thermochromic and triple shape memory functions towards human thermal management[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 187: 111890. (责任编辑: 沈天琦)