

发热服装面料的开发及应用

肖学良, 陈天骄, 谢云涛, 王睿瑶, 王志宇

(江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:为研究发热面料的制备方法,提高面料发热性能,拓宽其应用领域,综述近期国内外发热面料的研究进展。根据不同发热机理,将发热材料分为吸湿发热、电能发热、光能发热、化学反应放热和相变调温5种,并对相关发热面料进行了优缺点对比:从纤维、纱线、组织结构和表面处理技术等角度,探讨发热面料的开发;总结发热面料在日常保暖、防护急救、医疗卫生、智能穿戴等领域的应用;最后对目前发热面料开发中存在的问题进行分析。

关键词:发热材料;纤维开发;纱线开发;面料开发;应用

中图分类号:TS 102 文献标志码:A 文章编号:2096-1928(2021)04-0283-08

Developments and Applications of Heat-Generating Fabrics

XIAO Xueliang, CHEN Tianjiao, XIE Yuntao, WANG Ruiyao, WANG Zhiyu

(School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to study the preparation methods of heat-generating fabrics, improve the heat generation performance and broaden its application field, this paper reviews recent progress of heat-generating fabrics at home and abroad. According to the different exothermic mechanisms, exothermic materials are divided into hygroscopic exothermic materials, electrothermal materials, optothermal materials, chemically exothermic materials and phase-change materials; then the merits and drawbacks of heat-generating fabrics prepared by these materials are compared. The development is discussed from the perspectives of fiber, yarn, textile structure and surface treatment technology. Later the applications of heat-generating fabrics in daily warm retention, first aid, health care, smart wears and other fields were summarized. Through analyzing the shortcomings of heat-generating fabrics developed in recent years, the prospects are discussed.

Key words: exothermic material, fiber development, yarn development, fabric development, applications

随着科技进步与生活水平的提高,人们不再满足于被动的保暖方式,开始研究主动产热放热的发热材料,并探索主动保暖的途径与方法。主动发热面料柔软、可设计、升温迅速、温度可控,与传统厚重的保暖面料相比,主动发热面料更加轻便雅观、保暖效果好,除用于日常保暖外,还可应用于防护急救、医疗卫生、智能穿戴等领域。因此,开发发热织物,在满足人们保暖需求的同时,更有利于满足人们的美观需求,而进一步优化和改善其发热效果则利于开发功能性发热面料,拓宽它的应用领域。因此,文中综述了发热面料的研究现状,并对其未

来发展趋势进行展望。

1 发热纤维及其制备

发热纤维是指能够自行主动地产生或释放热量的纤维^[1]。发热纤维的发热机理如图1所示,根据发热机理,一般将发热纤维分为吸湿发热、电能发热、光能发热、化学反应放热和相变放热5种^[1-2]。其中,吸湿发热纤维绿色环保,但发热时间长、纤维成本高;电能发热纤维电热转换效率高、操作容易,但服用舒适性不高、电池不便捷;光能发热纤维节能环保,可使用条件受限、成本高;化学反应

收稿日期:2021-02-08; 修订日期:2021-05-01。

基金项目:国家先进功能纤维创新中心科研攻关项目(2020-FX020026)。

作者简介:肖学良(1984—),男,副教授,硕士生导师。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

放热纤维升温快,使用便捷,但效果不持久且反应不可逆;与其他发热纤维相比,相变调温纤维可双向调节温度,但调温范围窄^[3]。

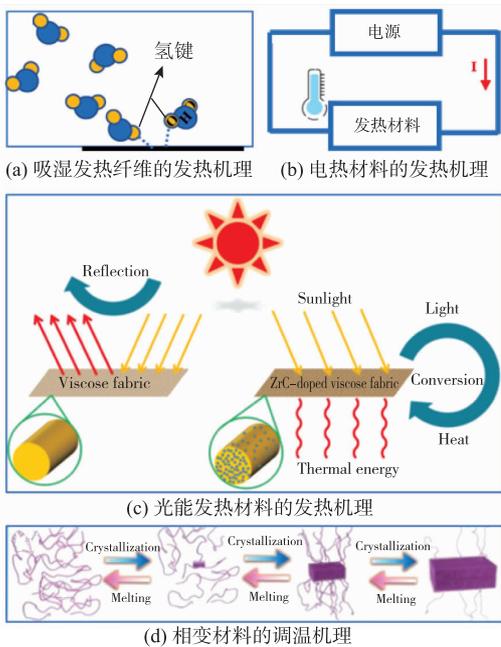


图1 发热纤维的发热机理

Fig. 1 Exothermic mechanisms of different materials

1.1 发热纤维的分类

1.1.1 吸湿发热纤维 一般认为,吸湿发热纤维吸收外界环境或人体产生的水汽,形成氢键放出热量,水分子动能也转换为热能[见图1(a)];但放出热量的主要来源是液化还是动能转化有待进一步论证^[1-2,4]。日本的吸湿发热纤维研究较为成熟,包括 Softwarm 纤维、N38 纤维、EKS 纤维等^[5];美国研发有 Outlast 纤维、Thermolite 纤维等^[6];中国开发有共混纺吸湿发热黏胶纤维^[7]、改性发热腈纶纤维^[8]等。

1.1.2 电能发热纤维 电能发热纤维利用电流热效应发热,导电材料通电后,将电能转化为热能^[9][见图1(b)]。目前,具有优良加工性和稳定性的聚合物基电热材料逐渐取代成本高、应用条件严格的金属类材料^[9-10]。WANG C L 等^[11]采用熔融纺制备聚醚醚酮纤维,编织得到的 PEEK 电热织物具有高断裂强度(830 ~ 1 422 N)和高热稳定性;强丁丁^[12]开发了适用于不同场景的不同温度石墨烯基电热产品(低温在 45 °C 左右,中温在 80 ~ 100 °C)。

1.1.3 光能发热纤维 光能发热纤维能够吸收太阳辐射中不同波长光线的能量并转化为热能,或反射人体热辐射^[2][见图1(c)]^[13]。不同材料对不同波长光线的吸收和反射能力不同,IV 族过渡金属碳化物可吸收太阳光中的高能波长段(300 ~ 2 000 nm)和反射人体散发的低能辐射(1 000 nm),

具有极佳的光热效果^[14]。梁佳璐等^[15]通过共混纺丝制得纳米陶瓷锦纶短纤,并编织得到吸光发热性能良好的纬编织物。LI C L 等^[13]通过在黏胶纺丝液中添加 ZrC,制备了新型光热纤维,纺成的织物经红外光照射后表面温度可升高近 40 °C。

1.1.4 化学反应放热纤维 化学反应放热材料通过发生化学反应将化学能转化为热能^[2]。如“暖宝宝”“速食饭”、自热小火锅等就是通过化学反应放热材料加热升温。但由于化学反应放热具有不可逆性,多用于一次性加热,在发热纱线、面料中的应用较为少见。

1.1.5 相变调温纤维 相变调温纤维通过物相变化吸收或放出热量,从而实现温度调节^[2,16][见图1(d)]^[16]。李佳佳等^[17]通过原位聚合和湿法纺丝制备石蜡/PVA 储能纤维,纤维相变焓值为 45.39 J/g,具有优良的储能性及热稳定性。XUE F 等^[18]基于三聚氰胺泡沫、氧化石墨烯和石墨烯纳米血小板合成了新型复合相变材料,具有优异的能量转换性能,在建筑节能保温、微电子器件温度保护等应用中存在巨大潜力。

1.2 发热纤维的制备

发热纤维的发热与保暖性能主要取决于纤维的形态结构与化学组成。与普通圆形截面纤维相比,异型纤维截面不规整,纤维不易聚集,纤维间空隙较大,有利于静止空气的储存,从而降低织物导热系数,提高织物的保暖性能,如哑铃形的德绒纤维等^[19]。因此,圆形中空涤纶纤维与扁平特殊黏胶纤维混纺时易于在纤维间形成空隙,增加静止空气含量,阻隔内外温度交换,达到保温作用^[20]。同理,超细纤维间或超细纤维与其他纤维间的空隙同样易于贮存静止空气。就吸湿发热纤维而言,纤维表面的纵向沟槽可提升纤维表面性能,利于吸附水分子。如 EKS 纤维和舒热丝纤维,与普通腈纶纤维相比,其表面沟槽更宽更深(见图2^[21]),在一定程度上增加了芯吸效应,利于水分传输,增强吸湿发热功能^[21]。此外,当纤维含有较多亲水基团时,纤维具有较高的回潮率;当氨基、酯基等向亲水基团转变时,分子间作用力减弱,结晶度下降,纤维吸湿性能改善^[8]。

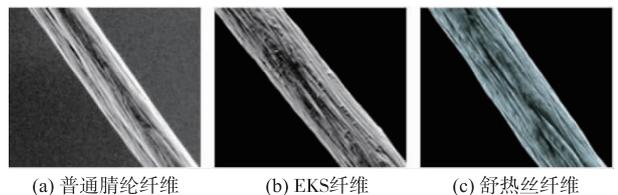


图2 几种吸湿发热纤维的 SEM

Fig. 2 SEM photographs of several hygroscopic exothermic fibers

依据形态结构和化学组成对纤维发热保暖性能的影响,采用化学改性、共混纺丝和静电纺丝等方法也可以制备发热纤维材料,具体如图3所示。化学改性法通过聚合、交联等反应,改变纤维大分子组成与结构,引入利于发热性能的元素、基团等。马正升^[6]对聚丙烯腈进行交联改性,提升亲水基团含量,改性后纤维表面沟槽宽而深、比表面积增大,水分吸附与传递能力提升。共混纺丝法就是在聚合物熔体或溶液中加入发热功能材料,纺制发热纤维^[16,22]。XIA W等^[23]将纳米相变材料加入纺丝熔体中制备PA6基相变调温纤维[见图3(a)^[23]],所得纤维的焓值高达137 J/g。JIANG Y J等^[24]在湿法纺丝前将氧化石墨烯(GO)加入黏胶溶液中,制备了一种具有光热转换能力的新型黏胶纤维[见图3(b)^[24]],结果表明,在相同的红外曝光时间内,氧化石墨烯分数为4%的黏胶织物温升比纯黏胶样品高出81.2℃。静电纺丝是一种制备超细纤维的便捷技术,常用于制备相变调温纤维^[25]。ZHU W T等^[26]通过静电纺制备了一种新型PEG/PVA复合相变纤维,取代了传统的有机溶剂法,更为绿色经济。由发热纤维纺制纱线再织成的面料,因纤维均匀分布在纱线、面料中,发热面料发热性能稳定,温度分布均匀。

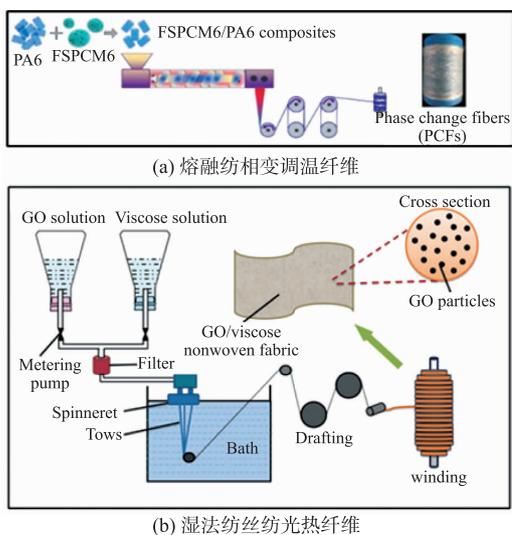


图3 制备发热纤维的不同纺丝方法

Fig. 3 Different spinning methods for preparing exothermic fibers

2 发热纱线的开发

类似于纤维,纱线发热效果也受形态结构和化学组成的影响,因此可利用纺纱方法,通过改变纱线化学组成或形态结构来制备发热纱线。一般情况下,线密度较大的纱线织成的织物结构更松散,内部空隙大,利于静止空气储存和湿气传递。制备发热纱线可以采用混纺的方法,在混纺纱中加入发

热纤维组分或利于发热保暖的纤维组分,适当调节混纺比,使材料获得良好的发热性能^[19]。杜凯^[4]纺制了混纺比不同的发热腈纶/中空涤纶混纺纱并分别编织双罗纹织物,研究发现随着混纺纱中发热腈纶纤维含量的增加,织物的吸湿发热性能逐渐提升,见表1^[3]。发热纤维也可与超细纤维、异型纤维或表面粗糙的纤维混纺,所制纱线孔隙率较大,易储存静止空气和吸湿导湿,发热保暖效果良好,如日本由铜氨丝和超细腈纶混纺成的Thermogear R^[27]。除混纺纱外还有包芯纱、包覆纱等,都能够结合发热材料制备发热纱线。沈文涛等^[28]纺制了PorelR吸湿发热氨纶包芯纱,开发的无缝针织物具有吸湿发热、透湿透气、产品轻薄等特点。庞欣^[29]以氨纶与聚酯发热长丝为原料,以1:3的氨纶牵伸比制备氨纶包覆纱用于开发高弹护膝。

表1 纱线混纺比对织物发热性能的影响

Tab.1 Effect of yarn blending ratio on the thermal properties of fabrics

试样	混纺比	平均升温/℃	最大升温/℃
PAN	-	1.2	1.8
HEPAN/T	20/80	3.3	4.8
HEPAN/T	40/60	3.5	5.0
HEPAN/T	60/40	3.6	5.3
HEPAN/T	80/20	3.9	6.1
HEPAN	-	4.1	6.3

注: PAN为普通腈纶纱线; HEPAN/T为发热腈纶/中空涤纶混纺纱; HEPAN为纯发热腈纶纱线。

纱线、金属丝等发热材料通过编织、刺绣、缝纫等方式应用到面料中,简单方便。严陶海等^[30]将碳纤维发热线作为纬纱与棉纱按照3种不同排列比编织平纹机织物。CHEN H J等^[31]将不锈钢纱线刺绣、缝纫到棉织物上,利用热变色材料展现刺绣、缝纫的图案,具体如图4所示^[31]。

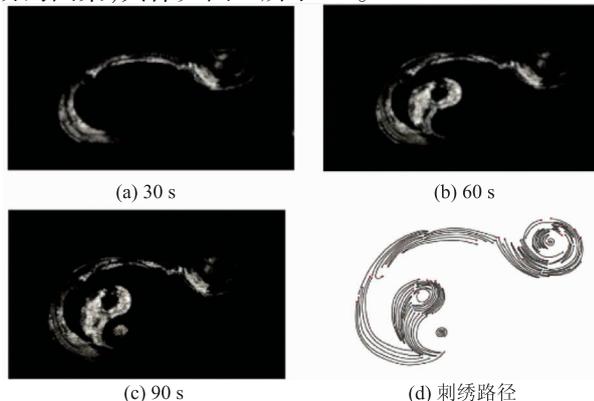


图4 利用热变色效应显示太极的背光图

Fig. 4 Thermochromic effects of the "Tai Chi" pattern with backlighting

3 发热面料的开发

3.1 基于组织结构的发热面料开发

发热面料分为针织和机织两种组织结构,其中,针织面料蓬松柔软、保暖、透气透湿、服用性能良好。因此,目前关于发热面料的研究中,针织组织较机织组织更受欢迎^[21]。

3.1.1 针织发热面料 针织组织结构由线圈单元相互串套形成^[32],孔隙率高、结构蓬松,因此静止空气含量高,保暖性能较好,同时透气透湿性能也较好^[21]。其中,双罗纹组织和衬纬组织在发热面料的研究中应用较多。双罗纹组织具有双面结构,织物厚实,保暖性能良好,常用于制作冬季保暖服装。衬纬组织是沿地组织纬向衬入辅助纱线的组织^[32],适于将发热材料作为辅助纱线引入。许静娴等^[33]织造了6款组织结构不同的电热针织物,发现双罗纹织物发热性能最优,因其组织内部纱线接触点多、总电阻小,所以升温效果好,且温度分布均匀。陈莉等^[34]研究了4种不同镀银长丝针织物的导热发热性能,结果表明衬纬织物电路清晰,电阻易于控制,温度分布均匀且发热效果良好。除此之外,还有半螺纹空气层^[35]等多种针织面料在发热面料的开发与应用中也具有较大优势。

3.1.2 机织发热面料 在机织的三元组织织物中,平纹织物较紧密,芯吸效果最差;缎纹织物结构蓬松,孔隙率较大,透气透湿性能最好;斜纹织物孔隙、厚度适中,克罗值最大,升温效果优于易散热的缎纹织物。双层机织物单位面积所含发热材料多,发热保暖效果比单层织物更优,但其透湿导湿性不如单层织物^[21]。机织面料结构及其温度分布如图5^[36]所示。机织面料因纱线间存在大量的交叉接触点[图5(a)],热量传导与分布更均匀[图5(b)],尤其是电流分布均匀的电热机织织物^[36]。

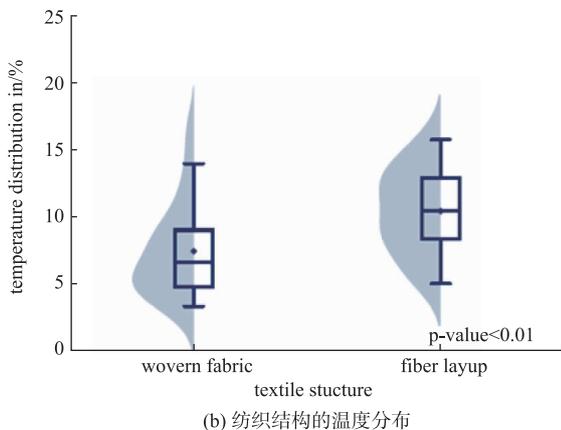


图5 纺织结构及其对温度分布的影响

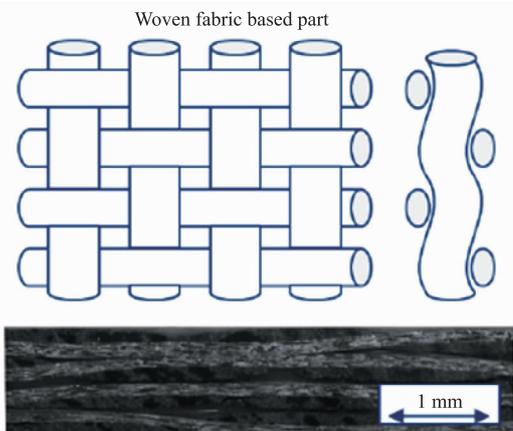
Fig. 5 Textile structure and its effect on temperature distribution

3.2 基于表面处理技术的发热面料开发

借助表面处理技术,通过物理或化学方法可使面料获得发热功效。化学方法包括电镀、离子镀、接枝聚合及化学气相沉积等;物理方法包括表面涂覆改性、真空镀、溅射、喷射及物理气相沉积等,运用不同表面处理技术开发发热面料如图6所示。XIE J等^[37]利用原位聚合法将聚丙烯添加到棉织物上[见图6(a)^[37]],制成的聚丙烯/棉复合材料性能优异,电压为5V时可在3min内达到168.3℃,且拉伸强度达到58MPa,是理想的加热元件。LU Y W等^[38]利用镀银、聚氨酯(PU)涂层和热致变色涂层制备了基于锦纶织物的热致变色多层复合织物,该织物具有良好的加热效果和热稳定性。基于相变微胶囊的浸轧整理,可使相变材料均匀分布于织物表面与纱线内部^[39-40]。ALAY S等^[41]通过浸轧的方式将相变微胶囊整理到棉、涤等织物上,结果表明不同织物的焓值较浸轧整理前都有明显提升。

采用表面处理方法制备发热面料,高效快捷,发热效果优良,但对织物的透气性、柔软性等会有所影响;并且由于材料多涂覆或沉积在织物表面,易损耗影响持久稳定性。莫崧鹰等^[42]借助等离子体金属镀膜技术开发了具有纳米级厚金属膜的柔软发热功能服装,具有轻薄可折耐用等优点。ZHANG L等^[43]采用改进的气相沉积法在织物表面涂覆PEDOT聚合物薄膜[见图6(b)^[43]和图6(c)^[43]],几乎没有改变织物的手感、质量和透气性能。此外,丝网印刷^[44]、油墨打印^[45]等方法也可用于制备发热面料。

除直接对织物进行表面处理制备发热面料外,还可将面状发热面料(如电热膜、电加热织物等)通过夹层、黏合等方式与面料结合形成发热面料。张阿真^[46]借助黏合衬,在两面分别黏合铜丝和涂层织物制作发热材料,制备双层柔性加热织物。



(a) 纺织结构的示意图和显微图像

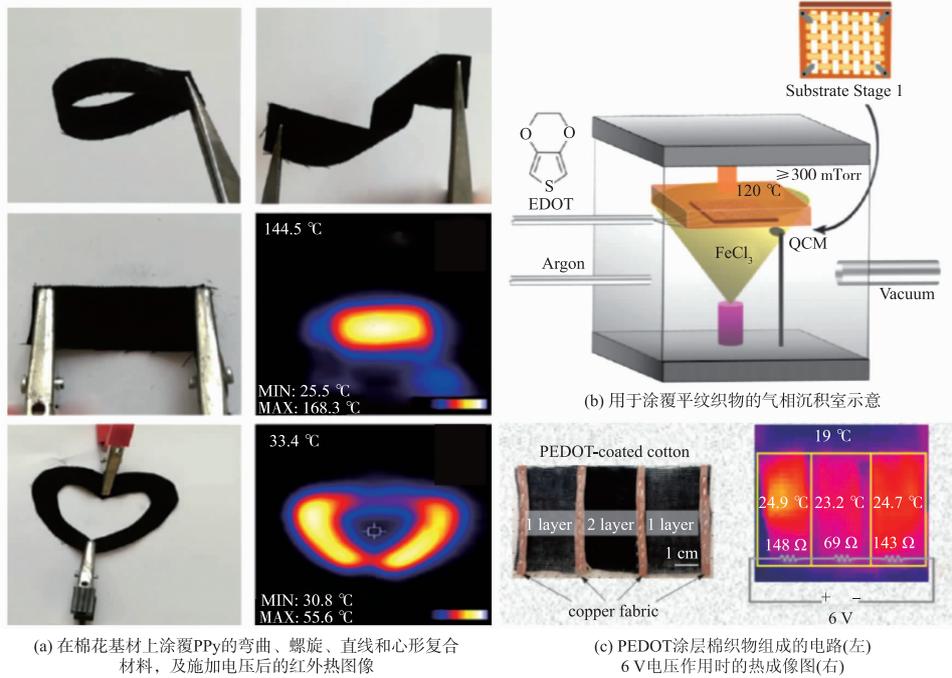


图6 运用不同表面处理技术开发发热面料

Fig.6 Exothermic fabrics developed by different surface treatment techniques

4 发热面料应用研究

发热面料具有主动产热供热等特点,且相较于传统保暖面料更为轻薄美观,多被用于防寒保暖服装的制备。又因柔性、可设计、发热的可控性等特点,发热面料除应用于日常保暖外,还可应用于防护急救、医疗保健和智能穿戴等领域。

4.1 防护急救

发热面料制备的防护服可帮助低温作业和急救工作正常进行,抵御寒冷。杨志坚等^[47]设计了基于原电池原理的供暖救生衣,落水人员拉动充气阀,使空气与铁粉等填充物发生化学反应放热供暖,避免冻伤等。

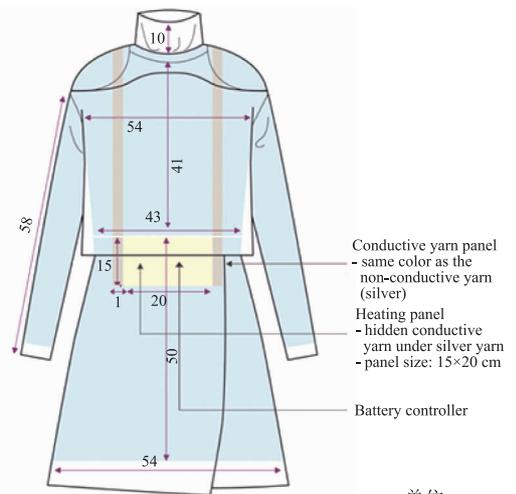
4.2 医疗保健

发热面料能够产生辐射热量,可用于制作理疗服装,辅助疾病治疗与人体保健,具体如图7所示。ZHAO Y F等^[48]利用镀银导电纱织制导电机织物,开发出针对女性痛经的热功能服,在服装腹部位置导电发热缓解人体疼痛[见图7(a)^[48]];洪文进等^[49]设计了基于纳米增强远红外技术的理疗内裤[见图7(b)^[49]],发热膜被加热直至人体临界舒适温度,增强远红外线能够深入皮肤内部,对人体进行热敷按摩和慢性疾病治疗等。

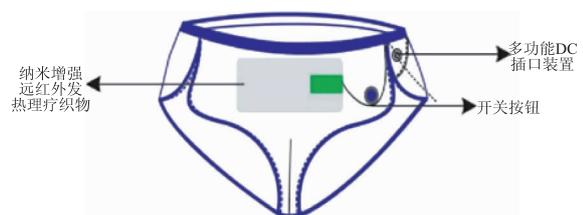
4.3 智能穿戴

使用发热面料制备柔性传感元件等,在智能穿戴设备及通信、监测等领域有广阔的应用前景。YANG M Y等^[50]采用浸渍干燥法将单壁碳纳米管

涂覆在针织棉织物表面,制备了具有较强电加热效果的导电棉织物,如图8所示^[50];由该织物制成的柔性应变传感器可工作应变范围大(0近似于100%)、响应速度快、稳定性好,可实时监测人体站立、行走等运动。



(a) 生理期保暖服



(b) 女性保暖理疗针织内裤

图7 发热面料的应用

Fig.7 Applications of exothermic fabrics

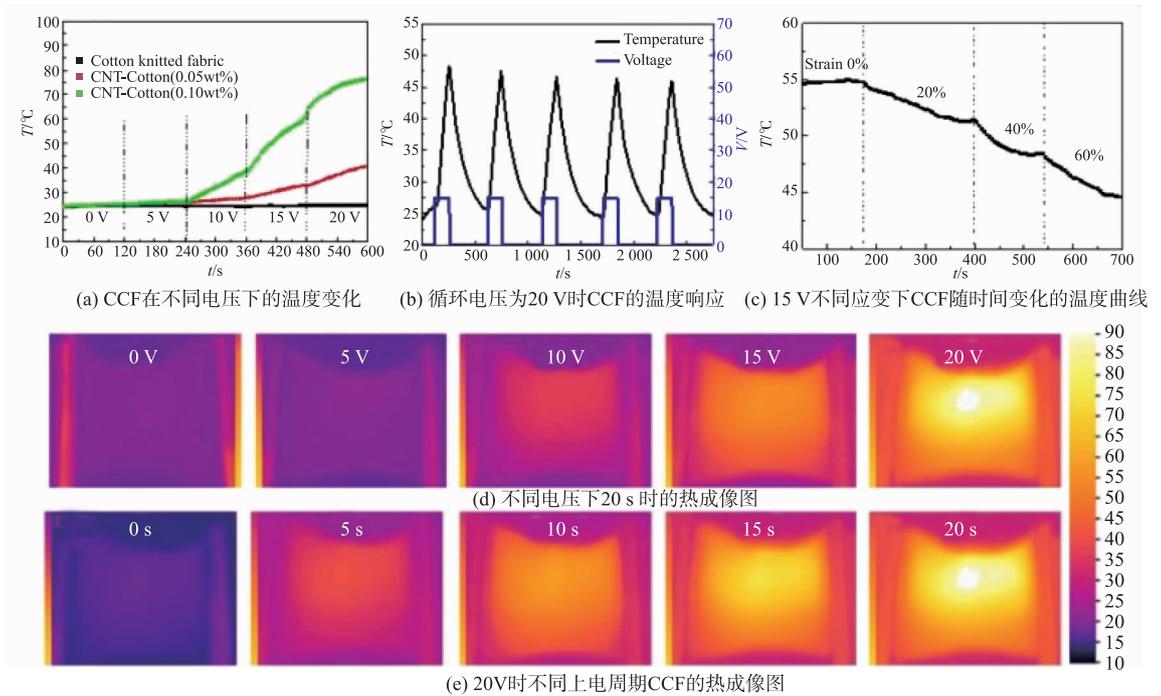


图8 导电棉织物及其电热效果

Fig. 8 Conductive cotton fabric and its electrothermal effect

5 结语

发热面料因主动产热、轻薄便捷、美观智能等特点,具有广阔的应用前景。目前虽已有大量可观研究成果,但仍存在一些需要解决的问题。

1) 发热效果。目前许多发热面料已能达到较好的发热效果,但发热速率、能量转换效率、温度分布均匀度等均需进一步优化。

2) 服用性能。利用表面处理方法制成的发热面料服用性能较差,限制了发热面料的实际应用。研究人员可在电池便携性、可纺柔性材料、热湿舒适性等方面做进一步发展研究,改善服用性能。

3) 力学性能。开发发热面料使用的化学改性、涂层等方法会在一定程度上损伤纤维、纱线等的力学性能,影响面料的耐用性及稳定性。

参考文献:

- [1] 王伟. 蛋白质/纤维素纤维的制备及其吸湿发热性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [2] 李丽莉. 发热纤维的开发与应用[J]. 印染, 2015, 41(21): 49-51.
LI Lili. Development and application of heat-generating fibers[J]. Dyeing and Finishing, 2015, 41(21): 49-51. (in Chinese)
- [3] 刘志艳, 刘玉军, 王新厚. 发热材料及其在服装领域应用的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(8): 1-11.

LIU Zhiyan, LIU Yujun, WANG Xinhou. Research progress of heating materials and their applications in the clothing field[J]. Technical Textiles, 2019, 37(8): 1-11. (in Chinese)

- [4] 杜凯. 发热腈纶纤维及其产品的性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [5] 孙玲, 卢业虎. 新型调温材料在服装中的应用[J]. 现代纺织技术, 2019, 27(4): 38-43.
SUN Ling, LU Yehu. Application of novel temperature adjustable materials in clothing[J]. Advanced Textile Technology, 2019, 27(4): 38-43. (in Chinese)
- [6] 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 multifunctional moisture-absorbing and heat-generating fiber[J]. Tianjin Textile Science and Technology, 2018(2): 41-46. (in Chinese)
- [7] 王晶. 服装纺织用吸湿发热粘胶纤维的制备与性能分析[J]. 粘接, 2019, 40(4): 49-52, 48.
WANG Jing. Preparation and performance analysis of hygroscopically heat-generating viscose fibers for garment textile[J]. Adhesion, 2019, 40(4): 49-52, 48. (in Chinese)
- [8] 刘川美, 刘正芹, 李圆圆, 等. 发热腈纶的结构及其理化性能研究[J]. 丝绸, 2018, 55(2): 31-35.
LIU Chuanmei, LIU Zhengqin, LI Yuanyuan, et al. Study on structure, physical and chemical properties of exothermic polyacrylonitrile fiber[J]. Journal of Silk, 2018, 55(2): 31-35. (in Chinese)
- [9] 赵越. 碳晶场发射电热材料的制备和性能研究[D].

- 沈阳:沈阳化工大学,2019.
- [10] 张颖异,李运刚,张快,等. 高温电热材料的研究发展[J]. 热加工工艺,2011,40(18):40-43,47.
ZHANG Yingyi, LI Yungang, ZHANG Kuai, et al. Research and development of high temperature electrothermal materials[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(18):40-43,47. (in Chinese)
- [11] WANG C L, LUAN J S, XU Z P, et al. Preparation and properties of a novel, high-performance polyether ether ketone fabric[J]. High Performance Polymers, 2018, 30(7):794-802.
- [12] 强丁丁. 石墨烯电热材料的制备及性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.
- [13] LI C L, LI L F, LI J C, et al. Fabrication and characterization of viscose fibre with photoinduced heat-generating properties[J]. Cellulose, 2019, 26(3):1631-1640.
- [14] 廖银琳,湛权,张宇群,等. 纺织品吸光发热性能测试方法[J]. 质量技术监督研究,2016(5):11-13,17.
LIAO Yinlin, ZHAN Quan, ZHANG Yuqun, et al. Test method for light-absorbing thermal properties of textiles[J]. Quality and Technical Supervision Research, 2016(5):11-13,17. (in Chinese)
- [15] 梁佳璐,丛洪莲,高哲. 纳米陶瓷锦纶短经纬编织物吸光发热性能研究[J]. 纺织科学与工程学报,2018,35(3):1-4,15.
LIANG Jialu, CONG Honglian, GAO Zhe. Study on the light-absorbing heat-generating properties of nano-ceramic polyamide staple fiber weft-knitted fabric[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2018, 35(3):1-4,15. (in Chinese)
- [16] 董勤霞. 高品质蓄热发光热湿舒适性关键技术研究及面料开发[J]. 黑龙江纺织,2019(3):1-4.
DONG Qinxia. Research on key technology of high quality regenerative luminous heat and moisture comfort and fabric development[J]. Heilongjiang Textile, 2019(3):1-4. (in Chinese)
- [17] 李佳佳,陆艺超,叶光斗,等. 纺丝原液原位合成相变材料微胶囊制备石蜡/PVA 储能纤维[J]. 复合材料学报,2012,29(3):79-84.
LI Jijia, LU Yichao, YE Guangdou, et al. In-situ synthesis of energy storage paraffin/PVA fibre with phase change microcapsules in the spinning solution[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(3):79-84. (in Chinese)
- [18] XUE F, LU Y, QI X D, et al. Melamine foam-templated graphene nanoplatelet framework toward phase change materials with multiple energy conversion abilities[J]. Chemical Engineering Journal, 2019(365):20-29.
- [19] 黄小蝶,崔沂,张瑞云,等. 多组分发热保暖针织物的热湿舒适性评价[J]. 上海纺织科技,2020,48(6):55-59.
HUANG Xiaodie, CUI Yi, ZHANG Ruiyun, et al. Evaluation of thermal-moisture comfort of multi-component exothermic warm retention knitted fabric[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2020, 48(6):55-59. (in Chinese)
- [20] 陈宝坤. 吸湿发热经编面料的开发[J]. 针织工业,2012(2):1-2,73.
CHEN Baokun. Development of moisture-absorbing and heat-release warp knitted fabric[J]. Knitting Industries, 2012(2):1-2,73. (in Chinese)
- [21] 葛露露,崔沂,张瑞云,等. 基于吸湿发热纤维的毛型面料开发[J]. 毛纺科技,2020,48(7):1-7.
GE Lulu, CUI Yi, ZHANG Ruiyun, et al. Development of wool fabrics based on hygroscopic-heating fibers[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(7):1-7. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] XIA W, FEI X, WANG Q Q, et al. Nano-hybridized form-stable ester@F-SiO₂ phase change materials for melt-spun PA6 fibers engineered towards smart thermal management fabrics[J]. Chemical Engineering Journal, 2021(403):1-10.
- [24] JIANG Y J, LI C L, JIANG P Q, et al. Preparation and characterization of viscose composites fiber and its enhancing effect in photothermal conversion property[J]. Polymer Composites, 2020, 41(10):4084-4092.
- [25] 马露,杨雪珂,高倩钰,等. 静电纺相变纤维的制备及性能表征[J]. 国际纺织导报,2019,47(4):4-6,8,14.
MA Lu, YANG Xueke, GAO Qianyu, et al. Preparation and characterization of phase change fiber by electrospinning[J]. Melliand China, 2019, 47(4):4-6,8,14. (in Chinese)
- [26] ZHU W T, WANG Y Q, SONG S K, et al. Environmental-friendly electrospun phase change fiber with exceptional thermal energy storage performance[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021(222):110939.
- [27] 李坚少. 发热纱线针织保暖内衣面料的开发[J]. 针织工业,2011(3):4.
LI Jianshao. Development of thermal yarn knitted warmth retention underwear fabric[J]. Knitting Industries, 2011(3):4. (in Chinese)
- [28] 沈文涛,王玲,韩倩,等. 采用 Porel R 吸湿发热纱开发贴身穿无缝针织物[J]. 针织工业,2014(5):9-11.
SHEN Wentao, WANG Ling, HAN Qian, et al. Development of next-to-skin seamless knitted fabric using porel R moisture absorption and heat-generating yarn[J]. Knitting Industries, 2014(5):9-11. (in Chinese)
- [29] 庞欣. 高弹护膝纺织品的开发与压力性能分析[D]. 杭州:浙江理工大学,2018.
- [30] 严涛海,王建刚,陈东生. 以薄膜太阳能电池供电的发热碳纤维机织物的发热工艺[J]. 闽江学院学报,2016,37(2):108-114.

- YAN Taohai, WANG Jiangang, CHEN Dongsheng. Heating technology of heating carbon fabric by thin-film solar cells power supply[J]. *Journal of Minjiang University*, 2016, 37(2): 108-114. (in Chinese)
- [31] CHEN H J, HUANG L H. An investigation of the design potential of thermochromic home textiles used with electric heating techniques[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-5.
- [32] 蒋高明. 针织学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2012: 62-94.
- [33] 许静娴, 刘莉, 李俊. 镀银纱线电热针织物的开发及性能评价[J]. *纺织学报*, 2016, 37(12): 24-28.
XU Jingxian, LIU Li, LI Jun. Development and performance evaluation of electrically-heated textile based on silver-coated yarn[J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(12): 24-28. (in Chinese)
- [34] 陈莉, 刘皓, 周丽. 镀银长丝针织物的结构及其导电发热性能[J]. *纺织学报*, 2013, 34(10): 52-56.
CHEN Li, LIU Hao, ZHOU Li. Structure and electric conductive heating performance of silver-plated filament knitted fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 34(10): 52-56. (in Chinese)
- [35] 界璐, 孟家光, 刘娟. Softwarm 发热纤维针织面料的服用性能及评价[J]. *针织工业*, 2013(6): 28-31.
JIE Lu, MENG Jiaguang, LIU Xian. The analysis on the wearing properties of softwarm heat-generating fiber knitted fabric and the comprehensive evaluation [J]. *Knitting Industries*, 2013(6): 28-31. (in Chinese)
- [36] WELLEKÖTTER J, BONTENC. Direct joule heating as a means to efficiently and homogeneously heat thermoplastic prepregs[J]. *Polymers*, 2020, 12(12): 2959.
- [37] XIE J, PAN W, GUO Z, et al. In situ polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019(14): 1-14.
- [38] LU Y W, XU L, HE Y, et al. Thermal-induced color-changing silver plating polyamide fabrics in low electric voltage[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2021, 112(1): 85-94.
- [39] 王瑞, 孙艳丽, 刘星, 等. 碳纳米管改性相变微胶囊的力学与热学性能[J]. *纺织学报*, 2018, 39(2): 119-125.
WANG Rui, SUN Yanli, LIU Xing, et al. Mechanical and thermal properties of phase change microcapsules modified with carbon nanotubes[J]. *Journal of Textile Research*, 2018, 39(2): 119-125. (in Chinese)
- [40] 阎若思, 王瑞, 刘星. 相变材料微胶囊在蓄热调温智能纺织品中的应用[J]. *纺织学报*, 2014, 35(9): 155-164.
YAN Ruosi, WANG Rui, LIU Xing. Application of microencapsulated phase-change materials in intelligent heat-storage and thermo-regulated textile [J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(9): 155-164. (in Chinese)
- [41] ALAY S, ALKAN C, GÖDE F. Synthesis and characterization of poly(methyl methacrylate)/n-hexadecane microcapsules using different cross-linkers and their application to some fabrics[J]. *Thermochimica Acta*, 2011, 518(1-2): 1-8.
- [42] 莫松鹰, 何继超, 莫曼妮. 基于等离子体金属镀膜的可加热保暖服装材料设计与开发[J]. *纺织导报*, 2019(4): 80-82, 84.
MO Songying, HE Jichao, MO Manni. Design and development of a thermal garment material based on plasma metal plating[J]. *China Textile Leader*, 2019(4): 80-82, 84. (in Chinese)
- [43] ZHANG L, BAIMA M, ANDREW T L. Transforming commercial textiles and threads into sewable and weavable electric heaters [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(37): 32299-32307.
- [44] PAHALAGEDARA L R, SIRIWARDANE I W, TISSERA N D, et al. Carbon black functionalized stretchable conductive fabrics for wearable heating applications[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(31): 19174-19180.
- [45] ARBAB A A, MEMON A A, SUNKC, et al. Fabrication of conductive and printable nano carbon ink for wearable electronic and heating fabrics[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019(539): 95-106.
- [46] 张阿真. 柔性可穿戴加热织物的制备与热性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [47] 杨志坚, 向萌, 叶加林, 等. 基于原电池原理的供暖救生衣设计说明书[J]. *科技创新与应用*, 2017(23): 23, 25.
YANG Zhijian, XIANG Meng, YE Jialin, et al. Design manual of heating life jacket based on the principle of galvanic cell [J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(23): 23, 25. (in Chinese)
- [48] ZHAO Y F, LI L. Novel design of integrated thermal functional garment for primary dysmenorrhea relief: The study and customizable application development of thermal conductive woven fabric [J]. *Textile Research Journal*, 2020, 90(9-10): 1002-1023.
- [49] 洪文进, 章鸥雁. 基于纳米增强远红外技术的智能保暖理疗针织内裤设计[J]. *上海纺织科技*, 2018, 46(2): 49-52.
HONG Wenjin, ZHANG Ouyan. Design of intelligent thermal therapy knitted underpants based on nano-enhanced far-infrared technology [J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2018, 46(2): 49-52. (in Chinese)
- [50] YANG M Y, PAN J J, XU A C, et al. Conductive cotton fabrics for motion sensing and heating applications [J]. *Polymers*, 2018, 10(6): 568. (责任编辑: 卢杰)