

智能防寒服装研究进展

王宏付, 张海棠, 柯莹
(江南大学设计学院, 江苏无锡 214122)

摘要:为探究智能防寒服装在开发过程中的关键问题,从电加热防寒服、流体加热防寒服、化学加热防寒服、相变材料加热防寒服、太阳能防寒服5种类型,介绍智能防寒服的加热原理、研究现状及各自优缺点。归纳总结智能防寒服装在织物层面和服装层面的评价方法,包括电热性能测试、暖体假人实验和人体穿着实验;预测了智能防寒服装在个性化需求、电子元件与服装一体化集成、安全舒适性3个方面的发展趋势。

关键词: 防寒服;评价方法;加热原理;智能服装;外接热源

中图分类号: TS 941.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2021)01-0029-07

Research Progress on Intelligent Cold Protective Clothing

WANG Hongfu, ZHANG Haitang, KE Ying
(School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to explore the key issues in the development of intelligent cold protective clothing, this paper introduced the heating principle, research status, advantages and disadvantages of intelligent cold protective clothing from five types: electric heating cold protective clothing, fluid heating cold protective clothing, chemical heating cold protective clothing, phase change material heating cold protective clothing, and solar cold protective clothing. The evaluation methods of intelligent cold protective clothing at fabric level and clothing level were summarized, including electric heating performance test, warm dummy experiment and human wearing experiment. The development trends of intelligent cold protective clothing in three aspects of personalized demand, integration of electronic components and clothing, safety and comfort were forecasted.

Key words: cold protective clothing, evaluation method, heating principle, intelligent clothing, external heat source

对于需要长期暴露于低温环境的工作人员而言,御寒保暖是他们的首要需求。防寒服作为抵抗冷应激最直接有效的个体防护装备,有着较高的研究价值。传统的防寒服一般通过增大“人体-服装-环境”系统的传导热阻、对流换热热阻、辐射换热热阻来减少人体散热,从而实现保暖防寒功能^[1-2]。此类防寒服的性能主要与面料厚度、质量和层数等有关^[3-4]。但是由于服装的总热阻值存在上限,一味地增加面料厚度和服装层数,并不能提高服装的保暖性^[5]。随着科学技术的迅猛发展,智能防寒服也随之兴起,与传统防寒服相比,智能防寒服通过

外接加热系统,实现对人体的主动加热,具有动态可调节性,能有效降低服装的厚度和质量,提高人体的活动自由度。

智能防寒服的外接热源方式主要包括电加热、流体加热、化学加热、相变材料加热、太阳能加热。电加热防寒服因其发热速度快、散热均匀性好、效率高等特性成为学者研究的热点。智能防寒服涉及多项核心技术,近年来,现代电子技术、传感技术、材料科学的发展为新型智能防寒服的开发提供了新思路和技术支持,有关智能防寒服集成化、服用性的研究成果层出不穷^[6]。目前,国内外有关智

收稿日期:2020-05-10; 修订日期:2020-09-15。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP51735B)。

作者简介:王宏付(1963—),男,教授,硕士生导师。主要研究方向为现代服装技术。Email: whf.3123@163.com

能防寒服的研究主要集中在产品开发和服装性能评价上。文中根据智能防寒服的热源进行分类介绍,分析国内外最新研究成果,为智能防寒服装的进一步研究提供理论依据。

1 智能防寒服的分类

1.1 电加热防寒服

电加热防寒服一般由电源、发热系统、调温系统和用户界面 4 部分组成^[7],其原理是利用电源驱动将电能转化为热能,从而起到防寒保暖作用^[8],是目前技术较为成熟的一类智能防寒服装。电加热防寒服的电源通常采用两种方式:外接电源和移动电池组。外接电源供电更稳定、持久,但由于需要电源插座,限制了用户的活动范围,因此这类产品并不常见。相比而言,移动电池供电的方式更方便人们活动,但电池体积和耐用性影响了电加热防寒服的穿着舒适度和防护性能。此外,移动电池无法弯折和挤压,也降低了防寒服的舒适性。闫侯西^[9]发明了一种可弯曲、挤压的片状柔性电池,将这种柔性电池置于电加热服的护腰内,美观、便携且不影响人体活动。但目前移动电池寿命、容量与质量之间的有效平衡还有待进一步研究。

发热元件通常分布在前胸、前腹、后腰、后背和关节等人体热敏感部位^[10]。常见的发热材料包括金属发热材料、电热膜和碳基发热材料。金属发热材料和电热膜材料因手感差、不易弯曲,导致穿着舒适度低,很少应用在服装领域^[11-12];而碳基发热材料的电热转化率高,柔软、质轻、耐用、可洗涤,因此成为目前市场上电加热防寒服的主要发热元件。

近几年,随着石墨烯技术的发展,其在智能服装领域的应用成为研究热点,石墨烯纤维导电、导热性能好,强度较高且较柔软,可用于导电织物、储能材料等。崔志英等^[13]从热稳定性能、功率密度、升温速度、发热均匀度和热舒适性能等方面,对碳纤维发热织物和石墨烯发热织物进行对比。结果发现,石墨烯发热织物具有良好的热稳定性,功率密度高、升温速度快、发热均匀性好,在环境温度为 5℃ 和 -5℃ 时,石墨烯电加热服装的加热效率更高,保暖效果更好。图 1^[14]为以石墨烯纤维为发热材料开发的智能恒温加热服装,不仅具有远红外理疗功能,还能够通过手机 App 调节服装的加热温度。智裳科技团队还开发了一种石墨烯加热布,具有导热性高、轻薄、耐弯折等性能,是目前市面上最薄的发热片之一,可耐 50 次水洗。可见,石墨烯纤维在智能加热服装中的应用已得到广泛关注。



图 1 智能恒温加热服装

Fig. 1 Intelligent thermostatic heating garment

电加热防寒服的调温系统大多是通过电压或热功率进行分档,手动调温,也可以通过传感器和温控装置随时监测衣下温度的变化情况,智能调整能量输入,实现智能化调温。电加热防寒服的用户界面一般设置在胸口、袖口或下摆处,用户利用该界面可以自行开启和关闭能量输入按钮、改变加热参数、测量皮肤或衣下空间温湿度、存储数据等。

电加热防寒服装中的加热电路和电热元件通常被置于服装夹层中,用绗缝或压胶的方式固定;控制键及显示屏则被缝制在服装表面;电源一般放置在内部口袋中。这种电子元件与服装的连接方式很大程度上影响了服装的穿着舒适度。王家欣^[15]利用导电布料和导电缝纫线实现电连接,制作的柔性电极触点形状多样且更易于与服装连接。电子器件的纤维化是智能服装未来的主要发展趋势之一,纤维状电子器件柔韧性好、质量轻,可直接编织成纺织品,使服装本身成为电子器件^[16]。

虽然电加热防寒服各项性能优异,穿着舒适度较高,但仍存在诸多不足。常见的电加热防寒服多使用发热片,其形状、大小和位置可以按照需求进行个性化设计,但容易导致发热不均匀。为了减轻质量,电加热防寒服的电源设计一直往微型化方向发展,但目前的微型化电源电压低,持续时间短,在特别寒冷的情况下加热功率不足^[17-18]。

1.2 流体加热防寒服

流体加热防寒服分为气体加热和液体加热两种。气体/液体加热防寒服一般由基础服装、循环管路和体外加热系统、控制装置等组成,其中基础服装一般包括两层保暖材料,将循环管路缝制在里

面。流体加热防寒服的原理是利用加热循环系统对气体/液体进行加热,并通过管路吹向人体微气候区或流经人体,从而达到御寒保暖的目的。流体加热防寒服最早应用于航天领域,为避免宇航员受到冷应激的伤害,会在舱外航天服内设置微型空调系统,利用液体工质之间的可逆化学反应产生热量,维持人体热平衡状态。后期人们将这种航天服微型化之后应用于其他寒冷地区或特殊环境中。

骆雯等^[19]设计了一种智能气体式空调服,通过在衣服内排布通风管和控制装置,以及在衣服外设置 N 型、P 型半导体冷源和热源产生装置,利用帕尔贴效应,在 N 型、P 型半导体两端分别实现制冷及制热效果,并利用通风管回路及控制装置对衣服进行制冷或制热。该新型空调服可为户外运动者和户外工作群体提供防寒保障。刘洪涛等^[20]利用水循环机构开发了一款空调服。水循环机构包括水箱、水泵和闭环管路,水箱和水泵均接通于闭环管路上,闭环管路的一部分设于服装夹层内(见图 2)。与气体加热防寒服相比,液体加热防寒服体积更大,质量更重。SKUBE M E 等^[21]设计了一款头部液体加热服,应用于需要全身麻醉的儿童外科手术中,以维持手术患者的核心体温。结果显示,0 ~ 3 岁的患者在长时间手术中均可保持理想的核心温度。流体加热防寒服加热效果好、时间持久、易于调节温度,但装置体积大且较复杂,管道的长度限制也阻碍了人体活动,因此流体加热防寒服的应用范围非常局限。

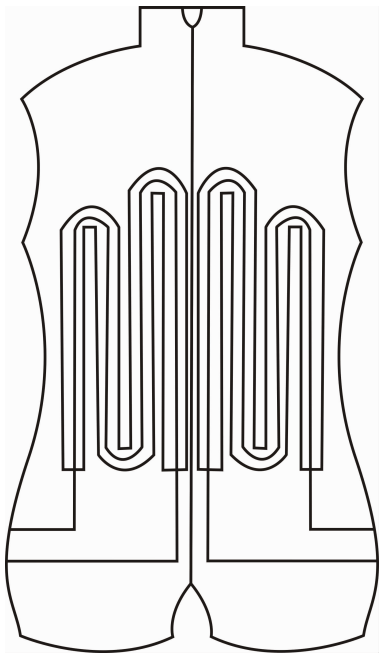


图 2 一款液体加热防寒服

Fig. 2 A liquid-warming cold protective clothing

1.3 化学加热防寒服

化学加热防寒服是一类利用化学反应产生热量,为人体加热的服装,其发热材料一般由铁粉、硅藻土、活性炭、木粉、盐类、高吸水性树脂等组成,利用铁粉生锈、氧化放热的原理达到加热目的^[22]。CHAN C Y L 等^[23]发现化学加热片能够为浅水区作业的潜水员提供足够热量,因此其被广泛应用于潜水服的设计中。化学加热片最高温度可达68 ℃,平均温度为 52 ℃,可连续 12 h 保持40 ℃以上,因此化学加热片不宜和人体皮肤直接接触。在设计化学加热防寒服时,一般会在服装内部设计放置化学加热片的口袋,口袋设有开口,方便及时更换化学加热片。

SONG W 等^[24]研究了寒冷教室环境下,化学加热服对学生热舒适性的改善情况,结果发现穿着化学加热服显著提高了人体整体的热舒适性及四肢等局部热舒适性。赖丹丹等^[1]采用暖体假人实验对比了冷环境下化学加热和电加热服装的舒适性能。结果显示,在(0.4 ± 0.1) m/s 的风速下,化学加热服装的总热阻及化学加热片的有效加热功率均显著低于电加热服装,而在(1.0 ± 0.1) m/s 的风速下,两者没有显著差异。此外,化学加热片的加热效率低于电加热片,而化学加热服装的表面温度高于电加热服装。由此可知,化学加热防寒服虽然成本低,操作容易,但其缺点也十分明显,例如温度不可控、适用范围小、不可重复使用、易发生化学泄漏等^[25]。

1.4 相变材料加热防寒服

相变材料加热服利用相变材料在环境温度低于相变点时凝固放热,高于相变点时融化吸热的特性,实现热能储存和温度调控^[26-27]。相变材料加热防寒服一般被设计成类似防弹衣的形式,在服装内部设置有用来装相变材料的口袋。微胶囊技术解决了传统相变材料液相易泄漏、腐蚀封装容器的问题,使智能调温纤维及其纺织品得到广泛应用。LIU W 等^[28]建立数学模型研究微胶囊相变材料所制成服装的热性能。结果发现:低温环境下,微胶囊相变材料可以延迟服装和人体皮肤温度下降的时间;高温环境下,可以延迟服装升温的时间,降低人体温度和出汗量。

相变材料加热防寒服可以根据环境温度,智能调节服装温度,且具有双向温度调节性和环境适应性,可以在温度振荡环境中反复循环使用。但由于材料相变温度的限制,相变材料加热防寒服的使用范围有限,在极端情况下无法达到加热保暖效果。

CHOI K 等^[29]发现当人体在温度为 5℃,湿度为 65%的环境下静坐时,与穿着普通防寒服相比,穿着相变材料加热防寒服时人体热舒适性更高,但人体体温和平均皮肤温度没有明显提高。因此寻找能够适应相变温度大范围变化的服用材料,是未来的发展方向。

1.5 太阳能加热防寒服

太阳能加热防寒服是将太阳能作为热源的一类加热服装,可以利用柔性太阳能电池或太阳能蓄热保温纤维达到加热效果。利用柔性太阳能电池实现加热的原理是将太阳能转化为电能并进行储存,电能再以热量的形式释放。目前,应用较多的柔性太阳能电池有柔性太阳能电池板、柔性塑胶太阳能电池、基于 Power Plastic TM 的柔性太阳能电池、染料敏化太阳能电池、胶体量子点太阳能电池等^[30]。太阳能蓄热保温纤维是指添加第Ⅳ族过渡金属碳化物的纤维,其工作原理为:当阳光照射时,第Ⅳ族过渡金属元素碳化物吸收大于 0.6 eV 的高能辐射线并转换成热能;而小于 0.6 eV 的辐射线则被反射^[31]。

赵欲晓等^[32]设计的柔性薄膜太阳能可调温发热服,利用太阳能电池加热电热片实现调温发热效果。电子元件与服装的连接方式采用纽扣和粘贴扣的设计,方便电子元件拆装,避免各个电子元件在拆装时过度拉扯而破坏电路,影响使用寿命。服装内部整体接线情况如图 3 所示。用面料将薄膜太阳能电池组封装成片,通过拉链的形式装在发热服背部,具体如图 4 所示。德国华裔设计师钱依然设计的太阳能帽子和手套,利用像纸一样薄的太阳能吸热板,将太阳能高效率地转化为热能,再通过内部传热导线,将热量均匀地传递到各个部分^[33]。

太阳光蓄热保暖材料可以吸收太阳辐射的可见光与近红外线,同时又能反射人体热辐射,具有良好的保温功能,其典型代表如碳化锆。太阳能加热防寒服节能环保,但成本较高,光电转换率低,且受太阳光强度制约,目前仍处于初步应用阶段。

表 1 为 5 种智能防寒服的特性对比,总结了各自的原理及优缺点。在实际应用中,可以根据不同的使用场合和具体需求,结合不同智能防寒服的优缺点进行合理选择。

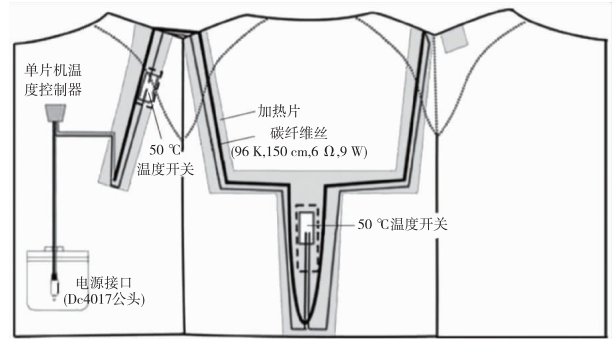


图 3 太阳能加热服内部接线情况
Fig.3 Internal wiring of solar heating suit



图 4 薄膜太阳能可调温发热服
Fig. 4 Thin-film solar heating suit with adjustable temperature

表 1 5 种智能防寒服的特性对比			
Tab.1 Comparison of the characteristics of five intelligent cold protective clothing			
名 称	原 理	优 点	缺 点
电加热防寒服	电能转化为热能	发热速度快,散热均匀性好,效率高,活动自由度高	发热不均匀,持续时间短
流体加热防寒服	预热气体/液体经管路吹向人体微气候区或流经人体	加热效果好,时间持久,易于调节温度	装置较复杂,活动自由度高,质量较大
化学加热防寒服	化学能转化为热能	无电子设备,成本低,操作容易、轻便	温度不可控,适用范围小,不可重复使用,易发生化学药品泄漏
相变材料加热防寒服	相变材料吸热、放热特性	主动调温,双向温度调节	适用范围小
太阳能加热防寒服	太阳能转化为电能或热能	节能环保	成本较高,光电转换率低,受太阳光强度制约

2 智能防寒服性能评价

智能防寒服装的性能评价包括织物层面的性能评价和服装层面的舒适性评价。目前,智能防寒服装的性能测试评价还没有统一的方法和标准。

2.1 织物性能评价

对于电加热防寒服和太阳能加热防寒服,一般对其织物的电热性能进行评价,评价指标包括织物的电阻、温度、导热系数和发热功率等^[34-35]。张妍^[22]为比较石墨烯发热织物和碳纤维发热织物的性能,测量织物的电阻和表面温度,计算织物的电阻变化率,发现电阻变化率越小,加热元件的热稳定性越好;通过测量经过织物的电压、电流以及织物表面积,计算发热功率密度,得出密度越大,发热性能越优异;利用红外热像仪测量织物表面温度,计算织物的升温速度和发热均匀度。对于微胶囊相变材料加热防寒服,一般对其织物的热湿舒适性、物理机械性能等进行评价,评价指标包括织物的透气性、透湿性、吸水性、保温性、顶破强力、厚度等。魏冰艳^[36]采用交联法将相变材料添加在棉织物和涤/棉织物上,通过分析织物的热活性、物理机械性能和热湿舒适性,验证棉织物和涤/棉织物的各项性能是否满足织物的服用要求。

2.2 服装舒适性评价

智能防寒服装的舒适性评价主要有两种测试方法:暖体假人实验和人体穿着实验。暖体假人实验是利用暖体假人模拟人体与环境之间的热交换过程,通过记录假人的皮肤温度、服装热阻和加热功率来评价智能防寒服装的加热性能和舒适性能。暖体假人实验可以表征极端环境,实验重复性好,效率高,稳定且安全,但比人体穿着实验精确度低。赖丹丹等^[1]通过暖体假人测试,研究化学加热和电加热服装的总热阻、有效加热功率和加热效率,并结合红外热像仪研究服装表面的温度分布。PARK H 等^[37]同样采用暖体假人,探究两种环境温度下多层电加热服的加热装置与人体距离对隔热和加热效率的影响。

人体穿着实验相较于暖体假人实验,可以更直观地评价智能防寒服的综合性能,但因受个体差异影响较大,实验结果误差大,且成本较高,还无法表征极端环境。人体穿着实验一般通过监测受试者皮肤表面温湿度、体核温度、衣下空间温湿度、身体含热量变化、心率等生理指标以及主观舒适感来评价服装的整体舒适性。UDAYRAJ 等^[38]通过人体穿着实验探究电加热服和外界加热设备对人体热舒

适性的影响,结果发现 3 种环境温度下,电加热服的加热效果均更显著,人体舒适度更高。SHIN S 等^[39]通过人体穿着实验评估石墨烯加热服间歇加热和持续加热对人体的防护效果,探究如何在节省电力和提高寒冷环境下的热舒适性之间寻找平衡点。李佳怡等^[40]研制了多层可调温户外防寒服,通过暖体假人和人体穿着实验评价防寒服装在两种状态(加热和不加热)、两种风速(0.4 m/s 和 1.5 m/s)下的保暖性能。

3 智能防寒服发展趋势

智能防寒服是一个多层织物系统,服装、环境、人体影响着智能防寒服装的热湿传递性能。智能防寒服的设计应在提升性能的同时,注重其安全性、耐久性和舒适性,其未来发展方向包括以下 3 个方面。

3.1 符合个性化需求

目前,智能防寒服的温度设定和加热部位调节仍未实现完全智能控制。根据用户自身热感特征,实现加热部位和加热温度的个性化调节,在不同环境温度下保证人体各部位均处于舒适的服装温度范围内,这是智能防寒服未来的发展方向之一。实现个性化调节及人衣交互需要结合传感技术和智能控制技术^[41]。

3.2 电子元件与服装一体化集成

目前的智能防寒服加热元件与服装的结合方式还是外置式,一般采用普通绝缘导线连接电路,运用压胶、拉链、纽扣等方法固定电路和元件,未能实现一体化集成。未来需要不断改善服装集成技术,使智能防寒服实现真正的智能化。

3.3 更高的安全舒适性

智能防寒服装的服用安全性越来越得到人们的重视,未来的智能防寒服还需要进一步从医学角度探究其对人体血液微循环、体表神经系统、排汗系统等微观生理系统的影响^[6]。通过元件的微型化、柔性化以及服装结构的合理化等方式,提高智能防寒服装的舒适性,是未来的发展趋势。

4 结 语

随着科技的发展和人民生活水平的提高,服装传统的保暖御寒功能已经无法满足人们的需求,尤其是低温作业人员,对服装的冷防护性能和舒适性有着更高的要求。因此,智能加热技术应运而生。近年来,国内外学者已从加热材料、加热部位、加热温度、服装组合方式等方面对智能防寒服展开

大量研究,并取得重要进展。然而,智能防寒服在个性化设计方面仍未完全实现智能控制,电子元件与服装的集成技术不够成熟,智能防寒服的安全舒适性有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 赖丹丹,宋文芳,王发明.冷环境下化学加热和电加热服装舒适性评价[J].中国个体防护装备,2016(2):40-45.
- LAI Dandan, SONG Wenfang, WANG Faming. Comfort performance evaluation of the chemically and electrically heated clothing in a cold environment[J]. China Personal Protective Equipment, 2016(2):40-45. (in Chinese)
- [2] 胡春华.基于人体需求的相变纺织品的研究[D].石家庄:河北科技大学,2009.
- [3] KASTURIYA N, SUBBULAKSHMI M S, GUPTA S C, et al. System design of cold weather protective clothing[J]. Defense Science Journal, 1999, 49(5):457-464.
- [4] MORRISSEY M P, ROSSI R M. Clothing systems for outdoor activities [J]. Textile Progress, 2013, 45(2):145-181.
- [5] WILLIAMS J T. Textiles for cold weather apparel [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009:329-341.
- [6] 李萍,蒋晓文.智能电加热服的研究进展[J].棉纺织技术,2019,47(9):79-84.
- LI Ping, JIANG Xiaowen. Research progress of intelligent electric heating clothing [J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(9):79-84. (in Chinese)
- [7] 柯莹,张向辉.电加热服结构及其性能评价方法[J].纺织导报,2016(11):122-123.
- KE Ying, ZHANG Xianghui. Methods for evaluating the structure and properties of electrically-heated garment[J]. China Textile Leader, 2016(11):122-123. (in Chinese)
- [8] 任萍,刘静.可加热服装技术的研究进展[J].纺织科学研究,2008(3):12-18.
- REN Ping, LIU Jing. Research progress of heating clothing technology[J]. Textile Science Research, 2008(3):12-18. (in Chinese)
- [9] 闫保西.一种电加热护腰:108308752A[P].2018-07-24.
- [10] KUKKONEN K, VUORELA T, RANTANEN J, et al. The design and implementation of electrically heated clothing [C]//Fifth International Symposium on Wearable Computers. Zurich:IEEE, 2001:180-181.
- [11] 钟林新,张美云,刘正伟.碳纤维特性及其在功能纸中的应用[J].中国造纸,2007,26(11):50-53.
- ZHONG Linxin, ZHANG Meiyun, LIU Zhengwei. The properties of carbon fiber and its application in specialty paper[J]. China Pulp and Paper, 2007, 26(11):50-53.

(in Chinese)

- [12] MONDAL S. Phase change materials for smart textiles—an overview [J]. Applied Thermal Engineering, 2008(28):1536-1550.
- [13] 崔志英,杨诗慧,张妍,等.石墨烯电加热服装的服用性能研究[J].毛纺科技,2018,46(8):1-5.
- CUI Zhiying, YANG Shihui, ZHANG Yan, et al. Evaluation on performance of electrically heated graphene garment [J]. Wool Textile Journal, 2018, 46(8):1-5. (in Chinese)
- [14] 智裳科技. AI clothing [EB/OL]. [2020-01-07]. <http://www.ai-clothing.com/jiejuefangan/zhinenghengwen>.
- [15] 王家欣.一种利用导电布料制成导电电极的智能服装:201720686086.7[P].2018-01-23.
- [16] 顾伟,侯成义,张青红,等.智能服装的现状及其发展趋势[J].东华大学学报(自然科学版),2019,45(6):837-843.
- GU Wei, HOU Chengyi, ZHANG Qinghong, et al. Present situation and development trend of intelligent garment[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2019, 45(6):837-843. (in Chinese)
- [17] 张雪青,余弘,张岳兰,等.电加热服装的研究进展[J].纺织检测与标准,2019(1):1-4.
- ZHANG Xueqing, YU Hong, ZHANG Yuelan, et al. Research on the development of electrically-heated garment[J]. Textile Testing and Standard, 2019(1):1-4. (in Chinese)
- [18] 方纾,刘皓,刘莉.柔性电加热元件与智能加热服装服饰研究进展[J].北京服装学院学报(自然科学版),2019,39(2):83-94.
- FANG Shu, LIU Hao, LIU Li. Research progress of flexible electric heating element and smart heating garments[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition), 2019, 39(2):83-94. (in Chinese)
- [19] 骆雯,王博文,赵诗雯,等.新型节能环保空调服:207707341U[P].2018-08-10.
- [20] 刘洪涛,张文瑶,罗国发,等.空调服:208160075U[P].2018-11-30.
- [21] SKUBE M E, ACTON R D, KOSCHEYEV V S, et al. Intra-operative temperature regulation in children using a liquid-warming garment [J]. Pediatric Surgery International, 2017, 33(2):145-148.
- [22] 张妍.电加热服装的服用性能研究[D].上海:东华大学,2017:2-3.
- [23] CHAN C Y L, BURTON D R. Local heating source for shallow water divers[J]. Journal of Power Sources, 1981, 6(3):291-304.
- [24] SONG W, WANG F, ZHANG C, et al. On the improvement of thermal comfort of university students by using electrically and chemically heated clothing in a cold classroom

- environment[J]. Building and Environment, 2015(12): 704-713.
- [25] 范一强,贺建芸,刘士成,等. 制冷与制热空调服的研究进展[J]. 纺织学报, 2018, 39(7): 174-180.
FAN Yiqiang, HE Jianyun, LIU Shicheng, et al. Review of cooling and heating garments [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(7): 174-180. (in Chinese)
- [26] HUNTER I, HOPKINS J T, CASA D J. Warming up with an ice vest: core body temperature before and after cross-country racing [J]. Journal of Athletic Training, 2006, 41(4): 371-374.
- [27] 王喜娜. 简述发热保暖纤维的发热机理及开发应用[J]. 山东纺织科技, 2012, 53(5): 38-40.
WANG Xina. Elementary introduction on heat mechanism and development application of exothermic warmth retention fiber[J]. Shandong Textile Science and Technology, 2012, 53(5): 38-40. (in Chinese)
- [28] LIU W, LI F, LIU W. Numerical analysis on thermal function of clothing with PCM microcapsules[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 36(2): 320-329.
- [29] CHOI K, CHUNG H, LEE B, et al. Clothing temperature changes of phase change material-treated warm-up in cold and warm environments [J]. Fibers and Polymers, 2005(6): 343-347.
- [30] 张小雪. 基于太阳能利用的发热服装研究[J]. 国际纺织导报, 2014, 42(3): 55-60.
ZHANG Xiaoxue. Research of fever garment based on solar energy [J]. Mellian China, 2014, 42(3): 55-60. (in Chinese)
- [31] 王向钦, 靳向煜. 蓄热调温纤维及其在非织造材料中的应用[J]. 非织造布, 2006, 14(4): 33-35.
WANG Xiangqin, JIN Xiangyu. Thermal storage conditioning fiber and its application in nonwovens materials[J]. Nonwovens, 2006, 14(4): 33-35. (in Chinese)
- [32] 赵欲晓, 李娅莉, 史丽敏. 柔性薄膜太阳能可调温发热服的电热系统设计[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2017, 37(4): 48-53.
ZHAO Yuxiao, LI Yali, SHI Limin. Design of flexible thin-film solar heating clothes with switchable output power [J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition), 2017, 37(4): 48-53. (in Chinese)
- [33] KREBS F C, NIELSEM T D, FYENBO J, et al. Manufacture, integration and demonstration of polymer solar cells in a lamp for the "lighting Africa" initiative [J]. Energy and Environmental Science, 2010, 3(5): 512-525.
- [34] 陈莉, 刘皓. 可加热纬编针织物的电热性能[J]. 纺织学报, 2015, 36(4): 50-54.
CHEN Li, LIU Hao. Electric heating performance of heatable weft knitted fabric [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(4): 50-54. (in Chinese)
- [35] 张猛, 富秀荣. 碳纤维发热织物的电热性能研究[J]. 合成纤维, 2015, 44(11): 25-27.
ZHANG Meng, FU Xiurong. Study on electrothermal performance of carbon fiber heating fabric [J]. Synthetic Fiber in China, 2015, 44(11): 25-27. (in Chinese)
- [36] 魏冰艳. 智能调温面料的开发及性能研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2015: 57-72.
- [37] PARK H, HWANG S, LEE J Y, et al. Impact of electrical heating on effective thermal insulation of a multi-layered winter clothing system for optimal heating efficiency [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2016(28): 1-18.
- [38] UDAYRAJ, LI Z, KE Y, et al. A study of thermal comfort enhancement using three energy-efficient personalized heating strategies at two low indoor temperatures [J]. Building and Environment, 2018(6): 1-14.
- [39] SHIN S, CHOI H H, KIM Y B, et al. Evaluation of body heating protocols with graphene heated clothing in a cold environment [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2017, 29(6): 830-844.
- [40] 李佳怡, 卢业虎, 叶鑫, 等. 智能发热户外防寒服装研制与性能评价[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 80-86.
LI Jiayi, LU Yehu, YE Xin, et al. Performance evaluation of outdoor cold protective clothing with smart heating function [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2018, 44(1): 80-86. (in Chinese)
- [41] 翟军辉, 薛天宇. 基于可穿戴计算技术的保暖服监控系统设计[J]. 微型机与应用, 2015, 34(4): 26-28.
ZHAI Junhui, XUE Tianyu. Warm clothing design of monitoring system based on wearable computing technology [J]. Microcomputer and Its Applications, 2015, 34(4): 26-28. (in Chinese)

(责任编辑:沈天琦)