

边防部队电加热服的研制与功能评价

佟 玫, 张雅丽*, 唐世君

(军事科学院系统工程研究院 军需工程技术研究所, 北京 100010)

摘要:为满足边防部队官兵在极寒环境下的被装保暖需求,采用电热技术研制一款电加热服。通过对服装结构、发热载体以及电池的充放电性能等进行研究,研发出用发热碳纤维作为发热载体、高分子锂电池作为能量源的背心式电加热服装。高分子锂电池能量密度高、充放电速度快、安全持久;背心的侧缝使用罗纹布能满足不同胸围人群的着装要求。通过部队试穿实验对服装的保暖效果、舒适性及红外伪装效果进行测验,结果表明:加热背心对寒冷条件下人体的辅助保暖效果明显、对厚型的冬服外表面温度影响较小,不会显著影响红外伪装效果,且发热部分柔软透气、舒适度较高,能很好地满足官兵需求。

关键词:电加热服;发热碳纤维;高分子锂电池;红外伪装

中图分类号:TS 941.11 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)05-0457-06

Development and Function Evaluation of Electric Heating Suit for Frontier Troops

TONG Mei, ZHANG Yali*, TANG Shijun

(Institute of Quartermaster Engineering and Technology, Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100010, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the border troops to keep warm in the extremely cold environment, an electric heating suit was developed by using electric heating technology. By studying the structure of the garment, the heating carrier and the charge-discharge performance of the battery, an electric heating garment with heating carbon fiber as the heating carrier and polymer lithium battery as the energy supply have been developed. Polymer lithium battery is with the advantages of high energy density, fast charging and discharging speed, safety and durability, and the rib vests with side seams can meet the dress requirements of people with different bust sizes. Finally, the thermal insulation effect, comfort and infrared camouflage effect of the clothing were tested through the army fitting test. The results show that the heating vest has an obvious effect on the auxiliary warmth of human body under cold conditions, and has little effect on the outer surface temperature of thick winter clothing. It will not significantly affect the infrared camouflage effect, and the heating part is soft and breathable with high comfort, which can well meet the requirements of officers and soldiers.

Key words: electric heating clothing, heating carbon fiber, polymer lithium battery, infrared camouflage

目前,军队在极寒地区的防寒服装主要是皮大衣、皮裤、皮帽和毛皮鞋、外套靴,官兵在 $-30 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下,执行巡逻、潜伏等任务时,人体与环境的温差可达 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,单靠传统防寒服装难以满足保暖要求,需要研制一款能够主动制热的服装,有效合理利用体外的能量(如电能、太阳能、化学能

等)在服装内转换成热能,以达到对身体加热保暖的目的。此加热服可减少官兵在极冷环境条件下着装的厚度和质量,提高人体着装的舒适度和灵活性^[1]。

根据外接热源的不同,加热服主要分为电加热服、化学加热服、相变材料加热服、流体加热服和太

收稿日期:2021-08-02; 修订日期:2021-09-16。

作者简介:佟玫(1978—),女,高级工程师。

*通信作者:张雅丽(1991—),女,工程师。主要研究方向为服装理论与技术。Email:906172077@qq.com

太阳能加热服^[2-3]5种。其中,化学加热防寒服温度不可控,易发生化学泄露;相变材料受相变温度的影响使用范围受限,在极端情况下无法达到加热保暖效果^[4];流体加热装置较复杂且限制人体活动;太阳能加热成本较高,且受太阳光强度的制约无法持续为人体供热^[5]。电加热防寒服因其发热速度快,散热均匀性好、效率高^[6]等特性成为学者研究的热点。文中采用电热技术研制一款面向边防部队的电加热服,主要研究其发热载体的舒适性、电池使用的实效性(耐低温、充放电时间)、着装后的舒适性和红外伪装效果。

1 电加热服的研制

电热服是利用电能驱动衣服内电热元件工作的一类服装的总称,一般由电源、发热元件、控温装置和安全保护装置等构成,相互之间通过导线连接^[7-9]。根据电加热服的结构特点和部队的勤务需求,拟研制的加热服装主要由3部分组成,即背心、发热载体和电池及其配套电子产品,重点开展了服装结构、发热载体和分子锂电池的研究^[10]。

1.1 服装结构

加热服采用西服背心款式,前身2个挖袋,袋口用尼龙搭扣结合,用于携带电池,左胸部设一假挖袋。加热服是公用物资,采用这种款式不仅方便贴身穿着,提高保暖效率,而且可以与冬作训服、冬常服配套穿用,提高应用率。背心腋下两侧采用5 cm宽的罗纹布,使每一型号的衣服胸围有一定的调节量,尽可能满足不同胖瘦人群穿用。

背心面料采用毛涤哔叽,里子采用防静电涤丝绸里子布。里子后背中间处横向设一隐形拉链,以此为界,上下分别设有一个口袋,用于安装加热载体,袋口用尼龙搭扣系合。背心前身腹部左右分别设有一个暗袋,大小与腹部加热片一致。背心外形及安装示意如图1所示。

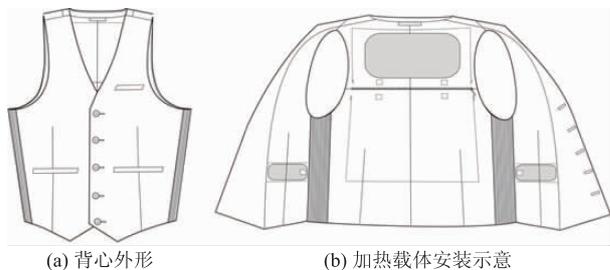


图1 背心外形及安装示意

Fig.1 Outline and installation diagram of vest

由于加热背心属于公用物资,号型设置不能过多,因此设计了3个号型,分别为165~170,175,

180~185,胸围分别对应92~96,96~100,100~104 cm。

1.2 发热载体

发热载体是电热服最重要的元件之一,要符合人体穿着需要,具备柔软透气、无异物感,发热效率高,便于拆装等特性。

1.2.1 发热材料的选择 现有发热材料主要有3类:金属发热材料(金属丝或金属片)、电热膜(碳基油墨或涂层)和碳纤维发热材料^[11]。金属发热材料一般质地较硬,不易弯曲,不能同人体很好地贴合,不适用于纺织服装产品。电热膜容易加工、成本较低,但手感太硬,透气性差易使人产生闷热感,一般应用于发热地板等^[12]。目前应用较普遍的是碳纤维及石墨烯纤维材料,碳纤维发热元件灵活、质轻、耐用、可洗且具有较好的电能转换率,便于嵌入服装中使用^[13-14]。

1.2.2 发热载体的设置 发热元件通常布置在前胸、前腹、后腰、后背、关节等人体热敏感部位^[1],本款加热服在后背和前腹部设置发热元件。其中背部加热片内置3块发热元件,由导线并联;2个腹部加热片各内置1块发热元件。加热载体的结构示意图如图2所示。

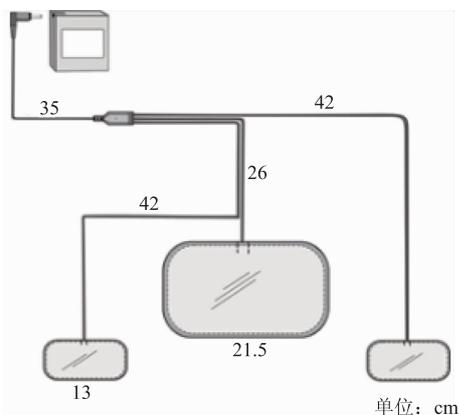


图2 加热载体结构示意图

Fig.2 Structure diagram of heating carrier

1.2.3 发热载体发热效果测试 电源一般采用12 V以下人体安全直流电压,电热服装正常工作电压设置为7.4 V,每个发热元件的电阻为28 Ω,背部、腹部发热片的发热功率分别为5.8,2.0 W,整个发热载体的最大发热功率为9.8 W。在25℃模拟环境下,施加7.4 V直流电压,测试发热载体的温度变化。发热载体的温度变化曲线如图3所示。结果表明发热载体升温速度快且能稳定在72℃左右。采用红外热像仪观察发热载体的温度均匀性^[15],结果如图4所示。由图4可以看出,发热载体升温比较均匀,无局部热岛现象,避免了连接结

点局部过热而烧坏服装或者烫伤人体的问题。

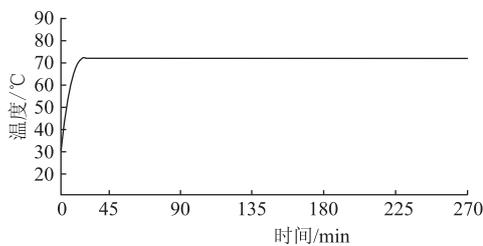


图3 发热载体的温度变化曲线

Fig.3 Temperature curve of heating carrier

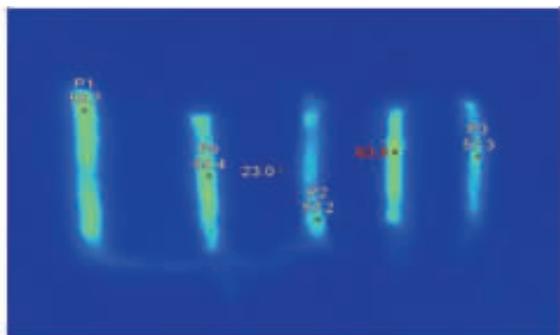


图4 红外热像仪实测过程

Fig.4 Measurement process of infrared thermal imager

1.3 高分子锂电池

锂离子以其高能量密度、高工作电压、长循环寿命、环保安全等优点,在便携式电子产品中得到普遍使用。目前市场上传统的电池材料和电压平台,对电池的能量密度提升比较缓慢,因此有必要研发一种耐低温高分子锂电池。

1.3.1 技术要求 根据7.4 V,4 A 电池使用特点,确定该系列电池应该具备如下要求:具有较高的质量比能,良好的-40 °C 低温放电能力和循环充电次数。因此,规定了组成该电池的单电芯技术指标,具体见表1。

表1 单电芯技术指标要求

Tab.1 Technical specifications of single cell

| 项 目 | 技术指标要求 |
|----------------------|--------|
| 充电时间/h | <1.5 |
| 体积能量密度/[(W · h)/L] | >420 |
| 质量能量密度/[(W · h)/kg] | >200 |
| 循环次数/次 | >500 |

1.3.2 提高电池性能的技术 采用独有的负极技术,结合创新的极片制作工艺,从而提高电池能量密度;采用第4代电解液,能更好地匹配高压实高能量负极材料,提升倍率性能和循环寿命。

根据-40 °C 低温放电的要求,在配方设计上提高了导电剂的含量,改善活性物质的导电性;选用较大比表面积的正极颗粒材料,提高电子和离子导电能力;采用黏结性较好的黏结剂,减小颗粒之间

的绝缘性;采用超低温型电解液、软包装叠片设计,减小电池内阻,增加电池的比能量。改进后的电池,低温放电性能由-20 °C 放电70% 提高至-40 °C 放电80%。

根据军人执勤时长和服装使用时间计算,电池充电时间需不超过1.5 h,循环寿命应达800次以上,因此电池必须同时具有更高的倍率性能和长寿命性能。这些与材料选择、混料方式、电极配方、隔膜、电解液等有关。选择磷酸铁锂和负极材料制成电池后,可进行高倍率充放电,且具有较高的稳定性。电极配方中,采用黏结性较好的黏结剂可降低其含量;采用较小粒径的导电剂、同时增加导电剂的含量,可延缓活性物质容量的衰减。经实验验证,采用孔隙率高、强度大的某型号隔膜可明显提高倍率放电性能和循环性能。电解液配方中添加了专用导电添加剂,有效提高了电解液的离子导电能力和高倍率充放电条件下的电池寿命。任选两个高比能软包电池测试其循环次数的实验,结果如图5所示。由图5可知,高比能软包电池性能相对稳定。

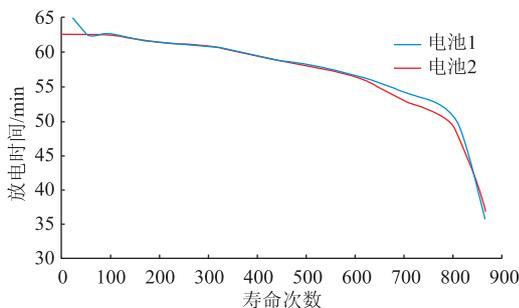


图5 两个高比能软包电池1 C 100% DOD 充放电循环曲线

Fig.5 1C 100% DOD charge-discharge cycle diagram of two high specific energy soft battery

除此之外,对电池的安全性能也进行了相关研究,包括电池过充电、过放电、短路、挤压和跌落实验5个方面,总体而言,该系列电池达到了安全、快充放、高比能量密度的技术要求,具体情况见表2。

表2 电池主要技术指标完成情况

Tab.2 Main technical indicators completion of the battery

| 项 目 | 技术指标要求 | 技术指标实测值 |
|----------------------|---------|----------|
| 充电时间/h | 持续0.2 C | 5.5 ≤5.5 |
| | 持续1 C | 1.5 ≤1.5 |
| 使用时间/h | 持续1 C | 1.0 ≥1.0 |
| | 最高2 C | 0.5 ≥0.5 |
| 使用次数 | 800 | ≥800 |
| | 600 | ≥600 |
| 体积能量密度/[(W · h)/L] | ≥420 | >420 |
| 质量能量密度/[(W · h)/kg] | ≥200 | >200 |

2 部队试穿实验

部队适应性实验是衡量科研成果综合性能和质量最直接、最真实、最有说服力的方法。因此,本项目在研究过程中,针对发热材料性能、服装尺寸结构、电池性能和冬服配套性能等要求,组织进行了部队适应性实验。

2.1 试穿实验组织安排

试穿所处地位于内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,该地区属于寒温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,冬季最冷月在 -18 ~ -30 ℃ 之间,试穿的第1个月最高气温为 -18 ℃,最低气温为 -41 ℃。发放加热背心 60 件,安排 3 个单位共 60 名官兵承担此次试穿任务。

实验前,为参加试穿的官兵讲解了加热服装的性能特点和使用方法,并对试穿提出了具体要求,提供了试穿实验大纲。试穿部队在营执勤、边防潜伏、边防巡逻等不同作训环境条件下进行试穿实验。

2.2 现场人体测温实验

针对部队穿着时的任务要求,进行野外条件下的服装表面红外测温实验。采用多点温度测量仪和红外热像仪,测试加热服装在全套冬服配套穿着条件下各层服装的表面温度变化,研究加热条件下对冬服红外隐身的影响,分析官兵在潜伏、站岗等执勤条件的红外泄露情况。

2.2.1 现场实验方法

- 1) 环境温度: 实验环境温度设置为 -40 ~ -35 ℃。
- 2) 实验仪器: ZJ1064 便携式温度采集仪,众佳科技有限公司制造; Ti450 红外热像仪,福禄克测试仪器(上海)有限公司制造。
- 3) 服装配套: 参试人员分两组,分别为实验组、对比组。冬服穿着配套品种见表 3。

表 3 两组受试者穿着配套品种

Tab. 3 Wearing matching varieties of both subjects

| 组别 | 穿着配套品种(由内到外) |
|-----|---|
| 实验组 | 秋衣裤、加热背心、绒衣裤、棉衣裤、迷彩作训服、迷彩大衣、栽绒帽、迷彩外手套、迷彩作训鞋 |
| 对比组 | 秋衣裤、绒衣裤、棉衣裤、迷彩作训服、迷彩大衣、栽绒帽、迷彩外手套、迷彩作训鞋 |

4) 温度传感器安放位置: 在背部对应加热服的位置。分别于秋衣外侧、绒衣外侧和棉衣外侧设置

3 个温度传感器,同时研究人员手工测试环境温度。各测量位置对应的传感器编号见表 4。

表 4 各测量位置传感器编号

Tab. 4 Sensor number of each measuring position

| 测量位置 | 传感器编号 (实验组) | 传感器编号 (对比组) |
|---------|----------------|----------------|
| 秋衣外侧,背部 | 1# | 9# |
| 绒衣外侧,背部 | 2# | 10# |
| 棉衣外侧,背部 | 3# | 11# |

5) 主观感觉心理量值测试: 人体的主观冷暖感觉量值见表 5。在现场对比实验过程中,研究人员每 30 min 询问一次被测试人员的主观冷暖感受,并填写在相应表格上。

表 5 人体主观冷暖感受等级表

Tab. 5 Grade table of human subjective cold and warm sensation

| 感受特征 | 冷热等级 | 分值 |
|--|------|----|
| 含舒适、稍凉、凉 3 个细级;稍凉指肩、膝、小腿稍凉,全身温热感较好;凉指肩、膝、臂、腿,背稍凉,全身温热感尚好 | 不冷 | 0 |
| 背部明显发凉,胸腹部肌肉有紧缩感,欲打寒战又无明显寒战出现,肩、膝、臂、腿已有冷感 | 稍冷 | 1 |
| 出现明显中等阵发性寒战(间隔 3 ~ 5 min),全身肌肉有紧缩感,不舒服 | 冷 | 2 |
| 全身出现不由自主的连续性寒战,想活动,略有口吃,感到很冷,不适 | 很冷 | 3 |

6) 冬服配套各层温度变化的测试: 实验组和对比组按照表 3 的配套穿着服装,在相应位置安放好传感器,在环境温度低于 -35 ℃ 的室外雪地中执行站岗任务。温度采集仪每 10 s 采集一组温度数据,研究人员每 10 min 用红外热像仪测量一次服装表面温度(正反面),同时每 30 min 填写一次冷暖主观感受值,实验时间为 1 h。鉴于文章篇幅有限及研究需要,只记录 11 个不同时间段衣内各点温度数据,具体见表 6。

7) 不同勤务状态下人体红外泄露分布研究: 实验组和对比组按表 3 配套穿着服装,分别模拟雪地潜伏和雪地站岗两种勤务状态,研究人员用红外热像仪从不同角度检测服装表面的红外热图像,以分析不同部位的热泄露情况。

表 6 不同时间段衣内各点温度
Tab. 6 Temperature data of each point of the clothes in different time periods

单位:℃

| 传感器编号 | 时间/min | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 4 | 5 | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 1 [#] | 34.3 | 43.9 | 45.3 | 49.5 | 48.1 | 47.5 | 46.3 | 45.1 | 44.6 | 44.0 | 43.6 |
| 2 [#] | 30.6 | 33.8 | 35.1 | 36.9 | 38.2 | 38.0 | 37.1 | 35.8 | 34.5 | 33.1 | 31.5 |
| 3 [#] | 21.2 | 19.4 | 19.6 | 22.7 | 23.8 | 24.4 | 23.9 | 20.6 | 16.9 | 13.2 | 9.3 |
| 9 [#] | 34.2 | 33.9 | 33.8 | 33.4 | 33.1 | 32.9 | 32.5 | 32.1 | 31.7 | 31.4 | 31.0 |
| 10 [#] | 30.3 | 29.5 | 29.3 | 28.6 | 28.2 | 27.7 | 26.3 | 24.5 | 23.0 | 21.2 | 19.5 |
| 11 [#] | 24.2 | 21.4 | 20.4 | 16.6 | 14.8 | 12.6 | 10.3 | 8.7 | 6.4 | 4.3 | 3.1 |

2.2.2 实验结果分析

1)衣内温度对人体冷暖感觉的影响。从表 6 数据可以看出,实验开始后,穿着加热服的实验组衣内温度快速上升,在 10 min 时达到最高值,与对比组秋衣外侧的温度(1[#]和 9[#]传感器)相差 16.1℃。随着热平衡的发展,衣内温度缓慢下降,到 60 min 时,实验组温度仍在 43℃左右,比对比组温度高 12.6℃。在 60 min 时,对比组的人体感觉已经达到寒冷的耐受极限,而实验组还处在较为舒适的状态,具体见表 7。

表 7 不同时间段人体的冷暖感觉

Tab. 7 Cold and warm feeling of human body in different time periods

| 时间/min | 实验组冷暖感觉 | 对比组冷暖感觉 |
|--------|---------|---------|
| 0 | 0.0 | 0.0 |
| 30 | 0.0 | 1.0 |
| 60 | 1.1 | 2.8 |

2)加热服对衣服表面温度的影响。实验开始与结束时的红外热像如图 6 和图 7 所示。从表 6 的数据可以看出,第 60 min 热平衡时,3[#]与 11[#]传感器的温差即棉衣外侧温度差为 6℃;从红外热像图 6 和图 7 可以看出,在实验开始和结束时,两组之间最外层服装表面温度基本一致。因此,在冬服多层配套的穿着条件下,衣内的热量很难传递到外层服装,对外层服装表面温度的影响极小。



图 6 实验开始时的红外分布

Fig. 6 Infrared distribution at the beginning of the experiment



图 7 实验结束时的红外分布

Fig. 7 Infrared distribution at the end of the experiment

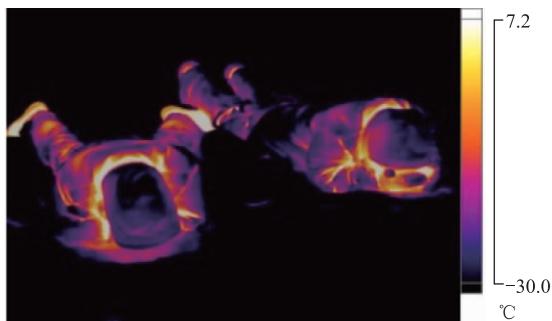
3)不同姿势人体对红外辐射量的影响。为研究不同勤务条件下人体姿势对红外辐射的影响,参试人员按照表 3 的配套穿着,分别以站姿、坐姿和潜伏状态进行实验。人体不同状态下的红外热像如图 8 所示。



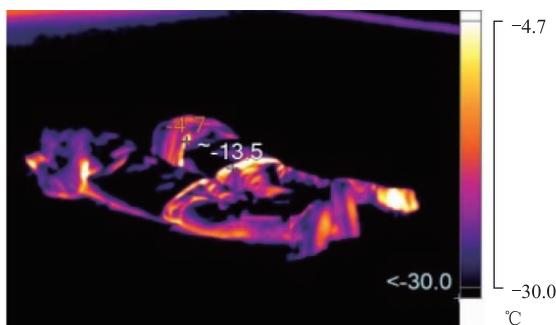
(a)站姿



(b)坐姿



(c) 潜伏时前部



(d) 潜伏时后部

图8 人体不同状态的红外热像

Fig. 8 Infrared thermal imaging of human body in different states

从图7~图8可以看出,人体各部位的散热量明显不同。站姿条件下,人体颈部、腋下、小腿和脚部散热量明显较大;坐姿条件下,人体颈部、腋下、腰部、脚部散热量较大;潜伏条件下,从前面观察,颈部和脚踝处散热显著,从后面观察,腋下、腰部和脚部散热明显。说明这些部位保暖不够,也证明这些部位的散热对红外伪装影响巨大,远远超出加热服装对红外伪装的影响。

2.2.3 实验结论 由上述实验过程及结果分析可以得出,加热背心对寒冷条件下人体的辅助保暖效果明显,可以大大延长官兵的野外执勤时间。影响单兵中远红外伪装的因素主要有温度和材料的发射率,加热服对厚型的冬服外表面温度影响较小,不会显著影响红外伪装效果;同时通过红外热像仪的观察研究,现行冬服配套的局部保暖性能不平衡,需在今后加以改进。

3 结语

电加热服由发热载体、服装和电池等构成,相互之间通过导线连接。发热载体布置在后背、前腹部,可拆卸,可水洗。服装是背心结构,两腋下侧缝采用罗纹材料,适合不同体型人员穿用。电池具有温度保护、电流控制功能及3档电压脉冲输出,穿用

者可以根据保暖需要调节发热功率。经过部队试穿实验,加热背心在寒冷条件下对人体的辅助保暖效果明显,全功率发热时间大于2 h,衣内表面温度不低于50 °C,能够有效满足官兵需求;加热服对厚型的冬服外表面温度影响较小、不会显著影响红外伪装效果;但现行冬服配套的局部保暖性能不平衡,需在今后加以改进。

参考文献:

- [1] 张妍. 电加热服装的服用性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [2] 包玉秀. 导热纤维及织物在加热服装中的应用研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2019.
- [3] 王宏付, 张海棠, 柯莹. 智能防寒服装研究进展[J]. 服装学报, 2021, 6(1): 29-35.
WANG Hongfu, ZHANG Haitang, KE Ying. Research progress on intelligent cold protective clothing[J]. Journal of Clothing Research, 2021, 6(1): 29-35. (in Chinese)
- [4] 吴雨曦. 面向高龄女性的智能调温加热服开发与舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [5] 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 Danan, 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)
- [6] 崔志英, 王绿英, 杨诗慧. 加热区域设计对电加热服热舒适性的影响[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(5): 33-36.
CUI Zhiying, WANG Lvyang, YANG Shihui. Influence of heating zone design on electrically heated garment thermal comfort[J]. Cotton Textile Technology, 2021, 49(5): 33-36. (in Chinese)
- [7] 郑兆和, 伍伟新. 电加热服装的电学安全性和发热功能性评价方法[J]. 山东纺织科技, 2017, 58(4): 22-25.
ZHENG Zhaohe, WU Weixin. Evaluation method for electrical safety and heating function of electrically-heated garment[J]. Shandong Textile Science and Technology, 2017, 58(4): 22-25. (in Chinese)
- [8] 范敏, 张辉. 电热服加热功率与内外层服装热阻的关系探讨[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2018, 38(2): 30-34.
FAN Min, ZHANG Hui. The relationship between heating power and thermal resistance of inner and outer layers for electric heating clothing[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Editions), 2018, 38(2): 30-34. (in Chinese)
- [9] 张清山, 李玲. 一款电加热羽绒服的加热性能评价[J]. 中国纤检, 2019(9): 100-102. (下转第470页)