

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.08.006

# 电加热服装的研究进展及热舒适性能评价

田苗<sup>1,2,3</sup>, 张向辉<sup>1,2,3</sup>, 沈翀翌<sup>1</sup>

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 功能防护服装研究中心, 上海 200051)

(3. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

**摘要:** 电加热服装的开发对拓展野外探索领域、治疗雷诺氏症候群等病症具有重要作用。通过回顾电加热服装的发展进程, 明确其主要功能, 解析其测试手段及存在的优点和不足。选取市场常用的电加热服装, 采用暖体假人测试、人体生理和心理测试, 获取服装热阻、人体皮肤温度和主观热感觉, 从活动状态、加热方式、人体部位和加热时间等角度, 探析电加热服装的热舒适性能。结果表明: 不同加热档位可提高服装热阻, 但电加热模块位置过于集中易造成人体皮肤温度分布不均, 从而影响其热感觉。研究结果为电加热服装的设计开发提供了参考。

**关键词:** 电加热服装; 热舒适性; 性能评价; 暖体假人; 主观评价

**中图分类号:** TS941.731

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2044(2018)08-0020-05

## Research progress of electrically heated garment and evaluation on its thermal comfort performance

TIAN Miao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xianghui<sup>1,2,3</sup>, SHEN Chongyi<sup>1</sup>

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China)

(2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China)

(3. Key Laboratory of Clothing Design &amp; Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** The development of electrically heated garments expands the scope of field exploration, which is also significant for the treatment of the disease like Raynaud's phenomenon. The development progress of electrically heated clothing is reviewed, its main functions are determined, the experimental methodology as well as its advantages and shortcomings are analyzed. A kind of electrically heated clothing on the common market is selected and examined by the thermal manikin to acquire the clothing thermal insulation. Physiological and psychological tests are also conducted to obtain the skin temperature and subjective thermal sensation score. Multi-dimensional factors, such as activity condition, heating level, body position and heating duration are analyzed to evaluate the thermal comfort of the clothing. Results demonstrate that increasing the heating level could increase the clothing thermal insulation. However, the concentrated electrical heating modules lead to heterogeneous skin temperature distribution, which impacts the thermal sensation. The results provide foundations for the design of electrically heated garments.

**Key words:** electrically heated garment; thermal comfort performance; performance evaluation; thermal manikin; subjective evaluation

随着社会的发展进步, 人们不断探索极限环境, 同时对服装的舒适性和功能性的要求不断提高。在对服装服用性能的评价中, 热湿舒适性能是衡量服装功能的一项重要指标。通常人体自身的体温调节能力能够将人体维持在舒适状态, 但对于特殊群体, 如冬季户外作业人员, 其体温调节能力不足以应对环境温度的变化, 此时服装功能就起到了关键作用。

保暖服主要可以分为消极阻热式保暖服和积极产热式保暖服两类。其中消极阻热式保暖服是指利用服装本身的材料结构及服装和人体之间的衣下间隙, 通过阻止人体热量散失达到保暖目的; 而积极产热式保暖服则是通过引入外界能源, 并将其转化为热能从而

达到辅助加热的目的。根据产热热源, 可将常见产热服分为五大类: 太阳能热服、化学能热服、空调热服、相变材料热服和电热服<sup>[1]</sup>。其中电热服是指以电能为能源, 将电能通过电热元件转化为热能的一类保暖服装, 一般由电源、发热元件、控温装置、安全保护装置等构成, 它们相互之间通过导线连接<sup>[2]</sup>。

本文首先通过文献分析回顾电加热服装的发展过程及评价手段, 并归纳电加热服的优势及目前存在的主要问题。然后选取常见的户外电加热服, 从生理学和心理层面面对服装性能进行测评, 探究活动状态、加热方式、身体部位和加热时间等因素对人体皮肤温度和热舒适感觉的影响, 为电加热服装的优化提供参考。

## 1 电加热服发展历程

电加热服装最早应用于第一次世界大战时期的飞行服, 爱迪生电气公司 (Edison Electric Appliance Company) 为美国陆军部提供了 5 000 套电加热飞行服, 用于抵御高空低温环境<sup>[3]</sup>。在之后的 20 年中, 鲜有对电

收稿日期: 2018-03-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2232017D-22); 上海市设计学IV类高峰学科资助

作者简介: 田苗(1989—), 女, 山东青岛人, 讲师, 主要从事功能服装数值模拟及人体工效学研究。

通信作者: 张向辉。E-mail: zhangxianghui@dhu.edu.cn。

加热服装测试的报道。但也有学者不断探索不同的加热方式<sup>[3]</sup>。

电加热手套和袜子的出现为防止冻伤和冬季免疫系统疾病的治疗提供了手段<sup>[4]</sup>。Kempson 等人<sup>[5]</sup>设计、制作电加热手套用来治疗雷诺氏症候群(Raynaud's phenomenon)等疾病。利用红外热成像获得的温度分布对这些病症进行医学评价,并证实电加热手套对血管痉挛性疾病的治疗具有显著作用。近年来,国内学者针对极易遭受低温损伤的手部,开发了一种低温环境下手部温度主动加热技术,可实现手部温度的自动调节,并保障手部的工效性能<sup>[6]</sup>。

随着电加热技术的发展,逐渐出现了电加热背心、内衣和夹克等。电加热服装也从军队应用普及到日常穿着。Scott<sup>[7]</sup>通过对电加热服装关键技术进行讨论,发现随着系统日益复杂,电加热服装制作难度和成本不断上升。由于供电方式制约了服装的使用,辅助电加热成为唯一的解决方案。美国陆军研究实验室对不同的电加热手套、短袜、背心和内衣进行配伍,探索加强电加热服装热防护性的方法,发现穿着电加热服装可以减少热量散失,增加在寒冷环境中的耐受时间<sup>[8]</sup>。由背心、电池和加热载体组成遥控式电加热服,可实现不同发热功率的遥控操作,使衣内表面温度不低于 50℃<sup>[9]</sup>。

另外,电加热模块作为极地智能服装的一部分,可应对低温恶劣环境,拓宽行动适应的温度范围,调节人体温度平衡,提高生存几率<sup>[10]</sup>。同时,通过实际环境测试发现,电加热智能服装在电源供应方面存在问题<sup>[11-12]</sup>。

在电加热服装的性能测试方面,Haisman<sup>[13]</sup>采用人体试验和问卷调查的方式,发现对于冬天手脚的防护不需要采用服装的方式。虽然电加热服装能够提高穿着者的舒适性,但服装需要连接供电装置,存在人体活动受限和耐久性不强等问题。Kayacan 等人<sup>[14]</sup>利用导电纤维制作加热板,并将其加入到电加热服装的设计中,在寒冷环境中利用暖体假人对服装的性能进行评价。此后,暖体假人、红外热像仪等逐渐成为电加热服装性能测评的重要手段<sup>[15-17]</sup>,用于探索化学加热和电加热服装舒适性能的差异<sup>[18-19]</sup>。另外,利用人体试验获取生理学和心理学层面的数据也逐渐应用于电加热服装<sup>[20]</sup>。

根据文献回顾和市场调研结果,电加热服的优点

主要可以概括为:与具有同等保暖性能的阻热式保暖服相比,厚度更薄、质量更轻;均采用低于 12 V 的人体安全电压,在保证温度的同时安全可靠;电加热服在结构上多采用“夹层式”设计,可脱卸穿着,增加了服装的实用性;发热元件大多为碳纤维材料,能够发射远红外线,对人体具有保暖保健作用。

虽然电加热服是目前应用较多且技术比较成熟的一种智能加热服装,但目前在结构和性能评价方面仍然存在一定不足<sup>[21]</sup>。本研究的主要目的是确认目前市场上已有的电加热服装存在的问题,并对其穿着舒适性进行评价,从而为电加热服装的开发和优化提供参考。

## 2 试验设计

### 2.1 测试样本

通过调研发现,目前市场上大多数电加热服装都设计为多点加热,且加热档位可调,因此,本研究选用具有代表性的某品牌 M 码户外电加热冲锋衣进行测试。

该服装面料为春亚纺 PVC 复合材料,里料为四面弹复合绒,由可温控便携式电池供电,可进行三档加热,档位越高加热功率越大。加热部位为背部的 3 个区域,发热均匀稳定。

### 2.2 测试方法

#### 2.2.1 暖体假人测试

利用人工气候室、暖体假人及相关配套软件系统,测试电加热服在不加热和三档加热状态下的热阻,用于客观评价电加热服的保暖性。本次试验使用的暖体假人共有 11 个独立的加热区段,具有恒皮温、变皮温、恒功率、变功率 4 种工作模式。本试验采用恒皮温工作模式,设置假人参数为皮肤温度 33℃。结合实验室条件,设置人工气候室的环境温度为(5±2)℃,相对湿度为(50±5)%。试验在 4 种加热方式下分别重复 3 次,每次测量间隔 5~10 min。

#### 2.2.2 皮肤温度测试

受试验条件限制,将恒温恒湿实验室的环境温度设置为(15±2)℃,相对湿度设置为(50±5)%。试验前对恒温恒湿实验室的温湿度进行调整,待环境温湿度平衡后开展试验。

电热服在不同的加热方式下,分别采集受试者站立和步行时皮肤温度数据,从生理角度对电加热服装的热舒适性进行评价。试验使用跑步机模拟人体步行

的活动状态。选取人体右侧背部、胸部、腰部和腹部4个部位,利用温度传感器监测皮肤表面温度。

### 2.2.3 主观评价

热感觉主观评价标尺将热感觉分为8个等级,分别是:-2为凉,-1为稍凉,0为舒适,1为稍暖,2为暖,3为稍热,4为热,5为很热。在试验开始之前,试验员会向受试者说明热感觉等级标准。在试验过程中,定时向受试者询问热感觉主观评价,并填写相关表格。

### 2.3 测试流程

皮肤温度和主观评价等人体试验的受试者为6名在校大学生,年龄(22±1)岁、身高(171.9±2.4)cm、体重(61.1±3.7)kg,确认受试者日常均习惯穿着测试服装号型。每位受试者依次完成以下测试流程:(1)受试者穿着电热服,在不加热的条件下站立,连续采集皮肤温度15 min。测试期间每隔5 min询问受试者4个部位的热感值,填写热感觉主观量表。完成后脱下电加热服静坐10 min;(2)依次调节电加热服加热档位至1、2、3档,在站立条件下,按步骤(1)采集皮肤温度并填写热感觉量表;(3)将跑步机速度设置为2.2 km/h,模拟步行状态,重复步骤(1)、(2)。

### 2.4 数据分析

利用SPSS软件对皮肤温度和主观评价结果进行单因素方差分析,研究活动状态、加热方式、身体部位和加热时间对人体生理和心理指标的影响。在单因素方差分析之前,首先进行方差齐性检验,若方差齐,则通过Tukey事后检验进行组内比较;若方差不齐,则通过Dunnnett's T3事后检验进行组内比较。

## 3 结果与讨论

### 3.1 热阻测试

由于在5℃环境下,暖体假人无法测量裸体热阻,因此在数据处理过程中,以暖体假人不加热时的热阻作为基准,比较4种加热功率对服装整体热阻的影响。在不加热、1档加热、2档加热和3档加热条件下的电热服热阻分别为1.73、1.91、2.19和2.36 Clo。热阻值随着加热等级的提升而呈阶梯性上升,3档加热时热阻最高,保暖性最强。与不加热时的热阻相比,1、2、3档加热状态对热阻的提升分别达到0.18、0.46、0.63 Clo,表明加热对服装的热阻有提高作用,且加热档位越高,热阻增加越多。

### 3.2 皮肤温度

单因素方差分析结果表明,活动状态( $p=0.005$ )、

加热方式( $p=0.003$ )、身体部位( $p<0.001$ )和加热时间( $p=0.006$ )对皮肤温度均有显著影响,见表1。表中\*代表在 $p=0.05$ 的显著水平下具有显著差异。

表1 皮肤温度的数据统计结果

影响因素		平均值/℃	标准差	显著性
活动状态	站立	33.46	0.74	0.005*
	步行	33.99	1.03	0.005*
加热方式	不加热	33.23	0.59	0.003*
	1档加热	33.64	0.76	0.003*
	2档加热	33.82	0.89	0.003*
	3档加热	34.20	1.15	0.003*
身体部位	背部	34.48	1.08	<0.001*
	胸部	32.95	0.34	<0.001*
	腰部	34.08	0.84	<0.001*
	腹部	33.37	0.31	<0.001*
加热时间	5 min	33.33	0.82	0.006*
	10 min	33.79	0.89	0.006*
	15 min	34.05	0.95	0.006*

由表1可见,随着加热方式从不加热到3档加热,皮肤温度从33.23℃升至34.20℃。组内比较结果表明,不加热状态与1档和2档加热时的皮肤温度无显著差异,但与3档加热时有显著差异。

当活动状态为步行时,皮肤表面温度为33.99℃,高于站立状态时的33.46℃。4种加热方式下不同活动状态的皮肤温度见图1,可见随着电热服加热档位的提高,皮肤表面温度也逐渐升高,且在不同的加热方式下,步行时的皮肤温度均高于站立状态。

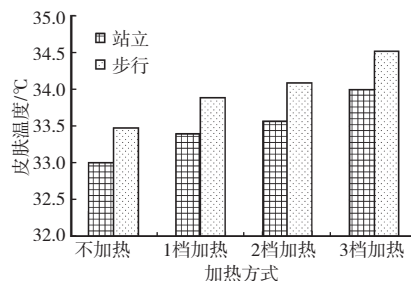


图1 4种加热方式下不同活动状态的皮肤温度

电热服的3个加热模块均在人体后背位置,因此表1所示背部温度最高,达到34.48℃,其次腰部为34.08℃,胸部温度最低,为32.95℃。组内比较结果显示,背部、腰部温度与腹部、胸部温度具有显著性差异。说明电热服的加热状态易造成人体皮肤表面温度分布不均。图2为4种加热方式下人体各部位的皮肤温度。可见,随着加热档位的升高,各部位的温度均有一定提升,与此同时,背部、腰部与胸部、腹部的温度差也不断

增大。这说明加热档位越高,加热服造成的皮肤表面温度分布越不均匀。因此在实际的电加热服装设计,需考虑加热部位的系统性设计。

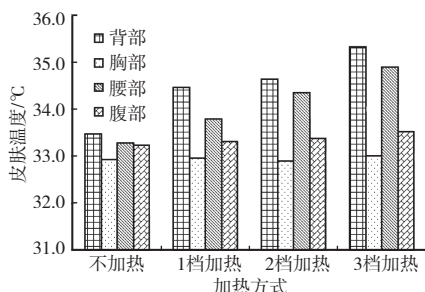


图2 4种加热方式下人体各部位的皮肤温度

加热时间的延长同样造成人体皮肤温度的升高。组内比较结果显示,当加热时间从5 min增加到15 min时,皮肤温度会产生显著性差异。图3为4种加热方式下不同时刻的皮肤温度。

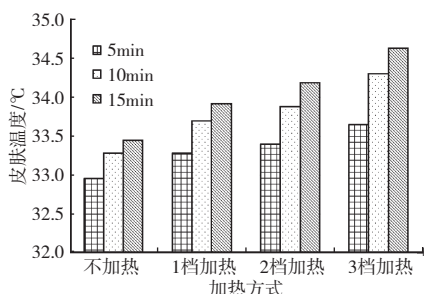


图3 4种加热方式下不同时刻的皮肤温度

如图3所示,随着加热档位的升高,皮肤温度同样呈阶梯性上升,且5~10 min的温度差大于10~15 min的温度差,说明随着加热服穿着时间的延长,温度上升的梯度会逐渐减小,并趋于平稳。

### 3.3 主观评价

单因素方差分析结果表明,活动状态( $p < 0.001$ )、加热方式( $p < 0.001$ )、身体部位( $p < 0.001$ )和加热时间( $p = 0.044$ )对人体的主观热感觉均有显著性影响,见表2。表中\*代表在 $p = 0.05$ 的显著水平下具有显著差异。可见,随着加热方式从不加热到3档加热,皮肤温度的主观热感觉从0.50升至1.86。组内比较结果表明,所有加热状态与不加热状态的主观热感觉均有显著差异,1档加热与2档加热无显著差异,但与3档加热时的主观热感觉具有显著差异。当活动状态为步行时,主观热感觉分值为1.44,高于站立状态时的0.89。图4为4种加热方式下不同活动状态的热感觉评分。

表2 主观热感觉的数据统计结果

影响因素	平均值	标准差	显著性	
活动状态	站立	0.89	0.78	<0.001*
	步行	1.44	0.68	<0.001*
加热方式	不加热	0.50	0.53	<0.001*
	1档加热	1.08	0.56	<0.001*
	2档加热	1.22	0.50	<0.001*
	3档加热	1.86	0.84	<0.001*
身体部位	背部	1.85	0.96	<0.001*
	胸部	0.86	0.67	<0.001*
	腰部	1.10	0.46	<0.001*
	腹部	0.85	0.45	<0.001*
加热时间	5 min	0.93	0.77	0.044*
	10 min	1.16	0.78	0.044*
	15 min	1.41	0.74	0.044*

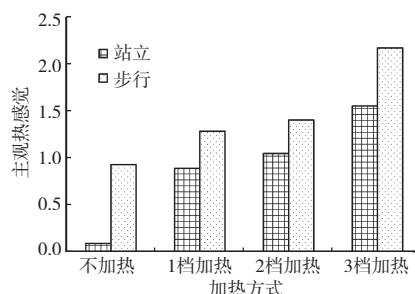


图4 4种加热方式下不同活动状态的热感觉评分

由图4可见,随着电热服加热档位的提高,主观热感觉分值也逐渐升高,且在不同的加热方式下,步行时的主观热感觉分值均高于站立状态,说明对于人体整体感觉而言,即使在运动时,三档加热仍然是需要的。

与人体皮肤温度结果一致,受试者对背部主观热感觉评分最高,达到1.85,其次为腰部1.10,最低为腹部0.85。即使胸部的实测皮肤温度较低,但受试者对胸部的主观热感觉稍高于腹部,表明人体对腹部的热感觉要求较高。文献研究同样表明,人体胸部、腹部、腰部所消耗的功率依次增大<sup>[17]</sup>。组内比较结果显示,背部与腰部、胸部、腹部的主观热感觉评价均有显著性差异,而腰部、胸部、腹部之间无显著差异。图5为4种加热方式下人体各部位的热感觉评分。可见,随着加热档位的升高,各部位的主观热感觉均有一定提升,与此同时,背部与腰部、胸部、腹部的主观热感觉差值不断增大。其中在3档加热时的背部主观热感觉分值达到3.088,为稍热,说明局部加热可能会使人体感到不适。

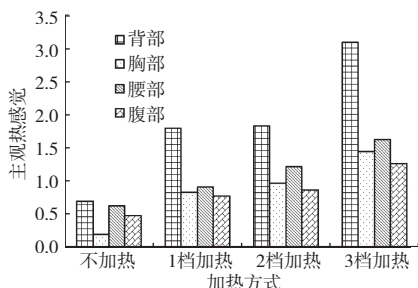


图5 4种加热方式下人体各部位的热感觉评分

加热时间的延长同样造成人体主观热感觉分值的升高。与人体皮肤温度一致,组内比较结果显示,当加热时间从5 min 延长至15 min 时,主观热感觉分值会产生显著性差异。图6为4种加热方式下不同时间的热感觉评分。

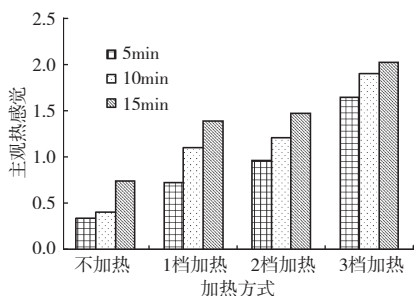


图6 4种加热方式下不同时间的热感觉评分

由图6可见,随着加热档位的升高,人体主观热感觉分值同样呈阶梯性上升。1档和2档加热在10 min和15 min 时的主观热感觉评分逐渐接近,说明随着加热服穿着时间的延长,人体对1档和2档加热的主观感觉趋于一致。

电加热服装的使用在低温环境中可普遍提高人体的热感觉和舒适性,且一般温度越低,加热功率越高,人体整体热感觉越好。试验结果同样表明,当电加热服装在背部多点加热时,加热功率的升高会提高人体整体的热感觉。然而,由于加热方式造成局部温度过高,反而会降低局部的热舒适感觉。同时,随着穿着时间的延长,各档位之间的热舒适性差异逐渐减小,在倡导节约能源的大环境下,可以针对产品的目标销售区域的气候环境,对加热位置和档位进行适当调整,在穿着者获得较好的热体验的同时,尽量减少能源消耗,同时降低对电池容量的要求。

#### 4 结 语

电加热服装的发展拓展了人们的野外探索领域,提高了人体对低温环境的耐受时间。但同时,电加热服装仍存在限制人体活动和电池供电有限的问题。本

文通过回顾电加热服装的发展进程,明确其主要功能,解析其测试手段及存在的优点和不足;利用市场调研选取测试样本,并采用暖体假人测试、人体生理和心理测试,获取服装热阻、人体皮肤温度和主观热感觉,从活动状态、加热方式、人体部位和加热时间等多角度探析电加热服装的热舒适性能。针对选取的电加热服装类型,获得如下结论:

(1)电热服加热可提高服装热阻,且提高程度3档>2档>1档,表明电加热服能够改善服装的保暖性,且加热功率越大,服装的保暖效果越好。

(2)电加热服对胸部、腹部的皮肤温度影响较小,背部、腰部的皮肤温度明显提高,表明3档加热功率对加热区域附近的温度影响较大,距离越远,加热效果越差,高档位加热下皮肤温度的升高可能影响人体热舒适性。

(3)主观热舒适性评价表明,背部加热会造成人体躯干前部热感觉较弱、后部热感觉较强的现象,且3档加热功率过高,影响背部舒适性。

同时,针对采用集中式背部加热的电加热服装,建议可以根据产品的目标销售区域的气候条件,对加热位置和档位进行适当调整,在提高人体热舒适性的同时,减少能源消耗。



#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 支荣钊,赖军.警用电加热服装的研究进展与应用分析[J].纺织标准与质量,2015(1):26-29.
- [3] WOTRING G H.Electrically heated clothing[J].Electrical Engineering,1944(63):1304-1313.
- [4] KEMPSON G E, COGGON C, ACHESON E D. Electrically heated garments[J]. British Medical Journal, 1983, 286(6365):643-644.
- [5] KEMPSON G E, CLARK R P, GOFF M R. The design, development and assessment of electrically heated gloves used for protecting cold extremities[J]. Ergonomics, 1988, 31(7):1083-1091.
- [6] 张海洲,陈晓.低温环境下手部温度主动加热技术的研究[J].中国个体防护装备,2008(2):16-18.
- [7] SCOTT R A. The technology of electrically heated clothing[J]. Ergonomics, 1988, 31(7):1065-1081.
- [8] HICKEY C A, WOODWARD A A, HANLON W E. A pilot study to determine the thermal protective capability of electrically heated clothing and boot inserts[R]. U.S. Army Research Laboratory, 1993.
- [9] 唐世君,郭诗琳.电加热服装的研制[J].中国个体防护装备,2013(6):5-8.

☞(下转第31页)

的纺纱最佳组合为  $A_3B_1C_3$ , 即 a 粗纱定量比例 30%, a 粗纱定量 1.9 g/10 m, b 粗纱定量 4.0 g/10 m, a 粗纱捻系数 60, b 粗纱捻系数 70, 细纱捻系数 410。该组合为正交表中 9 个组合中的 7<sup>#</sup>组合, 其覆盖率为 92.98%。

### 2.5 包芯纱性能测试

当包芯纱的覆盖率优化后, 其基本纱线性能也要达到一定要求, 才能作为合格的产品投入生产。在设计因素和水平时, 已经考虑到对纱线的实际生产要求, 并作出合理的水平设置。

试验样品选择两组正交试验中最优工艺组合纺制得到的包芯纱, 测试结果见表 5。

表 5 纱线性能测试样品表

喂入形式	单粗纱喂入	双粗纱喂入
捻系数	410	410
粗纱捻系数	60	a 纱 60, b 纱 70
粗纱定量/[g·(10 m) <sup>-1</sup> ]	2.3	a 纱 1.9, b 纱 4.0
纱线强力/cN	229.4	239.8
3 mm 毛羽指数/(根·m <sup>-1</sup> )	7.4	6.4
条干不匀率/%	11.57	11.28

根据文献资料和工厂的生产标准, 表 5 所示的指标均符合生产要求。经检验, 在最优化覆盖率工艺下纺制的纱线, 其基本性能也符合面料企业对纱线的品质要求。因此, 试验所得的两种最优工艺均具有可行性。

在实际生产中, 考虑到生产成本、效率等原因, 可根据实际的性能需求和风格特征等因素选择喂入方

式, 在单粗纱喂入能满足要求的条件下, 选择单粗纱喂入。

### 3 结 语

本文利用显微镜拍摄技术和计算机图像处理技术的覆盖率测量方法, 通过设计正交试验, 对单粗纱和双粗纱喂入两种包芯纱生产方法进行了工艺优化和对比, 并测试最优覆盖率工艺下纱线的断裂强力、毛羽指数和条干不匀率等性能。

由于时间和实践条件的限制, 本文只探究了粗纱定量、粗纱捻系数、细纱捻系数、粗纱的喂入形式(单粗纱或双粗纱喂入)这 4 个主要的因素。其他因素, 如设置更高的细纱捻系数、进一步探究双粗纱喂入条件下的可变参数等还需进一步探究。



#### 参考文献:

- [1] 黄鑫鑫.包芯纺纱技术的发展及存在问题[J].纺织科技进展,2008(6):9-10.
- [2] 张静.含分形涤纶舒适性织物的免烫性能研究[D].北京:北京服装学院,2005.
- [3] 刘荣清,张伟敏.包芯纱的纺制[J].纺织导报,2008(10):70-73.
- [4] 闫海江.两种包芯纱的工艺优选及质量对比[J].棉纺织技术,2015,43(1):37-40.
- [5] 孟召强,冯建永.环锭纺包芯纱覆盖程度的研究[J].现代丝绸科学与技术,2010,25(3):10-11.
- [6] 邢明杰,杨磊,李永霞,等.喷气包芯纱的纺制及其包覆效果探析[J].棉纺织技术,2005,33(9):1-4.
- [7] 张长乐,蔡韵梅.弹力包芯纱弹性与包覆效果的研究[J].棉纺织技术,2000,28(9):5-9.

(上接第 24 页)

- [10] RANTANEN J, KARINSALO T, REHO A, et al. Smart clothing for the arctic environment: International symposium on wearable computers[C].IEEE,2000:15-23.
- [11] RANTANEN J, VUORELA T, KUKKONEN K, et al. Improving human thermal comfort with smart clothing: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C].IEEE,2001:795-800.
- [12] KUKKONEN K. The design and implementation of electrically heated clothing: International Symposium on Wearable Computers [C]. IEEE, 2001: 180-181.
- [13] HAISMAN M F. Physiological aspects of electrically heated garments [J]. Ergonomics, 1988, 31(7): 1049-1063.
- [14] KAYACAN O, BULGUN E, SAHIN O. Implementation of steel-based fabric panels in a heated garment design [J]. Textile Research Journal, 2008, 79(16): 1427-1437.
- [15] WANG F, GAO C, HOLMÉR I. Effects of air velocity and clothing combination on heating efficiency of an electrically heated vest (EHV): A pilot study [J]. Journal of Occupational & Environmental

Hygiene, 2010, 7(9): 501.

- [16] WANG F, LEE H. Evaluation of an electrically heated vest (EHV) using a thermal manikin in cold environments [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2010, 54(1): 117.
- [17] 赵华菲.智能加热服装及其热学性能的研究[D].天津:天津工业大学,2013.
- [18] 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 & Environment, 2015, 94(2/3): 704-713.
- [19] 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.
- [20] 庄梅玲,张晓枫.电热服的热性能评价[J].青岛大学学报(工程技术版),2004,19(2):54-58.
- [21] 柯莹.电加热服结构及其性能评价方法[J].纺织导报,2016(11):122-123.