

电加热服装加热方式对其调温性能的影响

程子琪¹, 方嘉燕², 周娟², 卢业虎^{*1,3}

(1. 苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州市唯逸纺织科技有限公司, 江苏 苏州 215127; 3. 南通纺织丝绸产业技术研究院, 江苏 南通 226300)

摘要: 为了评价电加热服装加热方式对人体皮肤温度的调节能力, 选择马甲和外套两种款式的电加热服, 通过暖体假人实验评价 $-10 \sim 5$ °C 环境温度下不同服装款式、发热片面积、放置方式对人体各部位皮肤表面温度的影响。结果表明: 环境温度较高时, 外套的低温加热效果较好; 环境温度较低时, 马甲的高温加热效果较好; 加热面积对外套影响不大, 但对较修身的马甲影响显著, 加热面积越大, 上身整体皮肤温度越高, 可能会造成马甲加热部位的局部热不适; 服装前胸位置的调温性能明显优于前腹位置。因此电加热服装的设计应综合考虑穿着环境温度、服装款式、加热片面积、放置位置等因素, 且人体各部位的皮肤温度也是设计时需要参考的重要指标。

关键词: 电加热服; 暖体假人; 皮肤温度; 服装种类; 加热方式

中图分类号: TM 925. 63; TS 941. 736 文献标志码: A 文章编号: 2096 - 1928 (2024) 06 - 0507 - 07

Influence of Heating Method of Electrically Heated Garment on Its Temperature Regulation Performance

CHENG Ziqi¹, FANG Jiayan², ZHOU Juan², LU Yehu^{*1,3}

(1. College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Suzhou WI-INNOVATION CO., Ltd., Suzhou 215127, China; 3. Nantong Textile and Silk Industrial Technology Research Institute, Nantong 226300, China)

Abstract: In order to evaluate the regulatory ability of electrically heating garment on human skin temperature, the article selected two categories of electrically heating garment: vests and jackets. A thermal manikin experiment was used to assess the impacts of clothing category, heating area and heating position on the skin temperatures of various parts of the human body at an ambient temperature of $-10 \sim 5$ °C. The results show that when the ambient temperature is relatively high, jackets have better low-temperature heating effects. When the ambient temperature is relatively low, vests have better high-temperature heating effects. The heating area has little impact on jackets, but significantly affects slim-fit vests. The larger the heating area, the higher the overall skin temperature on the upper body, but it may cause localized discomfort in the heating area of the vest. The thermal regulation performance of heating in the front chest position of the clothing is significantly better than heating in the front abdominal position. Therefore, the design of electrically heated clothing should comprehensively consider factors such as the wearing ambient temperature, clothing category, heating area, heating position and so on. The skin temperature of each part of the human body is also an important indicator that needs to be considered when designing electrically heating garment.

Key words: electrically heated garment, thermal manikin, skin temperature, clothing category, heating method

收稿日期: 2024 - 05 - 31; 修订日期: 2024 - 09 - 10。

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)重大项目(21KJA540004)。

作者简介: 程子琪(2000—), 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 卢业虎(1986—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为智能和防护服装。Email: yhlu@suda.edu.cn

在低温环境下活动或工作时,为使人体体温维持在舒适范围内,人们通常会采用增加服装层数或在服装夹层内填充材料等方式被动地抵御寒冷^[1]。但该方法会使穿着过于臃肿,不仅限制了身体活动,而且提高了人体的代谢能量消耗,此外随着服装穿着层数或填充物的增加,其隔热性能在达到上限值后会逐渐下降^[2]。电加热服装可以主动产热,其通过置入服装中的电加热元件将电能转化为热能,从而在低温环境中为人体提供热量^[3-4]。

电加热服装的性能评价主要采用真人实验和暖体假人实验。庄梅玲等^[5]、SHIN S 等^[6]、丁波等^[7]采用真人实验法,从生理、心理两个角度测试了电加热服的热性能,研究不同环境温度、发热元件、加热区域、加热方式、功率消耗情况等要素对人体热舒适性的影响。但是真人实验中存在受试者的个体差异,且较为极端的实验条件可能会对受试者造成伤害,而使用暖体假人进行实验可以避免上述问题^[8]。SONG W F 等^[9]、WANG F M 等^[10]通过假人实验探讨了低温环境下服装组合和空气流速对电加热背心加热效率的影响,结果表明,背心的加热效率随着穿在加热背心上的衣物数量以及环境温度的增加而增加,随着空气流速的增加而降低。张妍^[11]选用碳纤维和石墨烯的电加热服,在不同环境温度下研究其加热面积、功率对加热效率、服装热阻的影响。PARK H 等^[12]、吴黛唯等^[13]对电加热服中发热片的放置位置进行研究,得出可以将加热装置放置在前胸、肩部、腹部、前臂和小腿 5 个表面温度相对较低的部位,并推荐了各部位的加热温度范围;且实验发现,加热片越贴近皮肤,对提升隔热效果和减少身体热量损失越有效。杨玉桐^[14]研究得出,与加热四肢相比,向人体躯干区域供热更有助于防寒保暖。

目前,学者已研究了环境因素(环境温度、风速)^[9-11]、服装(热阻及组合方式)^[10]、加热片(面积、温度、位置)^[6,7,11-15]对电加热服加热性能的影响,但对电加热服性能的研究主要采用加热马甲、外套等单一服装,缺少关于电加热服装款式对加热性能影响的研究。文中采用暖体假人进行实验,以人体皮肤表面温度作为评价指标,系统研究马甲和外套两种款式的电加热服装在不同低温环境下加热的热效应,并分析发热片面积、放置方式对人体各部位热舒适性的影响,为电加热服优化设计提供参考。

1 材料和方法

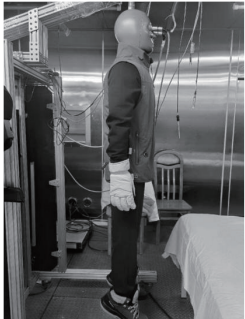
1.1 材料

FOOXMET 电热马甲和电热外套(采用 iwarm 加热技术,男款,尺码均为 170 码,马甲胸围116 cm,外套胸围 120 cm),均为苏州风谜网络科技有限公司生产;JERNANO 碳纳米薄膜加热片,苏州捷迪纳米科技有限公司生产。薄膜加热片中间的碳纳米管薄膜为面状加热,连接柔性电极、温度传感器、控制器,可以通过手机对加热片加热温度进行连续调控。

1.2 暖体假人实验条件

实验采用 34 区出汗暖体假人 Newton 评价电加热服装的调温性能,暖体假人由美国 Thermetrics 公司制造。

假人上身穿着的服装组合分别为内衣 + 外套 + 电加热马甲、内衣 + 毛绒马甲 + 电加热外套,假人着装后如图 1 所示。



(a) 电加热马甲



(b) 电加热外套

图 1 暖体假人着装示意

Fig. 1 Thermal manikin dress diagrams

为模拟人体静态穿着的情形,在假人穿着服装(未加热)的情况下保持其表面温度恒定在 32.5 ℃,开启加热后采用恒功率模式(假人加热功率设定为 70 W/m²)。实验在人工气候室内进行,环境温度及相对湿度可根据实验要求进行设置。实验时使用 Therm DAC[®] 软件实时记录假人各区域的皮肤表面温度,再根据实验数据以及各区域表面积计算暖体假人各部位的平均皮肤温度。该假人

共有 34 个独立控温区域,分布及编号如图 2 所示。由于服装的加热片均位于人体上身,因此主要对上身(3[#]~10[#],13[#]~18[#])、后背(14[#],16[#],18[#])、前胸(13[#])、腹部(15[#])这 4 个区域平均皮肤温度的变化情况进行分析。

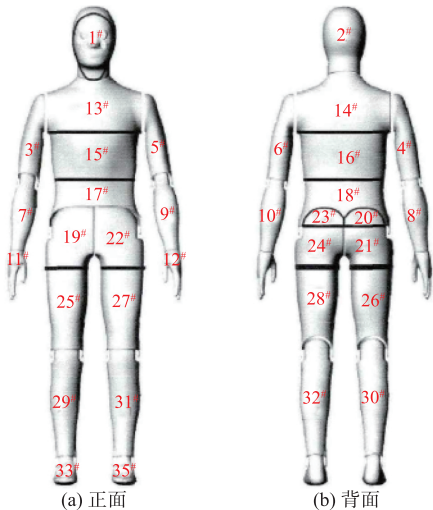


图 2 暖体假人分区示意

Fig. 2 Thermal manikin zoning diagrams

1.3 实验步骤

实验分为以下 3 个步骤:

1) 研究环境温度、服装款式对电加热服调温性能的影响。参考 ISO 11079—2007^[16], 根据服装加热时的热阻值估算服装穿着时的环境温度范围,由此设置马甲的实验环境温度为 0 ℃ 和 5 ℃,对应的外套实验环境温度为 -5 ℃ 和 0 ℃。在较低环境温度(马甲加热实验为 0 ℃,外套加热实验为 -5 ℃)时采用 50 ℃ 高挡位加热,在较高环境温度(马甲加热实验为 5 ℃,外套加热实验为 0 ℃)时采用 38 ℃ 低挡位加热。在同一环境温度下分别进行服装加热和不加热的实验,对比其加热效果。

2) 研究加热片面积对电加热服调温性能的影响。设置马甲的实验环境温度为 0 ℃,外套的实验环境温度为 -10 ℃,加热片放置位置如图 3 所示。由图 3(b)、图 3(d)可以看出,马甲和外套的后背位置设计了两片加热片:一片式(①)和大片式(②)。一片式加热区域长 19.3 cm、宽 10.5 cm,大片式加热区域长 26.3 cm、宽 10.5 cm。

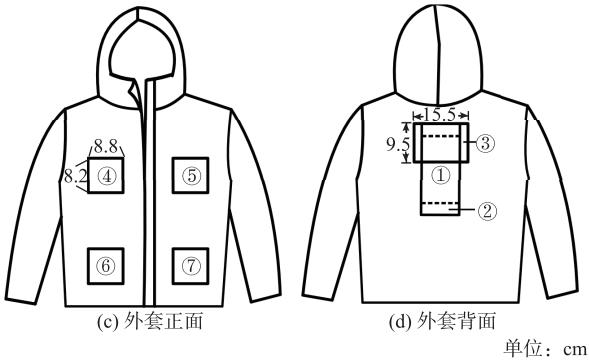
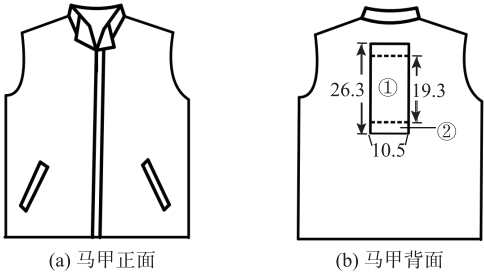


图 3 加热片放置示意

Fig. 3 Heating element placement diagrams

3) 研究加热片位置对电加热服调温性能的影响。已有研究表明,上背部、前胸、腹部局部热敏感性较高^[14],因此将外套设计为三片式(后背+前腹),即③+⑥+⑦,以及三片式(后背+前胸),即③+④+⑤两种加热片放置方式,其中加热片③加热区域长 15.5 cm,宽 9.5 cm。实验环境温度为 -10 ℃。

具体实验设计方案见表 1。

表 1 实验设计方案

Tab. 1 Test design scheme

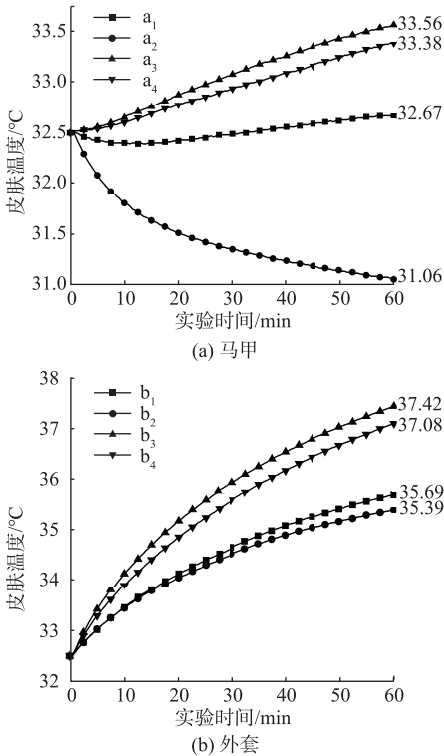
实验编号	款式	环境温度 /℃	加热片放置方式	加热温度 /℃	实验时间 /min
a ₁	马甲	0	一片式	50	60
a ₂		0	一片式		60
a ₃		5	一片式	38	60
a ₄		5	一片式		60
a ₅		0	大片式	50	60
b ₁	外套	-5	一片式	50	60
b ₂		-5	一片式		60
b ₃		0	一片式	38	60
b ₄		0	一片式		60
b ₅		-10	一片式	50	60
b ₆		-10	大片式	50	60
b ₇		-10	三片式(后背+前腹)	50	60
b ₈		-10	三片式(后背+前胸)	50	60

2 结果与分析

2.1 环境温度、服装款式对调温性能的影响

图 4 为穿着马甲(实验 a₁~a₄)和外套(实验 b₁~b₄)后人体上身皮肤温度变化情况。由图 4 可以看出,在同一环境温度下,加热后上身的皮肤温度均高于不加热时的皮肤温度。已有研究表明,人体皮肤较舒适温度范围为 32~37 ℃,当皮肤温度

低于 32 ℃ 时,会产生不适的冷感,高于 37 ℃ 时,会产生不适的热感^[17]。由图 4(a)可以看出,实验 a₂ 的人体上身皮肤温度持续下降至 32 ℃ 以下,人体产生不舒适冷感;实验 a₁ 的人体温度则在略微下降后缓慢上升,60 min 后皮肤温度达到 32.67 ℃,比实验 a₂ 高 1.61 ℃,此时人体不会有明显冷感。说明在 0 ℃ 环境下,马甲自身热阻不足以保持人体热舒适度,而对马甲进行 50 ℃ 高档加热后,人体皮肤温度有所上升,服装隔热性能提高。其余不加热实验(a₄,b₂,b₄)结果显示,穿着加热马甲或加热外套后上身皮肤温度均呈上升趋势,且实验 a₄,b₂ 在 60 min 后皮肤温度分别为 33.38 ℃ 和 35.39 ℃,人体较舒适。但实验 b₄ 在 60 min 后的上身皮肤温度达到 37.08 ℃,且仍有上升趋势,该温度会使人体产生不舒适热感,说明实验 b₄ 的环境温度设定偏高。实验 a₃,b₃(38 ℃ 加热)和 b₁(50 ℃ 加热)的上身皮肤温度均略高于不加热时的皮肤温度,60 min 后的温差分别为 0.18,0.34,0.30 ℃,加热效果不显著。



注:曲线上的数字表示实验时间为 60 min 时对应的皮肤温度,下同。

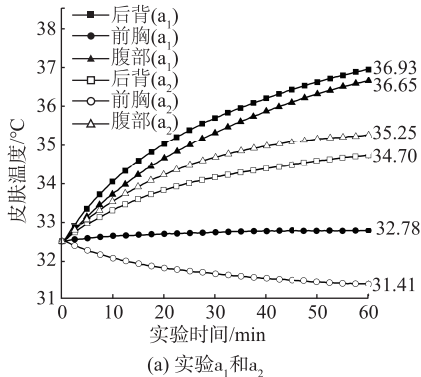
图 4 不同环境温度下的上身皮肤温度变化情况

Fig. 4 Temperature variations of upper body skin at different environmental temperatures

实验 a₁,a₂ 温差较大的原因为:马甲比外套的胸围小,款式更为修身,其加热片与人体贴合程度高,加热效果显著。此外,a₁,a₂ 的温差(1.61 ℃)明

显大于 b₁,b₂ 的温差(0.3 ℃),说明环境温度较低时,马甲的高温加热效果较好,可以使加热片产生的热量更多地传递给人体。

为进一步探究环境温度、服装款式对人体皮肤温度的影响,需要分析局部温度变化情况,具体如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,60 min 后,实验 a₁ 后背、前胸、腹部的皮肤温度分别比实验 a₂ 高 2.23, 1.37, 1.40 ℃,且皮肤温度均处于人体舒适区间。究其原因,实验中加热片放置在后背,使后背的加热效果更为显著。由图 5(b)~图 5(d)可以看出,加热后后背皮肤温度升温较多,实验 a₃,b₁,b₃ 相较实验 a₄,b₂,b₄ 分别升高 0.83,0.99,0.32 ℃;前胸、腹部加热后皮肤没有大幅升温,偶尔出现加热后局部皮肤温度略微高于不加热时的情况(温差小于 0.3 ℃),属于实验误差。可以看出在相同加热温度下,马甲加热后后背温差(2.23,0.83 ℃)高于外套加热后后背温差(0.99,0.32 ℃),这是因为马甲款式较为修身,加热片与人体表面间距小,加热效果更好。对比图 5(a)、图 5(c)可以看出,在较低温度下,加热马甲后不仅后背温度上升,前胸、腹部皮肤温度也有所升高,而加热外套后只有背部温度升高,进一步证明了低温时加热马甲对服装调温性能的影响更大。对比图 5(b)、图 5(d)可以看出,环境温度较高时,加热外套后各部位温度均有上升,而加热马甲后仅背部皮肤温度升高,且后背局部温度已高于 37 ℃,可能会使人体产生局部热不适。综合图 4,马甲和外套加热后的背部皮肤温度分别升高 0.83,0.32 ℃,上身皮肤温度分别升高 0.18, 0.34 ℃,可见虽然外套的背部加热效果不如马甲,但其上身温度差异较小,说明外套的加热均匀性更好。此外,穿着外套的情况下,不加热时各部位的皮肤温度大多大于 37 ℃,因此可以考虑减少内部衣服或者减小外套本身热阻,也意味着可以在更低环境温度下穿着该服装组合。后续实验将对穿着外套的环境温度进行调整,降低为 -10 ℃ 环境。



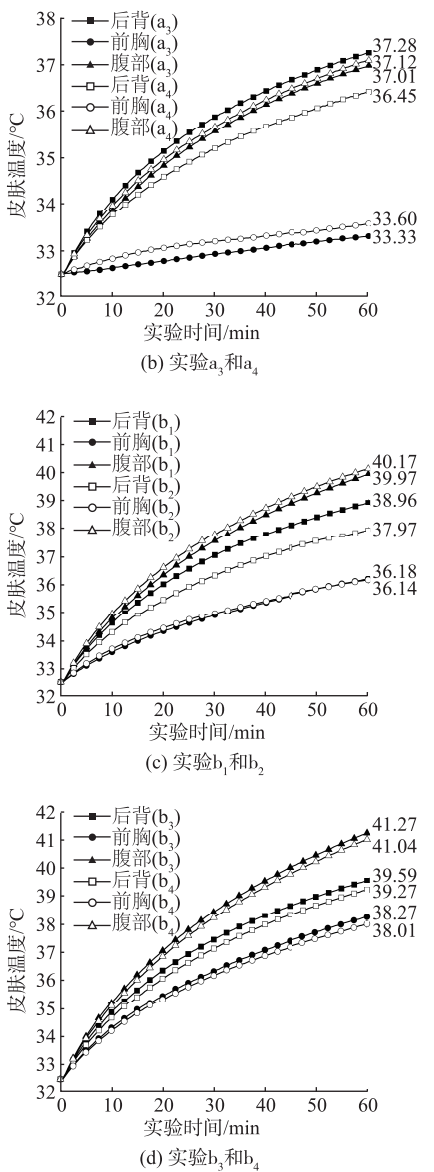


图5 不同环境温度下的局部皮肤温度变化情况

Fig.5 Local skin temperature variations at different environmental temperatures

2.2 加热片面积对调温性能的影响

通过计算可知,大片式加热片的面积比一片式加热片大36%。图6为马甲和外套采用不同面积加热片时,上身皮肤温度变化情况。由图6(a)可以看出,实验 a_1 中,上身皮肤温度先略有下降后缓慢上升,实验 a_5 的皮肤温度高于实验 a_1 ,且上升较快。加热60 min后,实验 a_1 , a_5 的上身皮肤温度分别为32.67,33.39℃,相差0.72℃。由图6(b)可以看出,实验 b_5 , b_6 的上身皮肤温度曲线十分相近,加热60 min后皮肤温度分别为34.51,34.46℃,相差0.05℃,说明加热片面积大小对马甲影响相对较大,对外套影响较小,究其原因,外套比较宽松,使得加热片与人体之间间隙较大,对加热效果的影响

较小。已有研究^[11]发现,碳纤维电加热服装发热面积占比1.2%和2%时,均无显著保暖效果,服装发热面积占比3.2%时,保暖性能较好。由此推测,文中实验设置的加热面积相差不够大,导致加热服装保暖性能差异较小。

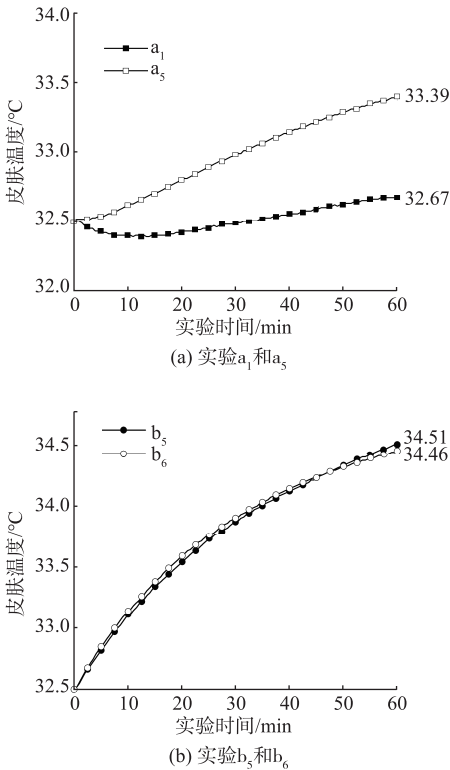


图6 不同加热面积的上身皮肤温度变化情况

Fig.6 Temperature variations of upper body skin with different heating areas

进一步分析局部皮肤温度变化情况,结果如图7所示。由图7(a)可以看出,实验 a_1 中,后背、前胸、腹部的皮肤温度分别为36.93,32.78,36.65℃,实验 a_5 中对应的皮肤温度分别为38.06,33.25,37.32℃,说明加热面积增大后,后背、腹部的皮肤温度超过了37℃,而整体上身皮肤温度以及前胸温度仍较低。因此对马甲而言,加热面积增大虽然会在一定程度上提升整体皮肤温度,但极有可能造成加热部位的局部热不适,因此可以降低加热温度或选择较小尺寸的加热片。由图7(b)可以看出,实验 b_6 与实验 b_5 相比,后背皮肤温度明显升高,前胸、腹部则升高较少,因此加热面积的适当增大可以使外套的局部温度升高,但对整体调温性能影响较小。由实验 b_5 的皮肤温度变化曲线可以看出,使用一片式加热片加热至50℃时,后背和腹部温度已大于37℃,超出人体舒适温度范围,因此可以适当降低加热温度,以达到人体热舒适状态。

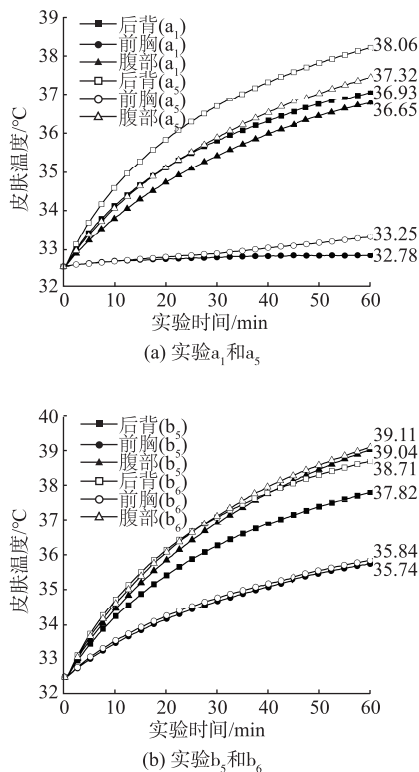


图 7 不同加热面积的局部皮肤温度变化情况

Fig. 7 Local skin temperature variations with different heating areas

2.3 加热片放置位置对调温性能的影响

图 8 为不同加热片放置位置的上身皮肤温度变化情况。由图 8 可以看出,实验 b_8 的上身温度高于实验 b_7 ,说明加热前胸时,上身整体皮肤温度较高,加热效果相对较好。

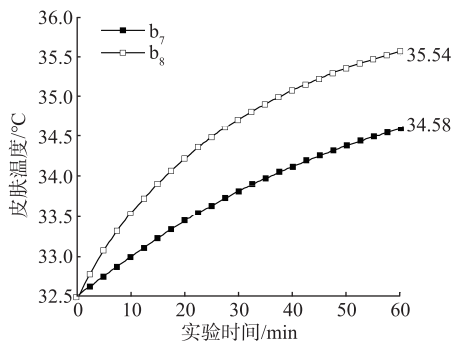


图 8 不同加热片放置位置的上身皮肤温度变化情况

Fig. 8 Temperature variations of upper body skin with different heating element positions

进一步分析两种放置方式的局部皮肤温度变化情况,结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,实验 b_8 后背、前胸、腹部的皮肤温度均高于实验 b_7 ,说明加热服装前胸比加热前腹的调温性能更好。杨玉桐^[14]在低温环境下对人体进行局部电加热实验,发现对胸、背部位进行局部热刺激时,平均皮肤温度有上升趋势,而对腹部进行热刺激时,平均皮肤温

度缓慢降低。文中实验结果与该结论相符合。

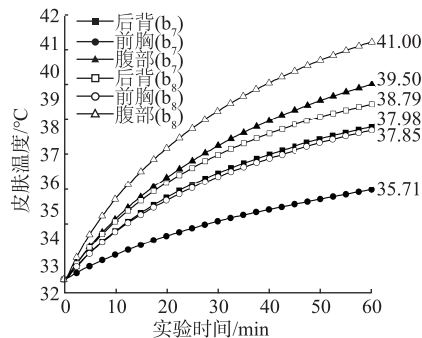


图 9 不同加热片放置位置的局部皮肤温度变化情况

Fig. 9 Local skin temperature variations with different heating element positions

3 结 语

文中对电加热马甲和外套进行假人穿着实验,分析加热方式对其调温性能的影响,得到以下结论:

1) 环境温度较低时,电加热马甲的加热效果较好;环境温度相对较高时,外套的背部加热效果不如马甲,但上躯干各部位局部温度的差异较小,说明外套的加热均匀性较好。因此在环境温度较低时,建议搭配穿着较为修身的电加热马甲;在环境温度不太低时,可以穿着电加热外套,使人体受热更均匀。

2) 加热面积变化对电加热外套的整体调温性能影响较小,对马甲的影响较大。但加热片尺寸并不是越大越好,加热面积过大可能会导致马甲加热部位的局部热不适,应根据服装款式选择合适的尺寸。

3) 就上身皮肤温度和局部皮肤温度而言,服装前胸位置的加热效果优于前腹。

综上,电加热服装的设计应综合考虑穿着环境温度、服装款式、加热片面积、放置位置等因素,且人体各部位的皮肤温度也是电加热服设计时需要参考的重要指标。

参考文献:

[1] MORRISSEY M P, ROSSI R M. Clothing systems for outdoor activities[J]. Textile Progress, 2013, 45(2/3): 145-181.

[2] 林磊,王宏付,柯莹. 电加热服的研究现状与进展[J]. 丝绸, 2022, 59(3): 68-75.

LIN Lei, WANG Hongfu, KE Ying. Research status and progress of electrically heated garments [J]. Journal of Silk, 2022, 59(3): 68-75. (in Chinese)

[3] 林磊,钱峻楠,王宏付,等. 低温环境下电加热服加热区

- 域分布对局部热舒适的影响[J]. 服装学报, 2023, 8(6): 508-512.
- LIN Lei, QIAN Junnan, WANG Hongfu, et al. Influence of the heating area distribution of electrically heated clothing on local thermal comfort in cold environments[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(6): 508-512. (in Chinese)
- [4] 陈雪, 于利静, 张昭华. 个体冷热调节服装的研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(9): 28-37.
- CHEN Xue, YU Lijing, ZHANG Zhao Hua. Review of personal cold and heat regulating clothing[J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(9): 28-37. (in Chinese)
- [5] 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.
- ZHUANG Meiling, ZHANG Xiaofeng. Heat performance evaluation of electric heating garment[J]. Journal of Qingdao University (Engineering and Technology Edition), 2004, 19(2): 54-58. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 丁波, 李健, 牛子璇, 等. 电加热服装发热元件的组合设计与评价[J]. 纺织导报, 2022(5): 93-97.
- DING Bo, LI Jian, NIU Zixuan, et al. Combination design and evaluation of heating elements for electrically heated garments[J]. China Textile Leader, 2022(5): 93-97. (in Chinese)
- [8] 卢业虎, 陈乔丹. 抗浸服性能评价方法研究进展[J]. 服装学报, 2023, 8(2): 141-148.
- LU Yehu, CHEN Qiaodan. Research progress on the performance evaluation methods of immersion suits[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(2): 141-148. (in Chinese)
- [9] SONG W F, LAI D D, WANG F M. Evaluating the cold protective performance (CPP) of an electrically heated garment (EHG) and a chemically heated garment (CHG) in cold environments[J]. Fibers and Polymers, 2015, 16(12): 2689-2697.
- [10] WANG F M, GAO C S, 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 and Environmental Hygiene, 2010, 7(9): 501-505.
- [11] 张妍. 电加热服装的服用性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017: 62-63.
- [12] PARK H, HWANG S K, 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(2): 254-264.
- [13] 吴黛唯, 李红彦, 戴艳阳, 等. 加热装置在防寒服中的位置及其热效用[J]. 纺织学报, 2020, 41(6): 118-124.
- WU Daiwei, LI Hongyan, DAI Yanyang, et al. Thermal function effectiveness and location of heating device in cold protective clothing[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(6): 118-124. (in Chinese)
- [14] 杨玉桐. 冷环境下局部电加热对人体热反应的影响[D]. 上海: 东华大学, 2021: 67-68.
- [15] 柯莹, 张海棠, 朱晓涵, 等. 电加热高空清洁作业服研制与性能评价[J]. 纺织学报, 2021, 42(8): 149-155.
- KE Ying, ZHANG Haitang, ZHU Xiaohan, et al. Development and performance evaluation of aloft cleaning working suit based on electrical heating[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(8): 149-155. (in Chinese)
- [16] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment—determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects: ISO 11079—2007[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [17] 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)

(责任编辑:沈天琦)