

文章编号: 1671-0444(2018)01-0080-07

智能发热户外防寒服装研制与性能评价

李佳怡^{1a, 2}, 卢业虎^{1a, 1b}, 叶鑫^{1a}, 李俊²

(1. 苏州大学 a. 纺织与服装工程学院;

b. 现代丝绸国家工程实验室, 江苏 苏州 215123;

2. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051)

摘要: 服装的构成方式会对其防寒性能产生影响。根据户外冷环境的防护要求, 研制了新型的多层户外防寒服套装, 包括防水外套、抓绒内胆、防寒裤, 采用智能电加热装置提高户外防寒服装的调温性能。通过暖体假人试验和真人试验分别评价防寒服装在两种状态下(加热和不加热)的保暖性能。暖体假人试验还探讨了两种风速(0.4和1.5 m/s)对户外防寒服的冷防护性能的影响, 结合真人试验表征的皮肤温度变化以及主观感受, 从而评价所研制的智能发热户外服装的防寒性能。研究结果将为优化户外防寒服的设计提供科学依据。

关键词: 防寒服装; 电加热装置; 暖体假人; 智能发热; 热阻

中图分类号: TS 941.73

文献标志码: A

Performance Evaluation of Outdoor Cold Protective Clothing with Smart Heating Function

LI Jiayi^{1a, 2}, LU Yehu^{1a, 1b}, YE Xin^{1a}, LI Jun²

(a. College of Textile and Clothing Engineering;

b. National Engineering Laboratory for Modern Silk, 1. Soochow University, Suzhou 215123, China;

2. Fashion and Art Design Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The composition of clothing can affect its thermal performance. According to the requirements of protection against the outdoor cold environment, a piece of novel multi-layer cold protective clothing was developed, including waterproof jacket, fleece and pants. Meanwhile, a smart electrical heating element was applied to improve the thermal performance of cold protective clothing. Evaluations of the thermal properties of clothing were performed by thermal manikin tests in constant temperature mode and human trial tests under two conditions (heating and non-heating). The effects of two wind speeds (0.4 and 1.5 m/s) on the protective performance of cold protective clothing were also discussed. The cold protective performance of the developed smart heating outdoor clothing was assessed by the changes in skin temperature and psychological perception as well. The research findings will provide technical basis and guideline for the design and optimization of cold protective clothing in cold environments.

Key words: cold protective clothing; electrical heating element; thermal manikin; smart heating; thermal insulation

长期处于寒冷环境会对人体造成危害, 低温会导致人体皮肤温度下降、冻伤、生理机能减弱等, 从

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51506137); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20161255); 丝绸工程省级重点实验室开放研究课题资助项目(KJS1414); 江苏省先进纺织工程技术中心开放课题资助项目(XJFZ-2016-5)

作者简介: 李佳怡(1993—), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 研究方向为功能服装舒适性, E-mail: 1051355162@qq.com

卢业虎(联系人), 男, 副教授, E-mail: yhlu@suda.edu.cn

而引发相关疾病,甚至死亡^[1]。为了抵御严寒,人们通常会穿上各类防寒服。

目前出现的防寒服装大体上归为两大类,即主动产热式防寒服和被动隔热式防寒服^[2]。日常生活中最常见的还是被动隔热式防寒服,它主要通过调节服装内部空气层的含量,阻止人体热量向外散发来达到保暖的目的。此类服装一般具有多层结构,其防寒性能很大程度上取决于服装内部静止空气层的含量,主要与服装面料的厚度、重量和层数等有关^[3-4]。然而,服装的总热阻是有上限的,即 4~5 clo,过多地增加面料的厚度和服装层数,并不会增加服装的保暖性^[5]。使用新型保暖纤维材料,虽可以减轻服装的厚重感,但是仍然采用被动防寒技术,服装一旦制作后,其防寒保暖效果就相对固定了,不能动态调节,其使用范围较小。主动产热服是通过外加产热装置,对人体主动加热起到保暖的效果^[6]。然而,一些新型的发热调节纤维材料,例如相变材料,可以提高服装的保暖效果,但有效制热时间较短,需要按时更换相变材料袋以保证持续的制热功能,这在户外显得极为不便^[7-8]。电加热服装也是主动产热服中的一种,通过向成衣植入加热元件来达到制热目的。采用加热装置可以提供动态可调节的保暖功能,有效地降低服装的厚度,提高动作灵活性。但是,目前的加热装置缺乏加热控制系统,加热效率与舒适性问题也没有得到解决,容易导致某些部位因过热而出汗,产生不适感,而且因能源浪费而降低电池的使用时间,很难保证长时间的户外穿着使用。

本研究设计了一种具有智能温控装置的新型防寒服,通过恒温模式下的暖体假人试验和真人试验分别评价所研制的智能发热户外服装的防寒作用,从而为寒冷环境下使用的防寒服的优化设计提供科学依据。

1 防寒服的研发

1.1 外套

1.1.1 款式设计

防寒服装外套款式如图 1 所示。防寒服外套整体设计类似于冲锋衣外套,头部有可拆卸的防风帽;袖口魔术贴设计,可调节袖口松紧;特殊之处在于里侧侧缝处缝有扣袢,可与内胆侧缝的纽扣连接,使两件服装成为一体,也可以根据使用环境单独穿着。

1.1.2 结构设计

外套由 3 层面料组成:最外层采用防风、防水、

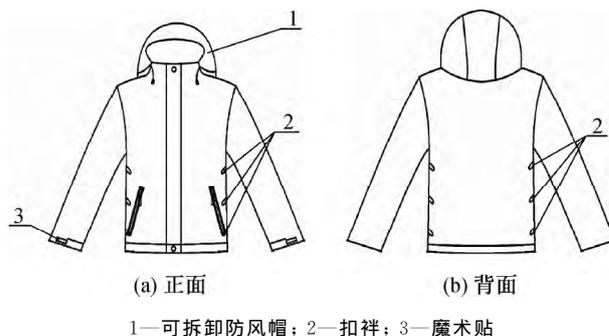


图 1 防寒服装外套款式图

Fig. 1 The style of cold-proof jacket

透气面料;中间层为轻薄丝棉絮片;最里层为 Omni-Heat 银色超薄热能反射层,布满微细圆点,通过反射作用将热能传至人体皮肤表面。

1.2 内胆

1.2.1 款式设计

防寒服装内胆款式如图 2 所示。内胆正面两侧各有两个带拉链的口袋,两口袋分别内置温控器和电池,以便能够根据体表温度来控制加热装置;下摆处以拉链连接面料和里料,方便拆洗并且可以随时检查连线状态并更换加热片;在内胆侧缝处缝有纽扣,可与外套内侧缝处的扣袢连接。

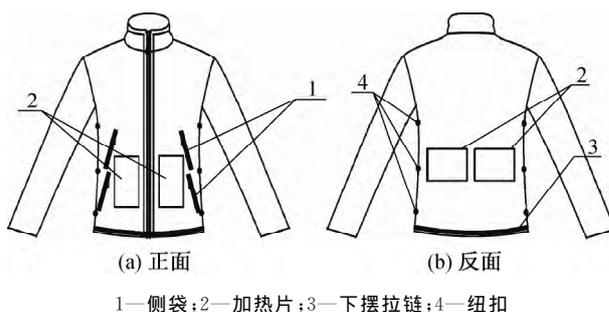


图 2 防寒服装内胆款式图

Fig. 2 The style of cold-proof fleece

发热装置包括加热片、蓄电池、连接加热片和蓄电池的导线、与加热片相连的温控装置、与温控装置相连的温度传感器。温控装置可以根据温度传感器检测的服装微环境的温度来调节加热片的工作方式,根据所设定的温度区间(30~35℃)自动启动或关闭加热片的加热,保持微环境中温度的相对稳定,防止升温过快,身体过热出汗,从而解决加热效率和人体舒适性问题。同时,综合考虑多个因素对防寒服保暖性的影响:(1)服装与人体之间衣下空气层厚度对服装热传递的影响,衣下空气层越厚服装越保暖;但当厚度达到一定程度,受到自然对流的影响,服装保暖性会下降;(2)冷感受器分布密集的部位易

产生冷感;(3)人体腰部、腹部对冷感觉的敏感程度较强^[9],采用在衣服的局部加热的方式(腹部和后腰),确保人体的舒适性,防止因加热位置不当而导致局部过热出汗等问题。加热片的尺寸为15 cm×20 cm,采用电加热丝加热布。腹部的加热片分别距门襟和下摆3和12 cm,后腰部位的加热片分别距离后中心线和下摆1和17 cm。蓄电池的电容量为4 500 mA·h,电压为7.4 V,质量约为230 g。内胆内部侧缝处设有拉袂,用于固定导线。

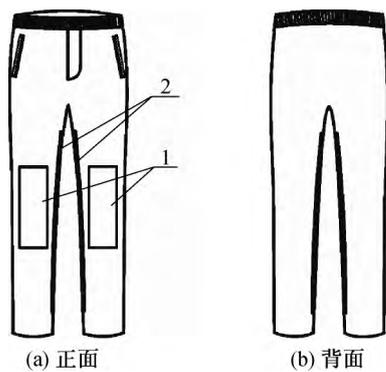
1.2.2 结构设计

内胆也由3层结构组成:最外层采用摇粒绒;中间层的特定位置通过魔术贴固定加热片,由于人体腹部及后腰部位最容易产生冷感,因此在腹部和腰部分别放置两片加热片;最里层为普通里料。

1.3 裤子

1.3.1 款式设计

防寒裤款式如图3所示。裤子的腰部采用松紧带的设计,两侧各有一个斜插口袋,分别放置温控器和电池。裤子里层内侧缝从膝盖向下6 cm处到裆下位置采用拉链的设计,便于连接导线并更换加热片。



1—加热片;2—拉链

图3 防寒裤款式图

Fig. 3 The style of cold-proof pants

1.3.2 结构设计

裤子的结构分为4层:最外层采用防风、防水、透气面料;第2层为丝棉絮片;第3层为加热片,由于人体膝盖部位容易产生冷感^[8],因此在两侧膝盖部位各放置一片加热片;最里层为里料。

2 试验

2.1 暖体假人试验

按照ISO 15831—2004,使用Newton出汗暖体假人在恒定皮肤温度模式($t_{\text{manikin}} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,测量

服装在不加热和加热两种状态下的热阻。空气温度为 $(-2.0 \pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度(RH)为 $(70 \pm 10)\%$,风速分别为 (0.4 ± 0.1) 和 $(1.5 \pm 0.3)\text{ m/s}$ 。假人上身里面穿着纯棉长袖保暖内衣,中间穿着制作的防寒内胆,外面穿着制作的防寒外套,下身里面穿着纯棉秋裤,外面穿着制作的防寒裤,脚部穿厚棉袜和运动鞋,头戴防风帽,手戴手套进行试验。每种服装热阻至少测量3次。

2.2 真人试验

试验共选定了6名志愿者($S_1 \sim S_6$)参加试验。6人平均年龄为23岁,平均身高为162 cm,平均体重为55 kg,平均体质指数(BMI)为21。每位志愿者需做两次试验(防寒服加热和不加热),且两次试验至少间隔一天,以排除受试者对冷环境适应性的影响。

试验前,要求志愿者处于常温环境下,在身体的10个部位(额头、胸部、腹部、上臂、前臂、手、大腿、小腿、后背、腰部)贴好温度传感器(精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,MSR145型),静坐30 min达到正常体温并保持稳定。之后受试者穿着设计制作的防寒服,头戴防风帽,手戴手套,脚穿棉袜和棉鞋进入气候室保持静坐状态,持续60 min。气候室空气温度为 $(-4.0 \pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度(RH)为 $(70 \pm 10)\%$,风速为 $(0.2 \pm 0.1)\text{ m/s}$ 。

根据式(1),采用八点法^[10]计算出每个人的平均皮肤温度(t_m);根据式(2)和(3)计算出每个人的上身温度 $t_{\text{upper torso}}$ 和下身温度 $t_{\text{lower body}}$ 。

$$t_m = 0.07(t_{\text{forehead}} + t_{\text{upperarm}} + t_{\text{forearm}}) + 0.175(t_{\text{chest}} + t_{\text{scapula}}) + 0.05t_{\text{hand}} + 0.19t_{\text{thigh}} + 0.20t_{\text{calf}} \quad (1)$$

$$t_{\text{upper torso}} = \left\{ t_{\text{chest}} + t_{\text{scapula}} + t_{\text{paravertebral}} + t_{\text{abdomen}} \right\} / 4 \quad (2)$$

$$t_{\text{lower body}} = (t_{\text{thigh}} + t_{\text{calf}}) / 2 \quad (3)$$

式中: t_{forehead} 为前额温度; t_{upperarm} 为上臂温度; t_{forearm} 为前臂温度; t_{chest} 为胸部温度; t_{scapula} 为后背温度; t_{hand} 为手部温度; t_{thigh} 为大腿温度; t_{calf} 为小腿温度; $t_{\text{paravertebral}}$ 为后腰温度; t_{abdomen} 为腹部温度。

2.3 主观评价

主观评价包括热感觉和舒适感两方面,并分为全身、上身和下身。在进行真人试验的60 min内,每隔10 min向受试者询问当下的热感觉和舒适感,从而获得着装者穿着两种服装(加热和不加热)的主

观感受。将热感觉分为 9 个等级(-4 非常冷、-3 冷、-2 凉、-1 有点凉、0 中等、1 有点暖、2 暖、3 热、4 非常热),舒适感分为 4 个等级(-3 非常不舒服、-2 不舒服、-1 稍微不舒服、0 舒服)^[11-12]。

2.4 统计分析

利用 SPSS V20.0 对试验数据进行统计分析。采用 ANOVA 方差检验比较加热和不加热两种情形下,服装整体和局部热阻、皮肤温度、主观评价等指标。显著性水平 p 设定为 0.05,标记为“*”。

3 结果与讨论

3.1 服装热阻

3.1.1 总热阻

不同情况下的防寒服总热阻如图 4 所示。在风速为 0.4 m/s 时,加热后服装总热阻明显大于不加热的热阻($p=0$);在风速为 1.5 m/s 时,加热后的总热阻略大于不加热的热阻,但没有显著性差异($p=0.084$)。整体而言,风速为 0.4 m/s 时服装的总热阻明显大于风速为 1.5 m/s 时的总热阻($p=0$)。

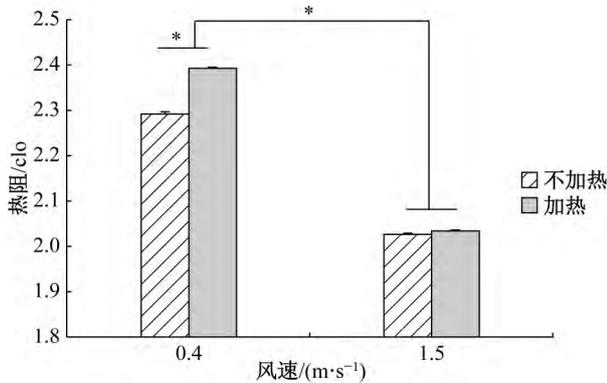


图 4 不同情况下的服装总热阻
Fig. 4 Total thermal insulation in different scenarios

3.1.2 腹部和腰部热阻

腹部和腰部热阻比较结果如图 5 所示。在风速为 0.4 m/s 时,加热后服装腹部热阻比不加热的热阻大 6.2%,具有显著性差异($p=0.033$),腰部热阻比不加热的热阻大 10.0%,具有显著性差异($p=0.022$);在风速为 1.5 m/s 时,加热后服装腹部和腰部热阻都略大于不加热的热阻,但不存在显著性差异(腹部 $p=0.331$,腰部 $p=0.590$)。整体上看,风速为 0.4 m/s 时的腹部和腰部热阻都远大于风速为 1.5 m/s 时的热阻($p=0$)。

3.1.3 上身和下身热阻

上身和下身热阻比较结果如图 6 所示。在风速为 0.4 m/s 时,加热后的上身热阻比不加热大

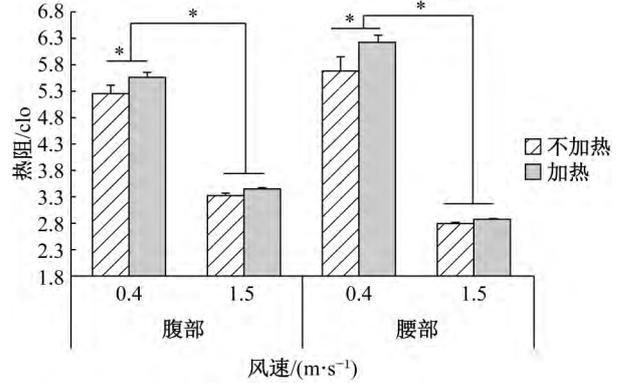


图 5 腹部和腰部热阻比较
Fig. 5 Comparison of thermal insulation between abdomen and waist

12.9%,明显大于不加热的热阻($p=0.001$),加热后的下身热阻比不加热时大 6.19%,具有显著性差异($p=0.001$);在风速为 1.5 m/s 时,加热后的上身和下身热阻都略大于不加热的热阻,但差别不大(上身 $p=0.237$,下身 $p=0.105$)。整体而言,风速为 0.4 m/s 时的上身和下身热阻都远大于风速为 1.5 m/s 时的热阻($p=0$)。

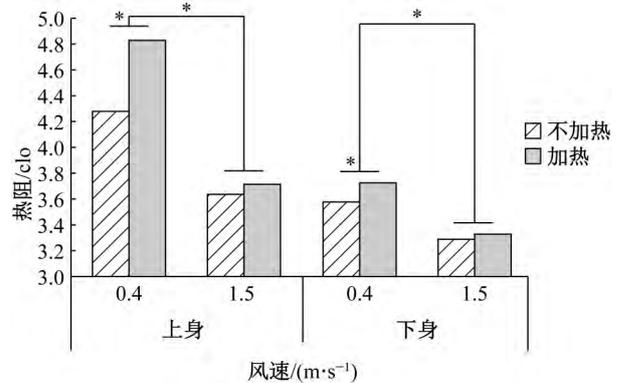


图 6 上身和下身热阻比较
Fig. 6 Comparison of thermal insulation between upper body and lower body

3.2 真人试验

3.2.1 平均皮肤温度

加热和不加热两种情形下平均皮肤温度随时间的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,无论加热还是不加热,人体平均皮肤温度随着时间增加而逐渐下降。在不加热条件下,1 h 内人体平均皮肤温度下降了 2.3 °C;而在加热状态下,1 h 内人体平均皮肤温度下降了 1.8 °C。显然在加热状态下人体能够更好地维持自身温度。从显著性差异水平上看,从 35 min 开始,加热和不加热两种条件下平均皮肤温度出现显著性差异($p < 0.05$)。

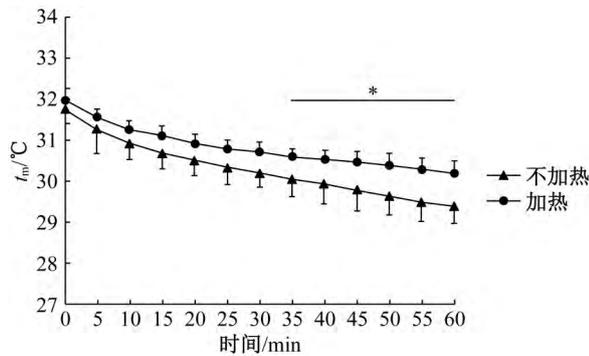


图 7 平均皮肤温度-时间变化曲线
Fig. 7 Mean skin temperature-time curve

3.2.2 腹部和腰部温度

腹部和腰部温度随时间的变化如图 8 所示。在试验过程中无论加热还是不加热,腹部温度随着时间增加而缓慢上升,腰部温度随时间增加而逐渐下降。在不加热条件下,1 h 内人体腹部温度上升了 0.9°C ,腰部温度下降了 1.4°C ;而在加热状态下,1 h 内人体腹部温度上升了 1.1°C ,腰部温度下降了 0.8°C 。显然在加热状态下人体能够更好地维持自身温度。从显著性差异水平来看,腹部和腰部温度分别从 30 和 25 min 开始直到试验结束,加热和不加热两种条件始终存在显著性差异。

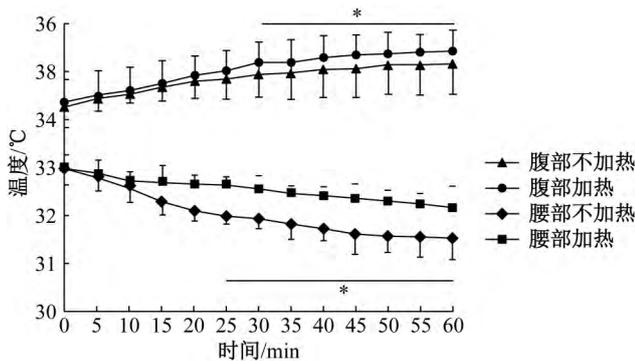


图 8 腹部和腰部温度-时间比较

Fig. 8 Skin temperature-time curves between abdomen and waist

3.2.3 上身温度和下身温度

上身皮肤温度和下身皮肤温度随时间的变化曲线如图 9 所示。在试验过程中无论加热还是不加热,二者均随着时间增长而缓慢下降。在不加热条件下,1 h 内人体上身温度下降了 2.2°C ,下身温度下降了 3.5°C ;而在加热状态下,1 h 内人体上身温度下降了 1.3°C ,下身温度下降了 2.7°C 。显然在加热状态下人体能够更好地维持自身温度。从显著性差异水平来看,两者分别从 30 和 35 min 开始,加热和不加热两条件始终存在显著性差异。

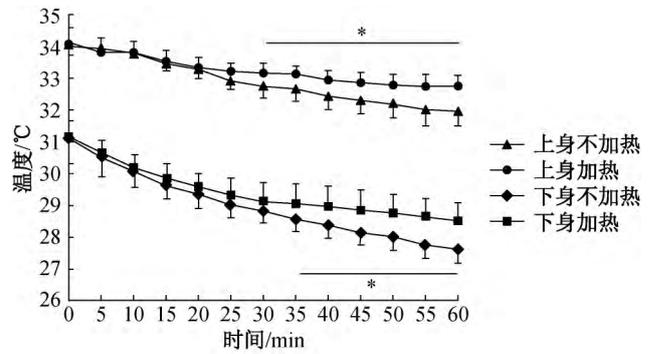
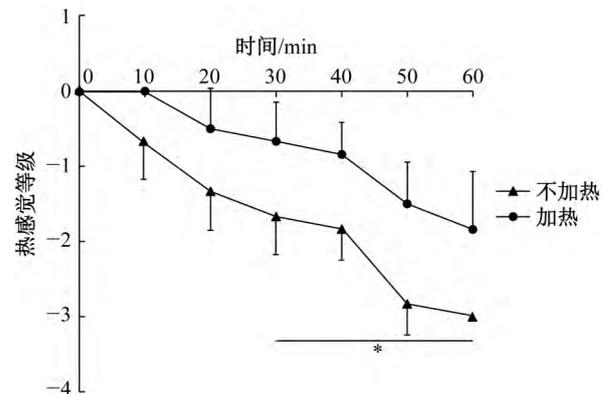


图 9 上身和下身温度-时间变化曲线
Fig. 9 Skin temperature-time curves between upper body and lower body

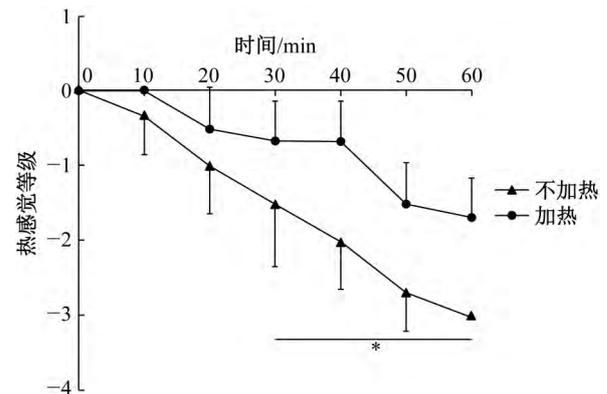
3.3 主观评价

3.3.1 热感觉

全身、上身和下身的热感觉变化结果如图 10 所示。随着时间的增加,在加热和不加热两种状态下人体的全身、上身和下身热感觉均会下降,即感觉越来越冷。在不加热条件下,着装者的全身、上身和下身热感觉等级从进入实验室就开始下降,并且全身和上身最终达到冷的状态,下身达到接近冷的状态;而在加热条件下,全身和上身热感觉等级均是从试验开始 10 min 后开始下降,最终达到凉或有点凉的状态。



(a) 全身



(b) 上身

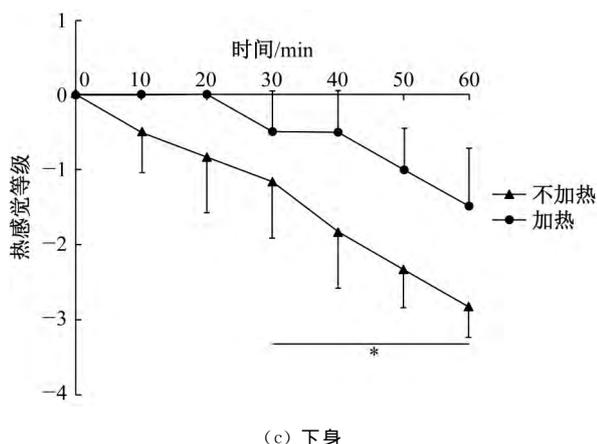


图 10 热感觉等级变化

Fig. 10 The change of thermal sensation grade

状态,而下身热感觉等级是从试验开始 20 min 后才开始下降,最终达到有点凉或凉的状态。全身、上身和下身都是从 30 min 开始,加热和不加热两种条件出现显著性差异。

3.3.2 热舒适度

全身、上身和下身的热舒适度变化结果如图 11 所示。随着时间的变化,在加热和不加热两种状态下人体全身、上身和下身的热舒适度均会下降,即感觉越来越不舒服。在不加热条件下,着装者全身和

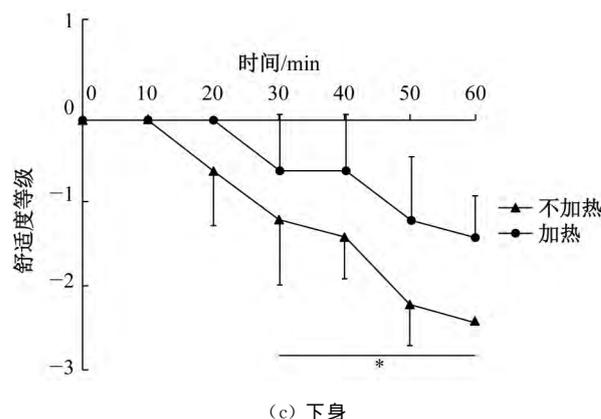


图 11 舒适度变化

Fig. 11 The change of thermal comfort

上身的舒适度从进入实验室就开始下降,并且全身热舒适度最终接近非常不舒服的状态,上身接近不舒服的状态,下身的热舒适度从进入实验室后 10 min 开始下降并最终达到不舒服的状态;而在加热条件下,着装者全身和上身的热舒适度均是从试验开始 10 min 后开始下降,最终分别达到接近不舒服和稍微不舒服的状态,下身的热舒适度是从试验开始 20 min 后开始下降,最终达到稍微不舒服的状态。

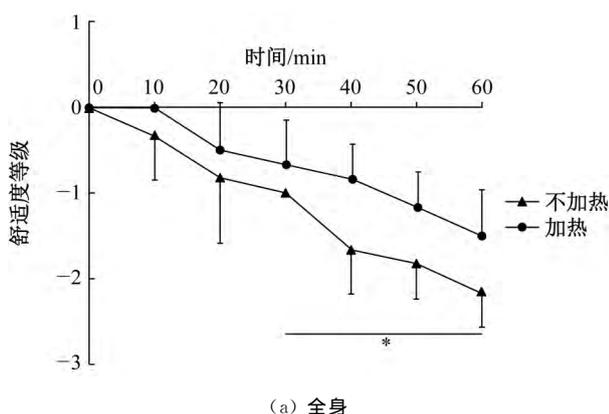
全身、上身和下身热舒适度分别从第 30、20 和 30 min 开始在加热和不加热条件下出现显著性差异。

综上所述,不论加热还是不加热,在寒冷环境中,人体的热感觉和热舒适度均呈下降趋势,但加热状态下,下降的起点明显晚于不加热状态时的起点,并且下降得比较缓慢。总体而言,比起不加热状态,加热时人体会感觉更暖且更加舒服。

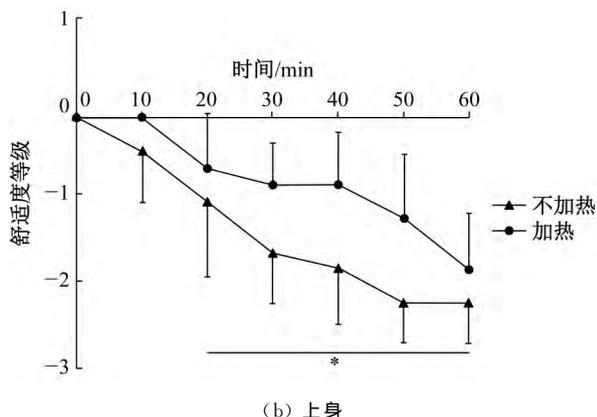
3.4 结果讨论

3.4.1 服装热阻

服装全身、腹部及腰部的热阻在加热状态时都明显大于不加热时的热阻,说明加热可有效减少人体向周围环境散失热量。首先,在各类试验条件下,上身热阻均大于下身热阻,主要原因是上身服装多一层抓绒内胆,相对下身较厚。其次,服装加热时对上身的影晌比下身大,这可能与加热片的数量和面积有关,上身加热片的覆盖率要高于下身。此外,风速会影响服装热阻。同一位置,风速为 0.4 m/s 时的热阻整体大于风速为 1.5 m/s 时的热阻。在风速为 0.4 m/s 时,加热的热阻显著大于不加热时的热阻;而在风速为 1.5 m/s 时,加热和不加热时的服装热阻几乎没有差异。在高速条件下,增强的对流散热增加了向周围环境的散热量,服装热阻显著下



(a) 全身



(b) 上身

降,因而减弱了高风速下加热与不加热的热阻之间的差异。这与 Song 等^[8]的研究结果一致。

3.4.2 皮肤温度

全身、腰部、上身以及下身的皮肤温度都随着时间逐渐下降,并且在加热时下降的温度少于不加热时下降的量。这说明加热状态下,服装能够更好地维持身体的温度。在加热条件下,服装具有较大的热阻,使人体保持较高的温度,这在上述暖体假人试验中已得到了证明。而腹部的差异相对较小,这可能是由于服装较宽松,且试验者均以坐姿进行试验,致使加热片距离腹部较远,加热效率不高。从试验结果来看,腹部皮肤温度略有上升,可能是因为人体处于坐姿,服装堆积在腹部,增加了服装的厚度,热阻增加,保暖性提高了。在实际状况下,服装的防寒性能只有进一步通过真人试验进行实地评价,才能获得更好的效果。

3.4.3 主观感受

人体的热感觉和舒适度均随着时间逐渐下降,并且在加热条件下下降的起点较晚且降得比较缓慢。这与皮肤温度随时间逐渐下降且加热状态下下降量较少的结果相符合,证实本试验结果的可靠性。在加热条件下,服装的热阻较高,因而保暖性更好,人体的热感觉和舒适度指标也较高。尽管在试验环境下($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$),考察加热与不加热两种情况时,人体的主观感受均会下降,但在加热条件下,人体会感觉有些凉或稍微不舒服,而在不加热条件下,人体会觉得冷或不舒服。这也在一定程度上反映了新研制的服装可以提高着装者的穿着舒适性,至于新研制的防寒服装适用的穿着环境可能需要进一步的试验加以验证。

4 结 语

本研究采用电加热片、智能温控装置和 Omni-Heat 银色超薄热能反射层,设计并制作了一款户外防寒服装,并通过恒温模式下的暖体假人试验和真人试验,分别从客观和主观角度评价服装在加热和不加热两种状态下的保暖性能,得到的结论如下:

(1) 在风速为 0.4 m/s 时,防寒服加热时的热阻要明显大于不加热时的热阻;在风速为 1.5 m/s 时,防寒服的热阻几乎不受电加热片的影响,即加热或不加热,服装热阻几乎不变;在风速为 0.4 m/s 时,防寒服装的热阻显著大于风速为 1.5 m/s 时的热阻。

(2) 防寒服在加热时的人体平均皮肤温度高于不加热时的平均皮肤温度,并且在放置加热片的部位,加热时的温度高于不加热时的温度。

(3) 在寒冷环境中,人体的热感觉和舒适度均呈下降趋势,但加热状态下,下降的起始点明显晚于不加热状态时的起点,并且下降得比较缓慢。

(4) 比起不加热状态,加热后的服装总体的保暖性能更好,且更加舒适。

参 考 文 献

- [1] 佟玫,陈立丽,王博,等. 人体温度的调节及冬季防寒服装穿着分析[J]. 中国个体防护装备, 2014(1): 13-15.
- [2] 苏婧劼,崔鹏,王府梅,等. 不同气温下防寒服保暖材料的规格确定[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2012, 38(2): 175-180.
- [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(2/3): 145-181.
- [5] WILLIAMS J T. Textiles for cold weather apparel [M]. UK: Woodhead Publishing Limited, 2009: 329-341.
- [6] 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.
- [7] LU Y, WEI F, LAI D, et al. A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: An investigation on its cooling efficiency [J]. Journal of Thermal Biology, 2015, 52: 137-146.
- [8] SONG W, LAI D, WANG F. Evaluating the cold protective performance (CPP) of an electrically heated garment (EHG) and a chemically heated garment (CHG) in cold environments [J]. Fiber and Polymers, 2015, 16(12): 2689-2697.
- [9] 李俊,王云仪,张渭源. 人体着装部位间皮肤冷感受之差异性研究——冷感受性敏感秩位的配对比较分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(6): 12-16.
- [10] ISO 10551—2001. Ergonomics of thermal environment—assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales [S]. Geneva: International Standardization Organization, 2001.
- [11] WANG F, GAO C. Protective clothing: Managing thermal stress [M]. UK: Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [12] 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, 94(2/3): 704-713.

(责任编辑:杜 佳)