

冷却服的冷却性能测试与分析

李利娜¹, 钱晓明¹, 范金土²

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300160 ; 2. 香港理工大学 纺织服装系, 香港九龙)

摘要: 为了评价不同类型冷却服的冷却性能, 采用可行走出汗暖体假人“华特”对3件不同类型的冷却背心进行冷却性能测试。3件冷却背心均不同程度地降低了暖体假人的皮肤温度, 液态相变材料冷却背心使假人的皮肤温度下降最多, 致冷时间最长。而微胶囊相变材料冷却背心使假人的皮肤温度下降最少, 致冷时间最短。液体冷却背心的致冷作用则介于二者之间。实验证明3种冷却背心均有明显的致冷效果, 但是在穿着舒适性方面它们都存在一定的不足。

关键词: 冷却服; 热防护; 暖体假人; 测试

中图分类号: TS941.7313 ; TS941.17 文献标识码: A 文章编号: 1671-024X(2008)05-0047-04

Test and analysis of cooling performance of cooling garments

LI Li-na¹, QIAN Xiao-ming¹, FAN Jin-tu²

(1. School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. Institute of Textiles and clothing, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: To evaluate the cooling performance of different types of cooling garments, three different cooling garments are tested by using movable sweating thermal manikin “Walter” in temperature cabin. The test results indicate that all of the three cooling garments evidently lower the skin temperature of the thermal manikin. The liquid phase change material cooling garment took away the most heat, and its cooling time is the longest. The microcapsule phase change material cooling garment took away the less heat, and its cooling time is the shortest. The cooling performance of the liquid cooling garment is middling. In conclusion, although all of the three cooling garments evidently removed the heat from the thermal manikin, there are some disadvantages on comfort.

Key words: cooling garment; thermal protective; thermal manikin; test

在高温环境中或穿着透气性差的防护服进行作业时, 严重的热应激会使人们的工作效率降低, 容易出现中暑、热衰竭等症状, 重者会导致热痉挛、热射病等职业病的发生。为了增加人们在高温环境下的工作时间和工作效率, 避免由于过大的热应激、热负荷对人体造成热伤害, 人们通过各种途径来维护自身的安全。理论上主要有两种途径: 一是增加人体的散热, 二是减少输入人体的热量。当外界环境温度不高于 39℃ 时, 人体的热调节系统通过增加人体的散热量来维持体温的相对稳定 (36.5~37℃); 当外界环境温度超过 39℃ 时, 仅依靠人体自身的热调节系统已不足以维持体温的相对稳定, 因此在这种情况下必须减少输入人

体的热量才能维护自身的安全^[1]。常用的办法是降低周围环境温度, 如采用空调致冷。但是在一些特殊情况下, 如穿着密闭性防护服、直升飞机的驾驶室、工业炉窑检修、炼钢地坑清渣、烈日下的交通岗等, 控制人体周围环境温度很难实现或费用昂贵, 不适合采用这种方式, 这样就需要对个体进行降温, 而冷却服就是帮助人们解决高温问题的有效途径之一。根据冷却介质的不同, 冷却服可以分为气体冷却服、液体冷却服和相变冷却服。气体冷却服^[2](circulating air cooling garment)的冷却介质是压缩空气, 主要由基础服装、空气压缩机、通风管等组成。液体冷却服^[3](liquid cooling garment)的冷却介质主要有水、冰水混合物、水与乙烯

基乙二醇组成的低于零度的冷冻液等. 相变冷却服^[4] (phase change cooling garment) 根据冷却介质的不同, 可分为冰冷却服、干冰冷却服、凝胶冷却服、相变材料冷却服、微胶囊相变材料冷却服等. 现在冷却服早已成为市场上较为流行的工业防护用品, 如国外著名的 Game Ready 冷却服 (美)、Steele 冷却服 (美)、Allegro 冷却背心 (美) 等, 国内也有广顺合系列降温背心、开普尔冷却背心、Chumkit 系列冷却服等产品. 冷却服主要用于在高温环境中或穿着与外界隔绝的防护服时防护人体过热或增强人体的热舒适性. 穿着冷却服可以强制加大人体的散热, 降低人体的热负荷、中心温度、皮肤温度, 心率和出汗量, 减小需水量, 提高大脑清醒度, 增加人们在热环境中的工作时间. 目前, 冷却服已经在航空、航海、野战、生化、消防、交通、冶金、采矿、核工业、体育和医疗等领域得到了广泛的应用. 值得一提的是, 冷却服在医疗领域的应用越来越受到人们的关注, 它主要是用来辅助治疗某些疾病, 如多发性神经硬化症 (MS)^[5]、先天性无汗综合征 (HED) 等的治疗. 对于炎热的夏季来说, 它还是一种有效的防暑降温产品. 因此, 冷却服具有重要的社会意义和推广应用价值.

1 测试装置

可行走出汗暖体假人“华特”是用来测试服装的隔热性能和透湿性能的仪器. 整个测试仪器由硬件和软件两部分组成, 硬件包括可行走出汗暖体假人 (外观如图 1 所示)、电子称、连杆传动机构、稳压电源、PID 控制组件等. 软件部分即暖体假人测试系统, 其界面如图 2 所示.

“华特”的原理^[6]是用 Gore-Tex 防水透湿织物缝制成标准男性人体形状后, 将整个水循环系统包含其中. 水循环系统模拟人体的血液循环系统, 它把躯干中心区域加热的水按一定比例分配给头和四肢, 模拟人体的整个温度分布. “华特”的皮肤是一种含有微孔结构的 PTFE 薄膜织物, 它允许水汽分子通过而不会让液态水流出, 从而可以模拟人体皮肤出汗. 它的皮肤可以通过其背后的拉链脱卸, 更换其他布质皮肤, 以模拟不同的出汗状态. 其四肢还可以模拟人体的步行状态^[7]. 需要指出的是, 暖体假人“华特”是在不做任何假设的前提下同时测得服装的热阻和湿阻值, 这是其他暖体假人无法比拟的优势. “华特”的出汗方式采用被动式, 其出汗量随服装透湿性的不同而自动改变, 在保持一定水位的情况下, 暖体假人的出汗量等于定时



图 1 “华特”的外观
Fig.1 View of “Walter”

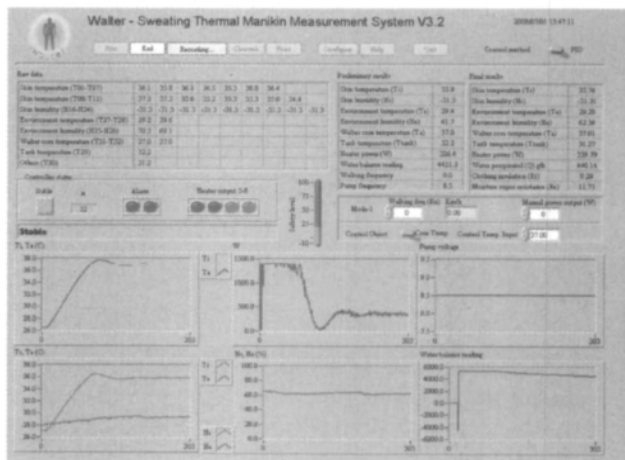


图 2 出汗暖体假人测试系统界面
Fig.2 Walter-sweating thermal manikin measurement system

向假人体内补充的水量, 这部分水量是可以直接测量的. 这样, 服装的热阻就可以根据式(1)、式(2)计算.

$$H_e = \lambda \cdot Q \tag{1}$$

$$R_t = \frac{A_s(\bar{T}_s - T_a)}{H_s + H_p - H_e} \tag{2}$$

式中 H_e 是暖体假人的蒸发散热量 (W); λ 是水的汽化热 (35 °C 时 $\lambda=0.672 \text{ W} \cdot \text{h/g}$); Q 是暖体假人的蒸发出汗量 (h/g); R_t 是服装及其附面空气层的热阻 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$); A_s 是暖体假人的体表总面积 ($A_s=1.79 \text{ m}^2$); \bar{T}_s 是暖体假人的平均皮肤温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_a 是环境温度 ($^{\circ}\text{C}$); H_s 是加热棒供给的热量 (W); H_p 是水泵产生的热量 ($H_p=24.0 \text{ W}$).

在计算服装的湿阻时,把可以皮肤当作服装的一层,因为皮肤内侧与体内的水直接相接触,则皮肤内表面的水汽相对湿度一定为 100%,使用皮肤内侧的水汽压计算总湿阻,然后减去假人皮肤的湿阻即为服装与其附面空气层的湿阻.假人皮肤的湿阻可以通过在强风时测量裸体暖体假人的湿阻得到,因为风速很高时,表面空气层湿阻很小.服装的湿阻可以根据式(3)计算:

$$R_{cl} = \frac{A_s(P_s^* - RH_a P_a^*)}{H_e} - R_{cs} \quad (3)$$

式中, P_s^* 是皮肤温度下暖体假人皮肤表面的饱和水蒸汽的压强(Pa); RH_a 是环境相对湿度(%); P_a^* 是环境温度下,周围环境的饱和水蒸汽的压强(Pa); R_{cs} 是暖体假人皮肤的湿阻($R_{cs} = 8.6 \text{ m}^2\text{Pa/W}$).

2 冷却背心性能测试方法

本实验对 3 件不同类型的冷却背心进行了冷却性能测试,即液态相变材料冷却背心、微胶囊相变材料冷却背心和液体冷却背心,以下依次简称为试样 1、试样 2 和试样 3.

本实验在恒温室内进行,室内空气温度为 35 ± 0.5 °C,相对湿度为 $40 \pm 5\%$,空气流速为 $0.4 \pm 0.1\%$.在测试前,需要将试样 1 和试样 2 置于冰箱内进行蓄冷处理 12 h,前者处理温度要求为 -30 °C 左右,后者为 3.5 °C 左右.

具体操作为:先给暖体假人依次穿上 T 恤(100%棉)、短裤(100%棉)、阻燃外套(100%NOMEX IIIA)和阻燃长裤(100%NOMEX IIIA).当暖体假人的核心温度达到 37 ± 0.5 °C 时,测试系统开始自动记录数据,每 30 s 记录一次.待 12 h 暖体假人的皮肤以及外部着装的含湿量稳定后,开始对试样 1 进行测试.计算此时暖体假人的平均输入功率 \bar{P} ,记录假人皮肤以及外部着装的总湿阻 R'_{cl} .然后迅速脱下暖体假人身上的外套和长裤,给假人穿上试样 1,然后再穿上阻燃外套和长裤.观察暖体假人测试系统界面,当暖体假人的皮肤温度由初始的 35 °C 下降到一定温度,到再次上升至 35 °C 时,试样 1 的冷却作用即告结束.记录总湿阻 R''_{cl} .试样 2 和试样 3 的测试重复上述过程,每个试样均测试 3 次.

当暖体假人没有穿着冷却背心时,假人的核心温度为 37 ± 0.5 °C,皮肤各点处的温度为 35 °C 左右;当它穿着冷却背心时,由于冷却背心的降温作用,假人的核心温度以及皮肤各点处的温度都会有不同程度地

下降.核心温度及皮肤温度的变化会直接影响到暖体假人输入功率的大小,为了使假人的核心温度维持在 37 ± 0.5 °C,温度下降,输入功率会自动增加.皮肤温度下降的幅度越大,持续时间越长,输入功率越大,说明冷却背心的致冷量越大.

3 测试结果与分析

图 3 中(a)、(b)、(c)分别是试样 1、试样 2、试样 3 在有效工作时间内暖体假人的皮肤温度随时间的变化关系图.图中的 T_{02} 、 T_{03} 、 T_{04} 、 T_{05} 分别指暖体假人前胸、后背、前腹和后腰处的皮肤温度.由图 4 可知,试样 1、2、3 在开始的一段时间内皮肤温度均由 35 °C 分别迅速下降到最低点,到最低点后又开始缓慢上升,当曲线上升到 35 °C 时,冷却作用即告结束.对图 3 中(a)、(b)、(c)进行比较,可以直观地看到试样 1 使皮肤温度下降最多,最低温度接近 28 °C,冷却时间最长,约 200 min;试样 2 使皮肤温度下降最少,最低温度不到 31 °C,冷却时间最短,约 40 min;试样 3 的冷却作用介于二者之间.另外,皮肤温度的下降直接影响到暖体假人输入功率的大小,皮肤温度下降,输入功率增加,因此,输入功率曲线的走向与皮肤温度曲线的走向相反,如图 4 中(a)、(b)、(c)所示.

对实验数据进行计算整理,所得结果如表 1 所示.

其中的湿阻 R_{cl} 用来衡量冷却背心的透湿透气性能,值越大,说明冷却背心的透湿透气性能越差;反之,冷却背心的透湿透气性能越好.湿阻 R_{cl} 按(4)式计算,其中的 R''_{cl} 和 R'_{cl} 由系统按(3)式自动算出.

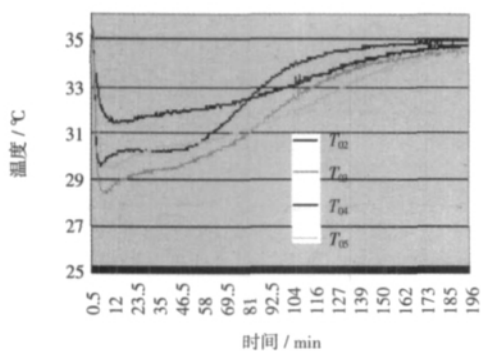
$$R_{cl} = R''_{cl} - R'_{cl} \quad (4)$$

式中 R'_{cl} 为暖体假人在没有穿着试样时皮肤以及外部着装的总湿阻 ($R'_{cl} = 33.610 \text{ m}^2\text{Pa/W}$); R''_{cl} 为暖体假人在穿着试样时皮肤、试样以及外部着装的总湿阻.

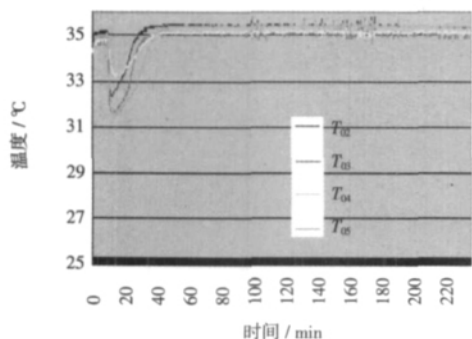
有效工作时间是指自冷却背心具有致冷作用开始至结束的一段时间.显然,它是评价冷却背心冷却效果的关键因素,有效工作时间越长越好.输入功率 P 是指冷却背心在有效工作时间内的输入功率,按(5)式计算,它的值越大,说明冷却背心的致冷效率越高.

$$P = \frac{\sum(P_i - \bar{P})}{T/60} \times \frac{30}{3600} \quad (5)$$

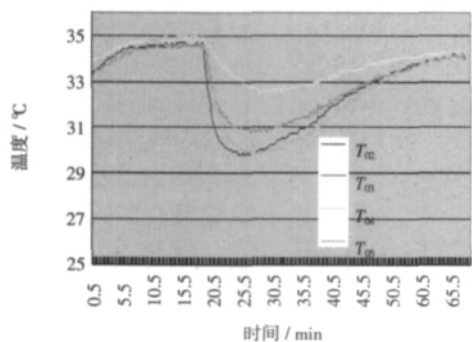
式中 P_i 为暖体假人穿着冷却背心时,测试系统每 30 s 记录的瞬时输入功率值(W); $i = (T \times 60) / 30$. \bar{P} 为暖体假人穿着冷却背心时,测试 12 h 后,得到的暖体假人平均输入功率(W). T 为有效工作时间(min).



(a) 试样 1



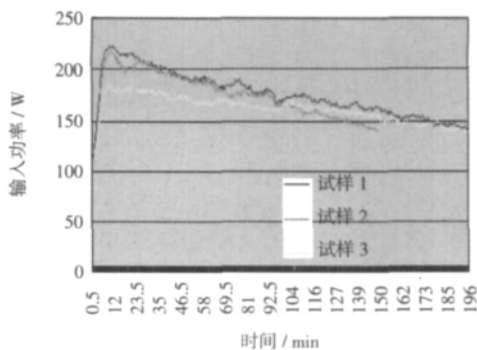
(b) 试样 2



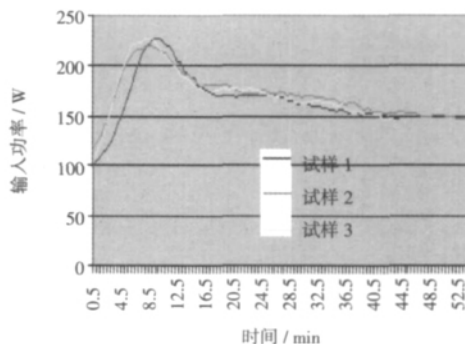
(c) 试样 3

图 3 暖体假人皮肤温度随时间的变化

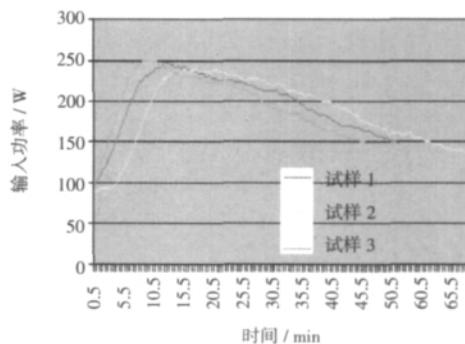
Fig.3 Skin temperature of thermal manikin vs time



(a) 试样 1



(b) 试样 2



(c) 试样 3

图 4 暖体假人输入功率随时间的变化

Fig.4 Input power of thermal manikin vs time

表 1 3 种冷却背心的各项性能指标比较

Tab.1 Performance index of three cooling vests

试样编号	冷却介质	价格 /\$	重量 G /kg	湿阻 R_a /m ² Pa/W	有效工作时间 T /min	输入功率 \bar{P} /W	输入功率 P /W	穿着舒适性
1	液态 PCM*	150	5.3	55	190	88.34	180.94	差
2	微胶囊 PCM	870	2.7	52	48	97.10	170.81	优
3	冰水	670	4.6	42	84	98.31	193.74	良

注 *PCM 是相变材料(Phase Change Material)的缩略词;

3 结论

从以上测试结果可以看出,在测试的开始阶段 3 种冷却背心均有显著的致冷效果,暖体假人的皮肤温

度都有不同程度的下降.由表 1 可知,液态相变材料冷却背心的有效工作时间最长,可达 3 h,其输入功率较大.但它的重量最重,湿阻最大,透汽性最差,存在过冷现象,因此这种冷却背心穿着显笨重,有闷湿感, (下转第 54 页)

46%。这可能是由于抗菌羊毛纤维与纳米载银 SiO₂ 抗菌剂复合后,在羊毛纤维的表面形成了纳米晶化层^[13],从而使其力学性能有了大幅度提高。力学性能的提高,有利于提高其成品的耐磨性能。

3 结 论

(1) 通过正交实验筛选工艺参数的结果为:预辐射和再次辐射时间分别为 30 min,反应温度为 80 °C,抗菌剂浓度为 0.9 mol/L,抗菌剂溶液 pH 值为 7 的条件下,制备出来的抗菌羊毛纤维的抗菌性能和力学性能较好。抗菌羊毛纤维对大肠杆菌的抗菌率达到 99 %。

(2) 制备的抗菌羊毛纤维长度较长,细度变细,卷曲多,卷曲回复率和卷曲弹性率高,单纤强力、伸长率提高,这些均更加有利于提高它的纺织加工性能、保暖性能和织物的舒适性和美观。

参考文献:

[1] TIAN C M , SHI Z H , ZHANG H Y , et al. Study on the thermal stability of wool treated with flame-retardant reagents[J]. *Thermochimica Acta* ,1995 ,284 :435-439.

[2] SCHUMACHER Karin , HEINE Elisabeth , HÖCKER Hartwig. Extremozymes for improving wool properties[J]. *Journal of Biotechnology* ,2001 ,89 :281-288.

[3] KAN C W , CHAN K , YUEN C W M , et al. Surface properties of low-temperature plasma treated wool fabrics [J]. *Journal of Materials Processing Technology* ,1998 ,83 :180-184.

[4] PASCUAL Esther , JULIA Maria Rosa. The role of chitosan in wool finishing[J]. *Journal of Biotechnology* ,2001 ,89 :289-296.

[5] VARESANO Alessio , DALL Acqua Lorenzo , TONIN Claudio. A study on the electrical conductivity decay of polypyrrole coated wool textiles [J]. *Polymer Degradation and Stability* ,2005 ,89 :125-132.

[6] TONIN C , PEILA R , FERRERO F , et al. Electrically conductive textiles[J]. *Tech Text* ,2002 (8) :120-122.

[7] DALL Acqua L , TONIN C , PEILA R , et al. Performances and properties of intrinsic conductive cellulose polypyrrole textiles [J]. *Synth Met* ,2004 ,146 :213-221.

[8] KAYNAK A , WANG L , HURREN C , et al. Characterization of conductive polypyrrole coated wool yarns [J]. *Fiber Polym* ,2002 ,3(1) :24-30.

[9] HAN Shiyong , YANG Yiqi. Antimicrobial activity of wool fabric treated with curcumin [J]. *Dyes and Pigments* ,2005 ,64 :157-161.

[10] SEONG H S , KIM J P , KO S W. Preparing chito-oligosaccharides as antimicrobial agents for cotton[J]. *Text Res J* ,1999 ,69 (7) :483-488.

[11] 姚 穆 ,周锦芳 ,黄淑珍,等. 纺织材料学[M]. 北京:中国纺织出版社,2004 :125-135.

[12] 高绪珊 ,吴大诚. 纤维应用物理学[M]. 北京:中国纺织出版社,2001 :49.

[13] 牛 梅 ,魏丽乔 ,王淑花,等. 纳米抗菌剂/羊毛纤维复合新方法[J]. *复合材料* ,2006 ,23(1) :124-128.

(上接第 50 页)

不舒适。液体冷却背心的输入功率最高,湿阻最小,透汽性最好,但它的有效工作时间较短。这种冷却背心的背部有一个用于储冷的小型供冷装置,重约 2 kg,给着装者增加了负重。另外,液体冷却背心也存在过冷现象。从图 3(a)和(c)中,可以清楚地观察到皮肤温度在开始的一段时间内由舒适温度 35 °C 快速下降到 29 °C 左右,在这样的温度下,人体会感觉非常不适。对于液态相变材料冷却背心和液体冷却背心来说,最大冷却功率均出现在着装初期,造成初期皮肤温度下降过快过大,出现冷凝水现象,导致人体产生不适感。微胶囊相变材料冷却背心的重量最轻,湿阻适中,穿着舒适性最好,但有效工作时间最短,仅为 48 min。

通过如上实验结果可知,3 种类型的冷却服均有各自的优缺点。在保证冷却服致冷效率的前提下,如何延长其有效工作时间,提高其穿着舒适性,则是今后国内外相关研究人员攻关的难题。

参考文献:

[1] 滕金山. 热应激防护服的设计与评估 [J]. *中国劳动防护用品* ,1995 (4) :34-40.

[2] PU Zhengxiang. A dynamic model of the human/cooling system/clothing/environment system [D]. Orlando :University of Central Florida Orlando ,2005.

[3] 张万欣 ,陈景山 ,李薄秋,等. 利用暖体假人对液冷服散热特性的实验研究分析[J]. *航天医学与医学工程* ,2001 (4) :257-260.

[4] 李利娜 ,钱晓明 ,徐 杰. 冷却服装的发展现状及应用[J]. *中国个体防护装备* ,2008 (2) :24-28.

[5] BEENAKKER E A , OPARINA T I , HARTGRING A , et al. Cooling garment treatment in MS : clinical improvement and decrease in leukocyte NO Production [J]. *Neurology* ,2001 ,57 (5) :892-894.

[6] 陈益松 ,范金士 ,张渭源. 新型出汗假人“Walter”与“一步法”测量原理[J]. *东华大学学报:自然科学版* ,2005 ,31(3) :101-103.

[7] QIAN xiaoming. Prediction of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance[D]. Hong Kong :Hong Kong Polytechnic University ,2005 :55-77.