

相变冷却服装发展现状及传热理论模型概述

周 觅,钱晓明,黄顺伟

(天津工业大学 纺织学院,天津 300387)

摘 要:介绍了冷却服和相变材料以及国内外相变冷却服的发展现状。提出了传统相变冷却服及新型相变冷却服传热理论模型,有利于人们对相变冷却服进一步的了解和认识。

关键词:冷却服;发展现状;相变材料;理论模型

中图分类号:TS941

文献标识码:A

文章编号:1673-0356(2017)01-0001-07

在较热或炎热环境中工作的人要比普通环境中做类似工作的人所承受的压力更大,体力负荷伴随暴露在高温环境中,会增加工人安全和健康的风险^[1],热应力会导致如消防员、工厂工人、军事训练者、运动员的耐力和表现降低^[2]。使用个人冷却设备等措施以改善人体周围的小气候,创造热舒适性,穿着冷却服是抵御高温侵害、提高工作效率的有效方法之一。

1962年 Burton 和 Collier 为英国皇家空军研制出世界上第一件液冷服^[3-4],从而拉开了冷却服研究的序幕。早期研制的冷却服主要领域为军事与航空航天^[5-7],20世纪70年代中后期,冷却服开始应用在医疗、消防、矿山和冶金等领域。目前,科学家们已经广泛地考察了在炎热的环境条件下,冷却服装在缓解人体所受到热应力的有效性^[8-10],冷却服已经被广泛应用于军事训练、消防医疗业务和体育等特殊领域。

1 冷却服

从2001年起,在个人冷却系统设计研究上主要集中在采用风机、循环液体或相变材料(PCM)作为工作中的微气候^[11-15]。冷却服根据冷却介质的不同,可分为液体冷却服、气体冷却服^[16-17]、相变冷却服^[18]和结合上述冷却技术的两个或两个以上的混合冷却服^[19-20]。冷却服又可分为主动型冷却服和被动型冷却服,主动型冷却服包括气体冷却服和液体冷却服,被动型冷却服主要为相变冷却服。气体冷却服通常配备了一个鼓风机,迫使空气进入背心的微气候。该冷却系统相当便宜,但冷却能力有限,功耗高,在炎热和潮湿的天气时无效^[21]。液冷服是衣服中含有细的导管,导管中含

有冷的循环液体,有良好的散热能力,有效时间相对较长;缺点是较重,妨碍工人行动,从而降低了工作效率^[22]。相变冷却服是在服装上封装相变材料包或者利用微胶囊技术将相变材料镶嵌在服装中,通过相变材料的相变改变吸收人体热量,实现对人体的降温。相变冷却服具有服装结构简单,穿脱方便,冷却效果好,不需要额外致冷装置等优点,但也存在有效工作时间较短的缺点^[23]。

2 国内外相变冷却服发展概况

2.1 国外相变冷却服

Bennett 等^[24]于1995年在海军消防员服装的6个口袋中放入凝胶进行降温研究。Chuansi Gao 等^[25]以十水硫酸钠及其添加物为相变材料制作出供消防员使用的冷却服。Lennart 等^[26]使用丙烯酸树脂高吸水性聚合物作为相变材料制作出供消防员使用的冷却服。20世纪末美国的 TRDC 公司^[27-28]将直径3~100 μm的相变微胶囊密封入服装,研制具有调温功能的智能服装。美国 Triangle 公司^[29]将直径15~40 μm的微胶囊编织到纺织物中研制出调温服。Wenfang Song 等^[30]为办公室工作人员设计的上衣和裤子复合 PCM 包和空气通风风扇的混合式个人冷却服装。Tao Wang 等^[31]试验研究用相变材料微胶囊悬浮液代替传统冷却液作为新的工作流体的液冷服。

2.2 国内相变冷却服

秦长春^[32]利用一种高分子水凝胶(蓝冰),研制出供消防员使用的“蓝冰降温避火服”,该服装是在传统消防服中以蓝冰为内胆放置在服装夹层内改进而来,可以同时起到防火与高效降温的作用。天津工业大学功能纤维研究所常规高分子聚合物为基材,采用熔融共混、熔融芯/鞘复合或溶液纺丝工艺研制的调温服,经中国人民解放军特种防护服装质量检测中心检

收稿日期:2016-10-10

基金项目:国家科技支撑项目(2014BAE09B00)

作者简介:周 觅(1993-),女,湖北仙桃人,在读硕士研究生,主要从事服装工效学的研究,E-mail:1257968932@qq.com。

测,在热环境下具有 3 ℃ 的降温功效^[33]。梁国志等^[34-36]以聚乙烯醇为基本原料,以硼砂溶液为胶凝剂,添加冰点降温助剂等,配制成的凝胶状蓄冷剂制作了供矿工使用的降温服。朱颖心等^[37-38]设计了供工厂和医疗机构使用的以氯化钠、氯化钾、氯化钙和水的混合物作为相变材料的降温服。王云仪等^[39]以凝胶为蓄能降温材料研制了局部性相变冷却服,主要供钢铁工人使用。

3 相变材料

相变材料(PCM)是一种潜热储存材料,具有较高的溶解热,相比显热储存材料,具有高热能存储密度,在发生相变过程中,在恒定温度条件下吸收和释放热量。潜热热能存储设备的存储容量^[40]为:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad (1)$$

$$Q = m [C_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_f - T_m)] \quad (2)$$

其中 Q 是存储容量, C_p 是比热, T_i 、 T_m 和 T_f 是初始、熔化和凝固温度, Δh 是焓。

3.1 分类

PCM 主要分为有机相变材料、无机相变材料和混合(共晶)相变材料, Abhat^[41] 的相变材料的综合分类如图 1 所示。

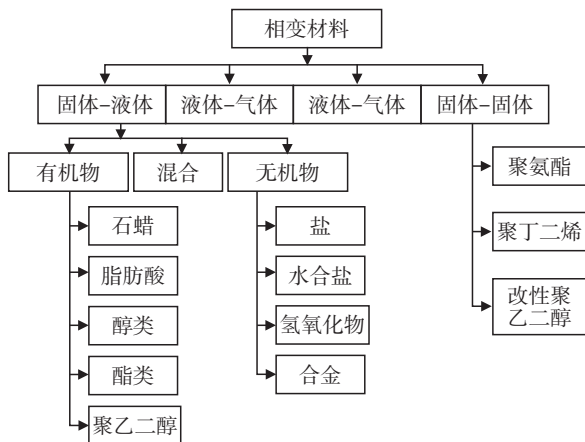


图 1 相变材料的分类

有机相变材料包括石蜡、羧酸、酯、多元醇等有机物,有机材料具有无相分离的一致熔融的能力。这些化合物在很宽的熔点范围内可使用^[42]。石蜡在 500 ℃ 下是安全、可靠的,可预测、廉价、无腐蚀性、化学惰性和稳定,但具有极低的热导率(0.1~0.3 W/mK),不适用于塑料容器封装。无机材料通常是水合盐和金

属,并大量应用在太阳能上^[43-44]。作为相变材料,大量循环使用后依然能够维持高的熔融热(350 MJ/m³),相对较高的热导率(0.5 W/m℃),但是熔融不一致。混合(共晶)相变材料是两种或两种以上成分的混合物,如有机-有机、有机-无机、无机-无机,每成分改变相态达到一致和结晶过程中形成晶体组成的混合物^[45]。混合相变材料的组成物熔化和结晶是一致的,组分不会发生分离^[46]。

3.2 基本性质

众多行业的研究人员了解到 PCM 储存和释放大 量潜热的特性,都在积极寻找适合具体应用的相变材料。PCM 作为储热系统应具备相关热、物理、化学、经济特性^[47-49]。热性能包括:合适的相变温度,制热或冷却的运行温度应该与用于热能储存的 PCM 相变温度相匹配;高比热提供了额外的显热储存;高潜热可以满足将大量的能量储存在小体积的 PCM 中,即让热能储存器的物理尺寸最小化;相变转换时有较高的导热性,导热系数应该高于降低熔化和凝固相变所需的温度梯度。物理性能包括:高密度,高密度材料需要的储存容器可以相对较小;凝固时不会或几乎不会产生过冷,小的过冷却避免 PCM 的凝固或熔化温度成为一个范围值,给出一个单一的相变温度值,即成核率高;低蒸气压和小体积变化,PCM 低蒸气压和小体积的变化有助于减少容器的几何形状的复杂性。化学性能包括:长期的化学稳定性、兼容胶囊材料、无毒,不易燃,不易爆;连续的凝固和熔化循环可能会影响 PCM 的化学组成,因此,这种材料在很长一段时间内保持化学稳定性是非常需要的。PCM 是被封装,不能与任何一种封装材料有不良反应。从安全的角度来看,它应该是无毒、不易燃、不爆炸。经济特性包括:大量容易获得的、廉价的,廉价和容易获得是材料非常理想的特性。

3.3 调温原理

PCM 是利用相变材料在温度高于相变点时吸收热量而发生相变(融化蓄势过程),当温度下降,低于相变点时,发生逆向相变(凝固放热过程)进行工作的。其原理如图 2、3 所示。

4 相变冷却服传热理论模型

冷却服根据相变储冷材料和储冷方式的不同可以分为 2 大类:传统相变冷却服和新型相变冷却服。传统相变冷却服是指将 PCM 包封装在冷却服的口袋里;新型相变冷却服则利用微胶囊技术将相变材料制作成

微型胶囊,并将微胶囊内嵌到服装面料中。

文章公式中用到的参数,其代表含义为:

A - 织物面积(m^2); g - 重力加速度(m/s^2); w - 湿度比($kgw/kgair$); P - 蒸气压(kPa); m - 质量(kg); α - 熔化的 PCM 分数; C - 织物电容($J/kg \cdot K$); m_a - 浮力作用引发的质量流率; β - 体积热膨胀($^{\circ}C^{-1}$); e - 织物厚度(m); ρ - 密度(kg/m^3); ν - 空气运动粘度(m^2/s); h_c - 对流传热($W/m^2 \cdot K$); r - 半径; air - PCM 和环境间的大气候; h_{fg} - 蒸发热(J/kg); R_d - 内织物干热阻($m^2 \cdot K/W$); a_j - PCM 和皮肤间的微气候; h_{ad} - 织物的吸附热(J/kg); Re - 织物蒸发阻力($m^2 \cdot kPa/W$); env - 环境; h_m - 织物的传质系数($kg/m^2 \cdot kPa \cdot s$); R - 织物回潮率; of - 外层织物; h_f - 织物的传热系数($kg/m^2 \cdot kPa \cdot s$); T - 温度($^{\circ}C$); if - 内层织物。

注: ρ_{if} - 内层织物密度(kg/m^3), n 是分布在冷却背心 PCM 包的数量。

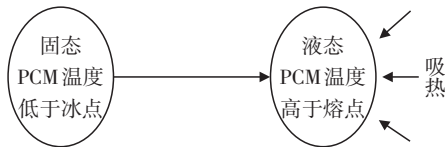


图2 相变材料吸热原理

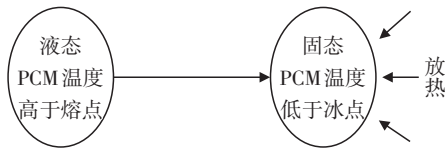


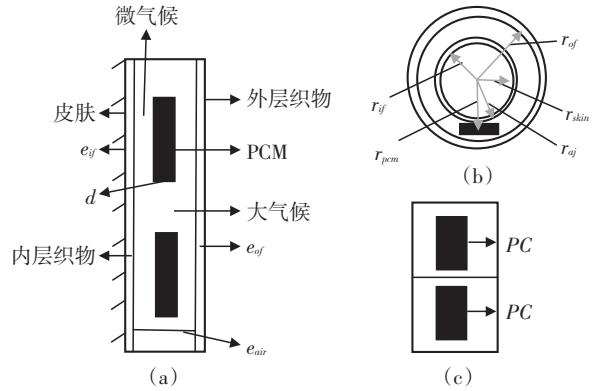
图3 相变材料放热原理

4.1 传统相变冷却服传热理论模型(冷却背心)

Haneen Hamdan 等^[50]在研究 PCM 冷却背心改善热环境的热舒适性中,提出织物-PCM 传热模型(将人体上半身看成圆筒形)。冷却背心由低蒸发阻力织物组成,以促进水分传递到环境中,并带有口袋用来封装 PCM 包。图 4 描述了织物-PCM 系统示意图。

底层服装层与皮肤和小气候空气层进行热、水汽输送。每个 PCM 片和内衣层之间微气候区域层是被看作单独一块区域。然而,每一个区域都有它自己的环境,取决于 PCM 熔化温度及其所在的位置。另一方面,在衣下空气层基本上是在一个集中的空气温度。

底层织物的质量和能量平衡由公式(3)、(4)分别给出:



注:(a)皮肤、服装、PCM 和空气层侧视图,(b)不同层半径的冷却背心的俯视图,(c)冷却背心中的 PCM 包放在圆筒躯干的上段和下段的正视图

图4 织物-PCM 圆筒模型图

$$\rho_{if} \times e_{if} \times \frac{dR_{if}}{dt} = \frac{p_{skin} - P_{if}}{\frac{R_{e,if} \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2 \times h_m}} \times \frac{r_{skin}}{r_{if}} + \frac{A_f - \sum_{j=1}^n A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{P_{air} - P_{if}}{\frac{R_{e,if} \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} + \frac{\sum_{j=1}^n A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{P_{aj} - P_{if}}{\frac{R_{e,if} \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \quad (3)$$

$$\rho_{if} \times e_{if} (C \frac{dT_{if}}{dt} - h_{ad} \frac{dR_{if}}{dt}) = \frac{T_{skin} - T_{if}}{\frac{R_{d,if}}{2} + \frac{1}{2h_f}} \times \frac{r_{skin}}{r_{if}} + \frac{A_f - \sum_{j=1}^n A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{T_{air} - T_{if}}{\frac{R_{d,if}}{2} + \frac{1}{2h_f}} + \frac{\sum_{j=1}^n A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{T_{aj} - T_{if}}{\frac{R_{d,if}}{2} + \frac{1}{2h_f}} \quad (4)$$

当没有发生相变($T_{PCM} \neq$ PCM 熔化温度),PCM 被看作为干的中间层,能量方程方程式(5)为:

$$m_{PCMj} \times C_{PCMj} \times \frac{dT_{PCMj}}{dt} = h_c \times A_{PCMj} \times (T_{aj} - T_{PCM}) \times \frac{r_{if}}{r_{PCM}} + h_c \times A_{PCMj} (T_{air} - T_{PCM}) \quad (5)$$

在相变过程中, T_{PCM} 是不变的, 它等于 PCM 熔化温度。有了这个假设, 热传导方程式(6)为:

$$h_{sf} \times m_{PCMj} \times \frac{d\alpha_j}{dt} = h_c \times A_{PCMj} \times (T_{aj} - T_{PCM}) \times \frac{r_{if}}{r_{PCM}} + h_c \times A_{PCMj} \times (T_{air} - T_{PCM}) \quad (6)$$

外层织物的质量和能量平衡公式分别为式(7)、(8)为:

$$\rho_{of} \times e_{of} \times \frac{dR_{of}}{dt} = \frac{p_{env} - P_{of}}{\frac{R_{e,of} \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} + \frac{p_{air} - P_{of}}{\frac{R_{e,of} \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \times \frac{r_{if}}{r_{of}} \quad (7)$$

$$\rho_{of} \times e_{of} \times (C \frac{dT_{of}}{dt} - h_{ad} \frac{dR_{of}}{dt}) = \frac{T_{env} - T_{of}}{\frac{R_{d,of}}{2} + \frac{1}{2h_f}} + \frac{T_{air} - T_{of}}{\frac{R_{d,of}}{2} + \frac{1}{2h_f}} \times \frac{r_{if}}{r_{of}} \quad (8)$$

假设 PCM 包和底层服装层之间的间隙宽度很小, 空气流服从泊肃叶流动, Bejan^[51] 代表的空气质量流动率方程为:

$$m_a = \rho_{air} \times g \times \beta \times \frac{T_{air} - T_{aj}}{12\nu} \times d^3 \times \omega \quad (9)$$

其中 d 一间隙宽度, ω - PCM 包的宽度。

微气候空气的质量和能量平衡公式分别为式(10)、(11):

$$\rho_{air} \times d \times \frac{d\omega_{aj}}{dt} = \sum \frac{P_{if} - P_{aj}}{\frac{R_e \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \times \frac{r_{if}}{r_{aj}} + m_a \times (\omega_{air} - \omega_{aj}) \times \frac{1}{d \times \omega} \quad (10)$$

$$\rho_{air} \times d \times A_{PCMj} \times C \frac{dT_{aj}}{dt} = A_{PCMj} \times h_c \times (T_{PCM} - T_{aj}) + A_{PCMj} \times h_c \times (T_{if} - T_{aj}) \times \frac{r_{if}}{r_{aj}} + m_a C_{air} \times (T_{air} - T_{aj}) \quad (11)$$

大气候空气质量和能量平衡公式分别为式(12)、(13):

$$\rho_{air} \times e_{air} \times \frac{d\omega_{air}}{dt} = \frac{P_{of} - P_{air}}{\frac{R_e \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} + \frac{P_{if} - P_{air}}{\frac{R_e \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \times \frac{r_{if}}{r_{air}} + h_{fg} \times \frac{A_f - \sum A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{P_{of} - P_{air}}{\frac{R_e \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \times \frac{r_{if}}{r_{air}} + \sum m_a \times C_{air} (T_{air} - T_{aj}) \quad (12)$$

$$\rho_{air} \times e_{air} \times (C \times \frac{dT_{air}}{dt} - h_{fg} \times \frac{d\omega_{air}}{dt}) = h_c \times (T_{of} - T_{air}) + \sum \frac{A_{PCMj}}{A_f} \times h_c \times (T_{PCMj} - T_{air}) + \frac{A_f - \sum A_{PCMj}}{A_f} \times h_c \times (T_{if} - T_{air}) + h_{fg} \times \frac{A_f - \sum A_{PCMj}}{A_f} \times \frac{P_{of} - P_{air}}{\frac{R_e \times h_{fg}}{2} + \frac{1}{2h_m}} \times \frac{r_{if}}{r_{air}} + \sum m_a \times C_{air} (T_{air} - T_{aj}) \quad (13)$$

为了解决上述耦合方程, 所有服装、空气层和 PCM 的初始条件是必要的。结合生物热模型测试 PCM 背心模型试验, 皮肤温度假设是等温的^[52]。织物的回潮率必须是已知的, 它是通过织物回潮率与环境中的相对湿度的相关性进行了评估的。

4.2 新型冷却服传热理论模型

A.Safavi 等^[53] 提出相变材料微胶囊 (micro-PCM) 冷却服纤维层传热的理论模型, 如图 5 所示皮肤-织物-环境系统模型。选用的织物是结合 PCM 的多孔织物, 在此, x 表示在多孔织物层的坐标, $x=0$ 和 $x=L$ 分别表示下表面层和上表面层的位置。



图 5 皮肤-织物-环境系统

假设热传递是以 x 方向从皮肤通过织物到环境传递。根据能量守恒定理推导, 作出如下假设:

- (1) 在相变的每个阶段, 相变材料的热物理性质是持续不断的。
- (2) 微胶囊是处于被周围纤维包裹着的平衡状态 (准稳态)。
- (3) 相变过程发生在一个温度范围 (而不是单一熔点)。

(4)通过织物的热传递发生热(无蒸汽传输)。织物区内没有对流换热,表面的辐射换热可以忽略不计。

含有 micro-PCM 的织物所处外部环境温度在相变温度范围外时,micro-PCMs 是不活跃的,在这种状态下,micro-PCM 作为具有恒定热容量织物的一个组成部分;另一方面,织物没有表现出动态的热行为。因此,存储在系统中的能量平衡包括显能中的变化率,公式为:

$$\rho_t C_t - s \frac{\partial T}{\partial t} = -K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

即

$$\rho_t = \gamma P_f + (1 - \gamma) \rho_{mpcm} \quad (15)$$

$$\rho_{mpcm} = \alpha \rho_{core} + (1 - \alpha) \rho_{shell} \quad (16)$$

其中, K — 热传递系数 ($W/m \cdot K$); c_{t-s} — 织物在静态状态下的热容量(没有相变) ($J/kg \cdot K$); γ — 织物中纤维的比例; $1-\gamma$ — 织物中 micro-PCM 比例; ρ_{core} — 石蜡密度 (kg/m^3), ρ_{shell} — 微胶囊壳的密度。

在相变过程中,micro-PCM 的热容量根据温度变化而变化,可以通过 micro-PCM 的 DSC 曲线来预估热容变化函数。在这种情况下,当 micro-PCM 发生相变时,方程(14)中 c_{t-s} 用 c_{t-D} 代替, c_{t-D} 为织物在动态状态下的总容量(相变过程中)。

方程应用还需添加初始和边界条件,织物的皮肤接触面,即 $x=0$,边界条件为:

$$KA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{cons} \quad (17)$$

织物的环境面,即 $x=L$ (相当于织物的厚度),边界条件为:

$$K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = u_{\infty} (T - T_{\infty}) \quad (18)$$

其中, q_{cons} — 模拟皮肤产生的热通量; u_{∞} — 空气—织物对流传热系数 ($W/m^2 \cdot K$); T_{∞} — 环境温度 (K)。

5 结语

随着科学技术的发展,冷却服不断得到完善,在航空、航海、野战、生化、消防、交通、冶金、矿山、医疗和体育等领域得到广泛应用。相变冷却服降温效果、制冷时间等方面取得了可喜的成绩,但还存在有效工作时间短、需要按时更换降温袋、重量较重、透气性差及泄漏等问题。织物—PCM 理论模型和分段生物模型相结合是非常有价值的工具,用来预测复合相变储热材料对人体不同躯干部位的影响,从而预测躯干非等皮肤温度;可以用来优化相变冷却服的性能,比如,冷却

背心在不改变性能的情况下,减小重量。目前市场上常见的冷却服均存在一定的不足,技术还不够完善,因此在冷却服的开发研制上还需要付出更多的努力。

参考文献:

- [1] Havenith G, Holmer I, Parsons K. Personal factors in thermal comfort assessment: Clothing properties and metabolic heat production[J]. *Energy and Buildings*, 2002, (34): 581—591.
- [2] Gao C, Kuklane K, Holmer I. Cooling vests with phase change material packs: The effects of temperature gradient, mass, and covering area[J]. *Ergonomics*, 2010, 53: 716—723.
- [3] Konrad J K, Buettner. Thermal stress in the modern aircraft [R]. Los Angeles: *Frontiers of Man Controlled Flight*, 1953.
- [4] Sarah A N. Water cooled garments: a review[J]. *Space Life Science*, 1970, 2(3): 335—360.
- [5] 管春磊, 李 猛, 陈景山. 美俄新型登月航天服技术研究进展[J]. *载人航天*, 2010, 16(2): 45—51.
- [6] 欧阳骅, 仝兆生. 从苏-27 一体化防护服看抗高过载措施[J]. *国际航空*, 1999, (2): 58.
- [7] 仝兆生, 石立勇, 王 琼, 等. 飞行员高空代偿服和 FTF-2 通风服通风散热性能评价[J]. *解放军医学杂志*, 2004, 29(10): 847—849.
- [8] Chan A P, Song W, Yang Y. Meta-analysis of the effects of microclimate cooling systems on human performance under thermal stressful environment: potential applications to occupational workers[J]. *Therm Biol*, 2015, 49—50: 16—32.
- [9] Song W, Wang F. The hybrid personal cooling system (PCS) could effectively reduce the heat strain while exercising in a hot and moderate humid environment, *Ergonomics*[EB/OL]. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1105305>.
- [10] C R Vernieuw, L A Stephenson, M A Kolka. Thermal comfort and sensation in men wearing a cooling system controlled by skin temperature[J]. *Hum Factors*, 2007, 49: 1 033—1 044.
- [11] J Webster, E J Holland, G Sleivert, *et al.* A light-weight cooling vest enhances performance of athletes in the heat [J]. *Ergon*, 2005, 48(7): 821—837.
- [12] A D Flouris, S S Cheung. Design and control optimization of microclimate liquid cooling systems underneath protective clothing[J]. *Ann Biomed Eng*, 2006, 34(3): 359—372.
- [13] A L Furtado, B N Craig, J T Chard, *et al.* Cooling suits,

- physiological response, and task performance in hot environments for the power industry[J]. *Int J Occup Saf Ergon*, (JOSE) 2007, 13(13): 227—239.
- [14] S A Nunneley. Water cooled garments; a review[J]. *Space Life Sci*, 1970, (2): 335—360.
- [15] J K Johnson. Evaluation of four portable cooling vests for workers wearing gas extraction coveralls in hot environments[D]. University of South Florida, 2013.
- [16] X Xu, J Gonzalez. Determination of the cooling capacity for body ventilation system[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2001, (111): 3155—3160.
- [17] J B Carter, E W Banister, J B Morrison. Effectiveness of rest pauses and cooling in alleviation of heat stress during simulated firefighting activity [J]. *Ergonomics*, 1999, (42): 299—313.
- [18] R Duffield, B Dawson, D Bishop, *et al.* Effect of wearing an ice cooling jacket on repeat sprint performance in warm/humid conditions [J]. *Br J Sports Med*, 2003, (37): 164—169.
- [19] J H Kim, A Coca, W J Williams, *et al.* Effects of liquid cooling garments on recovery and performance time in individuals performing strenuous work wearing a firefighter ensemble[J]. *Occup Environ Hyg*, 2011, (8): 409—416.
- [20] Y Lu, F Wei, D Lai, *et al.* A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: an investigation on its cooling efficiency[J]. *Therm Biol*, 2015, (52): 137—146.
- [21] T Y Meng. Design of a microclimate ventilation system, be thesis[D]. University of Southern Queensland, 2007.
- [22] Grazyna Bartkowiak, Anna Da browska, Bogdan Wodarczyk. Construction of a garment for an integrated liquid cooling system [J]. *Textile Research Journal*, 2015, 85 (17): 1809—1816.
- [23] HAN Zengwang, TANG Shijun, LAI Jun. The current international research situation and key techniques of cooling garment [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2009, (4): 11—14.
- [24] Bennett B L, Hagan R D, Huey K A, *et al.* Comparison of two cool vests on heat-strain reduction while wearing a firefighting ensemble [J]. *European Journal of Applied Physiology* 1995, 70(4): 328—332
- [25] Cao C, Kuklane K, Holmer I. Cooling vests with phase change materials; the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111 (6): 1207—1216.
- [26] Teunissen L P, WANG L C, CHOU S N, *et al.* Evaluation of two cooling systems under a firefighter coverall [J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(6): 1433—1438.
- [27] Bryant Y G, David C P. Fabric; with research enhanced thermal properties; US, 5366801[P] 1994.11.22.
- [28] Jones E A, Usin B W. Phase change materials in clothing [J]. *Textile Research Journal*, 2001, 71 (6): 495—502.
- [29] Colvin D P. PFCS — a new conception for cool micro-climate garments[C]//Industrial Fabric Association International 2th International Conference on Safety&Protective Fabrics, North Carolina, USA, 2000.
- [30] Wenfang Song, Faming Wang, Fanru Wei. Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment [J]. *Building and Environment* 2016, (100): 92—101.
- [31] Tao Wang, Liang Wang, Lizhan Bai, *et al.* Experimental study on the performance of a liquid cooling garment with the application of MEPCMS [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, (103): 943—957.
- [32] 董明元. 神奇软甲: “蓝冰降温避火服” [J]. *中国纤检*, 2013, (22): 48—49.
- [33] 张兴祥. 耐高温相变材料微胶囊及熔纺高储热量储热调温纤维 [J]. *天津科技*, 2010, 37 (2): 19—21.
- [34] 孙文娟, 梁国志. 矿工降温服蓄冷材料的实验研究 [J]. *化学工程与装备*, 2010, (4): 36—39.
- [35] 张奋奋, 梁国志, 周梦颖, 等. 降温服在煤矿中的应用 [J]. *能源技术与管理*, 2011, (2): 114—115.
- [36] 周梦颖, 冯立品, 梁国志. 矿用降温服性能测试研究 [J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 32 (2): 29—34.
- [37] 关平, 周翔, 李俊, 等. 医用相变降温服人体热舒适性试验研究 [R]. 兰州: 全国暖通空调制冷 2004 年学术年会, 2004.
- [38] 朱颖心, 张寅平, 周翔, 等. 一种相变材料降温服 [P]. 中国: 2742791Y, 2005—11—30.
- [39] 王云仪, 赵萌萌. 高温强辐射下相变降温背心的热调节作用客观测评 [J]. *纺织学报*, 2012, 33(5): 101—105.
- [40] Lane GA. Solar heat storage-latent heat materials[M], vol I Florida; CRC Press, Inc, 1983.
- [41] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage-heat storage materials[J]. *Sol Energy*, 1983, 30: 313—332.
- [42] Khudhair A M, Farid M M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials[J]. *Energy Convers Manage*, 2004, (45): 263—275.
- [43] Lane G A. Solar heat storage: latent heat materials[M]. Technology, vol II Florida: CRC Press, 1986.
- [44] Dincer I, Rosen M A. Thermal energy storage, systems

- and applications[M]. Chichester (England): John Wiley & Sons, 2002.
- [45] George A. Handbook of thermal design[M]. McGraw Hill Book Co, 1989.
- [46] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2009,13:318-345.
- [47] Regin A F, Solanki S C, Saini J S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2008, (12):2 438-2 458.
- [48] Waqas A, Ud Din Z. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-a review[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013,(18):607-625.
- [49] Soares N, Costa J J, Gaspar A R, *et al.* Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency [J]. *Energy Build*, 2013, (59):82-103.
- [50] Haneen Hamdan, Nesreen Ghaddar, Djamel Ouahrani, *et al.* PCM cooling vest for improving thermal comfort in hot environment [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016,102:154-167.
- [51] A Bejan. Convection heat transfer[M]. second ed, Wiley-Interscience, 1994, ISBN 0471579726.
- [52] M Salloum, N Ghaddar, K Ghali. A new transient bio-heat model of the human body and its integration to clothing models[J]. *Therm Sci*, 2007,46(4):371-384.
- [53] A Safavi, M Amani-Tehran, M Latifi. A new approach to theoretical modeling of heat transfer through fibrous layers incorporated with microcapsules of phase change materials[J]. *Thermochimica Acta*, 2015,604:24-32.

Development Status of Phase Change Cooling Garments and Theoretical Model of Heat Transfer Through Fabric

ZHOU Mi, QIAN Xiao-ming, HUANG Shun-wei

(School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The cooling garments, the phase change material and its development status were introduced. The theoretical model of heat transfer of both traditional phase change cooling garments and new phase change cooling garments were proposed. It is helpful to take further understand of the phase change cooling garments.

Key words: cooling garments; development status; phase-change material; theory model

新疆科研人员研发新工艺从废弃棉花短绒获取碳纤维

中国科学院新疆理化技术研究所资源化学研究室的科研人员基于新疆资源转化,以废弃的棉花短绒为原料,开发了一种环保、低成本制备碳纤维的新工艺。

上述相关研究成果日前发表在可持续绿色化学与工程领域国际权威杂志《美国化学会可持续化学和工程》杂志(*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*)上,这种绿色、低成本的工艺为生物质基碳纤维的制备提供了一种新的途径。

据悉,碳纤维作为一种高性能纤维材料广泛应用于航空、体育行业等领域。传统制备碳纤维的方法是以石化能源如聚丙烯腈、中间相沥青为原料,但由于化石能源的不可再生性以及制备碳纤维过程中会产生污染物(如制备 PAN 基碳纤维过程中会产生氰化氢有毒气体),从而污染环境。因此,以可再生、无毒害的天然资源为原料,开发环保、低成本的制备碳纤维的工艺

具有十分重要的意义。

中国科学院新疆理化技术研究所研究人员称,该工艺不仅将废弃的棉花短绒回收利用,制成再生纤维素纤维,并以此为原料,开发了一种制备高附加值碳纤维的工艺。在制备碳纤维过程中,采用较为环保的 CarbaCell 方法,该工艺与传统制备再生纤维素的方法相比,不仅生产流程简便(无老化、混合、熟化等工序),而且在制备再生纤维素纤维过程不产生如二硫化碳、硫化氢等有毒污染物,同时该工艺可在传统粘胶基纤维生产设备上使用,在碳化工艺中使用了较为便宜的磷酸氢二铵作为浸渍剂。

据介绍,实验结果表明,相对于未使用浸渍剂的样品来说,其碳化得率提高了 133%,同时抗拉强度达到了 0.72GPa,在类似的生物质基碳纤维中性能优异。

(中国新闻网)