

# 降温服的研究现状及发展趋势

柯莹, 张海棠

(江南大学设计学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:**为探究降温服在设计开发和测试评价过程中的关键问题,对其降温原理与分类、关键技术及测试评价方法进行归纳整理,并阐述降温服的发展现状。根据不同降温介质将降温服分成气体降温服、液体降温服和相变降温服3种类型,并依次介绍其工作原理、优缺点和最新研究进展。最后归纳总结降温服的3种测试方法(数值模拟法、暖体假人实验、人体穿着实验),并预测降温服在新材料的应用、舒适性与功能性以及规范精准的测试评价体系3方面的发展趋势。

**关键词:**降温服;关键技术;测试方法;工作原理

**中图分类号:**TS 941.731.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2020)01-0040-07

## Present State and Development Tendency of Cooling Suits

KE Ying, ZHANG Haitang

(School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:**In order to explore the key issues in the process of design and evaluation of cooling clothing, the cooling principle and classification, key technologies and evaluation methods of cooling clothing were summarized and sorted, and the development status of cooling clothing was expounded. According to the different cooling medium, the cooling clothes were classified into three types: gas cooling suit, liquid cooling suit and phase change cooling suit, and the working principle, advantages and disadvantages and the latest development of the cooling clothes introduced successively. The characteristics of three testing methods of cooling clothing (numerical simulation method, warm body dummy experiment and human wearing experiment) were summarized. The development trend of cooling clothing in the application of new materials, comfort and functionality, standardized and accurate test and evaluation system was predicted.

**Key words:**cooling suits, key technology, test method, operating principle

当从事生理学、职业健康和安全专业的工作人员,在炎热的气候条件下从事高强度体力劳动时,会使其健康和安全状况受到极大的威胁。因此,在极端气候条件下减轻从事体力劳动工作者的热应激反应问题亟待解决。降温服是一种能够在高温环境下保护穿着者不受热害影响的个体防护装备<sup>[1]</sup>,它将制冷装置与服装相结合,可以有效改善人体微气候,使人体在高温、高湿环境下保持一定的温湿度,降低热环境对人体的危害,提高人体的热舒适性和工作效率<sup>[2]</sup>。个体降温服作为直接有效的降温防护装备,及时保护了工作人员的生命健

康,具有很高的研究价值和意义。

国外关于降温服的研究是在20世纪50年代首次提出“水冷服”概念以后展开的。其主要应用领域从最初的航天航空逐步拓展到消防、军事、煤矿等方面<sup>[3-5]</sup>。虽然国内对降温服的研究稍晚,但近年不少学者对降温服的研究也取得了一些进展,尤其是各种相变材料的出现,为学者对降温服的研究带来了新的思路。

目前,国内外有关降温服的研究多集中在制冷装备的性能开发上,有关降温服的安全性、舒适性等综合性能的评价也很多。文中主要依据国内外

收稿日期:2019-10-25; 修订日期:2020-01-08。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51735B)。

作者简介:柯莹(1987—),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向为功能服装设计开发与评价。Email: keying@jiangnan.edu.cn

最新研究成果,按照降温服降温介质进行分类介绍,归纳整理降温服在关键技术和测试方法两方面的研究现状,分析降温服的研究瓶颈,对其未来的发展趋势进行展望,为降温服的优化设计提供依据。

## 1 降温服的工作原理与分类

### 1.1 降温服的工作原理

在人体皮肤表面和服装内层之间存在空气层,这一微小空间被称为服装微气候区,其温度、湿度、气流速度影响着人体的舒适性<sup>[6-7]</sup>。原田隆司<sup>[8]</sup>在研究服装与人体间的微气候时,总结出服装微气候区的温湿度与人体热舒适感之间的关系,具体如图 1 所示。

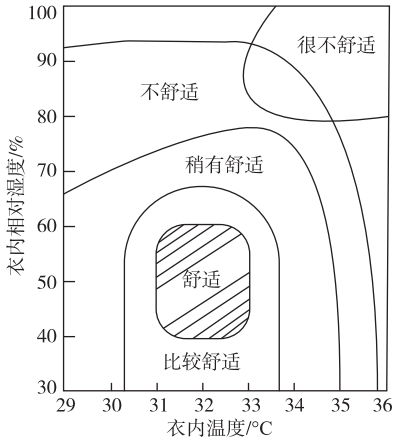


图 1 服装微气候区的温湿度与人体热舒适感之间的关系  
Fig.1 Relationship between temperature and humidity in clothing microclimate area and thermal comfort of human body

由图 1 可知,当服装微气候区的温度为  $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为  $50\% \pm 10\%$  时,热舒适度最高。影响服装微气候的因素包括人的生理及心理状态、外界环境和人体运动状态,同时也包括服装自身的结构与材料。降温服的原理是通过制冷装置对服装微气候区进行直接降温,快速排除多余水分,使服装微气候区始终保持在舒适范围内,从而维持人体的热量平衡<sup>[9]</sup>。

当人体处于高温环境时,身体本身会通过生理及行为反应进行散热,例如呼吸、排泄、汗液蒸发等。而降温服则是通过其中的制冷装置对服装微气候区进行降温,其降温方式主要包含 3 种:蒸发散热、对流散热、传导散热。一般蒸发型气冷服,是通过风扇形成的对流空气促进皮肤表面汗液蒸发时会带走热量这一特性来实现降温效果;对流型气冷服,通过预冷气体与人体产生热对流交换时可以带走热量来达到降温目的;而传导散热型降温服,则是通过接触预冷液体或相变材料,使热量从人体(高温物体)传递到液体或相变材料(低温物体)中,利用传导散热实现降温。

### 1.2 降温服的分类

降温服的分类方式很多,按服装结构,分为全身性降温服和局部降温服;按降温动力源,分为主动式降温服和被动式降温服;按制冷方式,分为蓄冷型降温服、蒸汽压缩式降温服、涡流管式降温服和电热制冷式降温服;按降温介质的不同,分为气体降温服、液体降温服和相变降温服。文中主要按照降温介质进行分类介绍,总结了 3 种降温服的不同特性,具体见表 1。

表 1 3 种降温服的特性对比  
Tab.1 Comparisons of the characteristics of three cooling suits

名 称	降温方式	优 点	缺 点	应用范围
气体降温服	蒸发散热,对流散热	气源丰富,便携,效果好	需电源、制冷器,影响工作人员操作	无防电、防爆要求的场合
液体降温服	传导散热	效率高,可持续降温,温度可控	体积大、质量重,需电源、制冷器	无防电要求的场合
相变降温服	传导散热	无电子设备,操作简单,效果好	降温时间有限,温度不可控,需反复蓄冷	无限制

**1.2.1 气体降温服** 气体降温服以环境空气或压缩空气为降温介质,通过通风管道使空气吹向服装微气候区,从而达到降温效果。根据散热方式的不同,气体降温服分为蒸发型气冷服和对流型气冷服。两种气体降温服的优缺点见表 2。

表 2 两种气体降温服的优缺点对比

Tab.2 Advantages and disadvantages of two kinds of gas cooling suit

类 型	优 点	缺 点
蒸发型气冷服	对通风温度没有要求,便携	需要电源
对流型气冷服	效果好,效率高	需要电源、制冷器,质量重,体积大

蒸发型气冷服主要利用水汽压梯度促进汗液蒸发散热。韩兴旺等<sup>[10]</sup>研发了一款换气式降温服,其将风扇缝制在背心中,利用风扇形成的强对流空气促进人体皮肤表面的汗液蒸发,评价实验结果显示,此款降温服有效地减少了人体的热应激。刘静等<sup>[11]</sup>将微型风扇编织到服装中,通过微电池驱动风扇运转达到降温目的,这款降温服的穿着舒适性更高。

对流型气冷服主要利用压缩空气在撤去外力后恢复到原来体积时会变冷这一特性,实现降温效果。其原理为当空气压缩机把空气净化冷却后,通过高压管将空气输入降温服内,气体与人体产生热对流交换,从而对皮肤表面进行降温。YANG Y F 等<sup>[12]</sup>将真空干燥冷却技术应用到降温服中,实验证明它的降温效率高达 373 W/m<sup>2</sup>。盛伟等<sup>[13]</sup>研究了一种无电自压缩式降温服,它是利用人们双脚对地的瞬时压力作为制冷装置的动力源,节能环保,且可长时间持续工作。洪福银<sup>[14]</sup>研发出躯干头部共同降温的风扇降温服,将通风调整件装置在服装后背上部和后领处,形成立体通风道,空气通过后领通风调整件到达头部,让头部实现同步降温。

气体降温服优点是服装质量较轻、气源丰富、降温时间持久、降温效果良好等。但由于气体降温服需要电源,且内部充满气体,在一些存在危险气体的环境中(如矿井),存在很高的危险性,同时穿着者的活动受高压管长度限制,自由度不高,影响工作效率。

**1.2.2 液体降温服** 液体降温服主要由服装、冷却液循环系统和附件组成,具体如图 2 所示。冷却液循环系统决定了降温服的降温性能和效率,并影响着人体穿着的舒适度。冷却液循环系统包括换热管路、微型水泵、降温介质。其中一般的降温介

质有水、冰水混合物、低于零度的冷冻液等<sup>[15-16]</sup>。液体降温服的工作原理是利用微型泵将预冷过的液体通过降温服中的换热管路输送到人体全身或需要降温的部位,此时预冷液体与人体产生热交换从而进行降温。而流经人体的液体也会通过出管口在制冷装置内降温散热,形成闭合回路,可循环使用。目前大部分研究中,液体降温服在结构设计上往往采用修身款式,以保证服装中的换热管与人体紧密接触,提高降温效果。



图 2 液体降温服的组成

Fig.2 Composition of liquid cooling suit

国内外学者从换热管路参数、降温介质温度以及水泵特性等多方面研究了液体降温服的性能。牛丽等<sup>[17]</sup>研究了换热管路的排布结构对液体降温服的影响,得到横向换热管路的降温效果高于纵向,且降温时间更持久。一般当管路间隔 3.5 cm 时,管路处温度升温速率缓慢且时间较长,因此间隔处的降温时间也有所延长<sup>[18]</sup>。郭庭辉<sup>[19]</sup>研究了水泵的结构与特性对液体降温服性能的影响,得出水泵流量和扬程分别为 600 mL/min 及 48 kPa 时,降温服的效果最优。

液体降温服的平均散热量可达 726.9 W,能够有效处理人体产生的大量代谢热,降温效果显著。目前液体降温服可以通过调整降温介质进口的温度或流速,控制降温服的整体温度,以适应人体不同环境下的穿着需求。但是液体降温服存在较高液体泄漏问题,且无论是移动式制冷装置液体降温服,还是固定式液体降温服,其穿着时的活动自由度都较低。

**1.2.3 相变降温服** 相变降温服是利用相变材料在环境温度高于相变点时融化吸热,低于相变点时凝固放热的特性进行工作的<sup>[20]</sup>。相变降温服的降温介质包括冰、干冰、凝胶、相变材料、微胶囊相变材料等。相变降温服一般在使用前需要将相变材料袋(5 ~ 15 cm)进行预冷处理,再放置到降温服内部的若干口袋中,降温过程一般可维持 2 ~ 4 h,相

变过程发生一段时间后,需取出相变材料袋,重新对其进行蓄冷,属于被动式降温服<sup>[21]</sup>。

BARTKOWIAK G 等<sup>[21]</sup>研究提出,由 3 种不同纺织加工方式制成的含有微胶囊或相变大颗粒的降温服,结果显示这 3 种降温服均使人体表面温度降低了 2~4℃。ALMQVIAT H O<sup>[22]</sup>研发了一种新型相变降温服,该降温服增设了一个可以指示相变材料冷却能力的传感器和一个具有活化物质的便携式容器。其中传感器可根据材料温度显示不同颜色,提示使用者是否需要更换材料,而便携式容器可供相变材料再次活化制冷。AYERS D 等<sup>[23]</sup>研制了一款同时具有降温性和保暖性的服装,当人体穿着其中一面时,服装通过捕获空气和人体的热量给人体加热;而穿着另一面时,服装又可以通过加速织物上的水分运动给人体降温。

相变降温服因其具有系统简单、操作方便、无电子设备、无防爆要求、制冷效果好、污染低等优点,具有广泛的发展前景,是国内外学者研究的热点。但相变材料在应用过程中也存在一些问题,例如液相泄露、水蚀、过冷、温度不可调控、需要反复蓄冷等。

## 2 影响降温服的关键技术

### 2.1 微型化设计

由于降温服中的压缩机、蒸发器、冷凝器会影响服装整体系统的体积和质量,因此其微型化设计是未来的发展方向。其中压缩机是运动部件,其性能关系到整个系统的运行时长。压缩机包括缸体型线、转子、阀片、机械密封等多个部件,这些部件的设计是实现压缩机微型化的关键。蒸发器和冷凝器的换热系数也亟待提高,减小这两个器件的体积和质量对于整个系统的缩小具有重要作用。降温服的供电电源质量同样需要大幅度减轻,寻找更高能量密度的供电电池或者微型内燃机代替电机。

### 2.2 纳米技术

相变降温服在使用过程中受到变形和水的影响,相变材料容易发生液相泄露、水蚀、过冷等问题,而相变材料的多功能封装和复合技术的研究可有效解决这一问题。如纳米技术在相变材料中的应用,将纳米技术与复合相变材料结合,可以制备新型、高效的纳米复合蓄能相变材料,这类相变材料可以克服传统相变材料的泄露问题,增强材料的循环热稳定性,提高材料的导热性能<sup>[24]</sup>。但纳米复合蓄能相变材料也存在缺陷:在使用过程中会产生分层析出、团聚等现象;纳米相变材料的精细结构无法准确表征;制备工艺稳定性不高等<sup>[25]</sup>。

## 3 降温服的测试评价方法

对降温服的综合性能进行准确评价,可以提高降温服的安全性与舒适性,规范其选用标准。降温服的测试评价方法包括数值模拟法、暖体假人实验和人体穿着实验<sup>[25-27]</sup>。

### 3.1 数值模拟法

数值模拟法可以对一些无法或者很难用理论分析求解的复杂问题进行模拟求解,比普通实验更自由、灵活,可节约实验成本,加快研究进度,扩大研究范围。1939 年 HENRY P S H<sup>[28]</sup>首次提出动态条件下织物的热传递模型,自此国内外学者开展了大量关于服装传热机制的研究,模型越来越复杂化。FARNWORTH B<sup>[29]</sup>基于出汗热平板仪实验,首次将织物的湿传递加入模型中。SANTOS M S 等<sup>[30]</sup>建立了衣下微气候数值传热模型,研究了衣下空气层厚度对热传递的影响。1948 年 PENNES H<sup>[31]</sup>提出了经典的生物传热方程,自此拉开了人体传热模型研究的序幕。以 HAVENITH G 等<sup>[32]</sup>建立的人体-服装-热生理模型为代表,此模型加入人体热感觉模型,可以预测人体热感和热舒适感,具体如图 3 所示,其中  $T_{\text{skin}}$  为人体皮肤温度,  $T_{\text{core}}$  为人体核心温度,  $T_{\text{skin,local}}$  为人体皮肤局部温度。

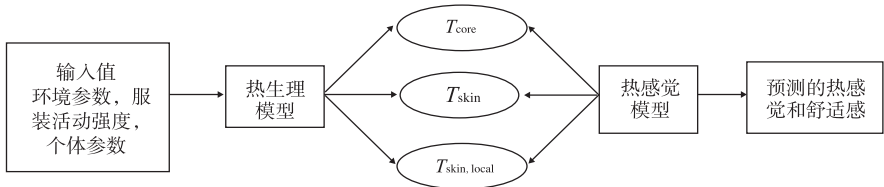


图 3 人体-服装-热生理模型

Fig.3 Human, clothing and thermophysiological model



数值模拟法一般是通过模拟降温服与人体之间的气流、热流交换,对降温服进行舒适性评价的<sup>[33]</sup>。王前进<sup>[34]</sup>用 Gambit 建立人体背部传热模型,用 Matlab 软件计算背部组织温度分布情况,分析了涡流式降温服在矿井下对人体背部的降温效果。SUN Y 等<sup>[35]</sup>建立了气体降温服热流、气流传递的数值模型,分析了风扇的大小和数量对人体皮肤温度的影响,以及风速对传热性能的影响。目前学者在对降温服进行数值模型构建时,越来越注重服装微环境下的各类物理参数、影响热环境因素和局部传热效果等,使模型更加接近人体真实的穿着状态。但数值模拟法容易受到环境、服装等多个因素的影响,测试结果的精度不如暖体假人和真人穿着实验,其通用性和可比性也有待考证。

3.2 暖体假人实验

暖体假人实验一般通过模拟人体、服装和环境之间的热湿交换过程来测试服装的性能。同时,配套的 ThermDAC 软件也可以实时记录暖体假人各部位的表面温度和热流,方便测试服装整体或局部的热学性能参数,精确度高、重复性好。WANG F 等<sup>[36]</sup>采用暖体假人实验,通过记录暖体假人头部温度和平均皮肤温度,研究两种不同控制模式下的几种降温服装的降温效果。ZHAO M 等<sup>[37]</sup>通过暖体假人实验,对暖体假人表面皮肤温度和各区域热损失进行记录,研究风扇的位置和服装的开口形式对气体降温服降温效果的影响。暖体假人测评装置

从传统的出汗暖体假人、热生理假人到数值热生理假人,越来越接近真人的热生理反应<sup>[38]</sup>。但是,目前的热生理暖体假人与真人实验结果仍存在局部差异。

3.3 人体穿着实验

人体穿着实验通过采集人体皮肤表面温湿度、体核温度、心率等生理数值和主观感受,可以直接、客观地评价降温服对人体热舒适性的影响,反映人体热舒适度。人体穿着实验一般在恒温、恒湿的人工气候环境仓中进行,可以模拟待测服装的使用环境,实验条件易控制,其误差小。UDAY R 等<sup>[39]</sup>人在环境仓中通过人体穿着实验,对比在两种降温服(PCM<sub>s</sub> 降温服和添设风扇的 PCM<sub>s</sub> 降温服)中添加质量可忽略的保温层对人体热应激的影响。

人体穿着实验还可以在室外环境中直接进行,但这种实验方法受气候条件的影响较大,易产生误差且成本较高。CHAN A P<sup>[40-41]</sup>通过大量的室外人体穿着实验,如香港地区建筑工地、马路环卫、机场工作人员穿着降温服时的热舒适度进行调查,结果表明受试者穿着降温服的热感明显低于穿着普通作业服时的热感。

人体穿着实验相较于前两种测试方法来讲可以更直观地评价降温服的综合性能,但其缺点是易受个体差异影响,实验结果误差较大,成本略高,而且无法表征极端环境。文中整理了降温服 3 种测试方法的优缺点,具体见表 3。

表 3 降温服 3 种测试方法的优缺点

Tab. 3 Advantages and disadvantages of three testing methods for cooling clothing		
种 类	优 点	缺 点
数值模拟法	比普通实验更自由、灵活,可节约实验成本,扩大研究范围	易受环境、服装等多个因素的影响,精确度不够高,模型通用性不高
暖体假人实验	可以表征极端环境;实验重复性好	精确度不够高
人体穿着实验	可以直接、客观地反映性能	受个体差异影响较大;成本略高;无法表征极端环境

4 降温服的发展趋势

未来降温服的发展方向包括以下几个方面:

1)新材料的应用。材料科学飞速发展,碳纤维、石墨烯、纳米材料换热性能优异,如果将其与降温服相结合,可提升降温服的性能。目前微胶囊相变材料具有较显著的蓄热调温功能,比一般相变材料的使用效率更高,已广泛应用于医药、化工和农

业等领域,但其降温持续时间短,在纺织服装领域一直没有取得长足发展。因此寻求持续时间较长、调温性能良好的相变材料是降温服发展的关键。

2)舒适性、功能性兼备。目前的降温服质量偏重、制冷温度难以控制、穿着舒适性较低。因此可以通过零部件微型化、服装结构合理化等方式减负,提高人体穿着舒适度。制冷路径也可以由单一制冷向复合制冷方向发展,实现降温服的功能多样化。

## 5 结 语

文中对降温服现阶段的发展情况进行了分析和总结,根据不同降温介质对降温服的原理和优缺点进行了分类介绍,归纳整理降温服在设计过程中涉及的关键技术和测试评价方法。研究表明微型化设计和纳米技术是影响降温服发展的关键技术,通过零部件的微型化设计可以有效改善目前降温服质量偏重、体积较大的问题;将纳米技术应用到相变材料中,可以解决相变降温服材料泄露问题,增强材料的循环热稳定性,提高材料的导热性能。另外,关于降温服的性能评价,数值模拟法、暖体假人实验和人体穿着实验3种评价方法各有优缺点,可以结合实际情况根据不同降温服选择合适的评价方法。目前降温服正往新材料的应用、舒适性高和功能多样化方向发展,开发制冷性能好、蓄电池续航能力强、温度可控、易拆洗、轻质舒适的降温服,可以给长期暴露于高温环境下的工作人员提供安全、舒适的保障。

### 参考文献:

- [1] 廖梦婷,邹声华. 降温服综合性能的模糊评价[J]. 工业安全与环保, 2018,44(6): 75-78.  
LIAO Mengting,ZOU Shenghua. Fuzzy evaluation of cooling garments comprehensive performance[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018,44(6): 75-78. (in Chinese)
- [2] 李璐娜,陈磊,梁永辉,等. 对相变降温服的相变材料充注量及摆放位置的研究[J]. 中国新技术新产品, 2019,8(46): 79-82.  
LI Luna, CHEN Lei, LIANG Yonghui, et al. The filling capacity and position of phase change materials for phase change cooling suit were studied [J]. New Technology and New Products from China, 2019,8(46): 79-82. (in Chinese)
- [3] SPECKMAN K L, ALLAN A E, SAWKA M N, et al. A review: microclimate cooling of protective over garments in the heat [R]. Natick: United States Army Research Institute of Environmental Medicine, 1988.
- [4] WEBBON B, MONTGOMERY L, MILLER L, et al. A comparison of three liquid-ventilation cooling garments during treadmill exercise [J]. Aviat Space Environ Med, 1981,52(7): 408-415.
- [5] BEIKO K. Evaluation of personal cooling systems explosive ordnance disposal suits [R]. Canada: Canadian Po-lice Research Center, 1993.
- [6] 王敏,李俊. 衣下空间作用机制与防护服舒适性[J].

中国个体防护设备, 2009,5(2): 18-21.

- WANG Min, LI Jun. The effect mechanism of the space under clothes and the comfort of protective clothes [J]. China Personal Protective Equipment, 2009,5(2): 18-21. (in Chinese)
- [7] 张渭源. 服装舒适性与功能[M]. 北京:中国纺织出版社, 2011: 75-76.
  - [8] 原田隆司. 衣服内气候与衣着[J]. 国外纺织技术, 1987(16): 35-40.  
HARADA T. The climate of clothes [J]. Textile Technology Overseas, 1987(16): 35-40. (in Chinese)
  - [9] 盛伟,郑海坤. 人体降温服在矿井热环境中的应用综述[J]. 中国安全生产科学技术, 2013,9(12): 95-101.  
SHENG Wei, ZHEN Haikun. Literature review on application of body cooled suits in mine thermal environment [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013,9(12): 95-101. (in Chinese)
  - [10] 韩增旺,唐世君,赖军. 换气式降温服的实验评价研究[J]. 中国个体防护设备, 2010,3(3): 11-14.  
HAN Zengwang, TANG Shijun, LAI Jun. The experimental evaluation studies of circulating air cooling garment [J]. China Personal Protective Equipment, 2010,3(3): 11-14. (in Chinese)
  - [11] 刘静. 热学微系统技术[M]. 北京:科学出版社, 2007.
  - [12] YANG Y F, STAPLETON J, DIAGNE B T, et al. Man-portable personal cooling garment based on vacuum desiccant cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 47: 18-24.
  - [13] 盛伟,刘秀芳,王强,等. 一种自压式空调服:CN102326891A[P]. 2012-01-25.
  - [14] 洪银福. 一种冷却服: CN201710815570.X[P]. 2017-12-08.
  - [15] 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(4): 24-28.  
LI Lina, QIAN Xiaoming, XU Jie. Development and application of cooling garments [J]. China personal Protective Equipment, 2008,2(4): 24-28. (in Chinese)
  - [16] WESTIN J K, KAPAT J S, CHOW L C, An improved thermoregulatory model for automatic cooling control development in liquid cooling garment systems [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2010, 2(1): 1-11.
  - [17] 牛丽,钱晓明,范金土,等. 可降温式消防服的设计与降温效果评价[J]. 纺织学报, 2018,39(6): 106-112.  
NIU Li, QIAN Xiaoming, FAN Jintu, et al. Design of cooling firefighting protective clothing and evaluation on cooling performance [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(6): 106-112. (in Chinese)
  - [18] 牛丽,钱晓明,范金土,等. 换热管路间隔大小对可降

- 温消防服降温效果的影响 [J]. 纺织导报, 2018(5): 92-94.
- NIU Li, QIAN Xiaoming, FAN Jintu, et al. Effect of heat exchange tube intervals on cooling performance of fire-fighter uniform [J]. China Textile Leader, 2018(5): 92-94. (in Chinese)
- [19] 郭庭辉. 液冷服中的流动与传热及其系统研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [20] HUNTER I, HOPKINS J T, CASA D J, et al. Warming up with an Ice vest: core body temperature before and after cross-country racing [J]. Journal of Athletic Training, 2006, 41(4): 371-374.
- [21] BARTKOWIAK G, DABROWSKA A, MARSZALEK A. Analysis of thermoregulation properties of PCM garments on the basis of ergonomic tests [J]. Textile Research Journal, 2012, 83(2): 148-159.
- [22] ALMQVIST H O. Cooling garment having phase change material in its extremity portions: US8499367 [P]. 2013-08-06.
- [23] AYERS D, CORTINA K, LINDEMANN C. Reversible garment with warming side and cooling side: US8813525 [P]. 2014-08-26.
- [24] 张行周, 钟晓辉, 吴玉庭, 等. 便携式空调系统研究 [J]. 中国个体防护装备, 2006(2): 31-33.
- ZHANG Xingzhou, ZHONG Xiaohui, WU Yuting, et al. Study on portable air-conditioning systems [J]. China Personal Protective Equipment, 2006(2): 31-33. (in Chinese)
- [25] 那寒矗, 李夕兵, 马春德, 等. 改进的层次分析法——模糊数学模型在矿井人体舒适度评价的应用 [J]. 安全与环境学报, 2015(15): 12-15.
- NA Hanchu, LI Xibing, MA Chunde, et al. The improved analytic hierarchy process—the application of fuzzy mathematical model in the evaluation of human comfort in mine [J]. Journal of Safety and Environment, 2015(15): 12-15. (in Chinese)
- [26] WANG F, SONG W. An investigation of thermophysiological responses of human while using four personal cooling strategies during heat waves [J]. Journal of Thermal Biology, 2017(70): 37-44.
- [27] SONG W, WANG F, WEI F. Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment [J]. Building and Environment, 2016(100): 92-101.
- [28] HENRY P S H. Diffusion in absorbing media [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1939(171): 215-240.
- [29] FARNWORTH B. A numerical model of the combined diffusion of heat and water vapor through clothing [J]. Textile Research Journal, 1986(56): 653-664.
- [30] SANTOS M S, OLIVERIRA D, CAMPOS J B L M, et al. Numerical analysis of the flow and heat transfer in cylindrical clothing microclimates-influence of the microclimate thickness ration [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018(117): 71-79.
- [31] PENNES H H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting forearm [J]. Journal of Applied Physiology, 1948(1): 93-122.
- [32] HAVENITH G, FIALA D. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress [J]. Comprehensive Physiology, 2016(6): 255-302.
- [33] 赵蒙蒙, 柯莹, 王发明, 等. 通风服热舒适性研究现状与展望 [J]. 纺织学报, 2019, 40(3): 183-188.
- ZHAO Mengmeng, KE Ying, WANG Faming, et al. Research and development trend of ventilation clothing thermal comfort [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(3): 183-188. (in Chinese)
- [34] 王前进. 涡流式降温服在矿井下应用基础研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [35] SUN Y, JASPER W. Numerical modeling of heat and moisture transfer in a wearable convective cooling system for human comfort [J]. Building and Environment, 2015(93): 50-62.
- [36] WANG F, SONG W. An investigation of thermo physiological responses of human while using four personal cooling strategies during heat waves [J]. Journal of Thermal Biology, 2017(70): 37-44.
- [37] ZHAO M, GAO C, WANG F, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013(43): 232-237.
- [38] 李莎莎, 李俊. 消防服性能测评技术及其综合评价原则 [J]. 服装学报, 2017, 2(3): 212-217.
- LI Shasha, LI Jun. Study on the performance evaluating methods and comprehensive evaluation principles of fire fighting clothing [J]. Journal of Clothing Research, 2017, 2(3): 212-217. (in Chinese)
- [39] UDAY R, WANG F, SONG W, et al. Performance enhancement of hybrid personal cooling clothing in a hot environment: PCM cooling energy management with additional insulation [J]. Ergonomics, 2019, 62(7): 928-939.
- [40] CHAN A P, ZHANG Y, WANG F, et al. A field study of the effectiveness and practicality of a novel hybrid personal cooling vest worn during rest in Hong Kong construction industry [J]. Journal of Thermal Biology, 2017(70): 21-27.
- [41] CHAN A P, YANG Y, SONG W. Evaluating the usability of a commercial cooling vest in the Hong Kong industries [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2018, 24(1): 73-81.