

个体降温服降温效应评价指标及方法

柯莹^{1,2}, 周文³

(1. 江南大学设计学院, 江苏无锡 214122; 2. 江南大学江苏省非物质文化遗产研究基地, 江苏无锡 214122; 3. 江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:个体降温服对高温高湿环境下作业人员有隔热降温的保护作用, 可使其免受热应激危害。为评定降温服降温效果的有效性与稳定性, 需对其进行测评。通过对国内外降温服降温效果评价研究进行综述, 从客观评价和主观评价两个方面, 对降温服降温效果的物理、生理、心理 3 个指标进行探讨, 归纳总结了高温高湿环境下个体降温服降温效果评价指标体系, 为降温服降温效果综合评价提供依据。

关键词:个体降温服; 降温效果; 评价指标; 评价体系

中图分类号: TS 941.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2021)01-0001-07

Evaluation Indicators and Methods of Cooling Effects for Personal Cooling Clothing

KE Ying^{1,2}, ZHOU Wen³

(1. School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Intangible Culture Heritage Research Base in Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Personal cooling clothing has the heat insulating and cooling effects for workers in high temperature and humidity environments, and can protect them from heat stress. In order to evaluate the effectiveness and stability of the cooling effects for cooling clothing, it needs to be evaluated. Through summarizing the research on the cooling effect evaluation of cooling clothes at home and abroad, the physical, physiological and psychological indicators of the cooling effects for cooling clothes were discussed from two aspects: objective evaluation and subjective evaluation. An evaluation indications system of cooling effects for personal cooling clothing in high temperature and humidity environments was summarized. It will provide a basis for the evaluation of the cooling effect for cooling clothing.

Key words: personal cooling clothing, cooling effect, evaluation indications, evaluation system

在高温高湿的环境中从事消防救援、工业生产、军事训练以及体育运动等的人员, 会承受巨大的热生理压力, 从而导致工作耐力和效率下降, 严重的可能会引起热疾病, 如皮疹、抽筋、中暑, 甚至死亡^[1-2]。为了减轻高温高湿环境中作业人员的热应激反应, 使人体达到热舒适状态, 研究人员已开发出多种能够在炎热环境中调节人体热湿舒适度的

个体降温服^[3]。

个体降温服是一种能够在高温高湿条件下有效保护人体免受热应激危害的个体防护装备, 为评价降温服降温效果, 需对其进行测评。对于个体降温服降温效果的评价, 可以从服装和人体两方面着手^[4], 将评价指标分为物理、生理和心理 3 大类, 通过出汗热板仪、暖体假人、真人着装等试验, 对降温

收稿日期: 2020-11-08; 修订日期: 2020-12-16。

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJCZH063); 中国博士后科学基金特别资助项目(2020T130255)。

作者简介: 柯莹(1987—), 女, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为服装舒适性与功能性。

Email: keying@jiangnan.edu.cn

服的面料性能、服装整体性能和着装后人体的实际指标进行客观评价与主观评价^[5-8]。个体降温服降温效果的准确测评结果,可以为实际环境中降温服的选择与应用提供理论依据。

文中通过对目前国内外降温服降温效果的评价方法和指标进行归纳整理,总结了高温高湿环境下个体降温服降温效果的评价方法,以期实现对个体降温服降温效果的科学、有效评价。

1 个体降温服概述

在高温环境下,人体可能会遭受不同程度的热应激,一般而言,可以从 3 个方面来降低劳动人员的热应变:为个人提供相对舒适的工作环境(如使用空调)、减少人体代谢热的产生(如降低锻炼、工作强度)、在人体周围创建舒适的服装微环境(使用个体降温服)。然而由于某些工作空间开放或流程特殊,无法使用空调系统,且空调往往带来巨大的能源消耗,灵活且能耗较少的个体降温服逐渐成为高温作业人员的常用防护装备。

个体降温服(PCC)是耗能最少、最便捷的降温防护装备,它将制冷装置与服装相结合,从而改善人体与服装之间的微气候,提高人体的热舒适度^[9]。个体降温服根据冷却介质的不同可以分为 4 类:基于相变材料相变吸热的相变降温服^[10](PCM),利用对流和蒸发冷却的气体降温服^[11](ACC),基于传导冷却的液体降温服^[12](LCC),结合了以上两种或多种降温方式的混合降温服^[13-14](HCC)。气体降温服的冷却介质是空气,主要由服装、压缩机和通风管道组成。液体降温服的冷却介质有水、冰水混合物、水与丙烯或乙二醇组成的混合冷却液等,主要由基础服装、换热管网路、液体进出口管、制冷装置、泵、电子流率控制装置及舒适衬里组成。相变降温服则通过材料的相变过程实现降温。最早关于降温服的研究是 20 世纪 60 年代美国航空航天局为了保护宇航员免受外太空高温、高辐射的危害而提出,后逐步拓展到消防、军事、煤矿等领域^[15-17]。目前,已有较多学者研究开发出效果显著的个体降温服,降温服产品如图 1 所示。



(b)混合降温服



(c)气体降温服



(d)相变降温服

图 1 降温服产品

Fig.1 Different types of cooling clothing system

2 个体降温服降温效果评价指标

个体降温服的降温效果评价主要分为客观评价和主观评价。客观评价是通过降温服及其面料的物理性能指标和人体生理指标进行评价,主观评价是依据人体的心理指标进行评价。降温效果的主要评价指标分类^[8]见表 1。

表 1 降温服降温效果评价指标的分类

Tab.1 Classification of evaluation indications of cooling effect for cooling clothing

分 类	评价指标
物理指标	面料的热阻、湿阻等
面料和服装指标	透湿指数、蒸发散热率、有效降温时长等
生理指标	单一指标:核心温度、皮肤温度、心率、出汗率等
综合指标	4 h 出汗率预测指标、热强度指数、生理效应指标、生理应激指标等
心理指标	热感觉、湿感觉、舒适感、热偏向等

2.1 物理指标

服装的热湿性能主要包括热阻和湿阻两方面^[18]。但受服装衣下间隙、服装开口、缝合方式等影响,面料的单一性能不能代表服装的整体性能,



(a)液体降温服

因此还要考虑服装的整体物理性能,即降温服在实际穿着过程中的参数。目前市场上的降温服普遍存在初期降温速率过快,导致局部过冷、降温时长较短的问题。因此,降温服的整体性能除热阻、透湿指数外,还包括有效降温时长(从具有致冷作用开始到降温效果消失)、初期降温速率等^[4]。

2.2 生理指标

在高温高湿环境下,人体的生理参数如核心温度、局部和整体皮肤温度、心率、出汗量等均会发生变化。热应力强度不同,其变化程度也不同。因此,根据人体生理指标的变化,可以客观评价降温服的降温效果。

2.2.1 核心温度 在高温高湿环境下,核心温度最能体现人体体温变化,如果人体长时间处在高温环境,会导致核心温度升高,引起不同程度的热应激反应^[19]。

ISO 7933—2018^[20]指出,当人体核心温度到达 38 ℃时就应该停止工作。若降温服能使人体核心温度维持在 38 ℃以下,则认为其能起到良好的降温效果。

2.2.2 平均皮肤温度 平均皮肤温度是按照局部皮肤温度与对应部位的皮肤面积计算的加权平均值。平均皮肤温度可有效直观地反映人体皮肤温度的变化情况。MITCHELL D 等^[21]研究表明,人体热舒适状态下的平均皮肤温度范围是 32 ~ 34 ℃。常见的平均温度计算公式^[22-26]见表 2。

表 2 平均皮肤温度计算公式

公式名称	计算方式
3 点公式	$T_{SK} = 0.5 \times T_1 + 0.36 \times T_2 + 0.14 \times T_3$
4 点公式	$T_{SK} = 0.3 \times T_1 + 0.3 \times T_4 + 0.2 \times T_5 + 0.2 \times T_2$
4 点公式	$T_{SK} = 0.28 \times (T_6 + T_7 + T_8) + 0.16 \times T_9$
7 点公式	$T_{SK} = 0.35 \times T_{10} + 0.19 \times T_5 + 0.14 \times T_4 + 0.13 \times T_2 + 0.07 \times T_{11} + 0.07 \times T_{12} + 0.05 \times T_9$
8 点公式	$T_{SK} = 0.07 \times (T_{13} + T_3 + T_{14}) + 0.175 \times (T_7 + T_1) + 0.05 \times T_9 + 0.19 \times T_5 + 0.2 \times T_2$
15 点公式	$T_{SK} = 1/15 \times (T_{12} + T_1 + T_{14} + T_3 + T_{11} + T_{15} + T_{16} + T_{17} + T_{18} + T_{19} + T_{20} + T_{21} + T_6 + T_{22} + T_{23})$

注: T_1, T_2, T_3 分别为胸部皮肤温度、小腿部皮肤温度、前臂皮肤温度; T_4, T_5 分别为手臂皮肤温度、大腿皮肤温度; T_6, T_7, T_8, T_9 分别为颈部皮肤温度、肩胛皮肤温度、胫部皮肤温度、手部皮肤温度; T_{10}, T_{11}, T_{12} 分别为躯干皮肤温度、头部皮肤温度、脚部皮肤温度; T_{13}, T_{14} 分别为额头皮肤温度、前臂皮肤温度; $T_{15}, T_{16}, T_{17}, T_{18}, T_{19}, T_{20}, T_{21}, T_{22}, T_{23}$ 分别为腹部皮肤温度、大腿前侧皮肤温度、大腿中部皮肤温度、大腿后侧皮肤温度、小腿前侧皮肤温度、小腿后侧皮肤温度、脚背皮肤温度、中背部皮肤温度、腰背部皮肤温度。

在冷环境中测量人体平均皮肤温度需不少于 8 个测点,但当环境温度较高时,可使用测点较少的公式。因此,在高温环境中评价降温服对人体平均皮肤温度造成的影响时,研究人员推荐使用更简便且精确的 4 点公式。若降温服能使人体在高温环境中的平均皮肤温度维持在 34 ℃以下,则认为其具有降温效果。

2.2.3 心率 心率是体现在高温高湿条件下作业的人体承担的热负荷及心血管系统状态的重要指标,能反应人体遭受的热应激程度。高温环境下,人体新陈代谢加快、心率升高、血液循环加快,可以促进人体散发多余的热量,以维持身体的热平衡。心率的正常变化范围为 40 ~ 180 次/min。

MORAN D S 等^[27]定义了 PSI (生理应激指标),以核心温度和心率量化高温下人体的热应激。PSI 将热应激分为 10 个等级,10 表示强烈的热应激,0 表示无热应激,其对应的心率和直肠温度见表 3。可结合直肠温度与心率值判定人体的热应激强度,从而评价降温服的降温效果。

表 3 热应激强度及对应的 PSI、心率和直肠温度值

Tab.3 Heat stress intensity and corresponding PSI, heart rate, and rectum temperature

热应激强度	PSI	心率/(次/min)	直肠温度/℃
无/弱	0	71 ± 1.0	37.12 ± 0.03
	1	90 ± 1.1	37.15 ± 0.04
	2	103 ± 1.1	37.35 ± 0.03
低	3	115 ± 1.3	37.61 ± 0.03
	4	125 ± 1.4	37.77 ± 0.04
	5	140 ± 1.9	37.99 ± 0.05
中度	6	145 ± 5.3	38.27 ± 0.07
	7	159 ± 1.3	38.60 ± 0.04
	8	175	38.70
很高	9		
	10		

2.2.4 出汗量及汗液蒸发率 出汗量是衡量人体在高温环境下散热能力的重要指标,汗液蒸发时从人体吸收热量,可有效降低皮肤温度,防止热量在体内大量聚集产生热应激反应。可以根据人体在高温环境下作业前后的裸体质量、着装质量与降温服的质量,计算出人体的出汗量、汗液蒸发量以及汗液蒸发率。出汗量越大,表示降温服降温效果越差;汗液蒸发率越大,表示降温服的透湿性能越好。对应的计算公式为

$$S_p = W_0 - W_1; \tag{1}$$

$$S'_p = W'_0 - W'_1; \tag{2}$$

$$\theta = \frac{S'_p}{S_p} \quad (3)$$

式中: S_p 为出汗量(g); W_0 和 W_1 分别为实验前后受试者的裸体质量(g); S'_p 为汗液蒸发量(g); W'_0 和 W'_1 分别为实验前后受试者的着装质量(g); θ 为汗液蒸发率。

2.3 心理指标

人体心理指标包括热感觉、湿感觉、舒适感、热疲劳度等。主观评价通常是将人体的感觉用不同等级的标度表示,使心理感觉转化为可测量的物理量,通过问卷调查的方式收集大量受试者的感觉值,用数学方式分析人体的主观感受,从而评价降温服的降温效果^[28-29]。

3 个体降温服降温效果评价方法

个体降温服作为功能防护服装的一种,其评价方法和体系与功能防护服装一致,主要有主观评价和客观评价两大类,分为4种方法,即织物测试评价法、人体生理模型法、暖体假人实验法、真人着装实验法。其中织物测试评价方法与其他功能服装类似,文中重点阐述后面3种方法。

3.1 人体生理模型法

对于降温服,人体生理模型法一般通过模拟在高温环境中人体穿着降温服时的热湿传递,测量模型数值,近而对降温服的降温效果进行预测^[30]。若因操作困难而无法进行真人实验时,可以采用生理模型法预测人体在不同环境和着装条件下的生理变化,包括皮肤温度、核心温度、出汗量、心率等生理变量。

比较经典的模型是 Stolwijk 25 节点模型^[31] 和 Fiala 模型^[32]。自人体生理模型建立以来,不断得到修正,使模型可以在更广泛的环境状态、活动水平和服装条件下使用。HAVENITH G 等^[33] 提出了基于热感觉模型的人体-服装热交换模型,可以有效预测人体热感和热舒适感。CHAUDHURI T 等^[34] 研究了基于归一化皮肤温度的热舒适性预测模型,通过局部皮肤温度及其梯度,提出了一种热状态估计模型,其准确度为 87%。CHOI J H 等^[35] 提出一种热满意度预测模型,该模型证实了心率、7 个局部皮肤温度以及人为因素(如性别、年龄、BMI 等)与人体的热满意度之间的相关性,并显示出 88.52% 的准确度。PSIKUP A 等^[36] 提出将暖体假人和数学人体温度调节模型结合形成一种新的热生理人体模型,该模型克服了两个单独组件的局限性,可以评估降温服与人体之间复杂的热量与水分

传递,测试降温服对人体热生理状态长期和短期的影响。SANTOS M S 等^[37] 建立了衣下空间数值传热模型,研究了衣下空气层厚度对对流散热的影响,并证实衣下空气厚度对热传递的影响较大。

3.2 暖体假人实验

暖体假人实验是测试降温服降温效果的常用方法。通常按照 ISO 15831—2004^[38], ASTM F 291—1999^[39] 测试服装的热阻;按照 ISO 9920—2007^[40], ASTM F 2370—2015^[41] 测试服装的湿阻;按照 ASTM F 2371—2005^[42] 测量降温服的散热率,以此评价降温服的降温效应。

ZHAO M M 等^[43] 通过暖体假人实验测试了通风服中风扇安装位置及不同开口条件下的通风服降温效果,发现风扇置于前胸下部且服装前后均开口时,暖体假人的散热量最高,风扇所在位置对应的局部皮肤散热量最高。韦帆汝等^[44] 采用暖体假人实验测试了一款基于相变材料和通风风扇的混合降温服的降温效果(环境温度为 30 ± 0.5 °C,相对湿度 $47\% \pm 5\%$),实验借助暖体假人,采用干态测试(不出汗)和湿态测试(出汗)两种方法,结果表明当人体不出汗时,混合降温服主要由相变材料提供降温效果;当人体出汗量较大时,混合降温服主要由微型风扇提供降温效果,该混合降温服在两种条件下均能较好地为人体制冷。马瑞鑫^[45] 用暖体假人实验测试了一款适用于石油行业的降温服在 5.5 h 内的降温效果(环境温度为 37 °C,相对湿度 50%),结果显示暖体假人的皮肤温度在实验过程中保持在 33.5 ~ 34.2 °C,可使人体处于热舒适状态,表明该相变降温服可在 5.5 h 内满足石油行业工作环境的需求。YANG J 等^[46] 在温暖环境下通过恒温模式和温度调节模式的暖体假人实验,研究服装尺寸和通风速率对一款通风夹克降温效果的影响,结果表明服装尺寸和通风速率与通风夹克的降温效果呈正相关。

3.3 人体着装实验

3.3.1 人工环境仓实验 人体着装实验是最直接、最准确评价降温服效果的方法(见图 2)。BARTKOWIAK G^[47] 设计了一款可手动调节冷却液温度的主动式液体降温服,并采用真人着装实验采集受试者的皮肤温度、主观感受及衣下微气候物理参数,证实了该温度控制系统对液体降温服降温效果的增益性。郑晴等^[48] 采用真人着装实验,在温度 30 °C,相对湿度 80% 的高温高湿环境下对一款相变降温矿工服的降温效果进行测评,结果表明该降温服能显著降低受试者的局部皮肤温度及出汗量,

可有效缓解井下采矿工作者的热应激问题。SONG W 和 WANG F 等^[49-51]多次利用真人着装实验,在 32~36℃ 高温环境中对其开发的基于相变材料和通风风扇的混合降温服降温效果进行测评,研究发现与单一降温服相比,混合降温服中的通风风扇可以促进人体汗液的蒸发,加快蒸散和对流散热,同时保持 PCM 的显著冷却效果,并有效增加降温时长。



图2 真人着装实验

Fig.2 Human body wearing test

3.3.2 现场试穿实验 个体降温服的最终开发还需大量的现场试穿实验作为依托,在实际作业环境中评定其热湿舒适性是最为客观和准确的。CHAN A P 等^[52-53]在香港的建筑工地、马路和机场等场所进行了大量的现场试穿实验,测评在这些热环境中穿着降温服时的热舒适性,结果表明在实际作业环境中穿着降温服,能有效降低人体的热应激反应。但现场试穿实验局限性较大,影响因素较多,实验操作难度较大,且成本较高。

4 结 语

个体降温服降温效果的评价方法主要包括面料性能测试法、人体生理模型法、暖体假人实验法和真人着装实验法。这4种评价方法的繁简程度依次递增,实验成本也由低到高依次增加。通常依据实际条件和实验目的选取不同的实验方法,采用物理指标、生理指标和心理指标从主观和客观两个方面综合反映降温服的降温性能。但不同环境、不同降温服的评价具体使用何种评价指标,以及各个评价指标如何有机结合,目前还缺乏足够的理论和

实验依据。因此评价指标的选取与有机结合是建立科学合理的降温服降温效果评价体系的关键,也是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] GUO Y M, GASPARRINI A, ARMSTRONG B G, et al. Heat wave and mortality: a multicountry, multicomunity study[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(8): 1-11.
- [2] 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 Dust Control*, 2018, 44(6): 75-78. (in Chinese)
- [3] MOKHTARI Y M, SHEIKHZADEH M. Personal cooling garments; a review[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2014, 105(12): 1231-1250.
- [4] 李紫含, 王世杰, 徐伯乐, 等. 热防护服降温效果评价体系研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2018, 40(1): 16-20.
LI Zihan, WANG Shijie, XU Bole, et al. Study on evaluation system of thermal protective clothing cooling effect [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering)*, 2018, 40(1): 16-20. (in Chinese)
- [5] QIAN X. Prediction of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance[D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2005.
- [6] 陆丽娅, 张辉. 服装热湿舒适性评价指标及方法概述[J]. *纺织科技进展*, 2014(4): 58-61.
LU Liya, ZHANG Hui. Introduction for the evaluation indexes and methods of clothing thermal-wet comfort [J]. *Progress in Textile Science and Technology*, 2014(4): 58-61. (in Chinese)
- [7] 陈益松, 范金土, 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): 100-103.
CHEN Yisong, FAN Jintu, ZHANG Weiyuan. The novel perspiring manikin "Walter" and "one-step" measurement method [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2005, 31(3): 100-103. (in Chinese)
- [8] 张英, 胡琴, 李紫含, 等. 热防护服降温效果评价指标与方法研究进展[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(3): 46-49.
ZHANG Ying, HU Qin, LI Zihan, et al. Research progress on evaluation indicators and methods of cooling effect for thermal protective clothing [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(3): 46-49. (in Chinese)

- [9] 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): 79-82.
LI Luna, CHEN Lei, LIANG Yonghui, et al. Study on the filling quantity and placement of phase change materials with phase change temperature-lowering clothing[J]. New Technologies and Products, 2019(8): 79-82. (in Chinese)
- [10] GAO C S, KUKLANE K, HOLMER I. Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area [J]. Ergonomics, 2010, 53(5): 716-723.
- [11] CHINEVERE T D, CADARETTE B S, GOODMAN D A, et al. Efficacy of body ventilation system for reducing strain in warm and hot climates[J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 103(3): 307-314.
- [12] VERNIEUW C R, STEPHENSON L A, KOLKA M A. Thermal comfort and sensation in men wearing a cooling system controlled by skin temperature [J]. Human Factors, 2007, 49(6): 1033-1044.
- [13] LUY H, WEI F R, LAI D 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]. Extreme Physiology and Medicine, 2015, 4(1): 1-2.
- [14] CHAN A P C, 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(7): 21-27.
- [15] 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.
- [16] WEBBON B, MONTGOMERY L, MILLER L, et al. A comparison of three liquid-ventilation cooling garments during treadmill exercise [J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1981, 52(7): 408-415.
- [17] BEIKO K. Evaluation of personal cooling systems explosive ordnance disposal suits [R]. Canada: Canadian Police Research Center, 1993.
- [18] 张昭华. 防护服热湿舒适性的研究进展[J]. 中国个体防护装备, 2008(5): 22-26.
ZHANG Zhaohua. Research development of thermal and moisture comfort of protective clothing [J]. China Personal Protection Equipment, 2008(5): 22-26. (in Chinese)
- [19] 李利娜, 钱晓明, 范金土. 冷却服的冷却性能测试与分析[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(5): 47-50.
LI Lina, QIAN Xiaoming, FAN Jintu. Test and analysis of cooling performance of cooling garments [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2008, 27(5): 47-50. (in Chinese)
- [20] International organization for standardization. Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of heat stress using the predicted heat strain model: ISO 7933—2018[S]. Geneva: International organization for standardization, 2018.
- [21] MITCHELL D, WYNNDHAM C H, ATKINS A R, et al. Direct measurement of the thermal responses of nude resting men in dry environments [J]. Pflügers Archiv, 1968, 303(4): 324-343.
- [22] BURTON A C. Human calorimetry. II The average temperature of the tissue of the body [J]. Journal of Nutrition, 1935, 9(3): 281-300.
- [23] RAMANATHAN N L. A new weighting system for mean-surface temperature of the human body [J]. Journal of Applied Physiology, 1964, 19(3): 531-533.
- [24] HARDY J D. The technic of measuring radiation and convection one figure [J]. The Journal of Nutrition, 1938, 15(5): 461-475.
- [25] WINSLOW C E A, HERRINGTON L P, et al. A new method of partitioned calorimetry [J]. American Journal of Physiology, 1936, 116(3): 641-655.
- [26] International Organization for Standardization. Ergonomics—evaluation of thermal strain by physiological measurements. International Organization for Standardization: ISO 9886—2004[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.
- [27] MORAN D S, SHITZER A, PANDOLF K B. A physiological strain index to evaluate heat stress [J]. The American Journal of Physiology, 1998, 275(1): 129-134.
- [28] 徐子龙. 偏热环境下人体热舒适研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2015.
- [29] 张渭源. 服装舒适性与功能[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2005.
- [30] 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)
- [31] JAN A J, STOLWI J K, HARDY J D. Control of body temperature [M]// Comprehensive Physiology. USA: John Wiley and Sons, Inc. 2011.
- [32] DUSAN F, LOMAS K J, MARTIN S. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system [J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 87(5): 1957-1972.
- [33] HAVENITH G, FIALA D. Thermal indices and ther-

- mophysiological modeling for heat stress [J]. *Comprehensive Physiology*, 2016(6):255-302.
- [34] CHAUDHURI T, ZHAI D Q, SOH Y C, et al. Thermal comfort prediction using normalized skin temperature in a uniform built environment [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 159(15):426-440.
- [35] CHOI J H, YEOM D. Development of the data-driven thermal satisfaction prediction model as a function of human physiological responses in a built environment [J]. *Building and Environment*, 2019, 150(4):206-218.
- [36] PSIKUTA A, KOELBLE B, MERT E, et al. An integrated approach to develop, validate and operate thermophysiological human simulator for the development of protective clothing [J]. *Industrial Health*, 2017, 55(6):500-512.
- [37] SANTOS M S, OLIVEIRA D, CAMPOS J B L, et al. Numerical analysis of the flow and heat transfer in cylindrical clothing microclimates-Influence of the microclimate thickness ratio [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117(2):71-79.
- [38] International Organization of Standards. Clothing-physiological effects-measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin; ISO 15831—2004 [S]. Geneva: International Organization of Standards, 2004.
- [39] American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring the thermal insulation of clothing using a heated manikin; ASTM F1291—16 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2016.
- [40] International Organization for Standardization. Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble; ISO 9920—2007 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [41] American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring the evaporative resistance of clothing using a sweating manikin; ASTM F 2370—2016 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2016.
- [42] American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring the heat removal rate of personal cooling systems using a sweating heated manikin; ASTM F 2371—2005 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [43] ZHAO M M, GAO C S, WANG F M, 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(3):232-237.
- [44] 韦帆汝, 王发明. 基于相变材料与微型通风风扇的新型个体混合冷却服在温热环境下的制冷效果研究 [J]. *丝绸*, 2016, 53(3):1-8.
- WEI Fanru, WANG Faming. The cooling performance of a portable hybrid personal cooling system (PCS) based on phase change materials and micro-ventilation fans in a warm environment [J]. *Journal of Silk*, 2016, 53(3):1-8. (in Chinese)
- [45] 马瑞鑫. 基于相变材料的石油行业防热降温装备研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [46] YANG J, WANG F M, SONG G W, et al. Effects of clothing size and air ventilation rate on cooling performance of air ventilation clothing in a warm condition [J]. *Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2020, 29(4):316.
- [47] BARTKOWIAK G, DABROWSKA A, MARSZALEK A. Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment [J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 58(1):182-189.
- [48] 郑晴, 王宏付, 柯莹, 等. 相变降温矿工服的设计与评价 [J]. *纺织学报*, 2020, 41(3):124-129.
- ZHENG Qing, WANG Hongfu, KE Ying, et al. Design and evaluation of cooling clothing by phase change materials for miners [J]. *Journal of Textile Research*, 2020, 41(3):124-129. (in Chinese)
- [49] 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 [J]. *Ergonomics*, 2015(8):1009-1018.
- [50] 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(2):92-101.
- [51] WANG F, SONG W F. An investigation of thermophysiological responses of human while using four personal cooling strategies during heatwaves [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2017, 70(5):37-44.
- [52] 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(7):21-27.
- [53] 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.

(责任编辑: 卢杰)