

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180405806

# 通风服热舒适性研究现状与展望

赵蒙蒙<sup>1</sup>, 柯莹<sup>2</sup>, 王发明<sup>3</sup>, 李俊<sup>4,5</sup>

- (1. 上海工程技术大学 服装学院, 上海 201620; 2. 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122;  
3. 香港理工大学 纺织及服装学系, 香港 999077; 4. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051;  
5. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

**摘要** 为揭示通风服对人体热舒适影响的机制, 阐明通风服与人体之间的热湿传递关系, 在介绍通风服的起源和工作原理的基础上, 通过对国内外相关研究成果的分析和总结, 重点论述了通风服热舒适性的研究方法: 出汗暖体假人测试法、人体着装实验法和数值模型构建法, 并分析了各种方法的优缺点。结果表明, 通风服对人体热舒适的影响机制是一门集环境传热学、人体生理传热学、服装面料学以及流体力学交叉结合的工程问题。最后对通风服热舒适性研究进行了展望, 认为未来将在通风服衣下气流的精确测量与仿真、衣下气流和热流数值模型的构建以及通风引起的局部和整体热舒适不匀等方面开展研究。

**关键词** 通风服; 热舒适性; 暖体假人; 真人着装

中图分类号: TS 941.731 文献标志码: A

## Research and development trend of ventilation clothing thermal comfort

ZHAO Mengmeng<sup>1</sup>, KE Ying<sup>2</sup>, WANG Faming<sup>3</sup>, LI Jun<sup>4,5</sup>

- (1. Fashion College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;  
2. College of Textiles and Clothing, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;  
3. Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;  
4. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China;  
5. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract** In order to reveal the mechanism of the ventilation clothing thermal comfort and explain the relationship of the heat and mass transfer between the ventilation clothing and the human body, the paper first introduced the origin and the working principle of the ventilation clothing and then explained the studying methods of the ventilation clothing thermal comfort by analyzing and concluding related researches of home and abroad. The studying methods included sweating thermal manikin measurements, human trials and mathematic models. The advantages and disadvantages of these studying methods were discussed. Results show that the mechanism of the thermal comfort of the ventilation clothing is an interdisciplinary engineering issue integrating environmental heat transfer, human physiological heat transfer, textile and clothing heat transfer and fluid dynamics. Finally, the paper prospected future researches of the ventilation clothing. Future researches will include accurate measurements of the air flow, the construction of the numerical models and the local and overall thermal comfort caused by the ventilation, etc.

**Keywords** ventilation clothing; thermal comfort; sweating thermal manikin; human trial

当前, 气候变暖成为全球关注的议题, 这意味着人类将暴露于更高的热环境中<sup>[1-2]</sup>。受热环境的影

响, 人体皮肤温度会升高、血流会加速, 脱水、中暑等热疾病将会影响工作效率、危害身体健康, 尤其是消

收稿日期: 2018-04-25 修回日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51506076); 教育部人文社会科学研究一般项目青年项目(17YJC760120); 闽江学院现代服装技术协同创新中心开放基金项目(MJKFFZ201702)

第一作者: 赵蒙蒙(1985—), 女, 副教授, 博士。主要研究方向为服装工效与生理学。

通信作者: 李俊(1970—), 男, 教授, 博士。主要研究方向为功能与防护服装、服装工效学。E-mail: lijun@dhu.edu.cn。

防、煤矿、建筑等特殊行业的从业人员<sup>[3-4]</sup>。目前，通常使用空调制冷设备，引进建筑通风系统以降低高温环境对人员的影响<sup>[5-7]</sup>。然而，这类降温措施能耗高、冷源需安装于具体设备上，限制了其使用范围，而节能高效、健康舒适的生存环境是人类普遍追求的趋势。

服装作为第二皮肤，对于调节人体热舒适起着非常重要的作用。在能源紧张、公共安全日益突出的背景下，智能化可穿戴服装成为发展趋势。基于服装人体工效学应运而生的可穿戴式调温服装能弥补热环境中人体生理热调节的不足，给着装者带来额外的保护，如通风服。

通风服早期主要用于军队、航天领域，用来减小士兵、航天员所遭受的高温热应激（Heat Strain）<sup>[8-9]</sup>，后来也被应用于室内办公、户外休闲、建筑工地等民用领域<sup>[10-12]</sup>，因此，热环境中通风服着装热舒适机制的研究具有良好的社会价值和经济效益。本文分析和总结了国内外相关研究成果，重点简述了通风服热舒适性的研究方法，展望了未来通风服热舒适性研究的聚焦点，以为通风服热舒适性的研究提供重要的理论参考。

### 1 通风服的起源

服装通风的概念最早由 Crockford 于 1972 年提出，是指衣下微环境与外界环境间的空气交换，实现皮肤表面与环境间的热量交换<sup>[13]</sup>。20 世纪八九十年代，美国陆军环境医学研究所将这种概念应用于军队装备中，如图 1 所示。通过在军服中配置微型风扇，利用风扇鼓风产生强制气流，以减小士兵穿着多层防护服、进行高温训练或执行任务时遭受的热应激，这种类型的服装被称为通风服<sup>[7]</sup>。后来，国内外相继在这方面开展了大量的研究。

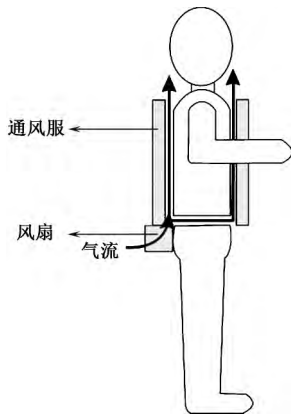


图 1 通风服示意图

Fig.1 Illustration of ventilation clothing

### 2 通风服热舒适性研究方法

服装衣下气流、热流的运动传递机制受到热环境、服装、人体生理热调控多个因素的影响，是一项复杂、系统的工程问题，如图 2 所示。

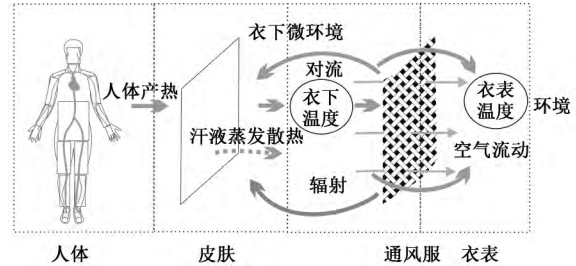


图 2 人体-通风服传热系统

Fig.2 Heat exchange of human ventilation clothing

通常采用客观物理实验测试法研究环境中通风服的着装热舒适机制，包括 3 种方法：出汗暖体假人法<sup>[13-14]</sup>、人体着装测试法<sup>[15-17]</sup>以及数值模型法。出汗暖体假人测试能客观表征服装的热阻、通风散热量，但不能表征人体的热生理指标；真人着装实验<sup>[18-19]</sup>可客观评价服装对人体的影响，获得反映热舒适的一系列生理指标，但受实验条件变化影响，且涉及到人体实验道德准则。真人着装实验可重复性差、费用高；数值模型法<sup>[20-22]</sup>可模拟通风服与人体之间的气流、热流交换，但模型的构建受到通风物理参数、热环境和服装多个因素的影响。

### 3 客观物理实验法

#### 3.1 服装整体通风

早期研究人员主要致力于服装整体通风量化，通常采用示踪气体法测量获得。用一种扩散性能与空气接近但更容易观测的气体作为示踪气体，通过监测衣下空间气体浓度的变化得到通风量。示踪气体法主要有 Crockford 的非稳态法<sup>[13]</sup>和 Havenith 的稳态法<sup>[23]</sup>。前者的测量分 2 步：测量衣下空间的体积及测量衣下空间的气体交换率。后者不断将示踪气体注入到衣下空间，使衣下空间的气体浓度不断升高直至达到平衡，由于通风引起的示踪气体排出量等于注入量。前者测量步骤较多，较后者复杂。

#### 3.2 服装局部通风

由于服装、人体局部的差异，局部通风测量成为后来的关注焦点。2006 年，Ueda 等<sup>[24]</sup>基于 Crockford 的方法建立了局部通风测量装置，可测量衬衫前胸、后背和上臂的通风量。该方法仅限于服

装局部通风,若要获得服装整体通风,则需要重新设计装置系统。之后,柯莹等<sup>[25]</sup>基于 Havenith 的方法改进了测量装置,采用  $N_2$  作为示踪气体,可同时或单独测量服装前胸、后背、左右臂的通风量,如图3所示。该方法还可通过加权平均法计算获得服装整体通风。

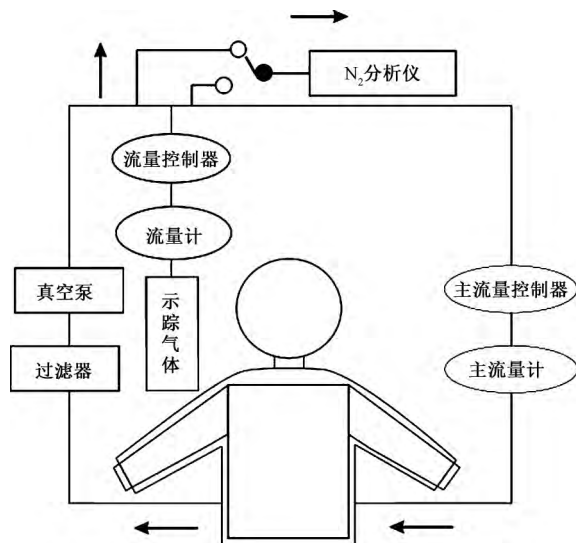


图3 采用示踪气体法测量服装局部通风

Fig.3 Local ventilation measurement by gas tracer method

### 3.3 通风服降温性能

通常采用出汗暖体假人实验来测试和评价通风服的降温性能。Zhao等<sup>[11]</sup>通过出汗暖体假人实验测试了风扇安装于服装不同部位和不同开口条件下的通风服降温效果。研究发现:风扇配置于前胸下部且衣身前后都开口的条件下,暖体假人散热量最高;风扇安装于衣身某局部部位时,相应部位的散热量最高。

由于采用微型风扇的通风服使用条件有限, Lu等<sup>[12]</sup>研究了风扇和相变材料(PCM)组合的服装的降温效果。通过采用2种不同控制模式的出汗暖体假人实验发现,通风极大地提高了蒸发散热,PCM和风扇组合的降温服可发挥2种不同冷源的降温优势。

Yi等<sup>[13]</sup>研究了采用2种不同通风系统(供电电源为AA电池和锂电池)的通风服的降温效果。结果表明:供电压不同导致风扇的通风强度不同;锂电池带来的通风率、可持续降温时间和躯干散热明显高于AA电池。

Wang等<sup>[14]</sup>也通过设置2种不同的控制模式,采用出汗暖体假人实验研究了不同降温服装的降温效果。由于实验条件的设置不同,这些采用出汗暖体假人实验进行通风服热舒适性的研究可比性较差。

## 4 人体着装实验法

人体着装实验是最直接、最客观的评价通风服对人体热舒适影响的方法,可获得反映热舒适的一系列生理和心理指标。人体着装实验又分为人工气候室模拟法与室外现场实验法。人工气候室可模拟不同的冷热环境,实验条件易控制、误差小;室外现场实验受气候条件的影响,实验条件误差较大,成本较高。

### 4.1 人工气候室模拟法

Hadid等<sup>[15]</sup>分别在40℃高温、40%相对湿度与35℃高温、60%相对湿度的人工气候室中,评价了受试者穿着士兵作战服、通风背心(通风量为360 L/min)时的热应激。Chinevere等<sup>[16]</sup>通过设置3种高温环境,研究了穿着士兵作战服中的通风背心(通风量为1.1 m/s)时的降温效果。2项研究都通过测量受试者的皮肤温度、体核温度、心率、感知疲劳度等生理指标和主观感觉来进行,研究表明这几种环境条件下受试者的热应激均得到降低。

### 4.2 室外着装测试法

Song等<sup>[17]</sup>通过人工气候室模拟了34℃的高温室内办公环境,研究了穿着通风和PCM组合的降温服对热舒适的影响。研究发现,该降温服使受试者的平均皮肤温度和出汗量明显降低,改善了受试者的整体热感觉、皮肤湿感和热舒适感。

Chan等<sup>[18-19]</sup>通过大量室外着装实验,研究了夏季香港地区建筑工地、环卫清洁、机场服务人员穿着类似的降温服对热舒适的影响。通过测量记录受试者的主观热感觉、热舒适感,表明穿着降温服受试者的热感觉明显低于穿着普通作业服时的热感觉。

如前所述,由于热环境条件设置不同,这些研究结果的可比性有待考证。

## 5 通风服-人体数值模型法

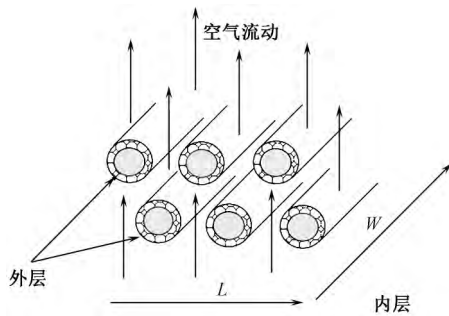
### 5.1 服装传热模型

自从Henry<sup>[26]</sup>首次提出动态条件下织物的热传递模型后,国内外研究人员在服装传热机制方面开展了大量的工作,模型的构建也越来越复杂。

Farnworth<sup>[27]</sup>基于出汗热平板仪实验,将织物的湿传递加入模型中。Li等<sup>[28]</sup>提出了2阶段模型来描述羊毛织物的热湿变化。

之后,研究人员将衣下自然对流以及因人体运动产生的强制对流加入模型中。Ghali等<sup>[29]</sup>将织物简化为多个纤维圆柱体的组合,建立了强制气流下

的织物传热模型,如图 4 所示。该模型将织物简化为多个纤维交织在一起的组合,假设每根纤维为一个长圆柱,圆柱由内部的固态纤维层(内层)和外部的空气层(外层)组成,纤维之间以及纤维外层有空气流动。



L 表示织物长度; W 表示织物宽度。

图 4 织物纤维通风传热模型

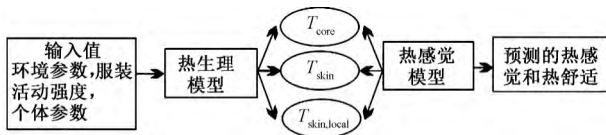
Fig.4 Ventilation and heat transfer in textile fibers

Santos 等<sup>[30]</sup>研究了衣下空气层厚度带来的对流散热的影响,建立了衣下微气候数值传热模型。研究发现,衣下空气厚度对热传递的影响比较大。

### 5.2 人体传热模型

上述数值模型关注的都是服装与环境之间的热量传递,未考虑人体的热生理调控。自从 Pennes<sup>[31]</sup>提出生物组织传热方程后,首次将生物组织与其他材料区分开来。研究人员基于 Pennes 的生物传热方程,将人体热生理调控加入模型中。通过将人体划分为不同的节段,加入血液循环,构建了多节点、多维的人体传热模型,例如 Gagge 等<sup>[32]</sup>的 2 节点模型、Tanabe 等<sup>[33]</sup>的多节点模型。

基于上述模型,加入服装传热,使服装与人体之间的传热模型越来越庞大,最为经典的代表是人体-服装热交换模型<sup>[34]</sup>。与前面的人体传热模型相比,该模型融合了人体热感觉模型,可预测人体热感觉和热舒适,如图 5 所示。



$T_{skin}$  为人体皮肤温度;  $T_{core}$  为人体核心温度;

$T_{skin,local}$  为人体皮肤局部区段温度。

图 5 人体-服装-热生理模型

Fig.5 Human, clothing and thermophysiological model

### 5.3 通风服-人体传热模型

通风服作为具有调温功能的服装,是当前的研究热点。李珩等<sup>[9]</sup>分析了全身通风条件下的人体-通风服传热模型。

曾彦彰等<sup>[9]</sup>基于 Pennes 生物传热方程,求解了引入微型风扇的通风服后人体的皮肤温度。然而,该模型未考虑风扇变化带来的通风变化,因而模型的适用性有待考察。

Sun 等<sup>[20]</sup>建立了通风服热流、气流传递的数值模型,分析对比了采用不同大小和数量的风扇带来的皮肤温度变化,分析了风速对传热性能的影响。

Ismail 等<sup>[21-22]</sup>通过构建数值模型,分析了不同行走速度下通风服上臂与躯干的通风率、空气传热,使模型更加接近真实穿着状态。与前面的研究相比,该研究还分析了服装局部通风传热,研究更加细化,为探索通风服局部传热提供了理论参考。

## 6 研究展望

1) 通过示踪气体法测量可获得服装某局部区段的通风量,然而对人体其他重要部位,如颈部、腹部等对通风刺激敏感的部位,通风量的测量尚未研究。其次,风扇鼓风形成的紊气流在衣下流动,使衣下空间尺寸变大,加之人体生理曲面不规则,紊气流在衣下以及人体各局段的分布是不均匀的,因此,未来需要合理量化通风服各局部区段的通风。

2) 虽然已有大量的工作研究了热环境中人体表面气流、热流的运动和传递机制,由于聚焦点不同,每项研究在构建体表气流、热流数值模型时采用的理论模型和边界条件不同,因此研究成果的可比性和适用性对于通风服有待考证。

3) 气体在人体表面流动会产生吹风感,对于吹风感的研究主要集中于建筑环境中工位送风对热舒适的研究,而关于通风服对人体吹风感的影响尚未见报道。这主要有 2 方面的原因:前人关注于通风服的降温效果,主要表现为对热生理参数的影响;用主观热感觉和热舒适感来量化热生理和心理的交互作用,掩盖了吹风感是热感觉、热舒适感的起因要素。因此,未来需要对通风服吹风感以及通风引起的局部和整体热舒适不匀的问题进行深入研究。

FZXB

### 参考文献:

[1] 祁新华,程煜,郑雪梅,等. 国内高温热浪研究进展及其人文转向[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(1): 26-31.  
 QI Xinhua, CHENG Yu, ZHENG Xuemei, et al. Heat waves research: its progress and human dimension turning in China [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2017, 12(1): 26-31.  
 [2] KJELLSTROM T, HOLMER I, LEMKE B. Workplace

- heat stress, health and productivity: an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change [J]. *Global Health Action*, 2009, 2(1): 46-51.
- [3] NUNNELEY S A. Heat stress in protective clothing: interactions among physical and physiological factors [J]. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1989, 15: 52-57.
- [4] HOLMER I. Protective clothing and heat stress [J]. *Ergonomics*, 1995, 38: 166-182.
- [5] 任雨婷, 端木林, 金权. 基于等效温度的工位空调环境下热舒适区研究 [J]. *暖通空调*, 2016, 46(5): 101-107.  
REN Yuting, DUAN Mulin, JIN Quan. Thermal comfort zone study based on equivalent temperature under task air conditioning system [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2016, 46(5): 101-107.
- [6] 王月梅, 连之伟. 胸部送风工位空调下的吹风感实验研究 [J]. *建筑热能通风空调*, 2016, 35(8): 1-5.  
WANG Yuemei, LIAN Zhiwei. Experimental study on the draft of the task ambient air conditioning with chest exposure [J]. *Building Energy & Environment*, 2016, 35(8): 1-5.
- [7] 郭爽, 赵敬德, 李林林, 等. 稳态环境下个体送风人体热舒适数值模拟 [J]. *建筑热能通风空调*, 2016, 35(7): 29-32.  
GUO Shuang, ZHAO Jingde, LI Linlin, et al. Numerical simulation study on thermal comfort of human body with personalized ventilation in steady situation [J]. *Building Energy & Environment*, 2016, 35(7): 29-32.
- [8] XU X, GONZALEZ J. Determination of the cooling capacity for body ventilation system [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(12): 3155-3160.
- [9] 李珩, 邱义芬, 姜南, 等. 通风温度对全身通风服热防护性能影响研究 [J]. *航天医学与医学工程*, 2014, 27(3): 205-209.  
LI Yan, QU Yifen, JIANG Nan, et al. Effects of ventilation temperature on thermal protection performance of general ventilation garment [J]. *Space Medicine and Medical Engineering*, 2014, 27(3): 205-209.
- [10] 曾彦彰, 邓中山, 刘静. 基于微型风扇阵列系统的人体降温空调服 [J]. *纺织学报*, 2007, 28(6): 100-105.  
ZENG Yanzhang, DENG Zhongshan, LIU Jing. Micro-fan-array system enabled air conditioning suit for cooling human body [J]. *Journal of the Textile Research*, 2007, 28(6): 100-105.
- [11] 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.
- [12] LU Y, WEN 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: 137-14.
- [13] YI W, ZHAO Y, CHAN APC. Evaluation of the ventilation unit for personal cooling system (PCS) [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2017, 58: 62-68.
- [14] 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.
- [15] HADID A, YANOVICH R, ERLICH T, et al. Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing a ballistic vest [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 104: 311-319.
- [16] CHINEVERE T, CADARETTE B, GOODMAN D, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] ISMAIL N, GHADDAR N, GHALI K. A clothing ventilation and heat loss electric circuit model with natural convection for a clothed swinging arm of a walking human [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2019, 40(3/4): 330-345.
- [22] ISMAIL N, GHADDAR N, GHALI K. Effect of inter-segmental air exchanges on local and overall clothing ventilation [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 86(4): 423-439.
- [23] HAVENITH G, ZHANG P, HATCHER K. Comparison of two tracer gas dilution methods for the determination of clothing ventilation and of vapor resistance [J]. *Ergonomics*, 2010, 53(4): 548-558.

- [24] UEDA H , INOUE Y , MATSUDAIRA M. Regional microclimate humidity of clothing during light work as a result of the interaction between local sweat production and ventilation [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology* , 2006 , 18 ( 3/4 ) : 225-234.
- [25] 柯莹 HAVENITH G 李俊 等. 服装整体及其局部的通风测量方法[J]. *纺织学报* , 2014 , 35( 7 ) : 134-139.  
KE Ying , HAVENITH G , LI Jun , et al. Method for measuring whole and local clothing ventilation [J]. *Journal of Textile Research* , 2014 , 35( 7 ) : 134-139.
- [26] HENRY P S H. Diffusion in absorbing media [J]. *Mathematical and Physical Sciences* , 1939 , 171A: 215-241.
- [27] FARNWORTH B. A numerical model of the combined diffusion of heat and water vapor through clothing [J]. *Textile Research Journal* , 1986 , 56: 653-664.
- [28] LI Y , HOLCOMBLE B V. A two-stage sorption model of the coupled diffusion into hygroscopic fabric during humidity transients [J]. *Journal of The Textile Institute* , 1992 , 62( 4 ) : 211-217.
- [29] GHALI K , GHADDAR N , JONES B. Modeling of heat and moisture transport by periodic ventilation of thin cotton fibrous media [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 2002 , 45: 3703-3714.
- [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] GAGGE A P , STOLWIJK J A J , NISHI Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [J]. *ASHRAE Transactions* 1971 , 77( 1 ) : 247-62.
- [33] TABABE S , KOBAYASHI K , NAKANO J , et al. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation ( 65MN ) and radiation models and computational fluid dynamics ( CFD ) [J]. *Energy and Buildings* , 2002 , 34: 637-46.
- [34] HAVENITH G , FIALA D. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress [J]. *Comprehensive Physiology* , 2016( 6 ) : 255-302.