

服装衣下空气层热传递性能研究进展

姜茸凡^{1,2}, 王云仪^{1a,2}

(1. 东华大学 a. 服装与艺术设计学院; b. 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051;
2. 西安工程大学 服装与艺术设计学院, 西安 710048)

摘要: 为探究衣下空气层对于服装系统热传递性能的影响, 文章介绍了衣下空气层的热传递机制, 概括了三种衣下空气层对于服装隔热性能影响的研究方法, 即热平板测试、假人测试和数值模拟, 论述了各研究方法的优点与不足。根据研究方法, 从厚度、体积、位置、方向、非均匀形态和运动状态六方面分析了衣下空气层对服装热传递性能的影响。基于目前研究现状, 针对研究方法和研究内容的不足提出两点展望, 即研究非均匀衣下空气层对于服装系统热传递的影响, 发展厚重服装和多层服装的衣下空气层的测量方法。

关键词: 衣下空气层; 热传递性能; 三维人体测量法; 服装; 暖体假人

中图分类号: TS941.17 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2018)07-0041-08 引用页码: 071107

Research progress of heat transfer performance of air layer entrapped in clothing

JIANG Rongfan^{1,2}, WANG Yunyi^{1a,2}

(1a. College of Apparel and Art Design; 1b. Key Laboratory of Clothing Design & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Apparel & Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: To explore the effect of air layer entrapped in clothing on heat transfer performance, the heat transfer mechanism of air layer was introduced in the study. The three kinds of research methods, their respective advantages and disadvantages were reviewed, including hot plate testing, manikin testing and numerical modeling. The advantages and disadvantages of research methods were discussed. According to the research methods, the influence of thickness, volume, location, direction, geometrical form and motion state on the clothing heat transfer performance was analyzed. Based on current research status, the two outlooks were proposed for the deficiency of research methods and research methods, i. e. to study the effect of non-heterogeneous air layer entrapped in clothing on heat transfer performance, and to develop measurement methods of air layer of thick clothing and multilayer clothing.

Key words: air layer entrapped in clothing; heat transfer performance; 3D body measuring; clothing; the thermal manikin

对于单层服装, 衣下空气层仅指人体皮肤表面与服装内表面之间的微小空气层, 而对于多层服装系统, 衣下空气层还包括服装层与层之间的空气层^[1-2]。由于空气的导热系数远小于纤维的导热系数, 所以, 静止的空气具有良好的隔热性能。在防护服装的款式设计中, 有效地增大衣下空气层, 既能提高防寒服装的保温性能, 也能增强高温防护服装的

热防护性能。因此, 衣下空气层被国内外学者广泛地关注并进行了深入研究。

本文以衣下空气层为研究对象, 介绍衣下空气层的传热机制、热传递性能测试方法及其优缺点, 分析影响热传递性能的六个因素, 并对研究趋势提出两点展望。

1 衣下空气层传热机制

全面地剖析衣下空气层的传热机制, 有助于建立准确的服装传热模型, 理解各因素(厚度、体积等)对于衣下空气层传热性能的影响。衣下空气层的传

收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2018-05-08

作者简介: 姜茸凡(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为服装舒适性与功能设计。通信作者: 王云仪, 教授, wangyunyi@dhu.edu.cn。

热方式包括传导、对流和辐射,空气的流动状态决定着空气层传导或对流的传热方式,空气层的几何形状影响着辐射的换热系数。

1.1 传导或对流传热

空气的流动状态分为静止、层流和湍流,在不同流动状态下,衣下空气层的传热方式不同。在传热学中,空气的流动状态可根据瑞利数 Ra 进行判定^[3],即

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T\delta^3}{\alpha\nu} \quad (1)$$

式中: Ra 为无量纲系数; δ 为衣下空气层厚度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ΔT 为空气层边界的温度差, K ; β 为体积膨胀系数,即空气的绝对温度的倒数, K^{-1} ; α 为空气热扩散系数, m^2/s ; ν 为空气动力黏度, m^2/s 。

文献[4]通过研究底部加热的水平矩形腔体内的空气流动状态发现,在矩形腔体的长度和宽度远大于厚度时,若 $Ra \leq 1700$,矩形腔体内空气处于静止状态;若 $1700 < Ra \leq 5 \times 10^4$,空气处于层流状态(矩形环形流动);若 $Ra > 5 \times 10^4$,空气处于湍流状态。在织物系统隔热性能测试中,热平板与织物之间的空气层类似于一个底部加热的水平矩形腔体。所以,学者们^[1-5]针对热平板测试建立的“织物层-空气层”热传递模型,一般多采用 $Ra = 1700$ 作为判定衣下空气层是否存在自然对流的依据。若空气处于静止状态,可根据傅里叶导热定律建立衣下空气层传热模型;若空气处于层流或湍流状态,可根据牛顿冷却公式建立传热模型。

1.2 辐射传热

空气的主要成分是氮气和氧气,两种气体都不发生辐射,在不考虑 CO_2 和水蒸气等极性分子时,可将空气视为透明体,根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,发现影响其辐射热传递性能的主要因素是服装与皮肤两表面之间的视角系数。对于热平板测试建立的传热模型^[6],织物与热平板之间处于平行状态且表面积相等,其视角系数为1;对于热圆筒测试建立的传热模型^[6],内圆筒为皮肤层,外圆筒为织物层,其视角系数为内圆半径与外圆半径之比;对于暖体假人^[7]测试,由于受人体体表形态^[8]、服装款式^[9]和面料力学性能^[10]的影响,衣下空气层分布是非均匀的,需要根据视角系数关系式定积分求取视角系数。

2 衣下空气层热传递测试

为研究衣下空气层对服装系统热传递性能的影响,

学者们针对各影响因素进行了大量实验及模型研究,研究方法可概括为热平板测试、假人测试和数值模拟。

2.1 热平板测试

热平板测试用于研究织物系统(皮肤层-空气层-织物层-外界环境)的热传递性能。测试装置一般是对现有织物热传递性能测试装置(如出汗热平板仪)的改进,主要包括:可模拟皮肤温度的热平板、防止热量从侧面和底部散失的隔热保温板、可模拟不同厚度的衣下间隔板、温度传感器、热流传感器和人工气候箱。为了防止面料由于自重而下垂影响衣下空气层,还会在分隔板上利用强力尼龙纱线制成网格状,以托起面料,保证衣下空气层厚度的准确,如图1所示。

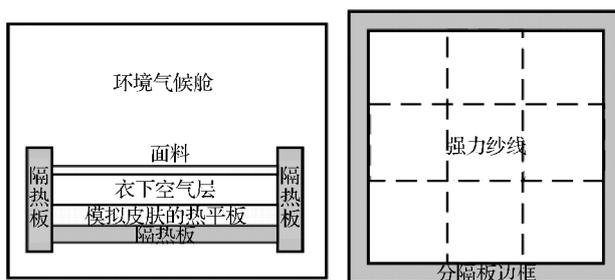


图1 热平板测试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of hot plate device

该方法可通过模拟不同厚度的衣下空气层测试织物系统热阻,定量地分析衣下空气层厚度与织物系统热阻之间的关系,并可建立衣下空气层厚度和织物系统热阻之间的线性回归方程^[11]。此外,还可对织物层与层之间增加不同厚度的分隔板,用以研究各层空气层的大小及其空气层处于织物系统的位置对于多层织物系统热传递性能的影响^[12]。但是,平板测试仅是在织物层面上进行分析,衣下空气层为封闭的矩形腔体,这与实际并不相符,因此,在织物层面上的研究并不能全面地反映衣下空气层的隔热性能,仍需考虑其他因素的影响。

2.2 假人测试

假人测试用于研究服装系统(皮肤层-衣下空气层-服装层-外界环境)隔热性能与衣下空气层体积和厚度的关系。测试系统包括:三维人体测量系统和假人系统。

学者们^[13-15]利用三维人体测量系统测量衣下空气层的体积和厚度,其步骤是先对人体模特的裸体形态和着装形态进行三维扫描,获取两种形态的点

云数据,再利用逆向工程软件对其进行封装、修复和填充孔以获得两种形态的三维曲面模型,最后将两者进行对齐、3D 比较和 2D 比较,获得衣下空气层厚度和体积。假人系统可被应用于测试服装系统隔热性能,如暖体假人、燃烧假人^[16]等。为保证实验研究的有效性,一般要求三维扫描中的人体模特应与测试服装隔热性能的假人体型相同或相似,以保证前后研究的是同一衣下空气层。同时,由于服装需要分别穿脱在人体模特和假人身上,前后两次穿脱仍会使衣下空气层形态产生差异。因此,Wang 等^[17]提出将三维人体测量系统与假人系统搭建在同一操作平台下,以避免“二次穿脱”造成的测量误差,提高了测试的准确性。

学者们^[18-20]已经利用此方法研究了衣下空气层体积或厚度和服装的隔热性能之间的关系,并建立了相关的线性回归方程。由于假人测试是基于服装层面上讨论的,其研究结果更具有实际意义。但是,三维人体测量法获取的衣下空气层是服装外表面到人体表面之间的空间形态,忽略了面料厚度对于衣下空气层的干扰,因此,测量方法仅适用于面料较薄的单层服装,不适用于面料较厚或多层面料组合的服装。

为排除面料厚度的干扰,Chen 等^[21]利用 KES-F (Kawabata Evaluation System for Fabric) 系统测量了加压(50 gf/cm²) 状态的面料厚度,并将其从衣下空气层厚度中减去,以获取更真实的衣下空气层。但是,着装状态下,服装各部位面料所受的压强并不相同,厚度也不相同。因此,此方法不能较好地反映厚重服装的衣下空气层的真实分布。为测量多层面料

组合服装的衣下空气层和服装层与层之间的空气层,Mcquerry 等^[22]将三层消防服(从外到内依次是最外层、防水透气层和隔热层)拆分为三件单层服装,再逐一测量单层服装的衣下空气层。但是,受面料性能和重力的影响,三件单层服装获取的衣下空气层与三层消防服的衣下空气层差异性很大。例如,测试中防水透气层的衣下空气层厚度为 37.2 mm,而隔热层为 39.7 mm,外层服装的衣下空气层厚度反比内层小,测量存在误差。所以,测量面料较厚或多层面料组合的服装的衣下空气层仍是该领域的难点,关于假人测试的研究多集中于单层轻薄服装层面进行讨论。

2.3 数值模拟

随着计算机仿真建模技术的发展,数值模型已经应用到各个领域。学者们通过搭建数值热传递模型研究多种因素(厚度、体积等)对于衣下空气层隔热性能的影响。研究步骤是利用计算机建模技术构建“皮肤层-衣下空气层-织物层/服装层-外界环境”的热传递模型,再通过数值计算求解传热模型,并基于实验研究验证模型的可靠性,最后,利用构建的热传递模型分析各因素对于衣下空气层隔热性能的影响。

平板测试和假人测试仅能定性或定量地研究各因素对于衣下空气层隔热性能的影响,而数值模拟则在此基础上更进一步诠释衣下空气层的热传递机制。因此,学者们对于衣下空气层建立了大量数值热传递模型(表 1)。从表 1 可以看出,热传递模型已经从一维向三维、单层空气层向多层空气层、单一传热方式向多种传热方式的方向发展。

表 1 衣下空气层热传递模型

Tab.1 The heat transfer model of air layer entrapped in clothing

出处	空气层方向	求解方法	模型特点
文献[23]	水平	有限元法	单层织物,一维辐射和传导传热模型
文献[24]	垂直	有限差分法	单层织物,圆筒形,一维辐射和传导或对流传热模型
文献[25]	水平	有限体积法	多层织物,一维辐射和传导传热模型,未考虑对流传热和空气通过面料空隙向外扩散传热
文献[26]	水平	有限差分法	单层织物,一维对流、传导和辐射传热模型,考虑面料透气性
文献[27]	水平	有限差分法	单层织物,二维对流和辐射独立计算的传热模型
文献[28]	水平	有限体积法	单层织物,二维对流、传导、辐射交互耦合的传热模型
文献[29]	水平	有限元法	单层织物,二维对流、传导、辐射交互耦合的传热模型,考虑空气浮升力
文献[30]	水平和垂直	有限体积法	单层织物,三维对流、传导、辐射交互耦合的传热模型,考虑动态空气层和空气浮升力

3 热传递性能影响因素

通过以上阐述的三种测试方法,学者们主要从厚度、体积、位置、方向、非均匀形态和运动状态六个方面分析了衣下空气层的热传递性能,为防寒服装和热防护服装的款式设计提供全面的理论指导。

3.1 厚度与体积

衣下空气层厚度是影响空气流动形式的主要因素。当空气层厚度从零逐渐增大时,由于空气浮力克服不了黏性阻力处于静止状态,传热方式为传导和辐射。根据傅里叶导热定律,厚度增大,隔热性能增大。当厚度超过某一定值时,空气浮力克服黏性阻力,空气转为层流状态,传热方式为对流和辐射,

对流会增大传热速率,所以厚度增大,隔热性能不再增大,甚至减小。因此,在厚度增大过程中,隔热性能将会出现一个极大值,即最佳空气层^[31]。准确地测定最佳空气层阈值,对设计功能性或防护性服装具有重要意义。

文献[11, 23, 32-35]基于热平板测试法测定了常温环境和火场环境的最佳空气层,如表2所示。对比发现,火场环境的最佳空气层一般比常温环境的小,原因是火场环境的气温较高,即皮肤与服装之间的温差较大,根据式(1),若 ΔT 较大,而 Ra 固定不变,则发生自然对流的衣下空气层厚度将较小,因此,火场环境的最佳空气层较小。

表2 最佳衣下空气层厚度

Tab.2 The best thickness of air layer entrapped in clothing

出处	环境参数	空气层方向	最佳空气层/mm
文献[11]	环境温度为 25 °C, RH 为 65%	水平	9 ~ 12
文献[23]	闪火热源, 热源强度为 84 kW/m ²	水平	6.4
文献[32]	闪火热源, 热源强度为 84 kW/m ² 且面料含水率为 5%、35%、65%、100%	水平	9 ~ 12
文献[33]	闪火热源, 热源强度为 84 kW/m ² , RH 为 35%、65%、95%	水平	12 ~ 15(RH 为 35%) 12(RH 为 65% 和 95%)
文献[34]	辐射热源, 热源强度为 8.4 kW/m ²	垂直	6 ~ 9
文献[35]	辐射热源, 热源强度为 5 kW/m ²	垂直	7

此外,学者们还基于火场环境下研究了水分对于消防服最佳空气层阈值的影响。Lu等^[32]测试了4种含水率(5%、35%、65%和100%)面料的最佳空气层, Li等^[33]利用超声波雾化器对衣下空气层进行加湿,测试了3种相对湿度(35%、65%和95%)下的最佳空气层。对比Torvi等^[23]在干态闪火条件下测得的最佳空气层,结果发现,增大面料的含水率或增大衣下微环境的相对湿度,都会使最佳空气层阈值增大。

衣下空气层体积可通过抽真空法^[36]或三维人体扫描法获得。文献[18-20]通过假人测试法研究了衣下空气层体积对于服装热阻的影响。研究发现,体积与厚度对于衣下空气层热传递性能的影响相似。段杏元等^[20]针对普通内衣和发热内衣建立体积与服装热阻的线性回归方程,如下式所示。

$$\text{普通内衣: } y = 0.1313 - 6 \times 10^{-10}x^2 + 8 \times 10^{-6}x \quad (2)$$

$$\text{发热内衣: } y = 0.1437 - 9 \times 10^{-10}x^2 + 2 \times 10^{-6}x \quad (3)$$

式中: y 为内衣的总体热阻, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$; x 为内衣与假人之间的空气层体积, cm^3 。

3.2 位置

对于多层面料组合的服装而言,衣下空气层不

仅存在于皮肤与服装之间,还存在于服装层与层之间。学者们^[12, 37-39]主要针对多层消防服装研究了空气层的位置对于服装热防护性能的影响。

Huang等^[37]构建了4层消防织物系统的传热模型,织物系统从外到内依次是最外层、防水透气层、隔热层和舒适层,其中隔热层和舒适层相连接,不存在空气层,其余位置均存在空气层。研究对比了空气层位于最外层与防水透气层之间和位于隔热层与皮肤之间的隔热性能,结果发现,空气层位于最外层与防水层时,织物的隔热性能更好,即空气层位于靠近织物最外层的位置,隔热性能更好。而Wang等^[38]和Fu等^[39]分别利用TPP(Thermal Protective Performance)装置和能模拟皮肤出汗的RPP(Radiant Protective Performance)装置研究了多层消防织物空气层的位置对于服装隔热性能的影响。但Wang和Fu的测试结果与Huang的研究结果相悖,他们发现空气层位于舒适层与皮肤层之间或位于隔热层和防水透气层之间的隔热性能更好,即空气层位于靠近皮肤位置,隔热性能更好。分析原因,这可能是由于空气层方向(Huang(垂直方向)、Wang和Fu(水平方向))和热源强度(Huang(5 kW/m²)、Wang(84 kW/m²))

$Fu(2 \sim 10 \text{ kW/m}^2)$) 的不同导致测试结果的差异。

3.3 方 向

织物热平板装置可研究水平方向衣下空气层的热传递性能。然而,人在站立或行走时,衣下空气层为垂直方向。文献[5,30,40]研究了垂直方向衣下空气层的热传递性能。

在常温环境下,Smith^[40]利用改进的热平板装置测试了垂直方向的衣下空气层(厚度为5~30 mm)发生自然对流的阈值为8 mm,小于文献[11-12]在水平方向的测试结果。Yoshio等^[5]和Udayraj等^[30]分别利用数值模型研究了水平方向和垂直方向的衣下空气层热传递性能,模拟结果也显示垂直方向的传热速率更大,更容易达到皮肤二级烧伤。

综上,垂直方向的衣下空气层更容易发生自然对流,对流传热加速了空气层的传热速率,故垂直方向衣下空气层传热性能更好。此外,由于不同的作业环境,衣下空气层还存在多种倾斜角度,后期应开发能测试多种倾斜角度的衣下空气层热传递性能装置,测定各倾斜角度的最佳空气层,为设计防护性服装提供理论参考。

3.4 非均匀形态

上述研究均假定衣下空气层是分布均匀的,面料与皮肤之间保持平行,而实际的衣下空气层是非均匀的。文献[41-43]基于热平板测试和假人测试研究了非均匀衣下空气层的热传递性能。

Sun等^[41]利用男性暖体假人和女性暖体假人测试5款服装热阻,结果发现,女性暖体假人的服装热阻更大。研究认为这是由于女性假人体型较小,同一服装下,女性假人的衣下空气层体积更大,且女性假人体表形态更复杂,非均匀的衣下空气层形态可以滞留更多的静止空气,增大了服装热阻。同样,Tannie等^[42]对比了男款和女款热防护服装的衣下空气分布和热防护性能,结果却发现女款热防护服装的二级烧伤面积更大,热防护性能更差。研究认为这是由于复杂的女性体表形态导致人体与服装之间存在较大的接触面积和局部较大的空气层厚度,皮肤与服装的直接接触加速了外界热量的传递,导致皮肤更易烧伤,而局部较大的空气层厚度,会使空气层内产生自然对流,增大传热速率,因此,女款防护服装的防护性能更差。

为更细致地探索非均匀形态对衣下空气层传热性能的影响,Emel等^[43]搭建了垂直方向非均匀衣下

空气层形态的加热圆筒躯干装置,分析折叠尺寸、折叠数量和服装与皮肤之间的接触面积对于服装热阻的影响。结果发现,厚度为50 mm的均匀衣下空气层,织物表面上端与表面下端之间的温差较大,为1.77℃,而对于非均匀形态,织物上端和下端之间的温差较小,为0.62℃,说明非均匀形态束缚了空气的浮升力,衣下空气层内未发生自然对流。

尽管非均匀空气层阻碍了衣下空气发生对流,但是,Emel等却发现非均匀衣下空气层的服装热阻值更低,这主要是由于非均匀空气层中存在着服装与皮肤之间的直接接触。皮肤与服装的直接接触增大了人体向外界的导热速率,因此,非均匀衣下空气层的服装热阻反而会更低。同时,由于Emel等对实验参数未进行统一设定,例如,在研究接触面积对于衣下空气层隔热性能的影响时,接触面积大的非均匀衣下空气层,其平均衣下空气层厚度会小于接触面积小的非均匀衣下空气层。所以,非均匀衣下空气层隔热性能的减小,可能是由于接触面积增大引起的,也可能是由于平均衣下空气层厚度减小引起的,实验结果无法对单一变量进行量化分析。因此,在未来研究中应优化实验方案,在同等参数条件下分析非均匀形态对于衣下空气层热传递性能的影响。

3.5 运动状态

人体运动会使衣下空气层产生强迫对流,从而降低服装热阻。因此,研究不同运动状态下衣下空气层的形态变化及其隔热性能十分重要。衣下空气层动态变化的测量方法,是先将连续变化的运动分解为若干人体姿势,再通过三维扫描仪逐一测量各姿势的衣下空气层,最后汇总获得一个衣下空气层形态连续变化的图谱,即动态空气层^[44-45]。

文献[46-47]通过对实验装置改进,为热平板安装一个动力系统,使之做上下往复运动的同时保持织物面固定不动,将动态空气层简化为衣下空气层厚度做周期性正弦变化,如下式所示。

$$y = y_0 + \Delta y \sin(2\pi fT) \quad (4)$$

式中: y 为随时间变化的衣下空气层厚度,mm; y_0 为平均衣下空气层厚度,mm; Δy 为空气层厚度的振幅,mm; f 为振动的频率,r/s。

Ghali等^[46]研究了常温环境下,动态空气层对于皮肤散热功率的影响,其中空气层厚度为38.1 mm,振幅为6.35 mm,转速为25 r/min。结果发现,热平板的散热功率受动态空气层的影响呈现正弦式上下

波动。Xin等^[47]研究了火场环境下,动态空气层对于皮肤升温曲线的影响。结果发现,三种振动频率的传感器表面升温曲线差异较小,且升温曲线未呈现明显的正弦波动。对比 Ghali 和 Xin 的测试结果,差异原因在于 Ghali 在常温条件下测试,动态空气层以对流传热为主,故皮肤散热量呈正弦波动;而 Xin 的实验将织物暴露于火焰下,织物背面的空气层以辐射传热为主,对流传热影响较小,故传感器表面温度波动不明显。

Ghazy等^[48]构建了一维“织物层-空气层”热传递模型,研究动态空气层的振幅和频率对于衣下空气层热传递性能的影响,但模型仅考虑传导和辐射两种传热方式,忽略了对流传热。因此,模型仅在衣下空气层厚度较小的范围内取得良好的模拟结果。Udayraj等^[30]基于流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)构建了对流、传导、辐射相耦合的三维“织物层-空气层”传热模型,利用动网格技术模拟空气层的动态变化,其模拟结果与 Xin 的实验结果之间保持良好的一致性。模型显示,在闪火条件下辐射传热起主要作用,占总传热量的80%以上,传导和对流传热起次要作用,动态空气层能增强衣下空气层的对流传热。

在实际运动中,衣下空气层的动态变化是更复杂的。Ghaddar等^[49]构建“手臂-衣袖”的动态热传递模型。模型将手臂摆动过程中的衣下空气层形态分为两个阶段:第一阶段,衣袖静止,手臂在衣袖内摆动,衣下空气层形态随时间发生形变;第二阶段,衣袖与手臂共同摆动,衣下空气层形态保持不变。该研究更细致地描述了衣下空气层的运动过程,模拟结果更具有实际意义。

针对以上六个因素的分析,在设计防护服装款式结构时,应以作业人员的工作环境(寒冷环境、高温环境、火场环境等)和工作状态(静立、静坐、行走等)为出发点,分析空气层上表面(服装内表面)与下表面(皮肤表面)之间的温差、空气层的倾斜角度、形状,以及运动状态,判定空气层内发生自然对流的临界阈值,从而优化防护服装的放松量设计,提高服装的冷/热防护性能。

4 研究展望

衣下空气层是影响服装隔热性能的重要组成因素。本文概括了三种用于探究衣下空气层对于服装

系统热传递性能影响的研究方法,并阐述了各研究方法的优缺点。根据以上研究方法,逐一分析了六方面因素对于服装热传递性能的影响。基于目前研究现状,本文对现有测试方法及研究内容的不足提出以下展望:

1) 研究非均匀衣下空气层对于服装系统热传递的影响。现阶段,对于衣下空气层的研究,无论热平板实验,还是数值传热模型,空气层多为均匀形态,而实际衣下空气层是非均匀的。若将均匀形态的空气层厚度对于服装隔热性能影响的研究结果,直接应用于预测真实着装状态下服装系统的隔热性能,则会造成预测结果的偏差。因此,在未来应基于同一空气层平均厚度的条件下,逐一分析波折频率、波折幅度、接触面积比率等几何特征因素对于服装热传递性能的影响,并建立非均匀空气层的织物或服装系统的热传递模型,更加全面地解释非均匀空气层的传热机制,为准确表征或预测服装隔热性能提供保障。

2) 发展厚重服装和多层服装的衣下空气层的测量方法。由于三维人体测量法忽略了服装面料厚度对于衣下空气层的影响,所以,厚重服装的衣下空气层形态尚无法准确测量,也无法分析厚重服装的衣下空气层分布情况及对于服装隔热性能的影响。在未来,可考虑利用压力假人系统和三维人体测量系统相结合的方法,通过测量人体各部位的压强来判断此部位的面料厚度,并利用逆向工程软件将面料厚度从空气层中减去,以获取厚重服装的衣下空气层分布,并研究其对服装隔热性能的影响。此外,在多层服装系统中,众多研究显示服装层与层之间的空气层也是影响服装隔热性能的主要因素。目前,此类空气层的研究仅通过热平板实验和模型模拟间接分析此类空气层的隔热性能,若能发展一种测试方法测量真实着装状态下服装层与层之间的空气层,将会完善服装衣下空气层热传递性能的研究体系,对于冷/热防护性多层服装系统的开发具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 张昭华,王云仪,李俊. 衣下空气层厚度对穿着人体热传递的影响[J]. 纺织学报, 2010, 31(12): 103-107.
ZHANG Zhaohua, WANG Yunyi, LI Jun. Effect of thickness of air layer under clothing on heat transmission of wearer [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(12): 103-107.

- [2] 赖军, 张梦莹, 张华, 等. 消防服衣下空气层的作用与测定方法研究进展 [J]. 纺织学报, 2017, 38(6): 151-156.
LAI Jun, ZHANG Mengying, ZHUANG Hua, et al. Research progress on air gap entrapped in firefighter's protective clothing and its measurement methods [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(6): 151-156.
- [3] HOLLANDS K, RAITHYBY G D, KONICEK L. Correlation equations for free convection heat transfer in horizontal layers of air and water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(7): 879-884.
- [4] MALKUS W V R. Discrete transitions in turbulent convection [J]. Proceeding of the Royal Society of London, 1954, 255(1161): 185-195.
- [5] YOSHIO Morozumi, KENICHI Akaki, NAOMASA Tanabe. Heat and moisture transfer in gaps between sweating imitation skin and nonwoven cloth: effect of gap space and alignment of skin and clothing on the moisture transfer [J]. Heat Mass Transfer, 2012(48): 1235-1245.
- [6] 葛新石, 叶宏. 传热和传质基本原理 [M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 507-509.
GE Xinshi, YE Hong. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. 6th Edi. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 507-509.
- [7] INGVAR Holmer. Thermal manikin history and applications [J]. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92: 614-618.
- [8] EMEL Mert, AGNES Psikuta, BUENO Marie-Ange. The effect of body postures on the distribution of air gap thickness and contact area [J]. International Journal of Biometeorology, 2017(61): 363-375.
- [9] 史雯, 王发明. 我国少数民族服男装整体和局部衣下空气层分布 [J]. 服装学报, 2016, 1(2): 161-169.
SHI Wen, WANG Faming. Study on the total and local clothing air gap of traditional Chinese male ethnic costumes [J]. Journal of Clothing Research, 2016, 1(2): 161-169.
- [10] JOANNA Frackiewicz-Kaczmarek, AGNES Psikuta, BUENO Marie-Ange. Effect of garment properties on air gap thickness and the contact area distribution [J]. Textile Research Journal, 2015, 85(18): 1907-1918.
- [11] 张昭华, 翟世瑾, 尹思源. 衣下间隙对织物系统热湿阻的影响 [J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 101-106.
ZHANG Zhaohua, ZHAI Shijin, YI Siyuan. Influence of air gaps on thermal and evaporative resistances of fabric system [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(6): 101-106.
- [12] HE Huang, YU Zhaicai. Effect of air gap entrapped in firefighter protective clothing on thermal resistance and evaporative resistance [J]. Autex Research Journal, 2017(6): 1-7.
- [13] KIM Young, LEE Calvin, LI Peng, et al. Investigation of air gaps entrapped in protective clothing systems [J]. Fire and Materials, 2002(26): 121-126.
- [14] LU Yehu, SONG Guowen. A novel approach for fit analysis of thermal protective clothing using three-dimensional body scanning [J]. Applied Ergonomics, 2014, 45: 1439-1446.
- [15] 王云仪, 张雪, 李小辉, 等. 基于 Geomagic 软件的燃烧假人衣下空气层特征提取 [J]. 纺织学报, 2012, 33(11): 102-106.
WANG Yunyi, ZHANG Xue, LI Xiaohui, et al. Geomagic-based characteristic extraction of air gap under clothing [J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(11): 102-106.
- [16] 王敏, 李俊, 李小辉. 燃烧假人在火场热防护服装研究中的应用 [J]. 纺织学报, 2013, 34(3): 154-160.
WANG Min, LI Jun, LI Xiaohui. Application of flame manikin in thermal protective clothing research [J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(3): 154-160.
- [17] WANG Min, LI Xiaohui, LI Jun. A new approach to quantify the thermal shrinkage of fire protective clothing after flash fire exposure [J]. Textile Research Journal, 2016, 86(6): 580-592.
- [18] LEE Yejin, HONG Kyunghi, HONG Sung-Ae. 3D quantification of microclimate volume in layered clothing for the prediction of clothing insulation [J]. Applied Ergonomics, 2007(38): 349-355.
- [19] LI Jun, ZHANG Zhaohua, WANG Yunyi. The relationship between air gap sizes and clothing heat transfer performance [J]. The Journal of the Textile Institute, 2013, 104(12): 1327-1336.
- [20] 段杏元, 胡源盛. 男士针织内衣热性能的测量与分析 [J]. 纺织学报, 2016, 37(12): 92-96.
DUAN Xingyuan, HU Yuansheng. Measurement and analysis on thermal properties of men's knitted underwears [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(12): 92-96.
- [21] CHEN Y S, FAN J, QIAN X. Effect of garment fit on thermal insulation and evaporative resistance [J]. Textile Research Journal, 2004, 74(8): 742-748.
- [22] MCQUERRY Meredith Laine. Clothing Modifications for Heat Strain Reduction in Structural Firefighter Protective Clothing Systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2016.
- [23] TORVI D A, DALE J D. Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux [J]. Fire Technology, 1999, 35(3): 210-231.
- [24] ZHU Fanglong, MA Suqin, ZHANG Weiyuan. Study of skin model and geometry effects on thermal performance of thermal protective fabrics [J]. Heat Mass Transfer, 2008(45): 99-105.
- [25] GHAZY A, BERGSTROM D J. Influence of the air gap between protective clothing and skin on clothing performance during flash fire exposure [J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(10): 1275-1288.

- [26] KAMEL Ghali, NESREEN Ghaddar, BYRON Jones. Modeling of heat and moisture transport by periodic ventilation of thin cotton fibrous media [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(18): 3703-3714.
- [27] SAWCYN C M J, TORVI D A. Improving heat transfer models of air gaps in bench top tests of thermal protective fabrics [J]. *Textile Research Journal*, 2009, 79(7): 632-644.
- [28] TALUKDAR P, TORVI D A, SIMONSON C J, et al. Coupled CFD and radiation simulation of air gaps in bench top protective fabric tests [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1): 526-539.
- [29] MAYOR T S, COUTO S, PSIKUTA A, ROSSI R M, et al. Advanced modelling of the transport phenomena across horizontal clothing microclimates with natural convection [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015(59): 1875-1889.
- [30] UDAYRAJ, PRABAL Talukdar, APURBA Das, et al. Numerical modeling of heat transfer and fluid motion in air gap between clothing and human body: effect of air gap orientation and body movement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017(108): 271-291.
- [31] 张渭源. 服装舒适性与功能 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2005: 58-59.
ZHANG Weiyan. *Clothing Comfort and Function* [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2005: 58-59.
- [32] LU Yehu, LI Jun, LI Xiaohui, et al. The effect of air gaps in moistprotective clothing on protection from heat and flame [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2013, 31(2): 99-111.
- [33] LI Jun, LU Yehu, LI Xiaohui. Effect of relative humidity coupled with air gap on heat transfer of flame-resistant fabrics exposed to flash fires [J]. *Textile Research Journal*, 2012(82): 1235-1243.
- [34] 张欢. 阻燃织物热湿舒适性及热防护性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
ZHANG Huan. *The Study of Thermal Comfort and Thermal Protective Performance of Flame Retardant Fabrics* [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [35] HE Song, HUANG Dongmei, QI Zhengkun, et al. The effect of air gap thickness on heat transfer in firefighters' protective clothing under conditions of short exposure to heat [J]. *Heat Transfer Research*, 2012, 43(8): 749-765.
- [36] CROCKFORD G W, ROSENBLUM H A. The measurement of clothing microclimate volumes [J]. *Clothing Research Journal*, 1974, 2(3): 109-114.
- [37] 黄冬梅, 何松. 空气层位置对消防战斗服隔热性能的影响 [J]. *纺织学报*. 2015, 36(10): 113-119.
HUANG Dongmei, HE Song. Influence of air gap position on heat insulation performance of firefighters' protective clothing [J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(10): 113-119.
- [38] WANG Yunyi, LU Yehu, LI Jun, et al. Effects of air gap entrapped in multilayer fabrics and moisture on thermal protective performance [J]. *Fibers and Polymers*, 2012, 13(5): 647-652.
- [39] FU Ming, WENG Wenguo, YUAN Hongyong. Effects of multiple air gaps on the thermal performance of firefighter protective clothing under low-level heat exposure [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(9): 968-978.
- [40] JL Spencer-Smith. The physical basis of clothing comfort, part 2: heat transfer through dry clothing assemblies [J]. *Clothing Research Journal*, 1977, 5: 3-17.
- [41] SUN Chao, FAN Jintu. Comparison of clothing thermal comfort properties measured on female and male sweating manikins [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 87(18): 1-10.
- [42] TANNIE Mah, SONG Guowen. Investigation of the contribution of garment design to thermal protection, part 2: instrumented female mannequin flash-fire evaluation system [J]. *Textile Research Journal*, 2010, 80(14): 1473-1487.
- [43] EMEL Mert, AGNES Psikuta, BUENO, et al. Effect of heterogenous and homogenous air gaps on dry heat loss through the garment [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015(59): 1701-1710.
- [44] CHOI Jiyoung, KIM Heejin, KANG Bora, et al. Analysis of clothing air gap in a protective suit according to the body postures [J]. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics*, 2014, 7(4): 573-581.
- [45] LI Xiaohui, WANG Yunyi, LU Yehu. Effects of body postures on clothing air gap in protective clothing [J]. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics*, 2011, 4(3): 277-283.
- [46] KAMEL Ghali, NESREEN Ghaddar, BYRON Jones. 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.
- [47] XIN Lisha, LI Xiaohui, LI Jun. A new approach to evaluate the effect of body motion on heat transfer of thermal protective clothing during flash fire exposure [J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(10): 2225-2231.
- [48] GHAZY Ahmed, DONALD J Bergstrom. Numerical simulation of the influence of fabric's motion on protective clothing performance during flash fire exposure [J]. *Heat Mass Transfer*, 2013(49): 775-788.
- [49] GHADDAR N, GHALI K, JREIJE B. Ventilation of wind-permeable clothed cylinder subject to periodic swinging motion modeling and experimentation [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130: 1-11.