

服装工效学：织物热湿舒适性 评价与智能预测模型

服装热湿舒适性研究现状
热湿舒适性运动面料的开发
织物静、动态热湿舒适性评价
织物主观热湿舒适性评价
织物主观热湿舒适性智能预测模型



中国纺织出版社

“上海工程技术大学科技发展基金著作出版专项”资助项目

服装工效学：织物热湿舒适性评价 与智能预测模型

柯宝珠 著

 中国纺织出版社

内 容 提 要

本书以基于人体热湿舒适性的功能性纺织材料与服装热湿传递测试方法为背景,构建了基于BP神经网络技术、以客观指标为输入参数的织物主观热湿舒适性预测模型,并介绍了面向用户界面的织物热湿舒适性智能预测软件的开发。书中系统阐述了热湿舒适性服装面料的设计方法,面料的主、客观热湿舒适性评价方法,以及面料动态热湿传递测试装置的设计思路,对舒适性服装面料的研制及相关仪器的设计开发具有重要的理论参考意义和应用价值。

本书注重理论与实践相结合,图文并茂,并附有预测模型的主要程序,适用于纺织工程、材料工程、物理学、应用数学等相关专业的教师、研究生和本科生,以及相关领域的实际工作者使用。

图书在版编目(CIP)数据

服装工效学: 织物热湿舒适性评价与智能预测模型/柯宝珠著. —北京: 中国纺织出版社, 2014. 12

ISBN 978 - 7 - 5180 - 0895 - 7

I. ①服… II. ①柯… III. ①服装—工效学
IV. ①TS941. 17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 191140 号

策划编辑: 李春奕 责任编辑: 陈静杰 责任校对: 寇晨晨
责任设计: 何 建 责任印制: 储志伟

中国纺织出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码: 100124

销售电话: 010—67004422 传真: 010—87155801

http: //www. c-textilep. com

E-mail: faxing @ c-textilep. com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 http: //weibo. com/2119887771

北京京华虎彩印刷有限公司印刷 各地新华书店经销

2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 8. 25

字数: 144 千字 定价: 39. 80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

前言

随着生活水平的提高,人们的健康意识逐渐增强,运动已成为人们生活的一部分,于是,具有舒适性、功能性新型面料的研究与开发便成为迫切需要。本书针对这一问题作了深入的探讨和研究,书中介绍了利用新型纤维(如“U”形涤纶、“十”字形PTT、超细丙纶等)开发的一系列具有透气导湿功能的针织面料。针对面料开发的需要,著者自行设计了一种新型三孔添纱导纱器,以解决现有导纱器无法很好满足编织三线添纱组织的问题。对新开发的面料以及市面上已有的常规纤维面料共36种面料的基本指标如厚度、平方米克重,以及静态热湿舒适性指标如透气率、透湿率、芯吸高度、回潮率、散湿率和热阻进行了测试,通过实验数据对比分析了影响织物热湿传递性能的因素。

对服装的热湿舒适性研究一直是服装舒适性研究的重点。但这方面的研究主要还是集中于织物的静态热湿传递,而实际上人体的散热散湿并非总是在静态条件下进行,尤其是在运动出显汗的情况下,“人体——服装——环境”之间的热湿传递是一个动态的过程。近年来,学者们逐渐认识到动态热湿传递性能与静态时有很大差别,也开始将研究转向服装的动态热湿传递。不过相比于静态过程,动态热湿传递的过程相当复杂,且由于实验条件的限制,无法很好地对其进行动态跟踪,而只是在其达到某一个稳态状态时进行测定,这实际上并没有很好地了解织物热湿传递的实时动态变化,对许多瞬间的变化无法做到真正的观测,也就难以对其热湿舒适性能进行客观地评价。针对这一情况,著者自行设计了一种微气候测试圆筒仪来实时跟踪织物微气候下的动态热湿变化情况,探讨动态热湿传递过程中的温、湿度变化曲线,并从温、湿度变化曲线的特征值中提取几个最能全面反映织物的热湿舒适性能的动态特征值 K_{Ts} 、 T_{equ} 、 ΔT 、 K_{Te} 、 RH_{equ} ,来作为面料动态热湿舒适性能的客观评价指标。书中对36种面料的5个动态热湿舒适性指标进行了测试。

评价服装的热湿舒适性,最直接的方法是在人身上进行穿着实验,做出主观感觉评价。书中对 36 种面料在穿着过程中的 4 个主观热湿舒适性指标(闷热感、粘体感、潮湿感和运动后的冷感)进行了评价。

织物的主观评价法是通过人体现场穿着实验和人体生理学实验对服装的舒适性进行评价的方法,是一种具有实际意义的手段和方法。但是主观测试也存在很多无法克服的困难,主要是因为试验条件的难以控制和穿着情况的复杂性,以及人的主观感觉受个体差异和精神因素的影响,在一定程度上影响了人体主观测试结果的准确性和可靠性。相比较而言,织物的客观评价不受精神因素的影响,试验结果稳定,误差较小,易于操作和控制。客观评价方法虽然简单方便,易于操作,但测试指标值并不能直观反映人体主观的穿着感觉,因而建立织物主观热湿舒适性的预测模型是很有必要也很有意义的。书中介绍了利用 BP 神经网络技术,分别建立以静态客观指标为输入参数的织物主观热湿舒适性预测模型和以动态客观指标为输入参数的织物主观热湿舒适性预测模型。专门针对这两种模型开发了织物主观热湿舒适性智能预测软件,利用可视化界面,实现在线输入织物的静态客观评价指标值或动态客观评价指标值,即可自动输出织物的主观评价指标值,大大提高了评价的效率及准确性。

在撰写本书过程中,十分感谢东华大学纺织学院的研究生王玉亮和复旦大学软件学院的研究生何柳在软件编写过程中的大力帮助!另外,本书受“上海工程技术大学科技发展基金著作出版专项”项目资助,项目编号为:E1-0508-14-020029,在此一并感谢。

柯宝珠

2014 年 7 月

目录

第一章 服装热湿舒适性研究现状	001
第一节 服装热湿舒适性研究的发展史	001
第二节 服装热湿舒适性的研究方法	002
第三节 服装热湿舒适性的研究方向	011
第二章 热湿舒适性运动面料的开发	018
第一节 热湿舒适性针织运动面料的开发途径和 设计原则	018
第二节 不同热湿舒适性针织运动面料的研制	021
第三章 织物静态热湿舒适性评价	034
第一节 织物热湿传递机理	034
第二节 织物静态热湿舒适性测试	035
第四章 织物动态热湿舒适性评价	046
第一节 织物动态热湿舒适性测试方法	046
第二节 微气候测试系统及其工作原理	048
第三节 织物动态热湿舒适性测试	055
第五章 织物主观热湿舒适性评价	068
第一节 不同纤维织物的吸湿特性及运动时的 穿着感觉差异	068
第二节 织物主观热湿舒适性测试	070
第三节 织物主观热湿舒适性能的综合评定	073

第六章 织物主观热湿舒适性智能预测模型	078
第一节 BP 神经网络的建模过程及原理	079
第二节 基于 BP 神经网络的织物主观热湿舒适性 预测模型	084
第三节 BP 神经网络模型与多元线性回归模型的对比	099
第四节 织物主观热湿舒适性智能预测软件的开发	104
附 录	109
附录 1 Matlab 编辑 BP 神经网络模型的主要程序	109
附录 2 Matlab 编辑可视化界面的主要程序	112

第一章 服装热湿舒适性研究现状

第一节 服装热湿舒适性研究的发展史

对服装热湿舒适性的研究始于20世纪30年代,到20世纪40年代,学者们开始以科学、系统的研究方法来评价服装对人体生理和心理的各种影响,并于第二次世界大战期间基于军需军备服的应用研究而迅速发展起来,人们开始认识到服装隔热防寒的原理^[1]。

1941年,盖奇(Gagge)和伯顿(Burton)^[2]对服装的隔热性能进行了研究,了解服装防寒保暖的原理,首次提出了服装热阻和隔热的定量单位——克罗(Clo)。克罗值的提出被公认为是服装科学研究中的重要一步。

第二次世界大战以后,由于生活条件的改善,人们对服装的要求从生理保护进一步提高到美观舒适,尤其是20世纪60年代后纤维工业的发展,纺织服装生产中开始大量使用化学纤维,由于化学纤维的吸湿性较差,制成服装穿着后有不舒适的闷热感,但化学纤维产量高成本低,且在许多方面的性能优于天然纤维,因此改善化学纤维产品的热湿舒适性被提到了纺织研究的日程。1962年,伍德考克(Woodcock)^[3]首次提出了服装的透湿指数(i_m),作为在热环境下衡量服装透湿性的指标。1965年,美国著名的服装生理学者戈德曼(Goldman)^[4]将服装的热阻和透湿指数结合起来,提出了服装的蒸发散热效能指数,并根据生理学的知识提出了用热阻、透湿指数和蒸发散热效能指数作为服装的热湿舒适性的物理指标。与此同时,人们也开始认识到,穿衣过程并非是一个简单的热湿传递的物理过程,服装的功能还与物理学、生理学和心理学等方面的因素相关。

1970年,福特(Fourt)和赫理斯(Hollies)^[5]对美国军需研究部门第二次世界大战以来的服装研究工作从生理学、卫生学、人类工效学、服装科学、纺织材料学的角度进行了系统的总结,首次提出把人体——服装——环境作为一个系统来考虑,从人体需要出发,全面研究服装及其材料的使用方法,对服装及服装功能方面的问题提出了更深刻的认识。随后,赫理斯和戈德曼^[6]专门着眼于服装的热湿舒适性能,在环境与人体的热平衡和防护、纤维及织物的性能与舒适性的关系、人体感觉分析、服装对人体运动的影响以及服装与环境间的

相互作用方面进行了较详细的研究。1981年,日本纤维机械学会^[7]从服装材料、被服设计和制作、服饰生活、被服机能、穿着试验、特种服装等方面对日本的服装研究工作进行了科学、系统的总结。

除了一般日常生活中人们对服装的舒适性要求越来越高外,随着近代科学技术的发展,人类探索自然的脚步已到达太空和深海,在这些领域中,人们对服装的生理防护功能以及舒适性有了更高更严格的要求,服装的传热、传湿性能以及防护性能成了研究的主要内容。

第二节 服装热湿舒适性的研究方法

通过几十年研究,对服装的热湿舒适性研究已经建立起了多种测试方法和评价指标,其中,一类是单纯测热或测湿的,测热方法主要有圆筒法、平板法、热脉冲法等,评价指标主要有保暖率、导热系数、热阻值等,测湿方法主要有透湿杯法、湿度梯度法、敏感器件法等,评价指标主要有透湿率、芯吸率、吸湿率、脱湿率等;另一类是测定热湿综合传递性能的,测试方法主要有微气候仪法、出汗暖体假人法,评价指标主要有透湿指数、蒸发散热效能指数等。

除了用物理方法评价织物的热湿舒适性外,生理学评价法和心理学评价法也是常用的研究方法。

一、织物的热传递

服装的基本功能之一是维持人体的热平衡与热舒适。服装作为纺织纤维和空气的集合体,其传热传湿途径包括传导、对流、辐射以及伴随着水汽运输而发生的潜热传递。由于织物内部纱线之间、或纤维之间的缝隙空洞较小,对一般纺织品而言,对流和辐射的传热效果在常规使用条件下小于热传导对传热所作的贡献^[8]。

盖奇等^[9]研究了各种气候温度环境下,运动中的人体舒适性、热感觉和生理指标间的关系。结果表明:在进行30~40min的恒定强度运动后,人体温度感觉从“冷”变为“热”主要与皮肤温度和环境温度有关。不舒服的感觉主要与皮肤的出汗率和热传导率有关。

在稳定一维热传递的条件下,王青华和夏正兴^[10]讨论了织物空间空气层厚度、表面特征和纤维种类对热阻的影响。导热系数是反映导热性能的一个重要参数,赵自立^[11]利用傅立叶定律的数学表达式,对影响织物导热系数的各因素进行了分析。接触冷感是另一个由织物热传导特性决定的服装热舒适性指标,王晓东^[12]和姚穆^[13]分析了织物与皮肤接触后皮肤温度变化规律,并根据热传

导物理学、皮肤温感生理学和感觉判断心理学的研究成果,提出了织物接触热舒适——接触冷感产生的模型。玛丽(Marie)等^[14]对皮肤和面料在接触瞬间的能量传递进行了研究,认为在初始0.8s内面料对热量吸收可以反映面料手感,并用线圈长度、纱线结构、纤维细度等变量得出一系列实验结果。吉尔萨克(Jirsak)^[15]对纤维网垂直排列和交叉排列的无纺布物的导热系数进行比较,得出材料密度和纤维细度与隔热性能的关系。穆罕默德(Mohammadi)等^[16,17]对多层针刺无纺布物的导热性能进行了探讨。金(King)等^[18]从环境角度研究了对流对多层服装系统热损失的影响,指出利用表面波纹起伏的夹层对风进行疏导,使气流平行服装表面流动,缓解垂直风压的渗透。

大卫(David)^[19]研究了羊毛服装在瞬时条件下的热阻问题,发现羊毛服装吸湿时,其热阻比正常时增加了50%~70%。斯图尔特(Stuart)等^[20]研究了干态羊毛服装置于低温高湿环境中的热量释放,证实这些在瞬时内释放的吸湿热会使人体感觉到所带来的温度增加。迪迪尔(De Dear)等^[21]用暖体假人人体模型和实验人员进行了一系列实验,研究空气相对湿度逐步变化对热舒适性的影响。从暖体假人实验中发现,在相对湿度变化引起羊毛服装吸湿或放湿中,热量的37%~42%参与此过程,并影响穿着者的感觉热平衡。从皮肤温度测试中,他们观察到皮肤温度的明显变化,尤其是穿羊毛服装时变化很明显。

二、织物的湿传递

服装湿传递是比纯热传递更复杂的现象。它伴随着质量和能量的双重传递。出汗是人体体温调节的重要部分,通过汗液蒸发来达到散热的目的。服装对体表汗液的蒸发起着阻碍作用,因而,透湿性良好的服装是服装湿舒适性研究的目标。

对于纺织品的湿传导而言,由于织物内部的缝隙空洞较小,在一般使用场合下对流传热传质现象较少出现,一般织物的湿传导途径^[22]有:发生在与缝隙空洞中的水汽扩散;水蒸气在一侧表面及纱间、纤维间的缝隙空洞表面凝结、在微细通道中形成毛细水并经过毛细输送,在另一侧蒸发;在纤维内部发生的吸湿、毛细输送及在较干燥端的放湿。水分子通过织物的缝隙空洞扩散是湿传递的主要途径,其他途径对湿传递也起到一定作用,这些途径比水汽扩散更复杂,但对织物的舒适性起着很重要的作用。通过织物的水蒸气传递有静态和瞬态湿传递。

(一) 静态湿传递

织物的静态湿传递是通过扩散过程发生的,例如水分子通过纤维和纱线间的空隙,以及沿着纤维表面扩散^[23-24]。这些过程用费克的扩散定律^[25-27]表示为:

$$R = \frac{DA t (\delta C)}{Q} \quad (1-1)$$

这里 R 为水汽扩散的阻力, Q 为时间 t 内通过织物面积 A 的水蒸气的质量, δC 为织物两面的水蒸气浓度差, D 是水蒸气的扩散系数。水蒸气的浓度差可由织物两面的温度、湿度和饱和水蒸气压计算出来。与织物属性相关的唯一决定因素是通过织物的水蒸气流量 (Q), 它和织物的性能参数有关。

1. 影响静态湿传递的因素

静态湿传递主要发生在织物的空隙, 因此, 织物的空隙是影响静态湿传递的主要因素。织物湿阻与织物几何结构 (尤其是厚度及空隙率) 有关^[25,26,28]。惠兰 (Whelan)^[30] 用打了孔的金属圆盘来研究影响湿传递的因素。通过改变板厚 (T)、孔径 (d) 和单位面积孔的个数, 得出了湿阻 (R) 与盘的结构参数的关系:

$$R = \frac{T}{\beta} + 0.71d \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\sqrt{\beta}} \right) \quad (1-2)$$

这里 β 为空隙率, 也即打孔面积所占的比例。

公式 (1-2) 表示湿阻随着盘厚的增加而变大, 随孔径和孔的个数增加而减小。惠兰用这一关系来研究织物的湿传递。而织物的几何结构比打孔的盘要复杂得多。织物的湿阻通过织物的重量、结构及纤维类型来计测, 结果显示, 当纤维的体积含量 β 在 20% ~ 29% 之间时, 织物的厚度与湿阻成正比, 但是当纤维的体积含量超出这一范围时, 结果会偏离这种线性关系。

允 (Yoon) 和巴克利 (Buckley)^[28,29] 用织物的厚度 (L), 空隙率 (β) 以及空气中水蒸气的扩散系数 (D_a) 来描述针织物的蒸发热阻。

$$R_e = \frac{L}{D_a \beta} \quad (1-3)$$

织物厚度对织物的湿传递也起着重要作用, 是影响静态湿传递的因素之一, 因为它影响水分子通过织物的通道长度, 织物越厚, 其湿阻越高。此外, 织物的厚度以及纱线的类型 (膨体纱、短纤还是长丝)^[31] 也是影响静态湿传递的因素。

2. 织物静态湿传递的测试方法

织物静态湿阻的测量方法主要有以下几种:

(1) 垂直杯法。垂直杯法测湿传递最早用于包装用材料^[22,25,26,30,32,34]。在 ASTM E96-80 的标准测试方法^[33] 中, 在上口敞开的透湿杯中盛水, 杯口紧密覆盖织物, 放在一定的实验环境中 (温度设定在 23℃、相对湿度为 50%), 计算一段时间内水蒸气的传递率 ($MVTR$) [单位: $g/(m^2 \cdot h)$]。水蒸气传递的驱动力是杯内的空气湿度与周围空气湿度的浓度差。如图 1-1 所示。

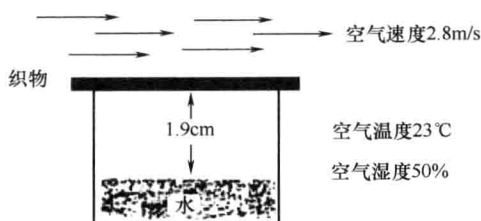


图 1-1 垂直杯法^[26]

(2) 出汗热平板法。出汗热平板法需要采用出汗热平板仪进行测试。出汗热平板仪用于测量织物的热湿传递性能, 包括热阻和湿阻^[34]。在热平板的测试中, 计算织物的热阻, 要求覆盖织物的热平板表面温度维持 35℃, 通过在热平板中滴水模拟出汗来计算织物的蒸发热阻, 如图 1-2 所示。

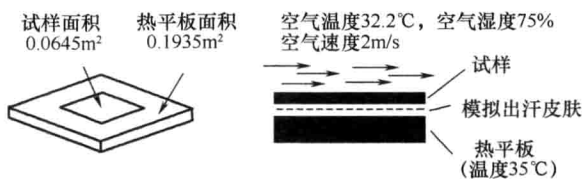


图 1-2 出汗热平板^[26]

热平板和周围空气的温度差是通过织物热传递的驱动力。织物干态热阻与织物阻碍热量从热平板扩散出去的能力有关, 可以表示如下:

$$R_{\text{total}} = \frac{A (T_{\text{plate}} - T_{\text{air}})}{Q} \quad (1-4)$$

这里 R_{total} 是织物和边界空气层的热阻 ($\text{m}^2 \text{K}/\text{watt}$), A 是测试织物的面积 (m^2), T_{plate} 和 T_{air} 分别是热平板表面和周围空气的温度 (K), Q 是维持热平板温度在 35℃ 的电力 (watts)。

织物本身的热阻 (R_{cf}) 是总的热阻 (R_{total}) 减去没有试样覆盖时的热阻 (R_{cf0})。

$$R_{\text{cf}} = R_{\text{total}} - R_{\text{cf0}} \quad (1-5)$$

计算织物的热阻, 必须在干态下进行测量。伍德考克^[3]提出了一个体现织物透湿性能的指标透湿指数 (i_m)。

$$i_m = \frac{\left(\frac{QR_{\text{total}}}{A} \right) - (T_{\text{plate}} - T_{\text{air}})}{S (P_s - \phi P_a)} \quad (1-6)$$

这里 S 是常数 ($1.65 \times 10^{-2} \text{ K/Pa}$), P_s 和 P_a 分别是平板表面温度和环境空气温度下的饱和水蒸气压, ϕ 表示环境空气的相对湿度, i_m 的值从 0 (完全不透湿) 到 1 (完全透湿)。

吉普森 (Gibson)^[26] 建议在考虑对流传热与蒸发传热的情况下, 用 i_m/R_{total} 的比值来表示织物的透湿性。 i_m/R_{total} 比率越高表示织物的热扩散能力 (包括蒸发降温和对流传热) 越强。织物本身的蒸发热阻 (R_{et}) 由 i_m 和 R_{total} 计算:

$$R_{\text{et}} = 60.6 \left(\frac{R_{\text{total}}}{i_m} - \frac{R_{\text{et}0}}{i_{m0}} \right) \quad (1-7)$$

这里 i_{m0} , $R_{\text{et}0}$ 分别是空平板 (没覆盖织物) 的透湿指数和热阻。

(二) 瞬态湿传递

服装的热湿传递性能在动态与静态条件下是有显著差异的, 盖奇所采用的服装静态热阻与湿阻模型只能适用于稳定环境条件下着装人体的热舒适状态, 而不适用于瞬态。另外, 实际穿着条件下由于人体运动、物理活动以及环境条件的改变是动态的。大量研究者^[35,49]对织物非静态条件下的湿传递性能进行了研究。

1. 影响瞬态湿传递的因素

文献^[35-38,40-41]研究了纤维的吸湿性对织物瞬态湿传递的影响。这些研究表明, 如果织物中的纤维不吸湿, 则织物的湿传递是由其空隙率来决定的。如果织物中含有高吸湿性纤维 (如棉或羊毛), 则随着有感出汗的开始, 皮肤和织物间微气候的水汽压会缓慢增加; 如果织物中含有不吸湿性纤维 (如聚酯), 则微气候内的湿度会迅速增加, 并在很短的时间内达到湿平衡。从皮肤表面蒸发的汗气可通过织物的空隙扩散, 也可能被织物内的吸湿性纤维吸收再重新蒸发, 这个过程会使微气候内的初始水汽压增加很慢。对吸湿性很小的纤维, 水分子通过织物间的空隙扩散, 而不被纤维吸收, 微气候内初始水汽压增加很快。纤维的吸湿过程发生在瞬态, 是影响织物瞬态湿传递的重要因素^[35,37-40]。因而, 研究织物的动态湿传递, 除了织物的几何结构外, 纤维的吸湿性也是必须考虑的决定性因素。

鸿 (Hong)^[40]发现纤维的吸湿效应对平衡状态没影响, 这可以解释如下: 当吸湿达到平衡后, 由于吸湿性纤维的亲水区都填满了水分子, 吸湿过程可以忽略。这时, 水分子通过织物的空隙扩散不再受纤维吸湿性能的影响, 这反映了平衡状态的连续湿传递特性。这个过程和不吸湿性纤维织物的湿传递现象相似, 没有吸湿现象的发生。因而, 不同纤维种类的织物达到湿平衡状态时, 湿传递性相同就不奇怪了。

普兰特 (Plante) 等^[49]发现实际穿着时的湿感与织物的吸湿性相关。穿着吸湿性好的羊毛织物比穿着吸湿性不好的聚酯织物感觉更干燥。这些发现表明

瞬态的湿传递比平衡状态的湿传递对穿着时的舒适感影响更大。静态下织物的湿传导指标,可以评价长时间暴露在水蒸气中的织物湿传递特性,却不能评价初始阶段的湿传递特性,而这一阶段对织物穿着舒适的感觉是非常重要的。鉴于这点,静态下测试的湿传递指标不能很好评价实际穿着时的舒适感。

阿德勒(Adler)和沃尔什(Walsh)^[36]研究了从一层织物到另一层织物的瞬态湿传递机理。比较了不同纤维类型(如棉和聚酯),不同组织结构(机织和针织)以及不同后整理(聚酯亲水整理)对织物湿传递机理的影响。

2. 瞬态湿传递的研究方法

王(Wang)和亚苏达(Yasuda)^[37]研制了一种出汗圆筒(放在一个可控的人工气候箱中)来研究瞬态湿传递。该圆筒由几个小隔间组成,每个隔间放置有温湿度传感器。测试织物放在小隔间之间,可以通过移走或增加隔间来测量单层或多层织物的湿传递。圆筒可以模拟无感出汗和有感出汗两种状态,以便测量水蒸气传递和液态水接触织物再通过织物蒸发两种情况,从而连续监控整个湿传递过程。他们采用不同纤维和不同后整理的织物来研究纤维表面特征(亲水性)和纤维吸湿特征(吸湿性)对湿传递的影响。

鸿和赫理斯^[40]用湿度计来连续测量整个湿传递过程中,织物表面动态湿度变化,直至达到平衡。在研究中,用出汗温度为34℃的人造麂皮来做模拟皮肤,由一个液流装置来控制模拟皮肤上均匀的出汗。湿度和温度传感器放在织物内层(面向模拟皮肤)和织物外层(面向外界环境)。该系统放在一个温度为27℃,湿度为80%的人工气候箱内。通过改变纤维、纱线和织物组织结构,研究纤维类型(棉、聚酯、50/50棉/聚酯)对湿传递的影响。在后来的研究工作中,金姆(Kim)和斯皮瓦克(Spivak)^[41]研究了两层织物系统的表面温湿度变化,主要对比了100%棉和100%聚酯两种针织物。织物都具有相同结构,两层织物中一层是棉,一层是聚酯,要么棉在上,聚酯在下;要么棉在下,聚酯在上。湿度计能连续有效的动态测试织物——皮肤表面以及微气候内的瞬态湿度变化。

为了建立热损失和湿传递的关系,法恩沃斯(Farnworth)等^[44,50]用出汗热平板仪测量随时间变化的热损失和温度改变,热平板仪可以放在一个可控制的环境气候中模拟出汗。平板仪设计的重点是随时间的快速反应,而不是绝对的静态热损失。热平板的温度保持在35℃,热损失可由维持平板恒定温度所需的功率计算出来。水分从水泵中通过聚乙烯管中0.5mm的小孔传输到热平板,热平板上有4个小孔,一张薄纸放在热平板上,用来散布水分。热平板所用的功率、环境温度和微气候的温度每隔20s记录一次。

允和巴克利^[28]用聚酯和棉混纺平针织物来研究聚酯和棉的混纺比以及纤维、纱线、织物的物理属性与织物热湿舒适性相关的物理属性如热阻、透湿指

数、透湿率之间的关系。研究显示针织物的热阻、透湿指数、透湿率主要和织物的几何结构因素有关(如厚度和空隙率),而织物的液态水传递性能与纤维的类型关系很大。他们用古丁(Gooding)^[51]的模型(该模型用织物的空隙率、厚度及孔的个数来表达织物的透气性),从透气性数据来计算织物的空隙率,结果显示织物空隙率的预测与实际测量的结果吻合很好。他们得出结论,针织物的透气性主要由织物的结构如空隙率、厚度来决定的,观察到透气性的偏差主要由于纤维的紧密度,而不是纤维类型。从水蒸气传递的理论分析,采用费克的扩散模型和 WVTR 实验,织物的湿传递性能主要由纱线间的空隙决定。随着纤维组成的变化,观察到的 WVTR 的变化可由纱线直径的改变来解释,纱线直径的改变会影响纱线间空隙的尺寸和织物的厚度。他们的结果显示纤维类型对针织物的湿传递影响不大。

乌姆巴赫(Umbach)^[46]根据织物的缓冲能力测量织物的水蒸气和液态水传递,用一个模拟皮肤和实验技术来模拟无感和有感出汗。在乌姆巴赫的实验中,用一个金属板加热到 35℃ 来模拟皮肤。铝箔放在金属板上端防止水分浸到板中。用吸湿性的织物代替模拟皮肤,放在铝箔上,并注入 35℃ 流动的水。用 4cm³ 和 15cm³ 的水来模拟无感出汗和有感出汗。为了模拟运动,织物用一个框架夹住放在距离烧结板 10mm 的上方。模拟无感出汗时,湿度传感器放在微气候中来测量微气候的湿度,环境条件设定在温度 25℃、湿度 30%。模拟有感出汗时,测试织物直接放在吸湿材料的上方,环境条件设定为温度 35℃、湿度 35%。同时,乌姆巴赫还提出了一个缓冲指数,来评价织物的湿传递性能。

三、服装热湿舒适性的人体实验

对服装热湿舒适性的评价,最终还是要人体实际穿着进行评价。人体穿着实验又可分为生理学评价法和心理学评价法。

(一) 生理学评价法

服装生理学评价方法是指通过人体在特定的活动水平和环境下,以穿着不同种类服装时生理参数的变化来评价服装舒适性的一种客观方法。服装生理学评价指标主要有^[52]:体核温度(一般使用直肠温度作为体核温度)、平均皮肤温度、平均体温、代谢产热量、热平衡差、热损失、出汗量、心率和血压等。

张辉等^[53]采用心率、体核温度、平均皮肤温度、衣内温度、新陈代谢、出汗量和蒸发率等生理指标来评价服装的热湿舒适性。唐世君^[54]采用衣内温度、衣内湿度、代谢产热量、肺通气量、皮肤温度、口腔温度、出汗量、蒸发量和服装吸汗量来评价服装的热湿舒适性。

通过对服装舒适性的生理学评价,可以发现人体的生理指标尽管因人而

异,但其变化是有规律的,从统计的观点来看,人体的皮肤表面温度和出汗潮湿面积比例变化是在一条生理曲线带内,在着装状态下,人体可以通过生理调节使得人体的皮肤表面温度和出汗潮湿面积比例都能满足产热和散热平衡的要求,但使人体感到舒适的皮肤表面温度和出汗潮湿面积比例只有一个很小的范围。中国航天医学工程研究所实验数据为基础,参考国内外有关资料,提出了人体舒适状态下有关生理指标的大致范围^[55]。其中代谢产热量 81 ~ 104W,不显汗蒸发水分量 45 ~ 65g/h,直肠温度 37℃,平均皮肤温度 33℃。也有人^[56]认为由于生理学方法的可重复性差,不大适合于服装舒适性的评价。

(二) 心理学评价方法

心理学评价法是对客观评价方法的补充及检验。心理学评价法虽然受到个体心理、生理、社会及环境因素的影响,使主观数据存在不一致性,但因为能比较直观地反应人体的实际穿着情况,而受到诸多研究者的关注^[57-67]。

心理学评价法又叫主观评价法,首先要设计好问卷调查表格,让受试者通过穿着试验,根据个人的心理感觉对穿着服装的舒适感指标(如闷热感、粘体感、冷感等)进行评分。舒适感指标的确立和标尺划分是心理学评价方法中一个重要环节,目前还没有一个很完善或公认的办法。评分标尺一般分为 3 点标尺、5 点标尺、7 点标尺,由于给人提供一维刺激时,一般人能不混淆地区分感觉量级数不超过 7 个,故标尺设计不应超过 7 点。将许多受试者的评分结果综合后得到各种服装舒适感觉指标的主观感觉评分值,然后再用适当的数学方法(如灰色聚类判别等)进行处理,便可评出各种服装的综合热湿舒适感觉指标的优劣性秩位。

赫理斯^[59]发现人稍微出点汗或大汗淋漓时,再经历冷或热两种不同环境,会产生较强的感觉。经过多次反复试验,赫理斯^[60]等获得了一张要求受试者描述其经历的感觉而得到的感觉描述记录表。该表包括如下术语:紧、松、重、轻、挺、硬、静电(贴体)、不吸湿、冷、滑腻(粘湿)、潮湿、粘身性、刺扎、粗糙、瘙痒等。每位受试者有权选择使用这些描述术语,且可以根据其经历的感觉另增加术语,这些感觉术语多年来不断由受试者所选用^[58-62]。

李(Li)等^[63]设计了一个多重标尺和穿着试验方案来研究消费者对 8 种纤维制成的运动服的生理反应、感官知觉和偏爱程度。通过使受试者在两种环境条件下(热: 32℃,相对湿度 45%;冷: 14℃,相对湿度 32%),运动 30min 及休息 10min 的方式获得他们的主观偏爱性和舒适感觉反映,其中气流速度为 0.25m/s。执行过程中,每 5min 测量一次耳膜和皮肤温度、心率及能量消耗,同时也记录服装的汗液流失和汗液吸收。每 10min 在 1(无感觉)~10(完全感觉)级标尺上记录 19 个感觉描述语的主观反应。感觉术语包括紧、松、重、轻、硬、静电、不吸湿、冷、粘湿、湿、热、粘缠、闷热、刺痛、粗糙、瘙痒

及痒等。每次试验,在手感评价后记下对所有评估的两服装间的总体偏好,穿着后试验结束时再做记录。该试验应用多重标尺,用成对比较设计获得对手感和穿着的总体偏好,通过类似于赫理斯^[59]的评分表格的综合态度标尺获得主观感觉反应。

张渭源等^[64]从松紧感、沉重感、硬挺感、凉爽感、潮湿感、刺感、痒感和粗糙感等指标来评价服装的舒适性。李俊和张渭源^[65]采用湿感、闷热感和粘体感来评价丙纶针织物的湿舒适性。张辉等^[53]采用冷感、热感、闷感、湿感、粘感、合身感、沉重感、宽松感和柔软感来评价含陶瓷粒子服装的舒适性。唐世君等^[66]采用湿闷感和冷热感来评价夏季服装的热湿舒适性。王革辉和张渭源^[67]采用冷暖感、粘体感、刺痒感、吸湿感、柔软感、闷热感、粗糙感和总体舒适感来评价羊毛机织面料的舒适性。

四、服装热湿舒适性的综合评价

服装的热湿舒适性的评价通常是多个指标综合评价的结果。综合评价法不但可以解决用单一指标进行评价时所产生的分散性及可比性差的问题,还可以根据某类特定顾客的要求对不同类型的织物进行热湿舒适性评价。

李俊和张渭源等^[68]运用常规客观测试方法,选用芯吸能力、透湿能力、保水能力和放湿干燥性四项指标对细旦丙纶针织物的湿舒适性进行了研究,并用灰色聚类判别分析法进行了综合评价。

郭维蝉等^[69]采用透湿性、吸湿性、热传递性、悬垂性、抗皱性来作为服装面料穿着舒适性能的综合评判指标。为了较好地协调各个性能指标,综合合理地评价服装面料的优劣,用模糊综合评判的方法预处理,模糊综合评判的关系式为 $B = A \cdot R$, B 为综合评判结果, A 为各指标对织物服用性能效果的影响权重系数集, R 为模糊服用性能评价效果与指标面的模糊关系矩阵。

黄莉茜^[70]采用 KESF - II 型精密热物性测定仪测定试样的吸水时间、散湿率和温暖感指标作为服装在热环境中的舒适性指标,并用回归分析法得出热环境中,试样的吸水时间与织物回潮率、织物散湿率与织物面密度和透气量、织物温暖感指标与线圈长度的回归方程。

沈婷婷和袁观洛等^[71]选定透气性、导热系数、透湿性、吸水率和散湿率五个指标来表征绢纺织物的热湿舒适性,并用相关分析法定性的研究了绢纺织物热湿舒适性各指标与结构参数之间的关系。

另外,李显波等^[72]综合脱湿率、芯吸收率、透湿率三个指标,借助线性模型数学论的矩阵求解方法综合评价服装湿舒适性;张怀珠^[73]以非显性蒸发的生理条件作为分析基础,设计了相应的非显性蒸发状态和无任何蒸发的模拟装置,以湿热散失、干热散失、透气阻抗对服装的热湿传递特性进行比较研究;