



多孔纤维材料 热湿传递模型及应用

李凤志 李翼 著



科学出版社

多孔纤维材料热湿传递模型及应用

李凤志 李 翼 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以多孔纤维材料热湿传递模型发展、数值算法和模拟应用为主线,介绍了作者十余年来在服装热功能分析和个体防护领域的主要研究工作。

本书基于多孔纤维材料热湿传递特点,阐明了建模理论基础和求解模型方程的数值方法。以口罩病毒防护为背景,介绍了发展的多孔纤维材料热湿传递多物理场模型,并应用其指导口罩设计。阐述了普通多孔纤维材料热湿传递模型在服装热功能分析中的应用,介绍了作者发展的1-D和3-D着装人体模型,探讨了服装材料特性和层数等因素对人体热响应的影响。发展了含有相变微胶囊的多孔纤维材料热湿传递模型,通过数值模拟研究了其特性,并将其应用于普通穿着的服装和抗荷服的热功能分析中。研究了相变材料微胶囊几何、物理参数和服装材料特性对人体的影响,给出了优化抗荷服中相变微胶囊参数的正交分析法。

本书可作为纺织服装院校师生以及从事纺织产品开发、人机工效、安全与防护领域研究科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多孔纤维材料热湿传递模型及应用 / 李凤志, 李翼 著.

— 北京: 科学出版社, 2019. 6

ISBN 978 - 7 - 03 - 061246 - 5

I. ①多… II. ①李… ②李… III. ①纺织材料—热湿舒适性—研究 IV. ①TS102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 094570 号

责任编辑: 许 健 王 威 / 责任校对: 谭宏宇

责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 10

字数: 201 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

多孔纤维材料热湿传递过程研究,涉及很多应用领域。以服装、口罩等多孔纤维材料为例,它们是保证人体热湿舒适性和健康防护的重要装备。着装人体热湿舒适性和健康防护问题是纺织、人机工效、安全与防护领域研究的核心内容。着装人体热湿舒适性问题的研究涉及人体-服装-环境传热传湿的物理过程、人体温度调节的生理过程、人体感官通过神经生理学机制形成感觉信号的神经生理学过程、由神经生理感觉信号引发知觉形成主观感觉的心理过程。这四个过程同时发生又相互影响。其中服装和周围环境间的传热传湿物理过程决定着人体生存和热湿舒适的物理条件。因此本书以多孔纤维材料热湿传递模型研究为出发点,探讨其在人体健康防护口罩和服装热功能分析中的应用。

在服装热功能研究领域经常用服装热阻和湿阻来描述服装的热湿传递特性。由于热阻和湿阻是在稳态环境下测得的服装综合指数,不能很好地考虑纤维动态吸湿性问题及其对传热的影响,而且不利于服装的底层设计。本书介绍的多孔纤维材料热湿传递模型以微元控制体分析为基础建立,它不仅能考虑纤维的动态吸湿性,而且能从构成服装的基本单位——纤维出发,考虑到纤维的几何特性、织物的结构特性(编织方式、层数)、材料物性等因素,甚至附加相变材料微胶囊的几何、物理参数对服装传热传湿的影响。这些服装模型与人体热调节模型结合,可以预测不同服装设计引起的人体热响应,更符合服装底层设计规律。使用者能够运用模型直接设计纤维的种类、纤维的半径、纤维组成纱线及织物的编织方式、织物的层数、环境温度和湿度,然后利用模型预测出随时间变化的人体热响应、服装温度和湿度等信息,为修改和优化设计参数、改善服装热功能提供指导。从服装设计最底层出发,是本书介绍多孔纤维材料热湿传递模型的一个重要特点。

本书以多孔纤维材料热湿传递特性、模型建立和数值模拟算法为主线,介绍了作者发展的普通 1-D、3-D 多孔纤维材料热湿传递模型、多孔纤维材料多物理场热湿耦合模型及含相变微胶囊的多孔纤维材料热湿传递模型。这些模型与作者发展的改进 25 节点人体热调节模型、85 节点飞行员热调节模型、考虑真实几何的 3-D 热调节有限元模型相结合,构成了不同的着装人体热功能分析模块。这些研究不仅对指导相关领域工作人员认清服装热湿舒适性原理具有重要的学术价值,而且对服装设计者设计出高附加值的热湿舒适性服装(如相变服装)有指导意义,可以提高产品的竞争力,促进国民经济发展,另外对服装消费者也具有重要的实用

价值,尤其是在电子商务时代,以此模型为基础,可以开发网上试衣系统,指导顾客网上购买适合自身热湿舒适性的服装,提高服装产品的竞争力。

本书是我和李翼教授多年合作的研究成果的结晶。感谢我的博士生导师大连理工大学刘迎曦教授、罗钟铨教授搭建的合作交流平台,可以说没有两位老师的鼎力支持和帮助,就不会有本书的存在。感谢在香港理工大学工作期间的同事应伯安博士、王若梅博士、朱庆勇博士、王众博士、戴晓群博士等,他们在我研究过程中提供了诸多帮助和有益讨论。此外,参加本书研究和写作工作的还有王鹏飞硕士、朱云飞硕士、王洋硕士、任朋浩硕士、叶佳林硕士等,在此一并表示感谢。

本书的内容基于国家自然科学基金项目(50706017)、南京航空航天大学青年科技创新基金(NS2010009、NS2013007)、香港创新基金项目的研究成果。本书的出版得到了飞行器设计与工程江苏省品牌专业建设经费的支持,在此谨致以深切的谢意。

由于作者水平所限,书中不尽如人意之处在所难免,敬请读者不吝指正。

李凤志

2019年1月2日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题提出的背景	1
1.2 纤维和多孔纤维材料(织物)的热学性质	2
1.3 多孔纤维材料(织物)热湿传递理论发展概况	4
1.3.1 热湿舒适性评价指标	4
1.3.2 多孔纤维材料(织物)热阻和湿阻模型	5
1.3.3 微元织物热湿耦合模型	7
1.4 多孔纤维材料热湿传递模型总结	10
1.5 本书的主要内容	11
参考文献	12
第 2 章 多孔纤维材料热湿传递模型理论基础及数值求解方法	16
2.1 多孔纤维材料热湿传递模型理论基础	16
2.1.1 热湿传递的傅里叶定律和非克定律	16
2.1.2 纤维吸湿和放湿过程及控制方程	17
2.1.3 水蒸气的蒸发和凝结	18
2.2 1-D 普通多孔纤维材料热湿传递模型的建立与求解	19
2.2.1 1-D 普通多孔纤维材料热湿传递模型的建立	19
2.2.2 1-D 普通多孔纤维材料热湿传递方程的时域有限差分及时域递归法 求解	23
2.3 3-D 多孔纤维材料热湿传递模型及有限元解法	38
2.3.1 3-D 多孔纤维材料热湿传递模型	38
2.3.2 3-D 多孔纤维材料热湿传递模型方程的有限元解	40
2.3.3 模型验证和预测	45
2.4 本章小结	50
参考文献	50
第 3 章 多孔纤维材料多物理场耦合模型及其在 SARS 病毒防护中的应用	52
3.1 口罩过滤性能研究概况	52

3.2	多孔纤维材料中的 SARS 病毒传递的多物理场耦合模型	54
3.2.1	传递机制	54
3.2.2	多物理场耦合模型	54
3.3	方程的离散方法	60
3.4	实验验证和模拟	62
3.4.1	实验验证	62
3.4.2	模拟结果分析	64
3.4.3	结构和材料特性对病毒含量的影响	67
3.5	本章小结	68
	参考文献	69
第 4 章	多孔纤维材料热湿传递模型在普通服装热功能分析中的应用	71
4.1	1-D 着装人体热湿传递模型及应用	71
4.1.1	25 节点人体热调节模型及改进	71
4.1.2	服装系统中多孔纤维材料热湿传递模型	73
4.1.3	人体-服装-环境系统热湿传递模拟流程	76
4.1.4	模型验证及分析	77
4.1.5	服装材料特性对人体热响应的影响	84
4.2	3-D 着装人体热湿传递模型及应用	91
4.2.1	考虑真实人体几何的人体热调节数学模型	91
4.2.2	服装热湿传递模型及其边界条件	94
4.2.3	3-D 着装人体热湿传递模型的数值解法	95
4.2.4	模型的验证和预测	97
4.3	本章小结	101
	参考文献	102
第 5 章	含相变微胶囊的多孔纤维材料热湿传递模型及其在服装热功能 分析中的应用	104
5.1	含单一种类相变微胶囊的多孔纤维材料中的热湿传递	104
5.1.1	理论模型和数值方法	104
5.1.2	模型验证和多孔纤维材料特性分析	109
5.1.3	分析结论	119
5.2	含多种相变微胶囊的多孔纤维材料中的热湿传递	119
5.2.1	理论模型	120
5.2.2	含多种相变微胶囊的多孔纤维材料热性能模拟	122

5.2.3	模拟结论	125
5.3	普通相变服装热功能分析	126
5.3.1	人体-相变服装-环境系统模型和人体热感觉评价	126
5.3.2	模型的验证及预测分析	126
5.3.3	相变材料与基材相互作用及对人体热响应的影响分析	131
5.4	含相变微胶囊的抗荷服热功能分析	136
5.4.1	飞行员-囊式抗荷服-环境系统热湿传递模型	136
5.4.2	模型的验证和预测	141
5.4.3	相变材料特性参数对人体热应激指数影响的正交分析法	149
5.5	本章小结	150
	参考文献	151

第1章 绪 论

1.1 问题提出的背景

多孔纤维材料具有密度小、比面积大的特点而被广泛应用于航空航天、交通运输、电子通信、医药、建筑、石油化工等各个工业领域,涉及过滤、分离、消音、吸震、包装、阻燃、隔热等多方面用途^[1-6]。然而,多孔纤维材料最普遍、最常见的应用是服装^[7-8]及个体防护领域^[9-12]。

人体的任何生理活动都是在一定温度下进行,离开特定的温度,人体就会代谢紊乱,人的生命就会受到威胁^[13]。服装的基本功能之一是保持人体在热环境中的热平衡和热舒适。在生物进化过程中,人体已失去了许多控制热量损失、保持平衡的能力。着装可以在皮肤和服装之间形成舒适的微气候,保护人体免受气候变化的影响,并在各种综合环境条件和体力活动下,使人体保持正常热平衡。换句话说,服装的一个重要任务是支持人体热调节系统,使人体处于较大的环境变化和激烈的体育运动状态仍能保持体温处于正常范围。在这里,服装、人体、环境三者构成了一个相互联系协调的体系,服装起到了缓和环境、部分代替、延伸或增强人体某一方面功能的作用。从生理学角度考虑,服装可以看成准生理学系统,它是人体的外延^[14]。因此,服装是保护人体的必需品。服装的热湿传递性能的好坏直接影响人的生活。

服装内热湿传递物理过程非常复杂,包括传湿过程、传热过程以及热湿耦合效应。传湿过程包括汗气扩散、纤维对汗气的吸附/解吸、汗气在纤维表面的凝结及凝结后的汗水在毛细压力下的流动、汗水的蒸发等。而传热过程包括服装内外温差引起热传导,以及与纤维吸湿或放湿、湿分(汗气或汗水)的凝结或蒸发有关的潜热的释放或吸收等。可以看出传湿和传热过程是耦合的。热湿传递过程是与纤维和织物的几何结构、材料特性密切相关的。羊毛、棉等天然纤维吸湿或放湿能力强,而丙纶等人造纤维吸湿或放湿能力弱,导致不同材料制成的服装穿着热湿舒适性存在差别。而汗水在服装中的传递和汗水的表面张力、汗水与纤维材料的接触角、织物结构等因素有关。汗气在服装里的扩散和织物的几何结构相关。这些服装内热湿传递的物理过程直接影响着装人体的传热物理过程和生理响应,进而影响人体的心理及对着装热湿舒适性的评价。

因此,无论是服装消费者、服装生产企业,还是做服装研究的学者对服装热湿

功能及热湿舒适性都给予了高度关注。近些年,标有防水透气、温度自适应等不同品牌的新型高级纺织材料(纤维/织物)及服装已在市场出现。这些产品有时候鱼目混珠,真假难辨。此外,电子商务和网上购物的出现,也使消费者面临网上购买服装的难题:在未穿上之前需要了解其热湿舒适性的问题。服装生产企业也希望能制造和生产出合适的热湿舒适性产品满足消费者需求。而从事服装研究的学者,对服装面料及其热湿特性有较深入的研究,如何把这些研究成果转化为对服装设计的定量指导也是他们面临的问题。所有这些问题的解决聚焦在服装热湿功能 CAD 系统的开发上。如果能有这样的一个 CAD 系统,消费者可以通过设定服装参数、环境温度、湿度,获得着装后的人体温度分布、着装热感觉和热湿舒适性,作为网上购买服装、辨别真伪时的参考。同样,企业的研发人员也可以利用该系统设计服装。

针对服装热湿功能分析 CAD 软件及人体健康防护的需求,我们在多孔纤维材料热湿传递模型、人体-服装-环境系统热湿传递模型等方面开展了一系列研究工作,并将研究成果集成开发了相应的热湿功能分析软件。

1.2 纤维和多孔纤维材料(织物)的热学性质

纤维的吸湿性是影响多孔纤维材料(织物)热学性质的最关键因素, Li 和 Luo^[15] 研究了不同纤维织物的动态吸湿过程。他们对不同吸湿性纤维织物的吸湿机制用不同的数学模型进行描述和分析,然后对比了实验和预测结果。各种纤维的吸湿等温特性见图 1.1。实验中把织物平衡在一个密闭室中,其温度为 20℃,相对湿度为 0%,然后将相对湿度突然变化到 99%,持续 90 min。在吸湿过程中通过

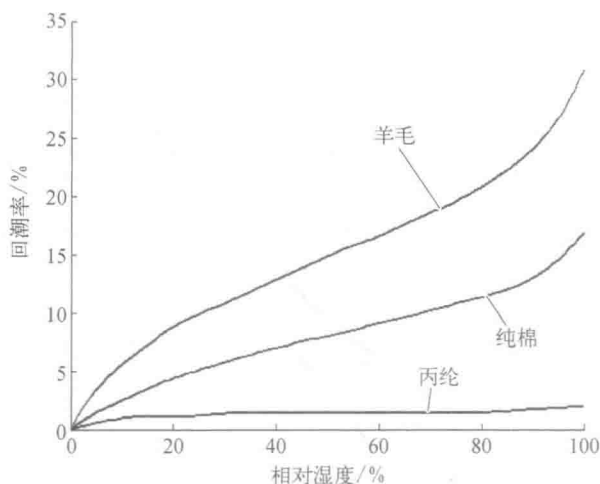


图 1.1 各种纤维的吸湿等温特性

连续地称量织物的质量得出织物含水量的变化,见图 1.2。由吸湿引起的织物温度变化可通过在样品表面接入热电偶获得,见图 1.3。

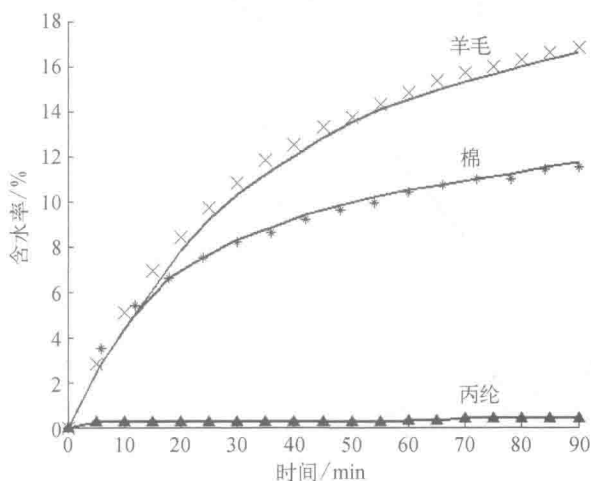


图 1.2 各种织物内的平均含水量

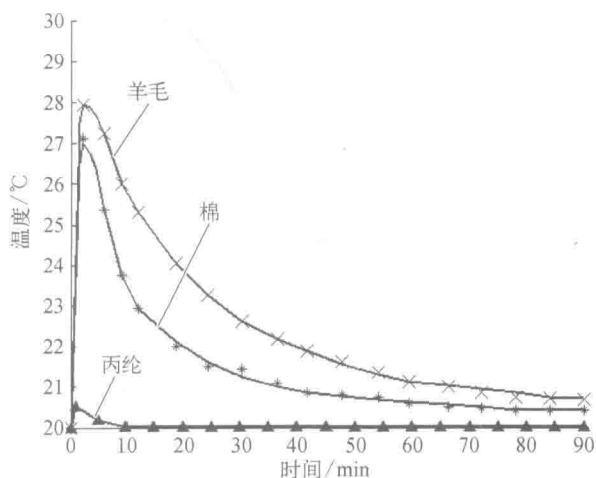


图 1.3 纤维吸湿导致织物温度变化

图 1.2 显示了吸附过程的织物吸湿量随时间变化。羊毛织物明显比其他织物吸湿大,并且它有最高的初始吸附率,其次是棉和丙纶织物。随着吸湿时间的增长,织物间吸湿量的差别增大,按照各个纤维的吸湿能力(图 1.1)区分开来。

图 1.3 显示了织物吸湿过程中测试织物表面的温度变化,羊毛织物温度峰值最高,其次是棉、丙纶。

从图 1.1~1.3 中可以看出,吸湿性强和吸湿性弱的纤维构成的织物,在外界

湿度变化过程中,动态热湿传递特性显著不同。高吸湿性的织物(如羊毛、棉)比低吸湿性纤维(如丙纶)有更强的质量和能量交换能力。

纤维吸湿和放湿对比热和传导率也会产生影响。比热大小对织物的暖感有一定的影响。由于吸湿,使不同类型的纤维比热明显变化,变化幅度和纤维吸湿量有关,因为水的比热比纤维大 2~3 倍。此外纤维吸湿后,导热率变大,这是由水的导热率非常大造成的。

因此,我们可以看出,纤维和织物的热学性质和纤维本身及水、气相关,具有复杂的动态性。

1.3 多孔纤维材料(织物)热湿传递理论发展概况

我们关注多孔纤维材料(织物)热湿传递理论是为了解决服装热功能分析软件的建模问题,为评价服装热湿舒适性服务的。因此关于多孔纤维材料(织物)热湿传递理论的发展概况,也要从服装热湿舒适性评价指标说起。

1.3.1 热湿舒适性评价指标

人们很久以前就认识到服装的热湿传递行为对服装热湿舒适性相当重要,在该领域已进行了大量的研究工作。为了从整体上考虑服装的传热性能,1941 年, Gagge 等^[16]提出了服装隔热保温综合指标——CLO 值,其定义为标准气候条件下(室温为 21℃,相对湿度为 50%,风速为 0.1 m/s 以下)静坐或从事轻度脑力劳动的人,感到舒适时所穿服装的隔热值为 1 CLO,它的值相当于 $0.155\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ 。此时人体代谢率为 58.14 W/m^2 ,人体皮肤平均温度为 33℃,其中大部分热量以显热的形式传递到体外。可以看出,该指标考虑了人体的生理参数、心理感觉量和环境温湿度及风速条件。在随后的研究中,他们又通过实验得出了标定 CLO 值的方法和粗略计算公式,从而能够用该指标来比较不同纺织品的隔热性能。但 CLO 值作为服装及其内部空气层的非潜热热阻指标,反映了纺织材料本身与微气候的总的隔热效果,实质为特定工况下的显热热阻。虽然 CLO 值定义时考虑了人体的生理参数、心理感觉量和环境条件,但其计算中将蒸发潜热流排除在总热流之外,使之与实际情况有较大差距。1962 年,服装生理学家 Woodcock^[17]为了对由湿气蒸发所产生的额外散热进行估计,在织物散热过程中引入分析热气候条件下穿着舒适与否的透湿指数。该指标实质上是一个反映服装材料热阻和湿阻之比的无量纲量,其值越大,意味着在同一热阻情况下,该材料的湿阻越小,即导湿能力越强。该定义与 CLO 值类似,由于它们都是在特定实验条件下测得的实验参数,对于实际穿着服装时由一种状态到另一种状态的动态热湿传递过程,两指标都是不确定的

量,使之在织物舒适性能的评价上可比性较差。1970年,Fourt和Hollies^[18]就服装舒适性和功能性方面的文献进行了综述和全面分析,特别是服装热湿舒适性方面。随后,Slater^[19]对纺织材料的舒适性能进行了进一步讨论,内容包括材料的热阻测试、水汽传递、液态水传递、空气通透性等。1977年,Hollies和Goldman^[20]重新探讨了评价热舒适性的准则,他们使用了一系列方程描述了服装热湿传递,包括对流热损失、蒸发热损失、平均辐射温度和干球调节温度等。Mechels和Umbach^[21]讨论了服装系统的湿度范围。他们指出服装系统的热湿特性取决于它的热传递阻力 R_c 和湿传递阻力 R_e 。热湿传递的阻力和湿度范围可用暖体假人或皮肤模型进行测试,这些参数依赖于服装款式、穿着方式、纺织材料和风速。Breckenridge^[22]调查了人体运动对服装传导和蒸发热交换影响的有关文献。服装热阻取决于一系列因素:厚度、层数、合身性、悬垂性、纤维细度、柔软度和密闭程度。所有这些研究都把传热、传湿过程独立开来,适合于各种稳定的穿着状态。在相对湿度瞬变期间,热和湿的传递过程是耦合的,这些评价指标存在较大偏差。并且上述这些研究只是对服装传热、传湿的指标的定义与评价,并没有给出服装内传热、传湿过程的具体的计算模型。

1.3.2 多孔纤维材料(织物)热阻和湿阻模型

1986年,Farnworth^[23]从系统的角度对多孔纤维材料(织物)热、质传递现象进行了研究,提出了多层织物系统的热、质传递数学模型:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{T_{i-1} - T_i}{R_{Hi-1}} - \frac{T_i - T_{i+1}}{R_{Hi}} + Q_{Ci} \quad (1.1)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{P_{i-1} - P_i}{R_{Vi-1}} - \frac{P_i - P_{i+1}}{R_{Vi}} \quad (1.2)$$

其中, P_i 和 T_i 是第 i 层蒸汽分压和温度; M_i 是第 i 层织物的含湿量; R_{Hi} 和 R_{Vi} 是干热阻和湿阻; Q_{Ci} 表示湿吸附或凝结过程产生的热源; C_i 为热容; Q_{Ci} 和 P_i 可以用 M_i 和 T_i 表示。Farnworth使用一个比例关系来描述织物回潮率和周围空气的相对湿度的关系,用来描述纤维的吸附过程。Farnworth假设每一层含湿量均匀。 R_{Hi} 和 R_{Vi} 依赖于织物及空气层厚度。在这个模型中Farnworth将不同纤维种类、厚度的各层织物对热量和湿分的阻挡或缓冲作用分别用统一的变量热阻、湿阻来表征。此外,还有其他一些模型,如热阻和湿阻链模型^[24-26],这些模型的优点是将服装层的传热、传质都考虑在内,但由于热阻和湿阻都是在与实际着装情况差异较大的实验条件下确定的物理量,故应用时引起的偏差也是较大的。这些模型只考虑了空气

为静止的状态,对于空气流动引起的对流效应没能给予考虑。

1983年,澳大利亚的 Stuart 和 Denby^[27]研究了以风为主导因素的服装层(织物)热湿传递现象,并根据织物透气性大小,给出了透气性大时通过织物的热湿流量的近似计算式。法国的 Berger^[28]认为在服装和皮肤之间被限制的空气层不仅能产生隔热效果,还可以调节人体的显热和潜热损失。对此他提出了风泵效应模型,通过引入微小气候空气更新率的概念对微气候中空气的温度和含湿量进行了计算,并与人体热平衡方程相结合,分析了不同季节服装对人体舒适调节作用。这些模型突出了气体流动所带来的服装与微气候之间以及服装与外界环境之间的热、质交换,表明气相总体移动对服装热湿传递过程具有重要的作用。Ghali 等^[29]为了考虑织物内气体流动对织物传热传湿的影响,提出了三点通风模型。整个服装层做三个点简化,如图 1.4 所示,外点表示暴露在纱线间孔隙中的空气部分;内点表示纤维内部及纱线内部的部分,它由外点完全包围;第三点是空气点。外点同流动的空气和内点进行热湿交换,内点仅通过扩散与外点进行热湿交换。织物纤维对水蒸气的湿吸附首先发生在外点,然后通过扩散作用传到内点。随后, Ghali 等^[30]又将该模型拓展成多层织物系统。尽管该模型考虑了很多复杂因素,但该模型的实质还是一个热阻和湿阻模型,无法准确确定内点和外点的比例,这必然限制其应用。

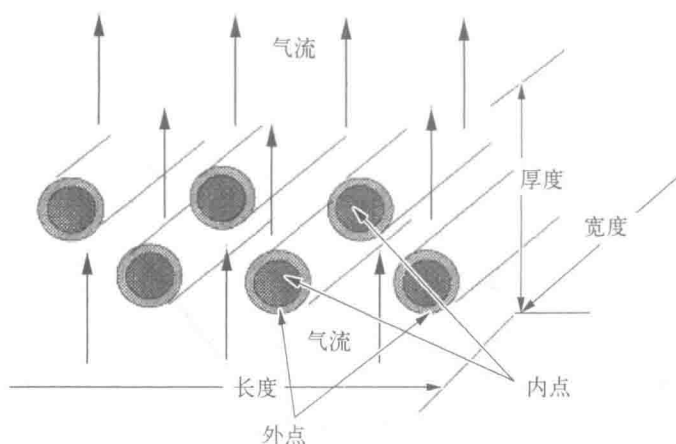


图 1.4 三点通风模型示意图

所有上述这些模型都认为热和湿的传递是一个独立的过程,并且把服装看成一个整体,这些研究大量应用于各种稳定的穿着状态。在相对湿度瞬变期间,热和湿的传递过程是耦合的,服装的热阻受到纺织纤维吸湿/放湿的影响。如当人体皮肤发汗时,水汽透过布料内的微小孔隙传递到外界,达到散热降温的目的。当水汽通过织物时,由于纤维对水蒸气的吸湿作用,使气态水变为液态,进而有相变潜热生成。

这样,纤维会被加热引起温度升高,势必引起以温度为驱动力的显热传递。同时温度的升高又会引起水蒸气饱和蒸汽浓度变化,进而引起蒸发量的变化。因此,对于动态条件下服装热湿舒适性评估,前述的测试方法、评价标准和计算模型不再适用。

郑涛和倪波^[31]使用 Farnworth 提出的热阻、湿阻模型,把整个织物分成更多的层数,纤维吸湿特性对织物的(热阻)传导率和热容的影响、纤维对水蒸气的吸附过程都按照 Li 和 Luo^[15]建立的热湿耦合模型所考虑的给定,已经考虑到了热阻和湿阻耦合的影响。史晓昆和倪波^[32]还把上述模型加入辐射项,对由于吸湿放热引起织物温度升高,进而导致的辐射现象进行了研究。这些模型在实质上与建立在微元基础上的热湿耦合模型殊途同归。但是,液态水的传递过程及其机制在模型中仍然不能给予适当考虑。特别是水、液、汽、热之间的耦合传递,这是一个非常复杂的现象,仅凭热阻和湿阻两个指标很难把这些现象全部考虑到。

1.3.3 微元织物热湿耦合模型

织物热湿耦合传递,已被广泛认为是理解穿着服装动态舒适性的重要因素。Henry^[33]第一个提出建立在微元体上的描述织物中热湿传输的热湿耦合数学模型,机制如图 1.5 所示,基本模型如下:

$$(1 - \varepsilon_{\text{fab}}) \frac{\partial C_f}{\partial t} + \varepsilon_{\text{fab}} \frac{\partial C}{\partial t} = \varepsilon_{\text{fab}} D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.3)$$

$$(1 - \varepsilon_{\text{fab}}) C_{v, \text{fib}} \frac{\partial T}{\partial t} - (1 - \varepsilon_{\text{fab}}) \Delta H \frac{\partial C_f}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.4)$$

其中, C_f 是纤维内的水蒸气浓度; ε_{fab} 是织物的孔隙率; C 是孔隙内的水蒸气浓度; $C_{v, \text{fib}}$ 是纤维的体积热容; ΔH 是纤维对水蒸气的吸附和解吸热; T 是温度。

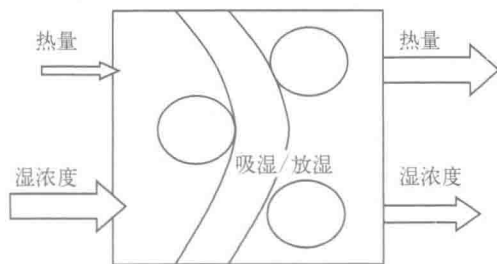


图 1.5 热湿耦合传递模型示意图

该模型建立在如下假设基础上: ① 由于吸湿而引起的纤维体积变化不计; ② 当通过纤维水蒸气的扩散系数远小于空气中水蒸气的扩散系数,纤维中的湿

传递可以忽略不计;③当纤维直径较细和水蒸气在空气中传播速度远大于在纤维中时,织物中纤维的取向在水蒸气传递过程中所起的作用很小;④当纤维直径非常小,比表面积非常大时,在此过程中纤维和空气间的热平衡瞬态完成。后来, Henry^[34]又假定纤维中的吸湿量线性依赖于温度和空气的湿浓度,并且纤维与邻近空气达到平衡是瞬间的。但该假设离实际的纤维吸附过程太远,限制了它的应用。为了改进上述模型, Nordon 和 David^[35]提出了纤维中湿含量与周围相对湿度的实验表达式,并结合几个被 Henry 忽视的因素给出了方程的数值解。其表达式如下:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial C_f}{\partial t} = (H_a - H_f) \chi \quad (1.5)$$

$$\chi = k_1 (1 - e^{k_2 | H_a - H_f |}) \quad (1.6)$$

其中, H_a 是孔隙内空气的相对湿度; H_f 是纤维内空气相对湿度; k_1 、 k_2 为实验常数。这些表达式忽略了纤维的吸附动力学原理。Li 和 Holcombe^[36]发展了一个新的吸附率方程。该方程考虑羊毛纤维的两阶段吸附特性并且结合更实际的边界条件去模拟羊毛织物的吸附行为。

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = (1 - \alpha) R_1 + \alpha R_2 \quad (0.0 \leq \alpha \leq 1.0) \quad (1.7)$$

其中, R_1 和 R_2 表示第一和第二阶段的纤维湿吸附率; α 是第二阶段发生的比例。 R_1 可以通过数值方法解扩散方程来获得, R_2 需要通过实验来确定。而 α 是根据 Watt 的实验数据获得的^[37]。

Li 和 Luo^[38]改进了纤维中湿吸附过程的数学模拟方法,羊毛纤维中的两阶段吸附过程通过一个统一的扩散方程和两套变化的扩散系数来模拟。

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{1}{\partial r} \left[r \cdot D_f(x, t) \cdot \frac{\partial C_f}{\partial r} \right] \quad (1.8)$$

在这个模型的基础上, Luo 等^[39]建立了一个新的模型,将 Farnworth^[40]发表的热辐射模型加入能量守恒方程,并用于较大温差下的传热传湿过程。

$$\frac{\partial F_R}{\partial x} = -\beta F_R + \beta \sigma T^4 \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial F_L}{\partial x} = \beta F_L - \beta \sigma T^4 \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \varepsilon_r \quad (1.11)$$

但这个模型并不能清楚地描述蒸发和凝结过程,以区分与吸湿—放湿过程的差别。并且没有考虑毛细管凝结与液态水传递机制。

1981年, Ogniewicz 和 Tien^[41]研究了具有相变的热湿传递过程,在它们的模型中液态水处于摆动状态,即液相凝结量随时间改变,但液态水并不流动。Motakef 和 El-Masri^[42]在该模型的基础上将这一模型推广到液相流体在多孔介质中流动情形。基本方程如下:

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} + \Gamma_{lg} \quad (1.12)$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{d^2 T}{dx^2} - \lambda_{lg} \Gamma_{lg} \quad (1.13)$$

$$\rho_c \varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} = \rho_c \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left[D_l(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] - \Gamma_{lg} \quad (1.14)$$

但是该模型中的扩散系数只是一个常数,没能与多孔介质及流体特性联系起来,其应用受到限制。1995年, Murata^[43]研究了具有冷凝相变的热湿传递方程,其中温度变化高达 100℃。在 Murata 的模型中考虑了流体的重力及对流影响,得到的理论结果与实验吻合。1998年, Bouddour 等^[44]研究了在湿润的多孔介质中具有蒸发/凝结相变的热湿传递方程,并给出了令人满意的结果。Hsieh 和 Lu^[45]研究了在多孔介质中的热力弥散过程。遗憾的是,在这些研究中,多孔介质材料都没有考虑固相材料的吸湿性,而大多数有机材料总是或多或少具有一定程度的吸湿性能,这是在有机产品的设计中必须考虑的因素之一。为了克服这一缺陷, Li 等^[46]建立了一个新的模型。该模型在 Li 和 Luo^[38]模型的基础上多了一个质量平衡方程来描述液态水的传递过程,以及推导出了一个液态水在多孔纤维材料中的扩散系数方程,包括表面张力 γ_f 、接触角 θ 、有效毛细管孔径分布 d_c 等物理参数,如式(1.15)所示:

$$D_l(\varepsilon_l) = \frac{\gamma_f \cos \theta (\sin^2 \alpha) d_c \varepsilon_l^{\frac{1}{3}}}{20 \eta \varepsilon^{\frac{1}{3}}} \quad (1.15)$$

它们的控制方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial (C_a \varepsilon_a)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_a} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_a \frac{\partial (C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right] - \xi_1 \varepsilon_f \Gamma_f + \Gamma_{lg} \quad (1.16)$$