

高温环境的人体热反应 机理与安全评估

翁文国 付明 杨杰 著



科学出版社

高温环境的人体热反应 机理与安全评估

翁文国 付 明 杨 杰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先描述人体与环境之间的热交换过程,研究影响人体与环境之间热交换的因素,探讨人体热生理调节机理及调节方式;其次通过小尺寸及全尺寸暖体假人实验研究服装之间的热湿传递过程,建立单层及多层织物模型,分析皮肤、空气层、织物及环境之间的热湿传递过程;再次通过人体实验、数学建模、假人实验及 CFD 仿真等四种研究方法,揭示高温环境中人体热反应机理,预测高温环境中人体热生理参数、评估舒适度和热应激;最后介绍评价人体热舒适性的常用指标,建立人体热舒适性评价模型,构建高温人体热应激评价方法以及皮肤烧伤预测方法,为灾害现场的人员安全评估提供指导。

本书可供公共安全、消防工程、人体工效学、航空航天、建筑设计和生物医学等相关领域的科研人员、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温环境的人体热反应机理与安全评估/翁文国,付明,杨杰著. —北京:科学出版社,2017.12

ISBN 978-7-03-055219-8

I. ①高… II. ①翁… ②付… ③杨… III. ①体温-人体生理学-研究 IV. ①R339.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 274210 号

责任编辑:马 跃/责任校对:樊雅琼
责任印制:霍 兵/封面设计:无极书装

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>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:247 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

关注人员安全，是公共安全“以人为本”理念的集中体现。近年来我国各类灾害事故频发，如“8·12”天津特别重大火灾爆炸事故。火灾、爆炸、危化品泄漏等复杂灾害事故，严重威胁广大人民群众和应急救援人员的生命安全，该书集中关注火灾高温环境下的人体热损伤与安全评估。

在以火灾为代表的高温环境中，由于燃烧产生对流、辐射以及灼热物体表面对人体的热传导，人员可能受到其直接或间接的伤害。针对火灾等高温环境的人体生理和个体防护研究，一方面是从火灾演化动力学的角度研究高温环境的物理规律，即确定高温环境参数的演化；另一方面是从生物传热学和生理学的角度研究人体温度的动态变化以及损伤机理和程度。将火灾演化动力学、生物传热学、生理学等有机结合，探索高温环境中的人体生理变化过程，对于保障人员生命安全、提高应急能力与救援效率、加强个体防护装备研发等，具有重要的研究价值和实际意义。

该书通过假人实验、生理实验、数学建模及 CFD 仿真等，研究高温环境的人体热反应机理与安全评估，一方面，可获得高温环境中人体损伤基础实验数据，分析高温环境中人体—服装—环境热湿传递过程，探索人体皮肤烧伤、生理热应激等损伤过程，进而建立适用于高温环境中人体热生理应激及皮肤损伤评价模型；可以有效评价火灾对人体的损伤机制，实现对安全指标的预测，以及对人体耐受时间和最佳救援时间的评判；也可预测高温环境对应急救援人员的健康和生命安全的威胁，防止发生热诱导性疾病、伤害，提升应急能力并保障救援工作正常进行。以此为基础，推进相关安全与健康标准的制定和改进，确保应急过程中的人员健康、生命安全，有效提升应急能力，促进应急工作的有序进行。另一方面，也为防护材料和装备的研发提供基础理论支撑，为我国个体防护装备的研发、生产及配备注入新的理念。个体防护装备是在应急管理中确保救援安全、高效开展的必要保障。该书对于开展高温灾害环境中个体防护装备的研发与检测检验，以及人体适应性研究，为形成个体防护装备质量要求与测试流程标准，推动我国个体防护装备研发等提供有力支撑。

我愿意将该书推荐给公共安全、消防工程和生物医学等相关领域的学者、研

究人员和研究生阅读，也希望该书作者继续孜孜以求，在灾害环境中人体损伤与个体防护的研究中不断取得新的进展。

中国工程院院士 

2017年10月31日

前 言

近年来,随着社会和经济的快速发展,公共安全面临的形势日益严峻。在公共安全科技的三角形框架中,人员是承灾载体的重要部分,是需要重点研究与保护的对象。高温热辐射等环境是被困人员和救援人员面临的主要威胁,如何评价高温环境中的人员热生理反应,预测环境各项参数对人体的影响程度,保证人员生命安全等,是高温环境应急处置需要考虑的重要问题。

随着公共安全人体热防护领域对人员生命安全保障和防护装备研制的迫切需求,分析高温环境中的人员生理变化过程与安全性相关指标,对于开展高温环境中人员安全性和热舒适性评估,开展人员防护装备研究等方面的工作具有如下重要的意义。

第一,预测高温环境人体热生理参数,进行人员热舒适和热应激评估。综合传热学、生理学、材料学、人体工效学和数值计算学等多学科,建立人体热反应模型,预测人体热生理参数,如皮肤和核心温度、出汗量、血液流量及心率等,计算的生理参数值可用于人员热舒适、热应激及皮肤烧伤评估。

第二,为人体热防护装备测试与研发提供技术支撑。利用模拟及实验得到的人体生理参数,通过不同着装情况下人体生理参数的比较,为防护装备的测试及研发提供支撑。对于推进我国应急装备研发具有十分积极的意义,为我国设计先进的高温防护装备、形成规定防护装备质量要求与测试流程的标准,提供有力的研究支撑。

第三,指导应急救援工作。高温热辐射环境可导致人体烧伤,甚至危及人员生命安全。结合核心温度阈值与暴露时间,可以对不同环境条件下消防员的救援作业时间进行合理调度安排,从而降低热应激水平、提升救援效率、保障人员的生命安全。

本书针对高温环境中的人体热损伤机理,通过人体实验、数学建模、假人实验及 CFD 仿真等研究方法,系统性地分析人体热生理调节机理及调节方式,皮肤、空气层、织物及环境之间的热湿传递过程,建立人体热舒适性评价模型、人体热应激评价方法以及皮肤烧伤预测方法。通过研究高温热辐射环境中人体—服装—环境之间传热传质机理和热防护原理,评估热环境中热舒适、热应激、皮肤烧伤等人员热安全状况,实现对人员安全指标的预测和对人员耐受时间和最佳救援时间的研判。

本书在国家重点研发计划（2016YFC0802801）、国家自然科学基金面上项目（71473147）等资助下完成，在此深表感谢！

由于作者水平有限，时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请读者和同行批评指正。

作 者

2017年6月30日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 个人防护装备	3
1.2.2 人体热反应	9
1.2.3 热舒适性	16
1.2.4 热安全性	16
1.3 本书内容安排	20
参考文献	20
第 2 章 人体热交换及热生理调节	35
2.1 概述	35
2.2 热交换影响因素	36
2.2.1 代谢产热	36
2.2.2 服装热湿防护性能	38
2.2.3 环境条件	39
2.3 人体与环境热交换方式	40
2.3.1 对流热交换	40
2.3.2 辐射热交换	40
2.3.3 传导热交换	41
2.3.4 蒸发热交换	42
2.4 高温环境人体热生理特点	42
2.5 人体典型热生理参数	44
2.6 人体热调节机理	46
2.7 体温热调节方式	48
参考文献	50

第3章 服装热湿传递	52
3.1 基于小尺寸实验的防护服热湿传递	52
3.1.1 实验设计	52
3.1.2 结果与讨论	57
3.2 基于全尺寸假人实验的防护服热湿传递	66
3.2.1 实验设计	67
3.2.2 结果与讨论	73
3.3 单层服装模型	87
3.3.1 皮肤与服装微环境热湿传递	88
3.3.2 织物内层与外层之间热湿传递	88
3.3.3 织物外表面与外界环境的热湿传递	89
参考文献	89
第4章 人体热反应	92
4.1 概述	92
4.2 高温实验室设计	92
4.3 人体热生理实验	98
4.3.1 实验方法	98
4.3.2 高温环境不着装工况热生理实验	100
4.3.3 高温环境防护服工况热生理实验	103
4.4 人体热反应模型	107
4.4.1 被动系统	108
4.4.2 主动系统	110
4.4.3 服装系统	110
4.4.4 人体热反应模型验证	110
4.5 暖体假人与模型耦合系统	115
4.5.1 暖体假人	115
4.5.2 假人与模型耦合方法	117
4.5.3 假人与人体热反应模型耦合系统验证	118
4.6 CFD 与人体热反应模型耦合系统的建立及验证	124
4.6.1 数值假人	125
4.6.2 网格划分	125
4.6.3 CFD 计算求解	127
4.6.4 CFD 与模型耦合方法	127
4.6.5 CFD 与模型耦合系统验证	128
参考文献	136

第 5 章 人体热舒适与热应激	138
5.1 概述	138
5.2 热舒适评价指标	139
5.3 热舒适模型	140
5.4 热舒适评价国际标准	141
5.5 高温人体热应激评价	142
5.5.1 人体热安全信号	142
5.5.2 热应激预测	143
5.6 热应激预测案例分析	145
5.6.1 室内热应激预测评价	145
5.6.2 室外热应激预测评价	147
参考文献	147
第 6 章 皮肤烧伤	149
6.1 皮肤—服装的热湿传递模型	150
6.1.1 问题假设	150
6.1.2 传质方程	150
6.1.3 织物层的能量方程	152
6.1.4 空气层的能量方程	154
6.1.5 初始条件和边界条件	156
6.1.6 数值方法与求解过程	156
6.2 结果与讨论	157
6.2.1 模型验证	157
6.2.2 不同热辐射强度下防护服的湿传递过程	159
6.2.3 不同湿气分布下防护服的湿传递过程	162
6.3 皮肤烧伤预测	164
6.3.1 皮肤传热传质模型	164
6.3.2 皮肤烧伤预测的运用	169
6.3.3 皮肤烧伤预测人员死亡风险	171
6.3.4 人员死亡风险案例研究	172
6.4 烧伤评价实验方法	175
参考文献	178
附录 人体热反应建模参数	181

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

近年来,随着社会和经济的快速发展,公共安全所面临的形势也日加严峻,这主要体现在突发事件频发,造成大量公众伤亡和经济损失,也引发一些社会不稳定现象^[1]。在公共安全科技的三角形框架(由突发事件、承灾载体和应急管理工作组成)中,承灾载体是其中十分重要的一环^[2],是公共安全研究和应急管理工作当中需要重点研究与保护的對象。通过研究承灾载体对突发事件作用的承受能力与极限,可以实现对突发事件作用后果的科学预测;通过研究承灾载体的破坏机理与脆弱性等,可以确定应急管理的关键目标,采取适当的防范和救援措施,从而实现有效预防。人员是承灾载体的重要内容,显然保护人员的安全是承灾载体研究的重要方向。如何保护受灾人员、施救人员在突发公共事件当中的生命安全,如何在有效的个人防护的基础上,圆满实现应急救援的目标,是当前公共安全科技框架中重要的研究方向。

在众多突发事件中,火灾一直是造成人员伤亡和财产损失的主要灾种,全球范围每年发生的火灾超过 600 万起,每年都有约 7 万人死于火灾。可以说,火灾的防护是人类社会一项长期而艰巨的任务,人类也从未中断过针对火灾的研究。其中,如何既能完成好灭火救援任务,又能最大限度地减少和避免自身伤亡,是必须重点考虑和研究的问题。

改革开放以来,伴随着经济的快速发展,我国火灾的发生起数以及经济损失发生大幅增长。例如,1991~2004 年,我国国民生产总值和城镇人均可支配收入分别增长 5.3 倍和 4.5 倍;但与此同时,我国每年的火灾起数和火灾损失也分别增长 4.6 倍和 2.2 倍^[3]。近几年,虽然我国特大火灾和总体火灾总数呈波动下降趋势^[4],但由于我国人口基数大,火灾伤亡总量相应较高,群死群伤的火灾问题十分突出,给人民生命财产造成了巨大损失^[5],例如,1994 年 11 月 27 日辽宁省阜新市艺苑歌舞厅发生的火灾死亡 233 人;同年 12 月 8 日新疆维吾尔自治区克拉玛依友谊宾馆发生的火灾死亡 325 人;2000 年 12 月 25 日的河南省洛阳市东都商厦火灾死亡 309 人。同时,需要关注的是,在灭火救援的过程中也常发生消防员的伤亡事件。

例如, 1983~1995 年, 全国共有 82 名消防指战员牺牲; 据统计, “十五” 期间, 我国消防战斗人员在各类灭火救援活动中共牺牲 43 人, 受伤逾 330 人。而在近几年, 火灾规模与次数波动变化, 虽然消防技术不断进步, 人员防护措施不断改进, 但全国消防部队平均每年仍有 20 多名官兵因公或在灭火救援中牺牲, 负伤的数目则更多^[6-8]。在众多的火灾当中, 建筑火灾造成人员的伤员比例很高, 因为建筑火灾与其他火灾相比, 具有火热传播迅速、扑救困难的特点^[9, 10], 建筑火灾所形成的室内高温环境, 极易造成人员伤亡事故和十分严重的经济损失^[11]。消防员在救援现场发生伤亡的原因, 除了意识和管理层面, 在灾害环境危险性预测、防护技术应用及研发等方面的科技支撑不足也影响着高温环境中人员防护技术的向前发展。

虽然针对突发公共事件中人员热防护及安全评估已经开展了一定的研究, 在应急处置当中对相关应急人员和公众也采取了一定的保护措施, 但是由于灾害事故环境的危险性高, 危险因素多且十分复杂, 导致目前对灾害事故危险环境中人体实际受高温及辐射等危险因素的具体影响所产生的人体生理反应、人体危险因素的耐受极限, 以及个人防护设备的有效性、舒适性等诸方面的具体研究还有很大的不足。

针对高温环境中承担应急工作的消防员等应急处置人员, 如何评价其在高温环境作业过程中的热忍耐情况, 预测环境的各项参数对人体的影响程度, 以及如何减小高温环境对人员产生的危害, 保证灾害环境中的人员生命安全等, 是高温环境应急处置需要考虑的重要问题。因此, 开展灾害事故环境中的人员安全基础科学研究十分必要。

在以火灾环境为代表的所有高温环境当中, 由于燃烧产生强辐射和高热量, 人员会受到其直接或间接的伤害。而针对火灾等高温环境当中的人员防护和人体生理的研究, 从火灾演化动力学与传热学理论结合的角度研究高温环境中的物理规律, 即确定高温环境条件的特点, 从生物传热学和生理学的角度研究人体温度的动态变化以及损伤机理和程度。通过实验与数学模拟的手段, 将生物传热、生理学与灾害演化动力学有机结合, 探索特殊高温环境中的人体生理变化过程具备重要的研究价值。开展人体热反应研究是提升热防护水平、保障消防员生命安全、提高应急救援效率与训练水平、加强个体防护装备研究与测试的重要科技手段。

1.1.2 研究意义

人体热防护及安全评估已成为一个非常活跃的研究方向, 广泛应用于航空航天、建筑设计、人体工效学、生物医学和公共安全等领域^[9-11]。载人航天领域由于执行任务环境的复杂性, 以及对航天器环境舱、航天服和人体热舒适性设计的高要求, 极大地推动了人体热防护研究的发展^[12-15]。在此研究基础上, 人体热防

护研究在建筑设计、暖通空调等领域可实现人体舒适性研究；在现代生物医学工程方面可获取并描述人体温度场并进行医学诊断；在人体工效和热防护装备领域可进行热防护装备的设计与评价；在公共安全领域可用于指导应急救援、人员热舒适及热应激评估、防护装备研发与测试等。

为了科学合理地评估人体在高温热辐射环境下的生理参数、降低热应激水平、提升救援效率、保障生命安全等，针对在高温环境中作业的人员，从理论与实验两方面进行高温人体热损伤研究。随着公共安全人体热防护领域对人员安全保障和防护装备研制的迫切需求，分析高温环境中的人员生理变化过程与安全性相关指标，对于开展高温环境中人员安全性和热舒适性评估，开展人员防护装备研究等方面的工作具有重要的意义。

(1) 预测高温环境人体热生理参数，进行人员热舒适和热应激评估。

综合传热学、生理学、材料学、人体工效学和数值计算等多学科，建立人体热反应模型，预测人体热生理参数，如皮肤和核心温度、出汗量、血液流量及心率等，计算的生理参数值可用于人员热舒适、热应激及皮肤烧伤评估。

(2) 为人体热防护装备测试与研发提供技术支撑。

利用模拟及实验得到的人体生理参数，通过不同着装情况下人体生理参数的比较，为防护装备的测试及研发提供支撑，对于推进我国应急装备研发具有十分积极的意义，为我国设计先进的高温防护装备、形成规定防护装备质量要求与测试流程的标准，提供有力的研究支撑。

(3) 指导应急救援。

高温热辐射环境可导致人体烧伤，甚至危及人员生命安全。结合核心温度阈值与暴露时间，可以对不同环境条件下消防员的救援作业时间进行合理调度安排，从而降低热应激水平、提升救援效率、保障人员的生命安全。

高温火灾环境以及高强度的应急救援任务，对被困人员和救援人员热安全评估提出了急迫的要求。关注高温环境中的人体热损伤机理，通过建立人体—服装—环境的热湿传递数学模型，通过假人实验与数值模拟手段挖掘风险的发生与演化过程，预测高温环境中的皮肤温度、核心温度和出汗量等生理参数，实时评估现场人员的热安全状况，为消防指战员根据火灾环境选用适当的应急装备提供指导，为我国火灾救援和减少人员伤亡提供理论依据，最终达到保护人民生命安全的目的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 个人防护装备

近年来，研究者以人体—服装—环境为系统，通过实验研究和数学模型建模，

分析人体—服装—环境之间的热湿传递过程,研究个人防护装备的热防护机理和性能。此外从人机工程学的角度,评估个人防护装备对热生理系统的影响,在此基础上,建立人体热防护检测的国际标准^[16-18]。

1. 热湿传递实验研究

人体通过服装与环境之间进行热湿传递。它们之间的热湿交换过程对着装条件下人体的热舒适和热应激起决定作用。这一动态过程主要取决于环境温度、相对湿度、环境风速、人员代谢量、服装对热传递的阻碍能力及服装对湿传递的阻碍能力等六大因素^[19]。针对实验研究热湿交换过程的环境条件,分为常温、低热辐射和高热辐射等热环境。

服装热阻和湿阻分别表征服装对传热和传湿的阻碍能力,是热舒适评价和极端温度热安全评价中两个重要的物性参数^[20]。服装热阻和湿阻可以通过小尺寸的出汗热平板^[21]和全尺寸的出汗暖体假人(thermal manikin)^[22]测量得到,测量实验条件和步骤分别在标准 ASTM F1868—2009^[17]和 ISO 9920—2009^[16]有详细的规定和描述。基于热平板的测量机理, Schacher 等^[23]对比了两种纯涤纶织物,将服装热阻与织物的导热系数联系起来,得出测量环境气压和空气流速对热阻有很大影响的结论。

暖体假人的身体尺寸和物性参数等与普通成年人相似,并具备与人体结构相近的分区,能够模拟人体体温动态平衡过程^[24]。世界上现有的出汗暖体假人有 Newton、Coppelius、Sam 和 Walter 等。对研究人体与服装之间的热交换而言,假人可以测量对流、辐射和导热的散热途径,同时可以测量出汗汽化散热这一重要的传热途径。现有的研究主要包括服装局部热阻的分析对比^[25],不同热阻和湿阻计算方法之间的差异性^[26],不同假人控制模式之间的差异性^[27],假人的不同姿态的影响^[28],以及真人实验和假人实验测量热阻与湿阻的差异性^[29]。此外,还有学者研究不同环境因素和条件对服装热湿传递性能的影响。Parsons 等^[30]和 Qian 等^[31]分别通过实验研究了环境风速和人体运动对服装热阻和湿阻的影响,得出环境风速和人体运动加快服装热湿传递使得服装热阻和湿阻减小。Havenith 等^[32]利用出汗暖体假人研究了水蒸气冷凝和热泵效应对服装湿阻的影响,分析得出实验高估了蒸发热损失。Chen 等^[33]通过出汗暖体假人 Water 分别测量干态和出汗条件下的服装热阻,得出出汗条件下服装热阻比干态下测量值减小 2%~8%。因此,在人体大量出汗的条件下,干态下测量的服装热阻需要修正,用于分析人体与环境之间的热交换。

在火灾等高温热辐射环境下研究防护服的热湿传递性能,由于轰燃的热辐射强度很大,暖体假人不能正常工作,因此暖体假人可以作为研究低热辐射环境中人体热反应和防护装备的有效实验仪器。在常规环境下和极端红外辐射环境下, Richards 等^[34, 35]应用暖体假人 Sam 的发汗和运动功能研究对比不同服装的性能和

变化情况,得出环境风速、人体活动量和呼吸量对服装热阻有很大的影响。在欧盟 ThermProtect 计划的支持下^[36],欧洲相关研究者利用暖体假人,研究了热辐射强度、风速、服装热阻、服装外表面的反射率以及水蒸气的透气性等参数对热防护性能的影响^[37-41],得出假人对热辐射的能量吸收取决于热辐射强度和防护服对水蒸气的透气性。通过以上热辐射环境中的假人实验,den Hartog 等^[41]预测了由于热辐射引起的假人散热量的减少量,结果表明假人热损失与热辐射强度呈线性关系。

适用于模拟真实火场环境中使用的假人是燃烧假人(fire manikin)^[42]。燃烧假人的实验舱体长、宽、高的最小尺寸都是 2.1m,必须保证绝热性能良好以及配备相关的通风和安全设施。燃料系统能满足燃烧假人持续暴露于 84kW/m^2 的热辐射强度 8s 以上,火焰喷口的数量和空间布置要将燃烧假人吞没于火焰中。同时超过 100 个热流密度传感器分布于燃烧假人模型全身,主要用于测量热流密度随时间的变化以及全身分布特点^[43]。国际上的相关标准组织^[44,45]都对使用燃烧假人实验评估热防护服的热防护性能提出了相应的技术要求。

此外由于暴露于热辐射环境中,防护服的热防护性能还可以通过小尺寸实验进行检测,主要包括热保护性能(thermal protective performance, TPP)^[46]检测方法和辐射防护性能(radiant protective performance, RPP)^[47]检测方法。TPP 检测或者 RPP 检测一般是在中高热辐射环境中进行的(21kW/m^2 、 42kW/m^2 或者 84kW/m^2)。将热防护服的服装面料作为试样,置于热流加热器上,热量垂直入射到试样的正上方,测量穿过材料的热流密度,判断是否与引起皮肤二度烧伤的热量相等,得到二度烧伤时间。小试样实验相对简单,费用不高,便于服装防护面料之间的隔热性能对比。在使用 TPP/RPP 检测仪和防护服储热分析仪的基础上, Song 等^[48]建立了一种热辐射强度范围在 $6.3\sim 8.3\text{kW/m}^2$ 的测试仪器,用于检测防护服的热防护性能,分析湿气的影响,计算着装下人员的生理负担,预测不同防护服材料的烧伤时间,结果表明防护服的性能与服装内部储热密切相关。Barker 等^[49]的实验结果表明,内部含湿量严重损坏了服装的热湿交换性能。Zhu 等^[50]发现当热辐射强度低于 21kW/m^2 时,防护服内部含水量增加,二度烧伤时间延长;当热辐射强度高于 42kW/m^2 时,服装内部的热传递增加。Keiser 等^[51]利用石英灯为热源,在 5kW/m^2 的热辐射强度下测量了防护服的温度分布,分析湿气传递的过程,结果表明服装内部的湿气分布有助于热防护性能的提高。Raj^[52]利用人体模特开展了石油天然气燃烧实验,测量 5kW/m^2 的热辐射强度下人体所在位置处的热流分布,分析不同防护服减缓外部热辐射的性能。

防护服的热防护性能受到服装内部以及与皮肤之间空气层的影响。Torvi 等^[53]使用小尺寸实验平台、可视化仪器以及数值模拟等方法,分析测试样品和检测仪之间空气层的影响,结果表明自然对流发生的条件是空气层的厚度达到 $6\sim 7\text{mm}$ 。Psikuta 等^[54]使用三维扫描技术,分别测量人体模特裸体和着装以后的三维分布,

通过前后对比得出着装人体与服装之间的接触面积和之间空气层的分布。燃烧假人平台也用于定量评估空气层厚度、空气层分布以及服装设计对人体与服装之间热传递的影响^[55-57]。Song^[58]在建立的燃烧假人实验平台的基础上,使用三维扫描技术检测假人穿着防护服之后的空气层分布,分析得出空气层最佳的防护厚度是7~8mm。Lu等^[59]利用TPP强热辐射实验平台,研究湿态下防护服内部各层织物之间空气层的影响,实验结果表明当空气层的厚度小于12mm时,湿气传递有助于热防护性能的提高,建议最佳的空气层厚度范围是9~12mm。总结起来,现有的空气层的实验研究主要集中在防护服和皮肤之间的空气层的分布以及轰燃下的热传递。

为了对比小尺寸和全尺寸实验,Lee等^[60]使用轰燃条件下小尺寸TPP实验平台和全尺寸燃烧假人实验平台,测量单层防护服的空气层分布和热防护性能,结果表明如果全尺寸实验测量出了空气层厚度和分布,将小尺寸实验设定对应的空气层厚度,能够预测全尺寸实验的测试结果。Stroup等^[61]开发了一种小尺寸实验和全尺寸实验的仪器,研究暴露于热辐射下多层防护服热防护性能,通过实验对比发现空气层对防护服的热传递有明显影响。在相同的空气层厚度情况下,小尺寸实验和全尺寸实验之间吻合较好。但是使用的全尺寸假人是人体模特,不能控制假人的皮肤温度以及不具备出汗功能。

综上所述,研究热辐射下防护服热湿传递过程和测量其热防护性能的实验方法主要包括小尺寸实验和全尺寸实验与在一般室内环境下分析热阻和湿阻等物性参数随环境的变化情况,以及在高温热辐射环境下研究热湿交换过程。但是在高温热辐射环境中,外部热量透过热防护服到达皮肤层。而在一般室内环境下热量从皮肤层散发,通过防护服的隔热层向外传递。高温与常温下热量传递过程不同,热量透过防护服不同织物层的顺序也会不同,这将对防护服热阻和湿阻的测量产生影响,进而影响高温热危害评价的准确性。此外,现有关于高温热辐射环境下防护服的热湿传递过程的研究没有定量分析服装内部含水量和热辐射对热湿传递的耦合影响,没有测量防护服的热阻和湿阻等参数。因此有必要开展高温热辐射环境下的服装热湿传递性能的实验研究,测量高温热辐射环境下的热阻和湿阻等参数,建立适用于高温热辐射环境下防护服热阻和湿阻的计算方法,准确评价高温热辐射环境中的人员热安全。

2. 传热传质模型研究

服装一般由纺织物做成,属于多孔介质。纺织物由纤维直接纺成或者由纤维先绕成纱线然后由纱线纺成。纤维之间以及纱线之间都存在孔隙。人体通过新陈代谢和运动产热,也受到外部环境中辐射热源的影响。人体与服装以及服装与环境之间存在导热、对流和辐射等多种热传递的方式。人体出汗以及外部湿环境使

服装中存在水分的传质过程。高温环境下水分在服装中的传热传质过程将伴随水蒸气和液态水之间的相变过程。因此, 纺织服装与人体或者外部环境之间存在包括导热、对流、辐射和相变换热等热传递过程以及蒸发、冷却、扩散、吸附和解析等传质相变过程。

Henry^[62]在1939年最先开始模拟常温环境下纺织服装的传热传质过程, 主要分析织物空隙内混合气体的扩散过程, 假设扩散系数与混合气体的浓度和温度有关。1980年以后, 纺织服装传热传质的模拟取得了一些重大突破。Ogniewicz等^[63]假设水滴处于摆动的状态, 温度和水蒸气浓度在水滴移动之前保持不变, 分析了导热和对流等热传递的准静态过程。Motakef等^[64]考虑液滴移动状态下水滴从潮湿区域扩散和蒸发, 得出温度、水蒸气和液滴的浓度随时间的变化过程。在此基础上, Shapiro等^[65]分析了瞬态热湿传递过程, 将模拟结果与对应环境下的实验进行对比发现该模拟扩散传质的时间尺度远大于扩散传热的时间尺度。Farnworth^[66]假设每层服装的温度和湿度保持不变, 首次提出了考虑吸附和冷凝过程的动态热湿耦合传递模型。Vafai等^[67]详细考虑了冷凝过程的动态热湿耦合传递过程, 首次分析了干态和湿态界面的控制方程, 同时分析了边界层对冷凝过程的影响。Vafai等^[68]提出了考虑多孔介质相变的二维热湿传递模型。Tao等^[69]分析了材料吸收性。Murata^[70]分析了重力作用下的水滴下降过程。Gibson^[71]分析了纺织物在对流和扩散过程、液滴的吸附和解吸、毛细作用以及有风条件下对透气性的影响。Li等^[72]研究发现亲水性纺织物中气体的扩散过程包括两个阶段: 第一个阶段遵守菲克定律, 这一阶段水蒸气扩散主要由浓度差主导, 扩散系数取决于水分, 同时液态水在表面张力的作用下从含水量高的地方流向含水量低的地方; 第二阶段比第一阶段慢很多, 这一阶段吸湿程度和快慢取决于热传递过程, 扩散系数服从指数关系, 取决于扩散时间。Fan等^[73, 74]首次综合考虑吸附冷凝过程、辐射热传递过程和液滴的运动等热湿传递动态过程。在以上模型基础上考虑压差引起的水分流动和冷凝的超饱和状态, 运用模型分析气态扩散、冷凝和蒸发以及水滴运动等过程对浓度分布和传热的影响^[75-77], 研究不同纺织物组合的透气性、黏性以及边界条件对服装散热透湿性能的影响^[78, 79]。此外其他学者研究分析了纤维尺寸和织物孔隙尺寸分布^[80, 81]、毛细和重力双重作用^[82]以及大气压^[83]等因素对热湿耦合传递的影响。与上述模拟采用的有限差分法对比, 几位学者采用了有限体积法, 对液滴移动采用上风格式, 考虑液滴移动对材料透气性的影响, 分析不同服装参数对液体吸附和冷凝的影响^[84-86]。

针对热辐射环境下热防护服的数值模拟主要集中在北美的研究机构。Torvi^[87]使用有限元方法, 采用热解重量分析(thermogravimetric analysis, TGA)和示差扫描热量计(differential scanning calorimetry, DSC)测量防护服材料的比热, 考虑了防护服材料对热辐射的吸收以及温度对材料的物性参数的影响, 系统性地研