



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

一种新型穿戴式温度调节系统的设计及 性能研究

姓名：侯瑾

学号：1432542

所在院系：机械与能源工程学院

职业类型：工程

专业领域：动力工程

指导教师：许鹏 教授

副指导教师：

二〇一七年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**Design and Performance Research of a New
Type of Wearable Temperature Conditioning
System**

Candidate: Hou Jin

Student Number: 1432542

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Engineering

Major: Power Engineering

Supervisor: Prof. Xu Peng

March, 2017

一种新型穿戴式温度调节系统的设计及性能研究

侯瑾

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

穿戴式温度调节系统可以在非空调房间、室外、特殊热环境下提高人体热舒适度，从而提高人们的工作效率及生活品质。本课题从设计制作、模拟分析、实验验证三个方面展开，设计一套用于人们日常降温的新型穿戴式温度调节，并对其使用性能及影响因素进行研究与分析。

首先，为克服现有的空气冷却服冷却效果不显著、液体冷却服需随身携带冷机、相变服装仅能间歇使用的缺点，本课题提出一种新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服：以相变材料为人体降温、以埋敷在相变材料中的冷水管为相变材料蓄冷、以微型冷机为相变液冷服提供冷量。并通过初始的设计计算确定其设计参数及选材等基本方案并制作出相变液冷服实体。

其次，建立相变液冷服的蓄冷传热模型，模拟分析相变液冷服的蓄冷性能及各设计参数对相变液冷服蓄冷性能的影响。提出并建立适用于人体局部冷却及瞬态变化的人体-相变液冷服热舒适模型，模拟分析相变液冷服穿着工况的穿着性能，及各使用参数对穿着性能的影响。其中，人体-相变液冷服热舒适模型涵盖了人体传热及热调节、相变液冷服传热、人体心理参数三个方面，能够更为真实及准确地模拟人体与相变液冷服的传热及人体的热反应。通过模拟分析，使用具有较高导热系数及密度的相变材料、较大水管内径、适当流速与进水温度、并行多管路的情况下相变液冷服具有最好的蓄冷性能。通过调整相变液冷服穿戴松紧程度可以有效调节人体的舒适程度。并且在相变液冷服设计计算中应对局部冷却所承担冷负荷的大小选取适当，以提高人体热舒适度。

最后，采用所制作的相变液冷服对其从蓄冷到穿着的整个过程进行实验，实验中测量并记录相变液冷服及人体的各类参数并询问受试人员对此套相变液冷服的看法及建议。实验验证了蓄冷传热模型及人体-相变液冷服热舒适模型中人体热模型及相变液冷服传热模型的准确性，相变液冷为人体降温的有效性，同时也说明了心理参数模型在预测相变液冷服穿着过程人体心理参数方面有一定误差，给出了相变液冷服的不足及改进措施。

关键词： 穿戴式温度调节系统，相变，蓄冷，热舒适，热舒适模型

ABSTRACT

Wearable temperature conditioning system can improve the thermal comfort for human body in non-air-conditioned rooms, outdoor, special thermal environment, thus increasing people's work efficiency and life quality. This paper designed a new type of wearable temperature conditioning system for daily cooling from the design, simulation and experimental verification, studied and analyzed its performance and influencing factors.

In order to overcome the shortcomings of the non-significant cooling effect of current air cooled garment, refrigerator in liquid cooling garment and intermittent use of phase-change garment, this thesis proposed a new type of wearable temperature conditioning system - phase-change liquid cooling garment with cold water pipe buried in the phase-change material for cold storage and cooling, and determined its design parameters and materials through the initial design and calculation, and finally made the phase-change liquid-cooling garment.

The cold-storage heat-transfer model of phase-change liquid-cooling garment was established, and the influences of storage performance and design parameters of phase-change liquid-cooling garment on the cold storage performance were analyzed. The thermal comfort model of human body - phase-change liquid-cooling garment suitable for the local cooling and transient changes was proposed and established. The wearability of phase-change liquid-cooling garment, as well as the influence of parameters on wearability, was simulated and analyzed. The thermal comfort model of human body - phase-change liquid-cooling garment involved the human-body heat transfer and heat regulation, heat transfer of phase-change liquid-cooling garment, and human-body psychological parameters, which could simulate the heat transfer between human body and phase-change liquid-cooling garment and the thermal reaction of human body more accurately. Through the simulation analysis, it was found that the phase-change liquid-cooling garment with higher heat conductivity coefficient and density of phase-change material, larger water pipe diameter, appropriate flow rate and inflow temperature and parallel multi-pipeline had the best cold storage performance. Adjusting the tension of phase-change liquid-cooling garment can effectively adjust the comfort of human body. And in the design of phase-change liquid-cooling garment, it is needed to select the appropriate cooling

load for local cooling, so as to improve the thermal comfort of human body.

The phase-change liquid-cooling garment was tested from the cold storage and wearability experiment, and the parameters of phase-change liquid-cooling garment and human body were measured and their views and suggestions on the phase-change liquid-cooling garment were recorded. The experiment proved the accuracy of human body and phase-change liquid-cooling model in cold-storage heat-transfer model and human body - phase-change liquid-cooling thermal comfort model, and the effectiveness of phase-change liquid-cooling in cooling for human body. Moreover, it also indicated that psychological parameter model had some errors in predicting the psychological parameter of human body when wearing phase-change liquid-cooling garment, and proposed the shortcomings and improvement measures of phase-change liquid-cooling garment.

Key words: wearable temperature control system; phase change; cold storage; thermal comfort; thermal comfort model

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 穿戴式温度调节系统.....	2
1.2.2 穿戴式温度调节系统的设计及研究方法.....	8
1.2.3 人体热舒适与热调节理论.....	9
1.3 研究内容与技术路径	12
1.3.1 研究内容.....	12
1.3.2 技术路径.....	13
1.4 本章小结	14
第 2 章 一种新型穿戴式温度调节系统的设计与制作	15
2.1 穿戴式温度调节系统设计要求	15
2.2 一种新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的设计	15
2.2.1 技术选择.....	15
2.2.2 结构设计.....	18
2.2.3 设计计算及参数确定.....	19
2.2.4 材料选择及材料性质.....	24
2.2.5 设计方案小结.....	27
2.3 相变液冷服的制作	27
2.4 本章小结	28
第 3 章 相变液冷服蓄冷工况传热模拟及分析	31
3.1 蓄冷工况典型案例	31
3.2 相变液冷服蓄冷传热模型	32
3.2.1 几何模型分析及简化.....	32
3.2.2 几何参数及物性参数确定.....	32
3.2.3 传热分析与传热模型.....	33
3.3 数值模拟与求解	35
3.3.1 几何建模与网格划分.....	35
3.3.2 传热模型设置.....	35

3.3.3 模拟结果分析.....	35
3.4 本章小结.....	41
第 4 章 人体-相变液冷服热舒适模型建立及模拟分析.....	43
4.1 穿着工况典型案例	44
4.2 模型概述	44
4.3 人体传热被控模型	45
4.3.1 人体的划分与几何模型.....	45
4.3.2 人体参数的确定.....	46
4.3.3 基于人体能量平衡的生物热方程.....	47
4.4 生理热调节模型	51
4.4.1 模型构成及机理.....	51
4.4.2 控制器模型.....	52
4.4.3 效应器模型.....	53
4.5 穿着工况下相变液冷服传热模型	54
4.5.1 几何模型分析及简化.....	54
4.5.2 相变液冷服参数的确定.....	54
4.5.3 传热分析及传热模型.....	55
4.6 心理热反应模型	58
4.6.1 相变液冷服热舒适分析.....	58
4.6.2 瞬态非均匀热环境下心理热反应模型.....	58
4.7 人体-相变液冷服热舒适模型数值模拟与求解	63
4.7.1 几何建模与网格划分.....	63
4.7.2 传热模型设置.....	63
4.7.3 心理参数计算.....	65
4.7.4 模拟结果分析.....	65
4.8 本章小结	70
第 5 章 相变液冷服蓄冷及真人实验	71
5.1 实验设计	71
5.1.1 实验环境.....	71
5.1.2 实验对象.....	72
5.1.3 实验参数测量.....	72
5.1.4 实验流程.....	75

5.2 实验结果及分析	76
5.2.1 相变液冷服蓄冷实验结果与分析.....	77
5.2.2 人体热环境适应实验及相变液冷服穿着实验结果与分析.....	77
5.3 实验小结	80
第 6 章 结论及研究展望	81
6.1 本文的主要成果与结论	81
6.2 局限性与展望	82
致谢.....	83
参考文献.....	85
附录 A.....	89
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	103

第1章 绪论

1.1 研究背景及研究意义

随着经济的发展,人们对生活质量的要求日益提高。舒适的热环境不仅有利于人们的身心健康和生活水平的提高,还有利于人们提高工作效率、工作积极性,热舒适是人们一项最基本的需求。人体热舒适的状态通过人体、服装、环境三者的相互作用获得,热舒适领域也通常划分为人、服装、环境三个方面^[1]。在严冬与酷暑时期,高温与低温的自然环境给人体带来不适。为了提高人们的热舒适,暖通空调领域从改善室内环境着手,通过调节室内空气温湿度等参数,使室内环境达到满足人体热舒适的状态,为人们提供舒适的工作与生活环境。经过多年的发展,供暖、通风、空气调节系统现已普及民用、商用、工业等各类建筑以及地铁、公交、私家车等各类交通工具。暖通空调领域为提高人们生活质量做出了极大的贡献。但是,即使如此,在满足人们的热舒适方面仍然存在很多问题:1)人们的工作与生活致使人们不能一直停留于空调房间内,一旦出门就会饱受严寒和酷暑的煎熬,并且,频繁穿梭于室内外大温差环境会造成机体适应不良;2)一些特殊的热工作环境,如烧锅炉或轧钢的工作车间,其高温不仅影响工人的工作质量,还会对工人的身体造成伤害。3)在人员密度较小的室内,通过调节大空间内的空气参数来满足少数人的热舒适,在各国面临能源资源紧张的今天,是不节能的举措。

由于人与环境的热交换是通过服装进行的,因此,具有降温和加热功能的功能性服装可以很好地解决以上问题。满足冷暖要求的功能性服装,通常也被称为空调服、穿戴式空调系统等。此功能性服装是服装生理学、暖通空调专业,人类工效学以及其他专业的交叉学科。如今,各领域专家及学者已致力于此项研究,各种形式的穿戴式温度调节系统出现在专利、论文之中,并应用于航空、军事等领域,且部分已经商品化。在目前已研制的具有加热功能的穿戴式温度调节系统中,加热技术主要采用电热织物^[2]等热转化电的技术及太阳能布料^[3]等技术,因其所使用材料体积小、柔软、轻便,具有加热功能的穿戴式温度调节系统已基本能够满足携带及使用方便的要求且被人们所接受。目前市场上电热服品牌很多,如 Tour Master^[4]、Gerbing^[5]等。不同于具有加热功能的穿戴式温度调节系统,由于受到制冷技术的限制,在目前已研制的具有降温功能的穿戴式温度调节系统中,如空气冷却服、液体冷却服、相变服装,大多系统不能兼具降温效果好、轻便、舒适等性能。因此降温服装现如今主要用于航天、军事领域或需要工作人员进行

特殊作业的工业领域,却缺少适用于人们生活中降温使用的穿戴式温度调节系统。因此,为了提高人们在热环境下的热舒适性从而提高人们的生活质量,并为节能做出贡献,本课题旨在设计一套适于人们日常降温使用的新型穿戴式温度调节系统并对其多方面性能进行研究。

1.2 国内外研究现状

本节对国内外穿戴式温度调节系统、穿戴式温度调节系统研究方法、穿戴式温度调节系统的理论基础做详细的阐述,为本课题新型穿戴式温度调节系统的设计与研究提供借鉴。

1.2.1 穿戴式温度调节系统

目前,国内外所研究的能够实现降温功能的穿戴式温度调节系统大致包括三类:空气冷却服(Air-cooled garment),液体冷却服(Liquid cooling garment),相变服装(Phase change garment)^[6],此外还有一些利用其他技术的穿戴系统,如利用水蒸发吸热,气体绝热膨胀制冷等实现降温的穿戴系统。

1. 空气冷却服(Air-cooled garment)

空气冷却服是一种通过向人体表面循环空气,增加汗液蒸发及对流换热,从而达到使人们免于忍受外界热环境的服装。空气冷却服出现在1940年,第二次世界大战期间,它首先用于在高海拔飞行的飞行员,之后,国内外研究学者对空气冷却服进行不同形式的设计及冷却能力等多方面的研究。

Mengmeng Zhao设计了一种带有通风系统的夹克衫^[7],如图1.1(a)。服装上装有2个直径约10cm的小风机并开有两个长条状风口。运行时,环境空气由风机鼓入服装内,在与皮肤进行汗液蒸发换热与对流散热后,由风口排入环境。

Moshe Siman-Tov采用带有空气通道的亲水性纺织面料设计了一种空气冷却服并在服装上配置空气驱动装置^[8],如图1.1(b)。使用时,空气驱动设备将环境空气鼓入空气通道,空气吸收被亲水面料吸收的汗液后排入周围环境。由于皮肤表面气流流速过高会引起皮肤压力感及粘膜不适等,相比于直接将流动空气引入至皮肤表面的空气冷却服,此套服装增加了人体的舒适程度。

中国科学院的刘静,考虑到传统风扇体积大、不易封装及由此制成的服装笨拙从而影响穿着方便等方面的缺陷,提出一种基于微纳米风扇阵列的人体降温空调服^[9],如图1.1(c)。其所采用的微纳米风扇尺寸小,可以编制到服装内,从而对所接触的皮肤进行强化换热,其作用相当于一种空调布。并且,通过对风扇的灵活布置,还可以完成对身体特定部位皮肤温度的局部调节。因此,以微纳米

风扇技术制作的空调服重量轻、柔软舒适，形式多样，与常规服装无明显差别。相比于由传统风扇制作的空气冷却服，此套服装更易于被人们所接受和喜爱。

影响空气冷却服冷却效果的因素主要有空气温度、湿度、流速、与人体有效换热面积等。空气温度越低、湿度越小，冷却效果越好，由于空气冷却服通常直接利用外界环境空气作为循环空气，因此冷却效果受周围环境所影响；空气流速越高，冷却效果越好，但流速过高会使穿着者皮肤感觉不适。空气冷却服具有重量轻、耗能少的特点。但由于其主要通过增加汗液蒸发及对流换热为人体降温，因此冷却能力很有限，并且只有当人体皮肤被一定量汗液润湿的情况下其冷却效果才较为显著。经测试，空气冷却服的最大冷却能力约 $300\text{kcal/h}^{[10]}$ 。针对这一问题，一些学者提出采用带有冷源的空气冷却系统。如，McLellan 研究了一种冷空气背心^[11]。经过冷水换热器冷却之后的空气进入服装内，在增加人体汗液蒸发散热量的同时，以其较低的温度加强与人体的显热换热量。因此，相比于直接利用环境空气的空气冷却服，带有冷源的空气冷却服冷却能力有所提高，但冷源降低了空气冷却服的便携性。

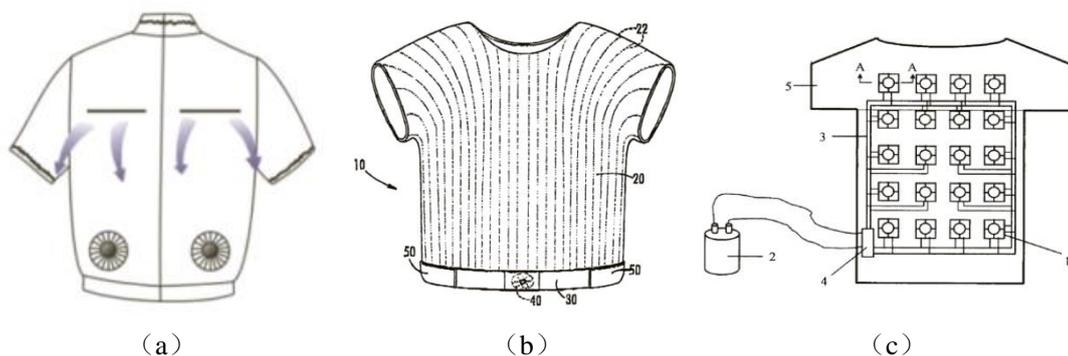


图 1.1 各种空气冷却服

(a) 带有通风系统的夹克衫^[7]；(b) 亲水性纺织面料空气冷却服^[8]；(c) 基于微纳米风扇阵列的人体降温空调服^[9]

2. 液体冷却服 (Liquid cooling garments)

液体冷却服是最常见的个人冷却系统之一。液体冷却服主要由服装布料、液体管路、制冷装置、泵等组成，冷却液采用水或其他无毒液体。使用时，冷却液由泵驱动在服装与制冷装置之间循环，将制冷装置制取的冷量带入液体冷却服并通过液体管路与人体皮肤换热，从而达到为人体降温的目的。

液体冷却服的概念最早由 Billingham 提出。第一套液体冷却服是在 1962 年由英国皇家空军基地的 Burton 和 Collier 研制成功。在早期的液体冷却服中，最为著名的是用于阿波罗飞登月计划的水冷服^[12]。此套水冷服中，40 根很细的塑料管编织在一套棉制内衣里，冷水沿四肢及躯干循环。虽然研究液体冷却服的最

初目的是用于飞行员的热防护,但人们很快认识到用于个体的冷却系统将会有更多可能的应用。目前,已有很多学者致力于液体冷却服的设计与研究中,各种形式的液体冷却服也相继用于民用、医疗及工业等。

Timothy C. Ernst 设计了一套穿戴式冷却系统^[13],此系统由服装和背包两部分组成,如图 1.2 (a)。服装中敷设制冷剂冷管,铝箔包裹冷管作为翅片增强换热。背包为蒸汽压缩制冷系统及 2L 容积的燃料箱。系统总重 5.31kg,体积为 0.318m×0.273m×0.152m。此系统可在环境温度为 37.7~47.5℃的情况下使用,测试得到在环境温度为 43.3℃的环境下,为人体的除热率达 300W。在为人提供冷量 175W 的情况下系统可持续使用 5.7h。此套系统制冷量大,降温效果明显,但由于较为笨重,因此只适用于进行特殊作业的人。

美国 VESKIMO 品牌研制并销售个体冷却系统^[14]。该品牌的个体冷却服包括冷却背心和冷水箱两个部分,如图 1.2 (b)。冷却背心采用质地轻、透气性好的面料。直径约 5mm 的 4 根并行水管间隔均匀的敷设在服装面料内,服装两侧的调节带可根据使用者身材尺寸进行调节,以使冷水管与人体紧密贴合来保证换热效果。冷水箱可储存约 7 磅的冰或水,水箱中装有 12V 水泵,驱动冷水进入服装与人体换热。相比于采用冷机作为冷源的液体冷却服,此套以冷水或冰作为冷源的个体冷却具有系统简单、成本低、运行噪音小的优点,但其制冷的可靠性有所降低。

北京工业大学张行周系统地研究了液冷服系统,系统包括服装及微型制冷系统两个部分^[15]。服装中液体管路以多管路直通设计,水流从髋臀之间的总进水管流入,分流上行至背部,绕过肩向下,经胸腹部到达腰部,然后横行折向髋臀部汇入总出水管,覆盖全身约 40%的体表面积。服装未充水时重量约 550g,充满水时约 690g。所研制的微型制冷系统由三角转子压缩机、管带式冷凝器、套管式蒸发器及毛细管组成。制冷系统重量为 2.85kg,几何尺寸为 270mm×260mm×120mm。经性能测试,该系统能够在 40℃环境下提供 300W 以上的制冷量,可以提供温度在 16~21.6℃之间变化的冷水。在此套液冷服系统中制冷系统的微型化为液冷服提供了轻便的冷源。

影响液体冷却服冷却效果的因素有进口液体温度、液体流速、管径、管长、管路布置均匀性、管网与人体有效换热面积、管网与人体的贴合的紧密程度等^[16]。目前,这些因素较为合理的取值为:进口液体温度 5~25℃、液体流速 60~120kg/h、管径 1.5~3.4mm、管长 90~110m、管网有效覆盖面积 15~20%^[17-18]。液体冷却服具有冷却效率高、冷却效果好、温度可控的优点。但液体冷却服需要与冷源相连,制冷装置体积庞大影响了液体冷却服的便携性,因此还有待微型化;若以冰或冰水混合物作为冷源,其温度过低影响了穿着的舒适性。因此液体冷却服的优化主

要依靠制冷装置的微型化来实现。

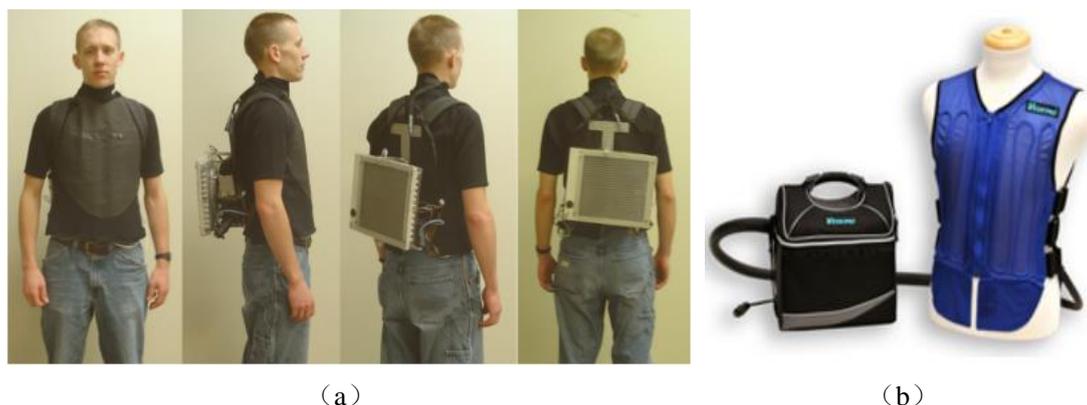


图 1.2 各种液体冷却服

(a) 穿戴式冷却系统^[13]; (b) 美国 VESKIMO 品牌研制并销售的个体冷却系统^[14]

3. 相变服装 (Phase change garment)

相变服装将相变材料放置于服装中, 利用相变材料发生相变时的相变潜热为人体降温。

Brian Doherty 设计了一款带有相变口袋的相变服装^[19]。服装胸前和背后各有一个口袋, 口袋中装有相变材料, 服装利用口袋中相变材料的相变潜热为人体降温, 如图 1.3 (a)。很多学者对相变冷却服的设计也采用了此种形式, 不同之处在于相变口袋的数量、大小及分布方式。例如, 关平等研究了适于医用的相变服^[20], 如图 1.3 (b)。为克服相变口袋体积大, 不服帖的缺点, 设计者缩小相变口袋体积, 布置多个口袋于身体不同部位, 并根据受试者试穿相变服装后的试穿感受不断改进和调整相变口袋大小及布局以得到最佳的设计方案。

Colvin, D. P. 采用相变颗粒设计了一种相变服装^[21]。服装中的相变材料以直径 3mm 的相变颗粒形式嵌入服装布料内, 如图 1.3 (c)。相比于带有相变口袋的相变服装, 此种形式的相变服装具有相变材料分布均匀、柔软舒适、服帖程度好、适于人体活动的优点。

NASA 研究项目研制了一种将相变材料整合于纺织布中的技术^[22], 经与相变材料整合的纺织布看似与普通纺织布没有区别, 却载有纳米级的相变微胶囊。当使用者皮肤温度高于相变材料的相变温度, 这些“隐形”的相变材料就会发生相变而制冷。但由于这种相变服中的相变材料过少, 制冷持续时间很短, 因此通常用于特殊用途, 如短跑运动员在短跑时使用。

影响相变服装冷却效果的因素有相变材料种类、相变材料用量、相变材料与人体的有效换热面积。相变材料应满足相变温度高于 15°C、相变潜热大、相变温度稳定、导热系数大、无毒无害等要求^[6]。相变服装结构简单, 冷却效果好, 并且不需要配置制冷机组, 较为轻便。不足之处在于在使用之前需要预先对相变

材料蓄冷，相变服装只能间歇使用。

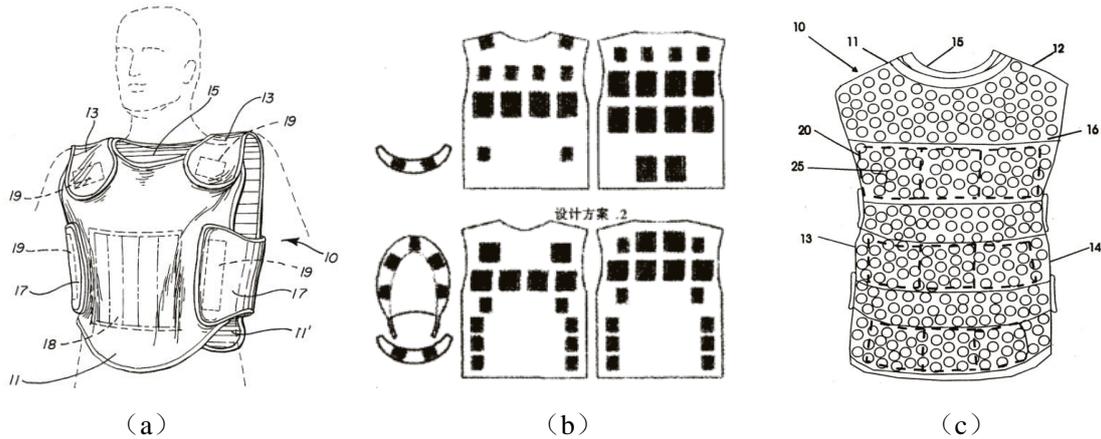


图 1.3 各种相变服装

(a) 两个相变口袋的相变服装^[19]；(b) 医用相变服相变口袋分布^[20]；(c) 相变颗粒形式的相变服装^[21]

4. 其他类型的穿戴式温度调节系统

此外，其他形式的穿戴式温度调节系统的降温原理有水蒸发吸热，气体绝热膨胀，半导体制冷等。

Wendell Vaughn Uglene 设计了一种通过水蒸发吸热来降温的服装^[23]。服装布层之间布置一些装有水的囊袋，布料隔水且能透过水蒸气。使用时，使用者直接紧贴皮肤穿着降温服装，液体通过蒸发吸热为人体降温。这种降温方法的缺点在于，水蒸发会导致人体皮肤表面空气湿度高，妨碍人体汗液蒸发从而造成不适。

Stephen T. Horn 设计了一种利用气体绝热膨胀制冷的个体冷却装置^[24]。如图 1.4 (a)，服装中敷设气体管网，管网有多个末端且分布在人体胸部、颈部等不同部位，服装腰部配有一高压储气罐。使用时，高压气体由储气罐经管网流向末端并在末端绝热膨胀，绝热膨胀过程中气体温度降低从而实现为人体降温的目的。利用气体绝热膨胀制冷的个体冷却服最为明显的优点是轻便且冷却效果显著。缺点是随身携带高压气体存在一定安全隐患，并且管网末端气流流速较大，若气流直接接触皮肤会给人体带来不适。

西安工程科技学院的肖居霞设计了一种智能微空调服，此服装同时具有加热和制冷的功能^[25]。加热部件采用看似与普通纤维相同的加热导电纤维，导电纤维中镶嵌极细的加热电阻丝，通入电流可实现为人体加热的功能。制冷部件采用半导体冷片，冷端贴附于人体皮肤表面，热端在衣服外侧由微小风扇为其散热，如图 1.4 (b)。服装层中安装温度传感器实时测量人体温度，控制器根据监测数据通过控制电流大小控制制冷制热量，由此实现智能化。在此套智能微空调服中，半导体冷片技术的采用使服装较为轻便，并且由于半导体以电能为能源进行制冷，因此通过控制电流易于实现智能控制。

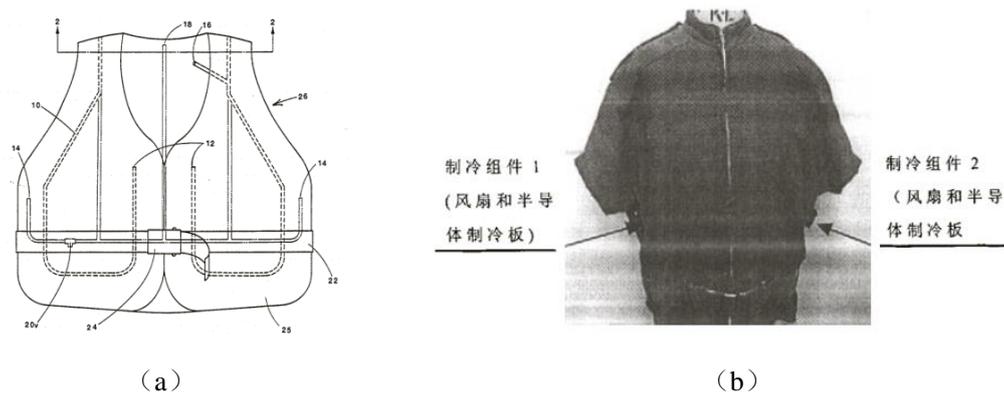


图 1.4 其它类型的穿戴式温度调节系统

(a) 利用气体绝热膨胀制冷的个体冷却装置^[24]; (b) 智能微空调服^[25]

综上, 根据各专家学者的设计与研究现状, 能够实现制冷的穿戴式温度调节系统分类如图 1.5 所示。

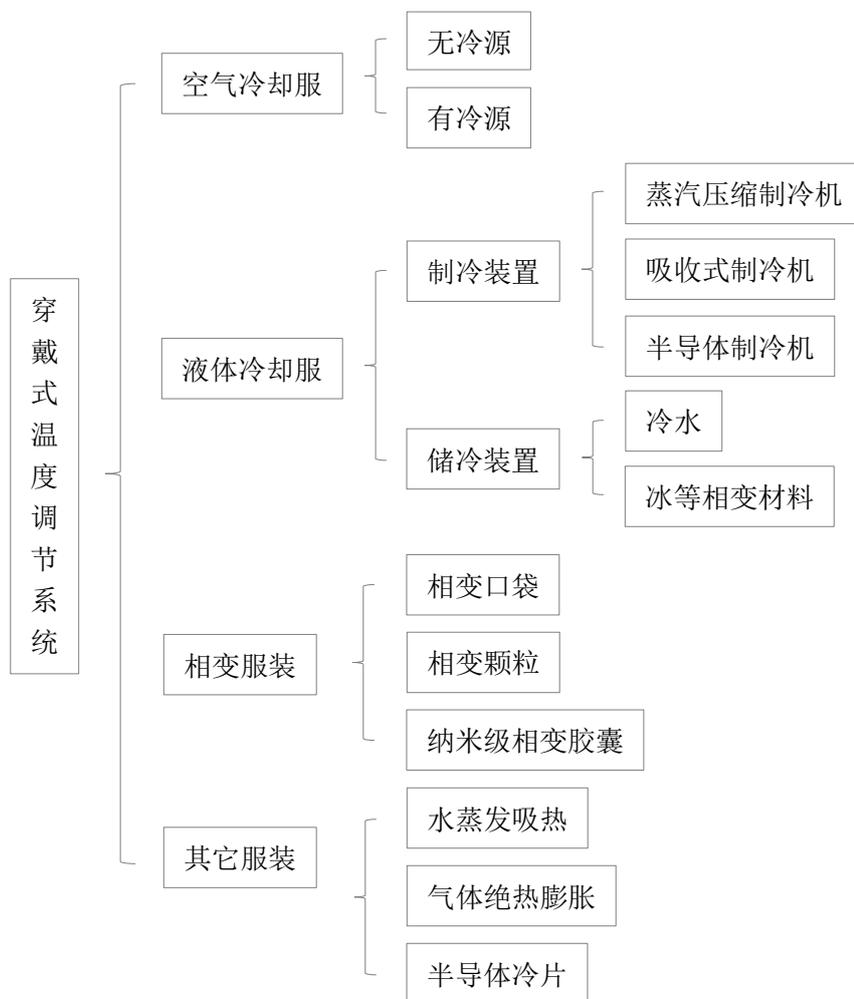


图 1.5 实现降温功能的穿戴式温度调节系统分类图

1.2.2 穿戴式温度调节系统的设计及研究方法

在穿戴式温度调节系统的设计及研究过程中,通常需要测量系统的冷却效果、及人体对系统的热生理反应等,以此来判断设计的合理性、优化设计方案等。目前,穿戴式温度调节系统的设计及研究方法主要有三种:1. 真人实验(Human trial) 2. 暖体假人实验(Thermal manikin measurement) 3. 热生理人体仿真器(Thermophysiological human simulator)^[6]。

1. 真人实验(Human trial)

真人实验是一种测试服装对人体生理影响的常用方法。在进行穿戴式温度调节系统的真人实验时,受试者穿着温度调节系统静坐或活动于给定环境参数的气候仓中。测试内容包括人体的生理参数及主观感受。生理参数包括各部位的皮肤温度、心率等;主观感受包括人体全身及局部的热感觉及热舒适性。真人实验以人体热舒适作为判断设计合理及优化设计方案的依据。关平^[20]对医用相变降温服的设计及性能研究采用真人实验的方法,实验中受试者试穿不同设计方案的服装并给出试穿感受,设计人员根据受试者的试穿感受优化设计方案。

真人实验是测试穿戴式温度调节系统冷却效果及热舒适程度最直接的方法,因此,真人实验是暖体假人及热生理模拟研究方法所不可替代的。但是,真人实验也有很多方面的缺陷。首先,在真人实验中,许多参数的测量受到限制,如人体代谢产热率、服装与人体或与外界之间的换热率。其次,受试者个体体质及主观感受差异大,若要通过真人实验得到可靠的实验结论,尤其对于需要根据实验数据进行拟合并上升为理论的情况,真人实验需要建立在大量的实验样本基础之上,因此真人实验耗时长、成本高。并且,真人实验需要在具备穿戴式温度调节系统实体的情况下才能进行,因此不适于在设计初期分析各类设计参数对服装效果的影响及从多种设计方案中选优的情况。

2. 暖体假人实验(Thermal manikin measurement)

暖体假人实验是利用已研制的暖体假人测试服装对人体生理影响的研究方法。暖体假人可实现恒定体温、恒定产热率、模拟人体行为、模拟人体热反应如出汗等功能^[26]。同时暖体假人可输出各类参数数据,如人体温度分布、人体产热率、皮肤表面热流率等。李利娜利用可行走出汗的暖体假人“华特”对三种不同类型的冷却背心^[27],即液态相变材料冷却背心、微胶囊相变材料冷却背心、液体冷却背心,进行冷却性能的测试,并得出三种冷却背心均具有明显制冷效果但各有不足的结论。

相比于真人实验,暖体假人实验可重复性好,参数测量简便,成本低。并且,暖体假人能够很好地模拟服装穿着在人体身上的物理状况,如服装与人体贴合程度等,这一优点是利用软件进行热生理模拟所不具备的。但是,由暖体假人实验

所得的实验数据及结论很大程度上取决于暖体假人模型的准确性与完整性。目前暖体假人的研制还处在发展阶段,仅以暖体假人进行实验还不能完全且综合地模拟人体在服装作用下的热反应,如血管收缩等人体热调节功能,因此暖体假人在动态环境下的测试结果与真人实验所得测试结果有一定偏离^[28]。例如在实际情况下,当人体穿着冷却服装时,皮肤层血管会因皮肤受到冷却而收缩,以此减少人体皮肤与服装间的温度梯度从而减少人体与服装的换热量^[29]。但当采用不能模拟血管收缩的假人测试冷却服装时,皮肤与服装之间的温度梯度将大于真实的温度梯度,从而导致人体与服装换热量的测试值大于真实值^[30]。

3. 热生理人体仿真器 (Thermophysiological human simulator)

热生理人体仿真器包括热生理模型,即人体热调节模型,及假人两个部分。人体热调节模型模拟人体在各种外界环境及服装作用情况下的人体热调节功能,预测人体温度、出汗率、产热量、血流量等,并将预测结果输入假人系统。在人体热调节模型的控制下,假人产生与热调节模型预测数据一致的皮肤温度、出汗率等。热生理仿真器的总效果相当于一具有人体热调节功能的假人,实现真实模拟人体热反应的功能^[31]。目前已有相关学者应用热生理人体仿真器进行服装及睡眠系统性能测试^[32]、汽车环境舒适度评价^[33]等。

相比于暖体假人实验,热生理人体仿真器在假人的基础上增加了人体热调节模型,一定程度上克服了暖体假人实验不能模拟人体热调节功能的缺陷。但是,经实验校验,热生理人体仿真器的测试效果并不理想,其主要原因是人体热调节系统复杂,使假人在人体热调节模型控制下实时精确地体现人体真实热调节过程的技术有限^[34]。

另外,有许多学者直接利用人体热调节模型模拟环境及服装对人体的作用。在这种应用中,人体热调节模型与服装或环境模型相结合,通过计算机程序或软件实现人体与环境及服装相互作用的模拟。北京航空航天大学的袁修干教授等人将人体热调节模型与液体冷却服装模型、航天服手套模型相结合来研究航天领域的问题^[35]。Naiping Gao, Jianlei Niu 等人将人体热调节模型与个体送风模型相结合研究了不同送风参数下个体送风装置的冷却效果^[36]。

1.2.3 人体热舒适与热调节理论

在穿着穿戴式温度调节系统的情况下,人体、服装、环境三者相互作用。穿戴式温度调节系统的目的是在较不适的环境下为人体提高舒适度。因此穿戴式温度调节系统的设计与研究与人体的热调节及热舒适理论紧密相关。

1. 热舒适定义

对于热舒适,不同专家及标准的定义有所不同。热舒适在 ASHRAE55 标准

中定义为“人体对环境表示满意的状态”^[37]。Bedford、Gagge、Fanger 等均认为热舒适指人体处于不冷不热的“中性”状态^[38-39]。Hensel 认为舒适的含义是满意、高兴和愉快^[40]。Cabanac 认为热舒适是在动态条件下随着热不舒适的部分消除而产生的^[41]。综合各专家及标准对热舒适的定义及研究,人体的热舒适由三个方面决定:1) 在人体活动产热及环境作用下通过服装的失热之间的热平衡;2) 人体皮肤温度、皮肤湿度、排汗率等生理参数;3) 人体想要得到的热状态。

2. 热舒适标准

热舒适标准的目的在于为建筑、设备等领域的工程师提供理论依据、为建筑或室内环境提供评价标准。目前最具代表性的热舒适标准有国际标准化组织制定的 ISO7730^[42]系列标准,及美国供暖、制冷与空调工程师协会的 ASHRAE55^[37]标准。

ISO7730 系列标准以的 P.O. Fanger 的 PMV-PPD 指标来描述和评价热环境。并补充了人体整体热舒适评价、局部热不舒适评价、非稳态热环境及人体热舒适适应性方面的内容,扩大了该标准的适用范围和条件。ISO7730 系列热舒适标准的前提条件是:人体处于坐姿状态、从事轻度体力活动、服装均匀覆盖人体表面。

ASHRAE55 标准以 P.O. Fanger 的 PMV-PPD 指标及有效温度 ET、新有效温度 ET*、标准有效温度 SET*来描述和评价热环境。并分析了空气湿度、垂直温差、吹风感、辐射不均匀性对热舒适的影响。ASHRAE55 标准的前提条件是:人体处于坐姿状态、从事轻度体力活动、服装均匀覆盖人体表面。

3. 热舒适模型

人体热舒适模型是人体热舒适研究中最重要及最核心的部分。根据模型建立方法,人体热舒适模型分为三类^[43]:人体热平衡法热舒适模型(Heat Balance Approach)、直接统计法热舒适模型(Direct Statistical Approach)、神经网络法热舒适模型(Neural Network Approach)。其中,热平衡法热舒适模型归类于数学模型,后两者归类于统计学模型。一个完整的人体热平衡法热舒适模型应包括三个方面^[44]:人体热模型,用来描述人体产热、热传递及热调节功能;环境与服装模型,用来描述人体与环境、服装之间的热交换现象;心理热反应模型,用来预测各种环境及服装作用下人体热舒适性。

人体热平衡法热舒适模型的发展经历由稳态到瞬态、由简单到多节点及多元描述的过程。

在早期的热舒适研究中,最为著名且被广泛使用的是 Fanger 的 PMV 模型^[39]与 Gagge 的两节点模型^[45]。PMV 模型建立了人体参数、环境参数与人体热感觉的数学关系式,因此被广泛用于 HVAC 及汽车领域,作为环境舒适程度的评价指标。但 PMV 模型基于稳态条件下人体总能量平衡原理建立,因此仅适用于稳

态、均匀环境。Gagge 的二节点模型是首次提出的具有人体热调节功能的数学模型。Gagge 将人体分为被控系统和控制系统进行建模，被控系统指没有调节功能的“无生命”躯体，控制系统指人体热调节系统。这种划分被控系统与控制系统的建模方法同样被多节点及多元模型采用。在二节点模型中，被控系统抽象为核心层与皮肤层，以两个同心圆柱体作为代表，并假设每层组织具有相同的生理参数及温度，即“二节点”；控制系统为一负反馈系统，根据体温度调节血流量及出汗量等。由于二节点模型实现了人体热调节功能的模拟，因此适用于各种动态工况。但由于模型是对每层组织采用集总参数法，因此只能模拟均匀热环境下皮肤与核心的温度变化，不能反映非均匀热环境对人体的影响。

多节点模型把人体划分为多个节段及皮肤层，即多节点，并用更复杂的热调节模型控制每个节点的血流量、出汗量、寒战产热量等生理现象，因此多节点模型具有更好的精度和灵活性。最具有影响力的多节点模型是 Stowlijk 模型^[46-47]。该模型将人体抽象为 5 个节段，即头、躯干、臂、手、腿、足，每个节段由内至外共 4 层，即核心层、肌肉层、脂肪层和皮肤层，血液作为单独的一个节点，共 25 个节点。每一个节点有相应的能量方程及控制方程。之后许多学者建立的人体热舒适模型均以 Stowlijk 模型为基础，在 Stowlijk 模型基础上进行改进。国内研究学者袁修干等人总结前人的建模经验，开发了适用于冷、热、冷热宽环境下的多节点模型，并与液体冷却服模型、航天服手套模型相结合建立了更为完善的人体热舒适模型来研究航天领域的问题^[30]。

不同于多节点模型，多元模型不再使用节点的概念，而是使用偏微分方程建立人体各节段数学表达式，并利用有限差分或有限元的数学方法求解。多元模型是目前最复杂的人体热模型，能够得到详细的人体温度分布，并且适用于更加复杂的瞬态及不均匀热环境，例如 Fiala 模型^[48-49]和 Berkery^[50]模型。

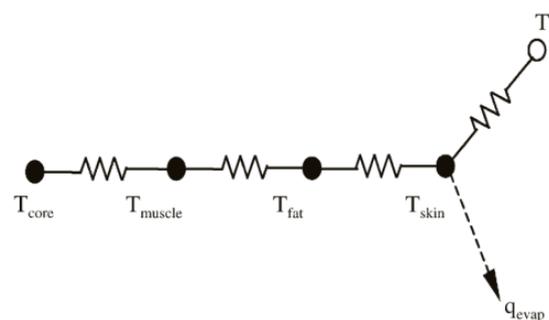


图 1.6 Stowlijk 模型结构

T_{core} 核心层温度； T_{muscle} 肌肉层温度； T_{fat} 脂肪层温度；
 T_{skin} 皮肤温度； T_a 环境温度； q_{evap} 人体蒸发散热

1.3 研究内容与技术路径

1.3.1 研究内容

本课题总结前人对各类穿戴式温度调节系统的设计与研究经验、方法及结论,以及目前可利用的技术与资源,提出一种用于人们日常降温使用的新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服,克服已有穿戴式系统的不足,为人体提供更为方便和舒适的使用性能。学习与借鉴国内外穿戴式温度调节系统研究方法,建立相变液冷服蓄冷传热模型、人体-相变液冷服热舒适模型,进行蓄冷实验及真人实验。通过模拟及实验,探索相变液冷服的使用性能、寻找最优设计方案、反思和改进设计计算方法,完善设计方案。本课题的研究共包括设计制作、模拟分析、实验验证三个方面的内容,如图 1.7 所示。

1. 设计制作

通过技术选择、结构设计、设计计算、材料选择确定此新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的基本形式,各设计参数取值或范围,各类物质材料如相变材料等的选取,从而确定相变液冷服的设计方案;最后,根据设计方案制作相变液冷服实体。

2. 模拟分析

建立相变液冷服蓄冷传热模型,模拟蓄冷工况下冷水与相变液冷服的传热,预测不同设计方案下相变液冷服的蓄冷性能,并分析各设计参数,即相变材料种类(主要区别在于密度及导热系数)、水管内径、进口水温及冷水流速对相变液冷服蓄冷性能的影响及影响程度。

建立适用于非均匀、瞬态情况的人体-相变液冷服热舒适模型,模拟预测相变液冷服穿着工况下的穿着性能,并分析各使用参数,即环境温度、穿着松紧程度、是否外穿保温层对相变液冷服穿着性能的影响。比较模拟结果与设计计算中设定的使用性能,反思和改进相变液冷服的设计计算方法。

3. 实验验证

进行相变液冷服从蓄冷到穿着使用的全过程实验,实验中测量并记录相变液冷服参数,人体生理参数,人体心理参数。校验蓄冷传热模型与人体-相变液冷服模型,验证此套相变液冷服的使用性能并给出具体的优化措施。

1.3.2 技术路径

根据上述研究内容，确定本课题的技术路径，如图 1.7。

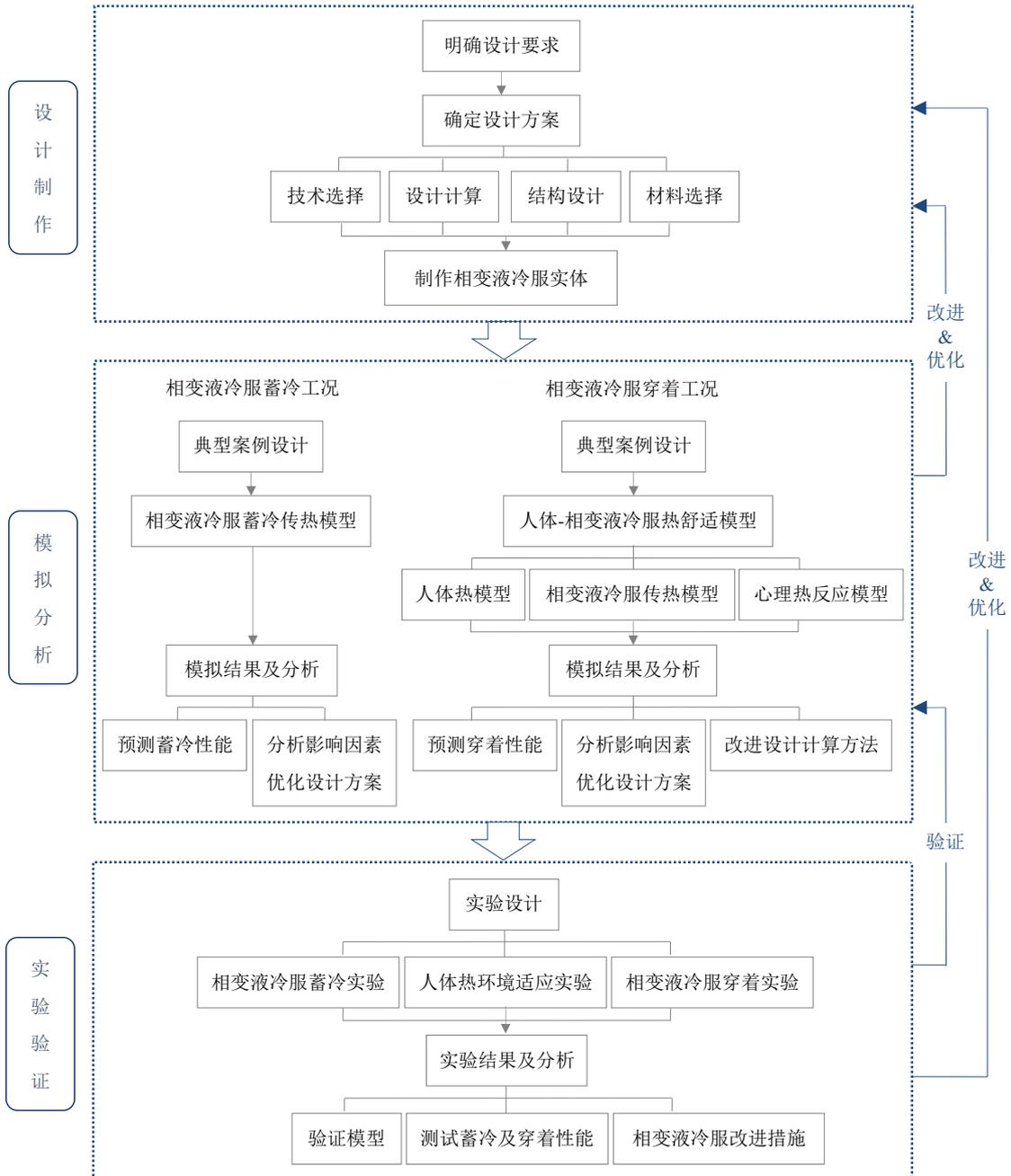


图 1.7 本课题技术路径示意图

1.4 本章小结

本章从热舒适对人们的工作及生活的重要性出发,介绍了目前致力于提高热舒适的领域及这些领域中还未能解决的问题。围绕可在多种环境下提高人们热舒适性的穿戴式温度调节系统,从穿戴式温度调节系统种类、穿戴式温度调节系统的设计及研究方法、热舒适及热调节理论三个方面进行文献综述。在此基础上提炼了本课题的主要内容及技术路径。

第2章 一种新型穿戴式温度调节系统的设计与制作

本章首先明确穿戴式温度调节系统设计要求,以设计要求为依据设计一套用于人们日常降温使用的新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服,并根据设计方案制作相变液冷服实体。

2.1 穿戴式温度调节系统设计要求

穿戴式温度调节系统应具有以下几个特性:

- 1) 方便性: 方便携带, 方便使用;
- 2) 有效性: 使用时间长, 有效除热或制热;
- 3) 舒适性: 热舒适, 透湿, 柔软, 重量轻;
- 4) 安全性: 无毒, 无腐蚀, 无机械伤害。

为满足以上要求,在以下穿戴式温度调节系统的设计中,其技术选择、结构设计、材料选择及参数设计等方面均以满足以上特性为设计依据。但由于受到现有技术的限制等,一套穿戴式温度调节系统往往不能兼具以上所有特性。因此,针对不同的用途,穿戴式温度调节系统应在不同的方面有所侧重以适用于其应用条件及目的。

本课题目的在于设计一套用于人们日常降温使用的穿戴式温度调节系统,尤其在夏季为人们提供舒适的生活和工作条件。对于这样一套穿戴式系统,除安全性及热舒适性外,其重量小及便携是其十分关键的特性。因此,在技术选择与参数设计中应充分重视便携性的实现。

2.2 一种新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的设计

按照此套穿戴式温度调节系统的设计顺序,设计过程包括技术选择、结构设计、设计计算及参数确定、材料选择及材料性质四个步骤。

2.2.1 技术选择

“制冷”是穿戴式温度调节系统的核心,为选择适于穿戴式温度调节系统的制冷技术,需要广泛了解和分析现有的制冷相关技术及其特点,并从中选择适用于穿戴式温度调节系统的技术。

表 2.1 总结归纳了目前现有的制冷技术及系统中的换热介质，包括各自的工作原理、适用性及优缺点。对比分析各类技术可以发现，以相变材料作为换热介质具有以下优势：

- 1) 相变材料利用相变潜热储蓄冷量的特性使穿戴系统储蓄与释放冷量的过程相分离，冷源不需要随身携带从而提高了穿戴系统的便携性；
- 2) 采用相变材料的穿戴系统结构简单，相变材料布置灵活，在提高系统的舒适性有很大潜力。

但由于相变材料需要储蓄冷量，以往的相变服装通常利用冰箱等冷环境中进行蓄冷，因此相变服装的使用需要冷环境的存在并只能间歇使用。

考虑以上相变材料用于穿戴式温度调节系统的优缺点及表 2.1 中各类冷源对穿戴系统的适用性，该新型穿戴式温度调节系统采用相变材料为人体降温，并将冷水管埋敷于相变材料实现相变材料的蓄冷，即相变液冷服。相变液冷服以外部微型冷机作为冷源供应冷量。相变液冷服及微型冷机概念设计图如图 2.1 所示。在蓄冷工况下，微型冷机与相变液冷服相连接，冷机通过冷水管向相变液冷服供应冷量使相变材料储蓄冷量。在穿着工况下，微型冷机与相变液冷服相分离以提高系统的便携性，相变液冷服利用相变潜热为人体降温。在蓄冷且穿着工况下，微型冷机与相变液冷服相连接，冷机通过冷水管向相变液冷服供应冷量，相变液冷服利用相变潜热为人体降温。

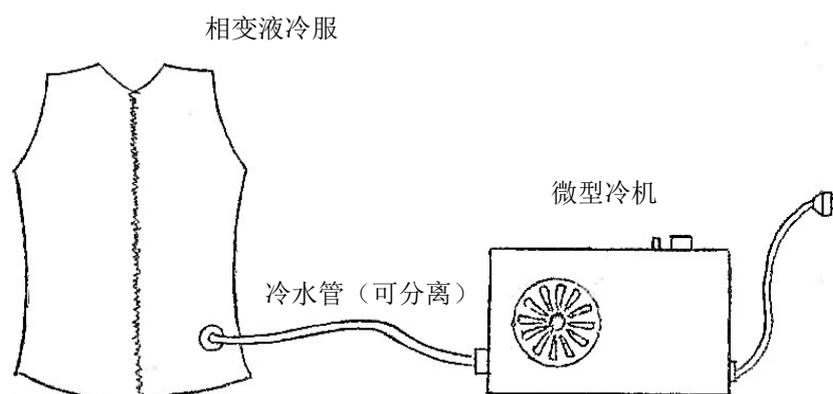


图 2.1 相变液冷服概念设计图

表 2.1 制冷技术及对穿戴系统的适用性汇总

名称	原理	对穿戴系统的适用性
冷源	蒸汽压缩制冷 ^[51]	以机械能为动力, 利用制冷剂在不同压力下具有不同的相变温度这一特性, 使制冷剂在高压与低压环境下循环, 交替地蒸发与液化并通过制冷剂的蒸发吸热实现制冷。 优点: 技术成熟, 制冷能力强, 且已经实现设备的微型化 ^[15] ; 可同时实现制冷与制热。 缺点: 微型系统依然略显笨重; 存在腐蚀性液体; 系统中机械传动产生噪音。
	吸收式制冷 ^[51]	以热能为动力, 利用溶液一定条件下能析出低沸点组分的制冷剂蒸汽, 另一条件下能吸收低沸点组分的制冷剂蒸汽这一特性完成制冷循环。析出蒸汽为吸热过程, 实现制冷。 优点: 技术成熟, 制冷能力强, 且已实现设备的微型化 ^[15] ; 可同时实现制冷与制热; 运转安静, 噪音小。 缺点: 微型系统依然略显笨重; 存在腐蚀性液体。
	半导体制冷 ^[52]	利用珀尔帖效应制冷, 即当向两种不同半导体材料构成的电路中通入电流时一端接头放热另一端接头吸热的现象, 进行制冷。当电流方向改变, 放热和吸热接头相互转换。 优点: 体积小, 重量轻; 无机械传动, 无噪音; 无液/气工作介质; 通过调节电流方向及大小即可实现制冷与制热工况的切换及制冷制热速率。 缺点: 效率低; 若进行制冷, 热端散热要求较高, 需添设促进散热的部件。
	吸附式制冷 ^[53]	以热能为动力, 利用固体吸附剂在不同温度和压力下能够吸附和解析制冷剂气体的特性, 周期性冷却和加热吸附剂实现交替吸附和解析。吸附时制冷剂液体蒸发, 实现制冷。 优点: 技术成熟, 制冷能力强; 可同时实现制冷与制热; 运转安静, 噪音小。 缺点: 系统庞大, 不易携带。
	磁制冷 ^[54]	利用磁热效应, 即磁性离子系统在施加与除去磁场的过程中所出现的对外释放及吸收热量的现象, 进行制冷。 优点: 相比于蒸汽压缩制冷系统, 体积小、重量轻、效率高。 缺点: 在民用技术中应用不成熟; 制冷过程中的超强磁场危害人体健康。
	绝热膨胀 ^[55]	利用高压气体绝热膨胀过程中气体对外做功消耗自身内能而降温的原理产生制冷效应。 优点: 重量轻, 方便携带。 缺点: 高压气体随身携带具有安全隐患; 需要气体压缩装置。
换热介质	液体 (水)	在温差提供的动力下进行换热 优点: 换热效率高。 缺点: 需要冷源及换热器, 但微通道换热器仍处于研究阶段 ^[56-57] , 目前通常只能通过常规的软管与人体换热。
	气体 (空气)	通过增加表面对流换热及蒸发换热增强换热; 或在温差提供的动力下进行换热; 优点: 重量轻, 服装结构简单。 缺点: 若直接引入环境空气至服装中增强换热则除热能力十分有限并且服装中需安装风机; 或需要冷源。
	相变材料 ^[58]	利用物质在其相变温度下凝固放热/融化吸热的特性储蓄或释放冷量 优点: 无需随身携带冷源; 系统结构简单、设计灵活。 缺点: 由于相变材料需储蓄能量, 系统只能间歇使用。

2.2.2 结构设计

人体由具有不同热调节特性与热敏感程度的节段组成,包括头、躯干、四肢、手和脚。各节段的冷却能力取决于节段的表面积、局部产热量、组织绝热程度、血管分布及热调节能力^[6]。研究表明,头部及颈部分布着丰富的表面血管并缺少血管收缩的调节能力,因此具有最高的除热效率,躯干及上臂的除热效率仅次于头部与颈部。由于躯干具有较大的换热表面,躯干虽不具有最大的除热效率但具有最大的除热能力。正因如此,穿戴式温度调节系统通常关注于对头部、颈部及躯干部位的冷却。穿戴式温度调节系统采用对具有较高热交换部位的局部冷却不仅可以保证人体热舒适,也可缩小系统尺寸,减轻系统重量与成本,提高穿戴方便性。因此,该相变液冷服采用背心且在胸前设有拉链的款式结构。

相变液冷服由基础服装、相变储能单元、冷水管及外层服装组成,如图 2.2 所示。基础服装采用棉质布料,覆盖人体皮肤表面,避免相变储能单元与皮肤的直接接触,以保证相变液冷服装着的舒适性。外层服装采用多孔涤纶布料,相变储能单元固定在外层服装上,外层服装起着支撑作用并同时保证服装的透湿与透气性。

服装中相变材料的布置应保证服装的柔软性及相变材料与人体很好的贴合,冷水管应均匀敷设并贯穿于相变材料中以保证蓄冷时冷水与相变材料有效换热。因此,相变液冷服中相变材料的布置及相变材料与水管连接方式如图 2.3 所示。在服装的胸前与背部分别装有 8 个长 300mm、横截面为类椭圆形的长条状相变材料储能单元,相变材料由 0.3mm 厚的 TPU 薄膜封装。16 个相变储能单元由一根纵穿各单元的冷水管相连。

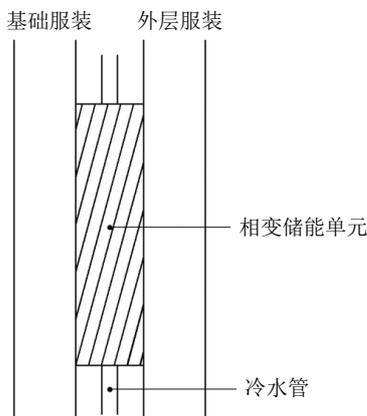


图 2.2 相变液冷服装结构

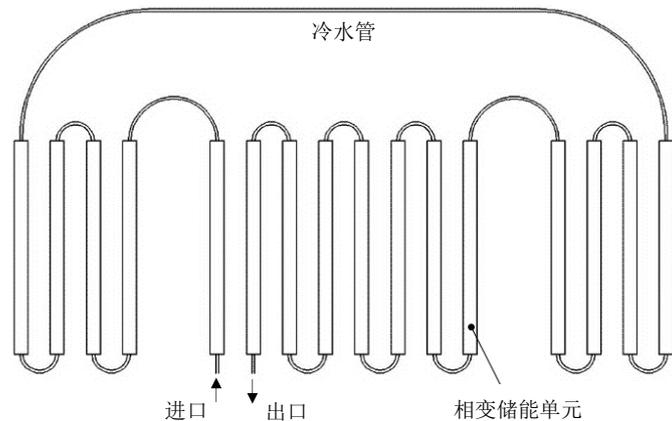


图 2.3 相变储能单元与水管连接形式

2.2.3 设计计算及参数确定

相变液冷服的设计计算主要以满足人体热舒适及使用时间为依据确定相变材料的相变温度及用量，进而确定相变储能单元的几何尺寸；以蓄冷时间为依据并考虑设计的可行性确定冷水速度、供水温度及水管尺寸。

对于相变液冷服的设计计算，当考虑不同的使用条件时会带来不同的设计结果。例如，当给定了相变液冷服的使用时间，使用环境为室内还是室外会在很大程度上影响相变材料的用量。作为此新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的第一代设计，本课题限定其使用条件为夏季室内办公人员使用并以男性青年作为使用对象。全文均围绕夏季室内办公人员使用为使用条件对相变液冷服进行设计、制作、模拟及实验。对于其他的使用条件，例如夏季室外或伴随运动的使用情况，有待今后进一步研究。

相变液冷服的蓄冷及穿着过程为三维、瞬态传热过程，相变液冷服的设计计算及参数确定需要通过对相变液冷服蓄冷及穿着过程的传热计算来进行。在相变液冷服的设计阶段，除相变液冷服的设计要求及结构布置外，其他参数等均未知。在这种情况下通过对蓄冷及穿着过程的三维、瞬态传热进行详细描述及理论计算来确定相变液冷服的设计参数是很困难甚至是不可行的。为了克服这一困难，通过借鉴换热器等系统的设计方法^[59]，采用如图 2.4 所示的路径对相变液冷服进行设计及研究。

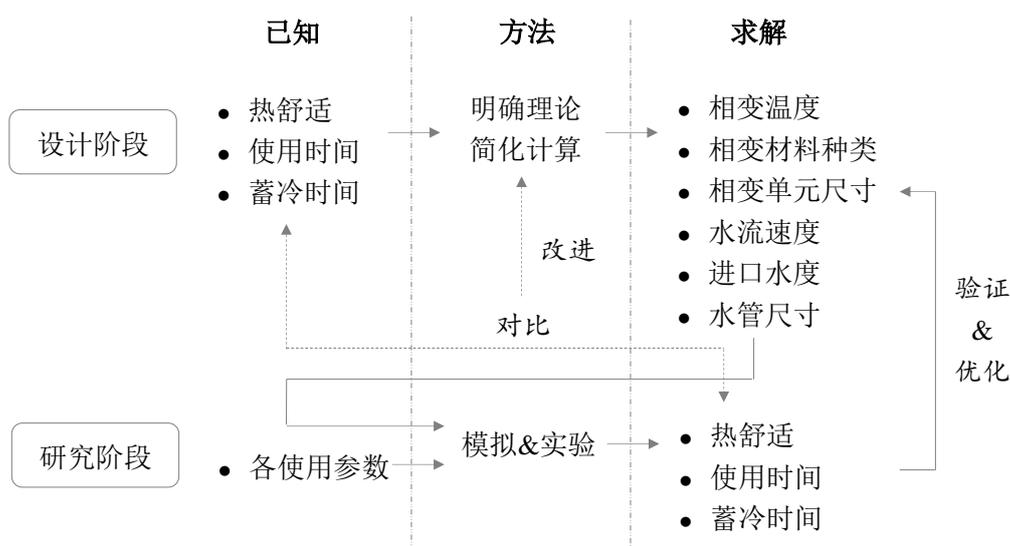


图 2.4 相变液冷服设计与研究路径

设计阶段,在给定使用性能的情况下,估算相变液冷服的设计参数并依此制作相变液冷服。在研究阶段,按照设计阶段的设计参数,通过模拟及实验测试其使用性能。以下,以传热及人体热平衡为理论通过简化计算确定相变液冷服的设计参数。研究阶段在第3章至第5章进行展开。

1. 穿着工况下人体热平衡

人体的生理机能要求体温必须维持近似恒定才能保证人体的各项功能正常^[41]。因此,在相变液冷服、环境的作用下,人体产热与散热必须保持平衡。人体的热平衡方程如公式(2.1)所示。

$$M - W - C - R - K - E = S \quad (2.1)$$

M —人体新陈代谢率, W ;

W —人体所做的机械功, W ;

K —躯干部位人体与相变液冷服换热量,即,相变液冷服内部得热量, W ;

C —其他部位人体外表面与环境的对流换热量, W ;

R —其他部位人体外表面与环境的辐射换热量, W ;

E —皮肤扩散蒸发、汗液蒸发及呼吸所造成的散热量, W ;

S —人体蓄热率, W , S 为零,人体保持能量平衡; S 为正值,表示人体内储蓄热量,体温上升;反之, S 为负值,表示人体散失热量大于产热量,体温下降。

考虑到人体在穿着相变液冷服的情况下相变液冷服只覆盖人体躯干部分,即人体处于局部冷却的状态。为避免人体躯干部位局部过冷,设计时,相变液冷服只考虑承担躯干部分的冷负荷。对于人体其他部位,由于人体所处环境(夏季室内环境)并非极端炎热,人体通过自身调节可以保证其他部分的热平衡。而相变液冷服对躯干部分的冷却可起到缓解人体炎热感,提高全身热舒适性的作用。因此,

$$K = M_{trunk} - W_{trunk} - E_{trunk} \quad (2.2)$$

M_{trunk} —躯干部位新陈代谢率, W , 取值 $47.6^{[35]}$;

W_{area} —躯干部位所作的机械功, W , 取值 $0^{[41]}$;

E_{trunk} —躯干部位所作由于呼吸及皮肤表面蒸发所散失的热量, W , 通常情况下呼吸及皮肤蒸散发热量占总散热量的 25%左右^[35], 因此取值 $25\% \cdot (M_{trunk} - W_{trunk})$;

计算公式(2.2)得相变液冷服承担人体约 $35.7 W$ 的冷负荷。

2. 穿着工况下相变液冷服传热及热平衡

在人体穿着相变液冷服的情况下,相变液冷服在环境与人体的作用下释放储存的冷量,热平衡方程如公式(2.3)所示。

$$K + Q = S_g \quad (2.3)$$

Q —相变液冷服与环境的换热量，即外部得热量，W；

S_g —相变液冷服的释冷率，W。

对于相变液冷服与人体的传热，由于相变材料以相变储能单元的形式分布在服装内而并非均匀且地完全覆盖在人体表面，根据以往相变服的设计^[6]及此套相变液冷服的结构设计，假设相变储能单元与人体的有效换热面积约为躯干部位人体表面积的 30%。忽略服装中空气及 TPU 薄膜的作用，假定基础服装与人体紧密贴合且相变材料与人体皮肤温度不变。则，相变储能单元与人体的传热过程简化为基础服装的一维稳态导热过程，传热方程如公式 (2.4) 所示。

$$t_s - t_p = 2d_{liner} \cdot K / (A_{trunk} \alpha \lambda_{liner}) \quad (2.4)$$

A_{trunk} —躯干部位人体皮肤表面积， m^2 ，取值 0.537^[35]；

α —相变储能单元与人体的有效换热面积比，取值 30%；

λ_{liner} —基础服装的导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ，取值 0.072^[35]；

t_s —人体皮肤温度， $^\circ C$ ，取值 33；

t_p —相变材料相变温度， $^\circ C$ ；

d_{liner} —基础服装厚度，m，取值 0.0013，公式中 $2d_{liner}$ 表示考虑了人体在相变液冷服内穿着自身棉质 T 恤的情况。

对于相变液冷服与环境的传热，由于夏季室内情况下人体与环境的辐射换热量相对于对流换热量很小^[41]，因此忽略相变液冷服与外界辐射换热。同时，忽略服装中空气的作用并假定相变材料温度不变。则相变储能单元与环境的传热过程简化为外层服装的一维稳态导热及服装外表面的对流换热过程，传热方程如公式 (2.5) 所示。

$$Q = \frac{(t_a - t_p)}{\frac{1}{A_{trunk} f h} + \frac{d_{outer}}{A_{trunk} \lambda_{outer}}} \quad (2.5)$$

t_a —环境空气温度， $^\circ C$ ，根据上海夏季，取值 30；

h —相变液冷服外表面对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，取值 3.34^[41]；

f —相变液冷服面积系数，取值 1.3^[41]；

λ_{outer} —外层服装导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ，取值 0.084^[60]；

d_{outer} —外层服装厚度，m，取值 0.001。

若考虑相变液冷服的内部得热 K 与外部得热 Q 完全由相变材料融化吸热承担，则对于给定的相变液冷服的使用时间 τ ，相变材料用量的计算公式如公式 (2.6) 所示。

$$m_p = \tau(K + Q) / \Delta H \quad (2.6)$$

m_p —相变材料用量, kg;

τ —相变液冷服的使用时间, s, 假定使用时间为 3600 s, 即 1 小时;

ΔH —相变材料相变潜热, J/kg, 参考文献[58]中提及相变温度 30°C 左右的相变材料其较高的相变潜热值约为 180000 J/kg。

由公式 (2.4) (2.5) (2.6) 可知, 相变材料的相变温度主要由相变储能单元有效换热面积、基础服装材料、所承担的人体冷负荷决定; 外部得热量主要由外界环境、外层服装材料、相变材料相变温度决定; 相变材料用量主要由所承担的人体冷负荷、外部得热量、相变材料性、使用时间决定。依次计算公式 (2.4) (2.5)

(2.6) 得相变材料的相变温度 t_p 、相变液冷服外部得热量 Q 、相变材料用量 m_p 分别为 25°C、11.8 W、0.95 kg。

3. 蓄冷工况下相变储能单元与冷水的换热

蓄冷工况下, 微型冷机向相变液冷服供应冷水, 冷水通过埋敷在相变液冷服中的水管与相变材料换热。微型冷机采用课题组已有的蒸汽压缩微型制冷机组, 因此蓄冷工况下主要包括冷水及水管的参数设计。

假设相变材料温度恒定, 且忽略 TPU 薄膜的作用, 对于单个相变储能单元, 相变储能单元与冷水的传热方程如公式 (2.7) 所示。

$$Q_{re} = \frac{t_p - \frac{(t_{in} + t_{out})}{2}}{\frac{1}{A_{insur} h_w} + \frac{d_{out} - d_{in}}{2A_{insur} \lambda_{tube}}} = A_{cross} v \rho_w c_w (t_{out} - t_{in}) \quad (2.7)$$

Q_{re} —相变储能单元与冷水的换热量, 即蓄冷速率, W;

t_{in} —相变储能单元冷水进口温度, °C;

t_{out} —相变储能单元冷水出口温度, °C;

A_{insur} —水管内表面积, m²;

A_{cross} —水管管内横截面积, m²;

d_{out} —水管外直径, m, 为保证服装的舒适性, 取值 0.005;

d_{in} —水管内直径, m;

h_w —水管内表面对流换热系数, W/(m²·°C), 判断冷水流态后根据文献^[59]进行计算;

λ_{tube} —水管导热系数, W/(m·°C), PVC 材质为例, 取值 0.16;

ρ_w —水密度, kg/m³, 取值 998.2^[59];

c_w —水比热容, J/(kg·°C), 取值 4182^[59];

v —冷水流速, m/s;

假定蓄冷情况下, 为缩短蓄冷时间相变液冷服外包裹保温层隔绝相变材料与外界的换热, 则单个相变储能单元蓄冷时间计算公式如公式 (2.8) 所示。

$$\tau_{re} = m_p \Delta H / 16 Q_{re} \quad (2.8)$$

τ_{re} 一单个相变储能单元蓄满时间, s;

如图 2.3 所示, 相变储能单元串联在一根水管上, 忽略储能单元外部冷水管段的散热, 则沿水流方向, 前一储能单元冷水出口温度即为后一储能单元的冷水进口温度。对于确定的设计参数: 进口水温 $t_{in,1}$ 、水流速度 v 、水管内径 d_{in} , 根据公式 (2.6) 及 (2.7) 计算第 1 个相变储能单元的冷水出口温度 $t_{out,1}$ 、蓄冷速率 $Q_{re,1}$ 、蓄满时间 $\tau_{re,1}$; 然后将第 1 个相变储能单元的冷水出口温度作为第 2 个相变储能单元的冷水进口温度, 即 $t_{in,2} = t_{out,1}$, 并且其他设计参数保持不变, 计算第 2 个相变储能单元的冷水出口温度 $t_{out,2}$ 、蓄冷速率 $Q_{re,2}$ 、蓄满时间 $\tau_{re,2}$ ……, 依次可计算出 16 个相变储能单元各自的冷水出口温度 $t_{out,i}$ 、蓄冷速率 $Q_{re,i}$ 、蓄满时间 $\tau_{re,i}$ 。第 16 个相变储能单元的蓄满时间即为相变液冷服的蓄满时间。

由于 16 个相变储能单元进口水温依次递增, 其所需的蓄满时间依次递增。其中, 第 1 个相变储能单元蓄满时间与第 16 个相变储能单元的蓄满时间差异最大。储能单元之间, 较大蓄满时间差异会带来各储能单元冷量储蓄步调不一致的问题, 即部分储能单元已过冷部分仍未蓄满的问题。定义最大差异系数来反映这一问题, 其定义式如公式 (2.9) 所示。

$$\delta = (\tau_{re,16} - \tau_{re,1})/\tau_{re,1} \quad (2.9)$$

根据公式 (2.7)、(2.8) 及 (2.9), 在相变液冷服冷水进口温度 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$, 水流速度 0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s, 水管内径 3 mm、3.5mm、4 mm 的情况下, 相变液冷服蓄满时间如图 2.5 所示, 最大差异系数如图 2.6 所示。

从图 2.5 可以看出, 在冷水管材质一定的情况下, 水管内径对相变液冷服蓄满时间影响程度最大, 冷水进口温度对相变液冷服蓄满时间的影响程度随水管内径的增大而减小, 冷水流速对相变液冷服蓄满时间的影响程度随水管内径的增大而减小。假定当相变液冷服的蓄满时间小于 0.5 小时是可以接受的, 如图 2.5 所示, 使曲线落入红色方框区域内的设计参数即为满足要求的设计参数。在此设计情况下, 即使相变液冷服在蓄冷的同时被人体穿戴, 单个相变储能单元的蓄冷也可在约 $1/[(1/\tau_{re,16}) - (1/\tau)]$ 的时间内完成, 即 1 小时内完成。

从图 2.6 可以看出, 冷水流速对相变储能单元最大差异系数影响最大, 冷水进口温度对相变储能单元最大差异系数没有影响。假定相变储能单元最大差异系数小于 0.3 是可以被接受的, 使曲线落入图 2.6 中红色方框区域内的设计参数即为满足要求的设计参数。

因此, 相变液冷服冷水进口温度、冷水速度、水管内径的参数取值应使图 2.5 及图 2.6 中曲线同时落入红色方框与蓝色方框范围内。

综上, 在设计阶段, 相变液冷服的使用性能及以使用性能为依据的设计参数

如表 2.2 所示。

表 2.2 相变液冷服使用性能及设计参数

使用性能	热舒适	维持躯干热平衡
	使用时间	1 小时
	蓄冷时间	半小时
设计参数	相变温度	25°C
	相变材料用量	0.95kg
	冷水速度/进口温度/水管内径	图 2.5 至 2.6 中红色与蓝色方框范围内

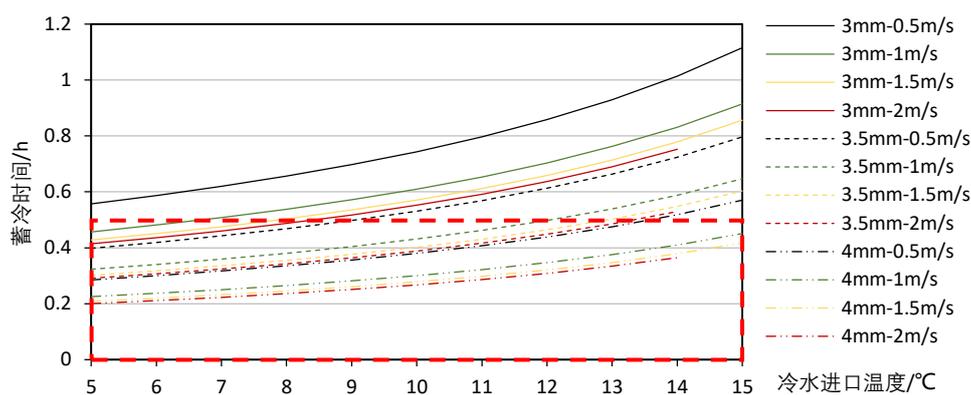


图 2.5 相变液冷服蓄冷时间设计计算

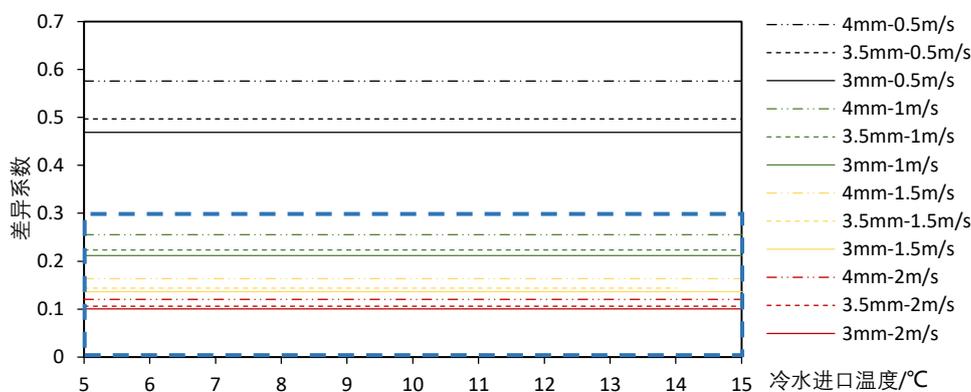


图 2.6 相变储能单元最大差异系数设计计算

2.2.4 材料选择及材料性质

相变液冷服所需选择的材质包括相变材料、水管、相变储能单元薄膜、基础服装、外层服装。其中储能单元薄膜、基础服装、外层服装的材质在上文中已经确定。以下对相变材料及水管材质的选择进行详细的讨论，并补充说明保温层。

1. 相变材料

按照相变形式分类，相变材料分为 4 类^[58]：固-固相变、固-液相变、液-汽相变、固-汽相变。由于第 3 和第 4 类相变材料相变过程中有大量气体，相变物质

体积变化大,因此尽管这两类相变过程有很大相变潜热,但在实际应用中很少被选用。

按照相变材料物质类别分类,相变材料分为3类^[58]:无机类、有机类、混合类。对于有机类与无机类相变材料,其各自存在优缺点。无机相变材料体积贮热密度大、导热系数大,但存在过冷、相分离等问题;有机相变材料无过冷及相分离问题,但其体积贮热密度小、导热系数小。

在2.2.3节的计算中,均假定相变材料保持在相变温度恒定不变,但实际传热过程中并非如此,因此至此并不能定性判断相变材料导热系数及密度对传热的影响程度。经过筛选,选择市场上相变温度在25℃左右的相变材料产品OP27E(石蜡类,属于有机相变材料)及RE25(无机盐类,属于无机相变材料)分别作为相变液冷服的相变材料在后期的研究阶段中探究其对传热的影响。产品参数见表2.3,产品介绍见附录1。

2. 水管

在相变储能单元外部,为了保证服装的舒适性及柔软性并保证水管弯折处(曲率约 40 m^{-1})水流通畅,采用PVC及硅胶材质的柔性软管反复试验后,选取管径 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的PVC软管。

在相变储能单元内部,在2.2.3节对水管及冷水的参数设计时,均以PVC材质的管材为例进行计算与分析,并且为与储能单元外的水管管径保持管径一致,选用外径为5mm的水管。在此套相变液冷服中,相变储能单元内水管选用PVC管,参数见表2.3,而非常用于换热器中并具有高导热率的紫铜管,其原因如下:

1) 相比于PVC管(密度 1380 kg/m^3),若仅在储能单元内部采用相同管径的紫铜管(密度 8900 kg/m^3),在管径分别为 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 、 $3.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 、 $4\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的情况下相变液冷服总重量将增加0.45 kg、0.36 kg、0.26 kg。紫铜管的重量将降低相变液冷服的便携性。

2) 对于分别采用PVC管与紫铜管的情况,根据公式(2.7),在相变液冷服冷水进口温度 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$,水流速度0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s,水管内径3 mm、3.5 mm、4 mm的情况下,相变液冷服中沿水流方向第一个相变储能单元冷水进出口温差如图2.7及图2.8所示。对比分析图2.7及图2.8可以看出,相对于采用PVC管,采用紫铜管时相变储能单元的冷水进出口温差急剧增加,这将导致相变液冷服最大差异系数的增大,即各储能单元冷量储蓄步调极度不一致的问题。虽然,在采用紫铜这样高导热率管材的情况下,依然假设相变材料温度保持在相变温度不变来对相变储能单元冷水进出口温差进行分析计算会带来不能忽略的误差,但相比与PVC材质,紫铜材质的高导热性能必定增加相变液冷服的最大差异系数。

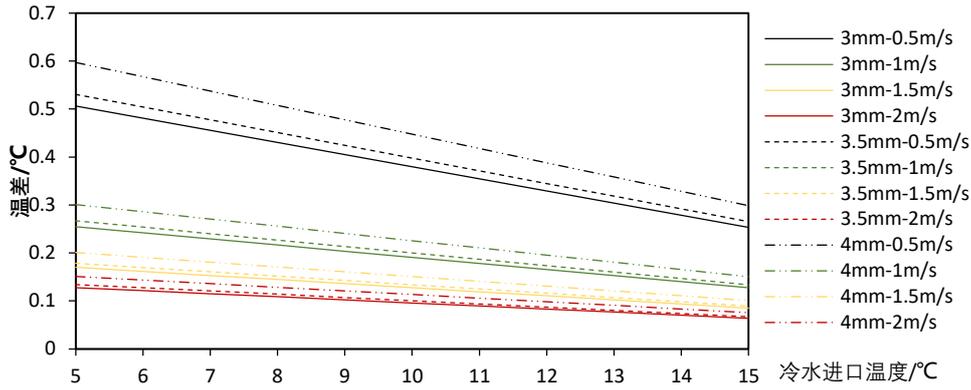


图 2.7 采用 PVC 管时第一个相变储能单元冷水进出口温差计算

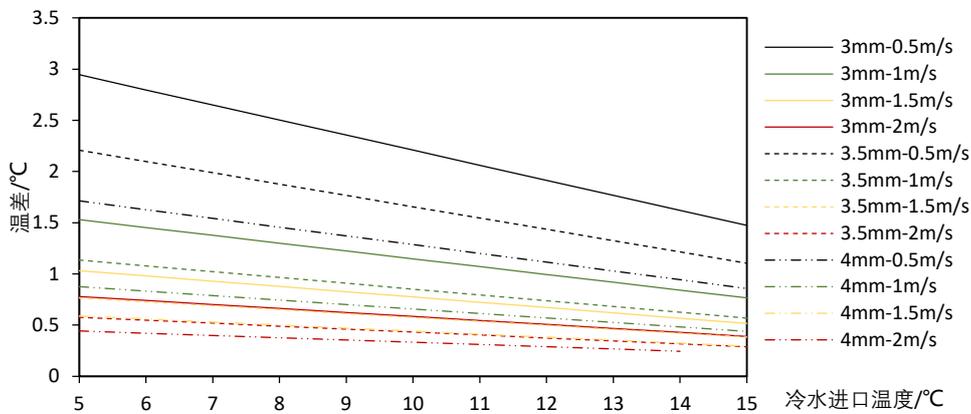


图 2.8 采用紫铜管时第一个相变储能单元冷水进出口温差计算

3. 保温层及保温材料

根据 2.2.2 节，相变液冷服由基础服装、相变储能单元及冷水管、外层服装组成。其中，相变液冷服外层服装采用涤纶布料，起固定支撑作用并同时保证服装的透湿性与透气性。从公式 (2.5) 及 (2.6) 可知，在穿着工况下，当其他设计参数一定，增加外层服装的热阻可以延长相变液冷服的使用时间。因此，当人体穿着相变液冷服时保持相变液冷服外层服装材质不变，等效地在液冷服外穿着保温层服装可以增加相变液冷服的使用时间。从公式 (2.8) 可知，在蓄冷工况下，当其他设计参数一定，减少相变储能单元外部得热可以加快相变储能单元蓄冷速率，因此，在蓄冷工况下通过在相变液冷服外增加保温层可以减小外部得热从而缩短蓄冷时间。保温层采用 2cm 厚的羽绒背心，参数如表 2.2 所示。

表 2.2 材料选择及其热物性

材料名称		密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·°C)	导热系数 W/(m·°C)	相变潜热 J/kg	相变温度 °C
相变材料	石蜡	液: 760, 固: 880	2000	0.2	179000	25~27
	无机盐	液: 1400, 固: 1500	2700	0.6	180000	24~26
PVC		1380	1003	0.16	--	--
基础服装		55.6	1280	0.072	--	--
外层服装		50	1340	0.084	--	--
保温层		28	1184	0.024	--	--

注：表中参数来源于文献[35][58]及附录 A.1。

2.2.5 设计方案小结

以上，通过技术选择、结构设计、设计计算及参数确定、材料选择及材料性质四个步骤，完成了对一种新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的设计。相变液冷服采用相变材料与冷水管相结合的方式，由外至内包括外层服装、相变储能单元及水管、基础服装。并且，根据以上设计参数的确定及材料的选择，形成了如表 2.4 所示的多种设计方案。

表 2.4 相变液冷服设计方案

相变材料	选择 1	OP27E, 相变储能单元尺寸 $a \times b = 16\text{mm} \times 24\text{mm}$, 1.2kg
	选择 2	RE25, 相变储能单元尺寸 $a \times b = 12\text{mm} \times 18\text{mm}$, 1.2kg
水管	PVC 材质, 外径 5mm, 储能单元外部内径 3mm	
	选择范围	储能单元内部内径在图 2.5 至 2.6 中红色与蓝色方框范围以内
冷水	选择范围	流速及进口温度在图 2.5 至 2.6 中红色与蓝色方框范围以内
外层服装	涤纶布料, 厚 2mm	
基础服装	棉质布料, 厚 1.3mm	
封装薄膜	TPU, 厚度 0.3mm	
穿戴	选择 1	无保温层
	选择 2	外穿保温层, 保温层厚 2cm
蓄冷	有保温层, 保温层厚 2cm	

注：相变储能单元尺根据相变材料用量及密度计算得到。

2.3 相变液冷服的制作

考虑可利用的资源及制作的方便，选择无机盐相变材料 RE25、内径 3mm 外径 5mm 的 PVC 软管、棉质基础服装、涤纶外层服装、TPU 薄膜的设计方案制作相变液冷服。

1. 相变材料封装及冷水管敷设

在相变液冷服的制作中, 首先需要进行相变材料的封装及冷水管的敷设。相变储能单元封装薄膜的密封及每个储能单元上下两个端口处薄膜与 PVC 管的密封采用热压焊接技术来实现, 即通过加热加压使材料熔化变形后凝固焊接的技术。焊接部位及焊接完成后的相变储能单元及冷水管如图 2.9 所示。

2. 相变液冷服各部分的连接与固定

相变液冷服中, 基础服装、相变储能单元及外层服装间的固定采用子母贴来实现。这样的固定方式具有使用灵活、易于拆卸、清洗方便的优点。子母贴的固定方式如图 2.10 所示。

3. 相变液冷服调节

在相变液冷服左右两侧, 即腋下部分, 每侧设置 3 个调节扣, 如图 2.11 所示, 以便于适于不同身材的人穿戴。同时调节口还可起到根据人体热舒适需要调节相变液冷服有人体贴紧程度的作用。

相变液冷服制作完成后的整体效果图如图 2.12 所示。经过称量, 此套相变液冷服总重 1.8kg。其中, 相变材料重 1.25kg, 管材 0.14kg, TPU 薄膜 0.12kg。

2.4 本章小结

本章从明确设计要求、确定设计方案、制作相变液冷服实体三个方面完成了一种用于人们日常降温使用的新型穿戴式温度调节系统——相变液冷服的设计及制作。

此套系统的设计要求主要为安全、舒适、便携。

此套系统采用相变材料为人体降温、埋敷在相变材料中的冷水管为相变材料蓄冷、微型冷机为相变液冷服提供冷量的技术方案, 即相变液冷服; 服装由外至内包括外层服装、相变储能单元及冷水管、基础服装; 相变材料相变温度为 25℃, 相变材料用量为 0.95kg, 冷水流速、进口水温、水管内径的取值使曲线落入图 2.5 及图 2.6 中红色与蓝色方框; 无机盐或石蜡类相变材料、PVC 软管、涤纶、棉布、TPU 薄膜、羽绒作为服装的制作材料。

根据设计方案, 通过热压焊接、母子贴等技术制作了相变液冷服实体。



图 2.9 相变材料封装及冷水管敷设完成效果图



图 2.10 子母贴固定方式



图 2.11 调节扣效果图



图 2.12 相变液冷服制作成果图

第3章 相变液冷服蓄冷工况传热模拟及分析

本章根据第2章设计方案设定几种典型案例,应用 workbench 软件对相变液冷服蓄冷工况下冷水与相变液冷服的传热过程进行模拟。模拟内容及目的包括:

- 预测在不同设计方案下相变液冷服的蓄冷性能:相变液冷服蓄满时间、相变液冷服蓄满时刻最低过冷温度;
- 分析各设计参数,即相变材料种类(主要区别在于密度及导热系数)、水管内径、进口水温及冷水流速,对相变液冷服蓄满时间及蓄满时刻最低过冷温度的影响及影响程度,从而优化设计方案。

3.1 蓄冷工况典型案例

根据表 2.4,对相变材料种类,水管内径,进口水温及流速四个设计参数中每个参数的两种取值进行排列组合形成相变液冷服蓄冷工况下的 12 种案例,如表 3.1 所示。12 种案例中其他设计条件均一致。

表 3.1 蓄冷工况典型案例

案例编号	相变材料种类		水管内径/mm		冷水进口温度/°C		冷水流速/ $m \cdot s^{-1}$	
	石蜡	无机盐	3	4	10	5	0.5	1.5
C1	√		√		√		√	
C2	√		√		√			√
C3	√		√			√	√	
C4	√			√	√		√	
C5	√			√	√			√
C6	√			√		√	√	
C7		√	√		√		√	
C8		√	√		√			√
C9		√	√			√	√	
C10		√		√	√		√	
C11		√		√	√			√
C12		√		√		√	√	

注:为对比分析各设计参数对蓄冷的影响,上表每种案例中的参数取值并未都使表 2.5 及 2.6 中曲线落入红色及蓝色方框区域。

3.2 相变液冷服蓄冷传热模型

相变液冷服蓄冷传热模型描述蓄冷工况下相变液冷服与冷水的传热过程,包括几何模型、参数确定、传热模型三个部分。

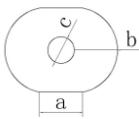
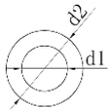
3.2.1 几何模型分析及简化

蓄冷工况下,相变液冷服与冷水的传热主要涉及冷水、水管、相变储能单元三个部分,因此将蓄冷工况下相变液冷服几何模型简化为中间层的相变储能单元与水管,基础服装及外层服装及蓄冷时包裹在相变液冷服外的保温层归入传热模型边界条件中进行计算。

3.2.2 几何参数及物性参数确定

模型中的几何参数及物性参数如表 3.2 及表 3.3 所示。

表 3.2 相变液冷服蓄冷工况下几何参数表

几何体		几何标定	几何参数
储能单元	石蜡		$a \times b \times c = 8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 5\text{mm}$
	无机盐		$a \times b \times c = 6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$
水管			$d_1 \times d_2 = 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ 或 $4\text{mm} \times 5\text{mm}$
综合服装 ^[1]			$L=23.6\text{mm}$

注: [1] 综合服装指基础服装、外层服装及保温层的总和。

表 3.3 相变液冷服蓄冷工况下物性参数表

材料名称		密度 kg/m^3	比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	相变潜热 J/kg	相变温度 $^\circ\text{C}$
相变材料	石蜡	液: 760, 固: 880	2000	0.2	180000 ^[1]	24~26
	无机盐	液: 1400, 固: 1500	2700	0.6	180000	24~26
PVC 水管		1380	1003	0.16	--	--
水		998.2	4182	0.6	--	--
综合服装		32	1201	0.027	--	--

注: [1] 由于相变材料的区别主要在于密度及导热系数的不同,因此将石蜡相变材料相变潜热及相变温度值与无机盐材料保持一致,以排除此相变潜热对传热模拟结果造成的影响。

3.2.3 传热分析与传热模型

蓄冷工况下，冷水进入水管并通过水管管壁为相变材料蓄冷。由于实际传热过程复杂，模型做如下假设：

- 1) 冷水视为不可压缩的牛顿流体；由于流体温度变化不大，物性视为常数；忽略粘性耗散产生的耗散热。
 - 2) 相变材料为连续介质，均匀分布，各向同性；忽略凝固过程的自然对流效应；忽略相变材料的重力作用。
 - 3) 相变材料的密度随温度发生变化，其余物性不随温度发生变化。
 - 4) 忽略相变材料传热时的接触热阻。
1. 相变材料蓄能模型

相变材料蓄冷偏微分方程：

$$c_p \frac{\partial \rho_p t_{p,ch}}{\partial \tau} = \lambda_p \nabla^2 t_{p,ch} + \Delta H \frac{d\rho_p f_s}{d\tau} \quad (3.1)$$

ρ_p —相变材料密度， kg/m^3 ；

c_p —相变材料比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

λ_p —相变材料导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$t_{p,ch}$ —蓄冷过程相变材料温度， $^\circ\text{C}$ ；

ΔH —相变材料相变潜热， J/kg ；

f_s —相变材料中的固相成份。

初始条件：

$$\tau = 0, t_{p,ch} = t_a \quad (3.2)$$

t_a —环境温度， $^\circ\text{C}$ ；

边界条件：

$$\lambda_p \frac{\partial t_{p,ch}}{\partial n} = \begin{cases} \frac{t_{p,ch,sur} - t_a}{h + d/\lambda} & \text{储能单元外表面} \\ -q_{p-t} & \text{储能单元内表面，即与水管接触表面} \end{cases} \quad (3.3)$$

n —表面法线方向，指向物体外侧；

$t_{p,ch,sur}$ —相变储能单元外表面温度， $^\circ\text{C}$ ；

h —对流传热系数， $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ，取值 $3^{[41]}$ ；

λ —综合服装导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

d —综合总厚度， m ；

q_{p-t} —相变储能单元与水管的换热量， W/m^2 。

2. 水管导热模型

$$\rho_t c_t \frac{\partial t_t}{\partial \tau} = \lambda_t \nabla^2 t_t \quad (3.4)$$

ρ_t —水管密度, kg/m^3 ;

c_t —水管比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

λ_t —水管导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_t —水管温度, $^\circ\text{C}$ 。

初始条件:

$$\tau = 0, t_t = t_a \quad (3.5)$$

边界条件:

$$\lambda_t \frac{\partial t_t}{\partial n} = \begin{cases} q_{p-t} & \text{水管外表面, 即与相变材料接触表面} \\ -q_{t-w} & \text{水管内表面, 即与冷水接触表面} \end{cases} \quad (3.6)$$

q_{t-w} —水管与冷水的换热量, W/m^2 。

q_{t-w} —水管与冷水的换热量, W/m^2 。

3. 管内水流换热模型

$$\rho_w c_w \frac{\partial t_w}{\partial \tau} + \rho_w c_w \text{div}(t_w \mathbf{U}) = \lambda_w \nabla^2 t_w \quad (3.7)$$

ρ_w —冷水密度, kg/m^3 ;

c_w —冷水比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

λ_w —冷水导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_w —冷水温度, $^\circ\text{C}$;

\mathbf{U} —冷水流速, m/s 。

初始条件:

$$\tau = 0, t_w = t_{w,in} \quad (3.8)$$

$t_{w,in}$ —冷水进口温度, W/m^2 。

边界条件:

$$\begin{cases} \lambda_w \frac{\partial t_w}{\partial n} = q_{t-w} & \text{水管内表面, 即与冷水接触表面} \\ t_w = t_{w,in} & \text{冷水进口} \end{cases} \quad (3.9)$$

3.3 数值模拟与求解

蓄冷工况下相变液冷服与冷水的传热为三维、瞬态传热过程。通过 workbench 平台中 Design Modeler、Mesh 及 Fluent 软件可以实现传热模型的建立及数值求解，获得不同设计方案下传热过程的模拟结果。

3.3.1 几何建模与网格划分

利用 Design Modeler 对相变储能单元、水管及冷水进行几何建模，并在 Mesh 中采用六面体网格进行网格划分。几何模型如图 3.1 所示。

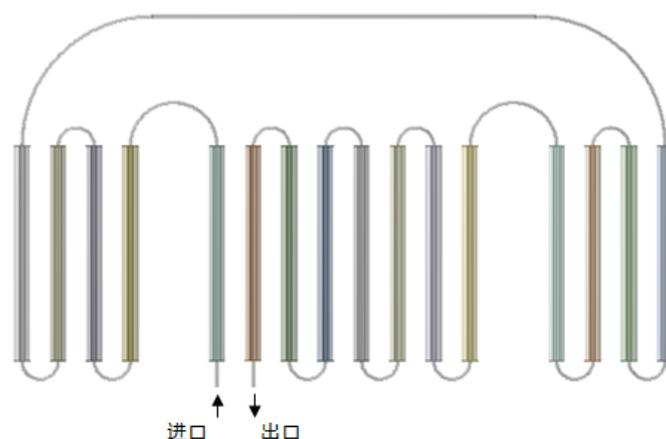


图 3.1 蓄冷工况下相变液冷服几何模型

3.3.2 传热模型设置

在 Fluent 软件中，根据 3.2 节设置各几何体的物性参数及初始与边界条件，开启 k-epsilon(2 eqn)粘性模型 (Viscous model)、凝固及融化模型 (Solidification & Melting model) 及能量方程 (Energy model) 模拟水的流动、相变材料的凝固及其他各物质的传热。

3.3.3 模拟结果分析

1. 模拟结果

12 个案例的模拟结果如表 3.4 所示。以案例 C7 为例，在蓄冷过程的第 1200s 时刻，相变储能单元温度及液相分数云图如图 3.2 所示，相变储能单元温度及液相分数变化曲线图如图 3.3 所示。其他案例中各类参数均与 C7 中参数变化规律一致。

表 3.4 蓄冷工况案例模拟结果

案例编号	相变液冷服蓄满时间 ^[1] /min	第一个储能单元蓄满时间 ^[2] /min	最低过冷温度 ^[3] /°C
C1	72	53	18.2
C2	66	53	20.3
C3	56	39	13
C4	64	51	17.3
C5	61	51	19.4
C6	49	40	15.7
C7	51	32	13.2
C8	41	31	18.4
C9	38	21	9
C10	34	24	14
C11	29	22	18.8
C12	24	17	12.4

注：[1] 相变液冷服蓄满时间：第 16 个相变储能单元液相分数达 10%的时间；
 [2] 第一个储能单元蓄满时间：第 1 个相变储能单元液相分数达 10%的时间；
 [3] 最低过冷温度：相变液冷服蓄时第一个相变储能单元的平均温度。

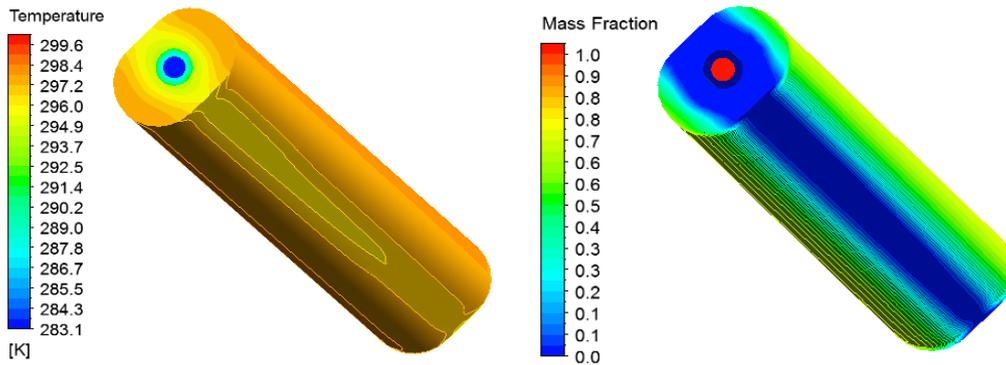


图 3.2 C7 第 1200s 时刻第一个储能单元温度及液相分数云图

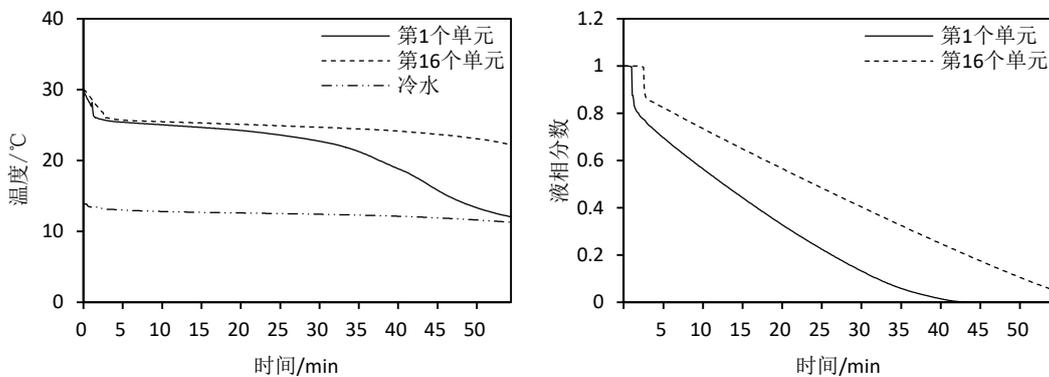


图 3.3 案例 C7 蓄冷过程相变储能单元温度及液相分数变化曲线

2. 影响因素分析

(1) 相变材料种类的影响

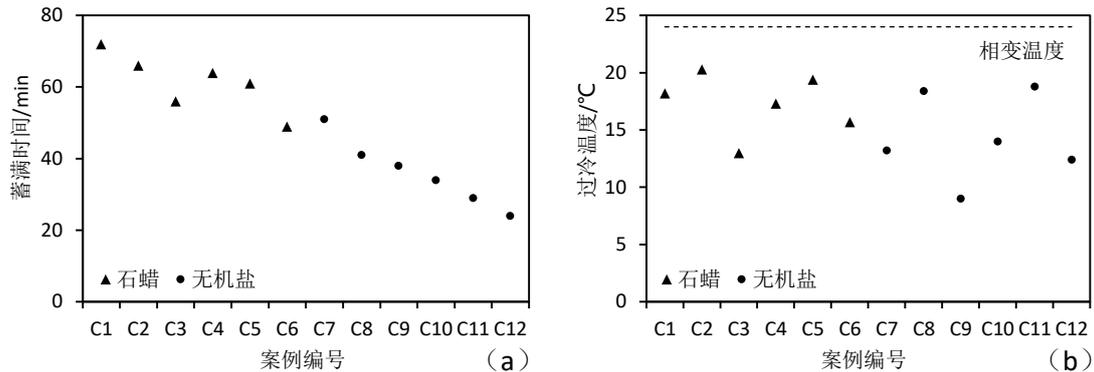


图 3.4 相变材料种类对相变液冷服蓄满时间及过冷温度的影响

从图 3.4 (a) 可以看出在不同水管内径、进口水温、流速的情况下, 采用无机盐相变材料的相变液冷服蓄满时间比采用石蜡相变材料时蓄满时间显著减少。对比案例 C1 与 C7、案例 C2 与 C8、案例 C3 与 C9 等, 可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用无机盐相变材料的相变液冷服蓄满时间比采用石蜡相变材料时蓄满时间减少约 $1/3 \sim 1/2$ 。因此, 在相变材料种类、水管内径、进口水温、冷水流速四个设计参数中, 且当各设计参数在表 3.1 的取值范围内, 相变材料种类是影响蓄满时间的重要因素。

从图 3.4 (b) 中, 对比案例 C1 与 C7、案例 C2 与 C8、案例 C3 与 C9 等可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用无机盐相变材料的相变液冷服蓄满时刻的最低过冷温度比采用石蜡相变材料时蓄满时刻的最低过冷温度稍有降低, 即过冷程度稍有增大。从案例 C3 与 C9、案例 C6 与 C12, 可以看出, 在进水温度较低的情况下 (5°C), 相变材料种类对相变液冷服蓄满时刻的过冷程度具有更大影响。

无机盐相变材料与石蜡相变材料对相变液冷服蓄满时间和蓄满时刻过冷程度的影响主要原因在于材料导热系数与密度的差别。无机盐相变材料导热系数高 ($0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$), 因此无机盐相变材料储能单元中相变材料之间的传热较快, 保证了冷水通过管壁与相变材料传热的顺利进行。并且由于无机盐相变材料密度较大 ($1400 \sim 1500 \text{ kg}/\text{m}^3$), 而无机盐与石蜡相变材料的相变潜热近似相等, 在保证相变液冷服相同相变潜热量的条件下, 无机盐相变材料储能单元尺寸较小, 如表 3.2 中的几何参数, 冷量传递路程较短, 有利于缩短蓄满时间。相反, 石蜡相变材料导热系数小、储能单元尺寸较大, 导致相变材料之间传热较慢, 冷量传递尺寸较长, 延长了蓄满时间。但, 无机盐相变材料导热系数较大也带来两个问题: 一方面, 相变储能单元蓄冷快, 在完全固化后降温较快; 另一方面, 水流冷

量散失较快，沿水流方向水温增长较快。因此，导致水流前端的储能单元与末端的储能单元蓄冷步调较为不一致，蓄满时刻第一个储能单元过冷程度大，即相变液冷服蓄满时刻最低过冷温度较低。

(2) 水管内径大小的影响

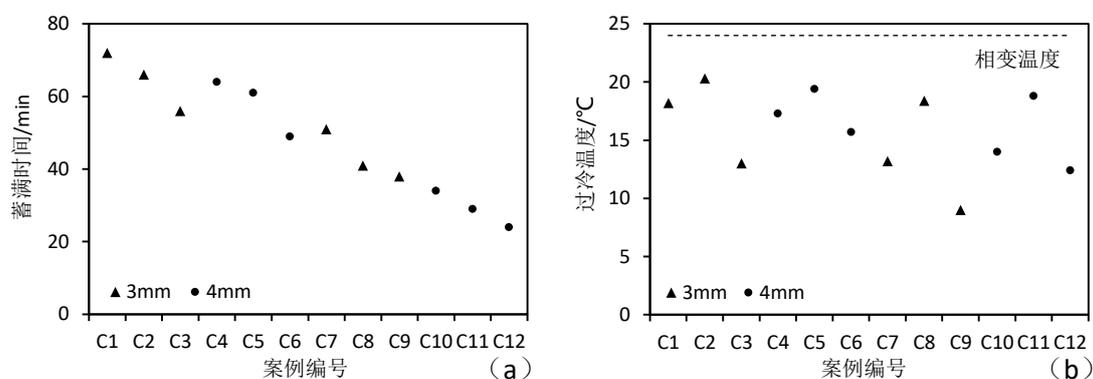


图 3.5 水管内径大小对相变液冷服蓄满时间及过冷温度的影响

从图 3.5 (a) 中，对比案例 C1 与 C4、案例 C2 与 C5、案例 C3 与 C6 等，可以看出在保持其他相同设计参数的情况下，采用较大水管内径 (4mm) 的相变液冷服蓄满时间比采用较小水管内径 (3mm) 时蓄满时间有所减少，减少约 8~15 分钟。对比案例 C1 至 C3 与 C4 至 C6、案例 C7 至 C9 与 C10 至 C12，可以看出在采用无机盐相变材料的情况下，水管内径大小对相变液冷服蓄满时间具有更大的影响。

从图 3.5 (a) 可以看出，从采用较小水管内径与较大水管内径各 6 组案例的总体来看，水管内径大小对相变液冷服蓄满时刻的过冷程度无明显影响。

水管内径大小对相变液冷服蓄满时间的影响主要来自于两个方面：1，水管外径相同的情况下 (5mm)，较大的水管内径下水管管壁厚度较小，减少了冷水与相变材料之间的传热热阻；2，较大的水管内径增大了冷水与相变材料的传热面积。因此，在水管外径相同的情况下，较大的水管内径增大了冷水与相变材料的传热量，缩短了相变液冷服蓄满时间。

(3) 进口水温的影响

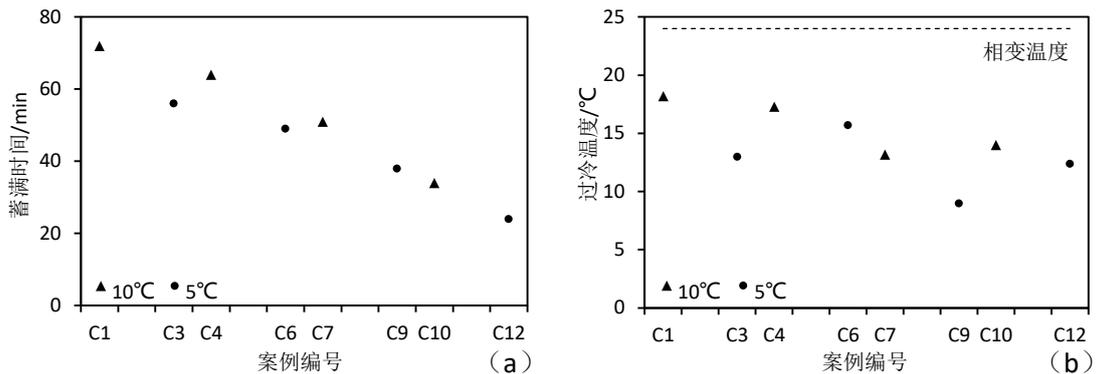


图 3.6 冷水进口温度对相变液冷服蓄满时间及过冷温度的影响

从图 3.6 (a) 中, 对比案例 C1 与 C3、案例 C4 与 C6、案例 C7 与 C9 等, 可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用较低进口水温 (5°C) 的相变液冷服蓄满时间比采用较高进口水温 (10°C) 时蓄满时间明显减少, 减少了 10~15 分钟。

从图 3.6 (b) 中, 对比案例 C1 与 C3、案例 C4 与 C6、案例 C7 与 C9 等, 可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用较低进口水温的相变液冷服蓄满时刻的过冷程度比采用较高的进口水温时蓄满时刻的过冷程度明显增大。过冷温差增大了 2~5°C。并且, 从案例 C1 与 C3、案例 C7 与 C9, 可以看出, 在较小水管内径的情况下 (3mm), 进口水温对相变液冷服蓄满时刻的过冷程度具有更大影响。

进口水温对相变液冷服蓄满时间的影响主要原因在于传热动力的大小。温差是发生传热的动力, 进口水温较低的情况下, 冷水与相变材料之间温差大, 传热快, 缩短相变液冷服蓄满时间。从图 3.6 (b) 及表 3.4 中, 对比案例 C1 与 C3 及 C4 与 C6、案例 C7 与 C9 及 C10 与 C12 的相变液冷服蓄满时间与第一个相变储能单元蓄满时间间隔、蓄满时刻最低过冷温度, 可以发现相比于较高进口水温情况, 在较低进口水温情况下第一个相变储能单元蓄满时间与相变液冷服蓄满时间间隔并没有增大, 但蓄满时刻的过冷程度增大了。因此, 导致较低进口水温情况下过冷程度较大的原因主要在于当相变储能单元完全固化后较大的温差驱动力致使储能单元降温较快, 相变液冷服完全蓄满时最低过冷温度较低。

(4) 冷水流速的影响

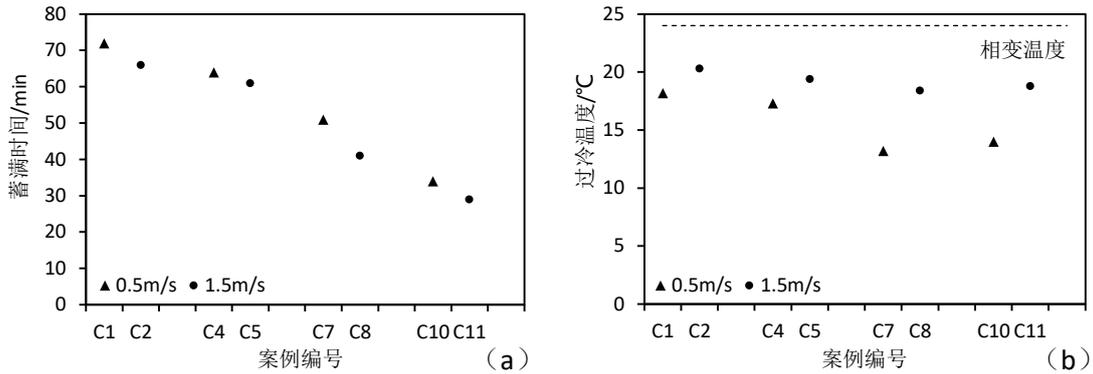


图 3.7 冷水流速对相变液冷服蓄满时间及过冷温度的影响

从图 3.7 (a) 中, 对比案例 C1 与 C2、案例 C4 与 C5、案例 C7 与 C8 等, 可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用较高冷水流速 (1.5m/s) 的相变液冷服蓄满时间比采用较低冷水流速 (0.5m/s) 时蓄满时间有所减少, 减少了 5~10 分钟。从案例 C7 与 C8、案例 C10 与 C11 可以看出, 在采用无机盐相变材料的情况下, 冷水流速对相变液冷服蓄满时间具有更大的影响。

从图 3.7 (b) 中, 对比案例 C1 与 C2、案例 C4 与 C5、案例 C7 与 C8 等, 可以看出在保持其他相同设计参数的情况下, 采用较高冷水流速的相变液冷服蓄满时刻的过冷程度比采用较低冷水流速时蓄满时刻的过冷程度有所减少, 过冷温差减小了 3~5°C。从案例 C7 与 C8、案例 C10 与 C11 可以看出, 在采用无机盐相变材料的情况下, 冷水流速对相变液冷服蓄满时刻的过冷程度具有更大影响。

冷水流速对相变液冷服蓄满时间的影响主要原因在冷水流速影响了沿水流方向水温的变化。根据公式 $Q = A_{cross} v \rho_w c_w \Delta t_w$, 在冷水流速较高的情况下, 冷水与相变材料具有相同的传热量 Q 时, 冷水温度下降 Δt_w 越小, 在整个管程上冷水温度较为一致且保持在更接近于进口水温的较低温度。因此, 较高的冷水流速将导致整个管程上冷水与相变材料的平均温差较大, 传热驱动力较大, 水流前端相变储能单元与末端的储能单元蓄冷步调更为一致, 从而缩短相变液冷服蓄满时间、减小蓄满时刻的过冷程度。

(5) 总结

综上, 相变材料种类、水管内径、进口水温、冷水流速四个设计参数, 且当各设计参数在表 3.1 的取值范围内时, 其对相变液冷服蓄满时间及蓄满时刻的过冷程度的总体影响及影响程度如表 3.5 所示。

表 3.5 各设计参数对相变液冷服蓄冷的影响

设计参数	相变材料种类 ^[2]		水管内径		进水温度		冷水流速	
	石蜡	无机盐	较小	较大	较高	较低	较低	较高
蓄满时间	↑↑↑	↓↓↓	↑↑	↓↓	↑↑	↓↓	↑	↓
蓄满时过冷程度	↓	↑	无	无	↓↓	↑↑	↑↑	↓↓

注：[1] ↑表示使增大，↓表示使减少，箭头数量表示影响程度；

[2] 不同相变材料种类主要区别在于相变材料导热系数及密度。

从表 3.5 可以看出，除冷水流速这一设计参数，相变材料种类、水管内径和进水温度在缩短相变液冷服蓄满时间及减小蓄满时过冷程度方面的作用总是相反的，但作用程度不同。因此，从缩短相变液冷服蓄满时间及减小蓄满时过冷程度方面综合考虑应采用具有较高导热系数及密度的无机盐相变材料、较大水管内径、适当进水温度、较高冷水流速的设计方案。从微型冷机制取冷量及输送冷水所消耗的能量方面考虑，进水温度较低、冷水流速较高会增大冷机能源消耗。

为解决这一问题，改变对相变液冷服冷水管路为单管路的原始设计，采用并行两管制或四管制的多管路设计方法。通过增加并行水管数量，可以起到三个方面的作用：第一，减少冷水流程从而减少输送能耗；第二，在保持相同进水温度的情况下降低整个管程上冷水平均温度从而增加冷水与相变材料的平均温差较大，促进传热；第三，减小管路首端与末端冷水温差从而减小相变液冷服蓄满时刻过冷程度。以设计方案 C11 为例，对采用多管路的相变液冷服进行模拟。模拟结果显示，对比单管路的设计方案，两管制可缩短相变蓄冷时间 3 分钟，提高蓄满时刻最低过冷温度 1.7℃，输送能耗为单管路情况下的 1/4；四管制可缩短相变蓄冷时间 6 分钟，提高蓄满时刻最低过冷温度 2.7℃，输送能耗为单管路情况下的 1/16。因此，对于蓄冷工况，相变液冷服最优设计方案为采用具有较高导热系数及密度的无机盐相变材料、较大水管内径、适当进水温度、适当冷水流速、并行多管路的设计方案。

3.4 本章小结

本章通过对相变液冷服蓄冷工况的传热模拟及分析，预测了相变液冷服在蓄冷工况下的使用性能、分析了各设计参数对穿着性能的影响，从而优化设计方案。

模拟分析结果显示，采用石蜡或无机盐相变材料、水管内径 3mm~4mm、进水温度 5℃~10℃、冷水流速 0.5 m/s~1.5m/s 的情况下，相液冷服蓄满时间为 24~72 分钟，蓄满时的最低过冷温度为 9~20.3℃。

相变材料种类（主要区别在于导热系数及密度）对相变液冷服蓄满时间影响

最大，冷水流速对蓄满时间影响最小，除水管内径以外的其他三类参数均对相变液冷服蓄满时的过冷程度有所影响。采用具有较高导热系数及密度的无机盐相变材料、较大水管内径、适当进水温度、适当冷水流速、并行多管路是相变液冷服蓄冷工况下的最优设计方案。

第 4 章 人体-相变液冷服热舒适模型建立及模拟分析

本章包括模型建立与模拟分析两部分内容。模型建立部分建立基于人体热平衡及热调节的人体-相变液冷服热舒适模型，包括三个子模型：a 人体热模型，b 相变液冷服传热模型，c 心理热反应模型；模拟分析部分根据相变液冷服使用情况设定几种典型案例，并通过人体-相变液冷服热舒适模型模拟分析相变液冷服穿着工况下人体与相变液冷服的传热与人的热舒适性、分析各类影响因素、反馈和改进设计计算方法。模型建立及模拟分析过程包括如下步骤，技术路径如图 4.1 所示。

- 1) 根据第 2 章设计方案及相变液冷服使用的具体情况设定几种典型案例；
- 2) 建立人体-相变液冷服热舒适模型；
- 3) 根据典型案例向热舒适模型输入不同参数，模拟不同条件下相变液冷服的穿着性能；
- 4) 分析模拟结果、得出模拟结论。

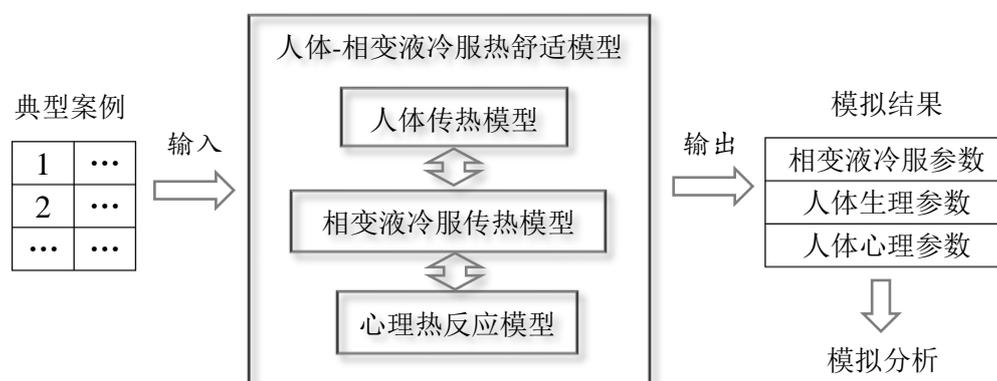


图 4.1 相变液冷服穿着工况模拟及分析技术路径

通过对相变液冷服穿着工况下人体与相变液冷服传热与热舒适性的动态模拟，可以实现以下三个目的：

- 预测不同使用情况下相变液冷服的穿着性能：相变液冷服使用时间及除热效率、人体温度分布及温度变化率、人体局部及全身热感觉及热舒适；
- 分析使用参数：环境温度、穿着松紧程度、是否穿着保温层，对相变液冷服使用时间及除热率、人体温度分布及温度变化率、人体局部及全身热感觉及热舒适度的影响及影响程度。
- 通过对比本章模拟获得的使用性能与第 2 章中设计计算时设定的使用性

能，反馈和改进设计计算方法。

4.1 穿着工况典型案例

在穿着工况下，除相变材料种类外，环境温度、相变液冷服与人体的贴紧程度、是否在穿戴相变液冷服的同时外穿着保温层，都会对人体与相变液冷服传热及人体的热舒适造成影响。考虑在使用石蜡相变材料时相变液冷服蓄冷时间长，较为不可行，因此在穿着工况下仅考虑采用无机盐相变材料的情况。对环境温度、穿着松紧程度、是否外穿保温层三个参数中每个参数的两种取值进行排列组合形成相变液冷服穿着工况下的 8 种案例，如表 4.1 所示。8 种案例中其他设计及使用条件均一致。

表 4.1 穿着工况典型案例

案例编号	环境温度/°C		穿着松紧程度		是否外穿保温层	
	30	34	稍松	稍紧	否	是
C1	√		√		√	
C2	√		√			√
C3	√			√	√	
C4	√			√		√
C5		√	√		√	
C6		√	√			√
C7		√		√	√	
C8		√		√		√

4.2 模型概述

在穿着工况下，相变液冷服覆盖部分，人体皮肤与相变液冷服换热，系统一方面吸收人体热量，一方面与外界环境通过对流、辐射发生热量交换从而阻隔环境热量进入人体。在身体的其余部分，人体通过自身着装与外界进行对流与辐射换热。与此同时，由于相变液冷服释冷过程是一个瞬态过程，人体自身热调节系统随过程中变化的皮肤温度及核心温度通过人体效应器（肌肉运动、血管扩张和收缩、汗腺活动）进行调节。穿着过程中，皮肤温度及核心温度及其变化反映着使用者的热感觉与热舒适程度性。从以上分析，在使用相变液冷服情况下，人体-相变液冷服的传热特点可以概括为以下三个方面：

- 1) 不同于非生命体，是具有主动调节能力的传热；
- 2) 是三维、非均匀（物质特性及传热情况）、瞬态的传热过程；
- 3) 传热过程复杂，多个传热子系统的传热过程相互耦合，例如人体与相变

液冷服的传热在人体皮肤这一边界上相互耦合。

因此,为使人体与相变液冷服的传热及热舒适性模拟应能够反映以上三个特点从而更加接近真实情况,借鉴国内外人体热舒适模型的建立方法,建立人体-相变液冷服热舒适模型,模型包括以下三个子模型:

- A, 人体热模型: 人体传热被控模型、生理热调节模型
- B, 相变液冷服传热模型
- C, 心理热反应模型

其中,人体热模型包括人体传热被控模型及生理热调节模型。人体传热被控模型即指没有调节功能的“无生命躯体”;生理热调节模型是通过血管舒张等生理功能维持体温恒定的人体生理热调节系统,是人体传热过程的控制系统,体现传热过程中的主动调节这一特点。相变液冷服传热模型作为人体传热模型局部的边界条件,描述相变液冷服在皮肤温度及外界环境作用下的传热情况。在人体的其余部分,人体以自身着装为边界条件与外界换热。人体传热模型与相变液冷服模型均采用三维非稳态传热模型,反映人体局部冷却而导致的非均匀、瞬态环境下的传热情况。心理热反应模型通过人体热模型与相变液冷服传热模型耦合计算输出的人体温度及其变化率衡量人体在穿着相变液冷服情况下全身及局部的热感觉与热舒适性。

4.3 人体传热被控模型

人体传热被控模型包括人体物理构成及人体能量控制微分方程,即人体生物热方程。

现实中,人体传热过程十分复杂,由于研究的时间与条件相对有限,本节在传热合理性与数值计算量之间寻找平衡点,建立适用于分析相变液冷服对人体的影响的三维、瞬态人体传热被控模型。此模型的建立以 Stolwijk 的 25 节点模型^[46-47]及袁修干的适于冷热宽范围的模型^[35]以及其他现有模型为参考。

4.3.1 人体的划分与几何模型

人体的几何形状、热物理参数的不均匀性及边界条件对人体的温度分布影响很大^[61],因此,将人体划分为 6 个节段,即头、躯干、臂、手、腿、脚,并用圆柱体表示各节段,如图 4.2 所示;每个节段分为 4 个同心层,即核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层,如图 4.3 所示。血液系统设置为独立的单元,因此共 25 个单元。不同的单元具有不同的几何、热物理、热生物参数。

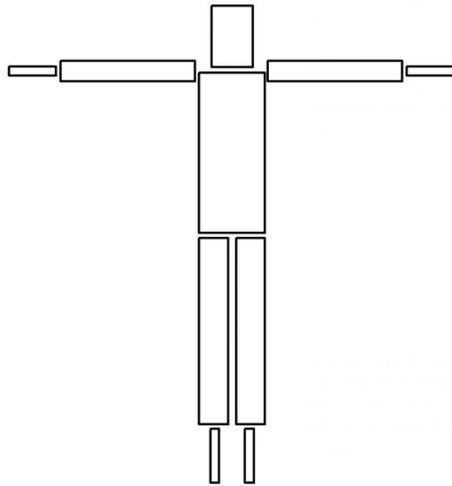


图 4.2 人体节段划分

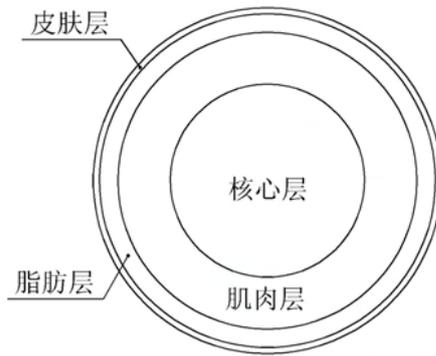


图 4.3 人体组织层划分

4.3.2 人体参数的确定

由于人体的几何参数、热物理参数及热生理参数存在较大个体差异，此模型采用表 4.2 所示的标准人作为各类参数的计算实体^[35]。人体各单元的各类参数在此标准人基础上按照表 4.3 所示的数据来源为依据进行计算和分配。根据表 4.3 中的数据来源，人体几何参数、热物理参数、热生理参数如表 4.4、表 4.5 及表 4.6 所示。

表 4.2 标准人生理参数

体重/kg	年龄/a	身高/cm	体积/m ³	面积/m ²
68.0	25.0	176.0	0.069	1.79

表 4.3 人体参数数据来源

类别	参数内容	参数来源
几何	半径，长度，表面积，体积	袁修干（2005） ^[35]
热物理	密度，比热容，导热系数	Shitzer (1984) ^[62] Zheng Lou (1990) ^[63]
热生理	基础代谢率，基础血流量	Stolwijk(1971) ^[67] Shitzer (1984) ^[62] Werner(1988) ^[64]

表 4.4 人体几何参数

序号	节段名称	体积 $V/10^{-6}m^3$	表面积 A/m^2	长度 L/m	半径 R_i/m			
					皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层
1	头	5400	0.1305	0.2512	0.0828	0.0800	0.0769	0.0641
2	躯干	35438	0.5373	0.6406	0.1327	0.1303	0.1160	0.0748
3	臂	3105	0.1173	0.5298	0.0432	0.0412	0.0395	0.0242
4	手	255.0	0.0448	0.1918	0.0193	0.0156	0.0154	0.0136
5	腿	8402	0.3372	0.7480	0.0598	0.0575	0.0555	0.0324
6	足	308.0	0.0626	0.2182	0.0211	0.0173	0.0166	0.0152

注：对于臂、手、腿、足均指一侧。

表 4.5 人体热物理参数

序号	组织名称	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容 $c/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	导热系数 $\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$
1	皮肤	1085.0	3680.0	0.44
2	脂肪	920.0	2300.0	0.21
3	肌肉	1085.0	3800.0	0.51
4	骨骼(核心)	1357.0	1700.0	0.75
5	结缔组织(核心)	1085.0	3200.0	0.47
6	血液	1059.0	3850.0	0.47

表 4.6 人体热生物参数

序号	节段名称	基础代谢产热量 $q_{m,b}/\text{W} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$				基础血流量 $B_b/\text{kg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^3)^{-1}$			
		皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层	皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层
1	头	446.11	218.43	588.03	5480.27	2.2417	0.0307	0.0909	4.7471
2	躯干	2165.95	59.11	475.58	3279.80	0.3012	0.0066	0.0316	5.2276
3	臂	244.65	193.01	446.02	638.49	0.8014	0.0258	0.0181	0.0694
4	手	19.93	3896.66	510.54	1577.75	2.8369	0.7878	0.4679	0.3301
5	腿	223.54	187.07	416.68	391.73	0.5896	0.0111	0.0163	0.0197
6	足	44.01	1171.69	529.46	1665.23	1.8390	0.1809	0.5786	0.1394
总计		86.60 W				0.0788kg/s			

注：基础代谢率为我国男性青年的情况。

4.3.3 基于人体能量平衡的生物热方程

从传热学的角度看，人体传热相当于含有内热源的三维传热系统。人体内通过生化反应产生热量；人体内部与人体表面通过 a 组织导热，b 血液与组织间对流换热，c 呼吸散热实现传热，其中前两者占主要部分；人体表面与环境通过与服装的导热及与外界的对流、辐射、蒸散发热实现传热。生物热方程包括组织热平衡方程及血液系统热平衡方程。模型采用如下假设：

- 1) 任一节段的任意组织层中物性参数不变；
- 2) 由于呼吸散热量占比很小，假设其为定值；
- 3) 简化血液对流换热：血液流出组织温度等于组织的温度；流入组织温度等于血液系统平均温度；
- 4) 由于处于室内，忽略人体与环境辐射换热；
- 5) 躯干以外其他部分皮肤为裸露表面。

1. 组织热平衡方程

(1) 偏微分方程

根据上述假设，微元体内人体组织热平衡方程有：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + q_m + q_{res} + q_b \quad (4.1)$$

ρ —人体组织密度, kg/m^3 ;

c —人体组织比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

λ —人体组织导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

t —人体组织温度, $^\circ\text{C}$;

q_m —单位体积内代谢产热量, W/m^3 ;

q_{res} —单位体积内呼吸换热量 (仅限于头部和躯干的核心层), W/m^3 ;

q_b —单位体积内组织与血液对流换热量, W/m^3 , 由血液热平衡确定。

其中, 人体代谢产热量 q_m 受多种因素的影响^[41], 本模型仅考虑我国男性青年在室内办公情况下的代谢产热, 根据文献[41]及表 4.2 标准人生理参数, 代谢产热值取 116.35W。由于身体运动是靠肌肉收缩进行的, 因此将运动带来的额外产热量分配至各节段肌肉层, 人体各部分代谢产热利用近似公式 (4.2) 进行计算。

$$q_m = \begin{cases} [\alpha_{w,i} \cdot (Q_m - Q_{m,b}) + Q_{m,b,mus,i}] / V_{mus,i} & \text{肌肉层} \\ q_{m,b} & \text{其他部位} \end{cases} \quad (4.2)$$

$Q_{m,b}$ —基础代谢产热量, W;

Q_m —代谢产热量, W;

$Q_{m,b,mus,i}$ —一节段*i*肌肉层基础代谢产热量, W;

$\alpha_{w,i}$ —肌肉运动产热量在各节段*i*的分配系数^[35], 见表 4.7;

$V_{mus,i}$ —一节段*i*肌肉层体积, m^3 。

因此, 在室内办公的情况下, 肌肉层代谢产热量见表 4.7。

表 4.7 肌肉运动产热量分配系数及肌肉层代谢产热量

节段名称	头	躯干	臂	手	腿	足
分配系数 $\alpha_{w,i}$	0.00	0.30	0.08	0.01	0.60	0.01
肌肉层代谢产热量 $q_m/\text{W} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$	588.03	1040.02	1179.99	5242.14	2288.12	5406.06

对于呼吸换热量,

$$q_{res} = q_{res,dry} + q_{res,wet} = [m_l c_{p,a} (t_a - t_{exh}) + m_l r_w (d_a - d_{exh})] / V_{h\&t,c} \quad (4.3)$$

$$m_l = 1.67 \times 10^{-6} Q_m \quad (4.4)$$

$$t_{exh} = 32.6 + 0.066 t_a + 0.032 d_a \quad (4.5)$$

$$d_{exh} = 27.7 + 0.065 t_a + 0.2 d_a \quad (4.6)$$

$q_{res,dry}$ —单位体积内呼吸干热换热量, W/m^3 ;

$q_{res,wet}$ —单位体积内呼吸湿热换热量, W/m^3 ;

m_l —肺部换气量, kg/s ;

$c_{p,a}$ —空气定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

r_w —水的汽化潜热, J/g ;

t_a —外界环境空气温度, $^\circ C$;

t_{exh} —由肺部呼出气体的温度, $^\circ C$;

d_a —外界环境空气含湿量, g/kg ;

d_{exh} —由肺部呼出气体含湿量, g/kg ;

$V_{h\&t,c}$ —头部及躯干部位核心层体积, m^3 ;

Q_m —新陈代谢产热量, W 。

由于呼吸换热量占比很小, 且其大小相对稳定, 因此假设其为定值。在环境温度为 $30^\circ C$ 及 $34^\circ C$ 的情况下各参数取值及呼吸换热量计算结果见表 4.8。

表 4.8 人体呼吸换热量计算表

序号	t_a	d_a	$c_{p,a}$	r_w	Q_m	t_{exh}	d_{exh}	$V_{h\&t,c}$	q_{res}
1	30	19	1005	2423	98.45	35.2	33.45	0.0145	-456.25
2	34	25	1005	2418	98.45	35.6	34.91	0.0145	-289.94

(2) 定解条件

初始条件:

$$\tau = 0, \quad t = t_0(x, y, z) \quad (4.7)$$

$t_0(x, y, z)$ —人体初始温度, 取值为全身裸露于环境下达到平衡时的体温。

边界条件:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \begin{cases} -q_{g-s} - q_e & \text{躯干部分, 即相变液冷服覆盖部分} \\ -q_c - q_e & \text{其余部分} \end{cases} \quad (4.8)$$

q_{g-s} —皮肤与服装的换热量, W/m^2 ;

q_c —人体表面对流换热量, W/m^2 ;

q_e —人体表面蒸发换热量, W/m^2 , 假设相变液冷服不影响其取值大小;

n —表面法线方向, 指向物体外侧。

其中,

$$q_c = h_c(t_s - t_a) \quad (4.9)$$

h_c —对流传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 取值 $3.34^{[41]}$;

t_s —皮肤表面温度, $^\circ C$ 。

$$q_e = q_{es} + q_{ed} = Q_{es,i}/S_{s,i} + 3.07(p_s - p_a) \quad (4.10)$$

由于人体通过皮肤蒸发换热量有限，因此， q_e 有上限，即：

$$q_e \leq (44.8 + 123v^{0.67})(p_s - p_a) \quad (4.11)$$

q_{es} —有感蒸发换热量，即体表汗液蒸发换热量， W/m^2 ；

q_{ed} —无感蒸发换热量，即蒸汽透过皮肤扩散换热量， W/m^2 ；

p_s —由皮肤温度确定的饱和水蒸气压， kPa ；

p_a —由环境温度确定的饱和水蒸气压， kPa ；

$Q_{es,i}$ —一节段*i*汗液蒸发换热量即有感蒸发换热量， W ，由生理调节模型确定；

$S_{s,i}$ —一节段*i*皮肤表面积， m^2 ；

p —温度*t*下的饱和水蒸气压， kPa ；

v —空气流速， m/s 。

由于，

$$p = 0.3244t - 5.24 \quad (4.12)$$

因此，

$$q_e = Q_{es,i}/S_{s,i} + 0.996(t_s - t_a) \quad (4.13)$$

$$q_e \leq (14.53 + 39.9v^{0.67})(t_s - t_a) \quad (4.14)$$

2. 血液热平衡方程

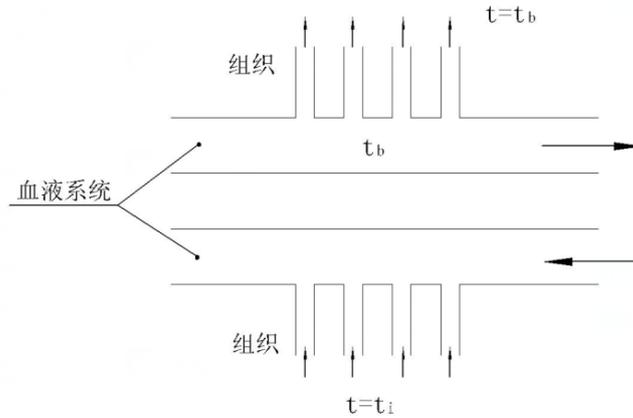


图 4.4 血液与组织换热原理

传热过程中，人体组织的导热性能差，在人体核心向体表及人体各部分组织间的传热中，血液与组织的对流换热起重要作用。血液与组织的对流换热分为微观对流换热与宏观对流换热。其中微观对流换热是小血管与组织间的换热，换热充分；宏观对流换热是较大血管与组织间的换热，换热不充分或很少。模型中，

- 1) 忽略宏观对流换热作用；
- 2) 假设小血管中血液流出组织的温度等于组织的温度，流入组织温度等于血液系统平均温度；

3) 血液温度不随空间变化，仅为时间的函数。

则，如图 4.4 所示，血液系统能量平衡方程有：

$$m_b c_b \frac{\partial t_b}{\partial \tau} = \iiint_V q_b \quad (4.15)$$

m_b —血液系统的血液的质量，kg，取值 2.5^[35]；

c_b —血液比热容，J/(kg·°C)；

t_b —血液系统平均温度，°C。

其中，

$$q_b = B c_b (t_b - t) \quad (4.16)$$

B —单位体积内血流量，kg/m³·s，由基础血流量及生理调节模型确定；

由于穿着相变液冷服情况下人体并非处于过冷或过热状态并且身体温度变化幅度不大。因此，为进一步简化模型，取血液系统中血液温度为定值且其值为以基础血流量（表 4.6）及温度调定点（表 4.9）在稳态下计算所得的血液温度，即 37°C。因此，

$$q_b = B c_b (37 - t) \quad (4.17)$$

4.4 生理热调节模型

关于生理热调节模型，也即人体传热的控制系统数学模型，目前比较公认且被广泛应用的模型建立方法是人体热调节的“调定点学说”及负反馈控制理论。本模型采用袁修干的控制系统数学模型^[35]，并根据穿戴相变液冷服的具体情况予以适当的修改。

4.4.1 模型构成及机理

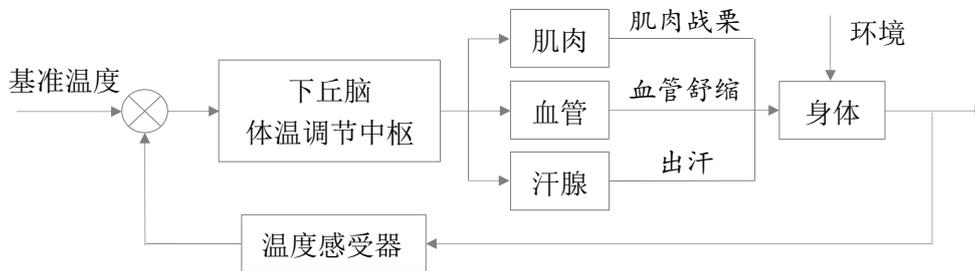


图 4.5 人体生理热调节简化图

人体热调节系统由参与调节的器官、组织及控制理论构成。参与调节的器官与组织包括下丘脑体温调节中枢，肌肉、血管及汗腺等效应器，人体这一被控对

象。从控制论的角度来看，人体热调节系统是一基于负反馈的闭环控制系统，如图 4.5 所示。模型中：

- 1) 考虑调定点（基准温度）分布于人体不同部位且各部位取值不同，由于本文中相变液冷服的使用条件为室内，身体状态变化不大，假定调定点温度为定值，忽略取值随身体状况如活动量大小的改变，取值如表 4.9 所示；
- 2) 影响调节的因素包括各部位温度及其温度变化速率；
- 3) 不同部位的温度及其变化速率对热调节的影响权重不同；
- 4) 由于使用相变液冷服的情况并非过冷状态，因此忽略肌肉寒颤作用。

表 4.9 人体各部分组织调定点温度及加权系数

序号	节段名称	调定点温度 $t_{set}/^{\circ}\text{C}$				加权系数			
		皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层	$K_{S,i}$	K_{vd}	K_{vc}	K_{es}
1	头	35.8	36.13	36.48	37.06	0.15	0.04	0.06	0.24
2	躯干	34.67	35.5	36.84	37.12	0.40	0.00	0.12	0.65
3	臂	34.2	34.51	35.05	35.61	0.17	0.32	0.19	0.03
4	手	35.33	35.39	35.41	35.47	0.08	0.16	0.16	0.02
5	腿	34.46	34.53	35.02	35.46	0.13	0.32	0.31	0.04
6	足	35.3	35.4	35.29	35.46	0.07	0.16	0.16	0.02

4.4.2 控制器模型

控制器接受人体各部位组织的温度信号，输出皮肤信号 S 和下丘脑信号 f_c 作为效应器的指令。

1. 皮肤信号

$$S = \sum K_{s,i} f_{s,i} \quad (4.18)$$

S —皮肤信号， $^{\circ}\text{C}$ ；

$K_{s,i}$ —一节段 i 皮肤信号加权因数；

$f_{s,i}$ —一节段 i 皮肤信号， $^{\circ}\text{C}$ 。

其中，

$$f_{s,i} = \overline{t_{s,i}} - t_{s,i,set} + R_i \frac{\partial \overline{t_{s,i}}}{\partial \tau} \quad (4.19)$$

$$R_i \begin{cases} 0 & \frac{\partial \overline{t_{s,i}}}{\partial \tau} > 0 \\ 10 & \frac{\partial \overline{t_{s,i}}}{\partial \tau} < 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

$\overline{t_{s,i}}$ —一节段 i 皮肤组织平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{s,i,set}$ —一节段 i 皮肤组织调定点温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

R_i —一节段 i 皮肤组织动态感应系数， s 。

2. 下丘脑信号

$$f_c = \bar{t}_c - t_{c,set} \quad (4.21)$$

\bar{t}_c —下丘脑温度，取头部核心层平均温度，°C；

f_c —下丘脑信号，即头部核心层信号，°C；

$t_{c,set}$ —下丘脑调定点温度，取头部核心层调定点温度，°C。

4.4.3 效应器模型

使用相变液冷服情况下，由于人体处于非过冷状态，效应器活动包括血管舒缩和汗腺活动。

1. 血管运行

血管效应器指令：

$$F_{vd} = 4.8S + 10.8f_c \quad (4.22)$$

$$F_{vc} = -10.8S - 3.8f_c \quad (4.23)$$

F_{vd} —全身皮肤血管扩张指令，W；

F_{vc} —全身皮肤血管收缩指令，W。

根据全身皮肤血管扩及收缩指令，皮肤层血流量根据下式进行调节，其他组织层血流量保持基础血流量不变。

$$B_{s,i} = B_{s,b,i} \frac{(1+K_{vd,i}F_{vd})}{(1+K_{vc,i}F_{vc})} \quad (4.24)$$

$B_{s,i}$ —一节段*i*皮肤血流量， $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ；

$B_{s,b,i}$ —一节段*i*皮肤基础血流量， $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ；

$K_{vd,i}$ —一节段*i*皮肤血管扩张加权系数；

$K_{vc,i}$ —一节段*i*皮肤血管收缩加权系数；

2. 汗腺活动

汗腺效应器指令：

$$F_{es} = 53.7S + 472f_c \quad (4.25)$$

F_{es} —全身出汗换热指令，W。

根据全身出汗换热指令，皮肤有感蒸发换热量根据下式进行调节。

$$Q_{es,i} = K_{es,i}F_{es} \quad (4.26)$$

$K_{es,i}$ —一节段*i*的出汗加权系数。

若上述各效应器指令 F_{vd} 、 F_{vc} 、 F_{es} 出现负值，则其值为零。

4.5 穿着工况下相变液冷服传热模型

由于穿戴式温度调节系统传热模型的建立与系统形式密切相关，人体-相变液冷服热舒适模型中相变液冷服模型根据第 2 章相变液冷服的设计及具体的使用情况建立。

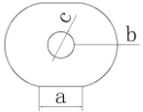
4.5.1 几何模型分析及简化

根据第 2 章中相变液冷服形式设计，相变材料以相变储能单元的形式排列在基础服装与外层服装之间，服装内形成较大的空气夹层。由于空气夹层对传热有所影响，为提高模拟准确度，在几何模型中应体现空气夹层。并且，穿着工况下，相变液冷服的冷水管中无水，且 PVC 管材比热容（ $1003\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ）远小于相变材料的相变潜热值（ $180000\text{J}/\text{kg}$ ），因此忽略冷水管。

4.5.2 相变液冷服参数的确定

穿着工况下时，相变液冷服几何参数见表 4.10，相变液冷服中各材料参数如表 4.11 所示。其中，在人体穿着相变液冷服时，由于相变储能单元由 PVC 薄膜封装，相变储能单元随相变液冷服与人体的贴紧程度发生形变，因此，相变液冷服与人体的不同贴紧程度表现在相变储能单元的截面尺寸的变化。

表 4.10 相变液冷服穿着工况几何参数表

几何体		使用情况	几何标定	几何参数
储能单元	无机盐	穿着稍松		$a \times b \times c = 6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$
		穿着稍紧		$a \times b \times c = 16.9\text{mm} \times 4\text{mm} \times 5\text{mm}$
基础服装				$L=2.6\text{mm}$
外层服装				$L=1.0\text{mm}$
保温层				$L=20.0\text{mm}$

注：[1] 基础服装厚度考虑了人体在穿着相变液冷服的同时在相变液冷服内部穿着自身棉质 T 恤的情况。

表 4.11 相变液冷服蓄冷工况下物性参数表

材料名称	密度 kg/m^3	比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	相变潜热 J/kg	相变温度 $^{\circ}\text{C}$
无机盐相变材料	液: 1400, 固: 1500	2700	0.6	180000	24~26
基础服装	55.6	1280	0.072	--	--
外层服装	50	1340	0.084	--	--
保温层	28	1184	0.024	--	--
空气夹层	1.225	1006	0.024	--	--

4.5.3 传热分析及传热模型

相变液冷服的结构决定了其传热特点。如图 4.6 所示，传热过程中，相变液冷服在人体皮肤与外界环境作用下通过相变材料融化释放冷量。一部分冷量以导热形式通过基础服装及外层服装进入皮肤及环境，另一部分冷量先进入相变液冷服中的空气夹层，再通过基础服装及外层服装的进入人体及环境。因此穿着工况下相变液冷服传热过程有如下特点：

- 1) 涉及空气夹层的作用；
- 2) 属于三维传热，即有多个传热方向。

由于实际传热过程复杂，模型做如下假设：

- 1) 穿着过程相变液冷服中无液态凝结水；
- 2) 相变液冷服透气良好，不影响人体皮肤表面蒸发散热，
- 3) 基础服装紧贴人体，忽略其与人体间的空气夹层；
- 4) 基础服装与外层服装热阻为常数。不考虑汗液对服装热阻的影响。
- 5) 根据文献[41]，相变材料与人体温差小，可忽略自然对流引起的空气夹层中的空气流动；
- 6) 忽略相变液冷服与环境的辐射换热。

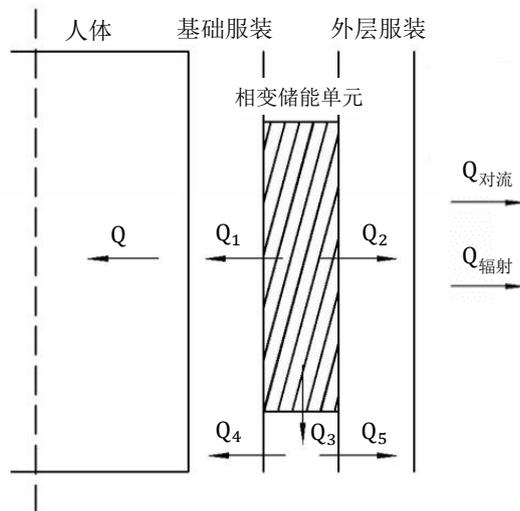


图 4.6 相变液冷服冷量传递示意图

1. 相变材料

相变材料释冷偏微分方程：

$$c_p \frac{\partial \rho_p t_{p,re}}{\partial \tau} = \lambda_p \nabla^2 t_{p,re} + \rho_p \Delta H \frac{df_s}{d\tau} \quad (4.27)$$

ρ_p —相变材料密度， kg/m^3 ；

c_p —相变材料比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

λ_p —相变材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;

$t_{p,re}$ —释冷过程相变材料温度, $^\circ C$;

ΔH —相变材料相变潜热, J/kg ;

f_s —相变材料中的固相分数。

初始条件:

$$\tau = 0, t_{p,re} = t_{p,\Delta H} \quad (4.28)$$

$t_{p,\Delta H}$ —相变材料相变温度, $^\circ C$ 。

边界条件:

$$\lambda_p \frac{\partial t_{p,re}}{\partial n} = \begin{cases} q_1 & \text{与基础服装接触部位} \\ q_2 & \text{与外层服装接触部位} \\ q_3 & \text{与空气夹层接触部位} \end{cases} \quad (4.29)$$

q_1 —由基础服装进入相变材料的热流量, W/m^2 ;

q_2 —由外层服装进入相变材料的热流量, W/m^2 ;

q_3 —由空气夹层进入相变材料的热流量, W/m^2 。

2. 空气夹层

由于忽略空气夹层中空气流动, 空气夹层传热可视为纯导热, 则空气夹层导热方程:

$$\rho_a c_a \frac{\partial t_{al}}{\partial \tau} = \lambda_a \nabla^2 t_{al} \quad (4.30)$$

ρ_a —空气密度, kg/m^3 ;

c_a —空气比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

λ_a —空气导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;

t_{al} —空气夹层温度, $^\circ C$ 。

初始条件:

$$\tau = 0, t_{al} = t_{al,0}$$

$t_{al,0}$ —穿着过程空气夹层的初始温度, $^\circ C$, 取相变材料相变温度。

边界条件:

$$\lambda_a \frac{\partial t_{al}}{\partial n} = \begin{cases} -q_3 & \text{与相变材料接触部位} \\ q_4 & \text{与基础服装接触部位} \\ q_5 & \text{与外层服装接触部位} \end{cases} \quad (4.31)$$

q_4 —由基础服装进入空气夹层的热流量, W/m^2 ;

q_5 —由外层服装进入空气夹层的热流量, W/m^2 。

3. 基础服装

基础服装导热方程:

$$\rho_{g,in}c_{g,in}\frac{\partial t_{g,in}}{\partial \tau} = \lambda_{g,in}\nabla^2 t_{g,in} \quad (4.32)$$

$\rho_{g,in}$ —基础服装密度, kg/m^3 ;

$c_{g,in}$ —基础服装比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

$\lambda_{g,in}$ —基础服装导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$;

$t_{g,in}$ —基础服装温度, $^\circ\text{C}$;

初始条件:

$$\tau = 0, \quad t_{g,in} = t_{g,in,0} \quad (4.33)$$

$t_{g,in,0}$ —穿着过程基础服装的初始温度, $^\circ\text{C}$, 取人体皮肤温度与相变材料相变温度平均值。

边界条件:

$$\lambda_{g,in}\frac{\partial t_{g,in}}{\partial n} = \begin{cases} -q_1 & \text{与相变材料接触部位} \\ -q_4 & \text{与空气夹层接触部位} \\ q_{g-s} & \text{与人体皮肤接触部位} \end{cases} \quad (4.34)$$

4. 外层服装

外层服装导热方程:

$$\rho_{g,out}c_{g,out}\frac{\partial t_{g,out}}{\partial \tau} = \lambda_{g,out}\nabla^2 t_{g,out} \quad (4.35)$$

$\rho_{g,out}$ —外层服装密度, kg/m^3 ;

$c_{g,out}$ —外层服装料比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

$\lambda_{g,out}$ —外层服装导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$;

$t_{g,out}$ —外层服装温度, $^\circ\text{C}$;

初始条件:

$$\tau = 0, \quad t_{g,out} = t_{g,out,0} \quad (4.36)$$

$t_{g,out,0}$ —穿着过程外层服装的初始温度分布, $^\circ\text{C}$, 取环境温度与形变材料相变温度平均值。

边界条件:

$$\lambda_{g,out}\frac{\partial t_{g,out}}{\partial n} = \begin{cases} -q_2 & \text{与相变材料接触部位} \\ -q_5 & \text{与空气夹层接触部位} \\ q_c & \text{与外界环境接触部位} \end{cases} \quad (4.37)$$

$$q_c = h_c(t_a - t_{g,out,s}) \quad (4.38)$$

q_c —对流换热量, W/m^2 ;

h_c —对流换热系数, $W/m^2 \cdot ^\circ C$, 取值 $3.34^{[41]}$ 。

4.6 心理热反应模型

研究表明, 人体温度场及其变化率能够衡量人体的热感觉及热舒适程度^[61]。心理热反映模型即根据体温预测热感觉与热舒适的模型。

在穿戴相变液冷服的情况下人体局部受到冷却, 且人体热状态实时变化, 根据这一特点, 本节采用 Hui Zhang 的适用于瞬态、非均匀热环境下的热感觉与热舒适模型作为人体-相变液冷服模型中的第三个子模型: 心理热反应模型, 并对其中的参数稍作修改以适用于相变液冷服的使用特点。

4.6.1 相变液冷服热舒适分析

不同于常规的空调系统, 相变液冷服通过对人体局部(躯干)进行冷却达到为人体降温的目的。在受热不均的情况下, 人体的热反应取决于人体局部及全身的热感觉与热舒适度^[66]。在这种情况下, 相变液冷服的使用可能会带来如下问题:

- 1) 相变液冷服仅能缓解躯干部位的热应力, 但对人体全身冷却效果不显著;
- 2) 相变液冷服可以有效改善人体在热环境下的全身的热舒适性, 但造成躯干部位的局部过冷问题。

此外, 虽然在使用过程中, 相变材料温度处于相变温度附近, 但由于初始状态的影响及导热温差的存在, 人体躯干部位的体表温度为一瞬态过程。研究表明, 瞬态过程中, 皮肤温度与热感觉存在分离现象^[41]。因此, 相变液冷服的使用过程中, 尤其在刚开始使用的时间段内, 皮肤温度变化速率将会影响人体的热舒适性。

4.6.2 瞬态非均匀热环境下心理热反应模型

Hui Zhang 的适用于瞬态、非均匀热环境下的心理热反应模型针对环境的瞬态及非均匀的特点建立了人体温度与热感觉与热舒适的关系, 适用于对相变液冷服热舒适性的分析。根据文献[66-69], Hui Zhang 的模型共包括四个部分:

- 1) 局部热感觉模型
- 2) 全身热感觉模型
- 3) 局部热舒适模型
- 4) 全身热舒适模型

模型中, 热感觉及热舒适采用如表 4.11 所示的 9 点近似标尺。

表 4.11 心理热反应模型中的热感觉与热舒适标尺

热感觉 标尺	很冷	冷	凉	稍凉	中性	稍暖	暖	热	很热
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
热舒适 标尺	很不舒适		不舒适	稍不舒适		稍舒适	舒适	很舒适	
	-4		-2	-1	0	1	2		4

1. 局部热感觉模型

局部热感觉模型是局部热感觉与人体温度回归所得的函数，如公式（4.39）、（4.40）、（4.41）所示。

$$S_{loc,i} = S_{loc,i,static} + S_{loc,i,dynamic} \quad (4.39)$$

$$S_{loc,i,static} = 4 \left(\frac{2}{1 + e^{-C1(t_{s,i} - t_{s,i,set}) - K1[(t_{s,i} - \bar{t}_s) - (t_{s,i,set} - \bar{t}_{s,set})]}} - 1 \right) \quad (4.40)$$

$$S_{loc,i,dynamic} = C2 \frac{dt_{s,i}}{d\tau} + C0 \frac{dt_c}{d\tau} \quad (4.41)$$

$S_{loc,i}$ —部位*i*的热感觉；

$S_{loc,i,static}$ —稳态下部位*i*的热感觉；

$S_{loc,i,dynamic}$ —瞬态下由于体温变化引起的附加热感觉；

$(t_{s,i} - t_{s,i,set})$ —部位*i*的皮肤实际温度与其设定温度（见附录 A.2）之差，代表局部皮肤热状态，°C；

$[(t_{s,i} - \bar{t}_s) - (t_{s,i,set} - \bar{t}_{s,set})]$ —部位*i*的实际温度与全身皮肤平均温度的差值与部位*i*皮肤设定温度与全身平均皮肤设定温度差值的偏离情况，代表局部皮肤热状态与全身热状态的偏离情况，°C；

$dt_{s,i}/d\tau$ —部位*i*的皮肤温度对时间的导数，代表局部皮肤温度变化情况，°C/s；

$dt_c/d\tau$ —核心温度对时间的导数，代表全身温度变化情况，°C/s；

$C1, K1, C2, C0$ —系数，见附录 A.2。

局部热感觉模型体现了如下几个方面：

稳态下：

- 1) 当局部皮肤温度处于设定温度附近，局部皮肤温度与局部热感觉接近线性关系；局部皮肤温度超出一定范围后，线性关系消失；
- 2) 局部热感觉不仅受局部皮肤温度的影响，也受全身皮肤平均温度的影响；
- 3) 皮肤局部温度与局部热感觉关系曲线的斜率及全身皮肤平均温度对局部热感觉的影响程度，在身体的不同部位及局部是冷却还是加热的情况下不同。

瞬态下：

- 1) 局部皮肤温度及核心温度变化率会造成附加热感觉；
- 2) 身体不同部位及温度变化率为正或负的情况下，附加热感觉的大小不同；
- 3) 局部皮肤设定温度为局部皮肤温度处于中性状态下的温度。

2. 全身热感觉模型

全身热感觉模型是全身热感觉与局部热感觉回归得到的函数，计算过程如图 4.7 所示。

其中，

S_o —全身热感觉；

$S_{o,small\ group}/S_{o,big\ group}$ —小组/大组部位的整体热感觉；

$S_{loc,max/min}/S_{loc,third\ max/min}$ —局部热感觉最大值/最小值/局部热感觉第三最大值/最小值；

$S_{loc,i,mod}$ —由小组中部位*i*产生的修正热感觉；

$\Delta S_{loc,i}$ —部位*i*手冷或受热时，开始时的热感觉与结束时的热感觉之差；

a, b, c —系数，见表附录 A.2。

全身热感觉模型体现了如下几个方面：

- 1) 当身体各处几乎一致的冷/暖且某些部位很冷/暖时，全身热感觉与几处很冷/暖部位的局部人感觉相一致；
- 2) 当身体各处几乎一致的冷/暖且各部位都偏中性时，全身热感觉接近各部位热感觉的平均值；
- 3) 当身体各处有冷有暖且多数部位感觉冷时，全身热感觉由暖的部位及最冷的部位决定；
- 4) 当身体各处有冷有暖且多数部位感觉暖时，全身热感觉由冷的部位及最暖的部位决定；
- 5) 不同部位的冷/热对全身热感觉的影响程度不同，特别地，当多数部位感觉暖，胸/背/骨盆热感觉值小于-1 时，全身热感觉由胸/背/骨盆热感觉决定。

3. 局部热舒适模型

局部热舒适模型是局部热舒适度与局部热感觉、全身热感觉回归得到的函数，如公式（4.42）所示。

$$C_{loc,i} = \left[\frac{-4-(C6+C7|S_o|)}{[(-4+C3|S_o|+C8)]^n} \frac{-4-(C6+C7|S_o|)}{[(4+C3|S_o|+C8)]^n} + \frac{-4-(C6+C7|S_o|)}{[(4+C3|S_o|+C8)]^n} \right] \cdot [|S_{loc,i} + C3|S_o| + C8|^n] + (C6 + C7|S_o|) \quad (4.42)$$

$C_{loc,i}$ —局部热舒适度;

$C3, C6, C7, C8, n$ —系数, 见附录 A.2。

局部热舒适模型体现了如下几个方面:

- 1) 当全身感觉冷/暖时, 局部感觉热/冷使得局部很舒适;
- 2) 当全身感觉越冷/热, 使得局部最舒适的局部热感觉越热/冷, 局部最舒适度越高;
- 3) 局部热舒适度与局部热感觉及全身热感觉的关系在身体不同部位及全身冷/暖的情况下不同;
- 4) 当局部感觉很冷/热的情况下, 无论全身热感觉如何, 均感觉局部很不适。

4. 全身热舒适模型

全身热舒适模型是全身热舒适度与局部热舒适度回归得到的函数, 如公式(4.43)所示。

$$C_o = \begin{cases} (C_{loc,min} + C_{loc,second\ min} + C_{loc,max})/3 & \text{人体处于可控/瞬态} \\ (C_{loc,min} + C_{loc,second\ min})/2 & \text{其他} \end{cases} \quad (4.43)$$

C_o —全身热舒适度;

$C_{loc,min}/C_{loc,second\ min}/C_{loc,max}$ —全身热舒适度最小值/第二最小值/最大值。

全身热舒适模型体现了如下几个方面:

- 1) 稳态环境下, 全身热舒适度主要由最不舒适的两个部位的热舒适度决定;
- 2) 瞬态或可控环境下, 全身热舒适由以上两个部位及最舒适部位热舒适度决定。

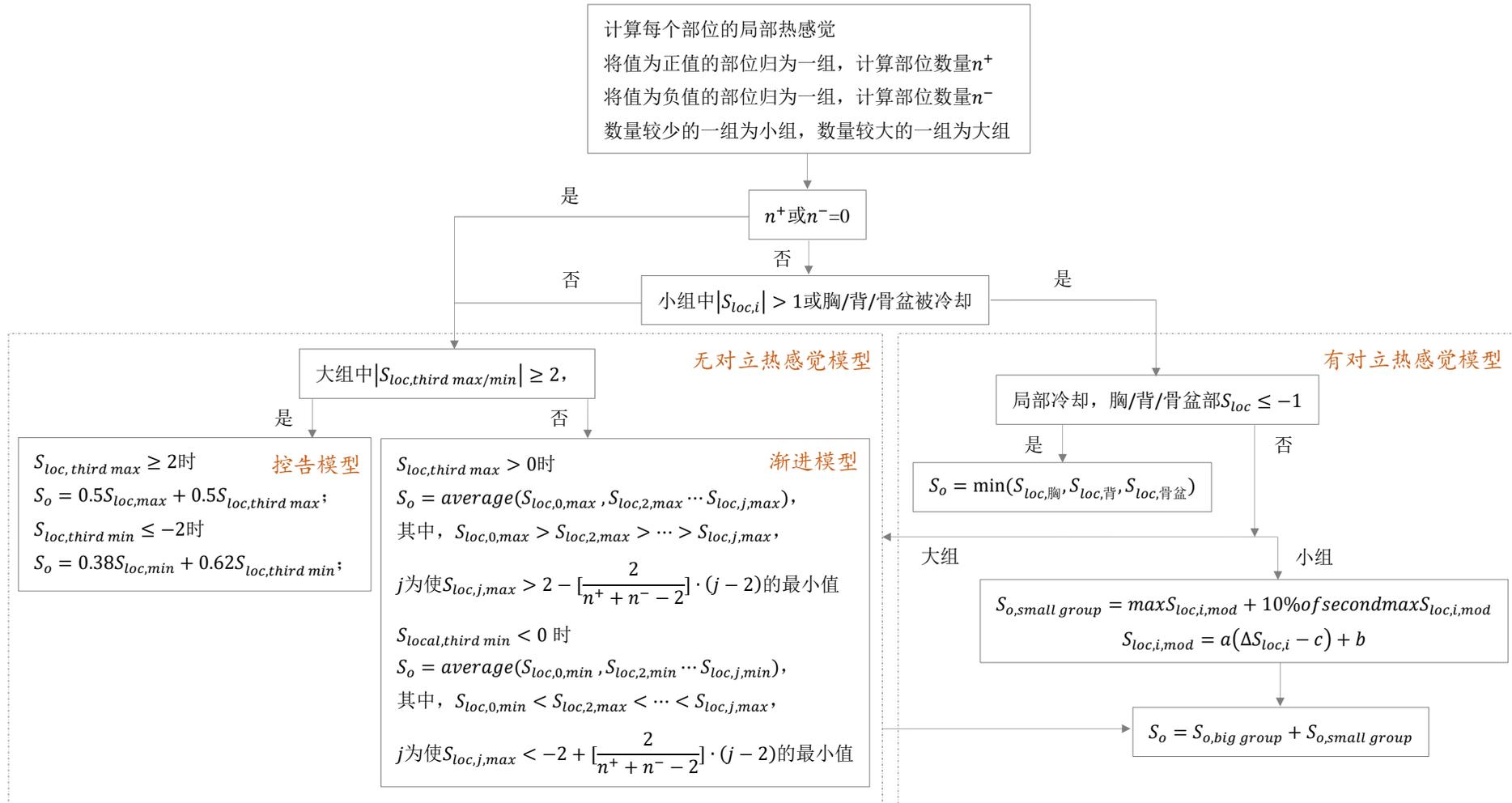


图 4.7 全身热感觉计算流程

4.7 人体-相变液冷服热舒适模型数值模拟与求解

穿着工况下人体与相变液冷服的传热为三维、瞬态传热过程。通过 workbench 平台中 Design Modeler、Mesh 及 Fluent 软件可以实现传热模型的建立及数值求解, 获得不同使用条件下传热过程的模拟结果, 利用 Office Excel 由数值求解所得人体温度分布及变化率预测人体局部及全身热感觉及热舒适度。

4.7.1 几何建模与网格划分

利用 Design Modeler 对人体及相变液冷服进行几何建模, 在 Mesh 中采用六面体网格进行网格划分, 并对空气层、相变储能单元及躯干部位的皮肤层、脂肪层进行精细加密以反映相变液冷服对人体的影响。几何模型如图 4.8 所示。

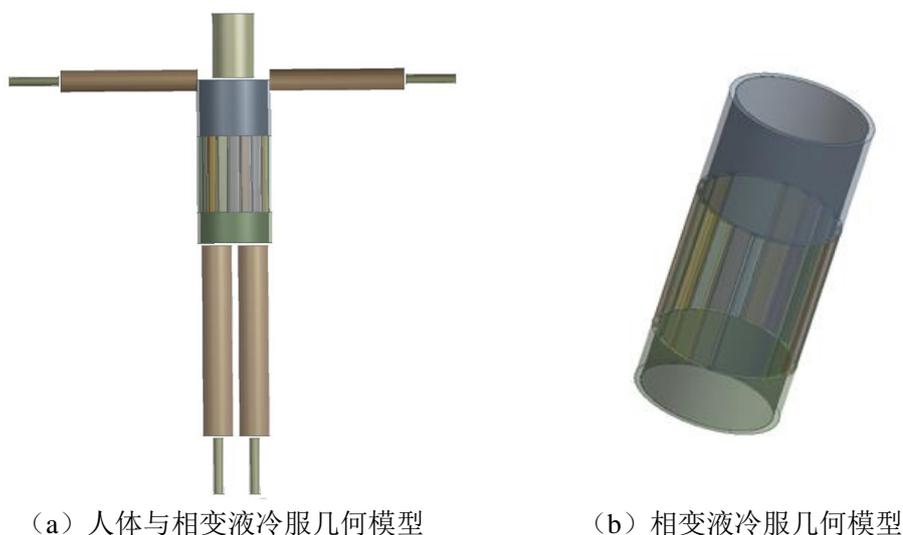


图 4.8 穿着工况下人体-相变液冷服几何模型

4.7.2 传热模型设置

在 Fluent 软件中, 根据 4.3 至 4.5 节设置各几何体的物性参数及初始与边界条件, 开启凝固及融化模型 (Solidification & Melting model) 及能量方程 (Energy model) 模拟相变材料的凝固及人体等其他各几何体的传热。其中, 生理热调节及初始条件的设置如下。

1. 生理热调节的实现

根据 4.3 及 4.4 节, 在使用相变液冷服的情况下人体根据各节段皮肤层及下丘脑温度通过调节血流量及出汗量来调节血液对流换热量及人体皮肤表面蒸发

换热量。血液对流换热量 q_b 为人体温度的函数；皮肤表面蒸发换热量 q_e 为人体及环境温度的函数。其中，除被相变液冷服覆盖的躯干部位，皮肤表面对流换热量 q_c 与蒸发换热量 q_e 一起组成人体的边界条件。

$$q_b \begin{cases} f(\overline{t_{s,1}}, \overline{t_{s,2}}, \overline{t_{s,3}}, \overline{t_{s,4}}, \overline{t_{s,5}}, \overline{t_{s,6}}, \overline{t_c}, t) & \text{皮肤层} \\ f(t) & \text{其他层} \end{cases} \quad (4.44)$$

$$\begin{cases} q_e = f(\overline{t_{s,1}}, \overline{t_{s,2}}, \overline{t_{s,3}}, \overline{t_{s,4}}, \overline{t_{s,5}}, \overline{t_{s,6}}, \overline{t_c}, t_s, t_a) & \text{相变液冷服覆盖的躯干部位} \\ q_c + q_e = f(\overline{t_{s,1}}, \overline{t_{s,2}}, \overline{t_{s,3}}, \overline{t_{s,4}}, \overline{t_{s,5}}, \overline{t_{s,6}}, \overline{t_c}, t_s, t_a) & \text{其他部位} \end{cases} \quad (4.45)$$

编写 q_b 及 q_e 的用户自定义函数（UDF）并连接到 Fluent 求解器作为人体组织的内热源及皮肤外表面的表面热汇。通过用户自定义函数实现生理热调节的实现方式如图 4.9 所示。以 30°C 环境下头部为例， q_b 及 $q_c + q_e$ 的用户自定义函数见附录 A.3。

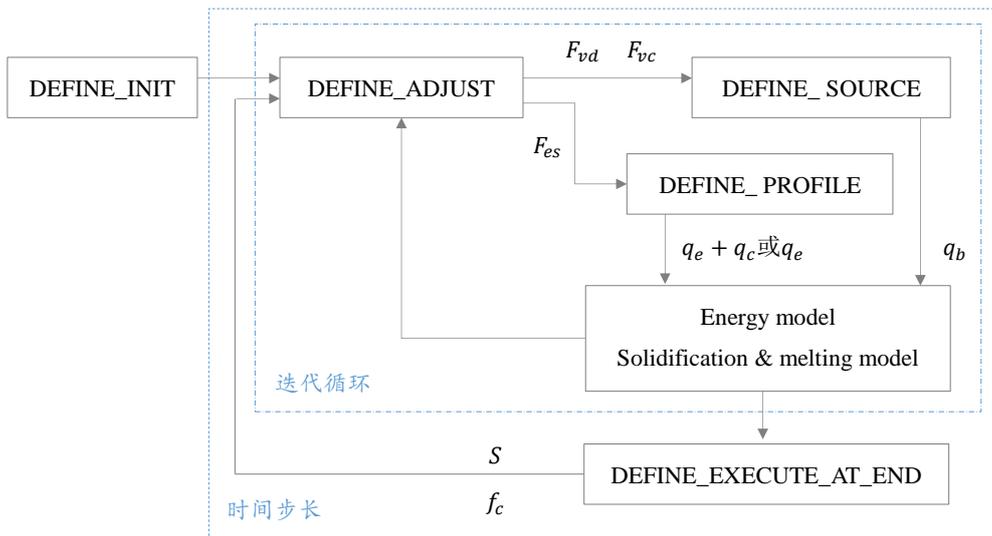


图 4.9 用户自定义函数实现人体热调原理图

2. 初始条件设置

在模拟人体与相变液冷服的传热中，人体的初始温度为人体裸露于环境温度（30°C或 34°C）情况下达到稳定状态时人体的温度分布。根据 4.3 至 4.4 节建立人体裸露于环境温度下的人体热模型并用 Fluent 求解，将达到稳定状态的人体温度分布作为人体-相变液冷服热舒适模型中人体的初始温度。求解结果如表 4.12 所示。

表 4.12 人体-相变液冷服热舒适模型人体初始温度

序号	节段名称	30°C环境下人体初始温度/°C				34°C环境下人体初始温度/°C			
		皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层	皮肤层	脂肪层	肌肉层	核心层
1	头	35.22	35.64	36.36	37.22	36.32	36.51	36.85	37.25
2	躯干	35.74	36.12	36.96	37.14	35.75	36.15	37.05	37.15
3	臂	34.82	34.93	35.20	35.50	35.82	35.87	35.99	36.13
4	手	36.10	36.22	36.26	36.38	36.62	36.70	36.74	36.82
5	腿	35.27	35.37	35.67	35.80	35.89	35.94	36.09	36.07
6	足	35.97	36.12	36.18	36.29	36.48	36.60	36.65	36.75

4.7.3 心理参数计算

根据心理热反应模型中局部及全身热感觉、局部及全身热舒适的计算公式，在 Office Excel 中建立宏按钮，如图 4.10 所示。将 Fluent 数值求解所得人体各节段皮肤温度及变化率输入 Excel 中“填写参数区”，在“计算结果区”点击对应按钮，即可计算各部位及全身热感觉及热舒适度。

填写参数区				计算结果区			
人体部位	局部温度/°C	局部温度变化率/°C/s	全身平均温度/°C	局部热感觉		局部热舒适	
额头	34.83	0.00	35.01	额头热感觉	-1.34	额头热感觉	2.65
脸	34.83	0.00		脸颊热感觉	-0.30	脸颊热感觉	2.00
呼吸	34.83	0.00		鼻部热感觉	-0.45	鼻部热感觉	1.68
颈	34.83	0.00		颈部热感觉	-1.20	颈部热感觉	-0.02
上背	36.32	0.00		上背热感觉	1.45	上背热感觉	0.47
下背	32.73	0.00		下背热感觉	-1.82	下背热感觉	-0.94
胸	36.32	0.00		胸部热感觉	1.51	胸部热感觉	4.52
腹部	32.73	0.00		腹部热感觉	-1.82	腹部热感觉	-1.28
上臂	34.67	0.00		上臂热感觉	0.36	上臂热感觉	1.39
小臂	34.67	0.00		小臂热感觉	0.00	小臂热感觉	0.71
手	35.83	0.00		手部热感觉	1.47	手部热感觉	2.82
大腿	35.35	0.00		大腿热感觉	0.72	大腿热感觉	0.91
小腿	35.35	0.00		小腿热感觉	2.10	小腿热感觉	2.05
足	35.74	0.00		足部热感觉	1.68	足部热感觉	3.04
核心	37.22	0.00		全身热感觉		全身热舒适	
				全身热感觉	-1.82	全身热感觉	0.77

注：核心温度取头部核心层温度

图 4.10 人体心理参数计算工具示意图

4.7.4 模拟结果分析

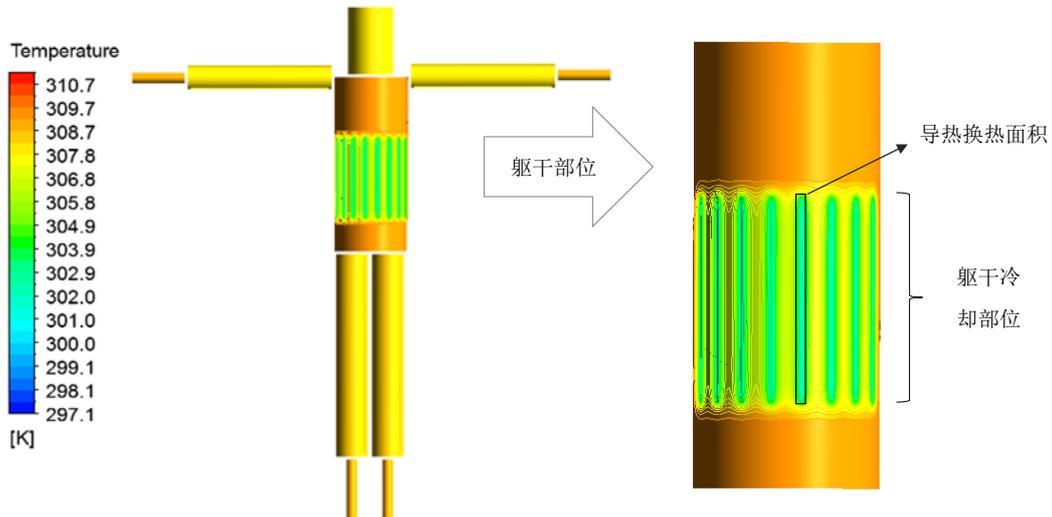
1. 模拟结果

8 个案例的模拟结果如表 4.12 所示。以 C1 为例，在相变液冷服穿着过程的第 2400s 时刻，人体皮肤温度及相变储能单元温度及液相分数云图如图 4.11 所示，人体各部位皮肤温度及相变储能单元液相分数及释冷率变化曲线图如图 4.12 所示。其他案例中各类参数均与 C1 中参数变化规律一致。

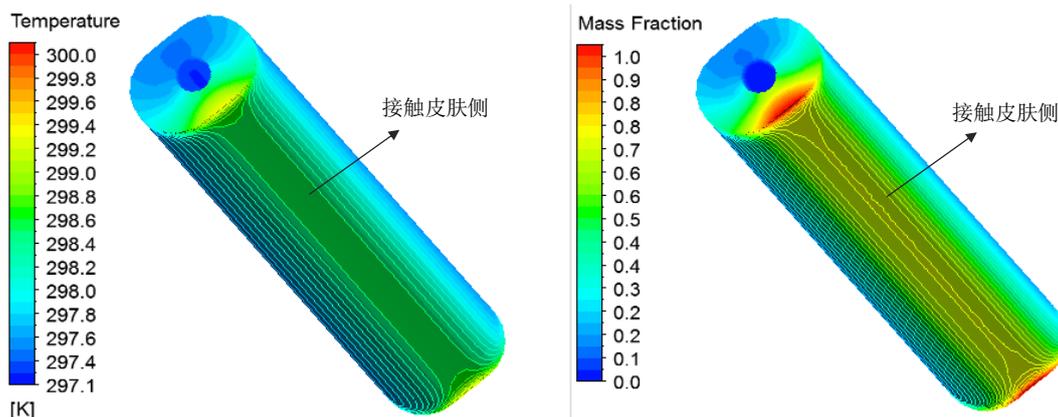
表 4.12 相变液冷服穿着工况各类参数模拟结果

案例编号	相变液冷服参数		人体生理参数					
	使用时间 ^[1] /min	平均释冷率 /W	稳定时段 ^[3] 局部 ^[4] 温度/°C		初始时段 ^[2] 温度 变化率/10 ⁻³ °C			
C1	225	15.3	32.7		4.5			
C2	257	13.4	32.7		4.7			
C3	178	19.4	31.3		6.6			
C4	206	16.7	31.3		7.0			
C5	207	16.7	32.9		4.6			
C6	239	14.4	32.9		4.6			
C7	171	20.2	31.6		6.8			
C8	186	18.5	31.5		7.0			
案例编号	人体心理参数							
	初始时段 ^[2]				稳定时段 ^[3]			
	热感觉		热舒适		热感觉		热舒适	
	局部 ^[4]	全身	局部 ^[4]	全身	局部 ^[4]	全身	局部 ^[4]	全身
C1	-1.17	-1.17	-0.13	1.01	-1.82	-1.82	-1.11	0.77
C2	-1.23	-1.23	-0.23	1.01	-1.83	-1.83	-1.12	0.63
C3	-1.71	-1.71	-0.95	0.86	-2.44	-2.44	-1.99	0.50
C4	-1.81	-1.81	-1.10	0.81	-2.44	-2.44	-1.98	0.48
C5	-1.34	-1.34	-0.39	1.06	-1.88	-1.88	-1.19	0.76
C6	-1.36	-1.36	-0.43	1.04	-1.91	-1.91	-1.25	0.71
C7	-1.91	-1.91	-1.24	0.75	-2.46	-2.46	-2.02	0.49
C8	-1.95	-1.95	-1.3	0.73	-2.53	-2.53	-2.11	0.47

注：[1] 指从相变液冷服使用开始至相变材料完全融化的时间；
 [2] 指相变液冷服穿着后 5 分钟内；
 [3] 指躯干被冷却部位温度达到最低点附近时段，如图 4.12 (a) 所示；
 [4] 指躯干被冷却部位，如图 4.11 (a) 所示。



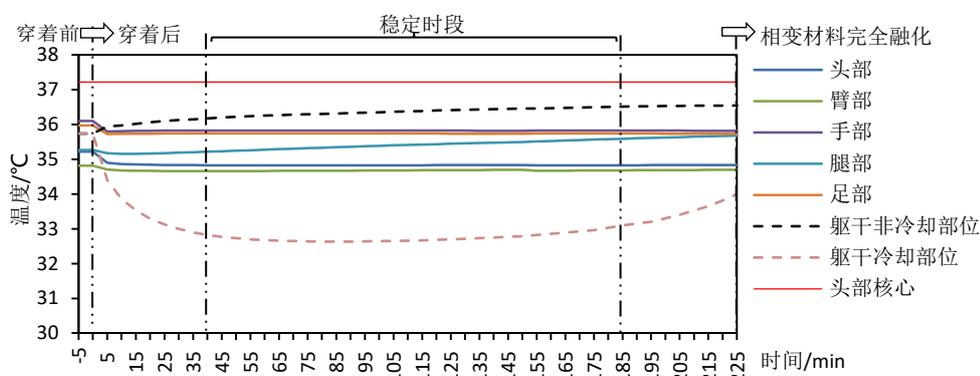
(a) 人体温度分布云图



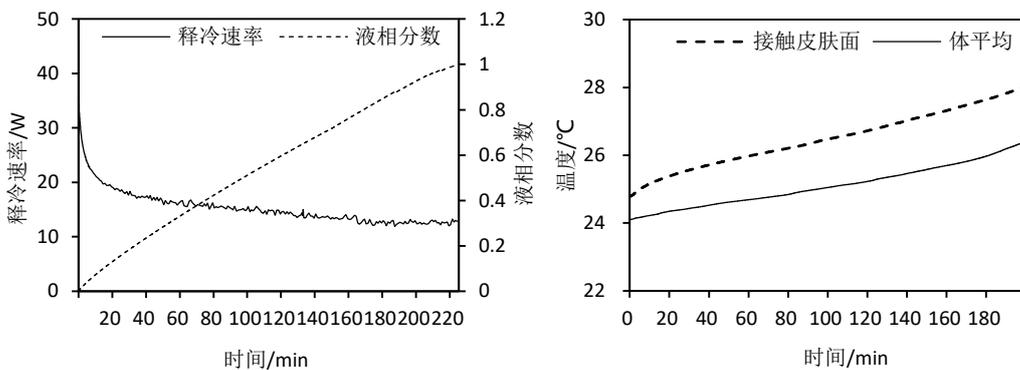
(b) 相变储能单元温度分布

(c) 相变储能单元液相分数

图 4.11 案例 C1 第 2400s 时刻人体及相变储能单元云图



(a) 人体各部位皮肤及核心温度变化曲线



(b) 储能单元外壁及接触皮肤侧温度变化

(c) 相变材料释冷速率及液相分数变化

图 4.12 案例 C1 人体及相变储能单元穿着过程参数变化曲线

如图 4.12 (a) 所示，穿着相变液冷服后，人体躯干冷却部位由于受到相变储能单元的冷却，皮肤温度快速下降并在之后相当长的一段时间内在最低温度附近维持稳定。接近使用结束，躯干冷却部位皮肤温度回升，由于完全融化的相变材料仍可利用显热进行降温，穿着结束时躯干冷却部位皮肤温度仍低于初始值。对于其他部位，在穿着相变液冷服的时，皮肤温度均稍有下降，这是由于在人体

感受躯干冷却部位的冷信号后全身各部位皮肤血管稍有收缩,血流量减少的表现。不同于头、臂、手、腿、足部位,躯干非冷却部位在皮肤温度稍有下降后并没有维持稳定,而是稍有上升,这是由于在穿着相变液冷服的情况下,躯干非冷却部位由于覆盖基础服装、外层服装及服装中空气夹层阻碍皮肤散热所导致的。人体的核心温度,始终维持温度,没有受到穿着相变液冷服的影响。

对于人体生理参数,从表 4.12 的生理参数模拟结果可以看出,根据 HuiZhang 的心理反应模型,在穿着相变液冷服的过程中,由于受到相变储能单元的冷却,躯干冷却部位感觉稍凉或凉,由于躯干冷却部位热感觉值小于-1,全身热感觉与躯干冷却部位热感觉保持一致。躯干冷却部位的热舒适度处于稍不舒适至不舒适之间,全身热舒适保持在稍舒适附近。

从图 4.12 (b) 和 (c) 可以看出,在相变储能单元与人体换热过程中,相变材料释冷速率在最初 5 分钟内急剧下降,之后稳定在平均释冷速率并缓慢下降,相变储能单元接触皮肤侧的外壁温度高于相变温度。

2. 影响因素分析

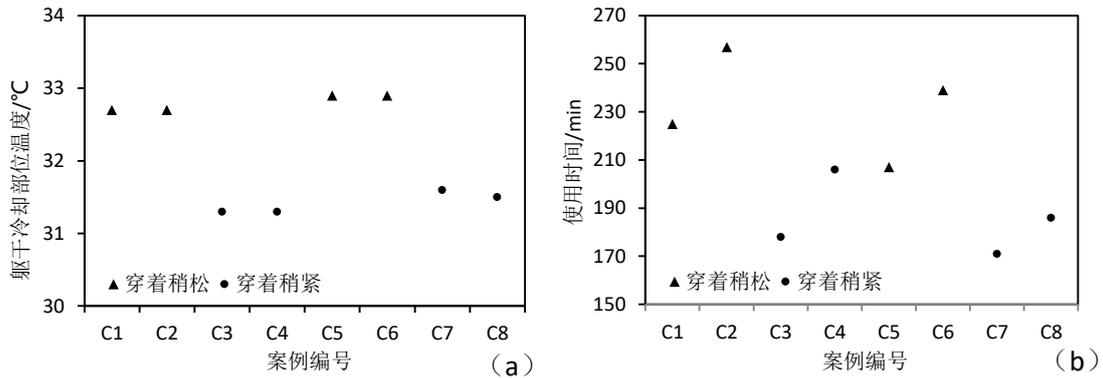


图 4.13 使用参数对人体躯干冷却部位皮肤温度及相变液冷服使用时间的影响

如表 4.12 及图 4.13 所示,在相变液冷服设计参数一定的情况下,不同的使用参数如环境温度、穿着松紧程度、是否外穿保温层,对相变液冷服使用过程中人体及相变液冷服均有不同程度的影响。

根据 Hui Zhang 的心理热反应模型,人体局部及全身的热感觉及热舒适度均由人体温度决定。如图 4.13 (a) 所示,在环境温度、穿着松紧程度、是否外穿保温层三个使用参数中,穿着松紧度对躯干冷却部位的皮肤温度影响最大,其对人体热感觉及热舒适的影响也最大。环境温度及是否外穿保温层对人体躯干冷却部位的皮肤温度影响很小。这一模拟结果,体现了相变液冷服在满足人体舒适性方面具有了很大的灵活性。在穿着相变液冷服时,穿着者可根据自身感受,通过动态地调节调节扣来调整相变液冷服的贴紧程度来调节相变液冷服的降温能力,以更大程度地提高人体舒适性,并适应不同环境及人体活动量等多种情况。

从图 4.13 (b) 可以看出, 穿着松紧度对相变液冷服使用时间的的影响程度最大。这主要是由于在穿着工况下, 与人体换热是相变液冷服主要的释冷方式, 穿着松紧度有效地改变了相变储能单元与人体的导热换热面积, 从而改变了与人体的换热量。其次, 是否外穿保温层对相变液冷服使用时间也有很大影响, 保温层减少相变储能单元与环境的换热量, 从而减小相变服的释冷速率。环境温度对使用时间的的影响较小。

3. 模拟结果与设计计算的比较

从以上模拟结果可以看出, 在环境温度及是否外穿保温层这两个使用参数保持不变的情况下, 根据在设定使用性能为维持热平衡、使用时间 1 小时的情况下所给出的相变液冷服设计方案 (第 2 章), 通过模拟计算所得的相变液冷服穿着工况下, 人体躯干冷却部位皮肤温度略低 (31.3~32.7℃), 人体明显感觉凉意, 液冷服使用时间 (3~3.75 小时) 远大于预先设定的使用时间 (1 小时)。

$$K = M_{trunk} - W_{trunk} - E_{trunk} \quad (4.46)$$

$$t_s - t_p = 2d_{liner} \cdot K / (A_{trunk} \alpha \lambda_{liner}) \quad (4.47)$$

在第 2 章 2.2.3 节中, 相变材料温度是基于躯干部位热平衡并根据以上两式计算得到。在计算中, 假定相变储能单元通过冷却较小的面积 $A_{trunk} \alpha$ 承担整个躯干部位冷负荷, 即躯干部位新陈代谢产热量。因此, 当相变储能单元与人体较小面积 $A_{trunk} \alpha$ 进行换热时, 由于单位面积换热量大于人体单位面积产热量, 面积 $A_{trunk} \alpha$ 的皮肤受到冷却而降温。并且, 根据人体生理热调节原理, 当皮肤受到冷却, 为减少热损失, 皮肤血管收缩减少血流量, 皮肤温度进一步降低。通过对局部皮肤冷却来承担较大面积的人体冷负荷, 是采用局部冷却的穿戴式温度调节系统实现为人体降温的原理。因此, 在局部冷却时, 被冷却部位略感凉意属于正常现象。但是, 由于人体的热感觉及热舒适度不仅取决于人体整体的热平衡, 也取决于人体各部位的皮肤温度及是否受热不均, 冷却面积 $A \alpha$ 与所承担冷负荷的面积 A 之比 α 应有下限, 以保证局部不会过冷。并且, 当环境温度不过高的情况下, 冷却面积 $A \alpha$ 所承担的冷负荷的面积 A 中的非冷却面积 $A(1 - \alpha)$ 的皮肤仍可通过自身热调节向环境散热, 冷却面积 $A \alpha$ 应承担 $A \alpha$ 面积的全部冷负荷与 $A(1 - \alpha)$ 面积的部分冷负荷。

从图 4.11 (b) 及图 4.12 (b) 中可以看出, 在相变液冷服与人体换热的过程中, 相变储能单元与人体的相互接触面上, 相变材料温度并非保持在相变温度。如上所述, 人体皮肤受到冷却而降温, 与相变储能单元进行导热换热部分的皮肤温度低至 30℃, 如图 4.11 (a) 所示。因此, 相变储能单元与人体的换热并非保持在如第 2 章中假设的 9℃温差。并且, 无论在穿着程度稍紧或稍松的状态, 从表 4.4、4.10 可知, 相变储能单元以导热形式与皮肤进行换热的换热面积占躯干

部位皮肤面积比均远小于 0.3，而在服装的空气夹层中的空气保持静止的情况下通过空气夹层来实现的相变储能单元与皮肤的换热量很小，因此相变储能单元与人体的实际有效换热面积比 α 小于设计计算中的假定值 0.3。相变储能单元与人体皮肤温差小、有效换热面积小是导致模拟得到的使用时间大于设计计算中设定使用时间的两个主要原因。

4.8 本章小结

本章建立了人体一相变液冷服热舒适模型，并采用人体一相变液冷服模型对典型案例进行模拟和分析，预测了相变液冷服在穿着工况下的使用性能、分析了各使用参数对穿着性能的影响、对设计计算方法提出了改进建议。

所建立的人体一相变液冷服热舒适模型包括人体热模型、相变液冷服传热模型、心理热反应模型三个子模型，适用于三维、非均匀、瞬态的传热过程，能够模拟人体与相变液冷服的传热、人体生理调节功能、人体热舒适等心理参数，较为全面地反映相变液冷服穿着过程中的传热及人体热反应情况。

模拟分析结果显示，采用相变温度 24~26°C 用量 1.15kg 的无机盐相变材料（导热系数 0.6 W/(m·°C) 密度 1400~1500kg/m³）的相变液冷服，在环境温度 30~34°C、穿着稍紧或稍松、外穿或不穿保温层的情况下，相变液冷服使用时间长达 3~3.75 小时，稳定时段人体躯干冷却部位的皮肤温度为 31.3~32.9°C，躯干冷却部位及全身感觉稍凉或凉，躯干冷却部位感觉不太舒适，全身感觉稍舒适。其中，在给定相变液冷服设计参数的情况下，穿着松紧度对人体体温及心理参数、相变液冷服使用时间影响最大，在穿着过程中，穿着者通过动态调节穿着松紧度能够更大程度地提高热舒适性并适应多种穿着环境。

通过将模拟得到的相变液冷服的使用性能与第 2 章的设计计算中设定的使用性能进行对比，对设计计算方法提出了改进建议：通过增大 α （冷却面积 $A\alpha$ 与所承担冷负荷的面积 A 之比）并且增大冷却面积 $A\alpha$ ，来计算相变材料的相变温度，可以保证人体热平衡的同时减少局部过冷程度、提高更大面积的热舒适度及全身的热均匀性；但 A 、 α 及相变温度、用量的具体取值需要通过反复的设计、模拟、实验确定。此结论也适用于其他用于局部冷却的穿戴式温度调节系统。

第5章 相变液冷服蓄冷及真人实验

本章采用第2章中所制作的相变液冷服实体,对相变液冷服从蓄冷到穿着的全过程进行实验,实验包括三个部分:相变液冷服蓄冷实验、人体热环境适应实验、相变液冷服穿着实验。实验内容及目的如下:

- 相变液冷服蓄冷实验:实验并测量相变液冷服蓄冷情况,校验相变液冷蓄冷工况传热模型,验证相变液冷服蓄冷性能;
- 人体热环境适应实验:使人体在自然着装的情况下适应热环境,从而模拟无相变液冷服着装时人体的热状态,为相变液冷服穿着实验做准备,同时测量自然着装情况下人体体温及热舒适性,校验人体热模型;
- 相变液冷服穿着实验:测量热环境下相变液冷服的穿着性能,校验人体-相变液冷服热舒适模型,验证相变液冷服降温效果及热舒适性,提出相变液冷服的改进措施。

5.1 实验设计

5.1.1 实验环境

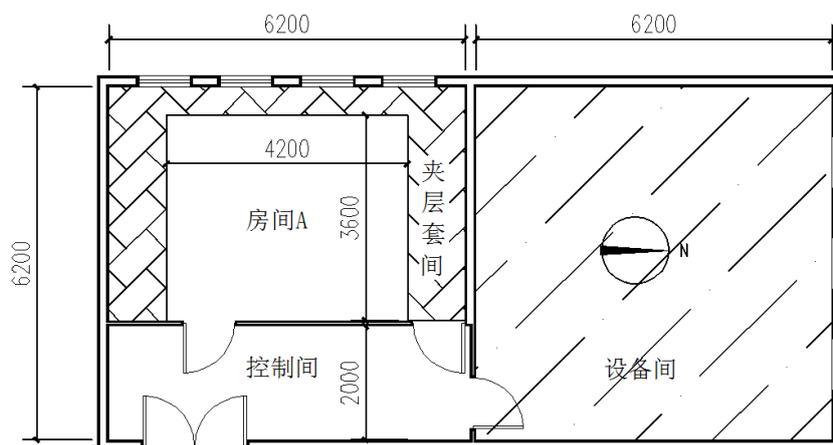


图 5.1 实验室平面图

实验于2017年1月14日至1月17日,进行4天。实验场所位于同济大学四平路校区济阳楼人工气候室,实验室平面图如图5.1所示。房间A为人工气候室内室,内室配置辐射供暖、独立新风系统、全空气空气调节系统,可实现对室

内环境温度的控制。房间 A 被夹层套间三面包围。夹层套间内配置全空气空气调节系统，可实现对夹层套件中温度控制来模拟外界环境。实验中，夹层套间开启全空气系统制热模式，空气温度控制在 30°C 来模拟夏季室外环境。气候室内室开启全空气系统制热模式，温度控制在 30°C，开启独立新风系统，新风量为 20m³/h，湿度为空气自然湿度，风速低于 0.01m/s，模拟夏季室内环境。

5.1.2 实验对象

实验对象包括相变液冷服及受试者。本次实验共招募 9 名身体健康的男性青年，受试者身体特征如表 5.1 所示。进行人体热环境适应实验时，受试者穿着棉质短袖上衣、短裤及凉鞋；进行相变液冷服穿着实验时，受试者在短袖上衣外穿着相变液冷服，下身穿短裤，脚穿凉鞋。

表 5.1 受试者身体特征

编号	姓名	年龄/a	身高/cm	体重/kg
1	刘 **	24	185	67
2	王 **	25	178	81
3	林 **	24	176	80
4	刘 **	23	175	60
5	曹 **	23	181	75
6	王 **	22	180	70
7	张 **	25	172	72
8	郭 **	22	172	63
9	朱 **	25	173	72

5.1.3 实验参数测量

实验中所测量参数包括室内环境参数、相变液冷服参数、人体生理参数、人体心理参数。所采用测量仪表如表 5.2 所示。

表 5.2 参数测量仪器

测量参数	测量仪器	量程	精度
空气温度	WSZY-1 温湿度自记录仪	-40~100°C	±0.5°C
空气湿度	WSZY-1 温湿度自记录仪	0~100%RH	±3%
室内风速	QDF-3 型热球式电风速仪	0.05~30m/s m/s	±0.05m/s
相变液冷服温度	WZYCH4-1 四通道温度记录仪	-20~80°C	±0.3°C
人体皮肤温度	WZYCH4-1 四通道温度记录仪	-20~80°C	±0.3°C

1. 室内环境参数

从相变液冷服蓄冷到穿着的整个实验过程均进行室内环境参数测量。室内环境测量参数包括空气温度、相对湿度及风速。测量仪器布置于人工气候室内室房间中心1m高度处,测试仪器距离受试者及相变液冷服等实验对象距离1m以上。

2. 相变液冷服参数

相变液冷服蓄冷实验及穿着实验中均进行相变液冷服参数的测量。相变液冷服参数包括相变储能单元表面温度、相变液冷服外表面温度及相变材料融化情况。相变储能单元表面温度、相变液冷服外表面温度的测量通过医用胶带及药棉贴附温度探头于测点进行接触式表面测量,药棉起到隔绝温度探头与环境传热的作用。测量过程中,仪器每1分钟自动记录一次数据。储能单元表面温度及相变液冷服外表面温度各有两个测点。由于相变材料融化情况无法通过仪器测量得到,实验过程,实验人员间隔性地观察相变液冷服中相变材料的融化情况。

3. 人体生理参数

从人体热环境实验结束前5分钟至实验结束及相变液冷服穿着实验整个过程中均进行人体生理参数的测量。人体生理参数包括人体不同部位的皮肤温度。皮肤温度的测量通过医用胶带及药棉贴附温度探头于受试者皮肤表面进行接触式表面测量,药棉起到隔绝温度探头与环境传热的作用。测量过程中,仪器每1分钟自动记录一次数据。皮肤温度测点(共11个)布置如图5.2所示。其中,由于相变液冷服中相变储能单元的覆盖部位为躯干的胸部靠下部位,因此以腹部及下背的平均温度代表躯干冷却部位温度,以胸部及上背温度代表躯干非冷却部位温度。

4. 人体心理参数

从人体热环境实验结束前5分钟时及相变液冷服穿着实验整个过程中均进行人体心理参数的测量。人体心理参数包括全身及躯干部位热感觉、全身及躯干部位热舒适度,以及仅在相变液冷服穿着实验中进行测量的相变液冷服除热效果、热不均匀性、柔软性等受试者对相变液冷服的性能评价,各参数标尺见表5.3。人体心理参数的测量采用问卷调查的方式进行,问卷样本见附录A.4。其中,全身及躯干部位热感觉、全身及躯干部位热舒适度的测量频率为人体热环境适应实验结束前5分钟时一次,相变液冷服穿着实验整个过程中前5分钟每两分钟一次、5~20分钟每5分钟一次、20~50分钟每10分钟一次、50分钟后每20分钟一次。相变液冷服的除热效果、柔软性等性能评价在相变液冷服穿着实验结束时进行。

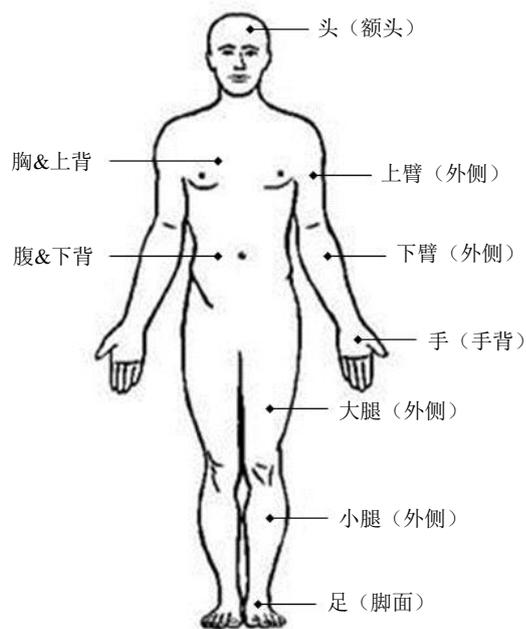


图 5.2 人体皮肤温度测试点布置图

表 5.3 相变液冷服主观评价内容及标尺

主观评价	评价标尺								
热感觉标尺	很冷 -4 +	冷 -3 +	凉 -2 +	稍凉 -1 +	中性 0 +	稍暖 1 +	暖 2 +	热 3 +	很热 4 +
热舒适标尺	很不舒适 -4 +		不舒适 -2 +	稍不舒适 -1 +	0 +	稍舒适 1 +	舒适 2 +	很舒适 4 +	
除热效果			过强 -2 +	稍强 -1 +	无感觉 0 +	稍若 1 +	很弱 2 +		
柔软性			很僵硬 -2 +	稍僵硬 -1 +	无感觉 0 +	稍柔软 1 +	很柔软 2 +		
轻便性			很沉重 -2 +	稍沉重 -1 +	无感觉 0 +	稍轻便 1 +	很轻便 2 +		
粘湿感			很粘湿 -2 +	稍粘湿 -1 +	无感觉 0 +				
冷热不均			很不均匀 -2 +	稍不均匀 -1 +	无感觉 0 +				

5.1.4 实验流程

实验于2017年1月14日至1月17日进行4天，每天2组或3组实验，每组实验一位受试者，共9组实验。每组实验包括两个实验阶段：实验第一阶段、实验第二阶段，三个实验部分：相变液冷服蓄冷实验、人体热环境适应实验、相变液冷服穿着实验。实验流程如图5.3所示。

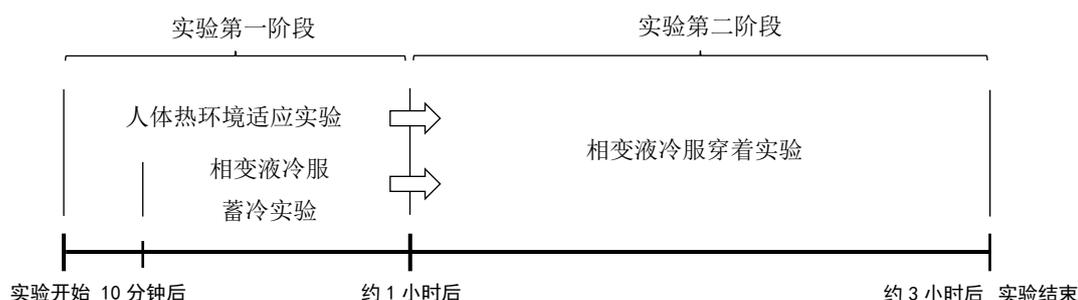


图 5.3 实验流程示意图

实验第一阶段为相变液冷服蓄冷实验及人体热环境适应实验。

(1) 实验开始后，受试者穿着棉质短袖上衣、短裤及凉鞋，于人工气候室静坐或阅读，以适应热环境。此时间段，实验人员为受试者皮肤表面安放温度探头为皮肤温度的测量及数据记录做准备。

(2) 实验开始10分钟后，实验人员利用课题组现有的微型蒸汽压缩制冷机组为相变液冷服进行蓄冷，冷机供应冷水温度 5°C ，流速 0.5m/s 。蓄冷过程中相变液冷服由羽绒保温层包裹以隔绝外界热环境加快蓄冷速率，相变储能单元表面温度及相变液冷服外变面温度由提前敷设好的四通道温度记录仪温度探头测量并记录，实验场景如图5.4所示。待相变材料完全固化且相变储能单元表面温度保持在相变温度且刚刚稍有降低时，相变液冷服蓄满冷量，实验第一阶段结束。

(3) 实验第一阶段结束时，人体热环境适应实验随之结束。由第三章模拟可知，相变液冷服蓄满时间约 $30\sim 50$ 分钟，因此，受试者在热环境中适应时间约1小时，假设此时受试者身体热状态已达到热环境下的稳定状态。人体热环境适应实验结束前约5分钟，人体皮肤温度测量及数据记录开始进行，受试者填写一次调查问卷，记录热环境下自然着装时的全身及躯干部位热感觉及热舒适度。

实验第一阶段结束后立即进入实验第二阶段，即相变液冷服穿着实验。

(1) 受试者穿上蓄满冷量的相变液冷服，调节扣使服装与人体良好贴合。实验过程中，受试者根据调查问卷中给定的时间点记录全身及躯干部位热感觉、全身及躯干部位热舒适度。受试者填写调查问卷的行为可视为模拟室内办公的活动状态。相变液冷服穿着整个过程中，人体皮肤温度及相变液冷服温度由四通道

温度记录仪温度探头测量并记录，实验场景如图 5.5 所示。

(2) 待相变液冷服中相变材料完全融化，或当受试者反映相变液冷服已不再能起到降温作用时，或当穿着时间长于 130 分钟时，相变液冷服穿着实验结束。结束时，受试者根据调查问卷对相变液冷服进行多方面的主观评价，并给出相变液冷服的改进建议或对相变液冷服的看法。



图 5.4 相变液冷服蓄冷实验情景



图 5.5 相变液冷服穿着实验情景

5.2 实验结果及分析

实验过程中，环境温度、相对湿度、及风速分别保持在 $29.5\sim 30.8^{\circ}\text{C}$ 、 $44.7\sim 53.7\%$ 、 $< 0.01\text{m/s}$ 。将各组实验所得实验数据取平均值，得到实验最终结果。

5.2.1 相变液冷服蓄冷实验结果与分析

根据实验设计,本实验中相变液冷服蓄冷实验条件与第3章中案例C7情景一致。

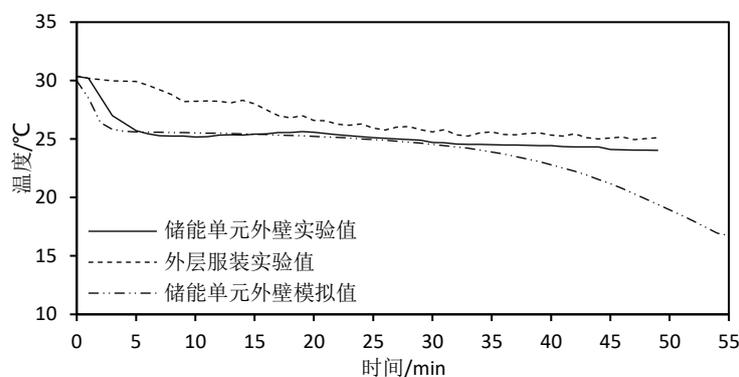


图 5.6 相变液冷服蓄冷实验相变液冷服温度测量

在相变液冷服蓄冷过程中,根据实验测得的相变储能单元外壁面温度及外层服装温度变化情况如图 5.6 所示。与模拟结果一致,蓄冷过程中,相变材料受到冷却后温度急剧下降至相变温度后保持稳定,相变材料进行固化蓄冷。不同的是,在蓄冷接近结束的时段实验测得相变储能单元外壁面温度仍保持在相变温度,而模拟温度却已过冷。这主要是由于模拟温度为所有相变储能单元外壁面温度平均值,并以第 16 个储能单元液相分数达到 10% 为蓄满的标志,蓄满时其他储能单元已处于稍过冷的状态。而实验中仅测量两个测点的外壁面温度,并以温度测量值刚小于相变温度值作为实验结束的标志,实验结束时相变液冷服处于基本蓄满的状态。并且在蓄冷实验中,相变液冷服被保温层包裹以隔绝外部热环境,但保温层的保温效果与模拟中设定的保温层导热系数会略有出入。综上,相变液冷服蓄冷工况下实验与模拟结果基本一致。

5.2.2 人体热环境适应实验及相变液冷服穿着实验结果与分析

根据实验设计,本实验中相变液冷服穿着实验条件与第 4 章中案例 C1 情景一致。

在相变液冷服穿着前(即人体热环境适应实验结束前 5 分钟)与穿着过程中,人体各部位皮肤温度变化曲线如图 5.7 所示。与人体-相变液冷服热舒适模型模拟所得人体皮肤温度变化情况(图 4.11)相一致,穿着相变液冷服后,躯干冷却部位受到冷却,皮肤温度快速下降后维持稳定并在接近实验结束时温度回升。其他各部位皮肤温度均在穿着相变液冷服时稍有下降。不同于模拟结果,躯干非冷却部位皮肤温度并没有逐渐升高,这主要是由于实验中,在躯干非冷却部位,相变

液冷服装中此部位由于没有相变储能单元的支撑而不存在空气夹层，因此此部位皮肤散热良好，但人体-相变液冷服热舒适模型中的相变液冷服在此部位仍考虑了空气夹层。并且，实验测量所得腿部温度（约 33°C）明显低于模拟值（35.5°C），头部温度（约 35.6°C）略高于模拟值（34.8°C），其他部位皮肤温度实验值与模拟值较为一致。

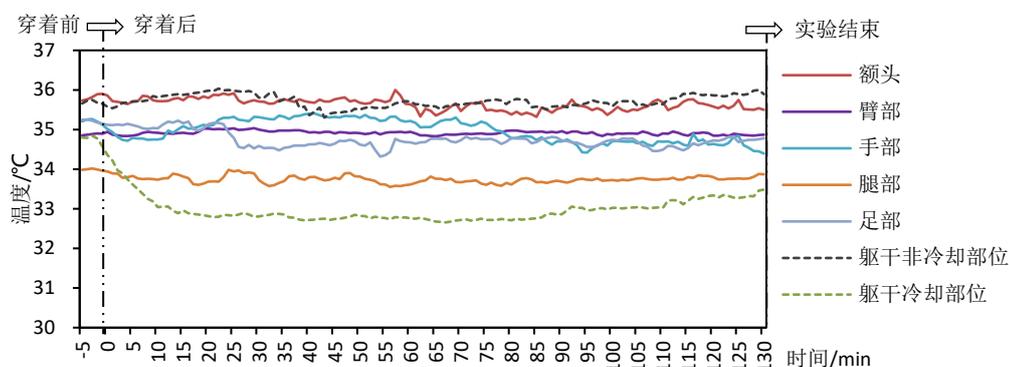


图 5.7 相变液冷服穿着实验人体皮肤温度测量

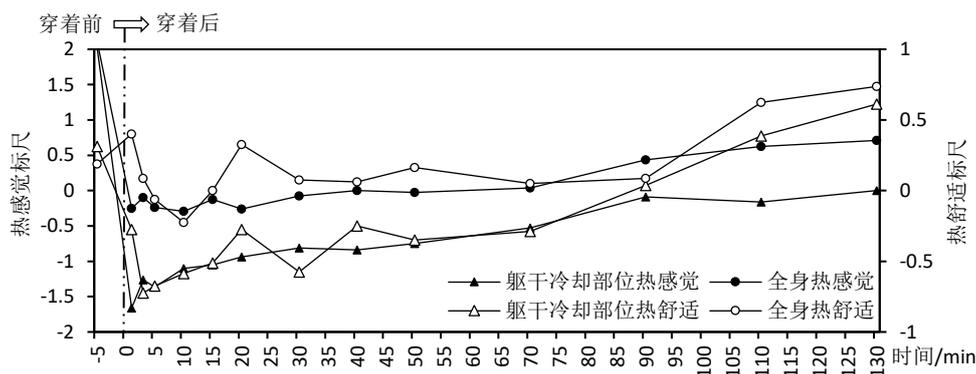


图 5.8 相变液冷服穿着实验人体心理参数测量

根据受试者调查问卷统计所得人体躯干冷却部位及全身热感觉及热舒适度随时间变化情况如图 5.8 所示。在穿着相变液冷服的初始时刻，躯干冷却部位及全身热感觉值急剧下降，躯干冷却部位由于突然感觉凉意稍不舒适，但全身热舒适度有所提高。在相变液冷服穿着过程中，躯干冷却部位及全身热感觉、热舒适度整体呈逐渐升高的趋势。在穿着后 5 分钟时，躯干冷却部位热感觉、热舒适度以及穿着过程中间阶段全身热舒适度的实验值与模拟值较为吻合，穿着后 5 分钟时全身热感觉、热舒适度以及穿着过程中间阶段躯干冷却部位热感觉、热舒适度及全身热感觉的实验值与模拟值偏差较大。

通过实验数据整理、实验过程中实验人员对受试者的询问及调查问卷中受试者对相变液冷服的建议及看法可以发现：

- 1) 由于在实验中，不同受试者穿戴相变液冷服时相变液冷服与受试者贴紧程度难以保持一致，在贴紧程度稍有不同时，人体热感觉及热舒适度差异较大；
- 2) 穿上相变液冷服后，不仅在躯干部位，全身均有凉爽感，尤其感觉胳膊温度降低。
- 3) 多位受试者腹部感觉稍冷并略有不适；
- 4) 在热环境下，由于手部放于桌面且足部靠近地面，虽躯干部位除热效果很好，但手脚稍有出汗；
- 5) 相变液冷服穿着初始时刻，感觉全身冷热不均对热舒适影响较大，但人体会逐渐适应。

其中，人体对热不均匀的适应性应是导致相变液冷服穿着过程中全身及局部热舒适逐渐升高的主要原因。

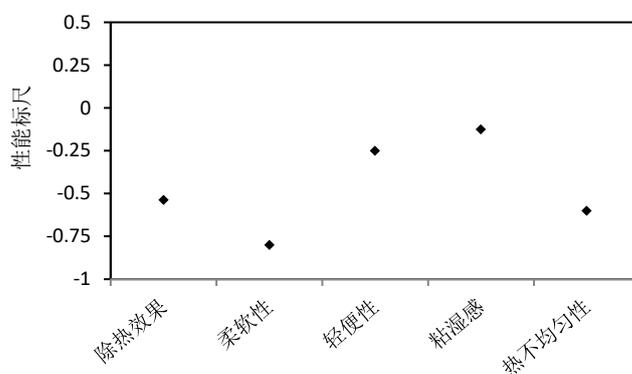


图 5.9 相变液冷服性能评价

实验结束时受试者对相变液冷服的性能评价如图 5.9 所示。可以看出，采用第 2.3 节所制作的相变液冷服在 30℃环境下对人体降温时，相变液冷服除热效果、柔软性、轻便性、粘湿感、热不均匀性取值均处于-1 至 0 之间，即在这 5 个方面，此套相变液冷服均是可以被接受的。

需要说明的是，在本次实验的实验过程中，相变液冷服的穿着松紧度保持固定不变。由第 5 章的模拟结果可知，调节穿着松紧度可以有效改变人体热舒适度。因此，当允许受试者实验过程中自由调节松紧度时，受试者会获得更高的舒适度；并且，通过自由调节来控制自身冷热状况也更符合人们现实生活中对温度调节系统真实的使用情况。

对于穿着实验中相变材料融化及温度的变化情况，实验中实验人员通过观察相变液冷服穿着过程相变材料的融化情况，发现相变材料在人体不同部位融化情况不同。在每组的相变液冷服穿着实验中，均是躯干冷却部位的上半部分的相变材料首先融化，下半部分融化很慢，甚至实验结束时仍未融化或完全融化。即相

变液冷服中靠近胸部的相变材料融化快，靠近腹部的相变材料融化慢。相变材料融化不均可能有两个方面原因。其一，如文献[6]所述，人体不同部位具有不同的冷却能力，实验中相变材料融化不均的现象说明，人体的胸部比腹部具有更大的冷却能力。并且如上文已述，受试者反映腹部感觉稍冷并略有不适。因此，冷却部位应尽量避免腹部。其二，如表 2.2 所示，相变材料在不同相态下密度不同，融化的液态相变材料受浮升力作用流入相变储能单元上部，因此相变储能单元应缩短长度。

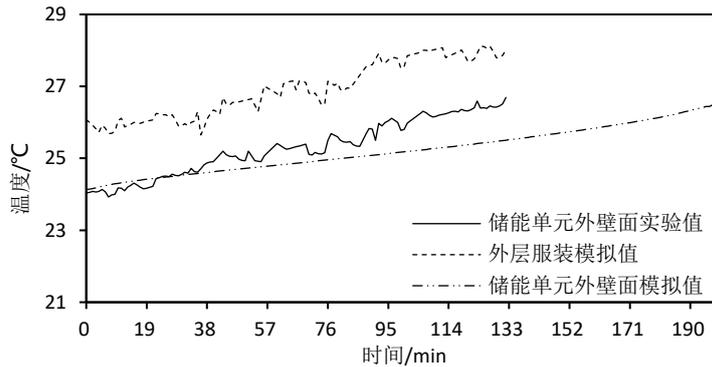


图 5.10 相变液冷服穿着实验相变液冷服温度测量

因相变材料融化不均，如图 5-10 所示，穿着实验中通过两个测点所测量的相变液冷服中相变储能单元的外壁温度不能反映相变材料温度的整体情况。

5.3 本章小结

本章，通过相变液冷服蓄冷实验、人体热环境适应实验、相变液冷服穿着实验，验证了第三章及第四章的模型、测试了相变液冷服的使用性能、并对所设计的相变液冷服提出了具体改进措施。

通过模型验证，相变液冷服蓄冷模型及人体—相变液冷服热舒适模型的传热及热调节部分(人体热模型、相变液冷服模型)的模拟结果与实验结果较为一致，心理热反应模型预测的人体心理参数与实验结果有一定误差；

模拟分析结果显示，在固定穿着松紧度的情况下，此套相变液冷服降温效果处于稍强与合适之间，人体全身热不均匀感处于稍不均匀与均匀之间；从除热效果、柔软性、轻便性、粘湿感、热不均匀性等各方面，此套液冷服均是可以被接受的；若允许受试者实验过程中自由调节松紧度,受试者会获得更高的热舒适度；

根据实验分析及受试者的建议，此套相变液冷服应做以下改进：

- 1) 应选取相变温度稍高于 24~26°C 的相变材料；
- 2) 冷却部位，即相变材料的分布，应避免腹部；
- 3) 为提高服装柔软性及相变材料融化均匀性，应缩短储能单元长度。

第6章 结论及研究展望

6.1 本文的主要成果与结论

穿戴式温度调节系统可以在室外、非空调环境、及特殊热环境等多种环境下为人体提高热舒适性。同时,穿戴式温度调节系统通过对个人而非大空间的温度调节在提高舒适性的同时也可节约能源。本课题依据设计制作→模拟分析→实验验证的技术路径设计并研究了一种新型的用于人们日常降温使用的穿戴式温度调节系统—相变液冷服。本课题的研究成果及结论主要包括以下几个方面:

(1) 通过技术选择、结构设计、设计计算、材料选择确定此种新型穿戴式温度调节系统—相变液冷服的设计方案,并根据设计方案制作相变液冷服实体。所设计的相变液冷服采用相变材料储蓄的冷量为人体降温,通过埋敷在相变材料的冷水管为服装蓄冷,利用微型冷机为相变液冷服提供冷量。此形式的相变液冷服克服了已有的空气冷却服冷却效果不显著、液体冷却服需要随身携带冷机、相变服装只能间歇使用的缺点。

(2) 建立蓄冷工况相变液冷服与冷水的传热模型,模拟分析相变材料种类、水管内径、进口水温及冷水流速4类设计参数的不同取值对相变液冷服蓄冷时间、过冷程度等性能的影响。模拟结果表明,在所考虑的各设计参数取值范围内,采用具有较大导热系数及密度的无机盐相变材料、较大水管内径、适当进水温度、适当流速并采用并行多管路的设计为蓄冷工况下相变液冷服的最优设计方案。

(3) 建立相变液冷服穿着工况下人体-相变液冷服热舒适模型,模型包括三个子模型:人体热模型、相变液冷服传热模型、心理热反应模型。此热舒适模型能够模拟人体与相变液冷服的传热、人体生理调节功能、人体热舒适等心理参数,较为全面地反映相变液冷服穿着过程中的传热及人体热反应情况。模型中人体热模型及心理热反应模型适用于分析人体局部冷却、瞬态变化的情况,因此能广泛地应用于多种穿戴式温度调节系统使用性能的模拟及分析。

(4) 通过人体-相变液冷服热舒适模型模拟给定形式的相变液冷服穿着工况下环境温度、穿着松紧程度、是否外穿保温层的不同取值对相变液冷服使用时间、人体皮肤温度及变化、人体局部及全身热感觉及热舒适度的影响,并将模拟结果与设计计算中的设定的使用性能进行比较以反思和改进相变液冷服的设计计算方法。模拟及比较结果表明,在所考虑的各使用参数取值范围内,穿着松紧度对相变液冷服使用时间及人体冷却部位的皮肤温度影响最大。人体通过调节相变液冷服穿着松紧度可以更大程度提高舒适性并适应多种穿着情况。由于人体的热感

觉及热舒适不仅取决于人体热平衡也取决于局部及全身的温度及相互间的差异,在相变液冷服及其他通过局部冷却为人体降温的穿戴式温度调节系统的设计中,所选取的冷却面积与冷却面积所承担冷负荷的皮肤面积之比 α 应有下限并尽可能增大比值 α 及冷却面积,以避免局部过冷并提高全身热舒适度。

(5) 对相变液冷服从蓄冷到穿着使用的全过程进行实验。实验与模拟结果对比分析表明,相变液冷服蓄冷传热模型、人体-相变液冷服热舒适模型中的人体热模型及相变液冷服传热模型较为准确,人体-相变液冷服热舒适模型中的心理热反应模型在预测相变液冷服穿着过程中人体心理参数方面存在一定误差。

(6) 实验测试数据及受试者对相变液冷服的评价及建议表明,此相变液冷服可以有效地在热环境下为人体降温。在固定穿着松紧度的情况下,降温效果处于稍强与中性之间,人体感受的热不均性处于稍不均匀与均匀之间,在穿着松紧度可调节的情况下,人体会具有更高的舒适性,因此是可以被接受的。并且在柔软性、重量等方面也均可被接受。同时,从实验结果获得了此套相变液冷服具体的优化措施。

6.2 局限性与展望

目前,关于人体局部冷却及通过局部冷却提高舒适性方面的研究仍处于初步探索阶段,因此采用局部冷却方式的穿戴式温度调节系统还比较缺乏对设计及研究的理论依据。并且,本课题中虽然已对此套穿戴式温度调节系统一相变液冷服进行设计及制作并通过模拟及实验研究了其各方面的使用性能及设计与使用参数对使用性能的影响,但本课题所涵盖的内容仅是相变液冷服的第一代设计与研究,此套新型穿戴式温度调节系统仍存在需要后续深入研究与优化的方面:

(1) 探索局部冷却与如何通过局部冷却提高热舒适的问题,细化并具体通过局部冷却提高热舒适的实现方法,例如冷却面积的大小,冷却面积上承担多少人体冷负荷、为承担设定的冷负荷所需要的冷却温度(例如相变液冷服的相变材料温度),为采用局部冷却方式的穿戴式温度调节系统的设计及研究提供理论依据。

(2) 根据本课题研究所获得的具体的优化措施,改进和完善此套穿戴式温度调节系统,提高除热效果、热舒适性、柔软性、重量等各方面的使用性能。

(3) 本课题研究了此套相变液冷服在蓄冷工况与穿着工况下相变液冷服的蓄冷及穿着性能,并且使用场所限于室内。由于此套相变液冷服采用冷水管埋敷在相变材料中的设计形式,可实现蓄冷与穿着同时进行,并且除热效果好、方便携带,因此后续应对此套相变液冷服在蓄冷穿着同时进行的工况及室外使用的工况进行研究。

致谢

在刚接到新型穿戴式温度调节系统的设计与研究这一课题时,我感觉到特别的新颖和有趣。因为在我看来,穿戴式温度调节系统跟进了时代的发展,是一个创新并且很具有实用意义的话题。但接踵而至的是由于自己缺乏设计方面的方法和逻辑以及目前对穿戴式温度调节系统研究不够成熟的背景所带来的重重困难。为了克服这些困难,在课题进行过程中,除了自己查阅资料,也询问了身边许多同学及老师的看法,得到许鹏教授、明岗教授及东华大学服装学院的李东平教授等多位老师的指点。在相变液冷服的制作及实验的准备及进行过程中,得到热心厂家及课题组同学的帮助,实验志愿者的认真配合。在此,我首先对在本课题中给予我指点的老师、热心帮助我的同学及厂家、积极参与并认真配合的志愿者们表示衷心的感谢。

其次,要再次感谢恩师许鹏教授。在我攻读硕士学位期间,在学术及学习方法上,许鹏教授给予了我许多指导与启发,使我受益匪浅。他敏锐的思维、渊博的知识、豁达的生活态度,深深地影响着我。在他的带领下,课题组营造了一种良好的学习与求知氛围。

还要感谢许鹏课题组的史建国老师、周燕老师、姬颖、李为林、侯金明、沙华晶、苑登阔、张量、陈璐、陈永保、扶洋洋、叶昀暘、焦飞飞、李梦西、鲁星、王慧龙、秦琪伟、冯帆、吴云涛、褚祎祎、杨志伟、顾洁帆、罗为等诸位师兄姐妹在生活和学习上给予我的关心和帮助。和大家在一起的时光是我硕士期间最珍贵和美好的回忆。

感谢我的好朋友们,在我迷茫与困顿的时候为我指点迷津,在我退缩气馁的时候给予鼓励和支持,在我悲伤烦恼的时候陪伴和安慰。

感谢我的家人,他们无时无刻不牵挂着我,百般呵护疼爱我。他们是我最大的动力、最坚强的依靠。唯有努力学习工作,回报父母对我的养育之恩。

最后,衷心感谢各位评审老师和专家对本论文的评阅,由于本人学识有限,文中不免有错误与不足之处,望各类前辈提出宝贵意见。

侯瑾

2017年3月于同济大学

参考文献

- [1] 雷丹妮. 服装对人体热舒适影响的实验研究[D].重庆大学,2012.
- [2] 庄梅玲,张晓枫. 电热服的热性能评价[J].青岛大学学报(工程技术版), 2004,19(2):54-58.
- [3] C. J. Brabec. Solar energy mater[J]. Solar Cells. 2004, 83: 273-276.
- [4] <http://www.tourmaster.com>.
- [5] <https://www.heatedwear.com>.
- [6] Motahareh Mokhtari Yazdi, Mohammad Sheikzadeh. Personal cooling garments: a review[J]. The Journal of The Textile Institute, 2014,105(12):1231-1250.
- [7] Mengmeng Zhao, Chuansi Gao, Faming Wang, Kalev Kuklane, Ingvar Holmér, Jun Li. 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.
- [8] Moshe Siman-Tov. Jerry Allen Crabtree[P]. US6295648 B2.
- [9] 刘静. 基于微/纳米风扇阵列驱动的人体降温空调服[P].中国实用专利,CN103478923A.
- [10] Albright, G. A., Kirby, M., Benjamin, F. B., Beck, A., Frankel, G. G.. Ventilation effectiveness of the Apollo Prototype Space Suit. Preprints, 35th Annual Meeting, Aerospace Medical Association (pp. 62-65).
- [11] McLellan, T. M.. The efficacy of an air-cooling vest to reduce thermal strain for Light Armour Vehicle personnel (Report No. DRDC-TORONTO-TR-2007-002). Defence R&D Canada, Toronto: Technical Report.
- [12] Waligora, J. S., & Michel, E. L.. Application of conductive cooling for working men in a thermally isolated environment[J]. Aerospace Medicine, 1968,39:485-467.
- [13] Timothy C. Ernst, Srinivas Garimella, Demonstration of a wearable cooling system for elevated ambient temperature duty personnel[J]. 2013, 317-324.
- [14] <http://www.veskimo.com/>.
- [15] 张行周. 冷夜服系统研究[D]. 北京工业大学,2006 .
- [16] 任萍. 可穿戴式人体热舒适系统技术的研究与应用[D]. 中国科学研究院,2009.
- [17] 张万欣,陈景山,李潭秋. 利用暖体假人对液冷服散热特性的实验研究分析[J]. 航天医学与医学工程. 2001,14(4):257-260.
- [18] Chevront, S. N., Kolka, M. A., Cadarette, B. S., Montain, S. J., Sawka, M. N. Efficacy of intermittent, regional microclimate cooling[J]. Journal of Applied Physiology, 2003,94:1841-1848.
- [19] Brian Doherty, 160 River Oaks Rd., Melbourne Beach,FL(US32951). COOL GARMENT[P]. US6185742 B1.
- [20] 关平,周翔,李俊,朱颖心. 医用相变降温服人体热舒适性实验研究[C]. 全国暖通空调制冷学术文集,2004.
- [21] Colvin, D. P., Bryant, Y. G.. Washington, DC: US Microclimate cooling garment[P]. US5415222.
- [22] Nelson, G. Microencapsulation in textile finishing. Review of Progress in Coloration[J], 2001,31:57-64.
- [23] Wendell Vaughn Ualene, Surrey, Canda, ENHANCED PERSONAL COOLING GARMENT[P]. US6134714.
- [24] Stephen T. Horn, R.R.2 Box 4800, White Stone, Va. 22578, BODY COOLING

APPARATUS[P]. US5438707.

- [25] 肖居霞. 智能微空调服设计原理的研究[M]. 西安工程大学,2004.
- [26] 黄建华. 国内外暖体假人的研究现状[J]. 建筑热能通空调,2006,25(6): 24-29.
- [27] 李利娜,钱晓明,范金土. 冷却服的冷却性能测试与分析[J]. 天津工业大学学报,2008,27(5): 47-54.
- [28] Richards, M. G. M., Psikuta, A., Fiala, D. Current development of thermal sweating manikins at Empa. In J.Fan (Ed.) Conference proceedings on thermal manikins and modelling (pp. 173-179). 2006,October 16–18, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- [29] Chevront, S. N., Kolka, M. A., Cadarette, B. S., Montain, S. J., Sawka, M. N. Efficacy of intermittent, regional microclimate cooling[J]. Journal of Applied Physiology,2003,94:1841-1848.
- [30] Bogerd, N., Psikuta, A., Daanen, H. A. M., Rossi, R. M.. How to measure thermal effects of personal cooling systems: Human, thermal manikin and human simulator study[J]. Physiology Measurement, 2010,31:1161-1168.
- [31] Gao, C., Kuklane, K., & Holmer, I. Thermoregulatory manikines are desirable for evaluation of intelligent clothing and smart textiles. Eighth international meeting for manikines and modeling,Victoria, BC, Canada, 2010c, August.
- [32] Psikuta, A., Richards, M., Fiala, D.. Single-sector thermophysiological human simulator[J]. Physiological Measurement,2008,29:181-192.
- [33] Farrington, R., Rugh, J., Bharathan, D., Burke, R.. Use of a thermal manikin to evaluate human thermoregulatory responses in transient, non-uniform, thermal environments[J]. SAE technical paper. Society of Automotive Engineers International, 2004,1: 2345-2347.
- [34] Psikuta, A.. Development of an ‘artificial human’ for clothing research[D]. De Montfort University, Leicester, UK.
- [35] 袁修十. 人体热调系统的数学模拟[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2005.
- [36] Naiping Gao, Jianlei Niu, Hui Zhang. Coupling CFD and Human Body Thermoregulation Model for the Assessment of Personalized Ventilation[J]. HVAC&R Research,2006,12(3):497-518.
- [37] ASHRAE.ANSI/ASHRAE 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.2004.
- [38] A.P. Gagge. Introduction to Thermal Comfort[M]. INSER,1997.
- [39] P. O. Fanger. Thermal Comfort[M]. Copenhagen: Danish Technical Press,1970.
- [40] H. Hensel. Thermoreception and Temperature Regulation[M]. London: Academic Press,1981
- [41] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [42] ISO. International Standard 7730. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva: International Standards Organization. 2005.
- [43] Yan zheng(Don)Guan, Byron W Jones, Mohammad H Hosni. Literature review of the advances in thermal comfort modeling[J]. ASHARE Transactions,2003,109(2):908-916.
- [44] 赵阳,端木琳,李祥立. 数值人体模型的建立方法及其研究发展综述[J]. 建筑热能通风空调,2010,29(1)
- [45] Gagge AP, Stolwijk JAJ, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. ASHRAE Transactions,1971,77(1):247-262.
- [46] J A J Stolwijk. Mathematical model of thermoregulation[J]. Physiological and Behavioral Temperature Regulation,1970,48:703-721.

- [47] J A J Stolwijk. A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man[R]. NASA,CR-1855;1971.
- [48] Dusan Fiala, Kevin J Lomas, Martin Stohrer. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system[J]. Appl Physiol,1999,87:1957-1972.
- [49] Dusan Fiala, Kevin J Lomas, Martin Stohrer. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions[J]. Int J Biometeorol,2001,45:143-159.
- [50] Charlie Huizenga,Zhang Hui,Edward Arens. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments[J]. Building and Environment. 2001,36:691-699.
- [51] 彦启森. 空气调节用制冷技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [52] 王怀光, 吴定海, 陈彦龙. 半导体制冷技术研究综述[J]. 四川兵工学报, 2012,33(11):132-134.
- [53] 韦汉涛. 吸附制冷技术的研究进展综述[J]. 赤子, 2012(12):163-163.
- [54] 鲍雨梅,张康达. 磁制冷技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [55] 谭羽非,吴家正,朱彤. 工程热力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [56] Khan, Mesbah G, Fartaj, Amir. A review on microchannel heat exchangers and potential applications[J]. International Journal of Energy Research, 2011, 35(7):553582.
- [57] 葛洋姜未汀微通道换热器的研究及应用现状化工进展 2016,0(S1):10-15.
- [58] 张寅平. 相变贮能理论和应用[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社,1996.
- [59] 章熙民. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2007.
- [60] 宋兰霞. 织物导热性能研究[D]. 北京服装学院,2005.
- [61] Werner J, Buse M . Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body, J . Appl . Physiol. 1988, 65(3):1110-1118.
- [62] Arkin H, Shitzer A. Model of thermoregulation in the human body. Part I and Part 2, EEC-148, ISSN0333-8048,1984.
- [63] Zheng Lou, WenJei Yang. Whole body heat balance during the human thoracic hyperthermia. Med & Biol Eng & Comput.,1990, 28:171-181.
- [64] Werner J, Buse M. Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body, J. Appl. Physiol., 1988, 65(3): 1110-1118.
- [65] Zhang, Hui, Huizenga, Charlie, Arens, Edward, Wang, Danni. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92(6):728-733.
- [66] Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part I: local sensation of individual body parts. Building and Environment. 2010,45:380-388.
- [67] Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: local comfort of individual body parts. Building Environ 2010,45:389-398.
- [68] Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: whole-body sensation and comfort. Building Environ 2010,45:399-410.
- [69] Yin Zhao, Hui Zhang, Edward A. Arens, Qianchuan Zhao. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. Building and Environment. 2014,72:300-308

附录 A

附录 A.1 相变材料技术参数

技术参数表



OP27E

产品简介:

鲁尔能源OPE产品是一种有机类相变材料，是利用物质在相态变化(多为固态和液态之间的转变)过程中温度基本保持不变，而可以吸收或释放大量的潜热来达到蓄冷或蓄热功能的一种新型储能材料。

产品优势:

- 储能容量高;
- 循环稳定性好;
- 无过冷及析出现象;
- 性质稳定、环境友好、使用寿命长。

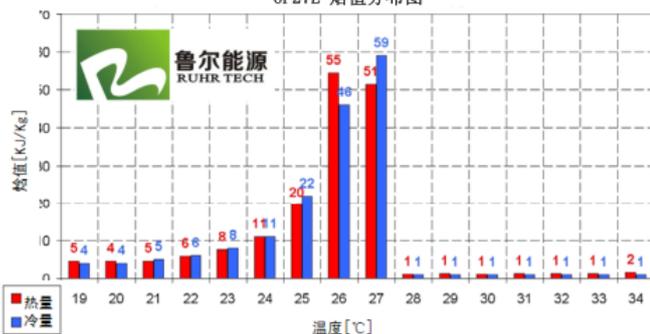


重要参数:

重要参数:	指标	
熔融范围	25-28	[°C]
	典型温度: 27	
凝固范围	28-25	[°C]
	典型温度: 27	
储热容量±7.5%	179	[kJ/kg]*
潜热与显热之和 (温度范围20至35°C)	50	[Wh/kg]*
比热容	2	[kJ/kg·K]
固态密度 (15°C)	0.88	[kg/l]
液态密度 (40°C)	0.76	[kg/l]
热传导率 (两相)	0.2	[W/(m·K)]
体积膨胀系数	12.5	[%]
闪点 (相变材料)	146	[°C]



OP27E 焓值分布图



* 采用三层量热仪测量

联系方式

杭州鲁尔能源科技有限公司
浙江省杭州市余杭区龙潭路16号4号楼2楼

电话: 0571-88607036

传真: 0571-88607030

邮箱: info@ruhrtech.com

网址: www.ruhrtech.com

技术参数表



RE25

产品简介:

鲁尔能源RE产品是一种无机类的相变材料, 是利用物质在相态变化(多为固态和液态之间的转变)过程中温度基本保持不变, 而可以吸收或释放大量的潜热的特性来达到蓄冷或蓄热功能的一种新型储能材料。

产品优势:

- 储能密度大;
- 热传导率高;
- 相变体积变化小;
- 无明显过冷现象。



重要参数:

重要参数:	指标	
熔融范围	24-26	[°C]
	典型温度: 25	
凝固范围	24-23	[°C]
	典型温度: 24	
储热容量±7.5%	190	[kJ/kg]*
潜热与显热之和 (温度范围17至32°C)	55	[Wh/kg]*
比热容	2	[kJ/kg·K]
固态密度 (15°C)	1.5	[kg/l]
液态密度 (30°C)	1.4	[kg/l]
体积膨胀系数	3-4	[%]
热传导率 (两相)	0.6	[W/(m·K)]
腐蚀性	对金属有腐蚀	



注意: 该产品吸水性强, 应密封保存。如储存不当可导致变质。



* 采用三层量热仪测量

联系方式
 杭州鲁尔能源科技有限公司
 浙江省杭州市余杭区龙潭路16号4号楼2楼
 电话: 0571-88607036
 传真: 0571-88607030
 邮箱: info@ruhrtech.com
 网址: www.ruhrtech.com

附录 A.2 心理热反应模型系数表

部位	额头	脸	呼吸	颈	上背	下背	胸	腹部	上臂	小臂	手	大腿	小腿	足	全身	
设定温度/°C	35.8	35.2	35.2	35.8	35.3	35.3	35.1	35.3	34.2	34.6	34.4	34.3	32.9	33.3	34.45	
C0	0	-2289	0	0	-4054	-5053	-2135	-5053	0	0	0	0	0	0	--	
C1	$t_{s,i} < t_{s,i,set}$	0.4	0.15	0.1	0.4	0.3	0.2	0.35	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.25	--
	$t_{s,i} \geq t_{s,i,set}$	1.3	0.7	0.6	1.25	0.7	0.4	0.6	0.4	0.4	0.7	0.45	0.3	0.4	0.25	--
K1	$t_{s,i} < t_{s,i,set}$	0.2	0.1	0.2	0.15	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.15	--
	$t_{s,i} \geq t_{s,i,set}$	0.2	0.1	0.2	0.15	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.15	--
C2	$dT_{skin,i}/dt < 0$	543	37	68	173	88	75	39	75	156	144	19	151	206	109	--
	$dT_{skin,i}/dt > 0$	90	105	741	217	192	137	136	137	167	125	46	263	212	162	--
C3	$S_0 < 0$	0.35	-0.11	0	0	-0.3	-0.23	-0.66	-0.59	0.3	-0.23	-0.8	0	-0.2	-0.91	--
	$S_0 > 0$	0.35	0.11	0.62	0	0	0	0.66	0	0.35	0.23	0.8	0	0.61	0.4	--
C6	2.17	2.02	1.95	1.96	2.05	2.2	2.1	2.06	2.14	2	1.98	1.98	2	2.13	--	
C7	$S_0 < 0$	0.28	0	0	0	0	0	1.39	0.5	0	0	0.48	0	1.67	0.5	--
	$S_0 > 0$	0.4	0.4	0.79	0	0	0	0.9	0	0	1.71	0.48	0	0	0.3	--
C8	0.5	0.41	1.1	-0.19	0	0	0	-0.51	-0.4	-0.68	0	0	0	0	--	
n	2	1.5	1.5	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1.5	2	--	
a	$\Delta S_{loc,i} \leq -2$	0.54	0.7	0.27	0.65	0.91	0.94	0.91	0.94	0.43	0.37	0.25	0.81	0.7	0.5	--
	$-2 < \Delta S_{loc,i} < 2$	0.5	0.37	0.51	0.46	0.46	0.32	0.57	0.32	0.28	0.38	0	0.3	0.29	0	--
	$\Delta S_{loc,i} \geq 2$	0.69	1.14	0.39	0.63	0.75	0.75	0.97	0.75	0.37	0.3	0.33	0.82	0.8	0.44	--
b	$\Delta S_{loc,i} \leq -2$	-1.1	-0.74	-1	-0.92	-0.92	-0.64	-1.14	-0.64	-0.56	-0.73	0	-0.6	-0.59	0	--
	$-2 < \Delta S_{loc,i} < 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
	$\Delta S_{loc,i} \geq 2$	1.1	0.74	1	0.92	0.92	0.64	1.14	0.64	0.56	0.73	0	0.6	0.59	0	--
c	$\Delta S_{loc,i} \leq -2$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	--
	$-2 < \Delta S_{loc,i} < 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
	$\Delta S_{loc,i} \geq 2$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	--

附录 A.3 30°C环境下头部血液对流换热量及皮肤对流与蒸发换热量的用户自定义函数

```

#include "udf.h"
#include "udf.h"
#include "sg_mphase.h"
real tset1=308.95, tset2=307.82, tset3=307.35, tset4=308.48, tset5=307.61, tset6=308.45, tc_set=310.21; /*皮肤层
及下丘脑调定点温度*/
real Ks1=0.15, Ks2=0.4, Ks3=0.17, Ks4=0.08, Ks5=0.13, Ks6=0.07; /*皮肤信号加权系数*/
real Kvd1 = 0.04, Kvd2=0, Kvd3=0.32, Kvd4=0.16, Kvd5=0.32, Kvd6=0.16; /*血管扩张加权系数*/
real Kvc1 = 0.06, Kvc2=0.12, Kvc3=0.19, Kvc4=0.16, Kvc5=0.31, Kvc6=0.16; /*血管收缩加权系数*/
real Kes1=0.24, Kes2=0.65, Kes3=0.03, Kes4=0.02, Kes5=0.04, Kes6=0.02; /*出汗加权系数*/
real Bbs1 = 2.2417, Bbs2=0.3012, Bbs3=0.8014, Bbs4=2.8369, Bbs5=0.5896, Bbs6=1.8390; /*皮肤层基础流量
*/
real Ss1 = 0.1305, Ss2=0.5373, Ss3=0.1173, Ss4=0.0448, Ss5=0.3372, Ss6=0.0626; /*皮肤层表面积*/
real fs1, fs2, fs3, fs4, fs5, fs6, S, fc; /*各部位皮肤信号、下丘脑信号、皮肤信号*/
real Mvd, Mvc, Mes; /*血管扩张指令、血管收缩指令、出汗指令*/
real Cb = 3850;
DEFINE_ADJUST(store_m1, domain)
{
    real Fvd, Fvc, Fes;
    Thread *t;
    cell_t c;
    int curr_ts = N_TIME;
    domain = Get_Domain(1);
    /*求解血管扩张指令、血管收缩指令、出汗指令*/
    thread_loop_c(t, domain)
    {
        begin_c_loop(c, t)
        {
            if (curr_ts > 1)
            {
                Fvd = 4.8*S + 10.8*fc;
                Fvc = -10.8*S - 3.8*fc;
                Fes = 53.7*S + 472 * fc;
            }
            else
            {
                Fvd = 0;
                Fvc = 0;
                Fes = 0;
            }

            if (Fvd >= 0)
            {
                Mvd = Fvd;
            }
        }
    }
}

```

```
    }
    else
    {
        Mvd = 0;
    }
    if (Fvc >= 0)
    {
        Mvc = Fvc;
    }
    else
    {
        Mvc = 0;
    }
    if (Fes > 0)
    {
        Mes = Fes;
    }
    else
    {
        Mes = 0;
    }
}
end_c_loop(c, t)
}
}
DEFINE_INIT(my_init_func, d)
{
    cell_t c;
    Thread *t;
    real xc[ND_ND];
    thread_loop_c(t, d)
    {
        begin_c_loop_all(c, t)
        {
            C_UDMI(c, t, 0) = 0.;
            C_UDMI(c, t, 1) = 310.15;
        }
        end_c_loop_all(c, t)
    }
}
DEFINE_EXECUTE_AT_END(execute_at_end)
{
    Domain *d;
```

```

Thread *t_head, *t_trunk, *t_arm, *t_hand, *t_leg, *t_foot, *t_headcore;
real Ri1, Ri2, Ri3, Ri4, Ri5, Ri6, delT = 1;
real sum_head = 0., sum_head1 = 0., volume_head = 0., temp_head, temp_head1, DTDt_head;
real sum_trunk = 0., sum_trunk1 = 0., volume_trunk = 0., temp_trunk, temp_trunk1, DTDt_trunk;
real sum_arm = 0., sum_arm1 = 0., volume_arm = 0., temp_arm, temp_arm1, DTDt_arm;
real sum_hand = 0., sum_hand1 = 0., volume_hand = 0., real temp_hand, temp_hand1, DTDt_hand;
real sum_leg = 0., sum_leg1 = 0., volume_leg = 0., temp_leg, temp_leg1, DTDt_leg;
real sum_foot = 0., sum_foot1 = 0., volume_foot = 0., temp_foot, temp_foot1, DTDt_foot;
real sum_headcore = 0., volume_headcore = 0., real temp_headcore;
cell_t c;
d = Get_Domain(1);
t_head = Lookup_Thread(d, 29);
t_trunk = Lookup_Thread(d, 25);
t_arm = Lookup_Thread(d, 33);
t_hand = Lookup_Thread(d, 37);
t_leg = Lookup_Thread(d, 41);
t_foot = Lookup_Thread(d, 45);
t_headcore = Lookup_Thread(d, 31);
/*求解头部皮肤层信号fs1*/
begin_c_loop(c, t_head)
{
    C_UDMI(c, t_head, 0) = C_T(c, t_head);
    sum_head += C_T(c, t_head)*C_VOLUME(c, t_head);
    sum_head1 += C_UDMI(c, t_head, 1)*C_VOLUME(c, t_head);
    volume_head += C_VOLUME(c, t_head);
    C_UDMI(c, t_head, 1) = C_UDMI(c, t_head, 0);
}
end_c_loop(c, t_head)
temp_head = sum_head / volume_head;
temp_head1 = sum_head1 / volume_head;
DTDt_head = (temp_head - temp_head1) / delT;
if (DTDt_head >= 0)
{
    Ri1 = 0;
}
else
{
    Ri1 = 10;
}
fs1 = temp_head - tset1 + Ri1*DTDt_head;
/*求解躯干部位皮肤层信号fs2*/
begin_c_loop(c, t_trunk)
{
    C_UDMI(c, t_trunk, 0) = C_T(c, t_trunk);

```

```

sum_trunk += C_T(c, t_trunk)*C_VOLUME(c, t_trunk);
sum_trunk1 += C_UDMI(c, t_trunk, 1)*C_VOLUME(c, t_trunk);
volume_trunk += C_VOLUME(c, t_trunk);
C_UDMI(c, t_trunk, 1) = C_UDMI(c, t_trunk, 0);
}
end_c_loop(c, t_trunk)
temp_trunk = sum_trunk / volume_trunk;
temp_trunk1 = sum_trunk1 / volume_trunk;
DTDt_trunk = (temp_trunk - temp_trunk1) / delt;
if (DTDt_trunk >= 0)
{
    Ri2 = 0;
}
else
{
    Ri2 = 10;
}
fs2 = temp_trunk - tset2 + Ri2*DTDt_trunk;
/*求解臂部皮肤层信号fs3*/
begin_c_loop(c, t_arm)
{
    C_UDMI(c, t_arm, 0) = C_T(c, t_arm);
    sum_arm += C_T(c, t_arm)*C_VOLUME(c, t_arm);
    sum_arm1 += C_UDMI(c, t_arm, 1)*C_VOLUME(c, t_arm);
    volume_arm += C_VOLUME(c, t_arm);
    C_UDMI(c, t_arm, 1) = C_UDMI(c, t_arm, 0);
}
end_c_loop(c, t_arm)
temp_arm = sum_arm / volume_arm;
temp_arm1 = sum_arm1 / volume_arm;
DTDt_arm = (temp_arm - temp_arm1) / delt;
if (DTDt_arm >= 0)
{
    Ri3 = 0;
}
else
{
    Ri3 = 10;
}
fs3 = temp_arm - tset3 + Ri3*DTDt_arm;
/*求解手部皮肤层信号fs4*/
begin_c_loop(c, t_hand)
{
    C_UDMI(c, t_hand, 0) = C_T(c, t_hand);

```

```

sum_hand += C_T(c, t_hand)*C_VOLUME(c, t_hand);
sum_hand1 += C_UDMI(c, t_hand, 1)*C_VOLUME(c, t_hand);
volume_hand += C_VOLUME(c, t_hand);
C_UDMI(c, t_hand, 1) = C_UDMI(c, t_hand, 0);
}
end_c_loop(c, t_hand)
temp_hand = sum_hand / volume_hand;
temp_hand1 = sum_hand1 / volume_hand;
DTDt_hand = (temp_hand - temp_hand1) / delt;
if (DTDt_hand >= 0)
{
    Ri4 = 0;
}
else
{
    Ri4 = 10;
}
fs4 = temp_hand - tset4 + Ri4*DTDt_hand;
/*求解腿部皮肤层信号fs5*/
begin_c_loop(c, t_leg)
{
    C_UDMI(c, t_leg, 0) = C_T(c, t_leg);
    sum_leg += C_T(c, t_leg)*C_VOLUME(c, t_leg);
    sum_leg1 += C_UDMI(c, t_leg, 1)*C_VOLUME(c, t_leg);
    volume_leg += C_VOLUME(c, t_leg);
    C_UDMI(c, t_leg, 1) = C_UDMI(c, t_leg, 0);
}
end_c_loop(c, t_leg)
temp_leg = sum_leg / volume_leg;
temp_leg1 = sum_leg1 / volume_leg;
DTDt_leg = (temp_leg - temp_leg1) / delt;
if (DTDt_leg >= 0)
{
    Ri5 = 0;
}
else
{
    Ri5 = 10;
}
fs5 = temp_leg - tset5 + Ri5*DTDt_leg;
/*求解足部皮肤层信号fs6*/
begin_c_loop(c, t_foot)
{
    C_UDMI(c, t_foot, 0) = C_T(c, t_foot);

```

```

        sum_foot += C_T(c, t_foot)*C_VOLUME(c, t_foot);
        sum_foot1 += C_UDMI(c, t_foot, 1)*C_VOLUME(c, t_foot);
        volume_foot += C_VOLUME(c, t_foot);
        C_UDMI(c, t_foot, 1) = C_UDMI(c, t_foot, 0);
    }
end_c_loop(c, t_foot)
    temp_foot = sum_foot / volume_foot;
temp_foot1 = sum_foot1 / volume_foot;
DTDt_foot = (temp_foot - temp_foot1) / delt;
if (DTDt_foot >= 0)
{
    Ri6 = 0;
}
else
{
    Ri6 = 10;
}
fs6 = temp_foot - tset6 + Ri6*DTDt_foot;
/*求解皮肤信号S*/
S = Ks1*fs1 + Ks2*fs2 + Ks3*fs3 + Ks4*fs4 + Ks5*fs5 + Ks6*fs6;
/*求解下丘脑信号fc*/
begin_c_loop(c, t_headcore)
{
    sum_headcore += C_T(c, t_headcore)*C_VOLUME(c, t_headcore);
    volume_headcore += C_VOLUME(c, t_headcore);
}
end_c_loop(c, t_headcore)
temp_headcore = sum_headcore / volume_headcore;
fc = temp_headcore - tc_set;
fflush(stdout);
}
/*头部各组织层血液对流换热热量qb*/
DEFINE_SOURCE(head_skin, c, t, dS, eqn) /*头部皮肤层血液对流换热热量*/
{
    real Bis, qb;
    real source;
    Bis = Bbs1*(1 + Kvd1*Mvd) / (1 + Kvc1*Mvc);
    qb = Bis*Cb*(310.15 - C_T(c, t));
    source = qb;
    C_UDMI(c, t, 7) = Bis;
    C_UDMI(c, t, 8) = source;
    dS[eqn] = 0;
    return source;
}

```

```

}
DEFINE_SOURCE(head_fat, c, t, dS, eqn) /*头部脂肪层血液对流换热热量*/
{
    real source;
    source = 0.0307*Cb*(310.15 - C_T(c, t));
    dS[eqn] = 0;
    return source;
}
DEFINE_SOURCE(head_muscle, c, t, dS, eqn) /*头部肌肉层血液对流换热热量*/
{
    real source;
    source = 0.0909*Cb*(310.15 - C_T(c, t));
    dS[eqn] = 0;
    return source;
}
DEFINE_SOURCE(head_core, c, t, dS, eqn) /*头部核心层血液对流换热热量*/
{
    real source;
    source = 4.7471*Cb*(310.15 - C_T(c, t));
    dS[eqn] = 0;
    return source;
}
/*求解头部皮肤层对流及蒸发换热热量*/
DEFINE_PROFILE(head_evaporate, t, i)
{
    real Qes, Qes1, A;
    face_t f;
    Qes = Kes1*Mes;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        A = 13.537*Ss1*(F_T(f, t) - 307.15);
        if (Qes>0 && Qes>A)
        {
            Qes1 = A;
        }
        else
        {
            Qes1 = Qes;
        }
        F_PROFILE(f, t, i) = -Qes1 / Ss1 - 4.336*(F_T(f, t) - 307.15);
    }
    end_f_loop(f, t)
}

```

附录 A.4 调查问卷

尊敬的受试人员：

您好，非常感谢您参与人体-相变液冷服传热及热舒适性研究实验！

本实验中，受试人员在可控的实验环境下身穿相变液冷服，并根据调查问卷对该系统进行热感觉和热舒适的评价。于此同时，实验人员将通过温度探头测试与采集受试者多个部位的皮肤温度及相变液冷服中相变材料温度。本实验结果将验证人体-相变液冷服模型的准确性及实验中所使用的相变液冷服实体的可行性。

本实验采用自愿参加的原则选取受试者。实验中实验环境接近于夏季室内的日常生活环境，相变液冷服在实验环境的基础上为人体提高舒适性，实验仪器均为常规仪器，因此本实验不会对人体产生不良影响。并且我们保证实验结果不作為他用。

为确保实验的顺利进行，这里列出了实验前和实验中的一些注意事项，请您认真阅读并与实验工作人员积极配合：

- 1, 为了保证您的身体健康，您需要在身体状况良好且无疾病的情况下接受实验。
- 2, 实验前一天具有良好的作息规律，且避免情绪波动，避免饮酒。
- 3, 实验前避免空腹，实验中应保持放松的心态。
- 4, 实验中积极配合实验工作人员，对有疑问的地方及时向实验工作人员进行咨询。

欢迎您对我们的实验提出宝贵意见！

同济大学机械与能源工程学院 许鹏教授课题组

若您对以上内容已充分了解并无异议，请您在此签字 曹哲，并在以下提供您的基本信息。

性别： 男 年龄： 23

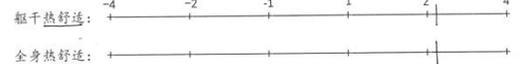
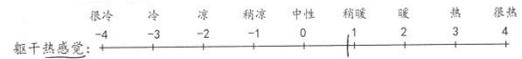
身高： 181cm 体重： 75kg 最近身体状况： 健康

日期： 11月15日 测试时间： 15:18 受试者： _____ 实验工作人员： _____

填写方式：根据感受在标尺上画线。

实验前 5 分钟

起始时间： ___min___s

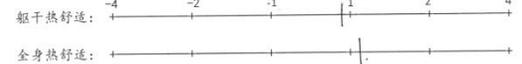
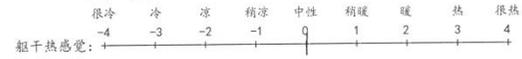


是否出汗与出汗程度： 手心出汗

结束时间： ___min___s

第 1 分钟

起始时间： ___min___s



是否出汗与出汗程度： 手心出汗

结束时间： ___min___s

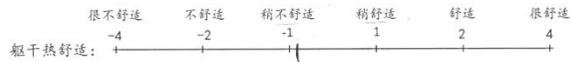
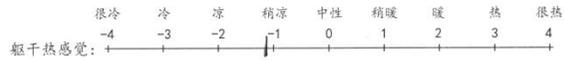
第 3 分钟

起始时间： ___min___s

结束时间: __min__s

第 30 分钟

起始时间: __min__s



结束时间: __min__s

第 40 分钟

起始时间: __min__s



是否出汗与出汗程度: 无汗, 胳膊上可感觉出凉意

结束时间: __min__s

第 50 分钟

起始时间: __min__s

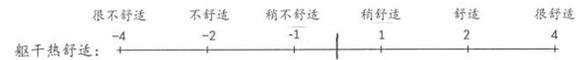
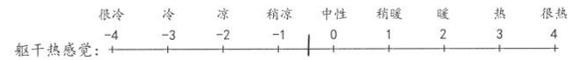


是否出汗与出汗程度: 与上次记录相同

结束时间: __min__s

第 70 分钟

起始时间: __min__s

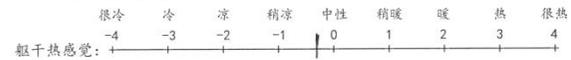


是否出汗与出汗程度: 无出汗现象

结束时间: __min__s

第 90 分钟

起始时间: __min__s



个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

侯瑾, 女, 1990年9月生。

2014年7月毕业于武汉科技大学 建筑环境与设备工程(暖通空调)专业, 获学士学位。

2014年9月入同济大学动力工程, 供热、供燃气、通风及空调工程方向, 读硕士研究生。

已发表论文:

[1] 侯瑾, 许鹏, 鲁星, 曲炜, 牛彦涛. 既有区域能源系统扩展规划与减碳实例分析[J]. 建筑节能, 2017, 45(1): 35-39.

[2] Peng Xu, Xing Lu, Huilong Wang, Tao Yang, **Jin Hou**. Cooling Potential and Applications Prospects of Passive Radiative Cooling in Buildings: The Current State-of-the-Art Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2016, 65: 1079-1097.

参与研究的项目:

[1] Optimum Design of HVAC Water System Configurations in High-rise.

[2] 佛山奇槎区区域能源规划.

专利

[1] 许鹏, 姬颖, 侯瑾, 鲁星, 王慧龙. 一种公共建筑空调系统末端设备电耗间接计量系统发明专利. 中国专利, 2015032400576920.

待发表论文:

[1] Implementation of expansion planning in existing district energy system: A case study in China.