

基于需求计算的相变低温防护服热需求分析

中文摘要

在低温工作环境中，如果缺乏适当保暖条件，会引起人体冻伤，甚至引起死亡。本文在考虑了人体热需求、服装导热、人体与环境的热交换之间的关系的基础上，提出了低温环境中，相变防护服的防护时间与相变材料的含量、低温环境的温度三者之间的计算关系，用于预测低温工作环境中相变防护服的防护时间、相变材料用量之间的关系，为低温防护服的需求设计提供依据。在计算公式的基础上进行了实验验证。验证实验表明，理论计算结果与实验测试结果有良好的一致性。

首先，分析了低温环境下人体的反应以及低温对人体的影响，选择相变温度为 25℃ 和 30℃ 的石蜡相变材料作为研究对象，对相变材料采用宏观材料包封装，并设计了低温相变防护服的款式，其结构为躯干部位分布相变材料的背心式防护服，立领、肩部分割、侧缝处不添加 PCM、拉链式闭合，PCM 层进行分布间隙量为 6mm 等。

然后，分析了低温环境中相变防护服的热需求，根据热量平衡方程以及服装系统的热量传递建立了着装人体系统有内热源时的热量平衡方程，并对热量平衡方程中各项影响因子进行分析，确定了各个参数的取值方法，得到背心式相变防护服在低温环境中热缓冲作用时间的计算公式。

其次，根据计算公式的条件，设定合适的参数值，将各个参数值代入公式中计算得出在不同条件下的相变防护服的防护时间计算值，计算数值共 16 组。

最后，根据计算选择的参数，设定相同的参数值，设计实验。实验分为真人实验和暖体假人实验，真人测试实验共有 16 组，暖体假人测试实验有一组。测试低温环境中，相变防护服的防护时间，同时测试了皮肤温度，微气候温度，口腔温度以及人体主观热感觉。通过实验数值与计算数值比较，理论计算结果与实验测试结果有很好的一致性，低温环境下，人体处于站立静止或轻微活动，无风无太阳辐射作用时，背心式相变防护服的防护时间的计算公式适用。

关键词：人体热需求 服装导热 热交换 相变材料 防护时间

作者：李晓霞

指导老师：孙玉钗

Thermal Requirement Analysis of Phase Change Protective Clothing in Low Temperature Environment

Abstract

In low temperature environment, the lack of a proper thermal protection can cause human body frostbite or even cause death. In this paper, the computational method of theoretical relationship between the phase change materials content in protective clothing, protective time and the working environment temperature was proposed when took into account the comfort requirement of human bodies, clothing thermal properties and heat loss through clothing system. This theoretical model could be used to predict the relationship between the protective material content and the protection time of phase change protective clothing. Experimental results showed good accordance with the theoretical prediction.

First, the reaction of the human body and the influence of low temperature environment on the human body were analyzed in the low temperature environment. The paraffin phase change materials were selected as the research object. Phase transition temperature is 25 °C and 30 °C. The encapsulation method of phase change materials is macroscopic packaging. Phase change protective clothing style was zippered vest and designed with stand collar, and not added the PCM in the side seam. The distribution interval of PCM packaging is 6 mm.

Then, thermal requirement of phase change protective clothing in low temperature environment was analyzed and clothing system heat balance equation with positive heat source was established according to the heat balance equation and heat transfer. The calculation formula of protection time of vest phase change protective clothing was established in low temperature environment by analyzing the various influence factors of the heat balance equation and the value of each parameter method.

After that, suitable parameter values were selected according to the conditions calculation formula. Parameter values were put into calculation formula and the protection time was obtained in different conditions. The total number is 16 groups.

Finally, the experiment was designed by selecting the same parameter values

according to calculation. The experiment was divided into reality body experiment with 16 groups and a group of thermal manikin experiment. The phase change protective clothing protection time, the skin temperature, the micro climate temperature were also tested as well as human subjective thermal feeling. Experimental results showed good accordance with the theoretical prediction, through comparing with the calculated value. The protective time calculation formula of the vest phase change protective clothing is applicable when the human is standing statically or light activity in low temperature environment with no wind and no sun radiation.

Key words: thermal requirement clothing thermal properties heat loss phase change materials protective time

Written by: Li Xiaoxia

Supervised by: Sun Yuchai

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究状态	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	4
1.3 课题研究的背景	5
1.3.1 低温环境	5
1.3.2 低温环境对人体的伤害	6
1.4 研究的意义	9
1.5 本课题研究的主要内容	10
第二章 低温相变防护服设计	11
2.1 相变防护服工作原理	11
2.1.1 相变原理	11
2.1.2 低温相变防护服调温机理	11
2.2 相变材料的选择	12
2.2.1 相变材料的分类	12
2.2.2 服用相变材料的选择原理	13
2.2.3 石蜡类相变材料特性	13
2.2.4 PCM 相变温度的选择	14
2.2.5 实验验证可用相变温度	16
2.3 低温相变防护服设计	17
2.3.1 相变材料的加工方法	17
2.3.2 相变材料的封装	18
2.3.3 相变防护服的款式	18
2.4 本章小结	21
第三章 低温相变防护服热需求分析计算	22

3.1 低温环境下人体反应.....	22
3.1.1 低温环境中人体新陈代谢.....	22
3.1.2 低温环境中人体体温调节.....	23
3.1.3 低温环境中人体散热.....	24
3.2 低温相变防护服缓冲时间计算公式.....	25
3.2.1 服装系统的热量传递.....	25
3.2.2 基本条件假设.....	27
3.2.3 热平衡方程.....	27
3.3 参数的确定.....	29
3.3.1 人体产热量.....	29
3.3.2 系统与环境的对流热交换.....	33
3.3.3 系统与外界环境的辐射换热.....	35
3.3.4 系统与环境的呼吸热损失.....	37
3.3.5 相变潜热.....	37
3.4 理论计算公式的建立.....	39
3.5 本章小结.....	40
第四章 防护时间的理论预测.....	41
4.1 参数确定.....	41
4.1.1 环境温度.....	41
4.1.2 人体表面积.....	41
4.1.3 人体-相变防护服系统最外层表面温度.....	42
4.1.4 相变潜热.....	42
4.2 理论计算.....	43
4.2.1 计算过程.....	44
4.2.2 计算结果.....	46
4.4 本章小结.....	46
第五章 相变低温防护服热需求计算实验验证.....	47
5.1 真人实验设计.....	47
5.1.1 实验方案.....	47

5.1.2 受试者.....	48
5.1.3 实验仪器.....	48
5.1.4 相变防护服.....	49
5.1.5 主客观评价.....	50
5.1.6 服装层间配置.....	51
5.1.7 测试点位置.....	52
5.2 实验过程.....	52
5.3 实验结果与分析.....	53
5.3.1 不同种类相变防护服的实验测试结果.....	53
5.3.2 主观热感觉.....	61
5.3.3 口腔温度温度变化.....	62
5.4 实验结果与计算结果比较.....	63
5.5 暖体假人实验.....	64
5.5.1 实验步骤.....	65
5.5.2 实验结果.....	65
5.5.3 实验结果与计算结果比较.....	66
5.6 本章小结.....	67
第六章 结 论	68
参考文献	70
攻读硕士学位期间发表的论文	75
致 谢	76

第一章 绪 论

1.1 引言

进入 20 世纪 90 年代以后, 纺织服装行业的竞争越来越激烈, 服装的功能不再仅仅是为了我们日常生活中遮体、御寒, 服装成为美观装饰的必要组成部分。随着我国经济和科学技术的快速发展, 人们的生活水平不断提高, 一些特殊行业对纺织品的要求也越来越高, 具有简单保温和传统御寒功能的纺织服装已不能满足不同消费者的需求。加之科技的飞跃和经济的迅速发展带动了纺织服装行业的发展, 并为其注入了新的元素, 具有舒适性和功能性的纺织品应运而生。功能化、智能化的服装越来越多的进入了人们的生活, 其种类逐渐增多, 应用领域也越来越广泛, 图 1.1 为服装发展趋势图。服装的舒适性和功能性已逐渐成为现代消费者对服装产品关注的焦点, 也是企业为了提升市场竞争力, 推动企业发展, 寻求产品突破创新的重要方向和途径。越来越多研究人员开始从事相变调温功能纺织品的研究, 从而提高人体在特殊环境的适应能力, 满足人们对功能性纺织品的需求。

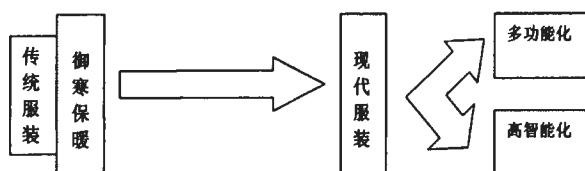


图 1.1 服装发展趋势图^[1]

热量一般为显热和潜热^[2], 显热是物体在加热或冷却过程中, 温度升高或降低而不改变其原有相态所吸收或放出的热量; 潜热是物质发生变化, 而温度不变时吸收或释放的热量。相变潜热主要利用材料相变时能够吸收或者释放热量来存储或者释放能量。相变材料 (PCM—Phase Change Material), 在一定的相变温度范围内, 可以随外界环境温度变化来改变自身形态 (气、液、固相), 而自身温度却保持不变, 在不同的相之间变化的过程中会伴随着能量的吸收或释放^[3]。相变材料的形态由一种态变为另一种态的过程称为相变过程, 如图 1.2 为固—液相变材料相变过程示意图, 相变储热或者放热过程, 材料的温度基本保持不变, 可以用来控制体系温度。

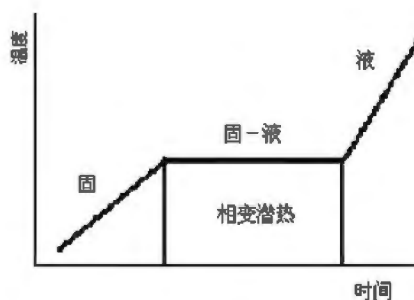


图 1.2 固-液相变材料相变过程

随着人类涉足领域的不断扩展,恶劣的外界气候环境以及各种极端工作或其它条件下使得人们难以通过普通的服装来抵御环境温度不适宜而对人体带来的伤害。人类需要提高服装的性能来抵于外界恶劣环境对人体的影响。目前,提高服装保暖性的途径基本有两种:消极阻热式保暖和积极产热式保暖^[4]。消极阻热式保暖是通过控制静止空气层的含量,提高服装系统的绝热性,阻止人体热量向外散失,从而达到保暖目的;积极产热式保暖是通过外加产热系统或者使用产热纤维材料,对人体主动加热以达到保暖的效果^[5]。

消极式保暖的方法:通过采用增大人体-服装-环境系统导热热阻、对流换热热阻、辐射换热热阻来减少人体散热量,以阻止身体产生的热量快速散掉而实现保温。主要方式有:一是降低热传导,如增加服装层间的空气孔隙,利用静止空气层热阻高的特性,采用含静止空气数量多的中空纤维、羽绒、皮毛以及各种絮等作为服装材料;二是防风织物,如超细纤维高密织物、层压物等;三是远红外反射或远红外辐射,如在织物的表面度铝膜、使用陶瓷粉等。

积极式保暖方法目前的开发途径主要有:一是采用电能—热能转化,通过消耗电能来产生热量,如发热金属丝、电热织物等。这种保暖方式需要有稳定的电源,而电池存在低温下放电反应缓慢、电池重量重、供电时间短等缺点,极大限制了这种保暖服的使用^[6];二是化学能—热能转化,如利用铁粉在空气中氧化放热。热能转化过程比较复杂且使用不方便,不可重复使用^[7];三是太阳能—热能转化,如利用陶瓷的自身特性,需要在自然光、白炽灯以及红外线等的照射下进行转化^[8],具有局限性;四是吸湿放热纤维,将人体的汗气转变为液体时产生热量从而用于保暖,多用于贴身衣物,如内衣,袜子等;五是利用相变材料,将相变材料整理到织物上,利用相变材料的潜热蓄热保暖。

相比之下,相变材料的潜热蓄热是利用材料在相变时吸收或者释放的热量来存储

或释放能量,相变材料潜热高(例如, LiH 的相变潜热可达 $2840\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), 导热率大, 在相变储能过程中材料的温度基本保持不变, 具有可智能化控制温度, 产热量基本不受环境条件影响, 可以多次重复使用, 所用装置简单, 体积小, 质量轻, 设计灵活, 使用方便且易于管理等。

自从二十世纪七十年代末, 美国国家航天航空局空间研究所成功的将相变材应用于纺织品中, 制成了具有调温功能的服装, 保护宇航员和设备不受太空低温的影响后, 相变材料的立刻受到了全世界的瞩目, 越来越多的国家开始研究这种应用相变材料的服装。作为积极式保暖的相变防护服, 就是为了使人体能够适应恶劣的低温环境温度、低温作业或者在工艺上要求低温的环境而研制的, 是解决特殊场合下的保暖问题的有效途径。

1.2 国内外研究状态

20 世纪 80 年代中期, 美国实施了自由号空间站计划, 该计划极大地推动了相变材料的发展。相变储热理论及应用技术研究在欧美发达国家(加拿大、美国、日本、英国、德国等)迅速崛起并不断发展。相变材料在电力调峰、太阳能利用、建筑节能以及日常生活等领域具有非常广阔的应用前景^[9-11]。相变材料在纺织服装领域的应用, 尤其是在智能纺织品、调温纺织品以及防护服方面的应用变得越来越广泛, 越来越多的学者开始研究相变纺织品, 对这方面的研究也越来越深入。

1.2.1 国外研究现状

20 世纪 70 年代末到 80 年代初, 美国国家航空和航天管理局(NASA) 应用微胶囊技术将 PCM 包装于微胶囊中, 并施加于纤维或纺织品中, 制成了具有良好温度调节功能的航天服^[12]。

到了 80 年代, Vigo 等人将无机水合盐添加在中空纤维的内部, 从而得到了相变调温纤维^[13], 但是这种纤维调温效果的耐久性比较差, 经过多次使用后, 调温效果很快减弱甚至消失。

20 世纪九十年代, Nuckols 建立了一种相变潜水服分析模型^[14], 该模型是在干燥状态下在潜水服中添加相变材料微胶囊, 通过分析着装人体各个节点的热量传递来构建方程。该模型研究了相变潜水服在深海冷水中热防护效果, 并与商业潜水服的性能

进行比较,同时讨论了相变材料微胶囊的最优质量和热量存储百分比,为相变潜水服的重量和厚度设计提供了依据。

2004 年, Ghalil K^[15]对含有相变微胶囊的织物进行了数值研究。实验研究了运动人体遭受温度突变(从温暖环境进入低温环境)过程时相变微胶囊整理的织物对人体瞬态热损失的影响。实验结果表明,进入低温环境后相变材料的热效应持续时间将近 12.5 分钟,当温度突变时,PCM 织物可以缓冲低温对人体的影响,减少人体热损失。实验同时证明了在稳定平衡的环境中,处于动态的 PCM 织物对于热阻无影响。

Pause^[16]通过实验系统的测试研究了相变微胶囊整理的织物性能,从而提出了相变蓄热调温织物具有基础和动态保温特性的理论。在 EMPA 测试实验的对比实验中,得出含有相变微胶囊的织物具有良好的调温功能。通过寒冬行走测试实验,得出穿着含有相变微胶囊物质制成的服装的测试者,在经过 127 分钟后,“微气候”温度降到了 26℃,相对于穿消极式保温材料制成的服装,温度降低的时间延迟了 73 分钟。时间延迟的多少主要取决于服装中 PCM 微胶囊的含量,含有 PCM 微胶囊服装的动态热平衡过程对人体提供积极式的保温效果,使人体维持在一个舒适温度范围的微气候。

SarierN^[17]研究了基于原位聚合生产工艺的相变微胶囊方法,并对含有 PCM 织物进行了实验测试。在模拟某些寒冷的环境条件和人体活动情况实验中,当环境温度为 -2℃时,含有一定质量的相变微胶囊的织物可维持人体舒适的时间约为 1.5 小时。

2013 年, Hwasook Yoo^[18]通过实验研究了相变服装在低温和高温条件下,相变材料的含量以及相变材料层的配置对相变服装调温效果的影响。实验中服装的配置为四层,通过测试“微气候”的温度变化来说明相变材料的作用。实验表明,相变服装中相变材料的含量越多时,其冷热防护的作用越明显;在高温中相变材料层置于服装最外层时,其防护作用越明显。

1.2.2 国内研究现状

2004 年, Li 和 Zhu 在其前期模型^[19]基础上又发展了一个新的数学模型,新的数学模型开始考虑到了吸湿性织物,考虑了织物中热湿传输和相变材料微胶囊的热调节耦合影响,讨论了相变材料的含量对织物中热湿传递的影响,在模型中,相变过程考虑为一个移动边界问题,并把相变温度考虑成一个点^[20]。

随后,张海峰等人对相变微胶囊的蓄热放热特性进行了分析研究^[21]。

张东等人在 2006 年提出了相变储能材料在相变过程是的温度模型^[22]。

Li Fengzhi^[23-27]等进一步发展了含相变微胶囊织物的动态热湿耦合模型, 考虑了织物中的相变材料含量对织物物理参数的影响, 以及相变微胶囊发生相变时对里面热传递的影响。研究了含有相变微胶囊织物的热湿传递特性, 使用等效热容法对相变微胶囊的相变过程进行了模拟, 并用控制体积法对方程进行了离散求解, 进一步研究了不同种相变微胶囊的体积分数含量对含相变微胶囊织物中的热湿传递的影响。

2011 年, 朱方龙根据多层热防护服装的传热特性, 构建了含相变材料层的热防护服装系统模型^[28], 以皮肤温度为参考, 讨论了含有相变层的热调节防护服在火灾环境下, 相变材料的熔点对服装热防护性能的影响程度, 并比较了在不同热流环境下, 相变材料层在服装层中的配置与防护人体皮肤烧伤性能的定性关系。

2012 年, 王云仪等人通过实验模拟高温强辐射炼钢工人作业^[29], 研究相变背心的热防护功能。实验证明, 在高温强辐射条件下, 穿着相变降温背心能减小假人躯干部位的皮肤温度, 减轻热应激, 延长高温作业时间。

孙浩等人, 根据相变材料的吸热和放热特点, 建立了相变材料的一维传热理论模型^[30-31], 通过该模型成功模拟了室内条件下相变材料放热时表面温度的变化。

朱云飞采用控制体积法, 联合含相变微胶囊的织物热湿耦合模型和改进的 25 节点人体热调节模型, 建立了人体—含相变微胶囊服装—环境动态热湿传递模型^[32]。

1.3 课题研究的背景

由于我国经济和社会的快速发展, 越来越多的作业人员需要从事低温作业。人类赖以生存的环境是多种多样的, 人自身的调节功能无法使得人类在恶劣低温环境条件下得以生存。不同程度的低温对人体和工作效率都有一定的影响, 低温环境下对作业人员的保护显得尤为重要。对于在低温环境中活动的人而言, 服装是其唯一的围护结构。服装的调温功能, 尤其是保暖防护功能对人类的生存至关重要, 使用防寒工作服是低温作业人员防寒的重要措施。

1.3.1 低温环境

根据 GB/T 14440-93《低温作业分级》, 低温作业环境的定义是: 在生产劳动过程中, 工作地点的平均气温小于等于 5℃的作业环境^[33]。按照工作地点的环境温度以及

在低温作业中的时间，低温作业等级可分为 4 级，低温作业的级别越高，那么冷强度就越大，低温作业分级如表 1-1 所示。

我国的东北、华北、西北地区属于高寒区，凡是在这些地区处于严寒、强风、潮湿的条件下从事露天作业，诸如采矿、兴修水利、开采石油、探矿、装卸、行军、搬运、冬季登山、农田耕作、乘车、涉水踏雪、极地探险等，均属低温作业^[35]；医务人员在施行冷冻疗法的环境，因操作技术的不熟练可能会发生冻伤，诸如这样的作业环境也算低温环境；此外，在其工艺上要求低温的环境，诸如冷藏库、制冷车间、啤酒厂的劳动，亦属于低温作业环境。作业人员若长时间在低温环境中工作，则可产生皮肤温度降低，耗氧量增加以及胃液分泌增多等症状。且如果长期在此环境下作业，加之防寒保暖措施不好，极容易发生冻伤、关节炎和腰腿痛。夏季内外温差大，进出若不注意及时更衣，则易患感冒等。

表 1-1 低温作业分级表^[34]

低温作业时间率/%		≤25	25~50	50~75	>75
温度范围 /℃	0~5	1	1	1	2
	-5~0	1	1	2	2
	-10~-5	1	2	2	3
	-15~-10	2	2	3	3
	-20~-15	2	3	3	4
	>-20	3	3	4	4

*GB/T 14440-93 《低温作业分级》

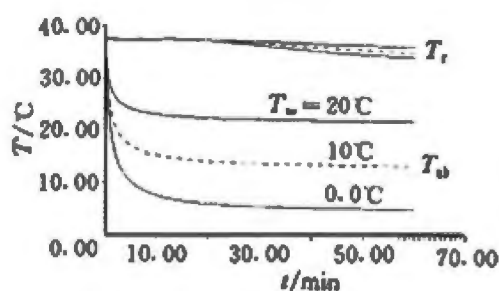
1.3.2 低温环境对人体的伤害

低温环境对于人体的影响不仅仅是因为环境气温低的程度，同时还取决于低温环境中人体的防寒保暖程度、体力活动状态、饮食以及健康状况间的关系，即低气温与其作用于人体的状态间的相互关系（冷作用强度）。低温环境中，由于机体散热加快，从而可引起人体整个系统一系列的生理变化，导致人体产热及散热机制失衡。此时，如果人体缺乏足够的保暖条件，时间长久以后就会使机体受到伤害，重者甚至可能造成局部性或全身性严重损伤，如冻僵、冻伤，甚至会引起死亡。

1.3.2.1 低温环境对皮肤温度的影响

无论是肢体还是躯干，外界环境温度下降，都会直接或间接地使皮肤温度降低。肢体皮肤温度下降程度比躯干皮肤温度下降程度显著，上肢更为明显。相同的温度下

降导致身体各部位皮肤温度变化,有着不同区别。着装人体进入低温环境,身体的各部位受到同样程度的冷刺激后,其各个部位的皮肤温度的最大变化量之间存在着显著差异,按左胸部与左腹部、左大腿后侧与右小腿部位、后腰左侧、右上臂前侧与左前臂部、后背左侧、右大腿前侧顺次递减^[36]。不同低温环境作用下人体皮肤温度的变化曲线如图 1.3 所示,从图中可以看到冷应激越严重,即低温环境的温度越低,人体皮肤温度下降得越多^[37]。



1.3 不同低温环境作用下人体皮肤温度的变化

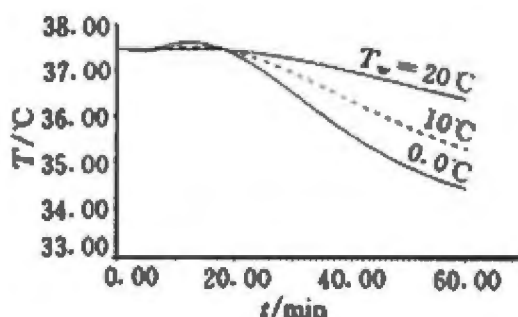
人体进入低温环境以后,首先是裸露的皮肤温度开始下降。如果进入低温环境的时间持续较长或环境温度不断降低,皮肤组织温度会不断下降,从而会扰乱体表的血液循环,皮肤温度开始不断降低进而出现潮红、冷、麻、痛等症状,严重时会导致冻伤。人体正常平均皮肤温度约为 33.5℃,当皮肤温度小于 32℃时,人体就会感觉到不舒适,当皮肤温度降到 28℃以下时,人会感觉到寒冷,其中 50%的人会感到非常寒冷,并出现冷颤。

1.3.2.2 低温环境对体温的影响

人体能维持生存的极限体温不超过 43℃,不低于 25℃。温度是保证机体内生化反应正常进行的一个重要因素,体温的过高或者过低都会对体内生化反应产生不良的影响。人体长时间在低温环境中,正常的体热平衡受到破坏,人体会产生一系列的生理性自主调节和行为性体温调节。低温环境中,人体体内的温度要明显高于皮肤温度,而皮肤温度又随环境气候和衣着情况的不同而发生变化,通过体温调节可以维持体内温度的基本稳定,从而保证人体生命活动的正常进行。

由于人类机体的自我调节机制,一般,体温随外界环境温度的变化不如皮肤温度随外界环境温度变化那么敏感。在低温环境中,只有机体的热量损失到一定的限度时(50kcal 约等于 210kj),体温才会开始下降。不同低温环境作用下人体核心温度的变化

曲线如图 1.4 所示,从图中可以看出冷应激越严重,核心温度下降得越多,核心温度回升现象也越明显。体温下降会引起机体代谢速率增加以维持机体内部温度的平衡,体温下降的幅度在 1°C 左右时,对于人体没有明显的不良影响。但是,当体温下降幅度较大时就会对身体产生较大的影响。当体温下降到 35°C 以下时,会出现明显的寒颤;体温下降到 32°C 时,则会引起人体血压降低,意识开始出现模糊,心率开始降低;当体温下降到 28°C 时,人体会出现心室纤颤,危害到人体生命。当体温降至 20°C 时,人体的呼吸、脉搏会变得微弱,反射消失,人体出现昏迷,如不及时救治就会导致死亡。



1.4 不同低温环境作用下人体核心温度的变化^[37]

1.3.2.3 低温环境对全身的影响

在低温环境中,机体受冷后,毛细血管收缩,循环血量减少,用以减少机体的散热量。人体在冷热温差较大的环境中,如经常来回进出冷藏作业、油气田工作间、制冷场、啤酒厂等,可能会破坏机体对季节变化引起的温差的适应性,因此,作业人员会产生疲惫、发酸、感冒、手脚麻木等症状。同时,由于低温环境下,人体末梢血管收缩,高血压患者工作人员容易产生脑意外。

在低温环境中工作时间过长,机体内组织血液供应出现障碍,免疫力降低,人体抵抗力减弱,从而易患感冒、肺炎等疾病。加之低温又高湿的环境,还会引起肌炎、肌痛、腰痛、神经痛以及风湿性疾病等;低温环境会导致人体大脑内的高能磷酸化合物的代谢降低,使神经兴奋性传导能力减弱,人体会出现嗜睡状态和痛觉迟钝。长时间的低温环境使心脏输出量减少、心率减慢,可导致白细胞和血小板减少,凝血时间延长,血糖降低等,对人体心血管系统造成伤害。

1.4 研究的意义

相变防护服不同于传统的保暖防护服,它是通过相变材料不断地吸收和释放能量来调节温度,改变了传统的消极式隔热保温模式,使人体能保持在一个舒适的温度范围。相变防护服可以做到减少织物的厚度和层数,以减轻服装重量,减小人体负荷,另外还可以达到节能减排的效果,从而满足人体穿着舒适的要求,符合人们以及社会的要求^[38-41]。因此,有必要对此类产品进行开发和进一步的深入研究。

相变材料的研究开发为防护服提供了积极保暖及智能式的可能,微胶囊技术、复合纺丝技术的进步更使得相变材料可以很好的应用于纺织品。相变材料的配方和制备工艺、微胶囊技术和复合纺丝技术的研究比较多,纺织服装领域对于含相变材料的服装体系的传热性能的研究开展不是很多;对于相变材料的蓄热性能大多是通过定性的叙述、DSC 测试或者实验模型对比等方式来说明相变材料可以提高服装的保暖性能。而对于计算在整个体系中,在含有哪种相变材料,在有多少相变材料的添加量下、在多少温度的环境条件下可以让服装体系在多长的时间内增强多少的御寒能力未展开深入的研究。

对于在高寒区工作的军警、国防战士等,高寒区温度在零下几十度,战士从室内走到室外温差十分大,即使战士们配置了厚厚的冬衣,这样大的温差还是很容易受低温伤害,采用相变防护服可在不同的环境温度下,在一定的时间内维持机体微气候区温度的基本稳定,同时可以降低服装体系的重量,缓解服装重量和服装的保暖量的矛盾,还可以减少单兵负荷,提高单兵的灵活性和作战力;在海水救援中,冰冷的海水使得人体热量快速散失,对救援人员造成威胁,如果穿着相变调温防护服,就可以预算援救时间,增加救援人员的灵活性;夏季进行冷藏、冷冻作业,由于室外是炎热的夏季,温度在 30℃左右,冷库的温度一般均为 0~-23℃,内外温差比较大,低温冷库工作人员需要往复交替出入冷热环境,此时,相变防护服可以起到调温作用,可以预测在冷库可以工作的时间。

在低温环境中,如果相变防护服的防护时间长,防护强度过大,会造成人体过于保暖,产生大量的热债,而且防护服重量过重,会造成人体的不舒适,以及资源的浪费;如若防护时间过短,防护强度比较弱,相变防护服装又不够御寒,人体正常的热平衡就会破坏,散热增加,人体同样感觉不舒服。本文基于人体的热需求,从热量平

衡角度对相变防护服的防护时间提出了初步计算公式,为低温劳动环境中防护服的设计提供理论依据。根据低温劳动环境温度,以及在低温环境中工作时间,选择合适的相变冷防护服。通过防护服中相变材料的质量,外界环境温度,预测其防护时间和防护强度;或者通过外界低温环境温度、所需的防护时间和防护强度,设计合适相变材料的含量的相变防护服,为低温劳动环境中的智能相变防护的防护时间和防护强度提供一种简便的计算方法,同时为低温相变防护服的热量需求提供一种预测方法。本文的研究有着很重要的现实意义。

1.5 本课题研究的主要内容

本课题研究的主要内容是基于人体的热需求,从热量平衡角度对相变防护服在低温环境中的缓冲防护时间提出了初步的计算公式。分析了相变防护服中相变材料的种类,相变材料的质量以及低温环境的温度与防护时间的数量关系。为低温劳动环境中防护服的设计提供理论依据,也为低温劳动环境中的智能相变防护服的热量需求提供了一种预测方法。可以设计出在不同的低温工作环境,以及不同的工作时间所需要的防护服种类;或者根据低温工作环境温度,以及在低温环境中工作时间,选择合适的相变防护服。

首先根据人体热量需求分析,选择合适的相变材料,并得出防护时间计算公式;其次根据计算公式基于实际使用条件代入合适的参数数值,计算在不同条件下的理论计算数值;然后设计实验,通过实验验证低温相变防护服的防护时间,将得出的实验数值结果与理论计算结果进行比较。本文主要从以下几个方面开展。

第一、为了进一步研究低温相变防护,对低温环境下人体热舒适性、人体新陈代谢、体温调节机制、产热散热进行分析,研究低温环境对人体的影响以及低温环境下相变防护服的设计,选择合适的相变材料和相变温度。

第二、对低温相变防护服热需求分析计算,通过热量平衡基本理论和条件假设得出相变防护服-人体系统的热量平衡方程。然后分析方程中的各因子,主要是对流换热、辐射换热、人体代谢产热、以及相变潜热等。并确定参数的取值,得出相变防护服在低温环境中缓冲时间计算公式。

第四、根据计算公式的条件设定具体的参数数值,将参数代入计算公式,得出在不同条件下相变防护服的理论计算防护时间。

第五、根据计算设定的具体参数,设计实验。先确定实验方案,通过实验得出在不同条件下相变防护服的实验测试防护时间,并将理论计算结果与实际实验测试结果进行比较分析,分析误差百分比。

第二章 低温相变防护服设计

防护服的价值体现在对人体的温度保护，主要是维持人体的体温在一定范围内，从而起到保护人体的作用，不受环境伤害。低温相变防护服是将相变材料应用于防护服中，为了使人体能够适应恶劣的低温环境、在工艺上要求低温的环境或者极端的低温作业而研制的，是解决低温特殊场合下的保暖问题的有效途径。对于低温环境下的相变防护服设计，首先需要了解相变防护服的原理，确定所适用的具体范围或条件，针对于所使用的范围条件，选择合适的材料，其中包括相变材料、防护服材料，还应该针对于防护的主体需求，设计合理的防护服款式。

本章主要分析了低温相变防护服工作原理，相变材料的选择，相变温度的确定以及相变防护服的结构设计等。

2.1 相变防护服工作原理

2.1.1 相变原理

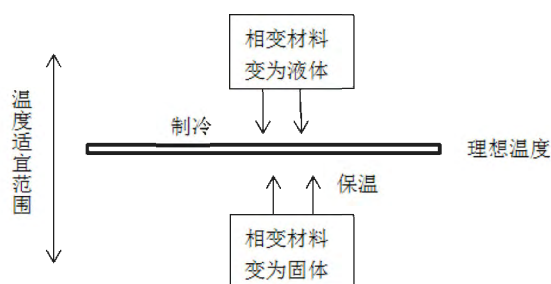
相是指在没有外力作用下，物理和化学性质完全相同，成分相同的均匀物质，在物理学中是指一种物态。相与相之间有明确的物理界面，超过界面就会有某些宏观性质改变，物质在一定条件下，从一种相转变为另一中相的过程叫做相变^[42]。相变过程就是物质结构发生变化过程。相变过程会伴随着体系与环境的能量交换，物质会等温释放或者吸收热量。

2.1.2 低温相变防护服调温机理

蓄热调温纺织品研制所使用的相变物质的相变温度通常在 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ^[43]。相变防护服是将相变材料和防护服制造技术结合起来，具有温度调节功能，在人体周围形成温度基本稳定的舒适的微气候，防止外部低温环境对人体的伤害。相变防护服是依靠服装中的相变材料在相变过程中吸热或者放热起到调节作用。相变材料在防护服中处于密封状态，相变材料温度达到相变点温度时，在服装层内产生制冷效果，一旦材料完全溶解，储能结束。相变防护服在低于相变温度的低温环境使用过程中，液态 PCM 将释放出能量，逐渐变回固态，为人体提供一定时间的加热效果，相变防护服在低温

环境中的工作原理如图 2.1 所示。这种热转换在服装内起温度缓冲作用，可减小人体皮肤温度由于低温刺激的变化，延长穿着者的热舒适感，对人体进行防护，减轻或者免于人体在低温作业环境中遭受身体伤害，甚至冻伤或者死亡。

在低温环境中，相变材料从液态变为固态要释放能量，只有相变材料释放足够潜热足以弥补人体向外界散失的热量时，才能有效地改善服装系统的热舒适性。



2.1 相变防护的工作原理

2.2 相变材料的选择

相变防护服的温度调节功能主要取决于相变材料的潜热、相变材料的相变温度、相变材料的使用量等。每一种相变材料都具有不同的性能，根据使用的条件选择合适的相变材料。一般相变材料的潜热越大，其相变过程所释放的能量就越大，提供的热量就越多；相变材料的含量越大，释放的热量也越大，调温效果也越明显。

2.2.1 相变材料的分类

按照其组成成分可分为无机相变材料（结晶水合盐类、无机熔融盐类、定型复合材料、功能热流体），有机相变材料（石蜡、醋酸、酯酸和其它有机物），金属或合金类相变材料（Al-Si、Al-Si-Mg 等）和有机与无机混合相变材料等主要这几个类别，在应用上还有几种相变材料混合组成的复合相变储热材料等，目的是随温度范围的扩大分别发挥不同相变材料的相变潜热功能^[44]。

按照相变的温度范围分类，相变材料可分为高温相变材料（大于 550℃）、中温相变材料（120℃~550℃）、低温相变材料（0℃~120℃）及制冷相变材料（小于 0℃）^[45]。相变材料作为一种新型恒温蓄热能源，近年来在国内外能源利用和材料科学方面研究十分活跃，受到很多学科科研人员的关注，取得了丰富的研究成果，迄今为止，有应用价值的相变材料约有 500 多种^[45]。

根据相变材料相变的形式,相变材料可以分为固-固相变材料、固-液相变材料、固-气相变材料和液-气相变材料四大类。在实际研究应用中,最常用的是固-液相变材料。

2.2.2 服用相变材料的选择原理

相变材料的选择应该满足人体在低温工作环境中的防护需求、运动需求以及适用于服用,选择应用于低温防护服的 PCM 必须满足以下几个原则:

(1) 具有大的储能容量,即相变材料的相变潜热高,使其在相变过程中能释放出较多的热量;

(2) 相变温度必须适合具体应用的要求。由于应用的领域为低温环境防护服,相变温度应该符合人体穿着时的舒适温度,并不对人体产生热债;

(3) 相变过程必须完全可逆,冷热循环稳定性好。过冷或过热现象小,而且正过程和逆过程的方向仅仅以温度决定。相变过程必须不带来任何 PCM 的降解和变化,具有实用价值的 PCM 的使用寿命必须大于 5000 次热循环(每一次正过程和逆过程为一热循环)以上。

(4) 相变过程的体积变化小,饱和气压比较低,许多材料完全没有实用价值的主要原因就是相变体积过大,体积变化太大不仅增加 PCM 的封装难度而且影响封装后的耐用性;

(5) 适宜的热传导系数,密度和比热容适宜;

(6) 具有优良的化学和物理稳定性,成本低。PCM 必须无毒、无腐蚀性、不可燃、对环境无污染、无任何化学反应、避免对人体造成任何伤害。并且,PCM 的生产工艺不能太复杂,成本不能太高,材料易得。

2.2.3 石蜡类相变材料特性

石蜡是多种碳氢化合物,从石油中提炼而来的有机物。

石蜡类相变材料相变潜热高,再重复吸热放热后,相变温度变化很小,相变潜热变化很小,材料比较稳定;石蜡熔化时蒸汽压力低,几乎没有过冷现象,自成核,无需添加成核剂;石蜡是稳定性物质,化学稳定性好(不易发生化学反应),但应隔绝空气,防止在空气中缓慢氧化;石蜡相变温度范围满足人体需求,其吸热温度范围取决于正构烷烃中碳原子数分布,分布越集中,吸热温度范围越窄,正构烷烃含量越多,

热性能越好；石蜡无毒无刺激性气味，具有惰性，没有相分离、无腐蚀性，便于封装；从经济学角度上，石蜡的价格是有机物中较低的，与无机盐类相当，但性能却优于无机盐类。^[46]

综合考虑，在对比各类相变材料的性能以后，选取工业用有机物石蜡固-液相变材料，石蜡类相变材料符合服用需求。

2.2.4 PCM 相变温度的选择

相变温度是相变材料在发生相转变时的温度，也叫相变点温度。相变温度通常是一个温度范围带，即相变材料在其温度相变范围内储热或者放热，此时存储或释放的能量为相变潜热。虽然在相变过程中材料自身的温度几乎不变，但是潜热却非常大。相变温度是否符合所需要应用的领域是 PCM 的选择首要考虑问题，因此可应用于低温防护服的 PCM 样本的首要条件是 PCM 的相变温度要符合低温防护服的穿着需求。

2.2.4.1 衣内微气候温度分布

人们穿着服装时的舒适感主要取决于服装内空气层形成的微气候区。微气候区是指人体皮肤与最外层服装表面之间所形成的空气层。有时候，微气候区也指人体皮肤与最内层服装之间的空气层的温度、湿度、气流等分布。微气候区的空气状态(包括温度、湿度和空气运动分布状态)取决于环境气候条件、服装织物性能(传热、透湿及透气等)及人体的生理状态(皮肤表面温度、出汗状态等)。当外界条件不同，身体的不同部位、不同服装层间的气候分布也各不同。相变防护服在人体穿着的层间位置不同，所需的相变材料的相变温度范围也各不相同。了解着装人体衣内微气候温度的分布可以为相变材料的相变温度选择提供参考。

一般当衣服最内层的温度比体温低 5℃时，能量消耗最少，感觉舒适^[47]。大多数情况下，微气候区内空气温度将呈现一定的温度梯度，即从人体表面至服装系统最外层，各层的温度是不同的。在低温寒冷环境中，人体皮肤表面温度高于外界环境温度(显热流由内到外)，服装内表面的温度高于外表面的温度，热量从人体表面通过服装向外界传递，由于内外温度梯度，从而引起显热热流量。因此，低温环境中，微气候区温度始终是由内到外逐渐降低的。冬季微气候示意图如图 2.2 所示，图中可以得到，环境温度为 5℃时，外套层的温度为 19.5℃，紧挨皮肤层的舒适层温度为 31.7℃。在低温环境中，热量从人体流向冷环境，皮肤—服装—外界之间存在着温度梯度，多

层服装系统衣内微气候区的温度分布梯度是逐层降低的。即使人体进入更冷环境，因内衣层与皮肤温度接近，相变材料仍处于液态，而服装外层的相变材料已遇冷固化放出热量，相变材料固化后，放热过程结束。

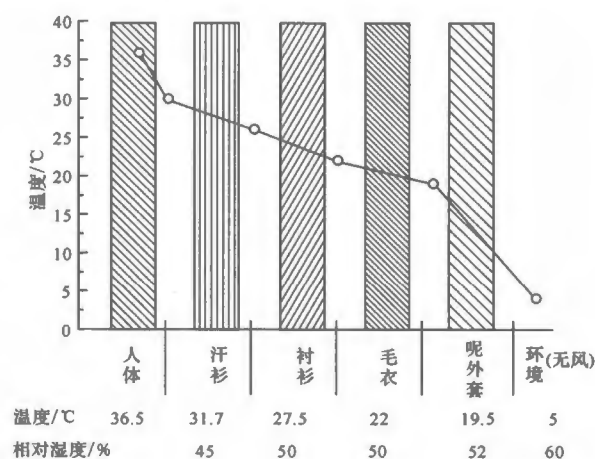


图 2.2 冬季微气候示意图^[48]

2.2.4.2 低温防护服穿着需求

从人体生理学角度出发，当人体处于热平衡时，人体的产热量与散热量应维持基本平衡，人体的蓄热基本为 0，服装应该有相应的热阻，人体可以维持体温的稳定，人体无显汗产生，进行不感知蒸发，衣内微气候维持在一定的温度范围内。

人体处于热平衡状态时，感觉舒适的平均温度约为 33.4℃，身体任何部位的皮肤温度与皮肤平均温度的差别在士 1.5~3.0℃ 范围人体感觉舒适，若温度范围超过士 4.5℃，人体将有不舒适感^[49]。另一方面，通过资料研究，人体在 10℃ 潮湿环境下机体开始出现不适，发生异常^[50]。人体在低温环境中的感觉变化依次为：舒适、不舒适、冷、非常冷，如果在低温环境中时间较长，可能会产生冻伤。

因此，根据人体皮肤的这一特点以及多层服装系统衣内微气候的温度分布趋势，将相变材料用在防护服上，如果相变防护服用于服装系统的内层，选择相变材料的相变温度范围接应近于人体皮肤的温度变化范围的相变材料，就可使人体感觉舒适^[51]。如果用于多层服装系统的最外层，相变温度不仅要满足温度舒适，还应该满足冷防护温度。根据温度舒适性要求和冷防护需求，相变材料的相变温度应该保证人体体温处于稳定状态，维护衣内微气候处于适宜的温度范围，所以应用于多层服装系统最外层的 PCM 相变温度最高温度为低温环境中人体的舒适温度，最低相变温度应该大于 10℃。

本文研究的相变防护服配置于多层服装系统的最外层，选取相变温度为 25°C 和相变温度为 30°C 的石蜡相变材料作为研究对象。下面通过实验来进一步来验证可用的相变材料的相变温度范围。

2.2.5 实验验证可用相变温度

相变防护服配置于多层服装的最外层，首先测试多层服装最外层外表面的温度变化范围，然后验证所选相变温度是否合适。

2.2.5.1 多层服装系统最外层温度测试

防护人员服装配置一件棉质 T 恤，和一件涤棉外套（与后期实验服装配置保持一致）。测试者为正常男性青年，身高 173cm ，体重 65kg 。避免人体消化食物产热，受试者在进食 2 个小时后开始实验。受试者在稳定的环境中先静坐休息 10 分钟，然后测试静坐 30 分钟内服装外表面的温度变化。由于着装较少避免人体冻伤，环境温度为 15°C ，湿度为 $50\%\text{RH}$ 。测试点的位置为四个，最外层服装外表面左前胸，右后肩胛，腹部，后腰，每次测试的位置是人体该点所对应的最外层服装外表面位置如图 2.3 所示。最外层服装外表面的平均温度如表 2-1 所示。

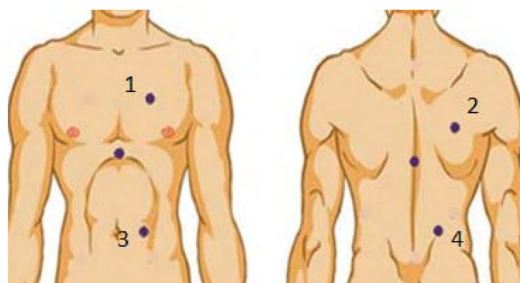


图 2.3 服装最外层测试点对应人体位置

表 2-1 最外层温度

测试点	1	2	3	4	平均值
平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	24.58	23.37	23.20	22.27	23.36
最小值 ($^{\circ}\text{C}$)	24.6	23	22.7	22	23.08
最大值 ($^{\circ}\text{C}$)	25	24.2	24.4	22.9	24.13

从实验数据可以得到，在环境温度为 15°C 时，人体穿着两层服装时，最外层温度在 23°C 左右。由于温度降低，着装人体受到一定强度的冷刺激后，皮肤温度会下降，根据多层服装系统衣内微气候的分布梯度趋势可知，人体皮肤和服装各层之间的温度梯度值也随之下降，即穿着同样的服装，当外界温度越低，服装的最外层温度也

越低。

2.2.5.2 相变温度实验验证

选取相变温度分别为 25℃、30℃的相变材料，将其分别制作成相变防护服，即有两种不同相变温度的相变防护服。然后分别在环境温度 5℃、湿度为 50%的人工气候室中测试相变防护服中相变材料是否完成相变过程。

受试者为正常男性青年，身高 173cm，体重 65Kg。受试者服装配置不变。受试者在常温环境静坐 10 分钟，然后穿上相变防护服，将温度记录仪的探头置于防护服中相变材料包上。然后进入 5℃低温环境，静坐 2 小时，温度记录仪 10 秒记录一次温度变化，并观察相变材料的变化。

通过对比实验，实验结束后，25℃与 30℃的相变防护服内材料形态均完全变化，即有相变过程。本文主要研究外界温度低于 5℃的环境，相变防护服置于服装最外层，通过分析和实验，选择相变温度为 25℃和 30℃的相变材料可行。

2.3 低温相变防护服设计

低温相变防护服是将相变材料和制造技术相结合的一种高科技智能服装，对于低温相变防护服的设计主要有相变材料的加工和防护服的款式结构设计。

2.3.1 相变材料的加工方法

随着蓄热调温纺织品的研究不断深入，逐渐从理论研究转向实际应用，对于相变材料的加工封装研究也越来越广泛，目前对于材料的加工和封装主要有以下几种方法：

复合纺丝法、中空纤维填充法、浸渍法等。用中空纤维填充法制得的调温纤维内径比较大，相变物质残留于纤维表面，易于渗出和洗出，作为服用纤维使用有比较大的局限性。用复合纺丝法时，在染整、后整理等过程中，纤维的芯部相变材料易逸出，所用的相变材料属于固-液相变，对纤维强度影响较大。

对织物进行涂层后整理。采用涂覆法或后整理的方法将相变材料混合，结合其它助剂使其附着在纺织品表面而获得具有调温功能的纺织品。这种方法将相变材料附着在织物的表面，所以在使用过程中存在着很大的稳定性问题。另一方面，影响织物手感，而且相变材料进行交联后，调温性能可能发生改变。

微胶囊法，将相变材料分装在微胶囊内，然后将微胶囊与纤维或纺织品复合。利

用微胶囊方法主要包括微胶囊涂层法、微胶囊填充织物法、微胶囊纺丝法等。微胶囊壁可以给相变材料提供一个稳定的封闭环境，增强相变材料的使用稳定性。

宏观相变材料包封装法。此方法是将相变材料封装在特殊的材料中，制作成方形或者其他形状的密封材料包，材料包的大小可以用 cm 度量，在服装内依据材料包的大小设计多个特定的袋子，将封装好的材料包固定在服装特定袋子内。此种方法工艺和制作上比较简单，而且 PCM 利用率高，对服装无污染，相变材料没有进行任何加工处理，不影响相变材料的调温性能。

本文研究的相变防护服主要是利用宏观材料包封装法，下面简单介绍相变材料包的制作。

2.3.2 相变材料的封装

采用宏观相变材料包封装法，将相变材料封装在 TPU 薄膜中，制作成长方形材料包，如图 2.4 所示。TPU 薄膜透明无色，厚度为 0.07mm，利用封口机在高温下将薄膜粘合，制成不同规格的相变材料包。根据背心的款式结构，为了让材料包均匀分布在背心中，材料包的规格分为三种，背心的中相变材料的总量分别有两种，分别为 950g 和 636g，如表 2-2 所示。



图 2.4 相变材料包

表 2-2 相变防护服中材料包参数

规格 (cm)	2×8	2×10	2×13	总计
数量 (个)	90	22	12	126
PCM 质量 (g)	7	8	12	950
PCM 质量 (g)	4.7	5.3	8	636

2.3.3 相变防护服的款式

本文研究的相变防护服为背心式，主要保护人体躯干部位。根据 NASA TMX-581901976 资料进行分析整理，得到身体各部位基础代谢、基础血流及热容量的数量值以及所占身体的百分比。由此可以看出躯干部位的基础代谢和基础血流处于主要地位，分别占到全身的 74.3% 和 80.6%，位于首位，同时躯干的热容量也最

高,如表 2-3 所示。在低温环境中对人体的躯干部位防护,保证人体正常的代谢,维持人体正常生命活动。同时,保证防护人员在低温环境中工作灵活、便利,有助于提高其工作效率。

表 2-3 身体各部位基础代谢、基础血流以及热容量分布比例

生理指标		头部	躯干	臂	手	腿	脚
基础代谢	W	13.6	56.4	1.5	0.1	4.1	0.2
	%	17.9	74.3	2.0	0.1	5.4	0.3
基础血流	kg/h	50.0	242.2	1.4	1.1	4.4	1.6
	%	16.6	80.6	0.5	0.4	1.4	0.5
热容量	kg/°C	17.3	126.0	11.2	0.9	32.8	1.3
	%	9.1	66.5	5.9	0.5	17.3	0.7

本文研究的背心式防护服如图 2.5-2.7 所示,其细部结构为:

领子结构为立领。在低温环境中,防护服的作用主要是维持人体体温的稳定,立领结构可以对人体的脖子进行保护,避免脖子与低温环境直接接触,同时还可以阻碍人体的热量由于烟囱效应通过脖子散失到低温环境中;

肩部进行分割,不添加相变材料。这样可以避免工作人员在肩部受力时导致相变材料损坏。

袖窿线向内修正 6cm,肩点向内移动 6cm。人体手臂的活动量和幅度是比较大的,较小的袖窿会对人体造成不舒适感,所以有必要对袖窿线进行修正。防护服的相变材料分布区域为背心,则袖窿造型设计以及袖窿线修正对低温防护服的舒适性非常关键。

侧缝区域为分割式结构,即侧缝区域与前后衣片分割,不添加 PCM,加入橡筋抽绳,随时调节服装大小。首先,这种结构设计便于调节相变防护服的大小;人体的体型各不相同,即使是同一身高体重的人,其体型也各不相同,这样的结构就可以增大服装的穿着适应性,防护服的大小可以随人体体型的变化而调整;由于侧面是曲面状态,弯曲的曲率比较大,相变材料进行两相转变时,材料包不能随意弯曲,因此侧缝处不添加相变材料。

衣下间隙松量为 3.5cm。如果放松量过小,人体可能会产生不舒适的感觉;如果放松量过大,人在动态时空气的对流会较大,微气候静止空气量减少,服装热阻就会减少,防护作用大大降低,还会对防护人员的行动造成不便,降低工作效率。

拉链式闭合的款式结构。这样的款式简单,便于穿脱;层间结构分别为里层-相

变层-外层。里层采用吸湿透气性较好的棉质针织面料，提高穿着舒适性；外层为全棉斜纹布；PCM 包分布间隙量的大小为 6mm。各层参数如表 2-4 所示。

表 2-4 相变防护服用料参数

材料名称	材料相关参数	材料用途
蓝色全棉斜纹布	经密 384/10cm	背心外层面料
黑色针织布	纬密 210/10cm	
TPU 薄膜	克重 229g/m ²	背心里层面料
	厚度 0.07mm	封装材料



图 2.5 背心式相变防护服



图 2.6 防护服正面



图 2.7 防护服背面

根据相变防护服的款式，相变材料包均匀分布在躯干部位，在防护服的各个区域内相变材料的规格各不相同，不同尺寸的相变材料包的分布位置以及个数如表 2-5 所示。区域 1、区域 2、区域 5、区域 6 这四个区域的材料包规格相同，区域 3 和区域 4 这两个区域的材料包规格相同，区域 7 和区域 8 这两个区域的材料包规格相同。图 2.8 为相变防护服的结构图。

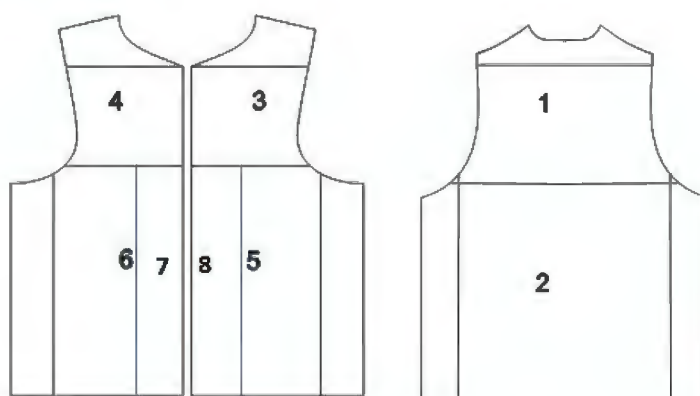


图 2.8 相变防护服的结构图

表 2-5 相变材料包分布

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
尺寸	2×8	2×8	2×13	2×13	2×8	2×8	2×10	2×10
个数	24	44	6	6	11	11	11	11

2.4 本章小结

(1) 低温相变防护服的工作原理：相变防护服的调温功能是依靠服装中的相变材料在相变过程中吸热或者放热作用。相变材料在防护服中处于密封状态，低温环境使用过程中，相变材料温度高于相变点温度，液态 PCM 将逐渐变回固态，释放出能量，为人体提供一定时间的加热效果。

(2) 介绍了相变防护服调温机理，在对比各类相变材料的性能以后，选取工业用有机物石蜡固-液相变材料。石蜡类相变材料相变潜热高，材料比较稳定；几乎没有过冷现象，化学稳定性好（不易发生化学反应）；相变温度范围满足人体需求，石蜡无毒无刺激性气味，无腐蚀性，便于封装，成本低等特点。石蜡类相变材料符合服用需求。

(3) 通过分析人体温度舒适性，对于相变温度的选择进行讨论。PCM 的相变温度要符合低温防护服的穿着需求以及所需要应用的领域，同时满足人体温度舒适以及冷防护温度需求，结合实验选取相变温度为 25℃ 和 30℃ 的石蜡固-液相变材料。

(4) 采用宏观材料包封装法封装相变材料，并设计制作了相变防护服，防护服的款式结构为立领、肩部进行分割、袖窿线向内修正 6cm、侧缝处不添加 PCM 的拉链式闭合的款式结构，PCM 包分布间隙量的大小为 6mm。

第三章 低温相变防护服热需求分析计算

在低温环境中,相变防护服可以利用相变材料的贮热及其相变温度处的近似恒温效果,来达到冷防护作用,保护人体,避免在低温寒冷环境中出现身体局部冻伤,甚至是死亡。人体、相变防护服与周围环境的热传输和热平衡是影响其效果的关键的因素之一。本章主要讨论了低温环境中,相变防护服的缓冲防护时间的计算公式。要得出相变防护服的防护时间计算公式,首先要分析在低温环境下人体的反应,找出与防护时间有关的因子,通过基础理论建立合适的等式关系,然后进一步考察各个因子的参数,确定合适的参数,通过等量关系,最后确立描述人体-相变防护服与低温环境间能量传递计算模型,即相变防护服在低温环境中的防护时间计算公式。该计算公式描述了相变材料的质量和与环境温差与相变防护时间的关系,即提出了当相变防护服中相变材料的质量为多少、外界低温环境的温度有多大,服装体系的御寒防护能力为多长时间。

3.1 低温环境下人体反应

在低温环境中,为了维持机体的正常生命活动,保持正常的体温,必须进行适当的调节。体温的变化,会破坏人体的热平衡,影响人体各个方面的功能。人体遭受冷应激时,手脚会变得不灵活,操纵不协调,影响工作效率,可能还会引起人体温度降低,冻伤,机体功能损伤,严重的,甚至会危及人的生命。

人体通过产热和散热机制来维持正常的体温,在外界温度低于 27°C 或高于 37°C 时,人体就不能单纯的依靠生理调节,而需要进行行为调节来适应外界环境。服装就是人体抵御外界低温环境损害的有效防护工具。只有当人体温度处于舒适状态时,人才能有更高的工作效率。^[52]

为了研究低温相变防护服的人体热需求,就要先研究低温环境下人体的反应,主要包括低温环境下人体的新陈代谢、体温调节机制、散热等。

3.1.1 低温环境中人体新陈代谢

人体是一个复杂的系统,新陈代谢和体温的相对稳定是维持人体正常生命活

动的基本保证,人体新陈代谢是影响人体热舒适的一个重要的因素。通过新陈代谢作用维持人体各器官的生理活动及时补偿由于各种情况所造成的热量损失,使体温维持恒定。

不同的环境温度对人体新陈代谢有显著的影响。在中性环境中,人体处于安静状态时的新陈代谢率最低,在 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的环境中最为稳定,基本保持恒定状态。当环境温度高于 30°C 或者低于 20°C 时,新陈代谢就会开始增加。在环境温度 10°C 以下,为保持人体热平衡,体内产热增加和新陈代谢的增加更加显著^[53]。叶晓江对低温环境(自然通风)和热舒适环境(空调环境)下的受试者在静坐时的新陈代谢率分别进行测量计算,结果如图 3.1 所示,在低温环境温度下,受试者的新陈代谢率要显著高于舒适温度下的新陈代谢率。新陈代谢率影响人体热平衡和舒适性,是研究低温相变防护服的热量需求的一个重要因素。

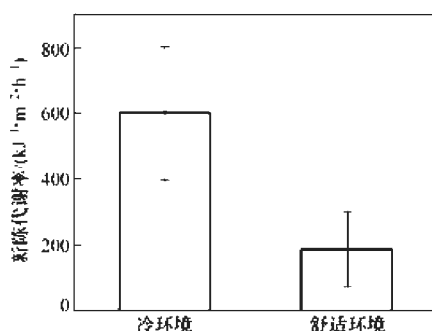


图 3.1 低温环境和舒适环境下人体新陈代谢率^[54]

3.1.2 低温环境中人体体温调节

体温调节是人体维持舒适的生理学基础。人体的体温调节是产热和散热以及人体内外热交换的调节过程,体温调节的主要功能是将人体核心温度维持在一个适合于生存的较窄的范围内。人体体温调节方法包括调节皮肤表层血流量、调节排汗量和提高产热量,人体皮肤表层的血流量可在很大范围内变动,可从几乎为零到心脏输出量的 12%^[55]。骨骼肌收缩时,会产生大量热量,由此来保持体温。

在一般情况下,体内的温度总是高于皮肤温度,而皮肤温度可随环境气候和衣着情况的不同而发生变化,从而维持体内温度的相对稳定。当人体处于低温环境时,体内的产热会产生改变,正常的体热平衡会遭到破坏,人体会产生一系列的生理性自主调节和行为性体温调节。在体温调节中枢的控制下,通过自主性体温调节,如增减皮

皮肤的血流量、出汗、寒战等生理性产热和散热调节反应，可维持体温的相对稳定。人体体温调节系统见图 3.2，低温环境下，冷信号传入下丘脑，当下丘脑后部感受到皮肤冷感受器的冷信号时，下丘脑后部感受到的核心温度又高于一定值，则会组织冷颤。如果下丘脑前部温度低于一定值，皮肤温度的降低就会引起冷颤来增加产热量。

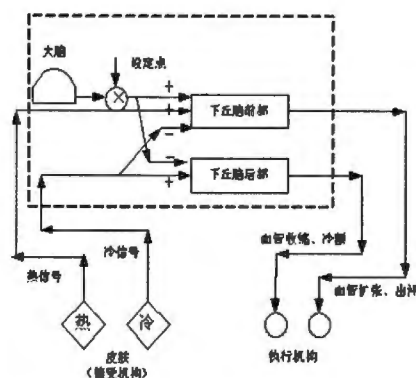


图 3.2 人体体温调节系统图

人类自身的温度调节能力是有一定限度的，外界环境温度的变化超过一定范围时，仅依靠人类自身的体温调节系统不能保持体温的相对稳定。机体就会通过一系列行为活动对体温进行调节。相变防护服就是其中的一种行为活动调节，是为了保证人体在低温环境下免于低温危害而设计的。人体通过体温调节和行为活动调节来维持体内温度的基本恒定，从而保证人类生命活动的正常进行。

3.1.3 低温环境中人体散热

人体的核心温度保持在 37°C 左右，人体向周围环境的放热属于物理性体温调节，通过传导、对流、辐射和蒸发这四种方式进行^[56]。其中，蒸发是通过皮肤和呼吸器官的水分蒸发进行的放热，称为湿性散热。传导、对流和辐射称为干性散热，低温环境中人体与环境的热交换主要为干性换热。在低温环境中，外界温度低于人体温度，人体会不断地向周围环境散热，通过服装表面的辐射和对流散热将会成为主要散热方式。当外界温度越低，即温差越大，人体辐射散热和对流散热越多。当人体与外界温差很大时，如皮肤温度为 33°C ，外界气温为 0°C 时，其温差达 33°C 。假如服装不足于御寒，通过服装表面的辐射和对流散热将会显著的超过人体代谢的产热量，而加之低温寒冷环境中呼吸道对流散热量也会大大增加，这些超过产热量的散热会使人体正常热平衡遭到破坏。

3.2 低温相变防护服缓冲时间计算公式

目前文献关于服装体系的热量和物质传输的模型有不少报道,但是关于添加相变材料的服装的热量传递模型的文献却不是很多,或者其模型比较复杂,求解比较难,对于要求简便灵活的实际应用其实用度不高,通用性比较差。

在人体着装热传质模型方面, Gagge 最先提出着装热传质模型,其模型主要是假定人体的热质交换只在着装外表面进行,着装与皮肤之间的空气只是起消极隔热作用,此模型是以后模型发展的基础^[57]。Mc Cullough、Loten 等人在 Gagge 模型基础上考虑了包裹空气层在传热传质过程中存在的阻力(即导热、辐射、扩散等因素),并扩充到多层模型,发展了一种新的修正式动态模型^[58-59]。李凤志考虑到了汗水的积聚过程,并结合织物热湿耦合模型,对 Stolwijk 人体热调节模型进行了改进,建立了人体-服装-环境系统的动态热湿传递模型^[60],用于人、服装、环境系统的瞬态热湿传递过程的数值模拟。

在相变材料热质传递模型研究方面,于静^[61]对相变材料的蓄放热特性进行了理论计算和实验研究。建立了一个一维非稳态、液相不含自然对流、固-液相变的数学模型,采用有限差分法对数值进行求解,获得了相变材料的蓄放热特性随温度的变化关系。孙浩^[30]通过热量平衡方程建立了相变微胶囊的一维热传递理论模型,用于推算在室内条件下微胶囊相变过程的持续时间。

在相变服装模型研究方面也有很多,例如朱方龙根据火灾着装人体实际情况,不考虑高温下服装材料降解吸热或放热效应,服装材料内湿份的影响忽略不计,构建相变潜热变化的各层热传导控制模型。该模型描述了热量在火灾多层服装(空气层)皮肤系统的传热过程,但是模型比较复杂,求解比较难。相变层潜热变化的各层热传导控制方程为^[28]:

$$\rho_m c_{pm} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \gamma \cdot q_{rad} e^{-\gamma x} + \rho_m Q \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (3.1)$$

本节结合研究工作及实践需求,基于着装人体热需求,研究在一定条件下相变材料的一维传热理论,得到了一种比较简便适用的计算方法,并进行简单的求解。

3.2.1 服装系统的热量传递

热力学第二定理指出,在一个物体内部或物系间,只要存在温度差,热量总是自发

地由高温处传向低温处^[62]。人作为一个有机生命体,与其他物体或者周围环境时时刻刻地进行着热量交换。从热力学观点来看,人-相变防护服与环境的热交换同样遵循能量转换以及守恒定理,即热力学第一定理。把人-相变服装看作一个系统,系统所获得的能量减去系统所失去的能量等于系统的能量积累。物体的质量和热量传输的基本理论方程是质量平衡和热量平衡方程,通过流入、流出以及流经系统的热量和质量,可计算出物体的表面温度及其随时间的变化关系。对性质恒定的固体材料而言,质量传输过程不予考虑,因而对于人体-相变防护服系统可以只考虑热量平衡方程。

热传递主要包括以下两部分:

- (1) 物体内部的热传导;
- (2) 物体的外表面与周围环境的热交换,主要包括传导、对流、辐射、蒸发。

在低温环境中,人体-相变服装系统与外界环境的热交换过程如图 3.3 所示,图中的传热过程分别为:人体经过新陈代谢作用产热;相变防护服内相变材料产热;人体-相变服装系统与外界环境传导换热过程;人体-相变服装系统与外界环境对流换热过程;人体-相变服装系统与外界环境辐射换热过程;人体-相变服装系统与外界环境蒸发换热过程;人体呼吸换热。

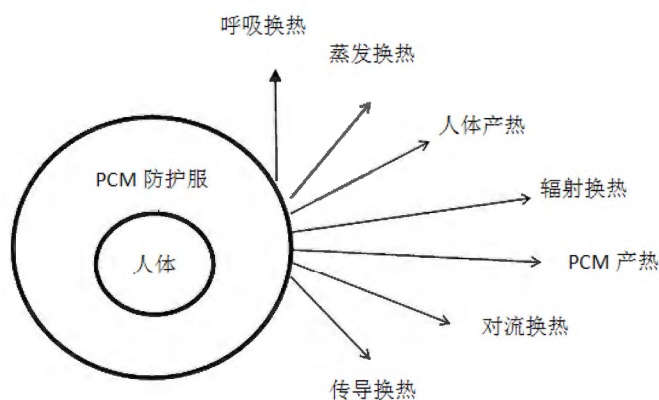


图 3.3 人体-相变服装系统与外界周围大气换热

热量在多层服装系统内的传递是一个非常复杂的过程,热量通过服装与人体空气层传到各层服装,然后传递到服装最外层,传递到服装最外层的热量与空气进行热交换,一部分热量以辐射能的形式传给外界低温环境,一部分热量通过对流散失^[53]。在低温环境中,系统的温度要高于外界环境温度,热量便从系统内传到系统表面,系统处于稳态,人体-相变防护服系统传到服装外表面的显热损失等于系统和环境的对

流及辐射换热损失之和。对流传热过程包括传导和对流，二者同时起作用。着装人体外表面与环境传热^[63]为：

$$q = C + R \quad (3.2)$$

q: 着装人体系统传到服装表面的热量；

R: 辐射换热量；

C: 对流换热量；

3.2.2 基本条件假设

在低温冷环境中，人体散热量会被动增加，使体温下降，当着装人体系统处于动态热平衡状态时，产热散热平衡，根据热量平衡理论本文中作以下假设：

(1) 显热放热阶段已经结束，不计算显热放热阶段，只计算潜热放热阶段；

(2) 维持人体舒适需求，着装人体处于热平衡状态，积热为 0^[64]。热量在服装系统中的传递是一个非常复杂的过程，当系统处于平衡状态时，材料吸热达到平衡，无材料吸热作用。

(3) 本文选定条件为低温冷环境，人体处于站立静止或轻微活动状态，环境无风、无太阳的辐射作用。

(4) 着装系统内热量的传递方式为导热，热量从人体传递到最外层服装的外表面，在最外层服装外表面通过对流和辐射与环境进行热交换^[63]。

3.2.3 热平衡方程

人体正常的体温恒定在 37℃左右，人体与环境处于动态热平衡过程，人体从环境得热量加体内产热量应与人体散热量平衡。若体内产热与人体得热之和大于人体散热，人体温度将升高，反之，人体温度会降低。着装人体与环境的热平衡方程^[64]为：

$$M - W \pm C \pm R - K - E - B = S \quad (3.3)$$

S: 人体蓄热量；

M: 代谢产热量；

W: 人体完成机械功所消耗的热量；

R: 辐射换热量；

C: 对流换热量；

K: 传导换热量；

E: 人体蒸发换热量;

B: 人体在低温环境中的呼吸热损失量;

根据热平衡方程, 人体从环境得热量加体内产热量应与人体散热量平衡。在低温环境中, 有相变服装时, 相变材料产热, 是着装人体系统的内热源, 着装人体系统的得热量与散热量平衡时, 系统处于热平衡状态。在低温环境中, 人体-相变服装系统处于动态热平衡时, 着装人体系统与环境的换热平衡方程为:

$$M - W \pm C \pm R - K - E \pm Q - B = S \quad (3.4)$$

S: 人体蓄热量;

M: 代谢产热量;

W: 人体完成机械功所消耗的热量;

R: 辐射换热量;

C: 对流换热量;

K: 传导换热量;

E: 人体蒸发换热量;

Q: 相变材料的相变潜热;

B: 人体在低温环境中的呼吸热损失量;

着装人体处于动态热平衡, 人体无热债, 积热为 0, 热量从人体传递到最外层服装的外表面, 在最外层服装外表面通过对流和辐射与环境进行热交换, 不考虑传导换热与蒸发换热。在低温环境中, 穿着相变防护服人体的热平衡方程为:

$$M - W - C - R + Q - B = 0 \quad (3.5)$$

$$Q = C + R + B - (M - W) \quad (3.6)$$

$$Q = \Delta C \cdot t + \Delta R \cdot t + \Delta B \cdot t - \Delta(M - W) \cdot t \quad (3.7)$$

Q: 相变材料的总相变潜热量;

ΔC : 单位时间的对流换热量;

ΔR : 单位时间辐射换热量;

ΔB : 单位时间呼吸换热量;

$\Delta(M - W)$: 单位时间人体除去做功后的产热量;

t: 时间。

人体一相变防护服系统与外界低温环境的边界层的热力学性能受系统本身和环境许多参数的影响,通过查阅文献和资料对方程进行简化处理,根据热平衡方程,要得出相变防护服中相变材料的作用时间,需要得出相变材料的总潜热,以及单位时间的对流换热,辐射换热,传导换热,蒸发换热,呼吸换热和人体产热。下面具体讨论公式中各项参数的取值以及测量、计算方法。

3.3 参数的确定

3.3.1 人体产热量

低温环境中,人体与环境能量交换的计算中,新陈代谢起着重要的作用,人体新陈代谢产生的热量一部分转化为外部机械功,一部分转化为体内热量。人体通过新陈代谢产生的热量维持正常体温,同时通过呼出气体、排泄物等带走一小部分热量,大部分由体表散发到外界环境中去。无论是不同人之间还是同一个人在不同时间内,机械效率的变化都是很小的。即使人在做有效机械功时,其机械效率也是很低的,机械效率的变化范围为 0~20%,而且大多数活动的机械效率为零^[65]。对于低温环境处于静止或轻微活动的人,其做功为 0,人体单位面积产热为单位面积新陈代谢率。

低温环境中人体单位时间产热量^[66] (ΔH) 为:

$$\Delta H = (M - W) \cdot S \cdot N \quad (3.8)$$

人体所做的机械功^[53]为:

$$W = \eta M \quad (3.9)$$

其中: M: 人体新陈代谢率;

W: 外部机械功;

S: 人体体表面积;

N: 人有效体面积百分数;

η : 做功量占新陈代谢的比例,一般取 5%左右^[65]。

由于机械效率为 0,所以低温环境中的单位时间的产热量可表示为:

$$\Delta H = M \cdot S \quad (3.10)$$

3.3.1.1 人体新陈代谢

目前广泛使用的新陈代谢率是 ISO 7730 热舒适国际标准中的新陈代谢率^[67],它是依据 ISO8996 热环境的人类工效中的方法确定的:一是根据活动种类或者工作类型

来划分估计代谢率；二是根据具体活动类型查表得到或者所测心率计算出新陈代谢率；三是采用仪器测量。在这三种方法中，仪器测量法准确度最高，误差小，但在实际工作中测试的成本高，且费时、费力、测试程序复杂。人们时常采用求和法、工作周期内平均代谢率的计算方法、心率法、经验模型法等方法来估算人体的新陈代谢率，或者通过预测公式预测新陈代谢值^[68]。在热舒适问题中常用的新陈代谢率计算公式为1981年Nishi建立的实验式^[69]：

$$M = 352(0.23RQ + 0.77)V_{O_2}/A_D \quad (3.11)$$

式中，M：代谢率（W/m²）；

RQ：呼吸商，无量纲；

V_{O₂}：在0℃，101.325pa条件下，单位时间消耗的氧气体积，（L/min）；

A_D：人体皮肤面积，（m²）。

一般，成年人在静坐和轻度劳动（M<1.5met）时，RQ取0.83；在重力劳动（M=1.5met）时，RQ将达到1.0，中间状态可用线性插值得到。10%的RQ最多会带来3%的误差。

到目前为止，新陈代谢率通常是根椐人体不同活动水平通过查表取得，表3-1列出了不同活动强度条件下的人体代谢率^[68]，代谢率单位：（1met=58.2W/m²=50kcal/（h.m²））。

肌肉活动水平又叫做肌肉活动强度，也称之为活动水平，由于人体肌肉活动水平对人体新陈代谢率的影响比较显著，不同的活动水平的能量代谢涉及许多因素。人体任何轻微的活动都可以使新陈代谢率提高，剧烈运动和重度体力劳动时，新陈代谢可超过安静状态时的很多倍，短时间的爆发性运动，新陈代谢可达安静状态的10~20倍。本文主要研究人体处于站立静止、静坐、站立休息或轻微活动状态，在此活动水平下我们认为人体基本无做功，此时，人体新陈代谢全部用于产热。人体的新陈代谢率可以通过查表3-1获得，此时可得人体处于站立、静止或轻微的活动状态时单位面积的代谢产热率为70W/m²，本文取人体单位面积产热为70W/m²，即W=70W/m²。

表 3-1 不同活动强度条件下的人体代谢率

活动类型		代谢率	
		W/m ²	met
休息	睡眠	40	0.7
	躺着	45	0.8
	静坐	60	1.0
	站着休息	70	1.2
步行（在水平面上）	3.2km/h(0.9m/s)	115	2.0
	4.3km/h(1.2m/s)	150	2.6
	6.4km/h(1.8m/s)	220	3.8
办公活动	静坐阅读	55	1.0
	写字	60	1.0
	打字	65	1.1
	坐着整理文档	70	1.2
	站着整理文档	80	1.4
	来回走动	100	1.7
	提重物/打包	120	2.1
驾车/驾驶飞机	驾驶小汽车	60~115	1.0~2.0
	常规飞行	70	1.2
	导航飞行	105	1.8
	战斗飞行	140	2.4
	驾驶载重车	185	3.2
各项居家活动	做饭	95~115	1.6~2.0
	打扫卫生	115~200	2.0~3.4
	坐着的重肢体活动	130	2.2
各种休闲活动	跳交谊舞	140~255	2.4~4.4
	体操/训练	175~235	3.0~4.0
	乒乓球单打	210~270	3.6~4.0
	篮球	290~440	5.0~7.6
	摔跤比赛	410~505	7.0~8.7

3.3.1.2 人体表面积

人体的能量代谢与体表面积有一定的内在联系，基本成正比。对于人体的不同部位，体表面积不同，产生的热量也不相同。要得到人体产热量，知道了单位面积的产热量后，需要确定人体体表面积，最后得到人体产热。人体的体表面积同样是比较难以测量的，通常用一些经验公式，较为常用的人体体表面积公式是 Dubois 公式和 Stevenson 公式。

Dubois 公式^[53]为：

$$S = k \cdot w^{0.425} \cdot h^{0.725} \quad (3.12)$$

式中： S ：人体体面积的数值，单位为 m^2 ；

w ：人体体重的数值，单位为 kg ；

h ：人体身高的数值，单位为 m ；

K ：不同人种常数。

Dubois 公式适用于欧美人群的体表面积计算，亚洲人与欧美的体型有很大的差异，针对于亚洲人群，我们主要用 Stevenson 的金典面积公式计算人体体表面积。

Stevenson 公式^[53]为：

$$S = 0.0061 \times h + 0.0128 \times w - 0.1529 \quad (3.13)$$

S ：人体体面积的数值，单位为 m^2 ；

w ：人体体重的数值，单位为 kg ；

h ：人体身高的数值，单位为 m 。

3.3.1.3 有效体表面积百分比

本文主要研究人体躯干部位，人体四肢不考虑，有效体表面积并非人体总的体表面积，人体产热量主要考虑躯干部位的产热量。根据 ISO9920 人体划分，人体各个部分面积占总体体表面积的百分比 N 如下图 3.4 所示，根据各个部位的面积比和人体总的体表面积，可以得出人体躯干部位的有效体表面积 A_b 。

即人体有效表面积为：

$$A_b = S \cdot N \quad (3.14)$$

S ：人体总体体面积的数值，单位为 m^2 ；

N ：人体各部位面积占人体总体体表面积的百分比。

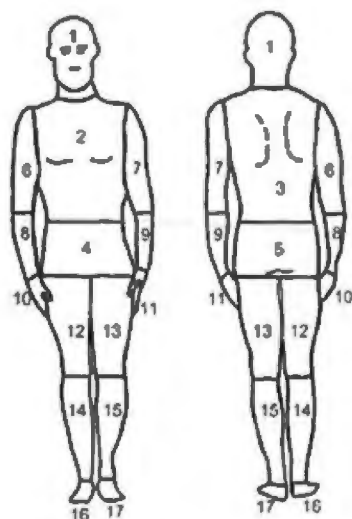
相变防护服是背心结构款式，作用于人体的有效部位为胸部、背部、腹部、臀部。由于相变防护服的衣长未完全覆盖腹部和臀部，大约覆盖腹部和臀部的一半，因此取腹部和臀部有效面积的二分之一，根据 ISO9920 人体划分胸部、背部、腹部、臀部四个部位面积比分别为 10.2%、9.2%、6.1%、6.6%。

人体有效体表面积百分比系数为：

$$N = 10.2\% + 9.2\% + \frac{6.1\%}{2} + \frac{6.6\%}{2} = 25.75\% \quad (3.15)$$

将方程(3.15)代入公式(3.14)可得人体有效体表面积为：

$$A_b = S \cdot N = \left(10.2\% + 9.2\% + \frac{6.1\%}{2} + \frac{6.6\%}{2}\right) = 25.75\% S \quad (3.16)$$



Segment	%total area
1 Head and neck	8.7
2 Chest	10.2
3 Back	9.2
4 Abdomen	6.1
5 Buttocks	6.6
6 Right upper arm	5.0
7 Left upper arm	5.0
8 Right lower arm	3.1
9 Left lower arm	3.1
10 Right hand	2.5
11 Left hand	2.5
12 Right thigh	9.2
13 Left thigh	9.2
14 Right calf	6.1
15 Left calf	6.1
16 Right foot	3.7
17 Left foot	3.7
Total	100

图 3.4 人体部位划分^[70]

综合以上分析将各个参数代入公式 (3.10) 可得人体产热为:

$$\Delta H = 18.025 \cdot S \quad (3.17)$$

S: 人体表面积数值, 单位为 m^2 ;

w: 人体体重的数值, 单位为 kg ;

h: 人体身高的数值, 单位为 m 。

3.3.2 系统与环境的对流热交换

在低温环境中, 人体-相变防护服系统的温度高于外界环境温度, 系统通过空气流过系统外表面将热量传递到外界低温环境中, 这是着装人体与环境进行热交换的方式之一。人体处于空气中, 当空气中无风作用或风速很小时, 发生自然对流, 使得系统周围产生一股热上升气流, 着装人体系统与外界不断进行对流换热。

着装人体系统与外界低温环境的对流热交换^[66]为:

$$\Delta C = h_c(T_{cl} - T_a)A_c = f_{cl} \cdot f_c \cdot A_b \cdot h_c(T_{cl} - T_a) \quad (3.18)$$

ΔC : 单位时间的热流量, 单位为 w ;

f_{cl} : 服装面积因子;

f_c : 服装有效对流面积系数;

h_c : 对流换热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

T_{cl} : 着装人体系统最外层服装外表面的温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

T_a : 外界低温环境的温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

A_b : 人体有效体表面积, 单位 m^2 。

对于公式中的参数, 人体有效体表面积已经得出, 还需要确定服装面积因子、服装有效对流面积系数、对流换热系数等参数。

3.3.2.1 对流换热系数

在自然对流情况下, 对流换热系数与系统外表面的温度与外界低温环境中空气温度的温差有关, 随着温差的增大而增加。人体处于不同姿态, 其对流换系数也各不相同, 一般人体坐立时的对流换热系数要大, 站立时的对流换热系数要小。热湿舒适性研究中常用的对流换热系数公式^[66]为:

$$h_c = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (3.19)$$

对流换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关, 不仅决定于流体的物性以及系统表面的形状, 而且还与空气流速有密切的关系。由于影响对流换热系数的因素太多以及外部形状的特殊性, 对流换热量难以准确求解, 即使整个系统表面的温度完全一致, 处在温度完全一致的气流平直稳定的空气中, 各个部位的对流换热量也会有明显的不同。

根据不同的应用条件和范围, 迄今为止, 国外学者总结和提出了一些特定条件下的对流换热系数理论值, 我们可以根据使用条件的不同加以选择。在自然对流情况下, 不同的对流换热系数见表 3-2。对于人体处于静止站立或者轻微活动状态, 环境风速非常小的时候 ($v < 0.1\text{m/s}$), 由表 3-2 可得, 对流换热系数值为 4.0。

表 3-2 不同应用范围下的对流换热系数

	对流换热系数	提出者	适用条件	说明
自然对流	4.0	Sppennan etc, 1972	$0 < v < 0.15$	站立于空气中的人体
	4.1	Rapp, 1973	$0 < v < 0.25$	理论值, 推荐用于静坐的人
	3.1	Mitchell, 1974	$0 < v < 0.2$	静坐于空气中的人体
	3.0	Nishi & Gagge, 1970		静止空气中的静止的人体

3.3.2.2 服装表面因子

服装表面因子为着装后外表面积与裸体时外表面积的比值, 其值恒大于 1, 与服装固有热阻有密切的关系。现有的计算服装面积因子方法主要有: 采用拍照称重法、

像素替代法、三维扫描技术法以及各种工程软件等方法。不同的计算方法下测量的服装面积因子值也是有一定差异的。目前,有很多学者研究服装面积因子,或者是进一步修正服装表面因子。本文采用面积因子公式为^[53]:

$$f_{cl} = 1.0 + 0.15R_{cl} \quad (3.20)$$

其中: f_{cl} 为服装表面因子, 无量纲;

R_{cl} 服装的基本热阻, clo;

服装的面积因子与服装的固有热阻 (R_{cl}) 有关, 服装的固有热阻也称服装的基本热阻, 是指从皮肤到服装表面的热阻, 排除着装后人体体表面积增大带来的影响。热阻取值的方法有暖体假人测试法或计算法, 本文热阻取值用计算法。由传热学可知, 服装基本热阻 R_{cl} 和衣服与风流间的对流换热系数 h_c 互为倒数^[71], 此时热阻的单位为 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, 1clo 就等于 $0.155^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。

$$R_{cl} = 1/h_c \quad (3.21)$$

将公式 (3.21) 代入公式 (2.20), 并代入数值 0.155 可得:

$$f_{cl} = 1.0 + 0.97 \cdot \frac{1}{h_c} \quad (3.22)$$

3.3.2.3 服装有效对流面积系数

着装人体处于不同的姿态, 其有效对流换热面积百分数也不各相同。一般来说, 处于坐着的人体的对流换热面积百分数要小于人体站立时的对流换热面积百分数。人体站立时有效对流换热的面积占总体面积的 94.2%, 而坐姿时仅为 86%^[72]。相变防护服为背心结构, 本文取有效对流面积占背心总体面积的 94.2%, 此时对流换热系数 f_c 的值为 94.2%。

通过以上分析, 将公式 (3.22) 代入公式 (3.18), 并将各个参数值代入公式后可得人体-相变防护服系统在单位时间内与低温环境的对流换热为:

$$\Delta C = 4.68A_b \cdot (T_{cl} - T_a) \quad (3.23)$$

3.3.3 系统与外界环境的辐射换热

在低温工作环境中, 人体-相变防护服系统的温度要高于外界环境的温度, 系统会不断的与低温环境发生辐射散热, 这是系统与环境的另一种热交换方式, 而且着装人体系统与环境的温差越大其辐射换热多。人体-相变防护服系统与环境的辐射散热遵循斯特潘—玻尔兹曼定律, 系统与环境的辐射热交换^[66]为:

$$\Delta R = h_r(T_{cl} - T_r)f_{cl}A_b = 4\varepsilon\sigma f_r\left(\frac{T_{cl}+T_r}{2} + 273\right)^3 A_b f_{cl}(T_{cl} - T_r) \quad (3.24)$$

其中： $h_r = 4\varepsilon\sigma f_r\left(\frac{T_{cl}+T_r}{2} + 273\right)^3$

式中：

ΔR ：辐射换热量，单位是 W；

h_r ：辐射换热系数，单位是 W/(m²·K)；

ε ：着装人体外表面的发射率；

σ ：斯特潘—玻尔兹曼常量，取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

f_r ：有效辐射面积系数（着装人体的有效辐射面积与总外表面积之比，%）；

f_{cl} ：服装表面因子，无量纲；

T_{cl} ：系统外表面的温度，单位为℃；

T_r ：平均辐射温度，单位为℃；

A_b ：有效体表面积。

下面具体分析各个参数的确定：

3.3.3.1 有效辐射面积系数

目前使用的着装有效辐射面积系数值基本都是由实验测试得到的，一般取值为 0.7~0.85，其值的大小与人体的性别、身高、体重、体型的关系不大，与人体所处的姿势有关：对于处于站姿的人来说，有效辐射面积系数大约为 0.77；对于处于坐姿的人来说，有效辐射面积系数大约为 0.7；而对于处于蹲坐的人，其有效辐射面积系数最小，大约为 0.67^[66]。对于本文研究的背心式相变防护服，有效部位为胸部、背部、腹部、臀部，这里我们取有效辐射面积系数值为 0.77。

3.3.3.2 表面反射率

关于低温环境的辐射，颜色并不影响发射率。大多数的服装的发射率值约为 0.95，而人体皮肤的发射率最高，近似为 1，在一般关于辐射换热计算中，发射率可以取皮肤与服装发射率的均值为 0.97^[66]。本文主要研究的是相变防护服外表面与环境的辐射换热，所以相变防护服的表面发射率值取 0.95。

3.3.3.3 平均辐射温度

平均辐射温度是一个比较复杂的概念，与人体在室内所处的位置，着装以及人体的姿势有关，它的值与黑球温度计示值 t_g (℃)、风速 v (m/s)、气温 t_a (℃) 的经验

公式为 $t_r = t_g + 2.4F(t_g - t_a)$ ，其中 F 是量纲为 1 的系数，数值为风速的二次根。对于封闭空间内表面温度均为一致的黑体表面，并且对于人体所造成的辐射换热量与所研究的人所处的真实环境相等，那么该黑体表面的温度就是真实环境的平均辐射温度，当人体的机械效率为 0，环境的平均辐射温度等于环境空气温度 T_a [66]。

通过以上分析可得，将各个参数值代入公式 (3.24) 可得系统与环境的辐射热交换为：

$$\Delta R = 20.57 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_{cl} + T_r}{2} + 273 \right)^3 (T_{cl} - T_a) A_b \quad (3.25)$$

3.3.4 系统与环境的呼吸热损失

人从环境吸入空气，经过呼吸道到达肺泡，完成氧气与二氧化碳的交换后再呼出体外。在这一生理过程发生了两种热交换过程：一种是由于吸入和呼出的空气温度发生的变化，例如，吸入 2℃ 的空气，呼出 36℃ 的空气，就要从人体带走热量，这是人体呼吸对流热损失；另一种是由于吸入和呼出的空气湿度的变化，通常是呼出的气体中含水蒸气，这部分增加的水蒸气来自人体，要带走相应的汽化潜热，这是人体与环境的呼吸蒸发热损失。本文主要考虑人体与环境的呼吸对流热损失。

人体与环境的呼吸对流热损失 [66] 为：

$$B = 0.0014M(T_{ex} - T_a)A_b \quad (3.26)$$

式中， B 为人体呼吸对流热损失， W ， M 为人体新陈代谢率， W/m^2 ， T_{ex} 为人体呼出气体的温度，℃； T_a 为环境空气的温度，℃， A_b 为人体有效表面积， m^2 。

在低温环境条件下，呼出的气体的温度 [66] 为：

$$T_{ex} = 29 + 0.2T_a \quad (3.27)$$

由公式 (3.26) (3.27) 可得，人体在低温环境中的呼吸对流热损失为：

$$B = 0.0014M(29 - 0.8T_a)A_b \quad (3.28)$$

将公式 (3.17) 代入公式 (3.28)，并代入新陈代谢率值可得：

$$B = 0.025 \cdot (29 - 0.8T_a)S \quad (3.29)$$

3.3.5 相变潜热

相变潜热是单位质量的相变材料在相变过程中所吸收或释放出来的热量，石蜡相变材料的相变温度不是一个点，而是一定的温度范围。通过差式扫描量热法 (DSC) 来测试石蜡相变材料的潜热，差示扫描量热法作为一种强有力的分析工具，已经在许

多领域中得到了大量而广泛的应用, 诸如研究样品纯度、结晶度、固相反应、热分解、相变以及测定相图等等。

差示扫描量热法的基本原理, 是把试样和参比物放在热环境中以相同的速率升温或降温, 随着温度 T 的变化记录下单位时间内试样和参比物两者从周围热环境中所吸收热量差 ΔW 。在程序升温或降温的情况下, 单位时间内试样和参比物从外界所吸收的热量应该是相同的 (假如试样和参比物有相同的定压热容量), 直到发生了某种热事件, 如试样熔化、分解或结晶结构发生变化等。这时, 试样要从外界吸收额外的热量以供给其发生相变 (假定为吸热反应), 在记录仪上就表现为记录笔开始偏离基线, 如图 3.5 所示。

通过确定 DSC 曲线 (升温速率 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) 上峰的面积, 用峰面积来表示石蜡相变材料的相变潜热。相变材料为石蜡相变材料, 石蜡相变材料的相变温度不是一个点, 而是一定的温度范围。图 3.6 为几种最常用的面积法求相变潜热的传统处理方法^[73]。

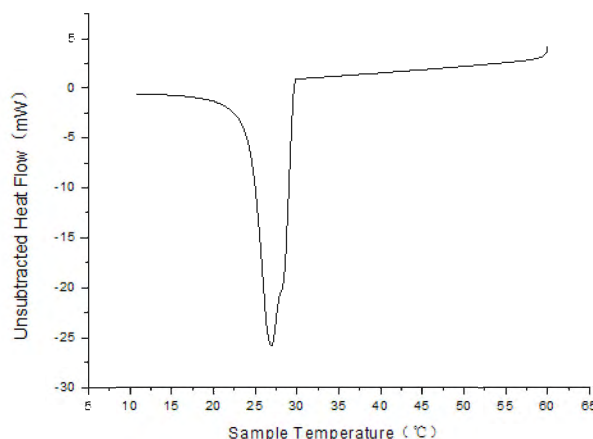


图 3.5 DSC 测试曲线

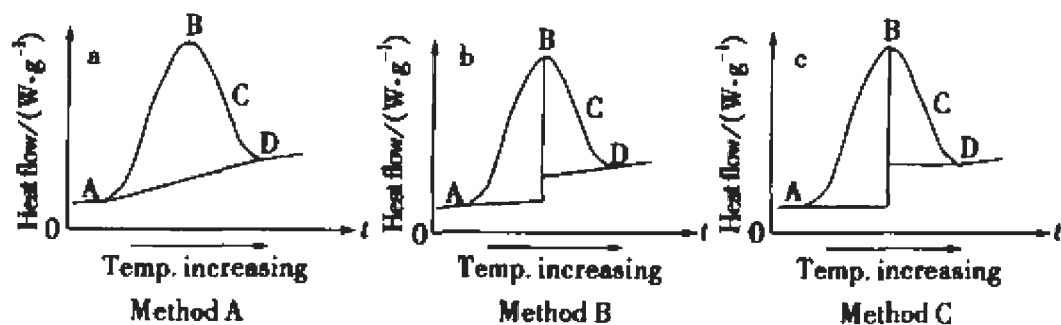


图 3.6 相变潜热面积法

图中, Method A 用线段 AD 上的峰面积来表示相变潜热值。另外一种求试样相

变潜热的传统办法是从相变曲线峰的顶点画一垂线，分别与相变前和相变后基线的延长线相交，求出前后基线延长线与峰线及顶点垂线相围面积之和，如图 MethodB，类似的另一方法见图 MethodC，与图 MethodB 略有不同的是以前后基线的水平延长线与峰线及顶点垂线相围面积之和表示相变潜热。

图所示的三中方法中，MethodA 的测量精度相对较高，这一方法目前用得较普遍，如在 TA 公司 DSC2910 型差热分析仪中就采用此种求潜热方法。本文使用 MethodA 的算法，通过差式扫描量热法（DSC）来测试石蜡相变材料的潜热，借助 origin 科技绘图及数据分析软件确定 DSC 曲线（升温速率 10℃/min）上峰的面积然后求的相变潜热，从而计算得到石蜡相变材料的相变总潜热。

$$Q = \Delta h \times m \quad (3.30)$$

Δh : 相变潜热, J/g;

m : 相变材料的质量, g。

$$\Delta h = \frac{a}{v \cdot m_1} \quad (3.31)$$

其中: a : 测得的相变材料 DSC 曲线的峰的面积值;

v : 测试相变材料 DSC 时, 程序的升温速率; 单位℃/min。

m_1 : DSC 测试试样的质量, 单位 g;

m : 相变材料总的质量, 单位 g。

3.4 理论计算公式的建立

通过查阅文献和资料对有关参数进行确定, 对方程进行简化处理, 得到一个简单实用的计算公式。在低温环境中传导换热 K 为零, 蒸发换热 E 为零, 综合以上分析, 将公式 (3.8) (3.18) (3.24) (3.26) 代入公式 (3.7) 后可得在低温环境中热平衡方程为:

$$Q = f_{cl} f_c A_b h_c (T_{cl} - T_a) \cdot t + 4 \varepsilon \sigma f_r \left(\frac{T_{cl} + T_r}{2} + 273 \right)^3 \cdot f_{cl} A_b \cdot t + 0.0014 M (T_{ex} - T_a) A_b - (M - W) \cdot S \cdot N \cdot t \quad (3.32)$$

整理后可得低温环境下相变防护服的防护时间为:

$$t = \frac{Q}{f_{cl} f_c A_b h_c (T_{cl} - T_a) + 4 \varepsilon \sigma f_r \left(\frac{T_{cl} + T_r}{2} + 273 \right)^3 \cdot f_{cl} A_b \cdot (T_{cl} - T_a) + 0.0014 M (T_{ex} - T_a) A_b - (M - W) \cdot S \cdot N} \quad (3.33)$$

将公式 (3.16) (3.17) (3.23) (3.25) (3.29) (3.30) 代入公式 (3.33), 再把各个参数代入公式, 低温环境中背心式相变防护服的防护时间为:

$$t = \frac{\Delta h \cdot m}{1.205S \cdot (T_{cl} - T_a) + 5.297 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_{cl} + T_a}{2} + 273 \right)^3 S(T_{cl} - T_a) - 0.02T_a S - 17.3S} \quad (3.34)$$

其中，人体表面积由公式（3.13）计算：

$$S = 0.0061 \times h + 0.0128 \times w - 0.1529 \quad (3.13)$$

w: 人体体重的数值，单位为 kg；

h: 人体身高的数值，单位为 m。

Δh : 相变潜热，单位为 J/g；

m: 相变材料的质量，单位为 g。

S: 人体体表面积，单位为 m^2 ；

T_{cl} : 系统外表面的温度，单位为 $^{\circ}C$ ；

T_a : 低温环境温度，单位为 $^{\circ}C$ ；

t: 相变防护服的防护时间，单位为 s。

3.5 本章小结

本章主要分析了低温环境中着装人体系统的热需求，根据热量平衡方程确立了相变防护服-人体系统在低温环境中的热平衡方程，并分析了各项的参数，最后得到了低温环境下背心式相变防护服的缓冲防护时间的计算公式。

(1) 通过人体舒适时的热量平衡方程以服装系统的热量传递得到了背心式相变防护服-人体系统处于低温时的热量平衡方程。

(2) 对相变防护服-人体系统的热量平衡方程中各个因子进行分析，并确定各个参数的取值方法，选择合适的参数。

(3) 根据相变防护服-人体系统热量平衡方程以及确定的各个参数确立了低温环境中相变防护服热缓冲的防护时间计算公式。得到了相变防护服的防护时间与相变防护服中相变材料的质量以及低温环境三者之间的计算关系。

第四章 防护时间的理论预测

公式的确立是为了实际应用,为了说明理论计算公式的准确性以及预测精度,需要对理论计算公式进行验证。在第三章公式的基础上,根据所适用条件范围,设定条件,选择合适的参数,将确定的参数值代入公式,计算其理论结果。本节首先在给定的条件下,确定各个参数,然后根据理论公式计算得出预测数值。

4.1 参数确定

根据上一章所得到的计算公式(3.34),低温相变防护服的防护时间计算需要确定环境温度值、着装人体最外层服装外表面温度、人体的表面积、相变潜热和相变材料的质量。在此根据公式所使用的范围内确定各个参数的取值,然后代入公式计算,得出相变防护服的防护时间计算值。

4.1.1 环境温度

根据 GB/T 14440-93《低温作业分级》对低温作业的定义(在生产劳动过程中,工作地点的平均气温小于等于 5℃的作业环境),计算中取低温环境温度分别为 2℃和 5℃,即 T_a 的取值有 2 和 5,并且是室内条件,无风无太阳辐射的作用。

4.1.2 人体表面积

为了更具代表性,选取中国正常男女青年,体型比较匀称,身体健康,年龄在 20~25 周岁,人体信息如表 4-1 所示。

表 4-1 人体参数值

编号	性别	年龄(周岁)	身高(cm)	体重(kg)
1 号	男	24	173	65
2 号	女	25	161	48

根据公式(3.13)将人体身高、体重数据代入人体体表面积公式,可以得到 1 号、2 号人体的总体表面积:

$$S_1 = 0.0061 \times 173 + 0.0128 \times 66 - 0.1529 = 1.75 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0.0061 \times 161 + 0.0128 \times 49 - 0.1529 = 1.46 \text{ m}^2$$

4.1.3 人体-相变防护服系统最外层表面温度

在实际情况中, 系统外表面的温度 T_{cl} 是随时间变化的非线性函数, 在本文中, 假设人体—相变防护服的显热放热阶段结束, 主要研究系统的潜热放热阶段, 在此阶段, 系统处于稳定的热平衡, 系统外表面的温度可以取稳态时的平均值, 如表 4-2 所示, 列出了在不同环境温度不同相变防护服在稳定阶段时最外层外表面温度的平均值。

表 4-2 不同相变防护服外表面平均温度

质量 (g)	环境温 度 (°C)	编 号	外表面温度 (°C) (相变温度为 25°CPCM)	外表面温度 (°C) (相变温度为 30°CPCM)
950	2	1	20.1	19.5
		2	21.2	20.3
	5	1	21.5	20.0
		2	22.4	20.9
635	2	1	19.8	18.6
		2	20.6	19.3
	5	1	21.6	19.2
		2	22.2	19.7

4.1.4 相变潜热

通过差式扫描量热法 (DSC) 来测试石蜡相变材料的潜热。将准备好的复合 PCM 样本真空干燥后, 在 NETZSCH DSC 204 F1 型差示扫描量热仪上测量 -10—60°C 范围的升降温曲线, 扫描速度为 10°C/min, N₂ 保护。升降温过程是先将复合 PCM 样本在 -10°C 维持 1min 后, 由 -10°C 升温至 60°C, 在 60°C 时保持 1 分钟, 再由 60°C 降温至 -10°C。

为了避免样本误差过大, 每一种 PCM 材料取 3 个样本, 分别用 DSC 测试其潜热值, 取 3 个样本的潜热值的平均值作为实际潜热值。如图 4.1 为相变温度为 25°CPCM 的 DSC 测试曲线 (样本质量为 0.0017g), 图 4.2 为相变温度为 30°CPCM 的 DSC 测试曲线样本质量为 0.0019g)。

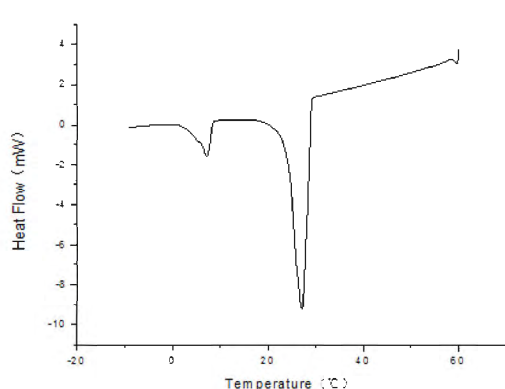


图 4.1 相变温度为 25°CPCM 的 DSC 曲线

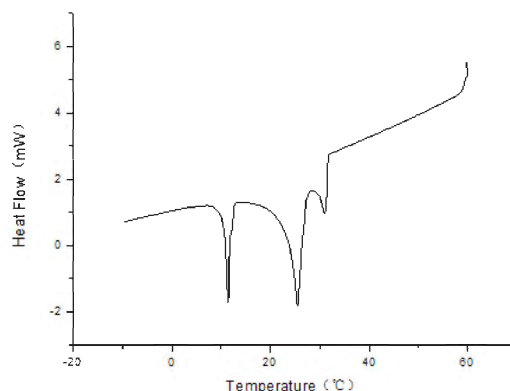


图 4.2 相变温度为 30°CPCM 的 DSC 曲线

利用 origin 科技绘图及数据分析软件分析 DSC 测试数据。将 DSC 测试曲线的数据导入到 origin 中, 分别求得相变温度为 25°CPCM 的 DSC 曲线峰的面积和相变温度为 30°CPCM 的 DSC 曲线峰的面积。由公式 (3.30) 和公式 (3.31) 可以计算不同相变材料的相变潜热值。表 4-3 列出了不同相变材料不同质量的总潜热值。

表 4-3 相变材料的总潜热

PCM 种类	潜热 (J/g)	质量 (g)	总潜热(J)
相变温度为 25°C	134.74	950	128003
		635	85694.64
相变温度为 30°C	107.78	950	102391
		636	68548

4.2 理论计算

将选取的参数值组合, 然后将各个组合参数分别代入公式 (3.34) 中, 计算出在不同条件下的相变防护服的缓冲防护时间, 参数组合信息如表 4-4 所示。

表 4-4 各个参数组合信息

计算编号	相变温度	相变潜热 (J/g)	质量 (g)	环境温度 (°C)	人体表面积 (m²)	外表面温度 (°C)
t ₁	25°C	134.74	950	2	1.75	20.1
t ₂					1.46	21.2
t ₃				5	1.75	21.5
t ₄					1.46	22.4
t ₅			635	2	1.75	19.8
t ₆					1.46	20.6
t ₇				5	1.75	21.6
t ₈					1.46	22.2
t ₉	30°C	107.78	950	2	1.75	19.5
t ₁₀					1.46	20.3
t ₁₁				5	1.75	20.0
t ₁₂					1.46	20.9
t ₁₃			635	2	1.75	18.6
t ₁₄					1.46	19.3
t ₁₅				5	1.75	19.2
t ₁₆					1.46	19.7

4.2.1 计算过程

不同种类的相变材料，不同含量，不同环境温度参数值代入公式 (3.34) 后计算相变防护服的防护时间。

$$t = \frac{\Delta h \cdot m}{1.205S \cdot (T_{cl} - T_a) + 5.297 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_{cl} + T_a}{2} + 273 \right)^3 S(T_{cl} - T_a) - 0.02T_a S - 17.3S}$$

1) 相变温度为 25°CPCM，相变材料的质量为 950g，相变总潜热为 128003J，环境温度为 2°C，对于 1 号人体，有效体表面积为 0.45m²，外表面温度 T_{cl} 为 20.1°C，；对于 2 号人体，有效体表面积为 0.38m²，外表面温度 T_{cl} 为 21.2°C 代入公式计算相变防护时间为：

$$t_1 = 2770s$$

$$t_2 = 2954s$$

2) 相变温度为 25°CPCM，相变材料的质量为 950g，相变总潜热为 128003J，环境温度为 5°C，对于 1 号，有效体表面积为 0.45m²，外表面温度 T_{cl} 为 21.5°C，对于 2 号，有效体表面积为 0.38m²，外表面温度 T_{cl} 为 22.4°C 代入公式计算相变防护时间为：

$$t_3 = 3290s$$

$$t_4 = 3428s$$

3) 相变温度为 25℃PCM, 相变材料的质量为 636g, 相变总潜热为 85694.64J, 环境温度为 2℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 19.8℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 20.6℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_5 = 1912\text{s}$$

$$t_6 = 2089\text{s}$$

4) 相变温度为 25℃PCM, 相变材料的质量为 636g, 相变总潜热为 85694.64J, 环境温度为 5℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 21.60℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 22.2℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_7 = 2090\text{s}$$

$$t_8 = 2320\text{s}$$

5) 相变温度为 30℃PCM, 相变材料的质量为 950g, 相变总潜热为 102391J, 环境温度为 2℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 19.5℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 20.3℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_9 = 2370\text{s}$$

$$t_{10} = 2496\text{s}$$

6) 相变温度为 30℃PCM, 相变材料的质量为 950g, 相变总潜热为 102391J, 环境温度为 5℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 20℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 20.9℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_{11} = 3056\text{s}$$

$$t_{12} = 3226\text{s}$$

7) 相变温度为 30℃PCM, 相变材料的质量为 636g, 相变总潜热为 68548J, 环境温度为 2℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 18.6℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 19.3℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_{13} = 1748\text{s}$$

$$t_{14} = 1898\text{s}$$

8) 相变温度为 30℃PCM, 相变材料的质量为 636g, 相变总潜热为 68548J, 环境温度为 5℃, 对于 1 号, 有效体表面积为 0.45m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 19.2℃, 对于 2 号, 有效体表面积为 0.38m^2 , 外表面温度 T_{cl} 为 19.7℃代入公式计算相变防护时间为:

$$t_{15} = 2285\text{s}$$

$$t_{16} = 2499\text{s}$$

4.2.2 计算结果

不同种类的相变防护服，在不同相变材料的含量，不同的低温环境条件下，根据公式计算所得到的理论结果如表 4-5 和 4-6 所示：

表 4-5 相变温度为 25℃相变防护服防护时间计算结果

质量 (g)	环境温度 (℃)	编号	时间 t(s)	时间 (min)
950	2	1	2770	46
		2	2954	49
	5	1	3290	55
		2	3428	57
635	2	1	1912	31
		2	2089	35
	5	1	2090	35
		2	2320	39

表 4-6 相变温度为 30℃的相变防护服防护时间计算结果

质量 (g)	环境温度 (℃)	编号	时间 t(s)	时间 (min)
950	2	1	2370	39
		2	2496	41
	5	1	3056	51
		2	3226	53
635	2	1	1748	29
		2	1898	31
	5	1	2285	38
		2	2499	41

4.4 本章小结

本章根据低温环境下相变防护服的防护时间的计算公式，确定了具体的变量值，将变量参数代入计算公式中，得到了相变防护服缓冲防护时间的计算值。

根据材料和温度的不同组合，相变防护服分为四种，每一种的环境温度为两种：2℃的低温与 5℃的低温。每一种温度计算两次，即人体参数为两个，最后得到 16 组计算数据。

第五章 相变低温防护服热需求计算实验验证

通过理论计算公式我们可以得到不同环境条件,不同相变材料种类和质量含量的防护服的防护时间。为了说明理论计算公式的准确性以及预测精度,对于设定的具体参数代入公式后得到的理论计算值,还需要通过设计实验对理论计算公式进行验证。这一章我们将讨论在设定的参数下,进行实验测试,将实验结果数据与理论计算值进行对比。根据实验方案,在人工气候室进行实验,实验分为真人实验和暖体假人实验,以真人实验为主。

5.1 真人实验设计

上一章主要讨论相变低温防护服的热需求,得出了预测时间的理论计算公式,同时根据理论计算公式,代入具体的数值,得到了在不同低温环境中,不同的相变材料种类,不同的相变材料含量的相变防护服的防护时间的计算值。那么实验方案要与上一章的设定条件相符合,这样才有对比性和准确性。

5.1.1 实验方案

根据理论计算的设定值,确定实验参数。PCM 为相变温度 25℃和相变温度为 30℃的相变材料,实验方案设计如表 5-1 和 5-2 所示。

表 5-1 相变温度为 25℃的 PCM 实验方案

序号	试验组合		
	PCM 质量 (g)	环境温度(℃)	受试者编号
1	950	2	1
2	950	2	2
3	950	5	1
4	950	5	2
5	636	2	1
6	636	2	2
7	636	5	1
8	636	5	2

表 5-2 相变温度为 30℃ 的 PCM 实验方案

序号	试验组合		
	PCM 质量 (g)	环境温度(℃)	受试者编号
1	950	2	1
2	950	2	2
3	950	5	1
4	950	5	2
5	636	2	1
6	636	2	2
7	636	5	1
8	636	5	2

5.1.2 受试者

受试者为中国成年男女青年, 年龄在 20~25 周岁, 身体健康, 体型匀称。受试者参数如表 5-3 所示。

表 5-3 受试者参数信息

编号	性别	年龄 (周岁)	体重 (kg)	身高(cm)
1 号	男	24	65	173
2 号	女	25	48	161

5.1.3 实验仪器

温度记录仪: 杭州路格科技有限公司生产的智能温度记录仪 L93-8, 有八条通路, 可以同时记录 8 个不同环境的温度变化情况。测量范围为-40~100℃, 测量精度为±0.5℃, 分辨率为 0.1℃, 记录间隔为 2 秒到 24 小时, 任意可调。用来测试皮肤温度, 舒适层温度, 相变材料层和服装最外层外表面的温度。温度记录仪如图 5.1 所示。

人工气候室: 温度控制范围为-20~50℃, 如图 5.2 和 5.3 所示。

辐射加热仪器: 低温环境中, 测试相变防护服的冷防护作用, 相变材料此时是释放能量, 需要将相变防护服加热至完全相变。

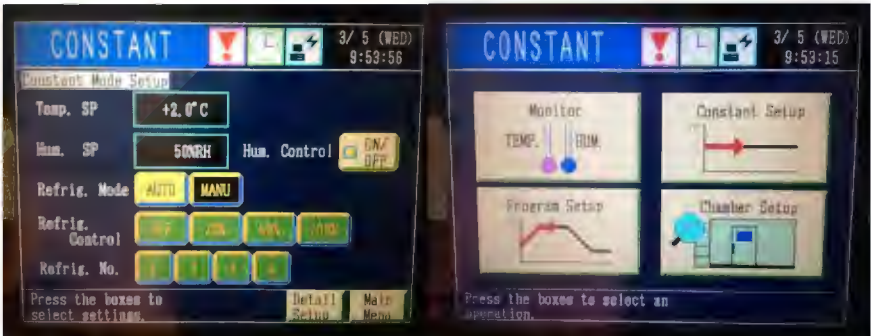
温度计: 医用体温计, 用于测量人体口腔温度变化。



5.1 温度记录仪



5.2 人工气候室



5.3 人工气候室操作界面

5.1.4 相变防护服

实验设计了四种 PCM 背心进行实验，四种 PCM 背心式防护服中相变材料包的间隙都为 6mm。PCM 背心的款式、号型、面料、里料完全一致，具体参数如表格 5-4 所示。四种 PCM 背心编号依次为 PCM 背心 A、PCM 背心 B、PCM 背心 C、PCM 背心 D，四种 PCM 背心分别为：

- PCM 防护服 A：相变温度为 25℃的 PCM+PCM 质量 950g；
- PCM 防护服 B：相变温度为 25℃的 PCM+PCM 质量 636g；
- PCM 防护服 C：相变温度为 30℃的 PCM+PCM 质量 950g；
- PCM 防护服 D：相变温度为 30℃的 PCM+PCM 质量 636g；

表 5-4 PCM 背心参数

名称	规格	用途
全棉斜纹布	经密 384/10cm 纬密 210/10cm	PCM 背心外层面料
针织布	克重 229g/m ²	PCM 背心里层面料
TPU	厚度 0.07mm	PCM 封装材料

5.1.5 主客观评价

本文主要测试特定温度环境下相变防护服的防护性能,采用人工气候室受控着装实验,生理客观数据和主观感觉评分相结合的方式进行实验。客观测试指标包括人体体温、皮肤和微气候温度;主观指标主要是服装热感觉主观评价等级。通过人体皮肤温度、微气候温度的变化结合主观感受来评价相变背心防护服的防护性能。

5.1.5.1 客观指标

(1) 皮肤温度

皮肤温度反应了人体冷热的应激程度,受外界影响比较大,可在 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 之间波动,人体感觉舒适的平均体表温度约为 33.5°C 。人体各部位的皮肤温度也不尽相同,在温度较低的环境中表现更为明显,躯干部位比较高。实验测试的皮肤温度是躯干部位的皮肤温度。

(2) 微气候温度

人们穿着服装时的舒适感主要取决于服装织物内空气层形成的微气候区。广义上,微气候区指人体皮肤与最外层服装表面之间所形成的空气层。狭义上,微气候区指人体皮肤与最内层服装之间的空气层的温度、湿度、气流等分布。不同外界条件、不同身体部位、不同服装层间的微气候分布各不同。众多研究发现,人体感到舒适的衣内微气候温度是 $(32\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度是 $(50\pm 10)\%$,风速是 $(25\pm 15)\text{cm}\cdot\text{S}^{-1}$ ^[74]。日本的铃木幸夫^[75]通过测定不同季节着装人体不同部位温度得出,低气温下,空气相对湿度中等(60%)时,身体躯干最内部空气层(皮肤和内衣)之间的温度在 32°C 左右,湿度稳定在 $40\%\sim 60\%$,被检者感觉比较舒适。本文测试的微气候是最内层服装外表面的温度,是躯干部位的微气候温度。

(3) 人体体温

人能维持生存的极限的体温不超过 43°C ,不低于 25°C 。代谢活动是人类生命活动的最基本特征,代谢活动在人体内表现为一系列的生化反应,而温度是保证生化反应正常进行的一个重要的因素,体温过高或者过低都会对体内的生化反应产生严重的影响。在实际中由于机体深部血液温度无法直接测量,往往以直肠温度、腋窝温度或者口腔温度等来代替核心温度,即人体体温。由于考虑实际方面等情况,本文采用测量口腔温度作为参考。

5.1.5.2 主观指标

在服装舒适性研究中，随着研究的深入，形成了很多综合性的指标来描述和评价着装人体的热舒适感觉，最为常用的是 Natick McGinnis 热舒适标尺和热感觉主观比例标尺。Natick McGinnis 热舒适标尺既可以用于热应力分析，也可以用于不同气候条件下的热安全评价；热感觉主观比例标尺是比较实用且简单的非比较比例标尺。本文的主观指标选用热感觉主观比例标尺，如表 5-5 所示。

表 5-5 热感觉主观比例标尺

标尺感觉值	感觉特征
-4	很冷
-3	冷
-2	凉
-1	稍凉
0	中性
1	稍暖
2	暖
3	热
4	很热

5.1.6 服装层间配置

在低温环境中，相变防护服主要是冷防护，本文主要研究相变防护服置于着装人体最外层。紧挨皮肤的舒适层为棉质 T 恤，外套为涤棉混纺带拉链的开衫。由于棉质衣物吸湿透气、手感比较柔软、接触冷感比较小、保暖性能比较好、而且防敏感，所以最内层服装选取棉质的 T 恤，穿着舒适；涤棉混纺织物既突出了涤纶的风格又有棉织物的长处，在干、湿情况下弹性和耐磨性都较好，尺寸稳定，缩水率小，具有挺拔、不易皱折、易洗、快干，保暖性好等特点，所以选择涤棉成分的服装在第二层，服装的最外层为相变背心。服装层间配置如图 5.4 所示。



图 5.4 服装层间配置

5.1.7 测试点位置

测试点的位置为两个，分别为左前胸、左后腰，如图 5.5 所示。测试的层间分别为皮肤层，舒适层，PCM 材料包，PCM 背心防护服外表面，每一个测试点进行一次测试，每次测试的位置是该点所对应的 4 个测试层间位置。

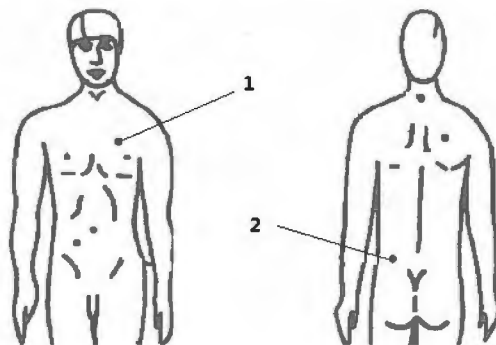


图 5.5 测试点的位置

5.2 实验过程

实验主要测试四件相变防护服，每一件防护中除了材料和质量不一样，其他的完全相同，每一件防护服的测试温度分别为 2°C 和 5°C ，受试者两个，即每一件相变防护服测试四次。在四种条件下每一种防护服测试一次，四件防护服的测试次数共为 16 次。以相变温度为 25°C PCM，相变材料的质量为 950g，环境温度为 2°C ，受试者为男生为例，其余实验的过程只需改变实验条件和受试者，其他的与此完全相同。实验过程图如图 5.6 所示。

1) 调节人工气候室的温湿度，分别设定为温度 2°C ，空气湿度为 50%。

2) 实验前，将温度探头 5 号和 6 号分别固定在 PCM 材料包相应的位置上，给相变防护服均匀加热，打开温度记录仪的软件，开始记录温度，等到温度上升到 50°C 后停止加热，并置于保温箱内，使相变防护服的温度更加均匀，此时温度会缓慢下降。

3) 受试者在室内静坐 20min，然后依次换上实验服装，棉质 T 恤和外套。下身穿上保暖裤，并套上保护袖套，避免胳膊和腿冻伤。然后将 1 号和 2 号探头分别固定在人体皮肤的左前胸和左后腰处，3 号和 4 号探头分别固定在舒适层的左前胸处和左后腰处，然后继续静坐。

4) 等到 5 号和 6 号探头温度下降到 40°C 的时候，开始给受试者穿上相变防护服，此时要快，避免相变防护服置于空气中温度下降过快。将 7 号和 8 号探头分别固定在

服装外表面的左前胸处和左后腰处。

5) 重启温度记录仪, 然后将温度记录仪脱机进入已经稳定的人工气候室中, 并记录此时进入低温环境时的时间点 D_1 , 受试者进入冷环境后静止站立于人工气候室中间, 并测量一次口腔温度, 记录一次主观感受。以后每隔十分钟记录一次主观感受, 每隔 20 分钟测量记录一次口腔温度。

6) 受试者在低温环境中处于静止状态, 期间没有喝水和进食等行为, 人工气候室无打开, 处于稳定状态。测试时间为两个小时, 两个小时后, 结束实验并记录结束时的时间点 D_2 , 停止温度记录仪, 受试者离开人工气候室, 将温度记录仪连接到电脑, 导出温度记录仪里的数据并保存。

7) 依次进行实验, 完成 16 组实验, 并记录保存每次的实验数据。



图 5.6 实验过程图

5.3 实验结果与分析

整个实验进行过程中, 为真实反映人体客观数据的变化趋势, 人体客观数据从开始记录, 温度记录仪每 10s 采集一次数据。

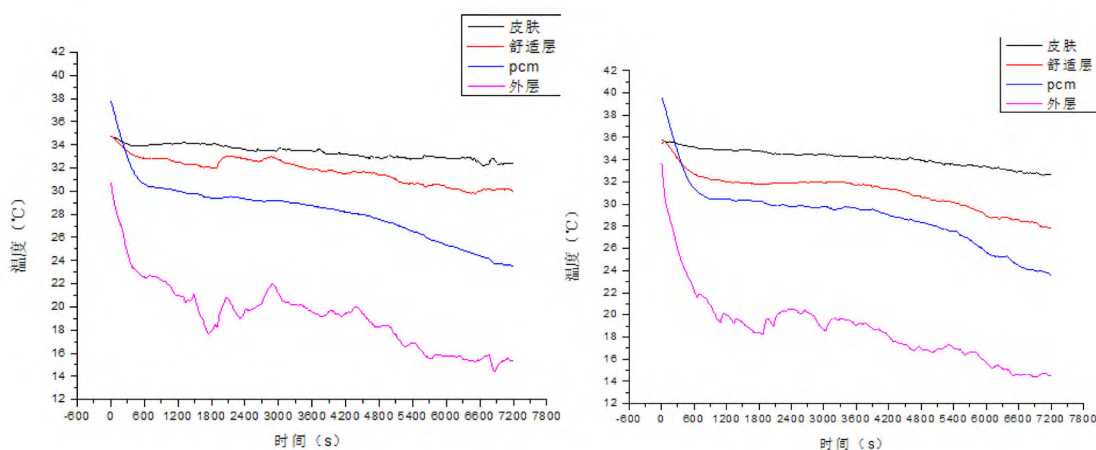
5.3.1 不同种类相变防护服的实验测试结果

取受试者进入人工气候室记录的时刻 D_1 与实验结束后记录的时刻 D_2 之间的数据为有效数据。由于着装每层的温度记录仪探头位置有两个, 每层记录两个位置的温度变化, 取两个点的温度的平均值作为该层的温度。将实验记录的数据导入 origin 科技绘图及数据分析软件中, 分别得出实验中测试的各层温度随时间变化的曲线图。图中右边从上往下曲线依次为第一条黑色的曲线表示受试者人体的皮肤温度随时间变化曲线, 第二条红色曲线表示紧挨皮肤的舒适层 T 恤外表面温度随时间的变化曲线, 第三条蓝色曲线表示相变材料包的温度随时间变化曲线, 第四条最下面的一条曲线表示着装人体系统最外层相变防护服外表面的温度随时间的变化曲线。

5.3.1.1 各层温度变化测试结果

(1) 受试者着装 PCM 防护服 A (相变温度为 25℃ 的 PCM, 相变材料的质量为 950g) 在低温环境中各层温度随时间变化的测试结果。

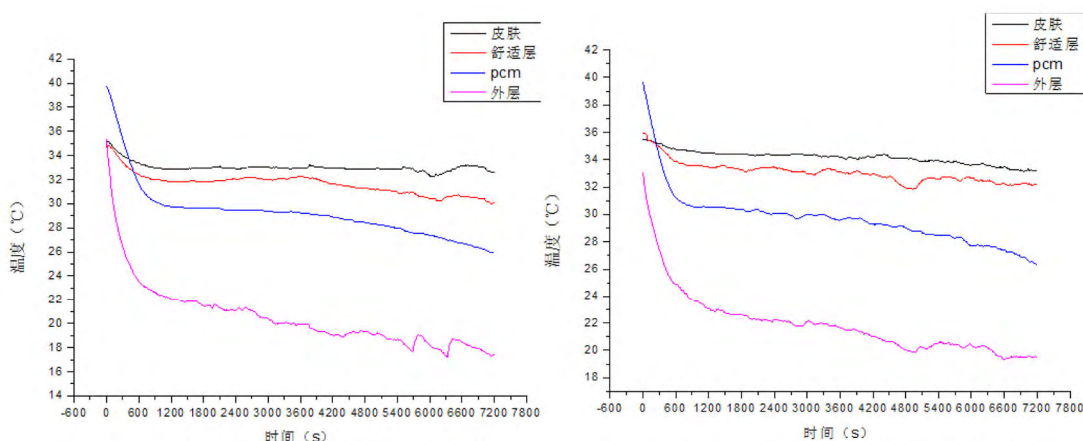
图 5.7 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 A 在环境温度为 2℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 a₁ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线; 图 b₁ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线; 图 5.8 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 A 在环境温度为 5℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 c₁ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。图 d₁ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。



a₁ 1 号受试者各层温度变化

b₁ 2 号受试者各层温度变化

图 5.7 着装 PCM 防护服 A 在环境温度为 2℃ 时各层的温度随时间的变化曲线



c₁ 1 号受试者各层温度变化

d₁ 2 号受试者各层温度变化

图 5.8 着装 PCM 防护服 A 在环境温度为 5℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

(2) 受试者着装 PCM 防护服 B (相变温度为 25℃ 的 PCM, 相变材料的质量为

636g) 在低温环境中各层温度随时间变化的测试结果。

图 5.9 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 B 在环境温度为 2℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 a₂ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 b₂ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 5.10 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 B 在环境温度为 5℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 c₂ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。图 d₂ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。

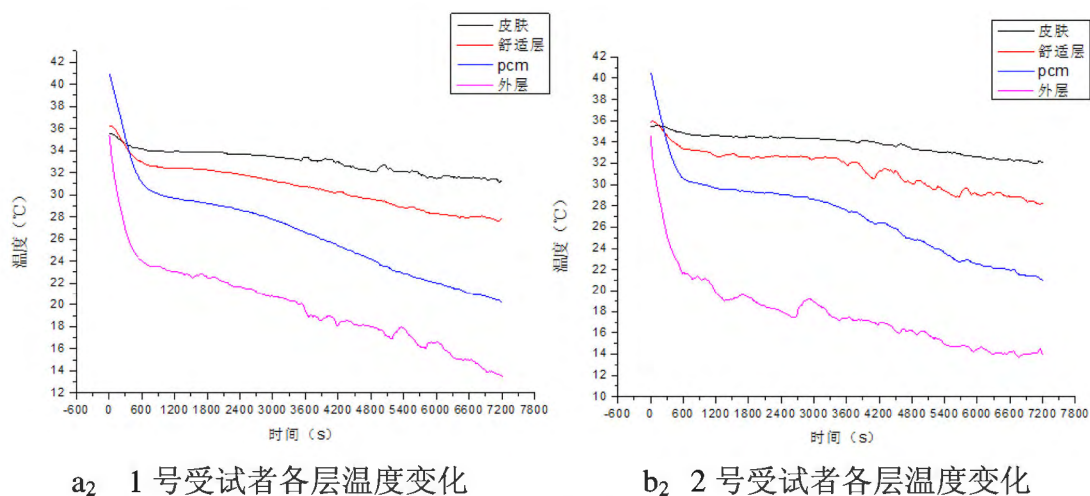


图 5.9 着装 PCM 防护服 B 在环境温度为 2℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

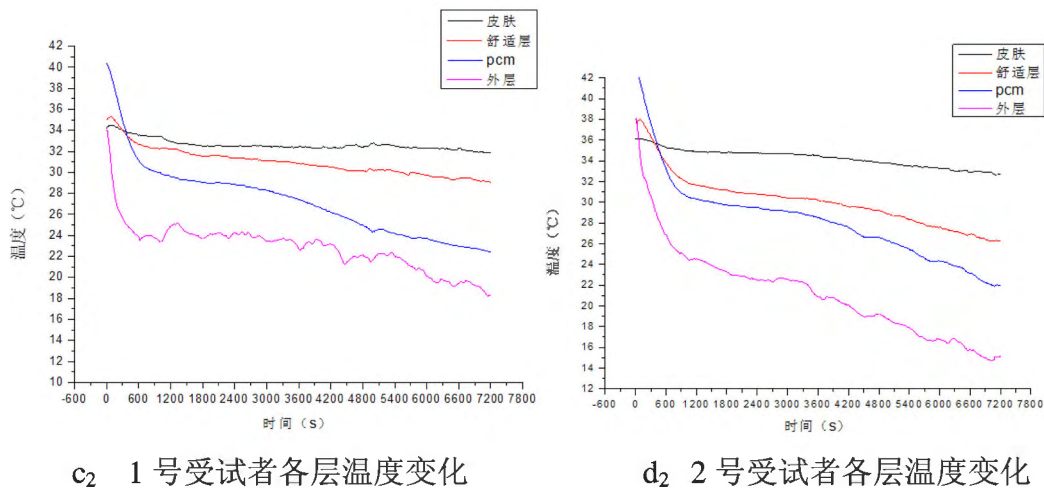


图 5.10 着装 PCM 防护服 B 在环境温度为 5℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

(3) 受试者着装 PCM 防护服 C (相变温度为 30℃ 的 PCM, 相变材料的质量为 950g) 在低温环境中各层温度随时间变化的测试结果。

图 5.11 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 C 在环境温度为 2℃、湿度为 50%

的条件下各层温度变化。图 a₃ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 b₃ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 5.12 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 C 在环境温度为 5℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 c₃ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。图 d₃ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。

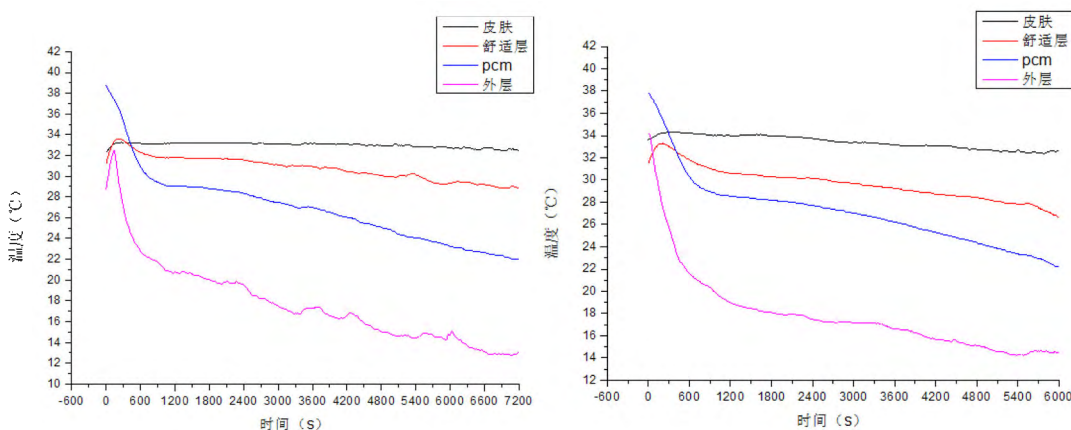
a₃ 1 号受试者各层温度变化b₃ 2 号受试者各层温度变化

图 5.11 着装 PCM 防护服 C 在环境温度为 2℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

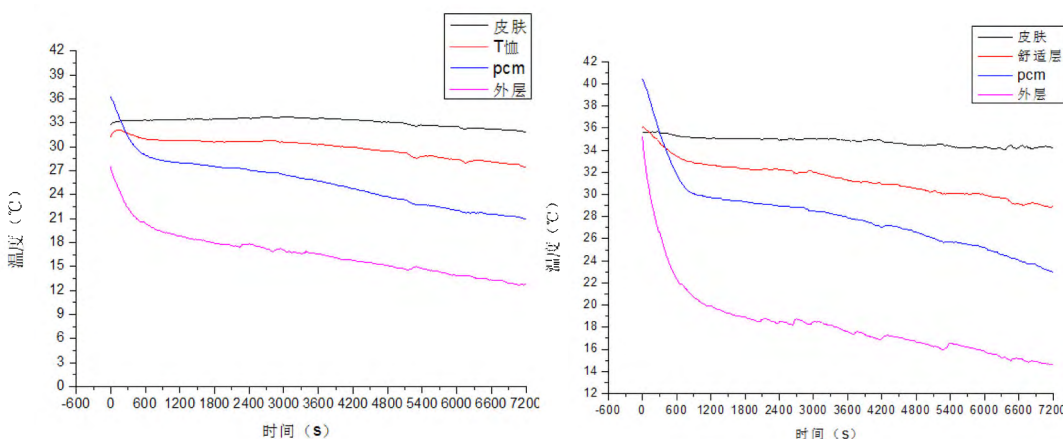
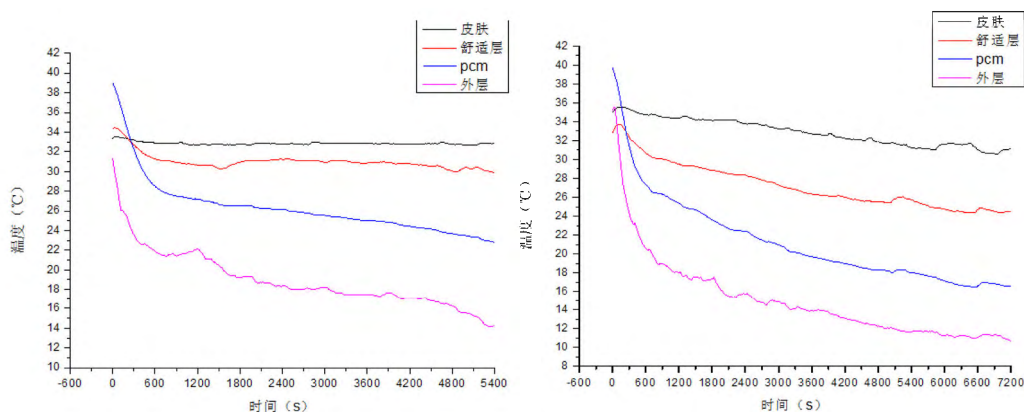
c₃ 1 号受试者各层温度变化d₃ 2 号受试者各层温度变化

图 5.12 着装 PCM 防护服 C 在环境温度为 5℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

(4) 受试者着装 PCM 防护服 D (相变温度为 30℃ 的 PCM, 相变材料的质量为 636g) 在低温环境中各层温度随时间变化的测试结果。

图 5.13 为 1 号和 2 号受试者着装 PCM 防护服 D 在环境温度为 2℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 a₄ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 b₄ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线；图 5.14 为 1 号和

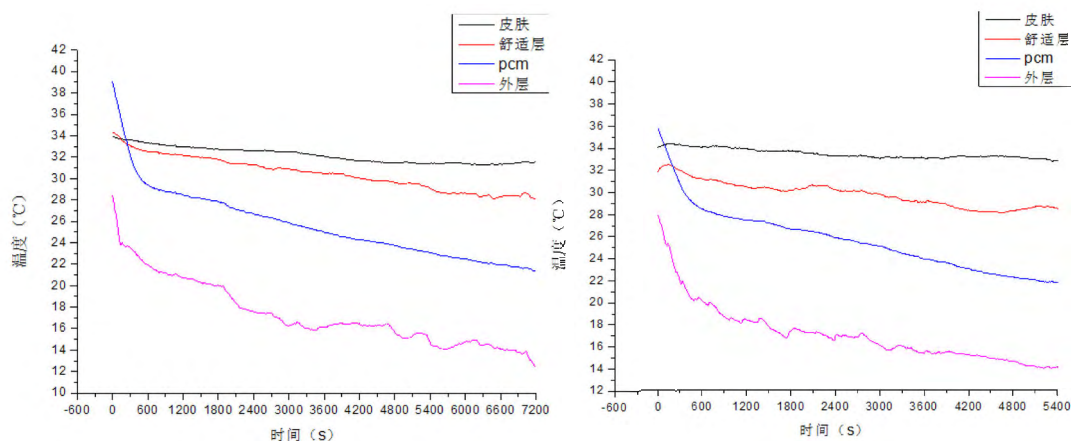
2 后受试者着装 PCM 防护服 D 在环境温度为 5℃、湿度为 50% 的条件下各层温度变化。图 c₄ 为 1 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。图 d₄ 为 2 号受试者测试体系中各层的温度随时间的变化曲线。



a₄ 1 号受试者各层温度变化

b₄ 2 号受试者各层温度变化

图 5.13 着装 PCM 防护服 D 在环境温度为 2℃ 时各层的温度随时间的变化曲线



c₄ 1 号受试者各层温度变化

d₄ 2 号受试者各层温度变化

图 5.14 着装 PCM 防护服 D 在环境温度为 5℃ 时各层的温度随时间的变化曲线

5.3.1.2 实验测试数据分析

图中第一条黑色曲线为温度记录仪探头记录的皮肤温度变化曲线，第二条红色曲线为温度记录仪探头记录的紧挨皮肤层的舒适层外表面的温度变化曲线，第三条蓝色为相变层相变材料包的温度变化曲线，第四条紫色为最外层相变防护服外表面的温度变化曲线。

(1) 相变材料层温度变化

由以上各图曲线可以看出,相变层的温度在最初是快速下降,然后再缓慢下降,最后又快速下降。第一阶段温度下降主要是显热放热,所以温度下降的很快,此时曲线的斜率变化比较大;中间阶段是相变材料的潜热放热阶段,曲线下降比较缓慢,斜率变化不大,曲线缓慢下降呈现水平状态;最后相变材料潜热放热结束后,进入显热放热阶段,曲线较前一阶段下降速度增大,曲线的斜率也有所增加,温度开始快速下降。但是曲线下降的趋势并不是骤变,这主要是因为虽然潜热已经结束,但是相变防护服是在穿着于人体外层,由于人体是不断向外部传热的,温度总是从温度高的方向传向温度低的方向,等到相变层相变材料的温度下降到一定值后,相变防护服开始吸收人体热量,与人体之间有一个热量相互传递的过程,热量传递到相变层,使得相变层的温度不会下降非常快。

借助于 origin 科技绘图及数据分析软件分析试验数据,主要分析 PCM 层温度变化曲线,由切线法可以得到相变材料相变过程的开始点与结束点,即取得相变防护服在不同低温环境中的潜热防护时间。如图 5.15 所示,曲线上拐点附近的两条切线的交点的对应的横坐标即为相变点。不同相变防护服在不同环境温度中的潜热防护时间的实验数值如表 5-6 所示。

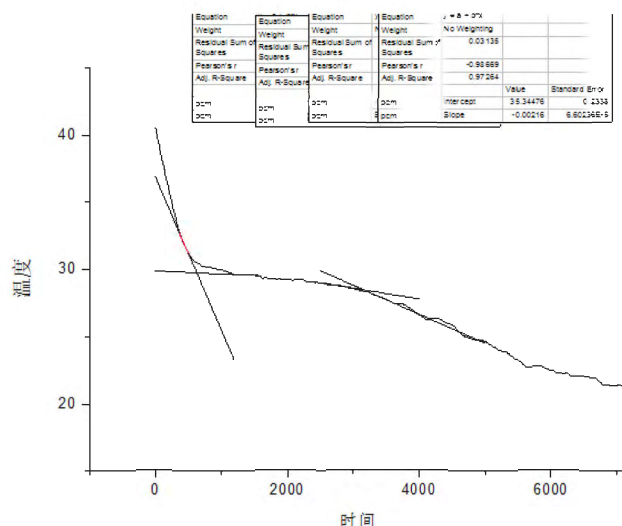


图 5.15 曲线拐点

表 5-6 不同相变防护服在不同环境温度中的防护时间实验测试值

种类	质量 (g)	环境温度 (°C)	编号	实验测试时间 t(s)
相变温度 为 25°CPCM	950	2	1	3050
		2	2	3150
		5	1	3500
		5	2	3620
	635	2	1	2150
		2	2	2300
		5	1	2250
		5	2	2500
相变温度 为 30°CPCM	950	2	1	2600
		2	2	2650
		5	1	3200
		5	2	3400
	635	2	1	2000
		2	2	2110
		5	1	2550
		5	2	2650

(2) 最外层外表面的温度变化

最外层相变防护服外表面的温度随着相变材料的温度变化而变化,最外层温度变化与相变材料层温度变化规律相似,首先快速下降,然后缓慢下降,最后快速下降;在显热放热阶段温度明显升高,随着显热放热结束,相变材料进入潜热放热阶段,温度开始缓慢下降,并维持在一定的温度范围内,当潜热放热结束后,温度下降速度开始不断加快。

(3) 皮肤层和舒适层温度变化

图中舒适层的温度为紧挨皮肤层的 T 恤外表面的温度,皮肤温度反映了身体活动的水平,是身体核心温度与环境温度进行热交换的中间站。皮肤温度直接受环境温度的影响,皮肤温度的高低则是决定热交换的数量和方向的基础^[76]。皮肤温度受环境的影响比较大,通常在 20~40°C 之间。一般,躯干部分的皮肤温度为 34~35°C^[77]。表 5-7 表示成年男子在不同季节,适当着装并感觉舒适时的人体皮肤温度分布情况。可以看到,低温环境中,人体感觉舒适时的皮肤温度比常温稍微低,躯干部位感觉舒适时的平均温度在 34°C 左右。

在潜热放热阶段,人体皮肤温度与舒适层的温度波动范围如表 5-8 所示。通常人体的皮肤温度基本保持在 $34 \pm 1^\circ\text{C}$,舒适层的温度基本保持在 30~34°C 范围内。众多研究发现,当裸体或者穿着少量服装的人感觉舒适时,各部位体表温度相接近,平均约为 33.5°C,衣内微气候温度为 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 10)\%$ 。身体任何部位的

皮肤温度与皮肤平均温度的差别在 $\pm 1.5\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 范围人体感觉舒适,若温度范围超过 $\pm 4.5^{\circ}\text{C}$,人体将有不舒适感^[49]。在相变潜热阶段,人体皮肤温度变化和微气候温度变化是处于舒适温度范围内。在低温环境中,由于相变防护服的作用,在一定时间内,皮肤温度和舒适层的温度会维持在一个比较稳定的范围内,使人体温度不会下降过快而受到伤害,从而起到防护作用,抵御外界低温损伤。

表 5-7 成年男子在不同季节,适当着装并感觉舒适时的人体皮肤温度分布^[78]

环境温度	头	脸	颈	胸	腹	腰	上臂	前臂	手	大腿	小腿	足	
春	15.0±2	31.4	32.2	34.3	34.1	34.8	35.0	32.8	30.2	26.0	31.2	30.0	25.0
	20.0±2	34.2	34.2	35.4	35.1	35.5	35.3	33.9	33.4	33.0	32.9	31.4	30.3
夏	26.5±2	34.9	34.9	35.2	35.0	35.0	35.2	34.1	34.6	35.0	33.6	33.3	34.8
秋	15.5±2	32.4	32.2	33.9	34.0	34.9	34.3	32.2	30.4	25.9	30.9	29.3	25.0
冬	7.0±2	28.8	29.3	33.6	34.0	34.5	34.3	32.2	27.4	18.5	28.9	27.2	20.1

表 5-8 人体皮肤温度和舒适层外表面温度波动范围

种类	质量(g)	环境温度(°C)	编号	皮肤温度波动范围(°C)	舒适层外表面温度波动范围(°C)
相变温度为 25°CPCM	950	2	1	34.2~33.45	33~32.2
		2	2	34.95~34.25	32.4~31.4
		5	1	33.15~32.85	32.25~31.8
		5	2	34.7~34.05	33.75~32.85
	635	2	1	34.05~33.6	32.75~31.6
		2	2	34.8~34.4	33.3~32.5
		5	1	33.5~32.45	32.45~31.2
		5	2	35.1~34.65	32.15~30.4
相变温度为 30°CPCM	950	2	1	33.25~33.05	32~30.09
		2	2	34.1~33.35	31.55~30.6
		5	1	33.7~33.25	31.15~30.25
		5	2	35.2~34.8	33.05~31.1
	635	2	1	32.9~32.65	31.25~30.2
		2	2	34.95~34.15	31.45~30.45
		5	1	33.4~32.55	32.6~30.95
		5	2	34.2~33.25	31.35~30.1

5.3.2 主观热感觉

热舒适感觉是人体对环境温度的舒适程度的主观感受。刚进入低温环境时，由于人体刚穿上相变防护服，热感觉基本都是暖，随着进入低温环境时间的增加，热舒适感觉评分逐渐减少，热感觉舒适程度降低。所处的低温环境温度越低，相变防护服中 PCM 的质量越少，热感觉舒适程度降低越快。受试者着装不同相变防护服在不同环境下的主观热感觉评分如图 5.16 到图 5.19 所示。

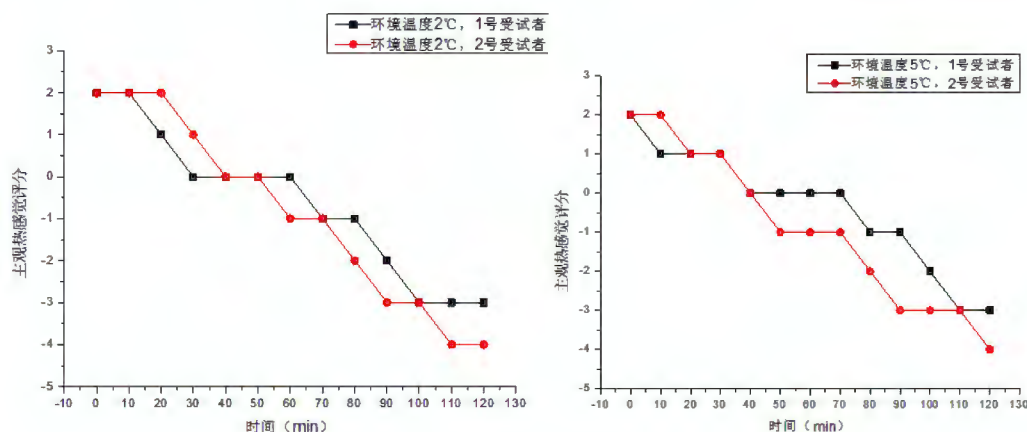


图 5.16 受试者着装相变防护服 A 主观热感觉评分

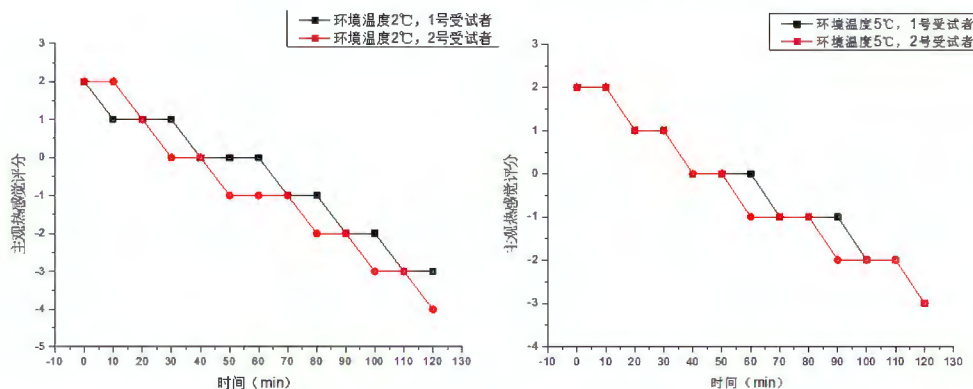


图 5.17 受试者着装相变防护服 B 主观热感觉评分

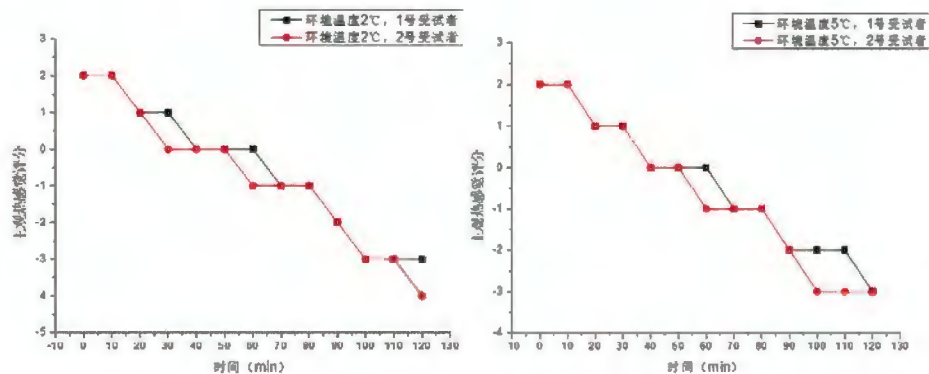


图 5.18 受试者着装相变防护服 C 主观热感觉评分

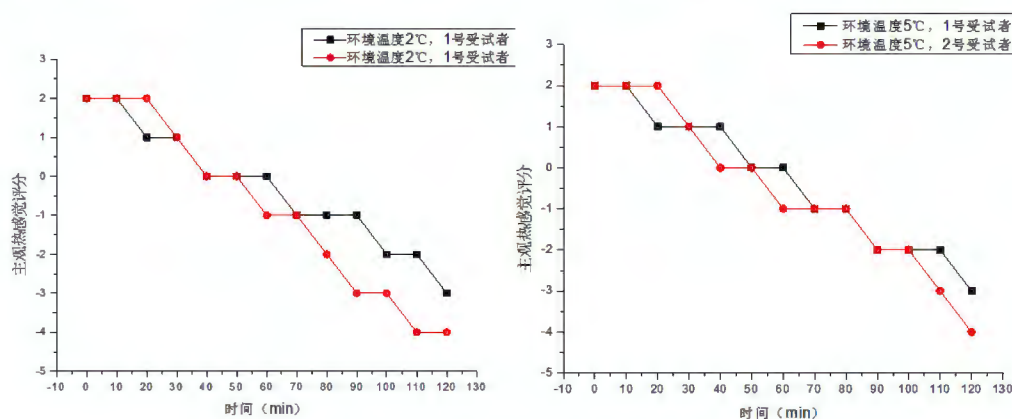
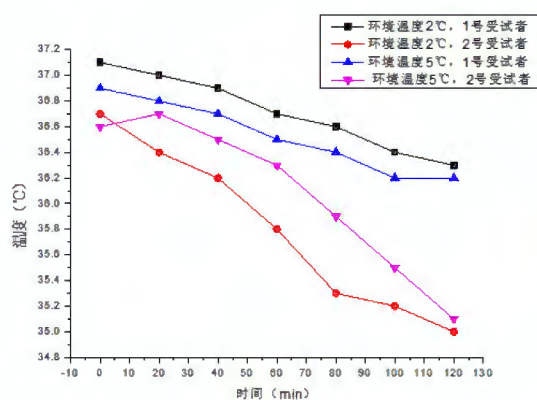


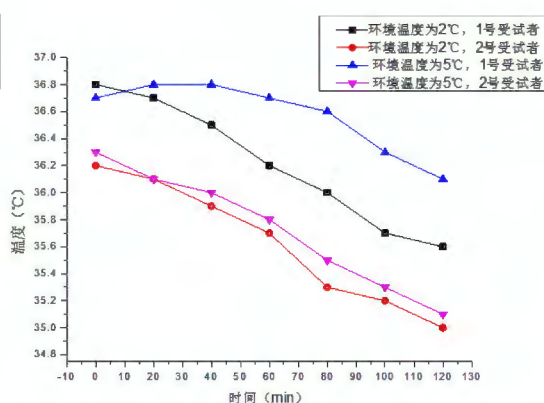
图 5.19 受试者着装相变防护服 D 主观热感觉评分

5.3.3 口腔温度温度变化

实验测试阶段, 20 分钟测试一次口腔温度, 人体口腔温度变化如图 5.20 到图 5.23 所示。随着时间的变化, 口腔温度是逐渐降低的。所处的低温环境越低, 相变防护服中 PCM 的质量越少, 口腔温度降低越快。



5.20 图着装相变防护服 A, 口腔温度变化图



5.21 着装相变防护服 B, 口腔温度变化

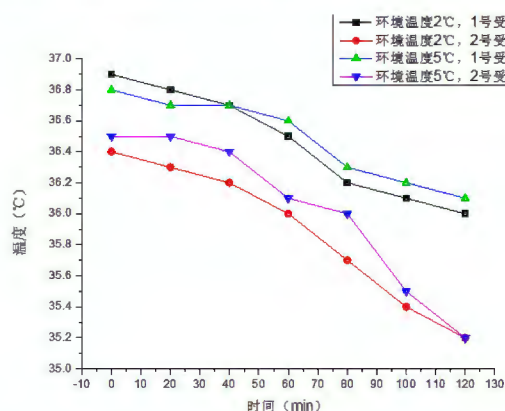
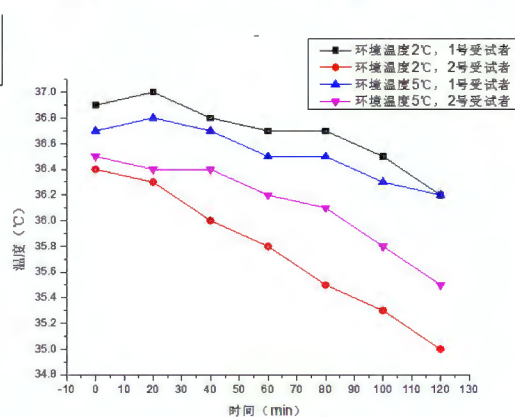


图 5.22 着装相变防护服 C, 口腔温度变化图



5.23 着装相变防护服 D, 口腔温度变化

在相变有效防护时间范围内,人体热舒适感觉评分和口腔温度变化范围如表 5-9 所示。在相变潜热防护阶段,人体热舒适感觉评分处于 2~-1 之间,主观感觉处于舒适可接受范围内,口腔温度基本保持在 36~37℃左右。由于相变材料的防护作用,人体基本维持平衡,人体热舒适感觉在可接受范围。

表 5-9 人体口腔温度和主观热感觉评分变化范围

种类	质量(g)	环境温度(℃)	编号	口腔温度变化(℃)	主观热感觉评分
相变温度为 25℃PCM	950	2	1	37.05~36.7	2~0
		2	2	36.55~35.8	2~-1
		5	1	36.85~36.5	1~0
		5	2	36.65~36.1	2~-1
	635	2	1	36.75~36.5	1~0
		2	2	36.2~35.8	2~-1
		5	1	36.8~36.7	2~0
		5	2	36.2~35.9	2~-1
相变温度为 30℃PCM	950	2	1	36.85~36.6	1~0
		2	2	36.35~36.1	2~-1
		5	1	36.75~36.6	2~0
		5	2	36.5~36.1	2~-1
	635	2	1	36.5~36.75	2~0
		2	2	36.35~36	2~0
		5	1	36.75~36.6	2~0
		5	2	36.45~36.3	2~-1

5.4 实验结果与计算结果比较

将实验测试所得到的时间与通过公式计算所得到的时间进行比较,如表 5-10 所示。可以看到,理论计算结果与实验测试结果相接近,数值相差不大。通过公式计算的结果与实验测试的结果之间有良好的-致性,实验测试结果要稍大于计算结果,计算结果与实验结果的误差百分比为小于 5%。

相变防护服中的相变材料的质量相同时,在 5℃的低温环境中的防护时间要大于 2℃的低温环境;当低温环境一样时,相变材料的质量大的,防护时间越长。在本文的研究条件下,相变防护服中的相变材料的质量越大,低温环境的温度越高,防护时间越长。并且,当质量减少三分之一时,即相变材料的质量从 950g 减少到 636g 时,

其他条件不变,相变防护服的理论计算防护时间也相应减少三分之一左右,实验测试防护时间同样也是相应减少三分之一左右。

表 5-10 相变防护时间理论计算与实验测试比较

种类	质量 (g)	环境温度 (°C)	性别	理论计算 时间 t(s)	实验测试 时间 t(s)	误差百分 比	差值 (s)
相变温度 为 25°CPCM	950	2	男	2770	2900	4.5%	130
		2	女	2954	3100	4.7%	146
		5	男	3290	3450	4.6%	160
		5	女	3428	3600	4.8%	172
	635	2	男	1912	2010	4.9%	98
		2	女	2089	2190	4.6%	101
		5	男	2090	2180	4.1%	90
		5	女	2320	2430	4.5%	110
相变温度 为 30°CPCM	950	2	男	2370	2490	4.8%	120
		2	女	2496	2600	4.0%	104
		5	男	3056	3200	4.5%	144
		5	女	3226	3390	4.8%	164
	635	2	男	1748	1840	5.0%	92
		2	女	1898	1990	4.6%	92
		5	男	2285	2400	4.7%	115
		5	女	2499	2600	3.9%	101

5.5 暖体假人实验

通过暖体假人实验进一步与公式计算值对比。实验所用的仪器与设备和真人实验相同。实验测试所用暖体假人为 Newton Thermal Manikin, 该暖体假人由 34 个区域组成, 每个区域可以单独控制。暖体假人的区域划分如图 5.24 所示。每个区域都安装有加热器来模拟新陈代谢产热率, 并且有分布的传感器来测试皮表温度。除此之外, 每个区域的表面都有均匀分布的端孔, 通过这些端孔来控制出汗。在暖体假人的内部有液体加热器, 给水预加热, 等加热到一定的温度再传输到假人表面。实验测试的相变防护服为相变温度为 30°C, 相变材料的质量 950g 的防护服, 测试的环境温度为 5°C。

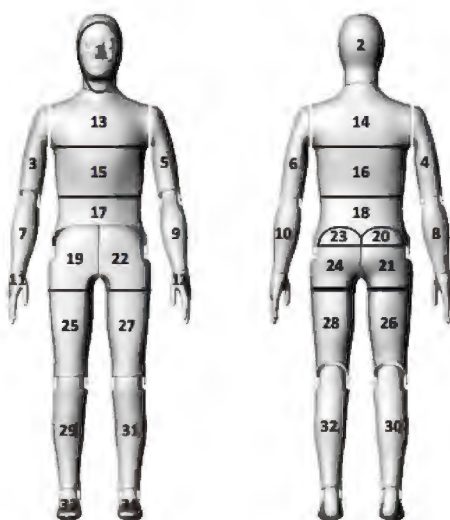


图 5.24 暖体假人区域划分

5.5.1 实验步骤

实验过程与真人实验相同。设定人工气候室的温湿度，温度 5℃，湿度 50%，待人工气候室温湿度达到设定值，并稳定以后，启动暖体假人程序，暖体假人程序操作界面如图 5.25 所示。等到假人表面温度达到设定的值处于稳定后，给假人穿上相变防护服，探头位置与真人实验相同。启动温度记录仪，记录实验开始的时刻，两个小时，结束实验，记录实验结束的时刻停止温度记录仪，将数据上传并保存。

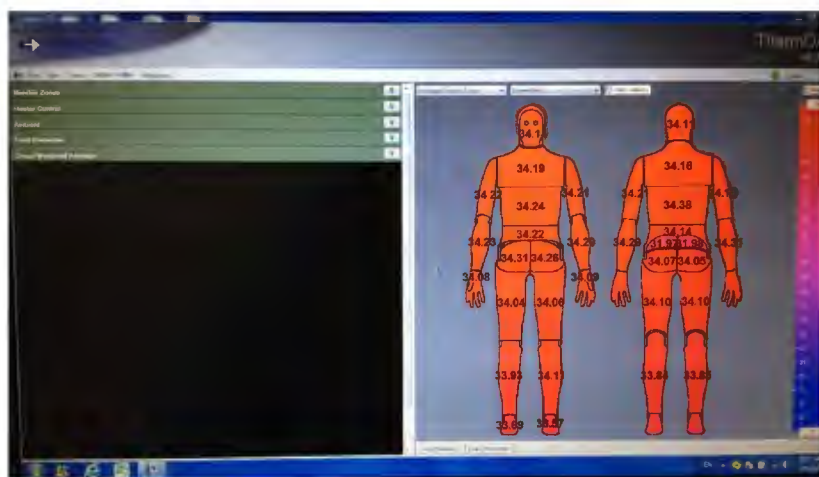
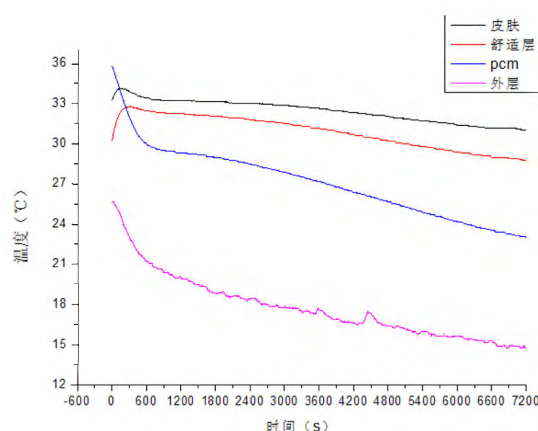


图 5.25 暖体假人程序操作界面

5.5.2 实验结果

整个实验进行过程中，为假人客观数据的变化趋势，数据从开始记录，温度记录

仪每 10s 采集一次数据。将实验记录的数据导入 origin 科技绘图及数据分析软件中, 分别得出实验中测试的各层温度随时间变化的曲线图。第一条黑色的曲线表示假人的皮肤温度随时间变化曲线, 第二条红色曲线表示紧挨皮肤的舒适层 T 恤外表面温度随时间的变化曲线, 第三条蓝色曲线表示相变材料包的温度随时间变化曲线, 第四条最下面的一条曲线表示着装人体系统最外层相变防护服外表面的温度随时间的变化曲线。暖体假人测试曲线的变化趋势与真人实验测试的曲线变化趋势相同, 暖体假人体系各层温度随时间变化曲线如图 5.26 所示, 有效相变防护时间从 550s 到 3860s, 为 3310s。



5.26 各层温度随时间变化曲线

5.5.3 实验结果与计算结果比较

暖体假人的体型为标准男体体型, 身高 170cm。按照标准男体身高 170, 体重为 65kg 计算, 由公式计算得体表面积为 1.72 m^2 。相变防护服外表面的温度取稳定阶段时的平均值为 19.6°C , 环境温度为 5°C 。将数值代入公式计算可得防护时间为 3271s, 计算结果与实验结果的误差百分比为 1.2%, 小于 5%。公式计算结果与实验测试结果有很好的 consistency。

通过真人实验和暖体假人实验并分别与公式计算值比较, 在低温环境下, 运用公式计算结果比实验结果稍小, 其误差百分比在 5% 以内, 两者具有很好的一致性, 说明低温环境下, 对于无风无太阳辐射, 人体处于静止站立或轻微活动状态时, 相变背心防护服的防护时间计算公式适用。

5.6 本章小结

本章主要设计实验，通过实验验证公式计算结果。实验分为真人实验和暖体假人实验，两者与公式计算结果都具有很好的—致性，误差小于 5%。

(1) 根据前面的计算公式条件，选择合适的参数值，设计实验方案。

(2) 实验分为真人实验测试与暖体假人实验，并分别与计算值进行比较，实验数值与计算数值具有很好的—致性，误差百分比小于 5%。

第六章 结 论

本论文基于相变低温防护服-人体系统的热需求分析确立了低温环境相变防护服热缓冲防护时间的计算公式,提出了相变材料的含量、低温环境的温度与相变防护服热缓冲防护时间之间的关系。首先分析了相变材料种类,选择相变温度为 25℃和 30℃的相变材料为研究对象,并设计了低温相变防护服的款式结构;然后根据热平衡原理确定低温相变防护服的防护时间计算公式,根据公式选择参数,进行数值求解;最后设计实验对防护时间计算公式进行验证,通过实验数据与公式计算结果进行误差分析,误差小于 5%,在低温环境下,背心式相变防护服的防护时间计算公式可适用。

本文主要研究工作及结论如下:

(1) 根据服用相变材料的选择原理和服装系统各层温度梯度,相变防护服配置于最外层时,选择相变温度为 25℃和相变温度为 30℃的石蜡相变材料。相变材料的封装选择宏观材料包封装法,并设计了低温相变防护服的款式结构,其细部结构为躯干部位分布相变材料的背心式防护服,立领、肩部分割、侧缝处不添加 PCM、拉链式闭合,PCM 层进行分布间隙量为 6mm 等。

(2) 对低温环境中相变防护服热需求进行分析,着装人体与环境不断进行热量交换,根据人体热量平衡方程和多层服装系统的热量传递确立了相变防护服-人体系统的热量平衡方程,分析方程的各项因子,同时对影响各个因子的参数进行分析,通过文献和资料数据整理,讨论了各个参数的取值方法,然后确定各个参数值,得到了背心式相变防护服在低温环境中的热缓冲防护时间计算公式。

(3) 根据计算公式的条件,选择合适的参数,并将参数代入背心式相变防护服在低温环境中的热缓冲防护时间计算公式,得到了不同条件下的相变防护服的理论预测时间,理论预测时间共 16 组。

(4) 根据理论预测时间选取的参数,设计实验方案,对低温相变防护服热缓冲防护时间计算公式进行实验验证。实验分为真人实验和暖体假人实验,其中真人实验测试 16 组,暖体假人实验测试一组,以真人实验为主。

(5) 实验测试低温环境中相变防护服热缓冲的防护时间,同时测试了人体的皮肤温度、微气候温度、口腔温度和主观热感觉,在热缓冲时间范围内都在舒适可接受

范围。将实验测试的数据与理论计算的数据比较，两者结果具有很好的一致性，误差百分比小于 5%

(6) 通过实验对比，在低温环境中无风无太阳辐射，人体处于站立静止或轻微活动状态时，背心式相变防护服的热缓冲防护时间计算公式可适用。

本文研究仍存在问题：服装系统最外层相变防护服外表面的温度的取值为稳定时间段的平均值，可能会有误差，可以进一步研究。相变温度、相变材料相变放热速率值是否有影响，如何表述在公式中。环境条件和人体活动水平改变后防护时间的计算等这些问题还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 高营.相变混纺织物调温即保持性能的研究[D].浙江理工大学,2010.
- [2] 于静.新型相变材料蓄放热特性的数值计算与实验研究[D].天津商业大学, 2008.
- [3] 王轩,朱金华,刘明光.相变材料的研究与进展[J].广州化工,2013,41(18):10-12.
- [4] 王敏, 李俊.发热保暖服装材料的开发现状及发展趋势[J].产业用纺织品, 2009,4:003.
- [5] 胡春华.基于人体需求的相变纺织品的研究[D].河北科技大学,2009.
- [6] 张海泉,孙小斌,李云台.供热式保暖服[J].产业用纺织品,2005,16(95):38-39.
- [7] 张东,康韡,李凯莉.复合相变材料研究进展[J].功能材料,2007,38(12):1936-1940.
- [8] H.Hosokawa.ThermocatchTM-W Photo-Thermal and Electro-Conductive Acrylic FiberThermocatchTM-W.39thInternationalandMan-MadeFibersCongresss,Austria,2000,(9):13-15.
- [9] 甘芬,俞从正,马兴元等.相变微胶囊保温材料的现状及在皮革中的应用前景[J].中国皮革 2008,37(15):18-22.
- [10] 丁丽, 杨建忠.温度调节纤维及其织物的发展与应用现状[J].纺织服装科技, 2008,29(2):10-14.
- [11] 张声诚.相变调温混纺纱的制备及其织物性能研究[D].浙江理工大学, 2010.
- [12] 张萍丽,刘静伟.相变材料在纺织服装中的应用[J].北京纺织,2002,23(4):50-53.
- [13] 廖选亭,马小强.相变材料在调温纺织品中的研究现状[J]. 科技创业月刊, 2011,7:112-114.
- [14]NUCKOLSM.L.Analyticalmodelingofadiverdrysuitenhancedwithmicroencapsulatedphasechangematerials[J].OceanEngineering,1999,26(6):547-564.
- [15] Ghali K, Ghaddar N, Harathani J, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of phase change materials on clothing during periodic ventilation[J]. Textile Research Journal, 2004, 74(3): 205-214.
- [16] Pause.B. New textile composites with thermo-regulating properties for automotiveinterior applications[C]. 6th Annual SPE Automotive Composites Conference 2006, v2, 6th Annual SPE Automotive Composites Conference 2006, 825-829.

- [17] Sarier N, Onder E. The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics[J]. *Thermochimica Acta*, 2007, 452(2): 149-160.
- [18] Yoo H, Lim J, Kim E. Effects of the number and position of phase-change material-treated fabrics on the thermo-regulating properties of phase-change material garments[J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83(7): 671-682.
- [19] LI Y, LUO Z X. Physical mechanisms of moisture transfer in hygroscopic fabrics under humidity transients [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2000, 91(2): 302-316.
- [20] LI Y, ZHU Q Y. A model of heat and moisture transfer in porous textiles with phase change materials (PCM) [J]. *Textile Research Journal*, 2004, 74(5): 447-457.
- [21] 张海峰, 葛新石, 叶宏. 相变微胶囊的蓄放热特性分析[J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 825-830.
- [22] 张东, 周剑敏, 吴科如. 相变储能材料的相变过程温度模型[J]. *同济大学学报*, 2006, (34) 7: 928-932.
- [23] 李凤志, 刘迎曦, 罗钟铨等. 一种着装人体动态热湿传递模拟方法[J]. *计算力学学报*, 2006, 23: 429-433.
- [24] Li Fengzhi, Li Yi. A computational analysis for effects of fiber hygroscopicity on heat and moisture transfer in textiles with PCM micro-capsules[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2007, 15(3): 223-235.
- [25] 李凤志, 吴成云, 李毅. 附加相变微胶囊多孔织物热湿传递模型研究[J]. *大连理工大学学报*, 2008, 48(2): 162-167.
- [26] Li Fengzhi, Wang Pengfei, Zhu Yunfei. Numerical Study on Thermal Property of the Textile with Mixture of Phase Change Materials Microcapsules[J]. *ICAMS (The second International Conference on Advanced Conference on Advanced Materials and Structures)*, 2008, 27-31.
- [27] 李凤志, 吴成云, 李毅. 相变微胶囊半径及含量对织物热湿性能影响数值研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(5): 671-678.
- [28] 朱方龙. 附加相变材料层的热防护服传热数值模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(4): 635-642.
- [29] 王云仪, 赵蒙蒙. 高温辐射下相变降温背心的热调节作用客观测评[J]. *纺织学报*, 2012, 33(5): 101-105.

- [30] 孙浩.红外热成像仿真假目标技术用微胶囊相变材料的研制[D].国防科技大学, 2004,11.
- [31] 满亚辉.相变潜热机理及其应用技术研究[D].国防科学技术大学研究生院, 2010.
- [32] 朱云飞.相变服装热湿传递机理及对人体热响应影响的模型研究[D].南京航空航天大学,2011.
- [33] 肖军.低温作业的职业危害防护[J].职业卫生,2011,96-97.
- [34] 黄力维,叶宏,门晓棠.低温作业对人体的危害及防寒工作服的性能评价[J]. 油气田环境保护,2012,22(3)68-70.
- [35] 黄力维,叶宏,门晓棠.低温作业对人体的危害及防寒工作服的性能评价[J]. 油气田环境保护,2012,22(3): 68-70.
- [36] 李俊, 张渭源, 王云仪.人体着装部位间皮肤冷感受之差异性研究-局部皮肤温度变化的多重比较[J].东华大学学报(自然科学版),2002, 28(3):13-19.
- [37] 徐向东, 袁修干, 杨春信. 冷环境中人体热调节的数学模拟与研究[J]. 航空学报, 1995, 1.
- [38] LaShanda.TEdwin L. Effect of the Degreeof soft and hard segment orderingon the morphologyandmechanicalbehaviorofsemicrystallinesegmentedpolyurethanes[J]. P olymer,2006, 47: 3073.
- [39] Mondal S, HuJL, Zhu Y. Free volume and water vapor permeabilityof densesegmented polyurethane membrane[J]. J. Membr. Sci, 2006,280:427.
- [40] Kousksou T. ,Bedecarrets J.P. , Dumas.I.P.,et a1.Dynamic modelingof thestorageof anencapsulatedice tank[J]. ApplTherm Eng, 2005, 25: 1534-1548.
- [41] Glali K, Ghaddar N, Harathani J, eta1.Experiment and numericalinvestigationof the effect ofphasematerials on clothig during periodic ventilation[J]. Textile Res.J, 2004, 74(3): 205-214.
- [42] 张仁元.相变材料与相变储能技术[M].北京: 科学出版社, 2009,1-142.
- [43] 胡春华, 孙玉钗. 相变材料在纺织品中的应用及存在的问题[J]. 化纤与纺织技术, 2009, 2: 27-30.
- [44] ZalbaB,Marín JM,Cabeza LF,Mehling H.Review on thermal energy storage withphase changematerialsheattransfer analysis and applications[J]. Appl Therm Eng, 2003, 23:253-254.

- [45] Benlen Z, Jose M, Luisa F. Review on thermal energy storage with phase change materials heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(2): 251-283.
- [46] 李得伦. 石蜡相变材料的传热与控温性能研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [47] 鲁生业, 鲁文彤, 官志文. 衣服物理性能对人体温热感觉和健康的影响[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(4): 255-258.
- [48] 王府梅. 服装面料的性能设计[J]. 上海: 东华大学出版社, 2000: 87-95.
- [49] 王玮玲, 于伟东. 相变纤维与伪相变纤维[J]. 技术创新, 2004(3): 16-19.
- [50] 张红星. 石蜡在相变调温纺织品领域的应用研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2011.
- [51] 朱平. 功能纤维及功能纺织品. 北京: 中国纺织出版社, 2006: 43, 243-245.
- [52] 孙庆伟, 周光纪, 白洁等主编. 人体生理学[M]. 北京市: 中国医药科技出版社, 2011, 03: 4-7.
- [53] 张渭源. 服装舒适性与功能[M]. 北京市: 中国纺织出版社, 2010, 07.
- [54] 刘蔚巍, 连之伟, 邓启红. 人体热舒适客观评价指标[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(3): 522-526.
- [55] 刘荣向. 基于新陈代谢率及皮肤温度的人体热舒适实验研究[D]. 青岛理工大学, 2010.
- [56] Huang J, Xu W. A new practical unit for the assessment of the heat exchange of human body with the environment[J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31(4): 318-322.
- [57] Gagge AP, et al. A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment[J]. SCIENCE, 1941, 94: 426-430.
- [58] McCullough EA, et al. A data base for determining the evaporative resistance of clothing[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95(2): 311-327.
- [59] Lotens WA, Havenith G. Calculation of clothing insulation and vapor resistance[J]. Ergonomics, 1991, 34(2): 233-254.
- [60] 刘迎曦, 李凤志, 罗钟铤. 人体-服装-环境系统动态热湿传递数值模拟[J]. 纺织学报, 2004, 25(5): 24-27.
- [61] 于静. 新型相变材料蓄放热特性的数值计算与实验研究[D]. 天津商业大学, 2008.
- [62] 姚仲鹏, 王瑞君. 传热学, 北京: 北京理工大学出版社, 2003.

- [63] Sun Y, Chen X, Cheng Z, et al. Study of heat transfer through layers of textiles using finite element method[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2010, 22(2/3): 161-173.
- [64] 邱义芬, 袁修干, 庞诚. 人体着装热平衡方程[J]. 航空学报, 1999, 1.
- [65] 王从陆, 伍爱友. 深部高温高湿矿井热平衡及热舒适评价研究[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(2): 34-37.
- [66] 黄建华, 服装的舒适性. 北京市科学出版社, 2008.
- [67] ISO8996, Ergonomics of thermal environments-determination of metabolic heat production. ISO, Geneva. 1989.
- [68] 李可基, 屈宁宁. 中国成人基础代谢率实测值与公式预测值的比较[J]. 营养学报, 2004, 26(4): 244-248.
- [69] 刘荣向. 基于新陈代谢率及皮肤温度的人体热舒适实验研究[D]. 青岛理工大学, 2010.
- [70] 李青. 服装面积因子及其热阻测评研究[D]. 东华大学, 2012.
- [71] 黄华良. 热害矿井气候与人体生理反应研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(3): 50-53.
- [72] Kurazumi Y, Tsuchikawa T, Matsubara N, et al. Convective heat transfer area of the human body[J]. European journal of applied physiology, 2004, 93(3): 273-285.
- [73] 李文波, 薛锋, 丁恩勇, 等. 差示扫描量热仪对物质相变潜热的精确量度[J]. 分析测试学报, 2006, 25(2): 16-19.
- [74] 谷美霞, 孙玉钗, 张莉. 服装微气候与人体主观感觉关系探讨[J]. 河北纺织, 2009(1): 22-28.
- [75] 谷美霞, 孙玉钗, 宋长亮. 影响衣内微气候舒适度的因素研究[J]. 山东纺织科技, 2008, 49(4): 51-54.
- [76] Papadopoulos A, Fotiadis DI, Likas A. An automatic microcalcification detection system based on hybrid neural network classifier[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2002, 25: 149-167.
- [77] 范少光等. 人体生理学[M]. 北京医科大学出版社, 2000.
- [78] 欧阳骅. 服装卫生学[M]. 人民军医出版社, 1985.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 李晓霞, 孙玉钗, 沈丽. 让毛衫璀璨起来[J]. 2012年艺术工学与创意产业国际学术会议论文集, 2012, 351-354.
- [2] Li X X, Sun Y C, Xu J Y, et al. Thermal Requirement Analysis of Phase Change Protective Clothing in Low Temperature Environment[J]. Advanced Materials Research, 2013, 796: 649-652.
- [3] Xu J Y, Sun Y C, Li X X, et al. Influence of Layer Configuration on Protecting Effect of Thermal Protective Clothing Containing PCM[J]. Advanced Materials Research, 2013, 796: 639-642.

致 谢

三月江南的烟雨朦胧，花红柳绿，一切充满生机。在这里，挥洒过汗水，也滴落过泪花，这里有我熟知的一切，有我怀念的一切，有我热爱的一切。恍惚中，在美丽的苏州大学校园中，度过了我的三年的硕士研究生生活，现在我即将完成我的硕士毕业论文。一路走来虽无大功大喜，回顾过去，感慨良多。

三年来，在大家的帮助下我顺利地完成了自己的硕士研究课题，这些帮助过我成长的各位良师、益友、同学、家人们，借此机会，请允许我真诚的对你们一句：谢谢！

首先，我要感谢我的导师孙玉钗教授，孙玉钗教授是我在研究生学习之路中的指引者，您专业知识渊博、对我孜孜不倦的教诲、及时指明我前进的方向。在学术研究方面，您不断的让我去思考、学习和实践。您总是及时的为我导航、悉心指导。在生活上，您平易近人、积极乐观的生活态度时刻感染我，鼓励着我。让我可以坚强地走过这三年中遇到的每一个坎坷。同时，正是在孙教授的指导下，我的课题才得以顺利完成，在此我要对您说：老师，您辛苦了！

其次，感谢在研究生期间传授知识给我的各位老师，各位老师的课程使我学到了很多知识、开阔了视野，为我的课题进展提供了良好的基础；

然后，我要感谢陈启、叶晶、庞漫、沈颖等同学帮着我一起完成课题的实验部分。我还要感谢杜艺、陈柔曦等实验室的师姐妹，你们为我提供了很多课题和生活上的帮助。我还要感谢徐静宇、沈芬、栗玉平等宿舍的姐妹们，总是在我需要你们的时候给予我最好的关怀，陪伴我这一路。我还要感谢黄冬徽、苏雪寒等在论文撰写中及时给我纠正错误。

最后，我要感谢我的家人，感谢你们对我无限支持，因为一直有你们鼓励支持，让我可以全身心的投入学习和课题研究中，今天我所取得的成绩要归功于你们的汗水！

本论文的顺利完成，离不开各位老师、同学、朋友以及家人的关心和帮助，帮助是举手之劳，感激永无止境。在此，怀着感恩的心对各位说声：感谢一路有你！