相变降温服热分析

付 杨 邱义芬 任兆生

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083) (空军航空医学研究所, 北京 100036)

摘 要: 为了研究相变材料降温服在高温高湿条件下的热防护性能和相变材料数值计算方法应用于降温服传热计算的可行性,在分析服装传热传质特点及计算方法的基础上,利用焓值分析法对服装中的相变材料建立传热模型,在整个区域建立统一的能量方程,在区域结点进行离散,并进行隐式求解,得到焓的分布. 建立了关于人体、降温服相变材料、人体着装、环境的传热模型,用此模型进行高温高湿条件下的人体着装的动态仿真,并进行试验验证. 降温服计算和实验结果吻合良好,可以看出,相变降温服热分析方法可靠合理.

关 键 词: 人体热调节系统; 相变材料; 降温服; 焓值分析法; 服装

中图分类号: V 445.3

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2007)03-0278-04

Analysis of heat sinking vest with phase-change material

Fu Yang Qiu Yifen

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Ren Zhaosheng

(Institute of Aviation Medicine, Air Force, Beijing 100036, China)

Abstract: To investigate the thermal protection effects of a heat sinking vest with phase-change material in high-temperature and high-humidity environment and the feasibility of numerical computation of heat transfer to the vest, based on the analysis of heat and mass transfer characteristic about the accouterments, a thermodynamic model was set up with the enthalpy method. The uniform energy equation was constructed for the whole domain, and the implicit difference equation was used in every node, the distribution of enthalpy was solved by numerical method. Simulation technique of the thermal system was established with the combination of human body thermal regulation model. It was used to analyze the accouterments. A experiment was carried out to validate the final computer results, and the experimental and computer results were tallied well. The results indicate that using numerical method of phase-change material in heat transfer of vest is credible and appropriate.

Key words: human thermal regulation system; phase change material; heat sinking vest; enthalpy analytical method; garment

降温服是用于高温环境的一种防护用品. 研究证明,当热负荷增加到一定程度时,会严重地影响人的工效. 而作为战斗机飞行员,为了对抗高性能战斗机带来的低压缺氧和高 g 值,都配备了代偿抗荷服. 由于这种服装为橡胶制品,透气性差,因此,配穿代偿抗荷服必然增大热负荷. 我国南方各地炎热季节普遍存在高温高湿气候,加上飞机座舱的温室效应,导致停放在地面的飞机座舱内温度很高,如可达 56℃. 这样的高热环境将严重影响飞行员工效. 战斗机飞行安全事故发生率高峰在夏季,那么,环境高温是一个不可忽视的影响因素. 为了减轻热负荷对飞行员的危害,有必要开展进一步的飞行员降温服设计.

降温服一般分为 3种类型,分别采用液体、气体和相变材料. 根据冷源供给方式,降温服又可分为主动和被动两种. 主动系统即液体或气体降温

收稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国家 863基金资助项目(2002AA743033)

作者简介: 付 杨(1982-),男,四川成都人,硕士生, fyskyon@sina.com.

系统, 可连续不断地提供冷源. 被动系统即相变材料降温系统为自携式, 着装后, 活动不受限制, 它体积小、重量轻、成本低. 不足之处是冷冻凝胶的能量释放到一定程度后, 必须置于冰箱中重新降温, 需要按时更换储冷剂. 降温原理: 降温服提供或储存的冷源从贴近皮肤处吸取人体热量, 降低体温, 延长人在高温环境中的工作时间[1].

相变材料降温系统小巧、使用方便, 所以本文选用相变材料降温服为研究对象.

1　相变过程数值模拟

焓值分析法的主要思路: 将焓和温度一起作为待求函数, 在整个区域(包括液相、固相和两相界面)建立一个统一的能量方程, 利用数值方法求出焓的分布, 然后确定两相界面. 因此它不需要将液相和固相分开处理. 分析时进行如下假设: 液态和固态各向同性; 相变发生在一个小区间 2ε (K)内, 相变焓在此区间内平均释放.

1.1　焓值分析法模型

对于一维导热, 其热传导方程为

$$\rho\frac{\partial H}{\partial t} = k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (1)$$

式中, ρ为相变材料当前相的密度; H 为相变材料的焓值; t为时间; k 为相变材料当前相的导热系数; T 为相变材料的温度; x为空间坐标.

初始温度条件:

$$T(x,\ 0) = T_i \qquad (2)$$

第一类边界条件:

$$T\mid_{x=0} = T_0$$

第三类边界条件:

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} = h(T_a - T)$$

式中, h 为换热系数; T_a 为环境温度. 焓计算为

$$H = \int_{T_m}^{T} c\,\mathrm{d}T \qquad (3)$$

式中, c为比热.

由式(3)液态、两相、固态时 T和H 的关系为

$$T = \begin{cases} T_m - \varepsilon + \dfrac{H}{c_{ps}} & H \leqslant 0 \\ T_m - \varepsilon + \dfrac{2\varepsilon H}{\lambda} & 0 < H < \lambda \\ T_m + \varepsilon + \dfrac{H-\lambda}{c_{pl}} & H \geqslant \lambda \end{cases} \qquad (4)$$

式中, T_m 为相变材料相变点; ε为相变温度范围(K)的一半(相变半径); c_{ps}, c_{pl}为相变材料固态、液态时的比热容; λ为相变融解热.

1.2　节点的划分和数值离散

对于一维问题, 将空间位置求解区域划分为 $M+1$个节点, 时间计算区间划分为 $N+1$个时间点. 对每个节点, 将式(1)离散, 得到离散方程:

$$H_i^{t_{n+1}} + H_i^{t_n} = b\left(T_{i-1}^{t_{n+1}} - 2T_i^{t_{n+1}} + T_{i+1}^{t_{n+1}}\right) \qquad (5)$$

其中　　$b = \dfrac{k\Delta t}{\rho\Delta x^2}$　　$t_n = n\Delta t$

式中, Δt为时间步长; i为空间节点编号, $i = 1, 2, \cdots, M$; n为时间节点编号, $n = 0, 1, 2, \cdots, N$.

对边界以外节点应用式(5)进行隐式求解. 根据节点所处相区(固态区、固液两相区或液态区), 把式(4)代入式(5)得到系数矩阵.

计算时, 先把 t_n 时刻的焓值作为 t_{n+1}时刻各点所处区域的参考值, 根据表 1得到每个节点的离散方程, M 个点的离散方程联立后形成 $M\times(M+1)$维矩阵, 解此增广矩阵对应的方程组得到 t_{n+1}时刻的焓值; 将此次计算得到的 t_{n+1}时刻的焓值作为各点所处区域的参考值, 重新计算 t_{n+1}的焓值; 当结果稳定时, 即前后两次计算的各节点焓值相对偏差均小于 10^{-8}, 认为计算结果是 t_{n+1}时刻的真实焓值. 重复上述步骤计算到 $t = t_N$ 为止.

1.3　数值算例

本文对半空间内的凝固过程(双区域问题)算例进行计算, 即一维水的凝结问题[2-4]. 如图 1所示, 水被限制在 $x > 0$的半空间内, 具有均匀初始温度条件 $T_i = 283$ K. 第一类边界条件为 $T\mid_{x=0} = T_0 = 253$K. 凝固过程从 $x = 0$的面开始, 固液界面向 x 的正方向移动. 这样的问题被称为 Neumann解. 计算相关的物性参数如下[2-4]:

$k_s = 2.22$W/(m·K)　　$k_l = 0.556$W/(m·K)

$\lambda = 338$kJ/kg　　$c_{ps} = 1.762$kJ/(kg·K)

$T_m = 273$K　　$c_{pl} = 4.226$kJ/(kg·K)

$\rho_s = \rho_l = 1\,000$kg/m^3

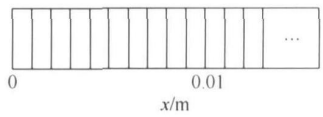

图 1　半空间内的凝固过程

文献[3]中 Neumann一维解的固液相变界面位置理论解与文献[2, 4]提供的解相比较是一致的. 采用前述焓值分析法模型对 Neumann一维解的固液相变界面位置进行数值计算, 计算结果与文献[2]提供的解对比, 如图 2所示. 由图可见, 本文计算结果与理论解的最大偏差小于 5%, 本文计算结果精度高, 所建计算方法可靠合理.

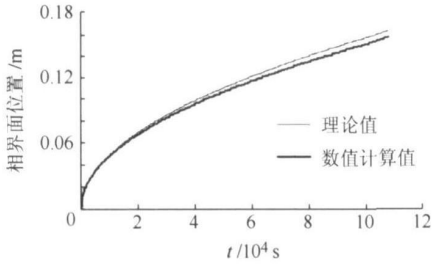

图 2 相界面位置焓值分析法数值计算结果与理论解对比

2 降温服热分析

2.1 降温服传热模型

选用降温服相变材料, 主要考虑合适的相变点和较大的相变融解热. 本文选用某化合物的水凝胶作为相变材料. 水凝胶有以下主要优点: 相变点为水的融解温度; 当作为蓄热材料的冰融化成水时, 有很大的相变融解热; 由于凝胶化抑制热对流而能长时间保冷, 使降温可以持续更长的时间; 同时使冰更加柔软, 增加降温服的舒适性; 凝胶能保持水分, 万一容器破裂, 蓄热材料不会流出, 污染服装或者泄露污染座舱.

图 3所示为"环境-相变材料降温服-人体着装-人体体表"传热过程. 降温服实际传热过程非常复杂, 在满足工程实际要求的情况下, 根据人体皮肤、服装和环境的传热特点, 对系统进行热分析时作以下假设: 取有降温服热防护的人体体表为研究对象, 由于水凝胶网络可抑制水的对流, 固态水流动性更小, 因此忽略相变材料的流动性; 又由于环境温度比较均匀, 降温服覆盖面积上人体体表温度分布差别不大, 且相变材料具有同一初始温度, 可假设图中由环境经相变材料降温服至人体的传热热流沿垂直于体表的方向进行.

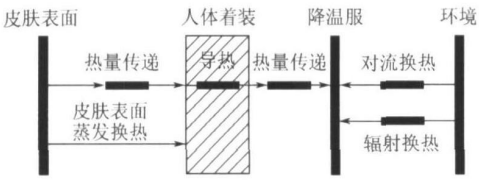

图 3 "环境-相变材料降温服-人体着装-人体体表"热系统传热过程

本文中, 人体皮肤表面到服装的热传递热阻由实验测得, 热阻包括: 人体皮肤与着装间的辐射换热; 人体皮肤与衣内空气的导热、对流换热; 衣内空气与着装间的导热、对流换热; 不同着装间的辐射换热; 着装本身的导热热阻. 所以在以下的分析中, 把从人体皮肤到服装外表面的热传递热阻作为一个值来考虑. 对于服装与环境的换热, 本文考虑了服装与包裹空气层的对流换热和服装与环境的辐射换热. 在潜热损失方面, 考虑了皮肤表面的直接蒸发和着装表面的扩散蒸发两部分. 由于人体热调节模型中涉及到皮肤显式出汗, 假设汗水全部进入着装内, 并用经验公式对含有汗水的着装的热阻进行修正. 以下分 3种情况讨论.

1) 基础服装中无液态水出现

人体皮肤热边界条件为

$$\phi_s = \phi_{p1} + \psi_1 H_e \tag{6}$$

相变材料热模型的人体侧热流边界条件为

$$\phi_{p1} = \frac{T_s - T_{pc1}}{I_{p1}} \tag{7}$$

相变材料热模型的环境侧热流边界条件为

$$\phi_{p2} = \frac{T_a - T_{pc2}}{I_{p2}} \tag{8}$$

其中, ϕ_s 为人体皮肤的热流; T_s 为人体皮肤表面温度; T_{pc1}为降温服相变材料内表面的温度; T_{pc2}为降温服相变材料外表面的温度; T_a 为外界环境温度, 为干球温度和辐射温度的加权值; I_{p1}为人体皮肤表面与降温服相变材料内表面的热阻[5]; H_e 为水的汽化潜热.

传质通路中, 由于无水蒸气凝结, 各质量流率 ψ_1, ψ_2 满足如下关系:

$$\psi_1 = \psi_2 \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} \psi_1 &= (C_{sk} - C_{p1}) \backslash J_1 \\ \psi_2 &= (C_{p1} - C_a) \backslash J_2 \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

其中, ψ_1 为人体皮肤表面的质量流率; ψ_2 为服装外表面的质量流率; C_{sk}为皮肤表面的水蒸汽分压; C_a 为环境水蒸汽分压; C_{p1}为服装外表面的水蒸汽分压; J_1 为人体皮肤表面与服装外表面的质量流阻; J_2 为服装外表面和外界环境之间的质量流阻;

2) 基础服装无显式出汗并有液态水凝结

边界条件同 (6)式、(8)式.

$$\phi_{p1} = \frac{T_s - T_{pc1}}{I_{p1}^{w}} + \psi H_e \tag{11}$$

满足

$$\psi_1 = \psi_2 + \psi_3 \tag{12}$$

式中, ψ_1, ψ_2 满足式 (10). 服装中的液态水量 W 有

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}t = \psi_3 \tag{13}$$

式中, ψ_3 为相变材料内表面水蒸气凝结的质量流率;

3) 人体皮肤表面出现显式出汗

边界条件同 (6)式、(8)式.

$$\phi_{p1} = \frac{T_s - T_{pc1}}{I_{p1}^{w}} - \psi H_e \tag{14}$$

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}t = \psi_1 + \psi_E - \psi_2 \tag{15}$$

式中, ϕ_E 为人体皮肤出汗的质量流率; I_{pl}^{*}为服装有液态水时的热阻, 为服装干态热阻和服装中含水量 W 的函数. 在分析体表及环境与降温服间的传热过程基础上, 结合前文所建焓值分析法模型对降温服的相变过程进行数值计算, 得到人体皮肤温度变化结果, 从而了解降温服对人体的热防护性能.

2 2　降温服人体试验

本文通过模拟我国南方夏季高温高湿气候条件, 进行了人体降温服降温性能试验. 试验前, 降温服中的相变材料置于 - 10℃的环境蓄冷, 记录受试者身高和裸体体重. 受试人员分别进行两种状态试验, 穿着降温服及不穿降温服. 高温舱试验温度为 45℃, 相对湿度 50%, 试验时间为 60m in 试验时, 每隔 10m in采集直肠温度、心率以及 8点皮肤温度 (分别为胸、腹、腰、背、前臂、上臂、大腿、小腿), 测试时, 受试者保持坐姿、阅读工作状态, 不能进食和饮水. 试验结束后, 测量受试者裸体体重及相变材料表面温度[6].

2 3　降温服热分析结果试验验证

从图 4和图 5中可以看出, 数字模拟结果与实验值吻合很好, 温度变化趋势也大致相同.

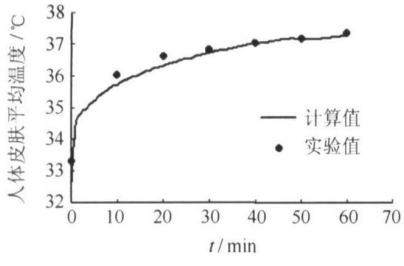

图 4　不穿降温服情况下人体皮肤平均温度计算值与实验值

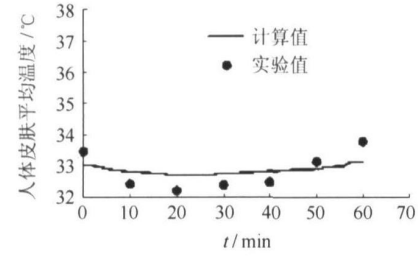

图 5　穿降温服情况下人体皮肤平均温度计算值与实验值

图 4中为不穿降温服的计算, 人体皮肤平均温度计算值与实验值最大差值为 0 7(最大差值点为初始状态点). 本文计算采用的是一个大量统计的人体数据, 由于实验人数的限制, 难以避免出现个体差异. 若除去初始状态点, 则人体皮肤平均温度计算值与实验值最大差值为 0 26℃.

图 5为穿着降温服的计算, 人体皮肤平均温度计算值与实验值最大差值为 0 6℃, 计算值的曲线更为平稳. 原因为: 着装的热阻是由实验测得统一值, 各部分会有差异, 而下身的抗荷装备, 其热阻会比测得的大, 上身则会偏小.

计算与试验结果对比表明, 二者存在一定偏差, 但二者差别不大, 量值非常接近. 可认为降温服计算结果有较高的精度, 分析方法正确可信.

3　结 束 语

本文利用焓值分析法模型建立了相变材料数值模拟方法, 以此为基础对相变降温服的热防护性能进行了分析计算, 并通过 Neumann 一维理论解以及降温服人体试验对二者分别进行了验证. 结果表明本文计算精度较高, 方法可靠合理. 本文结果可应用于各种高温作业环境、大工作负荷场合下人体的被动热防护技术研究.

参考文献 (References)

[1] 顾心清. 美海军舰艇被动式降温背心的研究现状 [J]. 海军医学杂志, 2004, 25(2): 191- 193
Gu Xinqing. The existing state of heat sinking vest of the USA navy[J]. Journal of Navy Medicine, 2004, 25(2): 191- 193(in Chinese)

[2] Comini G, Guidice S D. Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change [J]. J Num Meth Eng, 1974(8): 613- 624

[3] 奥奇西克 M N. 热传导 [M]. 俞昌铭译. 北京: 高等教育出版社, 1983
Ozisik M N. Heat conduction[M]. Translated by Yu Changming. Beijing: Higher Education Press, 1983(in Chinese)

[4] 周业涛, 关振群, 顾元宪. 求解相变传热问题的等效热容法 [J]. 化工学报, 2004, 55(9): 1428- 1433
Zhou Yetao, Guan Zhenqun, Gu Yuanxian. Equivalent heat capacity method for solution of heat transfer with phase change[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(9): 1428- 1433(in Chinese)

[5] 邱义芬. 舱外液冷通风服-人体热调节系统的数值模拟与实验研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 1999
Qiu Yifen. Experimental research and numerical simulation of liquid and ventilation cooling garment and human thermoregulation system for extravehicular activity[D]. Beijing Dept of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)

[6] 李志刚, 王赤才, 王辉, 等. 航空医学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1992 140- 145
Li Zhigang, Wang Chicai, Wang Hui, et al. The medicine of aviation[M]. Beijing: People's Military Medical Press, 1992 140- 145(in Chinese)

(责任编辑: 刘登敏)