

Research on Heat Transfer Process of High Temperature Protective Clothing Based on Mesh Heat Transfer Model

Yuchong Zhang¹, Sha Cao¹

1. School of physical and electronic sciences, Hunan University of Science and Technology, 411100, China

†Email: 1245567271@qq.com

Abstract

In order to solve the new problems in performance and comfort of common high temperature protective clothing, this paper explores the physical characteristics and heat conduction process of a common thermal protective clothing. In the study, a grid heat transfer model is established at high temperature, which is composed of four heat transfer equations constructed with four layers of protective materials. The relationship between temperature distribution and time and space is obtained by solving the temperature distribution. The data curve is drawn, and it is observed that the temperature of this thermal protective suit began to change steadily until it remained unchanged after 1744s at the ambient temperature of 75°C. The thermal conductivity of human model skin is calculated to be 0.0017w/(m·°C), and the temperature distribution table of each material layer is given (table 1), providing important calculation rules and theoretical basis for more advanced design of high-temperature protective clothing.

Keywords: Heat Conduction Model; Objective Programming Constraint; Difference Method; Optimal Thickness

基于网格化热传导模型对高温防护服传热过程的研究

张煜翀¹, 曹莎¹

1. 湖南科技大学物理与电子科学学院, 湖南省湘潭市 411100

摘要: 为了解决常见高温防护服在性能和舒适度等方面面临的新问题, 本文针对当前常见的一种热防护服, 探究物理特性和导热过程。在研究中, 建立了高温下的网格化热传导模型, 该模型由 4 层防护材料构造的 4 个热传导方程组成, 经过求解温度分布, 得出了温度分布与时间和空间之间的联系; 绘制出了数据曲线, 并观察发现这种热防护服在环境温度为 75 °C 情况下, 经过 1744s, 温度开始平稳变化直至不变; 计算得出人体模型皮肤的热传导率为 0.0017W/(m·°C), 并给出各材料层温度分布表 (见表 1), 为更加先进的高温防护服的设计提供重要的计算规律和理论依据。

关键词: 热传导模型; 目标规划约束; 差分法; 最优厚度

引言

高温防护服是在高温环境下作业时防止工作人员灼伤而不可或缺的防护品, 通常使用的高温防护服由三层织物材料构成, 分别为 I、II、III 层。I 层与外界环境接触, III 层与皮肤之间存在一层空隙层, 将该层记为 IV 层。现需根据获取的实验测量结果对高温防护服进行传热过程研究和设计, 降低服装设计的研发成本、缩短研发周期。实验中均采用仿真模拟人体。

1 问题分析和研究方法设计

为了充分研究整个过程，设定了合理的研究环境。将体内温度控制在 37 ℃ 假人放置在实验室的高温环境下，同时测量随着时间变化，假人皮肤外侧的温度变化情况。需建立数学模型来确定假人皮肤外侧的温度变化情况；在环境温度为 75 ℃ II 层厚度为 6mm、IV 层厚度为 5mm、工作时间为 90 分钟的情况下展开实验，根据给定的专用服装所用材料的一些参数值和已测量到的假人皮肤外侧温度，利用热传导方程和网格化差分法，建立热传导模型并计算出温度分布，得到温度分布情况和人体热传导率，为高温防护装备设计提供技术指标。

2 热传导模型的建立及求解

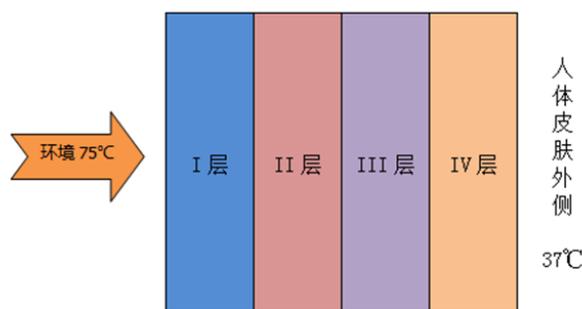


图 1 高温作业专用服装结构示意图

为了充分研究整个过程，设定了合理的研究环境。将体内温度控制在 37 ℃ 假人放置在实验室的高温环境下，同时测量随着时间变化，假人皮肤外侧的温度变化情况。需建立数学模型来确定假人皮肤外侧的温度变化情况；在环境温度为 75 ℃ II 层厚度为 6mm、IV 层厚度为 5mm、工作时间为 90 分钟的情况下展开实验，根据给定的专用服装所用材料的一些参数值和已测量到的假人皮肤外侧温度，利用热传导方程和网格化差分法，建立热传导模型并计算出温度分布，得到温度分布情况和人体热传导率，为高温防护装备设计提供技术指标。

2.1 人体皮肤随温度的变化情况

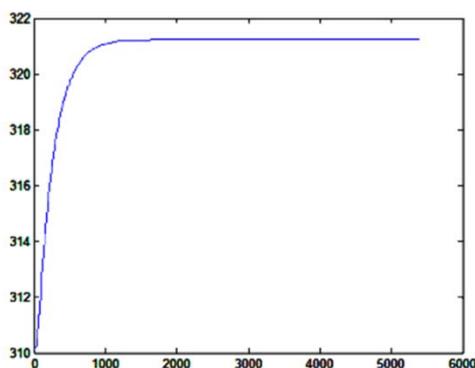


图 2 模拟人体皮肤外侧温度随时间变化曲线

首先，我们对高温作业专用服的物理特性进行研究，测得 90 分钟内模拟人体皮肤外侧温度随着时间变化的数据，我们将该变化过程用曲线绘制出，可见温度呈先快速上升，后逐渐平缓趋于一固定值的趋势。下面对这种情况进行分析：

在环境温度为 75 ℃ 情况下，对身着高温防护服，身体初始温度为 37 ℃ 模拟人体进行皮肤外侧温度测量，由上图可以看出，从测试开始到约第 1000 秒时，假人皮肤外侧温度呈不断上升趋势，且上升趋势逐渐放缓，到约第 1744 秒开始，假人皮肤外侧温度基本不再上升，约为 48.08 ℃ 基本处于稳定状态。通过图

像可以预测出现这种情况的原因，在内部温度逐渐升高过程中，会对外产生热辐射，尤其是服装第 III 层与假人皮肤之间的第 IV 层空气层，会产生一定的向外辐射，同时外部也向内热传递，当两者达到平衡时，内部温度就不会发生新的变化，保持 48.08 °C 不变，所以测量结果可能受到热辐射的影响。

2.2 一维热传导方程模型的建立

高温防护服在具有隔热功能的同时还具有热传导特性，各材料层分别进行热传导，我们依据传热学中傅里叶定律和能量守恒定律的有关知识，如果温度场只在一个方向上变化，即传热的空间坐标是一维的，则为一维传热。但是在本题中，除了要考虑空间坐标的变化还要考虑时间坐标的变化，这类传热过程为一维非稳态传热，时间坐标是单向的，因此建立一维热传导方程来求解。

同时，每层材料的比热容、密度、热传导率都不相同，所以要建立 4 个热传导方程进行计算，热量由左向右传递。在以下计算中，所有温度单位都化为 K (开尔文)， $1\text{ }^{\circ}\text{C}=273.15\text{ }K$ 。

一般热传导方程为

$$\begin{cases} u_t = \partial^2 u_{xx} + f(x,t), (0 < x < l, 0 < t < \infty) \\ u(0,t) = \mu_1(t), u(l,t) = \mu_2(t), (0 \leq t < \infty) \\ u(x,0) = \varphi(x), (0 \leq x \leq l) \end{cases}$$

一维热传导方程的偏微分形式为

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Q \quad (1)$$

通常， Q 作为热源是给定的，只要求温度即可，在研究中热源对防护服状态影响较小，不考虑热源的影响，所以设 $Q=0$ ，则热传导方程的偏微分形式为

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

ρ_i 为第 i 层材料密度， c_i 为第 i 层材料比热容， k_i 为第 i 层热传导率， i 为层数，取值 1、2、3、4。将 4 层不同材料的参数代入得到 4 个热传导方程。

$$\begin{aligned} c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} &= k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [0, 0.6) \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} &= k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [0.6, 6.6) \\ c_3 \rho_3 \frac{\partial T}{\partial t} &= k_3 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [6.6, 10.2) \\ c_4 \rho_4 \frac{\partial T}{\partial t} &= k_4 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [10.2, 15.2] \end{aligned}$$

x 的范围由 I 层厚度为 0.6mm，II 层厚度为 6mm、III 层厚度为 3.6mm、IV 层厚度为 5mm 得到。

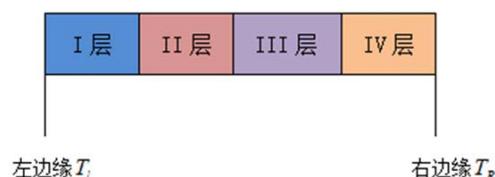


图 3 左、右边缘示意图

针对该高温作业专用服（包含空隙层）的最左侧和最右侧的情况（如图 3），可以列出左、右边缘热传导方程。

第 I 层左侧边缘温度变化情况：

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial x} = h_{cfl} (T_L - T(0,t)) \quad (3)$$

第 IV 层右侧边缘温度变化情况：

$$-k_4 \frac{\partial T}{\partial x} = h_{cfl} (T_R - T(l,t)) \quad (4)$$

其中， h_{cfl} 为热传导方程中的系数， $T(0,t)$ 为 I 层左边缘自身温度， $T(l,t)$ 为 IV 层右边缘自身温度， $T_L=348.5 K$ ， $T_R=310.5 K$ 。

2.3 网格化模型的求解

同时，为了方便计算与理解，我们可以设外界环境为第 0 层，假人体皮肤为第 V 层，如下图所示，利用这种方法可以得到人体皮肤的热传导率，并求出各层材料的温度分布，在运用模型解出皮肤层的温度后，与图 1 的实际测量值进行比较和误差分析。



图 4 重新设定后的层次分布图

由热力学知识我们可以了解到，温度是连续的，即在每层材料的边界处，通过第 i 右侧边界的热量应全部到达第 $i+1$ 处边界，温度是近似相等的，由此，我们可以列出以下几个方程，用于求解不同材料层处接触边界的温度。

第 i 个接触边界的温度情况

$$T(x_i^-) = T(x_i^+) \quad (i=1,2,3) \quad (5)$$

即在材料的分界处，分界线左侧的极限温度等于右侧的极限温度

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

求解这个模型，我们运用了差分法结合网格化模型的方式，在开始求解之前，要对空间和时间进行微分，将其离散成较小区间来求解。由于问题一将未知的 II 层和 IV 层厚度告知我们，可以得到总厚度。 s_i 为第 i 层材料厚度。

$$l = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 15.2mm$$

对空间的微分：

把 $l=15.2mm$ 的空间区间微分成步长为 Δx 的小区间

$$x_j = x_0 + j\Delta x \quad (7)$$

$$x_0 = 0$$

$$j = 1, 2, 3 \dots \frac{l}{\Delta x}$$

对时间的微分:

把 5400s 的总时间分成步长为 $\Delta t = 0.1s$ 的小区间

$$t_m = m \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$m = 0, 1, 2, 3 \dots 5400$$

建立网格化模型:

建立“时间-空间”坐标轴 $x-t$ ， x 为空间位置坐标， t 为时间坐标，在坐标轴中， T_j^m 在网格中表示 x_j 位置的点在 t_m 时间时的温度。由该图可运用知三角形两点坐标确定第三顶点坐标的方法。

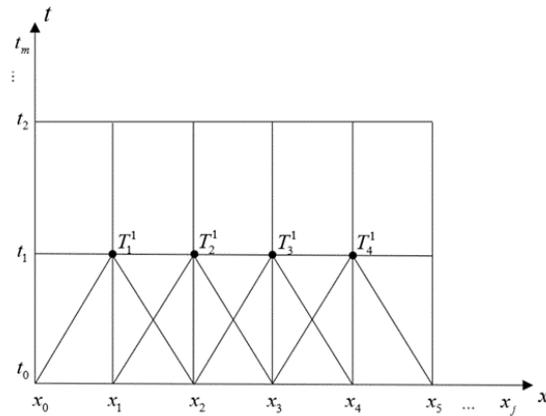


图 5 “时间-空间”网格化模型示意图

图中，纵坐标相等的点均温度相等，可得:

$$T_0^0 = T_1^0 = T_2^0 = T_j^0 = 348.15K$$

$$T_0^1 = T_1^1 = T_2^1 = T_j^1$$

⋮

⋮

$$T_0^m = T_1^m = T_2^m = T_j^m = 310.15K$$

根据先前建立的一维热传导方程

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (9)$$

可得

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x_i} = k_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x_i} \quad (10)$$

将 j 、 m 、 Δt 、 Δx 代入可得

$$\frac{c\rho(T_j^{m+1} - T_j^m)}{\Delta t} = k \frac{T_{j+1}^m - 2T_j^m + T_{j-1}^m}{\Delta x^2} \quad (11)$$

继续推导上述方程可以得到

$$T_j^{m+1} = T_j^m + \frac{k}{c_i \rho_i} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{j+1}^m - 2T_j^m + T_{j-1}^m) \quad (12)$$

由式 (5.12) 可以看出, 要求 T_j^{m+1} , 需要先求出 T_{j+1}^m 、 $2T_j^m$ 、 T_{j-1}^m , 在网格中体现, 即用知三角形两点坐标确定第三顶点坐标的方法。再利用 $j=0$ 时温度相等的条件, 列方程得:

$$k_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_0} = k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_0} \quad (13)$$

$$k_0 \left(\frac{T_0 - (75 + 273.15)}{\Delta x} \right) = k_1 \left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

类似式 (5.12), 可以得到 T_0^1 的表达式:

$$T_0^1 = \frac{k_0 T_0^1 + k_1 T_1^1}{k_0 + k_1} \quad (15)$$

由“时间-空间”坐标轴结合三角形确定顶点值的方法, 可以求得假人体皮肤的热传导率 $k_\lambda = 0.0017$, 同时可以得到高温作业专用服的温度分布表和温度分布图。

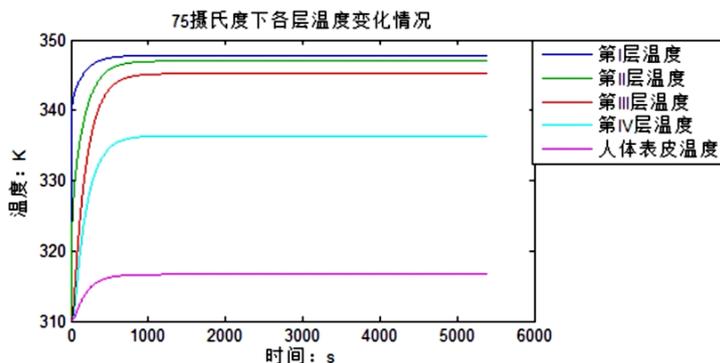


图 6 各层温度随时间变化曲线 (温度分布)

其中, 作为模拟人体皮肤的热传导率 k_λ , 经过假设模拟人体的皮肤为第 V 层材料, 利用 k_λ 可以由假人的体温推导得到左侧各层温度, 这是运用防护服和控制可适应温度的重要规律。

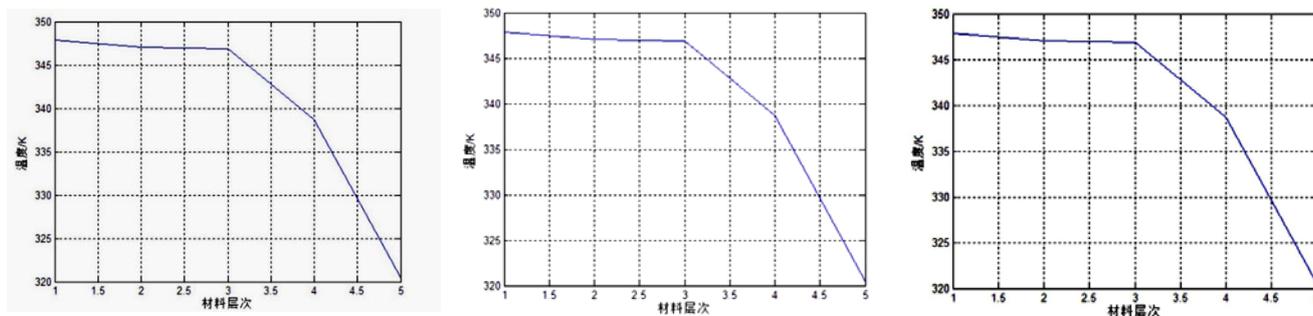


图 7 工作在 30、60、90 分钟时衣服各层温度分布曲线 (从左至右)

表 1 各层材料温度分布表（部分）

时间/s	第 I 层左温度/ °C	第 II 层左温度/ °C	第 III 层左温度/ °C	第 IV 层左温度/ °C
0	47.49	37	37	37
1	63.59	40.47	38.21	37.00
2	64.99	43.38	40.95	37.00
...
5398	74.67	73.92	73.75	65.55
5399	74.67	73.92	73.75	65.55
5400	74.67	73.92	73.75	65.55

计算出各层温度分布之后，可对照测量值进行误差分析，误差分析如下：

建立模型求解出的假人体皮肤表面温度，与附件 2 给出的实际测量值之间有一定的偏差，所以对得出的两组数据进行误差分析。我们在分析时，采用了均方根误差分析法来进行误差分析。均方根误差算的是观测值与其模拟值之间的偏差，在本题中就是测量值与计算值之间的误差，计算公式为

$$Re = \sqrt{\frac{\sum di^2}{(n-1)}}$$

我们将两组人体皮肤表面温度值进行函数比较，得出均方根误差为 1.59495，误差较小，结果合理。

3 结论

本文就高温条件下作业服装对人体的保护作用进行了探索，建立了以“高温专用服-空气层-皮肤”为主体的高温防护服装的热传递数学模型，得出了一些技术性结论，进一步优化高温防护服的设计，实现在一定时间内阻止皮肤接触面升温过快，保障施工人员的生命安全。本数学模型亦可用于室内对室外温度的隔离，如应用于窗户、门墙等建筑，夏季对外界高温进行隔离，保持室内凉爽；冬季对室内温度进行维持，避免过度寒冷等。同时，可对门窗进行进一步设计加工，如对旧窗户自行改装，加上一层玻璃，设计成双层窗，在经济节约的同时，亦可有效的保证室内温度的恒定。本研究主要体现在如下三点：

(1)该模型结合实际的物理过程，运用了一维热传导方程，将整个高温作业专用服装的材料层细化分开，还模拟增加了环境和假人体这两层辅助材料层方便求解。

(2)该模型在求解分层温度的热传导方程时，采用了网格化的方法，对时间和空间条件进行离散，在编程时递进求解，减小了求解误差，提高了模型效率。

(3)本文中建立的模型具有实际意义，除了对高温防护进行探究外，也可对保温、隔热的情况加以拓展。

REFERENCES

- [1] Wang Yuanming. Mathematical physics equations and special functions [M]. Beijing: higher education press, 2012
- [2] Xu maoliang. Mathematical modeling and mathematical experiment [M]. Beijing: national defense industry press, 2015
- [3] Si Shoukui, Sun Zhaoliang. Mathematical modeling algorithm and application. Beijing: national defense industry press, 2017
- [4] Lu Linzhen, Xu dinghua, Xu Yinghong. Prediction of skin burn degree using improved heat transfer model of three-layer thermal protective clothing [J]. Chinese journal of textiles, 2018, 39 (1)
- [5] Pan Bin. Mathematical modeling and inverse problem of parameter determination for thermal transmission of thermal protective clothing [D]. Zhejiang: zhejiang university of science and technology, 2016
- [6] Li Chun, Zhang Liyuan, Qian Shangwu. Thermology [M]. Beijing: higher education press, 2015

- [7] Yang Jie. Simulation and experimental study of human thermal response at high temperature based on human body -- clothing -- environment [D]. Beijing: tsinghua university, 2016
- [8] Guo Hong. Mathematical modeling of investment income of house insulation measures [J]. Journal of weifang university, 2009, 9 (2)
- [9] D.A. Torvi and J.D.Dale. Effects of Variations in Thermal Properties on the Performance of Flame Resistant Fabrics for Flash Fires[J].Textile Res.J,1998,68:787-796
- [10] Stapleton J M, Wright H E, Hardcastle S G, et al. Body heat storage during intermittent work in hot-dry and warm-wet environments. Applied Physiology Nutrition and Metabolism,2012,37(5):840-849

【作者简介】



¹ 张煜翀（1997），男，汉，本科在读，² 曹莎（1999），女，汉，本科在读，湖南科技大学在读本科生。湖南科技大学在读本科生。Email: 1245567271@qq.com
Email:1245567271@qq.com