



Optimal Thickness Design of Thermal Protective Clothing

Zhuojun Yao^{1,*}, Yuefeng Li², Zhihong Liu³

¹Department of Economics & Management, Rongcheng College of Harbin University of Science and Technology, Weihai, China

²Department of Mechanical Engineering, Rongcheng College of Harbin University of Science and Technology, Weihai, China

³Department of Software Engineering, Rongcheng College of Harbin University of Science and Technology, Weihai, China

Email address:

929063056@qq.com (Zhuojun Yao), 2742456589@qq.com (Yuefeng Li), liujialuoqsys93@qq.com (Zhihong Liu)

*Corresponding author

To cite this article:

Zhuojun Yao, Yuefeng Li, Zhihong Liu. Optimal Thickness Design of Thermal Protective Clothing. *Science Discovery*. Vol. 7, No. 3, 2019, pp. 152-160. doi: 10.11648/j.sd.20190703.14

Received: April 8, 2019; Accepted: May 24, 2019; Published: June 15, 2019

Abstract: Under the premise of ensuring the protective effect, it is of great significance to design the optimal protective suit. In this paper, under the premise of analyzing the basic temperature distribution, the optimal thickness of the protective clothing is optimized. First, a temperature distribution model based on the heat transfer equation. The partial differential equations of temperature, time and spatial position are written for fabric layers I, II, III and air layer IV respectively. The initial and boundary conditions are given according to the measured external temperature and thermodynamic laws of skin. The finite difference method is used to numerically solve the partial differential equations to obtain the temperature distribution at different time and space. It was found that the human skin temperature increased with time and reached a steady state at time $t=1645s$. Then the optimal thickness is solved. Under the condition of meeting the basic safety requirements, the constraint optimization model with the optimal II layer thickness (ie the thinnest and the lowest cost) as the objective function is established. Then use the particle swarm optimization algorithm based on dynamic target method to solve. The optimum layer thickness was found to be 6.2 mm. Finally, the model was tested. Using the finite element heat transfer analysis of ANSYS workbench to simulate the temperature distribution in the actual material, the similarity is high, which proves that the temperature distribution model is more accurate. This model can be extended to other heat transfer related clothing and container optimal thickness design.

Keywords: Thermal Protective Clothing, Heat Transfer Model, Finite Difference Method, Particle Swarm Optimization, ANSYS Finite Element Analysis

热防护服最优厚度设计

姚卓君^{1*}, 李月峰², 刘芷宏³

¹哈尔滨理工大学经济与管理系, 威海, 中国

²哈尔滨理工大学机械工程系, 威海, 中国

³哈尔滨理工大学软件工程系, 威海, 中国

邮箱

929063056@qq.com (姚卓君), 2742456589@qq.com (李月峰), liujialuoqsys93@qq.com (刘芷宏)

摘要: 在保证防护效果的前提下, 设计出最优的防护服意义重大。本文在分析出基本温度分布的前提下, 对防护服最优厚度进行了优化。首先, 基于热传递方程的温度分布模型。分别对织物层I、II、III及空气层IV列写了温度与时间及空间位置的偏微分方程, 根据测得的皮肤外测温度及热力学定律给出了初值及边值条件。运用有限差分法对偏微分方程进行数值求解, 得到在不同时间及空间处的温度分布。发现人体皮肤温度随时间增加而增高, 并在时刻 $t=1645s$ 达到稳态。随后对最优厚度进行求解, 在满足基本安全要求的条件下, 建立了以能耗关系为理论基础, 以最优II层厚度(即

最薄，成本最低）为目标函数的约束条件优化模型。然后利用基于动态目标法的粒子群算法进行求解。求得最优II层厚度为6.2mm.最后对模型进行检验。使用ANSYS workbanch的有限元的热传递分析对实际材料中的温度分布进行模拟，结果相似程度高，证明温度分布模型较为准确。本模型可以推广至其他热传递相关的服饰、容器最优厚度设计。

关键词：热防护服，热传递模型，有限差分法，粒子群优化，ANSYS有限元分析

1. 引言

热防护服是指在高温环境中穿用的、能够促使人体热量散发、防止热中暑、烧伤和灼伤等危害的个体防护服装。其工作原理就是减缓热转移的速度，使热量在人体皮肤上的尽量少积聚，保护皮肤不被烧伤或灼伤。大量的以高温作业环境为基础的实验测试，无法重复且耗费成本巨大，造成了不必要的资源浪费。因此，建立高温环境下热防护服装的设计模型，为热防护服装的设计提供理论依据显得十分必要[1]。

关于热防护服传递模型的研究已成为近年热点问题。现有的模型根据热防护服是采用单层还是多层材料，分为单层和多层模型。单层模型中热防护服只有外壳,国内外研究者主要研究其外部火焰的辐射热量、织物的物理学性质以及织物与皮肤之间的空气层厚度等因素对防护服热性能的影响[2]。单层模型上，朱方龙[3]研究了不同曲面下的热传递过程，Chittrphiomsri等[4]提出了多孔介质的防护服内部热湿耦合模型。多层方面，Mell等[5]提出了热传导和热辐射下层与层之间的传热模型。Ghazy等[6]考虑到空气层，建立了织物中包含多空气层的多层织物热传递模型。本文简化了热传递的过程，在热辐射可忽略的前提下，考虑到热传导和热对流及空气层对热传递性能的影响，建立了易于推广的厚度设计模型。

热量传递中要解决的主要问题之一是温度分布，即在给定时间的空间某区域内温度随空间位置及时间的变化。经查找文献可知，能量转移时，包含热传导、热对流和热辐射。由于I层材料阻挡了大部分的热辐射，因此在织物内部传递的过程中，可以忽略热辐射能量的影响；而且，当空气层的厚度值不超过6.4mm时，热对流影响小，亦可忽略。因此，根据能量守恒定律，列出每层的热传递方程式及其初始条件、边界条件，利用MATLAB等软件求解偏微分方程。最终得到温度数值随空间位置及时间的变化规律（即温度分布）[7]。

为得到II层的最优厚度，应建立以第二层厚度为目标函数的优化模型。根据热量守恒可以得到厚度与时间t的关系式。建立有约束的动态粒子群模型，即可得到最优的II层厚度。

各层基本参数如表1所示：

表1 防护服各层参数。

分层	密度(kg/m3)	比热(J/(kg·°C))	热 传 导 率 (W/(m·°C))	厚度(mm)
I层	300	1377	0.082	0.6
II层	862	2100	0.37	0.6-25
III层	74.2	1726	0.045	3.6
IV层	1.18	1005	0.028	0.6-6.4

2. 基于热传递方程的温度分布模型

2.1. 模型建立

高温作业专用服由三层不同的隔热材料组成，也就是I、II、III层。在假设的基础上，根据能量守恒定律，建立I、II、III层以及空气层的偏微分方程[8]。

STEP 1

I层材料热传递方程：

$$C_1 \frac{\partial T}{\partial t} = k_1 \Delta T_1(x_1, t) + W_{rad1} \quad (x_1, t) \in \Omega_1 \times (0, t_{exp}) \quad (1)$$

其中，

$$\begin{cases} C_i = \rho c_p \\ \Delta T_1(x_1, t) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ W_{rad1} = \frac{\partial F_L(x_1, t)}{\partial x} - \frac{\partial F_R(x_1, t)}{\partial x} \end{cases}$$

$\frac{\partial F_L(x_1, t)}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial F_R(x_1, t)}{\partial x}$ 满足如下关系式：

$$\frac{\partial F_L(x_1, t)}{x} = \beta F_L(x_1, t) - \beta T^4(x_1, t), \quad (x_1, t) \in \Omega_1 \times (0, t_{exp}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial F_R(x_1, t)}{\partial x} = \beta F_R(x_1, t) - \beta T^4(x_1, t), \quad (x_1, t) \in \Omega_1 \times (0, t_{exp}) \quad (3)$$

其中 T 为温度； t 为时间； x 为到服装最外层的距离； C_i ， $i \in (1, 4)$ 为材料的显热容，反映了热传递过程的能量变化； W_{rad1} 为单位长度辐射的改变量； $F_L(x_1, t)$ 为向左的辐射量， $F_R(x_1, t)$ 为向右的辐射量。 Ω_i 表示关于 t_{exp} 取值范围； t_{exp} 为暴露在高温环境中的时间[9-10]。

在时间为0时，人员刚进入高温环境，此时认为衣服和人体都处于 37°C 。并且认为最外层织物与外界环境的接触面始终等于环境温度。因此，初始及边界条件如下：

初始条件：

$$T(x, 0) = 37^\circ\text{C}, \quad x \in (0, l_1)$$

边界条件：

$$\begin{cases} T(0,t) = 75 \\ -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1} = -k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1} \end{cases}$$

STEP 2

同理可得II层材料热传递方程:

$$C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_2 \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (x,t) \in (l_1, l_1 + l_2) \times (0, t_{\text{exp}}) \quad (4)$$

其中, $C_i = \rho c_p$

在层与层之间的交界面, 能量及温度必然相等。对I层末的温度值进行拟合, 建立t与能量T的关系式, 此关系也是II层的初态, 是II层的边界条件。因此, II层初值及边界条件为:

初值条件:

$$T(x,0) = 37^\circ \text{C}, x \in (l_1, l_1 + l_2)$$

边界条件:

$$\begin{cases} T(0,t) = -3.307e^{-5}t^3 + 0.004207t^2 + 0.07513t + 36.32 \\ -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1+l_2} = -k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1+l_2} \end{cases}$$

$$C_4 \frac{\partial T}{\partial t} = k_4 \Delta T_4(x_4, t) - \frac{\partial q_{\text{rad}2}}{\partial x} \quad (x,t) \in (l_1 + l_2 + l_3, l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \times (0, t_{\text{exp}}) \quad (6)$$

其中:

$$\Delta T_4(x_4, t) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$C_i = \rho c_p$$

同理, 其初始条件:

$$T(x,0) = 37^\circ \text{C}, x \in (l_1 + l_2 + l_3, l_1 + l_2 + l_3 + l_4)$$

III层材料传递方程为:

$$C_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_3 \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (x,t) \in (l_1 + l_2, l_1 + l_2 + l_3) \times (0, t_{\text{exp}}) \quad (5)$$

其中 $C_i = \rho c_p$

类似, 可以得到第III层初始及边界条件。III层的初始及边界条件如下所示:

初值条件:

$$T(x,0) = 37^\circ \text{C}, x \in (l_1 + l_2, l_1 + l_2 + l_3)$$

边界条件:

$$\begin{cases} T(0,t) = 0.3108t + 34.67 \\ -k_3 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1+l_2+l_3} = -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_1+l_2+l_3} \end{cases}$$

STEP 3

第IV层热传递方程:

边界条件:

$$\begin{cases} T(0,t) = 37e^{-2.035 \times 10^{-9}t} + 1.057 \times 10^{-8}e^{0.1159t} \\ T(x,t) = 48.14e^{-2.975 \times 10^{-7}t} - 12.62e^{-0.00406t} \end{cases}$$

将比热、密度、热传导率、厚度等有关参数带入MATLAB进行求解。第一层的温度分布如图1所示。

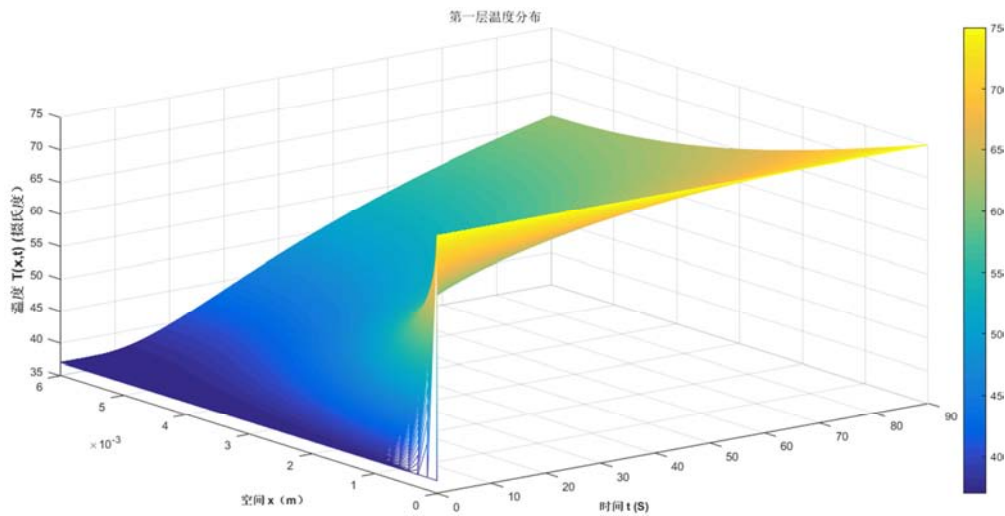


图1 第一层温度分布。

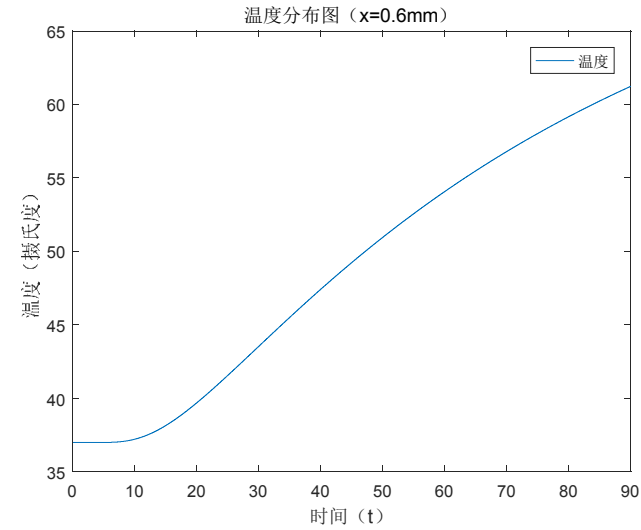


图2 温度分布图 (x=0.6mm)。

由图可知，温度随着距边界距离的增大而降低，随着时间的推移而升高。并且在离边界最近的位置，温度随着时间的推移急剧增加。距离边界越远的，温度随时间增加越缓。这与常识是相符的，证明了模型结果具有一定的合理性。

当 $x=0.6\text{mm}$ 时，可以得到点集 $P\{t, T\}$ 。对用拟合工具箱对点进行拟合，得到 $T(0.6,t)=-3.307e^{-5}t^3+0.004207t^2+0.07513t+36.32$ 。这也是第二层初始空间位置的边界条件。把此边界条件带入程序可以得到第二层的温度分布。

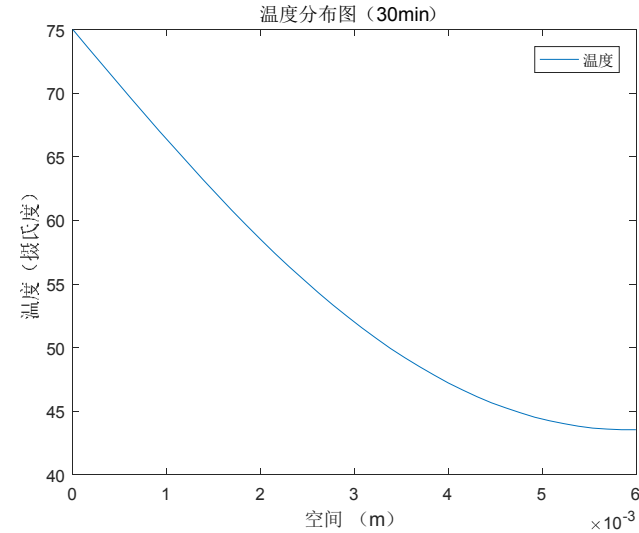


图3 温度分布图 (t=30min)。

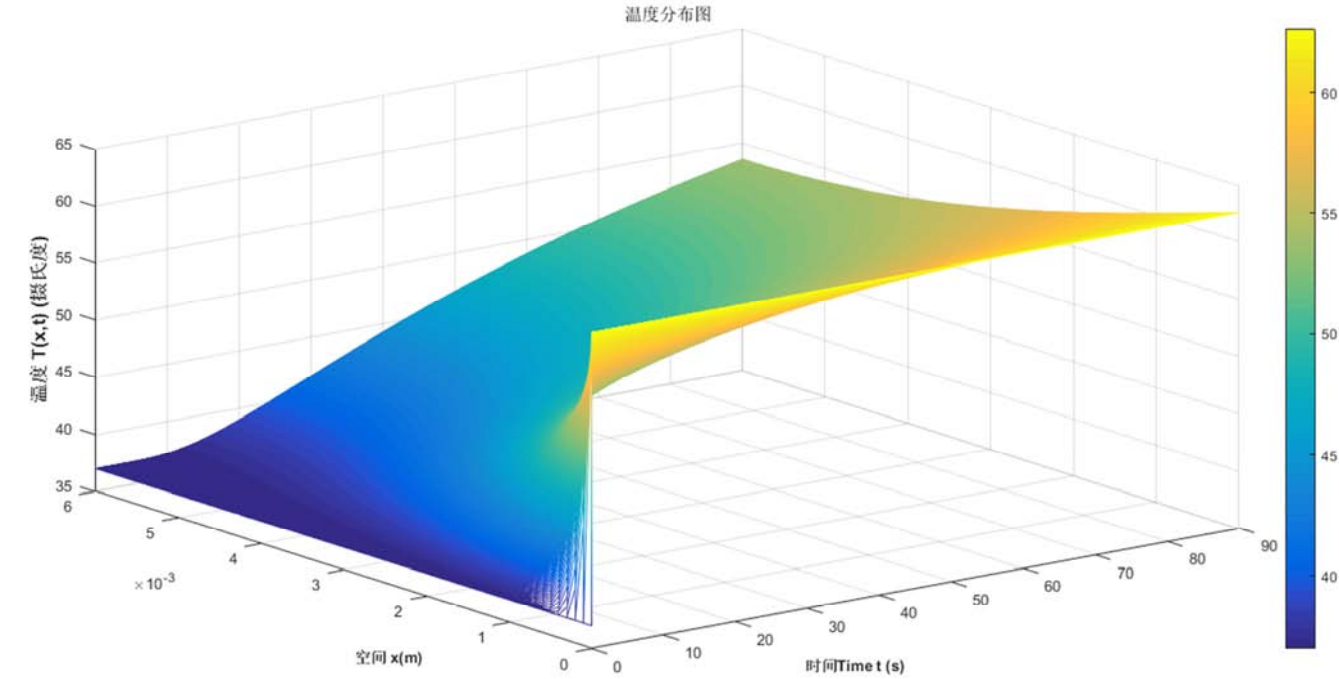
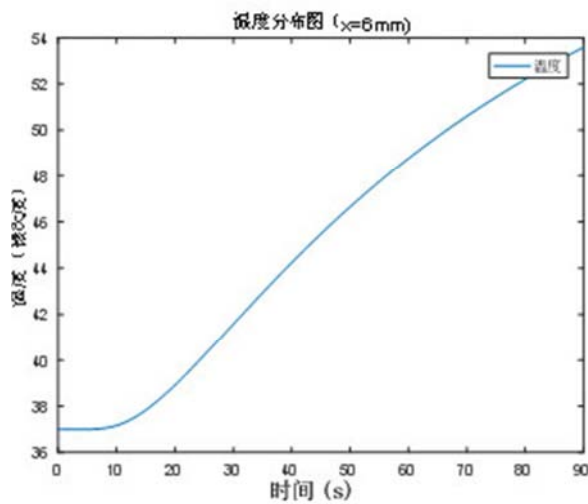


图4 第二层温度分布。

图5 温度分布图 ($x=6.6\text{mm}$)。

与第一层类似，温度随着距边界距离的增大而降低，随着时间的推移而升高。且距离边界越远的，温度随时间增加越缓。

当 $x=6.6\text{mm}$ 时，同样对点进行拟合，得到 $T(0,t)=0.3108t+34.67$ 。这也是第三层初始空间位置的边界条件。把此边界条件带入程序可以得到第三层的温度分布。

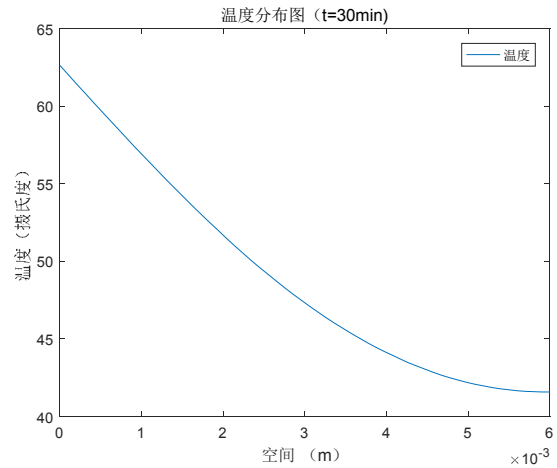
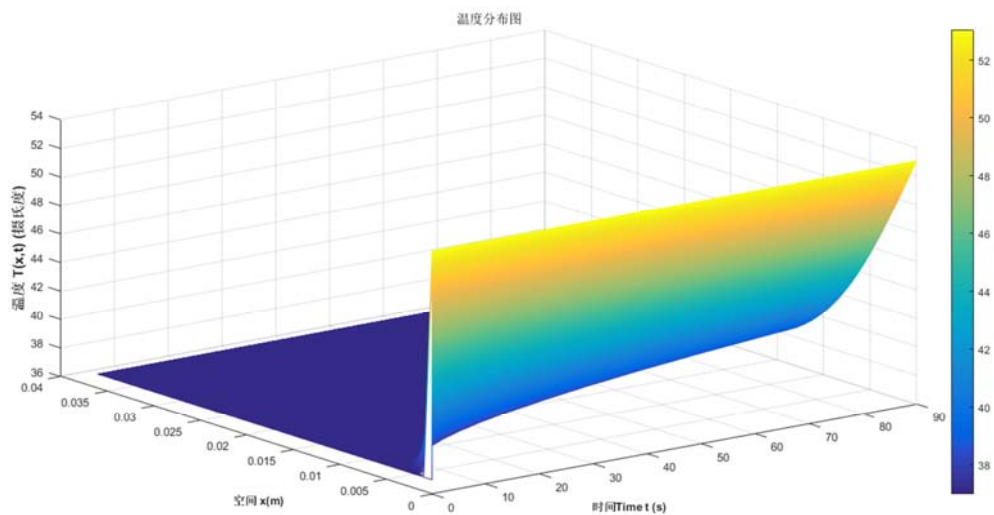
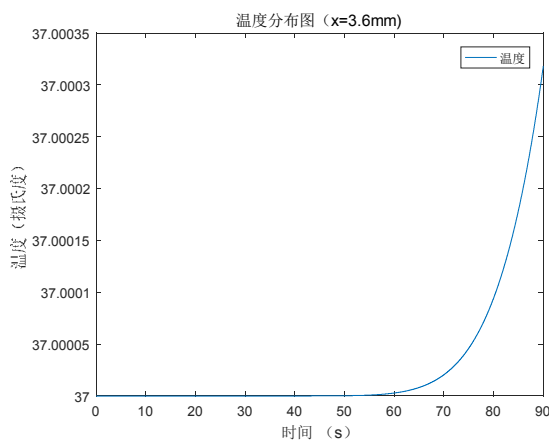
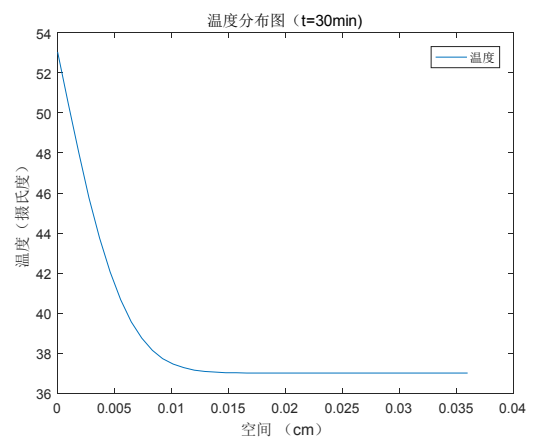
图6 温度分布图 ($t=30\text{min}$)。

图7 第三层温度分布。

图8 温度分布图 ($x=10.2\text{mm}$)。图9 温度分布图 ($t=30\text{min}$)。

温度随着距边界距离的增大而降低，随着时间的推移而升高。且距离边界越远的，温度随时间增加越缓，渐渐接近稳定。

令 $x=10.2\text{mm}$, 拟合得到 $T(0,t)=37e^{-2.035\times10^{-9}t}+1.057\times10^{-8}e^{0.1159t}$,这也是第四层初始空间位置的边界条件。把此边界条件带入程序可以得到第四层的温度分布。又因为已知皮肤表面不同时间对应的温度。可以据此拟合出在第四层空间位置末态时温度与时

间的关系。拟合得 $T(x,t)=48.14e^{-2.975\times10^{-7}t}-12.62e^{-0.00406t}$ 拟合效果如图10所示。输出的R-square为 0.9977, 可见拟合效果极好。可以认为 $T(x,t)=48.14e^{-2.975\times10^{-7}t}-12.62e^{-0.00406t}$ 是其函数关系式。因此有边界条件 $T(x,t)=48.14e^{-2.975\times10^{-7}t}-12.62e^{-0.00406t}$ 。求解可得第四层的温度分布。如图11所示。

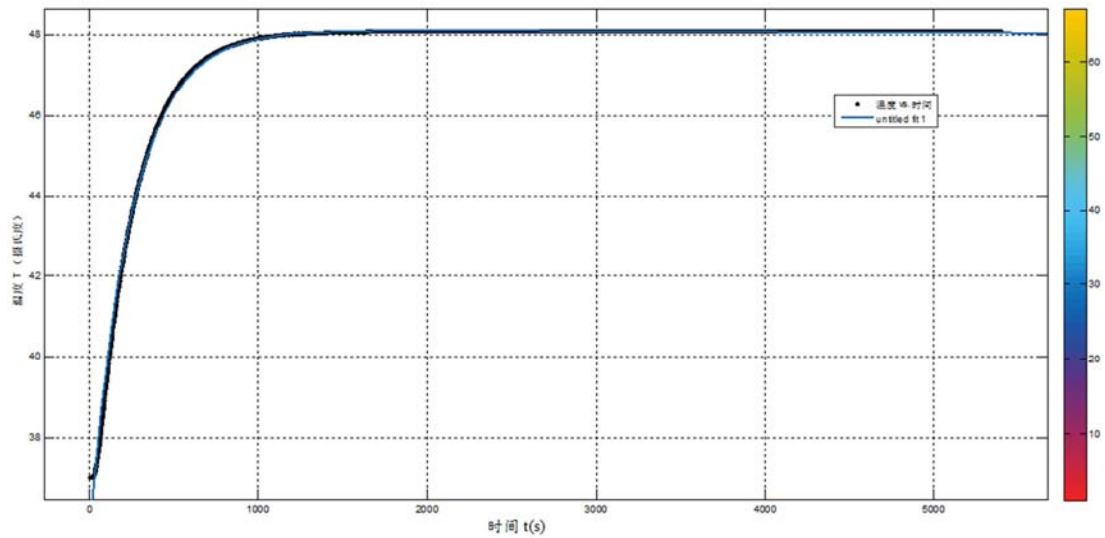


图10 用t对T进行拟合 ($x=15.2\text{mm}$)。

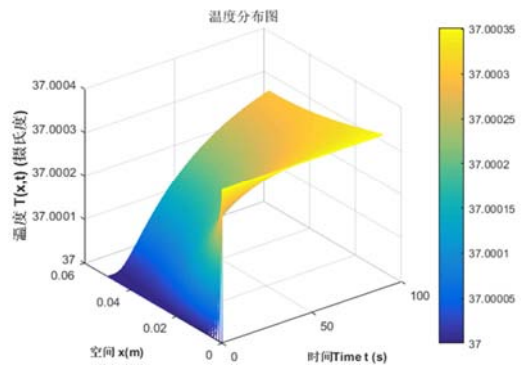


图11 第四层温度分布。

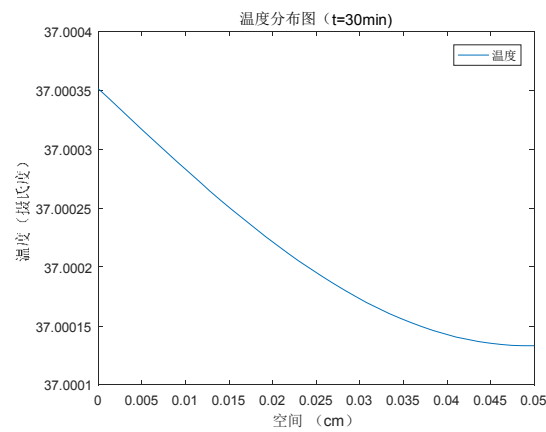


图13 温度分布图 ($t=30\text{min}$)。

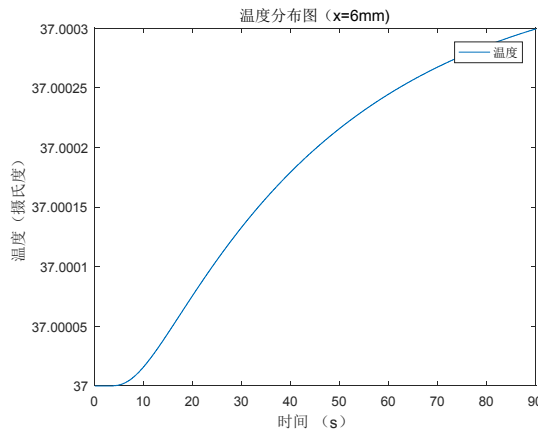


图12 温度分布图 ($x=15.2\text{mm}$)。

易知，温度随着距边界距离的增大而降低，随着时间的推移而升高。且距离边界越远的，温度随时间增加越缓。人皮肤温度随时间增加而增高，并在时刻 $t=1645\text{s}$ 达到稳态。

2.2. 温度分布模型的检验——有限元的热传递分析

以三层材料作为研究对象，利用 CREO 建模软件创建实体模型，经 ANSYS workbench 的有限元分析，得到服装的温度分布[11]。

ANSYS workbench 热力学基础公式。

(1) 能量守恒定律

热应力遵循能量守恒定律，对于一个封闭系统有：

$$Q - W = \Delta U + \Delta EK + \Delta EP \quad (7)$$

式中， Q 为能量， W 为做功， ΔU 为系统内能变化量， ΔEK 为系统动能变化量， ΔEP 为系统势能变化量。而对于大多数的热传导 ΔEK 和 ΔEP 均为0，并且通常不考虑做功，则公式简化为：

$$Q = \Delta U \quad (8)$$

(2) 热传导

热传导是指两个完全接触的物体之间由于温度梯度引起的能量交换。其公式如下：

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

式中， q'' 为热流密度， k 为热导率，而负号表示热量流向温度梯度的方向。

(3) 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间由于温差的存在引起的热量的交换。其可用下式描述：

$$q'' = h(T_s - T_b) \quad (10)$$

式中， q'' 为热流密度， h 为热换系数， T_s 为固体表面的温度， T_b 为环境中流体的温度。

(4) 热辐射

热辐射是指物体发射电磁波被其他物体吸收并转变为热的热量交换过程。其可用下式表示：

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{Q_i}{A_i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (11)$$

式中， N 为辐射面的总数， δ_{ij} 为克罗内克符号， ε_i 为辐射面 i 的有效发射率， F_{ji} 为辐射视角系数， Q_i 为辐射 i 损失的能量， A_i 为辐射面 i 面积， σ 波尔兹曼常数， T_i 辐射面绝对温度。

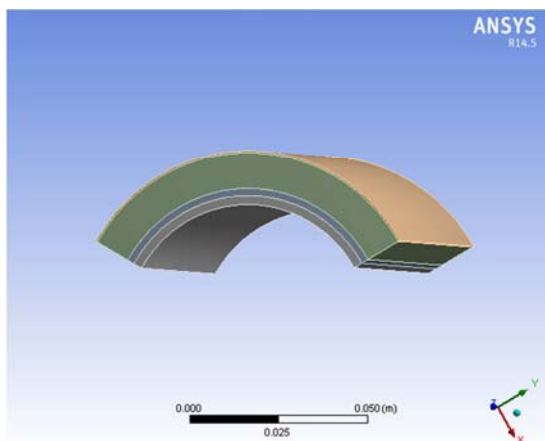


图14 材料分布图。

有限元热分析的步骤和结果

(1) 首先根据附件设置材料尺寸、比热和密度等数据。根据 软件画出四种材料的组件，然后同ANSYS选取各个材料来进行网格的划分，如图15

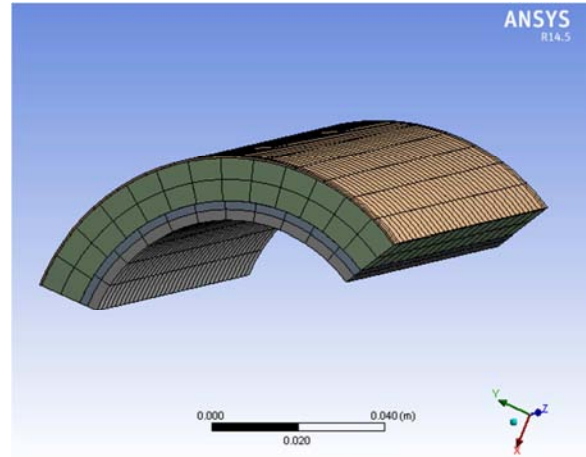


图15 网格划分图。

(2) 通过软件的工具包进行热传递分析[12-13]，得出各个材料的温度分布图和热流场图像

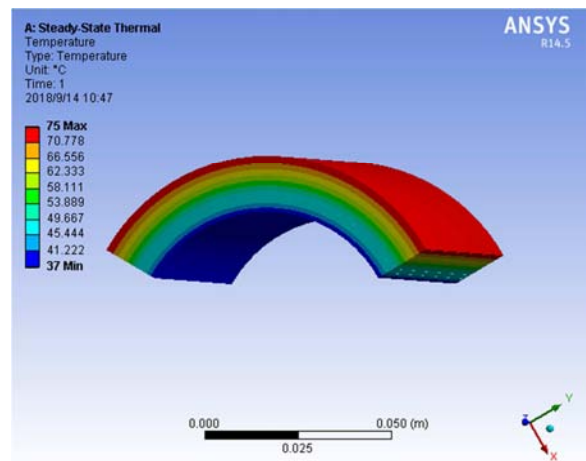


图16 温度分布图。

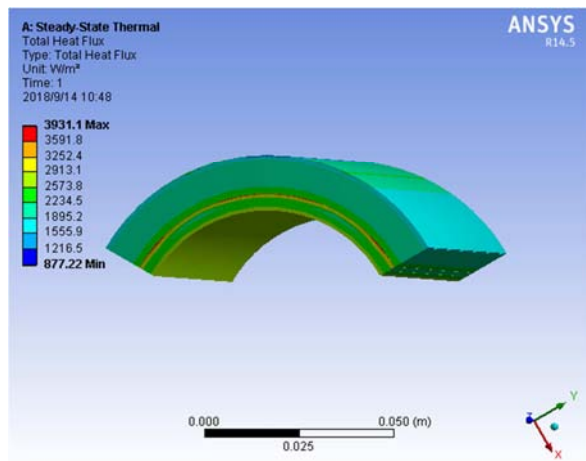


图17 热流场图。

(3) 误差分析:

表2 误差分析表。

材料	I层	II层	III层	IV层
仿真结果	69.7	52.7	43.3	37.9
模型结果	70.3	53.4	45.2	38.1

将计算结果与仿真结果进行对比, 结果发现结果精准, 模型建立准确。

3. 基于动态目标法 (DOM) 改进PSO的单目标寻优模型

以环境温度为65°C为例, 以确保工作60分钟时, 人体皮肤外侧温度不超过47°C, 且超过44°C的时间不超过5分钟为目标建立二层厚度优化模型。

STEP 1

根据能量守恒定律建立各个层之间的能量传导方程:

$$Q_{i\text{吸收}} = Q_{i\text{损耗}} + Q_{i+1\text{吸收}} \quad (12)$$

$$Q_{i\text{吸收}} = C_i m (T_{i+1} - T_i)$$

$$\rho_i A \delta_i = m_i$$

$$Q_{i\text{损耗}} = (\lambda_i A (T_{i+1} - T_i) t / 1000 \delta_i) \times 860$$

$$s.t. \begin{cases} T_5(3600) < 47 \\ T_5(3300) < 44 \\ T_{i+1} > T_i \\ 37 \leq T_i \leq 65 \\ 0 \leq t \leq 3600 \\ 0.0006 \leq \delta_i \leq 0.052 \end{cases}$$

其中 i 表示层数, $1 \leq i \leq 4$; C_i 代表各层材料的比热; λ_i 代表各个材料的热传导率; m 为各个材料的质量; A 代表热量传导覆盖的面积; δ_i 为各个层的厚度; $T_{i+1} - T$ 为材料受热的温度差[14]。

整理得总能量方程:

$$\delta_2 = (31.82 * (T_3 - T_2) * t) / (688.5 * (T_2 - 65) - 6.52 * (T_4 - 37) - (117.53 * (T_2 - 65) + 10.75 * (T_4 - T_3) + 4.83 * (T_5 - T_4)) * t) \quad (13)$$

$$s.t. \begin{cases} T_5(3600) < 47 \\ T_5(3300) < 44 \\ T_{i+1} > T_i \\ 37 \leq T_i \leq 65 \\ 0 \leq t \leq 3600 \\ 0.0006 \leq \delta_i \leq 0.052 \end{cases}$$

其中, δ_i 为第 i 层的厚度; T_i 为第 i 层的温度; t 为时间变量。

STEP 2

动态目标法(DOM)

粒子群优化算法可以解决单目标无约束优化问题, 但其缺少处理问题约束条件的机制, 动态目标法(DOM)可有效解决这个问题[15]。对于一个约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min & f(X) \\ s.t. & g_i(X) \leq 0, i=1, 2, \dots, n_g \\ & h_j(X) = 0, j=1, 2, \dots, n_h \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $g_i(X)$ 为不等式约束, n_g 为不等式的个数; $h_j(X)$ 为等式约束, 个数为 n_h 。

DOM通过定义一个距离函数 $\Phi(X)$, 将原有约束的单目标优化问题 $\min f(X)$ 转化为一个无约束的双目标优化问题 $\min \{P(X), f(X)\}$, 其中 $\Phi(X)$ 看作第一个目标, $f(X)$ 看作第二个目标。距离函数 $\Phi(X)$ 定义如下:

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^{n_g} \max \{0, g_i(X)\} + \sum_{j=1}^{n_h} \max \{0, |h_j(X)| - \varepsilon\} \quad (15)$$

其中, ε 为一个任意小的正数, 取 $\varepsilon = 0.001$ 。两个优化函数为距离函数 $\Phi(X)$ 和原目标函数 $f(X)$ 。若粒子位于可行域外, 则将 $\Phi(X)$ 作为优化目标; 否则, 就优化 $f(X)$ 。在优化过程中, 如果粒子离开了可行域, 则目标不变依然优化 $\Phi(X)$ 。因此, 粒子可以动态的调整自己的优化目标函数[16]。

利用动态目标法将建立的单目标优化模型简化, 可计算出第二层材料厚度的最优值。并通过算法将其适应度的曲线表示出来:

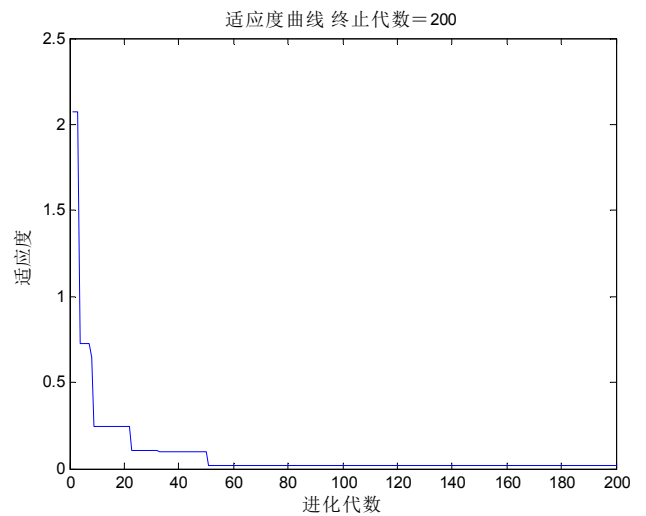


图18 粒子群算法结果。

通过曲线可知,其适应度越小和进化迭代越大表示其收敛效果较好,表示其函数收敛性好。当环境温度为65°C、IV层的厚度为5.5 mm时,II层的最优厚度为6.2mm。

4. 结论

在设计热防护服时,通过测量恒温人体模型表面温度和外界环境温度随时间的变化,利用热力学公式可以得到防护服各个厚度处的温度随时间的变化。从而可以在确定材料的情况下,得到各个层次的最优厚度。进而可以帮助生产企业在确保安全的前提下,获得最低的生产成本。

模型可以进行进一步的推广。如在确定防护服厚度的情况下,推导出材料的比热容或其他性质,从而确定出与要求最相符的材料。也可以用于保温杯的夹层厚度设计等。

参考文献

- [1] 卢琳珍.多层热防护服装的热传递模型及参数最优决定[D].浙江理工大学,2018。
- [2] 卢琳珍,徐定华,徐映红.应用三层热防护服热传递改进模型的皮肤烧伤度预测[J].纺织学报,2018,39(01):111-118+125。
- [3] 朱方龙. 服装的热防护功能[M]. 北京:中国纺织出版社, 2015: 98-131. ZHU FangLong. Clothing Thermal ProtectionFunction [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2015: 98-131.
- [4] CHITRPHIROMSRI P,KUZNETSOV A V. Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure [J]. Heat and MassTransfer, 2005, 41(3): 206-215.
- [5] MELL W E, LAWSON J R. Heat transfer model for firefighter's protective clothing [J]. Fire Technol, 1999, 36: 39-68.
- [6] AHMED GHAZY, DONALD J BERGSTROM. Numerical simulation of heat transfer in firefighters' protective clothing with multiple air gaps during flash fireexposure [J]. Numerical Heat Transfer Applications, 2012, 61(8): 569-593.
- [7] 李萍,张磊,王垚廷.基于Matlab的偏微分方程数值计算[J].齐鲁工业大学学报(自然科学版),2017,31(04):39-43.
- [8] 潘斌. 热防护服装热传递数学建模及参数决定反问题[D].浙江理工大学,2017.
- [9] 徐定华. 纺织材料热湿传递数学模型及设计反问题. 北京: 科学出版社2014.
- [10] 朱方龙,王秀娟,张启泽,张渭源.火灾环境下应急救援防护服传热数值模拟[J].纺织学报,2009,30(04):106-110.
- [11] 张建峰,王翠玲,吴玉萍,顾明.ANSYS有限元分析软件在热分析中的应用[J].冶金能源,2004(05):9-12.
- [12] 林冬华,武文斌,朱珊珊,李聪.磨辊轴承热力学有限元分析[J].现代面粉工业,2017,31(01):11-13.
- [13] 潘从芳,娄毅,蔺红,张起瑞,杨一,胡贺明.基于ANSYS的温度场仿真分析[J].工业控制计算机,2015,28(08):104-105.
- [14] 徐迅.多目标粒子群优化算法及其应用研究[D].江南大学,2014.
- [15] 刘彬,张仁津.基于动态多粒子群的多目标优化算法[J].计算机应用,2013,33(12):3375-3379.
- [16] 欧伟.结构多目标模糊优化设计[D].重庆大学,2006.