

高温作业专用服装设计

晋菁璞^{1*}, 符一凡^{3*}, 张宸伊², 宋梓辉³, 陈泽静¹

1. 三亚学院 人文与传播学院, 海南 三亚 572022

2. 三亚学院 管理学院, 海南 三亚 572022

3. 三亚学院 盛宝金融科技商学院, 海南 三亚 572022

DOI: 10.61369/TACS.2025080004

摘 要 : 本文研究了高温作业专用服装的设计问题, 旨在通过数学模型确定假人皮肤外侧的温度变化, 以优化服装设计。基于能量守恒定律, 建立了非稳态偏微分热传递控制方程, 并通过拟合优化问题求解对流热传递系数 h1 和 h2。研究采用显式差分方案对传热模型进行离散化处理, 通过迭代优化找到了最佳拟合的对流换热系数。结果表明, 对流热传递系数 h1 主要影响达到稳态的时间, h2 则主要影响稳态时的外皮温度。此外, 研究还验证了忽略辐射热传递的假设合理性。本文为高温作业专用服装的设计提供了科学依据, 有助于降低研发成本、缩短研发周期。

关 键 词 : 非稳态传热模型; 显式差分法; 对流热传递系数

Design of Special Clothing for High-Temperature Operations

Jin Jingpu^{1*}, Fu Yifan^{3*}, Zhang Chenyi², Song Zihui³, Chen Zejing¹

1. School of Humanities and Communication, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

2. School of Management, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

3. Saxo Financial Technology Business School, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

Abstract : This paper studies the design issues of special clothing for high-temperature operations, aiming to determine the temperature changes on the outer side of the dummy's skin through mathematical models to optimize the clothing design. Based on the law of conservation of energy, the non-steady-state partial differential heat transfer control equation was established, and the convective heat transfer coefficients h1 and h2 were solved by fitting the optimization problem. The research adopted the explicit difference scheme to discretize the heat transfer model, and through iterative optimization, the best-fitting convective heat transfer coefficient was found. The results show that the convective heat transfer coefficient h1 mainly affects the time to reach the steady state, while h2 mainly affects the outer skin temperature at the steady state. Furthermore, the study also verified the rationality of the assumption that radiative heat transfer was ignored. This article provides a scientific basis for the design of special clothing for high-temperature operations, which is conducive to reducing R&D costs and shortening the R&D cycle.

Keywords : transient heat transfer model; explicit difference method; convective heat transfer coefficient

引言

在高温环境下工作时, 人们需要穿着专用服装以避免灼伤。专用服装通常由三层织物材料构成, 记为 I、II、III 层, 其中 I 层与外界环境接触, III 层与皮肤之间还存在空隙, 将此空隙记为 IV 层^[1-4]。为设计专用服装, 将体内温度控制在 37℃ 的假人放置在实验室的高温环境中, 测量假人皮肤外侧的温度。为了降低研发成本、缩短研发周期, 利用数学模型来确定假人皮肤外侧的温度变化情况变得尤为关键^[5,6]。

一、非稳态传热模型

根据模型准备部分, 基于能量守恒定律, 可以建立非稳态偏微分热传递控制方程, 并确定初始值和边界条件^[7]。随后, 建立了服务的非稳态热传递模型。模型中的两个对流热传递系数未知。通过热传递模型, 建立了系数与测量温度之间的数值关系, 并通过拟合优化问题求解, 以获得最优的热传递系数, 该系数被应用

于后续服务的厚度设计。对于非稳态传热问题, 根据能量守恒定律, 建立了非稳态偏微分控制方程。即对于任何微元, 其热力学能的变化(表现为温度变化)等于该微元内热量流入与流出的差值。控制方程为:

$$\rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} \right) (j=1,2,3,4)$$

公式中, 左边项表示微元热机械能的变化量, 右边项表示电

池的热流进出量。

对于整个模型，第三种边界条件在两端应用，热量通过对流区向外流动。假设人体和工作服在进入高温环境后达到稳定状态，工作服的初始温度分布为虚拟温度37℃。

$$\begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=0} = h_1 (T_{en} - T(0, t)) \\ -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=L} = h_2 (T(L, t) - T_{le}) \\ T(x, 0) = T_{le} \end{cases}$$

在公式中，h1和h2分别代表两端的对流换热系数，T(0, t)和T(L, t)分别表示两端的界面温度，T(x, 0)为初始条件，Ten表示环境温度，Tren表示人体温度。对于非均匀材料的导热性，假设材料间接触良好，忽略接触热阻，并满足界面连续条件，即界面处的温度和热流保持连续：

$$\begin{cases} T(x_i^-, t) = T(x_i^+, t) \\ \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} (x_i^-, t) = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial x} (x_i^+, t) \end{cases} (i=1, 2, 3)$$

其中：i代表各接触面，如图1所示。

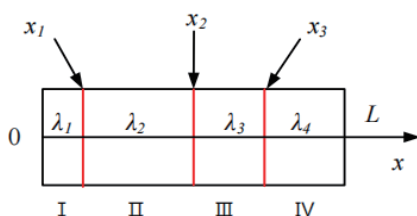


图1 材料接触面

在不稳定的一维传热模型中，两端的传热系数未知，参数估计模型采用最小二乘法建立：

$$(\hat{h}_1, \hat{h}_2) = \arg \min_{h_1, h_2} \sum_{i=1}^N [T(L, t_i; h_1, h_2) - T^*(t_i)]^2$$

其中，1和2是h1和h2的最小二乘估计值，T*(ti)是外皮的测量温度。

传热问题数值解的基本思想是在每个节点上对连续的物理量在时间和空间上进行离散化处理，用有限差分法求解物理量的数值解，如图2所示。

$$\begin{aligned} \text{参数估计: } & (\hat{h}_1, \hat{h}_2) = \arg \min_{h_1, h_2} \sum_{i=1}^N [T(L, t_i; h_1, h_2) - T^*(t_i)]^2 \\ & \rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} \right) (j=1, 2, 3, 4) \\ & \begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=0} = h_1 (T_{xm} - T(0, t)) \\ -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=L} = h_2 (T(L, t) - T_{le}) \end{cases} \\ \text{接触面: } & \begin{cases} T_i = T_{i+1} \\ \lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{j+1} \frac{\partial T}{\partial x} \end{cases} \\ \text{初始条件: } & T(x, 0) = T_{le} \end{aligned}$$

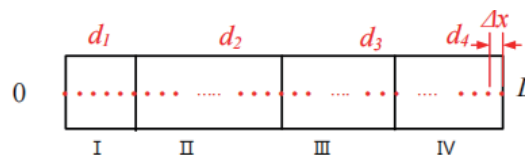


图2 离散图

存在两种不同的差分方案：显式和隐式。显式方案的计算量较小，但其准确性和稳定性不如隐式方案。隐式差分需要求解联立方程，虽然具有高稳定性和准确性，但计算量较大。由于数据量庞大，通常采用显式差分方案。本文中，使用显式差分方案对传热模型进行离散化处理。在求解(n+1)时间层的温度时，会依赖前一层的温度信息。在控制方程的离散化方案中，只有一个未知数Tin+1：

$$\begin{aligned} \text{控制方程: } & \Delta x_j \rho_j c_j \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \lambda_j \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x_j} \\ & \begin{cases} \frac{1}{2} \Delta x_1 \rho_1 c_1 \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = -h_1 (T_1^n - T_{en}) - \lambda_1 \frac{T_1^n - T_2^n}{\Delta x_1} \\ \frac{1}{2} \Delta x_4 \rho_4 c_4 \frac{T_4^{n+1} - T_4^n}{\Delta t} = -h_2 (T_4^n - T_{le}) + \lambda_4 \frac{T_4^n - T_3^n}{\Delta x_4} \end{cases} \\ \text{接触点: } & \frac{1}{2} (\Delta x_j \rho_j c_j + \Delta x_{j+1} \rho_{j+1} c_{j+1}) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \lambda_j \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\Delta x_j} + \lambda_{j+1} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_{j+1}} \end{aligned}$$

对于显式差分方案，离散解中需要考虑非稳态传热过程的稳定性。上述显式差分表明，空间节点i在时间节点n+1处的温度受到左右相邻点的影响，必须满足稳定性约束（即傅里叶网格数约束），否则会出现不合理的振荡解：

$$Fo_{\Delta} = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \quad (\text{傅里叶栅格编号})$$

$$Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2} \quad (\text{内部节点限制})$$

$$Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2 \left(1 + \frac{h \Delta x}{\lambda} \right)} \quad (\text{边界约束})$$

二、拟合分析

在对非稳态传热模型进行时空离散化处理后，可以根据边界条件和初始值条件，逐层在时间和空间节点上求解。通过建立未知参数的复合传热系数与虚拟物体外皮测量温度之间的数值关系，可以找到未知系数h1和h2，从而实现测量温度数据的最佳拟合。具体的求解步骤如下：

步骤一：代入h1、h2的初始值，对非稳态传热模型离散方程进行逐层求解，得到假定物体外表面温度的计算值；

步骤2：用最小二乘法求出计算值与实测值之间的误差，求残差平方和；

步骤3：更新h1和h2的值，再次将它们带入离散方程进行求解，得到新的温度计算值；

第四步：重复上述步骤，通过搜索和优化找到拟合度最好的对流换热系数，并将其应用到后续的服务设计中；

步骤5：根据搜索得到的最佳对流换热系数，求解服务温度分布。

根据上述解决方案步骤，确定了最佳拟合的对流热传递系数： $h_1=113\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ ； $h_2=8.344\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 。研究发现，对流热传递系数 h_1 主要影响达到稳态的时间；而 h_2 则主要影响稳态时的外皮温度。

在复合传热系数下，计算值与测量值的残差平方和为 3.6552；误差范围为 0.0061，拟合结果良好。此时，显式差分的最小傅里叶网格数为 $\text{Fo} \Delta \max=0.0472$ ；如果满足约束条件，解不会出现不合理的振荡。

表1 装配状态

$h_1/\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$	$h_2/\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$	残差平方和	一系列
113	8.344	3.6552	0.0061

根据两端的传热系数，采用非稳态传热模型计算温度分布，绘制出皮肤温度与时空三维温度分布图和稳态温度空间分布图，如图 4 所示。

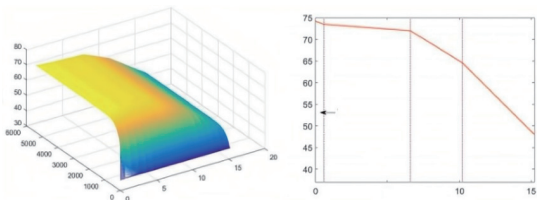


图3操作服务时空温度分布；稳态服务温度分布

温度分布数据的部分如下，其中为具体的温度分布信息。

表2 温度分布

t/min	$x=0\text{mm}$	$x=0.6\text{mm}$	$x=6.6\text{mm}$	$x=10.2\text{mm}$	$x=15.2\text{mm}$
5	70.18974	66.2322	59.8908	55.2576	44.3273
10	73.0906	71.5173	67.7980	62.0502	47.0590
15	73.8808	72.9568	69.9517...	63.9004	47.8030
80	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861
85	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861
90	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861

模型的准备阶段假设辐射热传递被忽略。在此基础上，对这一假设进行了验证，并进一步扩展了非稳态热传递模型。建立了并分析了包含辐射热传递项的模型。对于皮肤，可以近似视为绝对黑体，因此其发射率 $\varepsilon_{\text{skin}}=1$ ；对于工作服，发射率 $\varepsilon_g=0.02$ 。通过计算，得到了辐射热传递，并将其纳入非稳态热传递模型中：

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - q_{\text{辐射}} & \text{第三层右侧接口} \\ \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_2 (T_{\text{最后部分}} - T_{\text{皮肤}}) + q_{\text{辐射}} & \text{皮肤侧面} \end{cases}$$

参考文献

- [1] 巴德生. 基于有限元分析方法对高温作业专用服装设计的研究 [J]. 鞋类工艺与设计, 2024, 4(09): 3-5.
- [2] 周千. 基于热传导模型的高温作业专用服装设计研究 [J]. 西安航空学院学报, 2023, 41(05): 80-83.
- [3] 岳荣华. 对遗传算法下高温作业服装传热的探讨 [J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(09): 78-79.
- [4] 朱青, 郝永乐, 于洋洋. 基于有限元方法的高温作业专用服装设计 [J]. 周口师范学院学报, 2021, 38(05): 29-32.
- [5] 张美丽. 高温作业专用服装设计的数学模型研究 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2021, 42(03): 52-55.
- [6] 康晓婷. 高温作业专用服装设计分析 [J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(02): 76-78.
- [7] 徐小雅, 唐敏, 秦博文. 关于高温作业专用服装的研究 [J]. 内蒙古教育, 2020, (36): 41-48.

控制方程的离散形式为：

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(\Delta x_3 \rho_3 c_3 + \Delta x_4 \rho_4 c_4) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = -q_{\text{辐射}} + \lambda_4 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_4} + \lambda_3 \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\Delta x_3} \\ \frac{1}{2} \Delta x_4 \rho_4 c_4 \frac{T_{\text{最后部分}}^{n+1} - T_{\text{最后部分}}^n}{\Delta t} = -h_2 (T_{\text{最后部分}}^n - T_{\text{皮肤}}) + \lambda_4 \frac{T_{\text{最后部分}-1}^n - T_{\text{最后部分}}^n}{\Delta x_4} + q_{\text{辐射}} \end{cases}$$

在同一步骤中，建立了传热系数 h_1 和 h_2 与测得的温度值之间的数值关系，最佳拟合结果如图 5 所示。

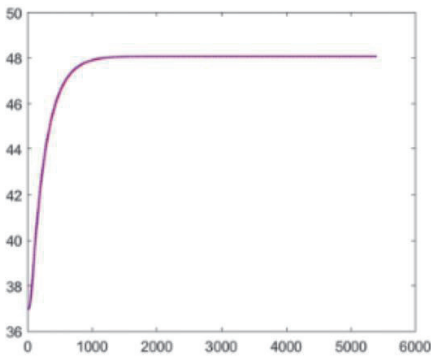


图4考虑辐射传热的拟合图像

在这种情况下，也可以获得更好的拟合结果。与无辐射传热的情况相比，传热系数 h_1 保持不变，而 h_2 从 $8.344\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 变为 $8.496\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ ，变化幅度很小。

表3 变化率

$h_1/\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$	$h_2/\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$	残差平方和	一系列
113	8.496	3.7703	0.0021

可以看出，由于防护服具有良好的隔热性能和低辐射发射率，辐射传热对整个非稳态传热过程的影响几乎可以忽略不计，模型建立部分的假设是合理的。

三、结语

本文通过构建非稳态传热模型，结合显式差分法，对高温作业专用服装的热传递特性进行了深入研究。通过优化对流热传递系数 h_1 和 h_2 ，实现了对假人皮肤外侧温度变化的精确预测，验证了模型的有效性和准确性。研究表明，对流热传递系数 h_1 和 h_2 对服装的热防护性能具有显著影响， h_1 主要影响达到稳态的时间，而 h_2 则主要影响稳态时的外皮温度。此外，通过对比分析考虑辐射传热与忽略辐射传热两种情况下的模型结果，发现辐射传热对整个非稳态传热过程的影响几乎可以忽略不计，从而验证了模型假设的合理性。本文的研究成果为高温作业专用服装的设计提供了科学依据，有助于优化服装结构，提高热防护性能，保障高温作业人员的安全与健康。