



防火服热湿传递数学建模及人体皮肤烧伤预测

吕婉莹, 徐映红

(浙江理工大学理学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了研究防火服内热湿传递规律, 首先根据织物结构内部热湿传递的质量守恒和能量守恒等物理学定律, 考虑消防水对热传递的影响, 在已有热传递模型基础上加入湿传递方程, 建立高温高湿环境下多层防火服-空气-人体皮肤系统中的热湿耦合传递数学模型。然后利用有限差分方法求解该模型, 得到防火服各层关于温度和水蒸气浓度的分布图。最后将热湿传递模型与皮肤烧伤模型相结合, 通过计算烧伤积分值, 预测了人体皮肤达到各级烧伤的时间。数值模拟表明: 一定量的湿传递能够有效减缓温度上升的速度, 延长皮肤达到各级烧伤的时间。该模型为高温高湿环境下防火服的设计提供了一定理论依据。

关键词: 防火服; 热湿传递数学模型; 皮肤烧伤模型; 有限差分法; 数值模拟

中图分类号: O242.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)05-0380-09

Mathematical modeling of heat and moisture transfer in fireproof clothing and prediction of skin burn

LÜ Wanying, XU Yinghong

(School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the law of heat and moisture transfer in the fireproof clothing, the moisture transfer equation was added on the basis of existing heat transfer model, mass conservation and energy conservation of internal heat and moisture transfer in fabrics, and impacts of fire-fighting water on heat transfer to establish a mathematical model for coupled heat and moisture transfer in multi-layer fireproof clothing-air layer-human skin system under high temperature environment. Then, the finite difference method was used to solve the model, and the distribution diagram of temperature and vapor concentration at each layer of fireproof clothing. Finally, the heat and moisture transfer model and skin burn model were combined to predict the time of skin burn at each level through calculating the burn integral value. The numerical simulation indicates that certain amount of moisture transfer can effectively ease temperature rising speed and extend the time of skin burn at each level. The model provides certain theoretical basis for the design of fireproof clothing under high-temperature and high-moisture environment.

Key words: fireproof clothing; mathematical model of heat and moisture transfer; skin burn model; finite difference method; numerical simulation

收稿日期: 2019-08-25 网络出版日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11501513, 11471287); 浙江省自然科学基金项目(LY18A010030)

作者简介: 吕婉莹(1993-), 女, 河南商丘, 硕士研究生, 主要从事反问题理论及应用方面的研究。

通信作者: 徐映红, E-mail: xyh7913@163.com

0 引言

防火服是常见的一类功能性服装,对保护消防员的生命安全起着至关重要的作用。随着科技的发展,防火服已具备阻燃、透气和隔热等性能,在一定程度上能够保护消防员的人身安全。然而,在实际消防作业过程中,消防员仍会面临高温辐射和低压蒸汽的共同危害^[1]。为了预防或减少热伤害,需要对防火服的设计提出更高的要求,而研究防火服内部热湿传递的规律将具有一定现实意义。

目前对防火服的研究主要分为两类:一类是热湿舒适性相关的实验研究^[2-4],一类是热湿规律的数学模型研究^[5-8]。实验方面的研究主要是通过设计实验来研究织物材料参数、空气层厚度和水含量等因素对防火服热防护性能的影响。数学模型方面的研究主要是通过建立热湿传递模型来研究服装内温度和水分的变化。从是否考虑湿传递的角度来说,现有的数学模型可分为热传递模型^[5]和热湿耦合传递模型^[6-8]。热传递模型不考虑织物内部的水分(包括水蒸气和汗水等),只研究火焰的辐射热量、织物的物理学性质和织物与皮肤之间微气候区的厚度等对防火服热性能的影响,如:卢琳珍等^[5]建立了三层热防护服热传递模型,并通过与皮肤烧伤模型相结合,预测了皮肤达到各级烧伤所需的临界时间。热湿传递模型既包含了热方程,又考虑了湿传递。如:He等^[6]基于经典傅里叶定律的 Pennes 三层皮肤模型计算了人体皮肤的传热,考虑了两种不同的织物组合,研究空气层位置和厚度以及水含量对热防护性能的影响,结果表明:二级烧伤的时间随空气层厚度的增加而有所延长,且织物含水率低于 20% 对热防护性能有负影响,高于该值则有正影响;Fu 等^[7]设计了一定热流量范围的试验台来研究湿气屏障对织物透气性的影响,结果表明:湿传递可以提高内层织物的保护性能;Fu 等^[8]建立了考虑热辐射吸湿的防护服热湿传递模型,数值模拟发现,温度变化和水分蒸发受热辐射影响较大。总之,上述热湿耦合传递模型都是研究特定因素对热防护服性能的影响,没有给出通用的热湿传递耦合模型,因此有必要对热湿耦合模型的建立与分析进行进一步探讨。

本文忽略人体出汗和织物吸水等因素的影响,只考虑消防水对热传递的作用,研究了防火服内热湿传递规律,为提高防火服热防护性能和预测人体皮肤烧伤达到各级烧伤的时间提供了理论依据。首先在卢琳珍等^[5]所建热方程的基础上,加入湿传递方程,建立了高温高湿环境下防火服-空气层-人体皮肤系统中的热湿耦合传递模型。卢琳珍等将模型分成五层,本文建立了七层,使模型更符合高温高湿的环境。然后,将热湿传递模型与皮肤烧伤模型相结合,来预测包含湿传递下人体皮肤达到各级烧伤的时间。最后,对比数值模拟结果和曹娟^[9]的实验结果,验证了模型的合理性。通过对防火服热湿传递过程的数值模拟,有助于我们理解复杂的传热传质现象,该模型的建立对于完善高温高湿条件下的热防护性能机制和改进防火服的设计具有重要意义。

1 防火服中热湿传递数学模型分析

1.1 防火服中的热湿传递

本文采用的防火服-空气层-皮肤系统的简化结构如图 1 所示。防火服由外层、防水层和隔热层组成,皮肤层由表皮、真皮和皮下组织三部分构成,其中:表皮和真皮之间的接触面称为基底基,真皮与皮下组织之间的接触面称为真皮基^[4]。图 1 中: L_s 为外层织物的厚度, m; L_m 为防水层织物的厚度, m; L_l 为隔热层织物的厚度, m; L_a 为空气层的厚度, m; L_{ep} 为表皮层的厚度, m; L_{ds} 为真皮层的厚度, m; L_{sc} 为皮下组织层的厚度, m。

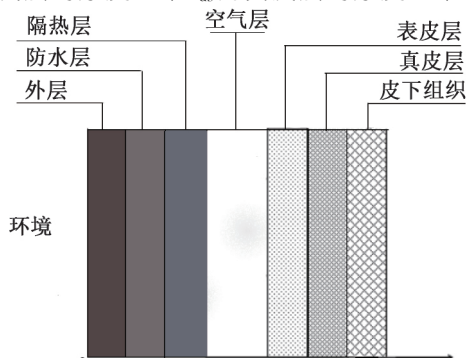


图 1 防火服-空气层-人体皮肤系统

为了更好地描述系统中的热湿传递规律,本文作如下假设:

- 防火服各层织物是各向同性的;
- 热湿传递过程中,织物的结构几乎不变,忽略由水分和含水量变化引起的纤维体积变化;
- 热湿传递过程中,防火服的材料没有发生溶解;
- 能量转移从环境到外层,包含热对流和热辐射;
- 空气层中不存在液态水;
- 湿传递过程中,只存在水分蒸发,忽略人体出汗以及织物吸水;
- 环境中的水分,只包含消防水。

基于上述假设,根据系统内热湿传递过程中能量守恒、质量守恒等物理学定律,可得防火服各层织物中关于温度和水蒸气浓度的偏微分方程组。防火服外层的方程为:

$$\begin{cases} C_s^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s(x, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial F_L(x, t)}{\partial x} - \frac{\partial F_R(x, t)}{\partial x} + \lambda(x, t) \eta_s(x, t) \\ \frac{\partial F_L(x, t)}{\partial x} = \beta F_L(x, t) - \beta \sigma T^4(x, t) \\ \frac{\partial F_R(x, t)}{\partial x} = -\beta F_R(x, t) + \beta \sigma T^4(x, t) \\ \epsilon_s \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\epsilon_s D_a}{\zeta_s} \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - \eta_s(x, t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $(x, t) \in \Omega_1 \times (0, T_t)$; C_s^A 为外层织物的显热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; k_s 为外层织物的有效热传导率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; F_L, F_R 分别为向左和向右的辐射量, W ; $\lambda(x, t)$ 为织物蒸发的潜伏热系数, kJ/kg ; $\eta_s(x, t)$ 为外层织物中水分蒸发的速率, $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; β 为辐射吸收常数, K^{-1} ; ϵ_s 为外层织物表面含有水时的孔隙率; ζ_s 为外层织物的曲折系数; C_a 为织物空隙间的水蒸气浓度, kJ/m^3 ; D_a 为空气中水汽的扩散系数, m^2/s ; T_t 为暴露在火场环境中的时间, s ; $\Omega_1 = (0, L_s)$ 为 x 的取值范围。方程(1)中第一个等式左边描述的是温度变化,右边考虑了热传导,热辐射和蒸发项;第二个和第三个等式是关于热辐射的方程,最后一个等式左边描述的是水蒸气变化,右边考虑了水蒸气的传递。

由于外层阻挡了大部分辐射,因此在防水层、隔热层以及人体皮肤的热湿传递过程中,可以忽略辐射的作用,故防火服防水层的方程为:

$$\begin{cases} C_m^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m(x, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda(x, t) \eta_m(x, t) \\ \epsilon_m \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\epsilon_m D_a}{\zeta_m} \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - \eta_m(x, t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $(x, t) \in \Omega_2 \times (0, T_t)$; C_m^A 为防水层织物的显热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; k_m 为防水层织物的有效热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\eta_m(x, t)$ 为防水层织物中水分蒸发的速率, $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; ϵ_m 为防水层织物表面含有水时的孔隙率; ζ_m 为防水层织物的曲折系数; $\Omega_2 = (L_s, L_s + L_m)$ 为 x 的取值范围。

防火服隔热层的方程为:

$$\begin{cases} C_l^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l(x, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda(x, t) \eta_l(x, t) \\ \epsilon_l \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\epsilon_l D_a}{\zeta_l} \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - \eta_l(x, t) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $(x, t) \in \Omega_3 \times (0, T_t)$; C_l^A 为隔热层织物的显热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; k_l 为隔热层织物的有效热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\eta_l(x, t)$ 为隔热层织物中水分蒸发的速率, $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; ϵ_l 为隔热层织物表面含有水时的孔隙率; ζ_l 为隔热层织物的曲折系数; $\Omega_3 = (L_s + L_m, L_f)$, $L_f = L_s + L_m + L_l$ 为 x 的取值范围。

在防火服的热湿传递过程中,为了更精准地描述热化学反应和水分蒸发过程中能量的变化,本文采用显热容法来描述各层织物比热容的变化。显热容可由式(4)表示^[10]:

$$C^A = \rho c_p \quad (4)$$

其中: ρ 为对应层织物的密度, kg/m^3 ; c_p 为对应层织物的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 且外层和隔热层织物的比热^[10]可

用式(5)计算:

$$c_p = 1300 + 1.6(T - 300) \quad (5)$$

外层和隔热层织物的有效热传导率可表示为^[11]:

$$k_s = \epsilon_s k_a(T) + (1 - \epsilon_s) k_f(T) \quad (6)$$

$$k_l = \epsilon_l k_a(T) + (1 - \epsilon_l) k_f(T) \quad (7)$$

其中: k_a 和 k_f 分别为空气和织物的热传导率^[12], $W/(m \cdot K)$, 满足:

$$k_a(T) = \begin{cases} 0.026 + 0.000068(T - 300), & T \leq 700 \\ 0.053 + 0.000054(T - 700), & T > 700 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_f(T) = \begin{cases} 0.13 + 0.0018(T - 300), & T \leq 700 \\ 1.0, & T > 700 \end{cases} \quad (9)$$

本文在卢琳珍等^[5]所建热传递模型的基础上加入蒸发项 $\eta(x, t)$, 进而研究湿传递对热传递的影响。蒸发项 $\eta(x, t)$ 满足:

$$\eta(x, t) = -\frac{2E}{r} \sqrt{\frac{(1 - \epsilon)(1 - \epsilon')}{2\pi RM}} \left(\frac{P_{\text{sat}} - P_v}{\sqrt{T}} \right) \quad (10)$$

其中: E 为蒸发系数; r 为对应层织物的半径, mm; ϵ' 为对应层织物表面不含有水时的孔隙率; R 为理想气体常数, $J/(mol \cdot K)$; M 为水的摩尔质量, kg/mol ; $P_v = RC_a T$ 为对应层织物内部空隙间的水蒸气压, Pa; P_{sat} 为饱和水蒸气压, Pa, 满足:

$$P_{\text{sat}} = \begin{cases} 651.24e^{0.07165(T-273.16)} - 35, & T \leq 275.66 \\ 966.2072e^{0.052227(T-273.16)} - 398.0646, & T > 275.66 \end{cases} \quad (11)$$

织物层的初始条件为:

$$\begin{cases} T(x, 0) = T_1(x) \\ C_a(x, 0) = C_{a1}(x) \end{cases} \quad (12)$$

其中: T_1 为初始温度, K; $C_{a1} = 0.65 \times P_{\text{sat}}(T_1)/R/T_1$ 为初始水蒸气浓度, kg/m^3 ; $L_f = L_s + L_m + L_l$ 为三层织物的总厚度, m。

织物层的左边界条件为:

$$\begin{cases} -k_s(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = (q''_{\text{conv}} + q''_{\text{rad}}) \Big|_{x=0} \\ (1 - \xi_1) F_L(0, t) + \xi_1 \sigma T^4(0, t) = F_R(0, t) \\ -\frac{\epsilon_s D_a}{\zeta_s} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{C_{a,e} - C_a(x, t)}{w_1 + (1/H_c)} \Big|_{x=0} \end{cases} \quad (13)$$

其中: ξ_1 为外层织物的辐射系数; $C_{a,e}$ 为外界环境的水蒸气浓度(与初始水蒸气浓度相同), kg/m^3 ; w_1 为外层织物外部的水蒸气阻力; H_c 为外层织物的对流传质系数; q''_{conv} 和 q''_{rad} 分别为从火焰到外层织物的对流和辐射热通量^[13], W/m^2 , 可以表示为:

$$(q''_{\text{conv}} + q''_{\text{rad}}) \Big|_{x=0} = h_{c,fl}(T_e - T_s) \quad (14)$$

其中: $h_{c,fl}$ 为环境和外层织物外表面之间的热对流系数; T_e 为环境温度, K; T_s 为外层织物的温度, K。

根据傅里叶定律, 由温度和热通量以及水蒸气浓度和质通量的连续性, 可得外层与防水层织物之间接触面的边界条件为:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow L_s^-} T(x, t) = \lim_{x \rightarrow L_s^+} T(x, t) \\ \lim_{x \rightarrow L_s^-} -k_s(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_s^+} -k_m(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \\ (1 - \xi_2) F_L(L_s, t) + \xi_2 \sigma T^4(L_s, t) = F_R(L_s, t) \\ \lim_{x \rightarrow L_s^-} C_a(x, t) = \lim_{x \rightarrow L_s^+} C_a(x, t) \\ \lim_{x \rightarrow L_s^-} \frac{\epsilon_s D_a}{\zeta_s} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_s^+} \frac{\epsilon_m D_a}{\zeta_m} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} \end{cases} \quad (15)$$

其中: ξ_2 为防水层织物的辐射系数。

防水层与隔热层织物之间接触面的边界条件为:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow L_s+L_m-} T(x, t) = \lim_{x \rightarrow L_s+L_m+} T(x, t) \\ \lim_{x \rightarrow L_s+L_m-} -k_m(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_s+L_m+} -k_l(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \\ \lim_{x \rightarrow L_s+L_m-} C_a(x, t) = \lim_{x \rightarrow L_s+L_m+} C_a(x, t) \\ \lim_{x \rightarrow L_s+L_m-} \frac{\epsilon_m D_a}{\zeta_m} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_s+L_m+} \frac{\epsilon_l D_a}{\zeta_l} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} \end{cases} \quad (16)$$

织物层的右边界条件为:

$$\begin{cases} -k_l(x, t) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L_f} = (q''_{a, \text{rad}} + q''_{a, \text{cond/conv}}) \Big|_{x=L_f} \\ -\frac{\epsilon_l D_a}{\zeta_l} \frac{\partial C_a(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L_f} = \frac{C_a(x, t) \Big|_{x=L_f} - C_{a0}}{\omega_0} \end{cases} \quad (17)$$

其中: $q''_{a, \text{rad}}$ 和 $q''_{a, \text{cond/conv}}$ 分别为隔热层织物通过空气层到达人体皮肤的辐射热通量和传导(或对流)热通量, W/m^2 ; $C_{a0} = 0.65 \times P_{\text{sat}}(T_{\text{art}})/R/T_{\text{art}}$ 为皮肤表面的水蒸气浓度, kg/m^3 ; ω_0 为隔热层织物内部的水蒸气阻力。

1.2 空气层中的热湿传递

空气层的能量守恒方程为^[14]:

$$\rho_a c_{pa} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q''_{a, \text{rad}}}{\partial x}, (x, t) \in \Omega_4 \times (0, T_t) \quad (18)$$

其中: ρ_a 为空气的密度, kg/m^3 ; c_{pa} 为空气的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\Omega_4 = (L_f, L_f + L_a)$ 。

由于空气层厚度比较小, 可将其看成一个矩形封闭腔, 利用有限空间内传导、对流传热原理, 可将空气层模型解耦为:

$$\begin{cases} q''_{a, \text{rad}} \Big|_{x=L_f+L_a} = q''_{a, \text{rad}} \Big|_{x=L_f} = \frac{\sigma(T_l^4 \Big|_{x=L_f} - T_{\text{ep}}^4 \Big|_{x=L_f+L_a})}{\frac{1}{\xi_l} + \frac{1}{\xi_{\text{ep}}} - 1} \\ q''_{a, \text{cond/conv}} \Big|_{x=L_f+L_a} = q''_{a, \text{cond/conv}} \Big|_{x=L_f} = h_{c,a} (T_l \Big|_{x=L_f} - T_{\text{ep}} \Big|_{x=L_f+L_a}) \end{cases} \quad (19)$$

其中: σ 为波尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_l, T_{ep} 分别为隔热层织物和表皮层的温度, K ; ξ_l, ξ_{ep} 分别为隔热层织物和表皮层的辐射系数; $h_{c,a} = k_a Nu/L_a$ 为空气层中传导、对流传热系数; $Nu = 1$ 为努塞尔特数。

空气层的初始条件为:

$$T(x, 0) = T_l(x) \quad (20)$$

空气层的左右边界条件分别为:

$$\lim_{x \rightarrow L_f-} T_l = \lim_{x \rightarrow L_f+} T_a \quad (21)$$

$$\lim_{x \rightarrow L_f+L_a-} T_a = \lim_{x \rightarrow L_f+L_a+} T_{\text{ep}} \quad (22)$$

其中: T_a 为空气层的温度, K 。

1.3 皮肤层中的热湿传递

为了更精准地预测皮肤内的温度分布, 本文根据三层皮肤结构的性质, 将卢琳珍等^[5]的单层皮肤模型改为三层皮肤模型^[12]:

$$\begin{cases} \rho_{\text{ep}} c_{\text{pep}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{ep}} \frac{\partial T}{\partial x} \right), (x, t) \in \Omega_5 \times (0, T_t) \\ \rho_{\text{ds}} c_{\text{pds}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{ds}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_b c_{\text{pb}} \omega_b (T_{\text{art}} - T), (x, t) \in \Omega_6 \times (0, T_t) \\ \rho_{\text{sc}} c_{\text{psc}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{sc}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_b c_{\text{pb}} \omega_b (T_{\text{art}} - T), (x, t) \in \Omega_7 \times (0, T_t) \end{cases} \quad (23)$$

其中: $\rho_{\text{ep}}, \rho_{\text{ds}}, \rho_{\text{sc}}, \rho_b$ 分别为表皮、真皮、皮下组织和血液的密度, kg/m^3 ; $c_{\text{pep}}, c_{\text{pds}}, c_{\text{psc}}, c_{\text{pb}}$ 分别为表皮、真皮、皮下组织和血液的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $k_{\text{ep}}, k_{\text{ds}}, k_{\text{sc}}$ 分别为表皮、真皮和皮下组织的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ω_b 为血液灌流速率, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; $T_{\text{art}} = 300$ 为人体温度, K 。

皮肤层的初始条件为:

$$T_{\text{ep}}(x, 0) = T_l(x) \quad (24)$$

皮肤层的左边界条件为：

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow L_f + L_a^-} T_a = \lim_{x \rightarrow L_f + L_a^+} T_{ep} \\ \lim_{x \rightarrow L_f + L_a^-} (q''_{a,rad} + q''_{a,cond/conv}) = \lim_{x \rightarrow L_f + L_a^+} -k_{ep} \frac{\partial T_{ep}}{\partial x} \end{cases} \quad (25)$$

表皮与真皮之间接触面的边界条件为：

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow L_{ep}^-} T_{ep} = \lim_{x \rightarrow L_{ep}^+} T_{ds} \\ \lim_{x \rightarrow L_{ep}^-} -k_{ep} \frac{\partial T_{ep}}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_{ep}^+} -k_{ds} \frac{\partial T_{ds}}{\partial x} \end{cases} \quad (26)$$

真皮与皮下组织之间接触面的边界条件为：

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow L_{ds}^-} T_{ds} = \lim_{x \rightarrow L_{ds}^+} T_{sc} \\ \lim_{x \rightarrow L_{ds}^-} -k_{ds} \frac{\partial T_{ds}}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow L_{ds}^+} -k_{sc} \frac{\partial T_{sc}}{\partial x} \end{cases} \quad (27)$$

皮肤的右边界条件为：

$$T_{sc} \Big|_{x=L_f+L_a+L_{sk}} = T_{art} \quad (28)$$

采用有限差分法^[15]对上面提出的以多层防火服、空气层和人体皮肤为整体的非线性抛物方程离散，并进行数值求解。数值实验所需的初始参数见表 1，织物的性能见表 2，人体皮肤的热物理属性见表 3。

表 1 热湿传递模型数值模拟的初始参数

初始温度/K	火焰温度/K	火焰对流系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	空气对流系数/(m·s ⁻¹)	空气层厚度/m	蒸发系数	扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	潜热/(J·kg ⁻¹)
300	2000	40	0.021	5×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁵	2.26×10 ⁶

表 2 织物的性能

织物分层	密度/(kg·m ⁻³)	比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	厚度/m	孔隙率	曲折系数
外层	286	—	—	0.70×10 ⁻³	0.334	2.120
防水层	250	1150	0.05	0.85×10 ⁻³	0.186	2.490
隔热层	220	—	—	0.95×10 ⁻³	0.115	1.820

注：数据来源于文献^[16]。

表 3 人体皮肤的热物理属性

皮肤分层	密度/(kg·m ⁻³)	比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	厚度/m	血液灌注
表皮	1200	3600	0.255	8×10 ⁻⁵	—
真皮	1200	3400	0.523	2×10 ⁻³	—
皮下组织	1000	3060	0.167	1×10 ⁻²	—
血液	—	3770	—	—	1.25×10 ³

注：数据来源于文献^[12]。

数值模拟结果如图 2—图 4 所示。图 2—图 3 示出织物层中温度及水蒸气浓度的变化。由图 2—图 3 可知，织物的温度以及织物中水蒸气浓度，最初随着时间增加而不断升高，之后上升速度趋于平稳；织物外层到隔热层的温度和水蒸气浓度依次递减。图 2(a)表明，刚进入高温高湿环境中时，织物的温度会迅速升高，同时水分逐渐积累，而后水汽达到饱和，水分开始蒸发，带走了织物中部分热量，使得织物温度上升速度减慢。图 3(a)表明，初始时刻水蒸气逐渐积累，浓度增大达到饱和，然后水分蒸发使得水分减少，水蒸气浓度上升速度减慢。图 4 示出热湿传递模型与热模型中织物层和皮肤层温度的变化。由图 4(a)可知，相对于热传递模型，热湿传递模型中织物层的温度最初上升速度较快，而后逐渐减慢。这是由于织物含水导致导热系数增加，使得织物温度上升速度比干燥环境中快；之后随着温度升高和水分积累，织物内部水分开始蒸发，带走了部分热量，使得织物温度降低，温度曲线变化趋于平缓。上述现象与曹娟^[9]利用皮肤模拟传感器测得的实验结果相一致。由图 4(b)可知，水分蒸发能有效降低皮肤温度，延长皮肤受到热损伤的时间。

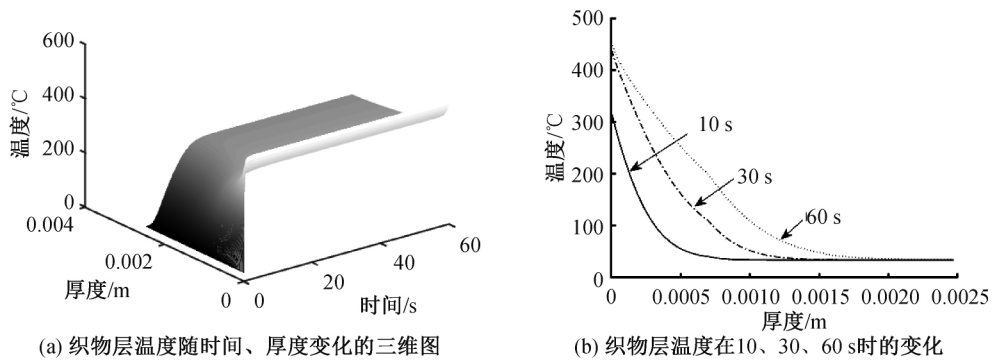


图2 织物层温度分布及其在不同时刻的变化曲线

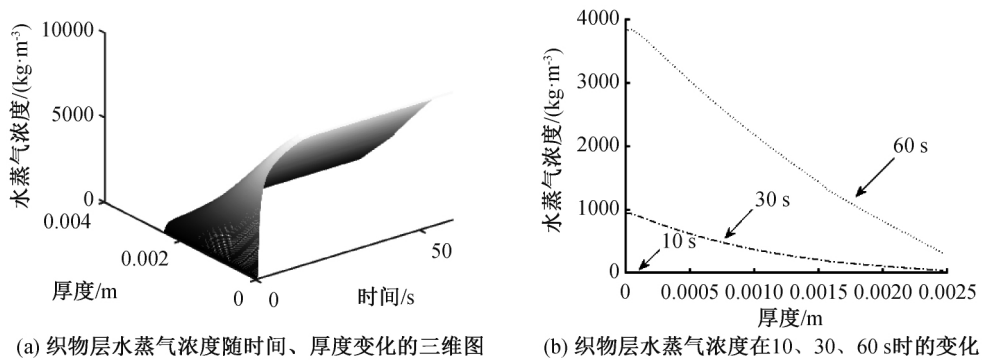


图3 织物层水蒸气浓度分布及其时间变化曲线

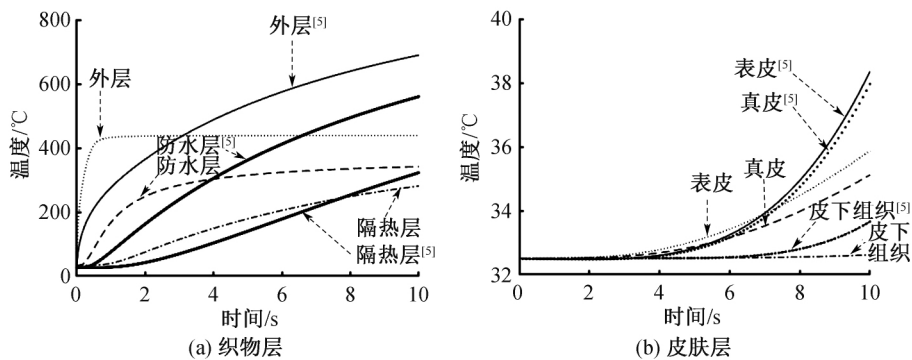


图4 热湿传递模型和热传递模型在织物层和皮肤层关于温度变化的曲线

2 人体皮肤烧伤程度预测

本节结合热湿传递模型与皮肤烧伤模型^[17],预测皮肤达到各级烧伤的时间。利用一级阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程评价组织烧伤程度:

$$\frac{d\Psi}{dt} = P \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) \quad (29)$$

对式(29)积分可得:

$$\Psi = \int_0^{\tau} P \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT(x,t)}\right) dt \quad (30)$$

其中: Ψ 为皮肤烧伤程度的量化值; P 为皮肤组织频率因子, s^{-1} ; ΔE 为皮肤活化能, $J/kmol$; τ 是皮肤受热时间, s 。

通过对皮肤生物传热模型的数值模拟可知皮肤各层的温度分布,结合烧伤积分方程可确定 Ψ 的值,进而预测皮肤被烧伤的程度。烧伤积分中所涉及的参数值见表4—表5。

表 4 烧伤积分常数表

皮肤	条件	P	$\Delta E/R$
表皮	$44\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	2.185×10^{124}	93534.9
表皮	$T \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.823×10^{51}	39109.8
真皮	$T < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	4.320×10^{64}	50000.0
真皮	$T \geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	9.390×10^{104}	80000.0

注：数据来源于文献[17]。

表 5 皮肤烧伤程度

温度取值位置	Ψ 值	烧伤程度
基底层温度	$\Psi \leq 0.53$	皮肤未发生烧伤
基底层温度	$0.53 < \Psi < 1.00$	一级烧伤
真皮基温度	$\Psi \geq 1.00$	二级烧伤
真皮基温度	$\Psi \geq 1.00$	三级烧伤

以基底层为目标点来预测人体皮肤发生一级和二级烧伤的时间,如图 4 所示。图 5 展示了基底层的温度和烧伤积分值随时间的变化曲线。从图 5(a)可知,在热湿传递模型和皮肤三层结构中,皮肤发生热损伤的时间为 26.16 s;从图 5(b)可知,皮肤达到一级和二级烧伤的时间分别为 33.96 s 和 35.90 s。结果表明:消防员在高温高湿环境中的工作时间小于 26.16 s 时,皮肤不会受到任何热损伤;而当皮肤发生热损伤后,再过 7.80 s 则会发生一级烧伤。同时,对比皮肤发生一级和二级烧伤的时间可知,皮肤在发生一级烧伤后,仅需 1.94 s 就能达到二级烧伤。

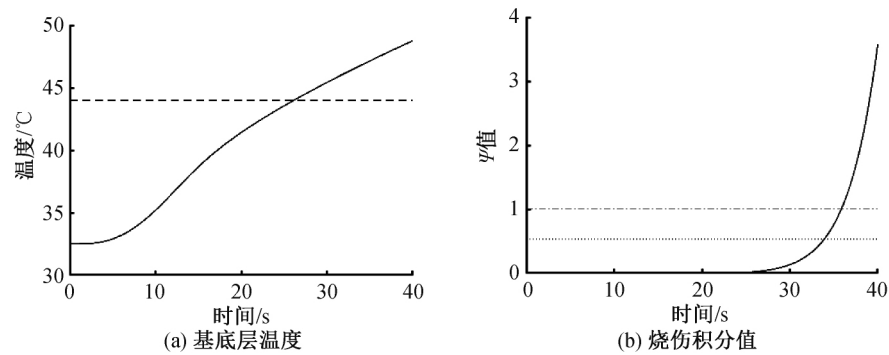


图 5 目标点的温度和烧伤积分值随时间的变化曲线

以真皮基为目标点来预测人体皮肤发生三级烧伤的时间,如图 6 所示。图 6 为真皮基的温度和烧伤积分值随时间的变化情况。从图 6(a)可知,真皮基温度达到 44 °C 需要 55.54 s;图 6(b)则表明皮肤达到三级烧伤的时间为 84.97 s。对比皮肤发生一级和二级烧伤的时间可知,皮肤在发生二级烧伤后,再过 49.07 s 就能达到三级烧伤。

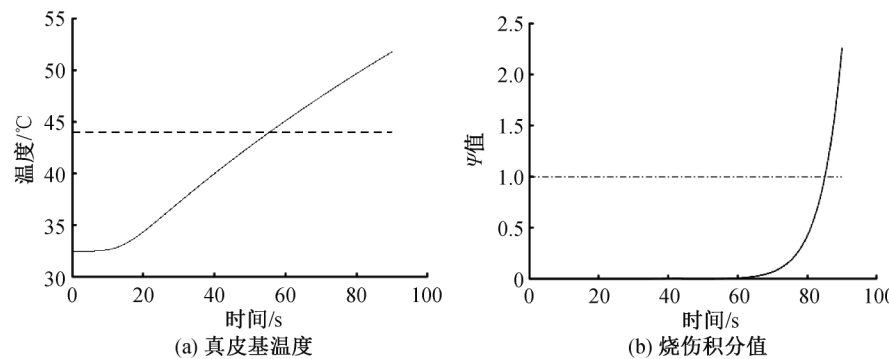


图 6 目标点的温度和烧伤积分值随时间的变化曲线

为了说明本文所建模型的有效性,将热传递模型和热湿耦合传递模型下,皮肤发生各级烧伤的时间作对比,见表 6。由表 6 可知,加入湿传递后,皮肤发生各级烧伤的时间均有所延长,说明湿传递能有效降低皮肤温度,增加消防员的安全工作时间。

表 6 热传递模型和热湿耦合传递模型模拟的皮肤烧伤时间 s

烧伤程度	热传递模型	热湿传递模型
基底层温度达到 44 °C	12.85	26.16
一级烧伤	17.10	33.96
二级烧伤	17.32	35.90
真皮基温度达到 44 °C	20.10	55.54
三级烧伤	28.14	84.97

3 结 论

在高温高湿条件下,本文首先考虑消防水对热传递的影响,在已有热传递模型的基础上,加入湿传递方程,建立了多层防火服-空气层-人体皮肤系统内的热湿耦合传递模型。针对本文所建热湿传递模型,给出系统中相应层与层之间合理的边界条件,并利用有限差分方法求解该模型。数值模拟结果表明,考虑湿传递后,服装和皮肤内温度的上升速度均有所减慢。最后,将热湿传递模型与皮肤烧伤模型相结合,并对皮肤生物传热模型进行数值模拟,预测了皮肤发生各级烧伤的时间。数值结果表明,热湿传递模型下皮肤发生各级烧伤的时间较热传递模型而言均有所延长。

本文所建热湿传递模型能够为防火服的设计研发提供一定的理论依据。由于本文只考虑了一定量的消防水对热传递的影响,忽略了人体出汗和织物吸水的情况,因此不同含湿量以及人体出汗和织物吸水等情况对防火服防护性能的影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Kahn S A, Patel J H, Lentz C W, et al. Firefighter burn injuries[J]. *Journal of Burn Care and Research*, 2012, 33(1): 152-156.
- [2] Ghazy A, Bergstrom D J. Numerical simulation of heat transfer in firefighters' protective clothing with multiple air gaps during flash fire exposure[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2012, 61(8): 569-593.
- [3] 朱方龙,张渭源.基于人体皮肤热模型的热防护服评价方法研究[J].*中国安全科学学报*,2007,17(11): 134-140.
- [4] 朱方龙. 服装的热防护功能[M]. 1版. 北京: 中国纺织出版社, 2015: 10-17.
- [5] 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(1): 111-118.
- [6] He H L, Yu Z C, Song G W. The effect of moisture and air gap on the thermal protective performance of fabric assemblies used by wildland firefighters[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2016, 107(8): 1030-1036.
- [7] Fu M, Weng W G, Yuan H Y. Quantitative assessment of the relationship between radiant heat exposure and protective performance of multilayer thermal protective clothing during dry and wet conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 276: 383-392.
- [8] Fu M, Yuan M Q, Weng W G. Modeling of heat and moisture transfer within firefighter protective clothing with the moisture absorption of thermal radiation[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 96: 201-210.
- [9] 曹娟. 含湿量对消防用织物热防护性能的影响[D]. 天津: 天津工业大学, 2016: 24-26.
- [10] Torvi D A, Eng P, Threlfall T G. Heat transfer model of flame resistant fabrics during cooling after exposure to fire[J]. *Fire Technology*, 2006, 42(1): 27-48.
- [11] Ding D, Tang T, Song G W, et al. Characterizing the performance of a single-layer fabric system through a heat and mass transfer model-Part I: Heat and mass transfer model[J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81(4): 401-410.
- [12] Ghazy A, Bergstrom D J. Numerical simulation of the influence of fabric's motion on protective clothing performance during flash fire exposure[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(6): 775-788.
- [13] Song G W, Chitrphimsri P, Ding D. Numerical simulations of heat and moisture transport in thermal protective clothing under flash fire conditions[J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2008, 14(1): 89-106.
- [14] Ghazy A. Numerical study of the air gap between fire-protective clothing and the skin[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2014, 44(2): 257-274.
- [15] 孙志忠. 偏微分方程数值解法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2012: 80-87.
- [16] Chitrphimsri P, Kuznetsov A V. Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2005, 41(3): 206-215.
- [17] Ghazy A, Bergstrom D J. Numerical Simulation of transient heat transfer in a protective clothing system during a flash fire exposure[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2010, 58(9): 702-724.

(责任编辑:康 锋)