

中文引用格式:杨杰,卢盈汝,雷颖. 消防服多层织物热质耦合传递模型建立与验证[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(3): 253-260.

英文引用格式:YANG Jie, LU Yingru, LEI Ying. Development and validation of a coupled multi-layered heat and mass transfer model of firefighting protective clothing[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 253-260.

消防服多层织物热质耦合传递模型建立与验证*

杨杰教授, 卢盈汝, 雷颖**

(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号: X968

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0531

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52474248); “十四五”国家重点研发子课题(2022YFC300610502)。

【摘要】 为提升火场高温热辐射环境中人体热损伤评估精度, 保障救援人员生命安全, 建立适用于动态条件的皮肤-微环境-消防服系统热质耦合传递模型; 基于多孔介质热湿传递机制, 考虑人体活动引起的织物周期运动及其对消防服热湿传递过程的影响, 实时预测不同热辐射强度下干态和湿态的皮肤温度、烧伤时间、织物层温湿度分布等。结果表明: 模型预测皮肤温度模拟值与文献试验测量值的相对误差仅为 3.79%。8.5 kW/m² 热辐射暴露工况下, 干态条件下发生二度皮肤烧伤的时间比湿态条件下提前 33.7 s; 消防员以 1 m/s 的速度靠近 20 kW/m² 辐射热源时, 增加隔热层厚度能更有效地阻挡热量传递, 人体发生二度皮肤烧伤的时间延长 10.9 s, 且皮肤表面吸收的总热能降低 20%; 当微环境厚度与织物的周期运动振幅相同, 导致高温织物周期性地直接接触皮肤表面时, 皮肤温度快速上升且发生显著波动, 发生二度皮肤烧伤时间提前 43.7 s。人体运动和织物中存在的水分均会作用于人体与环境的热交换过程, 对于救援研判精度的影响不可忽略。

【关键词】 消防服; 多层织物; 热质耦合; 传递模型; 皮肤烧伤; 衣下微环境

Development and validation of a coupled multi-layered heat and mass transfer model of firefighting protective clothing

YANG Jie, LU Yingru, LEI Ying

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To improve the accuracy of human thermal injury assessment and protect rescuers' safety in thermal radiation environments, a coupled heat and mass transfer model of skin-microenvironment-firefighting clothing system was proposed to predict skin burn injuries under dynamic conditions. Based on mechanism of heat and moisture transfer in porous media, the periodic movement of fabric caused by human activities and its impact on heat and mass transfer in the skin-microenvironment-firefighting clothing system were considered. Furthermore, the proposed model was used to simulate skin temperature, time of skin burn, and the distribution of temperature and humidity in the fabric layers for both dry and wet cases in real time. The results show that the relative error between simulated values predicted by the model and the experimental measurements presented in the literature is only 3.79%. When exposed to 8.5 kW/m² thermal radiation environments, the time to second-degree burn for the dry case is 33.7 s earlier than that for the wet case. When firefighters approach a 20 kW/m² radiant heat source at a speed of 1 m/s, the

* 文章编号: 1003-3033(2025)03-0253-08; 收稿日期: 2024-10-14; 修稿日期: 2024-12-24

** 通信作者: 雷颖(1997—), 女, 陕西渭南人, 博士研究生, 主要研究方向为职业健康。E-mail: yinglei97@163.com。

heat transferred is impeded by the increase in thermal layer thickness. This extends the time for second-degree burns to occur by 10.9 s and reduces the heat absorbed by the skin surface by 20%. When the air gap thickness in the microenvironment is the same as the amplitude of the periodic motion of fabric, the skin temperature increases rapidly and fluctuates significantly, and the time to second-degree burn occurs 43.7 s earlier. Human body movement and moisture in fabric layers affect heat transfer process between the human body and thermal environment, thereby their impact on the accuracy of rescue assessments cannot be ignored.

Keywords: firefighting protective clothing; multi-layered fabric; coupled heat and mass transfer; mass transfer model; skin burn; microenvironment

0 引言

随着社会化进程的加快,新兴建筑技术爆发式发展,不同建筑结构条件下火灾呈现出突发性、连锁性、复杂性和不可预见性等特点^[1]。消防员作为执行灭火救援任务的重要力量,承受着极大的热损伤风险,皮肤烧伤发生的比例高达 21%^[2-3]。由于保障消防员生命安全和研发高性能个体防护装备的迫切需求,科学评估消防员皮肤烧伤已成为重要的研究内容之一^[4]。因此,提高消防员热损伤评估精度,对于评估消防员灭火救援期间的热安全状态,提高灭火救援效率尤为关键。

近年来,学者们通过数值模拟方法探索热辐射暴露期间消防服系统中的热传递机制。如 TORVI 等^[5]建立单层织物热传递模型模拟闪火暴露下织物中的辐射、传导与对流热传递;MELL 等^[6]通过向前向后辐射模型分析了低辐射暴露下消防服多层织物中热辐射的吸收与发射作用;GHAZY 等^[7-8]考虑了织物与衣下微环境中热辐射的吸收、发射与散射作用,通过辐射传输方程求解织物内部的瞬态辐射通量;SU Yun 等^[9]分析了冷却期间织物中储存能量的释放对皮肤烧伤的影响。人体皮肤与防护服之间形成衣下微环境的热传递建模对热防护性能与皮肤烧伤评估存在关键影响。现有研究已从衣下微环境的方向(水平与垂直)^[10]、均匀^[11-12]与非均匀^[13]状态等多个方面改进其热传递模拟,以提高皮肤-微环境-防护服系统热传递建模的精度。此外,热辐射暴露期间织物的热收缩以及人体运动状态也被证明会引起微环境厚度的动态变化,影响皮肤烧伤时间的预测精度^[14-15]。然而,上述研究忽略了热暴露期间多孔介质中水分蒸发、冷凝、吸收等过程对于人体与环境换热过程的影响。

水分的存在会影响织物的热物理属性与光学性能,同时通过传质现象参与系统的热传递过程。

GIBSON^[16]基于多孔介质热质传递理论建立了织物的热质耦合传递模型,综合考虑了热暴露期间织物中各相的热传导、液相与气相的对流与转化等对于系统传热贡献;CHITRPHIROMSRI 等^[17-18]增加辐射源项,预测热暴露期间系统中的热湿分布;LI Yi 等^[19]分析了多孔介质中液态水的毛细与重力双重效应,计算多孔介质不同吸湿程度下的温湿度与水分含量分布;FU Ming 等^[20]基于火灾环境强辐射与高湿的特点进一步考虑了防护服内部湿气对热辐射的吸收作用;苏云^[21]考虑水分的扩散、达西流动、相变、吸湿和解吸过程,建立消防服系统热湿耦合模型探究火灾高温蒸汽条件下织物系统的传热行为。然而,上述研究在皮肤、多层织物、环境之间的热湿传递模拟中未考虑运动状态对热通量以及微环境厚度的影响,由此而导致换热量与实际灭火救援中偏差较大,降低皮肤烧伤预测精度。

鉴于此,笔者提出动态的皮肤-微环境-消防服系统热质耦合传递模型,预测热暴露期间皮肤烧伤时间和织物层温湿度分布,以期为保障消防员生命安全和提升灾害应对能力提供理论基础。

1 热质耦合传递模型的建立

当前模型考虑织物中的水分相变、吸附与解吸以及织物周期性运动和热暴露距离的动态变化对系统热质传递及皮肤烧伤预测的影响,衣下微环境的平均厚度设置为 3 mm,忽略其对流换热过程^[14],消防服多层织物的属性参数通过文献获取^[22]。为简化皮肤-微环境-消防服系统热质耦合传递模型的建立与求解,模型的相关假设如下:

1) 系统中的热质传递沿织物厚度方向一维传递。

2) 自由液态水既不存在于皮肤表面,也不存在于织物层中。

3) 消防服多层织物被认为具有吸湿性,但忽略

织物体积膨胀或收缩^[23]。

4) 微环境中水蒸气密度始终处于均匀状态。

5) 忽略织物和微环境中的热质对流及人体运动期间微环境厚度的周期性变化引起的湿空气的纵向运动^[17]。

1.1 消防服中的热质传递

消防服中能量守恒方程如下:

$$\rho_e(c_p)_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (\Delta h_v + \Delta h_a)m_s + K_f q_r \exp(-K_f x) \quad (1)$$

式中: ρ_e 为各层织物与微环境的有效密度, kg/m^3 ; $(c_p)_e$ 为各层织物与微环境的有效比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为不同时刻、不同位置的温度值, K ; t 为时间, s ; x 为水平坐标, m ; k_e 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Δh_v 和 Δh_a 分别为单位质量的蒸发焓与织物中结合水至自由液态水的转变焓, J/kg ; m_s 为水蒸气到结合水的质量转换速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; K_f 为消光系数, m^{-1} ; q_r 为外层织物表面的入射热辐射通量, W/m^2 。

假设织物中不同相之间始终处于局部的热力学平衡状态:

1) 消防服多层织物中固相连续方程如下:

$$m_s = \frac{\partial \varepsilon_b \rho_b}{\partial t} \quad (2)$$

式中: ε_b 为结合水体积分数; ρ_b 为结合水有效密度, kg/m^3 ;

2) 消防服多层织物中气相的扩散方程如下:

$$\frac{\partial \varepsilon_v \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right) - m_s \quad (3)$$

式中: ε_v 为气相体积分数; ρ_v 为水蒸气有效密度, kg/m^3 ; D_e 为织物中气相的有效扩散系数, m^2/s 。

1.2 微环境中的热质传递

随着织物温度的升高, 织物中水分蒸发并向人体皮肤移动, 微环境中能量守恒方程如下:

$$\rho_\gamma(c_p)_\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_\gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + K_a q_r \exp(-K_a x) \quad (4)$$

式中: ρ_γ 为微环境的有效密度, kg/m^3 ; $(c_p)_\gamma$ 为微环境的有效比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_γ 为微环境的有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; K_a 为微环境中空气的辐射吸收系数, m^{-1} ; q_r 为隔热层背面向皮肤组织发射的热辐射, W/m^2 。通常将微环境视为矩形封闭腔进行计算。衣下微环境中空气的导热系数远低于于织物纤维, 其内部热传递会随厚度发生改变。因此, 衣下微

环境的热质传递建模对消防服的热防护性能评估尤为关键。消防员进行救援活动时多处于运动状态, 考虑人体活动引起的织物周期运动, 引入微环境的瞬时厚度定量计算^[24]如下式:

$$x = x_0 + \Delta x \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

式中: x 和 x_0 分别为微环境的瞬时和平均厚度, m ; Δx 为织物的周期运动振幅, m ; f 为织物的周期运动频率, s^{-1} 。文中设置织物的周期运动频率和运动振幅分别为 1.64 s^{-1} 和 1.5 mm , 以分析织物周期性运动对系统温度分布和皮肤烧伤预测的影响。

1.3 皮肤层中的热质传递

皮肤组织中热传递主要以热传导为主。假定辐射热暴露期间皮肤组织的热物理属性恒定, 通过 Pennes 热生物模型求解皮肤组织中的温度分布^[25], 如下式:

$$\rho_s(c_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6)$$

式中: ρ_s 为各层皮肤组织的密度, g/cm^3 ; $(c_p)_s$ 为各层皮肤组织比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_s 为皮肤层的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。Henriques 烧伤积分模型被广泛用于评估人体的皮肤烧伤等级与时间^[26], 如下式:

$$\Omega = \int_0^{t_1} P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt_1 \quad (7)$$

式中: Ω 为烧伤程度量化值; P 为频数因子, s^{-1} ; ΔE 为皮肤活化能, J/mol ; R 为理想气体常数, $8.315 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; t_1 为皮肤温度达到 $44 \text{ }^\circ\text{C}$ (皮肤开始发生烧伤损伤)后的持续时间, s 。

1.4 热质耦合传递模型求解

火场周围的环境温度为 300 K , 织物的相对湿度为 0.65 , 初始时刻系统中温度和湿度均匀分布。皮肤-微环境-消防服系统中各控制方程均通过有限体积法及隐式格式离散求解。考虑水分对织物热物理属性的影响, 通过体积加权法更新各层织物的基本属性。假设消防员运动期间衣下微环境中控制体积的尺寸随其瞬时厚度的变化而均匀变化^[14]。

此外, 由于皮肤组织各层厚度的差异较大, 考虑网格数量与计算精度之间的关系, 区域离散化时将分别设置皮肤各层的空间步长以较好地反映皮肤温度的变化特征。求解过程在 Matlab 中实现。

2 传递模型验证、应用及影响分析

2.1 热质耦合传递模型的验证

为验证当前模型的有效性, 预测暴露于闪火条

件下 15 s 并冷却至 60 s 时,无微环境的多层织物系统传感器表面温度对比预测结果与文献[18]试验结果,如图 1 所示。当前模型预测的 3 层织物系统下传感器温升趋势与试验结果最大相对误差仅为 3.79%,吻合度较高。出现误差可能是由于热暴露期间随着织物温度的升高,织物中的水分蒸发并向传感器移动,最终在传感器表面冷凝释放大热量,从而引起人体皮肤温度的升高。

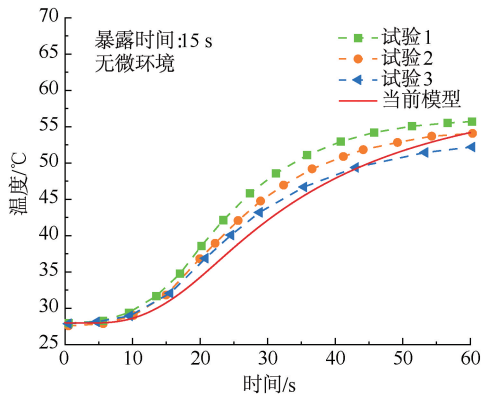


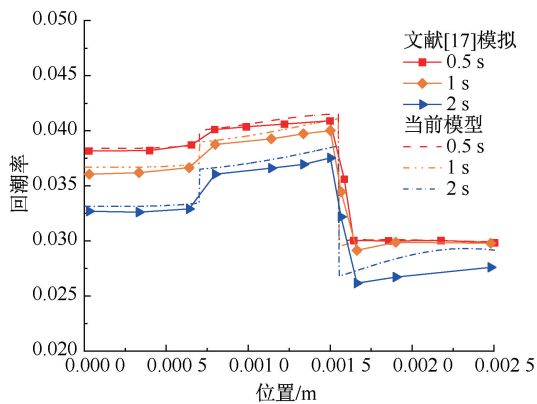
图 1 热暴露期间皮肤温度的模拟值与文献[18]中试验值的对比

Fig. 1 Comparisons of skin temperature between current simulations and measurements in literature [18] during thermal exposure

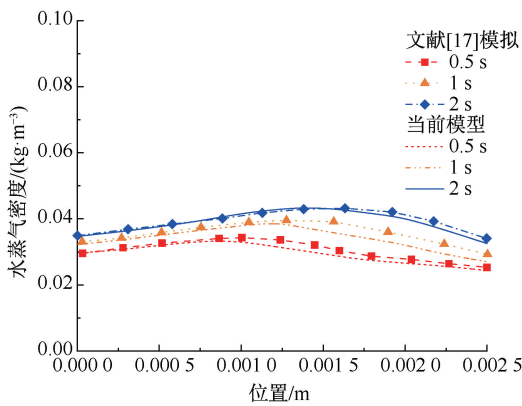
为进一步验证当前模型的有效性,通过预测暴露期间织物不同位置的回潮率和水蒸气密度,并对比预测结果与文献[17]中的模拟结果;图 2 为具有微环境的消防服多层织物暴露于闪火环境中不同时刻织物中瞬态的湿度分布情况。从图 2a 可以看出,各层织物回潮率因其热物理属性的不同在界面处出现跳跃,随着暴露时间的增加织物瞬时回潮率会降低,这是由于温度升高导致织物中结合水的蒸发。图 2b 为织物中的水蒸气密度分布情况,热暴露开始阶段外层温度升高引起水蒸气密度增加,而隔热层中水蒸气密度无明显变化;随着暴露时间的增加,织物中的温度梯度导致水蒸气不断向内层织物移动,隔热层中水蒸气密度的上升速率将大于外层织物。当前模型预测织物中湿度分布与文献试验结果之间的差异,可能是由于当前模型中未考虑织物中水分蒸发进入外界环境,仅考虑织物厚度方向的水蒸气密度的传输。

2.2 热质耦合模型的应用

随着织物温度的升高,织物中水分的相变与转移将作用于系统的热传递过程,系统热物理属性与温度梯度的改变又进一步影响其传质过程。通过当



(a) 织物回潮率



(b) 织物水蒸气密度

图 2 当前模型与文献[17]

模型中织物的湿度分布预测对比

Fig. 2 Comparisons of moisture distribution between current simulations and that by literature [17]

前模型参数化分析环境参数、织物属性对系统热质交换及对消防员皮肤烧伤预测的影响等因素,为消防服的设计优化提供思路。

2.2.1 水分对皮肤烧伤的影响

通过当前模型预测暴露于 8.5 kW/m^2 热辐射强度时湿态条件下人体表皮与真皮界面的温度,并与文献[21]干态热传递模型的预测结果进行对比,如图 3 所示。结果显示,热暴露开始阶段,当前模型预测的皮肤温度高于干态条件,热暴露 75 s 至暴露结束湿态条件下的皮肤温度偏低,与干态条件下皮肤温差逐渐增大。这是因为在热暴露开始阶段湿织物导热能力远大于干燥织物,皮肤表面吸收的热量快速上升,随着热暴露时间的增加,织物中水分发生相变,吸收大量热量,使传递至皮肤表面的热量发生断崖式下降^[27]。通过当前模型预测的干态及湿态条件下人体二度皮肤烧伤时间分别为 149.7 和 183.4 s,因此,在低辐射暴露条件下织物中,水分增加了消防服的热防护性能,与 SU Yun 等^[28]的预测结果吻合。

通过当前模型预测 20 kW/m^2 的热辐射暴露期

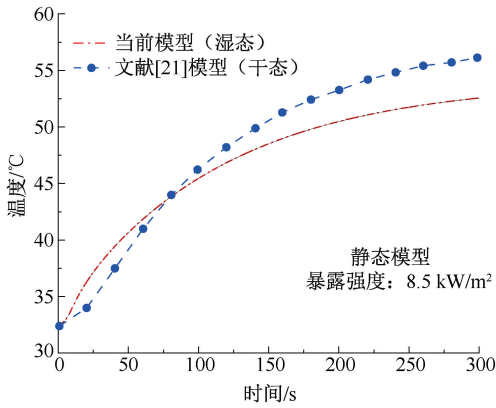


图 3 静止状态干态及湿态条件下表皮与真皮界面温度对比

Fig. 3 Comparisons of epidermal and dermal interface temperatures between dry and wet cases under static conditions

间,消防员以 1 m/s 的速度靠近热源,干态及湿态条件下表皮与真皮界面处的温度对比,如图 4 所示。结果表明:消防员运动期间织物中的水分会导致人体皮肤温度的升高,在热暴露前 50 s,湿态条件下表皮与真皮界面处温度均高于干态条件,湿态条件下消防员发生二度皮肤烧伤的时间较干态条件下提前 2.3 s。此外,由于热暴露期间人体靠近热源引起热暴露距离发生动态变化且伴随织物的周期性运动,因而表皮与真皮界面处温度波动上升。对比消防员长时间低辐射热暴露条件,当前运动状态下织物中的水分降低了消防服的热防护性能,增大了消防员的皮肤烧伤风险。

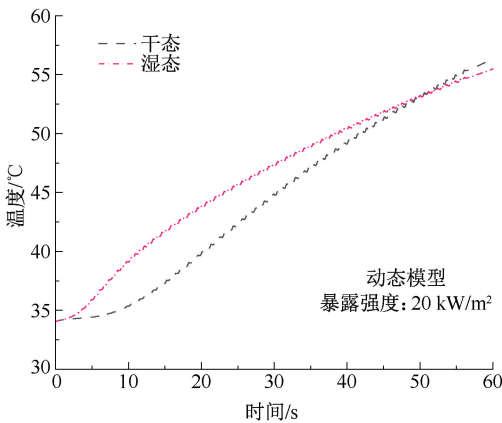


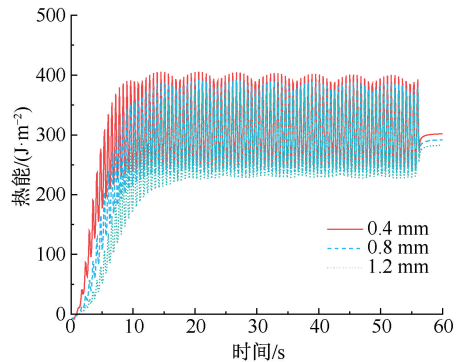
图 4 运动状态干态及湿态条件下表皮与真皮界面温度对比

Fig. 4 Comparisons of epidermal and dermal interface temperatures between dry and wet cases under dynamic conditions

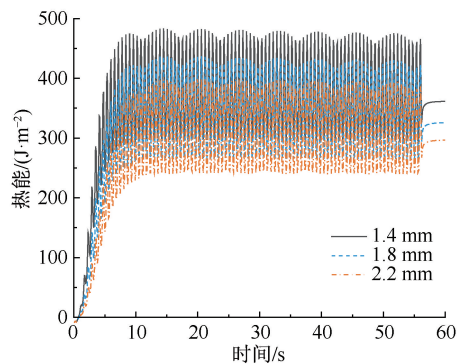
2.2.2 织物厚度对皮肤烧伤的影响

在当前模型中,设置外层与隔热层织物厚度分

别为 0.4~1.2 mm 与 1.4~2.2 mm,增量为 0.4 mm。织物厚度对系统热质传递与皮肤烧伤预测的影响如图 5 所示。由图 5a 可知:热暴露开始阶段传递至皮肤表面的瞬时热能快速增大,随后趋于稳定,这可能是由于当织物中储存一定热能后来自热源的热量以稳定速率传递至皮肤组织,当外层织物厚度增加至 1.2 mm 时,皮肤表面吸收的总热能下降 12.9%;由图 5b 可知:当隔热层织物厚度增加至 2.2 mm 时,皮肤表面吸收的总热能下降 20%,人体发生二度皮肤烧伤的时间延长 10.9 s。对比可知:增加隔热层厚度可有效阻止热暴露期间人体与环境之间的热交换。然而,当前研究结果未讨论冷却期间织物蓄热释放对皮肤烧伤的影响,由于隔热层靠近皮肤其储存热量在冷却期间大部分释放至皮肤组织,从而加速人体的皮肤烧伤风险。因此,通过隔热层织物厚度优化防护性能的同时应考虑织物系统的蓄热。



(a) 外层厚度发生改变皮肤吸收的瞬时热能



(b) 隔热层厚度发生改变皮肤吸收的瞬时热能

图 5 织物厚度改变皮肤吸收的瞬时热能

Fig. 5 Effects of fabric thickness on instantaneous heat energy absorbed by skin

2.2.3 微环境厚度对皮肤烧伤的影响

消防服多层织物与皮肤之间的微环境具有良好的绝缘性能,可有效阻止或降低系统中热量的传递速率,从而延长人体发生皮肤烧伤的时间。文中模型设定消防员运动速度为 1 m/s,期间衣下微环境

厚度和热暴露距离将发生动态变化。

采用当前模型预测微环境厚度为 1.5、3、5 mm 时表皮-真皮界面的温度,如图 6 所示。结果显示,在 1.5 mm 的初始微环境厚度下,热暴露期间人体表皮与真皮界面处温度快速升高且发生显著波动,与其他微环境厚度下皮肤温度的差异随暴露时间而增加。皮肤温度发生波动且峰值较高的原因可能是由于当前结果是基于 1.5 mm 的运动振幅下预测的,当人体运动期间高温织物会周期性与人体皮肤直接接触,以传导的方式释放大量热量至皮肤表面,从而引起皮肤温度快速升高,导致二度皮肤烧伤的时间由 52.7 s 缩短至 9 s。因此,灭火救援期间关注服装合体性与不同部位的烧伤分布预测是有必要的。

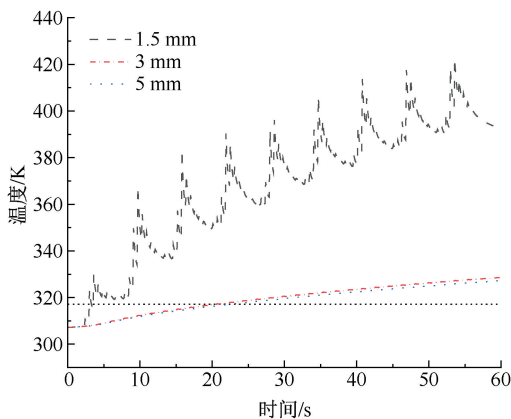


图 6 不同微环境厚度表皮-真皮界面温度
Fig. 6 Temperature at the epidermis-dermis interface with different air gap thickness

2.2.4 皮肤-微环境-消防服系统温湿度分布的预测

通过当前模型进一步分析辐射热暴露期间皮肤组织温度分布,如图 7 所示。由于人体运动期间微环境厚度的周期性变化,假设系统中皮肤组织的厚度从 0~0.005 1 m 逐渐加深,结果显示,热暴露期间,皮肤温度始终处于上升趋势;但随着消防员撤离火场,皮肤的温升速率下降。当表皮与真皮界面处温度达到 44 °C 时,人体皮肤开始发生烧伤损伤。

热暴露期间不同时刻织物层相对湿度分布和微环境中水蒸气密度如图 8 所示。从图 8a 中可以看出,消防服多层织物的相对湿度上升,这意味着由于外层织物温度快速上升引起织物内外表面温度梯度改变,织物中水分随其厚度方向的转移。通过当前模型预测的热暴露期间织物中湿度变化趋势与闪火暴露中 CHITRPHIROMSR 等^[17] 预测结果基本一致,但文中未考虑冷却期间湿度的恢复过程。热暴露期

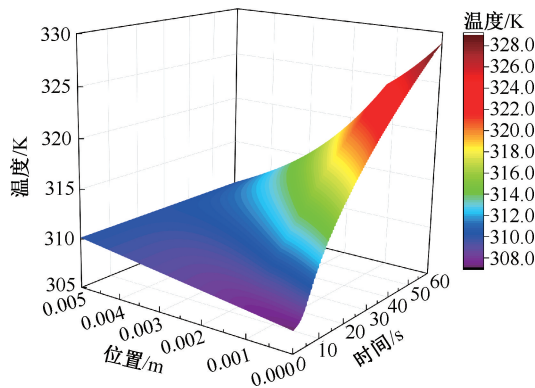
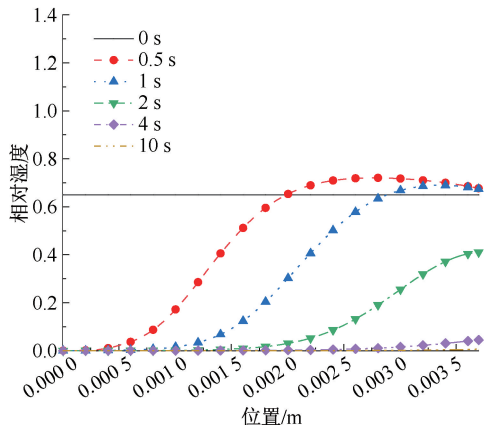


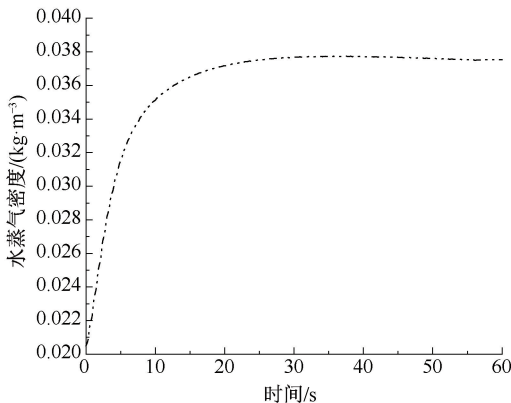
图 7 皮肤组织中温度分布

Fig. 7 Skin temperature distribution

间随着织物温度的升高,织物中水分蒸发并向人体皮肤移动,因此,微环境中热质传递建模非常关键。考虑织物中水分蒸发进入微环境,热暴露期间微环境中水蒸气密度分布,如图 8b 所示。热暴露前 20 s 内微环境从织物获得水分,水蒸气密度增加,随后由于织物中水分完全蒸发且储能达到最大值,水蒸气密度趋于稳定,此时来自热源的热量将以一定速率传递至皮肤组织。



(a) 不同时刻织物层相对湿度分布



(b) 微环境中水蒸气密度

图 8 织物与微环境中湿度分布

Fig. 8 Humidity distribution in firefighting protective clothing and microenvironment

3 结 论

1) 人体运动导致的织物周期运动会影响消防服多层织物热湿传递,增加传递至皮肤表面的总热能;人体的运动状态下织物中存在的水分增加皮肤烧伤发生的风险,降低消防服的热防护性能。

2) 服装合体性是影响皮肤烧伤时间的关键因素,随着微环境厚度的减小,高温织物周期性接触皮

肤表面并释放大量热量,导致发生二度皮肤烧伤的时间显著减少。

3) 当前模型考虑了人体活动引起的织物周期运动、热暴露距离动态变化、织物中水分的相变、吸附与解吸等过程,但忽略了出汗、颤抖、血管收缩等人体热调节功能的影响,可能导致结果存在一定误差。后续可通过 CFD 模拟的 UDF 功能,结合人体热生理调节功能,使模拟结果更接近消防实战。

参 考 文 献

- [1] 付译文. 提升消防救援人员作战安全能力的探讨[J]. 今日消防, 2022, 7(9): 124-126.
FU Zewen. Discussion on enhancing the combat safety capability of fire rescue personnel[J]. Fire Protection Today, 2022, 7(9): 124-126.
- [2] HUANG Dongmei, YANG Hua, QI Zhengkun, et al. Questionnaire on firefighters' protective clothing in China[J]. Fire Technology, 2012, 48: 255-268.
- [3] YANG Jie, SU Yun, SONG Guowen, et al. A new approach to predict heat stress and skin burn of firefighter under low level thermal radiation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106021.
- [4] 刘纪坤, 马传丽, 杨杰. 灭火防护服贝叶斯建模与热防护性能影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 214-222.
LIU Jikun, MA Chuanli, YANG Jie. Bayesian-inference-based fire protective clothing model and thermal protective performance impact analysis[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 214-222.
- [5] TORVI D A, DALE J D, FAULKNER B. Influence of air gaps on bench-top test results of flame resistant fabrics[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1999, 10(1): 1-12.
- [6] MELL W E, LAWSON J R. A heat transfer model for firefighters' protective clothing[J]. Fire Technology, 2000, 36(1): 39-68.
- [7] 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.
- [8] GHAZY A. The thermal protective performance of firefighters' clothing: the air gap between the clothing and the body[J]. Heat Transfer Engineering, 2017, 38(10): 975-986.
- [9] SU Yun, HE Jiazhen, LI Jun. Modeling the transmitted and stored energy in multilayer protective clothing under low-level radiant exposure[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 1 295-1 303.
- [10] UDAYRAJ B, TALUKDAR P, DAS A, et al. Numerical investigation of the effect of air gap orientations and heterogeneous air gap in thermal protective clothing on skin burn[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 121: 313-321.
- [11] 游波, 毛聪, 施式亮, 等. 管路结构对矿用通风服微气候的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 195-204.
YOU Bo, MAO Cong, SHI Shiliang, et al. Research on influence of pipeline structure of mine ventilation clothing on interior microclimate[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 195-204.
- [12] 游波, 杨娇, 吴国珊, 等. 矿用通风服衣内空间气流分配数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 104-112.
YOU Bo, YANG Jiao, WU Guoshan, et al. Numerical simulation study on air distribution in space of mine ventilation clothing[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 104-112.
- [13] DENG Meng, PSIKUTA A, WANG Yunyi, et al. Numerical investigation of the effects of heterogeneous air gaps during high heat exposure for application in firefighter clothing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121813.

- [14] GHAZY A. Influence of the fabric properties on the protective performance of flame resistant clothing during the body movement[J]. *Fire Technology*, 2019, 55: 713–728.
- [15] ŁAPKA P, FURMANSKI P. Modeling and analysis of the influence of the protective garment movement on the skin temperature and burn degree[J]. *Fire Safety Journal*, 2020, 111: DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102916.
- [16] GIBSON P. Multiphase heat and mass transfer through hygroscopic porous media with applications to clothing materials[D]. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell, 1996.
- [17] CHITRPHIROMSRI P, KUZNETSOV A V. Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2005, 41: 206–215.
- [18] SONG Guowen, CHITRPHIROMSRI P, DING Dan. 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.
- [19] LI Yi, ZHU Qingyong. A model of coupled liquid moisture and heat transfer in porous textiles with consideration of gravity[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2003, 43(5): 501–523.
- [20] FU Ming, YUAN Mengqi, WENG Wenguo. 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.
- [21] 苏云. 火灾高温蒸汽环境下消防服的热湿传递与皮肤烫伤预测[D]. 上海: 东华大学, 2018.
SU Yun. Heat and moisture transfer of firefighter's clothing and prediction of skin steam burn under hot steam of fire ground[D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [22] SU Yun, TIAN Miao, LI Jun, et al. Development of heat and moisture transfer model for predicting skin burn of firefighter in fire environments[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2022, 113(8): 1 658–1 665.
- [23] FAN Jintu, CHENG Xiaoyin, WEN Xinhua, et al. An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(10/11): 2 343–2 352.
- [24] 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.
- [25] PENNES H H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1948, 1(2): 93–122.
- [26] HENRIQUES F C. Studies of thermal injury; the predictability and the significance of thermally induced rate processes leading to irreversible epidermal injury[J]. *Archives of Pathology*, 1947, 43(5): 489–502.
- [27] 何华玲, 于志财, 张健飞, 等. 含水率对消防服用多层织物系统热蓄积的影响[J]. *纺织学报*, 2017, 38(8): 108–113.
HE Hualing, YU Zhicai, ZHANG Jianfei, et al. Influence of moisture content on heat storage performance of multilayer fabric assemblies for firefighters[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(8): 108–113.
- [28] SU Yun, LI Jun, ZHANG Xianghui. A coupled model for heat and moisture transport simulation in porous materials exposed to thermal radiation[J]. *Transport in Porous Media*, 2020, 131: 381–397.



作者简介: 杨杰 (1987—),男,山西大同人,博士,教授,主要从事个体防护方面的研究。E-mail: jyang@xust.edu.cn。