

DOI: 10.13475/j.fzxb.20181101306

热辐射暴露下消防员的生理反应及皮肤烧伤预测

苏云^{1,2,3}, 杨杰⁴, 李睿⁴, 宋国文⁴, 李俊^{1,2,3}, 张向辉^{1,2,3}

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 功能防护服装研究中心, 上海 200051;
3. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051; 4. 爱荷华州立大学, 美国 爱荷华 50011)

摘要 为优化消防服热防护性能的评价准则, 基于消防服热传递规律与人体热生理调节机制, 建立了消防员生理反应与皮肤烧伤预测模型。利用服装热防护性能测试平台对比分析了平均皮肤温度、核心温度的变化趋势与预测误差。结果表明: 基于模型预测的平均皮肤温度与核心温度均略大于实验测量结果, 但总体变化趋势与实验结果具有较高的一致性; 在热暴露条件下消防员面临着皮肤烧伤与热应激的双重威胁, 皮肤烧伤更多发生在热暴露阶段, 热应激更可能产生在热暴露结束之后, 这是由于热传递的滞后效应导致; 消防服热防护性能的评价需要综合考虑皮肤烧伤与人体热应激作为评价指标, 从而更加准确地标定及优化消防服的热防护性能。

关键词 生理反应; 皮肤烧伤; 热防护性能; 消防服; 热辐射

中图分类号: X 924.3; TS 941.73 文献标志码: A

Predictions of physiological reaction and skin burn of firefighter exposing to thermal radiation

SU Yun^{1,2,3}, YANG Jie⁴, LI Rui⁴, SONG Guowen⁴, LI Jun^{1,2,3}, ZHANG Xianghui^{1,2,3}

(1. Fashion & Art Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China; 4. Iowa State University, Iowa 50011, USA)

Abstract In order to improve the evaluation criteria on thermal protective performance of firefighting protective clothing, the prediction model on physiological reaction and skin burn of firefighter exposing to thermal radiation was developed based on mechanisms of heat transfer in clothing and human thermal physiological regulation. The changing trend and prediction deviation of mean skin temperature and core temperature were analyzed by the thermal protective performance tester of clothing. The results demonstrated that the mean skin temperature and core temperature predicted by the model are slightly larger than the values measured by the experiment, but the overall trend presents higher consistence with the experimental results. Additionally, firefighters in the heat exposure subject to threats of both skin burn and heat stress. The skin burn is caused during the exposure while it is more likely to produce heat stress after the end of exposure, which is attributed to lag effect of heat transfer. Therefore, the skin burn and the heat stress should be both used to more precisely characterize and improve the thermal protective performance of firefighting protective clothing.

Keywords physiological reaction; skin burn; thermal protective performance; firefighting protective clothing; thermal radiation

在工业生产、社会生活的火灾、爆炸等灾难性事故中, 消防员通常遭遇多种热灾害威胁, 主要包括火焰、热辐射、高温液体和蒸汽等, 这些热灾害环境可能导致消防员产生热应激、皮肤烧伤, 甚至死

收稿日期: 2018-11-05 修回日期: 2018-11-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2232018G-08); 国家自然科学基金资助项目(51576038); 上海市自然科学基金项目(17ZR1400500); 东华大学青年教师科研启动基金资助项目(107-07-005328)

第一作者: 苏云(1990—), 男, 讲师, 博士。主要研究方向为功能防护服及纺织材料热湿传递模型。

通信作者: 李俊(1970—), 男, 教授, 博士。主要研究方向为功能防护服及其舒适性。E-mail: lijun@dhu.edu.cn

亡^[1-3]。消防服作为消防作业人员进行紧急救援必备的一类个人防护装备,其防护性能的好坏直接关系到消防员的生命安全。

热灾害环境下消防员热应激与皮肤烧伤的研究一直以来就是 2 个热点问题。热应激的影响因素包括环境、服装性能、人体活动水平与负重^[4],但目前消防员热应激的研究主要集中在高温环境^[5],这种条件不会导致皮肤的烧伤,无法真实反映消防员所暴露的火灾环境,因此,进行火灾环境下消防员热应激的研究具有重要意义。另外,目前消防服热防护性能的研究主要是利用皮肤烧伤时间作为评价指标,研究表明,消防服的热防护性能取决于织物基本参数、空气层厚度、服装款式以及水分含量^[6-8]。然而,消防员皮肤烧伤的有效防护并不一定减少热应激的发生,过去研究也未调查消防员热应激与皮肤烧伤之间的关系,热应激在火场环境下可能更易产生,从而影响消防员的工作效率与生命健康,因此,仅仅利用皮肤烧伤时间评价消防服的热防护性能具有较大的局限性,穿着消防服的工作人员仍然面临着潜在的生命威胁。

由于火灾环境的危险性,热应激与皮肤烧伤的实验评价往往不能使用真人进行,因此数值模拟方法成为消防服热防护性能评价的有效手段。人体热应激的预测通常是基于人体热调节模型,如 Stowijk 提出的 25 节点模型^[9]、Gagge 提出的 2 节点模型^[10]、Tanabe 提出的 65 节点模型^[11]、15 区段 Fiala 模型以及可调节区段的 UCB 模型^[12-13],预测人体皮肤温度与核心温度用于评价消防员的热应激。皮肤烧伤的预测通常基于 Pennes 生物热传递模型与 Henriques 烧伤积分模型,计算皮肤烧伤时间。然而,目前很少有模型能够同时预测人体的热应力与皮肤烧伤,因此,本文提出新的数值模型用于预测消防员在热辐射暴露下的生理反应与皮肤烧伤,从而更加准确地评价消防服的热防护性能。

1 数值模型

1.1 服装热传递模型

在消防作业过程中,外界环境热量向人体的传递主要通过对流、传导、辐射 3 种方式进行,彼此之间相互耦合。为简化火灾环境下消防服内部的热传递过程,根据实际情况可作如下假设:

- 1) 整个织物系统的热传递是沿厚度方向的一维热传递,忽略质传递的影响;
- 2) 织物内部存在辐射传热与导热的耦合现象,假设对流传热仅仅发生在织物表面;

3) 由于织物暴露于低辐射条件下,忽略织物的热收缩与热化学反应;

4) 考虑织物热物性能随温度的变化,但假定织物的光学参数恒定。

基于能量守恒定律,多层织物的热传递方程如下:

$$\rho c_{\text{pfab}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{fab}}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_{\text{rad}}(x)}{\partial x} \quad (1)$$

式中: ρ 为织物的密度, g/cm^3 ; c_{pfab} 为织物的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; k_{fab} 为织物的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T 为不同时刻、不同位置的温度值, $^{\circ}\text{C}$; q_{rad} 为辐射传热流密度, W/m^2 。织物的导热系数随温度的改变而变化,取决于纤维与织物孔隙内空气的比例^[14]:

$$k_{\text{fab}}(T) = V_{\text{air}}\% k_{\text{air}}(T) + (1 - V_{\text{air}}\%) k_{\text{fiber}}(T) \quad (2)$$

式中: $V_{\text{air}}\%$ 为织物孔隙内的空气百分比,无量纲; k_{fiber} 和 k_{air} 分别为纤维与空气导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。织物内部辐射传热的衰减是由织物对辐射的吸收作用以及向后散射作用决定,基于 Beer 定律,其辐射热传递方程为

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{rad}}|_{x=0} (1 - e^{-\gamma_{\text{fab}}x}) \quad (3)$$

式中: $q_{\text{rad}}|_{x=0}$ 为织物外表面的入射辐射热流密度, W/m^2 ; γ_{fab} 为织物的消光系数,可通过以下关系式获得^[15]:

$$\gamma_{\text{fab}} = -\ln(\tau) / L_{\text{fab}} \quad (4)$$

式中: τ 为织物的透射率(0.01)^[14]。对于低辐射热暴露条件下的织物入射辐射热流密度为:

$$q_{\text{rad}}|_{x=0} = \frac{F_{\text{hs-shell}} \sigma \varepsilon_{\text{hs}} (T_{\text{hs}}^4 - T_{\text{shell}}^4) A_{\text{hs}}}{A_{\text{fab}}} (1 - r_1) - \sigma \varepsilon_{\text{shell}} F_{\text{shell-amb}} (1 - \varepsilon_g) (T_{\text{shell}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (5)$$

式中: A_{hs} 和 A_{fab} 分别为辐射热源的表面积与织物热暴露表面积, m^2 ; a 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; r_1 为辐射反射率; ε_{hs} 、 $\varepsilon_{\text{shell}}$ 、 ε_g 分别为辐射热源、外层织物及火焰的发射率; T_{hs} 、 T_{shell} 、 T_{amb} 分别为辐射热源、外层织物及外界环境的温度, $^{\circ}\text{C}$; $F_{\text{hs-shell}}$ 、 $F_{\text{shell-amb}}$ 分别为热源与外层织物之间、外层织物与外界环境之间的辐射角系数。

1.2 空气层热传递模型

由于服装无法紧贴人体,服装与人体之间会形成空气层,空气具有较小的导热系数,因此对服装整体的热防护性能有较大的影响。空气层内部的热传递包括对流、传导以及辐射,其热量传递方程为:

$$(\rho c_p)_{\text{air}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{air}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_{\text{rad-air}}}{\partial x} \quad (6)$$

式中: ρ_{air} 为空气的密度, g/cm^3 ; c_{airp} 为空气的比热

容 $J/(kg \cdot K)$; $q_{rad-air}$ 为空气层内部的辐射传递热流密度, W/m^2 , 可表示为,

$$q_{rad-air} = q_{therm-skin} e^{(-\kappa_{air}x)} \quad (7)$$

式中 κ_{air} 为空气的辐射吸收系数, $5 m^{-1}$ [15]。

1.3 人体热调节模型

根据生理结构划分, 将人体按“Newton”假人分为 20 个部位, 包括头、手、脚、上臂、前臂、大腿、小腿、前胸等。每个部位由 4 层组成, 依次为核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层。根据人体生理特征, 每个部位、每一层的热传递方程可表达为

$$c_{ij} \frac{dT_{ij}}{dt} = Q_{ij} - B_{ij} + D_{i,j-1} - r_{ij} - (R_{ij} + C_{ij} + E_{ij}) \quad (8)$$

式中: c 为人体不同节点热容, $J/(kg \cdot K)$; T 为人体不同节点温度, $^{\circ}C$; t 为暴露时间, s ; Q 为人体产热量, W ; B 为人体血液换热量, W ; D 为人体同一部位不同层之间传导热交换, W ; r 为呼吸散热量, W ; E 为皮肤蒸发散热量, W ; C, R 分别为对流及辐射散热量, W ; i, j 分别表示人体各部位不同层与人体不同区段。20 个部位、4 层组织组成 80 个节点, 每个节点通过血液流动与中央血液层进行热交换, 其热传递方程可表达为

$$c_{81} \frac{dT_{81}}{dt} = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^4 B_{ij} \quad (9)$$

式中: c_{81} 为血液层的热容, $J/(kg \cdot K)$; T_{81} 为血液层的温度, $^{\circ}C$ 。皮肤表面与环境显热传递包括对流、辐射和传导热交换:

$$R = h_r(T - T_{mt})A \quad (10)$$

$$C = h_c(T - T_a)A \quad (11)$$

$$E = h_e(P_s - P_a)A \quad (12)$$

式中: T_{mt}, T_a 分别为平均辐射温度与环境温度, $^{\circ}C$; h_r 为辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_e 为蒸发换热系数, $W/(m^2 \cdot Pa)$; A 为人体体表面积, m^2 ; P_s, P_a 分别为皮肤表面与外界环境的水蒸气压, Pa 。

1.4 皮肤烧伤预测模型

基于 Pennes 经典生物热传递模型, 假设[15]: 1) 皮肤传热是沿厚度方向的一维热传递; 2) 每一层皮肤组织的热物性恒定, 但每层各不相同; 3) 血液的温度恒定, 等于人体的体核温度; 4) 局部血液流动速率保持恒定; 5) 对于短时间、强热暴露忽略人体新陈代谢产热, 相反对于长时间、低热暴露则需要考虑。

$$P_{skin} c_{pskin} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{skin} \frac{\partial T}{\partial x} \right) +$$

$$w_b (\rho c_p)_b (T_b - T) + G_m \quad (13)$$

式中: ρ_{skin} 为各层皮肤组织的密度, g/cm^3 ; c_{pskin} 为各层皮肤组织比热容, $J/(kg \cdot K)$; w_b 为真皮层与皮下组织的血液灌注率, s^{-1} ; T_b 为血液的温度, $^{\circ}C$; G_m 为人体平均代谢产热量, W 。

根据 ASTM、ISO、NFPA 等国际标 准, 利用 Henriques 皮肤烧伤模型方程评价皮肤烧伤情况, 其方程可表达为

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (14)$$

式中: ΔE 为皮肤活化性能, 无量纲; P 为频率破坏因子, 无量纲; Ω 为皮肤烧伤程度的量化值, 无量纲; R 为理想气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$; t 为皮肤暴露于热源下其温度大于 $44^{\circ}C$ 的时间, s 。

1.5 模型求解

消防服系统的热传递过程属于非稳态传热, 其传热方程属于非线性抛物线型偏微分方程。为减小模型计算的误差, 本章采用 Crank-Nicholson 隐型有限差分法进行模型的离散化分析, 构造三对角矩阵, 利用 Thomas 迭代的方法求解非线性方程组, 计算流程如图 1 所示。利用求解的结果作为新的初始条件下, 按照以上求解过程, 计算下一时刻的热传递变化。本模型的网格划分精度为 $1.5 \times 10^{-5} m$, 为增加计算的准确性与稳定性, 模型迭代的时间间隔为 $5 \times 10^{-2} s$ 。

2 实验方案

模型验证实验中所选用的消防服是采用多层织物系统, 包括外层、防水透汽层、隔热层, 均是消防服所广泛使用的面料, 3 种面料的基本性能如表 1 所示。面料的厚度参照 ASTM D 1777—2002《测量纺织材料的厚度的标准试验方法》在施加 1 kPa 压力的情况下获取, 面料的热物性在环境温度为 300 K 时采用差分扫描量热仪进行测量。

表 1 不同层织物的基本性能参数

Tab. 1 Basic properties of different-layer fabrics

类型	成分	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	厚度/ mm	比热/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热 系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
外层	100%Nomex	342	0.6	1 570	0.047
防水透 汽层	80%Nomex/20% Kevlar (PTFE 镀膜)	122	0.9	1 160	0.034
隔热层	100%Nomex	123	2.2	1 350	0.035

本文利用热防护性能测试平台验证热辐射条件下数值模型的准确性, 如图 2 所示。该装置包括石

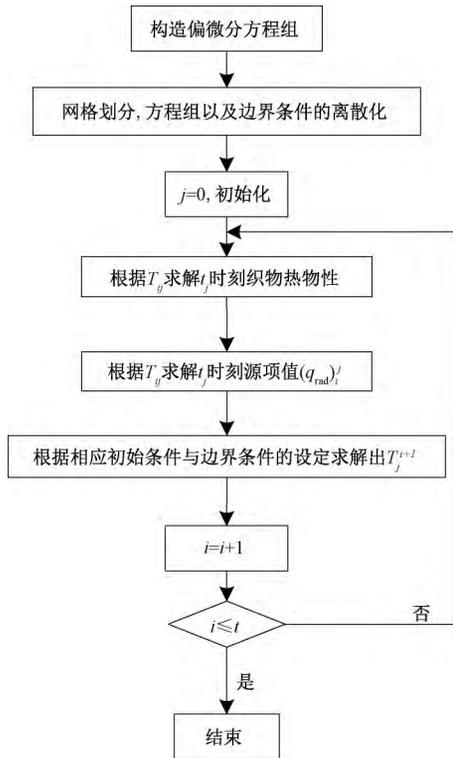


图 1 热传递模型的计算流程
Fig.1 Calculation process of heat transfer model

英灯管辐射模拟器、水冷隔热板、样品架、热流传感器与数据采集系统。根据 ASTM D 2731—2012《弹性纱线弹力特性的标准试验方法(CRE 型拉伸试验机)》, 多层织物系统暴露在 8.5 kW/m^2 的辐射热源下, 利用皮肤模拟传感器监测织物背面皮肤的热流变化。另外, 可通过调节织物系统与热流传感器之间的间隙大小模拟着装人体衣下空气层的变化, 更加精确地评价热辐射条件下不同织物系统的热防护性能。传感器传送装置可在非热暴露位置与热源之间移动, 一旦热暴露开始, 数据采集系统将会收集皮肤表面的热流变化。本文实验设置织物热暴露时间为 300 s , 热暴露结束之后皮肤模拟传感器继续采集数据直到 500 s 结束。为保证实验数据的有效性与减小实验误差, 实验样品按照以上要求重复测量 3 次。

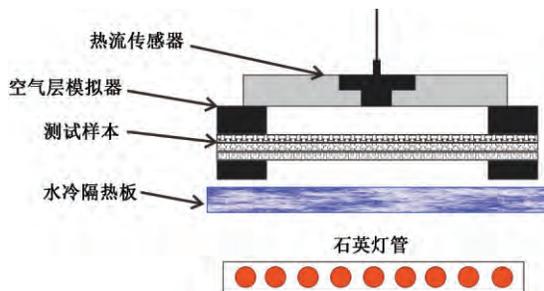


图 2 热防护性能测评装置
Fig.2 Thermal protective performance tester

3 结果与分析

3.1 平均皮肤温度

消防员进行灭火作业的代谢率大约为 290 W/m^2 , 基于研发的模型, 预测在典型火场环境下消防员的平均皮肤温度。图 3 示出了模型预测平均皮肤温度与实验测量值之间的对比图。在整个热暴露过程中, 皮肤温度随着时间的增加而上升, 热暴露结束之后, 由于多层织物系统蓄热释放对皮肤的传热, 皮肤温度仍保持较高值, 随后由于消防员处于冷却环境中, 皮肤温度开始急剧下降。

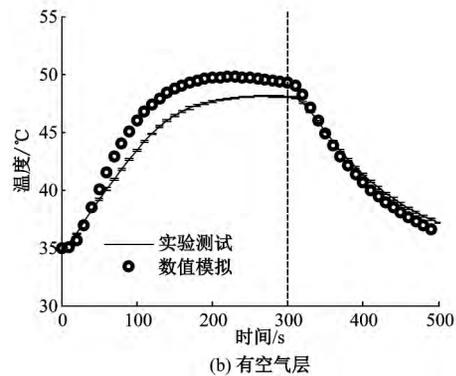
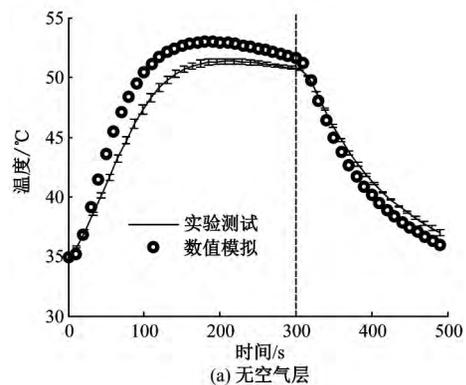


图 3 平均皮肤温度实验测量值与模型预测值的对比

Fig.3 Comparison of mean skin temperature between experiment and simulant results. (a) Without an air gap; (b) With an air gap

可以发现, 预测结果与实验测量值的总体趋势具有较好的一致性, 意味着该模型能够有效反映人体在热辐射环境下的皮肤温度变化。在热暴露阶段 (300 s) 模型预测的皮肤温度上升速率稍微大于实验测量值, 有空气层与无空气层 2 种情况下的平均皮肤温度最大差异分别为 2.05 和 $2.19 \text{ }^\circ\text{C}$, 这主要是因为该模型忽略了服装内部的多维热传递与湿传递过程。据文献[16]报道, 在热暴露过程中织物系统

中心部位的温度高于其织物边缘,以至于织物中心部位的热量会由于温差的存在向其边缘传递热量,本文模型仅仅考虑了一维热传递过程,所以其织物中心部位的预测温度明显偏高。同时,织物内部的水分对不同热暴露条件下的热传递有不同的影响^[17],在低辐射热暴露条件下水分能够减缓皮肤温度的上升^[18]。在 300 s 的热暴露之后,模型预测与实验测量的误差逐渐减小,这是因为人体在冷却阶段的降温主要取决于人体与环境之间的温度差。另外,在热暴露阶段与冷却阶段的模型预测温度变化趋势与 Ghazy 和 Bergstrom^[19] 的数值模拟结果相一致,该模型模拟了闪火条件下单层织物的一维热传递过程。

3.2 人体核心温度

图 4 示出了消防服有无空气层条件下核心温度的模型预测值与实验测量值。

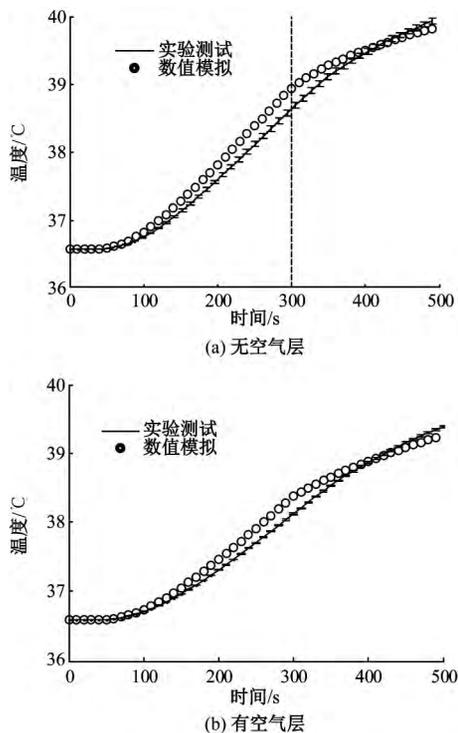


图 4 核心温度实验测量值与模型预测值的对比

Fig.4 Comparison of core temperature between experiment and simulated results.

(a) Without an air gap; (b) With an air gap

可以发现,模型预测的核心温度增长速率大于实验测量大小,核心温度在 300 s 热暴露结束之后仍然保持增长趋势,这是因为服装与人体中的热传递存在滞后作用,但模型预测值与实验测量值误差逐渐减小。在有无空气层情况下,核心温度的预测误差大小分别为 0.25 和 0.30 °C。人体核心温度是反映人体热应力的重要指标,核心温度通常维持在 $(37.0 \pm 1.0) \text{ }^\circ\text{C}$ ^[20],人体核心温度的安全上限为

38.5 °C^[21-22],因此,本文利用 38.5 °C 的核心温度所对应的暴露时间作为人体热应力的评价指标。如图 4 所示,在有无空气层的情况下消防员发生热应激的时间分别为 347.0、287.0 s,意味着消防员在 287.0 s 的热暴露过程中并未发生热应激,热应激主要发生在冷却阶段。热应激时间的模型预测值与实验测量值的误差大小分别为 7.1%和 9.3%。

3.3 皮肤烧伤时间

热辐射暴露下消防员发生皮肤烧伤的时间如图 5 所示。可以发现,无空气层情况下皮肤发生二级与三级烧伤的时间分别为 103.4、159.8 s,模型预测结果略微小于实验测量值,预测相对误差大小分别为 16.83%、14.00%。在有空气层情况下皮肤发生二级与三级烧伤的时间分别为 163.8、287.5 s,模型预测的二级与三级烧伤时间均偏小,预测的相对误差大小分别为 9.95%、10.43%。在有空气层情况下的模型预测误差小于无空气层情况下的模型预测误差,这是因为空气层热传递过程中忽略了自然对流的作用,虽然大多数模型忽略了小于 6 mm 空气层的对流传热,但实际中空气层的对流传热仍具有重要影响。

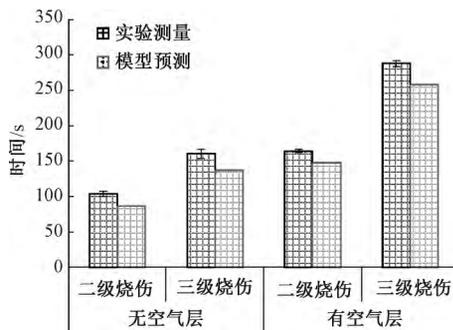


图 5 皮肤烧伤时间实验测量值与模型预测值的对比

Fig.5 Comparison of time to skin burn between experimental test and model prediction

对比人体发生热应激与皮肤烧伤的时间可发现,有无空气层情况下的二级与三级烧伤时间均小于人体发生热应激的时间,意味着在热辐射暴露下,消防员发生皮肤烧伤更快。进一步分析可知,皮肤烧伤时间均小于热暴露时间,而人体发生热应激的平均时间大于热暴露时间,接近于冷却阶段,这说明消防员未发生皮肤烧伤仍然可能产生热应激。这是因为人体皮肤温度的增加主要集中在热暴露阶段,当热暴露结束之后,人体皮肤温度主要呈现下降的趋势。人体核心温度虽然在热暴露初始阶段的增长幅度较小,但是增长过程分布在整个热暴露与冷却阶段。另外,人体皮肤烧伤发生的皮肤温度在 44 °C

以上热应激发生的核心温度在 38.5℃ 以上,因此,人体皮肤烧伤发生在热暴露阶段的可能性更大,人体热应激发生在热暴露阶段与冷却阶段的可能性均存在。综上所述,消防服热防护性能的评价既需要以人体皮肤烧伤时间作为评价依据,也需要参考人体热应激水平进行综合评价。

4 结 论

本文基于服装系统热传递规律与人体生理热调节机制,建立了热辐射暴露下消防员生理反应与皮肤烧伤预测模型。通过热防护性能测试平台验证了预测模型的准确性。结果表明:在有无空气层 2 种情况下,平均皮肤温度的最大偏差分别为 2.05 和 2.19℃,核心温度的最大预测偏差分别为 0.25 和 0.30℃;模型预测的平均皮肤温度、人体核心温度的整体变化趋势与实验测量结果均具有较高的一致性。另外,对比皮肤烧伤与人体热应激时间可发现:2 种情况下的二级与三级烧伤时间均小于人体发生热应激的时间;皮肤烧伤大多发生在热暴露阶段,而人体热应激更可能发生在冷却阶段,这意味着在火场环境下消防员可能未发生皮肤烧伤,但仍然面临热应力的威胁。因此,消防服热防护性能的评价不能仅仅用皮肤烧伤时间作为评价准则,也需要利用人体热生理反应水平作为参考标准,以更加准确地标定消防服的热防护性能。未来研究需要进一步调查人体热应激的影响因素,以结合皮肤烧伤的影响因素,综合提出消防服热防护性能的优化方案。

FZXB

参考文献:

- [1] BARR D, GREGSON W, REILLY T. The thermal ergonomics of firefighting reviewed [J]. *Applied Ergonomics*, 2010, 41(1): 161-172.
- [2] ROSSI R, INDELICATO E, BOLLI W. Hot steam transfer through heat protective clothing layers [J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2004, 10(3): 239-245.
- [3] SU Yun, LI Jun. Development of a test device to characterize thermal protective performance of fabrics against hot steam and thermal radiation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(12): 125904.
- [4] FTAITI F, DUFLOT J C, NICOL C, et al. Tympanic temperature and heart rate changes in firefighters during treadmill runs performed with different fireproof jackets [J]. *Ergonomics*, 2001, 44: 502-512.
- [5] FONTANA P, SAIANI F, GRÜTTER M, et al. Thermo-physiological impact of different firefighting protective clothing ensembles in a hot environment [J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(7): 744-753.
- [6] LEE Y M, BARKER R L. Thermal protective performance of heat-resistant fabrics in various high intensity heat exposures [J]. *Textile Research Journal*, 1987, 57(3): 123-132.
- [7] SONG G. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2007, 36(3): 193-205.
- [8] TORVI D A, HADJISOPHOCLEUS G V. Research in protective clothing for firefighters: state of the art and future directions [J]. *Fire Technology*, 1999, 35(2): 111-130.
- [9] STOLWIJK J. A mathematical model of physiological temperature regulation in man [J]. *NASA Contractor Report*, 1971, DOI: ASA CR-1855.
- [10] GAGGE A P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [J]. *Ashrae Trans*, 1971, 77(1): 21-36.
- [11] TANABE S, KOBAYASHI K, NAKANO J. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD) [J]. *Energy & Buildings*, 2002, 34(6): 637-646.
- [12] FIALA D, LOMAS K J, STOHRER M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(3): 143-159.
- [13] HUIZENGA C, HUI Z, ARENS E. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments [J]. *Building & Environment*, 2001, 36(6): 691-699.
- [14] TORVI D A, DALE J D. Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux [J]. *Fire Technology*, 1999, 35(3): 210-231.
- [15] CENGEL Y A, GHAJAR A J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* [M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 578-655.
- [16] SAWCYN C M J, TORVI D A. Improving heat transfer models of air gaps in bench top tests of thermal protective fabrics [J]. *Textile Research Journal*, 2009, 79(7): 632-644.
- [17] LAWSON L K, CROWN E M, ACKERMAN M Y, et al. Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters [J]. *International Journal of Occupational Safety & Ergonomics*, 2004, 10(3): 227-238.
- [18] PRASAD K, TWILLEY W H, LAWSON J R. Thermal Performance of fire fighters' protective clothing: numerical study of transient heat and water vapor transfer [C]// US Department of Commerce. NISTIR 6881. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2002: 1-29.
- [19] AHMED GHAZY, BERGSTROM D. Numerical simulation of transient heat transfer in a protective clothing system during a flash fire exposure [J]. *Numerical Heat Transfer*, 2010, 58(9): 702-724.
- [20] WISSLER E H. Whole-body human thermal modeling, an alternative to immersion in cold water and other unpleasant endeavors [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012. DOI: 10.1115/1HIC14-23340.
- [21] PARSONS K. *Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance* [M]. New York: CRC Press Inc, 2014: 59-77.
- [22] MCLELLAN T M. The importance of aerobic fitness in determining tolerance to uncompensable heat stress [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology: Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2001, 128(4): 691-700.