

文章编号: 1671-0444(2020)05-0740-07

基于 CFD 的闪火环境中消防服传热机制模拟

田 苗^{1a, 1b}, 李 俊^{1a, 1b, 2}

(1. 东华大学 a. 服装与艺术设计学院; b. 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051; 2. 同济大学 上海国际设计创新研究院, 上海 200092)

摘要:为探索闪火环境中消防服对外界热量的阻隔作用,利用传热传质和计算流体动力学原理建立三维人体和服装传热模型。通过燃烧假人系统物理试验,建立并验证裸体假人三维传热模型的有效性,确定模拟火场参数,并用于单层和多层消防服三维传热模型的建立。结果表明,消防服的胸部至膝盖部分具有良好的热防护能力,而领口、袖口及脚口等服装开口部位,由于空气对流加剧了服装内部和外界的热量交换,致使其热防护性能显著降低。多层消防服系统的表面温度低于单层消防服,具有更好降低热传递的性能,且不易达到热解温度。

关键词:消防服;传热机制;闪火;计算流体动力学;数值模拟

中图分类号: TS 941.73

文献标志码: A

Heat Transfer Mechanism of the Firefighter's Clothing Exposed to the Flash Fire Based on Computational Fluid Dynamics

TIAN Miao^{1a, 1b}, LI Jun^{1a, 1b, 2}

(a. College of Fashion and Design; b. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Shanghai Institute of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the effect of firefighter's clothing on heat transfer reduction from external environment of flash fire, three-dimensional heat transfer models of human body and garments were developed based on the theories of heat and mass transfer and computational fluid dynamics. Flame manikin tests were adopted to validate nude manikin simulation, and to determine the fire field parameters. These parameters were used to establish the single and multiple layers garment models. Results indicate that the garment has good ability of thermal protective performance from knee to the lower chest. On account of the effect of fluid flow through clothing ventilation openings at collar as well as the end of sleeves and pants, more energy transfers from the external to internal environment by convection, leading to the decrease of thermal protective performance. The outer surface temperature of multiple layers clothing is lower than that of the single layer garment. The multiple layers garment shows better ability of heat transfer reduction in the fire, and more time is required to reach the thermal decomposition temperature.

收稿日期: 2019-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576038);上海市教育发展基金会、上海市教育委员会“晨光计划”资助项目(18CG76);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2232019G-08);上海市设计学 IV 类高峰学科资助项目(DA 19202)

作者简介: 田 苗(1989—),女,山东青岛人,讲师,博士,研究方向为功能服装数值模拟及人体工效学, E-mail: tianmiao@dhu.edu.cn
李 俊(联系人),男,教授, E-mail: lijun@dhu.edu.cn

Key words: firefighter's clothing; heat transfer mechanism; flash fire; computational fluid dynamics; numerical simulation

消防员在执行灭火或救援任务时,常遭受高温火场、化学品药剂、浓烟、有毒气体等的严重威胁,其中火场热流是造成救援人员烧伤的重要因素^[1]。当消防救援人员面临火灾环境时,消防服等热防护服可以减少强热流对人体皮肤的危害,保障火场作业人员的安全。

消防服充分的热防护性能是为人体提供有效防护的必要条件,物理试验和数值模拟是目前评价和优化热防护服或织物性能的重要手段。通过数值模拟可实现火场环境和传热过程的重复再现,其主要目的是明确消防服热防护性能测试过程中的传热传质机理,从科学的角度分析造成人体皮肤烧伤的关键因素^[2],模拟物理试验尚不能实现的复杂环境^[3],以推动消防服测试技术的发展。

本文通过对燃烧假人系统进行三维测量和逆向工程建模,结合传热传质和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)理论,建立三维裸体燃烧假人系统模型,确定模型火场及计算参数,并应用于燃烧室内单层和多层消防服模型的建立及模拟,探究消防服在闪火环境中对外部热量的阻隔作用及传热机制。

1 裸体假人 CFD 模型的建立及验证

裸体假人燃烧试验是着装假人燃烧试验的火场校正试验,建立裸体假人 CFD 模型的主要作用是根据物理试验建立模拟火场。CFD 模型建立的关键问题包括几何模型的建立、网格的划分、控制方程的建立、初始和边界条件的确定,以及求解方法的确定。

1.1 燃烧假人系统及试验

燃烧假人试验的主要目的是模拟热流强度大、燃烧时间短的试验室火场,以通过预测烧伤表征热防护服或系统的防护性能。本研究利用燃烧假人系统,严格按照 ASTM F1930 和 ISO 13506 标准要求要求进行试验。假人表面共有 135 个传感器,覆盖其头、手、脚,可以监控试验过程中温度和热流密度随时间的变化。燃烧器有 6 组共 12 个,分布在假人周围,试验中能够产生吞没假人的火焰。

本研究基于裸体假人燃烧试验,建立裸体假人 CFD 模型,通过试验验证模型的有效性获得模拟火场环境参数,并用于消防服模型的建立。

1.2 数值假人三维模型的获取

数值假人的处理主要包括对点云数据、多边形的处理以及精确曲面的拟合等阶段。利用三维人体扫描仪获取燃烧假人点云数据,并将其导入逆向工程软件,通过检测体外孤点、减少噪声点和去除重叠等工具对点云数据进行优化处理。多边形阶段的主要步骤为填充孔,去除特征,网格医生,简化、松弛或砂纸操作,优化多边形用于精确曲面的建立。精确曲面拟合阶段需要进行轮廓线、曲面片、格栅及非均匀有理 B 样条(non-uniform rational B spline, NURBS)处理等操作。

1.3 燃烧室模型的建立及网格划分

1.3.1 燃烧室模型的建立

燃烧室内除燃烧假人外主要包括燃烧器和假人脚下金属板。在对相关尺寸进行精确测量后,利用 Gambit 软件导入经过处理的数值假人,建立燃烧室及细部结构,如图 1 所示。

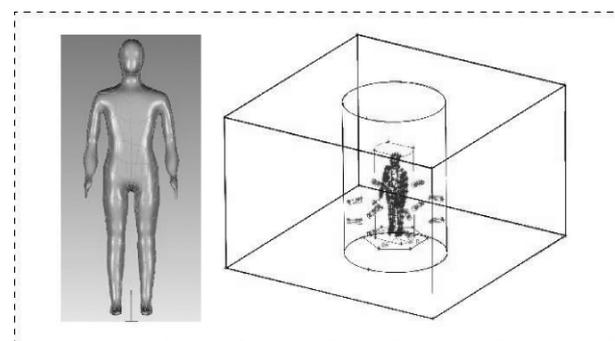


图 1 裸体假人燃烧室几何模型

Fig.1 Geometry of flame chamber with nude manikin

1.3.2 燃烧室模型网格划分

在进行 CFD 计算之前,需要将计算区域离散化,即将空间上连续的计算区域划分为多个子区域,并确定每个区域中的节点,从而生成网格。模型采用非结构化网格对计算域进行离散^[4-6]。由于燃烧室实际体积较大,在适当减少网格数量的同时,对网格进行局部加密,保障计算的准确性。燃烧室内数值假人网格模型由 4 面体和 6 面体网格组成。完成网格划分之后,分别定义边界和区域类型。

1.4 基本控制方程

1.4.1 质量守恒方程

质量守恒定律是指单位时间内流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净

质量^[4],方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u, v, w 为流体在 x, y, z 方向上的速度分量, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; t 为时间, s。

1.4.2 动量守恒方程

动量守恒定律是指微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和, x, y, z 方向的动量守恒方程分别为^[4,7]

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

式中: p 为流体微元体上的压力, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s; S_u, S_v 和 S_w 为广义源项, J。

1.4.3 能量守恒方程

能量守恒方程是指微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加体力与面力对微元体所做的功,即热力学第一定律,是含有热交换的流动系统必须满足的基本定律^[4]。

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial T}{\partial z} = \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p} \text{ grad } T \right) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容, J/(kg·K); S_T 为黏性耗散项, J; T 为温度, K; λ 为导热率, W/(m·K)。

1.4.4 组分质量守恒方程

在一个特定的系统中,若存在多种化学组分,每一种组分都需要遵守组分守恒定律,即系统内某种化学组分质量对时间的变化率等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。其中 i 组分的质量守恒方程如式(6)^[7]所示。

$$\rho \frac{\partial m_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial m_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial m_i}{\partial y} + \rho w \frac{\partial m_i}{\partial z} = D_i \text{ grad}(\rho m_i) + S_i \quad (6)$$

式中: S_i 为组分 i 的生成率; m_i 为组分 i 的体积浓

度; ρm_i 为组分 i 的质量浓度。

1.5 湍流、燃烧及辐射模型

1.5.1 湍流模型

火灾会形成强烈的湍流运动以及温度场,伴随燃烧和辐射传热^[3]。本文建立的三维瞬态 CFD 模型,需要求解三维瞬态的动量方程。目前三维湍流数值模拟的方法主要有直接数值模拟、大涡模拟以及 Reynolds 平均法(RANS)。常用的 RANS 湍流模型主要有 Reynolds 应力模型和涡黏模型两类。涡黏模型中的两方程模型常用于模拟燃烧和流体流动^[8-12]。在燃烧假人物理试验中,丙烷需要通过燃气喷嘴进入燃烧器,并与空气混合,采用 Realizable κ - ϵ 模型模拟湍流流动^[13-14],其中湍流动能 κ 的方程为

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (7)$$

式中: G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 为由浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张的贡献; S_κ 为用户自定义源项; σ_κ 为 κ 的湍流 Prandtl 数; μ_t 为修正后的湍流黏度。

湍流耗散率 ϵ 的方程为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (8)$$

式中: σ_ϵ 为 ϵ 的湍流 Prandtl 数; S_ϵ 为用户自定义源项; $C_1, C_2, C_{1\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (9)$$

与标准 κ - ϵ 模型不同的是, Realizable κ - ϵ 模型中的 C_μ 不是常数,而是与应变率相关^[4]。采用 RNG κ - ϵ 模型与标准壁面函数法模拟湍流流动,模型考虑黏性发热和浮力的影响,并对模型进行曲率校正。

1.5.2 燃烧模型

燃烧假人系统的燃料为工业丙烷,含有 90% 丙烷、5% 丁烷和 5% 丙烯。CFD 模型中采用丙烷-空气两步反应机制计算燃料的氧化率^[15],其中一氧化碳为中间产物^[9]。此外,采用涡耗散燃烧模型模拟化学组分输运和反应流,该模型对预测预混、扩散以及部分预混反应流有效,可用于确定局部反应率^[10,16]。

1.5.3 辐射模型

辐射传热是燃烧室内主要的热传递方式之

一[3]。在燃烧假人测试中,服装的降解碳化 and 燃气的燃烧会产生烟气和固体颗粒。本研究采用离散坐标辐射模型(discrete ordinates radiation model, DOM)计算燃烧室内的辐射热传递,该模型不仅考虑散射,还可计算气体和微粒间的辐射热交换[17]。由于CO₂和H₂O等具有不同的吸收频带,模拟通过灰气体加权和模型(weighted sum of gray gases model, WSGGM)计算烟气的辐射。WSGGM和DOM的结合可以模拟多维辐射体系,实现非灰气体辐射换热的精确模拟[17-18]。

1.5 初始、边界条件及求解方法

计算域的初始条件和边界条件是根据燃烧假人物理试验设定的。数值燃烧室内部的初始温度设为27℃,假定燃烧室内充满空气,氧气的质量分数为23%。数值假人表面为双侧壁,求解器可以根据近壁区的流体域直接计算假人表面的热传递。

基于燃烧假人系统的裸体假人CFD模型在Fluent软件中计算,采用压力-速度耦合算法求解耦合动量、能量及组分传输方程,瞬态方程采用一阶隐式算法。模型的步长为0.01s,模拟闪火时间为4s,共需计算400步。该模型在IBM System x3690 X5服务器上完成计算,一次运算耗时84.6h。

1.6 裸体假人CFD模型的验证

根据标准要求和物理试验结果,采用平均热流密度、热流密度分布、绝对热流差与相对热流差等指标对该模型进行验证[19-20]。数值假人表面的平均入射热流密度为83.7kW/m²,平均热流密度的标准差为16.2kW/m²,均满足ASTM F1930和ISO 13506标准的要求。分别提取135个传感器处的热流密度,利用Statistics 22.0软件对试验和模拟结果进行显著水平为0.05的配对t检验,试验与模拟的均值差为-1.69kW/m²,标准差为16.89kW/m²,P值为0.25(>0.05),表明试验和模拟的热流密度无显著差异。各个传感器处的绝对热流差和相对热流差结果同样表明,裸体假人CFD模型可以较好地反映实际火场和裸体假人燃烧试验的过程。此外,文献[20]也对CFD模型反映效果进行了具体说明。因此,可以将裸体假人CFD模型中的设定参数应用于消防服数值模型的建立。

2 消防服系统CFD模型的建立

2.1 消防服三维模型的获取

为获取消防服的三维形态,采用Kevlar[®]/PBI面料进行单层消防服的制作。标准测试服装为连体服装,前门襟装有防火金属拉链,无口袋,无袖口克夫及脚口克夫,且腰部无松紧带。服装结构及尺寸

满足ISO 13506要求。单层消防服的着装形态同样利用三维扫描仪获取,多层消防服结构则通过在CFD模型中设置服装层数获得。与裸体假人相同,利用逆向工程软件对消防服点云数据进行处理。获得服装NURBS曲面后,导入Gambit软件建立燃烧室几何模型,并进行网格划分,如图2所示。

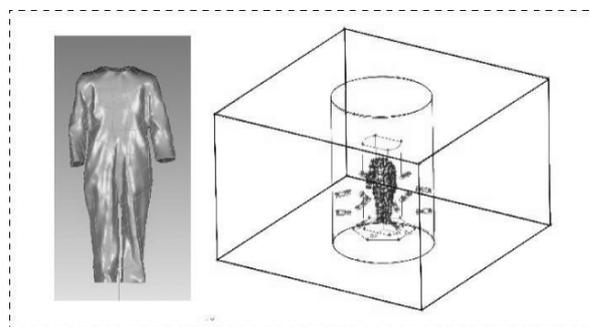


图2 消防服燃烧室几何模型

Fig.2 Geometry of flame chamber with clothing

2.2 消防服CFD模型的建立

单层及多层消防服CFD模型的初始、边界条件及求解方法设置与裸体假人模型相同,以保证所处火场环境一致。其中在材料性能参数设置时,采用文献[21-22]中三层消防服的经典参数,如表1所示。单层消防服只采用外层面料(Kevlar[®]/PBI)数据,多层消防服包括外层、防水透湿层及隔热层。着装状态下服装领口、袖口和脚口截面面积分别为263.5、88.7和160.0cm²,其中袖口、脚口处的截面面积为左右两侧的平均值。在消防防护装备系统中,头、手、足部的配套防护装备能够显著降低服装开口处的热传递。由于消防服CFD模型主要关注服装本身对传热过程的影响,且仅考虑服装开口打开的情况,因此,会在一定程度上增大服装开口部位的热传递,在实际问题中需要进一步考量。本模型同样利用IBM System x3690 X5服务器计算。

表1 三层消防服的材料性能参数

Table 1 Material properties of triple-layer fire clothing

| 服装层 | 性能参数 | 取值 |
|-------|---|---------------|
| 外层 | 厚度/mm | 0.60 |
| | 密度/(kg·m ⁻³) | 323 |
| | 比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 1 300 ~ 5 340 |
| | 导热率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 0.047 ~ 0.255 |
| 防水透湿层 | 发射率 | 0.90 |
| | 厚度/mm | 0.85 |
| | 密度/(kg·m ⁻³) | 250 |
| | 比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 1 150 |
| | 导热率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 0.05 |

(续表)

| 服装层 | 性能参数 | 取值 |
|-----|---|-------|
| 隔热层 | 厚度/mm | 0.95 |
| | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 220 |
| | 比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) | 1 300 |
| | 导热率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) | 0.052 |

3 模拟结果分析与讨论

3.1 消防服内、外环境温度分布

本文的主要目的是研究消防服对外界热量的阻隔作用,因此,服装内、外环境的温度分布是表征其作用的重要指标。闪火4 s末,消防服在 $z=0$ 和 $x=0$ 两个纵截面的温度分布,如图3所示。其中: $z=0$ 截面是指将服装分为前后两部分的额状面; $x=0$ 截面是指将服装分为左右两部分的矢状面。

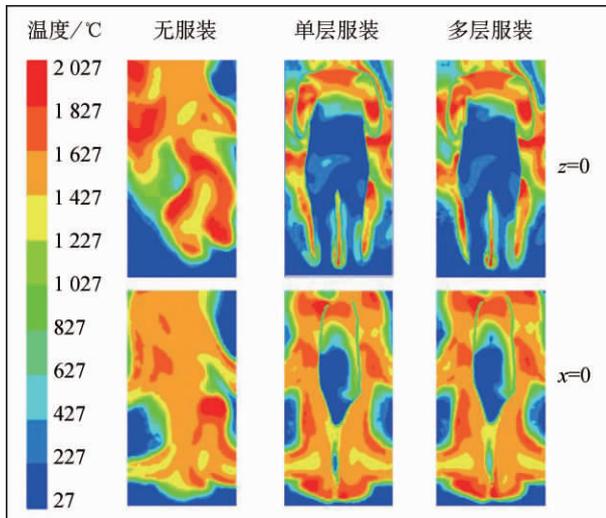


图3 闪火4 s末服装纵截面温度分布

Fig.3 Temperature distribution around garment on the longitudinal sections at the end of 4 s fire exposure

由图3可知:单层和多层消防服的模拟结果均存在明显的服装界面。服装层及服装近壁面的温度均小于外环境火场温度。这与面料层面的试验和模拟显著区分为热源、面料和衣下微环境不同,消防服内环境的温度并不完全低于外环境。消防服腰腹、大腿等躯干部位的温度显著低于外界火场环境,但在肩部、胸部等临近服装开口的部位,由于火焰直接进入服装内环境,产生热对流,内环境的温度与外环境无显著差异。

闪火4 s末服装横截面温度分布如图4所示。由图4可知,肩部、胸部、臀部、膝部的横截面温度分布同样证实了消防服对外界火场向服装内部传热的阻碍作用。与闪火4 s末服装纵截面温度分布结果

一致,尽管消防服本身的温度显著低于外环境温度,但由于服装领部开口的作用,肩部内环境温度并未显著降低。但胸部、臀部和膝部等远离服装开口的部位,服装内环境的温度明显低于外环境。与单层消防服的各部位截面处温度相比,多层消防服内环境温度较低的区域更大,表明多层消防服的隔热性能更好。此外,图4中的多层消防服具有更加明显的服装截面轮廓,说明其自身温度低于单层消防服。

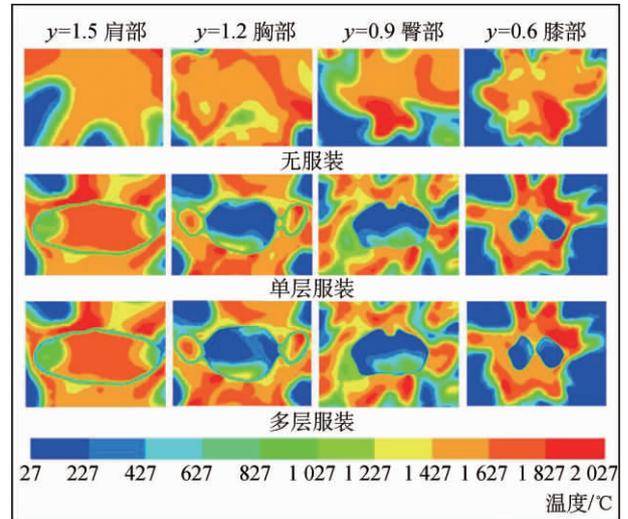


图4 闪火4 s末服装横截面温度分布

Fig.4 Temperature distribution around garment on the horizontal sections at the end of 4 s fire exposure

阻燃面料的热防护性能可通过台式测试获得,而将阻燃面料制作为消防服等热防护服装时,在不同部位发挥的热防护功能却有所不同,其影响因素包括身体部位、服装开口、外界热源分布等。本研究通过对闪火过程的模拟,预测了服装内、外环境的温度分布,分析了服装结构对热传递机制的影响。

3.2 消防服各表面温度分布

单层消防服内外表面温度分布相似,均是领部、袖口、脚口等服装开口部位的温度较高,而大身部位的服装表面温度较低,如图5所示。服装内表面温度低于外表面,论证了阻燃面料的隔热作用。由图3和4截面温度分布可知,由于火焰会通过服装开口直接进入服装内环境,因此导致靠近开口部位的服装内表面温度升高,同时服装本身的热传导效应使服装高温区域增加。因此,消防服合理的开口设计对其热防护性能的提升具有重要作用。

闪火4 s末多层服装各表面的温度分布,如图6所示。由图6可知,在进行多层消防服面料试验时,外层面料到内层面料的温度呈梯度降低。而本研究的模拟结果表明,在服装层面,外表面、外层/防水透

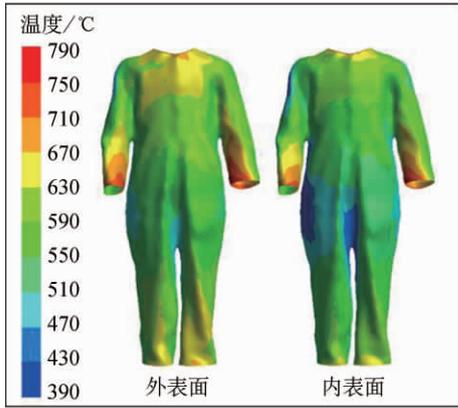


图 5 闪火 4 s 末单层服装各表面温度分布
Fig.5 Temperature distribution of the single layers garment at the end of 4 s fire exposure

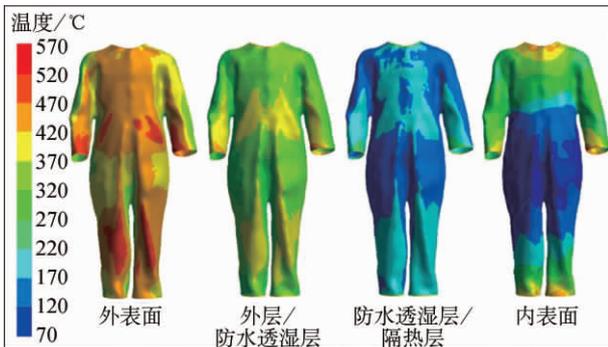


图 6 闪火 4 s 末多层服装各表面温度分布
Fig.6 Temperature distribution of the multiply layers garment at the end of 4 s fire exposure

湿层界面、防水透湿层/隔热层界面的温度依次逐渐降低;服装内表面的胸部、袖子、脚口等部位的温度高于防水透湿层、隔热层的温度,臀腹部等大身部位则出现服装系统的最低温度区域。该结果表明,在服装开口部位,不仅存在闪火外环境向服装内部的热传递,而且存在服装内表面向服装外部的热传递,服装内部热传递复杂,造成内表面特殊的温度分布。

3.3 消防服各层温度随时间的变化

为探究单层和多层消防服闪火 4 s 过程中温度的变化,提取并计算服装各层界面的平均温度,如图 7 所示。由图 7 可知:在闪火开始阶段,由于火焰从燃烧器到达服装表面需要一定的缓冲时间,在 0.5 s 之前服装各表面的温度并未发生明显变化;在 0.5~1.0 s,服装外表面的平均温度出现跃升,随后上升速率降低;对于单层消防服,在 4 s 闪火过程中,服装内表面温度低于外表面,但温度差逐渐降低。该结果表明,在闪火初始阶段服装内部热量积聚,当储存热达到饱和后,热量更迅速地向服装内部传热,与此

同时,服装内部开口处的温度也不断升高,导致服装内外表面温度差不断减小。

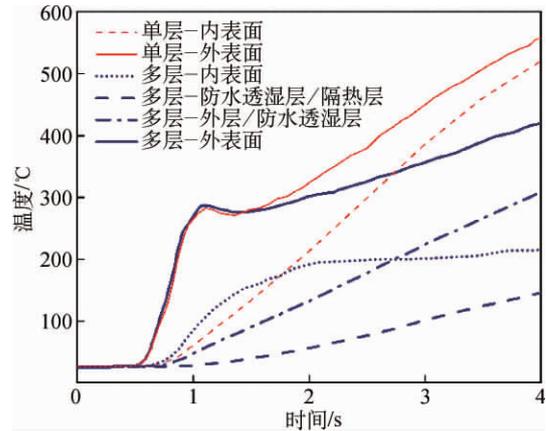


图 7 单层及多层消防服各表面温度随时间的变化
Fig.7 Temperature variation as a function of time for single and multiply layers firefighters' clothing

多层消防服外表面温度低于单层消防服。文献 [23]表明,Kevlar®/PBI 面料在 427 °C 左右开始发生热解。因此,单层消防服在接近 3 s 时已发生降解,而多层消防服外层阻燃面料尚未达到热解温度,由此可知,多层服装具备更稳定的热防护性能。多层消防服的外层/防水透湿层、防水透湿层/隔热层界面的平均温度逐渐降低,表明两层面料具备一定的隔热性能。

消防服内表面平均温度并非一直低于其他界面温度。热暴露 0.5~2.8 s 时,内表面温度高于中间层界面温度;热暴露 2.8~4.0 s,内表面温度被外层/防水透湿层界面温度反超,但仍高于防水透湿层/隔热层界面的温度。该结果表明:闪火初始阶段,热量主要从服装外表面向内表面传递,同时从服装内表面的开口部位向外部传递;当消防服各层面料储存热达到饱和时,服装内外表面温差最大的为大身部位,热量主要从外环境向服装内部传递,同时,从服装内表面开口部位向大身部位传递。

4 结 语

本文基于燃烧假人系统及裸体假人燃烧试验,利用传热传质及流体动力学原理,建立了裸体假人 CFD 模型,然后对该模型进行验证并应用于燃烧室内单层和多层消防服模型的建立及模拟,以探究消防服在闪火环境中对外部热量的阻隔作用及传热机制。

由模拟结果可知,服装的隔热作用不仅取决于所采用阻燃面料的热物理性能,同时会受到热源环

境、服装开口和服装层数等因素的影响。消防服对外环境向服装内环境的传递具有一定的阻碍作用,且多层消防服装隔热作用更好。服装界面及各层表面的温度分布表明:服装大身部位主要存在外环境向服装内环境的热传递;而在领部、袖口和脚口等服装开口部位,由于火焰直接进入衣下空间,并且空气对流加剧热传递,导致服装内环境温度升高,因此,同时存在服装外环境向内环境以及内环境向外环境的热传递。单层及多层消防服各表面的平均温度随时间而变化的结果论证了服装内外表面复杂的热传递机制。由于消防服层间空气层与燃烧室存在较大尺度差异,且服装结构复杂,本研究尚未考虑层间空气层的情况。此外,阻燃服装在热暴露过程中的降解同样是影响传热过程的重要因素之一,未来有必要通过物理试验和数值模拟相结合的方法开展深入研究。今后将继续关注服装开口对衣下微环境传热方式的影响,为消防服的优化设计提供理论依据。

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] 田苗, 李俊. 数值模拟在热防护服装性能测评中的应用[J]. *纺织学报*, 2015, 36(1):158-164.
- [3] JIANG Y Y, YANAI E, NISHIMURA K, et al. An integrated numerical simulator for thermal performance assessments of firefighters' protective clothing [J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(5):314-326.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [5] CALAUTIT J K, O'CONNOR D, SOFOTASIOU P, et al. CFD simulation and optimisation of a low energy ventilation and cooling system [J]. *Computation*, 2015, 3(2): 128-149.
- [6] GAO N, NIU J. Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment [J]. *Building and Environment*, 2006, 41(9): 1214-1222.
- [7] SOROUSH A. CFD evaluation of a jet in cross flow related to a gas turbine burner [D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2012.
- [8] YANG W, BLASIAK W. Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air [J]. *Energy*, 2005, 30(2/3/4): 385-398.
- [9] AMIRSHAGHAGHI H, ZAMANIYAN A, EBRAHIMI H, et al. Numerical simulation of methane partial oxidation in the burner and combustion chamber of autothermal reformer [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(9): 2312-2322.
- [10] YAN Z, HOLMSTEDT G. CFD simulation of upward flame spread over fuel surface [J]. *Fire Safety Science*, 1997, 5: 345-356.
- [11] KILIC M, SEVILGEN G. Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(9): 1159-1164.
- [12] MAZEJ M, BUTALA V. Investigation in the characteristics of the personal ventilation using computational fluid dynamics [J]. *Indoor and Built Environment*, 2012, 21(6): 749-771.
- [13] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of $k-\epsilon$ models [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(20): 3200-3210.
- [14] ROHANI B, SAQR K M. Effects of hydrogen addition on the structure and pollutant emissions of a turbulent unconfined swirling flame [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39(5): 681-688.
- [15] GUESSAB A. Numerical investigation of methane-air mixture with CO₂ dilution (in fuel, first air and second air inlet) in a gas turbine combustor chamber [J]. *International Journal of Mechanics*, 2015, 9:128-137.
- [16] PINHO C E L, DELGADO J M P Q, PILAO R, et al. Numerical study of propane-air mixture combustion in a burner element[J]. *Defect and Diffusion Forum*, 2008, 273: 144-149.
- [17] HU G H, WANG H G, QIAN F. Numerical simulation on flow, combustion and heat transfer of ethylene cracking furnaces [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(8): 1600-1611.
- [18] 聂宇宏, 陈海耿. WSGGM 结合离散坐标法研究非灰气体辐射换热问题[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2001, 22(4): 443-445.
- [19] TIAN M, WANG Z, LI J. 3D numerical simulation of heat transfer through simplified protective clothing during fire exposure by CFD[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 314-321.
- [20] TIAN M, LI J. Simulating the thermal response of the flame manikin with different materials exposed to flash fire by CFD [J]. *Fire and Materials*, 2017, 41(1): 40-53.
- [21] TORVI DA. Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux conditions [D]. Edmonton: University of Alberta, 1997.
- [22] 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.
- [23] KUKUCK S, PRASAD K. Thermal performance of firefighters' protective clothing: Part 3 simulating a TPP test for single-layered fabrics [M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2003.

(责任编辑:冀宏丽)