

气凝胶隔热面料热防护性能测评

刘 沙， 陈维旺*

(中国民航大学 民航热灾害防控与应急重点实验室,天津 300300)

摘 要:在隔热织物中填充气凝胶是提高织物热防护性能的有效途径。为探讨气凝胶隔热面料的热防护性能及其作为消防服隔热层使用的可行性,选取3种不同规格的气凝胶面料替换现役消防服的隔热层,通过热平板法分析评价不同组合面料的综合热防护性能,并耦合皮肤烧伤模型计算人体皮肤达到二度烧伤所需的时间。结果表明:相比传统消防服中的无纺毡隔热层,气凝胶面料具有更好的热防护性能;AG-T-Nomex 系列面料受黏合剂耐热性的限制,在高温环境下容易发生变形,故不适合在消防服中使用。综合分析,AG-ST-POF 的高温热防护性能更好,效果相对更稳定,有作为消防服隔热层面料使用的潜能。

关键词:气凝胶;消防服;隔热;热防护性能;皮肤烧伤

中图分类号:TS 941.15 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)04-0291-07

Evaluation on Thermal Protective Performance of Aerogel Fabrics

LIU Sha, CHEN Weiwang*

(Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Filling aerogel to the thermal insulation fabric is an effective way to improve the thermal protective performance of the fabric. To explore the thermal protective performance of aerogel thermal insulation fabrics and their feasibility as the thermal insulation layer of fire-fighting protective clothing, three different specifications of aerogel fabrics were chosen for analysis in this study. The comprehensive thermal protective performance of different composite fabrics was evaluated using hot plate method. The time for human skin to reach the second-degree burn was also calculated by coupling with skin burn model. The test and calculation results show that, aerogel fabrics can provide better thermal protection compared with the traditional non-woven felt. However, due to the heat resistance of the adhesive, the AG-T-Nomex is easy to deform in high temperature environment, thus it is not suitable for application in fire-fighting protective clothing. Based on the comprehensive analysis, AG-ST-POF performs better in thermal protection, and shows the potential to be used as a heat-insulating layer fabric for fire-fighting protective clothing.

Key words: aerogel, fire-fighting protective clothing, heat insulation, thermal protective performance, skin burn

工业化和城市化进程的推进带来社会经济的繁荣和人们生活水平的提高,但同时导致过度集中的人口和密集的建筑群,进而增加火灾事故发生的概率,对人民的生命财产安全构成严重威胁。近年来,我国火灾形势整体呈下降趋势,但群死、群伤事

故仍时有发生。调查数据显示,2009—2019 年间发生的 35 起火灾事故,共导致 677 人伤亡^[1],且多发于商场、高层建筑与群租房等人员密集的区域,严重影响社会公共安全。为此,国家与民众对消防救援工作的要求和期望越来越高^[2-4]。消防装备的优

收稿日期:2021-01-07; 修订日期:2021-03-16。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51904312);中国民航大学科研启动基金项目(2020KYQD115)。

作者简介:刘 沙(1994—),女,硕士研究生。

* 通信作者:陈维旺(1990—),男,讲师,硕士生导师。主要研究方向为热防护材料与个体防护技术、应急技术及方法等。

Email: ww_chen@cauc.edu.cn

劣直接关乎消防人员的生命安全,影响应急救援工作的开展。提高消防服的热防护性能是保护消防员免受外界高温和热辐射危害,保障消防救援工作顺利进行,减少人员伤亡的必要途径^[5-7]。

气凝胶是一种具有较高孔隙率(最高可达99%)、超轻($\sim 0.03\text{ g/cm}^3$)的纳米多孔结构固体材料^[8],热量在气凝胶内部的传递可分为气相传热、固相导热和热辐射换热。气凝胶内部堆积的大量微尺度颗粒使得气凝胶的固相传热面积缩小并延长了热量的传递路径,从而降低气凝胶的固相热导率;其次,气凝胶材料具有纳米级的孔隙,气相热导率极低;另外,气凝胶内部存在无数的微孔和反射颗粒,也能降低气凝胶内部的热辐射换热。因此,气凝胶材料热导率低,具有良好的隔热性能。气凝胶因自身的特殊结构可有效抑制固相导热和气相传热,使消防服具备优异的隔热性能^[9]。目前,气凝胶复合材料的制备方式主要有两种^[10-11]:①在气凝胶制备过程中加入增强材料,如玻璃纤维;②将气凝胶颗粒与黏合剂等试剂复合。

近年来,研究人员发现气凝胶的添加可显著改善消防服的热防护效果。任乾乾等^[12]研究了以玻璃纤维二氧化硅气凝胶毡为隔热层的新型面料组合方式,实验结果显示,各参数均优于我国现役消防服的相关标准要求;张兴娟等^[13]对复合气凝胶的新型组合式消防服进行了热防护性能评价,发现新型组合式消防服的导热系数为传统消防服的1/4;JABBARI M等^[14]使用涂层法将涤纶织物和气凝胶相结合,制备了轻质高隔热的聚氯乙烯涂层织物,实验结果表明,气凝胶的引入使复合材料的热防护性显著提高且不会弱化其他性能;张慧^[15]将实验与建立的数学模型相结合,对气凝胶、相变材料和新型热防护面料在不同强度下的热防护性能展开了

较为全面的研究和评价,为后续新型气凝胶热防护面料的研发奠定了一定的基础。近年来,相关研究人员致力于研究影响气凝胶应用于热防护服的各种因素,试图克服实际使用中存在的阻碍,在确保热防护服其他性能的同时进一步提高其热防护性能^[16-21]。

目前,通过添加气凝胶改善消防服热防护性能的研究颇多^[22]。对已有气凝胶隔热面料开展热防护性能对比分析与评价研究,进而评估热灾害环境下消防人员穿着气凝胶防护服的烧伤风险也就变得十分必要,这将为消防服面料的选择、性能评价等提供参考和借鉴。文中基于实验测试和皮肤烧伤计算,以无纺毡隔热层为空白对照,对3种气凝胶面料在消防服隔热层应用中所呈现的热防护效果进行评价。

1 材料与方法

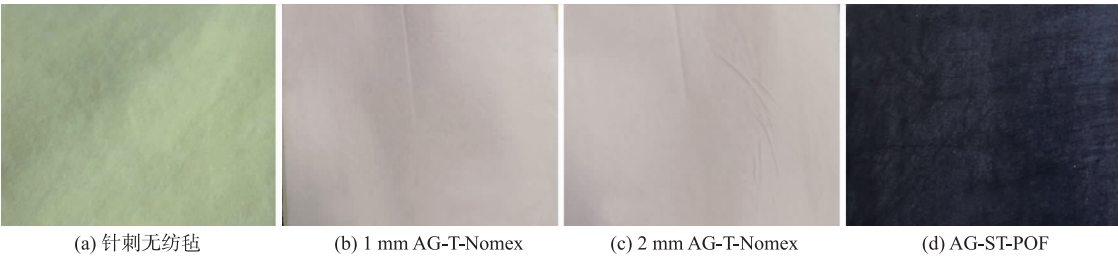
1.1 材料

1.1.1 试样 消防服为多层织物结构,由外及里分别为阻燃外层、防水透气层、隔热层和舒适层^[23-24]。文中热防护织物的基本物性参数见表1。选用4种规格(针刺无纺毡、1 mm AG-T-Nomex、2 mm AG-T-Nomex 和 AG-ST-POF)的热防护面料作为消防服隔热层,将其依次与阻燃外层、防水透气层和舒适层复合,得到4种不同的组合面料,分别记为 $S_1 \sim S_4$ 。其中:针刺无纺毡、1 mm AG-T-Nomex 和 2mm AG-T-Nomex 均由上海伊贝纳纺织品有限公司提供;AG-ST-POF 由深圳中凝科技有限公司提供。隔热层1[#]~4[#]常温下热导率分别为:0.070, 0.032,0.025 和0.020 W/(m·℃)。隔热层面料如图1所示。

表 1 热防护服织物基本物性参数
Tab.1 Physical parameters of thermal protective clothing fabric

名 称	织物成分	织物结构	面密度/(g/m ²)	厚度/mm
阻燃外层	$m(\text{Nomex}):m(\text{Kevlar}):m(\text{P140}) = 93:5:2$	斜纹	200	0.414
防水透气层	$m(\text{Nomex}):m(\text{Kevlar}) = 80:20$	水刺毡覆 PTFE 膜	105	0.453
隔热层 1 [#]	$m(\text{Nomex}):m(\text{Kevlar}) = 80:20$	针刺无纺	120	0.817
隔热层 2 [#]	AG-T-Nomex	针刺无纺复合 SiO ₂ 气凝胶	308	1.010
隔热层 3 [#]	AG-T-Nomex	针刺无纺复合 SiO ₂ 气凝胶	492	1.990
隔热层 4 [#]	AG-ST-POF	针刺无纺复合 SiO ₂ 气凝胶	339	1.980
商用舒适层	$m(\text{Nomex}):m(\text{Kevlar}) = 50:50$	平纹	120	0.292

注:P140 为抗静电纤维;PTFE 为四氟乙烯。



(a) 针刺无纺布 (b) 1 mm AG-T-Nomex (c) 2 mm AG-T-Nomex (d) AG-ST-POF

图 1 隔热层面料

Fig.1 Physical picture of thermal insulation fabric

1.1.2 仪器 WXD-SERIES 恒温加热台,天津威迅达科技有限公司制造;OM-DAQPRO-5300 数据采集仪,美国 Omega Engineering 公司制造;DSC-W830 数码相机,无锡中关数码设备有限公司制造。

1.1.3 模型计算 以 Protective Clothing Performance Simulator (PCPS) 软件为蓝本,采用 Microsoft Visual Studio 开发环境,基于 Fortran 编程语言实现。

1.2 实验方法

以恒温加热台为热源,为面料提供温度恒定的高温接触表面;使用数据采集仪记录图 1 中单层及组合面料舒适层上表面温度变化情况;使用数码相机记录隔热层的外观相貌变化情况,测试平台如图 2 所示。

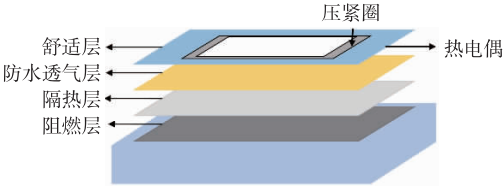


图 2 热防护性能测试装置

Fig.2 Device for thermal protective performance test

2 结果与讨论

2.1 外观形貌

图 3 为不同隔热层组合面料接触高温表面前后的外观变化情况。



图 3 加热前后隔热层面料外观形貌

Fig.3 Appearance of insulation fabrics before and after heating

由图 3 可以看出,针刺无纺布接触 200 °C 和 300 °C 高温表面后无明显变化,这与 Nomex 的耐高温特性是一致的;接触 200 °C 和 300 °C 热平板后,含有气凝胶的隔热面料 AG-ST-POF 外观形貌同样没有明显改变,热稳定性也较好;而在接触 200 °C

高温热表面后 1 mm AG-T-Nomex 出现轻微的隆起,面料平整性变差,当接触 300 °C 高温热表面后面料发生收缩变形,面料面积缩小;具有相同织物成分的 2 mm AG-T-Nomex 在接触 200 °C 高温热平面后,面料出现一些细小的波纹,但是经 300 °C 高温后该

面料形态发生了极大的变化,横向收缩严重并出现大量的褶皱与拱起。

2.2 热防护性能

不同面料的热防护性能测试结果如图 4 所示。其中:图 4 (a) 为单层隔热面料在 200 ℃ 的预设温度下,热防护性能的测试结果;图 4 (b) 和图 (c) 分别为 200 和 300 ℃ 高温环境下,不同组合面料热防护性能的测试结果。

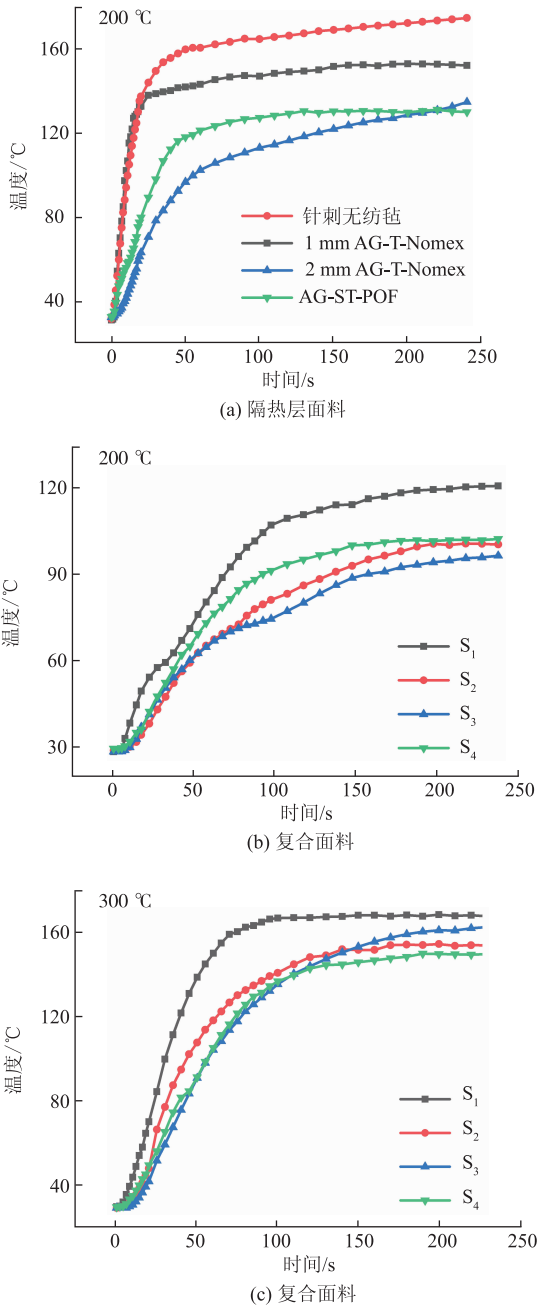


图 4 热防护性能测试结果

Fig. 4 Thermal protective performance test results

由图 4(a) 可以看出,针刺无纺布隔热层在测试的前 20 s 迅速升温,之后进入缓慢升温阶段直至相对平稳;1 mm AG-T-Nomex 隔热面料升温速度较快;其余 2 种添加气凝胶的隔热面料在进入类似的

缓慢升温状态前,大约经历了 45 s 的快速升温过程。2 mm AG-T-Nomex 与 AG-ST-POF 隔热面料的外侧温度明显低于未添加气凝胶的无纺毡,这进一步验证了气凝胶的添加对面料热防护性能的提升有显著影响。对比成分一致的 1 mm AG-T-Nomex 和 2 mm AG-T-Nomex 可以发现,气凝胶隔热层厚度与面料的隔热性能成正比;另一成分的 AG-ST-POF,其隔热性能介于二者之间。

由图 4(b)和图 4(c)可以看出,组合面料 S₁ 接触 200 和 300 ℃ 的恒温平板后,在很短时间内即进入平稳状态,热防护效果相对较差;图 4(b)中,进入平稳状态后,组合面料 S₃ 的舒适层上表面温度约比非气凝胶组合面料低 20 ℃;由图 4(b)可以看出,组合面料 S₃ 的舒适层上表面温度较低,热防护效果最佳,其次为 S₂ 和 S₄。图 4(c)中,除 S₁ 外,其余 3 种组合面料的温度变化规律比较相似,其中组合面料 S₃ 与 S₄ 的舒适层上表面温度在 130 ℃ 之前几乎完全重叠;130 ℃ 后,组合面料 S₄ 的舒适层上表面温度进入相对平稳的状态,表明 AG-ST-POF 具有较好的热防护效果,而组合面料 S₃ 的舒适层上表面温度一直处于缓慢升温过程。结合图 3 中 2 mm AG-T-Nomex 经 300 ℃ 处理后的外观形貌,出现该现象的原因可能是气凝胶面料使用的黏合剂无法承受如此高的温度,并在热分解过程中释放出热量,导致 2 mm AG-T-Nomex 面料结构在高温下发生了严重破坏,舒适层上表面温度持续升高,热防护性能降低。图 4(c)中,平稳状态下,当 AG-ST-POF 作为隔热层时,组合面料的舒适层上表面温度相比非气凝胶组合面料低 18 ℃。

2.3 皮肤烧伤预测

研究表明,运用数学模型,定量计算皮肤达到二度烧伤的时间,是评价消防织物及其服装热防护性能的重要依据^[25-27]。

2.3.1 皮肤传热模型 人体皮肤由表皮层、真皮层和皮下组织构成,其几何结构如图 5 所示。

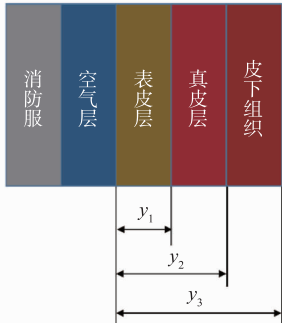


图 5 皮肤几何结构

Fig. 5 Structure of skin

假设人体皮肤各层是均匀的,且物性参数保持不变^[28]。采用 Pennes 生物热平衡方程^[29]计算人体皮肤的热传递。

表皮层:

$$(\rho c)_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}(\kappa_e \frac{\partial T}{\partial y}) \tag{1}$$

真皮层:

$$(\rho c)_d \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}(\kappa_d \frac{\partial T}{\partial y}) + (\rho c)_b \omega_b (T_c - T) \tag{2}$$

表 2 皮肤各层的物性参数

Tab.2 Physical parameters of each skin layer

参 数	厚度/mm	导热系数/ [W/(m · °C)]	比热/ [J/(kg · °C)]	血液灌注量/ [m³/(s · m³)]	密度/ (kg/m³)
表皮层	0.08	0.24	3 590	0	1 200
真皮层	2.00	0.45	3 330	0.001 25	1 200
皮下组织	10.00	0.19	2 500	0.001 25	1 000

2.3.2 皮肤烧伤模型 为了预测皮肤达到二度烧伤的时间,采用 Henriques 皮肤烧伤积分模型^[31]求得烧伤参数 Ω ,具体如下:

$$\frac{d\Omega}{dt} \begin{cases} 0 & T < 44\text{ }^{\circ}\text{C} \\ P\exp[-(\Delta E/RT)] & T \geq 44\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \tag{4}$$

对式(4)进行积分,可得

$$\Omega = \int_0^t P\exp(-\frac{\Delta E}{RT})dt \tag{5}$$

式中: ΔE 为皮肤活化能(J/mol); P 为频率因子(s^{-1})^[32]; R 为理想气体常数,即 8.315 J/(mol · K); T 为皮肤真皮层基质层处的温度(°C)^[26]。

研究发现,皮肤烧伤一般发生在 $T > 44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下。根据皮肤损伤达到的深度和皮肤表面的变化,将皮肤烧伤严重程度分为 3 级:一度烧伤,一般无大的风险,仅伤害表皮层;二度烧伤,危及生命安全需入院治疗,通常发生在真皮层(50 ~ 100 μm 处);三度烧伤,皮肤将不能再生,表皮层与真皮层已完全损伤且皮下组织发生部分损伤,尤其是在皮肤深度 1000 ~ 2 000 μm 处。当烧伤积分值 Ω 超过 0.53,1.0,104 时,一般认为基质层位置分别发生了一度烧伤、二度烧伤和三度烧伤^[30]。

2.3.3 边界条件 利用皮肤烧伤模型计算皮肤达到二度烧伤时间之前,需要对计算的边界条件进行确定。根据经验数据,将舒适层面料与皮肤之间的空气层厚度设为固定值 1 mm,另外,鉴于空气层厚度太薄,忽略对流换热对空气层传热的影响,仅考虑导热和热辐射。表皮层左右边界条件因此可以记为

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial y} \Big|_{y=L_1} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(1/\alpha_2) + (1/\alpha_1) - 1} + \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{d} \tag{6}$$

皮下组织:

$$(\rho c)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}(\kappa_s \frac{\partial T}{\partial y}) + (\rho c)_b \omega_b (T_c - T) \tag{3}$$

式中: $(\rho c)_e$, $(\rho c)_d$, $(\rho c)_s$ 和 $(\rho c)_b$ 分别为表皮层、真皮层、皮下组织和血液的体积热容,血液的比热和密度分别为 $3.3 \times 10^3\text{ J/(kg · K)}$ 和 $1.1 \times 10^3\text{ kg/m}^3$; κ_e , κ_d 和 κ_s 依次为表皮层、真皮层和皮下组织的导热系数; ω_b 为血液灌注率; T_c 为人体核心温度(°C),取 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。皮肤各层的物性参数值见表 2^[30]。

$$T_e \Big|_{y=L_r} = T_d \Big|_{y=L'_1} \tag{7}$$

式中: L_1 和 L_r 分别为表皮层的左右边界, L'_1 为真皮层的左边界; λ 为空气导热系数[W/(m · °C)]; T_1 , T_2 分别为服装舒适层和皮肤温度(°C); d 为皮肤和舒适层之间的空隙长度(m)。 σ 为斯特藩常量,约为 $5.67 \times 10^{-8}\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$, α_1 和 α_2 为舒适层织物与皮肤的吸收比,做近似处理后取 0.9 和 1.0。

真皮层和皮下组织的左右边界条件为

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial y} \Big|_{y=L_r} = \kappa_d \frac{\partial T_d}{\partial y} \Big|_{y=L_1} \tag{8}$$

$$\kappa_d \frac{\partial T_d}{\partial y} \Big|_{y=L'_r} = \kappa_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=L_1} \tag{9}$$

$$T_d \Big|_{y=L'_r} = T_s \Big|_{y=L'_1} \tag{10}$$

$$T_s \Big|_{y=L''_r} = T_c \tag{11}$$

式中, L'_1 和 L'_r 分别为真皮层的左右边界; L''_1 和 L''_r 分别为皮下组织的左右边界。边界计算过程中,假设皮肤的初始温度呈线性分布,最外侧温度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$,最内侧为人体核心温度 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气层的初始温度为室温。

图 6 为不同组合面料在 200 和 300 °C 的热面接触温度下,烧伤参数 Ω 随时间的变化曲线。

由图 6(a) 可以看出,组合面料 S_1 , S_2 , S_3 和 S_4 接触 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温表面时,皮肤达到二度烧伤的时间依次为 139.1,207.3,229.0 和 152.7 s。采用 2 mm AG-T-Nomex 作为消防服隔热层,人体皮肤达到二度烧伤的时间延后了 89.9 s。故在此工况下, S_3 面料防护下皮肤达到二度烧伤所需要的时间最长,热防护性能最好。

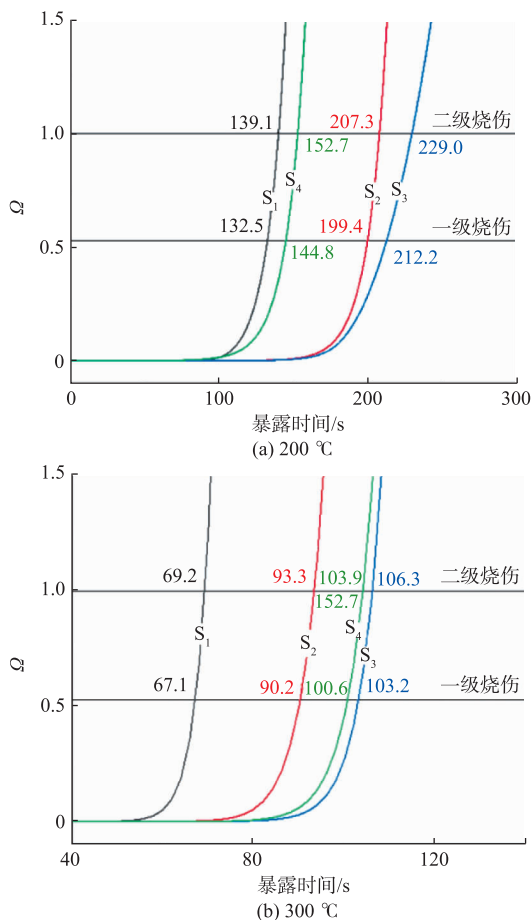


图6 不同温度下烧伤参数 Ω 随时间变化曲线

Fig. 6 Variations of Ω with time at different temperatures

由图 6(b)可知,组合面料 S_1 , S_2 , S_3 和 S_4 接触 300 °C 高温表面时,皮肤达到二度烧伤的时间分别为 69.2, 93.3, 106.3 和 103.9 s。其中,组合面料 S_3 防护下皮肤达到二度烧伤所需要的时间最长,然而图 2(c)中 2 mm AG-T-Nomex 发生了严重的收缩变形,影响到面料的热防护性能,致使舒适层上表面温度持续上升。AG-ST-POF 作为隔热层时,人体皮肤达到二度烧伤的时间延后了 34.7 s。综合来看,组合面料 S_4 的整体热防护性能更好。

3 结 语

文中以无纺毡消防服隔热层为对照,选取了 3 种不同规格的气凝胶隔热面料开展性能对比分析,利用热平板法研究了不同组合面料的热防护性能以及各织物作为隔热层使用时的外观形貌变化,结合皮肤传热和烧伤模型进行了皮肤烧伤预测,根据皮肤二度烧伤所需时间对比不同隔热层面料的热防护效果。实验与计算结果表明:

1) 组合面料接触较低温度的热平面(200 °C)

时,采用 2 mm AG-T-Nomex 作为消防服隔热层,可以提供最佳的热防护性能,舒适层上表面温度约比非气凝胶组合面料低 20 °C,使人体皮肤达到二度烧伤的时间延后了 89.9 s;

2) 组合面料接触较高温度的热平面(300 °C)的热平面时,尽管 2 mm AG-T-Nomex 作为隔热层时组合面料的舒适层上表面温度较低,但该面料发生严重收缩变形,且舒适层上表面温度持续上升,因而不适合作为消防服隔热面料使用。相比之下,AG-ST-POF 作为隔热层的组合面料综合性能相对更好,舒适层上表面温度相比非气凝胶组合面料低 18 °C,使人体皮肤达到二度烧伤的时间延后 34.7 s。

需要说明的是:①AG-T-Nomex 系列气凝胶隔热面料在较低温度下使用时具有比较出色的热防护性能,但由于所添加的黏合剂耐热性较差,致使该面料在高温下易发生收缩变形。因此,AG-T-Nomex 系列不适合作为消防服隔热层面料使用。若想改善这一系列面料的热防护性能,首先需要解决面料所含成分(如黏合剂)的耐高温问题。②AG-ST-POF 面料在不同的工况下,其热防护性能存在显著差异,未来需进一步探讨分析,揭示发生这一现象的原因和气凝胶面料差异性应用的可能。

参考文献:

- [1] 钟晓. 4月至10月在全国开展消防安全执法检查专项行动[J]. 中国消防, 2019(4): 8.
ZHONG Xiao. The special action of fire safety law enforcement inspection was carried out nationwide from April to October[J]. China Fire, 2019(4): 8. (in Chinese)
- [2] 范维澄, 孙金华, 陆守香. 火灾风险评估方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 258-265.
- [3] 陈平军. 高层建筑火灾特点及防范对策[J]. 煤炭技术, 2008, 27(8): 162-163.
CHEN Pingjun. Characteristics of high-rise building fires and countermeasures [J]. Coal Technology, 2008, 27(8): 162-163. (in Chinese)
- [4] 黄式培. 小议商场火灾原因及调查方法[J]. 科技资讯, 2013, 11(18): 207, 209.
HUANG Shipai. Discussion on fire causes and investigation methods in shopping malls[J]. Science and Technology Information, 2013, 11(18): 207, 209. (in Chinese)
- [5] 漆政昆, 张和平, 黄冬梅, 等. 消防服用织物材料热湿舒适性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 132-138.
QI Zhengkun, ZHANG Heping, HUANG Dongmei, et al. Comprehensive evaluation of thermal and moisture comfortableness of fabric for firefighter protective clothing

- [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(4): 132-138. (in Chinese)
- [6] 朱方龙. 消防服用织物热防护性能数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(11): 1044-1047.
ZHU Fanglong. Numerical simulation on thermal protection performance of textile used for fire fighting suit[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(11): 1044-1047. (in Chinese)
- [7] 王鸿博, 马晶婧, 董维锋, 等. 消防服用面料阻燃性及热防护性综合评价[J]. 服装学报, 2019, 4(2): 102-105, 116.
WANG Hongbo, MA Jingjing, DONG Weifeng, et al. Comprehensive evaluation of flame retardancy and thermal protection of fire-fighting fabrics[J]. Journal of Clothing Research, 2019, 4(2): 102-105, 116. (in Chinese)
- [8] 陈颖, 邵高峰, 吴晓栋, 等. 聚合物气凝胶研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(13): 55-62, 70.
CHEN Ying, SHAO Gaofeng, WU Xiaodong, et al. Advances in polymer aerogels[J]. Materials Review, 2016, 30(13): 55-62, 70. (in Chinese)
- [9] 冯晶晶, 赵晓明, 郑振荣. SiO₂ 气凝胶在热防护纺织品中的应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2018, 35(2): 113-117.
FENG Jingjing, ZHAO Xiaoming, ZHENG Zhenrong. Application of SiO₂ aerogel in thermal protective textiles[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2018, 35(2): 113-117. (in Chinese)
- [10] 王小丹. 复合结构隔热材料的制备与性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2011.
- [11] 贺香梅, 徐壁, 蔡再生. SiO₂ 气凝胶隔热涂层织物的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 95-100.
HE Xiangmei, XU Bi, CAI Zaisheng. Preparation of silica aerogel coated fabric and studies of its performance[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 95-100. (in Chinese)
- [12] 任乾乾, 林兰天, 郑慧琴. 采用二氧化硅气凝胶的防火隔热组合面料研究[J]. 上海纺织科技, 2011, 39(12): 53-55.
REN Qianqian, LIN Lantian, ZHENG Huiqin. Research of fireproof and insulation composite fabric by use of silica aerogels[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2011, 39(12): 53-55. (in Chinese)
- [13] 张兴娟, 吴洪飞, 孔祥明. 新型组合式消防服热防护性能分析[J]. 中国个体防护装备, 2013(6): 20-24.
ZHANG Xingjuan, WU Hongfei, KONG Xiangming. Analysis of thermal protective performance of aerogel-based new combined firefighters' clothing[J]. China Personal Protective Equipment, 2013(6): 20-24. (in Chinese)
- [14] JABBARI M, ÅKESSON D, SKRIFVARS M, et al. Novel lightweight and highly thermally insulative silica aerogel-doped poly(vinyl chloride)-coated fabric composite[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(19): 1581-1592.
- [15] 张慧. 基于气凝胶的高性能热防护纺织新材料的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [16] QI Z K, HUANG D M, HE S, et al. Thermal protective performance of aerogel embedded firefighter's protective clothing[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2013, 8(2): 134-139.
- [17] SHAID A, WANG L J, PADHYE R, et al. Aerogel nonwoven as reinforcement and batting material for firefighters' protective clothing: a comparative study[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2018, 87(1): 95-104.
- [18] CHAKRABORTY S, RAO A V, KOTHARI V K, et al. Radiant heat protective performance of clothing assemblies with flexible aerogel-nomex nonwoven composite as thermal insulation[J]. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2019, 44(4): 396-403.
- [19] KRZÉMINSKA S, GRESZTA A, RÓŻAŃSKI A, et al. Effects of heat exposure on the properties and structure of aerogels for protective clothing applications[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2019, 285: 43-55.
- [20] HEBALKAR N, KOLLIPARA K S, ANANTHAN Y, et al. Nanoporous aerogels for defense and aerospace applications[M]//MAHAJAN Y R, JOHNSON R. Handbook of Advanced Ceramics and Composites: Defense, Security, Aerospace and Energy Applications. Berlin: Springer, 2020: 121-163.
- [21] 孟晶, 高珊, 卢业虎. 石墨烯气凝胶复合防火面料防护性能的影响因素[J]. 纺织学报, 2020, 41(11): 116-121.
MENG Jing, GAO Shan, LU Yehu. Investigation on factors influencing thermal protection of composite flame retardant fabrics treated by graphene aerogel[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(11): 116-121. (in Chinese)
- [22] 赵石楠. 气凝胶型隔热层消防服概念及应用的可行性研究[J]. 消防技术与产品信息, 2018, 31(1): 67-69.
ZHAO Shinan. Conception and application feasibility of aerogel thermal insulating fire protective clothing[J]. Fire Technique and Products Information, 2018, 31(1): 67-69. (in Chinese)
- [23] 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, 2015: 1-7. (下转第304页)