

文章编号: 1671-0444(2018)01-0074-06

# 热灾害环境对形状记忆消防服 面料防护性能的影响

王 帅<sup>a</sup>, 卢业虎<sup>a, b</sup>, 王丽君<sup>a</sup>, 尤禅懿<sup>a</sup>

(苏州大学 a. 纺织与服装工程学院; b. 现代丝绸国家工程实验室, 江苏 苏州 215123)

**摘要:**消防员或应急救援人员需要穿着特定的热防护服以保障人身安全。在防水透气层与舒适层之间设置若干形状记忆合金弹簧, 构筑动态隔热消防服面料组合。采用热平板仪和热防护性能测试仪分别模拟高温热接触和低辐射热灾害, 测量分布于各面料层间的温度。对处于两种不同环境下的形状记忆合金弹簧形成的空气层对热防护织物的动态隔热作用进行分析比较, 发现采用一个弹簧正中排列及 3 个弹簧对角线放置的隔热效果最为显著, 可适用于两种热环境。研究结果可为优化形状记忆合金弹簧排布方式从而设计性能优越的智能消防服提供科学依据。

**关键词:**消防服; 形状记忆合金弹簧; 高温接触; 低辐射热

中图分类号: TS 941.73

文献标志码: A

## Effect of Thermal Hazards on the Thermal Protection of Fabrics Used in Firefighters' Protective Clothing Incorporated with Shape Memory Alloy

WANG Shuai<sup>a</sup>, LU Yehu<sup>a, b</sup>, WANG Lijun<sup>a</sup>, YOU Shanyi<sup>a</sup>

(a. College of Textile and Clothing Engineering;

b. National Engineering Laboratory for Modern Silk, Soochow University, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** Firefighters or emergency rescue people need to wear specific thermal protective clothing to ensure their safety. Several shape memory alloy springs were incorporated between moisture barrier and thermal inner layer to develop firefighters' protective fabric combinations with dynamic protective performance. A hot surface contact and low radiant heat was simulated by a hot-guarded plate and thermal protective performance tester respectively. The surface temperatures between layers were recorded. The difference effects of air gap provided by the shape memory alloy (SMA) springs on the fabric thermal performance in different thermal hazards were analyzed. The results indicate that SMA springs show effective benefits in dynamic thermal insulating property, and the effect is related to the thermal hazard. Moreover, the arrangement of One and Three \_diag provides best protective performance in both thermal environments. The research findings may be helpful to engineer optimized arrangement of SMA springs and develop high performance smart firefighters' protective clothing.

**Key words:** firefighters' protective clothing; shape memory alloy spring; hot surface contact; low radiant heat

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506137); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20161255); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划资助项目(201610285111H); 江苏省先进纺织工程技术中心开放课题资助项目(XJFZ-2016-5)

作者简介: 王 帅(1996—), 女, 江苏无锡人, 本科, 研究方向为智能热防护服装, E-mail: 2386310067@qq.com

卢业虎(联系人), 男, 副教授, E-mail: yhlu@suda.edu.cn

由于工作环境的极端危险与复杂性,消防员或应急救援人员的健康与生命安全受到极大威胁。因此,热防护服的防护性能必须达到特定的要求,以应对各种灾害源,如火焰、辐射热、高温蒸汽、熔融物质等<sup>[1-4]</sup>。然而,应急救援工作人员高达 80% 的时间不会直接面对火焰和强热辐射的极端环境,而是处于低热辐射的环境中<sup>[5-7]</sup>。此外,高温物体接触也是造成伤害的主要原因之一。

为了提高防护性能,现有研究大多从研制新型阻燃纤维材料或增加面料厚度和层数着手<sup>[1, 5]</sup>。然而,多层防护服厚重且透气性差,不仅限制着装者活动,还严重影响散热,易引发缺水、头晕、休克等症状,严重时危及生命。而且,在低热辐射环境中,较厚面料更易积蓄能量,一旦释放,可迅速对人体造成伤害<sup>[7-8]</sup>。此外,传统的防护服隔热性能相对固定,无法满足不同环境转换的需求。而文献<sup>[8]</sup>发现灾害热源种类对面料组合的防护性能具有明显影响。因而,在研制防护服时应充分考虑环境热源因素的影响。

根据形状记忆材料的特殊记忆性能<sup>[9-10]</sup>,文献<sup>[11]</sup>研制并测试形状记忆合金弹簧,发现其产生的空气层隔热效果较为明显。文献<sup>[12]</sup>将遇热后中部可弹起的形状记忆合金丝圈固定在防护服口袋中,发现其可显著减少口袋部位的热量传递。文献<sup>[13]</sup>将形状记忆合金盘成扁平蚊香状,发现动态结构能够改善防护性能。然而,上述研究均没有测试低辐射热和高温物体接触条件下阻燃织物的隔热性能,且均未考虑弹簧排布方式对隔热性能的影响。

本文在防护服的防水透气层与隔热层之间设置对环境温度变化感应较为灵敏的形状记忆合金弹簧,开发一种能动态调节服装隔热性能的智能消防服面料组合,分别测量高温热接触和低辐射热环境下各面料层间的温度,并进行差异分析。

## 1 智能消防服面料的研制

### 1.1 设计原理

空气层在防护服的隔热方面发挥着较大的作用,因此被广泛应用于防护服领域<sup>[7, 10-11, 14-15]</sup>。但是,相对过厚的空气层易产生对流导热,反而会降低隔热性能<sup>[4]</sup>。此外,空气层的分布位置同样影响其隔热作用<sup>[16]</sup>。所以,在设计防护服时,需要充分考虑这些因素,以获得更好的隔热效果。

本文研制了形状记忆合金弹簧,常温下为扁平盘香状,如图 1(a)所示,高温时迅速弹起呈圆锥体,

如图 1(b)所示。将若干形状记忆合金弹簧设置在防护服防水透气层和隔热层之间,使得防护服在常温条件下保持轻薄状态,保证穿着者行动灵便。而在极端危险环境下,该智能服装可以自发改变结构,短时间内在服装内层间形成空气层,进而提升隔热作用。

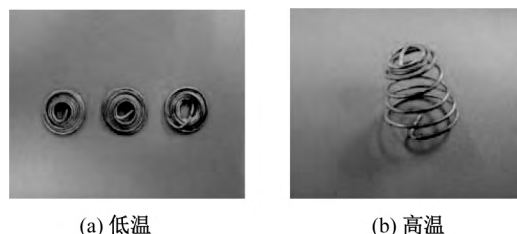


图 1 低/高温状态下的形状记忆合金弹簧

Fig. 1 Shape memory alloy spring at low and high temperature

### 1.2 形状记忆合金弹簧制作

合金材料为铜基,合金丝的直径为 1.5 mm。弹簧外径为 28 mm,内径为 14 mm,质量为 5.8 g,形变温度约为 45 °C,完全弹起后的高度约为 32 mm。这种形状记忆合金弹簧本身质量较轻且对环境温度变化的感应较为灵敏,所以能灵活地动态调节热防护服结构,进而提高隔热性能。

### 1.3 智能消防服面料组合

消防服面料通常包括 3 层,即防护外层、防水透气层和隔热层。面料裁剪为 15 cm×15 cm 的正方形,按组合顺序叠放。3 层组合面料在对角处固定,模拟服装实际穿着时面料间的相互作用。面料的基本性能如表 1 所示。为研究在不同的弹簧排列方式下面料组合的隔热性能,在面料上对形状记忆合金弹簧采用 6 组不同的排列方式(如图 2 所示):无形状记忆合金弹簧(CON)、1 个弹簧中心排列(One)、2 个弹簧并列(Two\_para)及对角排列(Two\_diag)、3 个弹簧等边三角形(Three\_tria)及对角线排列(Three\_diag)。

表 1 消防服面料的基本性能

Table 1 The basic properties of fabrics used in firefighters' protective clothing

面料	成分	结构	面密度 / ( $g \cdot m^{-2}$ )	厚度 /mm
防火外层	98% 芳纶 1313, 2% 芳纶 1414	斜纹	193.7	0.49
防水透气层	100% 芳纶 / PTFE 膜	层压	108.3	0.85
隔热层	100% 芳纶毡和基布	针刺	200.0	0.72

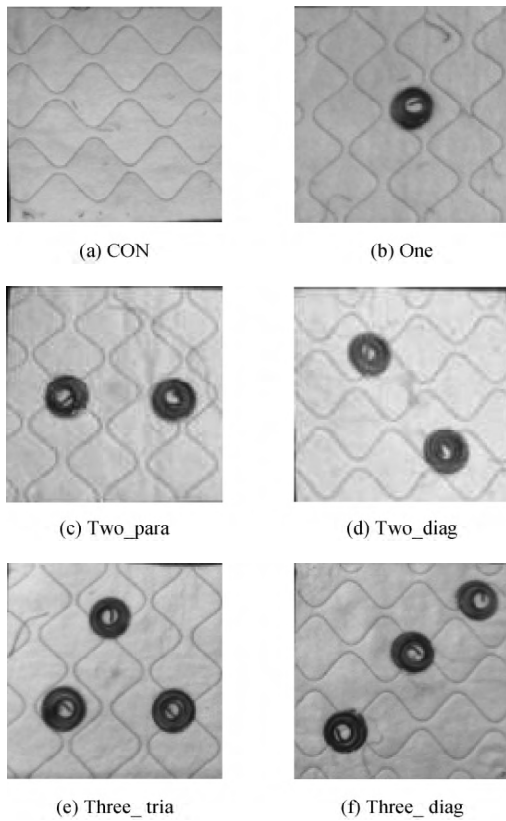


图2 形状记忆合金弹簧排布实物图

Fig. 2 The configurations of shape memory alloy spring

## 2 试验

本文采用热平板仪和热防护性能测试仪分别模拟高温热接触和低辐射热,如图3所示。为模拟救援过程中接触高温物体情形,将高温热平板仪温度设置为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热接触时间为 $20\text{ s}$ 。考虑到消防员常处于空气温度为 $70\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和热辐射热流量低于 $12.6\text{ kW/m}^2$ 的热环境中<sup>[2]</sup>,采用低辐射热流量为 $12\text{ kW/m}^2$ ,辐射时间为 $70\text{ s}$ 。对6组不同弹簧排列方式的样品进行高温热接触试验和热辐射试验,采用NI数据记录仪(NI 9231,美国)实时记录试验



图3 高温接触和低辐射热试验

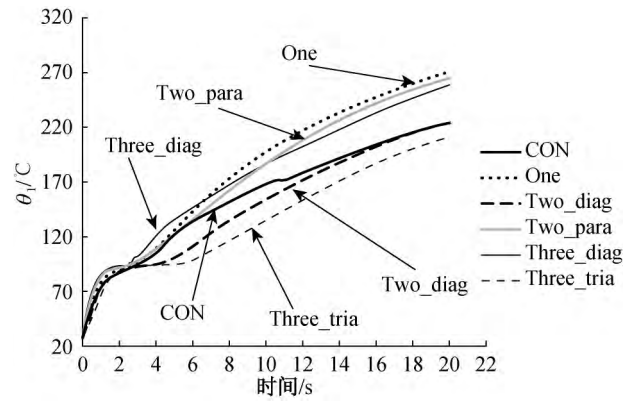
Fig. 3 Hot surface contact and low radiant heat tests

过程中防水透气层与外表面间温度 $\theta_1$ 、隔热层与防水透气层间温度 $\theta_2$ 、隔热层内表面温度 $\theta_3$ , $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 均为面料中心温度。测量 $\theta_1$ 的传感器固定在防水透气层外表面上,测量 $\theta_2$ 的传感器固定在隔热层的外表面上,测量 $\theta_3$ 的传感器固定在隔热层的内表面上。NI数据记录仪包括热电偶测试模块和32 gauge T型热电偶。为减小试验误差,每组排列方式至少测试3次。

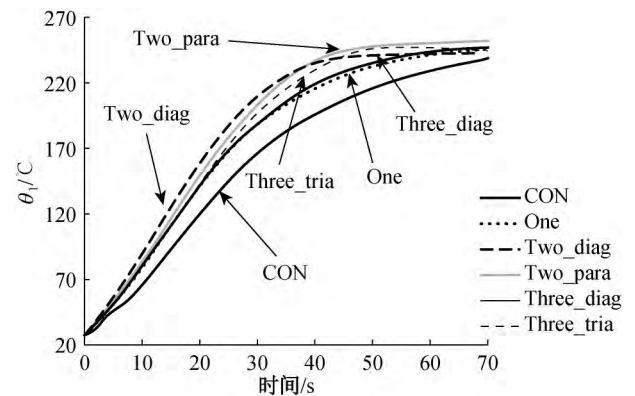
## 3 结果与讨论

### 3.1 防水透气层与外表面间温度 $\theta_1$

高温热接触和低辐射热环境下,不同形状记忆合金弹簧排列方式的试样防火外层和防水透气层之间的温度 $\theta_1$ 的变化曲线如图4所示。由图4可知,在高温接触条件下,防水透气层与外表面之间温度 $\theta_1$ 先迅速上涨,之后略有停滞,然后稳定快速增加,最终达到 $210\sim 270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;在低辐射热条件下, $\theta_1$ 先增长较快,然后趋于平缓,最终温度达到 $240\sim 255\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低辐射热条件下 $\theta_1$ 差异明显,高温接触条件下 $\theta_1$ 区别不大,这可能与试验环境及时间有关。



(a) 高温接触



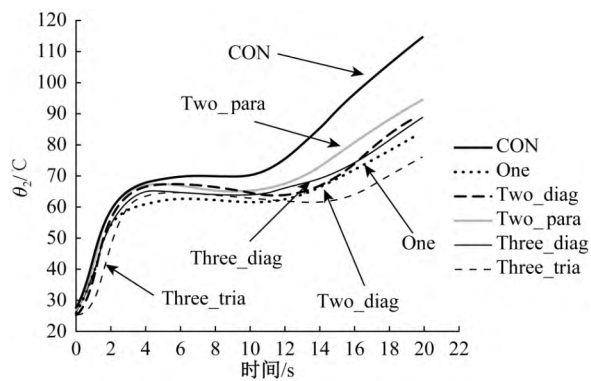
(b) 低辐射热

图4 高温接触与低辐射热条件下 $\theta_1$ 变化  
Fig. 4 The change curves of  $\theta_1$  in hot surface contact and low radiant heat tests

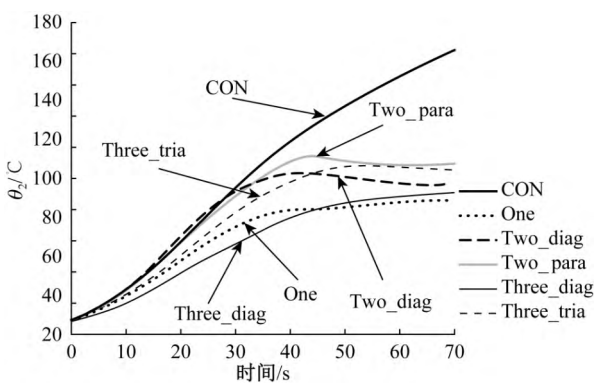
图 4 中,在低辐射热条件下,CON 试样的温度略低于其他 5 种情况,而在高温接触条件下,CON 试样的温度介于几种情况之间。这种差异可能与形状记忆合金弹簧受热形变产生的应力有关。在低辐射热条件下,该应力使得防水透气层发生轻微形变,缩短了面料与热源、防水透气层与防火外层之间的间距,从而加速了热量的传递。在高温接触条件下,自第 6 s 之后,One、Three\_diag 和 Two\_para 试样的  $\theta_1$  逐渐高于 CON 试样。这是由于正对着防水透气层内部中心的形状记忆弹簧(One 和 Three\_diag)受热弹起产生压力,压缩了中心点防水透气层与防火外层间的间隙,同时增强了防火外层与热板的接触,导致温度传导的速度加快。由于传感器缝制在试样中心,在面料中心点处安置的形状记忆弹簧对面料的温度变化具有一定的影响。Two\_diag 与 Three\_tria 试样的  $\theta_1$  最终温度相对较低,这是由于这两种排列方式的弹簧间距较大,形变产生的压力对面料中心点的影响较弱。

### 3.2 隔热层与防水透气层间温度 $\theta_2$

高温热接触和低辐射热环境下,不同形状记忆合金弹簧排列方式的试样隔热层外表面的温度  $\theta_2$  的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,两种试验条件下



(a) 高温接触



(b) 低辐射热

图 5 高温接触与低辐射热条件下  $\theta_2$  变化Fig. 5 The change curves of  $\theta_2$  in hot surface contact and low radiant heat tests

的  $\theta_2$  呈现出不同的变化规律。在高温接触条件下,  $\theta_2$  呈“N”型变化,即先快速增长至 65 °C 左右,之后稍显下降趋势,随后再次迅速增长。在低辐射热条件下,CON 试样  $\theta_2$  始终高速上升,而其他 5 组安装形状记忆合金弹簧试样  $\theta_2$  先增长较快,然后增长速度大幅减缓,最终趋于稳定。

图 5 中,在高温接触条件下,6 种排列方式试样的  $\theta_2$  在 0~5 s 变化趋势相近,最大差值仅为 8 °C。5 s 后 CON 试样的温度曲线高于其他几种,并且差值逐渐增加。而在低辐射热环境下,CON 试样的  $\theta_2$  始终较高,尤其在 30 s 后,与其他试样的  $\theta_2$  差距不断变大。两种热源条件下,CON 试样的最终温度均高于其他 5 种情况,其温度差值正是由形状记忆合金弹簧形变产生的空气层引起的,表明该弹簧具有明显的动态隔热作用。

在两种试验环境中,Two\_para 试样最终温度均较高,仅次于 CON 试样,表明其隔热效果一般。而弹簧排列方式为 One 试样的作用效果明显,两种条件下的  $\theta_2$  都较低,这是因为该排列形成的空气层中部突出,提升了整体的隔热性能。此外,Two\_diag、Three\_diag 试样在高温接触条件下,温度变化几乎相同;在低辐射热环境下,Three\_diag 始终低于 Two\_diag,其中 0~40 s 阶段两者的差距不断拉大,40 s 后逐渐缩小,最终差值约为 5 °C。因此表明,斜对角排列方式的作用效果与数目(间距)的相关性较小,主要与热环境有关。Three\_tria 试样的  $\theta_2$  在高温接触条件下最终温度最低,而在低辐射热环境下最终温度较高,只略低于 Two\_para,表明该排列方式有利于减少高温物体的伤害,而对辐射热的防护作用弱于其他几种排列方式。

### 3.3 隔热层内层温度 $\theta_3$

高温热接触和低辐射热环境下,不同形状记忆合金弹簧排列方式的试样隔热层内表面温度  $\theta_3$  变化曲线如图 6 所示。由于热量由外向内逐层传递,最终到内表面需要一定的时间,相较于  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  的变化曲线图,在热暴露的最初阶段, $\theta_3$  均稳定不变。之后,两种试验条件下, $\theta_3$  呈现出不同的变化规律。高温热接触条件下, $\theta_3$  可分为两组:弹簧排列方式为 CON、Two\_diag、Two\_para、Three\_tria 试样的  $\theta_3$  先快速增长,然后缓慢下降;弹簧排列方式为 One、Three\_diag 试样的  $\theta_3$  始终在增长,但速度随着时间的推移而放缓,最终  $\theta_3$  达到 45 °C。在低辐射热试验中,CON 试样的  $\theta_3$  保持高速上升态势,其他 5 组安装形状记忆合金弹簧的试样  $\theta_3$  增长较为缓慢,尤其是 One 和 Three\_diag 两种排列方式。

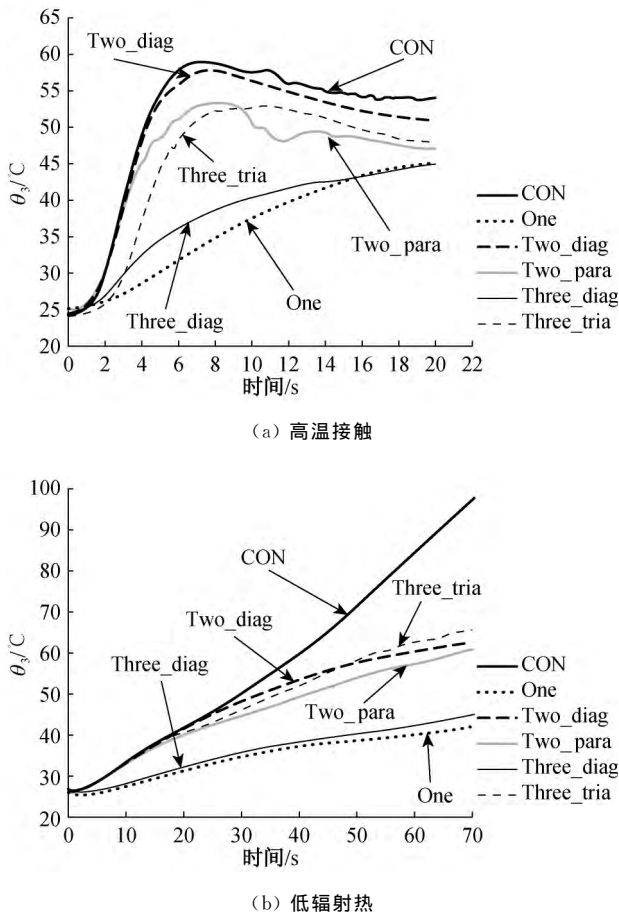


图6 高温接触与低辐射热条件下 $\theta_3$ 变化

Fig. 6 The change curves of  $\theta_3$  in hot surface contact and low radiant heat tests

与高温接触试验相比,低辐射热试验的 $\theta_3$ 整体趋势较平缓。对于One与Three\_diag两种排列方式,在两种热源条件下, $\theta_3$ 都较同组试验其他4种情况下的温度变化趋势有明显差异,最终温度都较低,增长速度也较缓慢。由此可见,One与Three\_diag两种排列方式在两种试验条件下都能有效地减慢温度的增长速度,降低内表面温度,能达到较好的隔热效果。在高温接触试验中,这两种排列方式(One与Three\_diag)与其他3种弹簧排列方式下的试样最终温度差异不大(6°C以内),而低辐射热试验中试样的 $\theta_3$ 比其他3种有弹簧的排列方式的试样低15°C左右,比CON试样低55°C。

为了更好地理解不同排列方式下弹簧形成的空气层对面料的隔热作用,对空气层形状进行分析。在两种不同的试验环境下,弹簧发生形变的时间明显不同。在高温热接触条件下,试验后1~2s,弹簧瞬间弹起,形成空气层;而在低辐射热条件下,大约30s后,弹簧逐渐弹起并形成稳定的空气层。总体而言,由于面料组合在对角处固定,防水透气层和隔热层之间的空气层厚度呈不均匀分布,即整体呈中

部向边缘递减的趋势,且空气层均在弹簧所排布位置最厚。在此基础上,进一步对5组不同弹簧排列方式所形成空气层具体形状进行分析。在One条件下,空气层中心点最厚,呈射线状逐渐向边缘减小;在Two\_para与Two\_diag条件下,中心方形区域空气层较厚,由于弹簧排布位置距中心点有一定距离,在面料本身重力作用下,该处空气层略薄于弹簧排布处;在Three\_tria条件下,弹簧虽不在面料组合中心点,但该排列方式使得整体空气层分布较均匀,尤其在弹簧形成的等边三角形区域内;在Three\_diag条件下,空气层分布结合了One与Two\_diag的特征,且中间厚空气层区域更多,但均匀性低于Three\_tria。

在低辐射热条件下,各排列方式 $\theta_2$ 的差异与 $\theta_3$ 的排序基本一致。而在高温接触条件下,尽管Three\_tria试样的 $\theta_2$ 最低,但 $\theta_3$ 高于One和Three\_diag。这可能由于3个弹簧等边三角形排列产生的空气层较均匀,空腔内的对流散热较好,故 $\theta_2$ 较低。但面料在对角线固定,内部空间有限,限制了该排列方式3个弹簧均匀形变产生的空气层厚度,从而导致隔热层背面中心温度 $\theta_3$ 较高。同时,该现象也进一步验证了热灾害环境对形状记忆合金面料的隔热性能具有一定的影响。

两种试验条件下,6组试样的 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 的曲线图总体差异很大,只有One与Three\_diag两种排列方式的 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 均相近,这可能与有一个弹簧安装在面料中心即测试点有关。

人体皮肤温度超过44°C时(温升为12°C)开始出现损伤,而当皮肤温度超过56°C(温升为24°C)可能出现二级烧伤。本文以 $\theta_3$ 达到44和56°C的时间分析面料的隔热效果,结果如表2所示。

在特定试验的基础上比较6组试样的 $\theta_3$ 达到44和56°C时所用的时间 $t_1$ 和 $t_2$ 。由表2可知,两种试验条件下,弹簧排列方式为CON、Two\_diag的试样很快达到44°C,并迅速增至56°C。其中Two\_diag略微慢一些,但总体上与CON的差异不大,作用效果一般。在高温接触条件下,弹簧排列方式为Two\_para的试样较早达到44°C,但最终温度低于56°C;而在低辐射热试验的中后期达到56°C。两种试验条件下,弹簧排列方式为One、Three\_diag、Three\_tria的试样均较晚达到44°C,除Three\_tria在低辐射热条件下用时65.7s升至56°C,其余最终都没有达到该温度。将各组安装弹簧的试样 $\theta_3$ 达到44和56°C的时间与CON试样相应用时作比值,直观地比较隔热作用效果。

表 2  $\theta_3$  达到 44 和 56 °C 的时间  $t_1$  和  $t_2$ Table 2 Time required for  $\theta_3$  to reach 44 °C ( $t_1$ ) and 56 °C ( $t_2$ )

排列方式	$t_1/s$	与 CON 比值/%	$t_2/s$	与 CON 比值/%	
高温接触	CON	3.5	100	5.5	100
	One	17.1	489	未到	>363
	Two_diag	3.7	106	6.1	111
	Two_para	3.9	111	未到	>363
	Three_diag	17.7	506	未到	>363
	Three_tria	5.0	143	未到	>363
热辐射	CON	22.7	100	36.4	100
	One	未到	>308	未到	>192
	Two_diag	23.2	102	44.8	123
	Two_para	28.4	125	55.0	151
	Three_diag	66.2	292	未到	>192
	Three_tria	26.4	116	65.7	181

由表 2 可知,两种试验条件下,弹簧排列方式为 Two\_diag、Two\_para、Three\_diag 的试样用时比均介于 100%~150%,其中 Two\_diag 接近 100%,而弹簧排列方式为 One、Three\_diag 的试样用时比几乎都大于 300%。由此表明,就延长皮肤受热损伤时间而言,弹簧排列方式 Two\_para、Three\_tria 均具有一定的作用,而弹簧排列方式为 One、Three\_diag 的试样的作用效果最明显,与未安装弹簧的试样相比,高温热接触和低辐射热两种不同环境下至少延长 200%的暴露时间。若将这两种组合面料成功运用到消防服领域中,可较大程度地增加消防人员抢险救灾的时间,从而提高抢救效果,减少财产损失与人员伤亡。

#### 4 结 语

本文在防护服的防水透气层与隔热层之间安装若干形状记忆合金弹簧,开发了一种能动态调节服装隔热性能的智能消防服面料组合。分别通过 400 °C 高温接触试验与 12 kW/m<sup>2</sup>热辐射试验,基于各层面料的表面温度变化情况评价不同排布方式、不同热源条件下的形状记忆合金弹簧产生的空气层的隔热作用,得到的结论如下所述。

(1) 低辐射热环境下的  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  变化曲线较为圆顺,而高温热接触试验中, $\theta_1$ 、 $\theta_2$  的变化曲线上有两个明显折点。两种热源条件下,组合面料呈现出不同的隔热性能。

(2) 在两种热源条件下,不同排列方式的弹簧对面料的隔热性能具有不同的作用。其中,弹簧排

列方式为 One、Three\_diag 试样的  $\theta_3$  均与其他 4 种情况下的温度变化趋势有明显差异,最终温度都较低,增长速度也较缓慢,隔热效果最显著。

(3) 与未安装弹簧的试样相比,不同排列方式的弹簧均在一定程度上提高了面料组合的防护性能。排列方式为 One、Three\_diag 的试样至少延长 200%皮肤受热损伤时间,可较大程度地提升消防人员的救援效果。

#### 参 考 文 献

- [1] 翟丽娜,李俊.服装热防护性能测评技术的发展过程及现状[J].纺织学报,2015,36(7):162-168.
- [2] SONG G, LU Y. Flame resistant textiles for structural and proximity fire fighting [M]. In: KILINC F S. Handbook of Fire Resistant Textiles. UK: Woodhead Publishing Limited, 2013: 520-548.
- [3] LU Y, LI J, SONG G, et al. The effect of air gaps in moist protective clothing on protection from heat and flame [J]. Journal of Fire Sciences, 2013, 31(2): 99-111.
- [4] LU Y, WANG F, SONG G. The impact of air gap on thermal performance of protective clothing against hot water spray [J]. Textile Research Journal, 2014, 85(7): 709-721.
- [5] LU Y, SONG G, LI J. A novel approach for fit analysis of thermal protective clothing using three-dimensional body scanning [J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(6): 1439-1446.
- [6] SONG G, PASKALUK S, SATI R, et al. Thermal protective performance of protective clothing used for low radiant heat protection [J]. Textile Research Journal, 2011, 81(3): 311-323.
- [7] BARKER R L, GUERTH-SCHACHER C, GRIMES R V, et al. Effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing in low-level radiant heat exposures [J]. Textile Research Journal, 2006, 76(1): 27-31.
- [8] MANDAL S, SONG G, ACKERMAN M, et al. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures [J]. Textile Research Journal, 2013, 83(10): 1005-1019.
- [9] MONDAL S, HU J, YANG Z, et al. Shape memory polyurethane for smart garment [J]. Research Journal of Textile and Apparel, 1999, 6(2): 75-80.
- [10] YOO S, YEO J, HWANG S, et al. Application of a NiTi alloy two-way shape memory helical coil for a versatile insulating jacket [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 481/482(1): 662-667.
- [11] 陈艳,林兰天,任乾乾.采用形状记忆合金的瞬时隔热组合面料的研究[J].上海纺织科技,2012,40(2):43-46.
- [12] YATES D A. Design and evaluation of a thermally responsive firefighter turnout coat [D]. England: University of Worcester, 2012.

(下转第 99 页)

- microparticles[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(10): 1640-1647.
- [10] ZHANG M J, WANG W, XIE R, et al. Microfluidic fabrication of monodisperse microcapsules for glucose-response at physiological temperature[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(16): 4150-4159.
- [11] HIROKAWA Y, TANAKA T. Volume phase transition in a non-ionic gel[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1984, 81(12): 6379-6380.
- [12] YANG X, LEE H Y, YOU S G, et al. pH-and temperature-dependent release from cationic vesicles coexisting with copolymer of N-isopropylacrylamide and methacrylic acid[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 348(1/3): 109-115.
- [13] GUI R, JIN H. Temperature-regulated polymerization and swelling/collapsing /floculation properties of hybrid nanospheres with magnetic cores and thermo/pH-sensitive nanogel shells[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(6): 2797-2806.
- [14] CHEN H T, FAN Y, FANG Y. Dual pH-and thermo-responsive self-assembly of the p (nipam-co-aa) hydrophilic random copolymer in pure aqueous solution[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(7): 1290-1296.
- [15] BRAZEL C S, PEPPAS N A. Synthesis and characterization of thermo-and chemomechanically responsive poly (n-isopropylacrylamide-co-methacrylic acid) hydrogels[J]. *Macromolecules*, 1995, 28(24): 8016-8020.
- [16] QIU H, CUI B, ZHAO W, et al. A novel microwave stimulus remote controlled anticancer drug release system based on  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{ZnO} @ \text{mGd}_2\text{O}_3 : \text{Eu} @ \text{P} (\text{NIPAm} - \text{co} - \text{MAA})$  multifunctional nanocarriers [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2015, 3(34): 6919-6927.
- [17] JO S M, LEE H Y, KIM J C. Glucose-sensitivity of liposomes incorporating conjugates of glucose oxidase and poly (N-isopropylacrylamide-co-methacrylic acid-co-octadecylacrylate) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2009, 45(4): 421-426.
- [18] LO C L, LIN K M, HSIUE G H. Preparation and characterization of intelligent core-shell nanoparticles based on poly (D, L-lactide)-g-poly (N-isopropyl acrylamide-co-methacrylic acid)[J]. *Journal of Controlled Release*, 2005, 104(3): 477-488.
- [19] GRIMSHAW P E, NUSSBAUM J H, GRODZINSKY A J, et al. Kinetics of electrically and chemically induced swelling in polyelectrolyte gels[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1990, 93(6): 4462-4472.

(责任编辑:杜 佳)

---

(上接第 79 页)

- [13] CONGALTON D. Shape memory alloys for use in thermally activated clothing, protection against flame and heat [J]. *Fire & Materials*, 1999, 23(5): 223-226.
- [14] SONG G. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2007, 36(3): 193-205.
- [15] MICHALAK M, KRUCIŃSKA I. A smart fabric with increased insulating properties [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 86(1): 97-111.
- [16] WANG Y, LU Y, LI J, et al. Effects of air gap entrapped in multilayer fabrics and moisture on thermal protective performance [J]. *Fibers & Polymers*, 2012, 13(5): 647-652.

(责任编辑:杨 静)