

DOI: 10. 13475 /j. fzx. 20170703906

# 形状记忆合金尺寸对消防服面料防护性能的影响

王丽君<sup>1</sup>, 卢业虎<sup>1,2</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 马妮妮<sup>1</sup>

(1. 苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215021;

2. 苏州大学 现代丝绸国家工程实验室, 江苏 苏州 215123)

**摘 要** 为提升嵌入形状记忆合金消防服面料组合的防护性能, 构筑了 3 种形变高度和 3 种排列方式的面料组合以分析形状记忆合金尺寸对其性能的影响。在高温热接触和低辐射热灾害环境下分别测试不同面料组合的防护性能, 研究表明: 形状记忆合金有效地提高了消防服面料的防护性能, 合金弹簧的形变高度影响组合面料层间空气层厚度, 从而改变其防护性能; 在不同的排列方式下弹簧形变高度也不同, 可能与弹簧形变产生的空气层形状及分布有关; 在不同的热源条件下, 不同排列方式的面料组合其防护性能呈现出不同的规律, 即在 2 种热源条件下, 1 个合金弹簧中心排列与 3 个合金弹簧对角排列方式下全高型试样的隔热性能均明显优于减半型, 而 2 个合金弹簧对角排列方式下 2 种弹簧试样隔热性能的差异较大。

**关键词** 消防服; 防护性能; 形状记忆合金弹簧; 空气层; 排列方式

中图分类号: TS 941. 73 文献标志码: A

## Influence of size of shape memory alloy on thermal protection of fabrics used in firefighters' protective clothing

WANG Lijun<sup>1</sup>, LU Yehu<sup>1,2</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>, MA Nini<sup>1</sup>

(1. College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

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

**Abstract** To improve thermal protection of fabrics used in firefighter's protective clothing embedded with shape memory alloy, fabric combinations with 3 deformation heights of shape memory alloy (SMA) spring and 3 different arrangement modes were developed to analyze the influence of the size of SMA. The protective performance of these fabric combinations were tested by hot surface contact and thermal radiation tests. The results indicate that the SMA can effectively improve the protective performance of fabric combinations, and the height of SMA spring influences the air gap distribution, thus determines the heat insulating property. Moreover, the impact of deformation height of SMA spring is influenced by the arrangement mode, which could be related with the air gap shape and distribution caused by the SMA springs. Finally, the thermal protection of fabrics with different arrangement modes also show different trends under the two thermal hazards, i. e., under both thermal hazards, the fabrics with no-cut SMA springs in the arrangement of one and three diag provided better performance than those with cut SMA springs, whereas the protection of fabrics with no-cut and cut SMA springs exhibited different change trend as the SMA springs are in two diag arrangement mode.

**Keywords** firefighters' protective clothing; protective property; shape memory alloy spring; air layer; arrangement mode

在极度危险与复杂的工作环境中, 消防员或应急救援人员主要依靠特定的防护服装抵御各种灾害

源对人体的侵害, 如火焰、辐射热、高温物体、高压蒸汽、熔融物质等<sup>[1-2]</sup>。同时, 消防员多数时间处于低

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2018-02-04

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项目(201610285111H); 江苏省先进纺织工程技术中心开放课题(XJFZ-2016-5)

第一作者简介: 王丽君(1996—), 女。研究方向为智能热防护服装的制备。

通信作者: 卢业虎, E-mail: yhlu@suda.edu.cn。

热辐射的环境中<sup>[3-5]</sup>, 服装的蓄积热也可能会引起皮肤烧伤<sup>[6]</sup>。为提高热防护服的防护性能, 行业内大都采用研制新型阻燃纤维材料或增加面料厚度和层数等方法<sup>[7-8]</sup>, 但此类服装制成之后其隔热性能相对固定, 不能实现动态调节, 无法满足着装者应对多变环境下的穿着使用需求。

为实现防护服的动态调节功能, 研究者将形状记忆材料与防护服相结合<sup>[9-10]</sup>。Congalton<sup>[11]</sup>将形状记忆合金盘成扁平蚊香状并暴露于强辐射条件下, 发现动态结构能够改善防护性能, Hendrickson<sup>[12]</sup>将可形成 7 mm 空气层的形状记忆环(SMR)放入消防服面料系统, 发现在辐射条件下 SMR 产生的空气层可使皮肤处于较低的温度范围内, 延长救援时间。随后, White<sup>[13]</sup>进一步发现 SMR 在面料中的位置影响服装热防护效果, 其中 SMR 放置在防水透气层外部的面料组合的隔热效果更好, 同时也验证了形变温度接近皮肤达到二级烧伤温度的 SMR 具有更优越的防护性能。陈艳等<sup>[14]</sup>采用高温火焰接触法进行防火隔热性能测试发现, 产生的空气层隔热效果较为明显。Yates<sup>[15]</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。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弹簧不同弹起高度对阻燃织物的隔热性能影响, 也未考虑弹簧排布方式对隔热性能的影响。

本研究团队前期将形状记忆合金设置在防护服的防水透气层与隔热层之间, 在低辐射和高温热接触条件下探索了不同排列方式的形状记忆合金消防面料的防护性能<sup>[16-17]</sup>发现, 形状记忆合金弹簧可有效提高面料组合的防护性能, 热源环境和弹簧排列方式也会影响其隔热性能<sup>[18]</sup>。上述技术手段均利用形状记忆合金材料产生的空气层提高面料系统的隔热性能, 但空气层的尺寸对其防护性能的具体影响尚不明确, 本文将进一步研究在高温热接触和低辐射热环境下, 形状记忆合金弹簧高度对面料组合的防护性能的影响, 以期研制出性能优异的智能消防面料组合。

## 1 形状记忆合金消防面料组合的研制

### 1.1 形状记忆合金弹簧

本文采用的形状记忆合金材料为铜基合金, 形变温度约为 45 °C, 合金丝直径为 1.5 mm<sup>[16-18]</sup>。图 1 示出 2 种弹起高度的弹簧。由合金丝制成的合金弹簧完全弹起高度分别为 32 mm 和 16 mm, 如图 1(a) 所示。全高型合金弹簧的最大直径为 28 mm, 最小

直径为 14 mm; 减半型合金弹簧的最大直径为 21 mm, 最小直径为 14 mm。

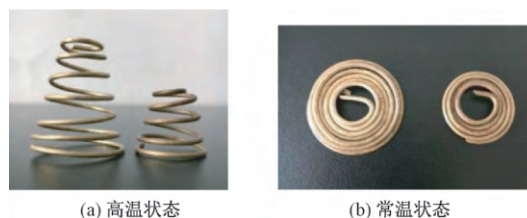


图 1 2 种弹起高度的弹簧

Fig. 1 Two types of springs. (a) At high temperature; (b) At low temperature

### 1.2 形状记忆合金消防面料组合

消防服面料组合包括防护外层、防水透气层和隔热层, 将形状记忆合金弹簧放置在防水透气层和隔热层之间, 使用芳纶阻燃线固定。样品面料尺寸为 15 cm × 15 cm。表 1 示出面料的基本性能。参考之前的研究<sup>[16-18]</sup>在面料上对 2 种形状记忆合金弹簧分别采用 4 组不同的排列方式, 即: 无形状记忆合金弹簧(简称无排列)、1 个弹簧中心排列(排列 1)、2 个弹簧对角线排列(排列 2)及 3 个弹簧对角线排列(排列 3), 共 7 种面料组合。为模拟服装实际穿着时面料之间的相互作用, 同时防止弹簧形变过程中面料之间发生滑移, 将 3 层组合面料在非弹簧排列的对角处固定<sup>[16]</sup>。

表 1 消防服面料的基本性能

Tab. 1 Properties of flame resistant fabrics

面料层	原料	结构	面密度/ (g·m <sup>-2</sup> )	厚度/ mm
防火外层	芳纶 1313/芳纶 1414 (98/2)	斜纹	193.7	0.49
防水透气层	100% 芳纶 1313 和聚 四氟乙烯膜	层压	108.3	0.85
隔热层	100% 芳纶 1313 毡和 基布	针刺	200.0	0.72

## 2 实验部分

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的救援环境。图 2 示出 2 种热源测试设备。实验时将高温热平板仪温度设置为 400 °C, 热接触时间为 20 s。热防护性能测试仪的辐射热流量设定为 12 kW/m<sup>2</sup>, 辐射时间为 70 s。对 7 种不同的面料组合进行高温热接触实验和热辐射实验, 将直径为 0.2 mm 的 T 型热电偶固定在隔热层的内表面, 采用 NI 数据记录仪(NI 9231, 美国)测量隔热层内表面温度  $\theta$  (面料中心温度)。为减小试验误差, 每种试样至少测试 3 次, 求平均值。

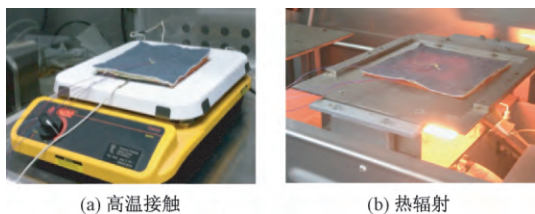


图 2 2 种热源测试设备  
Fig. 2 Test equipment of two kinds of thermal hazard.  
(a) Hot surface contact; (b) Thermal radiation

### 3 结果与讨论

#### 3.1 高温接触条件下隔热层内层温度

图 3 示出在高温接触条件下 7 组试样的隔热层内表面温度  $\theta_T$  的变化曲线。由图可知, 由于 3 层面料组合的隔热性延缓了热量的传递, 所有试样前 2 s 左右的温度无明显变化。此后, 排列 1、排列 3 减半型和排列 3 全高型 3 组试样温度先迅速增长至 55 ~ 60 °C, 再缓慢下降至 50 ~ 55 °C, 其余 4 组试样温度以缓慢的速度增长, 最终温度为 45 ~ 50 °C。

#### 3.2 高温接触条件下的防护性能

人体皮肤开始出现损伤时的温度为 44 °C (温升为 12 °C) 时, 超过 56 °C (温升为 24 °C) 可能出现二级烧伤。表 2 示出了高温接触条件下各种面料组合的隔热性能的比较。由表可知, 4 种排列方式下试样温度达到 44 °C 的时间呈现如下规律: 无排列 < 排列 2 <

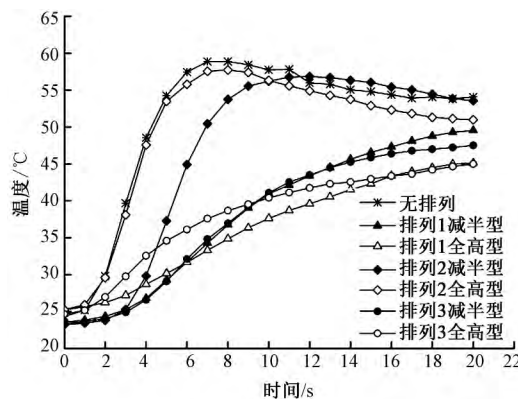


图 3 高温接触条件下隔热层内层温度  $\theta_T$  的变化  
Fig. 3 Change curves of  $\theta_T$  in hot surface contact test

排列 1 < 排列 3。排列 1 和排列 3 方式下试样的全高型较减半型用时长, 而排列 2 的效果相反。排列 2 方式下试样温度达到 56 °C 的时间大于无排列, 且全高型小于减半型, 而排列 1 和排列 3 试样温度未达到 56 °C。在不同的排列方式下, 各试样达到的最高温度呈如下趋势: 无排列 > 排列 2 > 排列 1 > 排列 3。

形状记忆合金弹簧弹起高度对最高温度也有一定的影响, 即排列 1 和排列 3 试样减半型较全高型分别高 4.5 和 2.5 °C, 而排列 2 试样全高型较减半型高 0.9 °C。4 种排列方式下试样的最终温度趋势与最高温度一致, 且全高型试样最终温度均比减半型要低。

表 2 高温接触条件下各组试样的隔热性能

Tab. 2 Heat insulating properties of each sample in hot surface contact test

排列方式	达 44 °C	与达 44 °C 无	达 56 °C	与达 56 °C 无	最高温度 / °C	最终温度 / °C
	时间 / s	排列方式比值	时间 / s	排列方式比值		
无排列	3.5 ± 0.8	1.0	5.5 ± 0.6	1.0	59.0 ± 2.2	54.1 ± 0.7
排列 1 减半型	12.5 ± 2.9	3.6	未达到	> 3.6	49.5 ± 1.9	49.5 ± 1.9
排列 1 全高型	17.0 ± 2.1	4.6	未达到	> 3.6	45.1 ± 0.8	45.1 ± 0.8
排列 2 减半型	5.9 ± 0.4	1.7	9.8 ± 1.3	1.8	56.9 ± 2.1	53.6 ± 1.5
排列 2 全高型	3.6 ± 0.2	1.0	6.1 ± 0.2	1.1	57.8 ± 0.4	51.0 ± 1.9
排列 3 减半型	12.6 ± 2.9	3.6	未达到	> 3.6	47.5 ± 0.7	47.5 ± 0.7
排列 3 全高型	17.6 ± 1.6	5.0	未达到	> 3.6	45.0 ± 0.8	45.0 ± 0.8

综上所述, 在弹簧高度相同的情况下, 排列 1 与排列 3 方式下试样的隔热效果显著, 而排列 2 方式的试样与无排列方式相比, 有一定的作用但并不明显。这是由于测温点在试样的正中心, 排列 1 与排列 3 方式试样在试样中心处安置有弹簧, 从而在中心区域形成的空气层厚度分别为 32 与 16 mm, 隔热性能较好, 同时延长了内表层到达 44 与 56 °C 的时间, 且至少是无排列试样的 3.6 倍, 这与前期的研究结果一致<sup>[17-18]</sup>。2 种排列方式下试样所达到的最高温度即最终温度也较低, 与无排列方式相比具有

显著性差异 ( $P < 0.05$ )。对于排列 2 试样, 弹簧距中心测温点位置较远, 空气层厚度增长较慢, 温度增长较快。由于中心处最终形成的空气层厚度小于弹簧形变高度 32 与 16 mm, 从而内表层温度较高, 最高温度达到 57 °C 左右, 且最终温度与无排列方式差异性较小, 没有显著性差异 (减半型  $P = 0.82$ , 全高型  $P = 0.17$ )。

比较温度到达 44 °C 的时间发现, 在排列 1 与排列 3 方式下全高型弹簧大于减半型弹簧, 分别延长了 4.5 和 5 s。虽然安置 2 种类型弹簧的试样温度

都未达到 56 °C ,但全高型弹簧达到的最高温度即最终温度比减半型弹簧低,且差异性显著(排列 1  $P=0.02$  排列 3  $P=0.01$ ) 这进一步说明中央空气层厚度为 32 mm 的试样所起到的隔热效果较 16 mm 的好。对于排列 2 方式的试样,比较其内表层到达 44 与 56 °C 的时间,装有减半型弹簧的试样所需时间较装有全高型弹簧的试样长 2~3 s。在实验初期,面料层间空气层厚度较小,空气层的散热速度不及金属的导热速度,导致全高型弹簧的试样温度增长得较快。安置 2 种弹簧试样达到的最高温度则无差异性,且持续时间较短,对隔热效果的影响较小。随着弹簧发生形变,空气层厚度逐渐变大,全高型试样的温度逐渐比减半型试样低,最终温度低 1.4 °C ,但无显著性差异(排列 2  $P=0.13$ )。总体来说,全高型弹簧试样所形成的空气层越厚,其隔热性能相对较好。在后续的研究中,将进一步测量整个内表面的温度,从而更为准确、全面地评价其隔热效果。

### 3.3 热辐射条件下隔热层内层温度

图 4 示出热辐射条件下 7 种组合试样隔热层内表面的温度  $\theta_R$  的变化曲线。从整体上看,由于热量在面料组合间传导具有延时性,所有试样的  $\theta_R$  在 0~5 s 内保持稳定。超出 5 s 后,7 组试样的  $\theta_R$  均持续增长。所有试样  $\theta_R$  的最高温度即为最终温度,此时热量传递未获得动态平衡,温度并没有稳定的趋势。

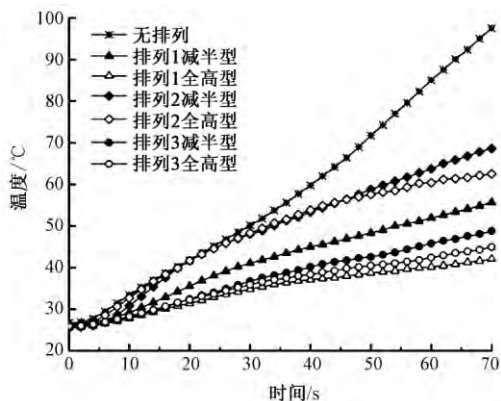


图 4 热辐射条件下隔热层内层温度  $\theta_R$  的变化  
Fig.4 Change curves of  $\theta_R$  in thermal radiation test

### 3.4 热辐射条件下的防护性能

表 3 示出热辐射条件下各种面料组合的隔热性能。在弹簧高度相同的情况下,排列 1 与排列 3 方式试样到达 44 °C 所用时长至少为无排列方式试样的 1.6 倍,而排列 2 方式试样与无排列方式到达 44 °C 的时间相近。形状记忆合金弹簧弹起高度不同,各试样  $\theta_R$  到达 44 °C 的时间也有所差异,整体上

满足无排列 < 减半型 ≤ 全高型。排列 1 和排列 3 试样 70 s 内未达到 56 °C ,排列 2 试样到达 56 °C 的时间是无排列试样的 1.2 倍,但排列 2 方式的全高型与减半型仅差 0.1 s。对于全高型弹簧 4 种排列方式试样的最终温度为:无排列 > 排列 2 > 排列 3 > 排列 1;而对于减半型弹簧,试样最终温度略有不同,即无排列 > 排列 2 > 排列 1 > 排列 3。试样的最终温度满足全高型 < 减半型 < 无排列规律。

表 3 热辐射条件下各组试样的隔热性能  
Tab.3 Heat insulating properties of each sample in thermal radiation test

排列方式	达 56 °C 时间/s	达 44 °C 与 无排列 方式比值	达 56 °C 时间/s	达 56 °C 与 无排列 方式比值	最终/最高 温度/°C
无排列	22.7 ± 1.7	1.0	36.4 ± 5.6	1.0	97.6 ± 2.7
排列 1 减半型	37.2 ± 4.6	1.6	未达到	>1.9	55.7 ± 7.8
排列 1 全高型	未达到	>3.1	未达到	>1.9	42.0 ± 2.7
排列 2 减半型	23.1 ± 2.8	1.0	44.9 ± 1.2	1.2	68.8 ± 2.2
排列 2 全高型	23.1 ± 4.4	1.0	44.8 ± 1.0	1.2	62.5 ± 6.4
排列 3 减半型	55.0 ± 5.0	2.4	未达到	>1.9	48.8 ± 1.0
排列 3 全高型	66.2 ± 6.1	2.9	未达到	>1.9	44.9 ± 3.8

较之无排列方式,排列 1、排列 3 方式的试样在达到 44 与 56 °C 的时间以及最终温度方面均具有明显的效果 ( $P < 0.05$ ),与高温接触条件下的规律类似。而排列 2 方式试样与无排列相比,在最终温度上的作用效果较明显,一定程度延长了到达 56 °C 的时间,但到达 44 °C 的时间较为接近。由于实验开始时试样中心测温点处空气层厚度增加不明显,导致实验初期试样的隔热效果较差,同时也是导致该排列方式的 2 种类型弹簧试样达到 44 °C 时间相同的原因。

图 5 示出了热辐射条件下排列 2 方式弹簧产生的空气层。随着弹簧的形变增加,空气层形状和厚度不同,排列 2 的减半型和全高型与无排列试样在最终温度上具有一定差异。排列 2 试样最终的内部空气层呈现对角线两边凸起,中间由于织物重力呈凹陷的形状,中心点处空气层厚度小于排列 1 和排列 3 所达到的弹簧形变高度的最大值 32 mm,试样最终温度相对偏高,隔热效果相对较弱。2 种类型的弹簧在测温点处产生的空气层厚度以弹簧高度 32 mm 为参照具有一定的差异,所以试样的最终温度也具有一定的差异(6.3 °C);但由于实验时间有限,差异并不显著(排列 2  $P=0.13$ )。

对于弹簧形变高度对面料组合隔热性能的影响,由于排列 2 方式下 2 种类型弹簧试样中心空气层厚度增长较慢,温度达到 44 和 56 °C 所需时间相近,隔热效果差异不明显。而在其余 2 种弹簧排列方式下,全高型比减半型试样延缓热量传递的效果

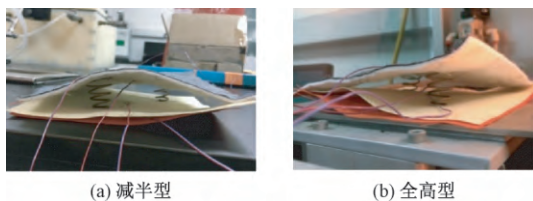


图5 热辐射条件下排列2方式弹簧产生的空气层  
Fig.5 Air gaps produced by two types of springs with arrangement 2 in thermal radiation test.

(a) Cut type; (b) No-cut type

较好。其中排列1试样全高型在70 s内未达到44℃,所用时长是减半型的1.9倍以上。减半型的试样最终温度是全高型的1.3倍,且具有显著性差异(排列1  $P=0.046$ )。这与2种类型弹簧试样产生的空气层厚度有关,即2种弹簧产生的空气层形态相似,但全高型产生的空气层厚度高于减半型16 mm。排列3试样全高型在达到44℃所用时长是减半型的1.2倍,最终温度也较低,具有显著性差异(排列3  $P=0.015$ )。由于中心点弹簧的安置,对于弹簧弹起高度不同的试样,在测温点处空气层的厚度差异较大,导致2种类型弹簧试样隔热效果的差异较明显。这进一步证明了在空气对流导热影响较小情况下,较厚的空气层能更有效地减缓面料组合内外热量的传递,起到更好的隔热效果。

图6示出了热辐射条件下排列1方式弹簧产生的空气层。进一步分析不同排列方式下减半型和全高型弹簧在隔热性能上的差异可知,在排列1方式下,二者的差异(13.7℃)最大,而排列3方式下二者的差异最小。这与弹簧形变产生的空气层形状和分布有关,即在排列1方式下空气层分布不均匀,中间空气层较大,呈射线状减少的形状<sup>[16]</sup>,安置2种类型的弹簧产生的空气层差异较大(见图6);在排列3方式下,弹簧产生的空气层形状分布较均匀,整个空腔内的传热较慢,隔热效果较好,但受限于空腔的内部空间,2种类型的弹簧形变产生的平均空气层厚度差异较小,因而二者的差异(3.9℃)较小。对弹簧排布方式及弹簧种类综合考量后得出:排列1全高型及排列3全高型是比较优良的面料组合方案,能有效地阻碍热量传递,延长人体受热损伤时间,隔热效果显著。

对于热源的不同,2种类型弹簧试样隔热性能也有所差异。排列2试样在热辐射实验中达到44℃与56℃时间都极为接近,而高温接触实验减半型弹簧试样用时较长一点,这可能与热量传递的速度、金属的导热速率、外界温度引起弹簧形变速度的不同导致空气层形成的快慢有关。高温接触中,外界温度越高,金属的导热速率越大,热量传递的速

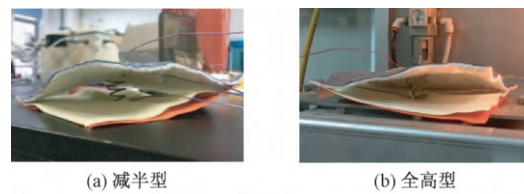


图6 热辐射条件下排列1方式弹簧产生的空气层  
Fig.6 Air gaps produced by two types of springs with arrangement 1 in thermal radiation test.

(a) Cut type; (b) No-cut type

度越快,弹簧形变速度越快,虽然在短时间内能及时形成空气层,但由于空气层的散热速度不及金属的导热速度,所以高温接触实验中减半型达到44℃与56℃的时间较长;热辐射实验中温度变化较慢,空气层形成速度较慢,金属导热速率也较低,二者引起的温度变化差异较小,故2种类型弹簧起初隔热性能无明显差异。2种热源环境下,排列1试样防护性能略优于排列3试样,全高型较减半型有明显优势。中心点空气层变化速度都相对较快,空气层的散热速度大于金属的导热速度,故全高型较减半型隔热效果要好。

## 4 结 论

通过分析不同排列方式及不同尺寸的形状记忆合金面料组合的隔热作用,得到如下结论。

1) 在2种热源条件下,形状记忆合金弹簧的不同排列方式对面料组合的隔热性能的影响不同。其中1个弹簧中心排列(排列1)与3个弹簧对角线排列(排列3)方式的面料组合内表层温度增长速度较慢,最终温度较低,隔热效果较好。

2) 在高温接触条件下,对于排列1与排列3方式,从到达44℃和56℃所需时间和到达的最高温度和最终温度相比,全高型试样的隔热性能明显优于减半型,而2个弹簧对角线排列(排列2)由于中心点空气层变化较慢,2种弹簧试样差异并不明显,隔热性能差异不大。

3) 在热辐射条件下,排列2的2种类型弹簧试样的最终温度相差较明显,而到达44℃的时间却相同。其余2种排列方式的全高型较减半型在整个实验过程中,明显地提高了面料组合的防护性能,且排列1方式下,二者的差异最大,可能与弹簧形变产生的空气层形状及分布有关。

4) 热源的不同,对于排列2的2种类型弹簧试样达到44℃和56℃的时间也有所差异。高温接触实验由于起初金属的导热速率大于空气层散热速率,

导致减半型用时较长,热辐射实验二者速率都较低则用时相当。

FZXB

#### 参考文献:

- [1] SONG G, LU Y. Flame resistant textiles for structural and proximity fire fighting [C]//KILINC F S. Handbook of Fire Resistant Textiles, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013: 520 - 548.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张梦莹, 苗勇, 李俊. 防火服热蓄积的影响因素及其测评方法 [J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 171 - 176.  
ZHANG Mengying, MIAO Yong, LI Jun. Influence factors and evaluation methods of stored thermal energy in firefighters protective clothing [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(6): 171 - 176.
- [7] 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.  
ZHAI Lina, LI Jun. Development and current status on performance test and evaluation of thermal protective clothing [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(7): 162 - 168.
- [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] MANDAL 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] MICHALAK M, KRUCINSKA I. A smart fabric with increased insulating properties [J]. Textile Research Journal, 2016, 86(1): 97 - 111.
- [11] CONGALTON D. Shape memory alloys for use in thermally activated clothing, protection against flame and heat [J]. Fire & Materials, 1999, 23(5): 223 - 226.
- [12] HENDRICKSON B W. The impact of a variable air gap on the thermal performance of firefighter protective clothing [D]. College Park: University of Maryland, 2011, 24 - 28.
- [13] WHITE J P. An experimental analysis of firefighter protective clothing: the influences of moisture and a thermally activated expanding air-gap [D]. College Park: University of Maryland, 2012: 52 - 56.
- [14] 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.  
CHEN Yan, LIN Lantian, REN Qianqian. Investigation on the instant fireproof composite fabric made of shape memory alloy [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2012, 40(2): 43 - 46.
- [15] YATES D A. Design and evaluation of a thermally responsive firefighter turnout coat [D]. College Park: University of Maryland, 2012: 11 - 15.
- [16] 王帅, 卢业虎, 王丽君, 等. 低辐射环境下形状记忆合金对防火面料隔热性能的影响 [J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 114 - 119.  
WANG Shuai, LU Yehu, WANG Lijun, et al. Effect of shape memory alloy on thermal protection of flame resistant fabrics under low radiation [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(8): 114 - 119.
- [17] 王丽君, 卢业虎, 王帅, 等. 高温接触条件下形状记忆合金阻燃面料的隔热性能研究 [J]. 丝绸, 2017, 54(5): 14 - 19.  
WANG Lijun, LU Yehu, WANG Shuai, et al. Study on thermal insulation performance of fireproof fabrics with shape memory alloy spring under hot surface contact [J]. Journal of Silk, 2017, 54(5): 14 - 19.
- [18] 王帅, 卢业虎, 王丽君, 等. 热灾害环境对形状记忆消防服面料防护性能的影响 [J]. 东华大学学报(自然科学版) 2018, 44(1): 73 - 79.  
WANG Shuai, LU Yehu, WANG Lijun, et al. Effect of thermal hazards on the thermal protection of fabrics used in firefighters' protective clothing incorporated with shape memory alloy [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2018, 44(1): 73 - 79.