

中文引用格式:朱雯,苏云,陈若颖,等.相变微胶囊涂层织物在热防护服中的应用[J].中国安全科学学报,2020,30(12):180-185.  
英文引用格式:ZHU Wen, SU Yun, CHEN Ruoying, et al. Application of fabric coated with phase change microcapsule in thermal protective clothing[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 180-185.

## 相变微胶囊涂层织物在热防护服中的应用\*

朱雯<sup>1</sup>, 苏云<sup>\*\*1 2 3</sup>, 陈若颖<sup>1</sup>, 李俊<sup>1 2 3</sup>教授, 田苗<sup>1 2 3</sup>

(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)

中图分类号: X968 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn.1003-3033.2020.12.025

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金资助(20YJC760087);中央高校基本科研业务费专项基金资助(2232019D-18, 2232020G-08);上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1400600)。

**【摘要】**为优化热防护服的热防护性能,将相变微胶囊涂层织物应用于织物系统中,制成具有调温功能的新型热防护服织物系统。选取4种相变温度的微胶囊悬浮液,制成3种相变含量的涂浆,采用干法涂层工艺制成涂层织物。测试涂层织物的基本性能变化,利用接触热防护测试仪评价织物系统的防护性能。结果表明:涂层处理后织物拉伸性能、导热系数均增大,相变焓与含量呈正相关关系;同时,涂层处理显著提高织物系统的热防护性能,二级烧伤时间平均延长66%,与微胶囊含量、相变温度以及相变焓密切相关。

**【关键词】**相变微胶囊; 涂层织物; 热防护服; 接触热; 拉伸性能; 蓄热

### Application of fabric coated with phase change microcapsule in thermal protective clothing

ZHU Wen<sup>1</sup>, SU Yun<sup>\*\*1 2 3</sup>, CHEN Ruoying<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1 2 3</sup>教授, TIAN Miao<sup>1 2 3</sup>

(1 College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China;

2 Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China;

3 Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** In order to optimize protective performance of thermal protective clothing, a new type of thermal protective fabric system featuring temperature regulation function was made by applying fabrics coated with phase change microcapsule to system. Then, microcapsule suspension at four types of phase change temperature was selected to make coating at three phase change content, and coated fabric was prepared by using dry coating process. Finally, fundamental performance changes of fabric were tested, and thermal protective performance of fabric system was evaluated based on a hot contact test device. The results show that tensile properties and thermal conductivity of fabric increase after coating, and phase change enthalpy is positively correlated with content. Meanwhile, coating improves thermal protective performance significantly, and prolongs time for second-degree burn by 66% on average. In addition, its protective performance is closely linked with content of microcapsules, phase change temperature and

\* 文章编号: 1003-3033(2020)12-0180-06; 收稿日期: 2020-09-12; 修稿日期: 2020-11-15

\*\* 通信作者: 苏云(1990—),男,湖北黄冈人,博士,讲师,主要从事功能防护服及纺织材料热湿传递模型等方面的研究。E-mail: suyun150t@dh.u.edu.cn.

enthalpy.

**Keywords:** phase change microcapsule; fabric coated; thermal protective clothing; hot contact exposure; tensile properties; heat storage

## 0 引言

在工业生产、火灾救援等场景中,热防护服是阻隔火焰高温、减少人体伤害的保护性服装<sup>[1]</sup>。当前针对热防护领域的研究主要集中在火焰和热辐射等热暴露环境<sup>[2-4]</sup>,而较少针对接触热暴露环境展开研究。当高温物体与人体局部皮肤发生接触时,热传导成为主要的传热方式<sup>[5]</sup>,迅速导致皮肤烫伤。

近年来,智能材料及金属功能材料是学者改进防护性能的研究热点<sup>[6]</sup>,其中,相变微胶囊材料因其优越的稳定性、良好的蓄热性能和使用效率逐渐被应用于纺织服装领域。当环境温度达到相变温度时,包裹在微胶囊壁材中的相变材料微粒相态发生改变,从而吸收外部的热量,提供热防护。MANDAL 等<sup>[7]</sup>使用改进的《防护服用织物接触热暴露下防护性能测试标准》<sup>[8]</sup>评价了织物系统的热防护性能,但并未提出热防护服性能优化的改进方案。闫飞<sup>[9]</sup>、王永凤<sup>[10]</sup>等研究表明:织物经微胶囊涂层整理后调温性能良好,控温幅度可达 4~10 °C,不影响服用性能。FONSECA 等<sup>[11]</sup>将相变材料应用于消防服中,发现热防护性能显著提高。瑞士 EMPA 实验室<sup>[12-13]</sup>通过增加相变层的方式提高消防服的热防护性能,并成功制备了不同相变材料的高负载柔性薄膜。SHAID 等<sup>[14]</sup>将气凝胶和相变材料复合应用于消防服以降低易燃风险,增强热防护和舒适性。然而针对相变材料及其织物的相关研究,多集中在制备和基本性能表征上,对于将相变材料应用于热防护服装后对防护性能和舒适性能的影响并未深入研究。相变材料在热防护服中的应用还需探究其耐用性、蓄热传热性,以保证在优化服装热防护性能的同时,不影响服装的服用性能。

鉴于此,笔者拟以相变温度和相变含量为变量,制备多种相变微胶囊涂层织物,应用于热防护织物系统中,探究其耐用性、蓄热传热性和对织物系统热防护性的影响,以期新型热防护服的设计研发提供参考建议。

## 1 相变热防护服面料的研制

### 1.1 相变涂层织物制作

选取相变温度为 25、30、35、42 °C 的 4 种相变微

胶囊悬浮液,焓值依次为 135、180、180、120 J/g,以质量比为 25%、35%、45% 的相变微胶囊分别制成不同相变温度、不同相变含量的涂浆,利用干法涂层工艺,制备相变微胶囊涂层织物,涂覆方向为沿织物经向。涂浆配制助剂为增稠剂 HEUR-B 和粘合剂 PU-3630。由于试验测试环境为接触热暴露环境,所选用的相变微胶囊涂层基布应具有较好的阻燃、隔热性能,故试验选用广泛用于热防护服制作的 Nomex IIIA 面料作为相变微胶囊涂层基布,该面料的基本信息见表 1。仪器选用刮浆涂层机和其配套的烘箱。

表 1 Nomex IIIA 面料规格参数

Tab.1 Specification parameters of Nomex IIIA

织物层	成分	组织	面密度/ (g·m <sup>-2</sup> )	厚度/ mm	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
基布	Nomex IIIA	斜纹	228.5	0.488	0.005

制得的相变微胶囊涂层织物表面光滑均匀,反面无渗透。涂层织物的平均增重为基布的 118%,增厚为基布的 53%。

### 1.2 相变热防护服面料组合

研究对象为含相变微胶囊涂层的热防护服织物系统(相变涂层织物系统),选取热防护服制作的多层织物系统,包括外层、防水透气层、隔热层,3 种面料的基本性能见表 2。

表 2 各层面料的规格参数

Tab.2 Specification parameters of each layer

织物层	成分	组织	面密度/ (g·m <sup>-2</sup> )	厚度/ mm
外层	Nomex IIIA	斜纹	164	0.32
防水透气层	Nomex/Kevlar (PTFE 镀膜)	水刺毡	112	0.55
隔热层	芳纶	针刺毡	143	1.66

同时选取自制的相变涂层面料 12 种、未涂层处理的 Nomex IIIA 面料 1 种,分别作为相变层放置在织物系统最内层,即距离皮肤最近的位置,涂层一侧朝外,其中 Nomex IIIA 面料作为对照组。所组成的相变热防护服面料组合排列顺序如图 1 所示。经文献查阅可知:前人较多研究闪火和辐射暴露环境下织物系统的整体热防护性,将相变层放置在防水透气层和隔热层之间<sup>[15]</sup>或外层和防水透气层之间<sup>[11]</sup>

的位置。文中研究的条件是接触热暴露环境,没有明火产生,虽然所研发的相变微胶囊织物具有耐高温性能<sup>[16]</sup>,但考虑到相变微胶囊不具有阻燃性,最终选择相变层位置在最内侧(即离皮肤最近的位置)织物涂层一侧向外。这样做也有利于相变层调节体表温度。同时,在预试验中已经证明将相变层放置在最内侧的可行性。



图1 相变层的嵌入位置

Fig.1 Incorporation location of phase change layer

## 2 性能测试

### 2.1 基本性能

按照文献[17],使用电子万能材料试验机,进行相变涂层织物的断裂强度和断裂伸长率测定。利用差示扫描量热仪,测量记录以温度或时间为x轴,以热流速率差为y轴的曲线,以10℃/min的速率升温,进行相变涂层织物的相变温度和相变焓测定。使用精密热物性测试仪,设置底板温度为30℃,测定相变涂层织物的导热系数。

### 2.2 热防护性能

使用依据文献[8]搭建的接触热防护性能测试仪如图2所示。采集时间数据与温度数据。根据Duhamel准则和皮肤内的热量传递Pennes方程<sup>[18]</sup>计算皮肤达到二级烧伤所需的时间,从而评价接触热暴露条件下相变热防护服面料组合的热防护性能。

$$q(t_m) =$$

$$2\sqrt{\frac{k\rho C_p}{\pi}} \sum_{j=1}^n \left[ \frac{T_j - T_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \cdot (\sqrt{t_m - t_{j-1}} - \sqrt{t_m - t_j}) \right] \quad (1)$$

式中: $t_m$ 为 $m$ 时刻 $s$ ;  $q(t_m)$ 为 $t_m$ 时刻通过皮肤模拟传感器的热流密度, $W/m^2$ ;  $k$ 为皮肤模拟传感器的导热系数, $W/(m \cdot K)$ ;  $\rho$ 为皮肤模拟传感器的密度, $kg/m^3$ ;  $C_p$ 为皮肤模拟传感器的热容量, $J/(kg \cdot K)$ ;  $T_j$ 为 $t_j$ 时刻皮肤模拟传感器的温度 $K$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 拉伸性能分析

相变涂层前后织物经纬向的断裂强度和断裂伸

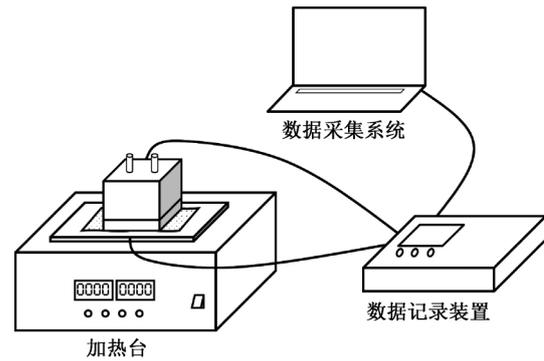


图2 接触热防护性能测试仪

Fig.2 Thermal protective performance tester for hot contact exposure

长率的对比,如图3所示。从图3中可以看出,涂层处理前Nomex IIIA织物的经向断裂强力为1494 N,经向断裂伸长率为50.6%;而经过相变涂层处理后织物的经向断裂强力均值增大到1615 N,经向断裂伸长率均值为50.7%,基本保持不变;涂层处理前Nomex IIIA织物的纬向断裂强力为1000 N,纬向断裂伸长率为22.6%;而经过相变涂层处理后织物的纬向断裂强力均值增大到1137 N,纬向断裂伸长率均值增大到32.1%。说明经过涂层处理后,织物的断裂强力在经纬向均有增大,织物的断裂伸长率在纬向上有明显增大,但在经向保持不变,可能与涂浆的涂覆方向有关。由于相变微胶囊以及涂层助剂均为聚合物高分子材料,内部应力较织物更大,在拉伸阶段,主要是织物表面的相变涂层承受应力。

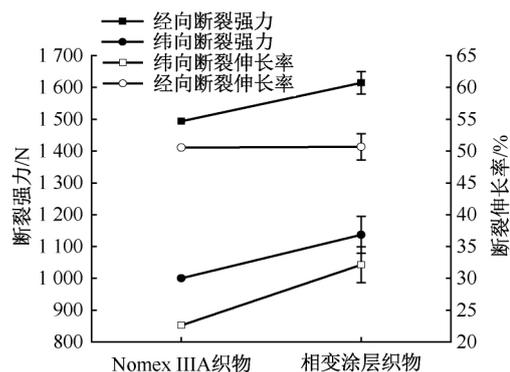


图3 相变涂层前后织物拉伸性能的对比

Fig.3 Comparison of tensile properties of fabrics before and after phase change coating

### 3.2 蓄热性能分析

为了解相变微胶囊涂层织物的蓄热性能,分析涂层织物的相变温度和相变焓。记涂层前的相变微胶囊悬浮液相变温度为 $\theta$ 。涂层后获得的相变微胶

囊涂层织物的相变温度为  $\theta^*$ 。以  $\theta_0$  为 42 °C、含量为 45% 的相变涂层织物为例,其热流-温度曲线如图 4 所示。在 34.5~55.8 °C 之间,该涂层织物有一吸收峰,说明在此期间发生固-液相变;吸收峰顶点温度为 47.1 °C,是相变涂层织物吸热最为显著的温度。由此可见:该涂层织物的相变温度范围为 34.5~55.8 °C,记录 47.1 °C 为此织物典型的相变温度  $\theta^*$ 。相变焓为图 4 中曲线与辅助线所围区域的面积积分除以升温速率,经计算为 107.0 J/g。

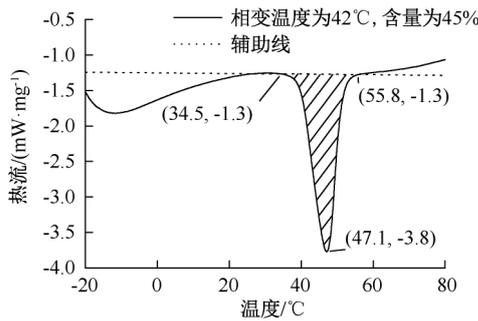


图 4 相变涂层织物的热流-温度曲线  
Fig.4 Curve of heat flow-temperature in phase change coated fabric

按照上述方法,计算出所有涂层织物的  $\theta^*$  和相变焓。相变涂层织物的  $\theta^*$  和  $\theta_0$  的对比,如图 5 所示。涂层织物的相变焓随含量变化的曲线,如图 6 所示。可以看出,涂层织物的相变温度  $\theta^*$  递变规律和制备所用微胶囊悬浮液的相变温度  $\theta_0$  基本一致,且  $\theta^*$  较  $\theta_0$  略有增大,平均增大 4.1 °C。当  $\theta_0$  相同时,随着涂浆中相变微胶囊含量的增大,所得涂层织物的相变焓整体上呈现上升趋势,且最终趋向于相变微胶囊悬浮液的相变焓值。经相关性检验, $\theta_0$  分别为 25、30、35、42 °C 的涂层织物相变焓和含量的相关性依次为 0.871 (显著性水平  $P = 0.327$ )、0.587 ( $P = 0.601$ )、1.000 ( $P = 0.001$ )、0.976 ( $P = 0.141$ )。说明在同一  $\theta_0$  情况下,涂层织物的相变焓和相变微胶囊含量确实呈现正相关关系。由此可见:相变微胶囊涂层织物的蓄热性能与制备所用微胶囊悬浮液的相变温度、涂浆中微胶囊的含量有关。

### 3.3 传热性能分析

为进一步研究相变涂层织物系统的传热过程,首先分析导热系数和相变涂层织物之间的关系。Nomex IIIA 织物和相变微胶囊涂层织物的导热系数对比,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,涂层处理前 Nomex IIIA 织物的导热系数为  $5.036 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,经过相变涂层处理后织物的导热系数

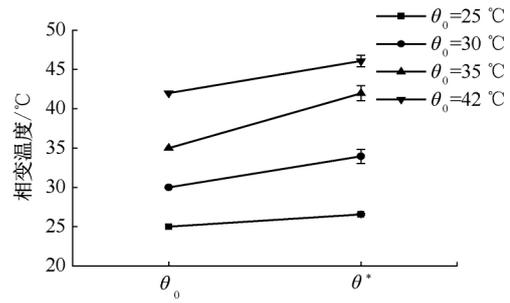


图 5  $\theta_0$  和  $\theta^*$  的对比

Fig.5 Comparison of  $\theta_0$  and  $\theta^*$

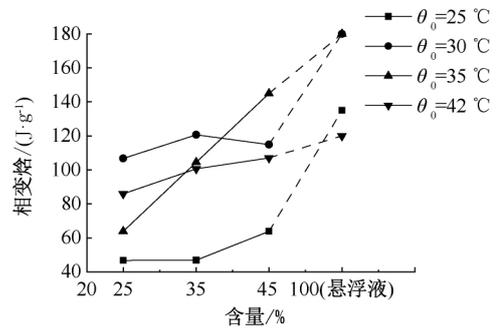


图 6 涂层织物的相变焓-含量曲线

Fig.6 Curve of enthalpy-content in phase change coated fabric

均大于  $7 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,平均增加了 53%。说明相变微胶囊的加入明显提高了织物的传热性能。

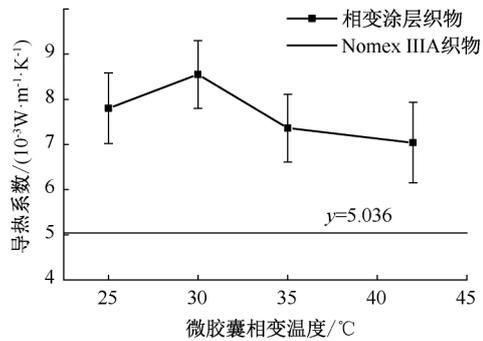


图 7 相变涂层前后织物导热系数的对比

Fig.7 Comparison of thermal conductivity of fabrics before and after phase change coating

同时,从图 7 中可以看出,微胶囊相变温度为 25、30 °C 的涂层织物导热系数相对较高,而微胶囊相变温度为 35、42 °C 的涂层织物导热系数则较低。经单因素方差检验,不同微胶囊相变温度的涂层织物导热系数确实存在显著性差异 ( $P = 0.044 < 0.05$ )。出现这一现象的原因可能是,相变微胶囊开始发生固-液相变至相变完全是在一段温度范围内,而所测试底板温度为 30 °C,对于  $\theta_0$  分别为 25、

30 °C 的涂层织物来说,在测试时样品处于相变状态,吸热较未发生相变的  $\theta_0$  分别为 35、42 °C 的涂层织物更多,导致底板与面板的温差较小,导热系数较大。试验数据显示,在其他参数基本相同时,  $\theta_0$  分别为 25、30 °C 的涂层织物测试中面板温度均值分别为 23.7、23.2 °C,而  $\theta_0$  分别为 35、42 °C 的涂层织物测试中面板温度均值分别为 22.5、22.6 °C,前者的温差更小,导热系数更大。因此,在相变微胶囊的蓄热性能未发生作用或作用较小时,与传统的 Nomex IIIA 织物相比,涂层织物的导热系数更大,传热更快。

### 3.4 热防护性能分析

试验证明:相变微胶囊涂层的加入对热防护服织物系统在接触热暴露条件下的热防护性能显著提高。经过相关性分析,相变热防护服织物系统的二级烧伤时间与涂层织物的微胶囊含量、相变焓和相变温度  $\theta^*$  的相关性依次为 0.651、0.602、0.590 ( $P$  依次为 0.022、0.038、0.043,均小于 0.05),说明这 3 组均呈现正相关关系。微胶囊的含量越大,涂层织物的相变温度  $\theta^*$ 、相变焓越大,则织物系统的热防护性能越好。

二级烧伤时间与相变含量、相变焓的关系如图 8、图 9 所示。加入 Nomex IIIA 的热防护服织物系统对应的皮肤二级烧伤时间为 17.7 s,相变涂层处理后,二级烧伤时间延长至 25.5~31.8 s,平均延长 66%;热防护服织物系统中涂层织物的  $\theta_0$  为

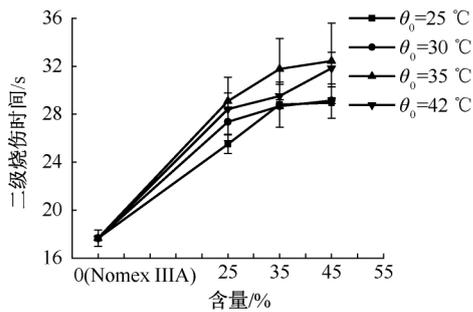


图 8 二级烧伤时间与含量的关系

Fig.8 Relationship between time for second-degree skin burns and content of phase change microcapsules

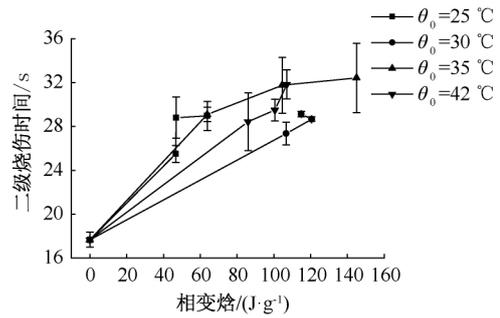


图 9 二级烧伤时间与相变焓的关系

Fig.9 Relationship between time for second-degree skin burns and phase change enthalpy

35 °C、含量为 45% 时,其二级烧伤时间最长,热防护性能最优;在  $\theta_0$  恒定的情况下,二级烧伤时间随含量的增大而增大,随相变焓的增大也呈现增大的趋势。由于  $\theta_0$  为 35 °C、含量为 45% 的涂层织物含量在 3 个水平中最大,相变焓也最大,也就能解释出现其织物系统对应的皮肤二级烧伤时间最长,热防护性最好的现象。

## 4 结论

1) 经过涂层处理后,织物的断裂强力在经纬向均有增大,织物的断裂伸长率在纬向上有明显增大,但在经向保持不变,可能与涂浆的涂覆方向有关。

2) 涂层织物的相变温度  $\theta^*$  的递变规律和制备所用微胶囊悬浮液的相变温度  $\theta_0$  基本一致,且  $\theta^*$  较  $\theta_0$  平均增大 4.1 °C;涂层织物的相变焓和制备所用涂浆中的相变微胶囊含量呈现正相关;相变微胶囊涂层织物的蓄热性能与制备所用微胶囊悬浮液的相变温度、涂浆中微胶囊的含量有关。经过相变涂层处理后织物的导热系数均值增加了 53%,相变微胶囊的加入明显提高了织物的传热性能。

3) 相变微胶囊涂层的加入对热防护服织物系统在接触热暴露条件下的热防护性能有显著提高,其中  $\theta_0$  为 35 °C、含量为 45% 的涂层织物系统对应的皮肤二级烧伤时间最长。微胶囊的含量越大,涂层织物的相变温度  $\theta^*$ 、相变焓越大,则织物系统的热防护性能越好。

### 参考文献

[1] RAJ U, WANG Faming. A three-dimensional conjugate heat transfer model for thermal protective clothing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 130: 28-46.  
 [2] SONG Guowen, 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.
- [3] 朱方龙, 张渭源. 基于人体皮肤热模型的热防护服评价方法研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2007, 17(11): 134-140.  
ZHU Fanglong, ZHANG Weiyuan. Study on estimation of thermal protective clothing based on human skin heat transfer model [J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(11): 134-140.
- [4] 翟胜男, 陈太球, 蒋春燕, 等. 含水率对防护织物热防护性能的影响 [J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(7): 148-152.  
ZHAI Shengnan, CHEN Taiqiu, JIANG Chunyan, et al. Effect of moisture of firefighter fabric on its thermal protective performance [J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(7): 148-152.
- [5] MANDAL S, SONG Guowen. Characterizing thermal protective fabrics of firefighters' clothing in hot surface contact [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, 47(5): 622-639.
- [6] 李晓琳, 于伟东. 耐高温表层材料选择及层合后隔热性对比分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(4): 127-132.  
LI Xiaolin, YU Weidong. Selection of surface materials for high temperature insulation and comparative analysis of heat insulation performance after lamination [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(4): 127-132.
- [7] MANDAL S, SONG Guowen, ACKERMAN M, et al. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures [J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83(10): 1 005-1 019.
- [8] ASTM F1060-2018, Standard test method for thermal protective performance of materials for protective clothing for hot surface contact [S].
- [9] 闫飞, 陆大年. 织物整理用相变微胶囊的制备 [J]. *印染助剂*, 2011, 28(1): 32-34.  
YAN Fei, LU Danian. Preparation of phase change micro-capsules for textile finishing [J]. *Textile Auxiliaries*, 2011, 28(1): 32-34.
- [10] 王永凤, 周学梅, 魏文政, 等. 相变涂层的控温性能研究 [J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 113-115.  
WANG Yongfeng, ZHOU Xuemei, WEI Wenzheng, et al. Research on temperature control performance of phase change coating [J]. *Surface Technology*, 2013, 42(1): 113-115.
- [11] FONSECA A, MAYOR T S, CAMPOS J B L M. Guidelines for the specification of a PCM layer in firefighting protective clothing ensembles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 81-96.
- [12] BUHLER M, POPA A M, SCHERER L, et al. Heat protection by different phase change materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(2): 359-364.
- [13] ROSSI R M, BOLLI W P. Phase change materials for the improvement of heat protection [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2005, 7(5): 368-373.
- [14] SHAID A, WANG L, PADHYE R. The thermal protection and comfort properties of aerogel and PCM-coated fabric for firefighter garment [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 45(4): 611-625.
- [15] 查思思. 相变材料在消防服用织物中的应用研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.  
ZHA Sisi. Performance of firefighter-clothing fabrics with phase change materials [D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [16] 徐哲, 李建强. 液体石蜡相变微胶囊的制备及性能表征 [J]. *过程工程学报*, 2012, 12(2): 293-301.  
XU Zhe, LI Jianqiang. Preparation and characterization of microencapsulated phase change liquid paraffin [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2012, 12(2): 293-301.
- [17] GB/T 3923.1-2013, 纺织品 织物拉伸性能 第 1 部分: 断裂强度和断裂伸长率的测定(条样法) [S].  
GB/T 3923.1-2013, Textiles—tensile properties of fabrics—part 1: determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method [S].
- [18] PENNES H H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1998, 85(1): 5-34.



作者简介: 朱雯 (1996—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为功能服装与服装舒适性。E-mail: zz822069@163.com。