



# 镶拼调温织物的设计及其降温性能分析

崔思怡<sup>1</sup>, 杨 罡<sup>1</sup>, 王雪琴<sup>1,2</sup>, 郑 涵<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 杭州 310018;

2. 浙江理工大学桐乡研究院, 浙江嘉兴 314000)

**摘要:** 为提升相变调温织物在夏日服装中的穿着舒适性, 减少其与皮肤的直接接触, 设计并制备了一种基于贴布绣工艺的镶拼调温织物, 探索相变区域的图形化分布设计对其降温性能的影响。采用微胶囊浸轧法和贴布绣复合工艺制备了 1、3、5、7 散点的镶拼调温织物, 利用红外热成像仪测试其降温性能, 并基于有限元软件模拟不同设计参数(分散程度、图案形态)下仿真织物的温度变化, 结合仿真结果进行回归分析, 以揭示其热传递机制。结果表明: 镶拼调温织物在相变阶段呈现约 50 s 的温度平台期, 与纯棉机织物形成约 10 °C 的温差; 在相变区域面积恒定(50 cm<sup>2</sup>)条件下, 织物的降温性能随着相变区域分散程度的增加而提升; 仿真结果与实测数据吻合度较高( $R^2 > 0.95$ ), 并通过线性拟合构建了织物模型的温度与相变材料分散程度之间的回归方程, 验证了图形化分布设计可通过增加分散程度提高热传递效率。该研究为兼顾降温性能与穿着舒适性的织物设计提供了理论依据及量化调控方法。

**关键词:** 相变材料; 镶拼调温织物; 分布设计; 仿真模拟; 有限元分析

**中图分类号:** TS195.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2025)11-0806-10

**引文格式:** 崔思怡, 杨罡, 王雪琴, 等. 镶拼调温织物的设计及其降温性能分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(6): 806-815.

**Reference Format:** CUI Siyi, YANG Gang, WANG Xueqin, et al. Design of patchwork thermo-regulating fabrics and analysis of their cooling performance[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(6): 806-815.

## Design of patchwork thermo-regulating fabrics and analysis of their cooling performance

CUI Siyi<sup>1</sup>, YANG Gang<sup>1</sup>, WANG Xueqin<sup>1,2</sup>, ZHENG Han<sup>1</sup>

(1. College of Textiles Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang

Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Sci-Tech University

Tongxiang Research Institute, Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** To enhance the comfort of phase-change temperature-regulating fabrics in summer clothing and reduce direct skin contact, a patchwork thermo-regulating fabric was designed and prepared using the patchwork embroidery technique. The study examined the effect of the graphical distribution design of phase-change regions on its cooling performance. Using microcapsule immersion coating and patchwork embroidery composite processes, patchwork thermo-regulating fabrics with 1, 3, 5, and 7 dispersion points were prepared. Their cooling performance was tested using an infrared thermal imaging camera, and finite element software was used to simulate temperature changes in the fabrics under different design parameters (dispersion degree, and pattern morphology). Regression analysis was conducted based on the simulation results to reveal the heat transfer mechanism. The results showed that the thermo-regulating fabric exhibited a temperature plateau phase of approximately 50 seconds during the phase change stage,

收稿日期: 2025-01-22 网络出版日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(22075252)

作者简介: 崔思怡(2000—), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事多功能枕垫产品开发与调温织物方面的研究。

通信作者: 王雪琴, E-mail: 917589373@qq.com

with a temperature difference of roughly  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  compared to pure cotton woven fabrics. Under the condition of a constant phase change region area ( $50\text{ cm}^2$ ), the cooling performance of the fabric improved with an increase in the dispersion degree of the phase change region. The simulation results showed a high degree of consistency with the measured data ( $R^2 > 0.95$ ). A regression equation was established through linear fitting between the temperature of the fabric model and the dispersion degree of the phase-change material, verifying that graphical distribution design can enhance heat transfer efficiency by increasing the dispersion degree of the phase-change material. This study provides a theoretical basis and quantitative control method for fabric design that balances cooling performance and wearing comfort.

**Key words:** phase-change materials; patchwork thermo-regulating fabrics; distribution design; simulations; finite element analysis

## 0 引言

相变材料(Phase change materials, PCM)是指能够在一定温度范围内通过改变自身物质状态而吸收或释放潜热的物质<sup>[1-2]</sup>。作为一种良好的热能储存的介质,PCM的自适应性使其能够根据环境温度的变化发生相变,从而实现双向调温的功能。国内外众多学者将PCM的应用研究扩展到纺织领域中,开发出具有调温功能的纺织品。这些产品包括用于高温环境的纺织品,如冷却背心<sup>[3]</sup>、消防防护服<sup>[4]</sup>、降温矿工服<sup>[5]</sup>,以及用于温度调控的纺织品,如帐篷<sup>[6]</sup>、针织内衣<sup>[7]</sup>、儿童恒温睡袋<sup>[8]</sup>等。

相变材料在实际应用中存在过冷、低导热率、泄漏和腐蚀等问题<sup>[9-10]</sup>,而封装技术是改善相变材料性能的重要工艺手段之一。目前,微胶囊化是较为常见的封装方式<sup>[11-12]</sup>,在纺织领域,相变调温面料主要通过微胶囊纺丝法或微胶囊后整理法获得。纺丝法是将所需的纤维聚合物和相变微胶囊混合,制成纺丝液,采用纺丝工艺制成纤维<sup>[13]</sup>。后整理法又分为涂层整理法和浸轧整理法<sup>[14]</sup>,该法操作简单、织物易得,因此应用广泛。现有的相变织物多采用全涂覆工艺,虽能提升调温性能,但易产生材料泄露、触感粗糙问题。因此,通过局部镶拼设计,将相变材料以散点形式复合于纯棉机织物表面,减少相变材料与皮肤的直接接触,并兼顾降温性能与穿着舒适性,是保障健康和提升穿着体验的有效途径。

有限元法作为一种强大的数值分析工具,已广泛应用于热管理研究领域,常用于模拟各类织物的传热过程。Codau等<sup>[15]</sup>采用有限元法对多孔材料织物进行建模,并通过COMSOL Multiphysics进行传热分析,结果与实验数据较为一致;Mishra等<sup>[16]</sup>通过数值模拟和实验法对嵌入气凝胶的非织造布进行传热模拟,并采用有限元法对气凝胶样品

的热性能进行预测;孙艳丽<sup>[17]</sup>建立了相变复合织物的有限元模型,探究了不同环境条件下织物的保温能力,并验证了模型的精准性。以上研究表明有限元法可以用于参数优化和模拟各种复杂的物理条件,从而提高研究和开发的效率。

本文提出了一种图形化分布的镶拼调温织物设计方法,以石蜡为原料,通过浸轧法将相变微胶囊乳液涂覆在纯棉机织物表面,利用激光切割及贴布绣工艺制备了1、3、5、7散点的镶拼调温织物;通过有限元软件构建不同图形化分布的镶拼调温织物模型,模拟并分析其温度变化规律,探究相变材料的分散程度对降温性能的影响,以期为开发兼具热管理性能与美学设计的镶拼调温织物提供理论依据及可控性研究方法。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

工业级相变石蜡购自浙江皇星化工股份有限公司,分析纯十二烷基苯磺酸钠购自天津科密欧化学试剂有限公司,分析纯聚丙烯酸酯购自上海吉至生化科技有限公司,纯棉机织物(经纬纱纤度均为 $14.58\text{ tex}$ ,织物厚度为 $0.506\text{ mm}$ ,平方米质量为 $280\text{ g/m}^2$ )市售。

YG(B)141 D 数字式织物厚度仪(温州际高检测仪器有限公司);ULTRA55 场发射扫描电子显微镜(FESEM,德国 ZEISS 公司);DSC Q2000 差示扫描量热仪(北京五洲东方科技发展有限公司);TC3000E 导热系数测量仪(西安夏溪电子科技有限公司)和 H2 在线式红外热成像仪(TOPRIE 公司)。

### 1.2 镶拼调温织物的制备

采用界面聚合<sup>[18]</sup>制备相变微胶囊:将石蜡作为芯材分散在十二烷基苯磺酸钠乳液中,以聚丙烯酸酯作为壁材,按2:1的体积比将二者混合搅拌

30 min, 制备得到相变微胶囊乳液。通过浸轧法将相变微胶囊乳液均匀涂覆在纯棉机织物表面, 具体步骤为: 将纯棉机织物完全浸润在乳液中, 取出后放置在隔热薄膜上, 用轧机热压处理, 将织物置于烘箱中烘干 1 h, 得到相变调温织物; 采用激光切割技术将相变调温织物切割成特定形状, 采用贴布绣工艺缝制于纯棉机织物表面, 同时在基材反面与相变区域对应的位置进行同步裁剪, 排除镶拼部分织物厚度的增加对热传导的影响, 制得镶拼调温织物。

由于镶拼调温织物中相变区域与非相变区域的表面接触周长不同, 且相变区域分布越分散, 表面接触周长越大, 因此将分散程度定义为相变区域平面周长与织物平面周长的比值, 用于量化表征相变材料在织物中的分布离散性。分散程度的计算公式见式(1):

$$D = \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

其中:  $D$  为分散程度;  $C_1$  为相变区域平面周长, cm;  $C_2$  整块织物平面周长, cm。

为了探究镶拼调温织物中的相变材料在不同分散程度下的降温性能, 将相变调温织物切割成正方形, 按 1、3、5、7 散点缝制于纯棉机织物(10 cm×10 cm)表面, 分别标记为 1#、2#、3#、4# 织物, 为确保相变区域与非相变区域面积相同, 均设置为 50 cm<sup>2</sup>。不同散点数的镶拼调温织物示意图如图 1 所示。未负载相变材料的纯棉机织物作为对照组, 记为 0# 织物。

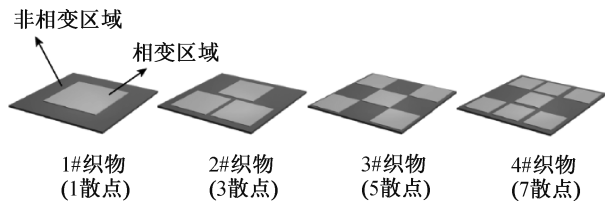


图 1 不同散点数的 1#—4# 镶拼调温织物示意图

1#、2#、3#、4# 织物相变区域的周长依次为 28.28、48.96、63.25 cm 和 74.76 cm, 整块织物的平面周长为 40 cm, 通过式(1)计算出对应的分散程度分别为 0.707、1.224、1.580、1.869。这表明在恒定相变区域面积(50 cm<sup>2</sup>)下, 散点数量从 1 增至 7, 分散程度提升, 验证了分布离散性的增强趋势。

### 1.3 测试与表征

#### 1.3.1 相变微胶囊负载率和织物厚度测试

采用增重法对相变调温织物上的微胶囊负载率进行计算, 分别将相变调温织物和纯棉机织物裁剪成 10 cm×10 cm 的正方形样品, 使用电子天平称

重, 计算两者的质量差值, 微胶囊负载率  $Q$  按式(2)计算:

$$Q = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中:  $Q$  为微胶囊负载率, %;  $W_0$  为纯棉机织物的质量, g;  $W_1$  为相变调温织物的质量, g。

根据 GB/T 3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》, 采用数字式织物厚度仪(测试压力 1 kPa, 压脚面积 2000 mm<sup>2</sup>), 对相变调温织物进行厚度测试。

#### 1.3.2 微观形貌观察

将相变调温织物真空喷金, 采用场发射扫描电子显微镜观察其表面形貌。

#### 1.3.3 热学性能测试

采用差示扫描量热仪测试相变调温织物的储热性能, 测试温度范围为 0~50 °C, 升温速率为 10 °C/min, 液氮制冷保护。

采用导热系数测量仪测试相变调温织物的导热系数, 具体方法如下: 准备 2 块边长 ≥ 25 mm 的相变调温织物, 将它们上下叠合并保持表面平整, 将探头置于 2 块织物之间进行测试。

#### 1.3.4 表面升温速率测试

采用在线式红外热成像仪测试镶拼调温织物的表面升温速率, 具体步骤如下: 将镶拼调温织物在 5 °C 的环境下冷却 2~3 min, 确保其温度保持在相变点以下; 将冷却后的织物置于 50 °C 的环境中升温, 利用红外热成像仪实时记录其升温过程的温度变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 负载率和织物厚度

根据式(2)计算得出, 浸轧整理后织物的微胶囊负载率为 62.6%, 说明该工艺可使相变微胶囊有效附着于纯棉机织物上。织物厚度测试表明, 相变调温织物的厚度为 0.568 mm, 和纯棉机织物的厚度(0.506 mm)相比仅增加 0.062 mm, 差异不显著, 说明通过浸轧和热压工艺制备的相变调温织物对厚度影响较小。

### 2.2 微观形貌分析

图 2 为相变调温织物的 FESEM 图像, 棉纤维表面分布着球形或近球形微胶囊, 部分区域存在着明显的堆积现象, 表明浸轧后的干燥工艺使微胶囊能够较好地附着于纤维表面。

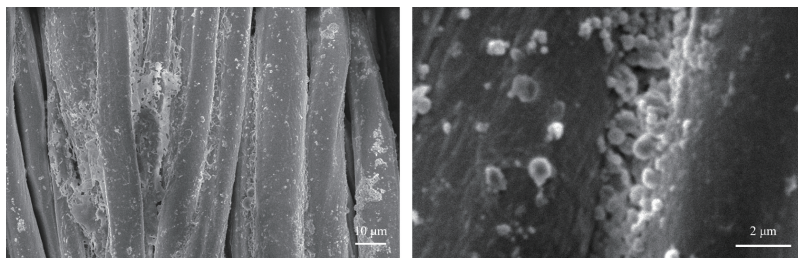
(a) 相变调温织物 ( $\times 1000$ )(b) 相变调温织物 ( $\times 9000$ )

图2 相变调温织物的 FESEM 图

### 2.3 热学性能分析

图3为相变调温织物与纯棉机织物的DSC曲线。由图3可知:纯棉机织物在整个测试温度范围内未出现显著的热流变化,相变调温织物在 $25\sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内存在向下的吸热峰,熔融潜热为 $42.17\text{ J/g}$ ,根据广东省标准化协会发布的团体标准《相变调温纤维及纺织品》,该材料的性能等级处于3A~4A之间,说明其具有良好的温度调节能力;由导热系数测量仪测得相变调温织物的导热系数为 $0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,略高于纯棉机织物( $0.07\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),表明了相变调温织物在具备调温功能的同时,具备一定的热传导能力,有助于热量在织物内部的扩散,从而提升整体的热调节效率。

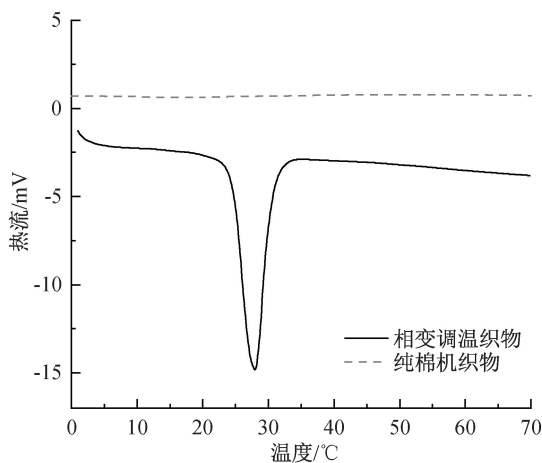


图3 相变调温织物与纯棉机织物的 DSC 曲线

### 2.4 升温速率分析

将1#、2#、3#、4#镶拼调温织物的平均温度变化数据绘制成曲线,并与不含相变材料的纯棉机织物(0#织物)进行对比,结果图4所示。从图4可知:0#织物的温度曲线明显高于镶拼调温织物,尤其是在 $0\sim 80\text{ s}$ 温度迅速上升,最终稳定在 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。根据升温速率的不同,1#—4#镶拼调温织物的升温曲线可分为3个阶段:a) $0\sim 30\text{ s}$ 内镶拼调温织物从 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温度上升速率较快,这是因为镶拼调温织物的温度与环境温差较大,且

相变区域中的相变材料依然处于固体状态,尚未吸收热量,但上升趋势慢于0#织物;b) $30\sim 80\text{ s}$ 为相变吸热阶段,此阶段内镶拼调温织物的温度上升趋势减慢,从 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右上升到 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,上升了约 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温速率显著低于前 $30\text{ s}$ ;c) $80\text{ s}$ 后为低温差阶段,这是因为镶拼调温织物中的相变材料完全液化,不再吸收热量,温差减小导致降温性能减弱,最终温度稳定在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

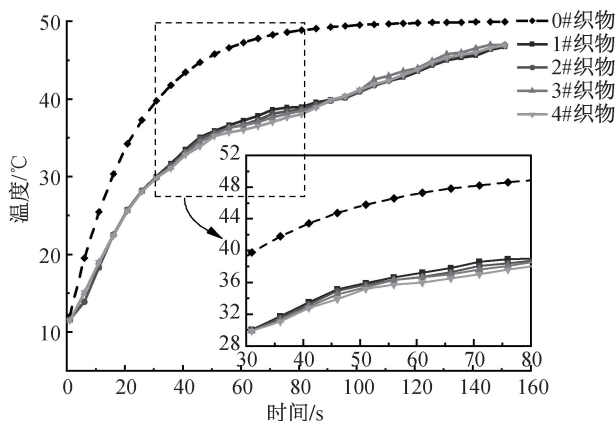


图4 0#—4#织物的实验温度曲线

在织物的相变吸热阶段( $30\sim 80\text{ s}$ ),0#织物的温度从 $39.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而1#—4#镶拼调温织物则呈现明显的温度平台效应,与0#织物之间形成了约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差。具体表现为:1#—4#织物的平均温度分别从 $30、29.9、29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $39、38.7、38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明在相变微胶囊用量和初始温度相同的条件下,随着镶拼调温织物中相变区域分散程度的提高,温度上升幅度呈递减趋势。这是因为相变区域分散程度的增加导致其与非相变区域的传热面积增加,从而增强了相变材料对非相变区域热量的吸收能力,进而使织物整体的平均温度降低。

### 3 镶拼调温织物的模型建立与验证

Ansys 有限元软件在热学领域的应用涵盖了从基本的热传导到复杂的多物理场耦合分析。在 Ansys 中织物模型的相变过程采用瞬态热分析模块

进行仿真,仿真步骤包括几何模型建立、材料定义、网格划分、边界条件及载荷设定。

### 3.1 模型建立

#### 3.1.1 几何模型

首先建立1、3、5、7散点的三维几何织物模型。

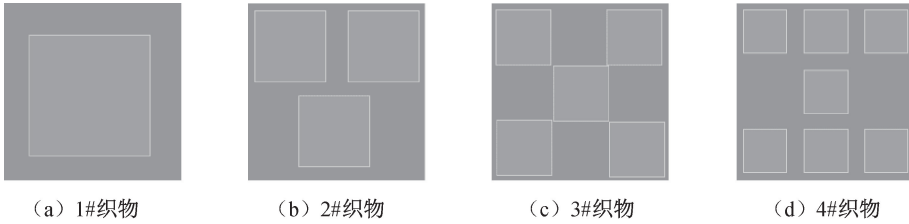


图5 1#—4# 镶拼调温织物有限元模型示意图

#### 3.1.2 材料定义

为了模拟镶拼调温织物的热学行为,需分别设定相变区域与非相变区域的热学性能参数。在仿真计算中,相变材料的潜热需要用焓值来代替,材料热物理性质的具体数值如表1所示。

表1 材料热物理性质表

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
纯棉机织物	473	0.07	1210
相变调温织物	769	0.12	4217

#### 3.1.3 网格划分

网格划分是将生成的几何模型离散化为有限个微小的有限元单元,对每个有限元单元进行计算。1#—4# 织物模型的网格划分节点数分别为286891、292504、299023、300657。

基于织物的尺寸数据,将镶拼调温织物模型简化为长10 cm、宽10 cm、高0.05 cm的立方体。有限元模型示意图如图5所示,其中相变区域以离散的小正方形形式分布于纯棉机织物中,相变区域与非相变区域的面积均为 $50\text{ cm}^2$ 。

#### 3.1.4 边界条件及载荷设定

本实验在相对密闭的环境中进行,初始温度设定为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ,环境温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,空气导热系数为 $0.025\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、空气的运动黏度为 $1.40\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ 、普朗特数为0.705。施加的对流换热系数载荷为 $6.46\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,采用自动时间步长控制,步长设定为10 s。

### 3.2 模拟与验证

#### 3.2.1 模拟分析

图6为1#—4# 镶拼调温织物模型在65 s时的仿真温度云图。由图6知:织物模型的相变区域温度较低,显示为蓝绿色,温度在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右;而非相变区域温度较高,显示为红色,温度在 $47\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。这表明镶拼调温织物的相变区域在高温环境下能够有效保持低温状态。

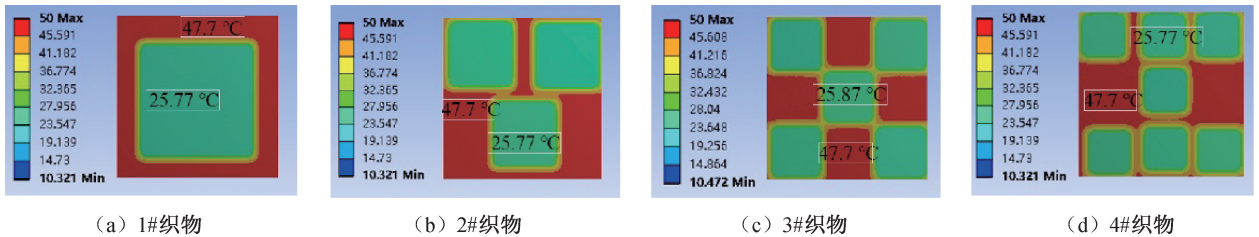


图6 1#—4# 镶拼调温织物模型的仿真温度云图

图7为0#—4# 镶拼调温织物模型的仿真温度曲线。由图7可知:0# 织物与1#—4# 镶拼调温织物的仿真温度曲线呈现显著差异。0# 织物在整个阶段内温度上升迅速,在80 s左右温度接近 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,随后趋于稳定,无明显的平台期;1#—4# 织物在0~30 s内平均温度从 $11\text{ }^\circ\text{C}$ 上升至约 $29\text{ }^\circ\text{C}$ ,升温速率较快,在30~80 s内平均温度从 $29\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $37\text{ }^\circ\text{C}$ ,升温幅度约 $8\text{ }^\circ\text{C}$ ,升温速率减缓,此时相变材料正处于固态向液态转变的过程中,吸收了大量热量,表现出约50 s的平台期。在30~80 s时间

段内,0# 织物的温度曲线明显高于其他织物,从 $39.34\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $48.80\text{ }^\circ\text{C}$ 。1#—4# 织物的温度分别从 $29.22$ 、 $29.07$ 、 $28.83\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $28.70\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $38.08$ 、 $38.04$ 、 $37.99\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $37.87\text{ }^\circ\text{C}$ ,初始温度与最终温度均低于0# 织物,且随着散点数量的增加,分散程度越高,热传递效率越强,因此织物的降温效果明显。

#### 3.2.2 验证分析

将1#—4# 镶拼调温织物在高温环境下的降温模拟结果与实验结果进行对比,结果如图8所示。

图 8 表明: 各织物其温度变化的模拟曲线与实验曲线较为吻合。在高温环境下, 镶拼调温织物的平均温度随着时间的推移而上升, 当温度达到相变点时, 升温速率明显减缓, 说明相变材料在这个过程中发生熔化并吸收热量; 1#—4# 织物的模拟数据与实验数据间存在一定温差, 但 2 组数据结果的最大温差不超过 1.3 °C, 误差在 5% 以内。对比实验结果与模拟结果, 计算得到的相关系数  $R^2$  分别为 0.964、0.956、0.973、0.986, 说明仿真模型具有较高的准确性, 可有效预测不同分散程度镶拼调温织物的热学响应行为。

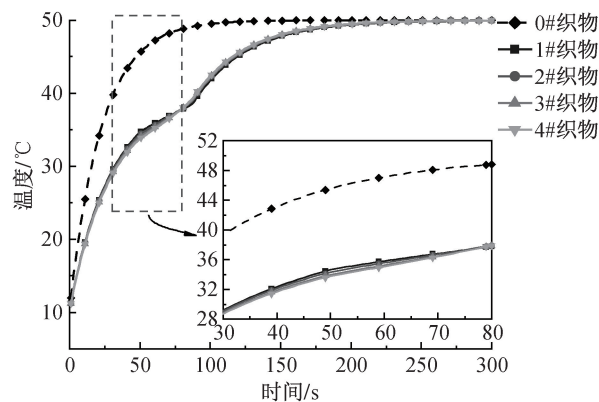
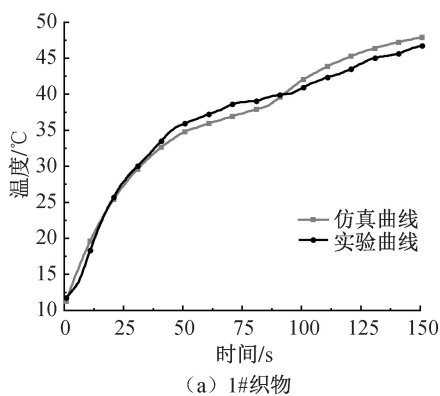
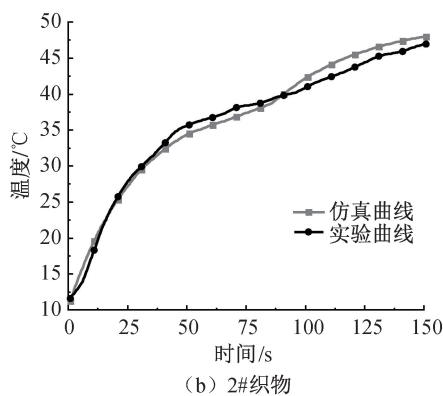


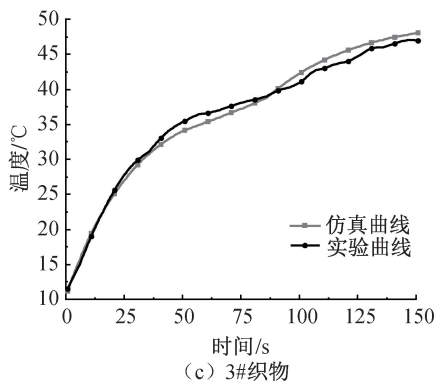
图 7 0#—4# 织物的仿真温度曲线



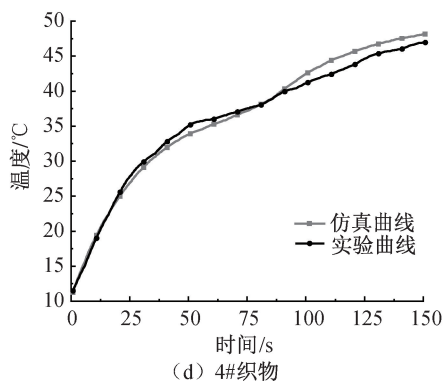
(a) 1# 织物



(b) 2# 织物



(c) 3# 织物



(d) 4# 织物

图 8 不同分散程度的镶拼调温织物仿真和实验温度曲线

## 4 不同图形化分布的织物模型仿真

基于上文已验证的镶拼调温织物模型, 进一步探究更高分散程度的规则图案(5#—8#)及不规则图案(9\*—16\*)模型对降温性能的影响, 以拓展图形化分布设计的优化空间并建立回归方程。分散程度的定义与计算同式(1), 适用于规则与不规则图案的分布特性表征。

### 4.1 高分散程度的规则图案织物模型

#### 4.1.1 模型建立

建立了散点数量为 9、16、25、36 高分散程度的规则图案织物模型, 并编号为 5#、6#、7#、8# 镶

拼调温织物, 通过增加散点数量、拓展分散程度的量化范围, 以覆盖更广泛的热传递场景。有限元模型示意图见图 9, 其中: 小正方形部分为相变区域, 其余部分为非相变区域, 相变区域与非相变区域面积均为  $50 \text{ cm}^2$ ; 5#、6#、7#、8# 织物相变区域的二维图形周长分别 84.85、113.14、141.42 cm 和 169.71 cm, 根据式(1)计算得到 5#、6#、7#、8# 织物中散点的分散程度为 2.121、2.828、3.535、4.243; 5#、6#、7#、8# 织物模型的材料属性与前文模型相同, 初始温度、热对流系数等边界条件亦保持一致, 5#—8# 织物模型的网格划分结果分别为 305532、310448、319021、319858。

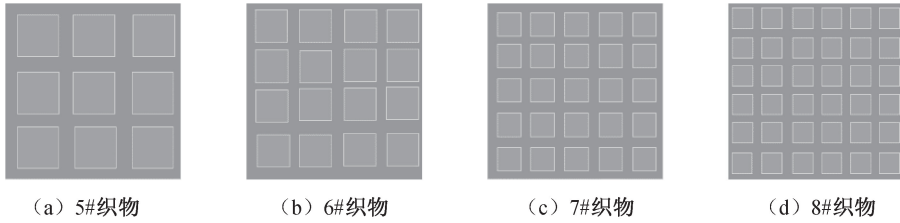


图9 5#—8# 镶拼调温织物有限元模型示意图

### 4.1.2 仿真模拟与结果分析

图10为5#—8# 镶拼调温织物模型的仿真温度云图,在65 s时相变区域温度约为25℃,非相变

区域温度约为47℃,镶拼调温织物中的相变材料已经发生相变,并持续处于吸热状态,因此温度显著低于非相变区域。

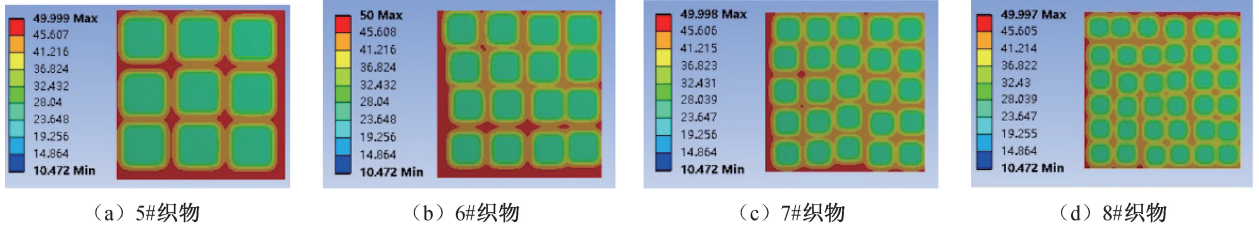


图10 5#—8# 镶拼调温织物模型的仿真温度云图

为了比较不同分散程度的规则织物模型之间温度的差异,将1#—8# 织物模型的平均温度曲线绘制在同一坐标系中,结果如图11所示。由图11可以看出:5#—8# 织物模型在30~80 s时处于相变阶段,其平均温度分别从28.55、28.25、27.87℃和27.60℃上升到37.80、37.71、37.40℃和37.28℃,其中1#与8# 织物在相变阶段中期(约50 s)的温差达到最大值2.447℃;随着分散程度的增大,织物的平均温度逐渐降低,这与1#、2#、3#、4# 织物模型规律相同。

$$y = -0.580291x + 34.4995 \quad (3)$$

式中: $x$  为分散程度; $y$  为平均温度,℃。

图12为规则图案织物模型的分散程度与温度变化之间的拟合曲线,其相关系数 $R^2$ 为0.994,并对线性方程进行 $F$ 检验,验证方程的显著性,结果为 $P = 1.4139 \times 10^{-33}$ ,远低于默认的显著性水平0.05,表明该拟合方程能准确反映规则图案织物模型的分散程度与平均温度的函数关系。

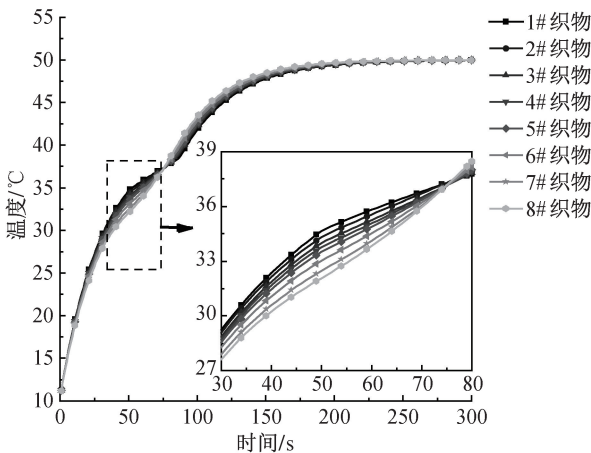


图11 1#—8# 规则图案织物模型的仿真温度曲线

为了探讨镶拼调温织物模型的分散程度与温度变化之间的规律,将计算出的分散程度设为自变量( $x$ )、镶拼调温织物模型在相变阶段的平均温度设为因变量( $y$ ),在SPSS软件中进行回归曲线拟合,结果为:

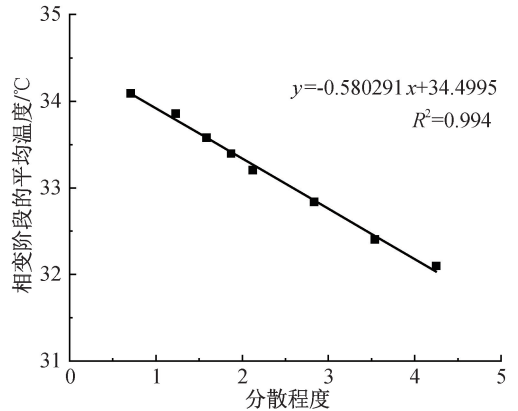


图12 规则图案织物模型分散程度与温度拟合曲线

通过对不同分散程度的镶拼调温织物模型的温度变化进行模拟,并构建分散程度与平均温度变化之间的回归方程(3),用于揭示两者间的数学关系。在该分散程度范围内,温度随分散程度增加呈线性下降趋势,分散程度每增加1单位,温度约下降0.58℃。该结果为预测镶拼调温织物的分散程度对降温性能的影响提供理论依据,对实际生产具有参考意义。

## 4.2 不规则图案织物模型

### 4.2.1 模型建立

为了探索分布图案设计的更多可能性,设计了 8 种不同分散程度的花形图案,进一步研究不规则图案模型的分散程度和温度之间的关系及回归方程,为实际生产中多样化图案设计提供理论依据。镶拼调温织物模型(编号  $9^*$ — $16^*$ )如图 13 所示,

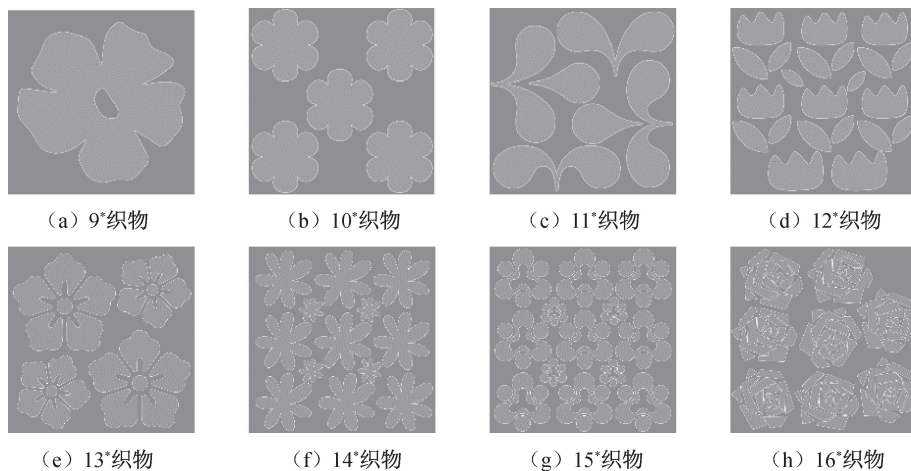


图 13  $9^*$ — $16^*$  镶拼调温织物有限元模型示意图

### 4.2.2 仿真模拟与结果分析

在 Ansys 中对不规则图案的织物模型进行仿真,以探究其分散程度与温度变化之间的关系。模型建立的步骤与前文一致,包括几何模型建立、材料属性定义及边界条件设定,其中  $9^*$ — $16^*$  模型的网

正方形内的花形图案部分为相变区域,其余部分为非相变区域,相变区域与非相变区域面积均为  $50 \text{ cm}^2$ ,  $9^*$ — $16^*$  模型中相变区域的总周长分别为 44.9、76.9、99.6、134.8、150.14、193.624、254.71 cm 和 341.78 cm。由式(1)计算各模型的分散程度,分别为 1.12、1.92、2.49、3.37、3.75、4.84、6.36、8.54。

格划分节点分别为 305152、337716、334236、338859、341122、369505、433032、359557。图 14 为  $9^*$ — $16^*$  不规则图案织物模型的仿真温度云图,从图中可以看出,织物模型在 65 s 时相变区域与非相变区域之间存在明显的温度梯度。

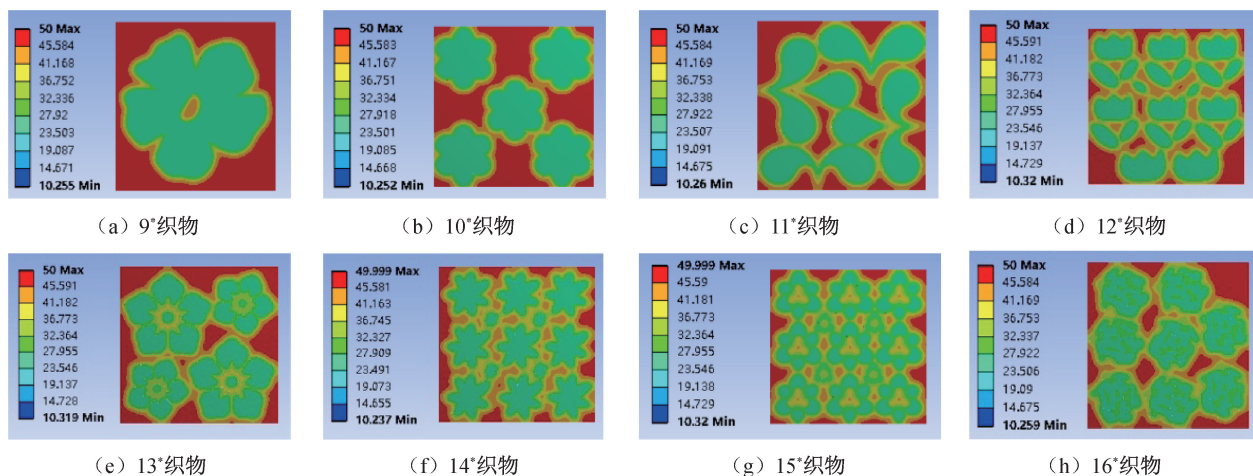


图 14  $9^*$ — $16^*$  不规则图案织物模型的仿真温度云图

图 15 为  $9^*$ — $16^*$  不规则图案织物模型的仿真温度曲线,从图中可以看出,  $9^*$ — $16^*$  织物模型在 30~80 s 时达到相变阶段,所有模型的温度均呈现显著变化,其中分散程度最高的  $16^*$  织物与最低的  $9^*$  织物间最大温差达到  $5.67 \text{ }^\circ\text{C}$ ,表明分散程度对降温效果具有关键影响。分散程度的增加使织物内

部相变区域与非相变区域的接触面积扩大,在相同相变时间内表现出更低的升温幅度。

为了明确不规则图案的分散程度与温度变化之间的关系,将计算出的分散程度设为自变量( $x$ ),镶拼调温织物模型在相变阶段的平均温度设为因变量( $y$ ),在 SPSS 软件中进行了回归曲线拟合,结果为:

$$y = -0.52251x + 36.2806 \quad (4)$$

其中: $x$  为分散程度; $y$  为平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

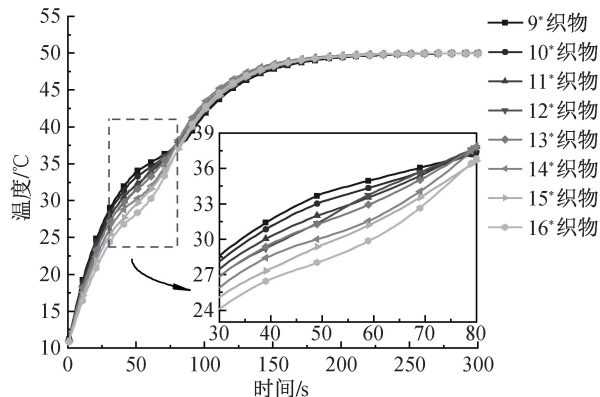


图 15 9°—16° 不规则图案织物模型的仿真温度曲线

图 16 为不规则图案织物模型的分散程度与温度变化之间的拟合曲线,其相关系数  $R^2$  为 0.976,并对线性方程进行  $F$  检验,结果为  $3.0 \times 10^{-6}$ ,远低于默认的显著性水平 0.05,表明该拟合方程能准确反映不规则图案织物模型的分散程度与平均温度的函数关系。

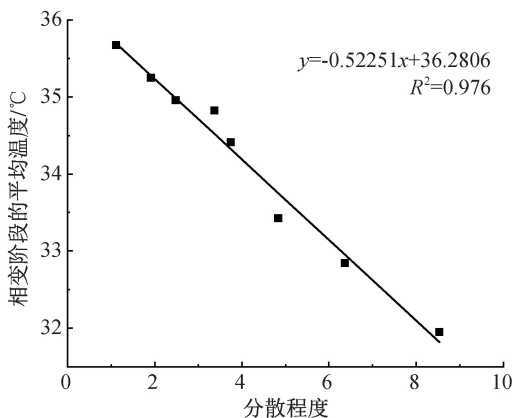


图 16 不规则图案模型分散程度与温度拟合曲线

通过对不同分散程度下不规则图案模型的温度变化进行模拟,构建了分散程度与温度变化之间的回归方程(4),分散程度每增加 1 单位,温度约下降  $0.52^{\circ}\text{C}$ 。随着不规则图案模型的分散程度增加,平均温度显著降低,揭示了分散程度对织物热性能的普适性影响规律,为复杂图案设计提供了理论支撑。

## 5 结论

本文设计并制备了一种基于贴布绣工艺的镶拼调温织物,并探索相变区域图形化分布设计对其降温性能的影响。利用红外热成像仪测试其降温性能,并基于有限元软件模拟不同设计参数下仿真织物的温度变化,结合仿真结果进行回归分析,以揭示

其热传递机制。主要结论如下:

a) 镶拼调温织物具有一定的降温效果,其在相变阶段(30~80 s)呈现约 50 s 的平台期,平均温度由  $29^{\circ}\text{C}$  升至  $38^{\circ}\text{C}$ ,与纯棉机织物形成约  $10^{\circ}\text{C}$  的温差,相变区域通过吸收非相变区域的热量并保持局部低温。

b) 在相变区域面积保持恒定( $50\text{ cm}^2$ )时,不同的图形化分布会导致镶拼调温织物的温度差异。随着镶拼调温织物中相变区域分散程度的提高,温度上升幅度呈递减趋势。

c) 有限元仿真结果与实验数据吻合度较高。1#—4# 织物模型的仿真与实验温度曲线相关系数  $R^2$  均大于 0.95,最大温差不超过  $1.3^{\circ}\text{C}$ 。在规则与不规则图案模型中,分散程度每增加 1 单位,织物平均温度分别下降  $0.58^{\circ}\text{C}$  和  $0.52^{\circ}\text{C}$ 。

## 参考文献:

- [1] 杨建, 张国庆, 刘国金, 等. 复合相变微胶囊制备及其在棉织物上的应用[J]. 纺织学报, 2019, 40(10): 127-133.
- [2] Zhao C Y, Zhang G H. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3813-3832.
- [3] Liu Z J, Wang R, Liu Z X, et al. Employing PCM vests to improve the thermal comfort for staff wearing mascot costumes in summer[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 89: 111732.
- [4] Su Y, Fan Y W, Ma Y L, et al. Flame-retardant phase change material (PCM) for thermal protective application in firefighting protective clothing [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108075.
- [5] 郑晴, 王宏付, 柯莹, 等. 相变降温矿工服的设计与评价[J]. 纺织学报, 2020, 41(3): 124-129.
- [6] El Majd A, Sair S, Ousaleh H A, et al. Advancing tent thermoregulation: Integrating shape-stabilized PCM into fabric design[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95: 112681.
- [7] Bartkowiak G Z Y, Dabrowska A, Marszalek A. Analysis of thermoregulation properties of PCM garments on the basis of ergonomic tests[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(2): 148-159.
- [8] Bhat S R, Meng N F, Kumar K, et al. Keeping babies warm: A non-inferiority trial of a conductive thermal mattress [J]. Archives of Disease in Childhood-Fetal and Neonatal Edition, 2015, 100(4): F309-F312.
- [9] 赖溯青, 齐可心, 曾成, 等. 相变储能材料在纺织服装领域的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(5): 76-80.
- [10] Mehling H, Brütting M, Haussmann T. PCM products and their fields of application—an overview of the state in 2020/2021 [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104354.

- [11] Keyan K, Shumugasundaram T, Shamugasundaram O L, et al. Microencapsulation of PCMs in textiles: A review [J]. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management, 2012, 7(3): 2-5.
- [12] 李东昇, 刘雷良, 吴建兵, 等. 相变微胶囊在调温纺织品中的应用研究进展[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(8): 79-84.
- [13] Fathallah A I, El-Sadek H, Youssef B Y, et al. Intelligent PCM composite for enhancing the thermoregulated properties of different cotton/polyester fabric constructions [J]. Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science, 2023, 20(1): 113-123.
- [14] Yang K, Venkataraman M, Zhang X L, et al. Review: Incorporation of organic PCMs into textiles [J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(2): 798-847.
- [15] Codau E, Codau T C, Lupu I G, et al. Heat transfer simulation through textile porous media [J]. The Journal of the Textile Institute, 2023, 114(2): 257-264.
- [16] Mishra R, Behera B K, Muller M, et al. Finite element modeling based thermodynamic simulation of aerogel embedded nonwoven thermal insulation material [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 164: 106898.
- [17] 孙艳丽. 相变微胶囊低温防护复合织物的结构设计及传热模型研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019: 134-145.
- [18] 胡敏, 王立久, 白媛丽. 界面聚合法制备石蜡微胶囊相变材料 [J]. 低温建筑技术, 2015, 37(1): 34-36.

## 团队介绍

王雪琴学术团队聚焦于时尚与纺织品(丝绸)创新设计研究, 主要研究方向包括弹性与立体纺织品结构设计、软装布艺创新开发、数字化织物设计技术及家居产品研发应用。团队近年来在智能纺织材料、功能性家居纺织品等领域取得多项成果, 设计作品荣获德国 IF 设计奖、英国 A'DESIGN 奖、Perspective AWARD、中国面料与花样设计金奖等十余项国内外奖项, 在纺织设计与应用领域具有一定影响。团队负责人王雪琴老师, 现任浙江理工大学副教授, 毕业于香港理工大学, 获时尚与纺织品设计博士学位; 同时担任浙江省重点哲学社科基地“丝绸与时尚文化研究中心”研究员, 获评杭州市“拱墅工匠”称号、并负责浙江省高技能人才“软装布艺创新工作室”; 主持完成多项省部级科研项目, 发表专业性学术论文 30 余篇, 获得国家授权专利 10 余项, 研究成果广泛应用于家纺、服装与陈设设计等领域, 在产学研结合方面成效显著。

(责任编辑: 张会巍)