高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education

DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26285

基于纳米粒子涂层织物的制备及制冷性能研究的创新综合实验设计

兰春桃 李 敏 麻伍军*

(南通大学纺织服装学院 南通 226019)

摘 要 针对传统实验教学内容陈旧、以验证性实验为主的痛点，旨在提升学生的综合创新能力和复杂工程问题解决能力。以“基于纳米粒子涂层织物的制备及其高效制冷性能分析”科研成果为载体，设计了一项融合材料科学、光学、热力学与纺织工程的多学科交叉创新综合实验。采用单组分、双组分及三组分纳米粒子涂层工艺制备涂层织物，并对织物太阳光谱反射率与被动辐射制冷性能进行系统测试与分析。通过该创新综合实验课程的教学实践，学生的科研创新能力、复杂工程问题解决能力及工程社会意识均得到显著提升。该创新综合实验设计为轻化工程专业实验教学改革提供了一个可复制、可推广的范例。

关键词 辐射制冷织物；纳米粒子涂层；创新综合实验；教学设计

Innovative Comprehensive Experimental Design Based on the Preparation of Nanoparticle-coated Fabrics and Their Cooling Performance Research

Chun-tao Lan, Min Li, Wu-jun Ma*

(*College of Textile and Garment, Nantong University, Nantong 226019*)

Abstract To address the shortcomings of traditional experimental teaching, characterized by outdated content and a predominance of confirmatory experiments, this study aimed to enhance students’ comprehensive innovation capabilities and their ability to solve complex engineering problems. Using the scientific research achievement “preparation of nanoparticle-coated fabrics and analysis of their high-efficiency radiative cooling performance” as a vehicle, a multidisciplinary and innovative comprehensive experiment integrating materials science, optics, thermodynamics, and textile engineering was designed. Coated fabrics were prepared using single-component, two-component, and three-component nanoparticle coating processes, followed by systematic testing and analysis of their solar spectral reflectance and passive radiative cooling performance. The implementation of this innovative comprehensive experimental course in teaching practice demonstrated a significant improvement in students’ scientific research innovation abilities, complex engineering problem-solving skills, and engineering social awareness. This innovative comprehensive experimental design provides a replicable and scalable paradigm for the reform of experimental teaching in the light chemical engineering major.

Keywords Radiative cooling fabric; Nanoparticle coating; Innovative comprehensive experiment; Teaching design

引用: 兰春桃, 李敏, 麻伍军. 基于纳米粒子涂层织物的制备及制冷性能研究的创新综合实验设计. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26285

Citation: Lan, C. T.; Li, M.; Ma, W. J. Innovative comprehensive experimental design based on the preparation of nanoparticle-coated fabrics and their cooling performance research. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26285

2026-06-09 收稿, 2026-07-30 录用

基金项目: 南通大学教学改革研究项目(项目号 2025F10)

* 通信联系人: 麻伍军, E-mail: mawj@ntu.edu.cn

轻化工程专业，特别是纺织化学与染整工程方向，其核心实验课程通常围绕织物前处理、染色、印花及后整理等工艺展开，旨在培养学生掌握纺织品化学加工的基本原理与操作技能[1]。然而，传统的轻化工程实验教学内容相对陈旧，多以验证性实验和重复性操作为主[2]。轻化工程专业实验教学面临的突出问题主要包括实验内容与产业实际需求脱节，实验模式单一，跨学科知识融合不足等问题[3]。这种教学模式难以反映学科前沿成果以及科学研究采用的新技术、新方法，导致学生解决复杂工程问题的能力、创新思维以及跨学科知识融合应用的能力不足。2019年，教育部发布《关于一流本科课程建设的实施意见》，明确指出应提高课程的“高阶性、创新性和挑战度”，强调将科研成果反哺教学，以提升学生的学习兴趣和自主创新能力[4]。因此，对轻化工程专业实验教学内容进行改革，引入前沿科研成果，设计具有综合性和研究性的实验项目，已成为当前教学改革的重要方向。

随着全球气候变暖加剧，夏季极端高温天气频发，户外环境中的热舒适管理成为社会关注的热点[5]。高温天气严重影响人体健康，引发中暑、热衰竭，甚至致死性中暑[6]。织物作为人体的第二皮肤，在抵御外界环境温度波动中发挥关键作用。辐射制冷可实现零能耗、零污染排放的自发降温，具备辐射制冷能力的织物为应对环境变化、调节人体热舒适提供创新方案[7]。户外环境中，太阳辐射是主要热源。为维持人体皮肤32~34 °C的最佳温度区间，户外制冷需使用高反射率织物[8]。依据米氏散射理论，当无机纳米粒子的尺寸与入射光波长相近时，会产生显著的光散射效应[9]。氧化锌(ZnO)、二氧化钛(TiO_2)、硫酸钡($BaSO_4$)等无机纳米粒子均为宽禁带半导体或绝缘体，在太阳光谱范围内具有本征的低吸收特性，是理想的光散射填料。同时，从米氏散射理论出发，3种材料的折射率存在差异(TiO_2折射率约2.7，ZnO约2.0，$BaSO_4$约1.64)，通过优化粒子种类、粒径及复配比例，可实现对太阳光谱不同波段的高效反射[10]。因此，将无机纳米粒子涂层织物的制备及其制冷性能研究引入轻化工程实验教学，具有重要的教学价值和现实意义。

基于此，本研究设计了一项面向轻化工程专业本科生的创新综合实验。实验选用涤纶(PET)织物为基底，ZnO、TiO_2、$BaSO_4$ 3种无机纳米粒子为功能组分，采用涂层工艺制备单组分、双组分及三组分涂层织物，系统评价不同纳米粒子配比的涂层织物的被动辐射制冷性能及循环稳定性。本实验设计立足于纺织品户外制冷的迫切需求，将纳米光学与纺织后整理前沿热点融入综合实验教学，帮助学生深入理解米氏散射理论、涂层整理工艺及被动辐射制冷机理，实现轻化工程理论知识与工程实践的有机融合，提升学生解决复杂工程问题的实践能力、创新思维和工程社会责任感。

1 实验部分

1.1 主要材料与仪器

PET织物由锦州雪松织造厂提供(面密度为75 g/m^2)；ZnO、TiO_2、$BaSO_4$，购于上海麦克林生化科技股份有限公司，3种粒子平均粒径分别为300、300、500 nm (商家提供)；分散剂(AD-4600)、黏结剂(DM-5128)、增稠剂(DM-5233G)，均购于德美化工有限公司。

紫外可见光分光光度仪(型号Lambda 1050+，珀金埃尔默仪器(上海)有限公司)，模拟日光氙灯光源系统(型号CEL-S500，北京中教金源科技有限公司)，太阳光功率计(型号SM206-SOLAR，欣宝科仪)，手持多路温度测试仪(型号JK808，常州市金艾联电子科技有限公司)。

1.2 实验过程

1.2.1 单组分纳米粒子涂层织物的制备

学生精确称量纳米粒子粉体、分散剂、黏结剂与去离子水，配备涂层浆料。在这个过程中，让学生配制不同无机纳米粒子质量分数的浆料。将浆料搅拌1~1.5 h至纳米粒子均匀分散，加入适量增稠剂。将涤纶织物平铺到涂层机上，启动机器使浆料均匀刮印至织物表面。最后放入130 °C烘箱烘干，得到单组分涂层织物。

1.2.2 双组分纳米粒子涂层织物的制备

学生精确称量纳米粒子粉体、分散剂、黏结剂与去离子水，配备涂层浆料。在实验过程中让学生复配不同比例的ZnO/$BaSO_4$、ZnO/TiO_2浆料。按单组分纳米粒子涂层制备工艺制备双组分纳米粒子涂层织物。

1.2.3 三组分纳米粒子涂层织物的制备

学生精确称量纳米粒子粉体、分散剂、黏结剂与去离子水，配备涂层浆料。在实验过程中让学生尝试复配3种纳米粒子不同比例的浆料。按单组分纳米粒子涂层制备工艺制备三组分纳米粒子涂层织物。

2 实验实施过程和考核方式

2.1 实验前准备

教学实施过程如图1所示。首先，在综合实验前，教师要求学生回顾“纺织品印花工艺学”课程中

涂层织物制备的基本原理和主要操作流程，同时引导学生通过中国知网、Web of Science等数据库检索辐射制冷织物、无机纳米粒子涂层、米氏散射等关键词，深入学习米氏散射原理、被动辐射制冷原理、被动辐射制冷织物研究现状、影响制冷性能的关键因素等。在该过程中，教师引导学生思考“制备涂层时必要的成分有哪些”“如何获得具有高反射率的涂层织物”等关键问题。根据专业课和文献调研所学知识，以ZnO、$BaSO_4$、TiO_2为涂层功能粒子，让学生设计单组分、双组分和三组分涂层织物的详细实验方案，并提交给授课教师审核。教师及时对学生的实验方案进行批改。学生根据意见修正方案。



图 1 创新综合实验设计流程

Fig. 1 Innovative comprehensive experimental design flowchart

2.2 实验过程

本实验设计属于“纺织品印花工艺学”的综合实验。该课程是轻化工程本科专业的必修课程，其中该实验为8学时。实验采用分组方式进行，每组3~4人。实验当天教师准备好实验所需的涤纶面料、TiO_2、$BaSO_4$、ZnO、分散剂、黏合剂、去离子水等实验材料，并检查相应设备以确保所有实验设备可正常使用。具体实验过程如下：

2.2.1 单组分纳米粒子涂层织物的课堂实施

实验开始前，教师对涂层成型原理和涂层制备工艺进行复习。结合学生设计的实验方案，详细讲解纳米材料的分散、黏合剂的用量、印花涂料的状态、涂层的制备、高温焙烘的过程，在该过程中重点强调不同纳米粒子对涂料的影响。各实验小组根据实验方案制备不同比例的单组分纳米粒子涂层织物。在实验过程中教师认真观察学生的操作过程，对于不规范的操作及时提醒。将制备的涂层织物进行相应的测试表征，并引导学生对实验数据进行分析。

2.2.2 双组分纳米粒子涂层织物的课堂实施

各实验小组根据实验方案制备双组分纳米粒子涂层织物。学生结合单组分纳米粒子涂层织物制备的相关经验，进行上机操作。教师提醒学生在实验过程中注意对比所制备的双组分纳米粒子色浆与单组分纳米粒子色浆的异同。在实验过程中教师认真观察学生的操作过程，对于不规范的操作及时提醒。将制备的涂层织物进行相应的测试表征，并引导学生对实验数据进行分析。

2.2.3 三组分纳米粒子涂覆织物的课堂实施

各实验小组根据实验方案制备三组分纳米粒子涂层织物。学生结合涂层织物制备的相关经验，进行上机操作。教师提醒学生在实验过程中注意对比所制备的三组分纳米粒子色浆与单组分、双组分纳米粒子色浆的异同。同时，在实验过程中教师认真观察学生的操作过程，对于不规范的操作及时提醒。将制备的涂层织物进行相应的测试表征，并引导学生对实验数据进行分析。

2.3 实验数据处理与分析

学生汇总实验过程中获得的相关数据并进行分类处理。根据所得结果讨论TiO_2、$BaSO_4$、ZnO 3种纳米粒子涂层织物的反射率和降温性能，明晰3种纳米粒子的反射特性。分析两组分和三组分涂层织物中各组分的调控对织物性能的影响规律，得出合理的实验结论。同时，查阅相关文献，进一步理解不同无机纳米粒子在被动辐射制冷方面的优势和不足。每个实验小组结合文献调研与所得的实验数据，撰写一份包括结果与分析的实验报告。

2.4 综合评价

学生的实验成绩评价由实验前准备、实验过程和实验报告3部分表现组成，分别占比25%、50%和25%。各部分的具体评分细则如下。

实验前准备(25%)包括文献调研与知识预习(10%)，考查学生对米氏散射理论、被动辐射制冷原理及辐射制冷织物研究现状的文献调研深度；实验方案设计(15%)，考查学生设计的单组分、双组分、三组分涂层织物方案的完整性与科学性，重点关注纳米粒子配比梯度设计的合理性及可操作性。

实验过程(50%)包括操作规范性(15%)，考察纳米粒子精确称量、浆料配制、涂层机操作、烘燥处理及仪器测试的规范程度；团队协作与分工(10%)，考察小组内任务分工的合理性及组内协同效率；问题发现与解决能力(15%)，考查学生在遇到浆料分散不均、涂层不均匀、反射率异常等实际问题时，能否自主分析原因并提出有效调整方案；原始数据记录完整性(10%)，考察实验过程中数据与现象是否及时、完整、规范地记录。

实验报告(25%)包括报告结构完整性(5%)，考察实验报告是否包含完整要素；数据处理与误差分析(5%)，考察数据分类、统计、可视化呈现的规范性及误差来源分析的合理性；机理讨论深度(10%)，考查学生对米氏散射理论、复配协同效应等核心机理的分析深度；反思与改进(5%)，考查学生是否能够客观反思实验不足并提出具体改进方向，以及文献补充调研的完整性。

3 实验结果与分析

本次综合实验所制备的高反射制冷织物通过在表面负载高反射率材料，反射太阳能，从而减少热量吸收。依据米氏散射理论，当粒子尺寸与入射光波长处于同一量级时，散射效率最高。本实验所用TiO_2和ZnO的粒径(300 nm)与可见光波长高度匹配，因此对可见光波段产生强烈的米氏散射效应。$BaSO_4$的粒径(500 nm)略大于TiO_2和ZnO，将对可见光–近红外区域的反射贡献更为显著。双组分和三组分复配体系中，不同粒径和不同折射率(TiO_2约2.7，ZnO约2.0，$BaSO_4$约1.64)粒子的组合，形成了粒径分布和折射率的双重互补，不仅引入了折射率对比、增强了界面散射，还通过宽化的粒径分布实现了对更宽光谱波段的高效覆盖。“纺织品印花工艺学”的基本任务是让学生掌握印花基本原理与工艺。本综合实验以纺织品印花工艺学为基础，同时进一步增强学生对功能织物的深层理解。PET织物的光学照片与扫描电镜图分别如图2(a)和2(b)所示。学生通过观察得出该织物为机织平纹组织，组织结构清晰。随后，学生对PET织物的反射性能和被动降温性能表征，发现尽管该织物为白色，但其在380~2500 nm全太阳光谱波段平均反射率仅为37.8% (图2c)。经太阳模拟器辐照340 s后，织物温度从室温升至约44 °C，织物共升温18.4 °C (图2d)。

在单组分纳米粒子涂层织物的制备中，某实验小组分别使用了表1中样品1-1至3-3中涂层材料配比来配备单组分涂层色浆。表1同时总结了各涂层织物在380~2500 nm全太阳光谱的平均反射率和涂层织物相对纯PET织物的降温情况。图3(a)~3(c)分别为该实验小组学生制备的不同质量分数的$BaSO_4$、TiO_2、

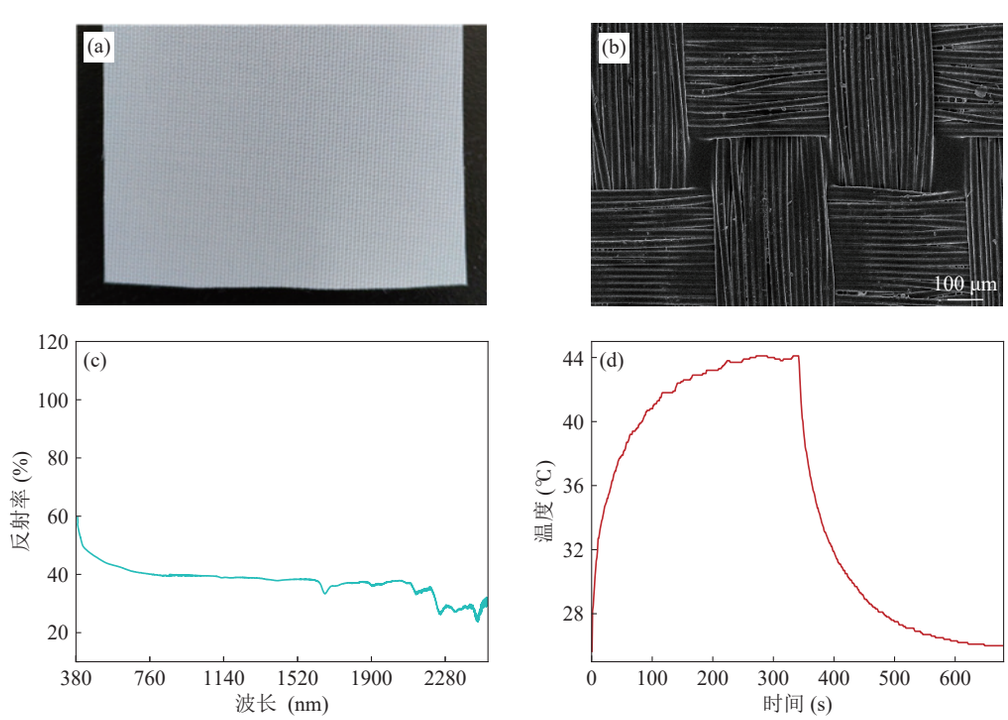

图 2 PET织物的(a)光学照片和(b)扫描电镜图；(c) PET织物反射率曲线；(d) PET织物温度变化曲线

Fig. 2 (a) Optical image and (b) SEM image of the pure PET fabric; (c) Reflectance of PET fabric; (d) Temperature evolution of PET fabric

表 1 涂层织物配料及其降温性能

Table 1 Coated fabric formulations and their cooling performance

样品	纳米粒子种类	配比	太阳光反射率(%)	降温(°C)
1-1	$BaSO_4$	10% [a]	48.1	1.7
1-2	$BaSO_4$	15% [a]	48.8	2.3
1-3	$BaSO_4$	20% [a]	50.2	2.5
1-4	$BaSO_4$	25% [a]	62.8	3.7
1-5	$BaSO_4$	30% [a]	77.6	6.1
2-1	TiO_2	44% [a]	75.5	5.1
2-2	TiO_2	47% [a]	81.1	6.8
2-3	TiO_2	53% [a]	84.9	6.9
3-1	ZnO	52% [a]	80.5	5.5
3-2	ZnO	55% [a]	83.8	6.7
3-3	ZnO	57% [a]	83.3	6.8
4-1	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 1:1 [b]	79.9	6.8
4-2	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 3:1 [b]	80.4	7.9
4-3	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 4:1 [b]	76.9	6.8
4-4	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 5:1 [b]	78.5	8.2
4-5	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 6:1 [b]	81.4	8.6
4-6	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 7:1 [b]	79.6	7.1
4-7	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 1:3 [b]	69.8	6.3
4-8	ZnO/$BaSO_4$	ZnO:$BaSO_4$ = 1:5 [b]	71.1	6.9
5-1	TiO_2/ZnO	TiO_2:ZnO = 1:1 [b]	84.9	7.7
5-2	TiO_2/ZnO	TiO_2:ZnO = 1:3 [b]	83.5	7.3
5-3	TiO_2/ZnO	TiO_2:ZnO = 3:1 [b]	78	6.5
6-1	ZnO/$BaSO_4$/TiO_2	ZnO:$BaSO_4$:TiO_2 = 6:1:3 [b]	81	8.4
6-2	ZnO/$BaSO_4$/TiO_2	ZnO:$BaSO_4$:TiO_2 = 6:1:1 [b]	88.9	8.9
6-3	ZnO/$BaSO_4$/TiO_2	ZnO:$BaSO_4$:TiO_2 = 2:4:4 [b]	75.6	6.7
6-4	ZnO/$BaSO_4$/TiO_2	ZnO:$BaSO_4$:TiO_2 = 6:3:1 [b]	79.2	7.6

[a] 纳米粒子质量占涂料整体质量的百分比；[b] 纳米粒子质量比

ZnO涂层织物在380~2500 nm全太阳光谱的反射率。学生根据所得数据得出$BaSO_4$涂层织物反射率随$BaSO_4$质量分数升高而提升；随TiO_2质量分数升高，织物红外波段反射率提升；ZnO涂层织物所得反射率曲线趋势与TiO_2涂层织物相似，但400~2500 nm波段下降幅度更大。图3(d)~3(f)为不同质量分数的$BaSO_4$、TiO_2、ZnO涂层织物实时温度。学生在该测试过程中发现涂层织物在阳光辐照下的温度均低于纯涤纶织物，且温度随纳米粒子质量分数的升高而降低。通过以上实验分析，学生总结出$BaSO_4$、ZnO、TiO_2 3种纳米粒子在高质量分数下均具备高反射率的特点，在制备高反射制冷织物方面潜力显著。

综合平均反射率与辐射制冷性能，该小组学生选取了单组分实验中3种粒子涂层最优质量分数($BaSO_4$为30%、ZnO为54.50%、TiO_2为53.45%)开展双组分涂层织物实验。复配涂层中各成分比例如表1中的样品4-1至5-3。图4(a)为不同ZnO/$BaSO_4$配比涂层织物的反射率。学生通过观察发现双组分复配后，反射率曲线兼具ZnO与$BaSO_4$的特征。图4(b)为不同TiO_2/ZnO配比涂层织物反射率。相较于TiO_2和ZnO单组分涂层，该双组分涂层织物红外波段反射率提升。图4(c)为ZnO与$BaSO_4$复配涂层织物实时温度。ZnO:$BaSO_4$质量比为6:1的织物温度低于其他配比。图4(d)表明TiO_2:ZnO 质量比为 1:1的织物在太阳光辐照下温度低于其他配比织物。学生从双组分涂层织物研究结果中得出，不同纳米粒子间的协同效应

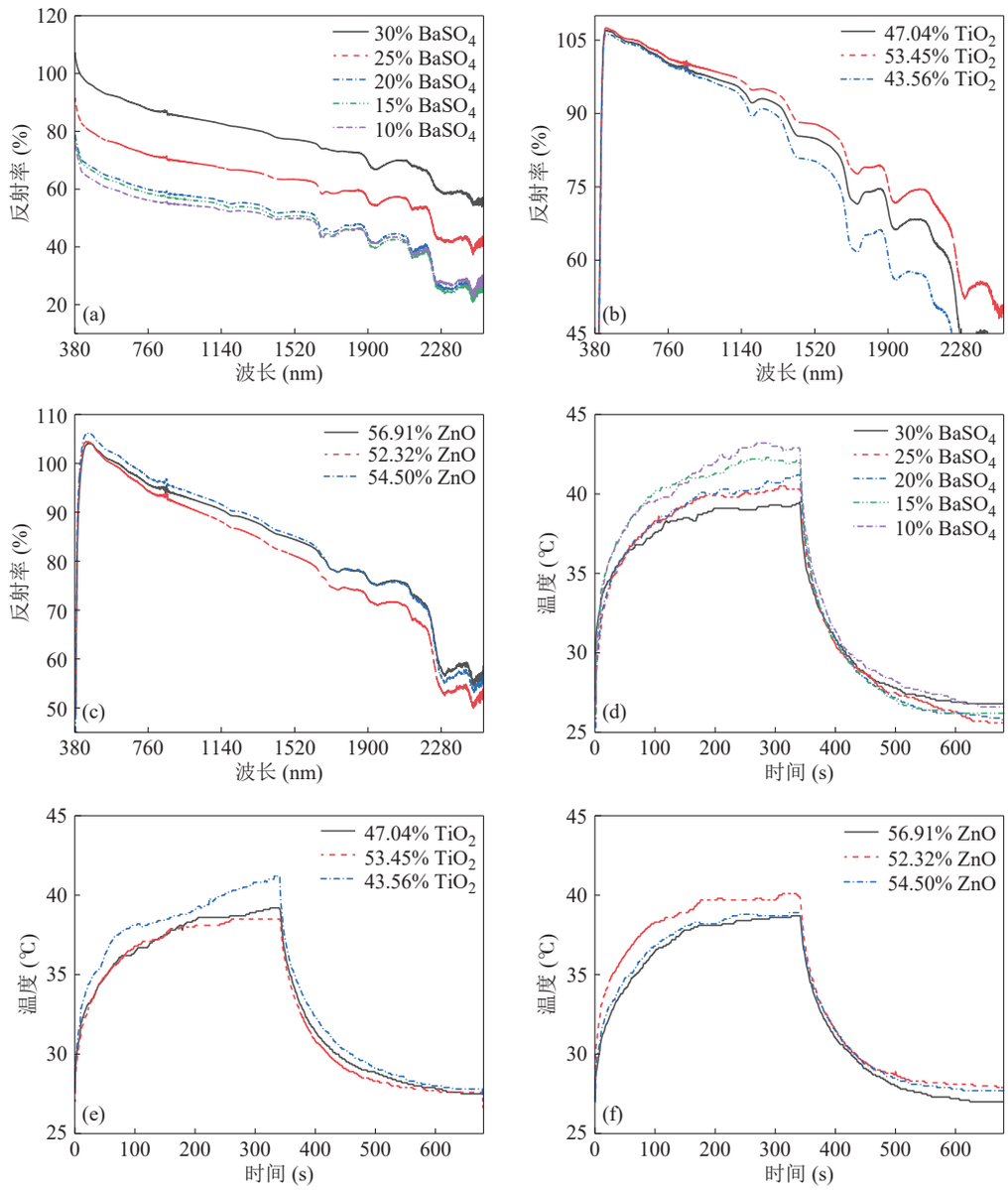

图 3 不同质量分数的(a) $BaSO_4$, (b) TiO_2和(c) ZnO涂层织物太阳光谱反射率；不同质量分数的(d) $BaSO_4$, (e) TiO_2和(f) ZnO涂层织物实时温度

Fig. 3 Reflectance of (a) $BaSO_4$, (b) TiO_2, and (c) ZnO coated fabrics with different mass fractions; Real-time temperature of (d) $BaSO_4$, (e) TiO_2 and (f) ZnO coated fabrics with different mass fractions

对织物制冷性能影响显著，双组分复配可充分发挥各粒子的反射特性。

该组学生进一步采用$BaSO_4$、ZnO、TiO_2 3种纳米粒子复配制备涂层织物。涂层制备过程中3种纳米粒子比例如表1中样品6-1至6-4所示。图5(a)为三组分涂层织物的反射率。通过分析学生得出ZnO含量更高的复合涂层织物反射率更高。而且，ZnO:$BaSO_4$:TiO_2质量比为6:1:1时，织物反射率高于其他配比，平均反射率达88.9%。学生在太阳辐照下发现在该比例下织物温度低于其他试样，最高温度仅约37 °C (图5b)。此外，学生在实验过程中还发现涂层厚度也影响织物制冷性能。学生通过控制涂层机刮刀与织物间的间距来获得不同厚度的涂层。不同设定间距织物的实时温度如图5(c)。设定间距为350 μm时，织物制冷性能最优。

4 教学效果分析

本创新综合实验是轻化工程专业学生利用所学涂层印花知识在新的功能领域的实际应用，具有较高的挑战性。整个实验设计具有系统性，能够有效地帮助学生巩固印花相关的专业知识。同时，在实验过程中，学生自主完成文献调研、色浆配制、涂层工艺

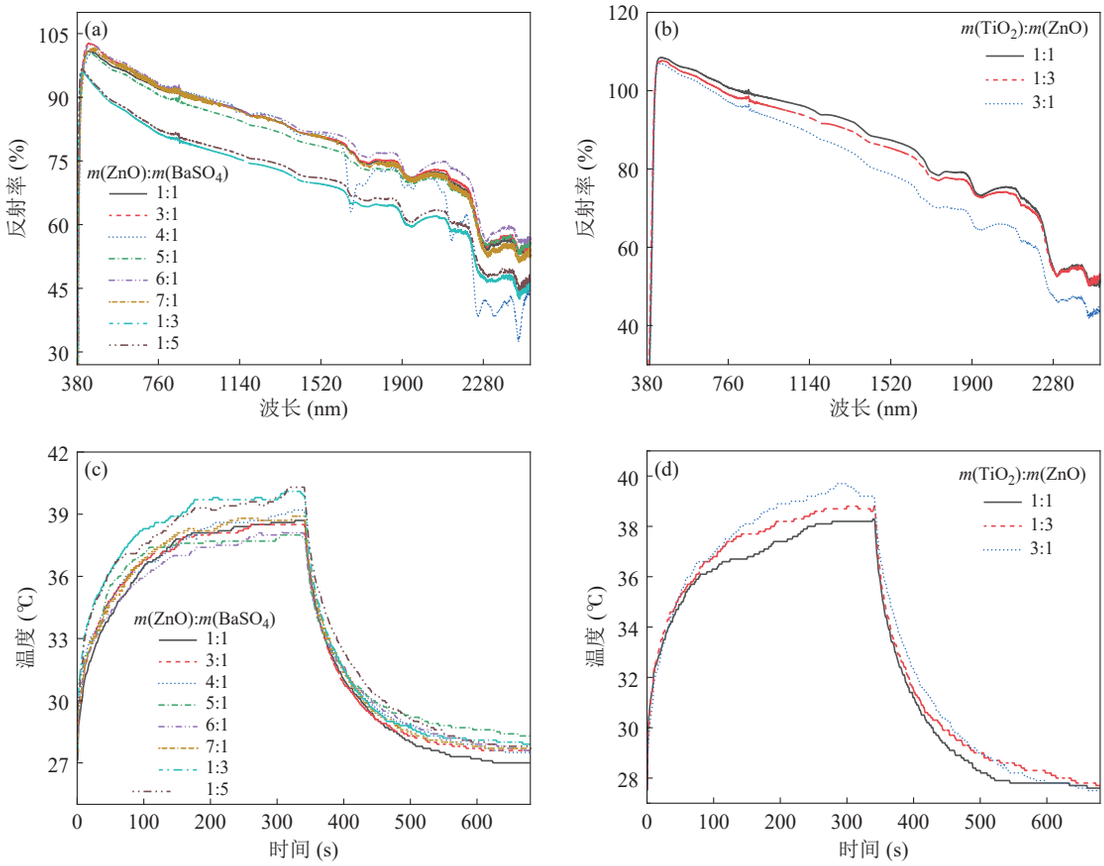

图 4 (a)不同ZnO/$BaSO_4$配比和(b)不同TiO_2/ZnO配比涂层织物的太阳光谱反射率; (c)不同ZnO/$BaSO_4$配比涂层织物和(d)不同TiO_2/ZnO配比实时温度

Fig. 4 (a) The reflectance of coated fabrics with different ZnO/$BaSO_4$ ratios in the solar spectrum, (b) the reflectance of coated fabrics with different TiO_2/ZnO ratios in the solar spectrum, the real-time temperature of coated fabrics with different (c) ZnO/$BaSO_4$ ratios and (d) TiO_2/ZnO ratios

调控、性能测试及数据分析等任务。这一模式有效培养了学生的自主学习能力。面对实验中出现的问题(如浆料分散不均、涂层厚度偏差、反射率异常等),学生需要自主讨论原因、调整方案并重新验证。这种训练极大地激发了学生探索未知世界的科学热情,也培养了其批判性思维和工程实践能力。通过本创新实验课程的开展,学生得以全面认知被动辐射制冷织物领域的前沿知识,增加学生对专业前景的信心。

本创新综合实验以织物涂层整理技术为核心,融合了无机纳米材料分散、浆料流变学调控、光学反射理论等多学科知识,要求学生突破传统印花色彩呈现的思维定式,转向功能赋予的创新设计理念。这种从“染得漂亮”到“功能强大”的认知转变,对学生的知识迁移能力和系统思维提出了更高要求。整个实验按涂层单组分、双组分、三组分的递进式设计,具有较强的系统性和科学性。在单组分阶段,学生通过调控ZnO、TiO_2、$BaSO_4$ 3种纳米粒子的质量分数,建立涂层成分与反射率关系的基础认知。在制备双组分涂层阶段,学生探究不同粒子间的协同效应,理解复配体系“1+1 > 2”的增强机制。在三组分涂层织物制备阶段,学生综合运用前期知识,寻找最优配比并验证其制冷性能。

无机纳米粒子涂层织物的制备与测试环节,为学生提供了多维度的能力训练平台。在制备阶段,学生需要精确称量纳米粉体、调控浆料黏度、设定涂层厚度。在测试阶段,学生需要独立操作太阳光模拟器及多通道温度测试仪等专业设备,学习数据处理软件进行统计分析。同时,小组内合理分工、高效沟通与协同推进的实验模式,也全面锻炼了学生的团队协作水平。通过本创新实验课程的开展,学生从米氏散射的光学机理,再到涂层工艺,逐步建立起了从微观粒子设计到宏观功能实现的知识体系。许多学生在实验报告中表示,原本以为轻化工程只是染布和印花,没想到还可以做出比普通织物低约9 °C的高科技面料,这极大地增强了他们对专业前景的信心和

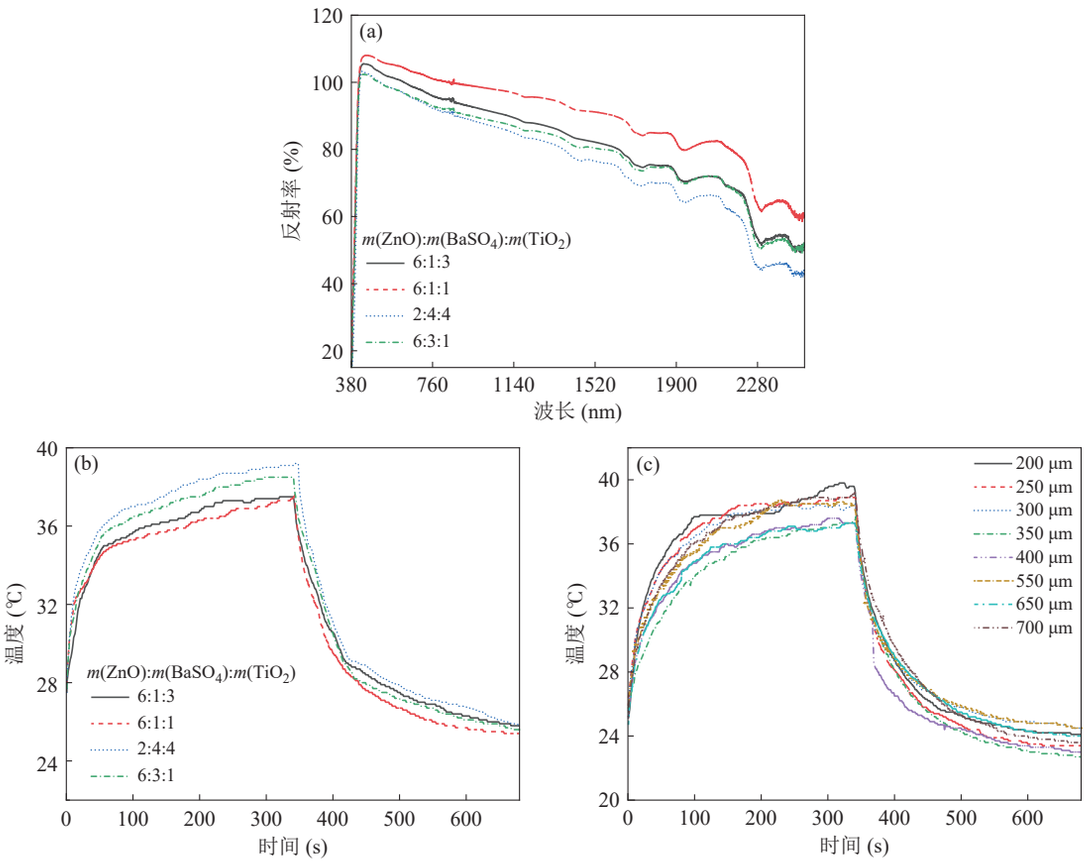

图 5 (a)不同$ZnO/BaSO_4/TiO_2$配比涂层织物太阳光谱反射率、(b)实时温度, (c)不同涂层机间距的三组分涂层织物实时温度

Fig. 5 (a) The reflectance of coated fabrics with different $ZnO/BaSO_4/TiO_2$ ratios in the solar spectrum, (b) the real-time temperature of coated fabrics, (c) the real-time temperature of coated fabrics with different setting distances of the coating machine

对学科价值的认同感。

为进一步科学评价本创新综合实验的教学成效，我们对参与了本课程的32名学生进行了课程前后对比问卷调查(100分制)，从文献调研能力、实验方案设计能力、专业仪器操作、数据分析能力、团队协作能力、专业认同感6个维度进行测评，结果如图6所示。数据显示，各维度实验后平均得分均显著高于实验前，其中“专业认同感”提升最为突出(增加28.7分)，印证了学生从染布印花到功能材料认知转变的深度；“实验方案自主设计能力”次之(增加25.8分)，反映了从按方操作到自主设计教学目标的达成；其余维度亦实现15.7~18.5分的显著提升。以上数据表明，本创新综合实验不仅在知识传授和技能训练层面成效显著，更在激发专业兴趣、培养创新思维和提升自主学习能力等深层教学目标上发挥了积极作用。

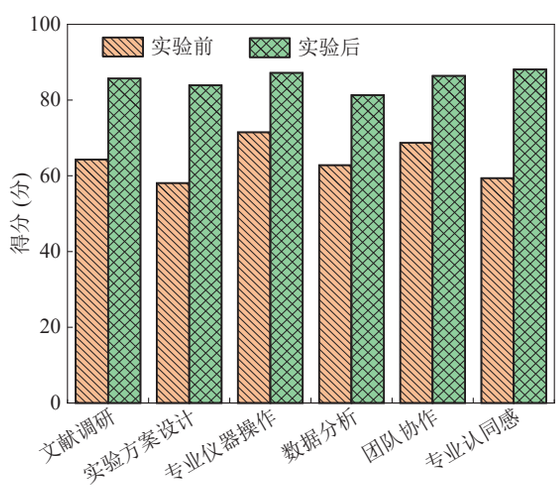

图 6 学生在创新综合实验前后能力变化

Fig. 6 Changes in students' abilities before and after the comprehensive innovation experiment

5 结语

本综合实验以具有科研前沿的辐射制冷织物为目标，设计了一个适合轻化工程专业本科生的创新综合实验课程。该课程以无机纳米粒子涂层整理技术为核心，引导学生主动查阅文献、自主设计实验方案，系统研究了ZnO、TiO_2、$BaSO_4$单组分及复配涂层织物的太阳光谱反射特性与被动辐射制冷性能。通过递进式实验设计，学生成功制备出具有高反射率

和显著降温效果的涂层织物。本课程紧密结合新工科背景下轻化工程专业实践课程改革要求，紧扣户外热舒适管理与零能耗辐射制冷这一科学前沿热点问题。通过本实验课程的学习，学生不仅掌握了常用科学表征设备的操作方法，熟悉了功能性涂层织物的制备工艺流程，更提升了理论联系实际的能力以及工程实践能力。更为重要的是，本实验课程有效提高了学生发现问题、分析问题、解决问题的能力。当学生亲眼看到自己亲手制备的涂层织物在太阳模拟器辐照下温度显著低于普通织物时，学习的获得感和成就感得到了极大增强，对专业前景的信心也显著提升。

综上所述，本创新综合实验成功将科研成果转化为教学资源，为轻化工程专业实验教学改革提供了可复制、可推广的范例，有助于实现创新型、复合型、应用型人才培养的目标。

参 考 文 献

1 史彩云,王祥荣,魏兴. 新工科背景下轻化工程(染整)专业实验课程教学改革探索. 纺织服装教育, **2024**, 39, 96−100.

2 任燕,邢建伟,习智华,刘呈坤. 轻化工程专业综合设计性实验的探索与实践. 教学研究, **2017**, 1, 59−61.

3 田安丽,王春霞,殷允杰,张丽平. 轻化工程专业三阶梯式实验教学体系构建: 以江南大学为例. 纺织科技进展, **2025**, 47, 75−77.

4 张芹,岳大光,刘文杰,孙振翠,梁军. “两性一度”框架下的实践课程混合式教学改革研究. 实验科学与技术, **2022**, 20, 42−46.

5 Wu, R. H.; Sui, C. X.; Chen, T. H.; Zhou, Z. R.; Li, Q. Z.; Yan, G. B.; Han, Y.; Liang, J. W.; Hung, P. J.; Luo, E.; Talapin, D. V.; Hsu, P. C. Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands. *Science*, **2024**, 384(6701), 1203−1212.

6 Wu, R. H.; Chen, T. H.; Hsu, P. C. Stay healthy under global warming: a review of wearable technology for thermoregulation. *EcoMat*, **2023**, 5(10), e12396.

7 Ahmed, N.; Xiong, X. H.; Zhang, L. Z.; Sattar, F.; Chen, B.; Jing, T.; Cui, J. X. Designing the future of cooling: superhydrophobic passive daytime radiative cooling systems. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(19), 27629−27650.

8 Zeng, S. N.; Pian, S. J.; Su, M. Y.; Wang, Z. N.; Wu, M. Q.; Liu, X. H.; Chen, M. Y.; Xiang, Y. Z.; Wu, J. W.; Zhang, M. N.; Cen, Q. Q.; Tang, Y. W.; Zhou, X. H.; Huang, Z. H.; Wang, R.; Tunuhe, A.; Sun, X. Y.; Xia, Z. G.; Tian, M. W.; Chen, M.; Ma, X.; Yang, L. Y.; Zhou, J.; Zhou, H. M.; Yang, Q.; Li, X.; Ma, Y. G.; Tao, G. M. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling. *Science*, **2021**, 373(6555), 692−696.

9 Cheng, N. B.; Miao, D. Y.; Wang, C.; Lin, Y. Y.; Babar, A. A.; Wang, X. F.; Wang, Z. H.; Yu, J. Y.; Ding, B. Nanosphere-structured hierarchically porous PVDF-HFP fabric for passive daytime radiative cooling *via* one-step water vapor-induced phase separation. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 460, 141581.

10 Zhu, B.; Li, W.; Zhang, Q.; Li, D.; Liu, X.; Wang, Y. X.; Xu, N.; Wu, Z.; Li, J. L.; Li, X. Q.; Catrysse, P. B.; Xu, W. L.; Fan, S. H.; Zhu, J. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocessed silk. *Nat. Nanotechnol.*, **2021**, 16(12), 1342−1348.