

# 面向太阳能热管理的炭化榉木/聚乙二醇复合相变材料

马振钧, 党 奔, 杨晨辉\*

(东北林业大学木本油料资源利用全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**为实现木材基相变材料的高储能密度、优异循环稳定性与高效光热转换的协同,提出一种协同工程策略。将天然榉木于 900℃ 炭化构建定向孔道碳骨架,赋予其宽光谱吸收能力;采用动态真空浸渍法负载聚乙二醇,并通过六亚甲基二异氰酸酯原位交联封装。所得复合材料太阳光吸收优异,30 min 升温至 72℃,相变焓达 170.24 J/g。经 50 次循环,焓值保留率 95%,为高效太阳能热能管理提供了先进生物基材料路径。

**关键词:**榉木;光热转换;热能存储;热循环稳定性;高温炭化

中图分类号:TQ351.21

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0191-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.032

## Carbonized beech/polyethylene glycol composite phase change material for solar thermal management

MA Zhen-jun, DANG Ben, YANG Chen-hui\*

(State Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization, Northeast Forestry University,  
Harbin 150040, China)

**Abstract:**To achieve a synergistic integration of high energy storage density, excellent cycling stability, and efficient solar-to-thermal energy conversion in wood-based phase-change materials, a synergistic engineering strategy was proposed. Natural beech wood was carbonized at 900℃ to construct a directional pore channel carbon framework, endowing it with broad-spectrum absorption capability. Polyethylene glycol was loaded via a dynamic vacuum impregnation method and encapsulated through in-situ crosslinking with hexamethylene diisocyanate. The resulting composite exhibits excellent solar absorption, reaching 72℃ within 30 min, with a phase change enthalpy of 170.24 J/g. After 50 thermal cycles, the enthalpy retention rate remained at 95%, providing an advanced bio-based material pathway for efficient solar thermal energy management.

**Key words:** beech wood; photothermal conversion; phase-change thermal energy storage; thermal cycle stability; high-temperature carbonization

全球能源短缺和日益严峻的环境压力,催生了对可持续热能存储与管理技术的迫切需求<sup>[1-2]</sup>。相变材料(PCM)凭借其高潜热密度和可靠的等温转变特性,已成为太阳能热收集及建筑能源调控的基石<sup>[3-6]</sup>。在有机相变材料中,聚乙二醇(PEG)因其巨大的相变焓、结构适应性和化学稳定性,成为了一种优选材料<sup>[7-9]</sup>。然而,PEG的实际应用常受限于其尺寸稳定性差,以及在固液转变过程中持续存在的泄漏风险<sup>[10-12]</sup>。此外,由于PEG本身缺乏光捕获能力,需集成外部吸热组件实现其热能存

储功能<sup>[13]</sup>。

为了应对这些挑战,研究人员开发了多孔支架来封装相变材料。天然木材具有可再生性、分级孔隙结构和固有的各向异性,是理想的生物基模板<sup>[14-15]</sup>。然而,原始木材的效能受限于两个主要瓶颈:内部存储空间有限以及较弱的光吸收能力。这些限制不仅制约了相变材料的最大负载量,还会导致光热转化效率低,进而损害长期稳定性<sup>[16-18]</sup>。虽然传统的炭化工艺已被用于增强光捕获能力<sup>[19-20]</sup>,但要实现高存储容量、强防漏性和高效光热转换之

收稿日期:2026-04-09;修回日期:2026-06-19

基金项目:木本油料资源利用全国重点实验室科研费

作者简介:马振钧(2000-),男,硕士生,研究方向为木基光热相变储能材料,15004962688@163.com;杨晨辉(1987-),男,博士,教授,研究方向为农林生物质分子结构调控及其新型光电功能应用,通讯联系人,yangch@nefu.edu.cn。

间的平衡,仍然是一个巨大的挑战。

在此,本研究展示了一种基于高温炭化的策略,用于构建一种光热响应相变储能木材(HPCW)。通过在900℃惰性气氛下处理天然榉木,将其转化为具有宽光谱吸收特性的三维多孔碳骨架,以解决光热转换难题;同时引入六亚甲基二异氰酸酯(HDI)作为交联剂,与PEG原位聚合形成聚氨酯网络,将其封装在稳定的聚氨酯网络中。这是一种兼具高储能密度、优异防泄漏性能及高效光热转换能力的炭化榉木/PEG复合材料,本研究为制造用于先进热能管理的下一代生物基系统,提供了一种通用且绿色的方法。

## 1 实验部分

### 1.1 实验药品与仪器

本章所用主要实验原料与药品主要包括:榉木(Zelkova serrata),产地为湖北;聚乙二醇(摩尔质量6000)与六亚甲基二异氰酸酯(纯度99%),均由上海阿拉丁公司生产。

实验仪器包括:电子分析天平(型号AG-135,瑞士Mettler-Toledo公司)、氙灯(型号CEL-S500,北京中教金源科技有限公司)、扫描电子显微镜(型号Apreo S HiVac,美国Thermo Scientific公司)、差示扫描量热分析仪(型号DSC-204F1,德国Netzsch公司)、红外热成像仪(型号Testo-869,德国Testo仪器集团)、同步热分析红外气质仪(型号STA6000-SO8,美国PE公司)、傅里叶红外光谱仪(型号Nicolet iS20,美国Thermo Fisher Scientific公司)、接触角测量仪(型号DSA25,德国KRÜSS公司)、紫外-可见-近红外分光光度计(型号UV-3600i plus,日本岛津公司)、光强计(型号CEL-NP2000,北京中教金源科技有限公司)、全自动比表面积及孔径分析仪(型号ASAP 2460,美国麦克默瑞提克公司)、X-射线衍射仪(型号XRD-6100,日本岛津公司)、管式炉(深圳市科晶智达科技有限公司)。

### 1.2 聚乙二醇/炭化榉木相变材料的制备

将山毛榉木块放置于管式炉中,室温状态(20℃)下设置通N<sub>2</sub>气流20 min,以保证管式炉内的空气排空。随后以5℃/min的速率升温56 min至300℃,保持300℃ 60 min。然后以5℃/min的速率升温120 min至900℃,维持温度120 min。随后保持N<sub>2</sub>气流通畅至体系降温至室温。

取50 g聚乙二醇置于烧杯中,于105℃烘箱中加热至完全熔融呈液态。立即将炭化木(CW)与液

态聚乙二醇转移至真空干燥箱进行真空过滤。在80℃条件下进行动态真空浸渍2 h。随后在50℃条件下用HDI真空浸渍30 min。最后使体系冷却至室温,获得最终复合相变材料HPCW。

### 1.3 微观形貌表征

采用Apreo S HiVac扫描电子显微镜对天然木、炭化木和HPCW的表面形貌和微观结构进行观察。测试步骤如下:取少量经处理后的样品,将其粘附于导电胶上,随后对样品表面进行喷金处理;将制备好的样品置于测试平台,通过调整不同放大倍数,直至获得清晰的图像,并记录样品在各放大倍数下的微观形貌。

### 1.4 傅里叶红外光谱(FT-IR)表征

使用Nicolet iS20型傅里叶红外光谱仪对天然木、炭化木和HPCW进行分析。扫描范围为4 000~500 cm<sup>-1</sup>。

### 1.5 X射线衍射谱(XRD)表征

使用XRD-6100型X射线衍射能谱仪对天然木、炭化木、HPCW和PEG-6000的晶型进行表征分析,扫描范围10~80°,扫描速度2°/min。

### 1.6 热储能性能表征

热储能性能的表征使用DSC 204 F1型差示扫描量热仪,在氮气气氛中进行。每次测试取约10 mg样品,装入铝制坩埚,先以5℃/min的速率从0℃升温至80℃,随后再以相同速率从80℃冷却回0℃。

### 1.7 热稳定性能(TG)表征

采用STA 6000-SQ8型同步热分析气质仪对样品天然木、炭化木和HPCW进行热稳定性性能测试,测试条件室温至800℃,升温速率10℃/min,测试过程中用氮气吹扫。

### 1.8 紫外-可见光-近红外光谱(UV-Vis-NIR)表征

采用UV-3600紫外-可见光-近红外分光光度计测试天然木、炭化木和HPCW表面在200~2 500 nm范围内的光吸收性能。

### 1.9 比表面积、孔径结构分析

使用全自动比表面积及孔径分析仪对天然木、炭化木和HPCW进行比表面积和孔径分布测试。

### 1.10 形态稳定性测试

称取相同质量的不同样品,并放置于定性滤纸上,在80℃的烘箱中加热30 min。加热过程中,分别在0、1、5、10、30 min时称重样品质量,并拍照观察泄漏情况。最后计算样品在不同时间的质量百分

数,记录样品在不同时间的外观形貌。

### 1.11 热循环稳定性测试

称取相同质量的不同样品在定形滤纸上,放置于表面皿中并在 80℃ 的烘箱里加热 30 min,然后将样品取出静置,冷却至室温后重新放入烘箱加热,重复以上流程 50 次,最后通过差示扫描量热(DSC)测试分析样品的热循环稳定性。

### 1.12 光热转化性能测试

使用氙灯模拟太阳光,分别将相同质量的 PEG-6000、天然木、炭化木和 HPCW 的光热转换性能。利用光功率计验证氙灯光照强度,每隔 1 min 记录一次温度,同时用红外热成像仪记录样品随时间变化的红外图像。

### 1.13 隔热性测试

使用加热台作为热源,将块状 HPCW 置于加热台上,保持加热台 80℃ 恒温。每隔 1 min 记录一次表面温度,同步使用红外成像仪记录样品的红外图像。

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚乙二醇/炭化榉木相变材料的微观形貌与结构表征

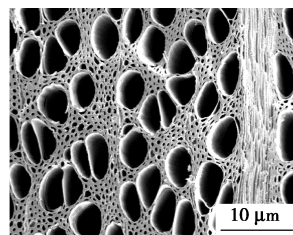
为了深入探究高温炭化及相变材料负载对榉木骨架的影响,我们对样品进行了系统的微观形貌与结构分析。如图 1(a)所示,经过 900℃ 高温炭化处理后的榉木骨架在横截面上清晰地保留了天然的导管结构,孔道呈现规则的椭圆形或圆形排列,孔径分布在 50~150  $\mu\text{m}$  之间,且孔壁完整无坍塌。这表明惰性气氛下的高温热解过程成功构建了具有三维连通性的多孔碳骨架,为后续相变材料的负载提供了理想的物理空间。图 1(b)展示了 HPCW 复合材料的表面形貌,原始的多孔结构已被致密且粗糙的炭化层完全覆盖,未见明显开放孔隙,说明聚乙二醇(PEG)已通过真空浸渍充分填充至内部孔道,并在表面形成了连续的封装层,有效防止了熔融态相变材料的泄漏。

化学结构分析进一步证实了复合材料的成功构建。拉曼光谱[图 1(c)]在 1350  $\text{cm}^{-1}$  和 1580  $\text{cm}^{-1}$  处显示出典型的碳材料 D 峰和 G 峰,其强度比约为 0.92,表明炭化骨架具有中等程度的石墨化有序性。这种介于无定形碳与石墨晶体之间的结构不仅赋予了材料优异的光吸收能力,还提供了良好的热传导通道。傅里叶变换红外光谱[FT-IR,图 1(d)]显

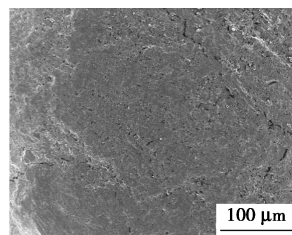
示,炭化榉木在 3400  $\text{cm}^{-1}$  附近的羟基峰及 1700~1500  $\text{cm}^{-1}$  区间的木质素特征峰完全消失,表明含氧官能团已被彻底去除。相比之下,HPCW 样品在 3400  $\text{cm}^{-1}$  处重现了宽化的—OH 吸收峰,并在 2889  $\text{cm}^{-1}$  和 1100  $\text{cm}^{-1}$  处出现了归属于 PEG 中—CH<sub>2</sub>—伸缩振动和 C—O—C 醚键的强特征峰。值得注意的是,1720  $\text{cm}^{-1}$  处出现的明显羰基(C=O)吸收峰以及 1530  $\text{cm}^{-1}$  处的 N—H 弯曲振动峰,证实了六亚甲基二异氰酸酯(HDI)与 PEG 反应生成了聚氨酯网络,实现了原位化学交联封装。

X 射线衍射(XRD)图谱[图 1(e)]揭示了材料晶型结构的变化。天然榉木在  $2\theta=22.5^\circ$  处的纤维素特征宽峰在 HPCW 中消失,表明纤维素已完全转化为非晶碳结构。然而,HPCW 在 19.2° 和 23.3° 处清晰保留了纯 PEG 的特征衍射峰,且峰位无偏移,证明负载过程中的高温处理及化学交联未破坏 PEG 的晶体结构,确保了其正常的熔融-结晶相变行为。

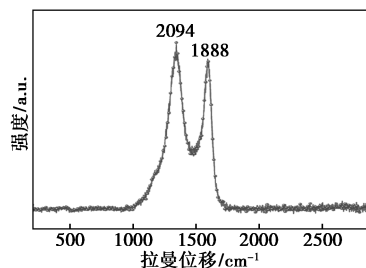
孔隙结构测试定量地反映了材料从天然木材到复合材料的演变过程[图 1(f)~(h)]。高温炭化显著提升了材料的孔隙程度,炭化木的比表面积从天然榉木的 8.32  $\text{m}^2/\text{g}$  急剧增加至 522.58  $\text{m}^2/\text{g}$ 。然而,在负载 PEG 及 HDI 后,HPCW 的比表面积骤降至 3.43  $\text{m}^2/\text{g}$ 。这一下降的数据有力地证明了 PEG 分子链及生成的聚氨酯网络已成功填充并占据了炭化骨架内部的绝大部分微孔和介孔空间,实现了高密度的相变材料负载,同时形成了致密的防泄漏结构。



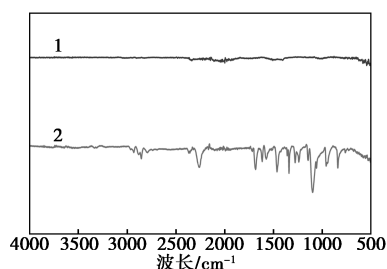
(a) 炭化榉木的扫描电镜形貌



(b) HPCW 的扫描电镜形貌

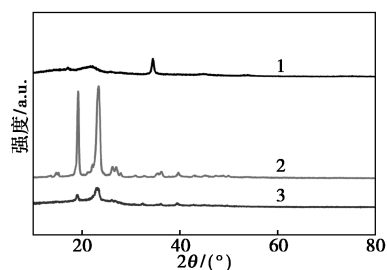


(c) HPCW 的拉曼光谱



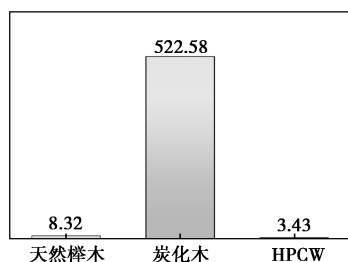
1—炭化榉木;2—HPCW

(d) 炭化榉木(Carbonized Wood)和HPCW的红外光谱(FT-IR)

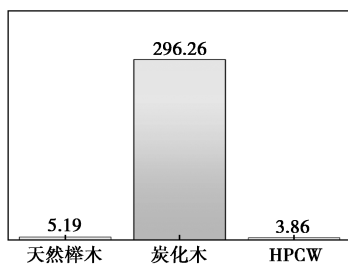


1—天然榉木;2—PEG;3—HPCW

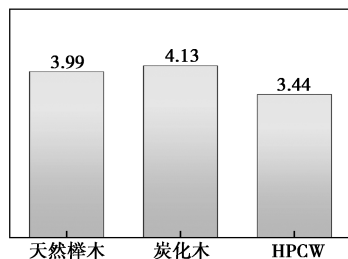
(e) 天然榉木、纯PEG和HPCW的X射线衍射(XRD)图谱



(f) 天然木、炭化木和HPCW的表面积



(g) 天然木、炭化木和HPCW的孔体积



(h) 天然木、炭化木和HPCW的平均孔径

图1 材料的微观形貌与结构表征

## 2.2 聚乙二醇/炭化榉木相变材料的热性能与热稳定性分析

DSC测试揭示了HPCW复合材料的相变行为及其在多孔骨架中的受限效应。如图2(a)、(b)所示,纯PEG 6000的曲线表现出非常典型的相变特征,HPCW复合材料的曲线走势与纯PEG非常相似,在58℃附近出现了吸热峰,在55℃附近出现了放热峰,峰的位置几乎没有发生偏移,这说明经过高温炭化处理和HDI原位聚合封装后,负载在榉木孔道内的PEG依然保持了原有的晶体结构和相变特性,没有因为化学反应或空间限制而改变其熔点。但是仔细观察可以发现,HPCW的峰面积明显小于纯PEG,峰的高度也更低,这是因为HPCW中包含了不具相变能力的炭化榉木骨架和聚氨酯封装层,这些非活性组分占据了部分质量,导致单位质量复合材料中有效储热成分PEG的比例下降,从而降低了整体的相变焓值。

经过50次完整的熔融-结晶循环后,HPCW的热性能表现出惊人的稳定性[图2(c)、(d)]。热流曲线显示第一次循环的黑色线条与第50次循环的红色线条在吸热峰和放热峰的位置上几乎完全重叠,两个峰的宽窄形状也没有出现明显的扭曲或变形,这直接说明材料在经历反复的加热融化与冷却结晶过程后内部结构依然保持稳定。首次测试时材料的熔化焓值和结晶焓值为169.74 J/g,在完成50次循环操作后测得的熔化焓值为173.72 J/g,结晶焓值变为170.24 J/g,这2个关键储能指标的变化幅度都控制在5%以内,证明材料储存和释放热量的能力在长期使用中没有发生明显衰退。

热重分析(TGA)进一步评估了材料在高温环境下的耐受性[图2(e)、(f)]。炭化榉木从室温到600℃重量基本保持在90%以上,只在100℃前有轻微下降,是残留水分蒸发造成的,说明高温炭化后材料本身非常稳定,不易分解。HPCW样品从约280℃开始明显失重,到450℃时重量降到约38%,之后趋于平稳,这个剩余重量比纯PEG高很多,因为纯PEG几乎完全挥发,而HPCW里的炭骨架不会烧掉,所以能留住一部分质量,起到支撑作用。DTG曲线更清楚地显示失重速度变化。炭化榉木在整个温度区间都没有明显的失重峰,说明它没有剧烈分解的过程。HPCW在390℃附近有一个很深的尖峰,这是材料分解最快的地方,对应的是PEG和HDI反应生成的聚氨酯一起分解的温度点。

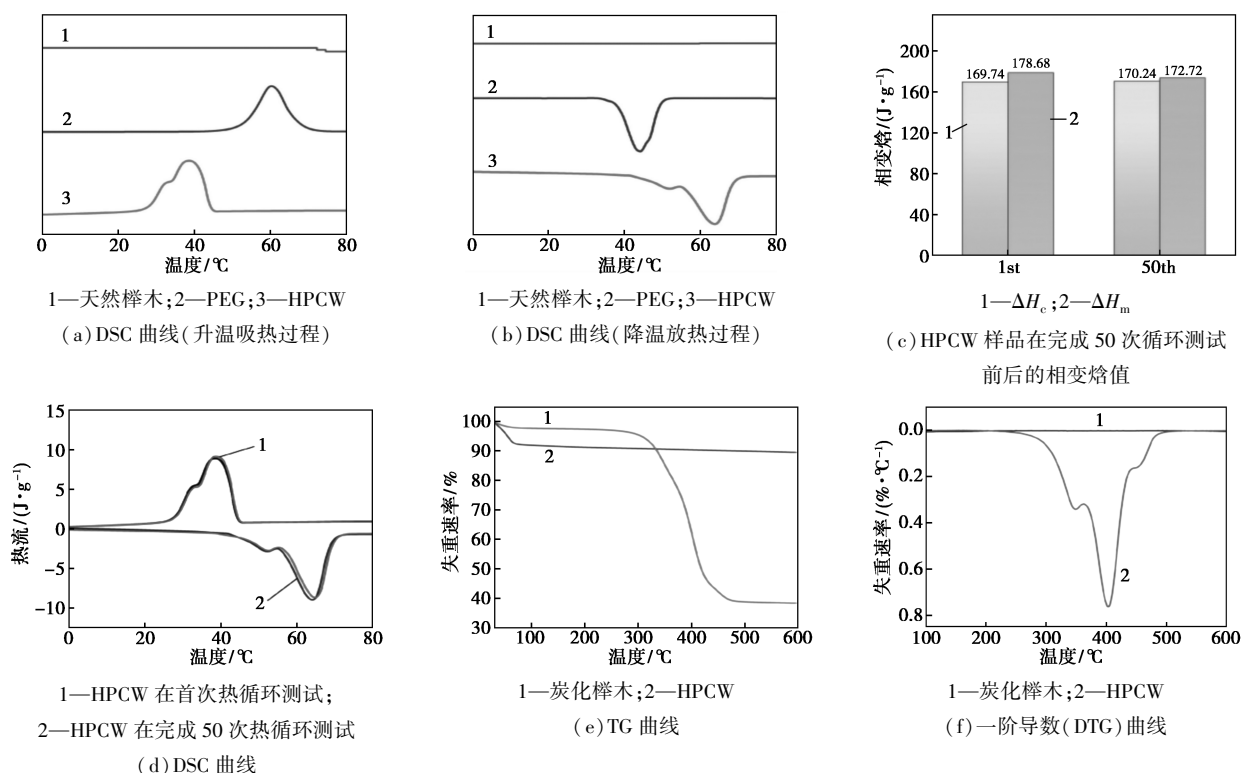


图 2 天然榉木、PEG 和 HPCW 在升温和降温过程中的差示扫描量热(DSC)曲线

### 2.3 聚乙二醇/炭化榉木相变材料的光热转换性能、防泄漏性及热管理应用

作为一种理想的太阳能热能存储材料,HPCW 必须具备高效的光吸收能力以将太阳辐射转化为热能。如图 3(b)所示,HPCW 在 200~2 500 nm 范围内表现出最优异的宽光谱吸收性能,其吸光度在整个测试波段均显著高于天然榉木和单纯炭化榉木。特别是在近红外区域( $>900$  nm),HPCW 的吸光度可达 1.5 以上,表明其能够高效捕获太阳辐射中占比最大的近红外能量。这一结果证实,通过将 PEG 相变材料负载于炭化榉木多孔骨架中,不仅保留了碳材料固有的强光吸收特性,还通过填充效应减少了内部光散射,从而提升了整体光能利用率,为构建高效光热驱动相变储能系统提供了可靠的光学基础。

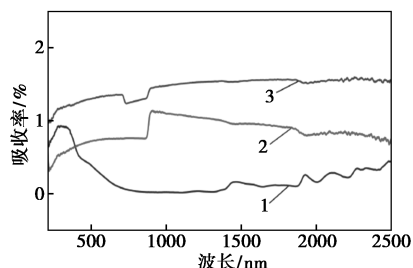
为了验证这一光学优势在实际热管理中的表现,我们记录了各样品在模拟太阳光( $1\text{ kW/m}^2$ )照射下的温度演变过程[图 3(a)]。结果显示,天然榉木和纯 PEG 由于颜色较浅或透明,升温速率缓慢,60 min 内最高温度分别仅为  $42^\circ\text{C}$  和  $61^\circ\text{C}$ 。相反,具有黑色外观的炭化木和 HPCW 表现出极快的升温速率,在前 10 min 内温度即突破  $60^\circ\text{C}$ 。值得注意的是,HPCW 的升温曲线在约  $60^\circ\text{C}$  附近出现了一个明显的“平台期”,这与 DSC 测试中观察到的 PEG

熔融吸热峰温度高度吻合。这表明入射的太阳能不仅用于提升材料显热,更被大量用于驱动 PEG 的固-液相变,以潜热形式存储起来。在撤去光源后,HPCW 的降温速率明显慢于炭化木,这是因为凝固过程中释放的相变潜热延缓了温度下降,体现了其优异的热缓冲能力。

对于相变材料而言,防止其在熔融状态下的泄漏是实际应用的前提。我们通过加热实验和称重法对 HPCW 的形状稳定性进行了严格评估。如图 3(c)所示,将 HPCW 样品置于  $80^\circ\text{C}$  的烘箱中加热 30 min,放置在底部的滤纸上仅观察到极微量的油渍痕迹,未发生明显的液体流淌或渗透。定量分析显示,在 30 min 的加热过程中,样品的重量损失率仅为 4.4%,重量保留率高达 95.6%。这一结果有力地证明了通过 HDI 交联形成的聚氨酯网络以及炭化木孔道的毛细管力共同作用,成功将液态 PEG 锁定在三维骨架内部。这种双重锁固机制(化学交联+物理吸附)确保了材料在反复相变循环中的结构完整性,解决了传统固-液相变材料易泄漏的难题。

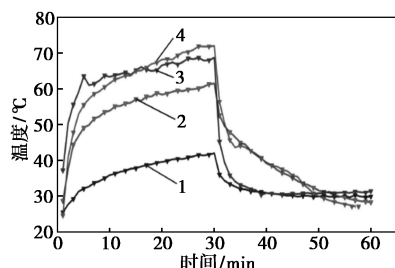
在图 3(d)中,从 0 min 到 15 min,样品整体颜色由深蓝色逐渐变为浅蓝、绿色再过渡到黄色,表明其表面温度持续上升;初始时刻(0 min)样品呈深蓝色,对应约  $26^\circ\text{C}$ ,随着加热进行,颜色逐步变浅,至

15 min 时已转为淡黄色,接近 43℃。热像图中样品中心与边缘区域温差较小,说明热量在材料内部传导均匀,无明显局部过热或冷点。温度-时间曲线进一步量化这一过程:前 4 min 内温度快速攀升,从 26℃ 升至 32℃;之后增速放缓,在 4~6 min 区间出



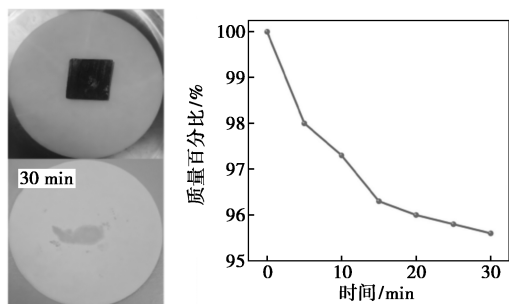
1—天然桦木;2—炭化桦木;3—HPCW

(a) 天然桦木、炭化桦木和 HPCW 的紫外-可见-近红外 (UV-Vis-NIR) 光谱

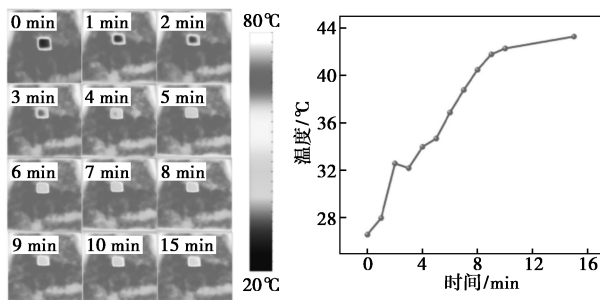


1—天然桦木;2—PEG;3—炭化桦木;4—HPCW 复合材料

(b) 天然桦木、纯 PEG、CW 以及 HPCW 复合材料在光照 (100 mW/cm<sup>2</sup>) 下的温度变化曲线



(c) HPCW 的加热变化实物图和 HPCW 80℃ 下加热 30 min 的质量百分比



(d) HPCW 在 80℃ 加热台上的红外热成像实物图和相对应的温度随时间变化曲线

图 3 相变材料的吸收光谱、温度变化曲线及红外热成像图

现短暂平台期,温度稳定在 32~33℃,这与 PEG 相变吸热过程吻合;6 min 后温度再次缓慢上升,最终在 15 min 达到 43℃。整个升温过程中未出现剧烈波动或断崖式变化,反映材料具有良好的热缓冲能力和结构稳定性。材料内部的 PEG 在熔融阶段持续吸收大量潜热,有效抑制了温度的进一步上升;同时炭化骨架与聚氨酯封装层共同构成热阻网络,延缓了外部热量向内部传递的速度。即使长时间暴露于热源下,材料仍能保持相对低温状态,体现出优异的隔热性能和热管理能力。

### 3 结论

本研究通过多尺度协同工程策略,成功开发了一种基于炭化木材的高性能光热相变储能复合材料 (HPCW)。该材料通过将桦木置于管式炉中在 900℃ 惰性气氛下高温炭化,获得具有宽光谱吸收特性的三维多孔碳骨架,再次孔浸渍 PEG 并 HDI 原位聚合封装制得炭化桦木/PEG 光热相变复合材料 (HPCW)。炭化处理显著提升了骨架石墨化程度 ( $I_D/I_G = 0.92$ ) 与导热性。结果显示,HPCW 光热转换效率大幅提升,30 min 内升温至 72℃,相变焓保持在 170.24 J/g,且有效抑制了泄漏 (失重约 4.4%)。综上所述,HPCW 集高储能密度、出色的光热转换效率、优异的防漏性及长期循环稳定性于一身,是一种极具应用前景的绿色、可持续太阳能热储能与管理材料。

### 参考文献

- [1] 高翔.热能存储及转化技术研究进展[J].模具制造,2023,23(11):118-120.
- [2] 李拴魁,林原,潘锋.热能存储及转化技术进展与展望[J].储能科学与技术,2022,11(5):1551-1562.
- [3] 姜竹,邹博杨,丛琳,等.储热技术研究进展与展望[J].储能科学与技术,2022,11(9):2746-2771.
- [4] 李昭,李宝让,陈豪志,等.相变储热技术研究进展[J].化工进展,2020,39(12):5066-5085.
- [5] 黄玥铭,吴子华,王嘉伟,等.有机复合相变材料光热转换和储热性能的研究进展[J].材料导报,2022,36(S2):440-448.
- [6] 李兴会,陈敏智,周晓燕.复合定形相变材料的封装及应用研究新进展[J].工程科学学报,2020,42(11):1422-1432.
- [7] 李绍伟,傅彬彬,李静.碳化柚子皮基复合相变材料的制备及性能[J].复合材料学报,2022,39(6):2885-2893.
- [8] 朱祥宁,冯黛丽,冯妍卉,等.木基生物质碳化骨架负载聚乙二醇相变材料及表面修饰对蓄热性能的强化[J].物理学报,2023,72(8):326-335.

(下转第 205 页)

而减小,持粘时间基本不受光能影响。

(3) 氢化树脂与非氢化树脂对丙烯酸酯热熔压敏胶的性能影响较为显著,在照射光强  $140 \text{ mW/cm}^2$ ,照射光能  $170 \text{ mJ/cm}^2$  的条件下,增粘树脂含量达 10% 时,两种丙烯酸酯热熔压敏胶的初粘性能和剥离强度均有所提高,而持粘时间下降明显。

(4) 针对不同照射条件与共混比例的丙烯酸酯热熔压敏胶共混体系凝胶率,采用幂律模型进行回归拟合,结果表明该模型能够较好表征其交联行为,可为共混胶体系性能调控及应用参数优化提供参考。

### 参考文献

- [1] 黄毅,蔡捷鸿,张溢辉,等.丙烯酸酯预聚物及其压敏胶的制备与性能研究[J].中国胶粘剂,2024,33(10):31-37.
- [2] Fang C, Jing Y, Zong Y, et al. Preparation and characterization of fluorine-containing acrylic latex PSAs using a reactive surfactant[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2016, 192: 113-119.
- [3] Fonseca G E, McKenna T F, Dube M A. Miniemulsion vs. conventional emulsion polymerization for pressure-sensitive adhesives production[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(9): 2797-2810.
- [4] Lei H, He D, Guo Y, et al. Synthesis and characterization of UV-absorbing fluorine-silicone acrylic resin polymer[J]. Applied Surface Science, 2018, 442: 71-77.
- [5] Jin X, Bai Y, Shao L, et al. Properties of solvent-borne acrylic pressure-sensitive adhesives synthesized by a simple approach[J]. eX-PRESS Polymer Letters, 2009, 3(12): 814-820.
- [6] Sabatini V, C Cattò, Cappelletti G, et al. Protective features, durability and biodegradation study of acrylic and methacrylic fluorinated polymer coatings for marble protection[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 114: 47-57.
- [7] 尉晓丽,傅和青.改性水性丙烯酸酯压敏胶研究进展[J].化工进展,2012,31(1):176-184.
- [8] Drosbeke M A, Aksakal R, Simula A, et al. Biobased acrylic pressure-sensitive adhesives[J]. Progress in Polymer Science, 2021, 117: 101396.
- [9] Bednarczyk P, Mozelewska K, Czech Z. Influence of the UV crosslinking method on the properties of acrylic adhesive[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 102: 102652.
- [10] 王虎,胡维,林克华,等.耐高温保护膜压敏胶的制备及性能研究[J].中国胶粘剂,2023,32(6):1-5,25.
- [11] 宋亚军,梅佳明,沈树人,等.辐射固化压敏胶研究进展[J].精细与专用化学品,2024,32(6):1-5.
- [12] Wongsamut C, Suwanpreedee R, Manuspiya H. Thermoplastic polyurethane-based polycarbonate diol hot melt adhesives: The effect of hard-soft segment ratio on adhesion properties[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 102: 102677.
- [13] Doi T, Takagi H, Shimizu N, et al. Effects of conditions in hot-melt coating process on microphase-separated structures and macroscopic deformation in coated layers composed of di- and triblock copolymer blends[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 152: 106115.
- [14] Wang D, Hao D, Wu J, et al. Rheology-based analysis of the effect of different tackifying resins on the cross-linking behavior of UV SBS pressure-sensitive adhesives[J]. Reactive and Functional Polymers, 2025, 213: 106272.
- [15] Zhang A, Ha Z, Xia Y, et al. Synergistic improvement on both the oil-resistance and heat-resistance performance of a single-component acrylic pressure-sensitive adhesive[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 172: 107096.
- [16] Mallégol J, Bennett G, McDonald P J, et al. Skin development during the film formation of waterborne acrylic pressure-sensitive adhesives containing tackifying resin[J]. The Journal of Adhesion, 2006, 82(3): 217-238.
- [17] 颜标.丙烯酸酯压敏胶改性的研究进展[J].化学工程与装备,2013,(1):144-146.
- [18] 陆炳坤,钱军,石一峰. UV 固化条件对丙烯酸酯热熔压敏胶的性能影响研究[J].现代化工,2025,45(12):187-193.
- [19] 任晓康. 氢化松香/丙烯酸酯复合细乳液的制备及其压敏胶的研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [20] 王宝兰. UV 固化聚丙烯酸酯压敏胶的制备[D]. 武汉:华中师范大学,2023.
- [21] 黄柯萌. 丙烯酸酯压敏胶的共混行为研究[D]. 上海:华东理工大学,2023. ■
- [15] Yang H, Liu Y, Li J. Full-wood photoluminescent and photothermic materials for thermal energy storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403(1): 126406.
- [16] Kazaz O, Karimi N, Kumar S, et al. Thermally enhanced nanocomposite phase change material slurry for solar-thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 5(2): 78.
- [17] Gupta K K, Rathore P K S, Sikarwar B S, et al. Solar to thermal energy storage performance of composite phase change material supported by copper foam loaded with graphite and boron nitride[J]. Solar Energy, 2024, 272: 112459.
- [18] Yu H, Ge X, Xing R, et al. Intelligent thermal control system in dark environments based on azobenzene-graphene photothermal phase-change energy storage composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 309: 113095.
- [19] 肖俊兵,钟湘宇,任建地,等.基于生物碳材料强化的硬脂酸相变材料储热性能研究[J].化工学报,2025,76(3):1312-1322.
- [20] 张永文,杨郁,杨倩倩,等.生物炭/聚乙二醇复合相变材料的制备及其性能研究[J].化学工程师,2024,38(6):6-11. ■

(上接第 196 页)

- [9] 薛锦瑞,周国轩,邓朝辉,等.光热相变储能复合材料的制备及应用研究进展[J].复合材料学报,2025,42(7):3644-3654.
- [10] Liu S, Cao C S, Liu D, et al. Hollow metal-organic-framework-derived magnetic carbon nanocage-based phase change composites for energy storage, photothermal conversion, and microwave absorption[J]. Energy & Fuels, 2025, 39(49): 23352-23365.
- [11] 王嘉伟,吴子华,王元元,等.氧化石墨烯复合相变材料的制备及光热性能[J].工程热物理学报,2023,44(7):1891-1896.
- [12] 全端星,缪文晶,袁长顺,等.聚乙二醇基定型复合相变材料的研究进展[J].储能科学与技术,2025,14(3):1010-1025.
- [13] 邓聪. PEG/GO-CuSO<sub>4</sub>-硫脲复合相变材料的制备及性能[J].江西化工,2021,37(2):83-89.
- [14] Wang J, Yue H, Du Z, et al. Flame-retardant and form-stable delignified wood-based phase change composites with superior energy storage density and reversible thermochromic properties for visual thermoregulation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(9): 3932-3943.