◆研究开发与生态设计◆

含磷低共熔溶剂预处理木材制备阻燃复合相变材料

项　哲[1,2,3]，孟　杨[1,2,3]，谢于辉[1,2,3]，谢德龙[1,2,3]

（1. 昆明理工大学 化学工程学院，云南 昆明　650500；2. 云南省磷化工节能与新材料重点实验室，云南 昆明　650500；
3. 云南省环境友好高分子国际联合实验室，云南 昆明　650500）

［摘　要］针对木基相变材料封装稳定性不足、易燃等问题，以巴尔沙木为封装基体，采用磷酸和氯化胆碱制备含磷低共熔溶剂（P-DES）进行预处理，并通过真空辅助浸渍法封装聚乙二醇（PEG），制备阻燃木基复合相变材料。结果表明，P-DES处理后木材仍保持天然多孔骨架结构，细胞壁表面出现局部微裂隙，增强通透性有利于PEG封装。FTIR和XPS分析表明，P-DES预处理可调控木材细胞壁组分，并将磷元素引入木材骨架。DSC结果显示，复合相变材料的熔融焓为122.03 J/g，焓效率为78.11%，经100次加热–冷却循环后，熔融焓仍保持在122.01 J/g，表明具有良好的储热性能和热循环稳定性。垂直燃烧测试和残炭分析表明，P-DES预处理能够促进木材骨架形成连续稳定的含磷炭层，从而改善复合材料的阻燃性能。该研究为含磷低共熔溶剂构建安全稳定的木基复合相变材料提供了简便有效的方法，也为磷化工产品在阻燃储能材料领域的绿色应用提供了参考。

［关键词］磷系阻燃剂；低共熔溶剂；相变材料；木材；定型封装

［中图分类号］TQ351；TQ314.24+8　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097–4566（2026）07–0016–06

Preparation of flame-retardant composite phase change material using phosphorus-containing deep eutectic solvent-pretreated wood

XIANG Zhe[1,2,3], MENG Yang[1,2,3], XIE Yuhui[1,2,3], XIE Delong[1,2,3]

(1. *Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*; 2. *Yunnan Provincial Key Laboratory of Energy Saving in Phosphorus Chemical Engineering and New Phosphorus Materials, Kunming* 650500, *China*; 3. *The International Joint Laboratory for Sustainable Polymers of Yunnan Province, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In response to the insufficient encapsulation stability and high flammability of wood-based phase change materials, phosphorus containing deep eutectic solvent (P-DES) is prepared using phosphoric acid and choline chloride for pretreatment of Balsha wood, and polyethylene glycol (PEG) is encapsulated by vacuum assisted impregnation method to prepare flame retardant wood-based composite phase change materials. The results show that after P-DES treatment, the wood still maintain natural porous skeleton structure, and local microcracks appear on the cell wall surface, which is beneficial for PEG encapsulation. FTIR and XPS analysis show that P-DES pretreatment can regulate the composition of wood cell walls and introduce phosphorus elements into the wood skeleton. The DSC results show that the melting enthalpy of the composite phase change material is 122.03 J/g, with an enthalpy efficiency of 78.11%. After 100 heating-cooling cycles, the melting enthalpy remains at 122.01 J/g, indicating good thermal storage performance and thermal cycle stability. Vertical combustion testing and residual carbon analysis indicate that P-DES pretreatment can promote the formation of a continuous and stable phosphorus containing carbon layer in the wood skeleton, improving the flame retardancy of the composite material. This study provides a simple and effective method for constructing safe and stable wood-based composite phase change materials using P-DES, and a reference for the green application of phosphorus chemical products in the field of flame retardant energy storage materials.

Key words: phosphorus-based flame retardants; deep eutectic solvent (DES); phase change material (PCM); wood; shape-stabilized encapsulation

收稿日期：2026–04–25

作者简介：项　哲（2001—　），女，辽宁阜新人，在读硕士研究生。

通信作者：孟　杨，讲师，硕士生导师，研究方向为复合相变材料、植物多酚纳米复合材料、阻燃复合材料、二维纳米材料。

基金项目：云南省重点研发计划（202403AA080003）

0　引言

随着能源消耗持续增长和“双碳”目标深入推进，发展先进热能存储技术已成为高效利用能源的重要方向。相变材料（PCM）能够在相变过程中吸收或释放大量潜热，在建筑节能、太阳能热利用和工业余热回收等领域具有应用潜力[1]。然而，聚乙二醇（PEG）、石蜡等常见有机相变材料在使用过程中普遍存在熔融泄漏和易燃等问题，限制了工程应用。近年来，木材因具有天然有序孔道、可再生等特点，被广泛用作PCM的封装基体[2]。为提高木材孔道的通透性和PCM的浸渍效率，已有研究通常采用化学处理去除细胞壁中部分木质素和半纤维素，从而增加有效孔隙[3]。然而，该方法往往涉及多步化学反应，试剂消耗量大，工艺复杂。同时，木质素是木材中含有芳香结构的重要组分，具有一定的热稳定性和成炭潜力[4]，过度去除木质素可能削弱木材在燃烧过程中的成炭保护作用，难以从根本上改善木基复合相变材料的阻燃安全性。

低共熔溶剂（DES）通常由氢键供体和氢键受体组成，具有制备简单、组成可调、挥发性低和环境友好等特点，成为木质纤维素组分分离、结构调控和绿色改性领域的热点方向[5]。与传统脱木质素方法不同，采用适当组成的DES对木材进行预处理，有望在保持木材天然孔道结构的同时，调控半纤维素和木质素在细胞壁中的分布状态，促进木质素迁移、重排或再沉积，从而改善相变材料的浸渍封装效果。与此同时，若DES体系中引入含磷组分，还可在木材骨架中构建含磷阻燃结构，促进燃烧过程中的脱水成炭和炭层稳定化，为提升木基相变材料的封装稳定性和阻燃性能提供新的思路[6]。

基于此，本研究以巴尔沙木为封装基体，采用磷酸和氯化胆碱构建含磷低共熔溶剂（P-DES），对木基框架进行预处理实现木质素原位重排；随后通过真空辅助浸渍法封装PEG，制备木基复合相变材料。通过分析P-DES处理对木材孔道结构、细胞壁组分及含磷结构引入的影响，进一步探讨其对PEG封装稳定性、相变储热性能和阻燃行为的调控作用。本文旨在阐明含磷低共熔溶剂预处理在木材封装基体结构优化与阻燃性能提升中的作用机制，为开发安全稳定的木基复合相变材料提供参考。

1　实验部分

1.1　实验材料与试剂

巴尔沙木，室干材，购自珠海德驰科技有限公司；磷酸（w(H_3PO_4) 85%），购自成都市科隆化学品有限公司；氯化胆碱（w(ChCl) 98%）、聚乙二醇（PEG，M_n=2 000，分析纯），均购自上海麦克林生化科技股份有限公司；去离子水，实验室自制。

1.2　实验设备与性能表征方法

采用扫描电子显微镜（SEM，ZEISS Gemini SEM 300）观察天然木材、P-DES预处理木材及复合相变材料的微观形貌；采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR，Bruker　Tensor-Ⅱ）分析样品的官能团变化，采用X射线光电子能谱仪（XPS，Thermo Scientific　K-Alpha）分析样品表面元素组成。

为了评价纯PEG和定性封装后的复合相变材料的形态稳定性，将样品分别在30 ℃（10 min）、60 ℃（10 min）、80 ℃（10 min）以及80 ℃（30 min）下处理，并采用数码相机记录样品在不同条件下的形态变化。

复合相变材料的相变性能采用差示扫描量热仪（DSC-3）进行测试，测试温度范围为−10～100 ℃，升降温速率为10 ℃/min，氮气气氛保护。复合材料的相变焓效率按式（1）计算：

$$\lambda=\frac{\Delta H_{m,\ \mathrm{CPCM}}}{\Delta H_{m,\ \mathrm{PEG}}}\times 100\%。\tag{1}$$

式中，λ为相变焓效率，%；$\Delta H_{m,\ \mathrm{CPCM}}$为复合相变材料的熔融焓，J/g；$\Delta H_{m,\ \mathrm{PEG}}$为纯PEG的熔融焓，J/g。

阻燃性能通过垂直燃烧和残炭分析进行评价。垂直燃烧（UL-94）测试用于评估复合相变材料的阻燃性能。由于本文中基材样品尺寸较小，因此无法依据GB/T 2408—2021标准进行阻燃性能的等级评定，但可以通过观察改性前后的相变复合材料的燃烧时间、自熄行为以及残炭形貌，宏观评估复合相变材料的阻燃性能。

1.3　P-DES溶液的制备

结合已有研究[7-8]，同时考量低共熔溶剂氢键网络形成的理论基础以及黏度等因素，按摩尔比1∶1称量磷酸（PA）与氯化胆碱（ChCl），置于三口烧瓶中，于60 ℃油浴中磁力搅拌反应3 h，得到均一透明的低共熔溶剂P-DES。冷却至室温后，用超纯水将其稀释为P-DES体积分数分别为25%、50%、75%、100%的溶液，分别标记为P-DES-x（x=25、50、75、100）。超声处理2 h，确保均匀混合，得到系列不同浓度的P-DES溶液。

1.4　P-DES改性木材骨架的制备

将巴尔沙木试样（20 mm × 20 mm × 4 mm）置于不同浓度的P-DES溶液中，采用真空辅助浸渍法

促进 P-DES 进入木材内部，经 5 次抽真空（真空度 0.05 MPa）—泄压循环促进渗透，并在 160 ℃下热固化 1 h，再经水洗、干燥，得到一系列改性木材骨架，记为 PNW-*x*。

1.5 复合相变材料的制备

将 PEG 加热至完全熔融后，分别将天然木材和改性木材骨架浸入熔融的 PEG 中，采用真空辅助浸渍法促进 PEG 充分进入木材孔道，并在 80 ℃下浸渍 24 h，随后取出样品，擦除表面多余 PEG，冷却固化后得到木基复合相变材料。其中，天然木材封装 PEG 所得样品记为 NWPCM，改性木材骨架封装 PEG 所得样品记为 PNWPCM。随后将样品置于 80 ℃烘箱中加热处理，去除表面未稳定封装的 PEG，直至质量基本恒定。

2 结果与讨论

2.1 木材骨架和复合相变材料的化学与结构表征

天然木材、改性木材骨架和复合相变材料的表面 SEM 图见图 1。如图 1 所示，天然木材（NW）呈现典型的蜂窝状多孔结构，但细胞壁表面相对完整致密，这在一定程度上会限制熔融 PEG 向细胞壁内部及孔道深处的渗透。经 P-DES 处理后，所有改性样品仍保留了木材原有的多孔骨架。但随着 P-DES 浓度增大，木材细胞壁表面变粗糙，逐渐出现层状剥离现象，表明 P-DES 预处理有利于提高木材孔道的通透性。

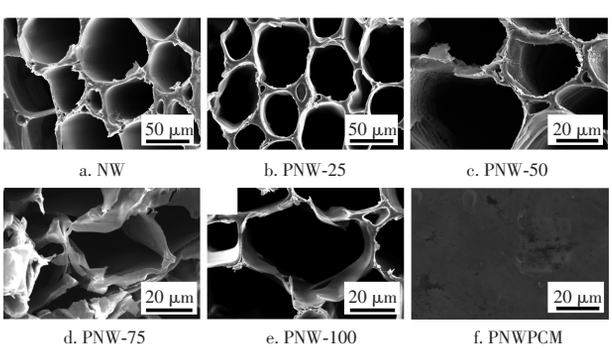


图 1 NW、PNW-25、PNW-50、PNW-75、PNW-100 和 PNWPCM 表面 SEM 图

Fig. 1 SEM images of NW, PNW-25, PNW-50, PNW-75, PNW-100 and PNWPCM

其中，PNW-75 的细胞壁结构变化更为明显，细胞壁变薄且可观察到微裂痕间隙出现。当 P-DES 体积分数继续升高至 100%时，PNW-100 的改性效果有所减弱，这可能是由于高浓度 P-DES 溶液黏度增大，限制了其在木材孔道及细胞壁中的渗透[9]。进一步封装 PEG 后，PNWPCM（由 PNW–75 封装 PEG 所制得，下同）的孔腔被连续致密的相变材料填充，表明熔融 PEG 能够有效进入 P-DES 改性木材骨架内部并实现封装。

改性前后巴尔沙木骨架的傅里叶红外光谱图见图 2。如图 2 所示，NW 在 3 330 cm^{-1} 附近出现宽吸收峰，对应木材中纤维素、半纤维素和木质素羟基的伸缩振动，2 894 cm^{-1} 处峰归属于 C—H 伸缩振动，说明木材基体中多糖骨架结构较为完整[10]。经 P-DES 处理后，PNW-25 和 PNW-75 仍保留上述特征峰，表明含磷低共熔溶剂预处理未破坏木材的基本骨架结构。与此同时，1 733 cm^{-1} 处归属于半纤维素乙酰基或酯基 C═O 的吸收峰明显减弱，说明 P-DES 处理可促进半纤维素部分脱除或酯键断裂，从而有利于打开细胞壁结构[5]。

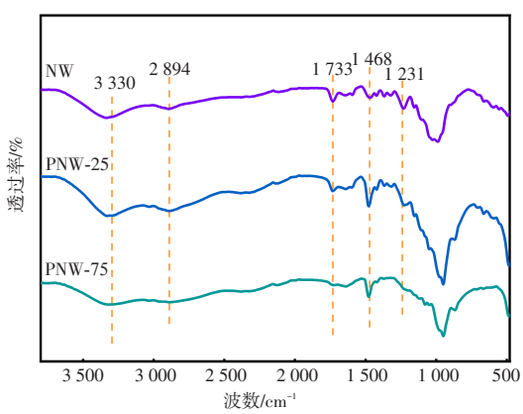
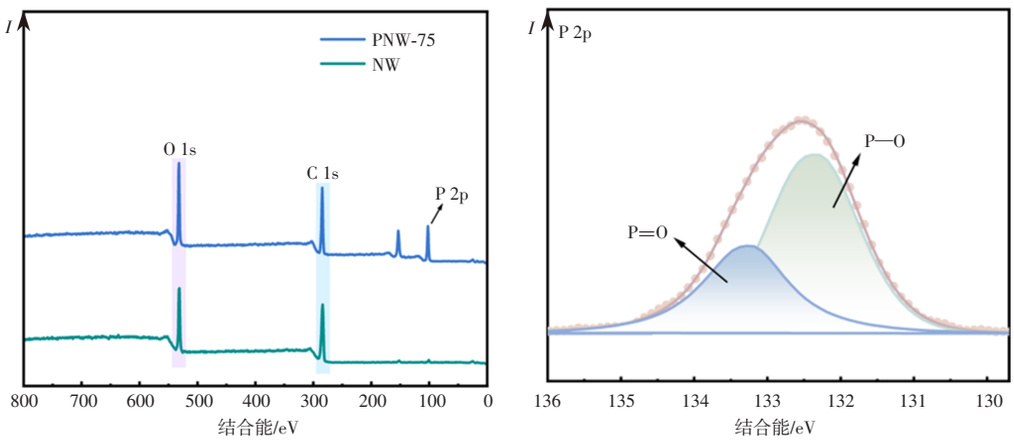


图 2 改性前后巴尔沙木骨架的傅里叶红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of the Balsha wood framework before and after modification

1 468 cm^{-1} 和 1 231 cm^{-1} 附近与木质素芳香骨架振动及 C—O 伸缩振动相关的吸收峰也发生变化，表明木质素结构受到一定影响，但仍保留在木材骨架中[11]。随着 P-DES 浓度提高，PNW-75 中相关峰变化更加明显，说明较高浓度 P-DES 对细胞壁组分的调控作用更强。

改性前后巴尔沙木骨架的 XPS 谱图以及改性后骨架的 P 元素高分辨谱图如图 3 所示。由图 3a.中 XPS 全谱结果可见，NW 和 PNW-75 均具有明显的 C 1s 和 O 1s 特征峰，符合木材中纤维素、半纤维素和木质素等有机组分的元素特征。与 NW 相比，PNW-75 在 130 ~ 135 eV 处出现 P 2p 特征峰[12]，在 P 元素高分辨率谱图中，在 132.38 eV 处出现 P—O 键，在 133.28 eV 处出现 P═O 键，这主要来自 P-DES 中磷酸的特征，进一步证明 P-DES 处理后磷元素成功引入木材骨架。该结果表明 P-DES 预处理不仅可调控木材细胞壁结构，还可赋予木材骨架含磷化学组分。磷元素的引入有利于促进材料在受热



a. 改性前后XPS全谱图　　b. 改性后PNW-75 P元素高分辨谱图

图3　改性前后巴尔沙木骨架的X射线光电子能谱图以及改性后骨架的P元素高分辨谱图

Fig. 3　XPS survey spectra and high-resolution P spectrum of the Balsha wood framework before and after modification

和燃烧过程中脱水成炭，从而为后续阻燃性能提升提供基础。

PEG、PNW-75和PNWPCM的傅里叶红外光谱见图4。如图4所示，纯PEG在约2 890 cm^{-1}处出现—CH_2—伸缩振动峰，在1 100 cm^{-1}附近出现C—O—C伸缩振动峰，表现出典型的聚乙二醇特征吸收峰[2]。

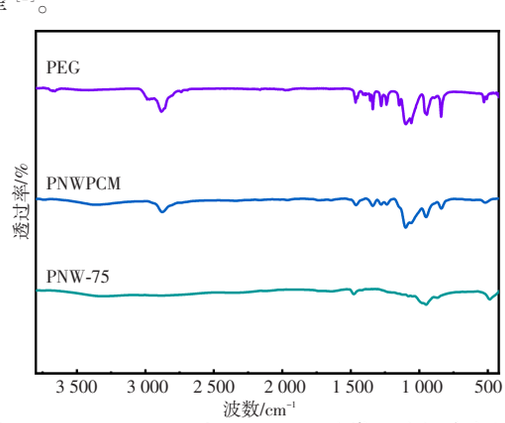


图4　PEG、PNW-75和PNWPCM的傅里叶红外光谱图

Fig. 4　FTIR spectra of the PEG, PNW-75 and PNWPCM

封装后，PNWPCM的红外光谱中同时保留了PNW-75和PEG的主要特征峰。与纯PEG相比，PNWPCM中PEG特征峰未出现明显新峰或显著位移，表明PEG与改性木材骨架之间主要依靠毛细作用、孔道限域及氢键等物理吸附作用结合。该结果说明P-DES改性木材骨架能够有效封装PEG，同时不会破坏PEG的官能团结构，为保持其相变储热性能提供了基础。

2.2　复合相变材料的形态稳定性

形态稳定性是评价复合相变材料封装效果的重要指标。PEG、NWPCM和PNWPCM泄漏实验结果见图5。如图5所示，纯PEG在升温后逐渐熔融，并在滤纸上出现明显扩散痕迹，说明其在高于相变温度后容易发生流动和泄漏。相比之下，NWPCM及P-DES改性木材骨架封装所得PNWPCM样品在加热过程中均能保持完整块状形态，滤纸表面未出现明显润湿或扩散现象，表明木材多孔结构能够对熔融PEG起到有效限域作用。从样品颜色，NWPCM仍呈现天然木材的浅棕色，而PNWPCM样品颜色明显加深，呈黑色。这主要归因于P-DES处理及后续热固化过程中，木材细胞壁中的木质素发生迁移和重组，导致木材骨架颜色加深[13]。

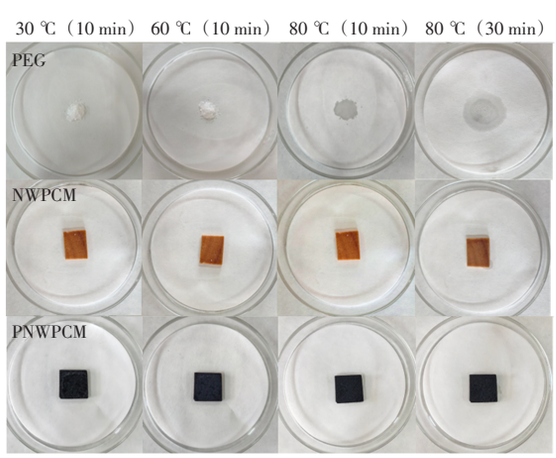


图5　PEG、NWPCM和PNWPCM泄漏实验结果

Fig. 5　Leakage performance of PEG, NWPCM and PNWPCM

进一步观察可见，经P-DES预处理后的PNWPCM样品在较高温度和延长加热时间下仍保持良好的形状稳定性，说明改性木材骨架具有较好的PEG封装能力。这主要归因于P-DES处理后木材孔道通透性得到改善，有利于PEG充分浸入细胞腔及细胞壁间隙；同时，木材骨架的毛细作用和物理限域效应能够有效抑制熔融PEG外渗。上述结果说

明，P-DES改性木材可作为稳定的相变材料封装基体，为复合材料后续储热应用提供结构保障。

2.3 复合相变材料的相变性能

相变焓是评价复合相变材料储热能力的重要指标。PEG、NWPCM和PNWPCM的热性能如表1所示。由表1可知，纯PEG的熔融温度（t_m）和结晶温度（t_c）分别为52.84 ℃和28.99 ℃，熔融焓和结晶焓分别为156.23 J/g和150.04 J/g，表现出典型的固–液相变行为。与纯PEG相比，NWPCM和PNWPCM的熔融焓有所降低，主要是由于复合材料中木材骨架不参与相变，降低了单位质量材料中的有效PEG含量。PNWPCM的熔融焓（ΔH_m）和结晶焓（ΔH_c）分别为122.03 J/g和111.85 J/g，焓效率（λ）为78.11%，略高于NWPCM的77.67%，表明P-DES预处理后木材骨架对PEG具有较好的封装能力，并能保持较高的相变储热水平。经过100次加热–冷却循环后，PNWPCM的热性能参数与循环前基本一致，表明PEG在改性木材骨架中具有良好的热循环可靠性。

表1 PEG、NWPCM和PNWPCM的热性能

Table 1 Thermal performance of PEG, NWPCM and PNWPCM

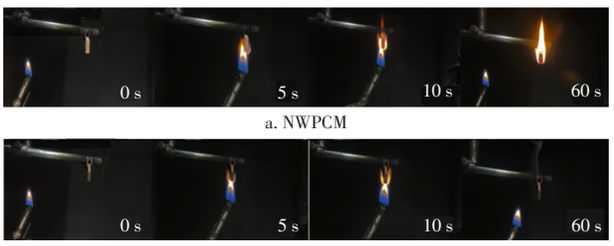
样品	t_m/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	t_c/℃	ΔH_c/(J·g^{-1})	λ/%
PEG	52.84	156.23	28.99	150.04	100.00
NWPCM	57.03	121.35	18.13	109.93	77.67
PNWPCM	56.70	122.03	21.45	111.85	78.11
PNWPCM（100次循环）	56.63	122.01	21.77	110.07	78.10

此外，PNWPCM的t_c为21.45 ℃，高于NWPCM的18.13 ℃，说明P-DES改性木材骨架在一定程度上改善了PEG在孔道中的结晶行为，减弱了天然木材封装后对PEG分子运动的限制[14]。总体来看，PNWPCM在获得阻燃改性木材骨架的同时，仍保持了良好的相变焓和可逆储放热能力，说明该体系具有较好的储热应用基础。

2.4 复合相变材料的阻燃性能

采用垂直燃烧测试对NWPCM和PNWPCM的燃烧行为进行对比，结果见图6。如图6所示，NWPCM在点火后迅速被引燃，火焰沿样品表面持续蔓延，燃烧过程中火焰强度较大，至60 s时仍存在明显明火，表明天然木材封装PEG后仍具有较高可燃性。这主要与木材基体和PEG均为有机组分有关，受热后易产生可燃挥发物，导致燃烧持续进行。

相比之下，PNWPCM在相同点火条件下10 s后燃烧区域主要局限于点火端，移去火源后明火迅速熄灭，60 s时无燃烧现象，表现出较好的自熄性。该结果说明，P-DES预处理能够显著改善木基复合相变材料的阻燃性能。



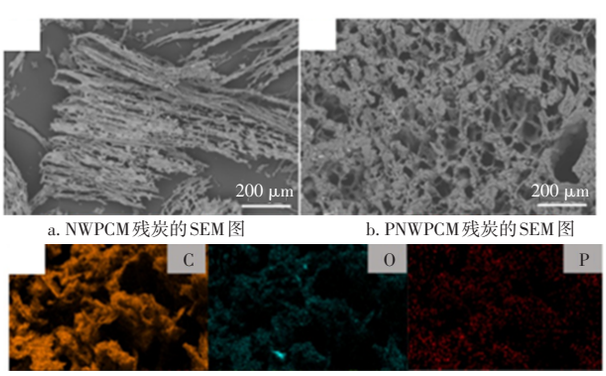
a. NWPCM

b. PNWPCM

图6 木基复合相变材料的垂直燃烧实验结果

Fig. 6 Vertical burning test results of wood-based composite phase change materials

为进一步分析P-DES改性对复合材料阻燃行为的影响，对燃烧后的残炭进行SEM和EDS表征，结果见图7。如图7所示，NWPCM燃烧后的残炭结构较为破碎，呈现明显的纤维状塌陷形貌，炭层连续性较差，说明其在燃烧过程中难以形成有效的保护屏障。相比之下，PNWPCM残炭保持了较完整的多孔炭层结构，炭层更为连续致密，有利于阻隔热量传递、氧气扩散和可燃挥发物释放，从而抑制燃烧持续进行。EDS元素分布结果显示，残炭中C、O元素分布较为均匀，同时可检测到明显的P元素信号，表明含磷组分在燃烧过程中能够保留于凝聚相中。磷化合物是高效的成炭促进剂，其在高温下可热解生成磷酸或聚偏磷酸等酸性物质，能够催化纤维素组分的脱水炭化反应，从而促进炭层的形成。磷元素在炭层中均匀分布的结果表明，阻燃剂在改性过程中已成功渗透并均匀分散于木材基体的内部结构中，进而在燃烧过程中于材料内部各处发挥一致的催化成炭作用，有助于形成连续、致密的保护性炭层。



a. NWPCM残炭的SEM图 b. PNWPCM残炭的SEM图

c. PNWPCM残炭的EDS图

图7 NWPCM和PNWPCM残炭的SEM以及PNWPCM残炭的EDS图

Fig. 7 SEM images of char residues of NWPCM and PNWPCM, and EDS image of the char residue of PNWPCM

3　结论

本文采用磷酸和氯化胆碱构建含磷低共熔溶剂（P-DES），对巴尔沙木封装基体进行预处理，并通过真空辅助浸渍法封装PEG，制备了阻燃木基复合相变材料。SEM结果表明，P-DES处理后木材仍保持天然多孔骨架结构，细胞壁表面变粗糙，并出现层状剥离和微裂隙，有利于提高PEG浸渍和封装效果。FTIR和XPS结果表明，P-DES处理可调控半纤维素和木质素等细胞壁组分，并成功向木材骨架中引入磷元素。PNWPCM在80 ℃下仍能保持完整形态，未出现明显泄漏，说明改性木材骨架对熔融PEG具有良好的封装作用。DSC测试表明，PNWPCM的熔融焓为122.03 J/g，焓效率为78.11%；经100次加热–冷却循环后，熔融焓仍保持在122.01 J/g，表明其具有良好的储热能力和热循环稳定性。垂直燃烧及残炭分析进一步表明，P-DES预处理可明显降低材料的持续燃烧行为，促进形成连续稳定的含磷炭层，从而提升复合相变材料的阻燃性能。综上，含磷低共熔溶剂预处理为改善木基相变材料的封装稳定性和阻燃安全性提供了一种简便有效的改性方法。

［参考文献］

［1］ 张江雨，李雨婵，江汇，等.磷改性十八醇阻燃相变储热材料的制备及应用[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(5)：6–13，79.
Zhang Jiangyu，Li Yuchan，Jiang Hui，et al. Preparation and application of phosphorus-modified flame-retardant phase change heat storage materials［J］. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(5)：6–13，79.

［2］ 李泽源，李众，于建芳.木基相变储能材料制备与应用研究进展[J].林产工业，2025，62(6)：1–8.
Li Zeyuan，Li Zong，Yu Jianfang. Research Progress on the Preparation and Application of Wood-Based Phase Change Energy Storage Materials［J］. China Forest Products Industry，2025，62(6)：1–8.

［3］ Zhou Ya，Zuo Yingfeng，Ma Yuhang，et al. A Formable Wood-Based Phase Change Materials with Enhanced Mechanical Properties and Thermal Efficiency for Smart Building［J］. Advanced Science（Weinheim，Baden-Wurttemberg，Germany），2026，13(8)：e19262.

［4］ 魏清泉，林俊宇，郭川川，等.生物基木质素型阻燃剂与海藻酸铁协效阻燃环氧树脂[J].厦门大学学报(自然科学版)，2026，65(1)：138–146，216.
Wei Qingquan，Lin Junyu，Guo Chuanchuan，et al. Bio-based lignin-type flame retardant and ferric alginate synergistic flame-retardant epoxy resin［J］. Journal of Xiamen University（Natural Science），2026，65(1)：138–146，216.

［5］ Sun Xinyue，Ni Junjie，Lou Yuhan，et al. Solvent-triggered directional lignin valorization towards monomeric acetals or lignin polyols[J]. Green Chemistry，2024，26(7)：4151–4160.

［6］ Yang Xiaomei，Shi Tao，Wang Xiaodong，et al. Typical Applications and Flame-Retardant Strategies for Organic Phase-Change Materials［J］.Carbon Energy，2025，7(11)：49–87.

［7］ Zhang Yutong，Zhao Lebin，Liu Yun，et al. Production of flame-retardant phosphorylated cellulose nanofibrils by choline chloride based reactive deep eutectic solvent［J］. Carbohydrate Polymers，2025，348(PB)：122931.

［8］ Ren Weidong，Li Chao，Fan Mengjiao，et al. Production of poplar branch-derived activated carbon with acidic deep eutectic solvent pretreatment coupled with chemical activation［J］. Fuel，2025，381(PB)：133417.

［9］ 柯梦庆，张肖凯，周廷，等.低共熔溶剂预处理对北美赤杨木材性的影响[J].林业工程学报，2025，10(3)：33–38.
Ke Mengqing，Zhang Xiaokai，Zhou Ting，et al. Effects of deep eutectic solvents pretreatment on wood properties of *Alnus japonica* wood[J]. Journal of Forestry Engineering，2025，10(3)：33–38.

［10］ 吴晓梅，薛晓博，王飞.植酸/三聚氰胺改性脱木素木材的阻燃性能研究[J].林产工业，2025，62(10)：22–27.
Wu Xiaomei，Xue Xiaobo，Wang Fei. Effect of Phytic Acid-based Flame Retardants on Combustion Performance and Thermal Stability of Wood［J］. China Forest Products Industry，2025，62(10)：22–27.

［11］ Wu Xinyu，Guo Dingmeng，Lian Hailan，et al. DES-Engineered Bioinspired Wood Scaffolds with Fluorescence and Thermal Storage［J］. ACS Applied Polymer Materials，2025，7(14)：9314–9325.

［12］ 刘鹏博，马小兵，崔宏丽，等.环三磷腈改性壳聚糖阻燃剂的制备与表征及其对PLA的阻燃[J].青岛科技大学学报(自然科学版)，2025，46(3)：91–100.
Liu Pengbo，Ma Xiaobing，Cui Hongli，et al. Preparation and Characterization of Cyclotriphosphonitrile-Modified Chitosan Flame Retardants and Their Flame Retardant to PLA[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology（Natural Science Edition），2025，46(3)：91–100.

［13］ Ran Yangyang，Li Jingyu，Zhang Shaodi，et al. Super-stable modified wood for enhanced autonomous indoor humidity regulation［J］. Chemical Engineering Journal，2024，488：150814.

［14］ 杨博超，吕洁，甄紫薇，等.硬脂酸和硬脂酸/MXene复合相变材料的结晶动力学[J].储能科学与技术，2022，11(12)：3836–3844.
Yang Bochao，Lü Jie，Zhen Ziwei，et al. Crystallization kinetics of stearic acid and stearic acid/MXene composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology，2022，11(12)：3836–3844.