

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.010

基于同轴静电纺丝的核壳相变纤维膜制备及性能

李伟^{1,2}, 王旭³, 张轶督³, 刘艳萍³

(1. 河南机电职业学院智能工程学院, 郑州 451191; 2. 河南省超硬材料智能制造装备集成重点实验室, 郑州 451191;
3. 郑州大学力学与安全工程学院, 郑州 450001)

摘要: 相变储能材料(PCM)基于良好的潜热存储能力在热管理领域有广阔的应用前景。然而热力学一级相变的固-液转变导致的泄漏和形状不稳定问题严重阻碍了PCM的应用。采用同轴静电纺丝技术,分别以聚羟基丁酸酯和聚乙二醇(PEG)作为壳层和芯层材料,成功制备了具有核壳结构的相变纤维膜。测试与表征了不同PEG含量下纤维膜的形貌和结构、热性能、热管理性能及力学性能。结果表明,纤维膜呈现均匀连续结构,纤维表面连续光滑无缺陷,核壳界面清晰;随PEG含量增加,纤维膜的熔点和结晶温度提升,相变焓值增大,拉伸强度降低,断裂伸长率升高,在热对流试验的升降温过程中达到相同温度的时间均变长,表明纤维膜具有较好的保温隔热效果;当PEG质量分数为50%时,纤维膜熔融焓达到57.93 J/g,储热能力优异,在20次热循环后仍保持稳定的相变储热性能,泄漏率约为6.1%,包覆效果良好。制备的核壳相变纤维膜兼具高储热能力、形状稳定性和循环耐久性,在医学热疗、电子器件热防护、智能纺织品等领域具有广阔应用前景。

关键词: 同轴静电纺丝;聚羟基丁酸酯;聚乙二醇;相变纤维膜;核壳结构;热性能

中图分类号: TK02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0072-07

Preparation and properties of phase change fiber membranes with core-shell structure based on coaxial electrospinning

LI Wei^{1,2}, WANG Xu³, ZHANG Yidu³, LIU Yanping³

(1. School of Intelligent Engineering, Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China;
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Integration for Superhard Materials, Zhengzhou 451191, China;
3. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Phase change material (PCM) has wide range of application potential in the field of thermal management because of its good latent heat energy storage capabilities. However, the leakage and shape instability caused by the solid-liquid transition of the thermodynamic first-order phase transition have seriously hindered the application of PCM. The phase change fiber membranes with core-shell structure were successfully fabricated by using coaxial electrospinning technology, with polyhydroxybutyrate and polyethylene glycol (PEG) as shell and core materials, respectively. The morphology, structure, thermal properties, thermal management properties, and mechanical properties of the fiber membranes with different PEG contents were tested and characterized. The results show that the fiber membrane has uniform continuous structure, with continuous smooth fiber surface without defects and clear core-shell interface. With the increase of PEG content, the melting point, crystallization temperature, phase transition enthalpy, and elongation at break of the fiber membrane increase, and the time to reach the same temperature increases during the heating and cooling process of the thermal convection experiments, indicating the fiber membrane has good thermal insulation effect, but the tensile strength decreases. When the mass fraction of PEG is 50%, the melting enthalpy of the fiber membrane reaches 57.93 J/g, indicating that the fiber membrane has excellent thermal energy storage capacity, after 20 thermal cycles, the fiber membrane still maintains stable phase change performance, and the leakage rate is about 6.1%, indicating that the coating effect is good. The phase change

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(222102220114)

通信作者: 李伟, 副教授, 主要从事高分子加工方面的教学和聚合物成型加工过程中形态结构形成、演化与控制方面的研究工作

收稿日期: 2025-03-24

引用格式: 李伟, 王旭, 张轶督, 等. 基于同轴静电纺丝的核壳相变纤维膜制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 72-78.

LI Wei, WANG Xu, ZHANG Yidu, et al. Preparation and properties of phase change fiber membranes with core-shell structure based on coaxial electrospinning[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 72-78.

fiber membrane with core-shell structure has high heat storage capacity, shape stability, and cycle durability, and can be used for the fields of medical hyperthermia, thermal protection of electronic devices, and smart textiles.

Keywords : coaxial electrospinning ; polyhydroxybutyrate ; polyethylene glycol ; phase change fiber membrane ; core-shell structure ; thermal property

全球能源结构中,约60%的初级能源最终以热能形式存在,但传统能源系统转换效率低下,导致大量热能未被有效利用。以火力发电为例,其能量转换效率普遍仅为40%左右,其余60%以废热形式散失^[1-3],工业余热、建筑供暖等领域同样面临热能回收不足的严峻挑战。为实现“双碳”目标,开发高效热能存储和利用技术已成为关键路径。相变储能材料(PCM)凭借其高储能密度和近等温储/放热特性,在太阳能利用、工业余热回收及建筑节能领域展现出巨大潜力^[4-7]。然而,PCM固有的低热导率[通常低于0.5 W/(m·K)]导致其热响应速率受限,严重制约PCM的实际应用范围。因此,如何通过材料设计与结构优化实现PCM高热管理效率,并揭示其热性能演变规律,成为当前研究的核心问题。

潜热储能因兼具显热存储的安全性与热化学存储的高效性而成为主流技术路径。聚乙二醇(PEG)作为典型高分子基固-液相变材料,具有相变焓值高(180~220 J/g)、相变温度可调(熔点随分子量变化)及生物相容性优异等特点^[8]。然而,其固-液相变导致的泄漏问题也是此类相变材料的缺陷。Sun等^[9]采用反相乳液模板原位缩聚法,成功制备了具有规整核壳结构的PEG@SiO₂相变微胶囊,包覆率超过80%;Li等^[10]通过构建PEG/分子筛NaY形状稳定相变材料体系,揭示了多孔基底表面修饰(氨基化)调控PEG分子链运动能力与结晶行为的作用机制,其中氨基化NaY通过增大孔径和减弱分子间作用力,使PEG结晶度显著提升,最终获得熔融焓达109.9 J/g的高性能储热材料。但化学封装工艺复杂且成本高昂,限制了PCM规模化应用^[11]。

物理封装技术中,同轴静电纺丝因其工艺简单、结构可控受到广泛关注。Kou等^[12]采用熔融同轴纺丝制备十八烷基相变纤维,该纤维能在人体舒适温度范围内表现出优异的热能吸收-储存-释放性能;Liu等^[13]采用同轴静电纺丝技术制备聚左旋乳酸包覆聚乙烯(PEO)的核壳结构相变纤维,该纤维相变焓达126.8 J/g,热稳定性良好。杨婷婷^[14]通过同轴静电纺制备PEO/聚羟基丁酸酯(PHB)核壳纤维,并研究了PHB和PEO纺丝溶液在不同温度下的

动态流变性能及电纺条件对纤维形貌、纤维性能的影响。

综上所述,笔者利用同轴静电纺丝手段,采用PHB包覆PEG的设计,制备核壳相变纤维膜,为高功率密度相变储能器件的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PEG:数均分子量为2 000 g/mol,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

PHB:ENMAT-Y200,宁波天安生物材料有限公司;

二氯甲烷(DCM):天津风船化学试剂科技有限公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF):天津市科密欧化学试剂有限公司;

六氟异丙醇(HFIP):阿尔法化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

静电纺丝机:DF05,长沙纳仪仪器科技有限公司;
偏光显微镜(POM):BX51,日本奥林巴斯公司;
透射电子显微镜(TEM):TalosL120c,美国赛默飞世尔科技公司;

扫描电子显微镜(SEM):LMS0,泰斯肯有限公司;
电子万能试验机:UTM2203,深圳三思纵横科技股份有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q2000,美国TA公司。

1.3 核壳相变纤维膜的制备

首先制备纺丝液,将PEG溶于DCM与DMF(体积比7:3)的溶剂中,配置成0.1 g/mL的溶液作为内相;将PHB溶于HFIP溶剂中,配置成0.067 g/mL的溶液作为外相。然后进行同轴静电纺丝,电压为10 kV,接收距离为20 cm,滚筒转速为3 000 r/min,纺丝过程示意图如图1所示。实验过程中,保持芯层(内相)与壳层(外相)溶液的总推进速率为1.2 mL/min。根据两相溶液的已知浓度,通过计算确定芯层与壳层溶液的推进速率配比,分别制备了PEG质量分数为10%,30%和50%的核壳相变纤维膜样品,并依次命名为PEG10,PEG30和PEG50。同时制备了纯PHB纤维膜作为对照组。

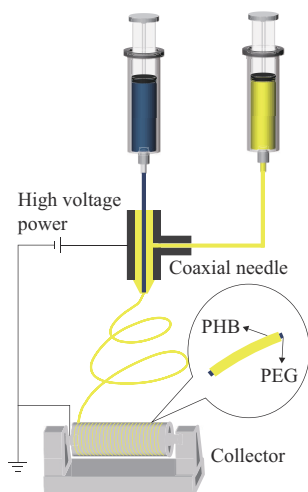


图1 同轴静电纺丝原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial electrospinning principle

1.4 测试与表征

1.4.1 微观形貌与结构表征

采用POM和SEM表征纤维膜的表面形貌,观察其表面是否光滑,并初步测定纤维直径分布。

通过TEM(电子源:六硼化镧)在120 kV的加速电压条件下表征纤维内部结构,并利用imageJ软件对纤维直径进行精确测量。

1.4.2 热性能测试

利用DSC仪对纤维膜和热循环试验(具体见1.4.3)后的纤维膜进行热性能测试。温度程序为:以10 °C/min的速率从室温加热至90 °C,保持5 min以消除纤维膜的热历史,再以同样速率降至室温,全过程在氮气氛围下进行。热循环后纤维升降温程序相同。

1.4.3 热管理性能分析

为分析纤维膜的热管理性能,设计烘箱热对流试验。具体步骤如下:从制备的4组纤维膜样品中各称取0.4 g,分别均匀包裹热电偶后装入4个相同的10 mL样品瓶中;随后将样品瓶置于80 °C的烘箱中,通过连接的热电偶温度计实时记录瓶内温度变化,并绘制升温曲线;温度稳定10 min后,取出样品瓶并置于室温环境中自然冷却,同时记录温度变化并绘制降温曲线。热循环试验即为重复上述步骤多次的试验,升降温一次为一个循环。

1.4.4 力学性能测试

室温条件下,用万能试验机对纤维膜进行拉伸性能测试,传感器量程为2 000 N,拉伸速率5 mm/min,初始距离10 cm。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌与结构表征结果分析

为了更清晰地观察纤维膜的表面形貌,采用400倍的POM对样品进行表征。图2a为PHB纤维膜的微观表面形貌,可以看出PHB纤维膜表面光滑且完整、无明显液滴等缺陷。图2b至图2d分别为PEG10, PEG30, PEG50纤维膜的微观表面形貌,可以看到纤维膜表面仍光滑平整,随着大分子量的PEG的加入,纤维膜的纤维平均直径有所提升。统计结果表明,PEG10, PEG30, PEG50的纤维平均直径从PHB的2.56 μm分别提升为4.6, 4.5, 5.11 μm,证实PEG已成功引入PHB纤维体系,而且所有样品均具有良好的纤维形貌。

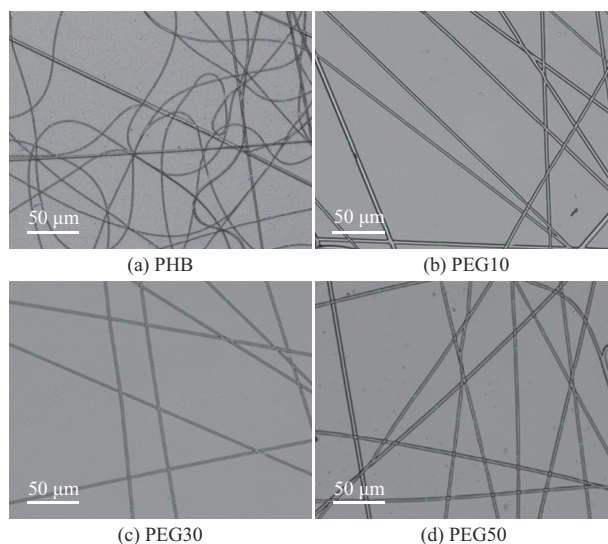


图2 纤维膜表面形貌POM照片

Fig. 2 Surface morphology POM photos of fiber membranes

采用分辨率更高的SEM对纤维膜进行表面形貌表征,结果如图3所示,可以看出所有纤维膜的纤维表面均匀光滑、无明显缺陷,再次表明所制备的纤维膜具有良好的纤维形貌。

为证实纤维的核壳结构,采用TEM对PHB, PEG30及PEG50样品结构进行表征,如图4所示。由图4看出,PHB纤维直径较小,呈现光滑均匀的外观形貌,无明显对比度差别;而在PEG30和PEG50的TEM照片中可观察到清晰的界面,表明纤维具有典型的核壳结构。此外,随着PEG分子量的增加,纤维直径逐渐增大,但整体仍保持连续、光滑的形貌,进一步证实采用同轴静电纺丝制备的纤维膜有很好的包覆效果。

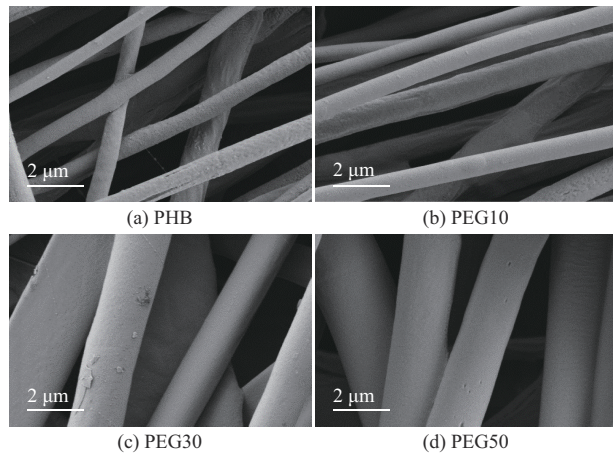


图3 纤维膜表面形貌SEM照片

Fig. 3 Surface morphology SEM photos of fiber membranes

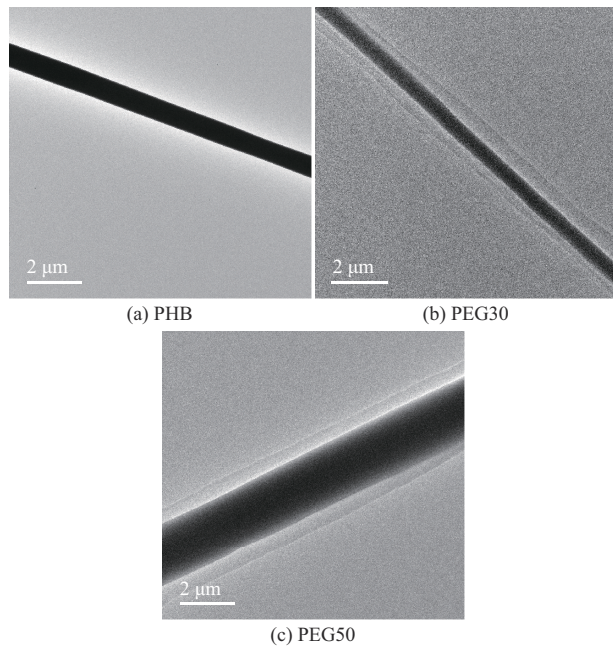


图4 PHB, PEG30及PEG50纤维膜TEM照片

Fig. 4 TEM photos of PHB, PEG30 and PEG50 fiber membranes

2.2 热性能测试结果分析

对于PCM和储能系统来说,潜热能力是衡量其热性能的重要指标之一,它很大程度上影响了储能体系的整体性能,是研究相变材料的关键。因此对所制得的纤维膜进行了DSC测试。为了探讨PEG质量分数超过50%后核壳相变纤维膜的热性能,又分别制备了PEG质量分数为52%和68%的纤维膜,命名为PEG52和PEG68。

图5a、图5b分别为PHB和核壳相变纤维膜在20~80℃的升温 and 降温曲线。在此温度范围内PHB不发生热力学变化,因此其DSC曲线无明显的吸热峰和放热峰,同时也不会影响PEG的焓变。其余5条核壳相变纤维膜的升温曲线,均在55℃左右出

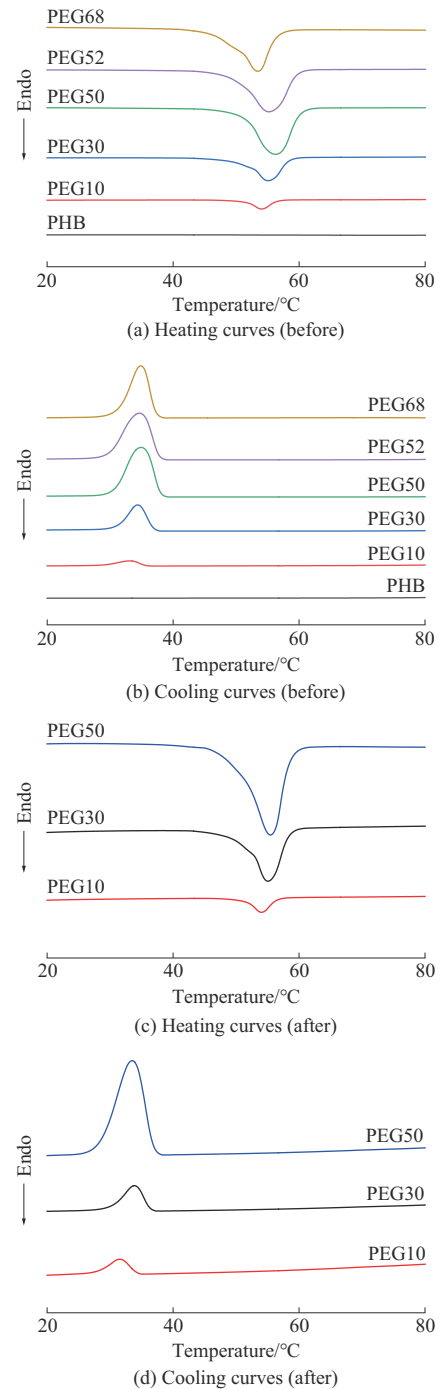


图5 纤维膜热循环试验前后的升温 and 降温DSC曲线

Fig. 5 Heating and cooling DSC curves of fiber membranes before and after thermal cycling experiments

现了明显的吸热峰;而在5条核壳相变纤维膜的降温曲线上,于34℃左右均出现了明显的放热峰,这说明核壳相变纤维膜具有一定的潜热能力,可以在一定的温度区间内吸收或者放出热量来实现储能和放能。

依据升温DSC曲线上熔融峰的大小可见,随PEG含量增加,相变焓呈现先增大后减小的趋势,

PEG质量分数为50%时最大。对于同轴静电纺丝工艺而言,包覆含量不可能无限增大,PEG含量进一步增加有泄漏的风险。例如PEG68的熔融焓仅为37.43 J/g,说明PEG可能已经泄漏。因此后续工作选取PEG质量分数为50%,30%和10%的3个纤维膜样品进行分析。

其次,为了探究核壳相变纤维膜的热可靠性和寿命,对PEG10,PEG30,PEG50进行20次热循环试验后,再次进行DSC测试。图5c、图5d为热循环后的纤维膜DSC升温 and 降温曲线。

升降温曲线中峰面积可代表焓值,因此对DSC曲线的吸放热峰进行积分得到纤维膜的熔融焓和

结晶焓^[15],进而根据式(1)计算纤维膜的包覆率。

$$R_c = \frac{\Delta H_m}{k \cdot \Delta H} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_c 为纤维膜的包覆率; ΔH_m 为纤维膜中PEG的熔融焓; ΔH 为纯PEG的熔融焓,取156.75 J/g; k 为PEG的质量分数。

对20次热循环后的样品进行同样的DSC测试,获得热循环试验前后的热力学数据,结果见表1。根据热循环前后包覆率可计算出核壳相变纤维膜的泄漏率。整体而言,PEG10的泄漏率最低,但焓值很小;PEG30的泄漏率较大;PEG50热循环后的泄漏率相对较低,约为6.1%,说明PEG50在20次循环后仍保持良好的相变储热性能,具有较好的包覆效果。

表1 纤维膜热循环试验前后的热力学数据

Tab. 1 Thermodynamics data of fiber membranes before and after thermal cycling experiments

Samples	$T_m/^\circ\text{C}$		$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$		$T_c/^\circ\text{C}$		$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$		$R_c/\%$	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
PEG10	54.02	53.27	6.59	6.42	33.16	31.47	5.17	4.85	42.0	40.9
PEG30	55.06	53.90	25.67	19.43	34.37	32.86	21.36	15.49	54.5	41.3
PEG50	56.27	54.10	57.93	54.36	37.91	33.47	52.55	51.18	73.7	69.2

Notes: T_m and T_c are melting and crystallization temperature respectively; ΔH_m and ΔH_c are enthalpy of melting and crystallization respectively; R_c is coating ratio.

理论上将PEG的质量分数与纯PEG焓值相乘即可得到不同PEG质量分数下的纤维膜样品理论焓值,然而从表1看出,实际制备的样品熔融焓值显著低于理论值,主要原因如下。

(1)静电纺丝工艺参数的影响。在实际静电纺丝过程中,受同轴针头偏心度、溶液浓度梯度、环境对流及温度波动等因素的影响,难以实现PHB对PEG完全均匀的包覆,导致纤维膜中PEG的实际含量低于理论设计值。

(2)PEG分子链的空间受限。在静电纺丝的过程中由于溶液快速蒸发,PEG分子链无法充分地形成三维规整结构(晶体),芯层有限的内部空间使PEG分子链的运动重排能力受到限制^[16]。

(3)PEG与PHB分子之间存在强的氢键相互作用,进一步影响PHB相变过程中的链段构象调整。

上述因素的协同作用导致制备的纤维膜的实测焓值与理论值存在显著差异,这也可以从表1包覆率的数值看出。值得注意的是,随着PEG含量的增加,纤维膜的实测焓值呈现上升趋势,当PEG质量分数为50%时,纤维膜的熔融焓达到57.93 J/g。从表1还发现,随着PEG含量的增加,纤维膜的熔点和结晶温度均有所提高。

2.3 热管理性能测试结果分析

对于储热系统来说,核心材料的储热能力至关重要,它决定了系统在实际工作时是否可以达到预定的要求,是材料是否可以面向实际的首要指标。因此,需要对制备的核壳相变纤维膜进行热对流试验来测试膜的保温隔热能力。

图6a和图6b为温度从30 °C升至70 °C时不同纤维膜的热对流升温 and 降温试验曲线。可以看出,随着纤维膜中PEG含量的增加,升降温过程中达到相同温度的时间均变长,表明纤维膜的保温和隔热效果变好。虽然PEG30的升温曲线没有明显的相变台阶,但观察到35 °C左右曲线斜率发生明显转折,所以推测此时已经完成相变。相对于只有显热存储的PHB,拥有潜热存储的核壳相变纤维膜可以一定程度上减缓由于温度变化所带来的环境影响,这也证明了所制备的核壳相变纤维膜都具有一定的热管理能力。

2.4 力学性能测试结果分析

材料的力学性能是决定其实际使用寿命的关键因素之一。不同应用场景对材料力学性能的要求存在显著差异:建筑结构材料需具备较高的强度、刚度和稳定性;而功能性薄膜材料(如车衣等)则

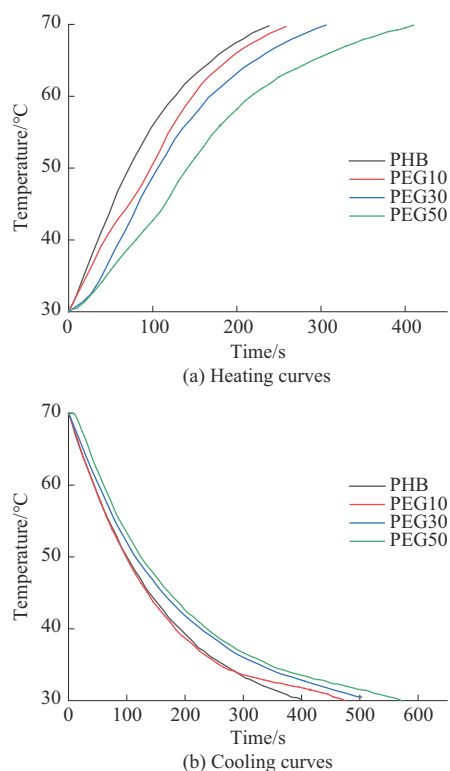


图6 纤维膜的热对流试验升温 and 降温曲线

Fig. 6 Heating and cooling curves of thermal convection experiments for fiber membranes

更注重韧性和延展性,对结构强度的要求相对较低。

为了分析核壳相变纤维膜的材料力学性能,对所制得的样品进行单轴拉伸测试,图7为测得的应力-应变曲线,相比较于PHB薄膜,加入PEG后核壳相变纤维膜的最大拉伸应力(即拉伸强度)降低,但断裂伸长率显著增加,且随着PEG含量的增加逐步增加,最大可达51.5%。

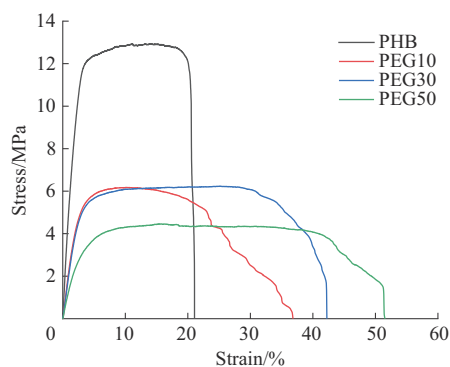


图7 纤维膜的拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 Tensile stress-strain curves of fiber membranes

核壳相变纤维膜的主要作用为储存热能以达到保温隔热的作用,对其强度要求并不突出,而且较大的断裂伸长率可以使薄膜具有更广的应用场景,例如医学热疗、柔性电子等方面的应用。

3 结论

采用同轴静电纺丝技术,设计并制备了以PHB为壳层、PEG为核层的一系列核壳相变纤维膜。通过调控PEG含量,系统研究纤维膜性能的变化规律,得到如下结论。

(1)微观形貌表征结果显示,所制备的核壳相变纤维膜具有光滑连续的表面形貌,核壳结构完整且包覆均匀,无明显结构缺陷。

(2)热性能和热管理性能测试结果表明,随着PEG含量的增加,纤维膜的熔点和结晶温度得到提升,相变焓值显著增大,且在热对流试验的升降温过程中达到相同温度的时间均变长,表明纤维膜具有优异的储热能力和温度调控功能,在保温隔热方面展现出良好的应用潜力。热循环试验结果表明PEG50在热循环20次后仍保持良好的相变储热性能,具有较好的包覆效果。

(3)力学性能测试结果表明,随着PEG含量的增加,纤维膜的拉伸强度降低,断裂伸长率升高。

这种兼具优异热管理性能和力学性能的纤维膜材料在智能纺织品、建筑节能等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] SOHRABI A, LIU S L, CUCE E, et al. Utilization of low-grade thermal energy for residential applications: A review of the existing and potential technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 219. DOI:10.1016/j.rser.2025.115832.
- [2] ONAIZI A M, TANG W C, HUSEIEN G F, et al. A systematic review on the application progress of phase change materials in energy piles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 274. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126630.
- [3] ZHAI Xiangrui, XU Zeyu, ZHANG Wei, et al. Phase change thermal energy storage: Materials and heat transfer enhancement methods[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 123. DOI: 10.1016/j.est.2025.116778.
- [4] VEDRTNAM A, KALAUNI K, SOARES N, et al. Phase change materials for climate-adaptive buildings: A review framed by tropical and Mediterranean climates[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 125. DOI:10.1016/j.est.2025.116938.
- [5] 韩冬林,王帅鹏,曾显清,等. 导热多级相变复合材料的制备及其在热管理中应用[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(3):14-18. HAN Donglin, WANG Shuaipeng, ZENG Xianqing, et al. Thermally conductive multi-stage phase change composites and their application in thermal management[J]. *Engineering Plastics Appli-*

- cation, 2022, 50(3):14–18.
- [6] LI Wenbo, TAO Zhang, LIU Yanqiang, et al. Graphene-based phase-change composites for thermal energy storage, conversion, and applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 122. DOI: 10.1016/j.est.2025.116619.
- [7] 徐众,李宏,吴恩辉,等.聚乙烯/石蜡复合相变材料的制备及热性能[J].*工程塑料应用*, 2025, 53(3):31–39.
XU Zhong, LI Hong, WU Enhui, et al. Preparation and thermal properties of polyethylene/paraffin wax composite phase change materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3):31–39.
- [8] 陈立贵,贾仕奎,付蕾,等.聚乙二醇定形相变材料的热稳定性[J].*工程塑料应用*, 2016, 44(10):94–97.
CHEN Ligui, JIA Shikui, FU Lei, et al. Thermal stability of PEG-based shape-stability phase change material[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(10):94–97.
- [9] SUN Zhao, SUN Kun, ZHANG Huanzhi, et al. Development of poly(ethylene glycol)/silica phase-change microcapsules with well-defined core-shell structure for reliable and durable heat energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 225. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111069.
- [10] LI Yang, YU Runxiang, ZHANG Min, et al. Enhanced thermal performances of polyethylene glycol/NaY molecular sieves phase change materials for heat storage by amino modification [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 126. DOI: 10.1016/j.est.2025.117051.
- [11] 刘艳萍,郑剑亮,王旭,等.同轴静电纺丝制备聚乙二醇和聚左旋乳酸核壳纤维及其热管理性能分析[J].*高分子学报*, 2022, 53(12):1 493–1 503.
LIU Yanping, ZHENG Jianliang, WANG Xu, et al. Preparation of poly(ethylene glycol) and poly(L-lactic acid) core-shell fibers by coaxial electrospinning and analysis of the thermal management properties[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2022, 53(12):1 493–1 503.
- [12] KOU Shencong, LIU Chaoqi, MU Yuan, et al. Flexible core – sheath composite phase change thermoregulation fiber films via coaxial electrospinning[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(7):4 123–4 131.
- [13] LIU Yanping, WU Yuewen, ZHAO Shuo, et al. Biobased phase change material with reduced thermal conductivity: From preparation to analysis of thermal insulation performance[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(5):3 728–3 736.
- [14] 杨婷婷.多结构的PEO/PHB核壳超细纤维的制备及性能研究[D].银川:北方民族大学, 2020.
YANG Tingting. Preparation and properties of different core (PEO)-shell(PHB) structured ultrafine fibers[D]. Yinchuan: North Minzu University, 2020.
- [15] 鲁红,冯大春,杨继佑. DSC、MDSC测定物质比热容的比较[J].*分析仪器*, 2011(3):70–74.
LU Hong, FENG Dachun, YANG Jiyu. Comparison of differential scanning calorimetry and modulated differential scanning calorimetry in measurement of specific heat capacities[J]. *Analytical Instrumentation*, 2011(3):70–74.
- [16] 宋少坤.一维微纳限域结构复合相变储能材料的制备与性能研究[D].武汉:武汉理工大学, 2020.
SONG Shaokun. Preparation and properties of composite phase change materials with one-dimensional micro-nano confined structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.