

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.005

# 聚乙烯/石蜡复合相变材料的制备及热性能

徐众<sup>1</sup>,李宏<sup>1</sup>,吴恩辉<sup>1,2</sup>,李军<sup>1,2</sup>,侯静<sup>1,2</sup>

(1.攀枝花学院钒钛学院,四川攀枝花 617000; 2.攀枝花学院四川省太阳能技术集成工程实验室,四川攀枝花 617000)

**摘要:**以高密度聚乙烯(PE-HD)、低密度聚乙烯(PE-LD)和线型低密度聚乙烯(PE-LLD) 3 种不同密度的聚乙烯(PE)作为封装材料,工业石蜡(PW)作为相变主材,采用熔融共混和压制成形制备不同复合相变材料,并采用热导率测试仪和红外热成像仪等对材料的泄漏性能、导热性能、蓄-放热速率和表面温度分布情况进行测试分析。结果表明,在 PW 中添加 3 种 PE 的质量分数不应过低,否则会造成 PW 明显泄漏,复合相变材料泄漏率随 PE 质量分数增加呈现指数减小关系;PE 质量分数为 45% 时,60 °C 加热 1 h,PE-HD/PW,PE-LD/PW 和 PE-LLD/PW 的泄漏率分别为 0.37%,2.05% 和 0.32%,而 65 °C 加热 1 h,这 3 种材料的泄漏率分别为 1.70%,4.87% 和 0.50%,PE-LLD 对 PW 的封装效果最佳;复合相变材料热导率随 PE 质量分数增加呈现增大趋势,PE 质量分数为 45% 时,PE-HD/PW,PE-LD/PW 和 PE-LLD/PW 的热导率分别比纯 PW 提升了 31.94%,10.00% 和 18.71%,添加 PE-HD 的热导率提升幅度最大;复合相变材料蓄-放热速率分别为 2.03~2.59 °C/min 和 1.46~4.76 °C/min,放热速率随成形厚度的增加而减小,添加 PE-HD 的材料放热速率最快;复合相变材料表面温差随加热时间增加呈现指数减小,且越来越均匀。实验结果和拟合计算式可以为不同 PE/PW 复合相变材料的工程应用或者其他实验研究提供理论和数据参考。

**关键词:**高密度聚乙烯;低密度聚乙烯;线型低密度聚乙烯;复合相变材料;泄漏率;热导率

**中图分类号:** TQ211, TB332, TK02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0031-09

## Preparation and thermal properties of polyethylene/paraffin wax composite phase change materials

XU Zhong<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1</sup>, WU Enhui<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, HOU Jing<sup>1,2</sup>

(1. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2. Sichuan Engineering Laboratory for Solar Energy Utilization Technology Integrated, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** Three kinds of polyethylene (PE) with different densities including high density polyethylene (PE-HD), low density polyethylene (PE-LD) and linear low density polyethylene (PE-LLD) were used as packaging materials, and industrial paraffin wax (PW) was used as the main phase change material, then different composite phase change materials were prepared by melt blending and compaction forming. The thermal conductivity tester and infrared thermal imager were used to test and analyze the leakage, thermal conductivity, heat storage-release rate and surface temperature distribution of the materials. The results show that the mass fraction of three kinds of PE added in PW should not be too low, as this can lead to substantial leakage of PW, the leakage rates of the materials decrease exponentially with the increase of the mass fraction of PE. When the mass fraction of PE is 45%, the leakage rates of PE-HD/PW, PE-LD/PW and PE-LLD/PW are 0.37%, 2.05% and 0.32% respectively when heated at 60 °C for 1 h, and the leakage rates are 1.70%, 4.87% and 0.50% respectively when heated at 65 °C for 1 h. The packaging effect of PE-LLD on PW is the best. The thermal conductivities of the materials increase with the increase of the mass fraction of PE. When the mass fraction of PE is 45%, the thermal conductivities of PE-HD/PW, PE-LD/PW and PE-LLD/PW are 31.94%, 10.00% and 18.71% higher than that of pure PW, respectively. The increase of thermal conductivity of the material with PE-HD is the largest. The heat storage and release rates of the materials are 2.03–2.59 °C/min and 1.46–4.76 °C/min, respectively. The heat release rate decreases with the

**基金项目:**四川省自然科学基金项目(2025ZNSFSC0375),工业固态废弃物土木工程综合开发利用四川省高校重点实验室项目(SC-FQWLY-2022-Y-08),攀枝花学院2024年双创项目(SC202413)

**通信作者:**徐众,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向为低温复合相变材料的制备及应用

**收稿日期:**2024-12-24

**引用格式:**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.

increase of forming thickness, and the heat release rate is the fastest when PE-HD is added. The surface temperature difference of the material decreases exponentially with the increase of heating time, and becomes more and more uniform. The experimental results and the fitting calculation formula can provide theoretical and data reference for the engineering application or other experimental research of different PE/PW composite phase change materials.

**Keywords :** high density polyethylene ; low density polyethylene ; linear low density polyethylene ; composite phase change material ; leakage rate ; thermal conductivity

随着社会的进步,人类对能源的需求量剧增,而化石能源储量有限,因而需要加速新能源的开发<sup>[1-4]</sup>。然而新能源存在间歇性和不稳定性,将新能源转化为热能进行储存是解决这一问题的有效方式之一。热能储存的方式之一是相变储热,因具有高储能密度和稳定工作温度而备受关注<sup>[5]</sup>,其可以通过恒温相变,吸收或释放热量,进而实现热能的储存<sup>[6]</sup>。低温有机相变材料能够很好地储存热能,但在固-液相变时存在体积膨胀、热导率低和易泄漏等缺陷,因此需要进行封装<sup>[7-8]</sup>。石蜡(PW)是有机相变材料中潜热较高的一种,具有相变焓值大、储能密度高、过冷度低、稳定性好、成本低等优点,但同样需要封装,如用微胶囊壳体材料、金属泡沫、碳纳米管和膨胀石墨等进行封装,可有效抑制泄漏,保持形状稳定<sup>[9-10]</sup>。但使用上述材料封装PW,不但成本高,工艺复杂,还不易回收,因此开发成本低、工艺简单、储能密度高、相变温度适宜的材料就成为了研究热点。不同密度的聚乙烯(PE)具有良好的韧性、抗冲击性、绝缘性和无毒害等优点,用其封装PW,不但成本低,还能提升封装后材料的热导率并防止PW泄漏,同时还可使材料具备特殊性能(例如绝缘性能和柔韧性等),拓展材料应用领域。

其中,使用线型低密度聚乙烯(PE-LLD)封装PW,对材料的焓值影响较小<sup>[11]</sup>;使用低密度聚乙烯(PE-LD)封装,不但能够提升热导率,还可用于蓄电池降温<sup>[12-15]</sup>;使用高密度聚乙烯(PE-HD)封装,会提升热导率<sup>[16]</sup>、蓄-放速率<sup>[17]</sup>、温度响应速度<sup>[18]</sup>和热稳定性<sup>[19]</sup>。分别使用PE-HD, PE-LD及聚丙烯和聚苯乙烯封装,可得到不同相变温度蓄冷材料,其中PE-HD封装效果最佳<sup>[20]</sup>。采用PE-HD, PE-LD和PE-LLD封装PW能产生良好定型效果,但同时使用3种PE封装PW,并分析PE添加量和蓄热温度对PW泄漏率和材料热导率影响,以及材料成形厚度对蓄-放速率和表面温度分布影响的研究则很少,然而蓄-放速率、表面温度分布和柔韧性等又直接影响相变材料在电池降温和芯片控温方面应用。笔者采用熔融

共混法制备不同PE含量的PE-HD/PW, PE-LD/PW和PE-LLD/PW复合相变材料,并分析PE添加量对PW泄漏率和材料热导率的影响,以及工作温度对PW泄漏率的影响,同时还分析了材料成形厚度对蓄-放热速率和表面温度分布的影响,以中心温度和最高温度的差值表征复合相变材料温度分布均匀性,为PE-HD/PW, PE-LD/PW和PE-LLD/PW复合相变材料在工程领域应用提供数据支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

精炼PW ( $C_nH_{2n+2}$ ): 块状, 熔点 59 °C, 昆仑抚顺有限公司;

PE-HD: 乳白色颗粒, 5000S, 拉丝纺丝级, 中国石化扬子石油化工有限公司;

PE-LD: 乳白色颗粒, 2426H, 高抗冲透明薄膜级, 中国石化扬子石油化工有限公司;

PE-LLD: 乳白色颗粒, DFDA-7042, 吹膜级, 中国石化扬子石油化工有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

电子天平: FA114, 上海海康电子仪器厂;

分析天平: C10002, 杭州万特衡器有限公司;

微电脑控温加热台: 946C+, 东莞市凤岗宝之山电子厂;

台式粉末压片机: DY-30, 天津市思创精实科技发展有限公司;

电热鼓风干燥箱: 101-00A, 绍兴市博特仪器设备有限公司;

手持式红外热成像仪: ST9450, 东莞万创电子制品有限公司;

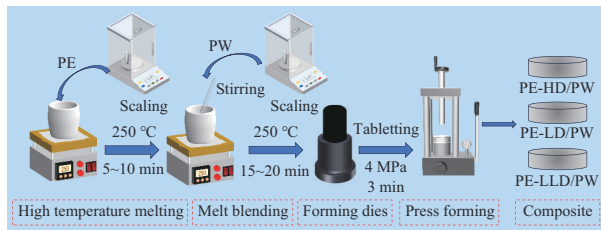
多功能快速热导率测试仪: DRE-III, 湘潭湘仪器有限公司;

工业级高精度电子数显游标卡尺: 数显卡尺 0~500型, 分辨率 0.01, 市售。

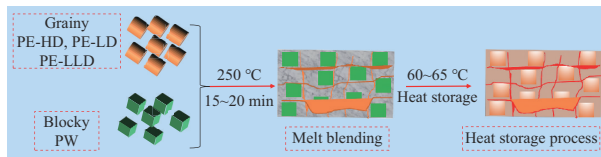
### 1.3 试样制备

采用熔融共混法制备PE/PW复合相变材料, 具体制备流程如图1a所示, 相变储热过程如图1b所

示。以PE-HD与PW质量比( $M_{PE-HD}:M_{PW}$ )为45:55为例,用天平分别称取6.75 g和8.25 g的PE-HD和PW(总质量约15 g),将PE-HD倒入刚玉坩埚,置于250 °C恒温加热台,加热5~10 min,PE-HD不断软化,然后加入PW,搅拌15~20 min,待两者充分熔融混合,冷却后取出,称取5 g倒入模具,压制成形(压力4 MPa,时间3 min),得到PE-HD/PW复合相变材料,同法制备PE质量分数( $\omega_{PE}$ )为5%~55%的复合相变材料,具体配料情况见表1。从图1b看出,加热熔融共混之后,PE吸附PW,PE之间形成交织的网状结构,使得PE/PW的导热变得有序,进而增大热导率,提升蓄-放热速率。



(a) Preparation process of composite phase change materials



(b) Phase change heat storage process

图1 复合相变材料的制备流程及储热过程

Fig. 1 Preparation process and heat storage process of composite phase change materials

表1 复合相变材料的配料表

$\omega_{PE}/\%$	PE-HD/PW		PE-LLD/PW		PE-LD/PW	
	$m_{PE-HD}/g$	$m_{PW}/g$	$m_{PE-LLD}/g$	$m_{PW}/g$	$m_{PE-LD}/g$	$m_{PW}/g$
5	0.74	14.25	0.76	14.27	0.77	14.24
10	1.53	13.50	1.51	13.50	1.49	13.50
15	2.25	12.75	2.25	12.75	2.25	12.75
20	3.01	12.00	3.00	12.01	3.00	12.03
25	3.75	11.25	3.75	11.25	3.75	11.25
30	4.50	10.50	4.50	10.50	4.50	10.50
35	5.26	9.75	5.25	9.75	5.25	9.75
40	6.02	8.99	6.03	9.01	6.10	9.02
45	6.74	8.25	6.75	8.25	6.75	8.25
50	7.51	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
55	8.26	6.74	8.25	6.75	8.27	6.73

Notes:  $\omega$  is mass fraction of PE;  $m$  is mass of different materials added.

## 1.4 测试与表征

### 1.4.1 PW 融化测试

制备2个纯PW相变材料(每个5 g),分别置于

60 °C和65 °C恒温加热台加热,分析融化过程,具体过程如图2所示。从图2看出,在60 °C下,PW在6 min时开始融化,22 min完全融化;在65 °C下,PW在3 min时开始融化,14 min完全融化。两个温度下PW的融化时间未超过60 min,因此测试PE/PW泄漏情况时,时间选择为60 min,可以很好地测试PE对PW的封装效果。

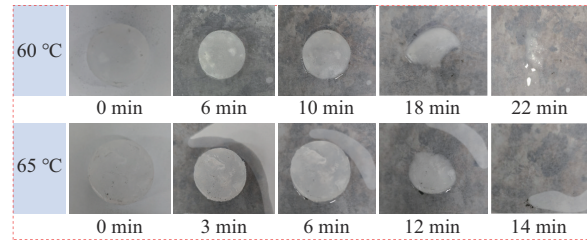


图2 PW的融化过程

Fig. 2 Melting process of PW

### 1.4.2 材料泄漏测试

采用泄漏率衡量PE对PW的封装效果,将制备好的PE/PW复合相变材料置于滤纸上,分别放入60 °C和65 °C干燥箱中加热,每隔10 min取出拍照,加热60 min后取出冷却,观察滤纸上泄漏痕迹,并通过公式(1)计算泄漏率<sup>[13]</sup>。测试60 min后,如果滤纸周边无明显泄漏,则可确定此时的 $\omega_{PE}$ 为PE的最佳添加量。

$$L = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $L$ 为泄漏率,单位%; $M_0$ 是复合相变材料初始质量,单位g; $M_t$ 是复合相变材料加热60 min后的剩余质量,单位g。

### 1.4.3 热导率测试

采用多功能快速热导率测试仪测试PE/PW复合相变材料的热导率。测试条件:输出功率0.25 W,测试时间160 s,采样间隔1 000 ms,滚动周期24 h,探头电阻16.3  $\Omega$ ,仪器固体常数0.26,探头半径7.5 mm,采样数据100个。热导率计算见式(2)<sup>[21]</sup>。

$$\lambda = \frac{P_0 D_r}{2\pi^{1.5} r \Delta t_i} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为被测试样热导率,单位W/(m·K); $P_0$ 为探头功率,单位W; $r$ 为平均半径,单位mm; $\Delta t_i$ 为样品表面温度变化,单位K; $D_r$ 为无量纲特征时间值。

根据文献[22]中的理论热导率计算公式(7)计算实验制备的PE/PW复合相变材料的热导率,并与实验测试值进行对比。

#### 1.4.4 蓄-放热性能测试

分析材料成形厚度对PE/PW的蓄-放热性能的影响,分别将1,2,3 g的 $\omega_{PE}$ 为45%的PE/PW复合相变材料,按照图1a的工艺压制成形(成形厚度分别为1.5~<2.5 mm,3.5~<4.5 mm和4.5~5.5 mm),然后置于65 °C恒温加热台加热40~50 min,取下降至室温,每隔2 min红外成像1次,记录试样表面中心温度( $T_{cen}$ )和最高温度( $T_{max}$ ),采用两者差值即表面温差( $\Delta T$ )表征表面温度分布均匀性, $\Delta T$ 越小温度分布越均匀。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料泄漏性能分析

#### 2.1.1 PE-HD/PW的泄漏率( $L_{PE-HD/PW}$ )分析

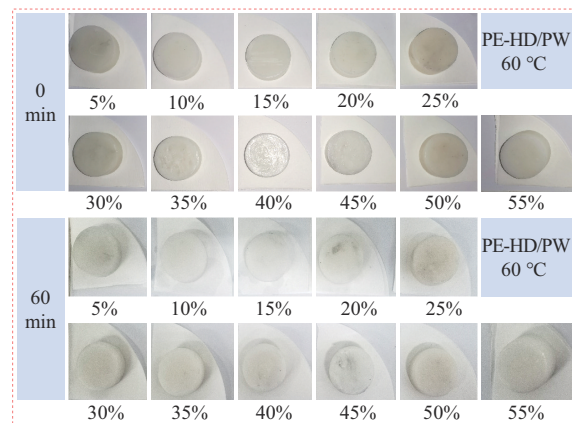
PE-HD/PW在不同温度下的泄漏测试过程如图3a和图3b所示。从图3a和图3b看出,在60 °C将PE-HD/PW加热60 min,滤纸周边未观察到明显的泄漏;在65 °C加热60 min,PE-HD质量分数( $\omega_{PE-HD}$ )<40%时,滤纸周边出现明显泄漏, $\omega_{PE-HD}$ >45%时,周边出现少量泄漏。

根据式(1)计算 $L_{PE-HD/PW}$ ,结果如图3c所示。从图3c看出, $L_{PE-HD/PW}$ 随 $\omega_{PE-HD}$ 增加而减小;60 °C加热, $\omega_{PE-HD}$ >35%时, $L_{PE-HD/PW}$ <1%, $\omega_{PE-HD}$ 为45%时, $L_{PE-HD/PW}$ 为0.37%,且周边无明显泄漏;65 °C加热, $\omega_{PE-HD}$ 为45%时, $L_{PE-HD/PW}$ 为1.70%,之后 $L_{PE-HD/PW}$ 继续降低,均低于2%;65 °C的 $L_{PE-HD/PW}$ 均比60 °C大,且材料泄漏现象更明显。结合图3a和图3b,经综合分析,可以认为,在60 °C使用PE-HD/PW时, $\omega_{PE-HD}$ 需要大于35%,而在65 °C使用PE-HD/PW时, $\omega_{PE-HD}$ 则需要大于45%。

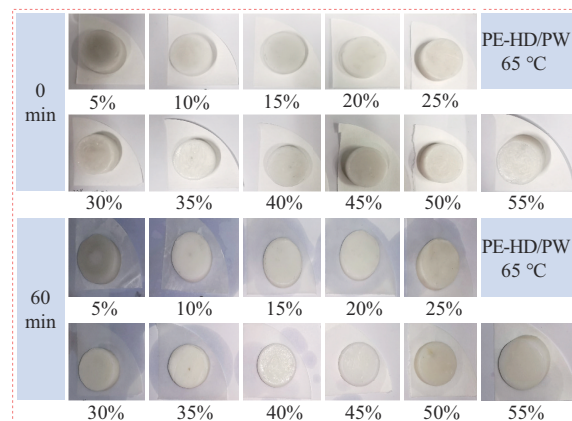
#### 2.1.2 PE-LD/PW的泄漏率( $L_{PE-LD/PW}$ )分析

PE-LD/PW的泄漏测试过程如图4a和图4b所示。从图4a和图4b看出,在60 °C将PE-LD/PW加热60 min,滤纸周边未出现明显泄漏;在65 °C下加热60 min,当PE-LD质量分数( $\omega_{PE-LD}$ )低于40%时,PE-LD/PW存在明显泄漏, $\omega_{PE-LD}$ 为45%时,周边出现微弱泄漏,之后泄漏较少。

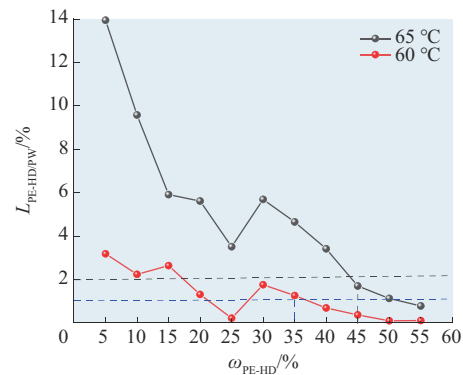
根据式(1)计算 $L_{PE-LD/PW}$ ,结果如图4c所示。从图4c看出,PE-LD/PW的泄漏规律与PE-HD/PW一致;在60 °C条件下, $\omega_{PE-LD}$ 为45%时, $L_{PE-LD/PW}$ 为2.05%,之后低于2%;在65 °C条件下, $\omega_{PE-LD}$ 为45%时, $L_{PE-LD/PW}$ 为4.87%, $\omega_{PE-LD}$ >50%时, $L_{PE-LD/PW}$ 低于3.05%,滤纸周边无明显泄漏痕迹。故在60 °C下使用PE-LD/PW



(a) Leakage test process at 60 °C



(b) Leakage test process at 65 °C



(c)  $L_{PE-HD/PW}$  change rule

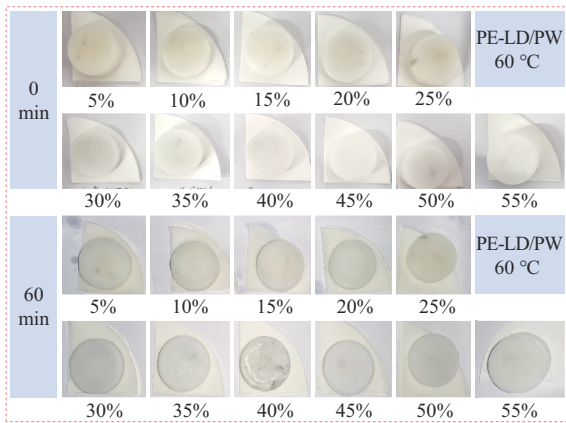
图3 不同 $\omega_{PE-HD}$ 的PE-HD/PW的泄漏测试结果

Fig. 3 Leakage test results of PE-HD/PW with different  $\omega_{PE-HD}$

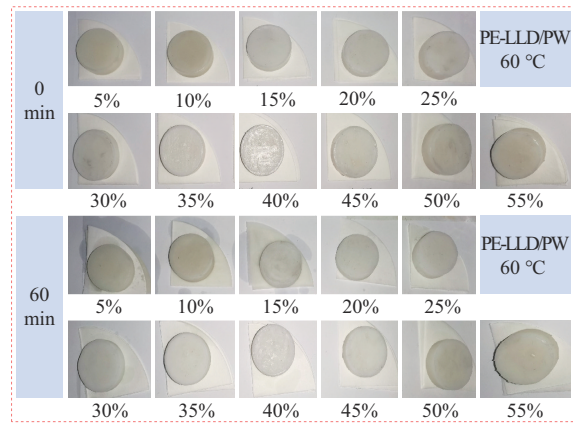
时, $\omega_{PE-LD}$ 需要大于45%,而在65 °C下使用, $\omega_{PE-LD}$ 需要大于50%。

#### 2.1.3 PE-LLD/PW的泄漏率( $L_{PE-LLD/PW}$ )分析

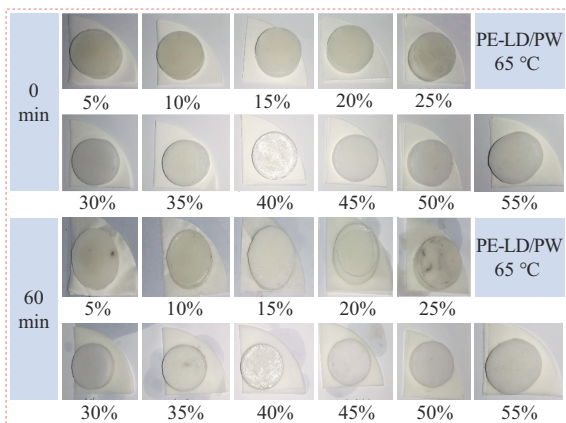
PE-LLD/PW的泄漏测试过程如图5a和图5b所示。从图5a和图5b看出,在60 °C将PE-LLD/PW加热60 min,当PE-LLD质量分数( $\omega_{PE-LLD}$ )低于20%时,滤纸周边出现明显泄漏, $\omega_{PE-LLD}$ >20%时,无明显泄漏;65 °C下加热60 min,当 $\omega_{PE-LLD}$ <35%时,周边存在明显泄漏, $\omega_{PE-LLD}$ >40%时,周边出现微弱泄漏。



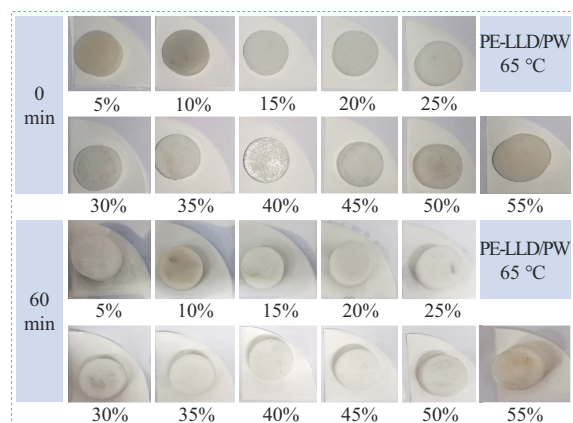
(a) Leakage test process at 60 °C



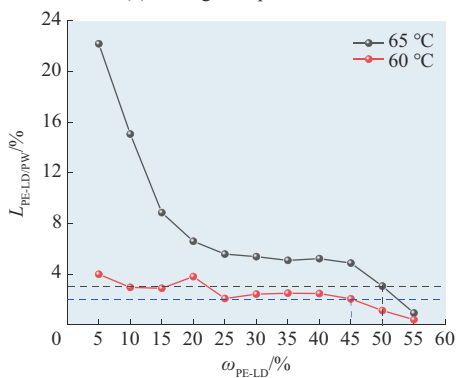
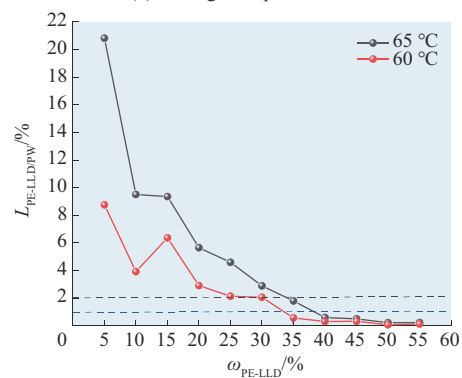
(a) Leakage test process at 60 °C



(b) Leakage test process at 65 °C



(b) Leakage test process at 65 °C

(c)  $L_{PE-LD/PW}$  change rule(c)  $L_{PE-LLD/PW}$  change rule图4 不同 $\omega_{PE-LD}$ 的PE-LD/PW的泄漏测试结果Fig. 4 Leakage test results of PE-LD/PW with different  $\omega_{PE-LD}$ 

根据式(1)计算 $L_{PE-LLD/PW}$ ,结果如图5c所示。从图5c看出, $L_{PE-LLD/PW}$ 的变化规律与 $L_{PE-LD/PW}$ 也一致;在60 °C条件下, $\omega_{PE-LLD}$ 为35%时, $L_{PE-LLD/PW}$ 低于1%, $\omega_{PE-LLD}$ 为45%时, $L_{PE-LLD/PW}$ 为0.32%;在65 °C条件下, $\omega_{PE-LLD}$ 为35%时, $L_{PE-LLD/PW}$ 低于2%, $\omega_{PE-LLD}$ 为45%时, $L_{PE-LLD/PW}$ 为0.50%,且滤纸周边无明显泄漏痕迹。故在60 °C下使用PE-LLD/PW时, $\omega_{PE-LLD}$ 需要大于35%,而在65 °C下使用, $\omega_{PE-LLD}$ 也需要大于35%。

图5 不同 $\omega_{PE-LLD}$ 的PE-LLD/PW的泄漏测试结果Fig. 5 Leakage test results of PE-LLD/PW with different  $\omega_{PE-LLD}$ 

#### 2.1.4 泄漏率拟合方程

分析3种材料泄漏率与 $\omega_{PE}$ 的关系,对其进行拟合,结果见表2,各拟合方程的相关系数 $R^2$ 在0.781 63~0.963 71范围内,说明泄漏率与 $\omega_{PE}$ 之间存在指数减小关系;当 $\omega_{PE}$ 超过35%之后,PE-LD/PW的泄漏率最大,PE-LLD/PW的泄漏率最小,封装效果最好。工程实践中可使用表2的拟合方程计算 $\omega_{PE}$ 的最佳值,减少重复实验,进一步降低实验成本。

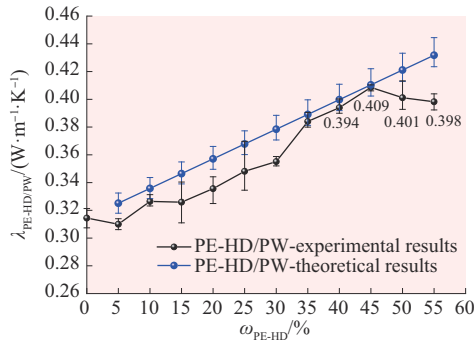
表2 泄漏率拟合方程  
Tab. 2 Leakage rate fitting equation

Serial number	Fitting equation	Correlation coefficient $R^2$
1	$L_{PE-HD/PW-65\text{ }^\circ\text{C}}=16.691 3e^{(-x/14.417 8)}+1.503 7$	0.908 35
2	$L_{PE-HD/PW-60\text{ }^\circ\text{C}}=4.175 0e^{(-x/28.158 8)}-0.415 2$	0.781 63
3	$L_{PE-LD/PW-65\text{ }^\circ\text{C}}=32.267 1e^{(-x/9.256 3)}+3.444 5$	0.963 71
4	$L_{PE-LD/PW-60\text{ }^\circ\text{C}}=-0.252 4e^{(x/21.748 1)}+3.711 2$	0.801 39
5	$L_{PE-LLD/PW-65\text{ }^\circ\text{C}}=30.197 4e^{(-x/11.228 4)}+0.249 3$	0.961 85
6	$L_{PE-LLD/PW-60\text{ }^\circ\text{C}}=11.555 1e^{(-x/18.308 0)}-0.674 3$	0.885 54

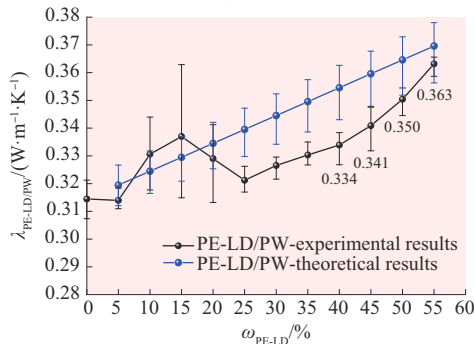
Note:  $x$  is mass fraction of PE.

### 2.2 材料热导率分析

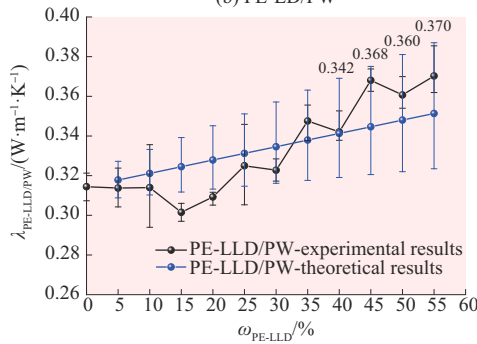
PE/PW复合相变材料的热导率测试结果如图6所示。从图6看出,3种材料热导率随 $\omega_{PE}$ 增加总体呈现增大趋势;PW的热导率( $\lambda_{PW}$ )为0.31 W/(m·K), $\omega_{PE-HD}$ 为45%时,PE-HD/PW的热导率( $\lambda_{PE-HD/PW}$ )比 $\lambda_{PW}$



(a) PE-HD/PW



(b) PE-LD/PW



(c) PE-LLD/PW

图6 PE/PW复合相变材料的热导率( $\lambda$ )变化规律

Fig. 6 Change rules of thermal conductivity ( $\lambda$ ) of PE/PW composite phase change materials

提升31.94%,与文献[16]中 $\omega_{PE-HD}$ 为60%相比[ $\lambda_{PW}=0.23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ],实验的 $\lambda$ 更高; $\omega_{PE-LD}$ 为45%时,PE-LD/PW的热导率( $\lambda_{PE-LD/PW}$ )比 $\lambda_{PW}$ 提升10.00%, $\omega_{PE-LD}$ 为55%时, $\lambda_{PE-LD/PW}$ 提升17.10%,与文献[12]中 $\omega_{PE-LD}$ 为40%相比[ $\lambda_{PW}=0.26 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ],实验的 $\lambda$ 更高。这是因为实验使用的成形压力跟上述文献不一样,致使成形相变材料的密度不同,而材料的密度直接影响热导率,这也是导致本次实验制备材料热导率偏高的主要原因之一。 $\omega_{PE-LLD}$ 为45%时,PE-LLD/PW的热导率( $\lambda_{PE-LLD/PW}$ )比 $\lambda_{PW}$ 提升18.71%, $\omega_{PE-LLD}$ 为55%时, $\lambda_{PE-LLD/PW}$ 提升19.35%。由于PE-HD的热导率较高,因而添加PE-HD对PW的热导率提升最大,添加PE-LD提升最小。 $\lambda_{PE-HD/PW}$ 实验测试值都比理论计算值低,而 $\lambda_{PE-LD/PW}$ 和 $\lambda_{PE-LLD/PW}$ 的实验测试值与理论比,存在偏大或偏小的现象,这是因为制备的材料表面平整度不高,导致温度探头接触不充分所致。对实验测试的3种材料热导率进行拟合,结果见表3,从表3看出,3种材料热导率与 $\omega_{PE}$ 均存在线性增大关系,拟合效果最佳的是PE-HD/PW。

表3 热导率拟合方程

Tab. 3 Thermal conductivity fitting equation

Serial number	Fitting equation	Correlation coefficient $R^2$
1	$\lambda_{PE-HD/PW}=0.301 11+0.002 27\omega$	0.931 20
2	$\lambda_{PE-LD/PW}=0.302 75+0.000 98\omega$	0.848 18
3	$\lambda_{PE-LLD/PW}=0.285 96+0.001 45\omega$	0.703 89

Note:  $\omega$  is mass fraction of PE.

### 2.3 材料蓄-放热过程分析

不同成形厚度PE-HD/PW复合相变材料的蓄-放热过程中 $T_{\text{cen}}$ 随时间变化情况如图7所示,图中PE-HD/PW-1 g,PE-HD/PW-2 g和PE-HD/PW-3 g分别表示因质量不同所形成的不同厚度的试样(具体

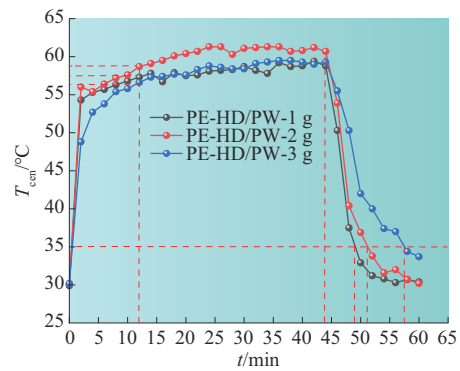


图7 PE-HD/PW蓄-放热过程表面中心温度随时间( $t$ )的变化

Fig. 7 Surface center temperature change of PE-HD/PW during heat storage-release process with time ( $t$ )

厚度值见 1.4.4,下同)。从图 7 看出,5 min 之前,升温迅速,这是因为 PW 还未到熔点,处于固态,传热速度较快;12 min 之后,升温速率减缓且趋于稳定,这是因为 PW 开始融化,属于固-液混合态,传热速率下降。从最高温度下降到 35 °C,PE-HD/PW-1 g,PE-HD/PW-2 g 和 PE-HD/PW-3 g 所用时间分别为 5,10,15 min 左右,厚度越大,放热越缓慢,因为厚度越大 PW 的质量越大,固-液混合态持续时间也越长,如果将该相变材料用于电子元器件降温需要考虑合适的厚度。加热 12 min,不同厚度 PE-HD/PW 的  $T_{\text{con}}$  达到的最高温度分别为 57.3,58.7,56.6 °C,2 g 的 PE-HD/PW 温度最高,PE-LD/PW 和 PE-LLD/PW 的蓄-放热过程中温度变化规律跟 PE-HD/PW 的基本一致。

计算蓄热 12 min 的蓄热速率( $V_1$ ),放热到 35 °C 的放热速率( $V_2$ ),结果见表 4。从表 4 看出,PE-HD/PW 的  $V_1$  和  $V_2$  分别在 2.20~2.38 °C/min 和 1.77~4.76 °C/min 范围内;PE-LD/PW 的  $V_1$  在 2.25~2.59 °C/min 范围内, $V_2$  在 1.46~3.22 °C/min 范围内;PE-LLD/PW 的  $V_1$  在 2.03~2.37 °C/min 范围内, $V_2$  在 1.80~3.82 °C/min 范围内;总体来看,添加 PE-HD 后,材料的放热速率最快,而添加 PE-LD 后,放热速率最慢,这是因为添加 PE-HD 后材料热导率更大,放热速率更快。可以看出,2 g 的材料升温最快,3 g 的降温最慢,这是因为 PW 的质量大,放热速度缓慢。与文献[17]对比,2 g 的材料蓄热速率更快,1 g 的放热速率更快。

表 4 PE/PW 的蓄-放热速率

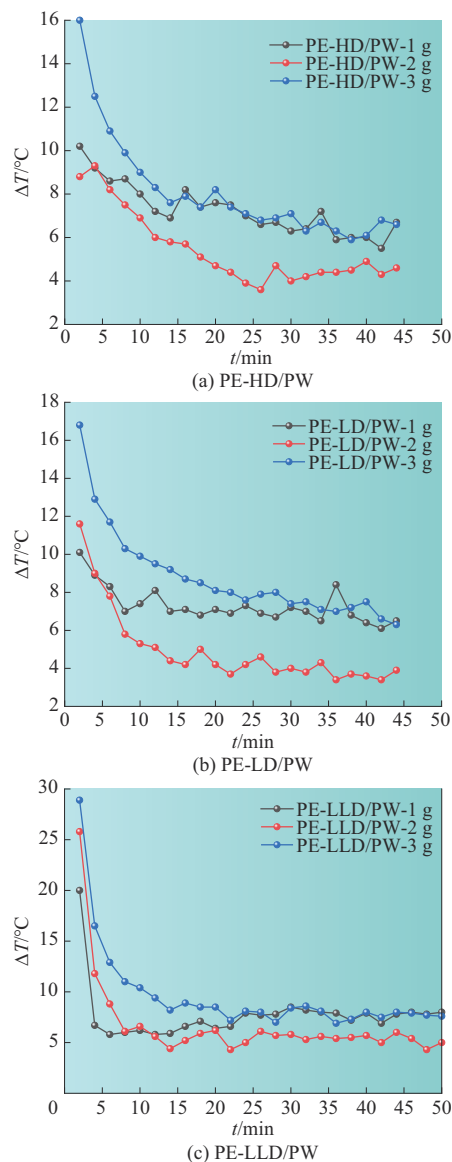
Tab. 4 Heat storage-release rate of PE/PW

Serial number	Samples	$V_1/(\text{°C}\cdot\text{min}^{-1})$	$V_2/(\text{°C}\cdot\text{min}^{-1})$
1	PE-HD/PW-1 g	2.28	4.76
2	PE-HD/PW-2 g	2.38	3.67
3	PE-HD/PW-3 g	2.20	1.77
4	PE-LD/PW-1 g	2.33	3.22
5	PE-LD/PW-2 g	2.59	2.35
6	PE-LD/PW-3 g	2.25	1.46
7	PE-LLD/PW-1 g	2.33	3.82
8	PE-LLD/PW-2 g	2.37	2.56
9	PE-LLD/PW-3 g	2.03	1.80

#### 2.4 材料表面温度分布均匀性分析

分析 PE/PW 的成形厚度对材料表面温度分布均匀性的影响,结果如图 8 所示。从图 8a 看出,随时间增加,材料表面  $\Delta T$  变小,PE-HD/PW 的热传导是从表面不断向内部传递,外部 PW 先融化,不断向内部扩散,当 PW 完全为液态时,热传导变得规律稳

定,表面温度分布变得均匀。厚度为 3.5~4.5 mm 时(即采用 2 g PE/PW 成形时),表面的温度分布最均匀,厚度为 4.5~5.5 mm 时(即采用 3 g PE/PW 成形时),表面温度分布均匀性最差。而从图 8b 和图 8c 看出,PE-LD/PW 和 PE-LLD/PW 的表面温度分布变化规律跟 PE-HD/PW 保持一致。

图 8 不同时间( $t$ )下 PE/PW 的表面温度分布均匀性Fig. 8 Surface temperature distribution uniformity of PE/PW at different time ( $t$ )

对时间与  $\Delta T$  的关系进行拟合,结果见表 5。从表 5 看出,PE-HD/PW,PE-LD/PW 和 PE-LLD/PW 的拟合相关系数  $R^2$  最小值分别为 0.846 98,0.721 32 和 0.901 63, $\Delta T$  与时间之间存在指数减小的关系,将该类相变材料用于蓄电池降温时,可以采用表 5 所示拟合式开展模拟研究。

表5 表面温度分布均匀性拟合方程

Tab. 5 Surface temperature distribution uniformity fitting equation

Serial number	Fitting equation	Correlation coefficient $R^2$
1	$\Delta T_{PE-HD/PW-1g} = 4.41024e^{(-t/15.5584)} + 5.88867$	0.84698
2	$\Delta T_{PE-HD/PW-2g} = 6.87891e^{(-t/9.91468)} + 4.06757$	0.92137
3	$\Delta T_{PE-HD/PW-3g} = 12.3615e^{(-t/6.03723)} + 6.64758$	0.96966
4	$\Delta T_{PE-LD/PW-1g} = 4.99497e^{(-t/4.35161)} + 6.90632$	0.72132
5	$\Delta T_{PE-LD/PW-2g} = 10.1458e^{(-t/7.33757)} + 3.87476$	0.90244
6	$\Delta T_{PE-LD/PW-3g} = 11.6714e^{(-t/6.83925)} + 7.24523$	0.96200
7	$\Delta T_{PE-LLD/PW-1g} = 86404.50e^{(-t/0.22682)} + 7.19576$	0.90163
8	$\Delta T_{PE-LLD/PW-2g} = 57.95731e^{(-t/1.90267)} + 5.41424$	0.98094
9	$\Delta T_{PE-LLD/PW-3g} = 41.85045e^{(-t/2.78398)} + 7.98742$	0.97887

Note:  $t$  is time.

### 3 结论

(1)研究了3种不同密度聚乙烯(PE-HD, PE-LD和PE-LLD)添加量对PW泄漏率的影响,发现泄漏率随PE添加量增加呈现指数减小。60℃下使用,PE-HD, PE-LD和PE-LLD的质量分数应分别高于35%, 45%和35%; 65℃下使用,则应分别高于45%, 50%和35%;添加PE-LLD的泄漏率最低,表明PE-LLD对PW封装效果最好。

(2)成形PE/PW复合相变材料的热导率随PE添加量增加呈现增大趋势;PE-HD/PW的热导率实验测试值比理论计算值偏小,其他两种材料的热导率实验测试值比理论计算值偏大或偏小;PE质量分数为45%时,PE-HD/PW, PE-LD/PW和PE-LLD/PW的热导率分别比纯PW提升31.94%, 10.00%和18.71%;添加PE-HD后热导率提升最大,添加PE-LD提升最小。

(3)PE/PW成形厚度为3.5~4.5mm时蓄热速率最快,放热速率随厚度增加而减小,PE/PW的蓄热和放热速率分别为2.03~2.59℃/min和1.46~4.76℃/min,添加PE-HD之后放热速率最快,添加PE-LD的最慢;PE/PW的表面温差随加热时间增加呈现指数减小,温度分布越来越均匀,厚度为3.5~4.5mm时,表面温度分布最均匀。

#### 参考文献

- ONG P J, LEE H Y S, WANG S X, et al. Recent advances in enhanced thermal property in phase change materials using carbon nanotubes: A review[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 279. DOI:10.1016/j.solmat.2024.113228.
- JIANG Z, LI X Y, PENG B H, et al. A review on recent advances in oriented thermally conductive phase change composites: Preparation, characteristics and applications[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 28. DOI:10.1016/j.mtsust.2024.101026.
- 肖桐,刘庆祚,张家豪,等.热固性树脂基复合相变材料的制备及

其储能强化研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3):1311-1327.

- XIAO Tong, LIU Qingyi, ZHANG Jiahao, et al. Recent advances in thermosetting resin-based composite phase change materials and enhanced phase change energy storage[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3):1311-1327.
- ZHI M Y, YUE S, ZHENG L L, et al. Recent developments in solid-solid phase change materials for thermal energy storage applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89. DOI:10.1016/j.est.2024.111570.
- WANG S Q, DU R X, LI T X. Progress and perspective on thermal conductivity enhancement of phase change materials[J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(20):3176-3179.
- XU J Y, ZHANG X L, ZOU L G. A review: Progress and perspectives of research on the functionalities of phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 54. DOI:10.1016/j.est.2022.105341.
- LIU K, YUAN Z F, ZHAO H X, et al. Properties and applications of shape-stabilized phase change energy storage materials based on porous material support—A review[J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 21. DOI:10.1016/j.mtsust.2023.100336.
- YAZDANI MCCORD M R, BANIASADI H. Advancements in form-stabilized phase change materials: stabilization mechanisms, multifunctionalities, and applications—A comprehensive review[J]. *Materials Today Energy*, 2024, 41(3). DOI:10.1016/j.mtener.2024.101532.
- CHANG Z J, WANG K, WU X H, et al. Review on the preparation and performance of paraffin-based phase change microcapsules for heat storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46. DOI:10.1016/j.est.2021.103840.
- WU T F, WU D, DENG Y, et al. Three-dimensional network-based composite phase change materials: Construction, structure, performance and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199. DOI:10.1016/j.rser.2024.114480.
- GUMEDE T P. The overall crystallization behavior of polyethylene/wax blends as phase change materials for thermal energy storage: A mini review[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2021, 27(3):469-484.
- LI C C, WANG W X, ZENG X L, et al. Emerging low-density polyethylene/paraffin wax/aluminum composite as a form-stable phase change thermal interface material[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(4):772-781.
- YU Y L, QIN H M, RAN S S, et al. A low-density polyethylene-reinforced ternary phase-change composite with high thermal conductivity for battery thermal management[J]. *Energies*, 2023, 16(9). DOI:10.3390/en16093838.
- 黄军元,尹艳平.相变辅助PE-LD/EG共混物制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):45-49.
- HUANG Junyuan, YIN Yanping. Properties of phase change assisted preparation of low density polyethylene/expanded graph-

- ite composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3): 45–49.
- [15] 谷亚新,关志猛,鄢冬茂. PE-LD/石蜡复合相变储能材料的制备及性能研究[J]. *中国塑料*, 2018, 32(6):53–58.  
GU Yaxin, GUAN Zhimeng, YAN Dongmao. Preparation and properties of PE-LD/paraffin based composite phase change energy storage materials[J]. *China Plastics*, 2018, 32(6):53–58.
- [16] YADAV D K, RATHORE P K S, SINGH R K, et al. Experimental study on paraffin wax and soya wax supported by high-density polyethylene and loaded with nano-additives for thermal energy storage[J]. *Energies*, 2024, 17(11). DOI:10.3390/en17112461.
- [17] RAHMALINA D, ZADA A R, SOEFIHANDINI H, et al. Analysis of the thermal characteristics of the paraffin wax/high-density polyethylene (HDPE) composite as a form-stable phase change material (FSPCM) for thermal energy storage[J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 121(6):6–13.
- [18] XIE Y F, YANG Y P, LIU Y, et al. Paraffin/polyethylene/graphite composite phase change materials with enhanced thermal conductivity and leakage-proof[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(3):543–551.
- [19] MOMBeki PEa H J, AN Z J, DU X Z, et al. Structure, characterization and thermal properties of the form-stable paraffin/high-density polyethylene/expanded graphite/epoxy resin composite PCMs for thermal energy storage[J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(6):2 104–2 114.
- [20] 冯立品,王明.不同载体石蜡基定型相变蓄冷材料的制备[J].*化工新型材料*, 2020, 48(11):135–137.  
FENG Lipin, WANG Ming. Preparation of shaped phase change cool storage paraffin based materials with different supports[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(11):135–137.
- [21] 赵景尧,孟泓旭,陈柏男,等.木材导热系数实验与模拟方法的研究进展[J].*木材科学与技术*, 2023, 37(6):12–19.  
ZHAO Jingyao, MENG Hongxu, CHEN Bonan, et al. Research progress on experimental and simulation methods for thermal conductivity of wood[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2023, 37(6):12–19.
- [22] 李文龙,李轩科,申克,等.高导热聚酰亚胺石墨膜/环氧树脂复合材料的制备与性能表征[J].*新型炭材料*, 2021, 36(5):971–979.  
LI Wenlong, LI Xuanke, SHEN Ke, et al. Preparation and characterization of graphitized polyimide film/epoxy resin composites with high thermal conductivities[J]. *New Carbon Materials*, 2021, 36(5):971–979.