# 氮化硼/脂肪酸复合相变材料的形状稳定性和导热性分析

徐众<sup>1,2,3</sup>,吴恩辉<sup>1,2,3</sup>,侯静<sup>1,2,3</sup>,李军<sup>2,3</sup>,黄平<sup>2,3</sup>

(1.攀枝花学院 钒钛学院,四川 攀枝花 617000;2.四川省太阳能利用技术集成工程实验室,四川 攀枝花 617000;3.太阳能技术集成及应用推广四川省高校重点实验室,四川 攀枝花 617000)

摘要:目的 探究氮化硼(BN)对月桂酸(LA)、肉豆蔻酸(MA)、棕榈酸(PA)和硬脂酸(SA)等4 种脂肪酸(FA)的形状稳定性和导热性的影响。方法 将 FA 融化后,添加 BN,在熔融状态下共混,制 备出4种不同的成型复合相变材料,并分析 BN 的添加量、光-热转换、储热时间和温度对复合相变材 料的密度和形状稳定性的影响,以及 BN 添加量对 FA 相变材料热导率的影响。结果 复合相变材料的密 度随着 BN 添加量的增加呈线性增大趋势,稳定性也随之增强,在4种 FA 中添加 BN 的最佳质量分数 分别为 68%、69%、69%、68%;复合相变材料的泄漏率随着储热时间的增加呈线性增大趋势,在储热 12h 时其泄漏率小于 0.6%,泄漏率随着储热温度的升高而增大,在高于熔点 25℃左右条件下加热 3 h, 泄漏率低于 0.1%;材料经过 4 次光-热转换后,其泄漏率小于 0.4%;复合材料的热导率分别比纯 FA 的 热导率提高了 401.91%、597.92%、353.74%、304.95%。结论 制备的成型复合相变材料具有不同的储能 温度、导热性能和稳定性,可以作为运输过程中的保温材料。

关键词:氮化硼;脂肪酸;成型复合相变材料;泄漏率;热导率

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)17-0020-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.003

# Shape Stability and Thermal Conductivity of Boron Nitride/Fatty Acid Phase Change Composites

XU Zhong<sup>1,2,3</sup>, WU En-hui<sup>1,2,3</sup>, HOU Jing<sup>1,2,3</sup>, LI Jun<sup>2,3</sup>, HUANG Ping<sup>2,3</sup>

(1. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Sichuan Panzhihua 617000, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Solar Technology Integration, Sichuan Panzhihua 617000, China; 3. Application and Solar Technology Integration Sichuan Provincial Key Laboratory of University, Sichuan Panzhihua 617000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the effects of boron nitride (BN) on the shape stability and thermal conductivity of lauric acid (LA), myristic acid (MA), palmitic acid (PA) and stearic acid (SA). Four different molding phase change composites were prepared by blending FA with BN after melting. The effects of BN addition, photothermal conversion, heat storage time and temperature on the density and shape stability of phase change composites, as well as the effects of BN addition on the thermal conductivity of FA phase change materials were analyzed. The results showed that the density of phase change composites increased linearly with the increase of BN content, and its stability also increased. The optimal mass fractions of BN added in the four FAs were 68%, 69%, 69% and 68%, respectively. The leakage rate of phase

收稿日期: 2021-12-22

基金项目:四川省科技厅国际科技合作项目(2020YFH0195);攀枝花市指导性科技计划(2021ZD-S-4);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)

作者简介:徐众(1985—),男,硕士,讲师,主要研究方向为低温复合相变材料应用。

change composites increased linearly with the increase of heat storage time. The leakage rate was less than 0.6% after 12 h of heat storage. The leakage rate increased with the increase of heat storage temperature, and the leakage rate was less than 0.1% after heating for 3 h above the melting point of 25 °C. After four photothermal conversions, the leakage rate was less than 0.4%; the thermal conductivity of the composites was 401.91%, 597.92%, 353.74% and 304.95% higher than that of pure FA, respectively. The prepared phase change composites have different energy storage temperature, thermal conductivity and stability, which can be used as insulation materials during transportation.

KEY WORDS: boron nitride; fatty acid; shape-stabilized phase change composites; leakage rate; thermal conductivity

新能源的开发与利用备受关注,新能源在开发 利用过程中存在间歇性和不稳定性等缺陷,因此需 要采用储能方式来调节能量的供给。利用有机相变 材料进行低温热能储存是方式之一。由于有机相变 材料在储热时存在热导率低、易泄漏和易燃等缺陷, 因此需要在有机相变材料中添加纳米石墨烯、氧化 石墨烯、膨胀石墨、碳纳米管、纳米碳纤维等碳基 材料和氮化硼基体材料来解决<sup>[1]</sup>。其中,氮化硼 (BN)具有良好的导热性能,研究者将 BN<sup>[2-3]</sup>或改 性 BN<sup>[4-8]</sup>加入聚乙二醇(PEG)中,也可以将 BN 添加到 PEG 复合相变材料中<sup>[6-8]</sup>,制备得到复合相 变材料。分析结果显示,添加 BN 或者改性 BN 后 材料的导热性能均得到有效提升。在石蜡中添加 BN,并通过模拟和实验的方式分析材料的导热性 能,结果显示,材料的热导率比纯石蜡的热导率提 高了 6~10 倍<sup>[9-10]</sup>。在癸酸-棕榈酸-硬脂酸混合酸<sup>[11]</sup>、 低密度聚乙烯<sup>[12]</sup>、赤藻糖醇/甘露糖醇<sup>[13]</sup>、肉豆蔻酸<sup>[14]</sup> 和正十八烷/硬脂酸<sup>[15]</sup>等材料中添加 BN 后,其热导率 比纯相变材料的热导率提高了 7.2%~22%。另外, 在 5G 时代,电子系统趋向于便携式、小型化、集成化和智能 化, 对系统温度的控制显得尤其重要, 将 BN 基复合相 变材料安装于微型电子元器件的背面,可以有效控制温 度,提高系统的运行效率[16-17]。上述研究和应用均基于 BN 基复合相变材料具有良好的导热性能。将 BN 加入 不同脂肪酸中,针对 BN 的添加量、充热时间、温度和 光--热转换对材料热稳定性影响的相关研究较少。由于 热稳定性是衡量材料储热性能的重要指标之一,因此实 验选择将BN分别添加到月桂酸(LA)、肉豆蔻酸(MA)、 棕榈酸(PA)和硬脂酸(SA)中,制备得到不同的成 型复合相变材料,分析 BN 的添加对材料密度和热导率 的影响, 以及不同条件下材料的热稳定性, 为 BN/硬脂 酸复合相变材料在不同场景的应用提供研究基础。

## 1 实验

#### 1.1 材料及仪器

主要材料: BN,浙江亚美纳米科技有限公司; LA,广州特韵贸易有限公司化工有限公司; MA,广 州聚力化工有限公司; PA,天津市光复精细化工研究 所; SA,天津市鼎盛鑫化工有限公司。 主要仪器: FA2104A 型电子分析天平,上海精天 电子仪器有限公司; 101 型电热鼓风干燥箱,北京永 光明医疗仪器有限公司; FYD 型电动压片机,天津 市思创精实科技发展有限公司; RDE 型瞬态平面热 源法导热仪,湘潭仪器仪表有限公司; MIK-R200D 型无纸化数显温度计,杭州米科传感技术有限公司; GXZ500 型长弧氙灯,上海季光特种照明电器厂; JF966-3030 型微电脑控制智能加热台,东莞市长安 金峰电子工具厂。

#### 1.2 成型复合相变材料的制备

以制备 BN 质量分数为 20 %的 BN/LA 成型材料 为例,先称取 8 g LA 置于 50 mL 烧杯中,放入 80 ℃ 恒温水浴中熔化完全,然后转移到 50 ℃恒温水浴 (MA、PA 和 SA 的水浴温度分别为 60、70、75 ℃), 边搅拌边加入 2 g BN,搅拌 30 min 左右,再冷却至 室温,使用压片机压制成型,成型压力为 300 kN, 保压时间为 3 min。

#### 1.3 BN 的含量对材料泄漏率的影响

制备 BN 质量分数不同的 BN/LA、BN/MA、 BN/PA 和 BN/SA 成型材料。称取质量为  $m_1$ 的材料 置于滤纸上,分别放入 50、60、70、75 ℃鼓风干 燥箱中加热 1 h(文献[18]的实验数据显示材料在 1 h内的泄漏量最大),每隔 10 min 取出拍照。结 束后,称量材料的质量( $m_2$ ),采用式(1)计算泄漏 率  $\eta^{[18]}$ 。

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$
(1)

式中: $\eta$ 为材料泄漏率,%; $m_1$ 为材料的初始质量,g; $m_2$ 为材料加热后的质量,g。

#### 1.4 加热时间和温度对材料泄漏率的影响

制备 3 个最佳配比的成型材料,称其质量,置于 滤纸上,再置于金属托盘中,分别置于 1.3 节所述的 4 个温度下加热 12 h,每隔 1 h 称量 1 次材料的质量, 采用式 (1) 计算  $\eta$ 。在测试成型复合材料前,分别 取 10 g LA、MA、PA 和 SA 制备成型材料,置于 4 个温度下加热,温度设置见表 1,观察融化过程。再 将最佳配比的成型复合材料置于 4 个温度下加热 3 h。 结束后,用式 (1) 计算  $\eta$ 。

	change composites
<b>Tab.1 Heating</b>	temperature of shape-stabilized phase
表 1	成型复合相变材料的加热温度

材料种类	蓄热温度/℃				
	温度 1	温度 2	温度 3	温度 4	
BN/LA	40	50	60	70	
BN/MA	50	60	70	80	
BN/PA	60	70	80	90	
BN/SA	65	75	85	93	

### 1.5 光-热转换对材料泄漏率的影响

将 2 个同样的成型复合材料置于自制的光-热转换台上,将温度计探头置于样品的下方,具体原理见图 1。将样品放置好后,打开氙灯,观察温度计的温度,当4 个温度计的温度均达到 75 ℃以上时关闭氙灯,让成型材料在室温下自然冷却。当温度达到 30 ℃ 左右时,完成 1 次光-热转换,连续进行 4 次光-热转换后称其质量,用式(1)计算 η。





#### 1.6 成型复合相变材料瞬态热导率测试

采用多功能导热系数测试仪测量成型复合相 变材料的热导率。测试的具体条件:成型材料的质 量约为10g;测试温度为28~33℃;功率为0.1W (纯相变材料)和0.25W(复合相变材料)。测试7 次,取其平均值作为材料的热导率,用式(2)计 算热导率增强效率 y<sup>[19-20]</sup>。

$$\gamma = \frac{\lambda_{\rm PCM} - \lambda_{\rm FA}}{100 \times w \times \lambda_{\rm FA}} \times 100\%$$
<sup>(2)</sup>

式中: $\lambda_{PCM}$ 为成型复合相变材料的热导率, W/(m·K); $\lambda_{FA}$ 为纯脂肪酸的热导率,W/(m·K);w为 复合相变材料中 BN 的质量分数,%。

# 2 结果与分析

#### 2.1 BN 添加量对材料密度的影响

测试 BN 添加量对材料密度的影响,测试结果 见图 2。由图 2 看出,材料密度随着 BN 添加量的 增加而增大,这与文献[5]的变化规律一致。因为 在相同质量下 BN 的密度远大于 FA 的密度。当 BN 的质量分数小于 70 %时,4 种成型复合相变材料的 密度在 0.88~1.67 g/cm<sup>3</sup>之间变化。对 BN 的添加量 与材料密度的变化规律进行线性拟合,结果见图 2。 由图 2 可知,线性相关系数(*R*<sup>2</sup>)分别为 0.96、 0.98、0.99 和 0.98,说明 BN 的添加量与材料密度 之间存在线性相关性,BN/LA 的拟合方程斜率相 对最小,BN/SA 的斜率相对最大。

#### 2.2 BN 的添加量对材料泄漏率的影响

BN 的添加量对材料泄漏率  $\eta$  的影响见图 3。当 BN 的质量分数小于 40%时,储热 60 min,材料无固 定形态,即 $\eta$ 为 100%,所以 BN 的添加量从质量分 数 40%开始。从图 3 中看出,当 BN 的质量分数为 40%~60%时, $\eta$  随着 BN 添加量的增加而减小;当 BN 的质量分数高于 60%时,材料泄漏率  $\eta$  在 1%以 下,稳定性得到提升。

虽然 BN 的添加量越高, 材料  $\eta$  值会越小, 但 根据文献[19]中的式(3) 计算 4 种复合相变材料 的融化潜热理论值分别为 62.78、50.07、69.69、 65.82 J/g, 冷凝潜热分别为 59.23、47.52、68.45、 64.99 J/g, 可看出材料中 BN 的质量分数越小, 其 潜热值越大,单位质量的储能密度越高。由此选择 滤纸上无泄漏痕迹且泄漏率低于 0.05%时的 BN 添 加量为最佳值,具体添加量见表 2。表 2 中  $\eta_1 - \eta_4$ 为 4 个最佳配比平行样的泄漏率,  $\eta$  ¥均为 4 个样品 泄漏率的平均值。

## 2.3 储热时间对材料泄漏率的影响

分析材料的泄漏率随储热时间的变化情况,结果见 图 4。从图 4 可以看出,材料泄漏率随着储热时间的增 加而增大,这与文献[20]和[21]的规律一致。因为随着 储热时间的增加,FA 处于液态的时间变长,流动性增 强,材料开始膨胀,出现了缝隙,FA 出现了泄漏;材 料的泄漏率在储热时间为 3~4 h 时增加得较明显,因此 测试不同储热温度对形状稳定性的影响时,仅加热 3 h; BN/LA、BN/MA、BN/PA、BN/SA 的泄漏率分别在 0.06%~0.45%、0.11%~0.50%、0.09%~0.59%、0.06%~0.49% 间变化,4种成型复合相变材料在储热 12 h 之后,泄漏 率均小于 0.59%,这与文献[18]的结论接近。经过储热 12 h 后,4种复合相变材料的泄漏率变化量 Δη 分别为 0.39%、0.39%、0.50%、0.43%,储热时间对 BN/LA 和 BN/MA 的泄漏率的影响较小。



图 2 BN 的添加量对材料密度的影响 Fig.2 Effect of BN addition on density of material



图 3 BN 添加量对材料泄漏率的影响 Fig.3 Effect of BN addition on leakage rate of material

另外,采用线性拟合分析储热时间对泄漏率 的影响,结果见图 4。从图 4 中看出,4 种材料的 R<sup>2</sup>分别为 0.97、0.98、0.94、0.94,均接近于 1, 说明储热时间与泄漏率之间存在一定的线性相关 性。采用拟合公式计算材料加热 66 h 后的泄漏率 分别为 2.18%、2.34%、2.88%、2.60%,可知材料 的泄漏率均小于 3%,比文献[7]中 PU<sub>PEG</sub> 和 Paraffin@SiO<sub>2</sub> 储热 66 h 的泄漏率 (6.55%和 4.97%)低,这是因为实验添加的支撑材料的比率 更高;比文献[22]中 ODE/NPGDMA/BN 复合材料 加热 66 h 后的泄漏率 (1.48%)高,这是因为文献 中使用的是 2 种支撑材料; BN/PA 的截距和斜率 相对最大,储热时间对其泄漏率的影响相对最大, 而 BN/LA 的斜率相对最小,说明储热时间对其泄 漏率的影响相对最小。

#### 2.4 储热温度对复合相变材料泄漏率的影响

在不同温度下,4种纯 FA 成型相变材料的融化情况 如图 5 所示。从图 5 可以看出,成型材料 LA 在 40 ℃下 加热 3 h 未见融化,在其他 3 个储热温度下完全融化的时 间分别为 98、26、8 min;成型材料 MA 在 4 个储热温度 下完全融化的时间分别为 180、118、12、10 min;成

表 2 最佳配比成型复合相变材料的泄漏率 Tab.2 Leakage rate of phase change composites with optimum ratio						
材料	$m_{\rm BN}$ : $m_{\rm FA}$	$\eta_1/\%$	$\eta_2$ /%	$\eta_3/\%$	$\eta_4/\%$	<b>η</b> 平均/%
BN/LA	68:32	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03
BN/MA	69:31	0.02	0.01	0.02	0.08	0.03
BN/PA	69:31	0.02	0.02	0.03	0.07	0.04
BN/SA	68:32	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02



图 4 储热时间对材料泄漏率的影响 Fig.4 Effect of heat storage time on leakage rate of material

型材料 PA 在 4 个储热温度下完全融化的时间分别为 146、38、26、16 min; 成型材料 SA 在 4 个储热温度 下完全融化的时间分别为 26、20、14、8 min;除了 LA 在 40 ℃下经过 3 h 未融化外,其他材料均在 3 h 内完全融化,且完全融化时间会随着储热温度的升高 而缩短,因此成型复合相变材料在不同储热温度下的 形状稳定性测试时间确定为3h。

分析储热温度对成型复合相变材料形状稳定 性的影响,结果见图 6。从图 6a 可以看出, BN/LA 在 40 ℃时 η 最小,这是因为 LA 在该温度下储热

180 min 未出现明显的融化现象, 如图 5a 所示。在 4个温度下储热 3 h, 4 种材料的 Δη 分别为 0.03%、 0.08%、0.10%、0.06%。从图 6b 可以看出, 在前 3 个温度下储热 3 h 材料的  $\eta$  的变化不明显,在 4 个 温度下材料的 Δη 分别为 0.13%、0.13%、0.15%、 0.16%。从图 6c 可以看出,在加热 2 h 时材料的  $\eta$ 的变化不大,加热 3 h 时,材料的  $\Delta\eta$  分别为 0.03%、 0.10%、0.12%、0.15%。从图 6d 可以看出, 在加 热 3 h 时, 材料的 Δη 分别为 0.04%、0.10%、0.20%、  $0.16\%_{\circ}$ 



图 5 在不同温度下纯脂肪酸成型相变材料的熔化过程





图 6 加热度对材料泄漏率的影响 Fig.6 Effect of heating temperature on leakage rate of material

另外, 计算 1、2、3 h 时材料的泄漏率差值 Δη, 结果见表 3。从表 3 可以看出, 在加热 1~3 h 时, 温 度对 BN/MA 的 Δη 的影响相对最小, 温度对 BN/LA 的 Δη 的影响相对最大。在加热 3 h 时, 温度对 BN/PA 的 Δη 的影响相对最大。

temperature at the same time				
Tab.3 Le	akage rate differ	ence at different	heat storage	
表 3	不同储热温度、	同一时间下的泄	漏率差值	

洲泥索羊店/0/	储热时间/h			
他俩平左围/70	1	2	3	
$\Delta \eta_{\mathrm{BN/LA}} = \eta_{70} - \eta_{40}$	0.13	0.17	0.15	
$\Delta \eta_{\mathrm{BN/MA}} = \eta_{80} - \eta_{50}$	0.04	0.10	0.07	
$\Delta \eta_{\rm BN/PA} = \eta_{90} - \eta_{60}$	0.09	0.12	0.21	
$\Delta \eta_{\rm BN/SA} = \eta_{95} - \eta_{65}$	0.08	0.13	0.20	

#### 2.5 光-热转换对材料泄漏率的影响

成型复合相变材料在进行 4 次光-热转换后 η 的 变化情况如图 7 所示。从图 7 可以看出,4 种材料经 过 4 次光-热转换后,η 的平均值分别为 0.13%、 0.33%、0.04%、0.03%;2 个平行样的 η 差值分别为 0.02%、0.03%、0.003%、0.01%,差值较小;经过 4 次光-热转换后,材料的 η 低于 0.35%,说明制备的 成型复合相变材料具有较好的光-热转换稳定性。





#### 2.6 BN 的添加量对 FA 瞬态热导率的影响

成型相变材料的瞬态热导率分析结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,在 FA 中添加 BN 后,其热导率都得到提升。这是因为 BN 为强导热材料,将其添加到 FA 中, BN 之间相互接触会形成稳定的导热网络,从而使材料的热阻减小、热导率增加。



图 8 不同相变材料的热导率 Fig.8 Thermal conductivity of different phase change materials

纯FA的热导率分别为0.25、0.26、0.32、0.30 W/(m·K), 从图 8 可以看出,复合材料的热导率比纯FA的热导率 分别提高了401.91%、597.92%、353.74%、304.95%, BN/MA 热导率的提高率最大,BN/SA 热导率的提高率 最小。根据式(2)计算成型复合相变材料的热导率增 强效率,4 种成型复合相变材料的 y 分别为 4.44%、7.22%、3.68%、3.01%。从式(2)可以看出, 决定材料 y 的主要因素有FA的热导率、BN的质量分 数和复合相变材料的热导率,在MA和PA中BN的质 量分数相同,但是BN/MA的热导率更大,所以热导率 的提升率更高,LA和SA也一样。

## 3 结语

以 BN、LA、MA、PA 和 SA 为原料,采用熔融 共混法制备了多种成型复合相变材料,并对材料的形 状稳定性和导热性进行了分析,得出如下结论。

1)成型复合相变材料的 η 随着 BN 添加量的增加 而减小。在 4 种脂肪酸中添加 BN 的最佳质量分数为 68%~69%。最佳配比的材料在加热 1 h 后,其泄漏率均 低于 0.05%。材料的密度随着 BN 添加量的增加而线性 增大,密度在 0.88~1.67 g/cm<sup>3</sup>间变化。

2)复合相变材料  $\eta$  会随着加热时间和温度的增加 而增大。4 种成型复合相变材料在加热 12 h 后,  $\eta$  为 0.60%左右,加热时间与  $\eta$  存在线性相关性。在高于 FA 的熔点(25 ℃左右)下加热 3 h,材料的  $\eta$  均低于 0.16%, 温度对 BN/LA 热稳定性的影响相对最小。

3)复合相变材料经过 4 次光-热转换后, η 均小 于 0.33%,光-热转换对 BN/SA 和 BN/PA 的 η 的影响 相对最小。添加 BN 均能使 FA 的热导率提升,提高 相对最大的是 BN/MA (597.92%),最小的是 BN/PA (304.95%)。

#### • 27 •

#### 参考文献:

- SHAHID U B, ABDALA A. A Critical Review of Phase Change Material Composite Performance through Figure-of-Merit Analysis: Graphene Vs Boron Nitride[J]. Energy Storage Materials, 2021, 34: 365-387.
- [2] 蒋昊洋. 氮化硼复合相变材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020:39.
   JIANG Hao-yang. Preparation and Properties of Boron Nitride Phase Change Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 39.
- [3] 何玉芳,颜品萍,黄宝铨,等.聚乙二醇/氮化硼复合 材料相变导热性能及其结晶行为[J].应用化学,2020, 37(6):650-657.

HE Yu-fang, YAN Pin-ping, HUANG Bao-quan, et al. Thermal Conductivity and Crystallization Behavior of Polyethylene Glycol/Boron Nitride Phase Change Composites[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2020, 37(6): 650-657.

[4] 杨菁菁,向萌,缪鑫凯,等. LDPE/PEG 插层剥离改性 氮化硼导热复合材料的制备及其性能[J]. 合成树脂及 塑料, 2021, 38(2): 15-19.

YANG Jing-jing, XIANG Meng, MIU Xin-kai, et al. Preparation and Properties of LDPE/PEG Intercalated BN Thermal Conductive Composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(2): 15-19.

- [5] WIE J, KIM J. Thermal Properties of Surface-Modified and Cross-Linked Boron Nitride/Polyethylene Glycol Composite as Phase Change Material[J]. Polymers (Basel), 2021, 13(3): 456.
- [6] YANG Jie, TANG Li-sheng, BAO Rui-ying, et al. Largely Enhanced Thermal Conductivity of Poly (Ethylene Glycol)/Boron Nitride Composite Phase Change Materials for Solar-Thermal-Electric Energy Conversion and Storage with Very Low Content of Graphene Nanoplatelets[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315: 481-490.
- [7] HE Xu-quan, ZHANG Ling, LI Chun-zhong. PEG-Based Polyurethane/Paraffin@SiO<sub>2</sub>/Boron Nitride Phase Change Composite with Efficient Thermal Conductive Pathways and Superior Mechanical Property[J]. Composites Communications, 2021, 25: 100609.
- [8] FANG Hui, LIN Jia-lin, ZHANG Ling-jie, et al. Fibrous Form-Stable Phase Change Materials with High Thermal Conductivity Fabricated by Interfacial Polyelectrolyte Complex Spinning[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 249: 116836.
- [9] WU Shu-ying, CHEN Qi-yan, CHEN Dan-dan, et al.

Multiscale Study of Thermal Conductivity of Boron Nitride Nanosheets/Paraffin Thermal Energy Storage Materials[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102931.

- [10] MA Xin-yao, WU Shu-ying, YI Zheng-ming, et al. The Effect Mechanism of Functionalization on Thermal Conductivity of Boron Nitride Nanosheets/Paraffin Composites[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 790-798.
- [11] 柯惠珍,李永贵. 癸酸-棕榈酸-硬脂酸/聚丙烯腈/氮
   化硼复合相变纤维膜的传热性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(3): 26-31.

KE Hui-zhen, LI Yong-gui. Heat Transfer Property of Capric Acid-Palmitic Acid-Stearic Acid/ Polyacrylonitrile/ Boron Nitride Composite Phase Change Fibrous Membranes[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(3): 26-31.

[12] 陈承相,朱玲颉,贾贝贝,等.基于扫描热显微技术的氮化硼/低密度聚乙烯复合材料界面导热性能研究
 [J]. 绝缘材料, 2021, 54(6): 18-25.

CHEN Cheng-xiang, ZHU Ling-jie, JIA Bei-bei, et al. Study on Interface Thermal Conductivity of Boron Nitride/Low Density Polyethylene Composite Materials Based on Scanning Thermal Microscopy[J]. Insulating Materials, 2021, 54(6): 18-25.

 [13] 王宁,齐承英,张瑞瑞,等.纳米颗粒对赤藻糖醇/甘 露糖醇稳定性影响的实验研究[J].现代化工,2021, 41(9):160-164.

WANG Ning, QI Cheng-ying, ZHANG Rui-rui, et al. Experimental Study on Effects of Nanoparticles on Stability of Erythritol/Mannitol[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(9): 160-164.

[14] 张仲彬,朱长林.碳纳米管-氮化硼/肉豆蔻酸复合相 变材料的蓄热性能研究[J].中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4585-4594.
ZHANG Zhong-bin, ZHU Chang-lin. Study on the Thermal Storage Performance for Carbon Nano-

tubes-Boron Nitride/Myristic Acid Composite Phase Change Material[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4585-4594.

- [15] SU Di, JIA Yu-ting, ALVA G, et al. Preparation and Thermal Properties of N-Octadecane/Stearic Acid Eutectic Mixtures with Hexagonal Boron Nitride as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage[J]. Energy and Buildings, 2016, 131: 35-41.
- [16] YANG Guo-qing, WANG Bi-jia, CHENG Huan, et al. Cellulosic Scaffolds Doped with Boron Nitride Nanosheets for Shape-Stabilized Phase Change Compo-

sites with Enhanced Thermal Conductivity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 627-634.

- [17] WANG Bo-long, LI Guang-yong, XU Liang, et al. Nanoporous Boron Nitride Aerogel Film and Its Smart Composite with Phase Change Materials[J]. ACS Nano, 2020, 14(12): 16590-16599.
- [18] 李建明. 基于六方氮化硼/石蜡复合相变材料的锂离子电池冷却性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 22-23.

LI Jian-ming. Research on Cooling Performance of Lithium-Ion Batteries Based on Hexagonal Boron Nitride / Paraffin Composite Phase Change Materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 22-23.

[19] 徐众,侯静,吴恩辉,等.石墨对活性炭/脂肪酸复合 相变材料潜热和导电性能的影响[J].化工进展,2021, 40(7):3878-3891.

XU Zhong, HOU Jing, WU En-hui, et al. Effect of Graphite on Latent Heat and Conductivity of Activated Carbon/Fatty Acid Composite Phase Change Materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(7): 3878-3891.

- [20] YANG Jie, TANG Li-sheng, BAO Rui-ying, et al. An Ice-Templated Assembly Strategy to Construct Graphene Oxide/Boron Nitride Hybrid Porous Scaffolds in Phase Change Materials with Enhanced Thermal Conductivity and Shape Stability for Light-Thermal-Electric Energy Conversion[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(48): 18841-18851.
- [21] YANG Guo-qing, ZHAO Lun-yu, SHEN Chuan-fei, et al. Boron Nitride Microsheets Bridged with Reduced Graphene Oxide as Scaffolds for Multifunctional Shape Stabilized Phase Change Materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 209: 110441.
- [22] 李雪峰,关宏宇,白宇峰,等.光固定型的十八烷相 变材料制备及热性质[J].精细化工,2021,38(3): 532-538.

LI Xue-feng, GUAN Hong-yu, BAI Yu-feng, et al. Preparation and Thermal Properties of Shape-Stabilized Phase Change Materials Based on Octadecane by Light Curing Process[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(3): 532-538.

责任编辑: 彭颋