

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-176-06

基于热塑性弹性体的柔性定形相变材料研究进展

敬瑶阁¹ 张楠¹ 周森林² 袁艳平¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 江苏坚威防护工程科技有限公司 扬州 225826)

【摘要】 定形相变材料是解决固-液相变材料在使用过程中液体泄漏问题的有效途径之一, 随着柔性设备控温技术的快速发展, 具备一定柔软度和柔韧性, 可伸缩、弯曲、扭转变形而不失去其性能的柔性定形相变材料应运而生。热塑性弹性体因其低成本和强相容性常被用作制备柔性定形相变材料的定形基体。综述了以氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SEBS) 和烯烃嵌段共聚物 (OBC) 等热塑性弹性体为基体的柔性定形相变材料在材料选择、制备工艺、相变性能和柔性性能等方面的最新研究成果, 并总结柔性定形相变材料在电子器件热管理与温控热疗/冷疗等领域的应用。最后, 对未来柔性定形相变材料发展的研究重点和发展方向进行了展望。

【关键词】 定形相变材料; 柔性; 热塑性弹性体; 潜热存储

中图分类号 TK02 文献标识码 A

Advances in the Research of Flexible Form-Stable Phase Change Materials based on Thermoplastic Elastomers

Jing Yaoge¹ Zhang Nan¹ Zhou Senlin² Yuan Yanping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Jiangsu Jianwei Protection Engineering Technology Co., Ltd, Yangzhou, 225826)

【Abstract】 Form-stable phase change materials (FSPCMs) are one of the effective ways to solve the problem of liquid leakage during the use of solid-liquid phase change materials. However, with the rapid development of flexible equipment temperature control technology, flexible FSPCMs have come into being. It has a certain degree of softness and flexibility, and can stretch, bend, twist, and deform without losing its properties. Thermoplastic elastomers can be the preferred shaped substrate for flexible FSPCMs due to their low cost and strong compatibility. In terms of material selection, preparation process, phase change properties, flexibility properties, this paper reviews the latest research results on flexible FSPCMs using thermoplastic elastomers such as styrene ethylene butylene styrene (SEBS) and olefin block copolymer (OBC) as the shaped matrix. Meanwhile, the application in the field of thermal management and thermotherapy of electronic devices is summarized. Finally, the research focus and direction of the future development of flexible FSPCMs materials are prospected.

【Keywords】 Form-stable phase change materials; Flexibility; Thermoplastic elastomers; Latent heat storage

基金项目: 江苏省科技项目 (BE2019090)

作者简介: 敬瑶阁 (1996.03-), 女, 硕士研究生, E-mail: vaeggcc@live.com

通讯作者: 袁艳平 (1973.06-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ypyuan@swjtu.cn

收稿日期: 2021-10-11

0 引言

储能技术是解决能源供求匹配问题、提高能源

利用率的有效手段, 而储能材料是储能技术的基础。相变材料作为储能材料的重要部分, 以其在相转变

过程中近似恒温、高储能密度、安全性强的特点^[1], 作为温度调控的优选材料广泛应用于空调蓄冷^[2,3]、建筑围护结构节能^[4,5]、太阳能高效热应用^[6,7]、保温衣物及生活用品^[8,9]等方面, 在可再生能源的利用中起重要作用。

定形相变材料是指通过一定的封装技术, 使相变材料的固-液转换在宏观上表现为固-固的相变过程, 防止液体泄露造成的不可逆损坏^[10]。定形相变材料可分为柔性定形和刚性定形, 相对刚性定形而言, 柔性定形是指材料具备一定柔韧性, 可伸缩、弯曲、扭转变形而不失去其定形与相变特性。这要求定形基体与相变材料有良好的相容性外, 还需要具备一定的柔韧性和弹性。目前的柔性定形基体可以分为: 轻质化的无机类(如二氧化硅气凝胶^[11]; 氮化硼气凝胶^[12])、导热增强的碳基类(如石墨烯气凝胶^[13]; 柔性分层碳纳米管^[14])、可编织的纤维类(改性醋酸纤维素^[15]; 中空聚丙烯纤维^[16])与低成本的热塑性弹性体类^[17](Thermoplastic Elastomer, TPE)等。

TPE 是新一代的高分子材料, 与常规的塑料和橡胶不同, 其分子结构中一部分或全部由具有橡胶弹性的链段组成, 常温下呈现类似橡胶的弹性, 而高温下呈现塑性, 再次冷却后又呈现弹性^[18]。这种特殊软链段-硬链段的结构使 TPE 成为具有应用潜力的柔性定形基体^[19]。与无机定形基体相比, TPE 具有与相变材料更好的相容性, 能满足材料整体均质性的要求; 与碳基材料相比, TPE 不会出现形状坍塌和相分离现象; 与纤维基材料相比, TPE 与相变材料混合的制备工艺更简单, 成本更低^[14,20]。

为了推进以柔性定形相变材料的发展, 本文综述了几种基于热塑性弹性体的柔性定形相变材料的研究进展, 介绍其相变蓄热特性、柔性特征与制备方法, 并总结其在电子器件热管理与人体热疗等领域的应用情况, 为后续研究提供借鉴。

1 以氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SEBS) 为柔性定形基体

氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物 (Styrene Ethylene Butylene Styrene, SEBS) 是以聚苯乙烯 (Poly-styrene, PS) 为末端段, 以聚丁二烯加氢得到的乙烯-丁烯共聚物 (Ethylene-co-Butylene, EB) 为中间弹性嵌段的线性三嵌共聚物。SEBS 不含不

饱和双键, 具有良好的稳定性和耐老化性, 且与石蜡有比较好的相容性 (石蜡中的直链烷烃与 SEBS 中的 EB 段结构相似), 能与多种聚合物共混^[18,21]。

Peng 等^[22]早在 2004 年提出将 SEBS 与石蜡共混, 并使用动态力学分析中三点弯曲测试的方法分析出石蜡的固-液相态转换是影响材料储能模量急剧变化且具有柔性的原因。随后, Zhang 等^[23]通过溶剂法将石蜡和 SEBS 在环己烷溶液中均匀混合, 首次将石蜡的质量含量提升到 90%, 制备具有柔性特征的定形相变材料, 并且该柔性定形相变材料具有可逆的物理凝胶性质。Rickert R 等^[24]进一步研究 SEBS 分子结构对复合材料的力学和相变性能的影响, 结果表明, 不同分子量和不同 PS/EB 链段配比的 SEBS 并不会显著影响相变性能, 然而随着 PS 含量的增加, 复合材料的力学性能会下降。

为了提升单一 SEBS 复合相变材料的性能, Chriaa I 等^[25]采用浸渍法将低密度聚乙烯 (LDPE) 和 SEBS 共同作为十六烷的定形基体, 获得石蜡质量含量为 80% 的柔性定形相变材料, 并指出 LDPE/SEBS/十六烷的焓值受到 SEBS 含量的影响: 十六烷小分子优先进入 SEBS 大分子中的 EB 链段, 限制了十六烷的结晶, 相变焓值相较理论值有所降低。在另一方面, LDPE 在一定程度上降低了 SEBS 对十六烷结晶特性的影响。Chen 等^[26]利用 SEBS、高密度聚乙烯 (HDPE) 与泡沫铜协同制备高导热性能的柔性定形相变材料。在 80℃ 环境下, 持续 150 小时的泄露性测试中, 复合材料的质量损失为 2.39%。Xiang 等^[27]利用丙烯腈苯乙烯丙烯酸酯共聚物 (ASA) 复合 SEBS 作为柔性定形基体, 拉伸测试结果表明, 所制备的复合材料的断裂伸长率可达 740%, 其柔性性能得到显著提升。值得注意的是, SEBS 与石蜡复合后, 在低于相变温度的状态下有较强的刚性, 高于相变温度则呈高弹性凝胶状态。再次冷却后会出现表面皱纹, 这会影响柔性定形相变材料的表面平整度。

2 以烯烃嵌段共聚物 (OBC) 为柔性定形基体

烯烃嵌段共聚物 (Olefin Block Copolymers, OBC) 是由低辛烷含量的可结晶乙烯-辛烷嵌段与含有高辛烷含量的无定形乙烯-辛烷嵌段组成。OBC 具有独特的多嵌段结构: 可结晶的嵌段形成分散相, 充当物理交联网络的网点; 无定形嵌段聚

集成连续相。这种特殊的结构还赋予其在柔韧性与耐热性之间的平衡,可显著提升压缩形变的断裂伸长率与弹性恢复率^[28,29]。

Zhang 等^[30]早在 2013 年开始用 OBC 作为石蜡的定形基体,通过熔融共混法,控制石蜡的质量含量为 40%,断裂伸长率可达 1500%。测试结果表明石蜡分散在 OBC 的连续相中,石蜡的固-液相变在控温的同时也可以用作温度触发来改变材料的临时形状,具有形状记忆功能。Zhang 等^[31]又通过溶胀法制备 OBC-十六烷柔性定形相变材料,原位广角 X 射线衍射与小角 X 射线散射测试表明其形状记忆性能与 OBC 晶体形态密切相关,而十六烷强烈影响 OBC 可结晶链段的变化。

OBC 与烷烃类相变材料优异的相容性启发了学者可在此基础上进一步添加高导热介质来提升复合材料的导热系数。Li 等^[32,33]使用 OBC 为定形基体,石蜡为相变材料,膨胀石墨(EG)为导热增强材料,通过熔融共混法,制备用于热能存储的高导热率热敏柔性相变材料。并将潜热为 160.2J/g 和 153.1J/g 的两种高导热柔性定形相变材料制备成厚度为 0.4mm 的薄膜相变片。拉伸测试结果表明,材料具有良好的拉伸和弯折扭曲性能。Qi 等^[34]在 OBC 与石蜡共混的基础上,增加导热添加剂碳

表 1 给出了上述柔性定形相变材料的相变性能与柔性性能参数。综上所述,在材料选择上,相变材料多为烷烃类相变材料;在制备方法上,SEBS 可与相变材料通过溶液法、溶胀法与熔融共混法进行混合,而 OBC 与相变材料多使用熔融共混法来制备;在相变材料负载量上,目前负载相变材料的

纳米管(CNTs),得到具有光驱动的形状记忆柔性定形相变材料。Wu 等^[35]进行 OBC-EG-石蜡体系的蓄放热实验。实验中出现了同心状的融化现象,说明 OBC-EG 显著抑制了石蜡在融化阶段的自然对流,进一步印证柔性定形相变材料的固-液变化在宏观上可认为是固-固的相变过程。

3 其他热塑性弹性体为柔性定形基体

聚烯烃弹性体(Polyolefin elastomer, POE)是陶氏化学公司利用金属催化剂开发的一种乙烯-辛烯共聚物。POE 的化学结构与石蜡相似,Zhang 等^[36]利用溶剂法将 POE、石蜡与改性的氧化石墨烯(C₁₈-rGO)制备柔性定形相变材料。化学形态和表面结构表征结果显示,C₁₈-rGO 被掺杂在石蜡与 POE 的三维网络结构中,增强热稳定性的同时提升导热系数。热循环 200 次后,材料的相变温度、相变潜热几乎无变化。Huang 等^[37]采用溶剂法将 SBS、EG 和石蜡混合,石蜡的质量含量在 50%以下有良好的柔性定形效果。为了进一步提升相变材料的含量,增加使用热塑性酯弹性体^[38](Thermoplastic ester elastomer, TPEE)作为定形基体。研究表明 TPEE 与 SBS 共同作为石蜡的定形基体,比使用单一的 SBS 具有更好的化学兼容性。

质量分数最高可达 90%;在相变温度与相变潜热方面,复合材料的相变温度几乎无较大变化,但相变潜热会有一定程度的降低;在柔性性能方面,目前定性分析多以宏观上可弯折的图像来表述,定量分析多采用力学拉伸测试中的断裂伸长率作为衡量指标。

表 1 TPE 基的柔性定形相变材料的性能

Table 1 Phase change properties and flexible performance of TPE-based flexible FSPCMs

定形基体	相变基体	相变材料负载量 (wt %)	相变温度 (°C)	相变潜热 (J/g)	柔性性能	文献来源
SEBS	石蜡	50~80	55±1	≤194±5	高于相变温度为软凝胶状态	[22]
SEBS	石蜡	80~90	54.5~55.3	142.0~158.5	高于相变温度为软凝胶状态	[23]
SEBS+HDPE +泡沫铜	石蜡	75	50.56	151.6	高于相变温度可弯折	[26]
SEBS+LDPE	十六烷	55~80	25.57	106.2~179.8	高于相变温度为软凝胶状态	[25]
SEBS	十六烷	90	15±1	190±3	高于相变温度为软凝胶状态	[24]
SEBS+ASA	石蜡	10~50	26±2	12.9~74.2	拉伸断裂伸长率: 430~740%	[27]
OBC	石蜡	30~40	47.8±2	47.2~64.4	拉伸断裂伸长率: ~1500%	[30]
OBC	十六烷	30、60	9.8、16.6	45、148	拉伸断裂伸长率: 800~1400%	[31]

续表 2 TPE 基的柔性定形相变材料的性能

定形基体	相变基体	相变材料负载量 (wt %)	相变温度 (°C)	相变潜热 (J/g)	柔性性能	文献来源
OBC+EG	石蜡	70~80	36±2	110±5	拉伸断裂伸长率: 10~30%	[32]
OBC+CNTs	石蜡	60	46.3	111.7	拉伸断裂伸长率: 140~600%	[34]
OBC+EG	石蜡	70~80	47.4~51.4	174~207.4	可弯折; 扭转; 压缩	[35]
OBC+EG	石蜡	64~85.5	46.~49.2	133.7~160.1	拉伸断裂伸长率: 3~17%	[39]
OBC+SEBS	石蜡	50	45、50	—	拉伸断裂伸长率: 90~160%	[40]
POE+C ₁₈ -rGO	石蜡	80~90	54±0.5	175±5	—	[36]
SBS+EG	石蜡	33、50	46±5	37.3~79.8	拉伸强度: 0.1~0.38MPa 弯曲强度: 0.25~0.75MPa	[37]
SEBS+TPPE	石蜡	80	55±2	165.9	拉伸断裂伸长率: 60~170%	[38]

4 柔性定形相变材料的应用

4.1 电子器件热管理

在复杂形状的热控设备表面上, 柔性定形相变材料作为热缓冲介质, 可降低相变控温模块的安装难度, 并有效降低接触热阻。众多学者已开展柔性相变材料应用于电子器件热管理的实验与模拟研究。

Li 等^[32]利用扫描电子显微镜测得刚性定形相变材料和柔性定形相变材料与电子器件表面的接触间隙分别为 140 微米和 30 微米, 并且柔性定形相变材料有更好的表面平整度, 在特殊空间具有更好的安装匹配度。Huang 等^[41]在上述材料基础上, 利用稳态法测试接触定形相变材料与贴合设备之间的热阻, 测得刚性定形相变材料在 0.106MPa 下的接触热阻为柔性定形相变材料的 4 倍。由于柔性变形, 相变材料与电池表面之间的空隙缩小, 表面传热的能力显著提高。Huang 等^[37]将柔性定形相变材料直接与锂离子电池组装, 测试对比不同工况下的充放电情况, 结果表明, 柔性定形相变材料不仅延长安全温度下电池组的使用时间, 还可以提高电池组的稳定性和安全性。值得注意的是, 实际热控应用中应合理选择柔性相变材料的导热率和潜热值。

4.2 温控热疗/冷疗

柔性定形相变材料在相变控温的基础上, 同时具备柔性可弯折的特性, 这种多功能性使其在生物医学领域中有很大发展空间^[34]。热疗/冷疗是一种缓解温度敏感型鼻炎并辅助发烧治疗的高效且经济的方法。Chen 等^[41]设计一种可减轻鼻黏膜炎

症损伤的热疗面罩, 由空气净化层和热调节层构成, 柔性分层的碳纳米管既作为定形基体又可吸附杂质, 聚乙二醇作为相变材料对吸入空气进行热量调节, 使吸入空气可在 43.5°C 恒温条件下维持 30 分钟, 具有良好的鼻部热疗效果。Zhang 等^[42]基于柔性定形相变材料开发了一种针对过敏性鼻炎的便携式热疗面膜。实验与数值模拟结果均表明, 空气流入鼻腔前, 柔性定形相变材料可以提供足够的热能, 可维持鼻部 30 分钟的舒适温度。这种高效经济的便携式鼻炎热治疗仪, 对提升人体舒适度和生活质量具有重要意义。在冷疗方面, 相变材料可作为冷源, 吸收多余的热量。Zhang 等^[43]基于石蜡与 SEBS 的柔性定形相变材料, 通过热压工艺, 设计了一种适用于儿童发烧的降温头罩。实验测得其可在 10°C 状态下维持 30 分钟, 并通过数值模拟对降温头套的可行性进行验证。

5 结语与展望

柔性定形相变材料具有以下优点: ①克服刚性相变材料脆性大、加工难的缺点; ②易加工成各种形状, 灵活性大, 能够适应不同的工作环境, 满足设备的形变要求; ③与目标设备更好的贴合, 降低接触热阻, 提高蓄热与控温性能。基于热塑性弹性体的柔性定形相变材料相比其他柔性定形相变材料相比具有整体均匀性强, 无脱附、形貌坍塌现象, 材料成本低, 制备工艺简单等优势。本文总结了以 SEBS、OBC 等热塑性弹性体作为定形基体的柔性定形相变材料的制备、相变性能、柔性性能与应用方向的最新研究进展, 有较强的研究价值。

鉴于此, 以下几个方面可供后续研究参考:

(1) 定形基体的选择不应局限于现有的几种热塑性弹性体, 可拓宽多种热塑性弹性体协同对相变基体定形的思路, 遴选性能较好的柔性定形基体。

(2) 柔性定形相变材料的柔性特征目前尚无统一的评价指标, 综合现有的研究, 建议在标准力学拉伸测试中, 用不同温度下的拉伸断裂伸长率、拉伸强度、弯曲强度等指标综合评定柔性效果。

(3) 取舍定形基体与相变基体与高导热添加剂的含量配比, 在无液体泄露的前提下, 平衡储能密度与定形效果。

(4) 热塑性弹性体相比其他的柔性定形基体具有显著的成本优势, 现有的溶胀法、机械共混的制备工艺可向节能与环保方向改进, 如: 调节交联剂等添加剂的含量, 改进物料混合顺序等, 以推动工业化规模生产。

参考文献:

- [1] Farid M M, Khudhair A M, Razack S a K, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004,45(9-10):1597-1615.
- [2] Shen J B, Qian Z J, Xing Z W, et al. A review of the defrosting methods of air source heat pumps using heat exchanger with phase change material[J]. *2nd International Conference on Energy and Power (Icep2018)*, 2019,160:491-498.
- [3] Omara A A M, Abuelnour A A A. Improving the performance of air conditioning systems by using phase change materials: A review[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019,43(10):5175-5198.
- [4] Al-Absi Z A A S, Isa M H M, Ismail M. Application of Phase Change Materials (PCMs) in Building Walls: A Review[J]. *Advances in Civil Engineering Materials (Icace 2018)*, 2019,19:73-82.
- [5] Liu Z X, Yu Z, Yang T T, et al. A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications[J]. *Building and Environment*, 2018,144:281-294.
- [6] Qiu L, Ouyang Y X, Feng Y H, et al. Review on micro/nano phase change materials for solar thermal applications[J]. *Renewable Energy*, 2019,140:513-538.
- [7] Asgharian H, Baniasadi E. A review on modeling and simulation of solar energy storage systems based on phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019,21:186-201.
- [8] Kwok Y L, Li Y, Ying B A, et al. Functional Design of Smart Thermal Clothing for Infants Using Phase Change Materials Textiles[J]. *Textile Bioengineering and Informatics Symposium Proceedings*, 2008,1-2:731-738.
- [9] Iqbal K, Khan A, Sun D M, et al. Phase change materials, their synthesis and application in textiles-a review[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2019,110(4):625-638.
- [10] Lv P Z, Liu C Z, Rao Z H. Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017,68:707-726.
- [11] Gao H Y, Bo L J, Liu P P, et al. Ambient pressure dried flexible silica aerogel for construction of monolithic shape-stabilized phase change materials[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019,201.
- [12] Qian Z C, Shen H, Fang X, et al. Phase change materials of paraffin in h-BN porous scaffolds with enhanced thermal conductivity and form stability[J]. *Energy and Buildings*, 2018,158:1184-1188.
- [13] Zhou Y, Wang X J, Liu X D, et al. Polyurethane-based solid-solid phase change materials with halloysite nanotubes-hybrid graphene aerogels for efficient light- and electro-thermal conversion and storage[J]. *Carbon*, 2019,142:558-566.
- [14] Chen X, Gao H Y, Hai G T, et al. Carbon nanotube bundles assembled flexible hierarchical framework based phase change material composites for thermal energy harvesting and thermotherapy[J]. *Energy Storage Materials*, 2020,26:129-137.
- [15] Cai Y B, Song X F, Liu M M, et al. Flexible cellulose acetate nano-felts absorbed with capric-myristic-stearic acid ternary eutectic mixture as form-stable phase-change materials for thermal energy storage/retrieval[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017,128(2):661-673.
- [16] Yan Y R, Li W P, Zhu R T, et al. Flexible Phase Change Material Fiber: A Simple Route to Thermal Energy

- Control Textiles[J]. *Materials*, 2021,14(2).
- [17] Shi J M, Qin M L, Aftab W, et al. Flexible phase change materials for thermal energy storage[J]. *Energy Storage Materials*, 2021,41:321-342.
- [18] 孟跃中. 热塑性弹性体[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [19] 乔治·德罗布尼(捷克). 热塑性弹性体手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [20] 曹艳霞, 王万杰. 热塑性弹性体改性及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [21] 唐颂超. 高分子材料成型加工[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
- [22] Peng S, Fuchs A, Wirtz R A. Polymeric phase change composites for thermal energy storage[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004,93(3):1240-1251.
- [23] Zhang Q L, Zhao Y Q, Feng J C. Systematic investigation on shape stability of high-efficiency SEBS/paraffin form-stable phase change materials[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013,118:54-60.
- [24] Rickert R, Klein R, Schonberger F. Form-Stable Phase Change Materials Based on SEBS and Paraffin: Influence of Molecular Parameters of Styrene-*b*-(Ethylene-co-Butylene)-*b*-Styrene on Shape Stability and Retention Behavior[J]. *Materials*, 2020,13(15).
- [25] Chriaa I, Trigui A, Karkri M, et al. Thermal properties of shape-stabilized phase change materials based on Low Density Polyethylene, Hexadecane and SEBS for thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020,171.
- [26] Chen P, Gao X N, Wang Y Q, et al. Metal foam embedded in SEBS/paraffin/HDPE form-stable PCMs for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016,149:60-65.
- [27] Xiang B, Yang Z B, Zhang J. ASA/SEBS/paraffin composites as phase change material for potential cooling and heating applications in building[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021,32(1):420-427.
- [28] Arriola D J, Carnahan E M, Hustad P D, et al. Catalytic production of olefin block copolymers via chain shuttling polymerization[J]. *Science*, 2006,312(5774):714-719.
- [29] 余赋生. 烯炔聚合物结构性能与应用问题分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2012.
- [30] Zhang Q L, Feng J C. Difunctional olefin block copolymer/paraffin form-stable phase change materials with simultaneous shape memory property[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013,117:259-266.
- [31] Zhang Q L, Cui K P, Feng J C, et al. Investigation on the recovery performance of olefin block copolymer/hexadecane form stable phase change materials with shape memory properties[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015,132:632-639.
- [32] Li W W, Cheng W L, Xie B, et al. Thermal sensitive flexible phase change materials with high thermal conductivity for thermal energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017,149:1-12.
- [33] Li W W, Wang F, Cheng W L, et al. Study of using enhanced heat-transfer flexible phase change material film in thermal management of compact electronic device[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,210.
- [34] Qi X D, Shao Y W, Wu H Y, et al. Flexible phase change composite materials with simultaneous light energy storage and light-actuated shape memory capability[J]. *Composites Science and Technology*, 2019,181.
- [35] Wu W X, Wu W, Wang S F. Form-stable and thermally induced flexible composite phase change material for thermal energy storage and thermal management applications[J]. *Applied Energy*, 2019,236:10-21.
- [36] Zhang H, Meng Y, Cao Y F, et al. Form-stable phase change materials based on polyolefin elastomer and octadecylamine-functionalized graphene for thermal energy storage[J]. *Nanotechnology*, 2020,31(24).
- [37] Huang Q Q, Li X X, Zhang G Q, et al. Thermal management of Lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021,183.
- [38] Huang Q Q, Li X X, Zhang G Q, et al. Pouch Lithium Battery with a Passive Thermal Management System Using Form-Stable and Flexible Composite Phase Change Materials[J]. *Acs Applied Energy Materials*, 2021,4(2):1978-1992.