

PEG/SiO₂-Ni 复合定形相变材料的 制备与性能研究

赵跃珍, 韦慧鹏, 张宇昂, 张淑芬, 唐炳涛*

(大连理工大学精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为提高相变储能材料的热导率和稳定性,以聚乙二醇(PEG)、SiO₂和泡沫镍为原料,基于溶胶-凝胶和真空浸渍法制备了一种新型热导率增强的定形复合相变材料 PEG/SiO₂-Ni,并对其性能进行表征。结果表明,镍泡沫的引入使复合相变材料的热导率达到 0.57 W/(m·K),与 PEG/SiO₂相比,热导率提高了 96.6%,其储热所用时间也相对减少了 63.4%,有效提高了 PEG/SiO₂-Ni 相变材料强度和储/放热速率。同时,PEG/SiO₂-Ni 相变材料还具有良好的定形相变效果、结构稳定性和较高的相变潜热。

关键词:复合相变材料;热性能;聚乙二醇;泡沫镍

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)11-0121-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.11.026

Preparation and properties of PEG/SiO₂-Ni composite form-stable phase change material

ZHAO Yue-zhen, WEI Hui-peng, ZHANG Yu-ang, ZHANG Shu-fen, TANG Bing-tao*

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the thermal conductivity and thermal stability of phase-change energy storage material, a novel form-stable composite PEG/SiO₂-Ni phase change material with enhanced thermal conductivity is prepared through sol-gel and vacuum impregnation methods, with polyethylene glycol (PEG), SiO₂ and foam nickel as raw materials. The properties of the prepared material are characterized. Results indicate that the thermal conductivity of this composite phase change material reaches 0.57 W/(m·K) due to the adding of foam nickel, which has an increase of 96.6% compared with that of PEG/SiO₂ phase change material. In the meantime, the time that PEG/SiO₂-Ni spends in storing heat is shortened by 63.4% compared with that of PEG/SiO₂. The structural strength and heat charging-discharging rate of PEG/SiO₂-Ni are improved effectively. What's more, PEG/SiO₂-Ni exhibits preferably form-stable performance, structural stability and high phase change latent heat.

Key words: composite phase change material; thermal properties; polyethylene glycol; foam nickel

热能对人们的生活和社会生产都非常重要,但热能的供需往往不平衡,因此热储能技术的研究得到广泛关注^[1]。热储能技术主要包括显热存储、潜热存储和化学反应热存储^[2]。对比其他储热方法,潜热存储是利用物质的相态转变进行热能存储,具有温度变化小、储能密度高的优点^[3],是热能存储的主要途径。相关学者已经研发了多种用于潜热存储的相变材料,如 Na₂SO₄·H₂O^[4]、石蜡^[5]、脂肪酸^[6]和聚乙二醇^[7-15]等。尽管相变材料的相关研究越来越多,但其低导热性和相变后的流动性阻碍了材料的实际应用。因此热导率高且相变前后形状

稳定的复合定形相变储热材料的开发受到极大关注,主要包括多孔介质负载^[16-21]与微胶囊包覆^[22-23]等途径。

在各种复合相变材料中,由于金属泡沫具有良好的结构强度和刚性、高孔隙率以及高导热系数,将泡沫金属掺到相变材料中合成金属复合相变材料,可提高相变材料的导热系数,实现热能的快速存储和释放^[24-29]。但由于金属泡沫的孔径较大,导致相变材料在相变过程中容易发生泄漏。

PEG 不仅具有较高的能量存储密度以及适宜的相变温度,而且在相变过程中具有极好的热稳定

收稿日期:2018-03-30;修回日期:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金(21576039,21421005,U1608223)

作者简介:赵跃珍(1993-),女,硕士研究生,研究方向为相变材料,zhaoyz@mail.dlut.edu.cn;唐炳涛(1975-),男,博士,教授,研究方向为能量转换、存储与管理,通讯联系人,tangbt@dlut.edu.cn。

性和较小体积变化^[11],是一类主要的有机固-液相变材料。在本研究中,将泡沫镍引入 SiO₂ 凝胶网络中,负载 PEG 相变材料,合成热导率增强的 PEG/SiO₂-Ni 定形相变材料,即以正硅酸乙酯制备硅溶胶,再将泡沫镍浸渍到 PEG 与硅溶胶混合液中,获得复合定形相变材料。SiO₂ 和泡沫镍的加入使 PEG/SiO₂-Ni 相变材料具有良好的定形效果,防止材料在相变过程中发生漏液,同时该材料还具有较高的热导率、相变焓值及结构强度,为其实际应用奠定了基础。

1 材料制备及性能表征

1.1 PEG/SiO₂ 复合相变材料的制备

向三口烧瓶中加入一定质量的正硅酸乙酯后,再加入质量为正硅酸乙酯质量 10 倍的去离子水,最后将三口烧瓶放在 60℃ 水浴中搅拌。大约 5 min 后,向三口烧瓶中加入适量的稀盐酸(0.5 mol/L),调节 pH 大约等于 2,搅拌 0.5 h,使溶液进行水解反应,得到透明的硅溶胶。

以熔化的 PEG6000 为相变组分,将制备的硅溶胶与其混合并搅拌均匀,混合后溶液的 pH 约为 6.5。混合液经过真空干燥后即可获得 PEG/SiO₂ 相变材料。

研究了 PEG 与 SiO₂ 不同质量比的 PEG/SiO₂ 相变材料的热性能,由于复合相变材料的热稳定性和相变焓与相变组分的质量有关,最终得出 PEG 与 SiO₂ 的最佳质量比为 85:15^[30]。

1.2 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的制备

PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的合成示意图如图 1 所示。

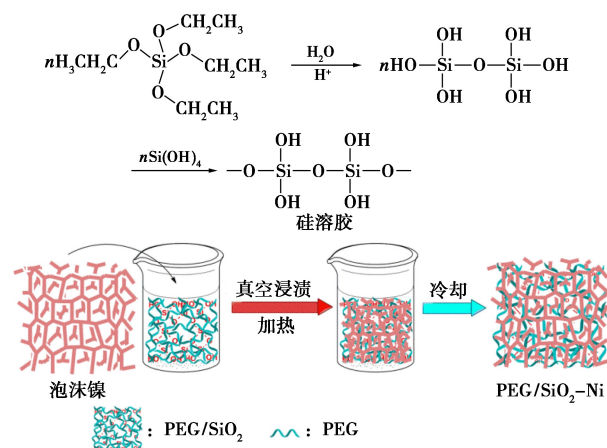


图 1 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的合成

按照制备硅溶胶所述的方法制备硅凝胶,再将其与熔融的 PEG6000 按照质量比 85:15 的比例混合。在真空条件下,将切割好的泡沫镍浸于硅溶胶与 PEG 的混合液中,放在一定温度的真空干燥箱中进行干燥,使混合液中的水完全挥发,逐渐变为固态,形成凝胶,获得 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料。

1.3 性能表征

1.3.1 定形效果测试

将样品 PEG6000、PEG/SiO₂、PEG-Ni 和 PEG/SiO₂-Ni 切成同样大小的块状后,同时放进 85℃ 的鼓风干燥箱中,用数码相机记录相变材料的形状变化。

1.3.2 热分析测试

利用差示扫描量热仪(DSC204 型,德国 NETZSCH 公司生产)测定相变材料的相变温度和相变潜热,升温 and 降温速率均为 5℃/min,氮气氛围。

1.3.3 热导率测试

利用导热系数测定仪(DRE-Ⅲ型,湘潭湘仪仪器有限公司生产)测定样品的热导率,并采用了每个样品的热导率测 3 次再取平均值的方法。

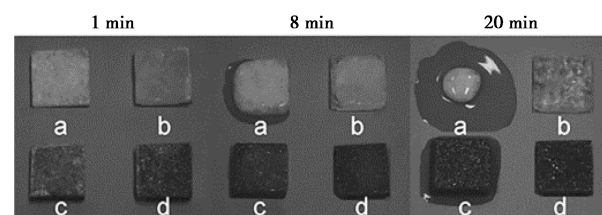
1.3.4 储热、放热速率测试

利用无纸记录仪和热电偶采集样品在不同时刻的温度。将样品研磨成粉末,分别称取 3 g 待测样品进行测试。升温过程:将温度同为 16.5℃ 的样品放置在温度为 70℃ 的恒温箱中进行加热,记录每个样品的温度升至 70℃ 所用的时间。降温过程:将初始温度均为 66℃ 的各个材料放到 14.4℃ 的自然环境中,使其自然冷却到环境温度,记录每个样品冷却时间。

2 结果与讨论

2.1 定形效果与结构强度分析

测试了 PEG6000、PEG/SiO₂、PEG-Ni 和 PEG/SiO₂-Ni 这 4 种材料在 85℃ 的定形效果,材料在不同时间的状态如图 2 所示。



a—PEG6000;b—PEG/SiO₂;c—PEG-Ni;d—PEG/SiO₂-Ni

图 2 不同材料的形状稳定性测试

从图 2 可以看出,在加热 8 min 时,只有 PEG6000 开始融化;加热 20 min 时,PEG6000 几乎完全融化,PEG-Ni 开始漏液,虽然 PEG/SiO₂ 仍然保持固态,但颜色变为透明,硬度降低,而 PEG/SiO₂-Ni 相变材料仍然保持固态,即使在 90℃ 烘箱中放置 6 h 仍保持固态。结果表明,镍泡沫和 SiO₂ 对 PEG/SiO₂-Ni 相变材料起到很好的保护作用,使 PEG/SiO₂ 和 PEG/SiO₂-Ni 在高于相变温度 20℃ 的环境中仍能保持固态而不发生泄露。

在加热 PEG/SiO₂-Ni(I) 和 PEG/SiO₂(II) 前后分别放 1 kg 的砝码对其施压,结果如图 3 所示。

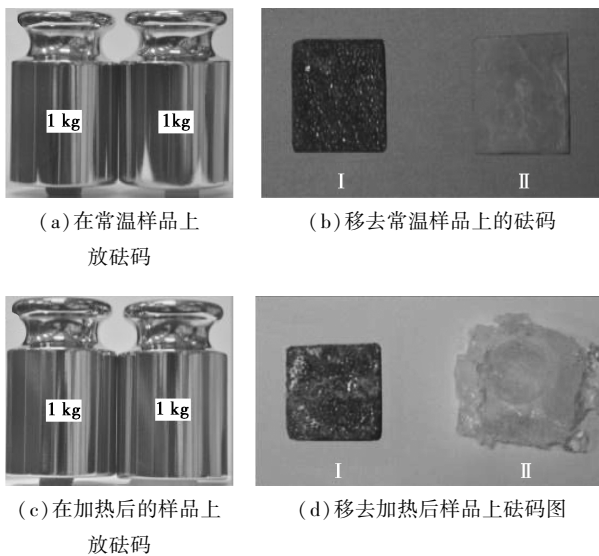


图 3 PEG/SiO₂-Ni(I) 和 PEG/SiO₂(II) 的结构强度测试

由图 3(b) 和图 3(d) 可以看出,PEG/SiO₂-Ni 相变材料在长时间加热后仍保持良好的结构强度,但 PEG/SiO₂ 相变材料在加热后硬度明显降低,完整的块状被压碎。综合定形相变分析(如图 2 所示)与结构强度分析(如图 3 所示),合成的 PEG/SiO₂-Ni 相变材料具有优异的定形相变与结构稳定性,这对实际应用过程中避免形状变化具有重要意义。

2.2 结构分析

利用扫描电镜对镍泡沫、PEG-Ni 以及 PEG/SiO₂-Ni 进行微观形貌分析,观察样品的细微结构,结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可以看出,泡沫镍的孔结构是微孔结构,而且这些孔结构相互连通。由图 4(b)、图 4(c) 可以看出,PEG 和 PEG/SiO₂ 在多孔结构中均匀分布。由于加入了镍泡沫,PEG-Ni 和 PEG/SiO₂-Ni

的力学强度得到明显提高。

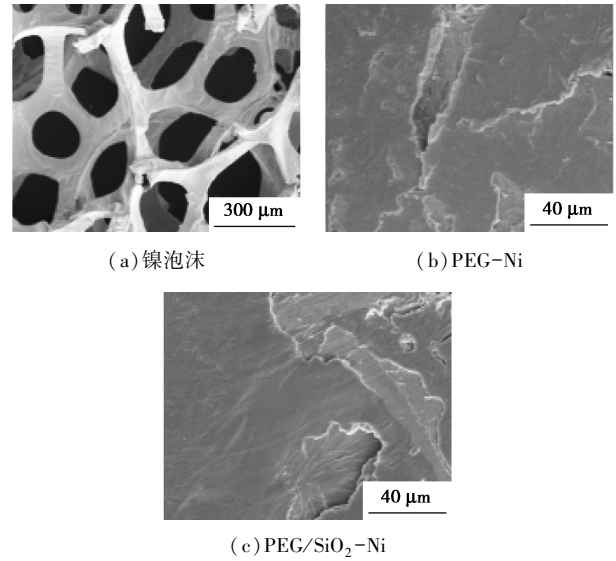
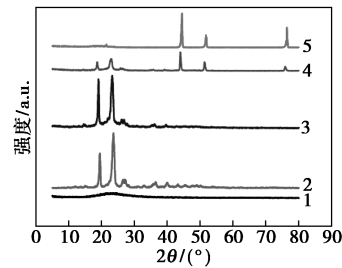


图 4 不同材料的扫描电镜图

2.3 XRD 分析

利用 XRD 研究了样品的结晶形态,结果如图 5 所示。



1—SiO₂; 2—PEG6000; 3—PEG/SiO₂; 4—PEG/SiO₂-Ni; 5—Ni

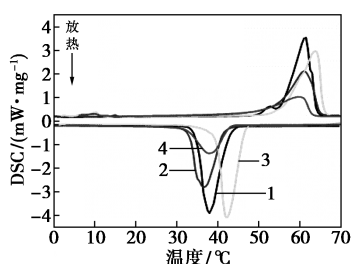
图 5 材料的 XRD 谱图

从图 5 中谱线 1 和谱线 2 可以看出,PEG6000 在 19.24° 和 23.42° 具有强烈的特征衍射峰,PEG/SiO₂ 和 PEG6000 衍射峰的位置几乎相同,只是衍射峰的强度有所不同,说明材料 PEG/SiO₂ 中 PEG 的结晶形态并未发生改变,仅仅结晶性能发生下降。从图 5 中曲线 4 可以看出,PEG/SiO₂-Ni 相变材料在 19.24° 和 23.42° 同样具有 PEG 的特征衍射峰,即 PEG/SiO₂-Ni 相变材料也具有有良好的结晶性能,为其相变储热奠定了基础。

2.4 热分析

PEG、PEG/SiO₂、PEG-Ni 和 PEG/SiO₂-Ni 的 DSC 曲线如图 6 所示,其相变潜热和相变温度如表 1 所示。

从图 6 和表 1 可以看出,PEG6000、PEG-Ni、PEG/SiO₂ 以及 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的相变



1—PEG6000; 2—PEG/SiO₂; 3—PEG-Ni; 4—PEG/SiO₂-Ni

图 6 不同材料的 DSC 曲线

表 1 相变温度和相变潜热

样品	$T_c /$ °C	$\Delta H_c /$ (J·g ⁻¹)	$T_m /$ °C	$\Delta H_m /$ (J·g ⁻¹)
PEG6000	37.8	222.7	61.4	212.0
PEG(85.2%)/SiO ₂ (15%)	36.6	167.2	61.0	145.2
PEG(83.2%)-Ni(16.8%)	42.1	198.9	63.8	200.2
PEG(74.6%)/SiO ₂ (13.2%)-Ni(12.2%)	37.9	90.7	59.9	92.9

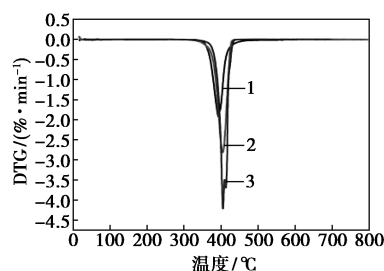
注: T_c 为冷却温度; ΔH_c 为冷循环潜热; T_m 为融化温度; ΔH_m 为热循环潜热。

焓值分别为 222.7、198.9、167.2 J/g 及 90.7 J/g, PEG/SiO₂ 的相变潜热低于纯 PEG6000, 说明 SiO₂ 束缚了 PEG 分子链, 使得 PEG 链结晶困难, 结晶区减小, 相变潜热下降。纯 PEG6000 和 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的相变温度相差较小, 说明 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料中的 PEG 与 SiO₂ 为物理混合。但 SiO₂ 介孔结构的牵制作用阻碍了 PEG 分子链的晶格排列, 其结晶区的有序性下降, 使 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料的相变潜热降低, 但是 PEG/SiO₂-Ni 复合相变材料仍具有较大的储热密度, 更为关键的是, 所得材料在相变前后具有优异的形状稳定性 (如图 2 与图 3 所示), 这对于提升其实际应用性能具有重要意义。

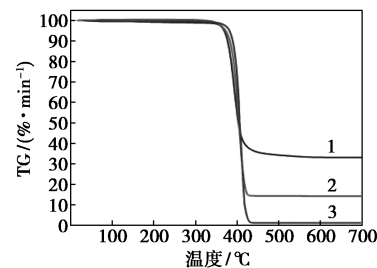
2.5 热稳定性和热导率

利用热重分析仪 (TG) 对样品的热稳定性进行了测试。PEG6000、PEG-Ni 和 PEG/SiO₂-Ni 材料的 TG 曲线和 DTG 曲线如图 7 所示, 相应的热稳定性数据如表 2 所示。

由图 7 和表 2 可以看出, 相变材料在低于 340°C 时均具有良好的热稳定性, 分解温度均高于 400°C, 其热稳定性温度范围已远超过相变材料实际相变工作温度, 确保了材料在应用过程中具有良好的热稳定性。



(a) DTG



(b) TGA

图 7 相变材料的 DTG 和 TGA 曲线

表 2 材料的热稳定性分析

样品	分解 温度/°C	700°C 残炭率/%
PEG6000	406.3	1.48
PEG(83.2%)-Ni(16.8%)	403.6	14.8
PEG(74.6%)/SiO ₂ (13.2%)-Ni(12.2%)	401.2	35.2

通过真空浸渍法将泡沫镍浸泡在相变材料中, 由于镍泡沫具有孔隙率高、导热性好等优点, 镍泡沫的加入有效提高了复合相变材料的导热系数。采用导热系数测定仪测定了镍泡沫、PEG6000、PEG/SiO₂ 和 PEG/SiO₂-Ni 4 种材料的热导率, 结果如表 3 所示。

表 3 样品的热导率

样品	PEG	PEG/SiO ₂	泡沫镍	PEG/SiO ₂ -Ni
热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	0.26	0.29	0.85	0.57
增加的百分比/%	—	—	—	96.6

由表 3 可以看出, 与 PEG/SiO₂ 相比, PEG/SiO₂-Ni PCM 的导热系数达到 0.57 W/(m·K), 导热系数提高了 96.6%。泡沫镍可以显著提高相变材料的导热系数, 有利于加快材料储存和释放热能的速度。与其他相变材料相比, 合成的新型 PEG/SiO₂-Ni 相变材料也具有较高的导热性和相变潜热, 如表 4 所示。

表4 不同材料的热性质

样品	$\Delta H_c /$ (J·g ⁻¹)	热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]	参考 文献
癸酸/膨胀珍珠岩(55:45)	96.3	0.143	[31]
PEG/SiO ₂ /Cu(68.53:29.37:2.1)	110.2	0.41	[12]
PA-CA/硅藻土(11.4:83.6:5)	98.3	0.295	[32]
PEG/硅藻土(97:3)	83.54	0.41	[33]
PEG/SiO ₂ -Ni(74.63:13.17:12.2)	90.7	0.57	本文

2.6 储热和放热速率分析

对于相变储能材料来说,能量利用的效率取决于热量储存和释放的速率,可以借助材料温度变化的速度来反映。3种样品的加热和冷却曲线分别如图8和图9所示。

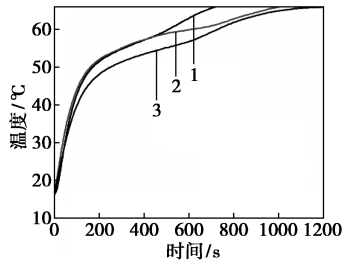
1—PEG/SiO₂-Ni;2—PEG-Ni;3—PEG/SiO₂

图8 材料的加热曲线

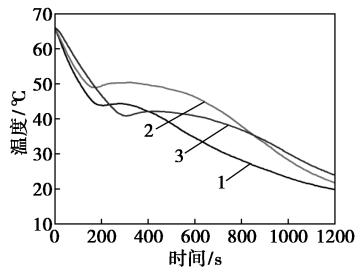
1—PEG/SiO₂-Ni;2—PEG-Ni;3—PEG/SiO₂

图9 材料的冷却曲线

由图8可以看出,PEG/SiO₂、PEG-Ni和PEG/SiO₂-Ni由16.5℃升到70℃,加热时间分别为1175、1000s和719s。与PEG/SiO₂相变材料相比,PEG/SiO₂-Ni复合相变材料升到同一温度所用时间缩短了63.4%。由图9可以看出,由于PEG/SiO₂、PEG-Ni和PEG/SiO₂-Ni材料在同样环境中冷却1200s后,温度分别变为24.0、21.8℃和19.9℃。显然,相比PEG/SiO₂,在加入镍泡沫后,PEG/SiO₂-Ni相变材料的导热系数得到明显提高,因此,温度变化速率明显加快,即相变储能材

料在添加镍泡沫后有效增大了材料的导热性,提升了能量的储存与释放速率,从而有利于提升热能利用效率。

3 结语

针对提高相变储能材料的储/放热性能、抑制其相变过程中易发生流动性的应用需求,合成了PEG/SiO₂-Ni复合定形相变材料。SiO₂和泡沫镍的加入提高了PEG/SiO₂-Ni复合相变材料的热稳定性和机械强度,其导热系数达到0.57W/(m·K),与PEG/SiO₂的导热系数相比增加了96.6%。在储热和放热测试中,PEG/SiO₂-Ni相变材料表现出高导热性能,与PEG6000相比,PEG/SiO₂-Ni复合相变材料的加热时间缩短了63.4%。因此,镍泡沫的引入使PEG/SiO₂-Ni复合相变材料的蓄/放热速度明显加快,将有助于提高热能的利用效率。

参考文献

- [1] Oro E, de Gracia A, Castell A, *et al.* Review on phase change materials (pcms) for cold thermal energy storage applications [J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 513-533.
- [2] Abhat A. Low-temperature latent-heat thermal-energy storage-heat-storage materials [J]. *Solar Energy*, 1983, 30(4): 313-332.
- [3] Zalba B, Marin J M, Cabeza L F, *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(3): 251-283.
- [4] Wang H Y, Lu S S. Study on thermal properties of phase change material by an optical disc system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 60(1-2): 132-136.
- [5] Zhang Y, Wang L J, Tang B T, *et al.* Form-stable phase change materials with high phase change enthalpy from the composite of paraffin and cross-linking phase change structure [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 241-246.
- [6] Fauzi H, Metselaar H S C, Mahlia T M I, *et al.* Thermal characteristic reliability of fatty acid binary mixtures as phase change materials (pcms) for thermal energy storage applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 127-131.
- [7] Liu Z, Wei H, Tang B, *et al.* Novel light-driven CF/PEG/SiO₂ composite phase change materials with high thermal conductivity [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 538-544.
- [8] Tang B, Wei H, Zhao D, *et al.* Light-heat conversion and thermal conductivity enhancement of PEG/SiO₂ composite pcm by in situ Ti₄O₇ doping [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 161: 183-189.
- [9] Zhang Y, Xiu J, Tang B, *et al.* Novel semi-interpenetrating network

- structural phase change composites with high phase change enthalpy[J]. *AIChE Journal*, 2017, 64(2): 688–696.
- [10] Wang Y M, Tang B T, Zhang S F. Single-walled carbon nanotube/phase change material composites; Sunlight-driven, reversible, form-stable phase transitions for solar thermal energy storage [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(35): 4354–4360.
- [11] Tang B T, Wang Y M, Qiu M G, *et al.* A full-band sunlight-driven carbon nanotube/PEG/SiO₂ composites for solar energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 123: 7–12.
- [12] Tang B T, Qiu M G, Zhang S G. Thermal conductivity enhancement of peg/SiO₂ composite pcm by in situ cu doping [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 105: 242–248.
- [13] Tang B T, Wang L J, Xu Y J, *et al.* Hexadecanol/phase change polyurethane composite as form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 1–6.
- [14] Wang Y M, Tang B T, Zhang S F. Novel organic solar thermal energy storage materials: Efficient visible light-driven reversible solid-liquid phase transition [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(35): 18145–18150.
- [15] Wang W T, Tang B T, Ju B Z, *et al.* Fe₃O₄-functionalized graphene nanosheet embedded phase change material composites: Efficient magnetic- and sunlight-driven energy conversion and storage [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(3): 958–968.
- [16] Zhou X F, Xiao H, Feng J, *et al.* Preparation and thermal properties of paraffin/porous silica ceramic composite [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(7–8): 1246–1249.
- [17] Bentz D P, Turpin R. Potential applications of phase change materials in concrete technology [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(7): 527–532.
- [18] Karaipekli A, Sari A. Capric acid and palmitic acid eutectic mixture applied in building wallboard for latent heat thermal energy storage [J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2007, 66(6): 470–476.
- [19] Sari A, Karaipekli A, Kaygusuz K. Capric acid and stearic acid mixture impregnated with gypsum wallboard for low-temperature latent heat thermal energy storage [J]. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32(2): 154–160.
- [20] Fang X M, Zhang Z G, Chen Z H. Study on preparation of montmorillonite-based composite phase change materials and their applications in thermal storage building materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(4): 718–723.
- [21] Karaipekli A, Sari A. Capric-myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(3): 323–332.
- [22] Yin D Z, Ma L, Liu J J, *et al.* Pickering emulsion; A novel template for microencapsulated phase change materials with polymer-silica hybrid shell [J]. *Energy*, 2014, 64: 575–581.
- [23] Yin D Z, Geng W C, Zhang Q Y, *et al.* Confining polymerization at emulsion interface by surface-initiated atom transfer radical polymerization on reactive pickering stabilizer [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 31: 360–366.
- [24] Chen Z Q, Gu M W, Peng D H. Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(14–15): 1967–1973.
- [25] Siahpush A, O'Brien J, Crepeau J. Phase change heat transfer enhancement using copper porous foam [J]. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 2008, 130(8): 082301.
- [26] Lafdi K, Mesalhy O, Elgafy A. Merits of employing foam encapsulated phase change materials for pulsed power electronics cooling applications [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2008, 130(2): 021004.
- [27] Lafdi K, Mesalhy O, Shaikh S. Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(8): 083549.
- [28] Hong S T, Herling D R. Effects of surface area density of aluminum foams on thermal conductivity of aluminum foam-phase change material composites [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(7): 554–557.
- [29] Gao D Y, Chen Z Q, Shi M H, *et al.* Study on the melting process of phase change materials in metal foams using lattice boltzmann method [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2010, 53(11): 3079–3087.
- [30] Pielichowski K, Flejtuch K. Differential scanning calorimetry studies on poly (ethylene glycol) with different molecular weights for thermal energy storage materials [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2002, 13(10–12): 690–696.
- [31] Sari A, Karaipekli A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 109(2–3): 459–464.
- [32] Tang F, Su D, Tang Y J, *et al.* Synthesis and thermal properties of fatty acid eutectics and diatomite composites as shape-stabilized phase change materials with enhanced thermal conductivity [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 141: 218–224.
- [33] Karaman S, Karaipekli A, Sari A, *et al.* Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(7): 1647–1653. ■