

高填充十八醇/膨胀石墨相变储能材料的制备及性能研究

王建众¹, 李国栋^{1*}, 赵永明¹, 袁静¹, 闫霆²

(1. 国网甘肃省电力公司陇南供电公司, 甘肃 陇南 742500;
2. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 201306)

摘要:以十八醇(OC)为相变材料、膨胀石墨(EG)为支撑材料,通过“熔融共混、压制定形”的方法制备了16种不同混合比例的OC/EG定形复合相变材料。通过扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)和傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)对复合材料的微观形貌、结晶相和官能团分布进行了分析,并利用差示扫描量热仪(DSC)和Hotdisk对复合相变材料的相变焓、相变温度和热导率进行了测试。结果表明,当EG质量分数为28%、样品密度为900 kg/m³时,其熔融焓和凝固焓分别为181.48 kJ/kg和161.52 kJ/kg,熔化温度和结晶温度分别为57.14℃和55.46℃,有效热导率高达13.08 W/(m·K),表现出较高的充放热性能和导热性能,约为纯OC[0.38 W/(m·K)]的34倍;在此基础上对样品进行了50次充放热循环稳定性测试,结果EG质量分数为28%、密度为900 kg/m³和1000 kg/m³的样品具有较好的循环稳定性、导热性和凝固放热特性。

关键词:十八醇(OC);膨胀石墨(EG);相变材料(PCM);压制定形;储热性能

中图分类号:TK124;TB332

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)04-0137-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.04.026

Preparation and properties of high filled octadecanol/expanded graphite phase-change energy-storage materials

WANG Jian-zhong¹, LI Guo-dong^{1*}, ZHAO Yong-ming¹, YUAN Jing¹, YAN Ting²

(1. Longnan Electric Power Supply Company, Gansu Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Longnan 742500, China; 2. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China)

Abstract: Taking octadecanol (OC) as phase change material and the expanded graphite (EG) as the supporting material, sixteen kinds of shaped composite phase change materials with different ratios of OC/EG are fabricated through a melt blending-press setting method. The micro morphology, crystalline phase and functional group distribution of the fabricated materials are analyzed by means of scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD) and Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR). The phase change enthalpy, phase change temperature and thermal conductivity of the materials are tested by using differential scanning calorimeter (DSC) and Hot-disk. Studies show that the material with an EG content of 28% and a sample density of 900 kg·m⁻³ has a melting enthalpy of 181.48 kJ·kg⁻¹, a solidification enthalpy of 161.52 kJ·kg⁻¹, a melting temperature of 57.14℃, a crystallization temperature of 55.46℃, and an effective thermal conductivity of 13.08 W·m⁻¹·K⁻¹ that is about 34 times that of pure OC (0.38 W·m⁻¹·K⁻¹), showing high heat storage/release performance and thermal conductivity. On this basis, fifty times heat storage/release cyclic stability test is performed on the samples. It is found that the samples with an EG content of 28% and a high density such as 900 kg·m⁻³ or 1000 kg·m⁻³ have better cycle stability, good thermal conductivity and solidification exothermic characteristics.

Key words: octadecanol; expanded graphite; phase change material; press setting; heat storage performance

为了有效提高可再生能源的持续健康发展、减少化石资源的浪费、有效解决能源在时空上供需不匹配等问题,高效储热技术应运而生^[1-2]。储热技术主要分为显热储热、潜热储热(或相变储热)以及热化学储热3类,其中,热化学储热虽然储热密度最大,但由于反应装置较为复杂、成本高昂,目前尚处于实验室研究阶段^[3]。潜热储热材料因储热密度

较大、成本较低,充放热过程近似恒温而广受关注^[4]。在太阳能光热利用^[5-6]、废热回收^[7]、绿色建筑^[4,8]、电子器件热管理^[9-10]和空调系统^[11]等领域具有广阔的应用前景。

相变储热系统性能的高低主要取决于其相变材料的优劣,按相变形式可将材料分为固-固相变材料^[12]、固-液相变材料、固-气相变材料和液-气相

收稿日期:2022-04-15;修回日期:2023-02-06

基金项目:国家自然科学基金(21546014);国网甘肃省电力公司陇南供电公司科技项目(5227122000J8)

作者简介:王建众(1970-),男,本科,高级政工师,研究方向为电网规划及智能电网、储能材料与系统,136078901@qq.com;李国栋(1993-),男,本科,助理工程师,研究方向为智能微网及分布式能源开发与利用、储能材料与系统,通讯联系人,1484492236@qq.com。

变材料。其中,固-液相变材料具有储能密度大、温度范围宽、使用周期长等优点。按照材料的组成可将材料分为有机相变材料、无机相变材料和混合相变材料^[13],有机相变材料包含石蜡^[14-15]、脂肪酸类^[16]及醇类^[17],无机相变材料包括水合盐、金属合金^[18-19],但是无机相变材料普遍存在过冷度大、相分离等现象^[20],而有机材料具有化学性能稳定、过冷度和腐蚀性能小的优点,所以有机相变材料引起了研究者的重点关注。在实际应用中,固-液有机相变材料虽然潜热大,但是易泄露且需要使用封装的容器储存,导致其界面热阻增加、导热性能和储热能力相对较低^[21]。一般来说,研究者主要通过添加高导热基质来提高相变材料的热导率,如碳基材料^[22]、金属泡沫^[23]和纳米粒子^[24]。鉴于这些材料中的石墨导热性能好、无毒、成本低廉,且膨胀石墨属于二维多孔介质^[25],是轻质碳材料,能够与相变材料相容而经常作为高导热添加剂。乍斯等^[26]采用膨胀石墨(EG)和硬脂酸(SA)制备了一系列不同 EG 质量分数和密度的 SA/EG 复合相变材料样品,发现样品密度为 950 kg/m³、EG 质量分数为 25% 的 SA/EG 复合相变材料的径向热导率高达 23.76 W/(m·K),是 SA 热导率的 130 倍以上,表现出明显的各向异性。宿金栋等^[27]以 OC 为相变材料,将 SiC 分散到多孔碳中,可显著降低其界面热阻,提高循环稳定性。陶乃敏等^[28]将二山梨醇作为凝胶因子制备凝胶态的 OC,添加 EG 作为导热材料,由于表面覆盖有一层凝胶态的 OC,相当于增加了界面热阻,其导热性能有所降低。

由于深入探索十八醇/膨胀石墨复合材料热性能的影响因素的研究论文相对较少,笔者选择十八醇为基体、高导热膨胀石墨为添加基质,采用“熔融共混,压制定形”方法将熔融状态的十八醇完全填充至膨胀石墨的微孔中,制备了 16 种不同参数(EG 质量分数分别为 7%、14%、21%、28%;样品密度为 700、800、900、1 000 kg/m³)的 OC/EG 高填充定形复合相变材料。分析了复合材料的微观形貌、化学兼容性以及结晶相的分布对热性能的影响,探讨了不同 EG 质量分数对储热性能和导热性能的影响。

1 实验部分

1.1 样品的制备

采用十八醇 OC(分析纯,熔点 56~58℃)和膨胀石墨 EG(>99.8%)为原材料,制备 16 种不同参

数的定形复合相变材料。具体实验步骤为:称取一定质量的 OC,选择 OC 和 EG 基质置于 H01-1B 型磁力搅拌器内粉碎。然后将 OC 放置在 80℃ 的 DHG-9245A 型鼓风干燥箱中加热至完全融化状态,取出熔融状态的 OC 缓慢倒入干燥的膨胀石墨中,以一定转速搅拌充分后,再放置于 80℃ 的鼓风干燥箱中融化共混。利用毛细管力将 OC 均匀吸附填充至 EG 孔隙中,形成蓬松的复合材料,依次循环 3~5 次。直至完全混合均匀后,获得待压缩的复合相变材料,将其放置到 SYP-24BF 型压片机中,施加预定的压力,将复合材料压缩至指定高度后,静置片刻进行冷却卸模,即可获得 40 mm×40 mm×40 mm 的复合材料方形样品。制备出不同样品密度(700、800、900、1 000 kg/m³)以及 EG 质量分数(7%、14%、21%、28%)的复合相变材料样品。对样品进行后续处理,均打磨成尺寸为 19 mm×40 mm×40 mm 的方块,用于样品的导热性能测试。

1.2 测试仪器

利用 NeuroSEM-100 型高通量扫描电镜(SEM)观察 EG 及 EG/OC 复合材料的微观结构;利用 Rigaku/max2550c 型 X 射线衍射仪(XRD)检测复合材料的结晶相;利用 IR Prestige21 型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)对石墨、纯十八醇和复合相变材料的官能团进行测定;利用 TGA2 1600F 型差示扫描量热仪(DSC)测试样品的相变温度及相变潜热,测试过程中保持氮气流速为 20~25 mL/min,升温及降温速率为 4℃/min;在鼓风干燥箱中测试复合相变材料的循环稳定性。

2 结果与分析

2.1 微观形貌表征

不同质量分数和密度的 OC/EG 复合相变材料的微观形貌图如图 1 所示。由图 1(a)中可以看出,纯膨胀石墨呈现鳞片状并且具有疏松多孔的网状结构,其比表面积大,有利于相变材料填充至 EG 孔隙空间。由于毛细管力和范德华力的作用,大量的 OC 可以吸附在石墨片层内,有效解决泄露问题。从图 1(b)中可以看到,EG 孔隙中只填充有少量 OC,但是石墨片层开始重叠排列;从图 1(c)中可以看出,大密度样品的 EG 孔隙中填充了充足的相变材料,随着密度的增大,石墨片层之间的距离缩小,孔隙逐渐被相变材料填满;从图 1(d)可知,EG 孔隙中填满了 OC,石墨片层表现出规整的分层排列。通过图 1

(b)、图 1(c) 和图 1(d) 的对比发现,在 EG 质量分数相同的情况下,提高复合相变材料的密度,样品的石墨片层叠加特性逐渐明显。OC 被限制在 EG 片层之间,同时由于毛细管力作用,可有效减少 OC 在充放热循环过程中的泄漏,进而提高其循环稳定性。

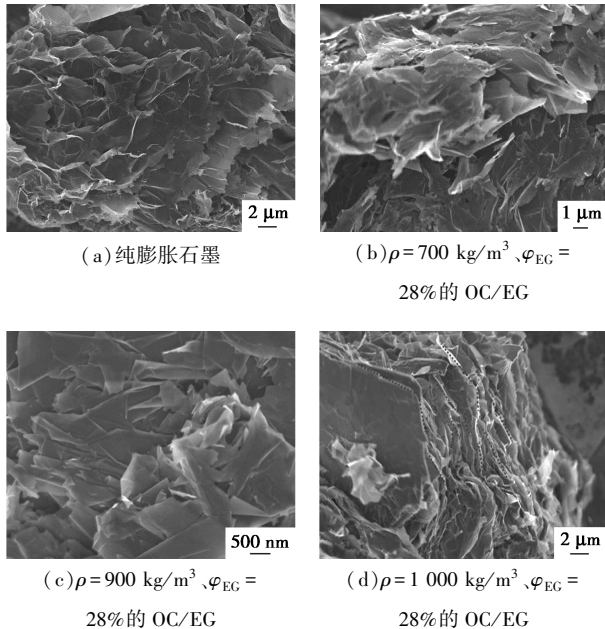


图 1 纯 EG 和不同 EG 质量分数的 OC/EG 复合相变材料的 Neuro-SEM 图

2.2 化学兼容性

2.2.1 循环前后官能团分析

EG、OC、OC/EG 复合相变材料循环测试前后的 XRD 图谱如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出,由于 OC 的重结晶性能稳定,在 XRD 谱图中出现了 21.68° 、 24.54° 这 2 个尖锐峰^[27],EG 在图中的峰值对应于 26.48° 。因此,从 OC/EG 复合相变材料中可以看出,相比于纯 OC 和纯 EG,OC 与 EG 复合的峰型与 OC/EG 复合相变材料的峰型一一对应。相比于纯 OC,只有在 $36.19^\circ \sim 44.75^\circ$ 之间的特征峰的峰值有微小衰减,其原因是制备过程中引入杂质或者在复合相变材料结晶后,晶体结构出现了细小变化。因此,相比于 OC 和 EG 的 XRD 图中的峰值有轻微变化,但是 OC/EG 复合相变材料没有观察到新峰型,说明 OC 已经成功吸附到了 EG 的孔隙之内,且 OC 与 EG 之间仅为简单的物理嵌合,没有产生化学反应。从图 2(b) 中可以看出,相比于循环前,循环后的 XRD 图中各点出现的峰值几乎一致,证明循环测试后仍然未出现化学性能的变化,在反复充放热过程中保证了 OC 较好的蓄热能力。

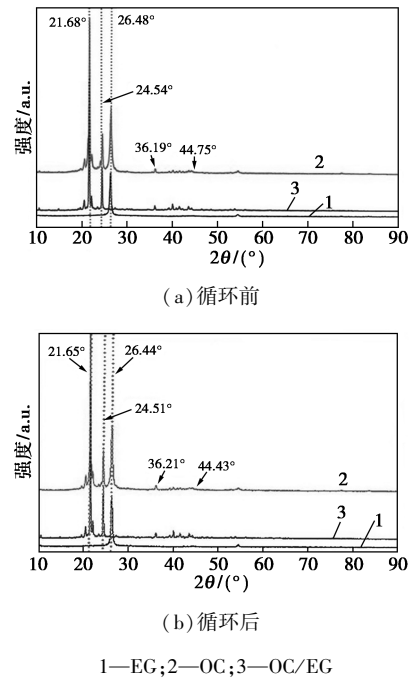


图 2 EG、OC、OC/EG 复合相变材料的 XRD 图谱

2.2.2 循环前后结晶相分析

OC、EG 和 OC/EG 复合相变材料循环前后的 FT-IR 图谱如图 3 所示。从图 3(a) 可知,OC 样品在 723 cm^{-1} 处的特征吸收峰对应于 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动吸收峰; $1\ 062\text{ cm}^{-1}$ 处对应于 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动和 $\text{C}=\text{C}$ 反对称耦合拉伸振动; $1\ 481\text{ cm}^{-1}$ 处对应 $-\text{CH}_2$ 剪切弯曲振动; $2\ 846$ 、 $2\ 918\text{ cm}^{-1}$ 分别对应

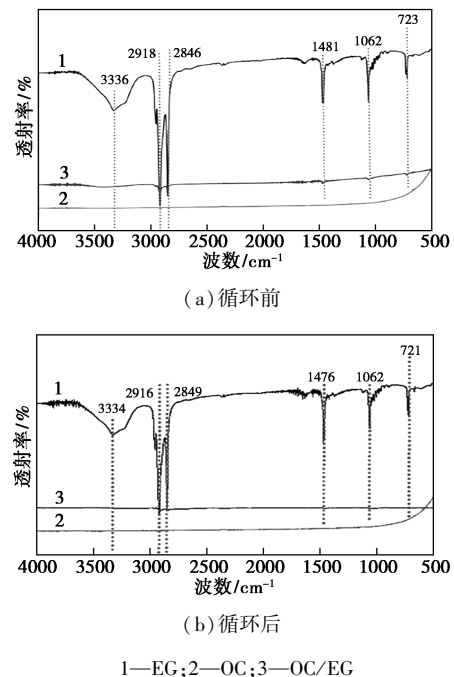


图 3 纯 OC、EG 和 OC/EG 定形复合相变材料的 FT-IR 图谱

着—CH₂ 对称和反对称拉伸振动;3 336 cm⁻¹处对应着—OH 的拉伸振动。由于—OH 中存在与氢键特性类似的基团,因此在 3 200~3 500 cm⁻¹之间表现出较宽吸收峰^[14-15]。OC 的出峰位置、峰型与 OC/EG 复合相变材料相一致,并未看到峰形的变化,只出现了较小的峰值变化,且无新的特征吸收峰出现,说明 OC 已经填充至 EG 孔隙中,OC/EG 复合相变材料是简单的物理吸附,无新物质生成,与 XRD 循环前测试的结果一致。

2.3 储热性能分析

相变材料储能能力主要取决于相变材料的相变焓^[29-30]。纯 OC 和不同 EG 质量分数的定形复合相变材料 OC/EG (密度为 900 kg/m³) 的 DSC 图如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,纯 OC 的熔融焓和凝固焓分别为 316.4 kJ/kg 和 312.47 kJ/kg。随着 EG 质量分数的增大,复合相变材料的熔融焓由 272.2 kJ/kg (EG 质量分数为 7%) 下降为 181.48 kJ/kg (EG 质量分数为 28%);复合相变材料的凝固焓由 259.54 kJ/kg (EG 质量分数为 7%) 下降为 161.52 kJ/kg (EG 质量分数为 28%)。由此可见,相变材料单位质量的储热能力随着支撑材料 EG 质量分数的增加而降低。因此,需要综合考虑材料的热导率、储热能力、经济性和循环稳定性等多个因素合理地选择支撑材料或添加剂的质量分数。

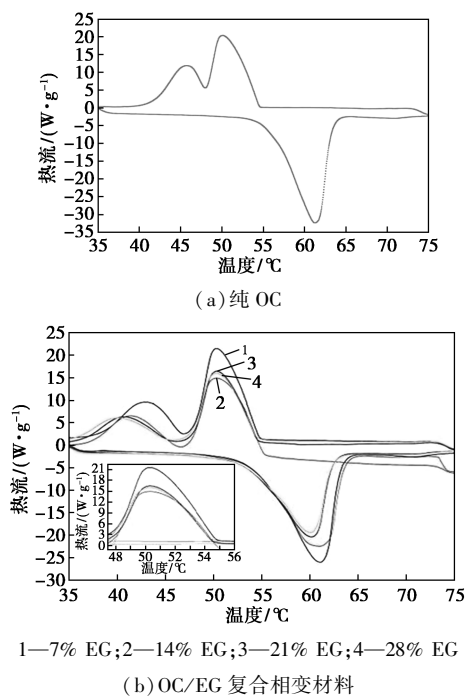


图 4 纯 OC 和不同 EG 质量分数的复合相变材料的 DSC 图

2.4 热导率分析

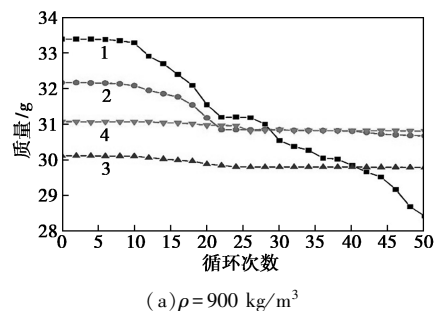
OC/EG 定形复合相变材料有效热导率与样品密度的关系如表 1 所示。由表 1 中可以看出,当 EG 质量分数为 28%、密度为 900 kg/m³ 时,定形复合相变材料的有效热导率最大,达 13.08 W/(m·K),约为纯相变材料 OC[0.38W/(m·K)]的 34 倍。当 EG 质量分数相等时,在样品密度为 700~900 kg/m³ 的范围内,增大样品密度会使其有效导热率逐渐增大,而当密度超过 900 kg/m³ 时,其导热性能开始逐渐降低,这是因为在低密度阶段,随着样品密度增大,OC 与 EG 接触面积逐渐增大,降低其空气热阻,有利于形成导热链,进而在两者之间促进热流传递。而随着样品密度继续增大,两者接触面积已经达到极限值,由于 EG 孔隙被无限挤压,被挤出的 OC 附着在 EG 片层表面,相当于在 EG 表面增加了一层界面热阻,阻止热流的传递,进而削弱了热传导性能。

表 1 OC/EG 定形复合相变材料有效热导率与样品密度的关系 [W·(m·K)⁻¹]

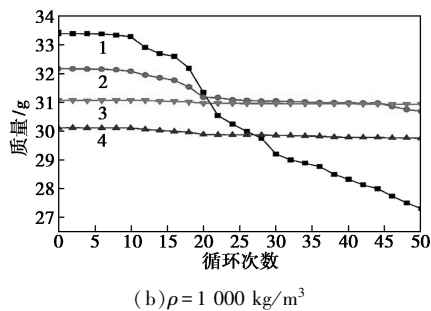
密度/(kg·m ⁻³)	7% EG	14% EG	21% EG	28% EG
700	3.39	6.91	7.85	9.01
800	4.67	7.88	9.42	10.83
900	5.32	8.47	10.49	13.08
1000	5.26	8.21	10.17	12.11

2.5 循环稳定性测试

相变材料的充放热稳定性是影响相变材料实际应用的主要因素之一。在制备定形复合相变材料过程中,OC 通过充分搅拌吸附在孔隙中,再采用压片机加压成形,经过该工艺处理的样品在循环稳定性测试过程中泄露量变化较小^[26]。复合相变材料的质量与循环次数的变化曲线如图 5 所示。从图 5 (a)、图 5(b)可知,泄露量随着 EG 质量分数的增加逐渐降低,说明随着 EG 质量分数的增加,在较大的毛细管力作用下,OC 被均匀吸附在 EG 孔隙空间内,限制熔融状 OC 的流动。当 EG 质量分数为 28%



(a) $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$

(b) $\rho=1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$

1—7% EG/OC; 2—14% EG/OC; 3—21% EG/OC; 4—28% EG/OC

图5 复合相变材料的质量随循环次数的变化曲线

时,样品泄漏量很小,这是因为随着样品密度和EG质量分数的增加,复合材料中的PCM更易于被EG吸附,在相变过程中,EG孔隙体积足以容纳OC,导致样品的泄漏量减少。

2.6 放热特性分析

2.6.1 红外热成像

对样品在冷却不同时间的红外热成像图进行分析可知,在第3~5 min,样品中心温度由76.9℃迅速降低至64.9℃,原因是与室温存在较大温差,放热速度加快。样品温度出现了四周边缘温度高,中心温度低,因为边缘与空气接触的面积大,与外界对流换热较快。在第7~8 min,样品中心最高温度由62℃迅速降低至60.4℃,此时边缘温度与中心温度逐渐保持一致。随着时间的推移,相变材料开始凝固,中心区域因换热较慢,而边缘区换热较快,两者在开始凝固时温度最为接近,最后开始同时凝固。在第13~17 min,样品温度进一步降低,由57.1℃降低至52.8℃。由于相变潜热的存在,样品的边缘温度再次高于中心温度,并且随着凝固放热过程的完成,最终的内外温度趋于一致,样品表现出较好的导热性和凝固放热特性。

2.6.2 凝固实验

对样品在冷却不同时间后的实物进行观察发现,样品经历第3~5 min,培养皿中的液态OC逐渐冷却,而未完全融化的OC外表面处于糊相区,样品边缘比中心更易融化。在与外界环境的对热换热中,液态OC逐渐形成固相。样品经历7~8 min,液态的OC从表面开始糊化并形成固相,而样品的边缘和中心区域也开始凝固,此时边缘与中心区域温度趋于一致。在第13~17 min,液态的OC已经完成了凝固放热过程,基本处于固相状态。而块状OC边缘也基本凝固,但是中心区域凝固速度相对较慢,主要是因为大量相变潜热的存在,降低了中心区域

的凝固速度。随着时间的推移,样品最终完成凝固过程,储存的热量得以完全释放。

2.6.3 凝固过程对比

根据以上测试和实验,样品在第3~5 min,培养皿盛放的液态OC对应于热成像图中样品边缘外的温度场,此时液态OC的温度最高。而样品边缘逐渐出现糊相区,温度逐渐由边缘向中心区域降低,实验测试的凝固现象与热成像的温度场一致。样品在第7~8 min,液态的OC基本处于糊相区并且不断向固相区发展,此时靠近培养皿壁面的OC温度最高。未完全融化的OC方块边缘均出现糊相区,中心区域开始凝固,由于四周与空气对流的面积较大,对流换热速率更快,边缘区域与中心区域的温差逐渐变小,两者开始凝固,此现象与热成像图相对应。样品在第13~17 min,培养皿壁面附近的OC表面已全部凝固,而内部还未完全凝固,导致壁面附近的温度较高,原因是表面已凝固的OC覆盖了液态或者糊状OC,导致OC与外界的换热受阻,降低了冷却凝固的速率。而OC方块四周和中心区逐渐凝固,最终两者温度基本趋于一致。

3 结论

(1)密度较大的复合相变材料形成的石墨片层之间出现明显的分层,在低EG质量分数的复合相变材料中,大量OC被挤压出EG片层表面,阻碍热量传递。FT-IR和XRD分析相互验证了循环前后EG与OC之间只是简单的物理吸附。由于EG的强吸附特性,OC完全吸附至EG空隙中,而仅有OC具有储热能力,因此OC的质量分数与储热能力成正比。

(2)OC/EG定形复合相变材料在凝固过程中经历了明显的固-固相变和固-液相变。当定形复合相变材料中EG质量分数为28%、密度为900 kg/m³时,有效热导率高达13.08 W/(m·K),是纯OC热导率的34倍。随着EG质量分数的增加,热导率会出现先增加后减小的趋势。因为材料密度增大、EG质量分数的增加有利于提高导热性能,但是密度加大极有可能致使分子之间发生聚集,声子的传递方向无序化,降低了其导热性能。

(3)利用红外成像技术和凝固实验相互验证了样品的凝固过程,实验中的凝固现象与热成像的温度场一致,且中心区域凝固速度相对较慢,主要是因为大量相变潜热的存在,降低了中心区域的凝固速

度。与纯 OC 相比,采用“熔融共混,压制定形”法制备的复合相变材料具有较好的化学兼容性和优异的储放热性能,是一种大规模推广应用的高性能定形复合相变储热材料。

参考文献

- [1] Li Q, Luo K H, Kang Q J, *et al.* Lattice boltzmann methods for multiphase flow and phase change heat transfer[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 52:62-105.
- [2] Tay N H S, Liu M, Belusko M, *et al.* Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75:264-277.
- [3] Yan Ting, Wang Ruzhu, Li Tingxian. Experimental investigation on thermochemical heat storage using manganese chloride/ammonia[J]. *Energy*, 2018, 143:562-574.
- [4] Lin Yaxue, Zhu Chuqiao, Guruprasad Alva, *et al.* Palmitic acid/polyvinyl butyral/expanded graphite composites as form-stable phase change materials for solar thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 228:1801-1809.
- [5] Song Yanlin, Zhang Nan, Yuan Yanping, *et al.* Prediction of the solid effective thermal conductivity of fatty acid/carbon material composite phase change materials based on fractal theory[J]. *Energy*, 2019, 170:752-762.
- [6] Liu Yurong, Xia Yongpeng, An Kang, *et al.* Fabrication and characterization of novel meso-porous carbon/n-octadecane as form-stable phase change materials for enhancement of phase-change behavior[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35:939-945.
- [7] Zhao Liang, Xing Yuming, Liu Xin, *et al.* Thermal performance of sodium acetate trihydrate based composite phase change material for thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143:172-181.
- [8] Guo Xi, Huang Yiheng, Cao Jinzhen. Performance of a thermal energy storage composite by incorporating diatomite stabilized paraffin as phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158:1257-1265.
- [9] Zhu Na, Li Shanshan, Hu Pingfang, *et al.* A review on applications of shape-stabilized phase change materials embedded in building enclosure in recent ten years[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 43:251-264.
- [10] Hussain A, Abidi I H, Tso C Y, *et al.* Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 124:23-35.
- [11] Deng Yong, Li Jinhong, Nian Hongen. Polyethylene glycol-enwrapped silicon carbide nanowires network/expanded vermiculite composite phase change materials; Form-stabilization, thermal energy storage behavior and thermal conductivity enhancement[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174:283-291.
- [12] Raj C R, Suresh S, Bhavsar R R, *et al.* Manganese-based layered perovskite solid-solid phase change material: Synthesis, characterization and thermal stability study[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 135:88-97.
- [13] 魏润枝,冯妍卉,黄志,等.碳管受限空间十二酸相变热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40:1362-1368.
- [14] 黄香.有机复合相变储能传热材料合成及特性研究[D].南京大学, 2018.
- [15] 唐耀杰.高导热定形相变储能材料的制备及性能研究[D].南京大学, 2017.
- [16] 黄雪,崔英德,张步宁,等.脂肪酸类相变材料传热及液相渗漏的研究进展[J]. *化工进展*, 2014, 33:2676-2680.
- [17] 梁怀阳.十二醇/三聚氰胺-甲醛/脲醛树脂微胶囊相变材料的制备与表征[D].厦门大学, 2014.
- [18] 贺万玉,闫全英.熔融盐相变储热材料[J]. *材料导报*, 2015, 29:128-30, 40.
- [19] Huang Xiang, Lin Yaxue, Guruprasad Alva, *et al.* Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 170:68-76.
- [20] 冷光辉,曹惠,彭浩,等.储热材料研究现状及发展趋势[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6:1058-1075.
- [21] Zhang Yinping, Ding Jianhong, Wang Xin, *et al.* Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90:1692-1702.
- [22] Sandeep Kumar, Monika Nehra, Deepak Kedia, *et al.* Carbon nanotubes: A potential material for energy conversion and storage[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 64:219-253.
- [23] Aakash B S, Bi S, Shields M D, *et al.* On the high-temperature crushing of metal foams[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 174-175:18-27.
- [24] Wang Yinghui, Zhang Xuelai, Ji Jun, *et al.* Thermal conductivity modification of n-octanoic acid-myristic acid composite phase change material[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 288:111092.
- [25] Hamed Mashhadzadeh A, Ghorbanzadeh Ahangari M, Dadras A, *et al.* Theoretical studies on the mechanical and electronic properties of 2D and 3D structures of beryllium-oxide graphene and graphene nanobud[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476:36-48.
- [26] 作斯,李廷贤,闫霆,等.高性能定形复合相变储能材料的制备及热性能[J]. *化工学报*, 2015, 66:5127-5134.
- [27] 宿金栋,李士明,闫明伟,等.多孔碳球/SiC 纳米纤维/十八醇复合相变材料定型封装及其热性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47:2482-2488.
- [28] 陶乃敏,田妥,宋健,等.十八醇/DMDBS 凝胶态相变材料的制备与性能研究[J]. *功能材料*, 2013, 44:1943-1947.
- [29] Wang Xiuli, Cheng Xiaomin, Li Yuanyuan, *et al.* Self-assembly of three-dimensional 1-octadecanol/graphene thermal storage materials[J]. *Solar Energy*, 2019, 179:128-134.
- [30] Sharma Atul, Tyagi V V, Chen C R, *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2):318-345. ■