

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.006

基于玻璃纤维织物的固-固相变树脂复合材料 制备及电磁屏蔽性能

梁超博, 霍强强, 隋绪文

(中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要: 具备灵活热响应的电磁干扰(EMI)屏蔽复合材料是电磁防护、建筑工程、电子兼容等领域的理想候选材料之一。为制得该类 EMI 屏蔽复合材料, 首先将异氰酸丙基三乙氧基硅烷(IPTS)与聚乙二醇(PEG)反应, 获得具有高活性硅醇基团可自交联的柔韧固-固相变树脂(SPCR)基体, 随后, 通过 SPCR 封装被银纳米线(AgNWs)修饰的玻璃纤维织物(GFF)制备得到 AgNWs/GFF/SPCR 复合材料。测试了 SPCR 的结构和热稳定性, 研究了 AgNWs/GFF 层数对复合材料电磁屏蔽性能的影响, 最后测试了复合材料的热响应性能。结果表明, SPCR 在保留原始 PEG 相变特性的同时具有优异的形状稳定能力, 从而避免被泄漏。4 层 AgNWs/GFF 组成的复合材料在 2.8 mm 厚度下的 EMI 屏蔽效能(SE)约为 73 dB。电磁波吸收效能(SE_A)随着 EMI SE 的增加呈现出递增的趋势, 而电磁波反射效能(SE_R)在 6~18 dB 范围内波动。同时, 反射系数(R)远大于吸收系数(A), AgNWs/GFF/SPCR 复合材料表现出明显的反射主导屏蔽机制。此外, AgNWs/GFF/SPCR 复合材料在升温 and 降温过程均表现出明显的温度滞后现象。因此, AgNWs/GFF/SPCR 复合材料在电磁辐射防护和设备热管理方面具有广阔的前景。

关键词: 固-固相变树脂; 聚乙二醇; 银纳米线; 玻璃纤维织物; 电磁屏蔽

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2024)09-0035-06

Preparation and EMI shielding properties of solid-solid phase change resin composites based on glass fiber fabrics

LIANG Chaobo, HUO Qiangqiang, SUI Xuwen

(College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract : Electromagnetic interference (EMI) shielding composites with flexible thermal response are one of the ideal candidate materials for electromagnetic protection, building engineering, and electronic compatibility. In order to prepare this type of EMI shielding composites, firstly, isocyanatopropyltriethoxysilane (IPTS) was reacted with poly(ethylene glycol) (PEG) to obtain a flexible solid-solid phase change resin (SPCR) matrix with highly reactive silanol groups that can produce self crosslinking. Subsequently, AgNWs/GFF/SPCR composites were prepared by SPCR encapsulation of glass fiber fabrics (GFF) decorated by silver nanowires (AgNWs). The structure and thermal stability of SPCR were tested, and the influence of number of AgNWs/GFF layers on the electromagnetic shielding performance of the composites was studied. Finally, the thermal response performance of the composite was tested. The results show that the SPCR has an excellent shape stabilization capability to prevent leakage while retaining the original PEG phase change properties. The EMI shielding effectiveness (SE) of the composites consisting of four layers of AgNWs/GFF is about 73 dB at 2.8 mm thickness. The EMI absorption effectiveness (SE_A) shows an increasing trend with the increase of EMI SE, while the EMI reflection effectiveness (SE_R) fluctuates in the band range of 6 dB to 18 dB. Meanwhile, the reflection coefficient (R) is much larger than the absorption coefficient (A), and the AgNWs/GFF/SPCR composites exhibit an obvious reflection-dominated shielding mechanism. Furthermore, the AgNWs/GFF/SPCR composites exhibit significant temperature hysteresis phenomenon in both warming and cooling processes. Therefore, the AgNWs/GFF/SPCR composites have a broad prospect in electromagnetic radiation protection and equipment thermal management.

Keywords : solid-solid phase change resin ; poly(ethylene glycol) ; silver nanowires ; glass fiber fabric ; electromagnetic interference shielding

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(20210302124314)

通信作者: 梁超博, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高分子电磁屏蔽复合材料

收稿日期: 2024-07-05

引用格式: 梁超博, 霍强强, 隋绪文. 基于玻璃纤维织物的固-固相变树脂复合材料制备及电磁屏蔽性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 35-40.

LIANG Chaobo, HUO Qiangqiang, SUI Xuwen. Preparation and EMI shielding properties of solid-solid phase change resin composites based on glass fiber fabrics[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 35-40.

在蓬勃发展的5G通信技术和互联网时代,电子产品几乎伴随着人们的整个生命周期。电磁波在给人们带来极大便利的同时,也导致了不受欢迎的电磁污染和信息泄露^[1-3]。因此,高性能的电磁干扰(EMI)屏蔽材料已经成为当前的一个研究热点课题。除了EMI屏蔽材料的屏蔽效能(SE)外,力学性能也是屏蔽材料至关重要的一个技术指标,特别是在航空航天、建筑工程、汽车制造等领域^[4-6]。金属和金属合金因为其具有高力学性能、高导电性和浅趋肤深度而被广泛用于电磁屏蔽。但是金属和金属合金存在若干缺点,如密度高、加工性差、不耐腐蚀、耐候性弱等^[7-10]。

近年来,纤维织物增强的复合材料凭借质量轻、强度高、性能可扩展等优势,已成为电磁屏蔽领域理想的候选材料^[11]。例如,碳纤维织物经环氧树脂封装并热压以后,可以实现高达120 MPa的拉伸强度,并且在X波段实现27 dB的EMI SE^[12]。尽管纤维织物增强的复合材料已经取得了长足的进展,但是目前的树脂封装材料只起到结构支撑作用,应用前景受到严重限制^[13-14]。因此,急需寻找传统封装材料的替代品,来满足更广阔的市场需求,如电磁辐射防护、信息安全保障以及热响应。

相变材料(PCM)能在恒定温度下吸收和释放大潜热,已广泛应用于热管理领域。目前广泛使用的石蜡、脂肪酸、聚乙二醇(PEG)等固-液PCM在发生相态变化时存在泄漏的问题,这制约着其作为封装材料的应用。与在高温下存在泄漏风险的固-液PCM相比,基于化学交联而成的固-固PCM很少发生泄漏或形变。因此,具有易加工性和良好适应性的固-固PCM是在各种基材上构造封装薄膜的最佳选择。

为此,笔者基于PEG制备了一种固-固相变树脂(SPCR),其被用于封装银纳米线(AgNWs)修饰的玻璃纤维织物(GFF)。SPCR是通过具有活性硅醇基团的PEG水解-缩合得到的。PEG分子链作为功能性软段,可以通过结晶态和无定形态之间的转换实现对热量的储存和释放。硅醇基团作为连接性硬段,通过多重氢键的物理交联作用在聚合物内部形成超分子网络结构,进而实现良好的热稳定性。特别地,SPCR, AgNWs和GFF之间的氢键有助于增强界面相互作用,由此产生的坚固结构使应力得以有效传递。并且这种织物具有优异的EMI屏蔽性

能,这得益于SPCR保护的AgNWs导电网络。此外,复合材料还表现出灵活的热响应特性。因此,AgNWs/GFF/SPCR复合材料在可穿戴的智能服装、电磁辐射防护和个人热管理方面具有广阔的前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

AgNWs:直径120 nm,长度45 μm ,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

PEG:数均分子量(M_n)为10 000,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

异氰酸丙基三乙氧基硅烷(IPTS):分析纯,99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

二月桂酸二丁基锡(DBT):99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

GFF: $\pm 45^\circ$ 双轴编织成布,中国巨石股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

旋转蒸发仪:DS/RE10-2CC,郑州东晟仪器设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU8010,日本日立公司;

红外热成像仪:Fluke Ti400,美国福禄克公司;

矢量网络分析仪:N5230,美国安捷伦公司;

电热鼓风干燥箱:101-1BS,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:DX-2700B,丹东浩源公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-1,瑞士梅特勒托利多仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IS50,美国赛默飞公司。

1.3 试样制备

1.3.1 SPCR合成

首先,对PEG和甲苯进行脱水处理。随后,将3 g的PEG,159 μL 的IPTS和75 μL 的DBT溶于30 mL甲苯中,在40 $^\circ\text{C}$ 下磁力搅拌反应6 h。最后,将产物溶于30 mL的0.1 mol/L的盐酸溶液中,在60 $^\circ\text{C}$ 下旋转蒸发3 h得到SPCR溶液,合成反应式如图1所示。

1.3.2 AgNWs/GFF制备

AgNWs/GFF采用可扩展的喷雾干燥法制备。为了去除GFF表面的杂质和油渍,原材料织物要在

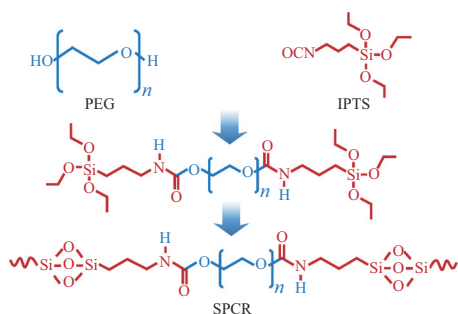


图1 SPCR的合成反应路线

Fig. 1 Synthetic route of SPCR

乙醇溶液中反复清洗,并在 80 °C 的真空烘箱中烘干。将预处理过的 GFF 放置在 80 °C 加热板上,将浓度为 3 mg/mL 的 AgNWs 乙醇分散液均匀地喷洒在 GFF 表面的一侧,然后用加热板烘干 GFF。经过 12 次喷涂以后,得到 AgNWs 质量分数为 6.48% 的 AgNWs/GFF。

1.3.3 AgNWs/GFF/SPCR 复合材料制备

将修饰有 AgNWs 的 GFF 浸在上述 SPCR 溶液中,并在 70 °C 下鼓风干燥蒸发溶剂至恒重得到 AgNWs/GFF/SPCR 预浸布。随后,将获得的 AgNWs/GFF/SPCR 预浸布在压力为 6 MPa 和温度为 90 °C 的条件下,热压 10 min 得到 X-AgNWs/GFF/SPCR 复合材料,其中 X 代表 AgNWs/GFF 的层数。

1.4 测试与表征

EMI 屏蔽性能测试:根据 ASTM D5568-08,采用波导法,使用矢量网络分析仪测试了样品在 X 波段(8.2~12.4 GHz)范围内的屏蔽性能,样品的相应尺寸为长 22.87 mm、宽 10.16 mm。

SEM 表征:用于观察 AgNWs 形貌以及织物表面形貌。

XRD 测试:使用 XRD 仪分析了 AgNWs 及其复合材料的晶体结构。测试角度范围为 5°~89°,步进角度为 0.03°。

DSC 测试:测试前对仪器进行温度校正,样品质量为 2~6 mg,采用高纯氮气保护,记录样品在 10 °C/min 的升温降温速率条件下于 0~80 °C 范围内的热流量-温度曲线。

FTIR 测试:扫描波数范围为 4 000~500 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} 。

热响应测试:将 4 层 AgNWs/GFF 组成的复合材料放置在 65 °C 的热台上加热 300 s 后,迅速转移到 20 °C 的室温台上进行冷却。

2 结果与讨论

2.1 SPCR 的结构表征和热稳定性分析

图 2 显示了 PEG, IPTS 和 SPCR 的 FTIR 谱图。SPCR 是由 PEG 与 IPTS 反应合成的。在 SPCR 的谱图中,属于 IPTS 的 $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ 伸缩峰在 2 270 cm^{-1} 处完全消失,并且在 1 758 cm^{-1} 处产生一个新的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩峰,这表明 PEG 的羟基成功与 IPTS 的异氰酸酯基发生了反应^[15]。

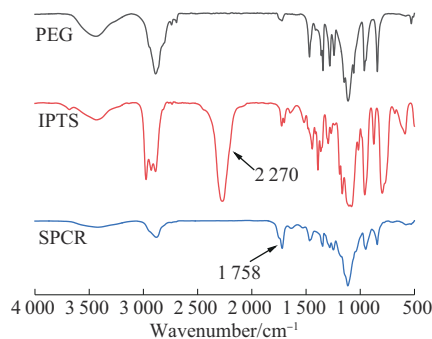


图2 PEG, IPTS 和 SPCR 的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of PEG, IPTS and SPCR

图 3 显示了 PEG 和 SPCR 的 XRD 谱图。PEG 和 SPCR 在 19.1° 和 23.2° 处均显示出两个强烈而尖锐的衍射峰,分别对应 PEG 三斜晶体的 (120) 和 (130) 晶面^[16]。这表明,SPCR 继承了 PEG 的结晶特性。

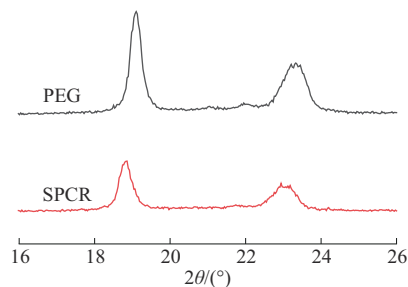


图3 PEG 和 SPCR 的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD spectra of PEG and SPCR

利用 DSC 仪分析了 PEG 和 SPCR 的放热/吸热行为和对应的焓值,分别如图 4 和表 1 所示。PEG 的熔化焓(ΔH_m)和结晶焓(ΔH_c)分别为 141.1 J/g 和 127.1 J/g,熔化点(T_m)和结晶点(T_c)分别为 64.9 °C 和 40.5 °C。经交联后的 SPCR 的 ΔH_m 和 ΔH_c 有所下降,同时 T_m 和 T_c 分别下降至 57.7 °C 和 38.9 °C。SPCR 表现出潜热和相变点下降的趋势。这是因为与 PEG 相比,SPCR 高分子链的自由运动被交联网络限制^[17]。因此,SPCR 内部高密度的交联点阻碍了 PEG 的结晶过程。

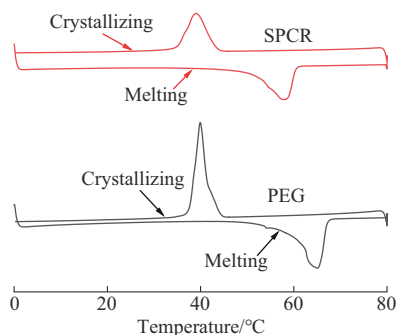


图4 PEG和SPCR的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of PEG and SPCR

表1 PEG和SPCR的DSC热力学数据

Tab. 1 DSC thermodynamic data of PEG and SPCR

Samples	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
PEG	64.9	40.5	141.1	127.1
SPCR	57.7	38.9	102.5	81.3

相比PEG,SPCR具有优异的热稳定性,PEG和SPCR在升温过程中相转变的形状照片如图5所示。图5中上下3张照片分别代表PEG和SPCR在相变前、相变中和相变后的形貌。相变前,PEG和SPCR在室温下均呈现规则的形状,并且缘于结晶态呈现出不透明的现象。当温度超过相变点以后,PEG和SPCR均从结晶态转变为无定形态,并且由不透明转变为透明。值得关注的是,SPCR保持了原有的

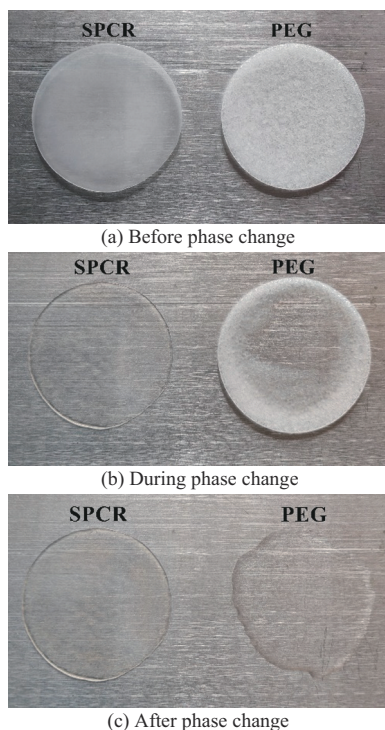


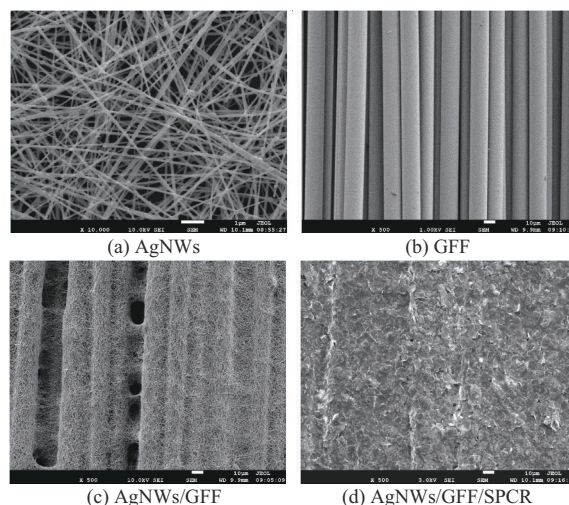
图5 PEG和SPCR在升温过程中相转变的形状照片

Fig. 5 Shape photographs of phase change for PEG and SPCR during heating process

固态形状,而PEG变为液态。这是因为多重氢键和Si—O—Si化学键的共同交联作用在SPCR内部形成了超分子网络结构,进而实现较高的热稳定性。

2.2 AgNWs/GFF/SPCR复合材料的微观形貌

图6是AgNWs, GFF, AgNWs/GFF和AgNWs/GFF/SPCR的表面形态和微观结构。从图6a可以看出,AgNWs的直径分布主要在100~120 nm范围内,平均直径为112 nm,平均长度为45 μm 。相比光滑的GFF(图6b),获得的AgNWs/GFF和AgNWs/GFF/SPCR具有明显的表面差异。

图6 AgNWs, GFF, AgNWs/GFF和AgNWs/GFF/SPCR的微观形貌
Fig. 6 Microscopic morphology of AgNWs, GFF, AgNWs/GFF, and AgNWs/GFF/SPCR

如图6c所示,AgNWs能够紧密地包裹在GFF表面。从图6c明显看出,AgNWs在GFF上搭接了密集的导电网络,形成了连续的电子传输通路。此外,为了给织物提供更好的结构稳定性和机械韧性,基于SPCR对织物进行了封装(图6d)。因此,在AgNWs密集导电网络和SPCR的作用下,复合材料将具有显著的热管理和EMI屏蔽性能。

2.3 AgNWs/GFF/SPCR复合材料的EMI屏蔽性能

图7显示了不同AgNWs/GFF层数的AgNWs/GFF/SPCR复合材料的总EMI SE。由图7可以发现,复合材料EMI SE随着AgNWs/GFF层数的增加而提高。当AgNWs/GFF层数为1层、2层、3层和4层,对应的复合材料试样厚度为0.7,1.4,2.1,2.8 mm时,复合材料的EMI SE分别达到39,50,60,73 dB。因此,通过灵活地控制AgNWs/GFF的层数,可以高效调谐复合材料的EMI屏蔽性能,进而满足不同场景下的应用需求。

特别地,未添加AgNWs的GFF/SPCR复合材料

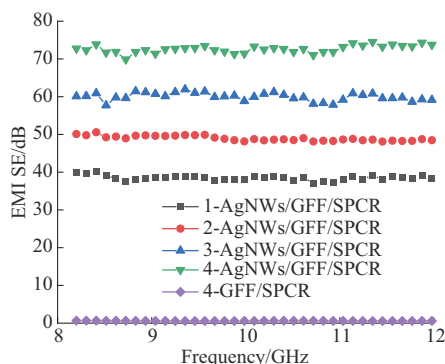
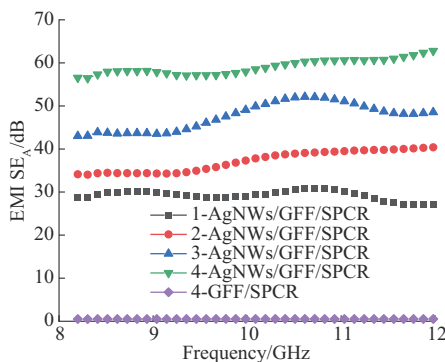
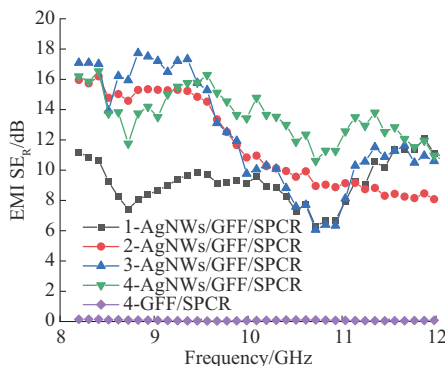


图7 不同AgNWs/GFF层数的AgNWs/GFF/SPCR复合材料的EMI SE

Fig. 7 EMI SE of AgNWs/GFF/SPCR composites with different numbers of AgNWs/GFF layers

的EMI SE仅为0.5 dB,说明AgNWs是电磁波的主要耗散单元。

为了进一步探究AgNWs/GFF/SPCR复合材料的电磁屏蔽特性,电磁波吸收效能(SE_A)和电磁波反射效能(SE_R)被进一步探究,结果如图8和图9所示。由图8和图9看出,随着EMI SE的增加, SE_A 呈现出递增的趋势,而 SE_R 在6~18 dB的范围内波动。功率系数[反射系数(R)、吸收系数(A)和透射系数(T)]值

图8 不同AgNWs/GFF层数的AgNWs/GFF/SPCR复合材料的EMI SE_A Fig. 8 EMI SE_A of AgNWs/GFF/SPCR composites with different numbers of AgNWs/GFF layers图9 不同AgNWs/GFF层数的AgNWs/GFF/SPCR复合材料的EMI SE_R Fig. 9 EMI SE_R of AgNWs/GFF/SPCR composites with different numbers of AgNWs/GFF layers

与AgNWs/GFF层数的关系如图10所示。由图10明显看出,AgNWs/GFF/SPCR复合材料的R值远大于A值,这表明反射主导了屏蔽机制。并且随着AgNWs/GFF层数的增加,反射机制加强,吸收机制被迫减弱。4层AgNWs/GFF增强的复合材料电磁波屏蔽效率几乎接近完全阻挡。这是因为,当电磁波撞击到AgNWs/GFF/SPCR复合材料时,由于AgNWs导电网络表面存在大量自由电子导致阻抗失配,大部分入射电磁波在遇到导电层时立即被反射。少量未被反射的电磁波与AgNWs高密度载流子相互作用,并基于欧姆损耗和感应电流对电磁波能量进行衰减,从而使未反射的电磁波被大量吸收^[18-19]。此外,相邻AgNWs/GFF层间的多重内部反射也会促进电磁波的耗散和衰减,直至电磁波几乎被完全吸收。

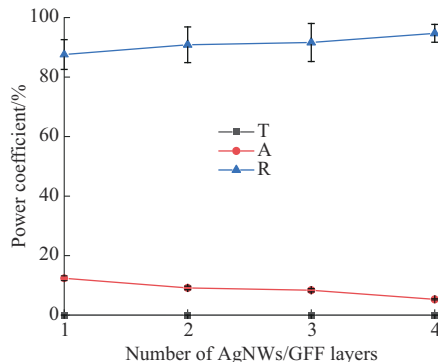


图10 不同AgNWs/GFF层数的AgNWs/GFF/SPCR复合材料的功率系数

Fig. 10 Power coefficients of AgNWs/GFF/SPCR composites with different numbers of AgNWs/GFF layers

2.4 AgNWs/GFF/SPCR复合材料的热响应性能

通过在升温 and 降温过程中监测AgNWs/GFF/SPCR复合材料的温度变化,突出SPCR在热响应方面对复合材料的贡献。基于织物在热台和冷台之间的快速切换,其实时温升和温降过程被记录,如图11所示。由图11可以看出,AgNWs/GFF/SPCR复合材料在升温 and 降温过程均表现出明显的温度滞后现象。这表明AgNWs/GFF/SPCR复合材料作为建筑工程材料可以在外部高温下延缓房间内热量陡增,外部低温下阻止房间内热量流失。

3 结论

通过水解-缩合制得SPCR并制备了AgNWs/GFF/SPCR复合材料,测试了SPCR的结构与热稳定性,研究了AgNWs/GFF层数对复合材料EMI屏蔽性能的影响,并测试了复合材料的热响应性能,具体结论如下。

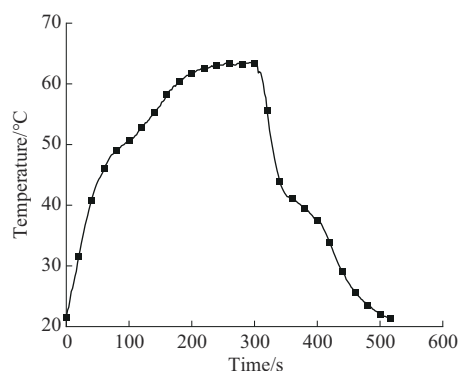


图11 AgNWs/GFF/SPCR复合材料的时间-温度曲线

Fig. 11 Time-temperature profile of AgNWs/GFF/SPCR composites

(1) SPCR保留了原始PEG相变特性的同时具有优异的形状稳定能力。并且SPCR的 ΔH_m 和 ΔH_c 分别为102.5 J/g和81.3 J/g。

(2)通过调整AgNWs/GFF层数,AgNWs/GFF/SPCR复合材料可以实现39~73 dB范围内的可调谐EMI SE,并且复合材料的R值远大于A值,呈现反射主导的屏蔽机制。

(3) AgNWs/GFF/SPCR复合材料在升温 and 降温过程均表现出明显的温度滞后现象,表明其可以作为建筑工程材料,在外部高温下延缓房间内热量陡增,外部低温下阻止房间内热量流失。

参考文献

- [1] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[J]. *Science*, 2016, 353(6 304):1 137-1 140.
- [2] XU J H, LIU T, ZHANG Y, et al. Dragonfly wing-inspired architecture makes a stiff yet tough healable material[J]. *Matter*, 2021, 4(7): 2 474-2 489.
- [3] 金雨霜,王东俊,张袁,等.封闭舱室电磁屏蔽用频率选择表面吸波体设计[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36(6):92-100.
JIN Yushuang, WANG Dongjun, ZHANG Yuan, et al. A frequency selective surface absorber for electromagnetic shielding in enclosed cabins[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 36(6): 92-100.
- [4] ABBASI H, ANTUNES M, VELASCO J I. Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 103: 319-373.
- [5] WANG J, LI Q, LI K C, et al. Ultra-high electrical conductivity in filler-free polymeric hydrogels toward thermoelectrics and electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34 (12). DOI:10.1002/adma.202109904.
- [6] LIANG C B, QIU H, ZHANG Y L, et al. External field-assisted techniques for polymer matrix composites with electromagnetic interference shielding: A review[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(17): 1 938-1 953.
- [7] CHEN M Y, LI M C, GAO Y F, et al. Flexible and robust core-shell PANI/PVDF@ PANI nanofiber membrane for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(8):2 643-2 651.
- [8] 王澎宇,陈港,魏渊,等.石墨烯/碳纤维/芳纶电磁屏蔽纸的制备与性能研究[J]. *中国造纸*, 2024, 43(5):73-83.
WANG Pengyu, CHEN Gang, WEI Yuan, et al. Preparation and properties of graphene/carbon fiber/aramid electromagnetic shielding paper[J]. *China Paper Making*, 2024, 43(5):73-83.
- [9] LIANG C B, ZHANG W, LIU C L, et al. Multifunctional phase change textiles with electromagnetic interference shielding and multiple thermal response characteristics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471. DOI:10.1016/j.cej.2023.144500.
- [10] HUAN X H, SHI K, YAN J Q, et al. High performance epoxy composites prepared using recycled short carbon fiber with enhanced dispersibility and interfacial bonding through polydopamine surface-modification[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.107987.
- [11] 韩悦,唐俊雄,刘元军,等.MXene在电磁屏蔽织物领域应用最新研究进展[J]. *针织工业*, 2024(4):89-94.
HAN Yue, TANG Junxiong, LIU Yuanjun, et al. Latest research progress of MXene in the field of electromagnetic shielded fabrics [J]. *Knitting Industry*, 2024(4):89-94.
- [12] LU H H, LI Z, QI X M, et al. Flexible, electrothermal-driven controllable carbon fiber/poly (ethylene-co-vinyl acetate) shape memory composites for electromagnetic shielding[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.108697.
- [13] ZHOU T Z, CAO C, YUAN S X, et al. Interlocking-governed ultra-strong and highly conductive MXene fibers through fluidics-assisted thermal drawing[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(51). DOI:10.1002/adma.202305807.
- [14] 赵一志,张登,刘元海,等.电磁屏蔽材料的耐腐蚀研究进展[J]. *环境技术*, 2024, 42(3):117-124.
ZHAO Yizhi, ZHANG Deng, LIU Yuanhai, et al. Research progress of electromagnetic shielding materials for corrosion resistance [J]. *Environmental Technology*, 2024, 42(3):117-124.
- [15] WANG Q W, ZHANG H B, LIU J, et al. Multifunctional and water-resistant MXene-decorated polyester textiles with outstanding electromagnetic interference shielding and joule heating performances[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(7). DOI:10.1002/adfm.201806819.
- [16] HAN Y X, RUAN K P, HE X Y, et al. Highly thermally conductive aramid nanofiber composite films with synchronous visible/infrared camouflages and information encryption[J]. *Angewandte Chemie*, 2024, 136(17). DOI:10.1002/anie.202401538.
- [17] WANG C Y, GENG X, CHEN J, et al. Multiple H-bonding cross-linked supramolecular solid-solid phase change materials for thermal energy storage and management[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(11). DOI:10.1002/adma.202309723.
- [18] HAN Y X, RUAN K P, GU J W. Multifunctional thermally conductive composite films based on fungal tree-like heterostructured silver nanowires@ boron nitride nanosheets and aramid nanofibers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(5). DOI: 10.1002/anie.202216093.
- [19] YANG J M, CHANG L, ZHANG X Q, et al. Ionic liquid-enhanced assembly of nanomaterials for highly stable flexible transparent electrodes[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1). DOI: 10.1007/s40820-024-01333-4.