

短切碳纤维增强环氧树脂形状记忆复合材料的制备与性能研究

罗发祥¹ 魏要强² 武南² 宋世彬¹ 邵一川¹

(1 福州大学机械工程及自动化学院金属橡胶工程研究中心, 福州 350108)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 为实现形状驱动能耗与复合材料力学性能的最佳配合, 本文在热致环氧形状记忆聚合物基体中提高增韧剂新戊二醇二缩水醚(NGDE)含量来降低其玻璃化转变温度, 同时添加短切碳纤维(SCF)来抵消由增韧剂引起的刚度降低负面效果。通过实验研究了不同 NGDE、SCF 含量对复合材料形状记忆转变温度、形状记忆性能和力学性能的影响。结果表明, 增加 NGDE 含量可将环氧聚合物基体的形状记忆转变温度从 90 °C 降至 43 °C, 其储能模量和弯曲模量也随之降低。在 11wt%NGDE 上添加 SCF 后, 复合材料的玻璃态储能模量、橡胶态储能模量、弯曲模量最高可提高至原始试样的 1.9 倍、7 倍和 2.4 倍。

关键词 环氧形状记忆复合材料, 短切碳纤维, 形状记忆转变温度, 储能模量, 弯曲模量

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.03.008

Preparation and Performance of Short Carbon Fiber Reinforced Shape Memory Epoxy Composites

LUO Faxiang¹ WEI Yaoqiang² WU Nan² SONG Shibin¹ SHAO Yichuan¹

(1 Metal Rubber Engineering Research Center, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract In order to achieve the optimum combination of the energy cost for shape recovery and the mechanical performance of composite materials. In this paper, the content of toughening agent Neopentyl Glycol Diglycidyl Ether (NGDE) is increased in the thermotropic epoxy shape memory polymer matrix to reduce its glass transition temperature, and Short Carbon Fiber (SCF) is added to compensate the stiffness reduction caused by toughening agents. The effects of different contents of NGDE and SCF on the shape memory transition temperature, shape memory properties and mechanical performance of the composites were investigated. The results show that increasing the NGDE content can reduce the shape memory transition temperature of the epoxy polymer matrix from 90 °C to 43 °C, and the storage modulus and flexural modulus are synchronously decreased. By adding SCF in the 11%wt NGDE containing sample, the glassy storage modulus, rubbery storage modulus, and flexural modulus of the composites can be increased to 1.9 times, 7 times, and 2.4 times of the original ones.

Key words Shape memory epoxy polymer, Short carbon fiber, Shape memory transition temperature, Storage modulus, Flexural modulus

0 引言

热致环氧形状记忆复合材料因其质量轻、可恢复变形大、形状记忆性能好等优点在航空航天等具有空间可展开结构致动器领域具有较大应用潜力^[1-6]。然而, 目前多数的环氧形状记忆聚合物

(Shape memory epoxy polymer, SMEP)基体的形状记忆转变温度通常在 60 °C 以上^[7-8], 使形状回复驱动所需的能耗较高, 这与航天领域节能需求相悖。此外, 较低的弯曲模量和储能模量是 SMEP 在应用中存在的主要缺陷^[9], 如何在降低热致 SMEP 形状记忆转变

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(12002088);

第一作者简介: 罗发祥, 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为聚合物基智能材料及结构。E-mail: 200227024@fzu.edu.cn

温度的同时增强其力学性能是目前研究的热点。

大量学者从升温速率、固化体系等角度对热致 SMEP 形状记忆转变温度的调节进行了研究。增加固化过程中的升温速率虽可降低 SMEP 形状记忆转变温度^[10],但操作较为复杂,且调控玻璃化转变温度(T_g)的精确程度仍有较大提升空间。基于酸酐类固化和胺类固化体系,改变固化剂、增韧剂、促进剂的添加量或者固化剂与环氧树脂的成分比例,可降低材料的转变温度^[11-15]。从现有报道来看,在胺类固化体系下的 SMEP 具有更低的形状记忆转变温度,这为降低 SMEP 的形状记忆转变温度提供了可行性方案,但未在提高材料力学性能方面做进一步研究。

现有的热致 SMEP 力学性能相关研究表明,采用胺类固化剂或热浅发剂改变环氧聚合物基体本身的结构可在一定程度使得材料强度、韧性和热力学性能得到提高^[16-17],但所需原材料种类较多。相较而言,在环氧树脂基体中加入填料更为简单有效。常见的填料有碳纳米管^[18]、石墨烯^[19]、亚麻纤维^[20]、碳纤维^[21-22]等。相比其他填料,碳纤维与环氧树脂复合而成的材料具有模量高、强度大、质量轻等优点。并且短切碳纤维与环氧树脂复合的工艺简单,生产成本低,所以是制备环氧形状记忆复合材料的最佳选择。然而目前关于短切碳纤维增强的环氧形状记忆复合材料的研究主要集中在拉伸^[23]、抗冲击^[24]等方面,对于弯曲性能方面的研究鲜有报道。

本文采用胺类固化体系制备形状记忆环氧树脂聚合物,以控制增韧剂含量作为降低环氧形状记忆聚合物形状记忆转变温度的有效途径;并采用短切碳纤维作为增强相提升复合材料的储能模量和弯曲模量;将为制备具有低转变温度的高力学性能热致环氧形状记忆复合材料提供数据支撑和方案参考。

1 材料制备

1.1 环氧形状记忆聚合物基体制备

环氧树脂选用双酚 A 型环氧树脂 E51,固化剂为聚醚胺 D230,增韧剂为新戊二醇二缩水醚 NGDE。按照 1 个环氧当量和 1 个胺当量配比的关系,得到环氧树脂 E51 和聚醚胺 D230 的固定质量配比为 E51 (3 g):D230(0.98 g)。制作 4 组不同含量增韧剂 NGDE 试样(表 1),按照 80 °C/3 h,120 °C/2 h 的固化

表 1 环氧形状记忆聚合物试样分组
Tab. 1 Test groups of shape memory epoxy polymer samples

试样组别	E51/g	D230/g	NGDE/g
A1	180	58.8	0
A2	180	58.8	15 (5wt%)
A3	180	58.8	30 (11wt%)
A4	180	58.8	45 (17wt%)

温度梯度对材料进行固化。

1.2 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料制备

因添加 11wt% (30 g) NGDE 的环氧形状记忆聚合物基体具有较低的形状记忆转变温度和合适的力学性能,故实验选用该配比下的环氧形状记忆聚合物作为基体材料(具体选用依据详见下文 3.3 节)。所使用的填料为短切碳纤维(SCF),直径 6 μm ,长度 0.2 mm,长径比为 33。制备流程与 SMEP 相似,唯一区别就是在固化前加入不同质量的 SCF(表 2)。

表 2 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料试样分组
Tab. 2 Test groups of SCF shape memory epoxy composite samples

试样组别	E51/g	D230/g	NGDE/g	SCF/g
SCF1	180	58.8	30	14.15 (5wt%)
SCF2	180	58.8	30	29.87 (10wt%)
SCF3	180	58.8	30	47.43 (15wt%)
SCF4	180	58.8	30	67.20 (20wt%)

2 性能表征

2.1 形状记忆转变温度表征

SMEP 的 T_g 反映形状记忆效应的转变温度,是确定 SMEP 形状固定和形状开始回复温度的关键参数^[14]。

本文采用德国耐驰仪器公司生产的型号为 DSC 214 Polyma 型差示扫描量热仪,用氦气作为保护气体,液氮降温。升降温程序为:(1)以 10 °C/min 的速率从 -10 °C 升至 250 °C;(2)在 250 °C 保温 3 min;(3)以 40 °C/min 的速率从 250 °C 降至 -10 °C;(4)在 -10 °C 保温 3 min;(5)以 20 °C/min 的速率由 -10 °C 升至 250 °C。仪器将记录 DSC 曲线,前 4 步是为了消除试样热历史,实验数据取第 5 步的结果,根据切线法得到环氧形状记忆聚合物及其复合材料的形状记忆转变温度。

2.2 形状记忆性能表征

本文主要对复合材料在弯曲-回复变形方式下的形状记忆性能进行表征,包括形状固定率、形状回复率及形状回复速率。形状固定率及形状回复率测试原理见图 1。

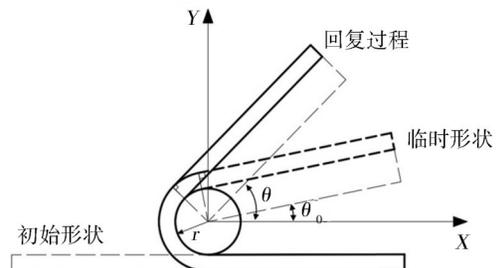


图 1 形状记忆材料形状回复测试原理图

Fig. 1 Principle of shape recovery test of shape memory material

形状固定率 R_f 、回复角度 θ_i 及形状回复率 R_r 的计算公式为:

$$R_f = \frac{180 - \theta_0}{180} \times 100\% \quad (1)$$

$$\theta_i = \theta - \theta_0 \quad (2)$$

$$R_r = \frac{\theta_i - \theta_0}{180 - \theta_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, θ_0 为试样回复初始角度或临时形状时的角度。

通过空气和硅油对试样进行加热,测试形状回复速率,将弯曲后的复合材料试样进行形状回复,记录试样回复角度与时间的关系来进行对比分析。

空气加热回复测试实验步骤为:(1)将电热鼓风干燥箱的温度加热至高于 T_g 10 °C,保持该温度;(2)将已经弯曲的 80 mm×15 mm×3 mm 试样放入电热鼓

风干燥箱内,将一端固定;(3)通过干燥箱的小窗口录制试样形状回复随时间变化视频,观察变化情况。

油浴加热回复测试实验步骤为:(1)将硅油倒入玻璃培养皿,放在磁力加热搅拌仪上加热至高于 T_g 10 °C,保持该温度;(2)将已经弯曲的 80 mm×15 mm×3 mm 试样放入玻璃培养皿内,将一端固定;(3)对试样录制形状回复随时间变化视频,观察变化情况。

此外,为最大限度降低重力对形状回复测试结果的影响,将真空干燥箱侧卧放置,便于相机从上方观察玻璃窗内样品。调整干燥箱内样品夹持方式以确保两种加热方法下样品重力作用方向均垂直于形状回复力作用平面,使重力在该平面内分量为0。具体实验过程如图2所示。

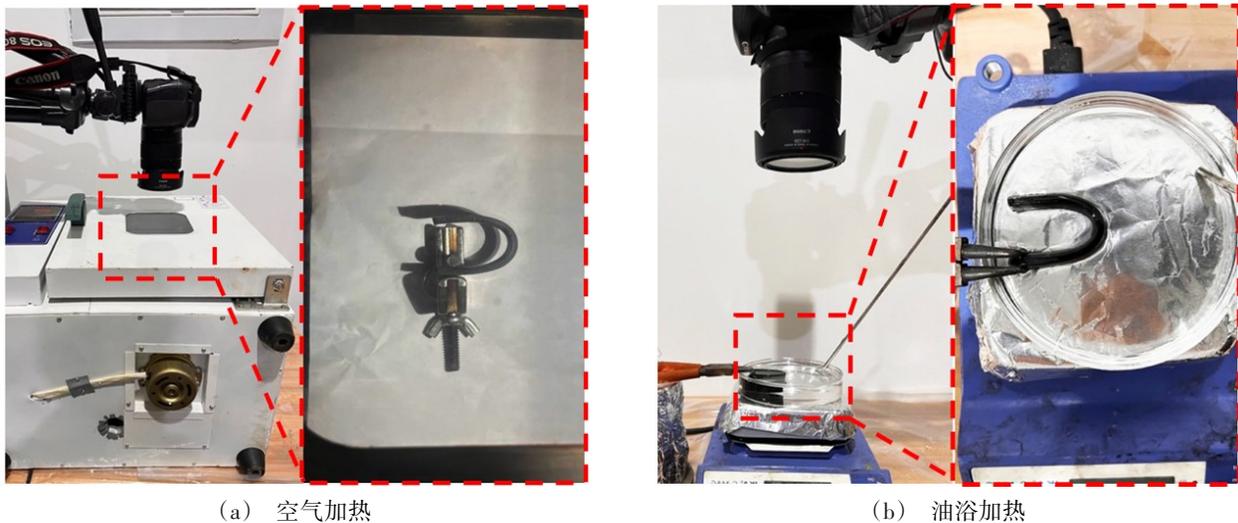


图2 不同加热方式实物图

Fig. 2 Two different heating methods

2.3 力学性能表征

环氧形状记忆聚合物以及环氧形状记忆复合材料的储能模量反映了材料以弹性方式储存变形能的能力,因此可通过储能模量的变化了解到材料形状回复应力的变化趋势。本文利用DMA Q850设备表征不同温度下材料的储能模量、损耗模量和损耗角等动态热-力学性能。具体测试方法为:试样的尺寸为 30 mm×10 mm×2 mm,夹持长度为 17.5 mm,选用单悬臂模式,频率为 1 Hz,温度为 0~140 °C,升温速率 5 °C/min。

此外,为了表征材料在弯曲状态下的准静态力学性能,本文通过三点弯曲试验测量不同材料在室温下的应力-应变,以对材料的弯曲模量进行表征。三点弯曲试验参照 GB/T1449—2005^[25],使用 WDW-T200 微机控制电子试验万能机,根据标准,试样的尺寸为 50 mm×15 mm×2 mm,有效跨距 32 mm。其跨厚

比为 16,压头速度为 1 mm/min。

根据三点弯曲测试得到的载荷-挠度曲线,计算得到弯曲模量,计算公式为:

$$E = \frac{L^3 \times \Delta p}{4b \times h^3 \times \Delta S} \quad (4)$$

式中, E 为弯曲弹性模量; L 为试样有效跨距; Δp 为载荷-挠度曲线上初始直线段的载荷增量; b 为试样宽度; h 为试样厚度; ΔS 为与载荷增量 Δp 对应的位移增量。

3 结果与讨论

3.1 形状记忆转变温度

环氧形状记忆聚合物试样的 DSC 测试曲线如图 3 所示,可以看出, A1~A4 试样 NGDE 含量逐渐增加,试样热流随温度变化曲线拐点逐渐向左移动,材料的 T_g 从 90.7 °C 逐渐降低到了 43.5 °C。原因是 NGDE 是低分子量脂肪族环氧树脂,在固化过程中,长脂肪

链在材料内部形成可逆相,从而降低了材料的转变温度。该结果表明,通过控制环氧形状记忆聚合物中 NGDE 的添加量,即可实现形状记忆转变温度在 43.5 ~90.7 °C 可控变化。

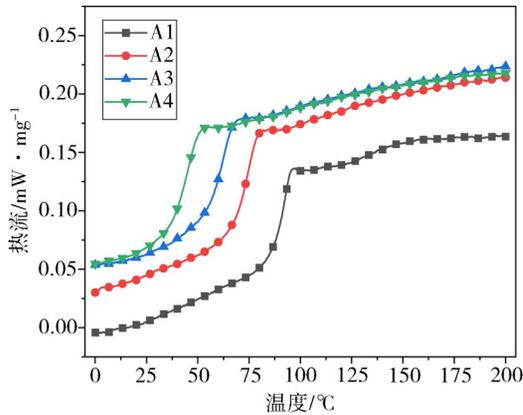


图3 不同NGDE含量试样的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves for different NGDE content samples

不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料的DSC测试曲线如图4所示。可知,当SCF含量从5wt%增加到20wt%,试样的热流随温度变化曲线的拐点逐渐左移,复合材料的热流随温度变化曲线的拐点逐渐左移,复合材料的 T_g 逐渐降低,与未添加填料的试样对比, T_g 最大差距在5 °C左右。原因是碳纤维具有比环氧树脂更高的热导率,因此碳纤维的添加增加了材料的温度响应,导致随着SCF含量的增大,环氧形状记忆复合材料的形状记忆转变温度逐渐降低。

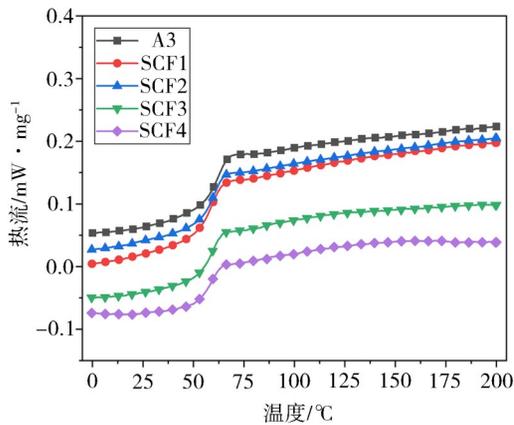


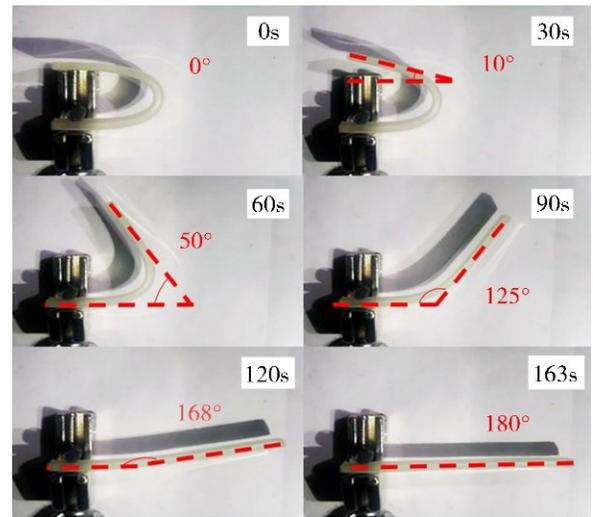
图4 不同SCF含量试样DSC曲线

Fig. 4 DSC curves for different SCF content samples

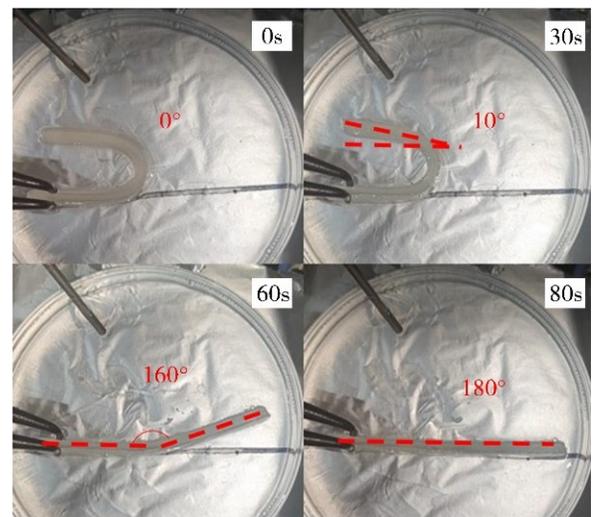
3.2 形状记忆性能

在空气加热和油浴加热下环氧形状记忆聚合物试样及添加短切碳纤维试样的形状回复过程分别如图5、图6所示。

不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料统计测试结果如图7和表3所示。可知,不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料均有



(a) 空气加热

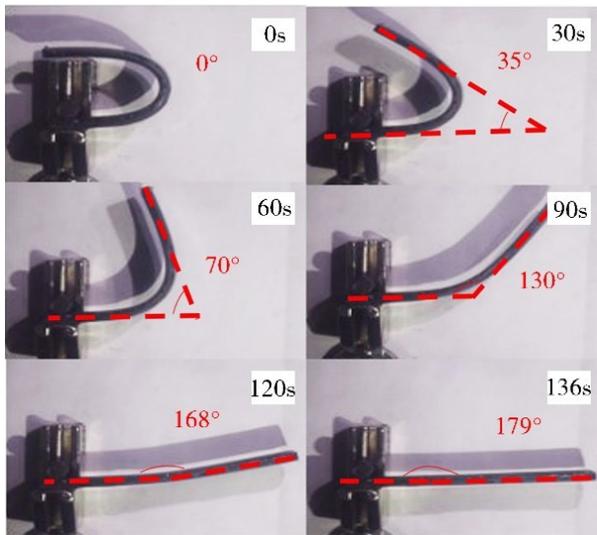


(b) 油浴加热

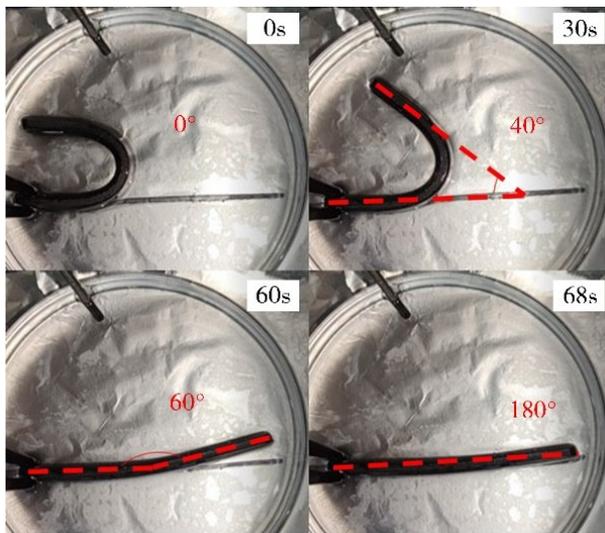
图5 环氧形状记忆聚合物形状回复过程

Fig. 5 Shape recovery process of shape memory epoxy polymers 着良好的形状记忆性能,形状固定率和形状回复率都在95.5%以上。但随着SCF含量的增加,材料的形状回复率略微降低,原因是填料的添加使得复合材料在形变回复过程中受到的阻力升高,导致了回复能力的降低。另外,排除重力的影响后,油浴加热的回复时间比空气加热的回复时间显著减小,说明通过油浴加热的方式可提高形状记忆复合材料回复速率。

此外,不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料的回复时间均小于普通环氧形状记忆聚合物,且随着SCF含量的增加,回复时间在逐渐减小,原因是随着SCF含量的增加,材料的导热能力增加,能更快地从外界吸收热量,更快达到 T_g 。但从15%(SCF3试样)增加到20%(SCF4试样),回复时间较为接近,说明SCF的添加虽然能提高材料的形状回复速率,但有限制。



(a) 空气加热



(b) 油浴加热

图6 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料形状回复过程

Fig. 6 Shape recovery process of short carbon fiber shape memory epoxy composites

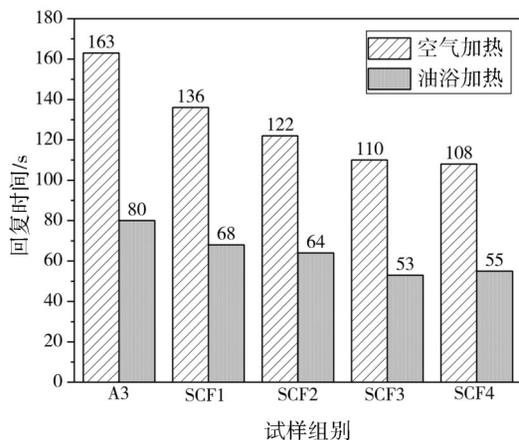


图7 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料形状回复时间对比

Fig. 7 Comparison of shape recovery results of short carbon fiber shape memory epoxy composites

表3 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料形状回复结果

Tab. 3 Shape recovery results of SCF shape memory epoxy composites

试样组别	空气加热		油浴加热	
	形状固定率	形状回复率	形状固定率	形状回复率
A3	100	100	100	100
SCF1	100	99.4	100	100
SCF2	100	98.4	100	99.4
SCF3	100	97.8	100	98.3
SCF4	100	95.6	100	95.6

3.3 力学性能

环氧形状记忆聚合物试样的DMA测试结果见图8。由图8(a)可知,0~140℃的变化过程中,试样的储能模量随着温度升高呈现出阶梯式下降,因为材料内部发生了从玻璃态到橡胶态的力学转变。当环氧形状记忆聚合物处于玻璃态时,储能模量比较高,约为3 GPa;处于橡胶态时储能模量比较低,只有几兆帕,材料的储能模量随着温度变化发生了3个数量级的变化。随着NGDE含量的增加,环氧形状记忆聚合物整体模量都出现了小幅度的下降,高温储能模量是形状记忆材料最重要的参数之一,它能够反映了材料在形状回复过程中产生的回复应力的大小,说明通过改变NGDE的含量即可改变聚合物的模量以及回复应力等性能。

在动态热力学分析中,通常把损耗角正切值的峰值所对应的温度看作 T_g ,由图8(b)可知,随着增韧剂NGDE含量的增加,峰值点逐渐左移, T_g 由90.07℃逐渐降低到53.04℃,与差示扫描量热分析趋势一致,吻合度良好,进一步说明了通过改变NGDE的含量能够改变环氧形状记忆聚合物材料的形状记忆转变温度。

环氧形状记忆聚合物的不同试样三点弯曲测试结果见图9。由图9(a)中的位移载荷曲线,经公式(4)计算可得到图9(b)中的弯曲模量变化趋势。从图中曲线结果可知,室温时,A1试样表现出脆性材料特性,载荷位移曲线呈现直线形状,具有最高的弯曲模量和最低的断裂应变,相比下A2~A4试样的载荷位移曲线斜率越来越小,弯曲模量不断减小,但断裂应变越来越大。说明随着NGDE含量的增加,虽然环氧形状记忆聚合物模量有所下降,但是韧性不断提高,材料的变形能力得到提高。原因是NGDE为长链化合物,与固化剂聚醚胺D230反应形成交联网状结构。这种结构插入环氧树脂与聚醚胺D230的交联结构中,提高了材料的韧性,增加了材料的塑性变形。但是,这也造成材料强度的降低,导致了弯曲模量的下降。从图中曲线可看出,弯曲模量下降的

速率呈现先缓后急的趋势。此外,结合 T_g 测试结果来看,A3 试样的 T_g 较低且弯曲模量降低的程度较低,是制备低形状记忆转变温度 SMPC 聚合物基体材料的最佳选择,此试样的 NGDE 含量为 11wt%。

针对不同 SCF 含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料的 DMA 测试结果如图 10 所示。由图 10(a) 可知,0~120 °C 变化过程中,不同 SCF 含量的短切碳

纤维环氧形状记忆复合材料相比于普通环氧形状记忆聚合物,整体模量均有较大增强,并且随着 SCF 含量的增加,形状记忆复合材料的模量持续上升,其中具有最大 SCF 含量为 20wt% 的环氧形状记忆复合材料(SCF4 试样)与单纯的环氧形状记忆聚合物(A3 试样)相比,玻璃态模量从 3.066 GPa 增大到 5.746 GPa,提高了 1.9 倍,橡胶态模量从 5 MPa 增大到 35 MPa,提

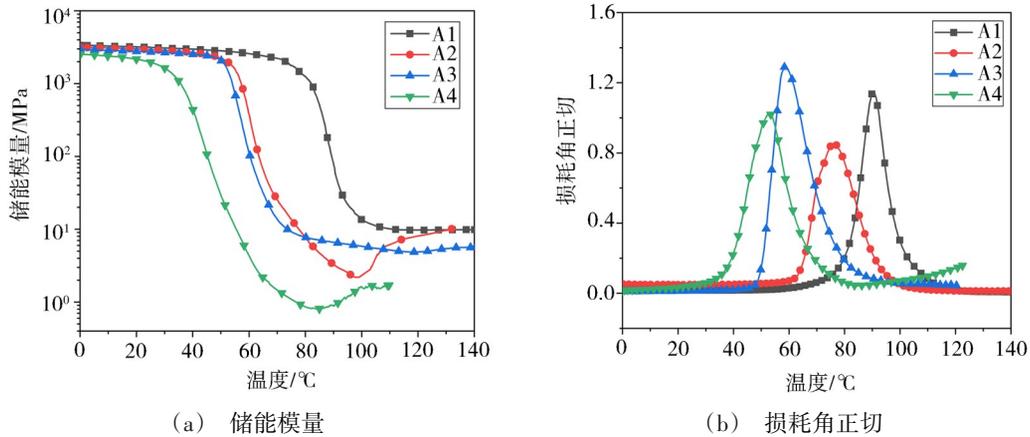


图 8 环氧形状记忆聚合物 DMA 测试结果

Fig. 8 Shape memory epoxy polymers DMA test results

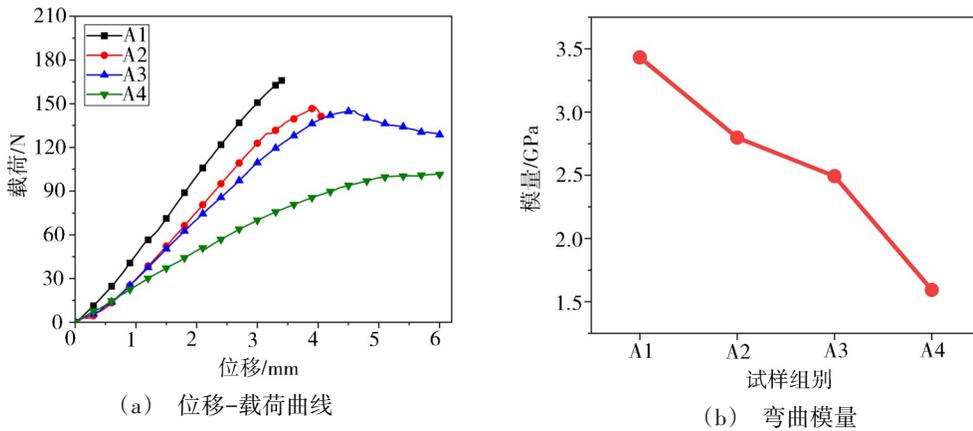


图 9 环氧形状记忆聚合物静态三点弯曲测试结果

Fig. 9 Static three-point bending test results of shape memory epoxy polymer

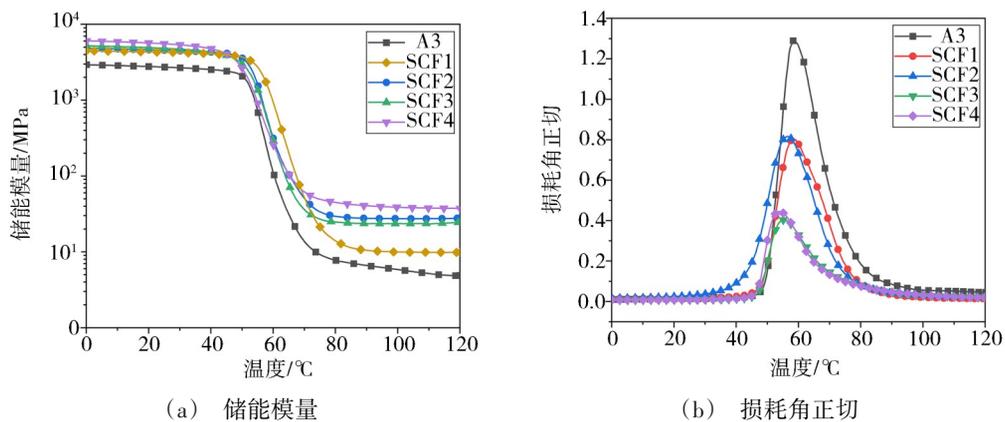


图 10 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料 DMA 测试结果

Fig. 10 Short carbon fiber shape memory epoxy composites DMA test results

高了7倍。原因是短切碳纤维填料与环氧基体之间相互缠结,使得材料内部交联度提高,分子链段运动变得更困难,宏观上表现出复合材料储能模量的上升。

由图10(b)可知,从A3~SCF4,随着SCF含量的增加,短切碳纤维环氧形状记忆复合材料的损耗角峰值逐渐向左偏移,说明材料的 T_g 逐渐降低,原因是碳纤维的添加增加了材料的温度响应。

对不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料试样的三点弯曲测试结果如图11所示。可以

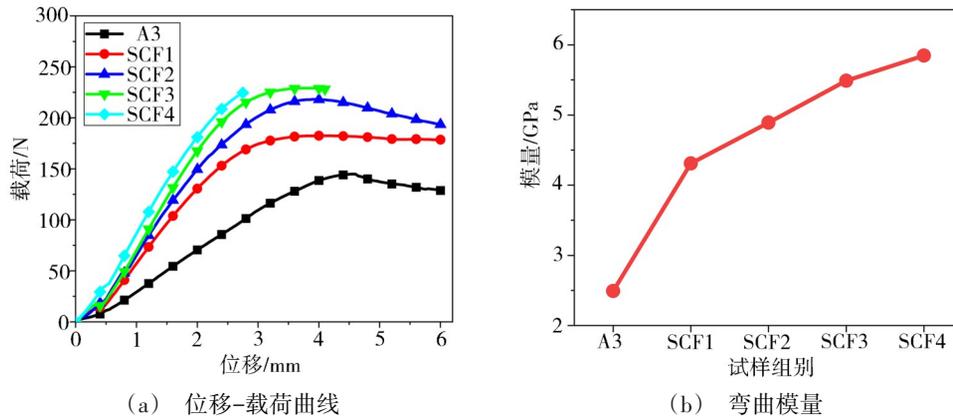


图11 短切碳纤维环氧形状记忆复合材料静态三点弯曲测试结果

Fig. 11 Static three-point bending test results of short carbon fiber shape memory epoxy composites

4 结论

本文采用环氧树脂E51、胺类固化剂聚醚胺D230和增韧剂NGDE制备了热致环氧形状记忆聚合物并对其力学性能和形状记忆性能进行了实验研究。主要结论如下:

(1)本文通过控制增韧剂NGDE的添加量可让制备的热致环氧形状记忆聚合物基体的形状记忆转变温度从90.7℃降低到43.5℃,低于多数种类形状记忆聚合物60℃的转变温度。并且添加短切碳纤维的环氧形状记忆复合材料的形状记忆转变温度较低,在55℃左右。实验结果发现随着SCF含量的增大,环氧形状记忆复合材料的形状记忆转变温度逐渐降低。达到预期降低复合材料形状记忆转变温度的效果,可减少复合材料在应用中的加热能耗。

(2)通过加入短切碳纤维弥补了由于基体材料自身以及增韧剂含量增加导致的力学性能差的缺陷。加入短切碳纤维使得环氧形状记忆复合材料的储能模量和弯曲模量均有较大增强。随着SCF含量的增加,复合材料的储能模量持续上升,其中环氧形状记忆复合材料(SCF4试样)与环氧形状记忆聚合物(A3试样)相比,玻璃态模量从3.066 GPa增大到了5.746 GPa,提高了1.9倍,橡胶态模量从5 MPa增大到35 MPa,提高了7倍。弯曲模量从2.5 GPa增大到了6 GPa,增大了1.7倍。

看到,不同SCF含量的短切碳纤维环氧形状记忆复合材料相比于环氧形状记忆聚合物的强度均有了提升,并且随着SCF含量的增加,材料的静态模量持续上升,但是断裂应变在不断减小,材料更易断裂。环氧形状记忆复合材料(SCF4试样)与环氧形状记忆聚合物基体(A3试样)相比,弯曲模量从2.5 GPa增大到了6 GPa,大约增大了1.7倍。原因是短切碳纤维填料提高了复合材料内部的交联度,并且能够阻碍裂纹的延展,从而提高了复合材料的模量。

(3)增韧剂含量的增加和短切碳纤维含量的增加虽会影响材料形状记忆性能的改变,但形状记忆性能下降幅度很小,从实验结果表明,制备的热致环氧形状记忆复合材料形状固定率和形状回复率均在95%以上,均有着良好的形状记忆性能。

参考文献

[1] 任天宁,朱光明,聂晶. 形状记忆聚合物复合材料可展开结构的研究进展[J]. 航空材料学报,2018,38(04):47-55.
 REN T N, ZHU G M, NIE J. Research progress on deployable structures of shape memory polymer composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(04):47-55.
 [2] 邓华,高军鹏,益小苏. 形状记忆复合材料用环氧树脂基体的制备与性能[J]. 宇航材料工艺,2014,44(04):46-49.
 DENG H, GAO J P, YI X S. Preparation and properties of epoxy resin matrix for shape memory composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(04):46-49.
 [3] 张豆,刘立武,徐鹏飞,等. 面向火星探测的环氧形状记忆聚合物复合材料的性能研究[J]. 力学进展, 2023, 53(1):239-255.
 ZHANG D, LIU L W, XU P F, et al. Properties of epoxy shape memory polymer composites for mars exploration [J]. Advances in Mechanics, 2023, 53(1):239-255.
 [4] LI Z, YANG Y, MA L, et al. Shape memory epoxy resin and its composite with good shape memory performance and high mechanical strength [J]. Polymer Bulletin, 2022, 80(2):1641-1655.

- [5] 赵伟, 刘立武, 孙健, 等. 基于形状记忆聚合物复合材料航天航空可变形结构技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 73-83.
- ZHAO W, LIU L W, SUN J, et al. Research progress of aerospace deformable structure technology based on shape memory polymer composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(4): 73-83.
- [6] 李芝华, 陈明, 马立, 等. 聚氨酯改性环氧树脂形状记忆材料[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(1): 24-27.
- LI Z H, CHEN M, MA L, et al. Polyurethane modified epoxy resin shape memory material [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(1): 24-27.
- [7] 赵寒星, 兰鑫, 冷劲松. 形状记忆聚合物材料及其在航天器新型锁紧释放机构中的应用[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(03): 157-166.
- ZHAO H X, LAN X, ENG J S. Shape memory polymer material and its application in new lock-release mechanism of spacecraft [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(03): 157-166.
- [8] 李芝华, 陈明, 马立, 等. 端羧基丁腈橡胶改性环氧树脂形状记忆聚合物[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(01): 28-32.
- LI Z H, CHEN M, MA L, et al. Carboxy-terminated nitrile rubber modified epoxy shape memory polymer [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(01): 28-32.
- [9] 曾好. 热致形状记忆聚合物及其复合材料的热力学性能研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.
- ZENG H. Thermodynamic properties of thermotropic shape memory polymers and their composites [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [10] 胡红梅, 闫长旺, 侯一斌. 固化因素对聚合物玻璃化转变温度的影响 [J]. 中国胶黏剂, 2013, 22(09): 11-13.
- HU H M, YAN C W, HOU Y B. Effects of curing factors on the glass transition temperature of polymers [J]. China Adhesive, 2013, 22(09): 11-13.
- [11] 赵利民. TiNi合金丝/环氧树脂形状记忆复合材料制备及性能研究[D]. 北京有色金属研究总院, 2015.
- ZHAO L M. Preparation and properties of TiNi alloy wire/ epoxy resin shape memory composites [D]. Beijing Nonferrous Metals Research Institute, 2015.
- [12] XIE T, ROUSSEAU I A. Facile tailoring of thermal transition temperatures of epoxy shape memory polymers [J]. Polymer, 2009, 50(8): 1852-1856.
- [13] FELDKAMP D M, ROUSSEAU I A. Effect of chemical composition on the deformability of shape - memory epoxies [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2011, 296(12): 1128-1141.
- [14] 刘雅芸. 形状记忆环氧树脂及其复合材料的性能与应用研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2019.
- LIU Y Y. Properties and applications of shape memory epoxy resins and their composites [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [15] 马甜, 贺鹏飞, 李文晓. 环氧/酸酐体系网络结构对形状记忆性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(02): 2145-2150.
- MA T, HE P F, LI W X. Influence of network structure of epoxy/anhydride system on shape memory performance [J], Material Reports, 2021, 35 (02): 2145-2150.
- [16] LIU H, LI J, GAO X, et al. Double network epoxies with simultaneous high mechanical property and shape memory performance[J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25(2): 1-12.
- [17] BELMONTE A, GUZMAN D, FERNANDEZ-FRANCOS X, et al. Effect of the network structure and programming temperature on the shape-memory response of thiol-epoxy "click" systems [J]. Polymers, 2015, 7(10): 2146-2164.
- [18] LIU Y, ZHAO J, ZHAO L, et al. High performance shape memory epoxy/carbon nanotube nanocomposites [J]. ACS applied materials & interfaces, 2016, 8(1): 311-320.
- [19] 夏康程, 杨少丹, 李培旭. 石墨烯/环氧树脂复合材料的最新进展及航空应用研究 [J]. 炭素技术, 2021, 40(06): 20-25.
- XIA K C, YANG S D, LI P X. Recent progress of graphene/ epoxy resin composites and research on aerospace applications [J]. Carbon technology, 2021, 40 (06): 20-25.
- [20] 张蕾. 亚麻纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能和阻燃性能研究 [J]. 塑料科技, 2022, 50(04): 36-40.
- ZHANG L. Mechanical properties and flame retardant properties of flax fiber reinforced epoxy resin matrix composites [J]. Plastic Technology, 2022, 50(04): 36-40.
- [21] 罗锐祺, 刘勇琼, 廖英强, 等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料力学性能影响因素的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35 (z2): 558-563.
- LUO R Q, LIU Y Q, LIAO Y Q, et al. Research progress on factors influencing mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Material Reports, 2021, 35 (z2): 558-563.
- [22] 王亚东. 碳纤维增强环氧树脂泡沫复合材料力学性能研究 [D]. 燕山大学, 2017.
- WANG Y D. Study on mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin foam composites [D]. Yanshan University, 2017.
- [23] 王光凯. 短切碳纤维增强酚醛环氧树脂的阻燃性能研究 [D]. 沈阳航空航天大学, 2019.
- WANG G K. Research on flame retardancy of chopped carbon fiber reinforced phenolic epoxy resin [D]. Shenyang Aerospace University, 2019.
- [24] 孙晋媛. 复合材料用作乒乓球拍底板的动力学特性研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49 (6): 121-123.
- SUN J Y. Research on dynamic characteristics of composite materials used as baseboard of table tennis racket [J]. Synthetic Material Aging and Application, 2020, 49(6): 121-123.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. GB/T1449-2005纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of China. GB/T1449-2005 Test method for bending properties of fiber reinforced plastics [S]. Beijing: China Standard Press, 2005.