

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.005

熔融纺丝法制备 PETG/PC/PBAT 复合纤维

邓晴晴¹, 思芳¹, 姜凤阳¹, 赵煜¹, 思昱安², 王梓安², 王俊勃^{1,2}

(1. 西安工程大学材料工程学院, 西安 710048; 2. 陕西鼎新汇智功能材料科技有限公司, 西安 710048)

摘要: 为提升纤维强度, 通过熔融纺丝法以聚碳酸酯(PC)/聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)为增强相, 与聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯(PETG)复合熔融纺丝。探究了不同PC/PBAT质量分数对PETG流变性能、官能团、热性能、拉伸性能、形状记忆性能的影响。结果显示, 随剪切速率升高, 黏度下降, 体系呈现剪切变稀的假塑性流体特征; 红外光谱可以看出复合物成功制备; PETG/PC/PBAT仅有一个玻璃化转变温度, 表明PC/PBAT与PETG为相容体系。随着PC/PBAT含量增加, 纤维强度逐步提升, 拉伸强度由37.84 MPa升至52.61 MPa, 断裂伸长率由238%提至332%, 与纯PETG相比, 拉伸强度提升39%、断裂伸长率提高39.5%; 随着PC/PBAT含量增加, 微观形貌产生缺陷, 说明PETG与PBAT相容性有限; 同时, 形状记忆性能下降幅度趋缓, 形状固定率由95%降至91%, 形状回复率由92.8%降至81.8%。本研究明晰了PC/PBAT含量对PETG基复合纤维多性能的作用规律, 为高性能PETG复合纤维的开发提供数据支撑与理论参考。

关键词: 熔融纺丝; 聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯; 聚碳酸酯; 拉伸性能; 形状记忆性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0034-07

Preparation of PETG/PC/PBAT composite fibers based on melt spinning method

DENG Qingqing¹, SI Fang¹, JIANG Fengyang¹, ZHAO Yu¹, SI Yuan², WANG Zian², WANG Junbo^{1,2}

(1. School of Materials Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Dingxinhuizhi Functional Materials Technology Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract : To enhance fiber strength, polycarbonate (PC)/poly (butylene terephthalate-co-adipate)(PBAT) was used as the reinforcing phase, and composite melt spinning was performed with poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate)(PETG). The effects of varying PC/PBAT contents on the rheological properties, functional groups, thermal properties, tensile properties, and shape memory properties of PETG were investigated. The results demonstrate that with increasing shear rate, the viscosity decreases, showing the shear-thinning behavior characteristic of a pseudoplastic fluid. Fourier transform infrared spectroscopy confirms the successful preparation of the composites. PETG/PC/PBAT has only one glass transition temperature, indicating that PC/PBAT and PETG form a compatible system. With the increase of PC/PBAT content, the fiber strength gradually improves as follows: the tensile strength increases from 37.84 MPa to 52.61 MPa, and the elongation at break rises from 238% to 332%. Compared with pure PETG, the tensile strength and elongation at break of composite fiber increase by 39% and 39.5%, respectively. However, as the mass fraction of PC/PBAT increases, defects appear in the microstructure, indicating limited compatibility between PETG and PBAT. Meanwhile, the shape memory properties decrease at a slower rate, the shape fixity rate decreases from 95% to 91%, and the shape recovery rate drops from 92.8% to 81.8%. This study clarifies the effect of PC/PBAT content on the multiple properties of PETG-based composite fibers, providing data support and theoretical reference for the development of high-performance PETG composite fibers.

Keywords : melt-spinning ; poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) ; polycarbonate ; mechanical property ; shape-memory performance

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2024030, 2021006), 西安市科技计划项目(2023GXFW0021), 泉州市科技计划项目(2021G04), 陕西省技术创新引导专项(2024ZC-YYDP-17), 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-021)

通信作者: 思芳, 工程师, 主要从事功能纤维的制备及应用研究

收稿日期: 2025-08-09

引用格式: 邓晴晴, 思芳, 姜凤阳, 等. 熔融纺丝法制备 PETG/PC/PBAT 复合纤维[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 34-40.

DENG Qingqing, SI Fang, JIANG Fengyang, et al. Preparation of PETG/PC/PBAT composite fibers based on melt spinning method[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 34-40.

聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯(PETG)作为一种非晶型共聚酯具有良好的透明性和塑韧性^[1-2]。PETG分子链柔性较高,熔体纺丝时易因拉伸而断裂,制备的纤维长期受力易磨损、变形,难以满足纺织纤维对强度的要求,因此目前PETG在纤维领域的应用及研究较少^[3-4]。但其具有较好的形状记忆性能,因此受到研究者的广泛关注,并期望通过提升强度来实现其在纤维领域的应用前景。研究者在PETG中加入丙烯腈-丁二烯-苯乙烯树脂^[5-8]、聚苯乙烯^[9-10]、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)^[11-14]、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)^[15]等作为增强相对PETG改性。研究发现PET作为增强相用量过多,会显著影响形状记忆性能;PBT与PETG的无法在任意比例下互溶;酪蛋白胶^[16]可以提升行抓记忆性能但是拉伸强度最高只能达到36.2 MPa。因此为了提高PETG的综合性能需要进行进一步研究。

聚碳酸酯(PC)具有优良的拉伸强度^[17]。双酚A型PC可以和聚酯发生酯交换反应,且PC与PETG溶解度参数和分子链刚性指数相近,因此二者可以在任意比例下相容^[18-19]。PC虽然强度高,但是流动性差、玻璃化转变温度(T_g)过高,因此PETG与PC共混后,拉伸强度升高但断裂伸长率和形状记忆性能显著下降^[20]。聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)具有高延展性、热稳定性及生物可降解性,且PBAT与PC相容性良好,可抑制PBAT结晶,二者共混后PC/PBAT的 T_g 明显降低、流动性增强,当PC/PBAT质量比为7:3时拉伸弹性模量最高,达到2 303 MPa^[21]。因此笔者以PETG作为基体,引入PC/PBAT质量比为7:3的复合物为增强相以减少纯PC加入时产生的缺陷,研究不同PC/PBAT含量对其力学性能以及形状记忆性能^[22]等的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PETG: S2008,成型收缩率0.3%~0.6%,密度1.27 g/cm³,韩国SK集团;

PC: PC-110,熔体流动速率(MFR)为10.5 g/(10 min)(300 °C,1.2 kg),密度1.2 g/cm³,中国台湾奇美实业股份有限公司;

PBAT: TH801T, MFR为4 g/(10 min)(190 °C, 2.16 kg),密度1.23 g/cm³,新疆蓝山屯河降解材料有限公司。

1.2 仪器及设备

万能试验机:UTM5504,深圳三思试验设备有限公司;

电热恒温干燥箱:101-1A,北京科伟兴仪器有限公司;

单螺杆挤出机:SY-6212-A-30/28,南京诚盟化工公司;

差热扫描量热(DSC)仪:Q2000,美国TA仪器沃特斯公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet is 50, Thermo Fisher Scientific公司;

热重(TG)分析仪:STA7300,美国TA仪器沃特斯公司;

高速旋转流变仪:MCR 302,奥地利Anton Paar Gmbh;

场发射扫描电子显微镜:Quanta-450-FEG,美国MEI公司。

1.3 试样制备

原料在80 °C的鼓风干燥箱,加热6 h进行干燥,将质量比为7:3的PC与PBAT在单螺杆挤出机共混造粒得到PC/PBAT共混物。

通过熔融共混,按照表1的配方制备PC/PBAT/PETG复合材料。按照所需比例将混合后的材料加入单螺杆挤出机,挤出机加热温度为150,200,260,220 °C,螺杆转速440 r/min,螺杆直径65 mm,长径比为36:1。复合物在挤出机中融化后送入纺丝部位由喷丝板挤出,后由卷绕装置高速拉伸为纤维,其中喷丝板采用同心圆排列的24孔等间距分布,喷丝板外圆直径为50 mm,卷绕速度为2 000 m/min。

表1 PC/PBAT/PETG复合材料的配方

Tab. 1 Formulations of PC/PBAT/PETG composite

Samples	% %	
	PC/PBAT	PETG
1 [#]	0	100
2 [#]	10	90
3 [#]	20	80
4 [#]	30	70
5 [#]	40	60
6 [#]	100	0

1.4 测试与表征

FTIR测试:分辨率4 cm⁻¹,扫描次数32次,波长范围500~4 000 cm⁻¹。

DSC测试:取样品颗粒5 mg左右放入坩埚中,在N₂气氛下以10 °C/min的升温速率由25 °C升至

250 °C。

TG测试:称取5 mg左右干燥后样品,在 N_2 气氛下,将样品以20 °C/min的升温速率由室温升高到600 °C。

形状记忆性能:取长度为50 mm的纤维样品拉伸至80 mm固定,分别在45, 50, 55 °C恒温水中保持15 s后测量长度测定形状固定率;拉伸固定后的纤维直接放入55, 60, 65 °C恒温水中保持15 s,测量长度测定形状回复率。

力学性能测试:按照GB/T 14337-2022进行测试,试样总长为30 mm,直径(0.23 ± 0.005) mm,传感器量程为200 N,测试速率为10 mm/min;每组纤维测试五组数据,并计算平均值。

流变性能测试:选择稳态剪切模式,平行板型号选择PP25,间隙设置1 mm,测试温度260 °C,剪切速率0.01~1 000/s,样品为直径25 mm、厚度1 mm的圆片。

SEM测试:纤维表面喷金后观察并分析表面的形貌和微观结构。

2 结果与讨论

2.1 流变性能

图1为PETG/PC/PBAT复合材料的黏度变化。由图1的流变曲线可知,PETG及PETG/PC/PBAT共混物的黏度随剪切速率增加而显著下降,具有假塑性流体的特征。剪切变稀特性有利于注塑、挤出等加工过程^[23]。在较低的剪切速率下,被剪切破坏的PETG/PC/PBAT共混物的缠结能可以及时重建,因此黏度上、下波动变化较小。当剪切速率提升时,重建的缠结速率小于破坏的速率,黏度开始下降。随着PC/PBAT含量的增加,PETG及PETG/PC/PBAT共混物黏度逐渐升高,这是因为PETG分子链排列规整,苯环密度较低,分子运动阻力较小,因此

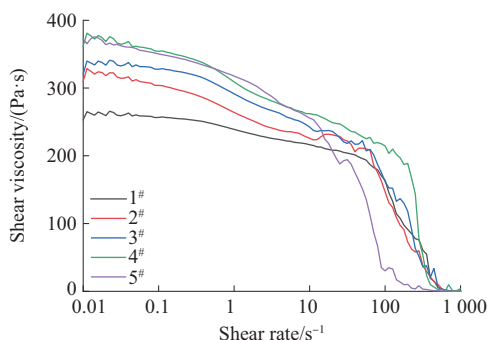


图1 PETG/PC/PBAT复合材料的黏度变化

Fig. 1 Viscosity changes of PETG/PC/PBAT composites

PETG的黏度相对于共混物最低。随着PC/PBAT的含量升高,PETG和PC/PBAT发生酯交换反应,提升了二者之间的相容性,使分子运动能力降低,因此黏度显著提升,流动性降低^[24]。当PC/PBAT质量分数为40%时,初始黏度相对于PC/PBAT质量分数30%提升幅度较小,而剪切速率为10/s时黏度下降速率增大,这是因为当PC/PBAT含量过高时会导致剪切敏感度提升。

2.2 FTIR分析

图2为PC/PBAT, PETG, PETG/PC/PBAT的FTIR谱图。由图2可知,PC/PBAT材料的特征吸收峰有1 270~1 240 cm^{-1} 范围内的C—O双峰和1 770 cm^{-1} 处的碳酸酯基团(—O—CO—O—);PETG的特征吸收峰有726 cm^{-1} 处的对位苯环取代基团及1 710 cm^{-1} 处尖锐的酯羰基(C=O)伸缩振动峰,共混样品中均能发现二者吸收峰的出现,说明PETG/PC/PBAT共混物已经制备成功。PC/PBAT和PETG在2 970~2 930 cm^{-1} 位置的C—H基团吸收峰呈现单峰,而PETG/PC/PBAT复合物则呈现双峰现象,说明PC/PBAT与PETG发生了分子链的滑移扩散和酯交换反应。

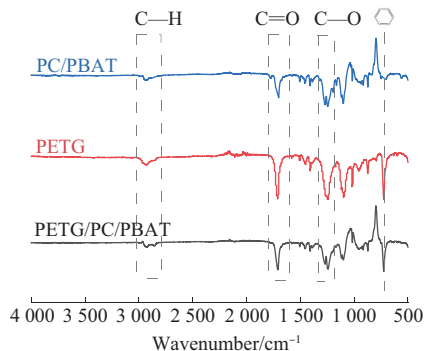


图2 PC/PBAT, PETG, PETG/PC/PBAT的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of PC/PBAT, PETG and PETG/PC/PBAT

2.3 DSC测试曲线分析

图3为PETG/PC/PBAT复合材料的DSC曲线。由图可知,随着PC/PBAT含量增加,软段玻璃化转变对应的低温吸热峰(54.1~56.4 °C)强度增强,这源于PC/PBAT分子通过空间位阻效应限制软段运动,其弱相互作用与相分离结构在维持PETG主链稳定的同时,可物理调控软段链段运动自由度。共混样品的硬段玻璃化转变温度 T_g (199.5~200.5 °C)并未因PC/PBAT的添加量升高而出现明显变化,说明两组分硬段区域没有形成强相互作用。DSC曲线可以看出,PETG/PC/PBAT共混样品软段与硬段的 T_g 均

介于两组分之间,这说明共混体系完全相容。

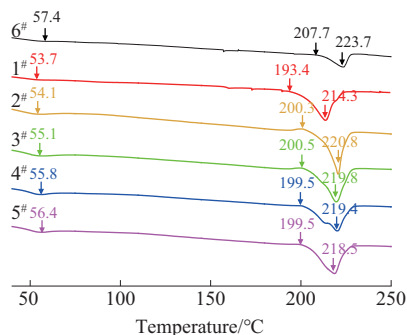


图3 PETG/PC/PBAT复合材料的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of PETG/PC/PBAT composites

2.4 TG测试与分析

一般将5%失重时的温度定义为初始分解温度^[25]。图4为PETG/PC/PBAT复合材料的TG曲线。如图4曲线显示,随着PC/PBAT含量的增加,共混物初始分解温度从PETG的319℃逐步升高至338℃,这是由于PC/PBAT含量的提升增强了硬段区域的分子堆积密度,抑制了热分解初期的链段解缠结,从而提升了主链断裂的起始温度^[26]。初始分解温度远高于 T_g ,这说明样品在 T_g 范围内的热稳定性很好,材料的正常使用完全不受影响。硬段 T_g 受PC/PBAT影响较小,但在高温热分解时,PC/PBAT的脂肪族碳酸酯基团热降解速率快于PETG的芳香酯基,最终削弱了共混体系的高温稳定性。

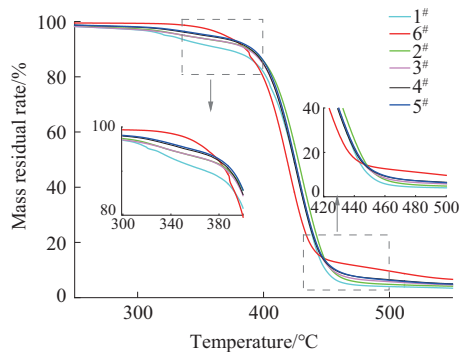


图4 PETG/PC/PBAT复合材料的TG曲线

Fig. 4 TG curves of PETG/PC/PBAT composites

2.5 力学性能

图5为PETG/PC/PBAT复合材料的拉伸机理图。由图5可以看出,PC/PBAT共混物分散于PETG基体中,PC加入可以增加分子链间的交联点,使材料在拉伸过程中能承受更大的外力,从而提高了共混物的屈服强度。PBAT作为增韧剂分散于基体中,通过剪切屈服吸收能量提升共混物的延展性。

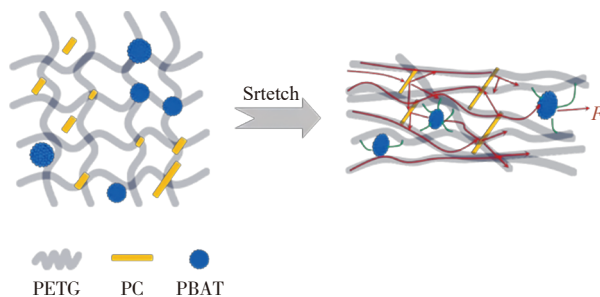


图5 PETG/PC/PBAT拉伸机理图

Fig. 5 Diagram of tensile mechanism of PETG/PC/PBAT

图6为不同PC/PBAT含量时复合材料的应力-应变曲线,可以看出当PC/PBAT质量分数为30%时增强效果最好。表2为不同PC/PBAT含量时PETG/PC/PBAT复合材料的力学性能。由表2可以看出,当PC/PBAT比质量分数为30%时PETG/PC/PBAT复合材料拉伸强度由37.84 MPa提升至52.61 MPa,相比纯PETG的拉伸强度提升了39%;当PC/PBAT质量分数为20%时,断裂伸长率高达332%,相比纯PETG的断裂伸长率提高39.5%。随着PC/PBAT质量分数增加至40%时,PC含量过高形成连续相,引发脆性断裂导致断裂伸长率下降,而柔性PBAT含量过高时降低体系的模量和强度。

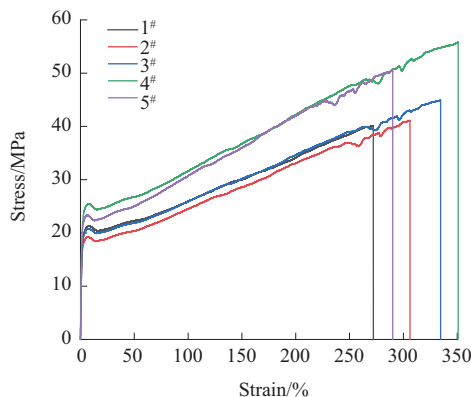


图6 PETG/PC/PBAT复合材料的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of PETG/PC/PBAT composites

表2 PETG/PC/PBAT复合材料的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of PETG/PC/PBAT composites

Samples	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%
1#	37.84	238
2#	39.62	273
3#	45.66	332
4#	52.61	294
5#	49.92	266

2.6 微观形貌分析

图7呈现不同PC/PBAT含量下纤维的表面微观形貌。由图7a(PC/PBAT质量分数为20%)可见,纤

维直径($D=228\ \mu\text{m}$)均匀一致,这表明熔融纺丝过程中,熔体流动状态与纺丝拉伸过程较为稳定,为纤维成型提供了良好条件。观察图7b-图7f,当PC/PBAT质量分数为20%时,纤维表面仍较为光滑,随着PC/PBAT质量分数继续增加,纤维表面“粗糙感”呈递增趋势,这是由于PETG与PBAT相容性有限,难以实现良好混熔。PBAT作为半结晶共聚物,与非晶态PETG共混时,随PC/PBAT质量分数增加,PETG会干扰PBAT分子链规整排列,致使PBAT结晶不完善,此类不完善晶体聚集后,在微观形貌上表现为凸起、颗粒状等缺陷^[27]。当PC/PBAT质量分数达到40%时,纤维表面存在较多结构缺陷。在受力过程中,这些缺陷易成为应力集中点,使纤维难以有效承受应力,最终导致力学性能下降,此现象与PC/PBAT质量分数为40%时复合材料的拉伸强度、断裂伸长率降低的力学测试结果相契合。

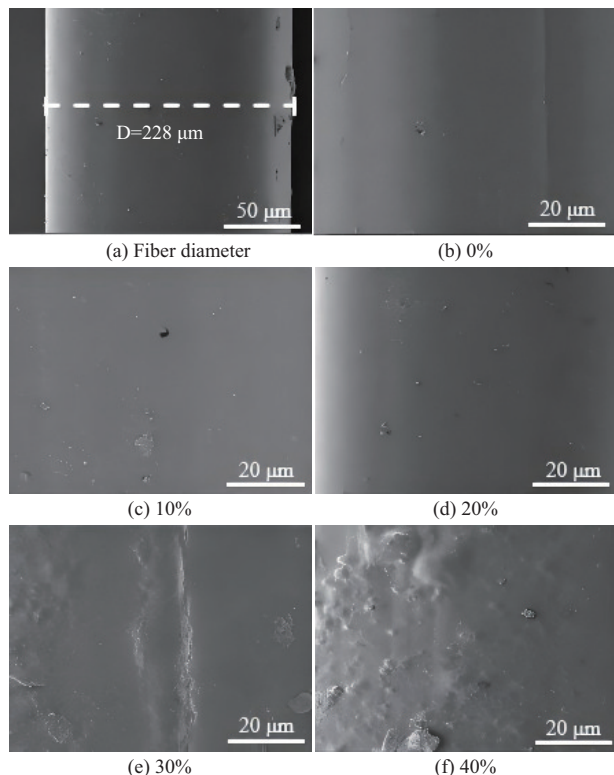


图7 不同PC/PBAT质量分数时复合纤维的微观形貌图

Fig. 7 Micrographs of composite fiber with different PC/PBAT mass fraction

2.7 形状记忆性能测试与分析

样品纤维分别在45, 50, 55 °C温水中浸泡10 s后,对纤维进行拉伸,设定纤维起始长度 ε_0 为50 cm,将纤维在温水中拉伸至载荷应变 ε_1 为80 cm后,

卸力,并将纤维拿出水面,测量载荷消失后的固应变 ε_f ,将水温升至55, 60, 65 °C,再次将纤维放入水中,测量纤维回缩长度 ε_r 。图8为PC/PBAT质量分数20%时共混物拉伸加热后固定以及继续加热后回复状态。

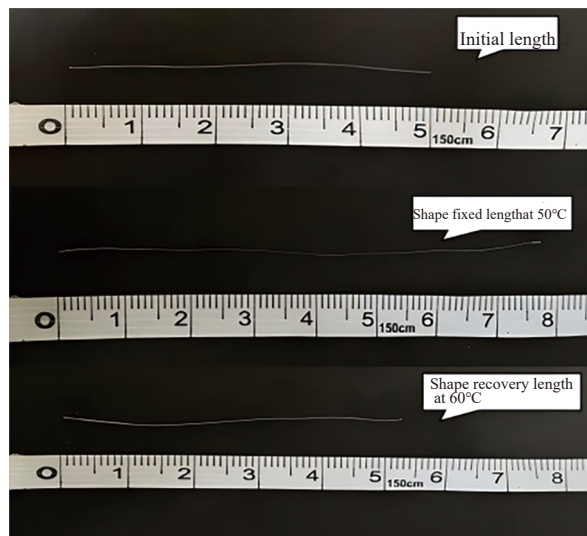


图8 PETG/PC/PBAT纤维拉伸固定及回复过程

Fig. 8 Stretching fixation and recovery process of PETG/PC/PBAT fibers

材料的形状固定率 R_f 以及形状恢复率 R_r 使用公式(1)和公式(2)计算。

$$R_f = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (1)$$

$$R_r = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_r}{\varepsilon_f - \varepsilon_0} \quad (2)$$

式中: ε_1 表示载荷应变; ε_f 表示载荷消除后的固应变; ε_r 表示温度升高样品收缩后的最终应变; ε_0 表示样品初始应变^[28]。

图9为不同温度下PC/PBAT含量对PETG形状记忆性能的影响。由图9a、图9b可以看出,随着PC/PBAT含量的增加,形状固定及回复的最佳温度也逐渐提升,并且三种温度下共混物的形状记忆性能都呈现下降趋势,这是因为PC/PBAT提升共混物拉伸强度的同时,PC/PBAT中的刚性颗粒限制分子链活动,需要更高的能量驱动形状变化,而形状记忆能力势必降低。其中形状固定率由95%降至91%,形状回复率由92.8%降至81.8%。但是形状固定率一直处于90%以上,形状回复率处于80%以上,形状记忆性能处于较高水平。

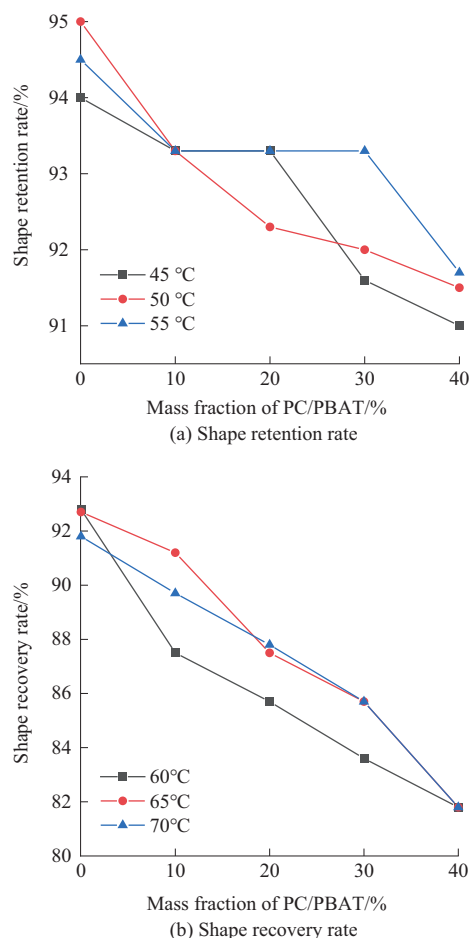


图9 不同温度下PC/PBAT含量对PETG复合材料形状记忆性能影响

Fig. 9 Effect of PC/PBAT content on shape memory properties of PETG composite under varying temperatures

3 结论

(1)通过单螺杆挤出机制备了不同质量分数PC/PBAT的PETG/PC/PBAT复合材料,材料的初始黏度随着PC/PBAT质量分数的增加逐渐升高,黏度随剪切速率升高而下降,表现出假塑性流体的特征。

(2)TG曲线表明,样品只有一个分解温度,说明二者为相容体系;由微观形貌看出,PC/PBAT质量分数为40%时表面粗糙度逐渐增加,说明PBAT与PETG相容性有限。

(3)PC/PBAT的加入能够有效提升PETG/PC/PBAT复合材料的力学性能,PC/PBAT质量分数为30%时,拉伸强度达52.61 MPa(较纯PETG提升39%);PC/PBAT质量分数为20%时,断裂伸长率突破332%。当PC/PBAT质量分数增加至40%时,由微观形貌看出表面缺陷显著增多,导致拉伸强度以及断裂伸长率下降。

(4)在形状记忆性能方面,随着PC/PBAT含量的

增加,形状固定率与形状回复率均呈下降趋势,其中形状固定率由95%降至91%,形状回复率由92.8%降至81.8%。从DSC曲线可知,共混体系的 T_g 由54.1 °C升高至56.4 °C,这一结果能够对共混物最佳形状记忆温度随PC/PBAT含量升高而升高的现象作出合理解释,即PC/PBAT含量的变化通过影响体系 T_g ,进而关联到共混物形状记忆温度的改变。

参考文献

- [1] 林妍妍,黄文广,刘毓敏,等.改性共聚酯PETG耐热性能的研究[J]. 聚酯工业,2022,35(3):27-29.
LIN Yanyan, HUANG Wenguang, LIU Yumin, et al. Study on heat resistance of modified copolyester PETG[J]. Polyester Industry, 2022, 35(3):27-29.
- [2] 胡利如,景旋,孙玉洁,等.二甘醇改性PETG共聚酯流变性能研究[J]. 合成技术及应用,2023,38(3):40-44.
HU Liru, JING Xuan, SUN Yujie, et al. Study on rheological properties of PETG copolyester modified by diethylene glycol[J]. Synthetic Technology & Application, 2023, 38(3):40-44.
- [3] 李恒,毛学锋,钟金龙,等.聚萘二甲酸乙二醇酯的合成现状及应用进展[J]. 工程塑料应用,2023,51(7):165-170.
LI Heng, MAO Xuefeng, ZHONG Jinlong, et al. Synthesis status and application progress of polyethylene naphthalate[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7):165-170.
- [5] 娄小安. PETG/PC合金材料制备及增韧改性[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(1):40-43.
LOU Xiaolan. Preparation of PETG/PC alloy and its toughening modification[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):40-43.
- [6] 张文师,陈延明,王立岩,等. PETG共混及复合材料的研究进展[J]. 聚酯工业,2022,35(2):23-27.
ZHANG Wenshuai, CHEN Yanming, WANG Liyan, et al. Research progress of PETG blends and composite materials[J]. Polyester Industry, 2022, 35(2):23-27.
- [7] MOLARI J A, BRUNELLI D D. ABS/recycled PCTG blend compatibilized with ionomer: Effect on impact resistance and morphology[J]. Polímeros, 2021, 31(3). DOI: 10.1590/0104-1428.20210070.
- [8] MIRASADI K, RAHMATABADI D, GHASEMI I, et al. Investigating the effect of ABS on the mechanical properties, morphology, printability, and 4D printing of PETG-ABS blends[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2024, 309(6). DOI: 10.1002/mame.202400038.
- [9] 刘本刚,汪文昭,杜中杰,等.不同PETG对PS/PETG共混物相态结构的影响[J]. 中国塑料,2013,27(11):59-65.
LIU Bengang, WANG Wenzhao, DU Zhongjie, et al. Effect of different PETG on morphology structure of PS/PETG blends[J]. China Plastics, 2013, 27(11):59-65.
- [10] TAKAYAMA T. Inorganic particles contribute to the compatibility

- of polycarbonate/polystyrene polymer blends[J]. *Materials*, 2023, 16(4). DOI:10.3390/ma16041536.
- [11] 张文帅. PBT/PETG合金及其纳米复合材料的制备与性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
- ZHANG Wenshui. Preparation and properties of PBT/PETG alloy and its nanocomposites[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [12] ZHANG W S, CHEN Y M, WANG L Y. Study on non-isothermal crystallization kinetics of Poly (butylene terephthalate)/Poly (ethylene terephthalate)-1, 4-cyclohexylenedimethylene terephthalate blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(8): 3 629–3 642.
- [13] 王重阳, 王艳, 曹帅, 等. 面向3D打印应用的PP/PET共混线材制备和性能[J/OL]. *材料工程*, 2024: 1–7. (2024-03-19). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLGC20240315003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- WANG ChongYang, WANG Yan, CAO Shuai, et al. Preparation and properties of PP/PET blended wire for 3D printing application[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1–7. (2024-03-19). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLGC20240315003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] 赵高升. PETG共混改性聚合物的制备及其性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- ZHAO Gaosheng. Preparation and properties of PETG blended modified polymer[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018.
- [15] 曾雍, 黄振, 林文龙, 等. PET纤维/棕榈油基聚氨酯复合防水卷材的制备与性能[J]. *生物质化学工程*, 2025, 59(3):1–7.
- ZENG Yong, HUANG Zhen, LIN Wenlong, et al. Preparation and properties of recycled PET fibers/palm oil-based polyurethane composite waterproofing membranes[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2025, 59(3):1–7.
- [16] 许昆鹏. PETG-酪蛋白胶3D打印形状记忆塑料的制备研究[J]. *塑料科技*, 2019, 47(10):74–77.
- XU Kunpeng. Study on preparation of 3D printing PETG-casein glue shape memory plastics[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(10):74–77.
- [17] 韩娜, 陈永昌, 沙乾坤, 等. PET复合纤维的制备及其隔热性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(5):8–15, 23.
- HAN Na, CHEN Yongchang, SHA Qiankun, et al. Preparation and thermal insulation performance of PET composite fibers[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(5):8–15, 23.
- [18] 季行行, 史新妍. 电致型形状记忆聚合物的研究进展[J]. *合成橡胶工业*, 2019, 42(3):242–247.
- JI Xingxing, SHI Xinyan. Research progress on electro-active shape memory polymers[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2019, 42(3):242–247.
- [19] 张雨, 丁雪佳, 郭甜甜, 等. PETG/PC共混物的制备及结构性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(8):24–26.
- ZHANG Yu, DING Xuejia, GUO Tiantian, et al. Study on preparation and the structural properties of petg/pc[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(8):24–26.
- [20] 汪伟. 可降解PBAT发泡改性复合材料的研究进展[J]. *塑料包装*, 2025, 35(1):35–38.
- WANG Wei. Research progress of degradable PBAT foam modified composites[J]. *Plastic Packaging*, 2025, 35(1):35–38.
- [21] 韦归鸿, 武贵林, 曾帅, 等. 3D打印可定制热塑性聚氨酯/聚己内酯共混物食管支架的生物力学性能[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1):504–513.
- WEI Guihong, WU Guilin, ZENG Shuai, et al. Biomechanical properties of a customizable thermoplastic polyurethane/polycaprolactone blended esophageal stent fabricated by 3D printing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(1):504–513.
- [22] 张宪超, 刘少岗, 王鹏飞, 等. 4D打印PLA和CF/PLA蜂窝结构参数对形状记忆性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(3): 112–117, 126.
- ZHANG Xianchao, LIU Shaogang, WANG Pengfei, et al. Effects of 4D printing PLA and CF/PLA honeycomb structure parameters on shape memory performance[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3):112–117, 126.
- [23] 曹亚南, 张玉芳. 增容剂对聚对苯二甲酸丁二酯/聚丙烯共混体系相形态、热稳定性与流变性能影响研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(6):147–151, 155.
- CAO Yanan, ZHANG Yufang. Study on effect of compatibilizer on phase morphology, thermal stability and rheological properties of polybutylene terephthalate/polypropylene blend system[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(6):147–151, 155.
- [24] 李宇飞. 加工温度对PBAT/TPS共混体系性能的影[J]. *化工管理*, 2025(2):140–143.
- LI Yufei. Effect of processing temperature on properties of PBAT/TPS blend system[J]. *Chemical Industry Management*, 2025(2): 140–143.
- [25] PREM K C, SIVANAGARAJU N, LOKNATH D, et al. Shape memory polymers, blends, and composites: processing, properties, and applications[J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2025, 64(9):1 253–1 281.
- [26] 何圳. PETG基4D打印形状记忆共混物的制备与性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- HE Zhen. Preparation and properties of PETG-based 4D printed shape memory blends[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2023.
- [27] ALI S J A, RAHMATABADI D, BAGHANI M, et al. Design, processing, 3D/4D printing, and characterization of the novel PETG-PBAT blends[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(59):9 150–9 164.
- [28] 张涛, 梁玉蓉, 王龙, 等. TPI/NR复合材料的制备及形状记忆性能[J]. *弹性体*, 2023, 33(5):8–13.
- ZHANG Tao, LIANG Yurong, WANG Long, et al. Preparation and shape memory properties of TPI/NR composites[J]. *Elastomers*, 2023, 33(5):8–13.