

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.002

聚醚砜/碳纳米管对环氧树脂的协同增韧

黄壮¹, 阳泽豪¹, 施燕华¹, 蔡超迁², 刘勇¹, 张辉¹

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620; 2. 东华大学纺织科技创新中心, 上海 201620)

摘要: 通过同时添加少量聚醚砜(PESU)及碳纳米管(CNTs)对环氧树脂(EP)进行增强增韧改性。首先采用热溶法使PESU完全溶解在EP中,再利用三辊研磨机的机械剪切作用帮助CNTs分散在EP/PESU体系中,制得EP/PESU/CNTs复合材料浇铸体试样。结果表明,CNTs和PESU的加入,在没有牺牲EP热性能的情况下,试样的断裂韧性、缺口冲击强度、弯曲强度、储能模量得到提高;同时其拉伸强度未受到不利影响。当PESU含量为10份,CNTs含量为0.15份时,试样的断裂韧性和缺口冲击强度达到最大值,分别为 $5.29 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 212 J/m ,相比纯EP提升49.4%和81.2%;CNTs含量为0.1份时,试样弯曲强度达到最大值216 MPa,相比纯EP提升24.1%。通过扫描电子显微镜分析发现,PESU相分离形成的热塑性微球和CNTs在微米和纳米两个尺度上对EP起到了协同增韧的作用。

关键词: 聚醚砜; 碳纳米管; 环氧树脂; 协同增韧

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0007-07

Synergistic Toughening of Epoxy Resin with Polyethersulfone / Carbon Nanotubes

Huang Zhuang¹, Yang Zehao¹, Shi Yanhua¹, Cai Chaoqian², Liu Yong¹, Zhang Hui¹

(1. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Epoxy resin (EP) was reinforced and toughened by adding a small amount of polyethersulfone (PESU) and carbon nanotubes (CNTs) at the same time. First, the hot dissolution method was used to completely dissolve PESU in EP, and then the mechanical shearing action of a three-roll mill was used to help disperse CNTs in the PESU/EP system to prepare PESU/CNTs/EP composite casting samples. The results show that the addition of CNTs and PESU can improve the fracture toughness, notched impact strength, bending strength, and storage modulus of the casting without sacrificing the thermal performance of EP; at the same time, its tensile strength is not adversely affected. When the PESU content is 10 phr and the CNTs content is 0.15 phr, the fracture toughness and notched impact strength of the casting reach the maximum value of $5.29 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ and 212 J/m , which is an increase of 49.4% and 81.2% compared to pure EP; when the CNTs content is 0.10 phr, the bending strength of the casting reaches the maximum value of 216 MPa, which is 24.1% higher than that of pure EP. SEM analysis show that the thermoplastic microspheres formed by phase separation of PESU and CNTs play a synergistically toughening effect on EP at both micron and nanometer scales.

Keywords: polyethersulfone; carbon nanotubes; epoxy resin; synergistic toughening

环氧树脂(EP)属于热固性树脂的一种,具有固化收缩率小、粘结性能好、电绝缘性好、化学稳定性高等优点,被广泛应用在化工涂料、胶粘封装、航空航天以及高性能复合材料等产业。但是其固化后交联密度高、脆性大、耐冲击性能差的问题却大大限制了其应用,因此针对EP的增韧改性工作一直是行

业内的热点课题^[1]。

聚醚砜(PESU)是一种高性能的热塑性树脂,分子结构中主要有砜基、醚基和次苯基,其中砜基赋予了其较好的耐热性,醚键赋予了其较好的韧性,而且其模量与EP相近^[2]。PESU可以在不降低EP本身耐热性以及刚度的情况下有效提高其断裂韧性。

基金项目: 上海市科委“科技创新行动计划”项目子课题(19511106703),国家自然科学基金青年基金项目(51803024)

通信作者: 张辉,副研究员,主要从事高性能纤维及复合材料、结构功能复合材料研究 Email: zhanghui@dhu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-28

引用格式: 黄壮,阳泽豪,施燕华,等. 聚醚砜/碳纳米管对环氧树脂的协同增韧[J]. 工程塑料应用,2021,49(3): 7-13.

Huang Zhuang, Yang Zehao, Shi Yanhua, et al. Synergistic toughening of epoxy resin with polyethersulfone / carbon nanotubes[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 7-13.

然而,采用 PESU 对 EP 进行增韧改性时,材料韧性的明显提高需要添加较高含量的 PESU, PESU 添加量过高会导致 EP 的黏度大幅度上升,降低了 EP 的工艺性能^[3]。碳纳米管(CNTs)具有高的长径比、超高强度以及超高模量,近年来已被广泛应用于 EP 的改性研究, CNTs 的拔出以及断裂、桥接、裂纹固定和裂纹挠曲等是 EP 增韧的主要机制^[4-6]。由于单一组分的增韧剂对 EP 的增韧效果有限,在 EP 中引入两种增韧剂以获得协同的增韧效果逐渐受到研究者的关注。徐辛^[7]通过简单的机械搅拌在 EP 中同时添加少量的 PESU 和纳米二氧化硅粒子对 EP 进行改性,结果表明,在 EP 的模量和热性能没有牺牲的情况下, PESU 和纳米二氧化硅粒子的同时加入能够显著提高 EP 的强度和韧性; Jia Liying 等^[8]通过化学合成制备了环氧接枝聚氨酯和氨基碳纳米管(CNTs-NH₂),然后对 EP 进行增韧改性,在室温以及低温条件下, EP 的拉伸、弯曲、冲击和断裂韧性均得到提高; Chen Zhengguo 等^[9]利用溶剂法首先将少量聚醚酰亚胺(PEI)溶解在二氯甲烷中,而后将 CNTs-NH₂ 通过超声分散在 PEI 溶液中,最后加入 EP 制备复合材料,结果表明 PEI 和 CNTs-NH₂ 对 EP 能够起到协同增韧的作用。上述研究表明,热塑性树脂和纳米粒子对 EP 有一定的协同增韧作用,然而简单的机械搅拌对于纳米粒子的分散作用十分有限,化学合成改性以及溶剂法则步骤繁琐并且污染环境,因此笔者选用热溶法以及借助三辊研磨机对改性粒子分散的方法来制备 EP 复合材料。

笔者选取少量的 PESU 通过热溶法改性增韧 EP,并通过添加不同含量的 CNTs 对 EP/PESU 进行进一步改性,采用三辊研磨机协助将 CNTs 分散在 EP/PESU 中,系统研究了 EP/PESU/CNTs 三元复合体系的微观相结构、力学性能以及动态热机械性能,结果显示 CNTs 和 PESU 可以起到协同增强增韧 EP 的作用。

1 实验部分

1.1 主要原料

EP: BAC170 (其主要成分为缩水甘油胺类芳香族 EP 和高温胺类固化剂,是一种单组分高性能复配树脂),浙江百合航太复合材料有限公司;

PESU: PESU E2020P, 重均分子量 55 000, 封端基团中含有至少 50% 的羟基,德国巴斯夫公司;

羟基化多壁 CNTs: 工业级,内径 5~10 nm,外径 10~30 nm,长度 10~30 μm,上海阿拉丁试剂

有限公司。

1.2 主要仪器与设备

三辊研磨机: SS-65 型,上海新斯机电科技有限公司;

真空烘箱: SZF-6050 型,上海精宏实验设备有限公司;

力学电子试验机: 208B-TS 型,深圳万测试验设备有限公司;

摆锤式冲击试验机: DAS 4000 型,意大利西斯特公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM): JSM-7500F 型,日本电子株式会社(JEOL);

动态热机械分析(DMA)仪: DMA-1 型,梅特勒-托利多公司。

1.3 试样制备

首先,将干燥后的 PESU 与 CNTs 加入到 EP 中,将混合物在 120℃ 油浴锅内快速搅拌溶解,待 PESU 在 EP 中溶解完全之后,将混合物经过三辊研磨机进行研磨分散并重复分散 3 次。将分散之后的混合物在 120℃ 的真空烘箱内脱泡 0.5 h,随后将其浇铸在预热好并且涂抹脱模剂的模具中,在 180℃ 固化温度下固化 4 h。固化完成后,随炉自然冷却并脱模得到浇铸体试样,浇铸体试样的制作工艺如图 1 所示。浇铸体试样中 PESU 的含量固定为 10 份, CNTs 的含量分别为 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 份,相应试样编号分别为 10-0, 10-0.05, 10-0.10, 10-0.15 和 10-0.20, 纯 EP 浇铸体试样编号为 0-0。

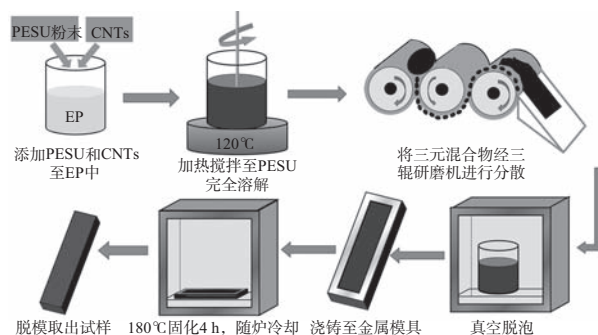


图1 浇铸体试样的制作工艺流程图

1.4 测试与表征

(1) 断裂面微观结构观察。

采用 SEM 观察试样断裂面的微观形貌。将试样在液氮中浸泡 5 min 后进行淬断,其中一部分试样置于 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)中刻蚀 12 h 以去除 PESU 组分,然后对所有试样断面进行喷金处理,观察试样刻蚀和未刻蚀的微观形貌结构。

(2) 力学性能测试。

采用力学电子试验机对试样的断裂韧性、弯曲、拉伸性能进行测试。试样的断裂韧性按照 ASTM D5045-2017 测试,加载速率为 1 mm/min,采用临界强度因子 (K_{IC}) 表征试样的断裂韧性;弯曲性能按照 ASTM D790-2017 测试,加载速率为 1 mm/min;拉伸性能按照 ASTM D638-2010 测试,加载速率为 2 mm/min。以上每种试样测试样条至少为 5 个,结果取其平均值。

采用摆锤式冲击仪,按 ASTM D256-2010 对试样的缺口冲击强度进行测试。测试模式为缺口背向冲击,摆锤冲击能量为 2.75 J,冲击速度为 3.5 m/s,每种试样测试至少 10 个样条,结果取其平均值。

(3) 动态热机械性能测试。

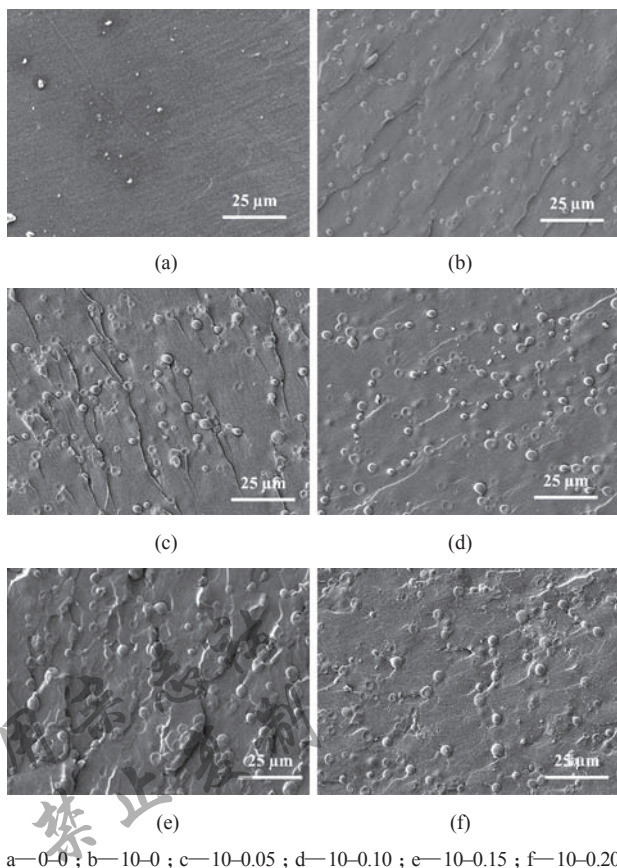
采用 DMA 仪对试样的动态热机械性能进行测试。测试模式为三点弯曲模式,试样尺寸为 40 mm×6 mm×2 mm,频率为 1 Hz,温度范围为 50~250℃,升温速率为 5℃/min。

2 结果与讨论

2.1 复合材料断裂面微观结构研究

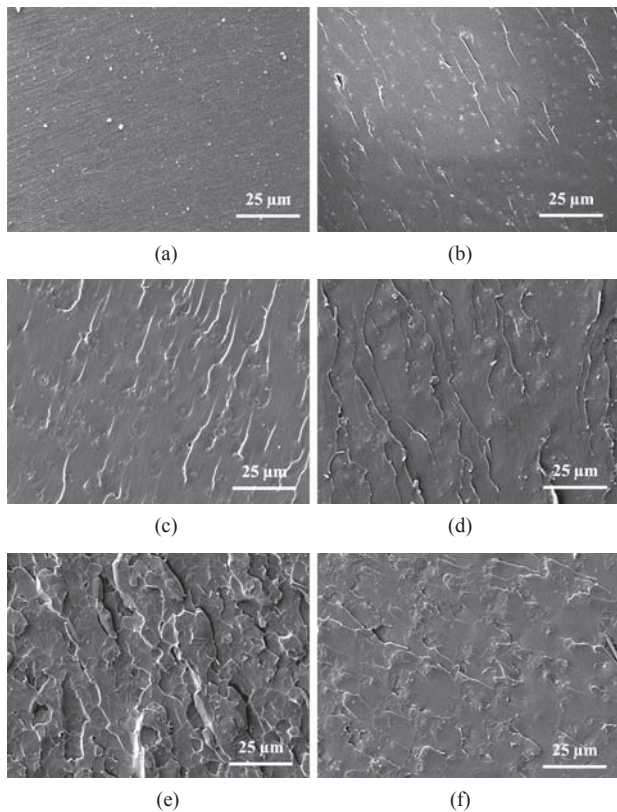
图 2 显示出纯 EP 及不同 CNTs 含量的 EP/PESU/CNTs 复合材料试样断裂面 SEM 照片。从图 2 可以发现,不同试样的断裂面粗糙程度有着明显的差别:其中,未增韧 EP 的断裂面十分光滑,未见到有明显的裂纹,其破坏模式为脆性断裂;而添加 10 份 PESU 以及在此基础上添加不同含量 CNTs 的浇铸体的断裂面随着 CNTs 含量的增加逐渐变得粗糙;尤其是当 CNTs 含量为 0.15 份时,浇铸体断裂面呈现阶梯状,表明裂纹扩展路径及断裂面积大大增加,破坏模式由脆性破坏转化成塑性断裂^[2,10]。图 2b~图 2f 显示, PESU 在 EP 固化过程中发生固化诱导相分离,以小球析出,尺寸在 2~3 μm,均匀分散在 EP 中形成了“海岛相”相结构。同时,可以很清楚地观察到,裂纹在 PESU 小球边缘出现偏转或者终止,或是 PESU 小球发生塑性变形由圆形变为椭圆形;另外,可进一步观察到 PESU 小球与基体发生脱粘行为,或者是引发更多的微裂纹^[7-11]。这些微米尺度的小球的存在会使裂纹在扩展过程中的难度加大,所需要的能量也会增加,进而提高基体树脂的整体韧性。

采用 DMF 溶剂将固化诱导相分离析出的 PESU 小球刻蚀,并通过 SEM 观察刻蚀后的浇铸体试样断裂面微观结构,其结果如图 3 所示。从图 3



a—0-0; b—10-0; c—10-0.05; d—10-0.10; e—10-0.15; f—10-0.20

图 2 不同试样断裂面 SEM 照片 (未刻蚀)



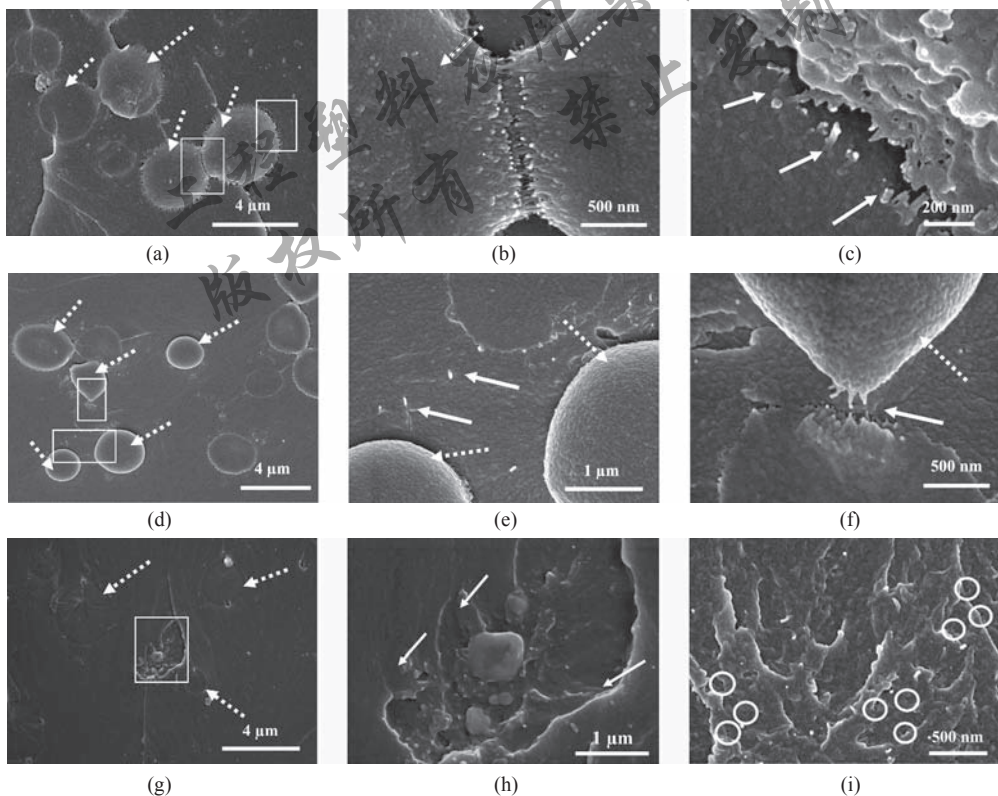
a—0-0; b—10-0; c—10-0.05; d—10-0.10; e—10-0.15; f—10-0.20

图 3 不同试样断裂面 SEM 照片 (DMF 刻蚀)

可以更清楚看到裂纹的走向与发展:随着 CNTs 含量的增加,裂纹的屈曲程度增加,表明裂纹扩展的路径增加。由于粗糙程度增加而出现的“鱼鳞”状叠层结构在 CNTs 含量为 0.15 份时极为明显,整个断裂面呈现出交错纵横的沟壑状,表明 CNTs 的加入对裂纹的发展产生了显著的影响,使得裂纹扩展路径变得更复杂,在 EP 发生破坏时能够吸收的能量也就更多。

图 4 是不同 CNTs 含量的 EP/PESU/CNTs 复合材料试样断裂面高倍 SEM 照片。从图 4a 可以看出,相分离析出的 PESU 微球(虚线箭头所指)对裂纹起到了阻挡和偏转的作用。图 4b 和图 4c 为图 4a 中两个实线方框处的高倍 SEM 照片,从图 4b 和图 4c 可以看出 PESU 微球与 EP 界面结合良好, PESU 微球在阻挡裂纹扩展的过程中与基体有脱粘的现象发生,而且脱落过程中有明显的拉拔、拔丝现象,表现出明显的塑性变形;同时 PESU 微球之间也

有着良好的界面,在阻挡裂纹过程中也有“拉丝”这种塑性形变。图 4e 和图 4f 为图 4d 中两个实线方框处的高倍 SEM 照片,从图 4e 可以看出一些 CNTs(实线箭头所指)随机分布在 EP 中,在图 4c 和图 4f 中可以看到,一些 CNTs 也有可能分散在 PESU 微球和 EP 界面从而起到提高两者界面强度的作用。图 4h 和图 4i 为图 4g 实线方框处的高倍 SEM 照片,从图 4h 可以看到, CNTs(实线箭头所指)的存在也阻止了裂纹的发展;图 4i 中显示一部分 CNTs 被包埋在 EP 中,亮色的尖端表明存在 CNTs 的断裂,圆圈内有 CNTs 拔出后留下的空洞,也证明了 CNTs 的拔出是存在的,整个 CNTs 的周边出现有层次的破坏断裂面^[12-13]。总之,纳米尺度的 CNTs 和微米尺度的 PESU 微球在 EP 树脂基体的破坏断裂过程中都起到了阻碍裂纹扩展和吸收能量的作用,两者在不同尺度上的协同作用对 EP 起到了增强增韧的效果。



a~c—10-0.05 放大倍数分别为 8 000, 50 000, 90 000; d~f—10-0.10 放大倍数分别为 6 000, 30 000, 50 000; g~i—10-0.15 放大倍数分别为 6 000, 30 000, 50 000

图 4 CNTs 含量分别为 0.05 份、0.10 份和 0.15 份的 EP/PESU/CNTs 三元复合材料断裂面微观结构细节高倍 SEM 照片

2.2 复合材料力学性能研究

图 5 为不同含量 CNTs 改性 EP/PESU 的 K_{IC} 和缺口冲击强度测试结果。从图 5 可以看出, 10 份 PESU 的引入显著提高了 EP 的断裂韧性和缺口冲

击强度; CNTs 的加入进一步提高了断裂韧性和缺口冲击强度, 并且随着 CNTs 含量的增加, 浇铸体试样的断裂韧性和缺口冲击强度均呈现先增大后减小的趋势。当 CNTs 含量为 0.15 份时, K_{IC} 和缺口

冲击强度达到最大值,分别为 $5.29 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 212 J/m ,相比纯 EP 增长了 49.4% 和 81.2%。从 EP 试样断裂后的 SEM 照片——图 2 和图 3 中可以发现,当 CNTs 含量为 0.15 份时,试样断裂面呈现为叠层的“鱼鳞状”结构,最为粗糙,裂纹的扩展路径也最为复杂、塑性断裂特征较为明显,在断裂过程中吸收能量的能力最强^[9]。CNTs 改性聚合物的力学性能取决于 CNTs 的分散和 CNTs 与聚合物之间的界面相互作用,良好的分散以及强的界面相互作用能显著提高聚合物的力学性能^[14]。在图 4 不同 CNTs 含量浇铸体试样断裂面微观结构细节的 SEM 照片中可以看到,纳米级别的 CNTs 在 EP 中分散良好并且羟基封端的 CNTs 与基体树脂有着良好的界面作用,能够有效地传递载荷;同时,微米级别 PESU 微球与 EP 界面结合良好,对裂纹的发展起到了阻挡和偏转的作用。但是,当 CNTs 含量增加至 0.20 份时,EP/PESU/CNTs 复合材料的断裂韧性以及缺口冲击强度均有明显的下降,表明过量的 CNTs 对浇铸体的韧性产生不利的影响。可能是因为三辊研磨机对高含量的 CNTs 的分散作用有限,造成 CNTs 在 EP 中产生大面积团聚,从而降低了对浇铸体的增韧效果^[15]。

图 6 为不同含量 CNTs 改性 EP/PESU 的弯

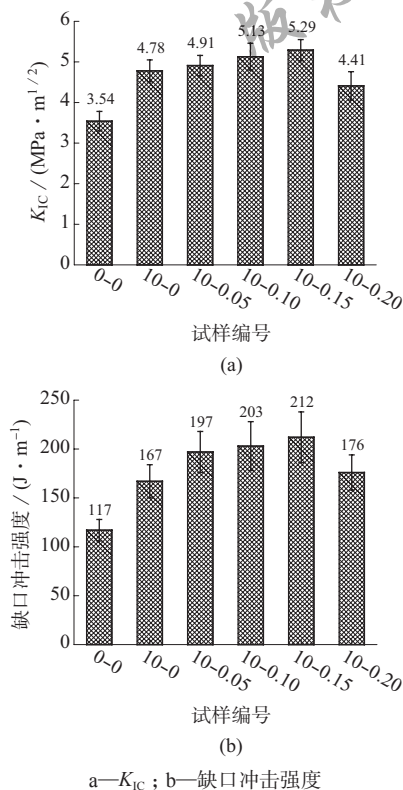
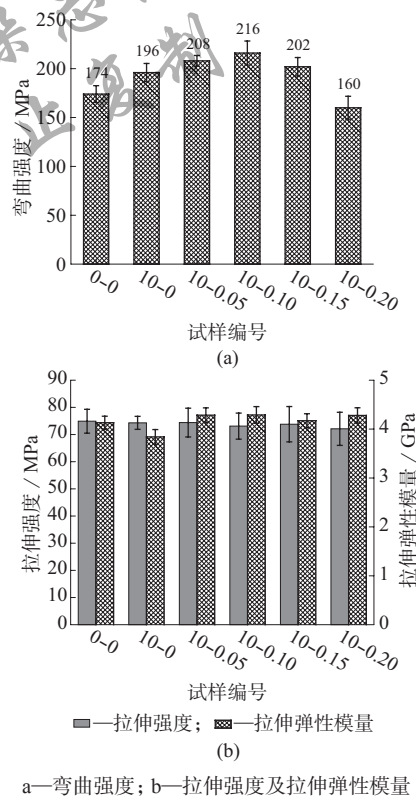


图 5 PESU/CNTs 增韧 EP 的断裂韧性及缺口冲击强度

曲强度、拉伸强度及拉伸弹性模量测试结果。如图 6a 所示,浇铸体的弯曲强度随着 CNTs 含量的增加呈现先增大后减小的趋势,并且当 CNTs 的含量为 0.10 份时,试样的弯曲强度达到最大值 216 MPa,相比纯 EP 提高了 24.1%,相比 10 份 PESU 增韧试样提高了 10.2%,表明 CNTs 的加入对 EP/PESU 起到了增强增韧的作用。从图 6b 可以看出,10 份 PESU 的加入导致浇铸体拉伸弹性模量下降了 7%,但是拉伸强度基本没有受到影响,可能是 PESU 的加入降低了 EP 的交联密度,并且 PESU 为热塑性树脂其本身模量与 EP 模量相当,可能低于固化后的 EP 模量,从而使其刚性下降^[16];而后随着 CNTs 含量的增加,浇铸体的拉伸弹性模量出现一定程度的上升,拉伸强度依然没有受到不利影响,没有发生明显的变化。CNTs 具有超高的模量, CNTs 的加入对 EP/PESU 起到了增强的作用^[15]。



a—弯曲强度; b—拉伸强度及拉伸弹性模量

图 6 PESU/CNTs 增韧 EP 的弯曲强度及拉伸性能

2.3 复合材料动态热机械性能

图 7 为 EP/PESU/CNTs 复合材料浇铸体的 DMA 测试结果。从图 7a 可以看到,一定量的 CNTs 和 10 份 PESU 的加入对浇铸体的储能模量有轻微的提升^[17]。但是,当 CNTs 含量为 0.20 份时,浇铸体的储能模量有明显的下降,可能是由于 CNTs 发生较大的团聚与基体树脂间产生了较差的界面^[14]。

储能模量在室温时的结果可以反应浇铸体的刚性。对于同种 EP 来说,其刚性的影响主要是由其本身固化体系内部交联网络的化学结构决定的。在整个交联网络结构中,刚性基团越多,表明固化体系的交联密度越大,其结果是刚性越大^[1]。图 7b 中,曲线的峰值温度代表浇铸体的玻璃化转变温度。如图 7b 所示,在 50~250℃ 范围内,只有单峰的出现,对应温度在 213℃ 左右,与未改性 EP 的玻璃化转变温度相近,表明 PESU/CNTs 的加入对基体树脂的耐热性能影响较小^[18]。

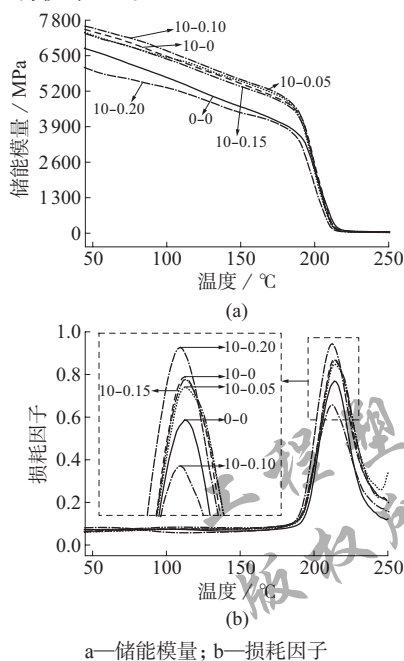


图 7 PESU/CNTs 增韧 EP 的储能模量及损耗因子随温度变化曲线

3 结论

(1) EP/PESU/CNTs 浇铸体试样的断裂面微观结构显示,随着 PESU 和 CNTs 的加入,浇铸体断裂面逐渐变得粗糙, PESU 在固化过程中发生相分离以微球的形式析出,在 CNTs 和 PESU 同时加入时,相结构为“海岛相”;高倍 SEM 照片显示, PESU 微球和 EP 基体界面结合良好,起到了对裂纹的偏转、终止及引发次级裂纹等作用;在裂纹边缘, PESU 微球显示破坏、脱粘、拉丝等塑性变形;而 CNTs 存在从基体中拔出、桥连以及本身断裂的情况。

(2) EP/PESU/CNTs 浇铸体试样的力学性能测试结果表明, PESU 和 CNTs 对试样的断裂韧性、缺口冲击强度和弯曲强度均有明显的提高效果,其拉伸强度没有受到不利影响; CNTs 在 10 份 PESU 改性 EP 的基础上能进一步提高其力学性能。CNTs 含量为 0.15 份时,试样的断裂韧性和缺口冲击强度

达到最大,分别为 $5.29 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 212 J/m ,相比纯 EP 提高了 49.4% 和 81.2%; CNTs 含量为 0.10 份时,浇铸体的弯曲强度达到最大,为 216 MPa,相比纯 EP 提升 24.1%。

(3) EP/PESU/CNTs 浇铸体试样的动态热机械性能测试结果显示,适量 CNTs 的加入提高了浇铸体的储能模量,同时 CNTs 的加入对基体树脂的玻璃化转变温度即耐热性能无不利的影响。

参考文献

- [1] 王智. 热固性树脂增韧方法及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社有限公司, 2018.
Wang Zhi. Thermosets: Toughening methods and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press Co. Ltd., 2018.
- [2] Jiang Minqiang, Liu Yong, Cheng Chao, et al. Enhanced mechanical and thermal properties of monocomponent high performance epoxy resin by blending with hydroxyl terminated polyethersulfone [J]. Polymer Testing, 2018, 69: 302–309.
- [3] Yang Jiaoping, Chen Zhenkun, Feng Qingping, et al. Cryogenic mechanical behaviors of carbon nanotube reinforced composites based on modified epoxy by poly(ethersulfone) [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(1): 22–26.
- [4] Yu Minfeng, Lourie O, Dyer M J, et al. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load [J]. Science, 2000, 287: 637–640.
- [5] 张竞, 王洪亮, 叶瑞, 等. 氧化石墨烯/碳纳米管协同改性环氧树脂的制备与性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(11): 156–160.
Zhang Jing, Wang Hongliang, Ye Rui, et al. Preparation and properties of epoxy resin composites reinforced by graphene oxide and multi walled carbon nanotubes [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(11): 156–160.
- [6] 赵珩, 李杰, 郭安儒. 纳米粒子改性环氧树脂的研究进展 [J]. 化学与粘合, 2020, 42(4): 288–293.
Zhao Heng, Li Jie, Guo Anru. Research progress in the nanoparticle toughening epoxy resin [J]. Chemistry and Adhesion, 2020, 42(4): 288–293.
- [7] 徐辛. 聚醚砜和二氧化硅纳米粒子协同增韧三官能团环氧树脂的研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45(6): 101–105.
Xu Xin. Synergistic toughening of trifunctional epoxy resin by poly(ether sulfone) and silica nanoparticles [J]. China Plastics Industry, 2017, 45(6): 101–105.
- [8] Jia Liying, Qi Pengfei, Shi Ke, et al. High performance epoxy-based composites for cryogenic use: A approach based on synergetic strengthening effects of epoxy grafted polyurethane and MWCNTs-NH₂ [J]. Composite Science and Technology, 2019, 184. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107865.
- [9] Chen Zhengguo, Luo Jie, Huang Zhuang, et al. Synergistic

- toughen epoxy resin by incorporation of polyetherimide and amino groups grafted MWCNTs[J]. Composites Communications, 2020, 21. DOI:10.1016/j.coco.2020.100377.
- [10] 贾文品, 周金利, 余木火, 等. 聚醚砜增韧环氧树脂的力学性能及固化体系相分离[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(3):5-10.
Jia Wenpin, Zhou Jinli, Yu Muhuo, et al. Mechanical properties and phase separation of epoxy resin toughened by polyether sulfone[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(3):5-10.
- [11] 余英丰. 热塑性树脂改性环氧体系的复杂相分离[D]. 上海: 复旦大学, 2004.
Yu Yingfeng. Complex phase separation in thermoplastics modified epoxy systems[D]. Shanghai: Fudan University, 2004.
- [12] Liu Yan, Wilkinson A. Rheological percolation behaviour and fracture properties of nanocomposites of MWCNTs and a highly crosslinked aerospace-grade epoxy resin system[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 105:97-107.
- [13] Gu Hongbo, Zhang Hongyuan, Ma Chao, et al. Trace electro-sprayed nanopolystyrene facilitated dispersion of multiwalled carbon nanotubes: Simultaneously strengthening and toughening epoxy[J]. Carbon, 2018, 142:131-140.
- [14] Ma Pengcheng, Siddiqui N A, Marom G, et al. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10):1345-1367.
- [15] Seyhan A T, Tanogu M, Schulte K. Tensile mechanical behavior and fracture toughness of MWCNT and DWCNT modified vinyl-ester/polyester hybrid nanocomposites produced by 3-roll milling[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2009, 523(1-2):85-92.
- [16] Sun Zeyu, Xu Lei, Chen Zhengguo, et al. Enhancing the mechanical and thermal properties of epoxy resin via blending with thermoplastic polysulfone[J]. Polymers, 2019, 11(3). DOI:10.3390/polym11030461.
- [17] Thostenson E T, Chou T W. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: Processing and mechanical characterization[J]. Journal of Physics D—Applied Physics, 2002, 35(16):L77-L80.
- [18] Wang Xue, Wang Zhe, Wang Lun, et al. Mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites interfacial modified with styrene-butadiene-styrene grafted multi-walled carbon nanotubes[J]. Polymer Composites, 2018, 39(S2):E996-E1004.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42、24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2020 年底共 48 卷 374 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2020 年底

共 29 卷 142 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址: 济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》编辑部

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款:

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 中国工商银行济南市经十一路支行

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>