

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.10.020

TPU/PDA-GF 复合材料的力学和动态流变性能

贺茂勇,李振中,王玉龙,张保卫

(太原工业学院材料工程系,太原 030008)

摘要:采用多巴胺对短切玻璃纤维(GF)进行表面改性,成功制备了聚多巴胺改性GF(PDA-GF),通过熔融共混方法制备了热塑性聚氨酯弹性体(TPU)/GF复合材料和TPU/PDA-GF复合材料,研究了纤维含量和多巴胺溶液浓度对复合材料力学性能的影响以及纤维与TPU基体之间的相互作用。结果表明,随着纤维含量的增加,复合材料的拉伸弹性模量不断增加,拉伸强度和断裂伸长率却不断降低;多巴胺溶液浓度为0.50 g/L时所制备复合材料的拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率分别达到79.12,34.56 MPa和495.77%,较TPU/GF复合材料分别提高了24.54%,45.52%和27.76%,且其拉伸弹性模量较TPU提高71.52%,拉伸强度和断裂伸长率与TPU相当。动态流变测试结果显示,在低频区,TPU/PDA-GF复合材料的损耗模量、复数黏度和损耗角正切值明显高于TPU和TPU/GF复合材料,说明改性纤维与TPU基体树脂之间存在较强的相互作用,扫描电子显微镜结果同时也证实了此结论;同样在低频区,TPU/PDA-GF复合材料储能模量最小,结合Han曲线的分析结果,可以得出TPU/PDA-GF复合材料内部存在一种网络结构使得其在测试条件下保持一种均相状态,Cole-Cole曲线的分析结果也证实了这一点。

关键词:热塑性聚氨酯弹性体;玻璃纤维;多巴胺;动态流变性能

中图分类号:TQ334.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)10-0106-06

Mechanical Properties and Dynamic Rheology Properties of TPU/PDA-GF Composites

He Maoyong, Li Zhenzhong, Wang Yulong, Zhang Baowei

(Department of Materials Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract : Short-cut glass fiber (GF) was modified by dopamine solution and polydopamine (PDA)-BF was successfully prepared. Then thermoplastic polyurethane (TPU)/GF composites and TPU/PDA-GF composites were prepared by melt-blending method, respectively. The effects of GF content as well as dopamine solution concentration on the mechanical properties of the composites and the interaction between fiber and TPU matrix were investigated. The results showed that the tensile modulus increased with GF content increasing, while both the tensile modulus and elongation at break decreased significantly. Whereas, the tensile modulus, tensile strength and elongation at break of TPU/PDA-GF composites being prepared with dopamine solution concentration of 0.50 g/L was 79.12,34.56 MPa and 495.77%, which was increased by 24.54%,45.52% and 27.76 % than those of TPU/GF composites, respectively. Moreover, the tensile modulus of TPU/PDA-GF composites was 71.52 % higher than that of TPU, and the tensile strength and elongation at break were similar to those of TPU. Dynamic rheological test results showed that the loss modulus, complex viscosity and loss tangent of TPU/PDA-GF composites at low frequency were higher than those of TPU and TPU/GF composites, which indicated that there was a strong interaction between modified fiber and polyurethane matrix, being also confirmed by scanning electron microscope results. Besides, storage modulus of TPU/PDA-GF composites at low frequency was the lowest, combined with the result of Han curves, the conclusion could be draw that there was a network structure inside TPU/PDA-GF composites that maintained a homogeneous state under test conditions. And the Cole-Cole curves analysis of composite above also confirmed it.

Keywords : thermoplastic polyurethane ; glass fiber ; dopamine ; dynamic rheology property

基金项目:山西省“1331工程”重点学科建设计划项目

通讯作者:贺茂勇,讲师,博士,主要研究方向为废旧轮胎胶粉的高值化回收再利用以及聚氨酯弹性体改性 E-mail: hmydor@163.com

收稿日期:2019-07-15

引用格式:贺茂勇,李振中,王玉龙,等. TPU/PDA-GF 复合材料的力学和动态流变性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(10):106-111,116.

He Maoyong, Li Zhenzhong, Wang Yulong, et al. Mechanical properties and dynamic rheology properties of TPU/PDA-GF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):106-111, 116.

在聚氨酯增强改性研究中,关于纤维增强改性聚氨酯的文献报道越来越多,其中包括碳纤维、植物纤维、玻璃纤维 (GF)、纤维素纤维等^[1-5]。上述聚氨酯增强改性成功与否,关键在于纤维在聚氨酯基体中的分散状况、纤维长径比分布范围以及纤维与树脂基体之间的界面相互作用,提高纤维与基体树脂间的界面强度成为制备综合力学性能优异的聚氨酯/纤维复合材料的研究重点。基于纤维表面分子结构,通过纤维表面改性来提高其与树脂基体间的界面粘结力来改善二者的相容性,进而制备性能优良的复合材料的文献报道越来越多。关于 GF 增强改性聚氨酯的文献报道^[6-9],所涉及纤维表面改性的方法包括强酸处理、等离子体处理、化学接枝处理、表面化学镀处理等,其中,关于多巴胺处理 GF 制备聚氨酯/GF 复合材料的报道较少^[10-11]。GF 表面沉积的聚多巴胺 (PDA) 薄膜上含有大量的酚羟基和亚氨基基团,这些基团又可以与聚氨酯分子链上的氨基甲酸酯等极性基团产生较强的氢键作用,有助于增强聚氨酯基体与 GF 之间的界面强度,从而促进聚氨酯与纤维之间的相容,使得聚氨酯/GF 复合材料具备良好的力学性能。另外,采用动态流变测试技术来分析研究纤维与聚氨酯树脂基体之间相互作用的研究工作却鲜有报道。

因此,笔者采用多巴胺对 GF 进行表面改性制备得 PDA 改性 GF (PDA-GF),然后通过熔融共混法制备热塑性聚氨酯弹性体 (TPU)/GF 复合材料,研究纤维含量 (< 10%) 对复合材料力学性能、热性能等的影响,通过动态流变测试表征纤维与树脂基体间的相互作用,间接研究纤维表面处理对复合材料力学性能、热性能等的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

TPU: 69M92,邦泰新材料有限公司;

短切 GF: 直径 13 μm ,新泰市朝瑞玻纤制品有限公司;

盐酸多巴胺 (98%): D103111,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

三氨基甲烷盐酸盐 (Tris): T105289,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

转矩流变仪: XSS-300 型,上海科创有限公司;

平板硫化机: BP-8170-A-20T 型,东莞市宝品精密仪器有限公司;

微机控制电子万能试验机: AI-7000M 型,高铁检测仪器 (东莞) 有限公司;

傅里叶变频红外光谱 (FTIR) 仪: TENSOR27 型,德国布鲁克公司;

扫描电子显微镜 (SEM): JSM7200F 型,日本电子株式会社;

X 射线能谱仪: NORAN System 7 型,赛默飞世尔科技公司;

旋转流变仪: ARES-G2 型,美国 TA 公司。

1.3 PDA-GF 的制备

首先将 GF 在 *N,N*-二甲基甲酰胺溶液中超声清洗 2 h,接着用去离子水将 GF 清洗干净,然后在真空烘箱 (100 $^{\circ}\text{C}$, 12 h) 中烘干备用。配置 6 组 10 mmol/L Tris 缓冲液,然后将盐酸多巴胺加入到 Tris 缓冲液中,配制成实验用多巴胺溶液 (浓度 0.25 ~ 2.50 g/L),接着加入干燥后的 GF 并超声分散,调节并保持溶液 pH 约为 8.5,室温静置 24 h,待多巴胺在纤维表面自聚成膜后将纤维取出,用去离子水反复冲洗,冷冻烘干 48 h 后制备得 PDA-GF。多巴胺自聚反应见图 1。

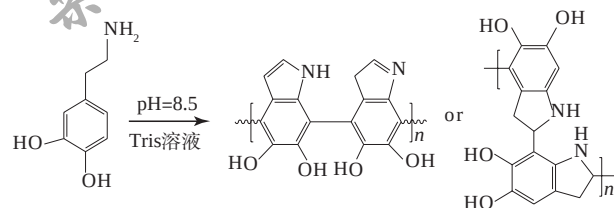


图 1 多巴胺自聚反应方程式

1.4 复合材料的制备

将 TPU 在鼓风烘箱中 100 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 2 h,然后和 GF 按一定比例 (GF 质量分数为 1%~5%) 加入转矩流变仪中熔融共混,温度 180 $^{\circ}\text{C}$,转速 60 r/min;当扭矩平衡后出料,然后在平板硫化机上热压成型,温度 180 $^{\circ}\text{C}$,时间 5 min,压力 10 MPa,经冷压 (压力 10 MPa,时间 5 min) 定型后制备得 TPU/GF 复合材料。

TPU/PDA-GF 复合材料制备方法相同,配方见表 1。

表 1 TPU/PDA-GF 复合材料制备的实验配方

试样 编号	TPU 用量/g	PDA-GF 用量/g	多巴胺溶液 浓度/(g·L ⁻¹)
TPU/0.25PDA-GF	97	3	0.25
TPU/0.50PDA-GF	97	3	0.50
TPU/1.00PDA-GF	97	3	1.00
TPU/1.50PDA-GF	97	3	1.50
TPU/2.00PDA-GF	97	3	2.00
TPU/2.50PDA-GF	97	3	2.50

1.5 性能测试与表征

拉伸性能测试:按照 GB/T 528-2009,试样为哑铃状 II 型,拉伸速率 500 mm/min,每组测试五个样条取平均值;

FTIR 分析测试:采用溴化钾压片法,溴化钾与试样质量比为 100 : 1,波数范围 4000 ~ 600 cm^{-1} ,扫描次数 32 次;

动态流变性能测试:应变 1.0 %,频率扫描范围 0.01 ~ 100 Hz,测试温度 180 $^{\circ}\text{C}$,圆片状试样;

动态力学性能测试:拉伸模式,温度范围 -80 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$,升温速率 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;

X 射线能谱分析 (EDS) 测试:将试样拉伸断面喷金处理后,进行纤维微观形貌、表面元素含量及分布的研究。

2 结果与讨论

2.1 PDA-GF 的表面结构分析

图 2 为 GF 和 PDA-GF 的红外谱图。从图 2 可看出, PDA-GF 在 2830 ~ 2950 cm^{-1} 处出现明显的 C—H 对称与非对称振动吸收峰,而 GF 谱图在此处却几乎不存在吸收峰;另外, 1515 cm^{-1} 和 1605 cm^{-1} 处较强的吸收峰,可能是多巴胺自聚过程中所产生的吡啶结构的特征峰^[12-13];这基本说明了 GF 表面存在 PDA 膜。

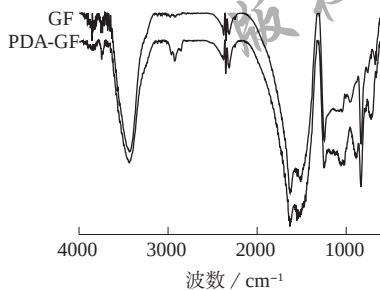
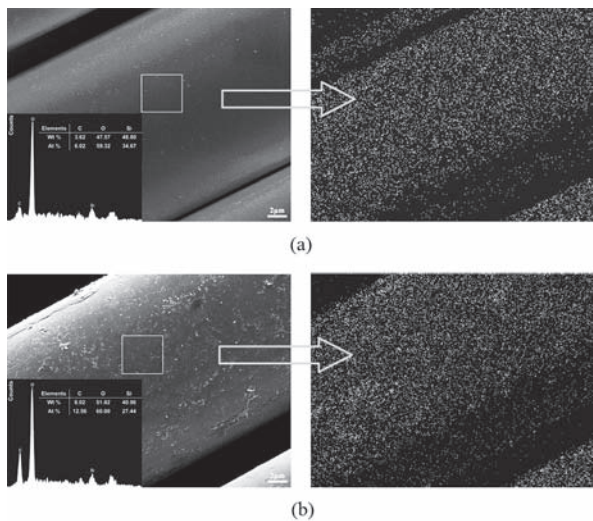


图 2 GF 和 PDA-GF 的红外谱图

图 3 为纤维表面 SEM/EDS 分析和 C 元素分布图。从图 3 可以看出, GF 表面比较光滑,而 PDA-GF 表面粗糙不平,局部存在膜状物;局部点扫结果显示, PDA-GF 表面 C 元素和 O 元素的相对含量分别为 8.02% 和 51.02%,明显高于 GF 表面的相对含量。

从图 3 还可以看出, PDA-GF 表面的 C 元素分布密度明显大于 GF;再结合红外分析结果,可以说,改性纤维表面确实存在 PDA 薄膜的生成,这为后续制备性能优异的 TPU/PDA-GF 复合材料提供了可能。



a—GF ; b—PDA-GF

图 3 纤维表面 SEM/EDS 分析和 C 元素分布

2.2 复合材料的力学性能分析

不同 GF 含量 TPU/GF 复合材料的拉伸性能见图 4。由图 4 可以看出,随着 GF 含量增加,复合材料的拉伸弹性模量逐渐增加,而拉伸强度和断裂伸长率却呈现出逐渐降低的趋势。

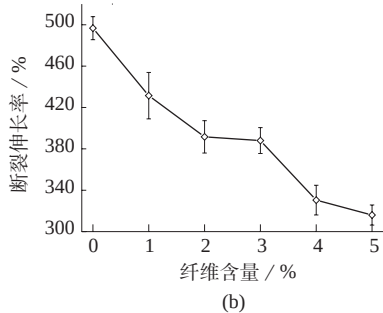
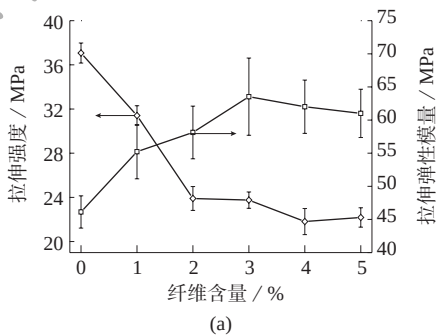


图 4 不同 GF 含量 TPU/GF 复合材料拉伸性能

图 5 为不同多巴胺溶液浓度时 TPU/PDA-GF 复合材料的拉伸性能。从图 5 可以看出,随着多巴胺浓度增加,复合材料的拉伸弹性模量、拉伸强度以及断裂伸长率都呈现出先增加后降低的趋势。当多巴胺溶液浓度为 0.50 g/L 时, TPU/PDA-GF 复合材料的拉伸弹性模量为 79.12 MPa,较纯 TPU

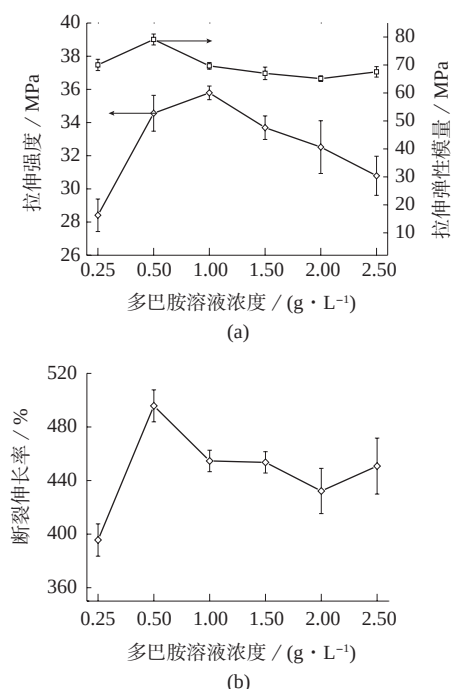


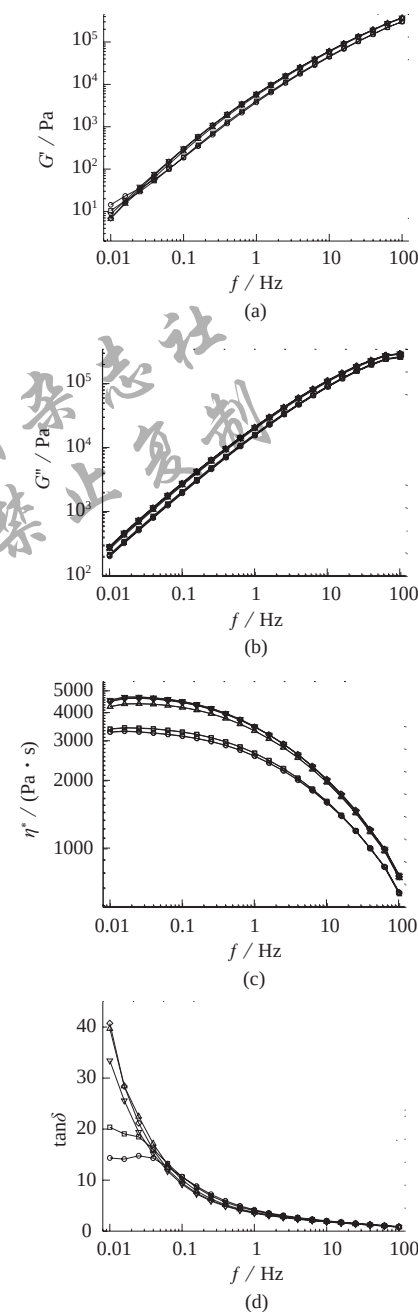
图5 不同多巴胺溶液浓度时 TPU/PDA-GF 复合材料的拉伸性能和 TPU/GF (97/3) 复合材料分别提高了 71.52% 和 24.54%; 其拉伸强度和断裂伸长率分别为 34.56 MPa 和 495.77%, 较 TPU/GF 复合材料分别提高了 45.52% 和 27.76%, 且基本与纯 TPU 的数据持平。

在 TPU 中加入少量纤维 ($< 10\%$) 时, 纤维不均匀的分散及其与 TPU 基体之间较差的界面粘结力, 共同造成了相应复合材料拉伸强度和断裂伸长率的降低, 此时, 纤维对基体相的“稀释”作用^[14]占主导地位; 当纤维表面沉积了一层 PDA 膜后, 相当于纤维表面“生长出”较大含量的酚羟基、亚氨基等极性基团, 这样在添加同样含量的纤维时, 上述极性基团易与 TPU 分子链上的氨基甲酸酯基团等基团产生较强的相互作用, 甚至生成作用力更强的氢键作用, 由于上述较强的界面作用, 使得纤维能够更加均匀地分布在树脂基体中, 从而使其拉伸性能得到大幅度提升。同样由于较强的界面强度, 当复合材料受到外力作用时, 纤维对 TPU 高分子链的运动起到更强的阻碍作用^[15], 进而 TPU/PDA-GF 复合材料表现出更高的拉伸弹性模量。

2.3 复合材料的流变性能分析

复合材料在 180 °C 下的储能模量 (G')-频率 (f)、损耗模量 (G'')- f 、复数黏度 (η^*)- f 、损耗角正切 ($\tan\delta$)- f 等流变性能曲线如图 6 所示。从图 6 可看出, TPU/GF 复合材料同纯 TPU 一样, 随着测试频率的

增加, 其储能模量和损耗模量都呈现出增加的趋势; 未改性纤维的加入, 使得 TPU 测试频率范围内的损耗模量略有降低, 而 TPU/PDA-GF 复合材料的损耗模量在测试频率范围内却明显高于纯 TPU 的损耗模量, 且多巴胺溶液浓度为 0.50 g/L 时, 复合材料的损耗模量最大。测试频率大于 0.06 Hz 时, 上述几种材料的储能模量随测试频率增加也都呈现出



—□—TPU; —○—TPU/GF; —△—TPU/0.25PDA-GF; —▽—TPU/0.50PDA-GF; —◇—TPU/2.50PDA-GF

a— G' - f 曲线; b— G'' - f 曲线; c— η^* - f 曲线; d— $\tan\delta$ - f 曲线

图6 复合材料的流变性能曲线

相同的规律,当测试频率在 0.01 ~ 0.06 Hz 范围内时,TPU/GF 复合材料的储能模量大于纯 TPU,而 TPU/PDA-GF 复合材料的储能模量却小于 TPU。源于分子链结构的特殊性,TPU 材料的流变特性不再符合经典流变关系式^[16],储能模量与频率的双对数曲线在低频区末端斜率约为 1 (经典流变关系中此斜率约为 2)。相较于改性纤维,未改性纤维更多地分布在 TPU 的软段区,这与其较高的玻璃化转变温度相一致,如图 7 所示。测试频率较低时,TPU/GF 复合材料分子量刚性较大的硬段区的损耗明显小于 TPU/PDA-GF 复合材料,因此其表现出较高的储能模量、较小的复数黏度和损耗角正切值;同时,低频区 TPU/PDA-GF 复合材料储能模量-频率对数曲线斜率小于 TPU 的现象,表明改性纤维在 TPU 基体中分布均匀。

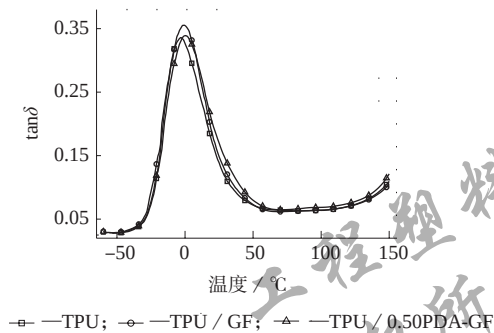
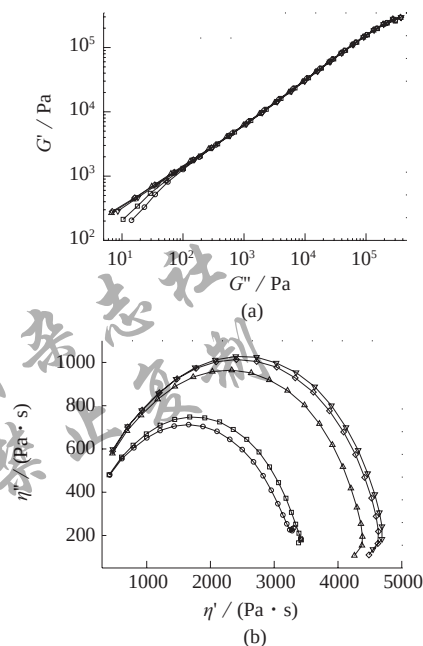


图 7 复合材料的 $\tan \delta$ -温度曲线

由于改性纤维 PDA-GF 表面存在的 PDA 薄膜含有丰富的酚羟基和亚氨基基团,其可以与 TPU 分子链结构上的氨基甲酸酯基团、酯基基团等之间产生较强的相互作用,使得纤维与聚合物熔体的界面粘结力增大,这可以从试样拉伸断面中纤维表面明显的聚合物包裹现象得到间接证实,从而使 TPU 熔体在受到频率较低的周期剪切应力作用时,分子链自由旋转变形困难,滞后严重,进而展现出较大的复数黏度和较大的损耗角正切值。

图 8 为复合材料的 Han 曲线和 Cole-Cole 曲线。Han 曲线是针对均聚物提出的 $\lg G' - \lg G''$ 关系曲线^[17-18], Cole-Cole 曲线可以判定填充类聚合物熔体的相分离程度,圆弧状曲线代表均相体系,具有拖尾现象的曲线表示相分离体系^[19-20]。从图 8a 可看出,不同复合材料在高频区的 Han 曲线能够很好地叠加在一起,而在低频区 (尤其是测试频率 $f < 0.06$ Hz 的区域) 却发生了不同程度的分离,且曲线斜率小于 1,黏性响应占主导。在上述分析中得知,未改性的 GF 在 TPU 基体中分散不均匀,在 TPU 硬段区分

布较少,而 PDA-GF 在 TPU 基体中分布比较均匀。这样,在低动态模量区,TPU/GF 复合材料在响应外界周期性剪切应力作用过程中,刚性分子链变形所耗散的能量增加,黏性响应占优;考虑到纤维与基体树脂之间较强的界面作用,TPU/PDA-GF 复合材料中纤维分布比较均匀,且其内部可能存在某种纤维网络结构^[18],致使复合材料在动态测试过程中弹性响应较 TPU 显著,表现为低频区 Han 曲线的斜率变小。



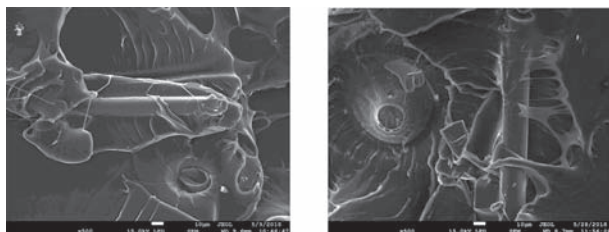
a—Han 曲线; b—Cole-Cole 曲线

图 8 复合材料的 Han 曲线和 Cole-Cole 曲线

从图 8b 可以看出,TPU 和 TPU/PDA-GF 复合材料的 Cole-Cole 曲线基本呈现圆弧状,说明在测试条件下,上述材料基本处于均相状态,而 TPU/GF 复合材料的 Cole-Cole 曲线在末端区有微弱“拖尾”现象,表明其在测试条件下处于微弱相分离状态。另外,TPU/PDA-GF 复合材料的弧状曲线的曲率半径明显大于 TPU 和 TPU/GF 复合材料的曲率半径,且 TPU/0.50PDA-GF 复合材料的曲率半径最大,TPU/GF 复合材料的曲率半径最小。

结合上述分析可得,改性纤维在 TPU 内部分散均匀,纤维与 TPU 分子链之间作用较强,且复合材料内部存在某种网络结构;而未改性纤维在 TPU 内部分布不均匀,纤维与树脂基体相之间的界面作用较弱,这也同时可以从试样拉伸断面的 SEM 照片得到间接证实,如图 9 所示。从图 9 可知,TPU/

GF 复合材料拉伸断面中存在清晰的纤维剥离痕迹;而 TPU/PDA-GF 复合材料的断面中纤维表面存在聚合物包裹现象,且纤维周围聚合物塑性变形异常明显,可见其较强的界面粘结力。



(a) (b)
a—TPU/GF; b—TPU/0.50PDA-GF

图9 复合材料拉伸断面 SEM 照片

3 结论

(1) 随着 GF 含量增加, TPU/GF 复合材料的拉伸弹性模量在不断增加,拉伸强度和断裂伸长率却不断降低;采用多巴胺对 GF 表面改性后制备得到的 TPU/0.50PDA-GF 复合材料具备较好的综合力学性能,拉伸弹性模量较纯 TPU 提高了 71.52%,且拉伸强度和断裂伸长率与纯 TPU 基本持平。

(2) 动态流变分析表明, PDA-GF 在 TPU 中分散均匀,且纤维与 TPU 基体之间的界面粘结力得到显著增加, TPU/PDA-GF 复合材料内部存在网络结构,使得复合材料的拉伸性能得以大幅度提升。

(3) 结合 SEM 测试和动态力学性能测试分析可知, PDA-GF 与 TPU 之间的界面强度较高,致使 TPU/PDA-GF 复合材料拉伸断面中纤维表面出现明显的聚合物包裹现象,与其具有较高的玻璃化转变温度相一致。

参考文献

- [1] Jiang S, Li Q, Zhao Y, et al. Effect of surface silanization of carbon fiber on mechanical properties of carbon fiber reinforced polyurethane composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 110:87-94.
- [2] Saba N, Jawaid M, Alothman Othman Y, et al. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106:149-159.
- [3] Zhang D, He M, Qin S, et al. Study on dynamic mechanical, thermal, and mechanical properties of long glass fiber reinforced thermoplastic polyurethane / poly (butylene terephthalate) composites[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(8):63-72.
- [4] Khairatun N M A, Pratheep K A, Darren M. Cellulose nanocrystals with enhanced thermal stability reinforced thermoplastic polyurethane[J]. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2017, 21(3):754-761.
- [5] Mi H Y, Xin J, Salick M R, et al. Carbon nanotube (CNT) and nanofibrillated cellulose (NFC) reinforcement effect on thermoplastic polyurethane (TPU)scaffolds fabricated via phase separation using dimethyl sulfoxide (DMSO)as solvent[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62:417-427.
- [6] 张道海,何敏,秦舒浩,等. 相容剂对长玻纤增强热塑性聚氨酯弹性体 / 聚乳酸复合材料性能的影响 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(8):50-55.
Zhang Daohai, He Min, Qin Shuhao, et al. Effect of compatibilizer on performance of long glass fiber reinforced thermoplastic polyurethane elastomer and polylactic acid composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(8):50-55.
- [7] 赵雨花,李其峰,王军威,等. 短纤维增强热塑性聚氨酯弹性体复合材料的性能研究 [J]. *纤维复合材料*, 2014(4):15-19.
Zhao Yuhua, Li Qifeng, Wang Junwei, et al. Study of short carbon fibers / thermoplastic polyurethane composites[J]. *Fiber Composites*, 2014(4):15-19.
- [8] 赵一兰,胡程耀,魏春,等. 聚酞亚胺表面处理玻璃纤维 / 环氧树脂复合材料力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(7):174-180.
Zhao Yilan, Hu Chengyao, Wei Chun, et al. Mechanical properties of polyimidesurface treated glass fiber / epoxy resin composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7):174-180.
- [9] Atiqah A, Jawaid M, Sapuan S M, et al. Effect of surface treatment on the mechanical properties of sugar palm / glass fiber-reinforced thermoplastic polyurethane hybrid composites[J]. *BioResources*, 2018, 13(1):1 174-1 188.
- [10] Liying Z, Sunanda R, Ye C, et al. Mussel-Inspired polydopamine coated hollow carbon microspheres, a novel versatile filler for fabrication of high performance syntactic foams[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2014, 6(21):18 644-18 652.
- [11] Zhang H P, Han W, Tavakoli J, et al. Understanding interfacial interactions of polydopamine and glass fiber and their enhancement mechanisms in epoxy-based laminates[J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019, 116:62-71.
- [12] Mondragon G, Santamaria-Echart A, Hormaiztegui M E V, et al. Nanocomposites of waterborne polyurethane reinforced with cellulose nanocrystals from sisal fibres[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(5):1 869-1 880.
- [13] 张弘毅,蒋金泓,莫梦婷,等. 反应介质对聚多巴胺纳米粒子制备的影响 [J]. *功能高分子学报*, 2014, 27(4):413-418.
Zhang Hongtao, Jiang Jinhong, Mo Mengting, et al. Effects of reaction medium on the synthesis of polydopamine nanoparticles[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2014, 27(4):413-418.

- [7] None. Americhem introduces new colour & additive masterbatch technologies, expands UK production capacity[J]. Additives for Polymers, 2011(9):1-2.
- [8] 余晓华,杨蕴敏. 国内外纺前着色技术及产品的新进展[J]. 纺织导报, 2012(11):57-60.
- Yu Xiaohua, Yang Yunmin. New developments in pre-spinning coloring technology and products at home and abroad[J]. Textile Review, 2012(11):57-60
- [9] 陆育明,刘萍,冯忠耀,等. 原液着色环保聚酯纤维的开发[J]. 合成纤维, 2018, 47(2):8-10.
- Lu Yuming, Liu Ping, Feng Zhongyao, et al. Development of pigmented environmentally friendly polyester fiber[J]. Synthetic fiber, 2018, 47(2):8-10.
- [10] 洗彩虹,杨婉琼,刘婉培,等. 多功能分散剂对色母粒性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(7):128-132.
- Xian Caihong, Yang Wanqiong, Liu Wanpei, et al. Effect of multifunctional dispersant on the properties of masterbatch[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):128-132.
- [11] 王少会,吴细敏,牛利玲. 超分散剂改性硫酸钙粉体在聚乙烯复合材料中的应用研究[J]. 河南化工, 2010, 27(1):33-36.
- Wang Shaohui, Wu Ximin, Niu Liling. Application of hyperdispersant modified calcium sulfate powder in polyethylene composites[J]. Henan Chemical Industry, 2010, 27(1):33-36.
- [12] 黄山. 超分散剂的发展及前景[J]. 新材料与新科技, 2018, 44(5):65.
- Huang Shan. Development and prospects of hyperdispersants[J]. New Materials and New Technology, 2018, 44(5):65.
- [13] 袁勇,李洁,孙伟娜. 有机颜料分散剂及应用研究[J]. 化工管理, 2013(2):69-70.
- Yuan Yong, Li Jie, Sun Weina. Organic pigment dispersant and its application research[J]. Chemical Industry Management, 2013(2):69-70.
- [14] 李建平,乔辉,丁筠. 分散剂对PA6纤维蓝色母粒着色性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2):116-117.
- Li Jianping, Qiao Hui, Ding Yun. Effect of dispersant on the coloring properties of PA6 fiber blue masterbatch[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):116-117.
- [15] 姜伟,董平,赵辉,等. 用于色母分散剂的副产蜡性能研究[J]. 精细石油化工进展, 2018, 19(1):44-49.
- Jiang Wei, Dong Ping, Zhao Hui, et al. Study on the properties of by-product wax used in masterbatch dispersant[J]. Progress in Fine Petrochemicals, 2018, 19(1):44-49.
- (上接第 111 页)
- [14] 贺建芸,张建文,刘亚康,等. 短纤维-TPU 复合材料力学性能理论与实验研究 (I) 拉伸强度理论与实验[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 1999, 27(4):47-50.
- He Jianyun, Zhang Jianwen, Liu Yakang, et al. Theoretical prediction and experimental research on the mechanical properties of short fiber-thermoplastic polyurethane composite (I) Longitudinal strength prediction and experimental research[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 1999, 27(4):47-50.
- [15] 贺建芸,张连凯,刘亚康,等. 短纤维-TPU 复合材料力学性能理论与实验研究 (II) 弹性模量理论预测及实验[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2000, 27(1):49-52, 55.
- He Jianyun, Zhang Liankai, Liu Yakang, et al. Theoretical and experimental studies on the mechanical properties of short fiber-TPU (II) Theoretical predication and experimental study on modulus of elasticity[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2000, 27(1):49-52, 55.
- [16] 陆佳俊,白绘宇,王玮,等. 动态流变学对 PVDF / PTW 共混物流体相容性研究[J]. 高分子学报, 2016(3):315-323.
- Lu Jiajun, Bai Huiyu, Wang Wei, et al. Dynamic rheology studies on the miscibility of PVDF / PTW blends[J]. Acta Polymerica Sinica, 2016(3):315-323.
- [17] Han C D, Jhon M S. Correlations of the first normal stress difference with shear stress and of the storage modulus with loss modulus for homopolymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1986, 32(3):3 809-3 840.
- [18] 王莉莉,董侠,刘祥贵,等. 热塑性聚氨酯及其复合材料的界面形态与流变特性[J]. 高分子学报, 2013(3):367-376.
- Wang Lili, Dong Xia, Liu Xianggui, et al. Microstructure and rheological properties of thermoplastic polyurethane and its composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013(3):367-376.
- [19] Zheng Q, Du M, Yang B, et al. Relationship between dynamic rheological behavior and phase separation of poly(methyl methacrylate) / poly(styrene-co-acrylonitrile) blends[J]. Polymer, 2001, 42(13):5 743-5 747.
- [20] 宋义虎,郑强. 粒子填充高分子熔体的动态流变行为[J]. 高分子通报, 2013(9):22-34.
- Song Yihu, Zheng Qiang. Dynamic rheologies of particle filled polymer melts[J]. Polymer Bulletin, 2013(9):22-34.