

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.008

高性能碳纤维增强尼龙 10T 复合材料制备与性能

张琦¹, 夏礼栋¹, 李源¹, 徐凯¹, 高达利¹, 庄毅², 张师军¹

[1. 中石化(北京)化工研究院有限公司, 北京 100013; 2. 中国石油化工集团公司, 北京 100728]

摘要:以半芳香族尼龙聚对苯二甲酰葵二胺(PA10T)为基体树脂,采用碳纤维(CF)增强改性的方式制备高性能CF增强PA10T复合材料,研究不同质量分数的CF对PA10T/CF复合材料力学性能的影响。通过扫描电子显微镜对PA10T/CF复合材料的断面形貌进行分析,结合X射线衍射分析和差式扫描量热分析对复合材料的熔融、结晶过程和晶体结构进行分析,采用热重分析测试了复合材料的热稳定性。结果表明,CF的加入显著提高了PA10T/CF复合材料力学性能,当CF质量分数为30%,PA10T/CF复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别达到253, 360 MPa和20.1 GPa,比纯PA10T的性能分别提高216%,323%和675%。CF在复合材料结晶过程中起到异相成核作用,为结晶过程提供大量晶核,CF诱导 α 晶型PA10T晶态结构发生变化;同时也对分子链的运动折叠产生阻碍,导致晶粒生长不完善出现晶粒细化现象。加入CF后,复合材料结晶温度提高,结晶度随CF含量提高呈先下降后上升的变化趋势,同时热稳定性提高,当CF质量分数为10%时,复合材料热分解起始温度及失重50%的温度分别比纯PA10T提高10.7℃和12.4℃。

关键词:碳纤维;聚对苯二甲酰葵二胺;力学性能;结晶

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0044-06

Preparation and Properties of High-Performance Carbon Fiber Reinforced PA10T Composites

Zhang Qi¹, Xia Lidong¹, Li Yuan¹, Xu Kai¹, Gao Dali¹, Zhuang Yi², Zhang Shijun¹

[1. SINOPEC (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. SINOPEC Group, Beijing 100728, China]

Abstract : Using semi-aromatic nylon poly(decamethylene terephthalamide) (PA10T) as matrix resin, high performance carbon fiber (CF) reinforced PA10T composites were prepared by adopting CF reinforced modification method. The effects of CF content on the mechanical properties of PA10T/CF composites were studied. The section morphology of PA10T/CF composites were analyzed by scanning electron microscopy, and the melting, crystallization and crystal structure of the composites were analyzed by X-ray diffraction analysis and differential scanning calorimetry, the thermal stability of the composites were tested by thermogravimetric analysis. The results indicate that the significant improvement of the mechanical properties of PA10T/CF composites is realized with the reinforcement of CF. As the content of CF is 30 wt%, the tensile strength, flexural strength and flexural modulus of PA10T/CF composites reach 253, 360 MPa and 20.1 GPa, respectively, are 216%, 323% and 675% higher than those of pure PA10T. Excessive crystal nucleus are provided under the heterogeneous nucleation of CF during the crystalline process, as well as the structure of α -crystalline PA10T is altered by induction of CF. Meanwhile, the movement and folding of molecular chain is hindered with the existence of CF, resulting in imperfect crystal grain growth and refinement. The crystallization temperature of the composite increases with adding CF, the crystallinity decreases first and then increases with the increase of CF content. In addition, the thermal stability of PA10T/CF composites is improved with adding CF, the onset decomposition temperature and 50% weight loss temperature of PA10T/CF composite increases by 10.7℃ and 12.4℃ compared with pure PA10T when the content of CF is 10 wt%.

Keywords : carbon fiber ; poly(decamethylene terephthalamide) ; mechanical property ; crystallization

半芳香族尼龙(PA)聚对苯二甲酰葵二胺(PA10T)是一种分子链中连有芳环结构的新型耐高

温PA材料,不仅具有传统PA材料优异的力学性能与耐摩擦性能,且具有更低的吸水率与更好的尺寸

基金项目:中国石油化工集团公司科技部项目(219025-4)

通信作者:张师军,教授级高工,中国石化高级专家,主要从事高分子材料改性与高性能研究

收稿日期:2022-03-01

引用格式:张琦,夏礼栋,李源,等.高性能碳纤维增强尼龙10T复合材料制备与性能[J].工程塑料应用,2022,50(5):44-49.

Zhang Qi, Xia Lidong, Li Yuan, et al. Preparation and properties of high-performance carbon fiber reinforced PA10T composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):44-49.

稳定性,耐热温度大幅度提高,因此在汽车、航空航天、军工等领域有广阔的应用前景^[1-2]。为了充分发挥 PA10T 的优异性能,拓展材料的应用领域,通常对其进行改性来提高材料的综合性能。其中采用高性能纤维增强改性是较为常用的方法之一^[3-4]。郝现红等^[5]采用玻璃纤维对 PA10T/1010 进行增强改性,玻璃纤维的加入能够明显改善复合材料的力学性能,同时也增强了材料的耐高温能力,且对复合材料的结晶过程影响较小。刘冰肖等^[6]通过对玻璃纤维增强 PA10T/66 的非等温结晶行为进行分析,证明通过玻璃纤维的加入可降低材料结晶活化能。叶振兴等^[7]采用玻璃纤维增强 PA10T/PA66 共混物复合材料,并对马来酸酐接枝氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物在复合材料中的增韧效果进行了研究。

与玻璃纤维相比,碳纤维(CF)具有更高的强度和模量,常用于先进复合材料的制备。近几年来由于国内 CF 产能的提高和市场化推广,关于 CF 在 PA 树脂中的改性研究和应用也出现了很多文献报道。目前,关于 CF 增强 PA 复合材料的研究主要包括:对材料性能分析及界面改性^[8-13]、针对加工过程中影响因素的分析及工艺条件优化^[14-15]以及新型加工成型技术研究等^[16-18]几方面,大多数研究围绕 PA6, PA66 基体的复合材料开展^[19-20],对于 CF 在耐高温 PA 复合材料中的文献研究较少。笔者采用双螺杆挤出加工方式制备 CF 增强 PA10T 复合材料,对不同纤维含量下复合材料的微观形貌、力学性能、热稳定性及结晶行为进行研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA10T: Vicnyl 700,金发科技股份有限公司;

CF: 12K,上海石油化工股份有限公司;

抗氧剂 *N*, *N*'-1,6-亚己基-二-[3,5-二叔丁基-4-羟基苯丙酰胺]: IRGANOX1098,巴斯夫(中国)有限公司;

抗氧剂四(2,4-二叔丁基酚)-4,4'-联苯二亚磷酸酯: PEPQ,科莱恩化工(中国)有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: ZSK25 型,德国 WP 公司;

注塑机: HTF90W1 型,广东海天集团股份有限公司;

电热鼓风干燥箱: 101AS-3 型,上海浦东荣丰科学仪器厂;

拉力试验机: 5966-J 型,美国英斯特朗有限公

司;

摆锤冲击试验机: ZBC7251-B 型,美斯特工业系统(中国)有限公司;

电子万能试验机: CMT6104 型,深圳新三思计量技术有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSL 型,美国 Perkin Elmer 公司;

热重(TG)分析仪: TGA8000 型,美国 Perkin Elmer 公司;

扫描电子显微镜(SEM): EM-30AX 型,韩国 COXEM 公司;

X 射线衍射(XRD)仪: D/max-RB 型,日本力学电机株式会社。

1.3 试样制备

采用双螺杆挤出加工的方式制备 PA10T/CF 复合材料,将各原料按照一定比例混合均匀,由加料仓加料,并根据比例将 CF 丝束从双螺杆挤出机侧加料口引入,PA10T 树脂与 CF 经双螺杆剪切捏合后挤出造粒,得到所需复合材料粒料。其中,通过调整加料量和进纤量来对复合材料中 CF 的含量进行调控,最终制备得到 CF 质量分数分别为 5%, 10%, 17.5%, 25%, 30% 的 PA10T/CF 复合材料。挤出温度为 325~340℃,加料比 4%~10%,螺杆转速为 300 r/min。将制备的 PA10T/CF 粒料在 120~140℃下干燥 8~10 h 后,通过注塑机制备出标准测试样条,注塑温度为 330~340℃。

1.4 测试与表征

拉伸强度和断裂伸长率按照 ISO 527-2:2012 测试,样条规格型号 -1A 型,夹具间距 115 mm,测试速度 10 mm/min。

弯曲性能按照 ISO 178:2019 测试,试样规格 (80×10×4) mm,跨距 64 mm,测试速度 2.0 mm/min。

简支梁缺口冲击强度按照 ISO 179-1:2010 测试,缺口类型 A 型,试样规格 (80×10×4) mm,摆锤标称能量 4 J,冲击速度 2.9 m/s。

DSC 测试:在氮气气氛下,以 20℃/min 的升温速率由 50℃升至 350℃,恒温 3 min 以消除热历史,再以 10℃/min 降温至 50℃,恒温 2 min,最后以 10℃/min 第二次升温至 350℃,将所得曲线进行基线校正。根据二次熔融曲线对熔融峰积分得到的热焓值 ΔH ,由式(1)计算得到复合材料中 PA10T 实际的熔融焓 (ΔH_m):

$$\Delta H_m = \Delta H / W_{PA10T} \quad (1)$$

式中: W_{PA10T} ——复合材料中 PA10T 的质量分数, %。

TG 分析: 取 5~10 mg 样品, 在氮气气氛下, 以 20℃/min 升温至 800℃, 分析样品残重。

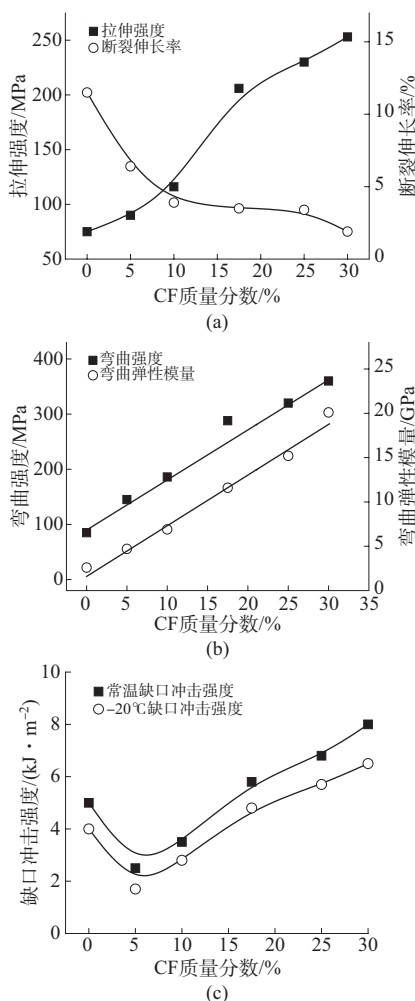
SEM 分析: 对样条冲击断面进行喷金处理, 再利用 SEM 观察其微观形貌。

XRD 分析: 扫描范围为 1°~60°, 扫描速度为 5°/min, Cu 靶, $K\alpha$ 辐射 (波长为 0.15408 nm), 管电压 40 kV, 管电流 100 mA。

2 结果与讨论

2.1 CF 含量对复合材料力学性能的影响

根据加工过程中进料量条件, 制备出不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料, 研究了 CF 含量对复合材料力学性能的影响, 结果如图 1 所示。



a—拉伸性能; b—弯曲性能; c—冲击性能

图1 不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料的力学性能

由图 1a 可知, 纯 PA10T 的拉伸强度为 80 MPa, 断裂伸长率为 11.5%。随着 CF 含量的增加, PA10T/CF 复合材料的拉伸强度显著提高。当

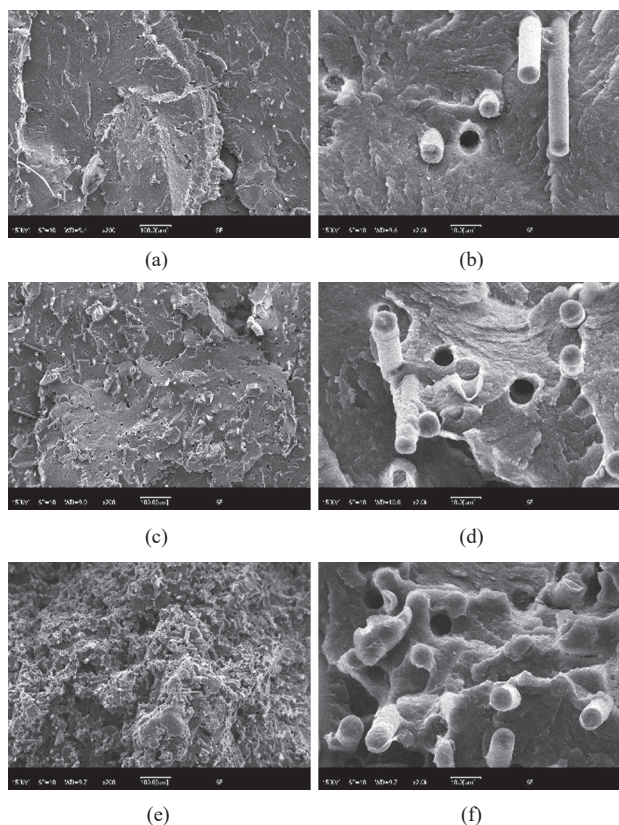
CF 质量分数为 30% 时, PA10T/CF 复合材料的拉伸强度达到 253 MPa, 比纯 PA10T 提高 216%。图 1a 也显示 PA10T/CF 复合材料的断裂伸长率随 CF 含量增加而逐渐下降, 原因在于 CF 为脆性材料, 其强度高但断裂伸长率较低。当复合材料中 CF 含量较高时, 所受拉伸应力传递使基体中的纤维被拉断, 从而使材料发生断裂失效, 此时材料的断裂伸长率更接近 CF 本身。

图 1b 曲线表明, 复合材料的弯曲强度及弯曲弹性模量随 CF 含量增大而提高。当 CF 质量分数达到 30%, PA10T/CF 复合材料的弯曲强度由纯 PA10T 的 85 MPa 提高到 360 MPa, 弯曲弹性模量达到 20.1 GPa, 比纯 PA10T 分别提高 323% 和 675%。该结果表明, CF 对 PA10T 的增强效果明显, 说明材料在拉伸和弯曲过程中, 所受应力可有效传递至 CF, 凭借 CF 高强度的特性使复合材料的强度随 CF 含量提高而得到显著提升。

由图 1c 中数据可知, PA10T 作为一种长碳链 PA, 其韧性良好, 常温缺口冲击强度为 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。随着 CF 的加入, PA10T/CF 复合材料的缺口冲击强度出现明显降低, 这是由于 CF 破坏了基体树脂的连续性^[19], 而 CF 属于脆性材料韧性较差, 材料受到冲击作用时较低含量的纤维吸收能量有限, 因此导致 PA10T/CF 复合材料冲击性能下降。随着 CF 含量逐渐提高, 材料受到冲击作用时可通过断裂形变和纤维拔出吸收更多能量, 因此材料的缺口冲击强度又表现为随 CF 含量增加逐渐提高。当 CF 质量分数为 30% 时, PA10T/CF 复合材料的常温和 -20℃ 缺口冲击强度分别达到为 8.0, 6.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.2 PA10T/CF 复合材料断面形貌

CF 在复合材料基体中的分散是影响材料力学性能的重要因素。通过 SEM 分别对 CF 质量分数为 5%, 10% 和 30% 的 PA10T/CF 复合材料冲击断面形貌进行观察, 结果如图 2 所示。由图 2 可见, CF 在树脂基体中的分散较为均匀, CF 质量分数为 5% 的 PA10T/CF 复合材料的断面较为平整, 随着 CF 含量提高, 复合材料的冲击断面呈现粗糙起伏的形貌结构, 且存在大量纤维拔出后留下的孔洞, 表明复合材料受外力冲击过程中通过 CF 与基体的脱粘来吸收能量, 实现缺口冲击强度提高。通过对断面形貌局部放大, 可观察到嵌入树脂基体的纤维与基体之间的界面结合较为紧密; 而拔出纤维的表面较为粗糙, 可观察到粘结有少量树脂, 说明材料中的



CF 质量分数 5% : a—放大 200 倍; b—放大 2000 倍
CF 质量分数 10% : c—放大 200 倍; d—放大 2000 倍
CF 质量分数 30% : e—放大 200 倍; f—放大 2000 倍

图 2 不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料冲击断面 SEM 照片
CF 与基体树脂的界面结合作用良好,受到外界作用时基体中的纤维能够起到良好的承接载荷的作用,使材料发生韧性断裂^[19]。

2.3 PA10T/CF 复合材料结晶性能

采用 XRD 对 PA10T 及不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料的晶体结构进行分析,结果如图 3 所示。由图 3 可见,纯 PA10T 在 $2\theta=20.7^\circ$ 和 22.1° 处出现重叠的衍射峰^[21],为 $\alpha 1$ 和 $\alpha 2$ 两种晶型,分别对应 PA10T 的 (100) 和 (010,110) 晶面^[22]。加入 CF 以后,复合材料在 $2\theta=25.2^\circ$ 处出现新的衍射峰,该衍射峰对应为 CF (002) 晶面。CF 质量分数为 10% 时,复合材料中 PA10T 的衍射峰明显变宽,

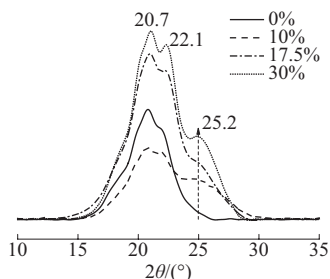
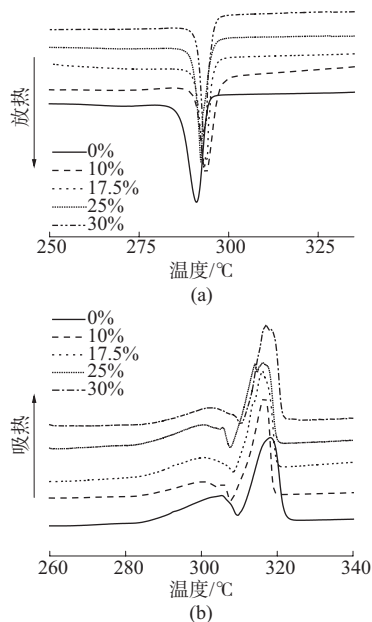


图 3 不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料 XRD 曲线

峰尖锐程度减小,说明 CF 加入后使 PA10T 结晶出现晶粒细小化,且结晶度有所下降;随着 CF 含量的提高,复合材料的衍射峰又重新变得尖锐,说明晶粒生长更完善,结晶度有所提高;且 $\alpha 2$ 晶型衍射峰尖形逐渐显现,说明 CF 改变了 PA10T 晶型的晶态结构,可能在结晶过程中 PA10T 分子链的运动、折叠受到 CF 的阻碍而产生缺陷,并且诱导晶粒优先沿 (010,110) 晶面生长^[8,22]。

采用 DSC 对 PA10T/CF 复合材料的熔融和结晶过程进行分析,得到各复合材料样品的 DSC 曲线,如图 4 所示。对图 4 中不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料 DSC 曲线进行分析,得到各复合材料对应的起始结晶温度 (T_0)、结晶温度 (T_c)、熔融温度 (T_m) 以及 ΔH_m ,相关数据列于表 1。由图 4a 和表 1 可以看出,加入 CF 后,PA10T/CF 的 T_0 和 T_c 均增大,说明 CF 的加入起到异相成核的作用,促进了 PA10T 的结晶。



a—结晶曲线; b—二次熔融曲线

图 4 不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料的
结晶曲线和二次熔融曲线

表 1 不同 CF 质量分数的 PA10T/CF 复合材料的 DSC 数据

CF 质量分数 / %	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
0	294.2	291.0	305.0/318.0	93.5
10	297.7	293.4	301.0/316.0	64.5
17.5	297.4	293.4	300.8/315.8	61.2
25	297.2	292.5	301.1/316.5	80.1
30	296.9	293.2	302.7/317.6	89.6

由图 4b 可以看出,纯 PA10T 的熔融曲线在 305°C 和 318°C 处出现两个熔融峰,这种曲线特征在半结晶 PA 中较为常见,形成原因可能是 PA 结

晶过程中形成的不同晶型、不同完善程度或不同晶片厚度的晶体,或者是由于熔融过程中的重结晶而引起^[22-23]。由于CF的加入一方面能够起到异相成核的作用,但同时也会破坏基体本身的连续性,阻碍树脂的分子链运动,使PA10T在结晶过程中形成不完善的晶粒。图4b和表1显示,随着CF的加入,低温熔融峰向低温偏移,同时还出现较为明显的小肩峰;而高温熔融峰值温度随CF含量增加先出现小幅度下降,然后又逐渐提高,但始终低于纯PA10T。结合表1中 ΔH_m 数据随CF含量的变化趋势,可知随着CF含量的增加,复合材料中PA10T的结晶度表现为先下降后上升。

在高CF含量下,纤维通过异相成核产生大量晶核,可诱导PA10T沿纤维方向取向结晶,同时阻碍晶粒生长使其形成具有缺陷结构的细小晶粒。由于晶粒细化使得这些不完善的晶粒在熔融过程中更早地在低温区发生熔融,使得双熔融峰均向低温偏移,并且低温峰变宽、高温峰变窄。随着CF含量的进一步增加,结晶过程所需要的晶核达到饱和,此时CF有利于晶核发生取向生长,使得复合材料的结晶度又逐渐提高,这种由CF含量变化引起的熔融和结晶行为变化与XRD实验结果大致相同。

2.4 PA10T/CF 复合材料 TG 分析

为研究CF的加入对PA10T/CF复合材料热稳定性的影响,对不同CF含量的复合材料在氮气气氛下的热失重分解过程进行分析,得到不同复合材料样品随温度变化的TG曲线,结果如图5所示。

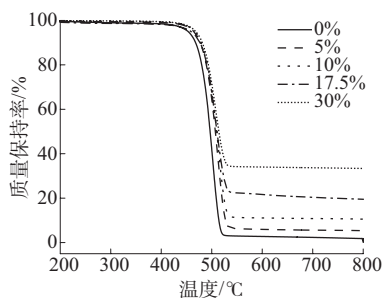


图5 不同CF质量分数的PA10T/CF复合材料的TG曲线

由图5可以看出,PA10T及PA10T/CF复合材料在氮气气氛下的热失重均为一步分解,表明CF的加入不会影响PA10T/CF复合材料的热分解机理。通过对TG曲线分析,得到不同CF含量的复合材料热分解起始温度(T_{onset})、外推终止温度(T_{end})及失重率达到50%的温度($T_{50\%}$),结果列于表2。由表2可以看出,CF的加入使复合材料的 T_{onset} 、 T_{end} 及 $T_{50\%}$ 均有明显提高,当CF质量分数为10%时,

PA10T/CF复合材料的 T_{onset} 、 T_{end} 及 $T_{50\%}$ 分别比纯PA10T提高10.7、14.1、12.4°C,这说明CF的加入有利于复合材料热稳定性的提高。

表2 不同CF质量分数的PA10T/CF复合材料的热分解温度/°C

CF质量分数/%	T_{onset}	$T_{50\%}$	T_{end}
0	479.5	496.5	514.4
5	486.7	506.0	525.6
10	490.2	508.9	528.5
17.5	489.8	508.2	527.7
30	483.0	503.3	523.8

3 结论

(1) 通过CF增强可显著改善PA10T的力学性能,当CF质量分数达到30%,PA10T/CF复合材料的拉伸强度达到253 MPa,弯曲强度达到360 MPa,弯曲弹性模量达到20.1 GPa,常温 and -20°C 缺口冲击强度分别为8.0 kJ/m²和6.5 kJ/m²。

(2) PA10T/CF复合材料冲击断面的SEM照片显示,CF可均匀分散在PA10T基体中,纤维与树脂基体之间的界面结合较好。随着CF含量的提高,复合材料断裂面结构粗糙,材料表现为韧性断裂。

(3) CF具有异相成核作用,能够诱导晶粒沿PA10T的(010,110)晶面生长,同时也会影响PA10T的分子链运动使其产生晶粒细化现象;随CF含量增加,熔融低温峰变宽且向低温偏移,熔融高温峰值温度出现先下降后上升的变化趋势。

(4) PA10T/CF复合材料的热分解过程属于一步分解,CF的加入有利于复合材料热稳定性的提高,当CF质量分数为10%时,复合材料的 T_{onset} 、 T_{end} 及 $T_{50\%}$ 分别比纯PA10T提高10.7、14.1、12.4°C。

参考文献

- [1] 张凯,赵建青,刘述梅,等.半芳香族尼龙的结构性能及其应用[J]. 石油化工,2015,44(5):536-542.
Zhang Kai, Zhao Jianqing, Liu Shumei, et al. Structure, properties and applications of semi-aromatic nylons[J]. Petrochemical Technology, 2015, 44(5):536-542.
- [2] 阎昆,付伟,解明晨, et al. 耐高温聚酰胺 PA10T 的 GPC 测试方法 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1):108-115.
Yan Kun, Fu Wei, Xie Mingchen, et al. Gel permeation chromatography of high temperature polyamide PA10T[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):108-115.
- [3] 张琦,张师军.碳纤维增强热塑性复合材料的研究进展 [J]. 石油化工, 2020, 49(12):1153-1164.
Zhang Qi, Zhang Shijun. Research development on carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Petrochemical Technology, 2020, 49(12):1153-1164.
- [4] 陈吉平,李岩,刘卫平,等.连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放原位成型技术的航空发展现状 [J]. 复合材料学报,

- 2019,36(4):784–794.
- Chen Jiping, Li Yan, Liu Weiping, et al. Development of AFP in-situ consolidation technology on continuous fiber reinforced thermoplastic matrix composites in aviation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2019,36(4):784–794.
- [5] 郝现红,胡国胜,张静婷,等. 玻纤含量对 PA10T/1010 复合材料性能的影响[J]. *工程塑料应用*,2018,46(2):31–36.
- Hao Xianhong, Hu Guosheng, Zhang Jingting, et al. Effects of glass fiber content on properties of PA10T/1010 composites[J]. *Engineering Plastics Application*,2018,46(2):31–36.
- [6] 刘冰肖,胡国胜,张静婷,等. 耐高温 PA10T/66 及 PA10/66/GF 非等温结晶动力学研究[J]. *工程塑料应用*,2019,47(3):101–105.
- Liu Bingxiao, Hu Guosheng, Zhang Jingting, et al. Study on non-isothermal crystallization kinetics of heat resistant PA10T/66 and PA10T/66/GF composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019,47(3):101–105.
- [7] 叶振兴,王欧白,钟绍信,等. 高性能玻璃纤维增强 PA10T/PA66 复合材料研究[J]. *塑料工业*,2020,48(5):123–128.
- Ye Zhenxing, Wang Oubai, Zhong Shaoxin, et al. Research on high-performance PA10T/PA66 composites reinforced by glass fiber[J]. *China Plastics Industry*,2020,48(5):123–128.
- [8] 马晓敏,邢立学,谭洪生,等. 连续碳纤维增强 PA66 复合材料的结晶与力学性能[J]. *中国塑料*,2019,33(2):40–47.
- Ma Xiaomin, Xing Lixue, Tan Hongsheng, et al. Study on crystallization and mechanical properties of continuous carbon-fiber-reinforced PA66 composites[J]. *China Plastics*,2019, 33(2):40–47.
- [9] 王健,何雍,张翔,等. 热氧老化对 PA10T_GF 复合材料性能及使用寿命的影响[J]. *工程塑料应用*,2018,46(4):91–97.
- Wang Jian, He Yong, Zhang Xiang, et al. Effects of thermal-oxidative aging on properties and service life of PA10T/GF composites[J]. *Engineering Plastics Application*,2018,46(4):91–97.
- [10] Zhao D F, Ma Y, Yang Y Q. Flexural damage behavior of CF/PA6 plain woven laminates with different layers[J]. *Composites Part B:Engineering*,2019,162:631–642.
- [11] Nishikawa M, Fukuzo A, Matsuda N, et al. Evaluation of elastic-plastic response of discontinuous carbon fiber-reinforced thermoplastics:Experiments and considerations based on load-transfer-based micromechanical simulation[J]. *Composites Science and Technology*,2018,155:117–125.
- [12] Ma Y Y, Yan C, Xu H B, et al. Enhanced interfacial properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites by grafting graphene oxide onto fiber surface[J]. *Applied Surface Science*, 2018,452:286–298.
- [13] 夏礼栋,张琦,高达利,等. 聚酰胺 / 碳纤维复合材料中纤维表面改性研究进展[J]. *合成树脂及塑料*,2022,39(1):73–78.
- Xia Lidong, Zhang Qi, Gao Dali, et al. Research progress on surface modification of carbon fiber in PA/CF composites[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*,2022,39(1):73–78.
- [14] 张友强,王宝生,赵付宝,等. 高流动性碳纤维增强尼龙 66 的制备与性能[J]. *工程塑料应用*,2021,49(8):43–47.
- Zhang Youqiang, Wang Baosheng, Zhao Fubao, et al. Preparation and properties of high fluidity carbon fiber reinforced nylon 66[J]. *Engineering Plastics Application*,2021,49(8):43–47.
- [15] Li H F, Wang Y, Zhang C W, et al. Effects of thermal histories on interfacial properties of carbon fiber/polyamide 6 composites:Thickness, modulus, adhesion and shear strength[J]. *Composites Part A*,2016,85:31–39.
- [16] 于天淼,高华兵,王宝铭,等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. *工程塑料应用*,2018,46(4):139–144.
- Yu Tianmiao, Gao Huabing, Wang Baoming, et al. Research progress of molding process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018,46(4):139–144.
- [17] Lee S, Ham S, Youn S J, et al. Effect of textile PAN-based carbon fibers with rough surface on interfacial adhesion in PA6 composites[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021,60(25):9 088–9 097.
- [18] Liu T F, Tian X Y, Zhang M Y, et al. Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites[J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*,2018,114:368–376.
- [19] 张顶顶,张福华,杨吉祥,等. 碳纤维表面改性及其在尼龙复合材料中的应用研究进展[J]. *工程塑料应用*,2019,47(7):141–147.
- Zhang Dingding, Zhang Fuhua, Yang Jixiang, et al. Research progress on surface modification of carbon fiber and its application in polyamide composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019,47(7):141–147.
- [20] 王立岩,曲日华,张龙云,等. 碳纤维增强尼龙 66 复合材料的制备及性能[J]. *塑料*,2020,49(1):15–19.
- Wang Liyan, Qu Rihua, Zhang Longyun, et al. Preparation and properties of carbon fiber reinforced nylon 66 composite[J]. *Plastics*,2020,49(1):15–19.
- [21] Tong X, Wang Z, Zhang M L, et al. Synthesis, characterization and non-isothermal crystallization kinetics of a new family of poly (ether-block-amide)s based on nylon 10T/10I[J]. *Polymers*,2021, 13(1):72–93.
- [22] Zou G J, Wang P L, Feng W T, et al. Poly(decamethylene terephthalamide) copolymerized with long-chain alkyl dodecanedioic acid:Toward bio-based polymer and improved performances[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2018,135(31):46 531–46 539.
- [23] Feng W T, Wang P L, Zou G J, et al. Synthesis and characterization of semiaromatic copolyamide 10T/10I4 with high performance and flexibility[J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2018,21(1):33–42.