

改性碳纤维增强尼龙 6 复合材料的制备及性能

Preparation and properties of modified carbon fiber reinforced polyamide 6 composites

刘 旭¹, 徐 海², 徐立新³, 张 宏¹, 周 琼²

(1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249;

2 中国石油大学(北京)新能源与材料学院, 北京 102249;

3 招商局海洋装备研究院有限公司, 广东 深圳 518067)

LIU Xu¹, XU Hai², XU Li-xin³, ZHANG Hong¹, ZHOU Qiong²

(1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2 College of New Energy and Materials, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 3 China Merchants Marine and Offshore Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518067, Guangdong, China)

摘要: 通过硝酸酸化处理及尼龙溶液浸渍上浆处理对碳纤维(CF)进行表面改性,制备高强度、高模量,同时具有低熔指和优异加工性能的CF增强尼龙6(PA6)复合材料。采用扫描电镜(SEM)、差示扫描量热仪(DSC)和熔融指数仪等方法,对复合材料的微观结构、力学性能和结晶行为进行测试和表征。结果表明,经过PA6溶液浸渍上浆处理后的CF表面形成了一层PA6薄膜覆盖层,大大增强了CF与PA6基体的结合力,改善了CF的分散性,提升了复合材料整体的强度与模量,改性CF加入量为8%(质量分数)时复合材料拉伸强度提升80.8%,弹性模量提升513.9%。进一步对复合材料结晶行为的分析表明,改性CF的加入能够促进PA6由 γ 晶型向更稳定的 α 晶型转变,提高其结晶温度及结晶速率,使复合材料的结晶更加均匀、完善,从而提高体系黏度,降低复合材料熔融指数,显著提升了复合材料的加工性能。

关键词: 尼龙6;碳纤维;挤出加工;结晶行为

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000274

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2021)04-0128-07

Abstract: The carbon fibers (CF) were surface modified by nitric acid treatment and polyamide 6 (PA6) solution sizing treatment, and a series of CF/PA6 composites with high strength and high modulus, low melting index, and excellent processability were prepared. Scanning electron microscope (SEM), differential scanning calorimeter (DSC) and melt index meter were used to test and characterize the microstructure, mechanical properties and crystallization behavior of the composite materials. The results show that a layer of PA6 film is formed on the surface CF after immersion and sizing treatment with PA6 solution, which greatly enhances the binding force between the fiber and PA6 matrix, and improves the dispersibility of CF. The overall strength and modulus of the composites are improved. The tensile strength of the CF/PA6 is increased by 80.8% and the elastic modulus is increased by 513.9% when the modified CF amount is 8% (mass fraction). The addition of modified CF can promote the transition of PA6 from the γ crystal form to a more stable α crystal form. At the same time, the crystallization temperature and crystallization rate of the composites are increased, so that the crystallization of the composites are more uniform, thereby reducing the melting index of the composite and improving its processing performance.

Key words: polyamide 6; carbon fiber; extrusion processing; crystallization behavior

海洋油气资源开采逐渐向更深海域发展,对于油气输送管道的轻量化需求也变得更加强烈^[1-2]。非金属柔性管与传统的金属管相比,具有轻量化、成本低、易铺设、耐疲劳等突出优势,在海洋油气开采方面具有巨大的应用前景,是未来管道发展的重要趋势^[3-5]。尼龙 6(PA6)具有机械强度高、韧性好、抗压性能优异、耐疲劳、耐蠕变性能好等优点^[6-8],能够作为非金属管道的承压材料,有效防止非金属管道变形,以抵抗管道外部压溃^[9]。

碳纤维(CF)具有高强度、高模量^[10]、大比表面积与长径比^[11]、高导电率等特点^[12],通过将 CF 与 PA6 复合,能够进一步提升 PA6 的力学性能^[13]。Kim 等^[14]制备出生长有氧化锌纳米棒(ZnONR)的碳纤维编织布(WCF)/PA6 复合材料。ZnONR 增加了 WCF 和 PA6 之间的机械互锁及化学相互作用,从而增强了界面结合力,复合材料的冲击强度和面内剪切强度分别较未添加纳米棒时提升了 72% 和 50%。Peng 等^[15]将 CF 进行了聚酰胺-胺(PAMAM)树枝状大分子的表面修饰,增加了 CF 表面的润湿性,同时,PAMAM 的氨基密度高于以往研究中的偶联剂,为纤维与环氧树脂之间形成化学键提供了更多机会,与官能化之前相比,官能化后的界面剪切强度增加了 85%。Varelidis 等^[16]分别通过界面聚合与溶液浸渍法将尼龙 66 均匀地包覆于 CF 的表面上,复合材料受力时,该包覆层能够通过促进裂纹尖端周围的局部塑性变形和钝化裂纹尖端从而吸收更多的断裂能量;同时它还可以充当应力消除介质,减少由成型过程中基体收缩引起的 CF 周围的应力集中,从而改善了复合材料的拉伸性能和冲击性能。

对于非金属管道的承压材料这类大长度的连续型材,往往需要采用挤出成型的加工工艺,这就要求复合材料不仅需要具备优异的力学性能,同时还要具有很好的加工性能、适宜的熔体黏度及结晶性能,以满足管材、异型材的连续加工需求。目前,改性 CF 对于挤出成型的高强度、高模量 PA6 复合材料力学性能、加工性能影响规律的研究报道较少。本工作通过对 CF 分别进行酸化处理与上浆处理,制备了一系列不同改性 CF 比例的 CF/PA6 复合材料,以研究 CF 表面特性对复合材料的微观结构、结晶行为的影响规律,并探讨其对复合材料力学性能、加工性能的影响机制。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验中主要原材料 PA6 为瑞士 EMS/BS 公司生

产;CF 为日本东邦的 IM400-12K 型,丙酮为北京市通广精细化工厂生产,甲酸为山东西亚化工科技有限公司生产,硝酸为上海阿拉丁生化科技有限公司生产,无水乙醇、氨水等均为北京化工厂生产。

1.2 实验过程

1.2.1 CF 表面处理

CF 的预处理:将 CF 长纤维短切至 2 cm,常温下置于丙酮溶液中浸泡 20 h,超声 3 h 使其分离均匀,然后用去离子水多次冲洗以去除残余丙酮,真空干燥后得到表面无杂质的原始 CF。

酸化 CF(aCF)的制备:将预处理后的 CF 与浓硝酸超声处理 30 min,而后在油浴锅中机械搅拌 3 h。将该混合溶液取出并用大量去离子水冲洗,用真空抽滤机抽滤,反复抽滤直至中性,将过滤物置于 80 °C 真空烘箱中干燥 12 h,即得到 aCF。

上浆 CF(sCF)的制备:将预处理后 CF 置于 10% (质量分数,下同)PA6 的甲酸溶液中搅拌并充分混合 3 h,将混合物真空抽滤,然后真空干燥 12 h 以去除残余甲酸溶剂,即得到 sCF。

1.2.2 CF/PA6 复合材料的制备

第一,将 PA6 粒料和不同 CF 置于 80 °C 真空干燥箱中干燥 12 h 以去除水分。第二,按比例分别称取 5%,8%,10% 的 CF,aCF 和 sCF 与相应的 PA6 粒料,采用熔融共混法制备不同 CF/PA6 复合材料。利用 Plasti-Corder 型密炼机进行熔融共混,加工温度 230 °C,速度 40 r/min,混合时间 4 min。第三,待密炼完成后,采用密闭式平板硫化机进行样片热压成型,模压温度 230 °C,压力 10 MPa。热压完成后,将样品与模具迅速转移到冷平板硫化机上,模压温度为室温,压力 10 MPa,直至样品完全冷却定型,即得到不同的 CF/PA6 复合材料。

1.3 测试与表征

1.3.1 力学性能

采用 WDL-5000 N 型万能电子拉力试验机对材料力学性能进行测试。测试样条为长 75 mm,平行段宽 4 mm 的标准哑铃型样条。拉伸速度 50 mm/min,记录样条的应力应变曲线、拉伸强度、断裂伸长率等数据。

1.3.2 熔融指数

采用 XNR-400A 型熔融指数测试仪,温度设定为 230 °C,砝码质量为 2.16 kg,参照国家标准 GB/T3682-2000 进行测试。平均每组测试 5~10 次,消除误差,标号,计算各组熔融指数。

1.3.3 差热扫描量热分析(DSC)

采用 DSC 204 F1 型差示扫描量热仪进行测试,

测试在惰性气体保护下进行。先以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 从室温升温至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 2 min 后降至室温, 以消除样品热历史; 再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降温进行测试, 得到样品的熔点 (T_m)、结晶温度 (T_c) 及结晶度 (X_c) 等参数。

1.3.4 扫描电子显微镜(SEM)

采用 SU8010 型冷场发射扫描电镜观察材料的表面形态, 对于 CF 粉末样品, 表面喷金后进行观察; 对于复合材料, 需将拉伸样条在液氮中脆断, 观察脆断面 CF 与 PA6 基体的结合状态。

2 结果与分析

2.1 改性 CF 对复合材料力学性能的影响

2.1.1 改性 CF 的 SEM 表征

为了研究 CF 经改性处理后其表面形貌的变化,

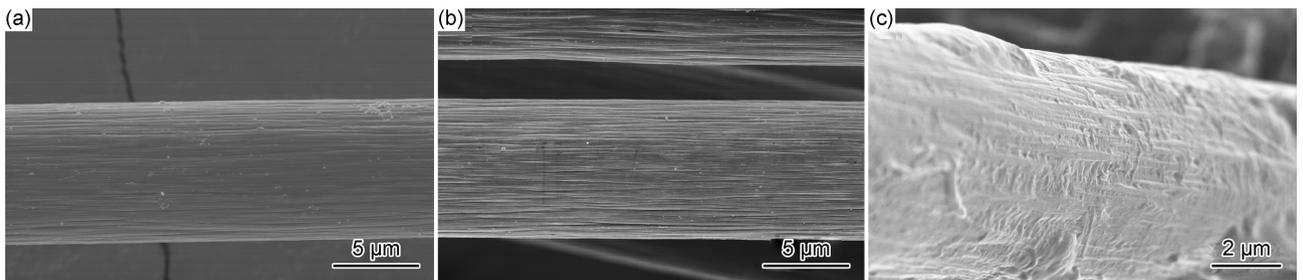


图1 原始未处理 CF (a), aCF (b) 与 sCF (c) 的 SEM 照片
Fig. 1 SEM photos of untreated CF (a), aCF (b) and sCF (c)

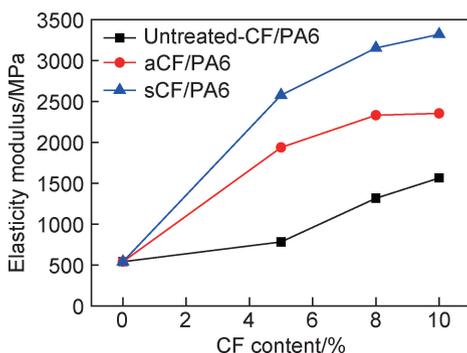


图2 不同纤维含量的 CF/PA6 复合材料的弹性模量
Fig. 2 Elastic modulus of CF/PA6 composites with different fiber contents

未处理 CF 和酸化处理 aCF 都有大幅提升, 且随着 sCF 添加比例的增加, 复合材料模量提升更加明显。这是由于经过 PA6 溶液浸渍后, 在 CF 表面包覆了一层 PA6 覆盖层, 因此在密炼过程中, 这层薄膜可以保护 CF, 以免被过度的剪切力破坏, 共混后该覆盖层可以作为 CF 与 PA6 的界面过渡层, 进一步提高 CF 与

对原始 CF、酸化处理后的 aCF、上浆处理后的 sCF 进行了 SEM 表征, 如图 1 所示。可以看出, 原始 CF (图 1(a)) 表面具有沿纤维轴向排列的沟槽。经酸化处理后的 aCF (图 1(b)) 表面粗糙度增加, 纵向沟槽更加明显, 这主要是由于浓硝酸具有强氧化性, 在纤维表面引入了大量羧基、羟基等氧化基团, 增强了 CF 的表面活性。图 1(c) 是上浆处理后的 sCF 表面局部放大照片, 从中可以明显看出, sCF 除了沿纤维轴向的沟槽外, 纤维表面还出现了大量褶皱, 这表明经上浆处理后, 纤维表面包覆了一层连续的 PA6 薄膜覆盖层。

2.1.2 CF/PA6 复合材料力学性能测试

CF/PA6 复合材料的力学性能是其在使用过程中的关键技术指标, 高强度、高模量复合材料能为管道提供更好的抗变形能力, 以抵抗外部压力。图 2 为不同纤维含量的 CF/PA6 复合材料的弹性模量曲线。可以看出, 上浆处理后的 sCF/PA6 复合材料的模量较

PA6 的相容性, 使复合材料具有更好的抵抗弹性变形的能力, 从而使模量得到提升。图 3 为不同纤维含量的 CF/PA6 复合材料的拉伸强度曲线。从中可以看出, 采用改性处理后的 aCF, sCF 制备的复合材料的拉伸强度在不同比例下均较未处理的 CF 有大幅提升; 且随着 aCF, sCF 添加比例的增加, 复合材料的强

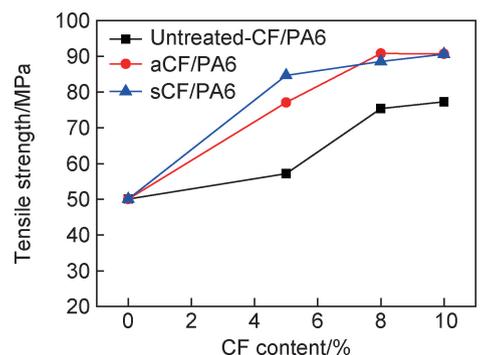


图3 不同纤维含量的 CF/PA6 复合材料的拉伸强度
Fig. 3 Tensile strength of CF/PA6 composites with different fiber contents

度呈逐渐升高的趋势。当纤维添加比例为 5% 时, 上浆处理的 sCF 复合材料强度高于酸化处理的 aCF; 但当纤维含量进一步增加到 8% 时, aCF 的强度反而略高; 当含量达到 10% 时, 二者强度趋于一致。这是由于在纤维含量较低时, 纤维与基体的结合能力对复合材料强度的影响占主导地位, 改性处理后的 CF 与 PA6 基体结合力更好, 且 sCF 的结合力优于 aCF; 随着纤维含量的增加, CF 对 PA6 的补强效果逐渐达到极限, 因此, 在纤维含量较高时, 不同的 CF 改性处理方法对复合材料的补强效果趋于一致。

2.1.3 CF/PA6 复合材料断面的 SEM 表征

分别将采用未处理 CF, aCF 和 sCF 制备的三种 CF/PA6 复合材料拉伸后的样品进行淬断, 利用 SEM 观察断口形貌, 结果如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出, 未处理 CF/PA6 复合材料内部存在大量孔洞, CF 存在团聚, 仔细观察可以看到 CF 与 PA6 基体之间存

在较多空隙, 这说明未经改性处理的 CF 与 PA6 相容性较差, CF 在基体中分散不均匀。复合材料受力时主要为 PA6 基体受力, 在拉伸过程中 CF 因与基体结合能力太弱而被直接拔出, 难以起到传递载荷的作用, 补强效果不佳。从图 4(b) 可以看出, 经酸化处理后的 aCF/PA6 复合材料, 断面孔洞数量较少, CF 分散更加均匀, 能够观察到较多被拉断的 CF 端部, 这表明酸化处理后的 aCF 与 PA6 基体的结合力得到提升, 拉伸过程中 CF 承受了部分载荷。从图 4(c) 可以看出, 经过上浆处理的 sCF 能够更加均匀地分布在 PA6 基体中, 且孔洞数量明显减少, 这表明复合材料断裂时, CF 并未从基体中拔出, 而是承受了更多的载荷而发生断裂。从局部放大照片图 4(d) 中可以看出, CF 与 PA6 基体结合紧密, 且 CF 表面包覆了一层 PA6 界面过渡层, 从而改善了 CF 与 PA6 基体的相容性, 从而更好地传递应力, 起到提升力学性能的效果, 与 2.1.2 中的力学

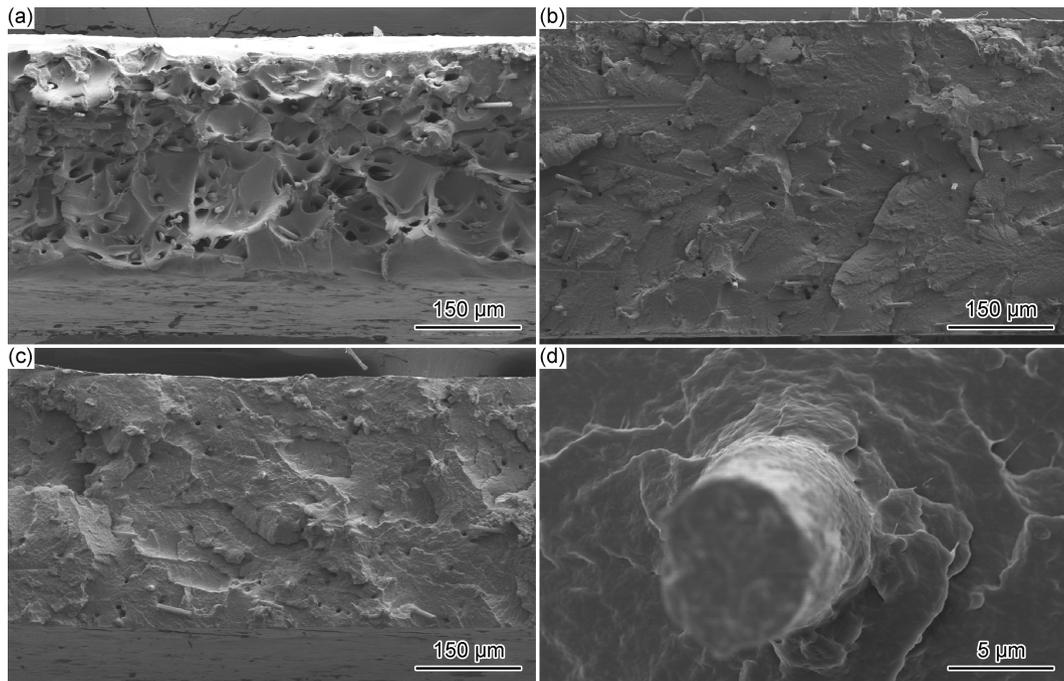


图 4 不同处理方法 CF 增强的复合材料断面 SEM 照片

(a) 未处理 CF/PA6; (b) aCF/PA6; (c) sCF/PA6; (d) sCF/PA6 局部放大图

Fig. 4 SEM photos of the cross sections of composites reinforced with CF of different treatment methods

(a) untreated CF/PA6; (b) aCF/PA6; (c) sCF/PA6; (d) enlarged picture of sCF/PA6

性能测试结果相一致。

2.2 改性 CF 对复合材料加工性能的影响

2.2.1 CF/PA6 复合材料的熔融指数

为研究不同处理方法改性后的 CF 对复合材料加工性能的影响, 对复合材料的熔融指数进行了测试。图 5 为不同处理方法 CF 增强的复合材料的熔融指数对比图。可以看出, 加入了 CF 的各组复合材料的熔

融指数较纯 PA6 均有下降。这表明 CF 的加入阻碍了 PA6 分子链流动, 使得体系黏度增大, 复合材料的流动性降低, 这在挤出加工时, 能使熔体在挤出后更易成型, 不易发生坍塌或者从模具流出等问题, 从而改善复合材料的挤出加工性能。随着 CF 含量的增加, 复合材料的流动性进一步降低, CF 对 PA6 分子链的阻碍作用进一步增强。酸化处理后的 aCF/PA6 复

合材料较未处理组, 熔融指数变化不明显, 说明酸化对熔融指数影响不大。上浆处理后的 sCF/PA6 复合材料较未处理组的熔融指数有一定提升, 推测是由于 PA6 的自润滑效果, sCF 表面的 PA6 薄膜降低了纤维与 PA6 基体的摩擦, 在一定程度上反而增加了流动性, 使得熔融指数上升。

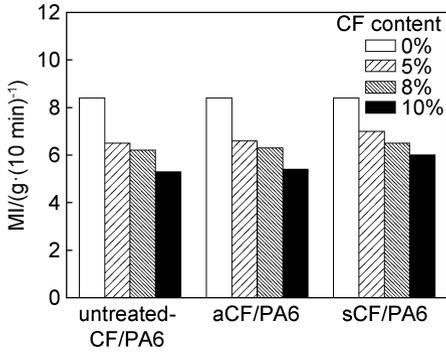


图5 不同处理方法CF增强的复合材料的熔融指数对比

Fig. 5 Comparison of melting index of composites reinforced with CF of different treatment methods

2.2.2 CF/PA6 复合材料的结晶行为

复合材料的结晶行为对其加工性能具有重大影响。

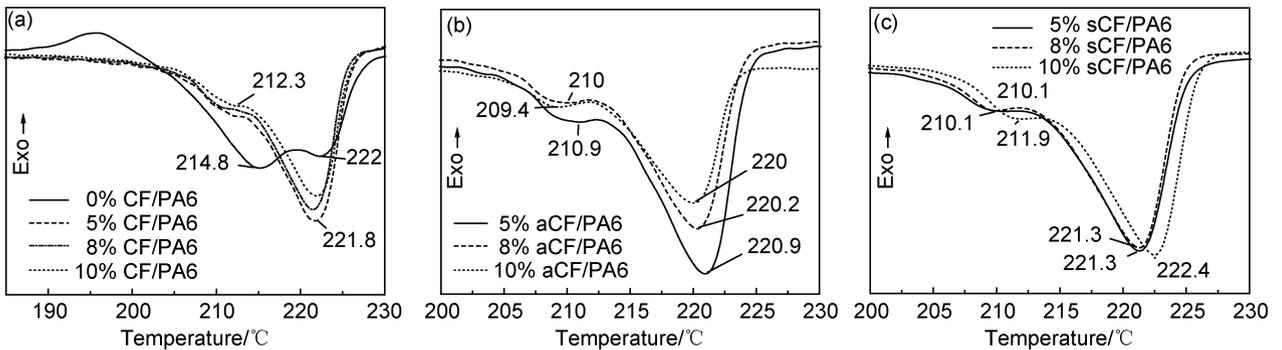


图6 不同处理方法CF增强的复合材料的熔融曲线

(a)CF/PA6; (b)aCF/PA6; (c)sCF/PA6

Fig. 6 Melting curves of composites reinforced with CF of different treatment methods

(a)CF/PA6; (b)aCF/PA6; (c)sCF/PA6

(2) 结晶曲线

图7是不同方法处理的CF/PA6复合材料的降温结晶曲线。从图7(a)中可以看出, 纯PA6结晶峰温度为161.7℃, 熔点低, 结晶温度区间宽, 这表明其晶片薄而不均匀; 加入不同比例CF后, 其结晶峰向高温方向移动, 峰变窄, 这表明复合材料内部晶片变厚且均匀; 结晶温度区间大幅减小, 说明加入CF后, 大大促进了PA6的结晶速率, 且使其结晶更加均匀、完善。通过对比酸化处理和上浆处理的CF/PA6复合材料的结晶曲线(图7(b), (c))可以看出, 经过处理后的

响。通过不同方法改性的CF具有不同的表面状态, 导致其与PA6基体的界面相容性存在差异, 从而使复合材料的结晶行为发生改变。为探究CF的加入对于PA6结晶行为的影响, 对不同处理方法、不同纤维添加比例的CF/PA6复合材料进行了DSC表征, 分别从熔融曲线和结晶曲线对其进行分析。

(1) 熔融曲线

图6为不同处理方法CF增强的复合材料的熔融曲线。从图6(a)中可以看出, 纯PA6熔融时有两个峰, 一个为214.8℃, 另一个为222.0℃, 分别代表PA6的六方γ晶型和单斜α晶型, 其中γ晶型的氢键作用弱于α晶型, α晶型是PA6中最稳定的一种晶型。加入CF后PA6的熔融峰由214.8℃占主导地位变为222.0℃熔融峰占主导, 说明加入CF后改善了PA6的晶型, 诱导PA6在结晶时向α晶型转变; 同时很大程度上降低了γ晶型结晶面积, 214.8℃处熔融峰向低温偏移, 使得PA6的晶体结构更为均一、稳定, 能够更好地传递应力, 从而达到增强效果。通过对比酸化处理和上浆处理的CF/PA6复合材料的熔融曲线(图6(b), (c))可以看出, 不同处理方法对PA6熔融峰影响与未处理CF的变化规律是一致的。

CF复合材料具有更高的结晶温度, 未处理CF/PA6的结晶温度约为180℃, 酸化处理aCF/PA6结晶温度范围在181~182℃, 上浆处理sCF/PA6的结晶温度范围在181~185℃。

利用DSC曲线计算了复合材料的结晶度, 以进一步研究不同CF处理方法对复合材料结晶行为的影响, 其结果如图8所示。可以看出, 未处理CF组与酸化处理的aCF两组纤维对PA6结晶影响趋势相近, 都随着CF的加入使复合材料结晶度下降。这是由于CF在PA6基体内起到异相成核的作用, 同时也阻碍

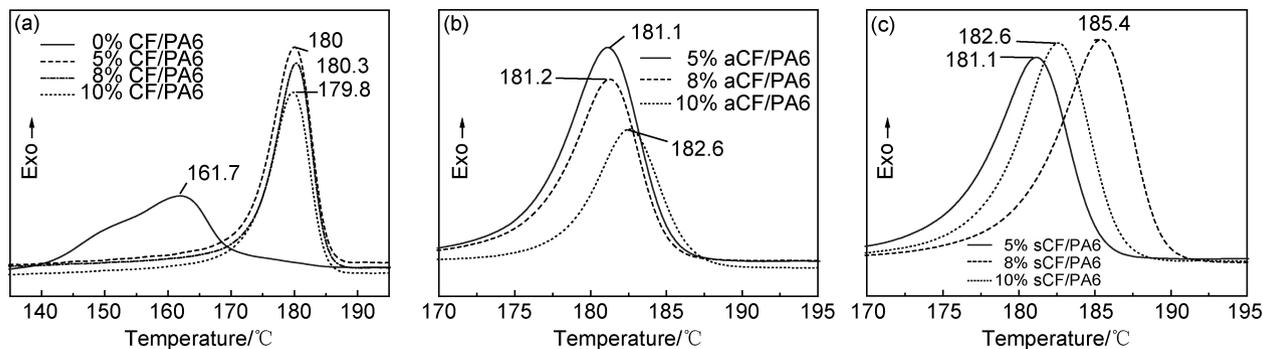


图 7 不同处理方法 CF 增强的复合材料的结晶曲线
(a)CF/PA6; (b)aCF/PA6; (c)sCF/PA6

Fig. 7 Crystallization curves of composites reinforced with CF of different treatment methods
(a)CF/PA6; (b)aCF/PA6; (c)sCF/PA6

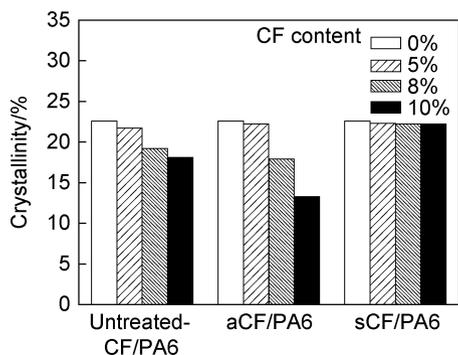


图 8 不同处理方法 CF 增强的复合材料的结晶度对比

Fig. 8 Comparison of crystallinity of composites reinforced with CF of different treatment methods

了分子链运动重排。这与 2.2.1 中熔融指数的测定结果相一致,复合材料熔融指数减小,表明 CF 加入后使体系黏度增大,进一步阻止分子链向晶格排列,从而导致结晶度下降。而经过上浆处理 sCF/PA6 复合材料,不同含量的上浆处理 CF 对于结晶度影响不大,推测这是由于上浆处理后的 sCF 表面附上一层 PA6 薄膜,因此,复合材料基体 PA6 分子链在 PA6 薄膜表面附生结晶环境与本体结晶趋于一致,从而弱化了纤维的加入对复合材料结晶度的影响。

3 结论

(1) 经 PA6 溶液上浆处理的 sCF 表面形成了一层 PA6 薄膜覆盖层,大幅改善了 CF 与基体的相容性。酸化处理与上浆处理对复合材料的强度、模量的提升均随 CF 含量的增加呈上升趋势,直至 CF 含量达 10% 左右趋于平衡。

(2) CF 的加入阻碍分子链运动,有效降低了复合材料的熔融指数,提高体系黏度,使其更有利于挤出成

型加工工艺。

(3) 改性 CF 的加入有效改善了 PA6 晶型,促进 PA6 由 γ 晶型向更稳定的 α 晶型转变,并大大提高其结晶温度和结晶速率,使复合材料内部的结晶更加均匀、完善。

参考文献

- [1] 阎军,英玺蓬,步宇峰,等.深水柔性立管结构技术进展综述[J].海洋工程装备与技术,2019(6):745-749.
YAN J, YING X P, BU Y F, et al. Summary of development of flexible riser structural technology in deep water[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019(6):745-749.
- [2] 余荣华,袁鹏斌.海洋非粘结型柔性软管的性能结构及其研究热点[J].油气储运,2016,35(12):1255-1260.
YU R H, YUAN P B. Structure and research focus of marine unbonded flexible pipes[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(12):1255-1260.
- [3] 王玮,孙丽萍,白勇.水下油气生产系统[J].中国海洋平台,2009,24(6):41-45.
WANG W, SUN L P, BAI Y. Investigation on subsea production systems [J]. China Offshore Platform, 2009, 24(6):41-45.
- [4] 潜凌,李培江,张文燕.海洋复合柔性管发展及应用现状[J].石油矿场机械,2012,41(2):90-92.
QIAN L, LI P J, ZHANG W Y. Development and applications of marine composite flexible pipe[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2):90-92.
- [5] LAMBERT A, DO A T, FELIX H A, et al. Qualification of unbonded dynamic riser with carbon fiber composite armours[C]//ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2012:117-125.
- [6] HUANG H, YAN L, GUO Y, et al. Morphological, mechanical and thermal properties of PA6 nanocomposites co-incorporated with nano- Al_2O_3 and graphene oxide fillers [J]. Polymer, 2020 (188):122119.
- [7] NGUYENTRAN H D, HOANG V T, DO V T, et al. Effect of multiwalled carbon nanotubes on the mechanical properties of car-

- bon fiber-reinforced polyamide-6/polypropylene composites for lightweight automotive parts[J]. *Materials*, 2018, 11(3):429-441.
- [8] 殷小春,尹有华,成迪,等. 正应力支配下混合顺序对 PA6/HDPE/CNTs 体系结构及性能的影响[J]. *材料工程*, 2020, 48(2):87-93.
- YIN X C, YIN Y H, CHENG D, et al. Microstructure and properties of PA6/HDPE/CNTs blends of different mixing sequences under normal stress dominated flow field[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(2):87-93.
- [9] 李培耀,王俊荣,于曙光,等. 耐高温输油管道内衬材料的改性研究[J]. *塑料工业*, 2004, 32(12):22-24.
- LI P Y, WANG J R, YU S G, et al. Investigation of modification of inner-liner for heat resistant oil pipe[J]. *China Plastics Industry*, 2004, 32(12):22-24.
- [10] TIBBETTS G G, LAKE M L, STRONG K L, et al. A review of the fabrication and properties of vapor-grown carbon nanofiber/polymer composites [J]. *Compos Sci Technol*, 2007, 67(7):1709-1718.
- [11] COLEMAN J N, KHAN U, GUN' KO Y K. Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes[J]. *Adv Mater*, 2006, 18(6):689-706.
- [12] ESAWI A M K, FARAG M M. Carbon nanotube reinforced composites: potential and current challenges[J]. *Mater Design*, 2007, 28(9):2394-2401.
- [13] MAZUR K, KUCIEL S, SALASINSKA K. Mechanical, fire, and smoke behaviour of hybrid composites based on polyamide 6 with basalt/carbon fibres[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(28/30):3979-3991.
- [14] KIM B J, CHA S H, KANG G H, et al. Interfacial control through ZnO nanorod growth on plasma-treated carbon fiber for multiscale reinforcement of carbon fiber/polyamide 6 composites [J]. *Materials Today Communications*, 2018, 17(12):438-449.
- [15] PENG Q, LI Y, HE X, et al. Interfacial enhancement of carbon fiber composites by poly(amido amine) functionalization [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74(1):37-42.
- [16] VARELIDIS P C, MCCULLOUGH R L, PAPASPYRIDES C D. The effect on the mechanical properties of carbon/epoxy composites of polyamide coatings on the fibers[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(12):1813-1823.

收稿日期:2020-03-28;修订日期:2020-06-06

通讯作者:周琼(1966—),女,教授,博士生导师,研究方向为高性能高分子材料,联系地址:北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)(102249),E-mail:zhouqiong_cn@163.com

(本文责编:宗希宽)