碳纤维改性聚酰胺复合材料力学性能与结晶性能研究

何 琛[1],吴经锋[2],张军强[1],陈 曦[1],王扬志[3]

(1.国网陕西省电力有限公司经济技术研究院,陕西 西安 710061;2.国网陕西省电力有限公司,陕西 西安 710001;3.聊城大学,山东 聊城 252000)

摘 要:对碳纤维(CF)进行硅烷偶联剂表面处理,采用熔融共混法制备CF增强聚酰胺6(PA6)复合材料,系统研究纤维含量对硅烷改性碳纤维(K-CF)/PA6复合材料力学性能、热学性能和结晶性能的影响。结果表明:K-CF的引入能够显著提升复合材料的拉伸强度、冲击强度和弯曲强度。当CF质量分数为10%时,K-CF/PA6复合材料的拉伸强度、冲击强度及弯曲强度均显著高于CF/PA6复合材料。K-CF/PA6复合材料的拉伸断口呈纤维断裂形貌,而未处理的CF/PA6复合材料则表现为纤维拔出形貌,表明前者纤维与基体间的界面黏附性显著增强。K-CF的引入能够提高复合材料的结晶度,诱导PA6基体由γ晶型向热力学稳定性更高的α晶型转变,在纤维界面处形成横晶结构。

关键词:碳纤维;聚酰胺;力学性能;结晶性能

中图分类号:TQ327.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0049-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.010

Study on Mechanical Properties and Crystallization Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyamide Composites

HE Chen[1], WU Jingfeng[2], ZHANG Junqiang[1], CHEN Xi[1], WANG Yangzhi[3]

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co. , Ltd. , Xi'an 710061, China;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Co. , Ltd. , Xi'an 710001, China;
3. Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: Silane coupling agent surface treatment was performed on carbon fibers (CF), and CF-reinforced polyamide 6 (PA6) composites were prepared via melt blending. The effects of fiber content on the mechanical properties, thermal properties, and crystallization properties of silane-modified carbon fiber (K-CF)/PA6 composites were systematically investigated. The results showed that the introduction of K-CF significantly improved the tensile strength, impact strength, and flexural strength of the composites. When the CF mass fraction was 10%, the tensile strength, impact strength, and flexural strength of the K-CF/PA6 composites were all significantly higher than those of the CF/PA6 composites. The tensile fracture surface of the K-CF/PA6 composites exhibited a fiber fracture morphology, whereas the untreated CF/PA6 composites showed a fiber pull-out morphology, indicating that the interfacial adhesion between fibers and matrix was significantly enhanced in the former. The introduction of K-CF increased the crystallinity of the composites and induced the transformation of the PA6 matrix from the γ crystal form to the more thermodynamically stable α crystal form, forming a transcrystalline structure at the fiber interface.

Keywords: CF; PA; Mechanical properties; Crystallization properties

收稿日期Submitted date 2025-09-17;修回日期Revised date 2025-10-23;录用日期Accepted date 2025-11-20

基金项目:国网陕西省电力有限公司成本项目(B626JY25Z015)

联系人,hechensgcc@126.com

引用本文:何琛,吴经锋,张军强,等.碳纤维改性聚酰胺复合材料力学性能与结晶性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):49-54.

Citation: HE C, WU J F, ZHANG J Q, et al. Study on mechanical properties and crystallization properties of carbon fiber reinforced polyamide composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 49-54.

高分子复合材料兼具良好的力学强度与轻质特性，在塑料工业中得到广泛应用[1-2]。其中，短纤维增强热塑性聚合物复合材料因性能优良，在航空航天和汽车工业等诸多领域得到广泛应用[3-4]。在众多热塑性聚合物中，聚酰胺6(PA6)因具有良好的热稳定性、低介电常数和高拉伸强度，已成为极具竞争力的候选材料[5-7]。碳纤维(CF)具备良好的力学性能、热性能和电性能，比强度很高[8-10]，已成为聚合物复合材料中常用的增强材料之一。近年来，CF增强复合材料引起了许多研究人员的关注。值得注意的是，复合材料的性能不仅取决于基体和纤维的类型，还受到制造工艺、纤维长度及纤维与基体黏附力等因素的影响，这些因素之间存在着紧密关联。

然而，尽管CF具有出色的力学特性，未经处理的CF普遍存在与聚合物基体黏附性差的问题[11-12]。因此，研究人员对纤维表面进行改性研究，如化学修饰、表面接枝、添加相容剂或采用偶联剂处理[13-16]，以改善复合材料界面黏附性能，确保应力从热塑性基体向纤维有效传递。在诸多改性方法中，硅烷处理因相容性良好、能有效增强纤维与聚合物基体间的界面结合强度，被广泛用于纤维或无机填料的表面改性[17]。其中，有机硅烷效果显著、工业化程度高且成本低廉，是应用最广泛的一类产品[18-19]。JIANG等[20]研究表明，与未处理的CF相比，采用不同硅烷偶联剂对CF进行表面硅烷化，CF/PU复合材料的拉伸强度提高18.3%。LI等[17]采用硅烷偶联剂(SGS)改性CF增强聚酰亚胺材料。结果表明，该复合材料的拉伸强度和界面附着力均得到提高。岑浩等[21]研究发现，硅烷偶联剂改性CF/环氧树脂复合材料的界面性能提升，剪切强度提高51.41%。硅烷处理可有效改善界面与力学性能，但关于力学性能提升的内在机理研究较少。在复合材料性能研究中，微观与宏观分析的关联至关重要。对于热塑性复合材料而言，其力学性能根本上由聚合物基体的微观结构及纤维/基体界面特性决定。以纤维增强PA6复合材料为例，其力学性能还受到PA6基体结晶形态的影响，而该形态又受制于加工条件。然而，目前的研究很少从微观与宏观相结合的角度，系统探讨硅烷处理纤维对基体晶体结构及其最终热学与力学性能的影响。

本研究旨在探究硅烷偶联剂(KH550)处理CF对半结晶性聚酰胺基复合材料晶体结构及力学性能的影响，探索复合材料结晶微观结构与宏观力学性能之间的关系。采用熔融挤出共混制备经KH550处理后的CF增强PA6复合材料。采用拉伸试验、冲击试验和三点弯曲试验分析复合材料的宏观力学性能，对复合材料的结晶度(X_c)与结晶结构进行表征。

1 实验部分

1.1 主要原料

CF，PX30，日本东丽株式会社；PA6，1013B，宇部兴产株式会社；KH550，KBM-903，南京和润偶联剂有限公司；丙酮，分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，Process11，美国赛默飞世尔科技公司；注塑机，SI-50-7S，日本东洋株式会社；万能拉力测试仪，6800，美国英斯特朗公司；摆锤冲击试验机，CEAST 9050，美国英斯特朗公司；动态热机械分析仪(DMA)，DMA1，瑞士梅特勒托利多公司；X射线衍射(XRD)，Empyrean，英国马尔文-帕纳科公司；扫描电子显微镜(SEM)，sigma360，德国蔡司公司；差示扫描量热仪(DSC)，DSC3，瑞士梅特勒托利多公司；偏光显微镜(POM)，Axio Imager 2，北京普瑞赛司仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 KH550改性CF (K-CF)的制备

将CF置于丙酮中浸泡2 h，以清洁和极化纤维表面。用去离子水洗涤至中性后，将CF浸泡于KH550的混合溶液(以一定比例的丙酮和水为溶剂，KH550质量分数为0.5%)中，浸泡1 h。随后，将K-CF在120 ℃下真空干燥2 h。

1.3.2 CF/PA6、K-CF/PA6复合材料的制备

将PA6放入真空干燥箱中，在90 ℃下干燥12 h。采用双螺杆挤出机将CF或K-CF分别与PA6熔融共混，PA6从主料斗加入，CF则借助螺杆旋转自动从纤维喂料口喂入。挤出过程中的剪切力将CF剪切成短纤维，分散于PA6基体中。双螺杆挤出机各段加工温度分别为230、240、240、250、240 ℃。调控CF与K-CF的添加质量分数分别为5%和10%，分别制备CF和K-CF增强PA6复合材料。按照添加质量分数分别命名为CF(5%)/PA6、CF(10%)/PA6、K-CF(5%)/PA6和K-CF(10%)/PA6。所得复合材料于90 ℃真空干燥24 h，用注塑机制备标准样条，用于后续力学性能测试。

1.4 性能测试与表征

拉伸性能测试：按照GB/T 1040.1—2025进行测试。样品在230、235、240 ℃ 3段温度及10 MPa压力下注塑成型，拉伸性能测试样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。采用万能拉力测试仪，在10 mm/min的拉伸速率下测定材料的拉伸强度及断裂伸长率。测试5次，取平均值。

冲击性能测试：按照GB/T 1843—2008进行测试。A型缺试样，标准样条尺寸为150 mm×10 mm×4 mm，缺口宽度为2 mm。采用摆锤冲击试验机测定材料的冲击强度，在悬臂梁试验条件下对混合物样品进行测试，测试5次，取平均值。

弯曲性能测试：按照GB/T 8812.2—2007进行测试。标准样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，采用三点弯曲法进行测试。平行测试5次，取平均值。

DMA测试：使用动态热机械分析仪，在测试温度为20~100 ℃、频率为1 Hz、升温速率为3 ℃/min的三点弯曲模式下进行测试。样品尺寸为50 mm×10 mm×4 mm。

DSC测试：采用差示扫描量热仪对复合材料的结晶行

为和熔融行为进行表征。将质量为6~8 mg的样品从30 ℃加热至300 ℃，升温速率为10 ℃/min，在此温度下保持5 min，以消除热历史。快速降至室温后，样品再以10 ℃/min的速率加热至260 ℃进行第二次加热实验。复合材料中PA6的X_c计算公式为：

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{(1-w)\Delta H_m^0}\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中：ΔH_m为测试样品的熔融焓，J/g；ΔH_m^0为PA6 100%结晶的熔融焓，取190.9 J/g[22]；w为复合材料中CF的质量分数。

XRD测试：采用X射线衍射仪在室温下对样品进行测试，扫描速率为2 (°)/min，扫描范围为10°~30°。

SEM测试：对样品断面进行镀金处理后，进行观察。

POM测试：将复合材料在200 ℃热台上保持5 min，以消除样品制备过程中产生的应力。以10 ℃/min的冷却速率冷却至室温，在冷却过程中进行形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 CF表面硅烷化处理及其界面结合机理

图1为硅烷偶联剂连接CF与PA6的界面反应机理。从图1可以看出，KH550表面的乙氧基(—OC_2H_5)被水解为反应性羟基，然后和CF表面的羟基在高温下进行脱水缩合。KH550的氨基官能团(—NH_2)与PA6的端羧基(—COOH)在双螺杆挤出机高温熔融共混过程中发生反应，生成酰胺基，该共价键作为化学桥梁将CF与PA6连接，从而有效提高二者的界面相容性。

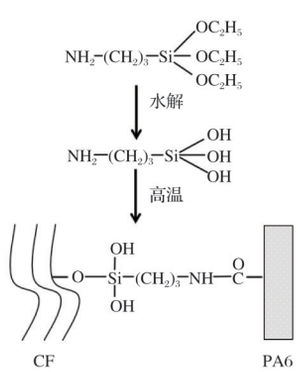


图1 硅烷偶联剂连接CF与PA6的界面反应机理

Fig.1 Interface reaction mechanism of silane coupling agent connecting CF and PA6

图2为CF和K-CF的SEM照片。从图2可以看出，未处理的CF表面呈洁净光滑状态。经KH550处理后的CF表面显著粗糙化，伴有微米级颗粒附着，该现象可归因于硅烷层在纤维表面的沉积。

2.2 CF/PA6复合材料的力学性能

图3为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的拉伸应力-应变曲线，表1为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的拉伸性能。从图3和表1可以看出，PA6基体呈现典型的半结晶聚合物拉伸特征，具有明显的屈服行为和较高的断裂伸长率。与之相比，所有复合材料样品均表现出近似线性的拉伸行为，没有冷流行为出现，断裂伸长率降至约100%，表明CF的加入能够限制PA6基体的塑性变形。随着CF含量的增加，复合材料拉伸强度和拉伸模量显著提高，这归因于CF自身优异的力学性能。其中，K-CF/PA6复合材料提升幅度最为显著，当K-CF质量分数为10%时，拉伸强度最大，为167.51 MPa，较PA6提高约175%。复合材料的拉伸性能主要取决于纤维取向及纤维-基体界面黏结质量。在本研究体系中，CF在PA6基体中呈随机取向，因此拉伸强度和拉伸模量主要受界面结合质量制约。KH550在纤维和基体间构建牢固的化学键合，使K-CF/PA6复合材料在裂纹扩展过程中可以承受更高的应力载荷和吸收更多的能量，从而表现出更优的拉伸强度。

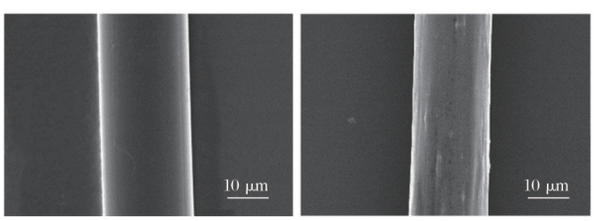


图2 CF和K-CF的SEM照片

Fig.2 SEM images of CF and K-CF

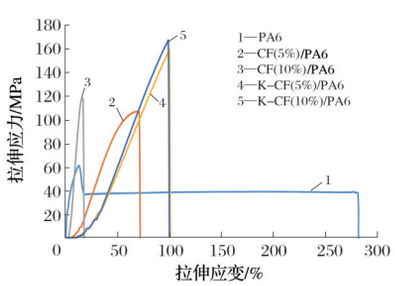


图3 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

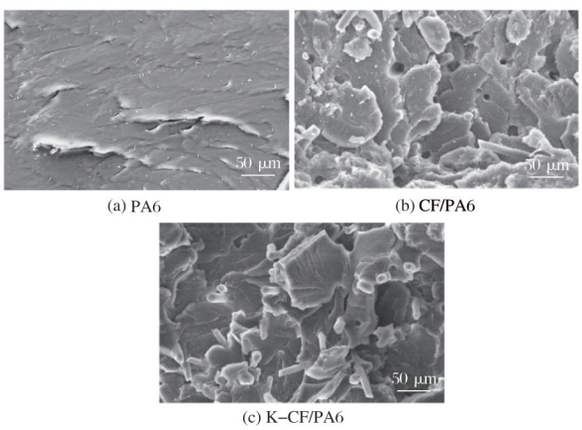
表1 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的拉伸性能

Tab.1 Tensile properties of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	拉伸模量/MPa
PA6	61.02	281.36	332.86
CF(5%)/PA6	107.37	72.14	773.87
CF(10%)/PA6	118.77	17.36	1 156.35
K-CF(5%)/PA6	159.69	101.72	2 120.60
K-CF(10%)/PA6	167.51	99.18	2 633.35

图4为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料断面的SEM照片。从图4可以看出，PA6基体在断裂前呈现明显的塑性形变特征。CF/PA6复合材料断面中可见大量CF贯穿基体，且CF和PA6之间存在明显的界面间隙。这会导致复合材料在受力时易引发纤维与基体之间脱黏，使纤

维转变为聚合物基体中的缺陷源，诱发材料早期断裂，这也是复合材料断裂伸长率显著降低的原因之一。相比之下，K-CF/PA6复合材料断面中，CF和PA6基体紧密黏附，孔洞缺陷明显减少。失效模式以基体开裂和纤维断裂为主，表明经KH550处理的CF与基体间形成强界面结合作用，该结果与前述拉伸性能的变化趋势一致。



(a) PA6　(b) CF/PA6　(c) K–CF/PA6

图4　PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料断面的SEM照片

Fig.4 SEM images of cross-sections of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

图5为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的冲击强度。从图5可以看出，PA6的冲击强度为7.83 kJ/m^2。添加CF后，复合材料的冲击强度有所提高，但随着CF含量的增加，冲击强度未见大幅增长。CF(5%)/PA6和CF(10%)/PA6的冲击强度分别为11.26 kJ/m^{2}和12.74 kJ/m^2，较PA6分别提高约44%和63%。添加K-CF后，K-CF(10%)/PA6的冲击强度达到18.32 kJ/m^2，为所有样品中最高值，较PA6提高约134%。上述结果表明，KH550表面处理可显著提升CF/PA6复合材料的抗冲击性能。

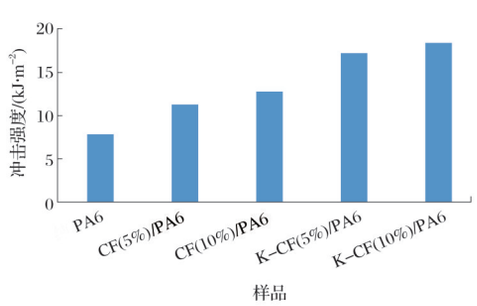


图5　PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的冲击强度

Fig.5 Impact strength of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

图6为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的弯曲应力-应变曲线，表2为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的弯曲性能。从图6和表2可以看出，CF的加入能够显著提高复合材料的弯曲强度，经硅烷处理后进一步增强。CF(5%)/PA6和CF(10%)/PA6复合材料的弯曲强度分别为75.99 MPa和90.78 MPa，较PA6的69.78 MPa分别提高约9%和30%。而K-CF(5%)/PA6和K-CF(10%)/PA6复合材料的弯曲强度分别达到122.32 MPa和151.91 MPa，较PA6分别提高约75%和118%。该变化规律与前述拉伸强度和冲击强度的结果一致，可归因于CF自身的高强度与界面相互作用的协同效应，协同增强复合材料的承载能力。

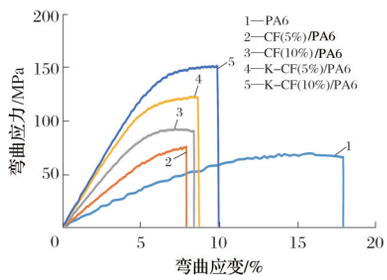


图6　PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的弯曲应力-应变曲线

Fig.6 Flexural stress-strain curves of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

表2　PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的弯曲性能

Tab.2 Flexural properties of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

样品	弯曲强度/MPa	弯曲断裂应变/%
PA6	69.78	17.93
CF(5%)/PA6	75.99	7.94
CF(10%)/PA6	90.78	8.41
K-CF(5%)/PA6	122.32	8.66
K-CF(10%)/PA6	151.91	9.90

DMA通过监测材料在温度及频率场作用下的力学响应变化来表征其机械性能，可提供储能模量、损耗模量和阻尼因子(tan δ)随温度变化的信息。图7为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的DMA曲线。从图7a可以看出，储能模量代表材料抵抗弹性形变的能力，随着CF含量的增加，CF/PA6复合材料的储能模量逐渐提高。在20 ℃时，K-CF(10%)/PA6的储能模量为7 440 MPa，较PA6的2 030 MPa提高约267%。其原因在于K-CF与PA6基体间良好的界面相容性。纤维与基体间的强相互作用使应力可以有效传递，这一点已由SEM结果所证实。

损耗模量表征材料的能量耗散能力，通常以热或分子链重排的形式体现。复合材料中同时存在运动和相对静止的分子链段，变形时静止链段较运动链段能存储更多能量。这同时反映聚合物的黏性特性，提供流动过程中黏性或能量耗散的信息。从图7b可以看出，CF/PA6复合材料的损耗模量随着CF含量的增加而增加。这表明CF能够限制PA6分子链段的运动，复合材料的黏度也因纤维的存在而提高。

tan δ用于表征材料的相对黏性与弹性行为。tan δ峰值对应的温度通常被认为是玻璃化转变温度(t_g)。纤维的引入会限制聚合物分子链的运动能力，通常会使t_g升高。从图7c可以看出，随着CF含量的增加，tan δ峰值呈下降趋势，这可能是因为CF的引入能够削弱PA6分子间的极性/氢键相互作用。进一步对比CF(5%)/PA6、CF(10%)/PA6与

K-CF(5%)/PA6和K-CF(10%)/PA6可知，经KH550改性后，tan δ峰值明显回升，且随CF含量的增加而增大，表明良好的界面结合，使刚性纤维对分子链运动的限制作用得以充分发挥。

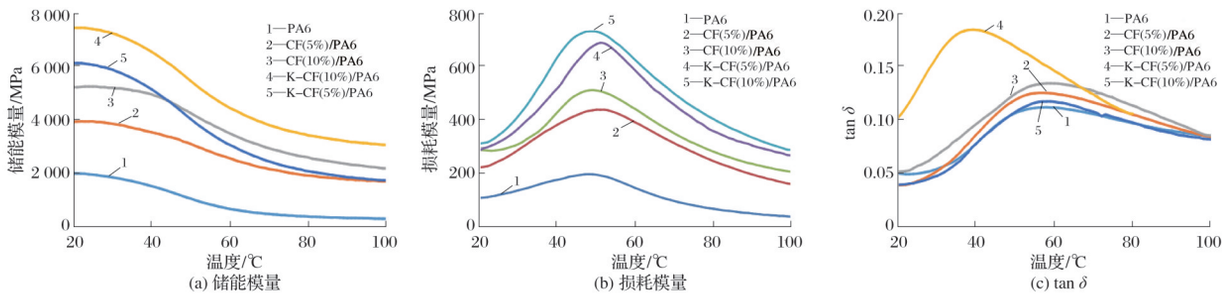


图7 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的DMA曲线

Fig.7 DMA curves of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

2.3 CF/PA6复合材料的结晶行为与微观结构

PA6作为半结晶聚合物，其X_c与晶型结构直接决定材料的物理性能。图8和图9分别为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的熔融结晶温度(t_{mc})和冷结晶温度(t_c)。从图8和图9可以看出，与PA6相比，添加CF或K-CF后，复合材料的t_{mc}向高温方向移动，结晶峰由“宽而广”向“窄而尖”转变。这表明结晶速率加快，X_c提高。与此同时，复合材料的t_c向低温方向移动，冷结晶峰则由“窄而尖”向“宽而广”转变，逐渐趋于消失。这说明复合材料的结晶能力逐渐增强，可供分子链重排的非晶区比例减少。

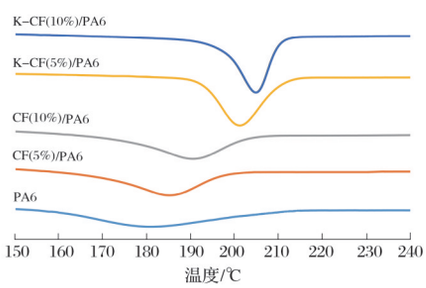


图8 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的t_{mc}

Fig.8 t_{mc} of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

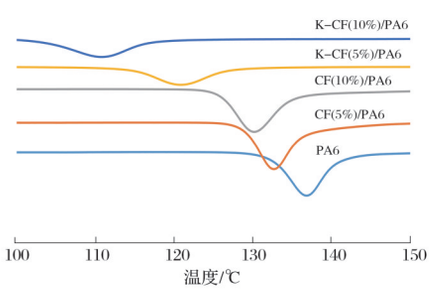


图9 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的t_c

Fig.9 t_c of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

表3为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的结晶性能。从表3可以看出，CF的加入能够提高PA6在非等温条件下的结晶速度和X_c。同时，K-CF/PA6的t_{mc}和X_c均显著高于CF/PA6。这表明KH550处理优化CF与PA6基体间的界面结合，可以更有效地提升PA6的结晶性能。

表3 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的结晶性能

Tab.3 Crystallization properties of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

样品	t_c/℃	Δt_h/℃	t_{mc}/℃	Δt_c/℃	X_c/%
PA6	136.72	110.93	179.42	68.56	22.3
CF(5%)/PA6	132.67	114.44	184.09	65.42	25.8
CF(10%)/PA6	130.81	119.29	189.25	61.91	30.2
K-CF(5%)/PA6	121.52	111.84	199.76	43.25	36.1
K-CF(10%)/PA6	111.21	124.96	203.52	47.63	40.7

注：Δt_h为过热度，即t_c与熔点的差值。

图10为PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的XRD谱图。PA6存在多种晶型，其中α晶型和γ晶型较为常见[23]。从图10可以看出，PA6基体以γ晶型为主，其特征是在22°(100晶面)处呈现一个强衍射峰；在23°(01+200晶面)处出现一个弱峰。CF/PA6和K-CF/PA6复合材料主要形成热力学稳定性更高的α晶型。其在21°(200晶面)和24°(002+202晶面)处显示出两个特征衍射峰。结果表明，CF的引入会诱导PA6基体由γ晶型向α晶型转变。HORIUCH等[24]研究表明，γ晶型断裂韧性优于α晶型，这可能是PA6表现出韧性拉伸行为的另一个原因。

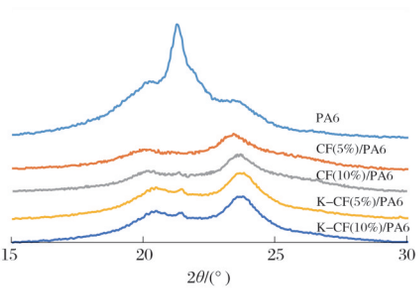
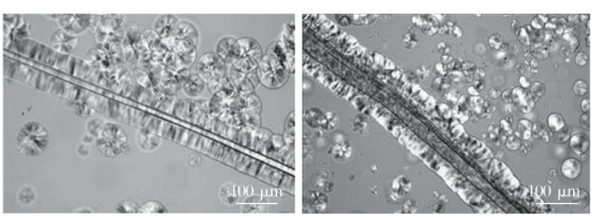


图10 PA6、CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的XRD谱图

Fig.10 XRD patterns of PA6, CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

图11为CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的POM照片。从图11可以看出，CF/PA6复合材料呈细小且分散均匀的球晶形态。引入K-CF后，部分晶体沿硅烷处理CF表面取向生长。这种具有特定界面取向的微观结构被确认为横

晶[25]。相比之下，未经处理的CF表面未观察到横晶，这归因于其表面光滑且呈化学惰性。上述结果表明，KH550处理能够显著提高CF对PA6的成核活性，同时促进晶型转变的发生。经KH550处理后，K-CF表面富含羟基和氨基活性基团，增强纤维与基体间的界面相互作用，从而促进横晶的形成。相比之下，未经处理的CF表面光滑且呈化学惰性，仅能诱导少量异质成核位点，结晶成核密度较低。这也可以解释K-CF/PA6与PA6和CF/PA6相比具有更高的X_c的原因。因此，K-CF/PA6力学性能的提升归因于3个关键因素：CF的增强效应、PA6基体X_c的提高以及晶型的转变。



(a) CF/PA6 (b) K–CF/PA6

图11 CF/PA6和K-CF/PA6复合材料的POM照片

Fig.11 POM images of CF/PA6 and K-CF/PA6 composites

3 结论

本研究采用熔融挤出共混制备CF/PA6复合材料。力学测试结果表明，经KH550处理的K-CF/PA6复合材料的拉伸强度、冲击强度和弯曲强度均显著高于未处理的CF/PA6复合材料。CF的硅烷处理有效增强纤维与基体之间的界面结合强度。拉伸断面的形貌分析表明，K-CF/PA6复合材料的失效模式以基体开裂和纤维断裂为主，而未经处理CF/PA6复合材料则主要表现为CF/基体脱黏。DMA测试结果表明，KH550处理能够显著提高K-CF/PA6复合材料的储能模量和损耗模量。从结晶性能来看，K-CF/PA6复合材料的t_c降低，t_{mc}升高，X_c增加，同时K-CF发挥异相成核作用，诱导PA6基体由γ晶型向热力学稳定性更好的α晶型转变。此外，纤维表面横晶结构的形成进一步强化界面黏附性。综上所述，对CF进行KH550硅烷处理是显著提升PA6复合材料综合力学性能的有效途径。

参考文献

[1] 武嘉, 陈岩, 丁金娜, 等. 半芳香族耐高温聚酰胺(PA6T/10T/66)的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(11): 16-19.

[2] 张伟, 冯春明, 李强, 等. 玻纤布增强核壳颗粒SiO_2@(1, 2-PB/EPDM)填充聚烯烃复合材料性能的研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 46-50.

[3] 明越科, 黄润鹏, 范英, 等. 纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 184-191.

[4] 杨铮鑫, 李光宣, 党鹏飞, 等. 石墨烯增强碳纤维复合材料层合板制备技术及其性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 14-18.

[5] 王瑞雪, 周家良, 胡泽旭, 等. 改性石墨烯增强聚酰胺6复合树脂的抗菌和热稳定性[J]. 合成纤维, 2025, 54(6): 1-6.

[6] 王家飞. 基于超支化聚酰胺-胺改性的高导电间位芳纶的制备及电磁屏蔽性能研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2024.

[7] 杨汉彬, 张圣明, 吴宇豪, 等. 聚酰胺6基弹性纤维的制备及其结构与性能[J]. 纺织学报, 2023, 44(3): 1-10.

[8] 张裕恒, 王继辉, 魏建辉, 等. 湿热环境下碳纤维增强乙烯基树脂复合材料长期力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1406-1416.

[9] UETANI K, ATA S, TOMONOH S, et al. Elastomeric thermal interface materials with high through-plane thermal conductivity from carbon fiber fillers vertically aligned by electrostatic flocking[J]. Advanced Materials, 2014, 26(33): 5857-5862.

[10] SHEN L, WANG F Q, YANG H, et al. The combined effects of carbon black and carbon fiber on the electrical properties of composites based on polyethylene or polyethylene/polypropylene blend[J]. Polymer Testing, 2011, 30(4): 442-448.

[11] 王源升, 朱珊珊, 姚树人, 等. 碳纤维表面改性及对其复合材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(2): 16-20.

[12] 郑红伟, 张泽凯, 郭增贤, 等. 碳纤维增强热塑性工程塑料研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(1): 180-185.

[13] 张静静, 梁森, 汤超. 微波对碳纤维的改性作用及其对电子束固化CFRP界面性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3900-3911.

[14] MEI L, HE X D, LI Y B, et al. Grafting carbon nanotubes onto carbon fiber by use of dendrimers[J]. Materials Letters, 2010, 64(22): 2505-2508.

[15] GAMZE KARSLI N, AYTAC A, AKBULUT M, et al. Effects of irradiated polypropylene compatibilizer on the properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 84: 74-78.

[16] 王涣翔, 赵刚, 徐剑. 硅烷偶联剂改性金属加热元件提高碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接强度[J]. 复合材料科学与工程, 2024(5): 76-84.

[17] LI J. Effect of silane coupling agent on the tensile properties of carbon fiber-reinforced thermoplastic polyimide composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2010, 49(4): 337-340.

[18] ZHOU W W, CHEN J, GUO Z F, et al. Preparation of short carbon fiber reinforced photosensitive resin and composite material properties study[J]. Polymer Engineering & Science, 2024, 64(10): 4890-4903.

[19] 杨天赐, 邓赛, 贾清秀, 等. 硅烷偶联剂KH550改性生物基PA56纤维及其与橡胶材料的黏合性能研究[J]. 橡胶工业, 2026, 73(8): 563-572.

[20] JIANG S, LI Q F, ZHAO Y H, 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.

[21] 岑浩, 杨洪斌, 傅雅琴. 硅溶胶改性碳纤维对碳纤维/环氧树脂复合材料界面性能影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 32-36.

[22] 王海利, 黄仁军, 吴盾, 等. 热氧老化对尼龙6结晶行为与性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(8): 88-92.

[23] 黄映珊. 不同晶型PA6的可控制备及染色性能的研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.

[24] HORIUCHI T, YAMANE H, TAKAHASHI M, et al. Effects of crystalline structure of polyamide 6 on mechanical and tribological properties of polyamide/polyethylene blends[J]. Journal of the Society of Materials Science, 1996, 45(12): 1290-1295.

[25] 咸贵军, 沈烈, 益小苏. PP/GF复合材料横晶结构对界面剪切强度的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(6): 118-120.