文章编号:1674-2869(2024)06-0637-07

# 端羟基超支化聚酯脂肪酸酯对尼龙6/玻璃纤维复合材料性能的影响

梁雪婷[1,2,3],张道洪*[1,2,3]

1. 催化转化与能源材料化学教育部重点实验室(中南民族大学),湖北 武汉 430074;
2. 催化材料科学湖北省重点实验室(中南民族大学),湖北 武汉 430074;
3. 超支化聚合物合成与应用技术湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430074

**摘 要**:玻璃纤维与尼龙的性质存在差异,其界面相互作用较弱,导致所得复合材料的机械性能低且表面粗糙。利用脂肪酸改性端羟基超支化聚酯(H24)合成了不同脂肪酸链长的端羟基超支化聚酯脂肪酸酯(H24-*n*,*n*=8,12,16,18),用于制备尼龙6/玻璃纤维复合材料。利用傅里叶变换红外光谱、氢-1核磁共振氢谱和凝胶渗透色谱表征了聚合物的化学结构和分子量。系统研究了H24-*n*的脂肪酸链长对尼龙6/玻璃纤维复合材料的机械性能、加工性能和热性能的影响规律。复合材料的综合性能随H24-*n*末端脂肪酸链长度的增大而提高;复合材料的流动性能随H24-18用量的增加而提高,而其机械性能则呈现先升高后降低的趋势。与空白样相比,经质量分数为0.9%的H24-18改性的复合材料的熔融指数、拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别提升了73.04%、14.53%、5.60%和9.71%。通过扫描电子显微镜、差示扫描量热法等技术分析了H24-*n*在提升复合材料性能方面的作用机制。

**关键词**:超支化聚合物;玻璃纤维;尼龙;复合材料;流动性能;力学性能

**中图分类号**:TB332 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202403030

# Effect of fatty acid esters of hydroxyl-terminal hyperbranched polyester on performance of nylon 6/glass fiber reinforced composites

*LIANG Xueting*[1,2,3], *ZHANG Daohong*[*1,2,3]

1. Key Laboratory of Catalysis and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education(South-Central Minzu University), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Catalysis and Materials Science(South-Central Minzu University), Wuhan 430074, China; 3. Hubei R&D Center of Hyperbranched Polymers Synthesis and Applications, Wuhan 430074, China

**Abstract**: Due to the inherent differences in properties between glass fibers and nylon, the weak interfacial interactions result in low mechanical properties and rough surfaces of the composite materials of them. In this study, fatty acid esters of hydroxyl-terminal hyperbranched polyester with different fatty acid chain lengths (H24-*n*, *n*=8, 12, 16, 18) were synthesized using fatty acid and hydroxyl-terminal hyperbranched polyesters (H24), to prepare nylon 6/glass fiber composites. The structure and molecular weight of the polymers were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, $^{1}$H nuclear magnetic resonance spectroscopy and gel permeation chromatography. The influence of fatty acid chain length of H24-*n* on the mechanical, processing and thermal properties of nylon 6/glass fiber composites was systematically investigated. The

**收稿日期**:2024-03-25

**基金项目**:国家自然科学基金区域创新联合基金重点项目(U23A20691);中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(CZD24001);中南民族大学学术创新团队项目(XTZ24012)

**作者简介**:梁雪婷,硕士研究生。Email:2021110250@scuec.edu.cn

***通信作者**:张道洪,博士,教授。Email:daohong.zhang@scuec.edu.cn

**引文格式**:梁雪婷,张道洪. 端羟基超支化聚酯脂肪酸酯对尼龙6/玻璃纤维复合材料性能的影响[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):637-643.

performance of composites was improved with the increase of terminal fatty acid chain length of H24-*n*, and the flow properties of the composites increased with the increase of H24-18 content, while their mechanical properties increased firstly and then decreased. The melt index, tensile strength, flexural strength and impact strength of the composites with H24-18 mass fraction of 0.9% were improved by 73.04%, 14.53%, 5.60% and 9.71%, respectively, compared with those of nylon 6/glass fiber composites. The improving mechanism of H24-*n* in the composites was analyzed by scanning electron microscopy and differential scanning calorimetry.

**Keywords**: hyperbranched polymer; glass fiber; nylon; composites; flow properties; mechanical properties

玻璃纤维增强尼龙复合材料因其卓越的性能，已被广泛应用于航空航天、汽车制造、电子电气设备及机械工程等多个行业，逐步替代传统的金属材料[1-2]。随着市场需求的不断提高，对这类复合材料性能的要求亦随之提高[3]。不仅要求玻璃纤维增强尼龙复合材料具备优异的机械性能，还需具备良好的加工性能[4]。Choi等[5]利用多种二胺单体与脂肪酸合成了一系列改性助剂，旨在改善玻璃纤维增强尼龙66复合材料的流动性和机械性能。尽管这些助剂在提高复合材料流动性方面取得了显著成效，但在机械性能方面的改进作用相对有限。Mun等[6]发现聚丙烯接枝马来酸酐能提高玻璃纤维增强尼龙66复合材料的机械性能，但熔体流动性明显降低。Yeh等[7]发现氨基硅氧烷偶联剂对玻璃纤维增强尼龙612复合材料的纤维-基体附着力、机械性能和相应的耐磨性能均可提高，但加工性能变差。在各种助剂中，超支化聚合物因其独特的优势而受到广泛关注[8]。这些优势包括低熔体黏度、可控的支化结构和丰富的末端官能团。低熔体黏度有助于提高复合材料的加工性能，而可控的支化结构则有助于实现特定的性能需求。此外，超支化聚合物的高效性和易于规模化生产的特点使其在进一步改良玻璃纤维增强尼龙复合材料方面展现出巨大的潜力。

本文制备了不同脂肪酸链长的端羟基超支化聚酯脂肪酸酯（fatty acid esters of hydroxyl-terminal hyperbranched polyester with different fatty acid chain lengths，H24-*n*，*n*=8，12，16，18），并将其应用于玻璃纤维（glass fiber，GF）质量分数为50%的尼龙6/玻璃纤维（nylon 6/glass fiber，PA6/GF）复合材料，系统研究H24-*n*的脂肪酸链长度及用量对复合材料性能的影响规律，探究复合材料的性能增强机制。

## 1 实验部分

### 1.1 原 料

PA6（J2800，工业级，中国聚合顺新材料有限公司）；GF（301HP，工业级，重庆保力国际股份有限公司）；端羟基超支化聚酯（hydroxyl-terminal hyperbranched polyester，H24）（工业级，武汉超支化聚合物科技有限公司）；4-二甲氨基吡啶（4-dimethylaminopyridine，DMAP）、四氢呋喃（tetrahydrofuran，THF）（分析纯，上海国药集团化学试剂有限公司）；辛酰氯、月桂酰氯、棕榈酰氯、硬脂酰氯（纯度大于96%，上海麦克林生化有限公司）。

### 1.2 H24-*n*的合成

根据图1所示的合成示意图，通过饱和脂肪酸酰氯与端羟基超支化聚酯（H24）的羟基发生酯化反应，成功合成了H24-*n*。在此反应中，*n*值为脂肪酸酰氯中的碳原子数，具体合成步骤参考作者前期的工作[9]。

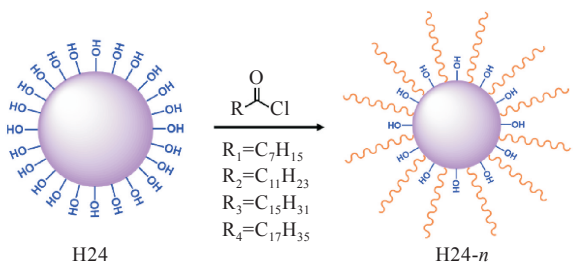



图1 H24-*n*的合成示意图

Fig. 1 Synthesis scheme of H24-*n*

### 1.3 H24-*n*改性PA6/GF复合材料的制备

将PA6、GF和H24-*n*按照表1中的配方混合均匀后，添加至双螺杆挤出机的料桶中，在双螺杆挤出机（机头温度255 ℃，一区至十区温度260 ℃，主机转速71 r/min和主喂料机的转速6 r/min）中进行混合，再进行拉条、冷却，切粒得到尼龙6/玻璃纤维复合材料（GP50）和H24-*n*改性尼龙6/玻璃纤维复合材料（GP50-*n*-9）。所有复合材料颗粒在100 ℃的烘箱中干燥5 h，然后经注塑机注塑成标准试样，测试相关性能。在改性复合材料中，采用质量分数为0.5%、0.7%、0.9%和1.2%的H24-18改性PA6/GF复合材料，分别命名为GP50-18-5、GP50-

18-7、GP50-18-9和GP50-18-12。

表1　H24-*n*改性PA6/GF复合材料的配方

Tab. 1　Fomula of PA6/GF composites with H24-*n*

| 复合材料 | *w*(PA6)/% | *w*(GF)/% | *w*(H24-*n*)/% |
|---|---|---|---|
| GP50 | 50.00 | 50.00 | - |
| GP50-8-9 | 49.55 | 49.55 | 0.90 |
| GP50-12-9 | 49.55 | 49.55 | 0.90 |
| GP50-16-9 | 49.55 | 49.55 | 0.90 |
| GP50-18-5 | 49.75 | 49.75 | 0.50 |
| GP50-18-7 | 49.65 | 49.65 | 0.70 |
| GP50-18-9 | 49.55 | 49.55 | 0.90 |
| GP50-18-12 | 49.40 | 49.40 | 1.20 |

### 1.4　测试与表征

1.4.1　结构和分子量表征　利用Vertex 70型傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR)，在扫描范围为4 000~400 $cm^{-1}$，分辨率为4 $cm^{-1}$，扫描次数为16的条件下测试。利用AVANCE III-400核磁共振波谱仪测试样品的氢-1核磁共振波($^1$H nuclear magnetic resonance，$^1$H NMR)谱。实验中以氘代氯仿(chloroform-d，$CDCl_3$)为溶剂，四甲基硅烷为内标物质。利用AVANCEIII型凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography，GPC)对样品的分子量进行测试，以色谱纯的*N*，*N*-二甲基甲酰胺为流动相，样品质量浓度为10 mg/mL。

1.4.2　热稳性测试　TGA55型热重分析仪(thermogravimetric analysis，TGA)升温区间为25~700 ℃，升温速率设置为10 ℃/min，氮气流速为25 mL/min。

1.4.3　热性能测试　将10 mg样品置于DSC25型差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter，DSC)中，迅速升温至250 ℃并保持5 min，然后以10 ℃/min的速率将样品冷却至30 ℃，并在此温度下维持5 min，最后以10 ℃/min的热速率重新将样品加热至250 ℃。结晶度($X_c$)通过公式$X_c=\Delta H_f/[\Delta H_f^o(1-w)]$计算，其中$w$是复合材料中纤维的质量分数，$\Delta H_f^o$是100%结晶尼龙6聚合物的理论熔融焓，$\Delta H_f$为通过DSC曲线的积分面积得到的熔融焓。

1.4.4　熔融指数测试　根据GB/T 3682.1—2018，通过GT-7100-MIJ熔体流动速率测试仪测试复合材料的熔体流动指数。

1.4.5　流动性能测试　RM-200C型哈克流变仪的测试温度为260 ℃、口模直径为2 mm、口模长径比为40。

1.4.6　力学性能测试　根据GB/T 1040.2—2022和GB/T 9341—2008，采用AI-700 M万能试验机测试复合材料的拉伸强度和弯曲强度。根据GB/T 1043.1—2008，采用GT-7045-MDL冲击试验设备测试复合材料的冲击强度。

1.4.7　断面形貌分析　在10 kV加速电压条件下，采用TM4000扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)对试样的断面形貌进行了研究。

## 2　结果与讨论

### 2.1　H24和H24-*n*的结构特征

H24和H24-*n*的FTIR谱图如图2(a)所示。3 500 $cm^{-1}$处的吸收峰为羟基的特征振动吸收峰，2 930和1 470 $cm^{-1}$处的吸收峰为H24和H24-*n*中亚甲基的特征振动吸收峰，1 740 $cm^{-1}$处的吸收峰为羰基的特征振动吸收峰。通过对比H24与H24-*n*的亚甲基和羟基特征振动吸收峰，发现H24-*n*的亚甲基振动吸收峰更尖锐且吸收强度更强，而羟基峰则显得更宽且吸收强度弱，这表明不同脂肪酸链长已接枝到H24上。图2(b)为H24和H24-*n*的$^1$H NMR光谱。0.86处的峰为封端链中—$CH_3$的质子峰，1.59和2.27处为脂肪酸链长前端酯基上两个相邻—$CH_2$—基团的质子峰。与H24相比，1.24处为H24-*n*的脂肪酸链中—$CH_2$—的质子峰，且长链中亚甲基的质子峰强度强于其他质子峰，这说明脂肪酰氯已通过酯化反应成功接枝到H24的端羟基上。从图2(c)可知，H24、H24-8、H24-12、H24-16和H24-18的数均分子量分别为5 774、6 003、6 044、6 073和6 391 g/mol，它们的分子量分布指数分别为1.93、1.90、1.89、1.87和1.86，说明H24-*n*的分子量分布较窄，其分子量随其末端脂肪酸链长度的增加而增加。H24和H24-*n*的TGA曲线如图2(d)所示。在168 ℃下，H24的质量减少5%，而H24-8、H24-12、H24-16和H24-18分别在213、213.5、240.4和261.7 ℃下质量减少了5%，说明H24比H24-8、H24-12、H24-16和H24-18的热稳定性能差。另外，在421 ℃时，H24就已经完全分解，而H24-*n*则在421 ℃以上完全分解。结果表明，H24-*n*比H24具有更高的热稳定性，并且其热稳定性随末端脂肪酸链长度的增加而增强[10]。

### 2.2　复合材料的性能

在H24-*n*质量分数为0.9%的条件下，H24-*n*末端脂肪酸链长度对尼龙6/玻璃纤维复合材料的流动性和机械性能的影响如图3所示。随着H24-*n*末端脂肪酸链长度的增长，复合材料的熔体流动

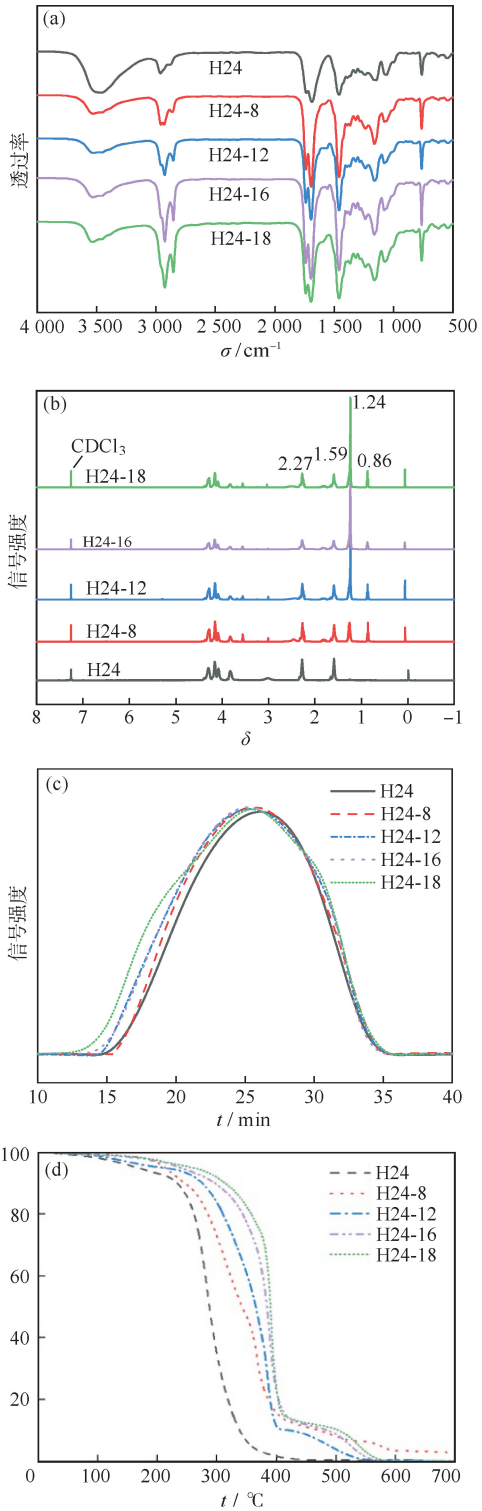



**图2 H24和H24-*n*的FTIR光谱(a),$^1$H NMR光谱(b),GPC曲线(c)和TGA曲线(d)**

Fig. 2 FTIR spectra (a), $^1$H NMR spectra (b), GPC curves (c) and TGA curves (d) of H24 and H24-*n*

指数也相应上升,其值从9.46 g/10min逐步提升至16.37 g/10min。经H24-*n*改性的复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均高于GP50复合材料,并随H24-*n*末端脂肪酸链长度的增加而增强。含有H24-18成分的复合材料展现出了最佳的机械性能,其拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别为203.48 MPa、307.03 MPa和23.83 kJ/m$^2$,与GP50复合材料相比,分别提升了14.53%、5.60%和9.71%。

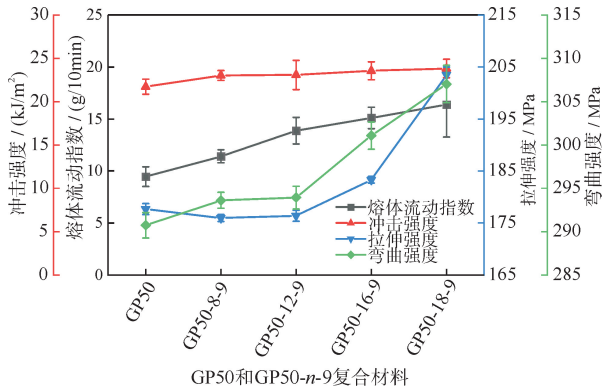



**图3 H24-*n*对尼龙6/玻璃纤维复合材料性能的影响**

Fig. 3 Effect of H24-*n* on the properties of nylon 6/glass fiber composites

图4显示了H24-18添加量对该复合材料流动性和机械性能的影响规律。经H24-18改性的复合材料的熔体流动指数均得到了改善,其熔体流动指数随H24-18添加量的增加而增加。当H24-18质量分数为1.2%时,复合材料的熔体流动指数为17.67 g/10min,较GP50复合材料提升了86.79%。当H24-18质量分数小于或等于0.9%时,复合材料的机械性能会随着H24-18添加量的增加而增强。当H24-18质量分数超过0.9%后,复合材料的机械性能开始呈现下降趋势。结合了线性聚合物和超支化聚合物优势的H24-18,通过超支化聚合物球形结构的润滑效果以及柔性链的缠绕作用[11],能够有效促进尼龙6分子链段的滑移,从而赋予复合材料优异的流动性能。在共混体系中,H24-18与尼龙6/玻璃纤维之间产生的氢键和物理纠缠作用,增强了界面相互作用和黏附性,减少了界面缺陷,进而改善了复合材料的力学性能。然而,当

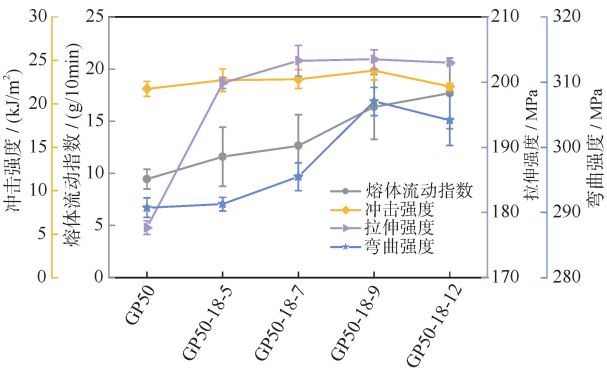



**图4 H24-18含量对尼龙6/玻璃纤维复合材料性能的影响**

Fig. 4 Effect of H24-18 content on the properties of nylon 6/glass fiber composites

H24-18 的添加量过高时，会形成独立的相，从而导致应力集中现象的发生。这种现象会降低复合材料在受外力作用时的机械性能[12-13]。

H24-*n* 对尼龙 6/玻璃纤维复合材料热稳定性能的影响如图 5 所示。从图 5 可知，GP50-*n*-9 复合材料的 TGA 曲线展示了与 GP50 复合材料类似的耐热性能，这表明 H24-*n* 对复合材料的热稳定性能影响较小。

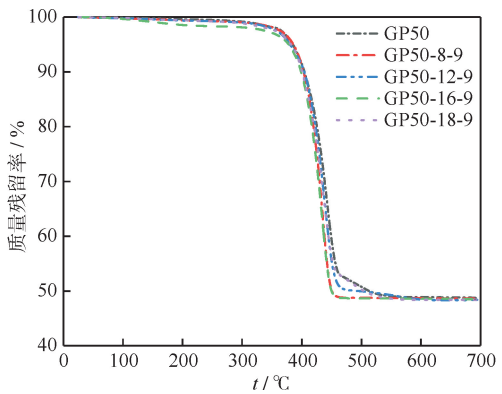



**图 5　GP50 和 GP50-*n*-9 复合材料的 TGA 曲线**

Fig. 5　TGA curves of GP50 and GP50-*n*-9 composites

## 2.3　尼龙 6/玻璃纤维复合材料的性能增强机理

图 6 为 GP50 和 GP50-*n*-9 复合材料的黏度随剪切速率的变化曲线。所有复合材料均表现出剪切稀化行为[14]，且复合材料的黏度随 H24-*n* 末端脂肪酸链长度的增大而减小，其中 GP50-18-9 复合材料的黏度最小。究其原因，是由于 H24-*n* 的类球状结构和低黏度，使其在共混体系中起到润滑的作用，并且随着末端脂肪酸链长度的增加，这种润滑效应得以进一步增强，从而改善了体系的流动性。

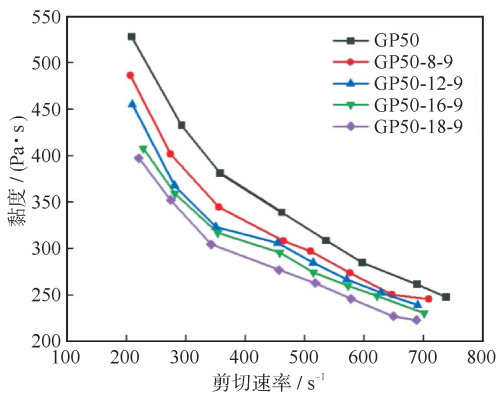



**图 6　GP50 和 GP50-*n*-9 复合材料的黏度随剪切速率的变化曲线**

Fig. 6　Viscosity versus shear rate curves for GP50 and GP50-*n*-9 composites

图 7 为 GP50 和 GP50-*n*-9 复合材料的 DSC 曲线。从图 7(a)可知，复合材料的结晶温度($T_c$)随 H24-*n* 末端脂肪酸链长度的增加而减小，从 187.85 ℃降至 183.51 ℃。在图 7(b)中，复合材料的熔融温度($T_m$)略有下降，但下降幅度较小，变化浮动在 0.53 ℃。然而，复合材料的结晶度($X_c$)随着 H24-*n* 末端脂肪酸链长度的增加而减小，从 36.88% 降至 30.51%。此现象的产生可归因于 H24-*n* 末端脂肪酸链与尼龙 6 分子链的物理缠结以及尼龙 6 分子链的移动受到氢键的限制。

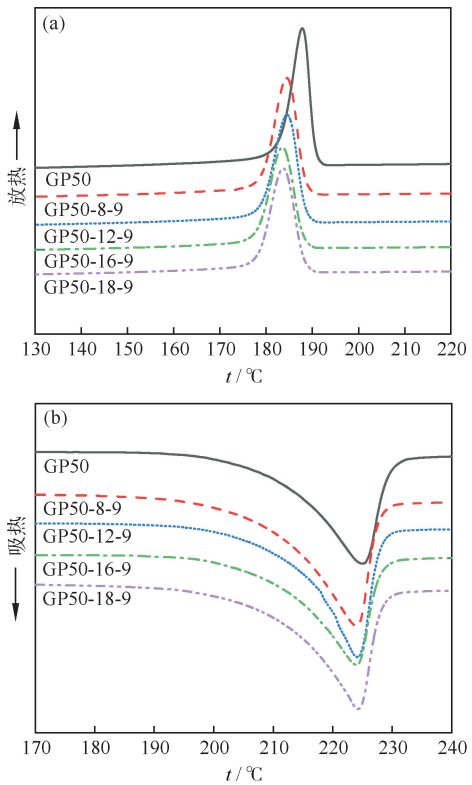



**图 7　GP50 和 GP50-*n*-9 复合材料的 DSC 曲线：(a)结晶曲线，(b)熔融曲线**

Fig. 7　DSC curves of GP50 and GP50-*n*-9 composites: (a) crystalline curves, (b) melting curves

为了深入研究 H24-18 与尼龙 6 之间的相互作用机理，将质量分数为 0.9% 的 H24-18 加入尼龙 6 中后获得了尼龙 6/H24-18 混合物，并通过 FTIR 分析对比了该混合物与纯尼龙 6 的光谱特征。图 8 为尼龙 6 和尼龙 6/H24-18 混合物的 FTIR 光谱。在尼龙 6/H24-18 混合物和尼龙 6 中，3 300 $cm^{-1}$ 处的峰为 N—H 伸缩振动吸收峰，1 640 $cm^{-1}$ 处的峰为酰胺吸收 I 带的 C=O 振动吸收峰，1 540 $cm^{-1}$ 处的峰为酰胺吸收 II 带的 N—H 弯曲振动和 C—N 伸缩振动吸收峰，1 265 $cm^{-1}$ 处的峰为酰胺吸收 III 带的 C—N 振动吸收峰[15]，这些吸收峰的位置没有明显变化，说明酰胺基团未发生反应形成新键。与尼龙 6 比较，1 733 $cm^{-1}$ 处的峰为 H24-18 的酯基振动吸收峰。当 H24-18 与尼龙 6 混合后，该酯基振动

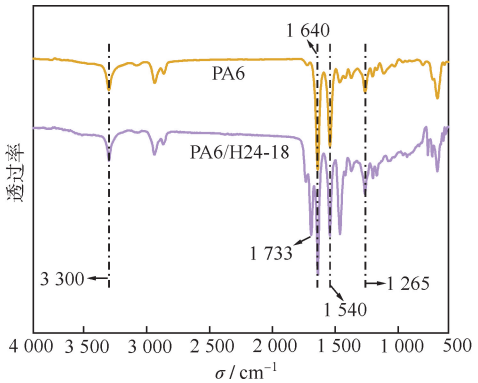



**图8 尼龙6和尼龙6/H24-18混合物的FTIR光谱**

Fig. 8 FTIR spectra of nylon 6 and nylon 6/H24-18 blends

峰的位置相对于未添加尼龙6时的1 740 $cm^{-1}$发生了红移，即向低频方向移动。已有研究发现，红外吸收峰位移到低频，且其吸收强度也有所变化，表明存在着氢键[16-17]。尼龙6和H24-18间存在氢键作用使得尼龙6与玻璃纤维之间产生“桥联”，进而改善尼龙6/玻璃纤维的机械性能。

图9为GP50和GP50-18-9复合材料的断面形貌的SEM图。由图9(a,b)可知，GP50复合材料中的玻璃纤维表面是裸露的，并且与尼龙6基体之间有明显的间隙和团聚现象，这表明该复合材料中的玻璃纤维与尼龙6基体的界面结合能力较弱。复合材料经超支化聚合物(H24-18)改性后，尼龙6与玻璃纤维结合紧密，无玻璃纤维抽出和团聚现象[图9(c,d)]，表明尼龙6/玻璃纤维复合材料具有较强的界面相互作用，H24-18在尼龙和玻纤之间起到了桥接作用，增强了玻璃纤维和尼龙6之间的相容性。

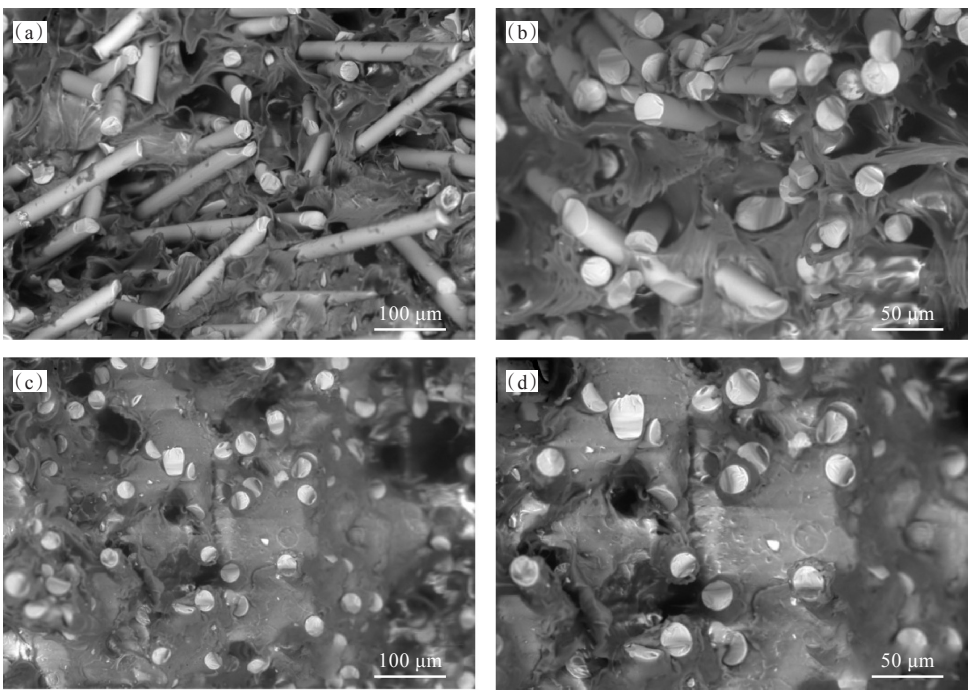



**图9 复合材料断裂表面的SEM图：(a,b) GP50，(c,d) GP50-18**

Fig. 9 SEM images of fractured surfaces of composites: (a,b) GP50, (c,d) GP50-18

## 3 结 论

本文以脂肪酸酰氯与H24作为原料，通过酯化反应成功合成了一系列H24-*n*，并研究了H24-*n*对尼龙6/玻璃纤维复合材料流动性、机械性能和热性能的影响规律。

(1)FTIR、$^1$H NMR、GPC和TGA表征结果证实了H24-*n*的成功制备，且H24-*n*的分子量和热稳定性均随末端脂肪酸链长的增加呈现上升趋势。

(2)随着H24-*n*末端脂肪酸链的长度和H24-18的添加量逐渐增加，复合材料的流动性和机械性能也随之提高，同时耐热性能保持稳定，从而获得了高性能的尼龙6/玻璃纤维复合材料。

(3)通过FTIR分析了H24-18与尼龙6之间的相互作用，证实了H24-18与尼龙6之间存在氢键作用。通过SEM分析复合材料的断面形貌，证明了H24-18能够通过形成氢键和物理缠结来增强玻璃纤维与尼龙6之间的界面相容性和黏附性。在加工改性过程中，H24-18展现出优异的改性效果，为高玻璃纤维含量的尼龙6/玻璃纤维复合材料提供了一种具有巨大潜力的改性剂。

**参考文献**


[1] 傅光华，王天晴，景铮，等. 超支化聚酯酰胺的合成及在尼龙加工中的应用[J]. 武汉工程大学学报，2020，42(4)：395−400.

[2] YU L J，HU Q S，LI T C，et al. Ultrahigh flowability and excellent mechanical performance of glass fiber/PA6 composites prepared by hyperbranched polymers [J]. Macromolecular Materials and Engineering，2023，308(8)：2300012.

[3] ARTYKBAEVA E，UCPINAR DURMAZ B，AKSOY P，et al. Investigation of the properties of PA6/PA610 blends and glass fiber reinforced PA6/PA610 composites [J]. Polymer Composites，2022，43(10)：7514−7525.

[4] XIE J X. Effect of matrix composition on properties of polyamide 66/polyamide 6I-6T composites with high content of continuous glass fiber for optimizing surface performance [J].E-Polymers，2023，23(1)：20228111.

[5] CHOI H S，LIM D，KIM D G，et al. Simultaneous flow enhancement of high-filled polyamide 66/glass fiber composites [J]. Journal of Alloys and Compounds，2017，722：628−636.

[6] MUN H J，CHA S H，CHOI P S，et al. Correlation between compounding sequence and the properties of glass fiber reinforced nylon-6,6 composite[J]. Polymer Engineering & Science，2019，59(1)：155−161.

[7] YEH Y H，CHEN C W，RANGANATHAN P，et al. Improvement of mechanical and wear resistance property by varying glass fiber contents and amino-silicate coupling agents on polyamide 612 composites [J]. Journal of Composite Materials，2022，56(20)：3083−3098.

[8] MU B，LIU T T，TIAN W. Long-chain hyperbranched polymers：synthesis，properties，and applications [J]. Macromolecular Rapid Communications，2019，40(17)：1800471.

[9] 张道洪，梁雪婷，张俊珩，等. 含氮耐高温超支化聚合物、制备方法、应用及玻纤增强尼龙复合材料：202410308350.8 [P]. 2024-03-18.

[10] REN L F，TANG Z，QIANG T T，et al. Hyperbranched polymer surfactant：synthesis，characterization and surface tension activity [J]. Journal of Leather Science and Engineering，2021，3：7.

[11] 梁叶云，余倩，张道洪. 超支化聚酯制备高玻纤含量的尼龙/玻纤复合材料[J]. 功能材料，2018，49(6)：6103−6106.

[12] RUAN F T，YANG Q Y，KAN C G，et al. Influence of hydroxyl-terminated hyperbranched polymer and coupling agent on the performance of SF/PLA composites [J]. Journal of Natural Fibers，2023，20(2)：2251683.

[13] XU M L，LU J W，QIAO Y N，et al. Toughening mechanism of long chain branched polyamide 6 [J]. Materials & Design，2020，196：109173.

[14] PATTI A，ACIERNO S，NELE L，et al. Sustainable basalt fibers vs. traditional glass fibers：comparative study on thermal properties and flow behavior of polyamide 66-based composites[J]. ChemEngineering，2022，6(6)：86.

[15] OSHIRO M，TAKASHIMA K，FURUKAWA Y. Infrared Stark spectra for a nylon 6 film [J]. Chemical Physics Letters，2019，728：32−36.

[16] BRIELLE E S，ARKIN I T. Quantitative analysis of multiplex H-bonds [J]. Journal of the American Chemical Society，2020，142(33)：14150−14157.

[17] RYU I S，LIU X H，JIN Y，et al. Stoichiometric analysis of competing intermolecular hydrogen bonds using infrared spectroscopy [J]. RSC Advances，2018，8(42)：23481−23488.


本文编辑：苗　变