

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.006

GF/CF 协同增强 PA6T/6I/66 复合材料的制备及性能

杨森^{1,2}, 简瑞^{1,2}

(1. 重庆科聚孚新材料有限责任公司, 重庆 401332; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要: 为制备低成本高强度的抗静电耐高温尼龙复合材料, 采用熔融共混法制备了玻璃纤维(GF)/碳纤维(CF)协同增强尼龙 6T/6I/66 共聚物(PA6T/6I/66)复合材料。在质量分数 20% 的 GF 体系中加入 CF, 研究了 CF 含量对复合材料力学、电学、热学等性能的影响, 并考察了抗静电复合材料在高温环境下力学和电学性能的变化规律。结果表明, 随着 CF 含量增加, 复合材料表面电阻率的变化呈现典型的渗流现象, 当 CF 质量分数为 10% 时, 复合材料表面电阻率为 $10^7 \sim 10^8 \Omega$, 具备抗静电功能; CF 起到协同增强作用, 复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量、缺口和无缺口冲击强度及热变形温度均随着 CF 含量的增加而增加; 复合材料热稳定性随着 CF 含量增加呈现轻微上升的趋势。随着温度升高, 复合材料的拉伸强度有所下降, 弯曲强度的变化较小, 弯曲模量略有下降, 缺口和无缺口冲击强度均略有增加, 表面电阻率先不变后略微升高。制备的 GF/CF 协同增强抗静电 PA6T/6I/66 复合材料具有良好的经济性、力学性能和耐热性能, 在高温领域有良好的应用前景。

关键词: 高温尼龙; 玻璃纤维; 碳纤维; 力学性能; 抗静电

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0037-07

Preparation and performances of GF/CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 composites

YANG Sen^{1,2}, JIAN Rui^{1,2}

(1. Chongqing Copolyforce New Materials Co., Ltd., Chongqing 401332, China;

2. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: In order to prepare low cost and high strength antistatic heat resistant nylon composites, glass fiber (GF) and carbon fiber (CF) were utilized to reinforce PA6T/6I/66 resin by melt blending method. The influence of CF content on the mechanical properties, electrical properties, thermal properties of fiber reinforced PA6T/6I/66 composites were studied when the GF content was 20 wt%, the mechanical and electrical properties of antistatic PA6T/6I/66 composites under high temperature environment were also conducted. The results show that as the CF content increases, the surface resistivity of the composites present a typical percolation phenomenon, 10 wt% CF reinforced PA6T/6I/66 composite possesses antistatic function with the surface resistivity in the range of $10^7 \sim 10^8 \Omega$. The tensile strength, flexural strength and modulus, notched and non-notched impact strength and heat deformation temperature of the composites increase with the increase of CF content, the heat distortion temperature and thermal stability of the composites increase slightly with the increase of CF content. With the increasing of temperature, the tensile strength of the composites decrease, while the flexural strength changes slightly and flexural modulus slightly decrease, on the contrary, the notched and unnotched impact strength increase slightly, the surface surface resistivity remains unchanged first and then increases. Thus, the GF/CF synergistically reinforced antistatic PA6T/6I/66 composites have excellent economy, mechanical properties, thermal properties and good application prospect in high temperature conditions.

Keywords: heat resistant nylon ; glass fiber ; carbon fiber ; mechanical property ; antistatic

玻璃纤维(GF)增强尼龙复合材料因具有良好的力学性能、尺寸稳定性和耐磨性等, 被广泛应用于

机械、汽车等领域^[1-3], 但是普通尼龙树脂较低的玻璃化转变温度和熔点限制了其在矿用连续开采装

通信作者: 杨森, 硕士, 工程师, 研究方向为高性能高分子复合材料

收稿日期: 2024-11-12

引用格式: 杨森, 简瑞. GF/CF 协同增强 PA6T/6I/66 复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 37-43.

YANG Sen, JIAN Rui. Preparation and performances of GF/CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 37-43.

备、电子元器件支架等高温场景中的进一步应用^[2,3]。尼龙6T/6I/66共聚物(PA6T/6I/66)是一种半芳香族共聚尼龙,由对苯二甲酸、己二胺、间苯二甲酸、己二酸共聚而成,其中对苯二甲酸-己二胺(6T)单元在分子链中引入芳香族结构,大幅提升了PA6T/6I/66的耐温性能,使熔点达到370℃以上;间苯二甲酸-己二胺(6I)单元破坏分子链规整性,在保持高耐热、高强度的同时,也提升了韧性^[4];己二酸-己二胺(66)单元的引入降低了分子链中芳香结构的比例,大幅改善加工性能,最终树脂的熔点降低至310℃左右。进一步通过GF对PA6T/6I/66进行增强,可大幅提高该类材料的力学性能、耐热性能等,拓宽其在高温领域的应用。但是GF增强PA6T/6I/66复合材料不导电,表面电阻率高达 $10^{15}\Omega$,易产生静电,难以直接应用于充满可燃性气体和粉尘的矿井、与敏感电子元器件接触的结构件等特殊环境,因此需要制备高强度抗静电耐高温尼龙复合材料以满足这类特殊环境的应用需求,但目前关于材料制备及其在高温环境中性能研究却少见报道。

碳纤维(CF)是一种主要由碳元素组成的高强度、高模量纤维,具有良好的导电性,还具有耐高温、耐磨、耐腐蚀等特性^[5],被广泛地应用于武器装备、航空航天和汽车等领域^[6],因此有望采用CF制备高强度抗静电耐高温尼龙复合材料。张琦等^[7]采用了CF对尼龙10T(PA10T)进行增强改性,研究了CF含量对PA10T/CF复合材料力学性能、结晶性能和热稳定性的影响,结果表明CF能够提升复合材料的力学性能和热稳定性,但该研究并未对复合材料电学性能进行探究。采用单一的CF对尼龙进行增强和抗静电改性会导致最终材料存在成本较高的问题^[8],难以工程化推广应用。因此笔者在GF增强PA6T/6I/66复合材料的基础上,引入少量的CF进行协同改性,研究CF含量对复合材料力学性能、电性能和热性能的影响规律,旨在制备一种低成本高强度的抗静电耐高温尼龙复合材料,并进一步探究该PA6T/6I/66复合材料在高温环境下力学和电学性能变化规律,为高性能抗静电耐高温尼龙复合材料工程化制备和应用奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6T/6I/66:N200,浙江新和成股份有限公司;
短切GF:ECS301HG-3/4.5,重庆国际复合材料

有限公司;

短切CF:CT-T300P,江苏创宇碳纤维科技有限公司;

抗氧剂:1098,巴斯夫股份公司。

1.2 主要仪器及设备

电热鼓风干燥箱:HTF313C,重庆威尔震昌科技股份有限公司;

双螺杆挤出机:TE-35,江苏科亚化工装备有限公司;

注塑机:HDX50,宁波市海达塑料机械有限公司;

高阻计:ZC46A,上海第六电表厂有限公司;

电子万能试验机:CMT-4204,美斯特工业系统(中国)有限公司;

摆锤式冲击试验机:ZBC8400-B,美斯特工业系统(中国)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SIGMA 300,德国蔡司公司;

微机控制热变形维卡软化点试验机:ZWK1302-B,美斯特工业系统(中国)有限公司;

热重(TG)分析仪:TG209 F3,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 试样制备

PA6T/6I/66树脂和抗氧剂经简单机械混合后从双螺杆挤出机的主喂料口加入,短切CF和短切GF经简单机械混合后从双螺杆挤出机第三段的侧喂料口加入,GF添加质量分数固定为20%,CF添加质量分数分别为0%,8%,10%,12%,14%,16%。在螺杆转速为300 r/min,温度270~330℃的条件下进行熔融共混、挤出造粒,造好的颗粒在100℃的电热鼓风干燥箱中干燥4 h,最终制得GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料。制备的复合材料通过注塑机加工为标准的性能测试样条,注塑加工温度为280~330℃。

1.4 测试与表征

表面电阻率测试:采用高阻计按GB/T 31838.3-2019进行测试,测试电压500 V。

拉伸强度测试:采用电子万能试验机按照GB/T 1040-2022进行测试,拉伸速率50 mm/min。

弯曲强度和弯曲模量测试:采用电子万能试验机按照GB/T 9341-2008进行测试,速度2 mm/min。

冲击强度测试:采用摆锤式冲击试验机按照GB/T 1843-2008进行测试,缺口冲击强度测试摆锤能量2.75 J,无缺口冲击强度测试摆锤能量5.5 J。

SEM表征:采用SEM对缺口冲击测试后的样品断面进行观察,工作电压3 kV。

热变形温度测试:采用微机控制热变形维卡软化点试验机按照GB/T 1634-2019进行测试,升温速率120 °C/h,跨距64 mm,载荷1.8 MPa。

TG表征:将测试样品在100 °C环境中预处理1 h,然后采用TG分析仪在氮气氛围下对材料热稳定性进行测试,温度范围50~600 °C,升温速率10 °C/min。

2 结果与讨论

2.1 CF含量对复合材料性能影响

2.1.1 电学性能分析

图1为不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料表面电阻率测试结果。由图1可知,仅GF增强的PA6T/6I/66复合材料的表面电阻率大于 $10^{15} \Omega$,处于绝缘态;当引入CF后,GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料表面电阻率随着CF含量的增加而下降。当CF的质量分数由8%增加至12%时,复合材料表面电阻率由 $10^{14} \Omega$ 骤降至 $10^5 \Omega$;当CF含量进一步增加,复合材料表面电阻率仅略微降低,呈现典型的渗流现象^[9]。这是由于GF和CF在双螺杆强剪切作用下,被剪碎并分散在树脂基体中,当CF含量达到渗流阈值时,CF相互接触形成导电通路^[10],其表面电阻率骤降,具备抗静电功能。当已经形成导电网络后,进一步增加CF含量,仅增加了复合材料中的导电通路,因此表面电阻率仅略微下降^[11]。为满足工程化应用和抗静电功能需求,CF添加质量分数为10%时具有最佳经济性,此时复合材料表面电阻在 $10^7 \sim 10^8 \Omega$ 范围内。

2.1.2 力学性能分析

图2为不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66

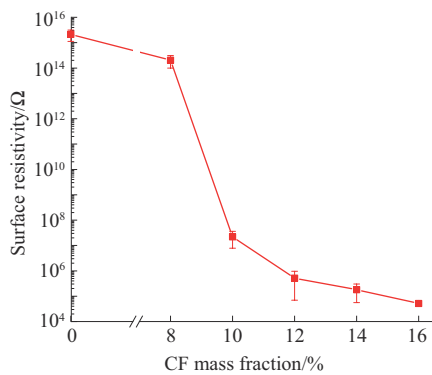


图1 不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料表面电阻率
Fig. 1 Surface resistivity of GF/CF reinforced PA6T/6I/66 composites with different contents of CF

复合材料力学性能测试结果。由图2a可知,复合材料的拉伸强度随着CF含量的增加而增加,这是由于CF具有极高的强度,随着CF含量的增加,树脂基体中有更多的纤维进行承载,并且纤维之间距离更近,应力更容易通过纤维进行传递,从而起到协同增强作用^[12]。由图2b可知,复合材料的弯曲强度和弯曲模量均随着CF含量的增加而增加,弯曲强度由179.4 MPa增加至238.2 MPa,弯曲模量由6 147 MPa大幅增加至10 808 MPa,这主要是由于CF的弯曲模量远大于GF^[13],从而大幅提升复合材料的刚度^[14]。由图2c可知,复合材料缺口冲击强度和

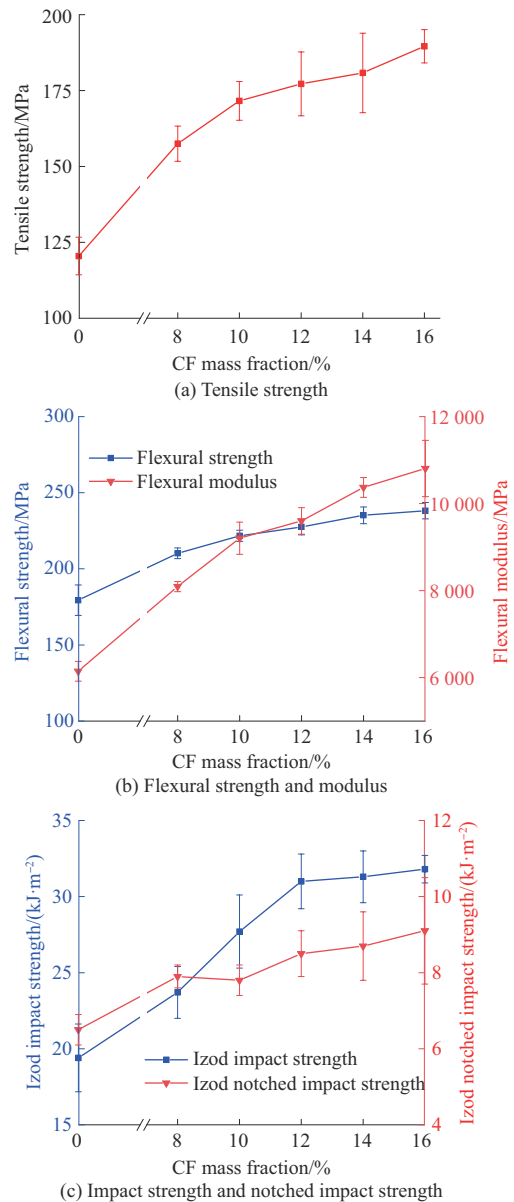


图2 不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料力学性能
Fig. 2 Mechanical properties of GF/CF reinforced PA6T/6I/66 composites with different contents of CF

口冲击强度均随着CF含量增加而呈现增加的趋势,这是由于树脂基体中增强纤维总含量增加,有更多的纤维和界面参与到冲击能量消耗过程,在GF和CF的协同作用下,缺口和无缺口冲击强度均有所增加。

2.1.3 SEM分析

图3为质量分数20%的GF增强PA6T/6I/66复合材料和20%GF与质量分数为10%的CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的冲击断面微观形貌照片。由图3可知,GF增强复合材料的断面中存在较多孔洞,这是由于纤维的强度高于树脂基体,受到冲击作用后基体首先被破坏,应力通过界面传递至纤维,导致部分纤维被拔出或者断裂^[15],部分残留的GF被高温尼龙树脂所包覆,表明GF与树脂基体之间具有较好的界面作用,从而提升了复合材料力学性能。在GF和CF协同增强复合材料断面中,由于纤维总含量增加,被拔出的孔洞和残留的纤维数量显著增加,需要消耗更多的能量,并且残留的CF也被树脂较好地包覆,说明CF与树脂之间同样具有良好的界面作用,能够参与到冲击能量的吸收过程,从而起到协同增强增韧作用。

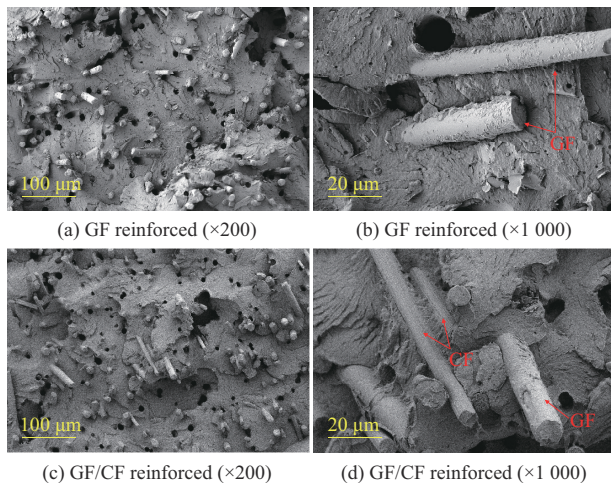


图3 不同PA6T/6I/66复合材料冲击断面SEM照片

Fig. 3 SEM photos of impact fracture surface of different PA6T/6I/66 composites

2.1.4 热变形温度分析

图4为不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料的热变形温度测试结果。由图4可知,20%GF增强PA6T/6I/66复合材料的热变形温度约为183℃,当加入质量分数8%的CF后,复合材料的热变形温度提升至216℃,且随着CF含量的进一步增加,复合材料的热变形温度呈现略微增加的趋势。

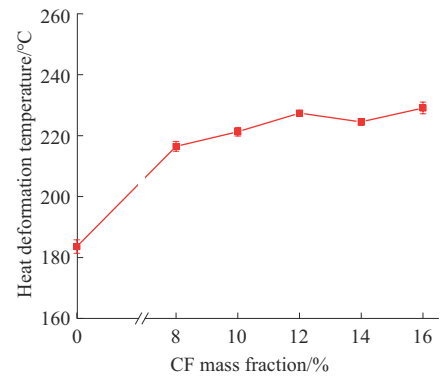


图4 不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料热变形温度
Fig. 4 Heat deformation temperature of GF/CF reinforced PA6T/6I/66 composites with different contents of CF

纤维增强复合材料的热变形温度由树脂基体聚集态结构和增强纤维共同决定^[16],GF和CF在树脂基体中起到类似“骨架”支撑作用,限制树脂基体分子链的移动,从而可大幅提升材料的热变形温度。当纤维总质量分数超过30%后,CF和GF已经形成较为稳定的“骨架”结构,因此再进一步增加CF含量,热变形温度仅略微升高。

2.1.5 热稳定性分析

图5和表1为不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料的TG测试结果。由图5和表1可知,不同CF含量的复合材料热降解均一步完成,说明

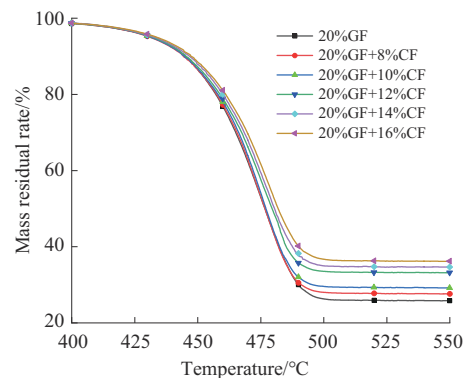


图5 不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料TG曲线
Fig. 5 TG curves of GF/CF reinforced PA6T/6I/66 composites with different contents of CF

表1 不同CF含量的GF/CF增强PA6T/6I/66复合材料TG数据
Tab. 1 TG data of GF/CF reinforced PA6T/6I/66 composites with different contents of CF

CF mass fracture/%	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	Char residue/%
0	431.4	476.6	25.6
8	431.1	476.7	27.4
10	431.2	477.1	29.1
12	432.1	479.5	33.0
14	433.0	480.5	34.5
16	433.7	481.9	36.0

CF并未改变复合材料的热降解行为。复合材料的初始分解温度($T_{5\%}$)和最大降解速率处温度(T_{max})均随CF含量的增加而呈现略微增加的趋势,表明CF的引入能够一定程度提升复合材料的热稳定性^[7]。这主要是由于CF自身的导热性能较好,可降低基体树脂内部的热应力,还可限制分子链热运动,导致复合材料的热稳定性有所提高^[17]。复合材料的残炭率与总纤维含量相近,这归因于CF和GF在550 °C基本不发生分解。

2.2 温度对复合材料力学性能和电学性能的影响

上述研究表明20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料具备良好的抗静电功能和经济性,并且具有良好的力学性能、耐热性和热稳定性,因此对其在高温环境下的力学性能进行进一步研究。图6为不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的拉伸强度测试结果,由图6可知,随着温度升高,复合材料的拉伸强度有所下降,在130 °C时拉伸强度依然高达120 MPa,拉伸强度的保留率达到70%,表现出良好的耐高温特性,但温度超过130 °C后,复合材料的拉伸强度下降较为明显。一方面是由于温度升高后,树脂基体链段运动自由度增加,链段容易伸展,分子链活动性增加,导致树脂基体自身强度下降^[18];另一方面是由于纤维和基体的热膨胀系数存在差异,温度升高后导致树脂基体与纤维之间的界面作用力降低^[19],在持续加载过程中,界面分离现象不断增加,导致应力不能有效地从基体树脂转移至增强纤维,最终导致复合材料的拉伸强度随着温度升高而降低。

图7为不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的弯曲性能测试结果。由图7

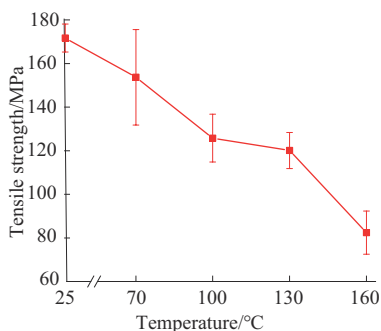


图6 不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的拉伸强度

Fig. 6 Tensile strength of 20%GF and 10%CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 at different temperatures

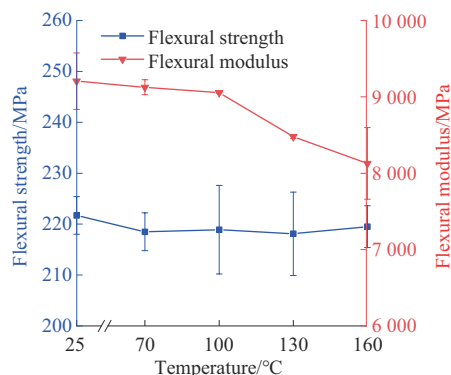


图7 不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的弯曲性能

Fig. 7 Flexural properties of 20%GF and 10%CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 at different temperatures

可知,随着温度升高,复合材料的弯曲强度未发生显著升高或下降,基本保持在同一水平,仅弯曲模量略有下降。这是由于复合材料热变形温度高达221 °C,当温度低于热变形温度时,增强纤维形成的“骨架”结构不会发生改变,可以有效地分散弯曲载荷,因此对弯曲强度影响较小。但随着温度升高,树脂基体中分子链段运动自由度增加,分子链热运动增加,导致树脂基体自身强度有所下降,从而导致弯曲模量略有下降。

图8为不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料冲击性能的测试结果。由图8可知,随着温度升高,复合材料缺口冲击强度和无缺口冲击强度均随着温度的增加而呈现略微增加的趋势。复合材料的冲击强度由树脂基体的韧性、纤维与树脂界面作用和纤维强度共同决定,随着温度升高,界面作用下降,纤维强度几乎不变,但是冲击强度却有所升高,说明此时树脂基体通过链段运

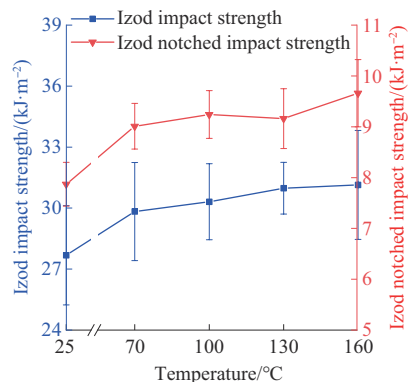


图8 不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的冲击性能

Fig. 8 Impact properties of 20%GF and 10%CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 at different temperatures

动吸收冲击能量占据主导作用,此外高温环境下,链段运动加剧还会使树脂基体不易产生微裂纹^[20],从而提升了复合材料冲击强度。

图9为不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料表面电阻率的测试结果。由图9可知,当温度低于130℃时,复合材料表面电阻率基本保持在同一水平。当温度升至160℃时,复合材料表面电阻率略有增加,这可能是PA6T/6I/66树脂基体的热膨胀系数相对较大,随着温度升高,CF之间距离变大,部分导电通路被阻断所致^[21]。

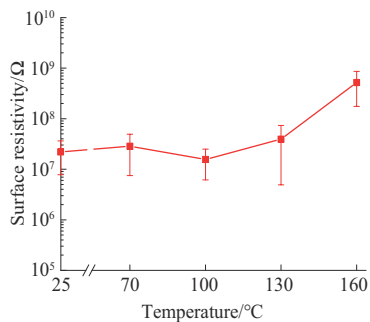


图9 不同温度下20%GF和10%CF协同增强PA6T/6I/66复合材料的表面电阻率

Fig. 9 Surface resistivity of 20%GF and 10%CF synergistically reinforced PA6T/6I/66 at different temperatures

3 结论

(1)在GF增强PA6T/6I/66体系中引入CF可制备抗静电复合材料,复合材料表面电阻率随着CF含量的增加而降低,呈现典型的渗流现象,抗静电复合材料的CF最佳添加质量分数为10%,此时复合材料表面电阻率为 $10^7 \sim 10^8 \Omega$ 。

(2)GF和CF起到协同增强作用,复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量、缺口和无缺口冲击强度以及热变形温度均随着CF含量的增加而增加,热稳定性也略有提高。

(3)抗静电PA6T/6I/66复合材料的拉伸强度随着温度升高而降低,弯曲模量略微降低,弯曲强度变化较小,缺口和无缺口冲击强度增加,表面电阻率先不变后略有增加。

参考文献

- [1] 龚梦晴,武金龙.环境吸湿对玻璃纤维增强尼龙66材料性能的影响[J].工程塑料应用,2024,52(5):140-145.
GONG Mengqing, WU Jinlong. Effect of environmental hygroscopicity on properties of GF reinforced nylon 66 materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5):140-145.
- [2] MA Y Y, ZHANG J N, CAO X Y, et al. High heat resistance and good melt spinnability of a polyamide 66 containing benzene structure[J]. Materials Advances, 2021, 2:6 647-6 654.
- [3] 郑天成,褚照哲,段小超,等.耐高温尼龙的结构、性能及发展现状[J].材料导报,2023,37(Z1):541-544.
ZHENG Tiancheng, CHU Zhaozhe, DUAN Xiaochao, et al. Structure, properties and development of high temperature nylon[J]. Materials Reports, 2023, 37(Z1):541-544.
- [4] 周阳,赵世坤,赵彪,等.半芳香族聚酰胺6T/6I/6的合成及其非等温结晶动力学研究[J].中国塑料,2022,36(10):15-21.
ZHOU Yang, ZHAO Shikun, ZHAO Biao, et al. Synthesis and nonisothermal crystallization kinetic study of semi-aromatic polyamide 6T/6I/6[J]. China Plastics, 2022, 36(10):15-21.
- [5] ZHAO Y P, ZHANG J M, QIANG S, et al. Effect of carbon fibers and graphite particles on mechanical properties and electrical conductivity of cement composite[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 94. DOI:10.1016/j.job.2024.110036.
- [6] 毛德胜,白彧,周燕,等.碳纤维复合材料在轨道交通的应用与展望[J].机电工程技术,2024,53(2):60-63.
MAO Desheng, BAI Yu, ZHOU Yan, et al. Application and prospect of carbon fiber reinforced plastic in rail transit industry[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(2): 60-63.
- [7] 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.
- [8] 据裕波,李智,柏挺,等.低成本碳纤维的研究进展与应用[J].工程塑料应用,2023,51(11):181-186.
JU Yubo, LI Zhi, BAI Ting, et al. Research progress and application of low-cost carbon fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):181-186.
- [9] AL-SALEH M H, GELVES G A, SUNDARARAJ U. Carbon nano-fiber/polyethylene nanocomposite: Processing behavior micro structure and electrical properties[J]. Materials and Design, 2013, 52: 128-133.
- [10] 逢娟娟,岳世伟,黄素玲,等.不同摩擦条件对PEEK、CF/PEEK复合材料摩擦学性能及其抗静电性能的影响[J].化工新型材料,2022,50(11):109-115.
PANG Xianjuan, YUE Shiwei, HUANG Suling, et al. The effects of different friction conditions on the tribological and antistatic properties of PEEK and CF/PEEK composites[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11):109-115.
- [11] LI Min, GAO Peiwei, LI Guoqing, et al. Fabrication and electrical properties of carbon fiber, graphite and nano carbon black conductive cement-based composites[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60. DOI:10.1016/j.csite.2024.104834.
- [12] 刘旭,徐海,徐立新,等.改性碳纤维增强尼龙6复合材料的制备及性能[J].材料工程,2021,49(4):128-134.
LIU Xu, XU Hai, XU Lixin, et al. Preparation and properties of

- modified fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(4):128-134.
- [13] 刘锦程,邱睿,曹清林.碳/玻混杂纤维复合材料力学性能与失效机理研究[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(11):153-157.
- LIU Jincheng, QIU Rui, CAO Qinglin. Study on mechanical properties and failure mechanism of carbon/glass hybrid fiber composites[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(11):153-157.
- [14] 何理,邹春龙,文周,等.碳纤维含量对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料弯曲性能和失效行为的影响[J]. *塑料工业*, 2024, 52(2):120-126.
- HE Li, ZOU Chunlong, WEN Zhou. Effect of carbon fiber contents on bending properties and failure behavior of CFRP composite materials[J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(2):120-126.
- [15] 王海雷,段跃新,王维维,等.玻璃纤维与碳纤维混杂复合材料的拉伸及低速冲击性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(2):102-109.
- WANG Hailei, DUAN Yuexin, WANG Weiwei. Study on tensile and low velocity and impact performance of glass fiber and carbon fiber hybrid composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(2):102-109.
- [16] 宋伟强,孙东泽,何星础,等. PA6I/6T对高GF含量PA66复合材料性能和外观的影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(9):34-38.
- SONG Weiqiang, SUN Dongze, HE Xingchu, et al. Effects of PA6I/6T on properties and appearance of PA66 composites with high glass fiber content[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(9):34-38.
- [17] 张翀,崔惠泽,郭瑞鲁,等.填料含量对高导热玻璃纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(11):93-97.
- ZHANG Chong, CUI Huize, GUO Ruilu, et al. Effect of filler content on properties of glass fiber reinforced epoxy resin with high thermal conductivity[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(11):93-97.
- [18] 马丽丽.尼龙12在升降温和热拉伸过程中的晶体结构研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.
- MA Lili. Study on crystal structure of nylon 12 during heating, cooling and thermal drawing[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2018.
- [19] 秦唯铭,杜冰,朱绍伟,等.环境温度对长玻纤增强聚丙烯单向拉伸力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2023, 37(20):241-246.
- QIN Weiming, DU Bing, ZHU Shaowei, et al. Effect of environment temperature on uniaxial tensile properties of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(20):241-246.
- [20] 李存静,陶洋,逢增媛,等.2.5D机织碳纤维-玻璃纤维/双马来酰亚胺树脂复合材料高温力学行为及损伤机制[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1):144-154.
- LI Cunjing, TAO Yang, PANG Zengyuan, et al. High temperature mechanical behavior and damage mechanism of 2.5D woven carbon fiberglass fiber/bismaleimide resin composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1):144-154.
- [21] 邹会昭,张习,郑少笛,等.具有高灵敏性且稳定可重复的正温度系数效应的PVDF/CF导电复合材料[J]. *高分子学报*, 2017, 8(8):1214-1219.
- ZOU Huizhao, ZHANG Xi, ZHENG Shaodi, et al. PVDF/CF conductive composites with high sensitivity and stable reproducibility of positive temperature coefficient effect[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2017, 8(8):1214-1219.