

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.019

# 玻纤增强 sPS 复合材料的力学性能和结晶性能

赵姜斌<sup>1</sup>, 贾义军<sup>1,2</sup>, 陈国军<sup>1</sup>, 陈拓<sup>1</sup>, 景裕生<sup>1</sup>, 聂琦<sup>1</sup>

(1. 宁波华腾首研新材料有限公司, 浙江宁波 315400; 2. 北京市化学工业研究院有限责任公司, 北京 100084)

**摘要:** 以玻纤(GF)和间规聚苯乙烯(sPS)树脂为原料,采用双螺杆挤出机熔融挤出造粒,制得GF增强sPS复合材料。探究了市售的6种不同种类GF对GF增强sPS复合材料性能影响,筛选出最佳种类GF,并利用扫描电子显微镜(SEM)和差示扫描量热(DSC)仪对复合材料力学性能和结晶性能进行了表征。随后,选用适合sPS的最佳种类的GF,考察了GF含量对GF增强sPS复合材料性能的影响。研究表明,所选6种不同种类GF中,最佳的型号是ECS11-3.0-436H;SEM结果表明,与其他5种GF相比,该GF和sPS树脂基体具有更好的界面黏合力。DSC分析结果表明,GF的种类对复合材料的冷结晶温度和熔融温度影响不大。选择ECS11-3.0-436H的GF,质量分数在0~50%范围内,随着GF用量的增加,复合材料的各项力学性能也逐步明显提高。

**关键词:** 间规聚苯乙烯;玻璃纤维;复合材料;力学性能;结晶性能

中图分类号: TQ325.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2024)11-0130-06

## Mechanical and crystallization properties of glass fiber reinforced sPS composites

ZHAO Jiangbin<sup>1</sup>, JIA Yijun<sup>1,2</sup>, CHEN Guojun<sup>1</sup>, CHEN Tuo<sup>1</sup>, JING Yusheng<sup>1</sup>, NIE Qi<sup>1</sup>

(1. Ningbo Huateng Shouyan New Material Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

2. Beijing Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China);

**Abstract:** Glass fiber(GF) reinforced syndiotactic polystyrene (sPS) composite material was prepared from GF and sPS resin by melting and blending with twin-screw extruder. The effects of 6 different kinds of GF on the properties of sPS composites were investigated, and the best kinds of GF were selected. The mechanical properties and crystallization properties were characterized by scanning electron microscopy(SEM) and differential scanning calorimetry(DSC). Then, the best kind of GF suitable for sPS was selected, and the influence of GF content on the performance of GF reinforced sPS was investigated. The results show that the best type of GF is ECS11-3.0-436H. The SEM results show that better interfacial adhesion between GF and sPS resin matrix is obtained than other 5 kinds of GF. The results of DSC analysis show that the type of GF has little effect on the cold crystallization temperature and melting temperature of the composites. Choose GF ECS11-3.0-436H, the mass fraction is in the range of 0~50%, with the increase of GF amount, the mechanical properties of the composite are also gradually improved.

**Keywords:** syndiotactic polystyrene ; glass fiber ; composite ; mechanical property ; crystallization

间规聚苯乙烯<sup>[1-12]</sup>(sPS)树脂是日本出光公司于1985年在世界上首次使用茂金属催化剂成功合成的,是具有立构规整性的结晶性的聚苯乙烯。sPS树脂具有高熔点、优异的电绝缘性、着色性和良好的加工流动性。但是,sPS树脂的缺点也比较突出,它的力学性能(拉伸强度、弯曲强度、缺口和无缺口冲击强度)普遍偏低,因此,为了拓宽sPS原料的应用范围,对其进行改性处理是必不可少的手段。最

常见最有效的改性处理方法,是加入合适的玻璃纤维(GF),提高材料的综合力学性能。目前,国外对GF增强sPS复合材料的研究,主要聚焦于相容剂、增韧剂及偶联剂的选择和方式对GF增强sPS复合材料的影响。如日本Okada<sup>[13-14]</sup>及Takehiro等<sup>[15]</sup>探究了不同种类的相容剂,并用经偶联剂处理的GF作为增强材料,开发了一系列性能优良的GF增强sPS复合材料,这种高性能的复合材料可用作电子

通信作者: 赵姜斌, 硕士, 主要从事工程塑料的改性等研究工作

收稿日期: 2024-09-04

引用格式: 赵姜斌, 贾义军, 陈国军, 等. 玻纤增强sPS复合材料的力学性能和结晶性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 130-135.

ZHAO Jiangbin, JIA Yijun, CHEN Guojun, et al. Mechanical and crystallization properties glass fiber reinforced sPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 130-135.

电器件、汽车部件、微波炉具等。Jr Stephen等<sup>[16-17]</sup>也在专利中报道了一种30%GF增强sPS复合材料,详细研究了相容剂和增韧剂对GF增强sPS复合材料力学性能的影响。研究表明增强体系中加入一定量的相容剂可以提高复合材料的冲击强度。目前国内研究GF增强sPS复合材料的报道较少,随着GF产业的发展,GF的品种和种类越来越多,并且不同种类的GF所用的浸润剂类型、浸润剂含量、玻璃类型及GF的直径各不相同,不同种类的GF与各种树脂基体的匹配度也不一样。笔者研究的目的是:筛选最合适sPS树脂的增强复合材料的GF,为后续进一步研究sPS材料应用提供数据支持。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

sPS:90Zc,日本出光兴产株式会社;

抗氧化剂:1010,626,圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

相容剂:马来酸酐接枝聚苯醚CS-1,厦门市科艾斯化学有限公司;

GF:ECS11-3.0-436H(长度3 mm,直径11  $\mu\text{m}$ ),HMG435TM-10-4.0(长度4 mm,直径10  $\mu\text{m}$ ),ECS10-3.0-T551R(长度3 mm,直径10  $\mu\text{m}$ ),HMG436S-10-4.0(长度4 mm,直径10  $\mu\text{m}$ ),ECS10-4.5-T436H(长度4.5 mm,直径10  $\mu\text{m}$ ),泰安市泰山玻璃纤维有限公司;

GF:E7CG10-03-534A(长度3 mm,直径10  $\mu\text{m}$ ),桐乡市中国巨石股份有限公司。

### 1.2 仪器及设备

电热鼓风干燥箱:MX841-TG,吴江市闽鑫烘箱电炉制造有限公司;

同向平行双螺杆挤出机:ZSK-30, $L/D=44$ ,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

高速混合机:5 L,南京橡塑机械厂有限公司;

注塑机:UN120A5S-V,广东伊之密精密注压科技有限公司;

电子万能试验机:WDT-W-20A1,承德精密试验机有限公司;

摆锤式冲击试验机:SS-3700CZ,松恕检测仪器有限公司;

电子天平:FA2004N,上海精密科学仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-60Plus,岛津(上

海)实验器材有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Thermo Apreo 2C,赛默飞世尔科技公司(中国)有限公司。

### 1.3 试样制备

(1)原料干燥:将sPS树脂在鼓风干燥烘箱中120  $^{\circ}\text{C}$ 下烘2 h除去水分,放置2 h后冷却;

(2)物料共混:将树脂、相容剂及抗氧化剂按照一定比例使用高速混合机共混,混合均匀;

(3)双螺杆挤出机挤出造粒:一定比例的短GF通过侧喂料称进入螺杆挤出机中,混合后的树脂、助剂等物料通过主喂料称进入螺杆挤出机中,双螺杆挤出加工工艺,其中挤出机1~10区温度为:120, 260, 260, 260, 270, 270, 270, 260, 260, 260  $^{\circ}\text{C}$ ,机头温度为275  $^{\circ}\text{C}$ ,螺杆转速280~320 r/min;

(4)测试样条的制备:所制得的样品粒料放入鼓风干燥箱中在120  $^{\circ}\text{C}$ 干燥2 h,然后按照检测标准在280~290  $^{\circ}\text{C}$ 下使用注塑机制备标准力学样条。最后,将所注塑成型后样条在室温下静置24 h,并进行性能测试。

### 1.4 性能测试与表征

#### 1.4.1 力学性能测试

拉伸强度按照GB/T 1040.2-2006测试,拉伸速率为5 mm/min;

弯曲强度按照GB/T 9341-2008测试,测试速率为2 mm/min;

简支梁无缺口冲击强度和缺口冲击强度按照GB/T 1043.1-2008测试,缺口类型为A型。

#### 1.4.2 结晶性能分析

结晶性能按照GB/T 19466.3-2004进行DSC分析,空坩埚作为空白参比,称量2~8 mg的样品,充入高纯氮气进行保护。设置升温速率为10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,待温度达到320  $^{\circ}\text{C}$ 后,以10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率降温,直至样品降温到50  $^{\circ}\text{C}$ ,记录样品整个结晶放热曲线和熔融曲线。

#### 1.4.3 断面形貌分析

样品取自拉伸实验后样条的断面,并对干燥后的样条断面进行喷金处理,在SEM上进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 GF种类对GF增强sPS复合材料力学性能和断裂形貌影响

2.1.1 GF种类对GF增强sPS复合材料力学性能影响  
选择6种不同种类的GF(GF质量分数均为

30%)作为 sPS 树脂的增强材料,分别制备了样品 S1~S6,并对比这 6 种样品的综合力学性能。其配方、GF 的基本参数指标和性能结果分别列于表 1~表 3。从表 3 可看出,S5 样品综合的力学性能最低,拉伸强度和弯曲强度分别为 73 MPa 和 142 MPa,缺口和无缺口冲击强度分别为 3.8 kJ/m<sup>2</sup>和 12.4 kJ/m<sup>2</sup>。S1 样品的综合力学性能最好,与 S5 样品相比,S1 样品的拉伸强度提升了 73.98%,弯曲强度提升了 30.99%,缺口冲击强度提升了 60.53%,无缺口冲击强度提升了 163.71%。对比 S1 样品和 S5 样品,从表 2 可看出,两者所用 GF 直径和 GF 表面浸润剂含量相差不大,且 HMG436S-10-4.0 使用了高模量玻璃, ECS11-3.0-436H 使用了常规模量的无碱玻璃,而 S1

表 2 不同配方所用不同种类 GF 的基本参数

Tab.2 Basic parameters of different kinds of GF used in different formulations

Sample	GF grade	Type of infiltrating agent	GF diameter / $\mu\text{m}$	Glass type	Combustible mass fraction/%
S1	ECS11-3.0-436H	436H	11.19	E-Glass	1.00
S2	E7CG10-03-534A	534A	10.00	E-Glass	0.74
S3	HMG435TM-10-4.0	435TM	10.25	HMG	0.39
S4	ECS10-3.0-T551R	T551R	10.63	E-Glass	0.73
S5	HMG436S-10-4.0	436S	10.11	HMG	0.94
S6	ECS10-4.5-T436H	T436H	10.48	E-Glass	0.98

Notes: 436H, 534A, 435TM, T551R, 436S, T436H means GF company internal infiltrating dosage form number; Combustible mass fraction means infiltrating agent content.

表 3 不同种类 GF 对增强 sPS 复合材料力学性能的影响

Tab.3 Effect of different types GF on mechanical properties of reinforced sPS composites

Item	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Tensile strength/MPa	127	99	132	136	73	118
Bending strength/MPa	186	152	164	166	142	186
Impact strength/(kJ·m <sup>-2</sup> )	6.1	4.2	4.0	4.8	3.8	6.2
Non-notched impact strength/(kJ·m <sup>-2</sup> )	32.7	16.0	20.2	29.7	12.4	29.0
Tensile elongation at break/%	1.5	1.0	1.6	1.9	0.6	1.3

综合以上,从综合的力学性能来看,所选的市售常见的六种 GF 中,型号 ECS11-3.0-436H 作为增强材料,最适合用于 sPS 树脂。

### 2.1.2 不同种类 GF 对 GF 增强 sPS 复合材料断裂形貌影响

采用选择的 6 种 GF,用于制备 30%GF 增强 sPS 复合材料。采用 SEM,进一步探究了复合材料经拉伸断裂后 GF 与 sPS 树脂的断面形貌,结果如图 1 所示。从图 1 可看出,所选的 6 种 GF 制得的 30%GF 增强 sPS 复合材料中,样品 S5 中的断面空穴最多,断面中残留断裂的 GF 数量最少。这可能是由于 GF

表 1 不同种类 GF 增强 sPS 复合材料的配方

Tab.1 Formulations of different types GF reinforced sPS composites

Material	S1	S2	S3	S4	S5	S6
sPS	100	100	100	100	100	100
GF	45.2	45.2	45.2	45.2	45.2	45.2
Compatibilizer CS-1	5	5	5	5	5	5
Antioxidant 1010	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Antioxidant 626	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Note: Composite is 30% GF reinforced sPS composite.

样品的综合力学性能反而更高。这可能主要是:较于表面浸润剂“436S”,该 GF 所用的表面浸润剂“436H”与 sPS 树脂基体有更好的界面结合力。

所用的浸润剂“436S”与 sPS 树脂界面的结合力差,导致材料受外力拉伸作用下,GF 很容易从基体树脂中拔出,并留下空穴。6 种样品的断面形貌观测来看,样品 S1 的断面空穴最少,断面中残留断裂的 GF 数量较多。断裂形貌的扫描结果表明:GF 增强 sPS 复合材料被破坏过程基本与其他树脂基体 GF 增强复合材料被破坏的规律一致<sup>[18-21]</sup>,经历了以下几个步骤:①基体变形与断裂;②GF 与基体的界面脱落;③GF 的拔出;④GF 的断裂。浸润剂“436S”与 sPS 树脂基体的界面相容性差,HMG436S-10-4.0 型 GF 与 sPS 树脂基体的界面黏结力较弱,即使使用了高模量类型的玻璃,很多 GF 并未经过断裂而被直接拔出,导致玻璃无法吸收更多的外界破坏能量,因此对应 S5 样品的综合力学性能相对较差;反之,浸润剂“436H”与 sPS 树脂基体的相容性更好,ECS11-3.0-436H 型 GF 与 sPS 树脂基体有更强的界面黏结力,受到外界作用力时,复合材料中的 GF 能吸收更多的破坏能量,因此 S1 样品的综合力学性能相对较优异。

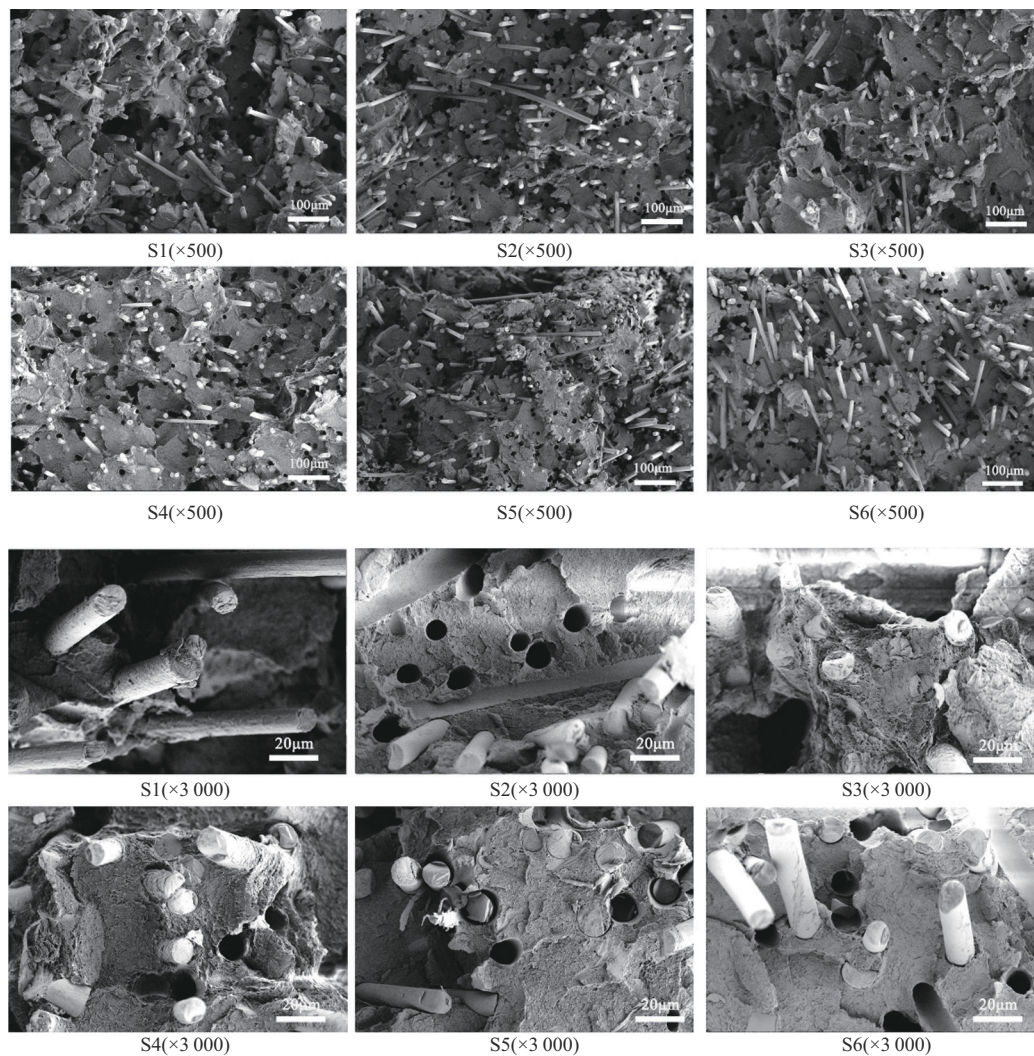


图1 不同种类GF增强sPS复合材料拉伸样条断裂面形貌的SEM照片(分别放大500倍和3 000倍)

Fig. 1 SEM photos of tensile spline fracture surface morphology of different types GF reinforced sPS composites ( $\times 500$ ,  $\times 3\ 000$  respectively)

## 2.2 GF种类对GF增强sPS复合材料结晶性能的影响

GF增强sPS复合材料是结晶型材料,结晶性能对复合材料的后应用加工成型至关重要。为研究不同种类GF对GF增强sPS复合材料结晶性能的影响,进一步对这6种GF增强sPS复合材料做了DSC分析,结果见图2和表4。

从图2和表4中可看出,GF的种类对增强sPS复合材料的冷结晶温度和熔融温度影响不大。6个样品的冷结晶温度在 $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,熔融温度在 $273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。相较而言,复合材料S5的过冷度( $\Delta T_{\text{mc}}$ )最小为 $32.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,复合材料S1的 $\Delta T_{\text{mc}}$ 相对较大,为 $41.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 $\Delta T_{\text{mc}}$ 反映了聚合物分子链段生成稳定晶核的能力,可用来表征聚合物在高温区生成稳定晶核的行为<sup>[22-24]</sup>。其值越小,表明sPS在晶核形

成过程中出现阻碍越小,结晶性能越好。样品S6中,GF与sPS树脂基体的界面结合力较弱,GF对sPS晶核形成过程中阻碍较小,结晶性能略好。而样品S1中,GF与sPS树脂基体的界面结合力较强,GF对sPS晶核形成过程中阻碍更大,结晶性能略差。

## 2.3 GF含量对GF增强sPS复合材料力学性能的影响

根据上述的探究结果,ECS11-3.0-436H的GF增强sPS复合材料综合性能最佳。选择ECS11-3.0-436H的GF作为sPS树脂的增强材料,研究不同含量GF(S7-0%GF, S8-10%GF, S9-20%GF, S1-30%GF, S10-40%GF, S11-50%GF)对增强sPS复合材料力学性能影响。结果如图3~图5所示。

从图3~图5可看出,在0~50%范围内,随着GF

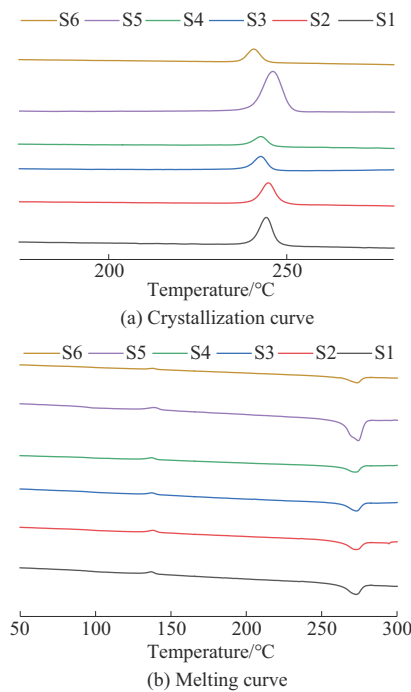


图2 不同种类GF增强sPS复合材料的DSC曲线

Fig. 2 DSC curves of different kinds of GF reinforced sPS composites

表4 不同种类GF增强sPS复合材料的结晶参数

Tab.4 Crystallization parameters of different types GF reinforced sPS composites

Sample	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_{cc}/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{mc}$
S1	231.71	136.73	272.86	41.15
S2	227.01	138.06	272.71	45.70
S3	237.15	137.28	273.13	35.98
S4	232.14	137.16	272.66	40.52
S5	241.61	138.63	274.26	32.65
S6	237.13	137.76	273.46	36.33

Notes:  $T_c$  is crystallization temperature;  $T_{cc}$  is cold crystallization temperature;  $T_m$  is melting temperature;  $\Delta T_{mc}$  is degree of supercooling.

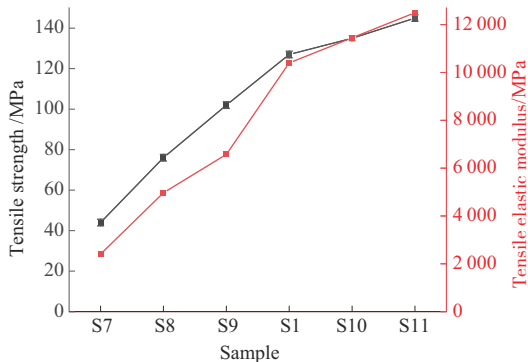


图3 不同GF质量分数对增强sPS复合材料拉伸性能的影响

Fig. 3 Effect of different mass fraction of GF on tensile properties of reinforced sPS composites

质量分数的增加,GF增强sPS复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均随之增加。这可能是由于该GF与sPS树脂基体界面结合性较好,受外力作

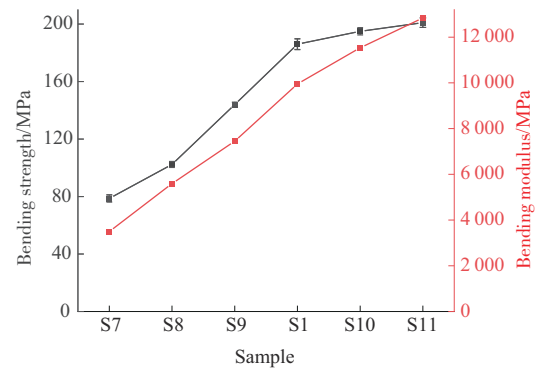


图4 不同GF质量分数对增强sPS复合材料弯曲性能的影响

Fig. 4 Effect of different mass fraction of GF on bending properties of reinforced sPS composites

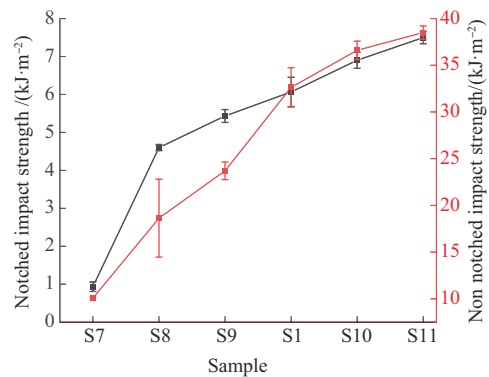


图5 不同GF质量分数对增强sPS复合材料冲击强度的影响

Fig. 5 Effect of different mass fraction of GF on impact strength of reinforced sPS composites

用时,sPS基体并未与GF提前剥离,外力能很好传导到GF上,较基体sPS在受力方向上GF承受更多的外力,所以随GF含量增加,sPS复合材料的拉伸、弯曲和冲击等力学强度能明显提升。

### 3 结论

(1)所选市售6种不同种类GF,应用于30%GF增强sPS复合材料中,型号为ECS11-3.0-436H的GF最好。断裂形貌的SEM结果也证明该结论。30%GF增强sPS复合材料力学性能最佳,拉伸强度为127 MPa,弯曲强度为186 MPa,缺口和无缺口冲击强度分别为6.1 kJ/m<sup>2</sup>和32.7 kJ/m<sup>2</sup>。

(2)所选市售6种不同种类GF中,GF的种类对GF增强sPS复合材料熔融温度和结晶性影响不大,DSC结晶分析的结果也验证了该结论。

(3)在0~50%含量范围内,随着GF质量分数的增加,GF增强sPS复合材料的力学性能逐步提升,增强作用效果明显。

### 参考文献

[1] BAUGH L S, SCHULZ D N. Discovery of syndiotactic polystyrene: its synthesis and impact[J]. Macromolecules, 2020, 53(10):

- 3 627–3 631.
- [2] WEN B, HU H, KANG D, et al. High-efficiency mono-cyclopentadienyl titanium and rare-earth metal catalysts for the production of syndiotactic polystyrene[J]. *Molecules*, 2023, 28(19). DOI:10.3390/molecules28196792.
- [3] COVELLI V, COZZOLINO A, RIZZO P, et al. Salicylic acid release from syndiotactic polystyrene staple fibers[J]. *Molecules*, 2023, 28(13). DOI:10.3390/molecules28135095.
- [4] HUANG J, LI X, MENG H, et al. Studies on pyrolysis mechanisms of syndiotactic polystyrene using DFT method[J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 747. DOI:10.1016/j.cplett.2020.137334.
- [5] 康光宇,刘金成.间规聚苯乙烯共混改性研究进展[J].*中国塑料*, 2003, 17(6):15–19.  
KANG Guangyu, LIU Jincheng. Advances in studies on blending modification of syndiotactic polystyrene[J]. *China Plastics*, 2003, 17(6):15–19.
- [6] 王进,林尚安.间规聚苯乙烯合金[J].*高分子通报*, 2003(2):23–28, 58.  
WANG Jin, LIN Shang'an. Syndiotactic polystyrene alloy[J]. *Polymer Bulletin*, 2003(2):23–28, 58.
- [7] COZZOLINO A, MONACO G, DANIEL C, et al. Monomeric and dimeric carboxylic acid in crystalline cavities and channels of delta and epsilon forms of syndiotactic polystyrene[J]. *Polymers*, 2021, 13(19). DOI:10.3390/polym13193330.
- [8] KRISHNAN V G, JOSEPH A M, KUZHICHALIL P S, et al. Nanoporous crystalline aerogels of syndiotactic polystyrene: polymorphism, dielectric, thermal, and acoustic properties[J]. *Macromolecules*, 2021, 54(22):10 605–10 615.
- [9] UEMATSU H, SUDO K, EGUCHI T, et al. Improvement of interfacial shear strength between syndiotactic polystyrene and carbon fiber by Self-localization of acid modified poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) on the surface of carbon fiber[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 153. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106706.
- [10] COZZOLINO A, PAPPALARDO S, RIZZO P, et al. Linear hydrogen bonded aggregates of carboxylic acids in crystalline channels of syndiotactic polystyrene[J]. *Polymer*, 2022, 262. DOI:10.1016/j.polymer.2022.125484.
- [11] KULKARNI A, JANA S C. Surfactant-free syndiotactic polystyrene aerogel foams via Pickering emulsion[J]. *Polymer*, 2021, 212. DOI:10.1016/j.polymer.2020.123125.
- [12] SANO T, ITAGAKI H, SAGO T. Crystallization of syndiotactic polystyrene by immersion in liquid compounds[J]. *Polymer*, 2024, 309. DOI:10.1016/j.polymer.2024.127447.
- [13] OKADA A, FUKUI H. Polystyrene resin composition: JP 070484881995.02.21.[P].1995-02-21.
- [14] OKADA A, FUKUI H. Polystyrene resin composition: JP 06345923 [P].1994-12-20.
- [15] TAKEHIRO I, ERI O, YOHEI K, et al. High-speed melt spinning of syndiotactic polystyrene: Effects of molecular weight and copolymerization on structure and properties of as-spun fibers[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2024, 3158(1). DOI: 10.1063/5.0204440.
- [16] JR STEPHEN H, NAZIR AHMED M, Choung-Houng L. Styrene-like polymer compositions: US5654365[P]. 1997-08-25.
- [17] JR STEPHEN H, NAZIR AHMED M, CHOUNG-HOUNG L. Styrene polymer composition: EP755972[P].1999-09-15.
- [18] RANI M, CHOUDHARY P, KRISHNAN V, et al. A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108768.
- [19] MORAMPUDI P, NAMALA K K, GAJJELA Y K, et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 43:314–319.
- [20] KHAN S, PARK J S, ISHIHARA T. A review of the single-step flame synthesis of defective and heterostructured TiO<sub>2</sub> nanoparticles for photocatalytic applications[J]. *Catalysts*, 2023, 13(1). DOI:10.3390/catal13010196.
- [21] ARPITHA G R, JAIN N, VERMA A. Banana biofiber and glass fiber reinforced hybrid composite for lightweight structural applications: mechanical, thermal, and microstructural characterization [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(11): 12 589–12 598.
- [22] CHEN S, XIE S, GUANG S, et al. Crystallization and thermal behaviors of poly (ethylene terephthalate)/bisphenols complexes through melt post-polycondensation[J]. *Polymers*, 2020, 12. DOI: 10.3390/polym12123053.
- [23] CHEN S, FU X, JING Z, et al. Non-isothermal crystallization kinetics and rheological behaviors of PBT/PET blends: effects of PET property and nano-silica content[J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2022, 25(1):32–46.
- [24] JIA S, JING B, GAO Z, et al. Melt crystallization of 2,4-dinitrochlorobenzene: Purification and process parameters evaluation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259. DOI:10.1016/j.seppur.2020.118140.