

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.022

增容剂对玻纤增强 PA66/sPS 复合材料力学性能的影响

陈拓¹, 贾义军^{1,2}, 陈国军¹, 赵姜斌¹, 黄乐文¹, 景裕生¹, 聂琦¹

(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: 采用双螺杆挤出机熔融共混, 制得玻璃纤维(GF)增强尼龙66 (PA66)/间规聚苯乙烯(sPS)复合材料。选用3种不同接枝率的马来酸酐接枝聚苯醚作为复合材料的增容剂, 首先考察不同接枝率增容剂对GF增强PA66/sPS复合材料力学性能的影响, 同时采用差示扫描量热(DSC)仪、热重(TG)分析仪和扫描电子显微镜对复合材料的结晶性能、热性能及微观形貌进行测试与表征; 然后, 根据力学性能测试结果, 从3种增容剂中筛选出最佳增容剂, 探究增容剂含量对GF增强PA66/sPS复合材料力学性能的影响。结果表明, 在同等增容剂用量下, 接枝率为1.0%的增容剂FB820的增容效果最佳; DSC和TG测试结果表明, 使用3种增容剂制得的GF增强PA66/sPS复合材料的结晶温度、熔融温度和热稳定性基本一致。当增容剂FB820用量为4份时, 复合材料的力学性能最佳, 拉伸强度为176 MPa, 弯曲强度为219 MPa, 非缺口冲击强度为39 kJ/m², 缺口冲击强度为12.7 kJ/m²。

关键词: 尼龙66; 间规聚苯乙烯; 增容剂; 玻璃纤维增强复合材料

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0160-06

Effects of compatibilizers on mechanical properties of glass fiber reinforced PA66/sPS composites

CHEN Tuo¹, JIA Yijun^{1,2}, CHEN Guojun¹, ZHAO Jiangbin¹, HUANG Lewen¹, JING Yusheng¹, NIE Qi¹

(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 polyamide 66 (PA66)/syndiotactic polystyrene (sPS) composites were prepared by using melt blending with twin screw extruder. Three kinds of maleic anhydride grafted polyphenylene oxide with different grafting ratios were selected as compatibilizers of the composites. At first, the effects of compatibilizers with different grafting ratios on the mechanical properties of GF reinforced PA66/sPS composites were studied, meanwhile, the crystallization properties, thermal properties and microscopic morphology of the composites were tested and characterized by differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric (TG) analyzer and scanning electron microscope. Then according to the testing results of mechanical properties, the optimal compatibilizer was selected from the three compatibilizers and the effects of its content on the mechanical properties of the composites were investigated. The results show that, under the same content of compatibilizers, the compatibilizer FB820 with a grafting ratio of 1.0% has the best compatibilization effect. In the DSC and TG testing results, the crystallization temperature, melting temperature and thermal stability of the GF reinforced PA66/sPS composites prepared using the three compatibilizers are basically consistent. The best mechanical properties of the composites were obtained when the compatibilizer FB820 amount is 4 phr, with tensile strength of 176 MPa, bending strength of 219 MPa, non-notched impact strength of 39 kJ/m² and notched impact strength of 12.7 kJ/m².

Keywords : polyamide 66 ; syndiotactic polystyrene ; compatibilizer ; glass fiber reinforced composite

间规聚苯乙烯(sPS)的分子链中具有刚性苯环结构, 苯环在分子链的两侧规则排列存在结晶作用, 限制了分子链的运动, 使得sPS具有刚性结

构^[1-4]。sPS的刚性结构赋予了其强度高、硬度大和耐腐蚀性强等特点^[5-7]。因此, sPS在单独使用时, 断裂前不会表现出任何银纹或剪切屈服(即塑性微变

通信作者: 陈拓, 硕士研究生, 主要从事工程塑料的改性等研究工作

收稿日期: 2025-01-23

引用格式: 陈拓, 贾义军, 陈国军, 等. 增容剂对玻纤增强PA66/sPS复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 160-165.

CHEN Tuo, JIA Yijun, CHEN Guojun, et al. Effects of compatibilizers on mechanical properties of glass fiber reinforced PA66/sPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 160-165.

形),导致 sPS 在使用时受到脆性大的限制,使其很难单独用作工程塑料,限制了 sPS 在大部分领域内的应用,为了解决这一缺陷,通常将 sPS 与其他工程塑料进行共混。

目前尼龙 66 (PA66)与 sPS 共混^[8-9]是一种常用的方法,PA66 拥有与 sPS 相近的熔点,同样具有良好的结晶性能,这使得高温下 PA66/sPS 共混物能够保持良好的结构稳定性。同时,通过将 sPS 与 PA66 共混不仅改善了 sPS 的冲击性能,而且还能改善 PA66 的耐热性能,两者相互促进,发挥各自优势,使得 PA66/sPS 共混物具有良好的综合性能。Hwang 等^[10]以马来酸酐接枝 sPS (sPS-g-MAH)为增容剂制备了 PA66/sPS 共混物,研究结果显示加入增容剂可使 PA66 和 sPS 具有良好的界面黏附力,进一步改善了共混物的冲击性能。曹有名等^[11]研究了纳米 Al_2O_3 对 PA66/sPS 复合材料的影响,发现纳米 Al_2O_3 对 PA66/sPS 复合材料有增韧增强效果。Akihiko 等^[12]在专利中报道了一种质量分数 30% 的玻璃纤维 (GF)增强 PA66/sPS 复合材料,详细研究了增容剂对 GF 增强 PA66/sPS 复合材料力学性能的影响,发现在 GF 增强体系中增容剂可以提高复合材料的冲击强度。

目前,国内研究 PA66/sPS 共混物的报道较少,随着增容剂产业的迅速发展,增容剂的种类越来越多,不同接枝率的增容剂对树脂基体的增容效果各不相同,马来酸酐接枝聚苯醚利用聚苯醚和 sPS 相容性好的特点,实现其与 sPS 的良好相容,同时在和 PA66 熔融共混时,马来酸酐接枝聚苯醚上的活性基团可和 PA66 的端氨基反应实现反应增容,借以强化两类聚合物的界面黏结以改善相容性。笔者在确定 PA66 和 sPS 树脂基体质量比为 1:1、GF 质量分数为 30% 的条件下,制备 GF 增强 PA66/sPS 复合材料,探究不同接枝率的增容剂(马来酸酐接枝聚苯醚)及增容剂含量对复合材料力学性能和热性能的影响,为 sPS 基复合材料的研制和应用提供数据支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66:EPR27,神马实业股份有限公司;

sPS:90ZC,日本出光株式会社;

马来酸酐接枝聚苯醚:FB820,接枝率为 1.0%,佳易容聚合物(上海)有限公司;

马来酸酐接枝聚苯醚:CS-1,接枝率为 0.8%,科

艾斯化学有限公司;

马来酸酐接枝聚苯醚:KT-24,接枝率为 0.7%,沈阳科通塑胶有限公司;

抗氧剂 1010:圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

润滑剂:P12,德国布吕格曼有限公司;

GF:ECS10-3.0-T435N,短切,泰山玻璃纤维有限公司。

1.2 主要仪器及设备

同向平行双螺杆挤出机:ZSK-30,长径比为 44,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机:MA600/150,南京橡塑机械厂有限公司;

电子万能试验机:CMT6104,美特斯工业系统(中国)有限公司;

摆锤冲击试验机:ZBC7151-B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

高速混合机:SHR-10B,张家港市轻工机械有限公司;

热重(TG)分析仪:TG 309 Libra Classic,耐驰科学仪器商贸(上海)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;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 300 Caliris Select-S,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 试样制备

(1)原料干燥:将 PA66 和 sPS 树脂分别在鼓风干燥箱中于 120 °C 下干燥 3 h 除去水分,放置 2 h 后冷却。

(2)物料共混:将树脂、增容剂、润滑剂和抗氧剂按照一定比例使用高速混合机共混至混合均匀。

(3)双螺杆挤出机挤出造粒:按照配方确定的原材料比例,GF 通过侧喂料称进入双螺杆挤出机中,混合后的树脂、助剂等物料通过主喂料称进入双螺杆挤出机中,然后挤出造粒;挤出机 1~10 区温度为 130, 265, 265, 250, 250, 250, 250, 255, 265 °C,机头温度为 231 °C,螺杆转速为 280~320 r/min。

(4)测试样条的制备:将所制得的样品粒料放入鼓风干燥箱中在 120 °C 下干燥 2 h,然后使用注塑机制备标准力学性能测试样条,注塑工艺为熔体温度 290 °C、模具温度 50 °C、注射压力 80 MPa、保压压力 80 MPa、保压时间 3 s,最后,将注射成型后的样条在室

温下静置 24 h,并按照 GB/T 2918-2018 进行状态调节。

1.4 性能测试及表征

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 10 mm/min。

弯曲强度按照 GB/T 9341-2008 测试,弯曲速率 2 mm/min。

简支梁无缺口和缺口冲击强度按照 GB/T 1043.1-2008 测试,测试温度为 23 °C,摆锤能量为 1 J。

1.4.2 DSC 测试

按照 GB/T 19466.3-2004 进行 DSC 分析,以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 °C/min,待温度达到 310 °C 后,以 10 °C/min 的速率降温,直至样品降温到 50 °C,记录样品整个结晶放热曲线和熔融曲线。PA66 结晶度的计算公式见式(1)。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_\infty \cdot W_f} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c 为结晶度; ΔH_m 为复合材料的熔融焓; ΔH_∞ 为结晶度 100% 时的 PA66 理论熔融焓,经查阅文献[12]后确定为 188 J/g; W_f 为 PA66 在复合材料中的质量分数。

1.4.3 断面形貌分析

取拉伸试验后样条的断面,并对干燥后的样条断面进行喷金处理,在 FESEM 上观察断面并分析。

1.4.4 TG 测试

准确称重 5~10 mg 试样,放入经高温灼烧至恒重的 Al_2O_3 坩埚,在流量为 20 mL/min 的空气气氛中,以 20 K/min 升温速率从 350 K 升至 1 200 K,记录试样的 TG 曲线,数据采样点温度间隔为 2.5 K。

2 结果与讨论

2.1 不同接枝率增容剂对 GF 增强 PA66/sPS 复合材料性能和微观形貌的影响

2.1.1 力学性能

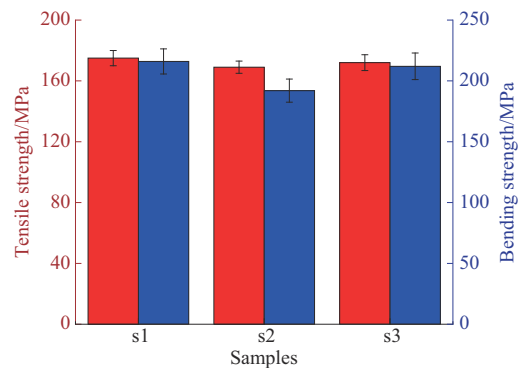
确定基体 PA66 树脂和 sPS 树脂的质量比为 1:1,选择市面上 3 种不同接枝率的马来酸酐接枝聚苯醚作为增容剂,分别制备 GF 增强 PA66/sPS 复合材料。复合材料具体的配方见表 1,力学性能对比结果如图 1 所示。

在对 GF 增强 PA66/sPS 复合材料进行加工时,不添加增容剂的复合材料在挤出造粒时无法成条,这主要是由于 PA66 和 sPS 基体分别为极性聚合物和非极性聚合物,两者之间相容性不好,很难形成

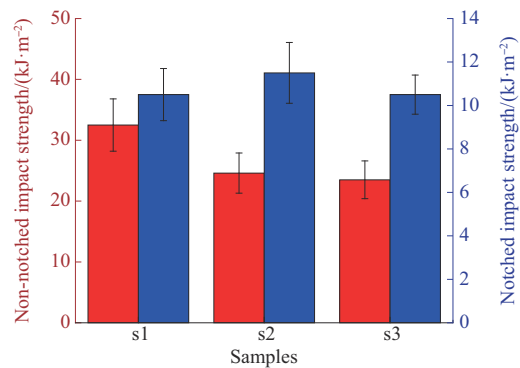
表 1 不同接枝率增容剂的 GF 增强 PA66/sPS 复合材料的配方
Tab. 1 Formulation of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

Materials	s1	s2	s3
PA66	50	50	50
sPS	50	50	50
GF	46.12	46.12	46.12
Compatibilizer FB820	6	0	0
Compatibilizer CS-1	0	6	0
Compatibilizer KT-24	0	0	6
Antioxygen 1010	0.3	0.3	0.3
Lubricating agent P12	0.3	0.3	0.3
Other additives	1	1	1

Notes: Mass fraction of GF in the composite is 30%.



(a) Tensile strength and bending strength



(b) Non-notched impact strength and notched impact strength

图 1 不同接枝率增容剂的 GF 增强 PA66/sPS 复合材料的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

均匀的共混物,出现了聚合物之间的分层和相分离^[12-13]。在引入增容剂马来酸酐接枝聚苯醚后,复合材料可以顺利挤出造粒加工。从图 1 可以看出,在按照表 1 的 s1, s2 和 s3 配方制得的复合材料中, s1 样品的综合力学性能最佳,其拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度和缺口冲击强度分别为 175 MPa, 216 MPa、32.5 kJ/m² 和 10.5 kJ/m²。综上所述,3 种不同接枝率的增容剂都能使 PA66 与 sPS 实现很好的相容性,综合看采用 FB820 的增容效果最好。这可

能是由于FB820的接枝率最高,其中含有的马来酸酐基团最多,马来酸酐基团与PA66中的氨基能够反应的位点更多,使得FB820的增容效果更好。

2.1.2 结晶性能

sPS与PA66都是结晶型材料,结晶行为对材料的加工性能起着重要的作用。因此,采用DSC对3种不同接枝率增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料的结晶性能进行表征,结果见图2和表2。

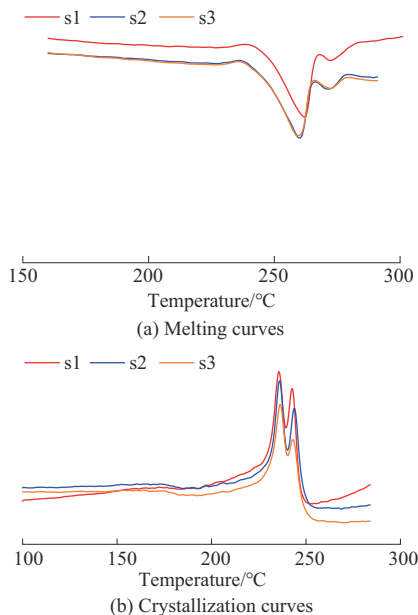


图2 不同接枝率增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料的熔融和结晶曲线

Fig. 2 Melting and crystallization curves of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

表2 不同接枝率增容剂GF增强PA66/sPS复合材料的DSC参数

Tab. 2 DSC parameters of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

Samples	$T_{m1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{m2}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$	$T_{c1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{c2}/^{\circ}\text{C}$
s1	261.80	272.33	36.07	38.37	242.68	235.68
s2	260.08	271.26	32.19	34.24	243.81	235.99
s3	258.94	272.30	29.61	31.50	243.19	236.37

Notes: T_{m1} is melting temperature of PA66; T_{m2} is melting temperature of sPS; ΔH_m is melting enthalpy; X_c is Crystallinity of PA66; T_{c1} is crystallization temperature of sPS; T_{c2} is crystallization temperature of PA66.

从图2a和2b可以看出,3种不同接枝率增容剂对复合材料的结晶峰和熔融峰位置影响不大。从表2可以看出,3种复合材料的熔融温度与结晶温度相差不大,这可能是因为增容剂均属于马来酸酐接枝聚苯醚,增容剂与PA66和sPS树脂均有很好的相容性,由于增容剂添加量相对较少,所以对复合材料基体树脂的结晶和熔融温度影响很小。以上结果

从注射成型测试样条中也能得到证明,3种不同接枝率的增容剂对复合材料加工性能无影响。另外,随着增容剂接枝率的减小,基体树脂中PA66的结晶度也逐渐减小,这可能是因为增容剂能起到一定的异相成核作用,但当增容剂接枝率变小时,与PA66端氨基发生反应的马来酸酐基团变少,导致增容剂与PA66的相互作用减弱,从而导致PA66结晶度下降。

2.1.3 热稳定性

热稳定性对复合材料的加工成型工艺至关重要,为此进一步对2.1.1中的3种复合材料进行了TG分析,结果见图3和表3。

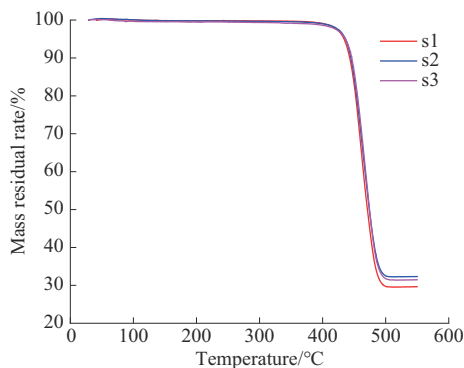


图3 不同接枝率增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料热的TG曲线

Fig. 3 TG curves of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

表3 不同接枝率增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料的热失重温度

Tab. 3 Weight loss temperatures of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios

Samples	$T_{s1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10}/^{\circ}\text{C}$	$T_{20}/^{\circ}\text{C}$	$T_{50}/^{\circ}\text{C}$
s1	433.59	442.80	452.20	470.95
s2	435.31	444.50	453.71	473.87
s3	434.92	445.02	454.22	473.01

Notes: T is weight loss temperature and its subscript number represents weight loss rate.

从图3和表3可以看出,3种复合材料s1,s2和s3均表现出相似的TG曲线。3种复合材料初始分解温度(失重5%的温度)分别为433.59,435.31,434.92 $^{\circ}\text{C}$,相差不大。这表明不同接枝率的增容剂对复合材料的热稳定性影响不大,且复合材料初始分解温度高于复合材料的加工温度(260~270 $^{\circ}\text{C}$),在加工温度下能保持良好的热稳定性。

2.1.4 微观形貌

采用FESEM对添加FB820,KT-24和CS-1 3种增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料的断面微观形貌进行分析,结果如图4所示。

从图4b和图4c可以看出,s2和s3样品断面中

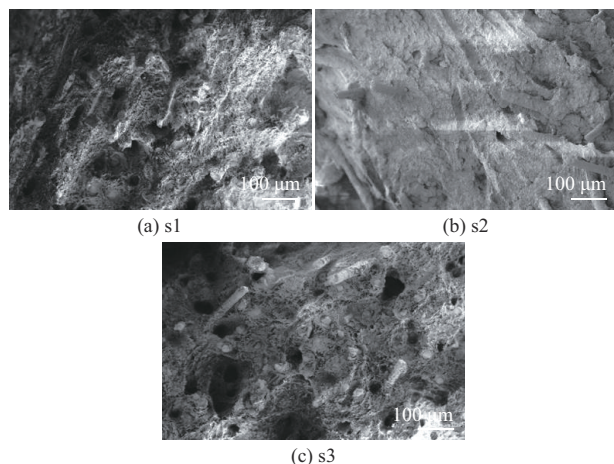


图4 不同接枝率增容剂的GF增强PA66/sPS复合材料
断面微观形貌($\times 1\,000$)

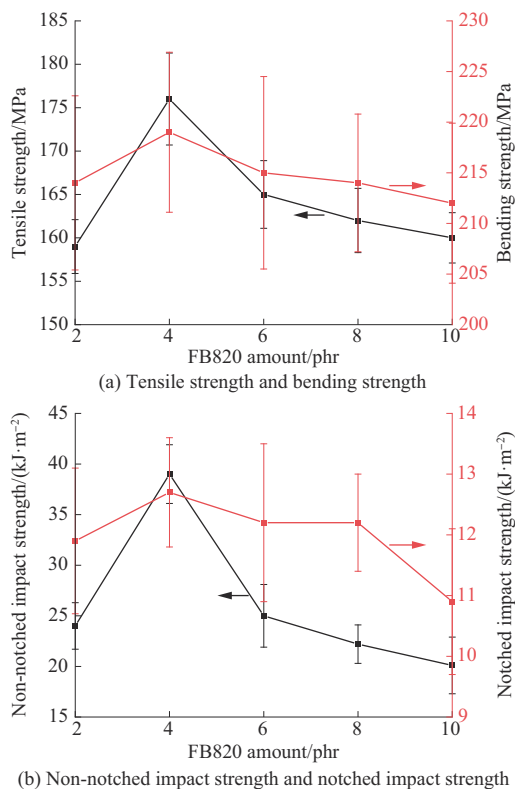
Fig. 4 Microscopic morphology of cross-section of GF reinforced PA66/sPS composites with compatibilizers of different grafting ratios ($\times 1\,000$)

有许多孔洞,特别是s3样品,在断面中可以发现纤维与基体间存在少量的缝隙。而图4a中s1样品的SEM断面显示,断面的孔洞较少,也无明显的纤维拔出现象。这可能是因为增容剂引入后,显著改善了基体树脂间以及纤维与基体之间相容性,相比而言,具有高接枝率的FB820含有更多的反应位点,起到更好的增容作用,促进各相之间的界面更加稳定。添加FB820增容剂可以使得复合材料界面结合力增大,从而使复合材料拉伸、弯曲和冲击性能明显提高。

2.2 增容剂的用量对GF增强PA66/sPS复合材料力学性能的影响

从2.1中的系列研究中得出,采用FB820作为增容剂,获得复合材料的综合力学性能最佳。因此,进一步探究了不同用量(2份、4份、6份、8份、10份)的增容剂FB820对GF增强PA66/sPS复合材料力学性能的影响,结果如图5所示。

从图5可以看出,随着FB820用量的增加,复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击性能均呈现先增加后降低的趋势。FB820最佳用量为4份,相应复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度和缺口冲击强度分别为176 MPa, 219 MPa, 39 kJ/m²和12.7 kJ/m²。这可能是因为添加4份的FB820,使得马来酸酐与PA66端氨基反应已经完全,增容剂分散在两相间的含量达到最大,两相的结合力显著增强,增容效果达到最佳,故使得复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度和缺口冲击强度达



(a) Tensile strength and bending strength
(b) Non-notched impact strength and notched impact strength
图5 不同FB820用量的GF增强PA66/sPS复合材料的力学性能
Fig. 5 Mechanical properties of GF reinforced PA66/sPS composites with different FB820 amounts

到最大。而当增容剂用量继续增加时,会产生过多游离的马来酸酐基团,由于马来酸酐基团为五元环结构,游离的马来酸酐基团之间会产生较大的空间位阻^[14-15],使得PA66与sPS的相容性变差,导致复合材料的力学性能下降。

3 结论

(1)选择3种不同接枝率的马来酸酐接枝聚苯醚增容剂,应用在GF增强PA66/sPS复合材料中,研究发现FB820的增容效果最佳。当FB820用量为6份时,相应复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度和缺口冲击强度分别为175 MPa, 216 MPa, 32.5 kJ/m²和10.5 kJ/m²。样条断面微观形貌分析也进一步证明了该结论。

(2)对比3种不同接枝率的马来酸酐接枝聚苯醚增容剂,发现增容剂的接枝率对GF增强PA66/sPS复合材料的熔融温度、结晶温度和热稳定性影响不大。

(3)选择马来酸酐接枝聚苯醚FB820为增容剂时,FB820最佳用量为4份,此时复合材料的综合性能最优,其拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度和缺口冲击强度分别为176 MPa, 219 MPa, 39 kJ/m²和

12.7 kJ/m²。

参考文献

- [1] 赵娟. 改性聚苯乙烯塑料的力学性能研究进展[J]. 塑料科技, 2023, 51(5):115–119.
ZHAO Juan. Research progress in mechanical properties of modified polystyrene plastics[J]. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(5):115–119.
- [2] 李伯耿, 余波, 曹堃. 间规聚苯乙烯改性的研究[J]. 化工进展, 2003, 22(6):559–563.
LI Bogeng, YU Bo, CAO Kun. Advances in modification of syndiotactic polystyrene[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2003, 22(6):559–563.
- [3] 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.
- [4] 杨敏, 丁会利, 闫卫东. 间规聚苯乙烯的改性研究[J]. 广州化学, 2003, 28(3):53–57.
YANG Min, DING Huili, YAN Weidong. The research development of modification for syndiotactic polystyrene[J]. *Guangzhou Chemistry*, 2003, 28(3):53–57.
- [5] 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 of glass fiber reinforced sPS composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(11):130–135.
- [6] 黎华明, 沈志刚, 王进, 等. 间规聚苯乙烯/尼龙6/磺化间规聚苯乙烯/蒙脱土纳米复合材料的研究[J]. 功能高分子学报, 2002, 15(3):261–265.
LI Huaming, SHEN Zhigang, WANG Jin, et al. Studies of syndiotactic polystyrene/polyamide-6/sulfonated syndiotactic polystyrene/montmorillonite nanocomposites[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2002, 15(3):261–265.
- [7] 徐德民, 柯毓才, 胡友良, 等. 釜内聚合法制备间规聚苯乙烯与聚丙烯共混复合材料[J]. 高分子学报, 2001(5):594–598.
XU Demin, KE Yucui, HU Youliang, et al. Blends of syndiotactic polystyrene and isotactic polypropylene prepared by reactor polymerization[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2001(5):594–598.
- [8] 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.
- [9] 浦鸿汀, 沈志刚, 周文乐, 等. 间规聚苯乙烯结晶性能的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(6):5–10.
PU Hongting, SHEN Zhigang, ZHOU Wenle, et al. Research advance in crystalline properties of syndiotactic polystyrene[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2002, 18(6):5–10.
- [10] HWANG S H, KIM Y S, CHA H C, et al. Thermal and physical properties of poly(phenylene oxide) blends with glass fiber reinforced syndiotactic polystyrene[J]. *Polymer*, 1999, 40(21):5 957–5 960.
- [11] 曹有名, 沈志刚, 林尚安. SPS/PA66/g-SPS/纳米Al₂O₃粒子复合材料性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004(4):543–547.
CAO Youming, SHEN Zhigang, LIN Shang'an. Properties of SPS/PA66/g-SPS/Al₂O₃ particles nanocomposites[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2004(4):543–547.
- [12] AKIHIKO O, HIROKI F. Polystyrene resin composition: JPH0748488A[P]. 1995-02-21.
- [13] 张榕. 5G基站滤波器用聚苯硫醚基复合材料的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2023.
ZHANG Rong. Research on polyphenylene sulfide-based composites for 5G base station filters[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [14] 刘威, 王敦, 秦梓喻, 等. MBS对PC/ABS/纤维增强材料界面和力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(8):150–156.
LIU Wei, WANG Dun, QIN Ziyu, et al. Influences of MBS on the interfacial and mechanical properties of PC/ABS/fiber reinforced materials[J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(8):150–156.
- [15] 郑祥, 裴涛, 张凯舟, 等. 玻璃纤维增强PVC/ABS合金材料性能的研究[J]. 塑料工业, 2011, 39(4):34–37.
ZHENG Xiang, PEI Tao, ZHANG Kaizhou, et al. Study on the properties of glass fiber reinforced PVC/ABS alloy[J]. *China Plastics Industry*, 2011, 39(4):34–37.