

# 高CTI玻璃纤维增强聚苯硫醚的制备与性能研究

吴德洋, 秦维练, 苏龙群, 黄渝, 吴雨栋, 宁露, 刘洪, 郭万才\*

(四川中科兴业高新材料有限公司, 四川眉山 620000)

**摘要:** 聚苯硫醚(PPS)是一种具有优异耐热性、耐化学腐蚀性和阻燃性的新型工程塑料,但耐漏电起痕性能相对较低,限制其在高绝缘要求的应用场合的使用。文章研究PPS树脂基体的种类和碳酸钙含量对复合材料性能的影响,旨在开发具有优异耐漏电起痕性能的玻璃纤维增强PPS复合材料。结果表明:PPS(GAC08)的复合材料在拉伸强度、弯曲强度及弯曲模量方面表现优异,而PPS(GAC05)的复合材料则在耐漏电起痕性能上表现最佳。随着碳酸钙含量的增加,复合材料的密度和熔体质量流动速率增大,而拉伸强度、断裂伸长率、弯曲强度及弯曲模量则呈先增大后减小的趋势。当碳酸钙质量分数为8%时,复合材料的综合性能达到最优,拉伸强度为164 MPa,断裂伸长率为6.8%,弯曲强度为245 MPa,弯曲模量为11 250 MPa,缺口冲击强度为14 kJ/m<sup>2</sup>,耐漏电起痕指数(CTI)为200 V。然而,碳酸钙添加过量会导致团聚现象,影响复合材料的力学性能和CTI。研究结果为PPS复合材料在特殊电子电器领域的应用提供新的可能性。

**关键词:** 聚苯硫醚;耐漏电起痕指数;玻璃纤维;复合材料

中图分类号: TQ326.56; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0081-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.015

## Study on Preparation and Properties of High CTI Glass Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide

WU Deyang, QIN Weilian, SU Longqun, HUANG Yu, WU Yudong, NING Lu, LIU Hong, GUO Wancai\*

(Sichuan Zhongke Xingye High-Tech Material Co., Ltd., Meishan 620000, China)

**Abstract:** Polyphenylene sulfide (PPS) was a novel engineering plastic with excellent heat resistance, chemical corrosion resistance, and flame retardancy, but its relatively low comparative tracking index limited its application in occasions with high insulation requirements. The study investigated the effects of PPS resin matrix types and calcium carbonate content on the properties of composites, aiming to develop glass fiber-reinforced PPS composites with excellent comparative tracking index performance. The results showed that the PPS (GAC08) composite exhibited excellent performance in tensile strength, flexural strength, and flexural modulus, while the PPS (GAC05) composite demonstrated the best comparative tracking index performance. With the increase of calcium carbonate content, the density and melt mass flow rate of the composites increased, whereas the tensile strength, elongation at break, flexural strength, and flexural modulus exhibited a trend of initial increase followed by decrease. When the mass fraction of calcium carbonate was 8%, the comprehensive properties of the composite reached the optimal level, with a tensile strength of 164 MPa, an elongation at break of 6.8%, a bending strength of 245 MPa, a bending modulus of 11 250 MPa, a notched impact strength of 14 kJ/m<sup>2</sup>, and a comparative tracking index (CTI) of 200 V. However, excessive addition of calcium carbonate led to agglomeration phenomena, which subsequently affected the mechanical properties and CTI of the composites. The research results provide new possibilities for the application of PPS composite materials in special electronic and electrical fields.

**Keywords:** Polyphenylene sulfide; Comparative tracking index; Glass fiber; Composites

收稿日期 Submitted date 2025-04-22; 修回日期 Revised date 2025-05-28; 录用日期 Accepted date 2025-07-23

基金项目: 四川省中央引导地方科技发展专项项目(2024ZYD0281)

\*联系人, guowancai@sc-dct.com

引用本文: 吴德洋, 秦维练, 苏龙群, 等. 高CTI玻璃纤维增强聚苯硫醚的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 81-85.

Citation: WU D Y, QIN W L, SU L Q, et al. Study on preparation and properties of high CTI glass fiber reinforced polyphenylene sulfide[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 81-85.

航空航天工业和轨道交通等领域快速发展对兼具卓越热稳定性、超高强度、优异绝缘性和耐久性的高性能多功能材料的需求日益增长<sup>[1]</sup>。聚苯硫醚(PPS)作为一种高性能工程塑料,其分子链由苯环与硫原子交替构成,这种独特结构赋予PPS出色的热稳定性、耐腐蚀性、阻燃性和电气绝缘性能,使其在电子、汽车、机械和化工等领域得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>。然而,PPS本身脆性较高,冲击性能不足。为改善PPS的韧性,研究人员广泛采用纤维增强方法,其中玻璃纤维增强PPS因具有卓越的力学性能和绝缘性能,且成本低廉、加工简便、可回收利用,在电子电器领域得到广泛应用,如保险丝支架、变压器壳体和传感器等<sup>[4-5]</sup>。

耐漏电起痕指数(CTI)是衡量材料抵抗表面污染物和湿气引起漏电现象的重要指标,直接反映材料在高电压环境下防止电弧追踪、降低短路和电气故障风险的能力<sup>[6]</sup>。尽管PPS材料具有耐高温和优异机械性能等综合优势,但在高电压负荷下易产生碳化现象,导致其CTI较低。对于玻璃纤维增强PPS材料,其常规CTI约为170 V,未能达到最低标准175 V的要求<sup>[7]</sup>。以往国内外对PPS材料开展了多种改性研究,涉及韧性、摩擦性能、导电性能、流变性能和抗氧化性能等方面,但针对PPS材料CTI的改性研究相对较少<sup>[8-11]</sup>。

因此,本研究采用“基体筛选-填料优化”的分步研究策略。先固定碳酸钙质量分数为8%(预实验初步优化值),对比不同PPS基体(GAC05、GAC08、GAT05)的性能差异,快速锁定高CTI潜力基体。随后针对筛选出的最优基体,系统研究碳酸钙含量对性能的影响规律,避免无效实验,将资源聚焦于最具应用前景的材料体系,为高CTI的PPS材料的产业化提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PPS, GAC05、GAC08、GAT05, 重庆聚狮新材料科技有限公司, 表1为3种PPS树脂的性能指标; 偶联剂, KH-560, 江西晨光新材股份有限公司; 复配弹性体, 聚烯

烃弹性体(POE8480, 相对分子质量  $1 \times 10^5$ , 陶氏化学)和EMA-GMA三元共聚物弹性体(LOTADER®AX8700, 韩国SK集团)混合质量比为1:1; 玻璃纤维, ECT4300A-2000, 质量分数98%, 重庆国际复合材料股份有限公司; 碳酸钙, AP10F-25, 质量分数98.5%, 四川亿欣新材料有限公司。

表1 3种PPS树脂的性能指标

Tab.1 Performance indicators of three PPS resins

PPS种类	熔体流动速率/ [g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	水分/%	灰分/%	白度	CTI/V
GAC05	25	≤0.3	≤0.3	≥80	140
GAC08	35	≤0.3	≤0.3	≥80	120
GAT05	100	≤0.3	≤0.3	≥80	125

注: 按照ISO 1133—1:2022测试, 测试温度315 °C, 负荷5 kg。

### 1.2 仪器与设备

箱式电阻炉, SX2-10-12N, 广州航信科学仪器有限公司; 熔体流动速率仪, CB-400B, 重庆重标实验仪器有限公司; 电子密度计, DX-300, 厦门群隆仪器有限公司; 微机控制电子万能试验机, CBW-2T, 重庆重标实验仪器有限公司; 简悬组合冲击试验机, CBS-22J, 重庆重标实验仪器有限公司; 表面电阻测试仪, TG-600A, 苏州通格防静电设备有限公司; 扫描电子显微镜(SEM), Sigma 360/560, 德国蔡司集团; 双螺杆挤出机, ZSK 26 Mc<sup>18</sup>, 德国Coperion公司; 注塑机, 海天 Mars 1200, 海天国际控股有限公司; 触屏式漏电起痕试验机, LDQ-2, 北京智德创新仪器设备有限公司; 能谱仪(EDS), Xplore 30, 牛津仪器科技(上海)有限公司。

### 1.3 样品制备

表2为复合材料的配方。按照表2配方将PPS、复配弹性体、碳酸钙投入高速搅拌器混合30 min, 向混匀的物料中加入0.5 g的KH-560偶联剂, 再继续搅20 min。之后用双螺杆挤出机造粒, 混合的物料从主喂料口加入, 玻璃纤维从侧喂料口加入, 挤出温度220~280 °C, 螺杆转速300 r/min。挤出得到的改性PPS粒料置于烘箱中, 150 °C烘干3 h。烘干后注塑得到标准样条, 注射温度为300~330 °C。

表2 复合材料的配方

Tab.2 Formula of composites

单位: %

样品	W <sub>PPS(GAC05)</sub>	W <sub>PPS(GAC08)</sub>	W <sub>PPS(GAT05)</sub>	W <sub>碳酸钙</sub>	W <sub>玻璃纤维</sub>	W <sub>复配弹性体</sub>	W <sub>KH-560偶联剂</sub>
S0	54	0	0	0	41.5	4	0.5
S1	50	0	0	4	41.5	4	0.5
S2	46	0	0	8	41.5	4	0.5
S3	42	0	0	12	41.5	4	0.5
S4	38	0	0	16	41.5	4	0.5
S5	0	46	0	8	41.5	4	0.5
S6	0	0	46	8	41.5	4	0.5

注: S0~S4表示GAC05基体的碳酸钙梯度实验; S2、S5~S6表示基体筛选实验, 固定碳酸钙质量分数8%(基于预实验最优结果)。

### 1.4 性能测试与表征

灰分测定: 根据ISO 3451—1: 2019, 采用箱式电阻炉测量样品灰分。测试温度850 °C, 时间4 h。

熔体质量流动速率测试: 根据ISO 1133—1: 2022, 采

用熔体流动速率仪测量样品的熔体质量流动速率。测试温度315 °C, 负荷5 kg。在测试过程中, 将样品放入预热至315 °C的熔体流动速率仪中, 施加5 kg的负荷, 记录样品在10 min内的流出质量。

密度测定:根据 ISO 1183—1: 2019,采用浸渍法测量样品的密度。

拉伸性能的测定:根据 ISO 527—1: 2012,采用微机控制电子万能试验机测量样品的拉伸强度和断裂伸长率。拉伸速度 5 mm/min,样品尺寸 170 mm×20 mm×4 mm。

弯曲性能的测定:根据 ISO 178: 2010,采用微机控制电子万能试验机测量样品的弯曲强度和弯曲模量。试验速度为 2 mm/min,样品尺寸 80 mm×10 mm×4 mm。

简支梁冲击强度的测定:根据 ISO 179—1:2023,采用简悬组合冲击试验机测量样品的冲击强度。冲击能量选择 2.75 J,基本速度 2.9 m/s,样品采用标准的 2 mm 深的 V 型缺口。

CTI 测试:根据 IEC 60112:2020,采用触屏式漏电起痕试验机测量样品的 CTI。

形貌测试:选取弯曲测试后样品的断口,截面较平整的部分喷金处理,使用电子扫描显微镜观察断口形貌。借助能谱仪对微区 Ca 元素分布进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合材料的表征及性能分析

树脂基体在复合材料中发挥黏结和承载的作用<sup>[12]</sup>。表 3 为复合材料的物理及力学性能。从表 3 可以看出,不同样品的密度和灰分相差不大,而 S2 样品的熔体流动速率比 S5 和 S6 样品小。结合表 1 可以看出,不同 PPS 树脂与其他组分复合之后熔体流动速率发生较大变化,与对应的 PPS 树脂相比,S2 和 S5 样品的熔体流动速率提高。S6 样品的熔体流动速率显著高于 S0,这可能与 GAT05 树脂的高流动性及碳酸钙的分散状态有关<sup>[10]</sup>。综上所述,PPS 树脂基体对复合材料的成型流动性影响较大。

表 3 复合材料的物理及力学性能

Tab.3 Physical and mechanical properties of composites

样品	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	灰分/ %	熔体流动速率/ [g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	拉伸强度/ MPa	断裂伸长率/ %	弯曲强度/ MPa	弯曲模量/ MPa	缺口冲击强度/ (kJ·m <sup>-2</sup> )
S0	1.62	53	25	134	6.45	190	10 600	7
S1	1.64	52	27	137	6.60	198	10 650	8
S2	1.69	50	33	164	6.80	245	11 250	14
S3	1.72	51	50	166	7.20	240	11 100	17
S4	1.74	51	55	130	6.25	191	11 050	10
S5	1.72	52	54	167	6.60	247	13 830	11
S6	1.70	51	54	157	6.30	235	13 170	12

S2、S5 样品的拉伸强度和断裂伸长率均比 S6 样品优异,这与 PPS(GAT05)树脂的分子量较小有关,分子量的提高可以增加分子链之间的缠结,从而增强材料的拉伸强度和断裂伸长率<sup>[13]</sup>。不同样品的冲击强度在 7~14 kJ/m<sup>2</sup> 间波动。对于高性能工程塑料而言,弯曲强度的表征尤为关键。S2、S5 样品的弯曲强度相当,S6 样品的弯曲强度较小。从微观的角度分析,良好的界面结合有助于应力的有效传递,从而提高复合材料的弯曲强度。

图 1 为 S2、S5 和 S6 样品弯曲断口微观形貌的 SEM 照片。从图 1 可以看出,S6 样品断口有许多纤维被拔出,而 S2 和 S5 样品断口存在明显的韧窝。另外,S2 和 S5 样品断口处的纤维表面附着一层基体,而 S6 样品纤维表面光滑。这说明 S2 和 S5 样品基体与纤维之间的结合强度比 S6 样品好。因此,S2 和 S5 样品的弯曲强度比 S6 样品优异。

表 4 为复合材料的 CTI。从表 4 可以看出,虽然 S5 样品的力学性能最好,但 CTI 最小,为 150 V,尚且不能满足安全标准规定的 175 V;S2 样品的 CTI 最大,为 200 V。这可能是由于玻璃纤维和碳酸钙高强度填料的加入通过应力传递和界面结合显著提高材料的拉伸强度、刚度和抗冲击性,但碳酸钙的和玻璃纤维的加入可能形成导电通路,或破坏基体均匀性导致电场集中,加速漏电痕迹的形成<sup>[14-15]</sup>。

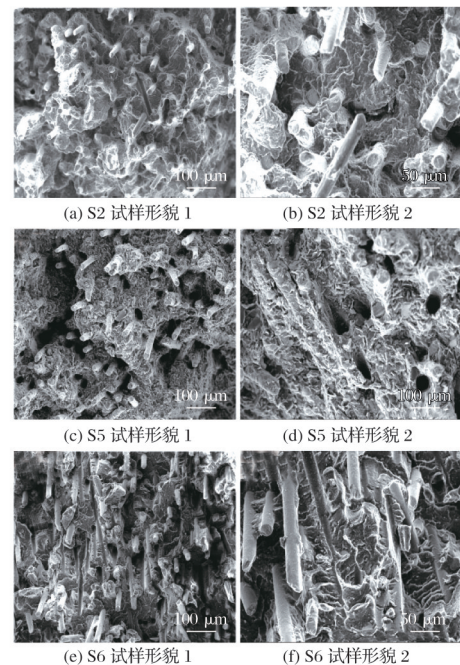


图 1 S2、S5 和 S6 样品弯曲断口微观形貌的 SEM 照片  
Fig.1 SEM images of microstructure of bending fracture surface of S2, S5 and S6 samples

### 2.2 碳酸钙含量对复合材料性能的影响

表 5 为碳酸钙含量对复合材料物理性能的影响。从表 5 可以看出,随着碳酸钙含量的增加,样品的密度呈现

略增大的趋势,这是因为碳酸钙的密度大于玻璃纤维的密度。样品的灰分随碳酸钙含量增多无明显变化,而熔体质量流动速率随碳酸钙含量增多显著增大,说明碳酸钙有助于提高PPS复合材料的成型流动性。一方面碳酸钙可以有效降低PPS基体的黏度,使复合材料在加工过程中更容易流动;另一方面碳酸钙在PPS基体中起到物理隔离的作用,减少PPS分子链间的直接相互作用,从而降低了分子链运动的阻力<sup>[16]</sup>。

表4 复合材料的CTI  
Tab.4 CTI of composites 单位:V

样品	CTI
S0	140
S1	175
S2	200
S3	160
S4	155
S5	150
S6	175

表5 碳酸钙含量对复合材料物理性能的影响

Tab.5 Effect of calcium carbonate content on physical properties of composites

样品	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	灰分/%	熔体质量流动速率/[g·(10 min) <sup>-1</sup> ]
S0	1.62	53	25
S1	1.64	52	27
S2	1.69	50	33
S3	1.72	51	50
S4	1.74	51	55

图2为碳酸钙质量分数对复合材料拉伸强度和断裂伸长率的影响。从图2可以看出,碳酸钙质量分数由4%增加至16%时,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均呈先增大后减小趋势。当碳酸钙质量分数为12%时,复合材料的拉伸强度最大为166 MPa,断裂伸长率最大为7.2%,说明碳酸钙含量过多或过少都不利于复合材料的拉伸性能。当碳酸钙质量分数从4%增至16%时,PPS(GAC05)质量分数从50%降至38%,可能导致基体对填料的包裹能力下降,界面结合减弱,而纤维在复合材料中充当骨架,因此拉伸强度和断裂伸长率急剧减小<sup>[17-18]</sup>。

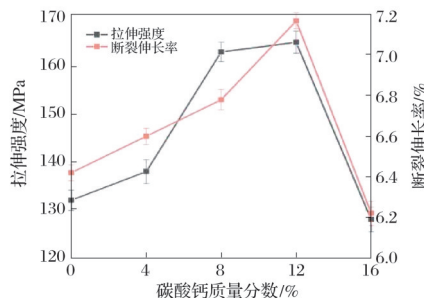


图2 碳酸钙质量分数对复合材料拉伸强度和断裂伸长率的影响  
Fig.2 Effect of calcium carbonate mass fraction on tensile strength and elongation at break of composites

图3为碳酸钙质量分数对复合材料弯曲强度和弯曲模量的影响。从图3可以看出,PPS复合材料的弯曲强度随碳酸钙质量分数的增加先增大后减小,弯曲模量的变化趋势与弯曲强度一致。当碳酸钙质量分数为8%时,复合材料的弯曲强度最大为245 MPa;当碳酸钙质量分数为16%时,复合材料的弯曲强度最小为189 MPa。这是因为碳酸钙粒子与PPS基体的界面相容性较差,随着碳酸钙含量的增加,部分碳酸钙的团聚造成应力集中和缺陷,同时高强度的玻璃纤维含量减少,从而导致弯曲强度下降<sup>[19-20]</sup>。在弯曲模量方面,碳酸钙作为刚性粒子具有高的比模量,可以提高复合材料的弯曲模量,但是随着碳酸钙含量的增加,碳酸钙容易发生团聚,又限制了弯曲模量的提升<sup>[21]</sup>。

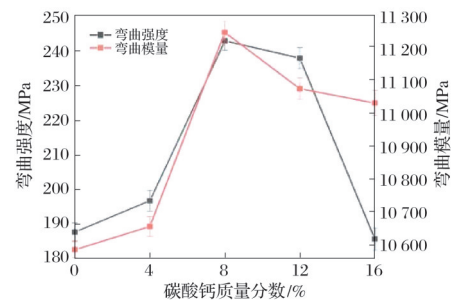


图3 碳酸钙质量分数对复合材料弯曲强度和弯曲模量的影响  
Fig.3 Effect of calcium carbonate mass fraction on bending strength and bending modulus of composites

图4为碳酸钙质量分数对复合材料缺口冲击强度的影响。从图4可以看出,复合材料的缺口冲击强度随碳酸钙含量的增加先增大后减小,加入适量的碳酸钙具有增韧的作用。当碳酸钙质量分数为12%时,复合材料的冲击强度达到最大值17 kJ/m<sup>2</sup>。碳酸钙增韧的原因:一方面是碳酸钙与PPS基体形成“芯-壳”结构,当材料受到冲击力时,基体包裹中碳酸钙粒子能够阻碍裂纹的扩展,使材料被破坏的程度减缓;另一方面碳酸钙粒子充当应力集中剂,能够在受到冲击时引发剪切带的形成,从而吸收更多能量<sup>[22-23]</sup>。

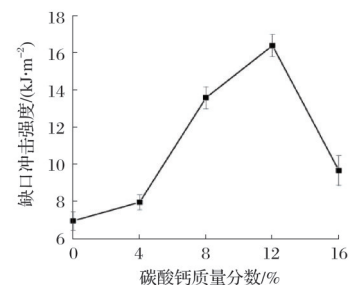


图4 碳酸钙质量分数对复合材料缺口冲击强度的影响  
Fig.4 Effect of calcium carbonate mass fraction on notch impact strength of composites

图5为碳酸钙质量分数对复合材料CTI的影响。从图5可以看出,当碳酸钙质量分数为8%时,复合材料的CTI最大为200 V,而当碳酸钙含量继续增多,复合材料的CTI减小为150 V。碳酸钙为绝缘填料,其本身的绝缘性

能有利于提高复合材料的CTI。然而,碳酸钙分散不均匀或存在团聚,会在材料中形成微观尺度上的非均匀结构,导致局部电场分布不均,CTI降低。

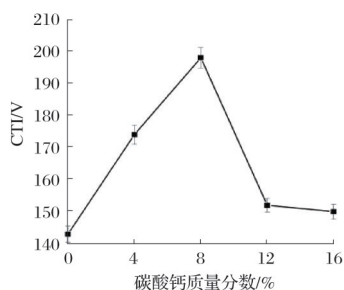


图5 碳酸钙质量分数对复合材料CTI的影响  
Fig.5 Effect of calcium carbonate mass fraction on CTI of composites

图6为S2和S4样品微观形貌的SEM照片。从图6可以看出,当碳酸钙质量分数为8%时,碳酸钙在基体中均匀分散;当碳酸钙质量分数提高至16%时,碳酸钙的分散性下降,在基体中密集分布,存在严重的团聚现象。

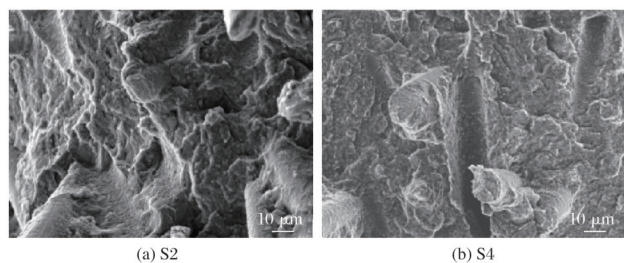


图6 S2和S4样品微观形貌的SEM照片

Fig.6 SEM images of microstructure of S2 and S4 samples

### 3 结论

对比固定填料质量分数(8%)下的不同PPS基体发现,GAC05基复合材料具有优异的拉伸强度和弯曲强度。同时,GAC05基复合材料的CTI最高(200 V),其耐漏电起痕性能显著优于GAC08和GAT05基材料,表明PPS树脂的本征绝缘性能是复合材料CTI的决定性因素。随着碳酸钙含量的增加,复合材料的密度和熔体流动速率增大,复合材料拉伸强度、断裂伸长率、弯曲强度及弯曲模量均先增大后减小。当碳酸钙的质量分数为8%时,复合材料的CTI最大。然而,碳酸钙添加过量存在分布不均匀和团聚现象,会对复合材料的力学性能和CTI产生负面影响。

#### 参考文献

- [1] KIM S G, HEO S J, KIM S, et al. Ultrahigh strength and modulus of polyimide-carbon nanotube based carbon and graphitic fibers with superior electrical and thermal conductivities for advanced composite applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110342.
- [2] TANG L, ZHANG J L, TANG Y S, et al. Polymer matrix wave-transparent composites: A review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 75: 225-251.
- [3] JIAN L, TAO S. The mechanical and tribological properties of CF/PPS composite filled with PA6[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2014, 27(5): 594-602.
- [4] WANG S, AKBOLAT M Ç, KATNAM K B, et al. On the R-curve behaviour of carbon/epoxy laminates with core-shell rubber nanoparticle and micro-fibre veil hybrid toughening: Carbon vs PPS veils[J]. *Polymer*, 2022, 254: 125081.
- [5] LIU B Y, WANG X J, LONG S R, et al. Interfacial micromechanics of carbon fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites[J]. *Composite Interfaces*, 2014, 21(4): 359-369.
- [6] FU B, LIN L B, ZHOU X, et al. Effect of incorporating recycled macro fibres on the properties of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 83: 108460.
- [7] ISAINCU A, MICOTA D, MARŞAVINA L. On the fracture toughness of PPS and PPA reinforced with glass fiber[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 41: 646-655.
- [8] REN H H, XU D X, YAN G M, et al. Effect of carboxylic polyphenylene sulfide on the micromechanical properties of polyphenylene sulfide/carbon fiber composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 146: 65-72.
- [9] LATES M T, VELICU R, GAVRILA C C, et al. Temperature, pressure, and velocity influence on the tribological properties of PA66 and PA46 polyamides[J]. *Materials*, 2019, 12(20): 3452.
- [10] JIANG T, GENG C Z, ZHOU H M, et al. Rheological and mechanical properties of polyphenylene sulfide reinforced with round and rectangle cross-section glass fibers[J]. *High Performance Polymers*, 2017, 29(7): 849-856.
- [11] ZHANG D, QI H M, ZHAO F Y, et al. Tribological performance of PPS composites under diesel lubrication conditions[J]. *Tribology International*, 2017, 115: 338-347.
- [12] SARASINI F. Vinylester resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites[M]//Advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Amsterdam: Elsevier, 2023.
- [13] LV S Y, YANG F, YU Z H, et al. Enhancing shear resistance in ultrahigh-molecular-weight polyolefin drag-reducing agents via siloxane bond integration[J]. *Energy*, 2025, 320: 135281.
- [14] YAN D D, ZHANG X H. Recent development on the theory of polymer crystallization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(18): 188201.
- [15] 王欧白, 张宇, 刘述梅, 等. 高分子材料漏电起痕现象分析[J]. *合成材料老化与应用*, 2021, 50(2): 124-127.
- [16] 马沛岚, 苑会林, 王永刚. PP/纳米CaCO<sub>3</sub>原位复合材料流变性能[J]. *石化技术与应用*, 2004, 22(1): 55-57.
- [17] ISLAM SIAM M S, TURJO S M K S, ANTU M N R, et al. Effects of fiber content on the mechanical properties of rice straw/carbon/glass fiber reinforced epoxy composites: Experimental and numerical analysis [J]. *Hybrid Advances*, 2025, 9: 100402.
- [18] 庄卫国. 玻纤含量对玻纤增强聚丙烯拉伸性能的影响[J]. *精密成形工程*, 2010, 2(2): 20-22.
- [19] MARGOLINA A, WU S H. Percolation model for brittle-tough transition in nylon/rubber blends[J]. *Polymer*, 1988, 29(12): 2170-2173.
- [20] 张翼清, 初立秋, 金剑, 等. 纳米碳酸钙改性聚丙烯的性能与增韧机理[J]. *合成树脂及塑料*, 2023, 40(2): 1-5.
- [21] CHEN J F, WANG G Q, ZENG X F, et al. Toughening of polypropylene-ethylene copolymer with nanosized CaCO<sub>3</sub> and styrene-butadiene-styrene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 94(2): 796-802.
- [22] 张桂云, 古建议. 聚丙烯/碳酸钙复合材料改性研究[J]. *现代塑料加工应用*, 2009, 21(5): 33-35.
- [23] WEON J I, GAM K T, BOO W J, et al. Impact-toughening mechanisms of calcium carbonate-reinforced polypropylene nanocomposite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 99(6): 3070-3076.