

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.018

石墨改性聚酰亚胺特种工程塑料的性能分析

冯献礼¹, 王一帆², 陈行州³, 沈丰³, 王伟²(1. 河南农业大学实验室与设备管理办公室分析测试中心, 郑州 450046; 2. 浙大宁波理工学院材料科学与工程学院, 浙江宁波 315100;
3. 宁波永灵航空科技有限公司, 浙江宁波 315191)

摘要: 美国杜邦公司的 Vespel®SP-21 作为一种高性能聚酰亚胺工程塑料, 因具有优异耐高低温性能、尺寸稳定性和耐磨损性能, 已经广泛应用于低温行业, 但是, 其存在韧性差、加工困难和成本高等问题。为替代 Vespel®SP-21, 以质量分数为 15% 的石墨微粉填充结晶性聚酰亚胺, 通过热压成型制备了石墨/结晶性聚酰亚胺复合材料(PI/C), 系统地测试了 PI/C 的热学、力学、尺寸稳定性及摩擦磨损等性能, 并与 Vespel®SP-21 进行了对比。结果表明, PI/C 的玻璃化转变温度约为 215 °C, 熔融温度为 370 °C, 5% 热失重温度为 537 °C, 略高于 Vespel®SP-21 (531 °C), 具有优异的热稳定性; PI/C 与 Vespel®SP-21 在 50~150 °C 范围内具有相当的储能模量, 且熔融加工性更加优异, 但是耐热性相对较差。PI/C 在 -150~100 °C 温度区间内热膨胀系数变化率约为 26%, 优于 Vespel®SP-21 的 35%; 室温下 PI/C 的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和简支梁无缺口冲击强度均远高于 Vespel®SP-21; 在 200 °C 下 PI/C 也保持了优异的力学性能; 在 -150 °C 下 PI/C 的压缩强度达到 297 MPa, 表现出更加优异的低温压缩性能; PI/C 的摩擦系数为 0.3, 磨痕宽度为 4.5 mm, 显示出良好的耐磨损性能。制备的 PI/C 可替代 Vespel®SP-21 成为低温环境的优选材料, 在低温泵行业中具有广阔的应用前景。

关键词: 聚酰亚胺; 石墨; 复合材料; 摩擦磨损; 尺寸稳定性; 高温力学性能; 低温力学性能

中图分类号: O632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0128-06

Properties analysis of graphite modified polyimide special engineering plastic

FENG Xianli¹, WANG Yifan², CHEN Xingzhou³, SHEN Feng³, WANG Wei²(1. Analytical Instrumentation Center, Laboratory and Equipment Management Office of Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;
2. School of Materials Science and Engineering, NingboTech University, Ningbo 315100, China;
3. Ningbo Yongling Aviation Technology Co., Ltd., Ningbo 315191, China)

Abstract : Vespel®SP-21, a high-performance polyimide engineering plastic produced by DuPont, has been widely used in the cryogenic industry due to its excellent high and low-temperature resistance, dimensional stability, and wear resistance. However, it suffers from poor toughness, difficult processing, and high costs. To replace Vespel®SP-21, crystalline polyimide was filled with graphite micro powder of 15 wt% to prepare graphite/crystalline polyimide composite (PI/C) through hot pressing. The thermal, mechanical, dimensional stability, and friction-wear properties of PI/C were systematically tested. Properties of PI/C were also compared with those of Vespel®SP-21. The results show that the glass transition temperature of PI/C is approximately 215 °C, the melting temperature is 370 °C, the thermal weight loss temperature at 5% is 537 °C, which is slightly higher than that of Vespel®SP-21 (531 °C), indicates that PI/C exhibits excellent thermal stability. PI/C has comparable storage modulus to Vespel®SP-21 at 50–150 °C, and its melt processability is more excellent, however, its thermal resistance is relatively inferior. Within the temperature range of -150 °C to 100 °C, the change rate of the coefficient of thermal expansion of PI/C is approximately 26%, which is better than that (35%) of Vespel®SP-21. At room temperature, the tensile strength, flexural strength, compressive strength, and Charpy non-

基金项目: 宁波市青年科技创新领军人才项目(2023QL045), 宁波市鄞州区技术创新挑战赛项目(2023YZQ090005), 浙江省公益技术应用研究项目(LGG22E030014), 宁波市重大科技攻关暨“揭榜挂帅”项目(2022Z004)

通信作者: 王伟, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为耐热高分子材料

收稿日期: 2025-03-19

引用格式: 冯献礼, 王一帆, 陈行州, 等. 石墨改性聚酰亚胺特种工程塑料的性能分析[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 128–133.

FENG Xianli, WANG Yifan, CHEN Xingzhou, et al. Properties analysis of graphite modified polyimide special engineering plastic[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 128–133.

notched impact strength of PI/C are all higher than those of Vespel®SP-21. PI/C also maintains excellent mechanical properties at 200 °C. At -150 °C, the compressive strength of PI/C reaches 297 MPa, showing more excellent low-temperature compressive performance. The friction coefficient of PI/C is 0.3 and the wear track width is 4.5 mm, showing good wear resistance. The developed PI/C demonstrates potential to replace Vespel®SP-21 as the preferred material for low-temperature environments and has broad application prospects in the cryogenic pump industry.

Keywords : polyimide ; graphite ; composite ; friction and wear ; dimensional stability ; mechanical properties at high temperature ; mechanical properties at low temperature

在石油石化行业中,低温泵起着输送低温产品、提供燃料等作用,是生产过程中的重要设备,一些低温泵实测工作温度可低至-263 °C左右。而在常见的液氢涡轮泵、离心泵、真空泵等低温液体泵中,机械密封是影响低温泵工作状态和工作效率的重要因素,也是确保低温泵安全运转的关键因素,常需要在磨损严重、介质易汽化、易振动的工况下稳定运转。因此,某些密封件(如密封圈、密封环、衬套等)材质的选择至关重要^[1]。

聚酰亚胺(PI)作为一种高性能工程塑料,具有突出的力学性能和耐高温、耐极低温(-269 °C)、耐溶剂性能,特别是在高低温、高低压、高速度等极端条件下具有优良的耐摩擦磨损性能^[2-5],被广泛应用于航空航天、电子电工等诸多领域,也是低温环境的优选材料。由于纯PI的自润滑性能相对较差,一般需要通过复合改性,进一步改善PI的摩擦磨损性能,扩大应用范围^[6-7]。复合改性方法一般包括添加固体润滑剂(如石墨、二硫化钼、聚四氟乙烯等),或通过共聚改变分子结构等^[8-10]。石墨作为一种固体润滑剂,常用于降低聚合物的摩擦系数,改善聚合物的摩擦学性能^[11-13]。美国杜邦公司的 Vespel®SP-21 产品就是一种添加了石墨(质量分数 15%)的PI特种工程塑料,已经广泛应用于低温行业,但是,其存在韧性差、难加工和成本高等问题。

结晶性PI一般具有确定的熔融温度,可实现熔融加工,而且因其具有优异的尺寸稳定性、耐溶剂性,以及高强度和高温下力学性能保持率高等优点而备受人们的关注^[14]。为了制备一种低摩擦、耐磨损,尤其在极低温度下具有高强度和优异尺寸稳定性的PI改性材料,以替代 Vespel®SP-21 产品用于低温领域,笔者采用 15%(质量分数)石墨微粉对结晶性PI材料进行填充改性制备石墨/结晶性PI复合材料。通过该复合材料在常温和高低温下热学、力学、尺寸稳定性、摩擦磨损性能等综合性能的研究,并与 Vespel®SP-21 性能进行对比,得到了一种综合

性能非常优异的PI基复合材料,可应用于低温泵和阀门行业。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PI模塑粉:3001,黄色细粉,比浓对数黏度约为 0.72 dL/g,平均粒径 13 μm,粒径基本小于 30 μm,宁波领科新材料科技有限公司;

石墨微粉:平均粒径小于 2 μm,北京聚光赢创科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机:SHR-100A,张家港格兰机械有限公司;

热压机:XLB-0,湖州顺力橡胶机械有限公司;

微机式万能试验机:WDW-50J,济南天辰试验机制造有限公司;

简支梁冲击试验机:XJ-50Z,济南天辰试验机制造有限公司;

摩擦试验机:M-200A,北京航天纵横检测仪器有限公司;

数显硬度计:MXHRS-150,上海伦捷机电仪表有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:200 PC,德国 NETZSCH 公司;

热重(TG)分析仪:209 F1,德国 NETZSCH 公司;

动态热机械分析(DMA)仪:Q800,美国 TA 公司;

热机械分析(TMA)仪:Q400,美国 TA 公司。

1.3 试样制备

首先将PI模塑粉和石墨微粉进行预烘干处理以除去水分,200 °C下处理 2 h。然后将两者按照质量比为 85:15 加入高速混合机中,经高速搅拌,使物料混合均匀,得到石墨质量分数为 15%的复合粉料。

采用热压机成型,将粉料放入到 210 mm×120 mm 规格模具型腔中,将热压机的温度升至 385 °C,加压 45~55 MPa 的压力并保温保压 20~30 min。降温脱模后得到 210 mm×120 mm×4 mm 规格的石墨/

结晶性PI复合材料板材,再经机械加工得到标准测试样块。

1.4 测试与表征

密度按 GB/T 1033.1-2008 测试;

拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 测试,试验速度 5 mm/min;

压缩强度按 GB/T 1041-2008 测试,试验速度 5 mm/min (-150 °C 下压缩强度和压缩模量按照上述条件进行);

弯曲强度按 GB/T 9341-2008 测试,试验速度 2 mm/min;

200 °C 和 250 °C 下,拉伸强度、压缩强度和弯曲强度同样按照上述条件进行;

简支梁冲击强度(无缺口)按 GB/T 1043.1-2008 测试,摆锤能量 15 J,冲击速度 3.8 m/s;

洛氏硬度(M)按 GB/T 3398.2-2008 测试,其中洛氏硬度标尺选“M”;

摩擦系数、磨痕宽度按 GB/T 3960-2016 测试,和 45# 钢对磨,负荷 20 kg,对磨 2 h;

DSC 测试:氮气气氛,气体流速为 50 mL/min,测试温度范围为 50~400 °C,升温速率为 10 °C/min;

TG 测试:空气气氛,气体流速为 50 mL/min,温度范围 50~800 °C,升温速率 10 °C/min;

DMA: 氮气气氛,测试频率 1 Hz,升温速率 10 °C/min;

TMA: 氮气气氛,测试温度范围为 -150~100 °C,升温速率为 10 °C/min。

2 结果与讨论

将制备的石墨质量分数为 15% 的石墨/结晶性 PI 复合材料简称为 PI/C,其为热塑性材料,经热压机压制成型后,得到完全塑化、质地均一、表面黑且亮的复合材料板材,复合材料的密度为 1.50 g/cm³,与 Vespel®SP-21 相近。

2.1 热性能

采用 DSC 对 PI/C 和 Vespel®SP-21 进行了表征,结果如图 1 所示。由图 1 可见,杜邦公司的 Vespel®SP-21 的 DSC 曲线表现为一条直线,未观察到明显的玻璃化转变温度(T_g)和熔融温度,文献资料记载其 T_g 约为 360 °C,因此广泛应用于高温领域^[15]。也正是由于 Vespel®SP-21 高的 T_g ,使其不能完全塑化,加工十分困难,且材料韧性很差。DSC 曲线显示 PI/C 是一种典型的结晶性材料,具有明显

的结晶熔融峰,熔融温度约为 370 °C; T_g 不是十分明显,大约在 215 °C。PI/C 具有很好的熔融加工性,385 °C 下热压成型时完全塑化。尽管制备的 PI/C 与 Vespel®SP-21 的 T_g 相差很大,但是从后面的高温力学性能研究分析可以发现 PI/C 在高温下的力学性能也十分优异。

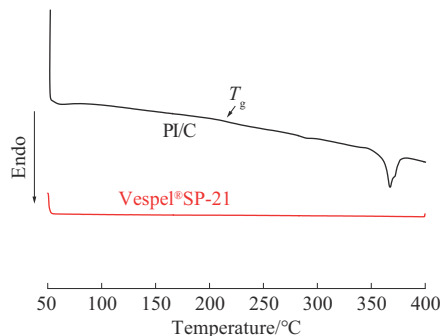


图1 PI复合材料的DSC曲线

Fig. 1 DSC curves of PI composites

2.2 热稳定性

采用 TG 分析仪对 PI/C 和 Vespel®SP-21 进行了热稳定性的表征,结果如图 2 所示。两种 PI 复合材料都表现出了非常优异的热稳定性,在空气气氛下的起始热分解温度均超过 400 °C。PI/C 的热稳定性更加优异,5% 热失重温度为 537 °C,略高于 Vespel®SP-21 的 531 °C。

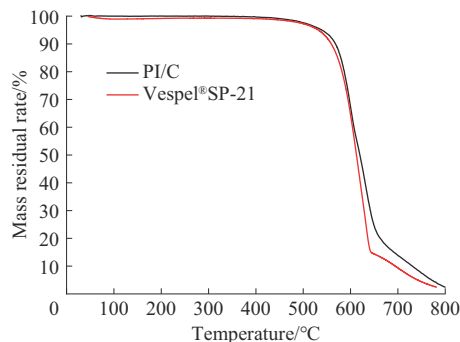


图2 PI复合材料的TG曲线

Fig. 2 TG curves of PI composites

2.3 动态力学性能

采用 DMA 仪对 PI/C 与 Vespel®SP-21 的动态力学性能进行了表征,结果如图 3 所示。由图 3 可见,PI/C 在 50 °C 的储能模量(E')达到 4 000 MPa 以上,并且在 50~150 °C 范围内,PI/C 的 E' 与 Vespel®SP-21 相当,下降幅度也很小,表现出了较其他 PI 材料(一般为 3 000 MPa 左右)更高的刚性和抗变形能力。在 200 °C 时,PI/C 的 E' 快速下降,当温度达到 250 °C 时, E' 仍为 750 MPa 左右,说明 PI/C 在高温下具有较

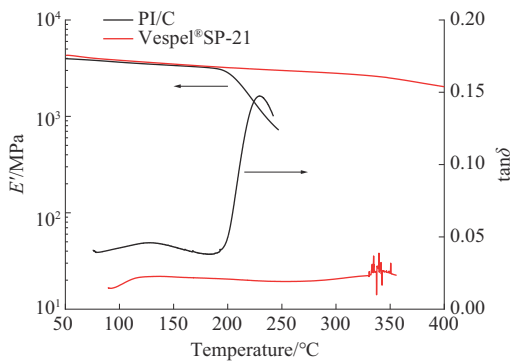


图3 PI复合材料的DMA曲线

Fig. 3 DMA curves of PI composites

高力学性能保持率。Vespel®SP-21在50℃至400℃的温度区间内均保持了非常高的 E' ,具有非常优异的耐高温性能,这使其成为高温领域的重要PI材料。损耗因子($\tan\delta$)是DMA中的一个关键参数,较高的 $\tan\delta$ 通常表明材料黏性较强,材料在形变过程中能量损耗较大,加工时流动性较好^[15]。由图3可见,PI/C的 $\tan\delta$ 达到0.15左右,而Vespel®SP-21的 $\tan\delta$ 很小,说明PI/C具有更加优异的熔融加工性能。

2.4 尺寸稳定性

目前,美国杜邦公司的PI材料Vespel®SP-21与聚三氟氯乙烯(PCTFE)材料都被用于低温阀门行业。与PCTFE相比,Vespel®SP-21在整个工作温度范围内,性能接近恒定不变,如在-150~23℃范围内热膨胀系数变化率约为35%,而PCTFE的热膨胀系数变化率约为79%,因此,Vespel®SP-21能达到更好的密封效果,能有效减少垫片出现的变形和液体的泄漏^[15]。

采用TMA仪对PI/C的尺寸稳定性也进行了表征,测试温度范围为-150~100℃,结果如图4所示。由图4可见,该复合材料在整个测试温度区间都表现出了优异的尺寸稳定性。经计算,PI/C在50~70℃

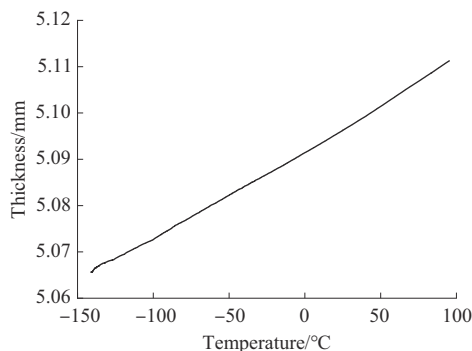


图4 PI/C的TMA曲线

Fig. 4 TMA curves of PI/C

温度区间的热膨胀系数约为 $43\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$;在-150~100℃温度区间的热膨胀系数约为 $32\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,热膨胀系数变化率约为26%,比Vespel®SP-21还要低,说明PI/C尺寸稳定性更好,适宜应用于低温领域。

2.5 力学性能

2.5.1 室温下的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和冲击强度

首先对PI/C在室温下的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和简支梁无缺口冲击强度进行了表征,结果见表1,并与杜邦公司的Vespel®SP-21进行了对比。由表1可见,PI/C室温下的拉伸强度、弯曲强度和压缩强度分别为110,178,185 MPa,远高于Vespel®SP-21性能数据,表现出了更加优异的力学性能。尽管结晶的存在,导致PI/C的冲击强度明显低于其他热塑性PI材料,仅为42 kJ/m²,但仍高于Vespel®SP-21(约35 kJ/m²)。相较Vespel®SP-21而言具有更好的韧性,这在低温应用场景下,至关重要。

表1 PI复合材料常温力学性能数据

Tab. 1 Mechanical property data of PI composites at room temperature

Samples	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Compressive strength/MPa	Impact strength/(kJ·m ⁻²)
PI/C	110	178	185	42
Vespel®SP-21	70	125	155	35

2.5.2 高温下的拉伸强度、弯曲强度和压缩强度

如前所述,Vespel®SP-21材料的 T_g 约为360℃,是一种典型的耐高温材料,长期使用温度为250℃左右,因此一般都测定材料250℃下的力学性能。制备的PI/C的 T_g 为215℃左右,因此,首先对PI/C在200℃下的力学性能进行了表征。为了更好地与Vespel®SP-21对比,也测定了PI/C在250℃下的力学性能,结果见表2。PI/C在200℃下的拉伸强度、弯曲强度和压缩强度分别为57,96,89 MPa,表现了较优异的力学性能,其在250℃下的拉伸强度、弯曲

表2 复合材料的高温力学性能数据

Tab. 2 Mechanical property data of PI composites at high temperatures

Samples	Temperature/℃	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Compressive strength/MPa
PI/C	200	57	96	89
Vespel®SP-21	200	—	—	—
PI/C	250	25	56	60
Vespel®SP-21	250	45	80	85

强度和压缩强度分别为25, 56, 60 MPa, 明显低于Vespel®SP-21, 证实了Vespel®SP-21的耐高温性优于PI/C。通过对比PI/C在200 °C下的力学性能和Vespel®SP-21在250 °C下的力学性能数据, 可以发现两者性能接近, 表明PI/C可长期应用于200 °C。由于两种材料的 T_g 相差约150 °C, 而长期使用温度仅相差50 °C, 可见PI/C也具有非常优异的高温力学性能保持率。

2.5.3 低温下的压缩性能

当PI/C应用于低温泵或阀门中用作垫圈、垫片等零件时, 所承受的主要是压力, 因此十分有必要对该复合材料的低温压缩性能进行表征。PI/C在-150 °C下的压缩强度和压缩模量分别为297 MPa和4.8 GPa。而Vespel®SP-21在-195 °C下的压缩强度为250 MPa。对于PI特种工程塑料而言, 温度越低, 压缩强度越大, 可见, PI/C在-150 °C下的压缩强度明显优于Vespel®SP-21。

2.5.4 硬度

PI/C的洛氏硬度(HRM)为102, 与Vespel®SP-21几乎相同。

2.6 摩擦磨损性能

按照GB/T 3960-2016要求, 将PI/C和45#钢对磨, 负荷20 kg, 对磨2 h, 得到PI/C的摩擦系数为0.3, 磨痕宽度为4.5 mm。由于PI/C中石墨含量与Vespel®SP-21相同, 质量分数均为15%, 因此, 两者摩擦系数几乎相同。PI/C的磨痕宽度较Vespel®SP-21稍小(Vespel®SP-21磨痕宽度约为5.4 mm), 表现出了更好的耐磨损性能, 这主要是与PI/C为结晶性材料, 具有更高的刚性有关。

3 结论

(1)成功制备了一种石墨质量分数为15%的石墨/结晶性PI复合材料, 该复合材料密度为1.50 g/cm³, 具有优异的热稳定性和优异的熔融加工性。

(2)尺寸稳定性研究结果表明, 该复合材料在-150~100 °C温度区间内热膨胀系数变化率约为26%, 优于Vespel®SP-21的35%, 显示出更好的尺寸稳定性。

(3)力学性能测试结果表明, 相比Vespel®SP-21而言, 该复合材料在室温下具有更加优异的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和冲击强度; 200 °C下力学性能保持率高, 可在该温度下长期使用; -150 °C下的压缩强度更优异。

(4)摩擦磨损性能测试结果表明, 该复合材料的摩擦系数为0.3, 磨痕宽度为4.5 mm, 与Vespel®SP-21相比, 具有更好的耐磨损性能。

(5)综上所述, 制备的石墨/结晶性PI复合材料在热稳定性、尺寸稳定性、力学性能和摩擦磨损性能方面均表现出优异的性能, 可替代Vespel®SP-21成为低温环境的优选材料。

参考文献

- [1] 郑晓, 赵汉元, 李双喜, 等. 化工用低温液氢泵密封相变性能分析及验证[J]. 化工机械, 2024, 51(3):402-413.
ZHENG Rao, ZHAO Hanyuan, LI Shuangxi, et al. Analysis and verification of the phase change performance of cryogenic liquid hydrogen pump seal for the chemical industry[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2024, 51(3):402-413.
- [2] 赵慧文, 王玮, 陈国飞, 等. 基于异构三苯二酐二酐的热塑性共聚酯亚胺的合成[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(6):1-5.
ZHAO Huiwen, WANG Wei, CHEN Guofei, et al. Synthesis of thermoplastic copolyimides derived from isometric hydroquinone diphthalic dianhydride[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6):1-5.
- [3] 唐咏梅, 陈国飞, 钟莺莺, 等. Cardo半芳香型透明聚酰亚胺的合成及性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(3):100-105, 161.
TANG Yongmei, CHEN Guofei, ZHONG Yingying, et al. Synthesis and properties of cardo semi-aromatic transparent polyimides[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):100-105, 161.
- [4] 徐广锐. 含苯并噁唑结构耐高温聚酰亚胺模塑料制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):36-40, 45.
XU Guangrui. Preparation and properties of high temperature resistant polyimide molding plastics with benzoxazole group[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):36-40, 45.
- [5] 王文华, 黄志江, 郑亚杰, 等. 树脂含量对聚酰亚胺树脂基复合材料摩擦学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6):109-115, 134.
WANG Wenhua, HUANG Zhijiang, ZHENG Yajie, et al. Effects of resin content on tribological properties of polyimide resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6):109-115, 134.
- [6] 刘福华, 明白, 李轩, 等. 聚酰亚胺及其复合材料的摩擦学改性研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(6):1 033-1 040.
LIU Fuhua, MING Bai, LI Xuan, et al. Research progress on tribological modification of polyimide and its composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(6):1 033-1 040.
- [7] 逢显娟, 李栋, 岳世伟, 等. 聚酰亚胺复合材料改性方法优化其摩擦学性能的研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(8):12-16.
PANG Xianjuan, LI Dong, YUE Shiwei, et al. Research progress on the modification of polyimide composites for optimizing their tribological properties[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(8):12-16.

- [8] 徐林,王洁,俞娟,等.共聚共混改性聚酰亚胺的摩擦磨损性能研究[J].工程塑料应用,2016,44(3):6–11.
XU Lin, WANG Jie, YU Juan, et al. Tribological and wear properties of polyimide modified by copolymerization and blending[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):6–11.
- [9] 杨培娟,黄健.PI填充PTFE复合材料[J].工程塑料应用,2018,46(1):9–12.
YANG Peijuan, HUANG Jian. PTFE-based composite filled with PI [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1):9–12.
- [10] 李红波,赖亮庆,黄艳华,等.聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J].工程塑料应用,2019,47(11):30–35.
LI Hongbo, LAI Liangqing, HUANG Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):30–35.
- [11] 穆丽珀,俞娟,王晓东,等.石墨共混改性热塑性聚酰亚胺梯度复合材料干摩擦磨损性能[J].润滑与密封,2011,36(11):58–62.
MU Lipo, YU Juan, WANG Xiaodong, et al. Tribological performance of graphite modified thermoplastic polyimide functionally gradient materials under dry sliding[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(11):58–62.
- [12] 杨睿,苏正涛,李红波,等.石墨的取向对聚酰亚胺摩擦性能的影响[J].中国塑料,2020,34(5):21–25.
YANG Rui, SU Zhengtao, LI Hongbo, et al. Effect of graphite orientation on tribological properties of polyimide[J]. China Plastics, 2020, 34(5):21–25.
- [13] 陆洋,郑佳佳,俞娟,等.单宁酸改性石墨/聚酰亚胺复合材料的制备及摩擦学性能[J].化工新型材料,2024,52(3):71–75.
LU Yang, ZHENG Jiajia, YU Juan, et al. Preparation and tribological properties of tannic acid-modified graphite/polyimide composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(3):71–75.
- [14] 张鸿飞.基于三苯双醚二酐可熔融加工结晶性聚酰亚胺的合成与性能研究[D].宁波:中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所),2017.
ZHANG Hongfei. Synthesis and characterization of melt-processable semi-crystalline polyimides based on 1, 4-bis(3, 4-dicarboxyphenoxy) benzene dianhydride[D]. Ningbo: University of Chinese Academy of Sciences (Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [15] 丁孟贤.聚酰亚胺:化学、结构与性能的关系及材料[M].2版.北京:科学出版社,2012.
DING Mengxian. Polyimide: Relationship between chemistry, structure and properties, and materials[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.