

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.010

高灼热丝起燃温度无卤阻燃PA66/GF复合材料的制备及性能

叶敬彪^{1,2}, 芦浩浩², 宋向前², 王晓东², 申屠宝卿^{1,3}

(1. 浙江大学工程师学院, 杭州 310015; 2. 横店集团得邦工程塑料有限公司, 浙江东阳 322118;

3. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310058)

摘要: 为提高亚磷酸铝协效二乙基次膦酸铝(ADP)阻燃玻璃纤维增强尼龙66(PA66/GF)复合材料的灼热丝起燃温度(GWIT), 通过引入聚苯醚(PPO)作为协效成炭组分, 在固定相容剂含量基础上, 系统探究了PPO用量对复合材料力学、热学、流动性及阻燃性能的影响规律, 并结合复合材料残炭形貌分析其作用机制。结果表明, PPO可同时提升复合材料的热稳定性与成炭能力: 当PPO质量分数为20%时, 复合材料600℃质量保持率增至37.5%, 5%质量损失温度提升至393.1℃; 且PPO可作为异相成核剂, 提高了PA66的结晶温度和结晶度; 但熔体流动速率明显降低。力学性能方面, 复合材料拉伸强度随PPO用量波动不明显, 但冲击强度随PPO用量升高逐步下降。阻燃PA66/GF复合材料均达到UL 94 V-0等级, 极限氧指数小幅提升至34.1%; GWIT随PPO用量增加逐步上升, 其中PPO质量分数为15%时, 材料GWIT可达到775℃, 是兼顾阻燃、力学性能和流动性的最优用量。扫描电子显微镜结果表明, PPO的加入有助于形成致密炭层, 阻隔热量与分解产物传递, 从而通过凝聚相协效作用提升复合材料的GWIT。

关键词: 尼龙66; 聚苯醚; 亚磷酸铝协效二乙基次膦酸铝; 玻璃纤维; 灼热丝起燃温度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0092-08

Preparation and properties of halogen-free flame-retardant PA66/GF composites with high glow-wire ignition temperature

YE Jingbiao^{1,2}, LU Haohao², SONG Xiangqian², WANG Xiaodong², SHENTU Baoqing^{1,3}

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. Hengdian Group Tospo Engineering Plastics Co., Ltd., Dongyang 322118, China; 3. College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To improve the glow-wire ignition temperature (GWIT) of glass fiber-reinforced polyamide 66 (PA66/GF) composites flame-retarded by aluminum diethylphosphinate (ADP) synergized with aluminum phosphite, polyphenylene oxide (PPO) was introduced as a synergistic char-forming component. With the compatibilizer content kept constant, the effects of PPO loading on the mechanical, thermal, flow and flame retardant properties of the composites were systematically investigated, and the action mechanism was analyzed based on the morphology of its residual char. The results show that PPO simultaneously enhances the thermal stability and char-forming capacity of the composites. At 20 wt% PPO loading, the quality retention of the composite at 600 °C increases to 37.5%, and the temperature at 5% mass loss rises to 393.1 °C. PPO serves as a heterogeneous nucleating agent, and raises the crystallization temperature and crystallinity of PA66. However, it causes a significant decrease in the melt flow rate. For mechanical properties, the tensile strength of the composites shows no remarkable fluctuation with increasing PPO content. By contrast, the impact strength declines gradually as PPO loading increases. All flame-retardant PA66/GF composites attain a UL 94 V-0 rating. The limiting oxygen index increases slightly to 34.1%. The GWIT of the composites rises progressively with higher PPO loading. At 15 wt% PPO loading, the composite achieves a GWIT of 775 °C. This loading is identified as the optimal formulation that balances flame retardancy, mechanical performance and flowability. Scanning electron microscopy results indicate that the addi-

通信作者: 申屠宝卿, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子材料的改性及成型加工研究

收稿日期: 2026-07-11

引用格式: 叶敬彪, 芦浩浩, 宋向前, 等. 高灼热丝起燃温度无卤阻燃PA66/GF复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 92-99.

YE Jingbiao, LU Haohao, SONG Xiangqian, et al. Preparation and properties of halogen-free flame-retardant PA66/GF composites with high glow-wire ignition temperature[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 92-99.

tion of PPO facilitates the formation of a dense char layer, which blocks the transfer of heat and decomposition products, and thus improves the GWIT of the composites via a condensed-phase synergistic mechanism.

Keywords: nylon 66; polyphenylene oxide; synergistic system of aluminum phosphite and aluminum diethylphosphinate; glass fibers; glow-wire ignition temperature

以玻璃纤维(GF)共混补强的尼龙66(PA66)为基体材料,添加二乙基次膦酸铝(ADP)及协效剂构筑无卤阻燃体系,是当前工程塑料领域应对严格环保与安全法规的重要解决方案之一^[1-4]。目前,ADP单独使用时阻燃效果有限,常采用三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)^[3-4]作为ADP的阻燃协效剂。当MPP存在时,PA66热降解产生的水和胺类物质会促使ADP转化为高挥发性的二乙基次膦酸,其在气相中作为自由基猝灭剂,抑制火焰传播,且ADP转化过程中产生的氢氧化铝进一步转化为磷酸铝,可在凝聚相发挥成炭作用^[5]。在电子电气领域,灼热丝起燃温度(GWIT)是衡量材料在异常热源作用下抵抗被点燃能力的关键安全指标^[6]。ADP/MPP阻燃协效体系虽能使复合材料的GWIT提升至775℃,但高温加工过程中MPP极易析出,影响制品外观与性能。为克服该问题,工业界采用亚磷酸铝 $[\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3]$ ^[7]与ADP进行复配,复配物虽然改善了析出性,但复合材料的GWIT仅为725~750℃,难以满足高电流载荷部件对热安全要求严苛的应用场景。因此,开发兼具高GWIT与良好加工稳定性的无卤阻燃PA66/GF复合材料,已成为业内亟待解决的关键技术问题。

杨家祥等^[8]采用双螺杆挤出工艺,制备空心玻璃微珠(HGM)填充红磷阻燃PA66/GF复合材料,随着HGM质量分数增至16%,GWIT由725℃升至775℃,表明HGM有利于改善材料的耐灼热丝引燃性能。PENG等^[9]以植酸、苯并胍胺、七水硫酸锌自组装制备一种P/N/Zn阻燃协效剂PABG@Zn,以质量分数3%的PABG@Zn替代等量ADP得到的最优配方,可使PA6复合材料的GWIT提升至750℃。但是,对于已工业化应用的ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 阻燃PA66体系的GWIT提升方案还鲜有报道。

GWIT的高低取决于材料的可燃气体释放阈值与凝聚相热阻隔能力。一方面,复合材料初始热分解温度越高,可燃小分子释放速率越慢,越难达到气相起燃浓度;另一方面,表面炭层越致密,越能阻隔灼热丝向基体内部的热量传递及空气渗透^[6,8-9]。

聚苯醚(PPO)在高温下易形成石墨化程度高、热稳定性优异的致密炭层,可提升PA66的阻燃性能^[10-11]。但现有研究对PPO改性阻燃PA66的评价多以UL 94阻燃等级与极限氧指数(LOI)为主^[12],GWIT特性鲜受关注。

基于上述原因,将PPO引入ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 协效阻燃GF/PA66体系,通过熔融共混制备不同PPO含量的阻燃复合材料,系统探究PPO用量对复合材料力学性能、热性能、熔体流动性、UL 94阻燃等级、LOI与GWIT的影响规律,结合热重(TG)分析、残炭形貌表征,阐明PPO提升复合材料GWIT的协同作用机制,为开发高GWIT的ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 阻燃PA66/GF复合材料提供理论依据与技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66:HY1500,江苏华洋尼龙有限公司;

PPO:LXR045,蓝星化工新材料股份有限公司芮城分公司;

GF:ECS10-03-568H,短切长度3 mm,中国巨石股份有限公司;

ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 阻燃剂:FR331,ADP与 $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 质量比为(3~5):1,青岛欧普瑞新材料有限公司;

马来酸酐接枝PPO(PPO-g-MAH):FB820,佳易容聚合物(上海)有限公司;

抗氧剂:1098,烟台新特路新材料科技有限公司;

润滑剂:硅酮树脂,HY5501,杭州海一高分子材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电热鼓风干燥箱:GR-GZ9018A,广州格瑞检测设备有限公司;

双螺杆挤出机:STS35 Mc^{II},科倍隆(南京)机械有限公司;

失重式喂料机:NX-S50D,日本久保田株式会社;

注塑机:MA600 II/130,海天塑机集团有限

公司;

TG 分析仪: TG 209 F1, 德国 NETZSCH 公司;
差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC214, 德国 NETZSCH 公司;

熔体流动速率(MFR)仪: WJ-400B, 承德市万吉仪器仪表制造有限公司;

简支梁冲击试验机: HIT-2492, 承德市金建检测仪器有限公司;

万能试验机: 5966-10KN, 美国 INSTRON 公司;
扫描电子显微镜(SEM): TM3030, 株式会社日立制作所;

LOI 测定仪: JB-3, 上海久滨仪器有限公司;
水平垂直燃烧试验机: SH5312, 广州信禾电子设备有限公司;

灼热丝试验仪: KS-51BS, 上海今森检测设备有限公司。

1.3 样品制备

将 PA66 和 PPO 树脂放入 120 °C 烘箱中干燥 3 h, 干燥冷却后按表 1 配方称取 PA66、PPO、PPO-g-MAH、润滑剂与抗氧剂, 置于聚乙烯袋中混合摇匀。采用失重式喂料机主喂混合料, 第一阶侧喂阻燃剂、第二阶侧喂 GF, 按质量比 60: 15: 25 输送至双螺杆挤出机中熔混造粒。按照纯 PPO 树脂的用量, 4 组样品名称分别记为: 0wt%PPO、10wt%PPO、15wt%PPO 和 20wt%PPO。同时增加一组 15wt%PPO 配方的对照组, 不添加 PPO-g-MAH, 记为 15wt%PPO-0MA。双螺杆挤出机 1 区至 10 区的加热温度分别设置为 240、275、275、275、265、260、260、260、260、275 °C, 机头温度 285 °C, 螺杆转速 350 r/min, 挤出产量约 60 kg/h。所得无卤阻燃 PA66/GF/PPO 粒料经 120 °C 烘箱干燥 4 h, 并通过 275 ~ 290 °C 的加工条件进行注塑成型制备标准测试样条。

表 1 阻燃 PA66/GF/PPO 复合材料配方(质量分数)
Tab. 1 Flame-retardant PA66/GF/PPO composites formulation (mass fraction)

Samples	PA66	PPO	ADP/Al ₂ (HPO ₃) ₃	GF	PPO-g-MAH	Silicone lubricant	Antioxidant 1098
0wt%PPO	59	0	15	25	0	0.5	0.5
10wt%PPO	47	10	15	25	2	0.5	0.5
15wt%PPO	42	15	15	25	2	0.5	0.5
20wt%PPO	37	20	15	25	2	0.5	0.5
15wt%PPO-0MA	44	15	15	25	0	0.5	0.5

1.4 性能测试

所有注塑试样均需在 (23±2) °C、50%±5% RH 环境下调节 24 h 后再进行性能测试。

1.4.1 DSC 测试

使用 DSC 测试材料的熔融-结晶行为, 升温降温速率为 20 °C/min, 首先升温至 290 °C 保持 3 min, 以消除样品热历史。然后降温至 30 °C, 记录结晶曲线。再次升温至 290 °C, 记录消除热历史后的熔融曲线。共混物中 PA66 的结晶度(X_c)计算公式:

$$X_c=100\% \cdot \Delta H_m / (\varphi \cdot \Delta H_f) \tag{1}$$

式中: φ 为复合材料中 PA66 的用量, ΔH_m 为样品实测的熔融焓, ΔH_f (100%PA66)=194.69 J/g^[13]。

1.4.2 TG 分析

使用 TG 分析仪进行 TG 分析测试, 氮气氛围, 升温速率为 10 °C/min, 测至 600 °C。

1.4.3 MFR 测试

使用 MFR 仪测试材料的熔体质量流动速率, 测试条件为 280 °C、2.16 kg。

1.4.4 拉伸性能测试

按照 GB/T 1040.2-2022 测试, 使用万能试验机测试材料的拉伸强度, 1A 型样条, 拉伸速率为 10 mm/min。

1.4.5 冲击性能测试

按照 GB/T 1043.1-2008 测试, 使用简支梁冲击试验机测试材料的冲击性能, 样条尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm, 缺口冲击样条为 A 型缺口。

1.4.6 SEM 表征

无缺口冲击断面使用 SEM 进行观察, 并使用 SEM 观察复合材料经 750 °C 灼热丝测试后的残炭形貌。

1.4.7 LOI 测试

使用 LOI 测定仪测试材料的极限氧指数, 样条尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm;

1.4.8 阻燃等级测试

使用水平垂直燃烧试验机测试材料的 UL 94 阻燃等级, 样条尺寸为 125 mm×13 mm×1.5 mm, 各测 5 片。

1.4.9 GWIT 测试

使用灼热丝试验仪测试材料的GWIT,样片尺寸为60 mm×60 mm×1.5 mm,750 °C起测。

2 结果与讨论

2.1 PA66/GF/PPO复合材料的力学性能

PPO与PA66相容性较差,直接进行熔融挤出时料条容易出现熔体破裂现象,难以连续造粒收集样品。需添加马来酸酐接枝型增容剂进行改性,通过与PA66的端氨基发生反应,形成较强的界面黏附^[14-17]。本文选取质量分数为2%的PPO-g-MAH作为该复合材料体系的相容剂。图1为质量分数15%的PPO复合材料在添加相容剂前后经双螺杆挤出的料条照片,未添加相容剂的料条表面粗糙度明显更高。图2的拉伸测试结果进一步表明,未添加相容剂体系的拉伸强度与断裂应变均明显偏低,是PA66和PPO两相基体间相容性较差的直接体现。

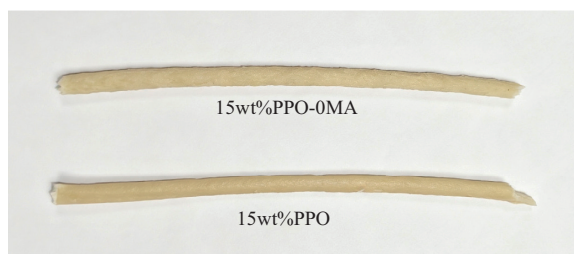


图1 添加相容剂前后质量分数15% PPO复合材料的双螺杆挤出料条照片

Fig. 1 Photographs of strands obtained by twin-screw extrusion of 15 wt% PPO composites with and without compatibilizer

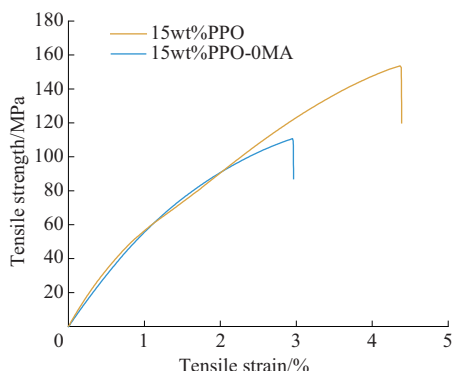


图2 添加相容剂前后质量分数15%的PPO复合材料的拉伸测试结果

Fig. 2 Tensile test results of 15 wt% PPO composites with and without compatibilizer

添加质量分数为2%的PPO-g-MAH作为反应型相容剂后,阻燃PA66/GF/PPO复合材料的拉伸和冲击强度测试结果如图3所示。逐步提高PPO含量未显著改变复合材料的拉伸强度,其数值维持在

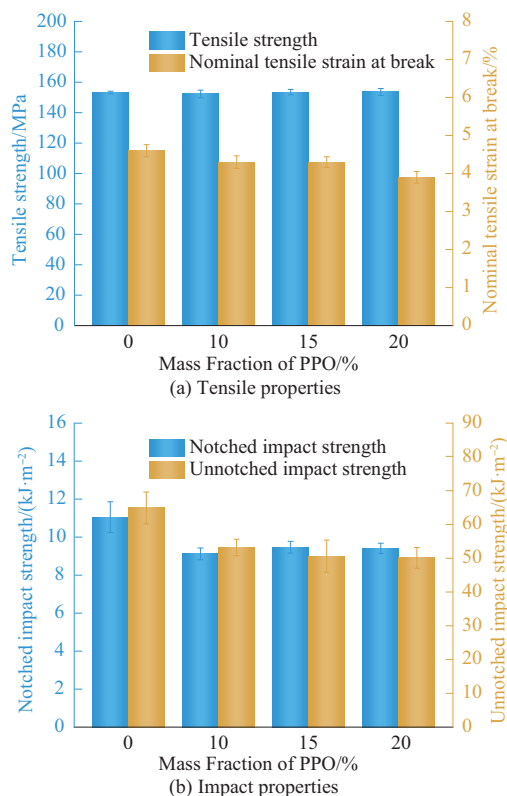


图3 阻燃PA66/GF/PPO复合材料的力学性能

Fig. 3 Mechanical performance of flame-retardant PA66/GF/PPO composites

153 MPa左右。但复合材料韧性持续下降,断裂标称应变由4.6%减小至3.9%,缺口冲击和无缺口冲击强度分别由11.1、64.9 kJ/m²降至9.4、50.1 kJ/m²。

从图4的SEM结果可看出,PPO质量分数在10%~20%范围内时未破坏基体与GF的界面结合,这是因为PPO-g-MAH中马来酸酐基团与PA66发生化学作用,改善了PPO在PA66中的界面相容性,并提升了复合材料的拉伸强度;但是,PPO以海岛状分散于PA66基体中,因其分子链苯环含量高、刚性大,冲击下易发生脆性断裂,对应断面形貌更粗糙,导致复合材料韧性下降^[14-15,18]。

2.2 PA66/GF/PPO复合材料的热性能

阻燃PA66/GF/PPO复合材料的DSC测试结果如图5和表2所示。与未添加PPO的体系相比,随着PPO的引入,PA66的结晶温度(T_c)从226.7 °C逐渐升高至228.4 °C,表明PPO的加入促进了PA66的结晶,与杨青林^[14]和Zhang^[15]等报道的结果相似,这是因为PPO作为分散相可成为PA66的异相成核点,诱发PA66在较高温度下开始结晶。同时,PPO的引入使PA66的结晶度(X_c)提高,当PPO质量分数为15%时, X_c 最高,其值为39.1%,这也从结晶层面解

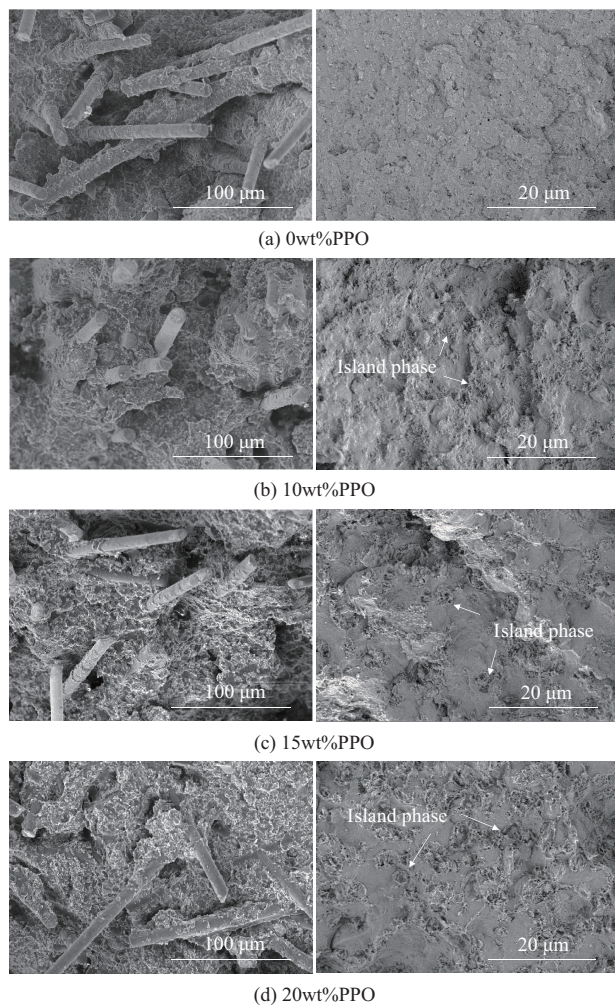


图4 阻燃PA66/GF/PPO复合材料无缺口冲击断面的SEM图

Fig. 4 SEM images of the unnotched impact fracture surface of flame-retardant PA66/GF/PPO composites

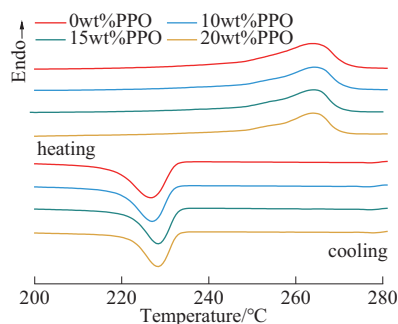


图5 阻燃PA66/GF/PPO复合材料的DSC曲线

Fig. 5 DSC curves of flame-retardant PA66/GF/PPO composites

释了材料冲击性能下降的部分原因。但当PPO质量分数增至20%时, T_c 与 X_c 均不再继续增加, 这是由于PPO熔体黏度高, 影响PA66分子链向晶核表面迁移与规整排列, 异相成核作用受到限制^[14]。

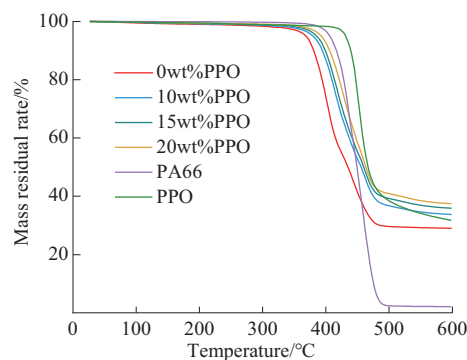
阻燃PA66/GF/PPO复合材料的TG结果如图6和表3所示。随着PPO用量的增加, TG曲线整体往

表2 阻燃PA66/GF/PPO复合材料的DSC分析

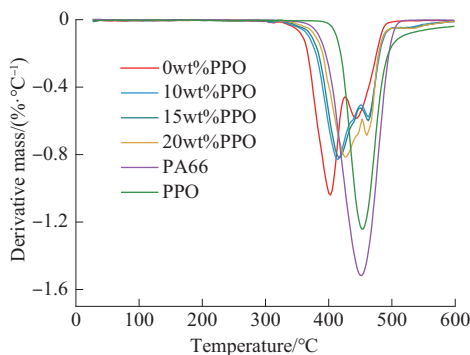
Tab. 2 DSC analysis of flame-retardant PA66/GF/PPO composites

Samples	0wt%PPO	10wt%PPO	15wt%PPO	20wt%PPO
$T_c/^\circ\text{C}$	226.7	227.0	228.4	228.3
$T_m/^\circ\text{C}$	263.9	264.2	264.4	263.9
$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	-32.8	-28.4	-24.8	-23.8
$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	41.6	33.5	32.0	28.2
$X_c/\%$	36.2	36.6	39.1	39.1

Notes: T_c , T_m , ΔH_c , ΔH_m , and X_c denote the crystallization peak temperature, melting peak temperature, crystallization enthalpy, melting enthalpy and crystallinity, respectively.



(a) TG curves



(b) DTG curves

图6 阻燃PA66/GF/PPO复合材料和PPO、PA66的TG和DTG曲线

Fig. 6 TG and DTG curves of flame-retardant PA66/GF/PPO composites, PPO, and PA66

表3 阻燃PA66/GF/PPO复合材料和PPO、PA66原树脂的TG分析结果

Tab. 3 TG analysis results of flame-retardant PA66/GF/PPO composites, PPO, and PA66 resins

Items	0wt% PPO	10wt% PPO	15wt% PPO	20wt% PPO	PA66	PPO
$T_5/^\circ\text{C}$	368.3	385.3	392.7	393.1	406.1	430.9
$T_{50}/^\circ\text{C}$	435.8	455.7	459.8	463.2	448.2	466.7
$T_{p1}/^\circ\text{C}$	402.8	415.2	416.4	426.6	452.2	452.5
$T_{p2}/^\circ\text{C}$	442.8	462.1	462.9	460.9	—	—
$W_{600}/\%$	29.0	33.7	35.9	37.5	2.1	31.7

Notes: T_5 is temperature at 5% mass loss; T_{50} is temperature at 50% mass loss; T_{p1} is peak temperature 1 in DTG curve; T_{p2} is peak temperature 2 in DTG curve; W_{600} is residual mass fraction at 600 °C.

高温方向偏移,相同失重阶段对应的温度明显升高,这是因为与PA66相比,PPO具有更高的热稳定性。但复合材料的质量损失5%温度(T_5)均小于PA66和PPO原树脂,这可能是因为ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 阻燃剂在370℃附近开始产生磷酸类物质,催化树脂加速分解。此外,TG测试表明,纯PPO在600℃下的质量残留率(W_{600})可达31.7%,远高于纯PA66。同时,随着PPO用量的增加,PA66/GF/PPO复合材料的 W_{600} 呈逐渐上升趋势,PPO质量分数为20%样品的 W_{600} 较未添加PPO的样品相对提高了29.3%。这主要是因为PPO分子链含大量苯环,高温分解时易形成大量残炭。此外,阻燃PA66/GF/PPO复合材料的DTG曲线呈现双峰特征,与邹梦浩等^[19]报道的ADP与含磷有机硅协效阻燃PA66热分解行为相似。这是因为在ADP/ $\text{Al}_2(\text{HPO}_3)_3$ 阻燃剂作用下,PA66呈现两个阶段的分解行为,第一阶段PA66受阻燃剂催化作用开始断链,进行脱水环化与交联成炭,并快速产生大量小分子物质;第二阶段未完全降解的PA66链段,在高温下突破炭层保护发生进一步解聚^[2,5,20-21]。

2.3 PA66/GF/PPO复合材料的MFR

阻燃PA66/GF/PPO复合材料的MFR结果如图7所示。随着PPO含量增加,复合材料熔体流动速率明显下降,当PPO质量分数为10%时,MFR从19.1 g/10 min降至6.7 g/10 min;当PPO质量分数为20%时,MFR继续缓慢下降至3.2 g/10 min。这是因为PPO分子链刚性大、本征熔体黏度高,导致复合材料的MFR随其用量增加而持续降低^[14]。因此,在实际注塑加工应用时,需要适当提升加工温度。

2.4 PA66/GF/PPO复合材料的阻燃性能

阻燃PA66/GF/PPO复合材料的LOI、UL94和

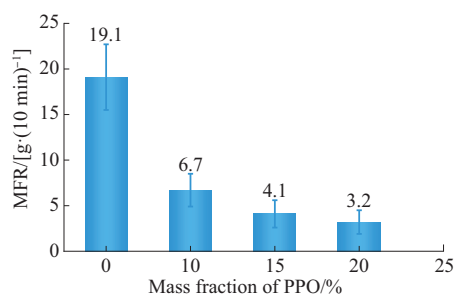


图7 阻燃PA66/GF/PPO复合材料的MFR结果

Fig. 7 MFR test results of flame-retardant PA66/GF/PPO composites

GWIT结果如表4所示。所有样品的垂直燃烧均达到UL 94 V-0等级,复合材料的LOI随PPO用量的增加,呈现小幅上升趋势;随着PPO用量的增加,GWIT从725℃逐渐提升至775℃。这是由于PPO自身的质量损失温度显著高于纯PA66,提升了共混体系的初始热降解温度,延缓灼热丝热接触下可燃性组分的释放;同时,PPO具有高成炭性,且其芳环结构可与阻燃剂的分解产物(聚磷酸、磷酸铝等)发生协同交联反应,构建“聚合物炭骨架-磷酸盐”复合阻隔炭层,进一步提升凝聚相的热屏蔽与空气阻隔效应^[12]。

表4 阻燃PA66/GF/PPO复合材料的LOI、UL94等级和GWIT结果

Tab. 4 LOI, UL94 and GWIT test results of the flame-retardant PA66/GF/PPO composites

Samples	0wt%PPO	10wt%PPO	15wt%PPO	20wt%PPO
LOI/%	33.1	33.5	33.7	34.1
UL 94 rating	V-0	V-0	V-0	V-0
GWIT/°C	725	750	775	775

Notes: LOI is the limiting oxygen index; GWIT is the glow wire ignition temperature.

当PPO质量分数为15%时,阻燃PA66/GF/PPO复合材料的GWIT可达到775℃。SEM结果(图8)可以看出阻燃PA66/GF/PPO复合材料经过750℃灼热丝测试后,其表面裸露的玻纤量随着PPO用量的增加逐渐减少,说明PPO促进致密炭层的形成,对PA66基体起到了较好的隔热和隔氧作用,使复合材料在高温下分解产生可燃性气体的释放速率和释放量降低。

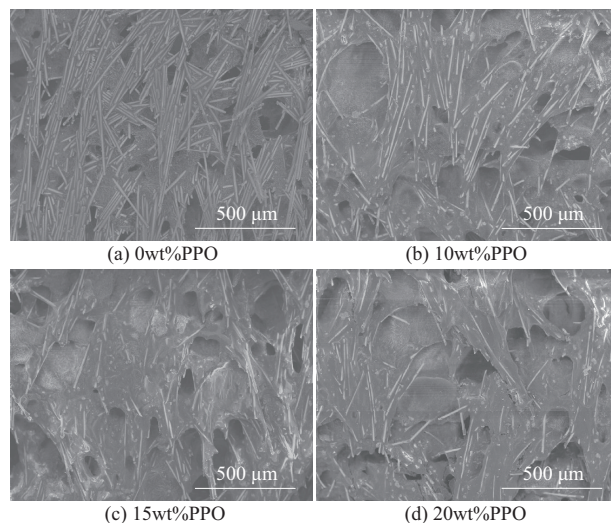


图8 经750℃灼热丝测试后阻燃PA66/GF/PPO复合材料的SEM图

Fig. 8 SEM images of the flame-retardant PA66/GF/PPO composites after 750 °C glow wire test

3 结论

(1)在质量分数为2%的PPO-g-MAH相容剂体系中,随PPO添加量升高,阻燃PA66/GF/PPO复合材料拉伸强度基本保持稳定,约153 MPa;而缺口冲击和无缺口冲击强度分别由11.1、64.9 kJ/m²降至9.4、50.1 kJ/m²。

(2)在ADP/Al₂(HPO₃)₃阻燃PA66/GF体系中引入PPO可同时调控材料的热稳定性、结晶行为与阻燃性能。PPO通过异相成核作用提升PA66的结晶温度与结晶度,但会降低复合材料的熔体质量流动速率;其还可通过凝聚相协效提升材料成炭性与阻燃性能,当PPO质量分数为15%时,复合材料的灼热丝起燃温度可达到775 °C,且保持UL 94 V-0级,是兼顾综合性能的最优用量。

(3)灼热丝测试后残炭的SEM结果表明,PPO的加入优化了炭层结构,使炭层更具连续性与致密性,能够阻隔外部热量向基体内部传递,同时抑制可燃分解产物的释放,进一步验证了其通过促进成炭提升材料防火安全性的作用机制。

参考文献

- [1] 叶岗,陈锐,徐星驰,等.低软化点空心玻璃微珠协效ADP阻燃PA66/GF复合材料的制备与性能[J].合成材料老化与应用,2023,52(3):11-13,84.
YE Gang, CHEN Rui, XU Xingchi, et al. Preparation and properties on aluminium diethyl phosphate flame retarded PA66/GF composites with synergist of low softening point hollow glass spheres[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(3): 11-13, 84.
- [2] 陶四平,索倩倩,张现军.二乙基次磷酸铝在增强聚酰胺体系中的阻燃机理[J].工程塑料应用,2020,48(12):133-139.
TAO Siping, SUO Qianqian, ZHANG Xianjun. Flame retardant mechanism of aluminium dipropylphosphinate in reinforced polyamide system[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 133-139.
- [3] 杨森.无卤阻燃抗静电聚酰胺66复合材料的制备及性能[J].中国塑料,2025,39(11):47-52.
YANG Sen. Preparation and properties of halogen-free flame-retardant and antistatic polyamide 66 composites[J]. China Plastics, 2025, 39(11): 47-52.
- [4] 叶士兵,黎焕敏,安朋.有机磷阻燃玻璃纤维增强PA6的漏电起痕失效机理与提升[J].工程塑料应用,2025,53(7):139-145.
YE Shibing, LI Huanmin, AN Peng. Failure mechanism and improvement of tracking of organophosphorus flame-retardant glass fiber reinforced PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 139-145.
- [5] ZHENG Z X, YAO J L, YAO Q. Chemical interactions between polyamide 66 and phosphorus flame retardants[J]. Polymer Degradation and Stability, 2025, 240. DOI: 10.1016/j. polymdegrad-stab2025.111435.
- [6] PRATAMA A A, PRABOWO A R, MUTTAQIE T, et al. Polymer characteristics and additive effects on fire resistance in glow-wire test performance: Part I - Testing description and record[J]. Procedia Structural Integrity, 2025, 72:370-376.
- [7] 张学选,周东荣,王万儒,等.亚磷酸铝的制备及应用研究进展[J].大众科技,2024,26(3):67-70.
ZHANG Xuexuan, ZHOU Dongrong, WANG Wanru, et al. Research progress in preparation and application of aluminum phosphite[J]. Popular Science & Technology, 2024, 26(3): 67-70.
- [8] 杨家祥,孙菲,吴喜元,等.空心玻璃微珠填充无卤玻璃纤维增强阻燃PA66性能研究[J].塑料工业,2020,48(9):127-130.
YANG Jiaxiang, SUN Fei, WU Xiyuan, et al. Properties of hollow glass microspheres filled halogen-free glass fiber reinforced flame retardant PA66[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(9): 127-130.
- [9] PENG Q H, HUA Y F, YANG J J, et al. Construction of a P/N/Zn synergist for enhancing the fire safety and char formation of PA6/aluminum diethylphosphinate composites[J]. Polymers, 2026, 18(3). DOI: 10.3390/polym18030351.
- [10] WANG H M, YOU J G, TIAN M, et al. Preparing flame-retardant poly(phenylene oxide)/polyurea nanocomposite foam with excellent heat-resistance and shape memory performance[J]. Composites Communications, 2023, 40. DOI: 10.1016/j. coco.2023.10158.
- [11] ZHANG Z Y, YANG M C, CAI K P, et al. Effect of the flame retardants and glass fiber on the polyamide 66/polyphenylene oxide composites[J]. Materials, 2022, 15(3). DOI: 10.3390/ma15030813.
- [12] 魏安,尹奇志,孟征.阻燃聚酰胺/聚苯醚合金的研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(1):207-211,218.
WEI An, YIN Qizhi, MENG Zheng. Research review of flame retardant polyamide/polyphenylene oxide alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 207-211, 218.
- [13] 逯维健,王春花,王文志,等.共聚酰胺66/MACM12的制备及性能[J].工程塑料应用,2025,53(2):134-140.
LU Weijian, WANG Chunhua, WANG Wenzhi, et al. Preparation and performance of copolyamide 66/MACM12[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 134-140.
- [14] 杨青林,周松,李璨然,等. SEBS-g-MAH对PPO/PA66复合材料性能和形貌的影响[J].中国塑料,2025,39(3):30-35.
YANG Qinglin, ZHOU Song, LI Canran, et al. Effect of SEBS-g-MAH on properties and morphology of PPO/PA66 blends[J]. China Plastics, 2025, 39(3): 30-35.
- [15] ZHANG Z Y, CAI K P, LIU S B, et al. The effect of HIPS-g-MAH on the mechanical properties of PA66/PPO alloy[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(9): 7 939-7 951.

- [16] 赵天宝,杨如意,袁诗琳,等. PPO/PA 合金材料的研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版),2021,40(1):109–114.
ZHAO Tianbao, YANG Ruyi, YUAN Shilin, et al. Research progress of PPO/PA alloy materials[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(1):109–114.
- [17] 沈玉海. 聚苯醚/尼龙合金性能影响因素概述[J]. 化工新型材料, 2021, 49(4):247–250, 256.
SHEN Yuhai. Factors affecting on the property of PPO/PA alloy[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(4):247–250, 256.
- [18] 赵博,俞陈诚,廖文强,等. 相容剂 SMA 对 PPO/PA66/SEBS-g-MAH 合金力学性能的影响及其机理[J]. 塑料, 2021, 50(2): 1–5, 10.
ZHAO Bo, YU Chencheng, LIAO Wenqiang, et al. Effect of compatibilizer SMA on the mechanical properties of PPO/PA66/SEBS-g-MAH alloy and its mechanism[J]. Plastics, 2021, 50(2): 1–5, 10.
- [19] 邹梦浩,罗钟琳,乔艺卉,等. 二乙基次磷酸铝协同含磷有机硅阻燃 PA66 热分解动力学[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4):105–111.
ZOU Menghao, LUO Zhonglin, QIAO Yihui, et al. Thermal degradation kinetics of aluminum diethylphosphinate in synchronizing phosphorous silicone flame-retarded PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4):105–111.
- [20] 王金泳,王兴旺. 无卤阻燃剂二乙基次磷酸铝的热降解和阻燃机理[J]. 中国塑料, 2019, 33(2):82–85, 130.
WANG Jinyong, WANG Xingwang. Study on thermal degradation and flame retardant mechanisms of aluminum diethylphosphinate[J]. China Plastics, 2019, 33(2):82–85, 130.
- [21] ZHENG Z X, YAO J L, YAO Q. Thermal degradation of polyamide 66 and its model compound[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 228. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110909