

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.020

PETs对无卤阻燃玻纤增强PA66复合材料性能的影响

刘兆真¹, 贾义军^{1,2}, 陈国军¹, 周乐章², 王家欣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:以聚酰胺66(PA66)为基体树脂,添加18%无卤阻燃剂和30%玻璃纤维(GF),使用螺杆直径为30 mm的双螺杆挤出机进行熔融共混挤出,对材料进行无卤阻燃玻纤增强改性,制得无卤阻燃PA66(30%GF增强)复合材料。为优化材料加工性能、力学性能和阻燃效果,考察了润滑剂季戊四醇硬脂酸酯(PETs)加入的影响,借助差示扫描量热、热重分析和扫描电子显微镜(SEM)分别对复合材料熔融温度、结晶温度、热失重温度及显微形貌进行测试分析。结果表明:在无卤阻燃PA66(30%GF增强)复合材料中,润滑剂PETs最佳的添加量为1%;润滑剂PETs的使用可有效改善复合材料的流动性,使复合材料与未添加无卤阻燃剂的PA66(30%GF增强)复合材料的熔体流动速率达到同等水平;此时复合材料的综合性能最佳,即拉伸强度为172 MPa、弯曲强度为247 MPa、缺口冲击强度为13 kJ/m²、阻燃性可满足UL94 V-0(0.4 mm)等级、相对漏电起痕指数为600 V、灼热丝起燃温度为725 °C,完全满足电子元器件对此类复合材料在苛刻工作环境下提出的使用性能要求。此外,添加润滑剂PETs与未添加润滑剂相比,复合材料达到熔融或结晶状态所需能量更低,并对阻燃剂的分布分散效果有所改善,一定程度上影响着熔融温度、结晶温度和质量损失5%的热失重温度,复合材料在SEM下观测到阻燃剂呈均匀稳定连续相分散。

关键词: 润滑剂;季戊四醇硬脂酸酯;无卤阻燃;聚酰胺66;30%玻纤增强;UL 94等级

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0142-06

Effects of PETs on properties of halogen-free flame retardant glass fiber reinforced PA66 composites

LIU Zhaozhen¹, JIA Yijun^{1,2}, CHEN Guojun¹, ZHOU Yuezhong², WANG Jiaxin¹

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

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

Abstract : Using polyamide 66 (PA66) as matrix resin, adding 18% halogen-free flame retardant and 30% glass fiber(GF), using a twin-screw extruder with screw diameter 30 mm to melt blend extrusion, the material was modified by halogen-free flame retardant and GF, and the halogen-free flame retardant PA66 (reinforced by 30%GF) composite was prepared. In order to optimize the machining properties, mechanical properties and flame retardant effect of the composites, the effects of pentaerythritol stearate (PETs) were investigated. The melting temperature, crystallization temperature, thermogravimetric temperature and microstructure of the composites were measured by differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis and scanning electron microscope (SEM). The results show that the optimal additive amount of PETs in halogen-free flame retardant PA66(reinforced by 30%GF) composites is 1%. The use of PETs can effectively improve the fluidity of the composite, and make melt flow rate of the composite reach the same level as that of PA66(reinforced by 30%GF) composites without halogen-free flame retardants. At this time, the comprehensive performance of the composite is the best, that is, the tensile strength is 172 MPa, the bending strength is 247 MPa, the notched impact strength is 13 kJ/m², the flame retardant can meet UL 94 V-0 (0.4mm) grade, the comparative tracking index is 600 V, and the glow wire ignition temperature is 725 °C, fully meeting the performance requirements of electronic and electrical components for the use of such composites in harsh working environments. In addition, compared with PETs without lubricant, the energy required for the composite to melt or crystallize is lower, and the distribution and dispersion effects of the flame retardant are improved to a certain extent, which affects the melting temperature, crystallization temperature and the thermal weight loss temperature of 5%. The flame retardant in the composite is uniform and stable continuous phase dispersion observed under SEM.

Keywords : lubricants ; pentaerythritol stearate ; halogen-free flame retardant ; polyamide 66 ; 30% glass fiber reinforced ; UL 94 grade

通信作者: 刘兆真, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为工程塑料改性与应用

收稿日期: 2025-03-10

引用格式: 刘兆真, 贾义军, 陈国军, 等. PETs对无卤阻燃玻纤增强PA66复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 142-147.

LIU Zhaozhen, JIA Yijun, CHEN Guojun, et al. Effects of PETs on properties of halogen-free flame retardant glass fiber reinforced PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 142-147.

聚酰胺(PA)被誉为五大工程塑料之首,其中PA66具有优异的力学性能、耐热性、电绝缘性、耐磨性和耐腐蚀性,广泛应用于汽车工业、机械设备和电子电气等领域^[1-2]。近年来,随着PA66材料应用领域愈加广泛,市场需求逐年增长,但塑料制品的防火问题更加引人深思^[3-4]。同时,欧盟早在2003年颁布了RoHS指令用以限制电子电气设备中卤素阻燃材料的使用,我国于2006年也发布国家强制性标准GB 20286-2006用以加强管控含卤阻燃材料,并于2022年《“十四五”应急管理标准化发展计划》提出新型、安全和环保的阻燃材料发展方向。但是无卤阻燃剂在树脂材料中的添加量大于含卤阻燃剂,难以分散均匀,导致无卤阻燃PA66复合材料流动性较差、力学性能较低和阻燃效率不高等问题^[5-8]。

康兴隆等^[9]采用二乙基次磷酸铝(ADP)复配有机蒙脱土制备了PA6复合材料,结果表明:当ADP质量分数达到12%时,阻燃等级可达到V-0(3.2 mm)级。Tao等^[10]采用原位聚合法合成三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)阻燃PA66材料,进而改善阻燃剂在PA材料中的分散性。Ma等^[11]采用分散性良好的金属有机框架(MOFs)提升阻燃剂在聚合物中的分散性,进而提升其阻燃性能和力学性能。目前,有关复配阻燃剂提升PA66阻燃效率的研究相对全面,但未见通过润滑剂改善PA66复合材料性能的相关研究。笔者通过添加不同质量百分比的PETs润滑剂,研究润滑剂季戊四醇硬脂酸酯(PETs)对材料加工性能、力学性能和阻燃性能的影响,分析复合材料性能变化机理,为从事PA66工程塑料改性领域的研究者们提供技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66树脂:EPR27,平顶山神马工程塑料有限责任公司;

无卤阻燃剂G-ADP:自制,一种由二乙基次磷酸铝(ADP)复配三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)的无卤阻燃剂;

主抗氧剂:1098,圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

辅抗氧剂:168,圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

玻璃纤维(GF)短纤:ECS10-3.0-T435N,泰山玻纤纤维有限公司;

PETs:发基化学品(张家港)有限公司。

1.2 仪器及设备

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;

注塑成型机:UN90A5S-V,广东伊之密精密机械股份有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:XNR-400AM,承德世鹏检测设备有限公司;

电子万能试验机:WDT-W-20A1,承德精密试验机有限公司;

电子式简支梁冲击试验机:JC-25D,承德精密试验机有限公司;

水平垂直燃烧试验仪:ZZZ-RS-HL,深圳市中子测控仪器有限公司;

灼热丝试验仪:ZRS-JT,上海竞田测试设备有限公司;

漏电起痕试验仪:LDQ-JT,上海竞田测试设备有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-60 Plus,日本岛津株式会社;

热重(TG)分析仪:TG-50,日本岛津株式会社;

扫描电子显微镜(SEM):Thermo Scientific Apreo 2C,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.3 试样制备

将PA66树脂在120℃干燥箱中干燥4 h,并将冷却后的PA66树脂与无卤阻燃剂、主抗氧剂、辅抗氧剂和润滑剂按表1比例混合均匀后加到同向平行双螺杆挤出机配备的失重称中。在挤出机侧喂料称中加入GF短纤,设置主喂料和侧喂料称的下料速度为7:3,挤出机温度为265℃,螺杆转速为330 r/min。挤出料条先后经过循环水冷却、脱水机脱水 and 切粒机造粒,制得无卤阻燃PA66+30%GF复合材料。

无卤阻燃PA66复合材料制备工艺流程如图1

表1 无卤阻燃PA66复合材料基本配方

Tab. 1 Basic formulation of halogen-free flame retardant PA66 composites

phr					
No.	PA66	G-ADP	PETs	1098	168
1 [#]	100	0	0	0.5	0.5
2 [#]	100	36	0	0.5	0.5
3 [#]	100	36	2	0.5	0.5
4 [#]	100	36	4	0.5	0.5

所示。将无卤阻燃PA66复合材料在120℃干燥箱中干燥4 h,用于注塑机测试样条制备。注塑机头温度为275℃,注塑压力12 MPa,注塑速度90%,保压时间4 s。测试样条采用标准样条,状态调节和试验环境按GB/T 2918-2018规定进行,拉伸强度样条尺寸为150 mm×10 mm×4 mm,弯曲强度和缺口冲击样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,燃烧样条尺寸为125 mm×13 mm×3 mm,灼热丝样条尺寸为60 mm×60 mm×2 mm,相对漏电起痕指数样条尺寸为直径为80 mm、厚度为3 mm的圆片。

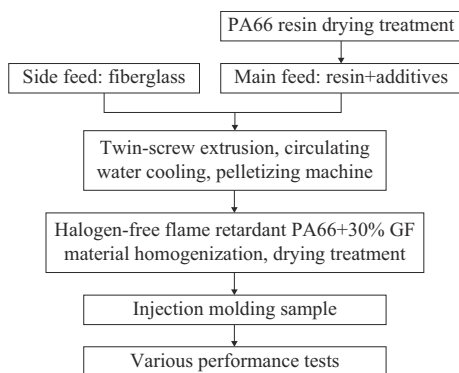


图1 无卤阻燃GF增强PA66复合材料制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of halogen-free flame retardant GF reinforced PA66 composites

1.4 测试与表征

拉伸强度按GB/T 1040.1-2018测试,拉伸速率为5 mm/min;弯曲强度按GB/T 9341-2008测试,加载速率为2 mm/min;缺口冲击强度按GB/T 1043.1-2008测试,摆锤能量为1 J;MFR按GB/T 3682.1-2018测试;垂直燃烧按GB/T 2408-2021测试;灼热丝按GB/T 5169.13-2013测试;相对漏电起痕指数按GB/T 4207-2022测试。

2 结果与讨论

2.1 PETs用量对复合材料加工性能的影响

将无卤阻燃剂的添加量固定为配方总质量的18%(份数为36份),考量了阻燃剂引入体系后对复合材料流动性的影响,以及润滑剂添加量对复合材料的影响,结果见表2。由表2可知,不添加无卤阻燃剂的MFR为13.6 g/10 min。随着无卤阻燃剂引入,复合材料的流动性呈下降趋势,MFR从13.6 g/10 min降低至4.9 g/10 min。润滑剂PETs的引入,可有效提高复合材料的流动性。加入1%质量分数(份数为2份)的PETs润滑剂,复合材料的MFR与未加无卤阻燃剂持平。但随着PETs用量的增加,复合材料的流动性改善效果不大。这可能是由于润滑

剂PETs的引入,在熔融状态下,分子量低的PETs可扩散到PA66大分子链中,增加了分子链间的自由体积,提高了分子链在高温下或剪切力作用下相对运动能力,使PA66大分子链更容易缠结,宏观表现为复合材料的流动性有明显提升。PETs起到了内润滑的作用^[12-14]。同时,PETs作为润滑剂分散在PA66基体中,改善了熔体与螺杆流道的表面摩擦力,避免熔体与设备的黏附,起到了外润滑的作用^[15-16]。

表2 PETs添加量对PA66复合材料MFR的影响

Tab. 2 Effect of PETs addition on MFR of PA66 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	13.6	4.9	13.0	16.6

PA66复合材料MFR的提升意味着材料在加工过程中有更宽的加工窗口,大量无卤化的阻燃剂粉体添加,导致螺杆扭矩提升,不仅影响复合材料产量,长期使用还将对挤出机螺杆配件的使用寿命造成损伤。除添加润滑剂PETs方法提升材料MFR外,提升挤出机加工温度增加树脂流动性,使阻燃剂充分分散也能达到相同效果,但加工温度的升高将导致无卤阻燃剂在加工过程中提前分解,不利于制造综合性能良好的无卤阻燃PA66复合材料。因此,在无卤阻燃PA66复合材料中,添加适量润滑剂PETs,不仅起到提升材料加工效率的作用,还有利于在加工过程中保护阻燃剂,避免其分解失效。综合考量,润滑剂PETs的最佳质量分数为1%。

2.2 PETs用量对复合材料综合性能的影响

将无卤阻燃剂的添加量固定为配方总质量的18%,考量了润滑剂的添加量对复合材料的力学、阻燃和电气性能影响,结果见表3。由表3可知,在力学性能方面,PETs质量分数为1%时,复合材料的拉伸强度最佳,可达172 MPa,接近未添加无卤阻燃剂的原始配方。但随着PETs过量添加,又会导致复合材料拉伸强度降低至161 MPa。润滑剂PETs的使用及其添加量对材料弯曲强度的影响不大。这可能是由于润滑剂在双螺杆挤出机起到的润滑作用使其具

表3 PETs添加量对PA66复合材料性能的影响

Tab. 3 Effect of PETs addition on properties of PA66 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
Tensile strength/MPa	175	165	172	161
Bending strength/MPa	260	247	247	227
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	13.2	10.5	13.0	11.3
UL 94	HB	0.8 mm V-0	0.4 mm V-0	0.8 mm V-0
GWIT/°C	700	725	725	725
CTI/V	600	600	600	600

有一定取向性。添加 1%PETs 的无卤阻燃 PA66+30%GF 复合材料的缺口冲击强度可达 13.0 kJ/m²,这可能是由于润滑剂 PETs 的使用,可使无卤阻燃剂在 PA66 基体树脂中分散均匀,未在局部形成团聚,使得材料冲击性能未降低。

在阻燃性能方面,添加 1% 质量分数的 PETs 润滑剂,可显著提升材料的阻燃性能,即从 0.8 mm V-0 级提升至 0.4 mmV-0 级,这可能是由于润滑剂 PETs 的存在,使无卤阻燃剂在 PA66 材料中具有更好的分散效果。阻燃剂分散效果越好,材料阻燃效率越高,可达到更高防火等级^[17]。在灼热丝起燃温度和相对漏电起痕指数两个方面,润滑剂的添加未降低 PA66 复合材料的这两项性能,即添加 PETs 不会影响材料的使用性能,灼热丝起燃温度(GWIT)达到 700 °C,相对漏电起痕指数(CTI)达到 600 V,符合电子电气行业对无卤阻燃 PA66 复合材料提出的性能要求。

2.3 PETs 用量对复合材料熔融、结晶和耐热稳定性的影响

为进一步验证,无卤阻燃剂的添加量固定为配方总质量的 18%,采用 DSC 和 TG 对表 3 中复合材料性能检测结果进行了熔融和耐热分析验证。分析特征数据见表 4。图 2~图 4 为 PA66 复合材料在氮气氛围下进行的 DSC 和 TG 测试曲线。

表 4 PETs 添加量对复合材料熔融、结晶和耐热稳定性的影响

Tab. 4 Effect of PETs addition amount on melting, crystallization and heat stability of PA66 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
Melt temperature/°C	262.29	261.25	260.70	260.46
Heat absorption energy/mJ	143.52	241.22	129.89	148.87
Crystallization temperature/°C	231.38	230.04	230.95	230.93
Exothermic energy/mJ	99.88	174.31	89.09	100.46
Mass loss of 5% temperature/°C	388.70	339.79	353.57	329.84

图 2 为材料的 DSC 熔融吸热曲线,通过 LabSolutions 软件对 1[#]~4[#]样品的处理数据得出:熔点分别为 262.29, 261.25, 260.70, 260.46 °C,吸热能量分别约为 143.52, 241.22, 129.89, 148.87 mJ。从以上数据中可以看出,润滑剂 PETs 的使用可有效降低复合材料的熔融温度。添加无卤阻燃剂的 2[#]样品熔融所需能量更高,而添加润滑剂 PETs 的 3[#]和 4[#]样品熔融吸热能量显著降低。这可能是 2[#]样品,未添加润滑剂 PETs 的 PA66 复合材料,在加热过程中,无卤阻燃剂未能均匀分散,团聚效应明显,分子间结合力的打破需要更高的能量才能破坏,也侧面说明 2[#]样品

黏度更大。而添加润滑剂 PETs,可使无卤阻燃剂在 PA66 基体树脂中充分分散,有利于热量的传递,使得复合材料熔融更容易。

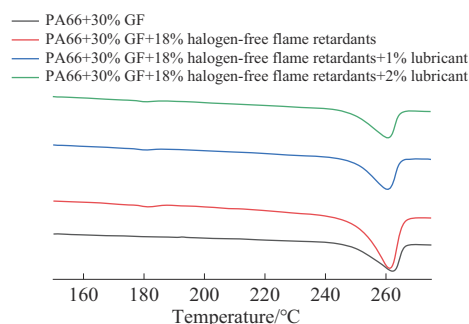


图 2 PA66 复合材料的 DSC 熔融吸热曲线

Fig. 2 DSC melting heat absorption curves of PA66 composites

图 3 为材料 DSC 结晶放热曲线,数据处理采用 LabSolutions 软件,分析得出:1[#]~4[#]样品的结晶温度分别为 231.38, 230.04, 230.95, 230.93 °C,放热能量分别约为 99.88, 174.31, 89.09, 100.46 mJ。图 3 的结果可以进一步验证图 2 中的结论。与熔融吸热规律相同,仅添加无卤阻燃剂的 2[#]样品结晶放热能量更高,添加润滑剂 PETs 可进行改善,有利于制得综合性能良好的无卤阻燃 PA66 复合材料。

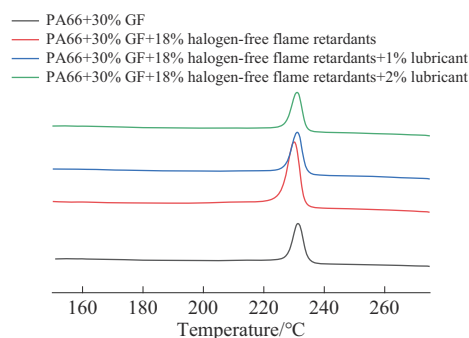


图 3 PA66 复合材料的 DSC 结晶放热曲线

Fig. 3 DSC crystallization heat release curves of PA66 composites

图 4 为复合材料 TG 曲线,在升温速度为 10 °C/min 升至 550 °C,1[#]~4[#]样品质量损失 5% 的温度分别为 388.70, 339.79, 353.57, 329.84 °C。从图 4 可以看出,无卤阻燃 PA66+30%GF 复合材料,在添加 18% 无卤阻燃剂的条件下,热失重温度显著降低。添加 1% 质量分数的润滑剂 PETs,使复合材料体系中的无卤阻燃剂充分分散,热失重温度有所提升。当添加量达到 2% 时,润滑剂 PETs 的使用,使得热失重温度又进一步降低,这可能是由于过量的润滑剂不能均匀分散在树脂材料中,致使无卤阻燃剂分散效果与 1% 质量分数相比变差所致。

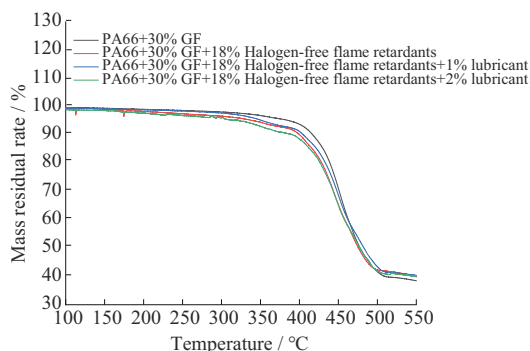


图4 PA66复合材料的TG曲线

Fig. 4 TG curves of PA66 composites

2.4 PETs用量对复合材料微观结构的影响

为了进一步验证润滑剂的使用对PA66复合材料力学性能改善的机理,采用SEM对断面进行分析验证,结果见图5。图5a~图5d分别为1#~4#样品断面在 $\times 5\,000$ 放大倍数下的SEM形貌。从图5可以看出:未添加润滑剂的1#样品,图中断面显示PA66基体树脂与玻纤包覆效果一般,玻纤表面平滑;添加润滑剂的2#样品,有效改善了玻纤和树脂基体的界面黏合,断裂强度表现在拉伸强度和缺口冲击强度上有明显提升,这与2.2结论中的力学性能表征结果一致。添加1%润滑剂PETs的3#样品,树脂与玻纤界面黏合效果最好。而润滑剂PETs的添加质量分数为2%的4#样品,树脂与玻纤的包覆效果变差,表现为树脂与玻纤未形成连续的“钢筋-混凝土”式复合材料结构。从SEM照片来看,润滑剂PETs的引入,对无卤阻燃PA66+30%GF复合材料中基体树脂和GF的界面微观结构产生较大影响,润滑剂PETs最佳的质量分数为1%。

综上所述,SEM研究结果表明,润滑剂PETs的

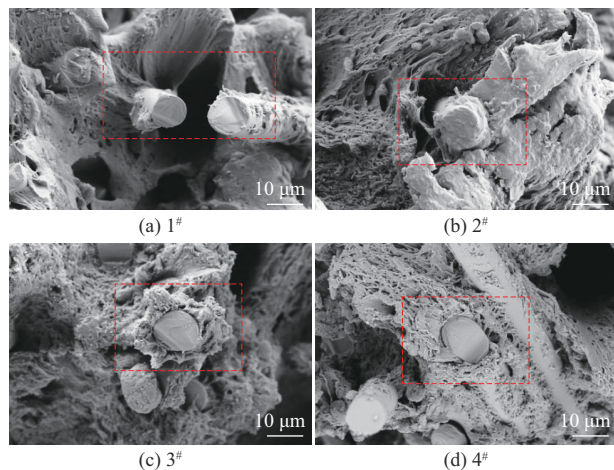


图5 PA66复合材料的SEM照片

Fig. 5 SEM photos of PA66 composites

使用对树脂基体和玻纤的界面结合有很大影响。这可能是PETs属于兼具内润滑和外润滑双重作用机理^[18-20]的一种润滑剂。其拥有特殊的化学结构,是由季戊四醇的四个羟基分别与四个硬脂酸分子的羧基发生酯化反应,形成一个复杂的具有四个酯键的酯类化合物。由于有酯键的存在,可与PA66树脂的酰胺基团和玻纤的偶联剂形成很好的“桥架”,有利于提高复合材料的力学性能。

3 结论

(1)在无卤化阻燃PA66+30%GF复合材料中,润滑剂PETs的添加,对流动性的作用效果明显。添加质量分数为1%时,MFR为13.0 g/10 min。

(2)在无卤化阻燃PA66+30%GF复合材料中,PETs最佳添加质量分数为1%。该添加量下性能最佳,即拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度分别达到172 MPa,247 MPa和13 kJ/m²。

(3)润滑剂PETs的使用,有效提高了阻燃剂在基体树脂中的分散性,材料的阻燃效果从0.8 mm V-0阻燃等级提升至0.4 mm V-0,CTI达到600 V,可满足多数电子电器材料的使用要求。

(4)润滑剂PETs的使用,使材料达到熔融状态所需能量降低40%,结晶所需能量降低48%,材料质量损失5%的温度提升13 °C,有效改善阻燃剂的分散状态。

(5) SEM结果表明,在无卤化阻燃PA66+30%GF复合材料中,PETs的引入有效改善了GF、阻燃剂和基体树脂的界面结合强度,并形成连续均匀的稳定相结构。

参考文献

- [1] 郭斌,李军艳.聚酰胺改性的研究进展[J].煤炭与化工,2021,44(8):123-126,138.
GUO Bin, LI Junyan. Research progress of polyamide modification [J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(8):123-126, 138.
- [2] KUNDU C K, LI Z W, LI X H, et al. Graphene oxide functionalized biomolecules for improved flame retardancy of Polyamide 66 fabrics with intact physical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156:362-371.
- [3] 冯建立,王学军.PA66阻燃改性研究进展[J].塑料工业,2023,51(1):23-29.
FENG Jianli, WANG Xuejun. Research progress on flame retardant modified polyamide 66[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(1):23-29.
- [4] HOLDSWORTH A F, HORROCKS A R, KANDOLA B K. Novel metal complexes as potential synergists with phosphorus based flame retardants in polyamide 6.6[J]. Polymer Degradation and

- Stability, 2020, 179. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2020.109220.
- [5] 余厚咏,陈芸卉,张云云,等.不同阻燃剂对尼龙材料加工改性的研究进展[J]. 纺织高校基础科学学报, 2024, 37(3):22–29, 45.
YU Houyong, CHEN Yunhui, ZHANG Yunyun, et al. Progress in the modification of nylon materials by different flame retardants[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2024, 37(3): 22 – 29, 45.
- [6] 朱云燕,郭荣辉.阻燃剂阻燃机理的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(4):115–122.
ZHU Yunyan, GUO Ronghui. Research progress of retarding mechanism of flame retardants[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(4):115–122.
- [7] 宋广杰,侯春曰,郑毅.阻燃聚酰胺66的研究现状及发展趋势[J]. 合成纤维, 2023, 52(8):1–3, 6.
SONG Guangjie, HOU Chunyu, ZHENG Yi. Research status and development trend of flame-retardant polyamide 66[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(8):1–3, 6.
- [8] 靳昕怡,魏丽菲,窦娟,等.无卤阻燃剂在聚合物阻燃中的应用研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(6):67–73.
JIN Xinyi, WEI Lifei, DOU Juan, et al. Research on the application of halogen-free flame retardants in polymer flame retardants[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(6):67–73.
- [9] 康兴隆,鲁哲宏,柳妍,等.改性纳米二氧化硅协效二乙基次磷酸铝阻燃尼龙6[J]. 材料导报, 2021, 35(18):1 8047–18 051.
KANG Xinglong, LU Zhehong, LIU Yan, et al. Modified nano-silica synergistic aluminum diethylphosphinate flame retardant nylon 6[J]. Materials Reports, 2021, 35(18):1 8047–18 051.
- [10] TAO W, LI J. Melamine cyanurate tailored by base and its multi effects on flame retardancy of polyamide 6[J]. Applied Surface Science, 2018, 456:751–762.
- [11] MA S C, HOU Y B, XIAO Y L, et al. Metal-organic framework@polyaniline nanoarchitecture for improved fire safety and mechanical performance of epoxy resin[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 247. DOI:10.1016/j.matchemphys.2020.122875.
- [12] 刘乐文,程书文,姜向新.极性润滑剂对滑石粉填充PP性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5):149–155.
LIU Lewen, CHENG Shuwen, JIANG Xiangxin. Influences of polar lubricants on properties of PP filled with talcum powder[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):149–155.
- [13] 吴博,廖双双,徐文文,等.不同助剂对PA66黏度的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):134–138.
WU Bo, LIAO Shuangshuang, XU Wenwen, et al. Effects of different additives on viscosity of PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):134–138.
- [14] 葛铁军,王成城.不饱和硬脂酸季戊四醇酯的合成及对PVDC热降解影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12):117–120, 125.
GE Tiejun, WANG Chengcheng. Synthesis of UPS and its influence on thermal degradation of PVDC[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):117–120, 125.
- [15] 杨钟,孟楷.季戊四醇硬脂酸酯对聚酯弹性体加工性能的影响[J]. 合成技术及应用, 2022, 37(4):39–42.
YANG Zhong, MENG Kai. Effect of pentaerythritol stearate on the processing performance of polyester elastomer[J]. Synthetic Technology & Application, 2022, 37(4):39–42.
- [16] 王坤, WIT YEE TIN, 刘广永,等.季戊四醇硬脂酸酯在聚碳酸酯中的应用[J]. 弹性体, 2020, 30(2):56–60, 68.
WANG Kun, TIN W Y, LIU Guangyong, et al. Application of pentaerythritol stearate in polycarbonate[J]. China Elastomerics, 2020, 30(2):56–60, 68.
- [17] 王凌峰,徐百平,谈灵操.多阻燃剂协同实现PP泡沫的高效阻燃改性[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4):1–7.
WANG Lingfeng, XU Baiping, TAN Lingcao. Multi-flame retardants synergistically achieve efficient flame retardant modification of PP foams[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 1–7.
- [18] 叶淑英.润滑剂对PP/IFR复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4):113–117.
YE Shuying. Effect of lubricants on properties of PP/IFR composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):113–117.
- [19] 杨士亮,杨宏伟,马玉红,等.塑料润滑剂的发展现状及应用[J]. 广州化工, 2013, 41(2):20–21, 25.
YANG Shiliang, YANG Hongwei, MA Yuhong, et al. Development and application of plastic lubricants[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(2):20–21, 25.
- [20] 刘芳,李杰,时凯.塑料润滑剂及润滑作用的理论与应用概述[J]. 聚氯乙烯, 2008, 36(8):29–33.
LIU Fang, LI Jie, SHI Kai. Summary on the theory and application of plastic lubricants and lubrication[J]. Polyvinyl Chloride, 2008, 36(8):29–33.