doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.10.005

半芳香族共聚改性阻燃增强尼龙66的制备与性能

单倩,高永芝,田国锋,刘建伟,常显涛,董柄志
(山东东辰瑞森新材料科技有限公司,济南 250200)

摘要:针对传统尼龙66 (PA66)添加型阻燃改性中阻燃剂用量大、力学性能损失显著、环保性受限等问题,通过半芳香族共聚改性制备聚己二酰己二胺-聚间苯二甲酰己二胺共聚物(PA66/6I),系统对比其与PA66在玻璃纤维(GF)增强及阻燃增强体系下力学性能、加工流动性、吸水率、耐水煮性能、阻燃等级等方面的差异,探究半芳香结构对尼龙本征阻燃性与综合性能的提升机制。结果表明,对于GF增强体系,随着GF质量分数从10%提升至50%,PA66/6I体系力学性能稳步提升,拉伸强度由81.81 MPa升至205.3 MPa,弯曲强度从149.6 MPa增至268.7 MPa,缺口冲击强度从5.6 kJ/m^{2}提升至12.9 kJ/m^2。对于阻燃增强体系,当阻燃剂质量分数由9%增至18%时,PA66和PA66/6I两种阻燃增强材料的力学性能均呈下降趋势;而当阻燃剂质量分数相同时,阻燃增强PA66/6I的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度与熔体流动速率(MFR)均优于阻燃增强PA66,且吸水率更低。阻燃测试显示,阻燃增强PA66/6I在阻燃剂质量分数为13%时即可达到V−0级,而阻燃增强PA66需添加质量分数18%的阻燃剂才能达到相同阻燃等级,表明半芳香共聚结构显著提升了材料本征阻燃性,可有效降低阻燃剂的用量。水煮72 h后,阻燃增强PA66/6I的拉伸与弯曲强度保持率分别达57.8%与54.2%,远高于阻燃增强PA66,耐水解稳定性更突出。同时,阻燃增强PA66/6I的漏电起痕指数达600 V、灼热丝起燃温度达775 ℃,满足电子电气与家电领域高绝缘、高耐热要求。此外,通过调整己二酸与间苯二甲酸配比进一步验证表明,芳香环含量直接影响材料的综合性能,芳环占比降低会造成材料力学性能、流动性及阻燃等级同步下降。研究表明,半芳香族PA66/6I可实现阻燃性、力学性能、加工性与耐环境性的协同提升,为高性能低添加阻燃尼龙材料的开发与工程应用提供理论依据与技术支撑。

关键词:半芳香族尼龙;尼龙66;共聚改性;本征阻燃;增强改性;阻燃改性
中图分类号:TQ327.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3539(2026)10-0037-09

Preparation and properties of flame retardant reinforced nylon 66 modified by semiaromatic copolymerizatio

SHAN Qian, GAO Yongzhi, TIAN Guofeng, LIU Jianwei, CHANG Xiantao, DONG Bingzhi
(Shandong Dongchen Ruishen New Materials Technology Co., Ltd., Jinan 250200, China)

Abstract: To address the issues associated with traditional flame-retardant modified nylon 66 (PA66), such as high flame retardant additive content, significant loss of mechanical properties, and limited environmental sustainability, semi-aromatic copolymer-modified polyhexamethylene adipamide-polyisophthalamide copolymer (PA66/6I) was prepared. The mechanical properties, processability, water absorption, boil-proof resistance, and flame retardancy of PA66/6I were systematically compared with those of pure PA66 under glass fiber (GF) reinforcement and flame-retardant enhancement systems, aiming to investigate the mechanism by which the semi-aromatic structure enhances the intrinsic flame retardancy and overall performance of nylon. The results show that the mechanical properties of PA66/6I system increase steadily with the increase of GF mass fraction from 10% to 50%. The tensile strength increases from 81.8 MPa to 205.3 MPa, the flexural strength increases from 149.6 MPa to 268.7 MPa, and the notched impact strength increases from 5.6 kJ/m^2 to 12.9 kJ/m^2. As the mass fraction of flame retardant increases from 9% to 18%, the mechanical properties of both materials show a downward trend, but under the same flame retardant content, PA66/6I exhibits superior tensile strength, flexural strength, notched impact strength, and melt flow rate (MFR) compared to PA66, along with lower water absorption. Flame retardancy tests show that PA66/6I can reach V−0 level with 13 wt% flame retardant, while PA66 requires 18

通信作者:单倩,博士研究生,工程师,研究方向为改性尼龙的研究与应用

收稿日期:2026-07-25

引用格式:单倩,高永芝,田国锋,等.半芳香族共聚改性阻燃增强尼龙66的制备与性能[J].工程塑料应用,2026,54(10):37−45.
SHAN Qian,GAO Yongzhi,TIAN Guofeng,et al. Preparation and properties of flame retardant reinforced nylon 66 modified by semiaromatic copolymerizatio[J]. Engineering Plastics Application,2026,54(10):37−45.

wt% to achieve the same grade, indicating that the semi-aromatic copolymer structure significantly enhances the material's intrinsic flame retardancy and effectively reduces the flame retardant dosage. After 72 hours of boiling, the retention rates of tensile strength and flexural strength for PA66/6I reach 57.8% and 54.2%, respectively, far exceeding those of PA66, demonstrating better hydrolysis resistance. At the same time, PA66/6I achieves a comparative tracking index of 600 V and a glow-wire ignition temperature of 775 ℃, meeting the requirements for high insulation and high heat resistance in electronics and household appliances. In addition, the experiment further verifies by adjusting the ratio of adipic acid to isophthalic acid that the aromatic ring content directly affects the overall material performance. Lowering the proportion of aromatic rings will cause a simultaneous drop in the material's mechanical properties, flowability, and flame-retardant rating. Research shows that semi-aromatic PA66/6I can achieve a synergistic improvement in flame retardancy, mechanical properties, processability, and environmental resistance, providing a theoretical basis and technical support for the development and engineering application of high-performance, low-additive flame-retardant nylon materials.

Keywords: semi-aromatic nylon ; nylon 66 ; copolymerization modification ; inherently flame-retardant ; reinforced modification ; flame-retardant modification

尼龙 66 (PA66)作为一类性能优异的工程塑料,凭借其结晶度高、刚性强、热变形温度高等特点,被广泛应用于电子电气、汽车制造、航空航天等诸多领域[1−3]。然而,尼龙材料本身具有易燃特性、极限氧指数(LOI)较低,燃烧时易滴落并释放有毒有害气体,这一缺陷严重限制了其在高阻燃要求场景中的应用[4−5]。

随着全球范围内消防安全法规的日益严苛,对尼龙材料的阻燃性能提出了更高要求[6]。目前,主流的尼龙阻燃改性方式为通过引入磷系、溴系、氮系等阻燃剂来提升材料阻燃等级[7−10]。但传统添加型阻燃改性存在显著瓶颈:一方面,为使材料达到 UL 94 V−0 级等关键阻燃标准,往往需要添加大量阻燃剂,而高含量阻燃剂的引入会严重破坏尼龙基体的结晶结构与界面相容性[11],导致材料力学性能大幅下降,无法满足工程部件的结构承载需求;另一方面,部分阻燃剂(如传统溴系阻燃剂)存在环境安全性争议[12],不符合“绿色环保”的行业发展趋势,而环保型阻燃剂的高效应用又面临成本与性能的双重制约[13]。

在此背景下,提升尼龙材料的本征阻燃性、降低阻燃剂添加量、实现“阻燃性能-力学性能-环保性”的协同平衡,成为突破当前技术瓶颈的关键方向。半芳香族尼龙的分子链中引入的芳香环结构可借助 π 电子离域效应、芳香环的热稳定性及炭化促进作用[14],显著提升材料的本征阻燃潜力,为低阻燃剂添加量下实现高效阻燃提供了新思路[15−16]。

基于上述行业需求与技术缺口,本研究聚焦聚己二酰己二胺-聚间苯二甲酰己二胺共聚物(PA66/6I)与纯 PA66 阻燃性能的对比,利用苯环的 π 电子离域效应提升材料本征阻燃性,并系统对比 PA66/6I 与纯 PA66 在相同阻燃体系下的阻燃效果、阻燃剂需求及力学性能的差异。

1 实验部分

1.1 主要原材料

己二胺:工业级,中国化学天辰齐翔新材料有限公司;

己二酸:工业级,山东华鲁恒升化工股份有限公司;

间苯二甲酸:工业级,台化兴业(宁波)有限公司;

玻璃纤维(GF):工业级,牌号 435TM,泰山玻璃纤维有限公司;

抗氧剂:工业级,牌号 1098 和 168,天津利安隆新材料股份有限公司;

阻燃剂:工业级,牌号 9103-1,浙江传化化学集团。

1.2 主要仪器及设备

聚合釜:CJ-27,威海新元化工机械有限公司;

双螺杆挤出机:HK36 MT,南京科亚机械制造有限公司;

注塑机:VE III,宁波海天塑机集团有限公司;

高速混合机:GSH50,江苏永志环保科技有限公司;

万能试验机:CMT6103,深圳泰欣荣科技有限公司;

冲击试验机:XJJ-50,承德市科承试验机有限公司;

熔体流动速率(MFR)测定仪:LSD-450,厦门莱

斯德科学仪器有限公司;

乌氏黏度仪:BP160,杭州中旺科技有限公司;

分析天平:FB124,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:HH-4A,上海秉越电子仪器有限公司;

漏电起痕试验仪:ZM-R12,东莞市中铭仪器设备有限公司;

灼热丝试验仪:ZY6055-ZN,中诺仪器(广东)有限公司;

垂直燃烧试验仪:HVR-75,上海埃微电子科技有限公司;

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

1.3 试样制备

1.3.1 PA66/6I和PA66的制备

将物质的量比1.05∶1的己二胺、二元酸(己二酸与间苯二甲酸物质的量比4∶1)加入中和锅中,然后加入适量的去离子水升温至70~100 ℃制备成尼龙盐溶液。其中,盐溶液pH值控制到7.4~8.0。经测试盐溶液pH值合格后与抗氧剂(1098和168)等助剂一起加入到聚合釜中,抗氧剂用量为盐溶液质量的0.05%,充氮气置换空气后开始升温升压进行缩聚反应,当压力达到2.3 MPa时,保压3 h,然后降压至常压,在降压过程中,保证釜内温度升高到270 ℃。最后,常压下排气1 h出料,经切粒干燥后得到PA66/6I(相对黏度为2.6,达到工程应用水平)。

将物质的量比1.05∶1的己二胺、己二酸加入中和锅中,然后加入适量的去离子水升温至70~100 ℃制备成尼龙盐溶液。其中,盐溶液pH值控制到7.4~8.0。经测试盐溶液pH值合格后与抗氧剂(1098和168)等助剂一起加入到聚合釜中,充氮气置换空气后开始升温升压进行缩聚反应,当压力达到2.3 MPa时,保压3 h,然后降压至常压,在降压过程中,保证釜内温度升高到270 ℃。最后,常压下排气1 h出料,经切粒干燥后得到PA66(相对黏度为2.7,达到工程应用水平)。

1.3.2 GF增强尼龙材料的制备

将尼龙树脂在80 ℃真空干燥箱中烘干6 h,然后将其与抗氧剂(1098和168)经过高速混合机均匀混合得到预混料,与侧喂的GF送入双螺杆挤出机中挤出造粒制得增强尼龙材料,详细配方见表1。工艺参数:挤出机喂料段到机头段九区温度为240、250、255、260、265、270、275、280、280 ℃,双螺杆转速为350 r/min,主料喂料流量为40 kg/h,侧喂料转速频率为20 Hz,侧喂料流量根据GF含量进行调整。

表1 GF增强尼龙材料配方(质量分数)

Tab. 1 GF reinforced nylon material formulation (mass fraction)

%

Samples	PA66/6I	PA66	GF	1098	168
1#	89.6		10	0.2	0.2
2#		89.6	10	0.2	0.2
3#	69.6		30	0.2	0.2
4#		69.6	30	0.2	0.2
5#	49.6		50	0.2	0.2
6#		49.6	50	0.2	0.2

1.3.3 阻燃增强尼龙材料的制备

将尼龙树脂在80 ℃真空干燥箱中烘干6 h,然后将其与抗氧剂、阻燃剂经过均匀混合,与侧喂的GF挤出造粒制得阻燃增强尼龙材料,详细配方见表2。工艺参数与1.3.2相同。

表2 阻燃增强尼龙材料配方(质量分数)

Tab. 2 Flame-retardant reinforced nylon material formulation (mass fraction)

%

Samples	PA66/6I	PA66	GF	Flame retardant	1098	168
7#	60.6		30	9	0.2	0.2
8#	56.6		30	13	0.2	0.2
9#	54.6		30	15	0.2	0.2
10#	51.6		30	18	0.2	0.2
11#		60.6	30	9	0.2	0.2
12#		56.6	30	13	0.2	0.2
13#		54.6	30	15	0.2	0.2
14#		51.6	30	18	0.2	0.2

1.3.4 尼龙材料注塑工艺

将尼龙材料置于90 ℃条件下干燥4 h去除水分,干燥完成后投入注塑机料筒,料筒从投料到射出段五区温度依次设定为265、275、285、295、305 ℃,模具温度设置为80 ℃,熔融后的尼龙熔体以60 MPa的注射压力完成充模,随后切换至40 MPa保压压力进行5 s保压补缩,保压结束后进入15 s冷却阶段,待制品充分冷却定型后开模顶出得到注塑制品。注塑样条均在23 ℃、相对湿度50%的环境下状态调节24 h后进行相应测试。

1.4 测试与表征

拉伸性能按GB/T 1040−2006测试,测试温度为23 ℃,拉伸速率为50 mm/min,试样厚度4 mm。

弯曲强度按GB/T 9341−2008测试,测试温度为

23 ℃,弯曲速率为2 mm/min,试样厚度4 mm。

简支梁缺口冲击强度按GB/T 1043−2008测试,采用V型缺口试样,测试温度为23 ℃,摆锤能量为5.5 J,试样厚度4 mm。

MFR按ASTM D1238−23测试,温度为275 ℃,砝码为2.16 kg。

漏电起痕指数(CTI)测试按IEC 60112:2025进行,以样品承受50滴电解液且未出现试验失败现象时的最高电压取值。

灼热丝起燃温度(GWIT)按GB/T 5169.13−2013测试,测试厚度为1.5 mm。

垂直燃烧等级按GB/T 2408−2008测试,样条长为(125±5) mm,宽为(13±0.5) mm,厚度约1.6 mm。

吸水率按GB/T 1034−2008测试,水温控制在(23±1) ℃,浸泡(24±1) h。

熔点和结晶性能采用DSC测试,以10 ℃/min的升温速率从25 ℃升温至250 ℃,恒温3 min,消除热历史;然后以10 ℃/min的降温速率降温至25 ℃,恒温3 min,再以10 ℃/min的升温速率升温至250 ℃。结晶度按式(1)计算。

$$X_c=\Delta H_m/\Delta H_0 \quad (1)$$

式中:X_c为基于PA66可结晶链段的表观结晶度;ΔH_m为试样的结晶焓;ΔH_0为试样100%结晶熔融焓,取191.5 J/g。

耐水煮测试:将注塑制备的标准拉伸、弯曲、缺口冲击及无缺口冲击样条置于100 ℃沸水中浸泡72 h,取出后擦干试样表面水分,在23 ℃、相对湿度50%的环境下状态调节24 h,随后分别依据GB/T 1040−2006、GB/T 9341−2008、GB/T 1043−2008、GB/T 1043−2008依次测试试样的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度与无缺口冲击强度。

2 结果与讨论

2.1 PA66/6I与PA66的结晶性能对比

图1为PA66/6I和PA66的DSC曲线,相应参数见表3。由DSC测试结果可知,相比于PA66,PA66/6I的结晶起始温度由225.68 ℃降至193.59 ℃,结晶峰值温度由217.73 ℃降至187.35 ℃,结晶度由26.96%降至18.23%,说明间苯二甲酸共聚单元的引入显著降低了材料的结晶能力。PA66为线型脂肪族聚酰胺,分子链规整度高,酰胺基团易于形成分子间氢键,有利于分子链有序堆砌并结晶;当主链引入带有刚性间位苯环结构的单元后,破坏了分子链的规整性与对称性,阻碍链段规整排列与晶体生长,结晶过程需在更低温度下才能发生,最终使PA66/6I呈现更低的结晶温度与结晶度。

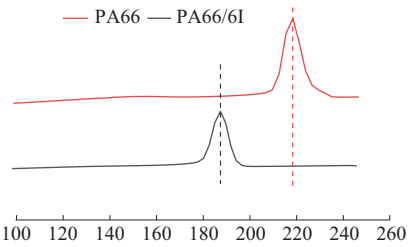


图1 PA66/6I和PA66的DSC曲线

Fig. 1 DSC curves of PA66/6I and PA66

表3 PA66/6I和PA66的DSC数据

Tab. 3 DSC data of PA66/6I and PA66

Samples	T_{onset}/℃	T_c/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	X_c/%
PA66/6I	193.59	187.35	34.92	18.23
PA66	225.68	217.73	51.63	26.96

Notes: T_{onset} denotes the crystallization onset temperature; T_c represents the crystallization temperature; ΔH_m stands for the crystallization enthalpy; X_c denotes the degree of crystallinity.

2.2 PA66/6I与PA66在GF增强改性中的性能对比

GF增强PA66/6I与PA66体系的综合性能数据汇总于表4。结合不同GF含量下PA66/6I与PA66体系的力学性能及MFR测试结果可清晰看出,在10%、30%、50%三种不同GF质量分数下,改性后的PA66/6I体系综合性能全面优于纯PA66体系。其中PA66/6I体系的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度等核心力学指标均高于同GF含量的PA66体系,同时具备更优异的加工流动性。随着GF质量分数从

表4 GF增强尼龙材料的性能

Tab. 4 Properties of GF reinforced nylon materials

Samples	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Notch impact strength/(kJ·m^{-2})	Non-notch impact strength/(kJ·m^{-2})	MFR/[g·(10 min)$^{-1}$]
1#	81.8	149.6	5.6	32.4	50.4
2#	75.3	133.8	4.8	20.1	37.5
3#	165.8	212.5	7.9	68.1	36.8
4#	162.3	203.2	6.5	51.2	25.2
5#	205.3	268.7	12.9	79.5	11.7
6#	186.5	252.4	11.3	70.6	3.1

10%提升至50%，GF的骨架增强作用充分发挥，PA66/6I体系力学性能稳步提升，拉伸强度由81.8 MPa升至205.3 MPa，弯曲强度从149.6 MPa增至268.7 MPa，缺口冲击强度从5.6 kJ/m²提升至12.9 kJ/m²。受GF填充阻力影响，PA66/6I体系MFR随GF增加小幅下降，但始终优于PA66体系。

PA66/6I为PA66与间苯二甲酸的共聚结构，可破坏PA66分子链的规整排列，降低基体树脂结晶度，有望减少因快速结晶导致的GF-树脂界面缺陷与内应力、改善GF在基体中的分散均匀性，进而显著提升拉伸、弯曲与冲击性能。此外，链段规整性降低使PA66/6I熔体黏度更低、流动性更好，在高GF含量下仍能保持良好加工流动性，避免因GF团聚与熔体流动性差导致的性能劣化[17]。

2.3 PA66/6I与PA66在阻燃增强改性中的性能对比

不同阻燃剂用量对阻燃增强PA66/6I及阻燃增强PA66复合材料拉伸、弯曲性能的影响如图2、图3所示。当阻燃剂质量分数从9%递增至18%时，阻燃增强PA66复合材料的拉伸强度从136 MPa降至119 MPa，弯曲强度从195 MPa降至174 MPa；阻燃增强PA66/6I复合材料的拉伸强度从141 MPa降至125 MPa，弯曲强度从202 MPa降至183 MPa。出现该规律的核心原因是，阻燃剂添加量过高时，易在树脂基体与GF界面发生团聚，形成孔隙、缺陷，破坏树脂基体的连续性，弱化GF与树脂的界面结合力，最终造成材料整体力学性能逐步衰减。

在所有同等阻燃剂添加比例下，阻燃增强PA66/6I复合材料的拉伸强度、弯曲强度均显著高于

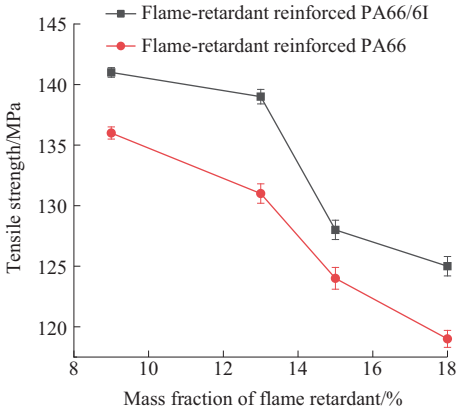


图2 阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的拉伸强度

Fig. 2 Tensile strength of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

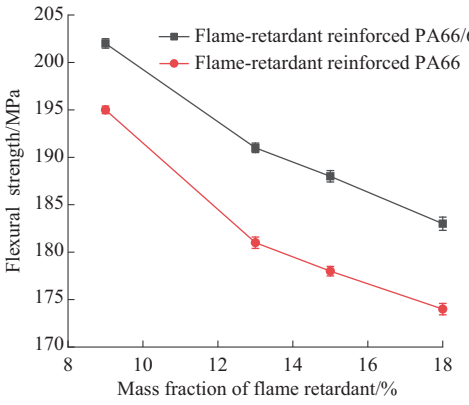


图3 阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的弯曲强度

Fig. 3 Flexural strength of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

阻燃增强PA66复合材料。这是因为PA66/6I引入的间苯二甲酸结构，打破了PA66分子链的规整性，使熔体流动性提高，有利于填料分散。同时，结构中刚性苯环可提升分子链刚性与热稳定性，让材料在高阻燃剂添加量下，依旧保持优异的力学性能。

图4为不同阻燃剂添加量下阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的缺口冲击强度。由图4可见，随阻燃剂含量的增加，阻燃增强PA66/6I与阻燃增强PA66的缺口冲击强度均持续下降。阻燃剂颗粒增多易引发团聚，产生微观缺陷、造成应力集中，降低材料抗冲击能力。其中阻燃剂质量分数为9%时，PA66/6I的冲击强度达7.7 kJ/m²，远高于PA66的6.8 kJ/m²。这是由于PA66/6I结晶度降低，材料无定形相比例增大，在外力冲击时，无定形区链段可以发生滑移、取向，吸收冲击能量，提升缺口冲击韧性。

阻燃剂添加量对阻燃增强PA66/6I与PA66复合材料MFR的影响如图5所示。由图5可见，阻燃

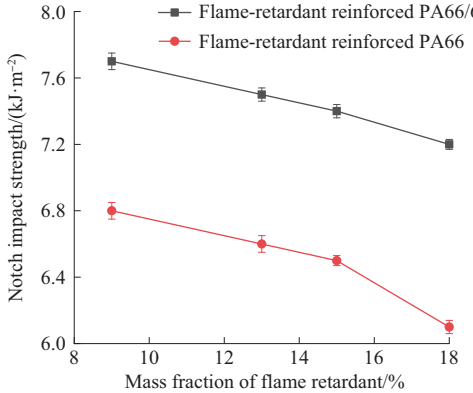


图4 阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的缺口冲击强度

Fig. 4 Notch impact strength of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

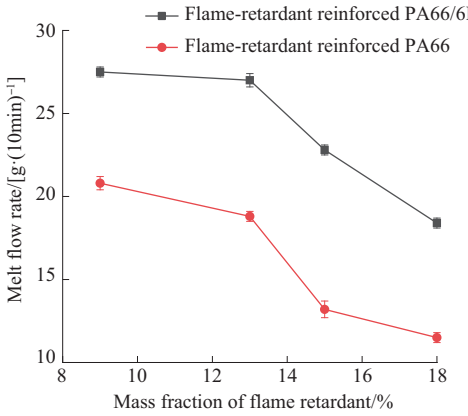


图 5 阻燃增强 PA66/6I 和阻燃增强 PA66 的 MFR

Fig. 5 MFR of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

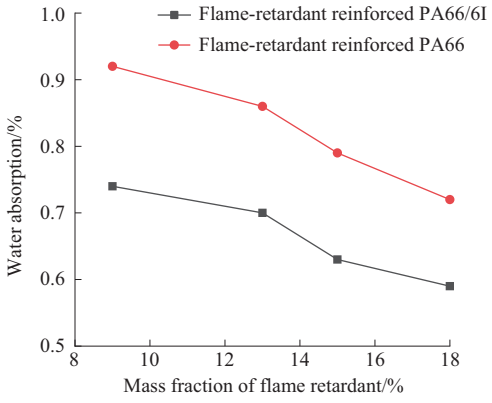


图 6 阻燃增强 PA66/6I 和阻燃增强 PA66 的吸水率

Fig. 6 Water absorption of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

剂添加量提升至 18% 时,阻燃增强 PA66/6I 的 MFR 从 27.5 g/10 min 降至 18.4 g/10 min,但始终高于阻燃增强 PA66 的 MFR。这是由于阻燃剂含量的增加会增大基体熔体的内部摩擦阻力,限制分子链运动,进而降低材料流动性。PA66/6I 分子链因引入间苯二甲酸结构单元,减弱了分子链间氢键与范德华力,使熔体链段更易发生相对滑移;同时,无定形区域比例提高可优化阻燃剂在基体中的分散性,降低颗粒团聚与界面摩擦带来的熔体流动阻力,因此 PA66/6I 具备更优的加工流动性能[18]。

阻燃增强 PA66/6I 和 PA66 的吸水率如图 6 所示。由图 6 可见,随着阻燃剂质量分数的增加,阻燃增强 PA66/6I 与阻燃增强 PA66 的吸水率均呈现逐步降低的趋势。阻燃剂多为疏水性粉体,添加量提升会在尼龙基体中形成连续的疏水相,占据并封堵水分扩散通道。PA66/6I 分子链规整性较弱,减少了可与水分子结合的酰胺基团有序排列区域,使得其在相同阻燃剂添加量下,表现出更低的吸水率,有利于实际应用。

表 5 为阻燃剂质量分数为 15% 时,两种阻燃增强尼龙经 100 ℃、72 h 耐高温水煮处理后的力学性能保持率,可直观反映材料的耐水解与耐高温稳定性能。由测试数据可知,水煮老化处理后,阻燃增强 PA66/6I 的拉伸强度、弯曲强度保持率分别达 57.8%、54.2%,远高于阻燃增强 PA66 的 45.1% 和 40.6%,充分证明 PA66/6I 拥有更优异的耐高温、耐水解稳定性。这是因为间苯二甲酸改性结构有效降低了树脂基体的吸水率,大幅减轻高温水煮下的分子链水解程度,更好地保留材料刚性与力学承载性能。而在韧性方面,阻燃增强 PA66 的缺口、无缺口冲击强度保持率分别为 206.9%、152.5%,明显高于 PA66/6I 的 183.6%、117.6%。核心原因是 PA66 基体吸水率更高,高温吸水后产生显著的增塑效应,分子链柔韧性提升,极大提高了材料抗冲击韧性;而 PA66/6I 吸水与水解程度弱,增塑效果有限,因此冲击性能提升幅度相对更小。

表 5 水煮 72 h 后两种阻燃增强尼龙材料的力学性能保持率

Tab. 5 Retention rate of mechanical properties of two kinds of flame retardant reinforced nylon materials after boiling for 72 h.

Samples	Tensile strength retention/%	Flexural strength retention/%	Notch impact strength retention/%	Non-notch impact strength retention/%
Flame-retardant reinforced PA66/6I	57.8	54.2	183.6	117.6
Flame-retardant reinforced PA66	45.1	40.6	206.9	152.5

表 6 为 1.6 mm 厚度样条测试得到的两种阻燃增强尼龙阻燃等级,清晰展现了阻燃剂添加量对材料阻燃性能的影响规律。随着阻燃剂添加量逐步提升,阻燃增强 PA66/6I 与阻燃增强 PA66 的阻燃等级均稳步提升。随无卤阻燃剂添加量提高,体系中磷系阻燃组分增多,受热时可催化基体脱水、交联成炭,抑制可燃小分子逸出,因此两种材料阻燃等级均随阻燃剂用量增加逐步提升。在阻燃剂质量分数为 9% 时,阻燃增强 PA66/6I 即可达到 V−1 阻燃等级,而同等条件下的阻燃增强 PA66 未达到任何阻燃等级,阻燃性能基本未达标。当阻燃剂添加质量分数提升至 13% 时,阻燃增强 PA66/6I 体系已稳定

表6 阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的阻燃等级

Tab. 6 Flame retardant grade of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

Flame retardant additive mass fraction/%	Flame-retardant reinforced PA66/6I	Flame-retardant reinforced PA66
9	V−1	No fire retardant rating
13	V−0	V−1
15	V−0	V−1
18	V−0	V−0

达到最高V−0阻燃级别,且在阻燃剂质量分数为15%、18%下始终保持V−0等级;阻燃增强PA66仅达到V−1等级,直至阻燃剂质量分数高达18%时才可实现V−0等级。这表明PA66/6I的分子结构可有效协同阻燃体系,提升阻燃效率,能在更低阻燃剂添加量下实现优异阻燃效果,既减少了高填充阻燃剂带来的力学损耗,又可降低原料与加工成本,综合性能更均衡,更适配工业化生产与工程实际应用。PA66/6I分子链引入半芳香间苯二甲酸单元,苯环键解离能更高,提升基体本征热氧化稳定性,抑制基体热分解;同时芳香结构可在受热条件下促进交联,提升炭层致密性与稳定性,与磷系阻燃剂形成凝聚相协同阻燃效应。

表7为阻燃剂质量分数为15%时,阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的CTI和GWIT。由表7可见,阻燃增强PA66/6I的CTI为600 V,GWIT为775 ℃,这两项代表电绝缘性能与耐热阻燃能力的核心指标均表现优异,达到行业高标准水平。说明该材料具备出色的电气绝缘性、耐高温性与阻燃性能,能够充分适配各类家电产品严苛的工况使用要求,可广泛应用于家电外壳、设备内部绝缘结构件等关键部件。综合性能优势突出,市场适配性强,拥有良好的实际应用空间与工业化批量推广价值。

按照1.3.1的制备方法进行聚合,其中己二酸与间苯二甲酸的物质的量比更换为5∶1,出料经切粒干燥后得到PA66/6I-2,其与PA66/6I的性能对比见表8。相较于PA66/6I,PA66/6I-2分子链规整性与结晶能力提升,熔点由239 ℃升至250 ℃,加工难度提升。在相同加工工艺条件下,PA66/6I熔体流动性更优,有望提升GF、阻燃剂等无机填料在树脂基体中的分散均匀性。PA66/6I-2中脂肪链段占比的提升有效改善了分子链柔顺性,使树脂基体的拉伸强度与冲击韧性得到提升;但芳环刚性结构单元含量降低,导致树脂基体本征刚性略有下降,最终表现为PA66/6I-2材料弯曲强度出现小幅降低。

表7 阻燃增强PA66/6I和阻燃增强PA66的CTI和GWIT

Tab. 7 CTI and GWIT of flame-retardant reinforced PA66/6I and flame-retardant reinforced PA66

Samples	CTI/V	GWIT/℃
Flame-retardant reinforced PA66/6I	600	775
Flame-retardant reinforced PA66	600	775

将PA66/6I-2树脂在80 ℃真空干燥箱中烘干6 h,然后将其与1098(质量分数0.2%)、168(质量分数0.2%)、阻燃剂(质量分数13%)经过均匀混合,与侧喂的GF(质量分数30%)挤出造粒制得阻燃增强尼龙材料,将其与由PA66/6I树脂制备的阻燃增强尼龙材料进行对比,其结果见表9。相较于阻燃增强PA66/6I,将己二酸与间苯二甲酸物质的量比调整为5∶1(间苯二甲酸占比降低)后,阻燃增强PA66/6I-2体系的拉伸强度、弯曲强度、MFR均下降,缺口冲击强度小幅上升,阻燃等级由V−0降至V−1。拉伸强度与弯曲强度的下降是因为芳环刚性结构减少后,树脂基体抵抗外力形变的能力减弱,而弯曲性能对基体刚性更为敏感,因此弯曲强度降幅更为明显;阻燃增强PA66/6I-2体系分子链柔顺性改善,链段运动与能量吸收能力增强,材料冲击性能小幅提升,但受GF引入的界面缺陷制约,冲击强度增幅有限。阻燃增强PA66/

表8 PA66/6I和PA66/6I-2的性能对比

Tab. 8 Performance comparison of PA66/6I and PA66/6I-2

Samples	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Notch impact strength/(kJ·m^{-2})	MFR/[g·(10 min)$^{-1}$]	Melting point/℃
PA66/6I	53.73	100.07	2.95	56	239
PA66/6I-2	59.17	94.29	4.06	51	250

表9 阻燃增强PA66/6I和PA66/6I-2复合材料的性能对比

Tab. 9 Performance comparison of flame retardant reinforced PA66/6I and PA66/6I-2 composites

Samples	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Notch impact strength/(kJ·m^{-2})	MFR/[g·(10 min)$^{-1}$]	Flame retardant grade
Flame retardant reinforced PA66/6I	139.4	191.2	7.5	27	V−0
Flame retardant reinforced PA66/6I-2	129.6	168.3	7.9	23.8	V−1

6I-2体系阻燃性能降级则源于脂肪链占比提升后,基体整体热稳定性下降,受热更易分解产生可燃挥发物,同时树脂与阻燃体系的协同阻燃效果被削弱,阻燃抑燃能力下降,阻燃等级从V−0下降至V−1。

3 结论

(1)GF质量分数为10%~50%增强尼龙体系中,PA66/6I的力学性能与加工流动性均优于纯PA66,共聚改性可优化GF-树脂的界面结合与分散性。

(2)阻燃剂质量分数为9%~18%时,阻燃增强PA66/6I的力学性能、流动性更优且吸水率更低,当阻燃剂质量分数为13%时即可达V−0阻燃等级,可显著降低阻燃剂用量。

(3)PA66/6I的耐水解性、强度保持率比纯PA66更优异,CTI与GWIT满足电子电气及家电领域高绝缘、高耐热要求。

(4)将己二酸与间苯二甲酸的物质的量比更换为5∶1制得PA66/6I-2,其熔点、拉伸强度及冲击强度提升,但弯曲强度、流动性下降;其玻纤阻燃增强体系阻燃等级降至V−1,多项力学与流动性能降低。

(5)半芳香共聚改性可实现PA66/6I综合性能协同提升,为高性能低添加阻燃尼龙的开发与应用提供技术支撑。

参考文献

[1] 夏学莲,陈华义,冯巧,等.尼龙在分离膜材料中的应用进展[J].工程塑料应用,2026,54(2):199–205.
XIA Xuelian,CHEN Huayi,FENG Qiao,et al. Review on application of nylon in separation membrane materials[J]. Engineering Plastics Application,2026,54(2):199–205.

[2] 刘富豪,苏世发,秦佳倩,等.尼龙66多功能改性与应用研究进展[J].石油化工高等学校学报,2026,39(1):12–19.
LIU Fuhao, SU Shifa, QIN Jiaqian, et al. Research progress on multifunctional modification and application of nylon 66[J]. Journal of Petrochemical Universities,2026,39(1):12–19.

[3] 李佳馨,钱晓明,朵永超,等. PA66的改性及应用进展[J].塑料,2024,53(3):124–130.
LI Jiaxin, QIAN Xiaoming, DUO Yongchao, et al. Modification and application progress of PA66[J]. Plastics,2024,53(3):124–130.

[4] 李向前,吴长波,杨志坚,等.APEA/POE-MAH协同增韧红磷阻燃尼龙复合材料的制备与性能研究[J].上海塑料,2025,53(5):13–18.
LI Xiangqian, WU Changbo, YANG Zhijian, et al. Preparation and performance analysis of APEA/POE-MAH toughened red phosphorus flame-retardant nylon composites[J]. Shanghai Plastics, 2025, 53(5):13–18.

[5] 李邵娜.基于P/N阻燃体系的尼龙66高效阻燃与力学稳定性协同优化研究[D].北京:北京化工大学,2025.
LI Shaona. Synergistic optimization of high efficiency flame retardancy and mechanical stability of nylon 66 based on P/N flame retardant system[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2025.

[6] CUI M J,LI J,GAO Q,et al. A novel strategy to fabricate nylon 6 based flame retardant microfiber nonwoven fabric with durability[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2022,641. DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.128482.

[7] 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.

[8] 程骏,雷彩红,董智贤,等.高温高湿环境下红磷阻燃增强PA66表面析出改进[J].塑料工业,2025,53(7):26–33,39.
CHENG Jun,LEI Caihong,DONG Zhixian,et al. Surface precipitation improvements of red phosphorus flame retardant reinforced PA66 under high-temperature and high-humidity conditions[J]. China Plastics Industry,2025,53(7):26–33,39.

[9] GAO J C,WU Y D,LI J,et al. A review of the recent developments in flame-retardant nylon composites[J]. Composites Part C: Open Access,2022,9. DOI:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.021.

[10] LIU R Q, TAO B, GAO S L, et al. A nitrogen-oxygen triazine flame retardant for simultaneously improving flame retardancy and mechanical performance of nylon 6[J]. Polymer Degradation and Stability, 2026, 246. DOI: 10.1016/j. polymdegradstab.2026.111924.

[11] 邓海霞,关礼争,孙可凡,等.阻燃剂含量对PA66可纺性及其纤维结构与性能的影响[J].合成纤维工业,2026,49(2):1–6.
DENG Haixia,GUAN Lizheng,SUN Kefan,et al. Effect of flame-retardant content on spinnability and fiber structure and properties of PA66[J]. China Synthetic Fiber Industry,2026,49(2):1–6.

[12] 王长波,张丽艳,申红果.溴系阻燃剂的生产技术升级及市场应用前景[J].中国化工贸易,2026,18(13):4–6.
WANG Changbo, ZHANG Liyan, SHEN Hongguo. Production technology upgrading and market application prospects of brominated flame retardants[J]. China Chemical Trade, 2026, 18(13): 4–6.

[13] LU X S,QIAO X Y,YANG T,et al. Preparation and properties of environmental friendly nonhalogen flame retardant melamine cyanurate/nylon 66 composites[J]. Journal of Applied Polymer Science,2011,122(3):1 688–1 697.

[14] LIN X B,CHEN L,LONG J W,et al. A hybrid flame retardant for semi-aromatic polyamide: Unique structure towards self-compatibilization and flame retardation[J]. Chemical Engineering Journal,2018,334:1 046–1 054.

[15] YE S Y,YANG S,LIU G. Carbon fiber and glass fiber reinforced semi-aromatic polyamide composites with enhanced mechanical, electrical, and flame-retardancy properties[J]. Journal of Applied

Polymer Science，2025，142(37). DOI:10.1002/app.57466.

[16] 贺春尧.半芳香族尼龙材料研究进展[J].工程塑料应用，2024，52(5):181–187.
HE Chunyao. Research progress in semi-aromatic nylon materials[J]. Engineering Plastics Application，2024，52(5):181–187.

[17] 毕江涛，贺娜娜.玻纤含量对尼龙复合材料性能的影响探究与质量控制[J].山东化工，2025，54(12):102–103，107.
BI Jiangtao，HE Nana. Investigation on the influence of glass fiber content on the properties of nylon composites and quality control[J]. Shandong Chemical Industry，2025，54(12):102–103，107.

[18] 徐星驰，张伟，蒋炎锋，等.树脂黏度对无卤阻燃玻纤增强PA66性能的影响[J].工程塑料应用，2025，53(1):50–56.
XU Xingchi，ZHANG Wei，JIANG Yanfeng，et al. Effect of resin viscosity on the properties of halogen-free flame-retardant glass fiber reinforced PA66[J]. Engineering Plastics Application，2025，53(1):50–56.

观众人数超35万再破纪录
CHINAPLAS 2026 国际橡塑展圆满收官

为期四天的“CHINAPLAS 2026 国际橡塑展”于4月24日在上海·国家会展中心（虹桥）盛大收官。这场全球橡塑行业的顶级年度盛会，以40万平方米的展示规模、5,104家海内外优质展商、350,189名专业观众的亮眼成绩，再度刷新历史纪录，充分展现橡塑供应链强劲的发展韧性与蓬勃的创新活力，为行业高质量发展注入澎湃动能。

集聚全球创新力量，绽放世界级舞台

本届展会吸引了来自45个国家及地区的5,104家展商，与2025年深圳展相比，增长10.57%；迎来全球188个国家及地区的350,189名观众，与2025年深圳展相比，增长24.53%；其中，中国港澳台地区及海外观众占比达24.68%，总数86,440人，与2025年深圳展相比，增长26.11%。

走进各大展厅，浓厚的贸易氛围与创新气息扑面而来。3,800余台机械展品动态演示，1,900多家原材料供应商集中亮相，超350家展商带来全球/亚洲首发技术，生动勾勒行业全景图。展会既汇聚世界500强、中国500强企业领航，更有1,000多家“专精特新”企业参展，其中近200家为国家级“小巨人”企业，持续释放创新活力。

展会主办方雅式展览服务有限公司总经理梁雅琪表示：“当我穿梭在16个展厅之间，第一次真切地感受到‘CHINAPLAS国际橡塑展’已经达到了世界级水准。我看到了与会者高涨的参与热情、丰富多元的展品、展商与观众之间热烈的交流、中国科技供应商在世界舞台上日益上升的地位，以及全球对中国作为塑料与橡胶行业未来重要驱动引擎之一的日益认可。”

创新技术密集落地，引领行业高质量发展

本届展会紧扣“变革·协作·共塑可持续”主题，聚焦“循环经济”“数字化”“创新材料”以及“高端科技 中国制造”四大核心方向，集中展示了橡塑产业向高端化、智能化、绿色化跃升的创新成果。

展会现场，高端注塑成型设备、高度灵活的吹膜生产线、智能高效的挤出机械、吹塑成型及热成型机械等硬核装备悉数亮相并开机演示，可广泛适配汽车、电子电气、包装、医疗等多领域应用场景。为响应橡塑行业对AI转型的迫切需求，给注塑机装上会思考的“智慧大脑”、智能注塑与人形机器人协同作业、再生分选智能设备等创新解决方案层出不穷，成为重构生产效率、质量与成本的关键变量，将“智能制造”推向新高度。从高功能薄膜、阻燃聚丙烯改性材料、聚烯烃弹性体（POE）、无PFAS材料、高性能生物基材料，到可媲美原生料的高品质再生材料，都在不断拓宽创新边界。锚定低空经济、人形机器人、AI数据中心、新能源等极具增长潜力的新兴赛道，展商纷纷推出长碳链尼龙材料、高性能碳纤维增强复合材料、聚氨酯灌封泡沫、PEEK等新型橡塑材料及先进加工工艺。

同期活动赋能，思想盛宴点燃行业火花

展会同期重磅打造多场高规格配套活动，场场爆满、人气高涨。“塑料的力量论坛”“添加剂研讨会：成就可持续及优质塑料”“科技讲台”“医用塑料汇”“科创·产学研行”“应用研讨荟”“趋势洞察日”等一系列活动，聚焦橡塑产业前沿趋势、市场热点与智能绿色转型路径等核心议题，汇聚全球行业大咖、业内精英同台论道，共探产业新机遇、共谋行业新未来。

展会价值跃升，深化产业链协同

在全球经贸格局深度调整、产业链供应链深度重构的背景下，“CHINAPLAS 2026 国际橡塑展”不仅为橡塑产业发展注入信心与底气，也清晰展现了新格局下多元化的展会价值。在推进产业链稳链、补链的同时，展会实现了平台效能的全面跃升——从传统商贸对接迈向全方位的产业协同创新。

对展商而言，“CHINAPLAS国际橡塑展”不止是最直接拓展市场的渠道，更是展示品牌形象、传递企业发展理念，进而建立长久互信的优质平台。对观众而言，到展会上不仅是看行业新品、聊前沿技术、高效对接优质供应链资源，更能跳出日常工作节奏，亲身感受行业发展脉搏及变革趋势。

商机无限，展商观众反馈超预期

为期四天的展会全程热度不减，16大展厅人气持续爆棚，展商热情迎八方客商。签订单、谈合作、找方向、拓人脉、谋共赢，收获丰硕成果。

“CHINAPLAS国际橡塑展”单年深圳、双年上海轮流举办，下届展会将于2027年4月13-16日在深圳国际会展中心（宝安）盛大举办，期待与全球各界同仁共赴新程，不断拓宽橡塑应用边界，共塑橡塑产业新未来！

想了解更多详情，请浏览展会官网 ChinaplasOnline.com / 国际橡塑展.com或电邮至Chinaplas.pr@adsale.com.hk。

（雅式展览服务有限公司）