

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.004

超支化聚酯对含磷共聚 PA6 流动行为的影响及促熔滴阻燃机制

李如意,周燕飞,韦相宇,刘可
(浙江理工大学材料科学与工程学院,杭州 310018)

摘要:以超支化聚酯 C100 为流动促进剂提升聚酰胺 6 (PA6)、含磷共聚 PA6 (CoPA6) 的流动性能与阻燃性能,采用双螺杆挤出机共混挤出制备了 C100 添加量为 1~4 phr 的 PA6/C100 与 CoPA6/C100 复合材料。为探究 C100 对 PA6、CoPA6 性能的影响,对复合材料的熔融结晶行为、流变特性、阻燃性能及力学性能进行了系统表征。结果表明,适量 C100 的引入有异相成核作用,促进 PA6 及 CoPA6 在更高的温度下结晶;C100 有助于提升熔体的流变性能,当添加量为 4 phr 时,PA6 和 CoPA6 在低频段(0.1 Hz)的黏度降幅分别为 81% 和 73%,在高频段(100 Hz)仍保持 76% 和 79% 的显著降幅;PA6 与 CoPA6 的拉伸强度随 C100 的引入呈现先升高后降低的趋势,当 C100 添加量为 3 phr 时,CoPA6/3phrC100 的拉伸强度由 CoPA6 的 68.3 MPa 降至 66.9 MPa,但断裂伸长率由 115.5% 提高至 171.8%;C100 可显著提升材料的阻燃性能,CoPA6/3phrC100 和 CoPA6/4phrC100 的极限氧指数由 CoPA6 的 26.4% 分别提升至 29.6% 和 30.4%、垂直燃烧测试均达到 UL 94 V-0 级,这是因为 C100 能有效提升熔体的流动性能,在燃烧时可促进带熔滴体滴落及时带走燃烧区域热量,抑制火焰蔓延,从而提升材料的阻燃性能,为开发阻燃聚酰胺材料提供了新思路。

关键词:聚酰胺 6;超支化聚酯;流变特性;阻燃性能;力学性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0031-07

Influence of hyperbranched polyester on the flow behavior of phosphorus-containing copolymer PA6 and its flame retardant mechanism promoting melt droplet formation

LI Ruyi, ZHOU Yanfei, WEI Xiangyu, LIU Ke

(School of Materials Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Hyperbranched polyester C100 was employed as a flow promoter to enhance the fluidity and flame retardancy of polyamide 6 (PA6) and phosphorus-containing copolyamide 6 (CoPA6). PA6/C100 and CoPA6/C100 composites with C100 contents ranging from 1 phr to 4 phr were prepared using a twin-screw extruder. To investigate the effects of C100 on the properties of PA6 and CoPA6, systematic characterizations of the melting and crystallization behavior, rheological properties, flame retardancy, and mechanical properties of the composites were carried out. The results indicate that the introduction of an appropriate amount of C100 exerts a heterogeneous nucleation effect, which promotes the crystallization of PA6 and CoPA6 at higher temperatures. C100 contributes to the improvement of melt rheological properties: when the addition amount is 4 phr, the viscosity reductions of PA6 and CoPA6 at low frequency (0.1 Hz) reach 81% and 73%, respectively, while significant reductions of 76% and 79% are still maintained at high frequency (100 Hz). The mechanical properties of PA6 and CoPA6 show a trend of first increasing and then decreasing with the introduction of C100. When the C100 content is 3 phr, in the CoPA6 system, the tensile strength decreases from 68.3 MPa of CoPA6 to 66.9 MPa, while the elongation at break increases significantly from 115.5% to 171.8%. C100 can remarkably enhance the flame retardancy of the materials; the limiting oxygen index values of CoPA6/3phrC100 and CoPA6/4phrC100 are increased from 26.4% of CoPA6 to 29.6% and 30.4%, respectively, and both achieving the UL 94 V-0 rating in the vertical burning test. This

基金项目: 国家自然科学基金项目(52303016)

通信作者: 刘可,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向为成纤聚合物的合成与改性

收稿日期: 2025-12-08

引用格式: 李如意,周燕飞,韦相宇,等.超支化聚酯对含磷共聚 PA6 流动行为的影响及促熔滴阻燃机制[J].工程塑料应用,2026,54(3):31-37.

LI Ruyi, ZHOU Yanfei, WEI Xiangyu, et al. Influence of hyperbranched polyester on the flow behavior of phosphorus-containing copolymer PA6 and its flame retardant mechanism promoting melt droplet formation[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 31-37.

is attributed to the fact that C100 can effectively improve the melt fluidity, which promotes the dripping of flaming melt during combustion to timely remove heat from the burning area and inhibit flame spread, thereby enhancing the flame retardancy of the materials. This work provides a new insight for the development of flame-retardant polyamide materials.

Keywords: polyamide 6; hyperbranched polyester; rheology property; flame retardant property; mechanical property

聚酰胺6 (PA6)作为半结晶性工程塑料,具有强度高、耐磨损、耐溶剂性等优点,广泛应用于汽车、电子、机械、航空航天等领域,但其存在着易燃的缺陷,严重制约了其在阻燃性能严苛场景的应用^[1-4]。

通过添加阻燃剂可有效改善PA6的易燃问题,常用阻燃剂有卤系^[5]、磷系^[6-7]、无机^[8]及氮系^[9]等类型。卤系阻燃剂主要通过释放卤素自由基与火焰中活性自由基(如·H、·OH)结合以实现中断燃烧链式反应的作用,较低添加量即可实现高效阻燃的效果^[10],但在加工过程、高温及燃烧状态下易产生有害化合物,近年来逐渐被限制使用。无机阻燃剂(如氢氧化镁、氢氧化铝等)的阻燃机制为受热分解时吸收大量热量,释放水蒸气稀释空气中的可燃成分,残留物形成屏障阻止热量与物质传递^[11-13],但这类阻燃剂需要大量添加才能发挥较好的效果,这往往会导致材料力学性能恶化^[4]。氮系阻燃剂主要通过热分解的吸热过程降低材料表面温度,同时生成不燃气体以稀释可燃气体浓度提升材料的阻燃性^[14]。Sha等^[15]通过原位聚合制备PA6/三聚氰胺脲尿酸盐(MCA)复合材料,当MCA质量分数为8%时,复合材料的阻燃等级达到UL 94 V-0级,极限氧指数(LOI)为31.8%。

在各类阻燃剂中,磷系阻燃剂因其优异阻燃效率成为目前研究热点,其作用机理包括凝聚相脱水成炭形成保护层和气相捕获自由基等,可多途径抑制材料燃烧^[13]。Liu等^[16]以己内酰胺和9,10-二氢-10-[2,3-二(羟基羰基)丙基]-10-磷杂菲-10-氧化物(DDP)为原料,熔融缩聚制备了含磷共聚阻燃PA6 (FRPA6),含质量分数5%DDP的FRPA6垂直燃烧达到UL 94 V-0级,LOI值由PA6的23.5%提升至33.7%,但拉伸强度由75.9 MPa降低至54.3 MPa,断裂伸长率由82.3%降低至33.2%。虽然PA6的阻燃性能提升,但大量阻燃剂的添加导致其力学性能和加工性能下降^[17-18],如何平衡阻燃性能和力学性能是阻燃PA6领域亟待解决的难题。

超支化聚酯是一种分子链呈三维树枝状生长、分子表面有大量的端基官能团、具有高度支化结构的聚合物,一般可用于改善玻纤增强聚酰胺材料的加工流动性^[19]。Liang等^[20]将超支化聚酯C100引入玻纤增

强PA6复合材料以提升其加工流动性能,当C100质量分数为0.18%时,熔体流动速率从6.68 g/10 min增至14.84 g/10 min,C100对PA6的流动性能具有显著提升作用。笔者前期研究发现^[16],DDP共聚PA6阻燃性能的提升可以归因于两方面:在气相中,含磷自由基捕捉燃烧自由基,中断燃烧链反应;在凝聚相中,促进熔体滴落及时带走热量。低磷含量的DDP共聚PA6(磷质量分数0.2%~0.3%)具有较好力学性能与改善的阻燃性能。因此,通过将超支化聚酯引入低磷含量的DDP共聚PA6提高其流动性能,有望在凝聚相促进带焰熔体滴落及时带走热量,从而协同改善PA6的阻燃性能。为探究超支化聚酯对PA6和CoPA6结构性能的影响规律,本文通过将不同比例的超支化聚酯分别引入纯PA6和含磷共聚PA6(CoPA6)基体中进行共混,制备了超支化聚酯改性PA6和超支化聚酯改性CoPA6,对所得材料的熔融结晶行为、流变性能、力学性能和阻燃性能进行对比研究。研究结果可为高性能阻燃PA6的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6:HY-2500A,海阳科技股份有限公司;

超支化聚酯:C100,武汉超支化树脂科技有限公司;

CoPA6:实验室自制(磷质量分数0.25%)^[16],分子式如图1所示。

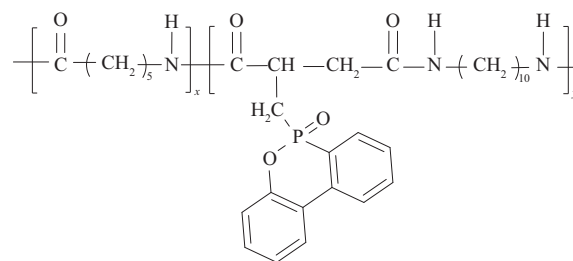


图1 CoPA6分子结构

Fig. 1 Molecular formula of CoPA6

1.2 主要仪器及设备

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3,瑞士Mettler Toledo公司;

真空干燥箱:DZF-6053,上海一恒科学仪器有限公司;

电子天平:RS232C,瑞士Mettler Toledo公司;

双螺杆挤出机:WLG10 AG,上海新硕精密机械有限公司;

注塑机:WZS10D,上海新硕精密机械有限公司;

LOI测定仪:F101,南京炯雷仪器设备有限公司;

垂直燃烧仪:HD815A-II,南通宏大机电制造有限公司;

万能试验机:DR-503AS,中国东日仪器有限公司;

旋转流变仪:MCR 702e,奥地利Anton Paar公司。

1.3 阻燃PA6树脂的制备

将PA6、CoPA6、C100放入鼓风干燥箱在100 °C下烘干2 h,再移入真空干燥箱在100 °C真空干燥12 h,以去除样品中的水分。随后,按照表1配方将干燥后的原料通过双螺杆挤出机进行熔融共混。挤出工艺条件为:上、下腔板及出料口温度分别为228、230 °C和230 °C,螺杆转速为30 r/min。最后,通过注塑机在料筒温度为232 °C、注射压力为0.5 MPa、冷却时间5 s的条件下制备成标准样条,以备后续性能测试。

表1 阻燃PA6实验配比

Tab. 1 Flame-retardant PA6 experimental formulation

Samples	Resin		C100 phr
	PA6	CoPA6	
PA6/1phrC100	100		1
PA6/2phrC100	100		2
PA6/3phrC100	100		3
PA6/4phrC100	100		4
CoPA6/1phrC100		100	1
CoPA6/2phrC100		100	2
CoPA6/3phrC100		100	3
CoPA6/4phrC100		100	4

1.4 测试与表征

DSC测试:在氮气气氛下测试,温度为30~250 °C,升温速率为10 °C/min,恒温5 min,在250~30 °C获取结晶曲线,降温速率为10 °C/min,恒温5 min,在30~250 °C获取熔融曲线,升温速率为10 °C/min。

流变性能测试:注塑尺寸为 $\Phi 25$ mm \times 1 mm的标准样条,在氮气气氛下按GB/T 33061.10-2016测试,测试温度为260 °C,扫描频率范围为0.1~100 Hz。

力学性能测试:按标准GB/T 1040.2-2022注

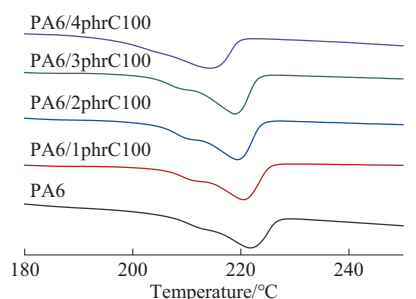
塑4 mm厚的1A型哑铃形标准样条,测试速度为50 mm/min。

阻燃性能测试:注塑尺寸为115 mm \times 10 mm \times 4 mm的长方形标准样条,按标准GB/T 2406.2-2009测试LOI;注塑尺寸为125 mm \times 13 mm \times 3.2 mm的长方形标准样条,按UL 94-2023进行垂直燃烧测试,并参照UL 94垂直燃烧等级判定标准对材料阻燃性能进行评价。

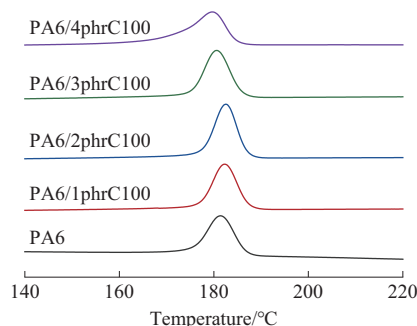
2 结果与讨论

2.1 熔融结晶性能

为了探索C100的加入对PA6和CoPA6的升温熔融和降温结晶的影响,对PA6/C100与CoPA6/C100复合材料进行DSC测试分析。图2为添加不同比例C100的PA6复合材料的升温熔融曲线和降温结晶曲线,表2汇总了该系列复合材料的DSC数据,包括结晶温度(T_c)、熔融温度(T_m)、熔融焓(ΔH_m)及结晶度(X_c)。纯PA6的 T_m 为221.8 °C,当C100添加量为1~3 phr时其熔融温度变化不大,当C100为4 phr时,PA6的 T_m 降至214.5 °C,这可能是由于C100大量添加破坏了PA6分子链的规整性,导致其熔融温度降低。C100的引入对PA6的结晶性能影响相对较小,PA6的结晶温度和结晶度未发生明显变化,当C100的添加量为2 phr时,PA6的结晶温度和结晶度略微增加,这说明适量C100的引入有异相



(a) Heating melting curves of PA6/C100



(b) Cooling crystallization curves of PA6/C100

图2 PA6/C100样品的DSC曲线

Fig. 2 DSC curves of PA6/C100 samples

表2 PA6/C100 DSC的测试数据

Tab. 2 DSC test data of PA6/C100

Samples	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
PA6	221.8	181.5	65.9	28.6
PA6/1phrC100	220.5	182.3	67.2	29.2
PA6/2phrC100	219.5	182.5	73.6	32.0
PA6/3phrC100	219.0	180.3	69.9	30.4
PA6/4phrC100	214.5	179.5	68.9	30.0

Notes: T_m is melting temperature, T_c is crystallization temperature, ΔH_m is melting enthalpy, X_c is crystallinity.

成核作用,促进PA6在更高的温度下结晶。

图3为添加不同比例C100的CoPA6复合材料的升温熔融曲线和降温结晶曲线,表3汇总了该系列复合材料的DSC数据。由表3可知,纯CoPA6的 T_m 和 T_c 分别为220.3 $^\circ\text{C}$ 和175.7 $^\circ\text{C}$ 。与PA6相比,C100的加入对CoPA6熔融温度的影响相对较小,这可能是因为CoPA6分子中磷杂菲结构占据一定空间位阻,而C100的引入未明显破坏分子链规整性,因而对熔融温度影响不大;C100的引入对CoPA6结

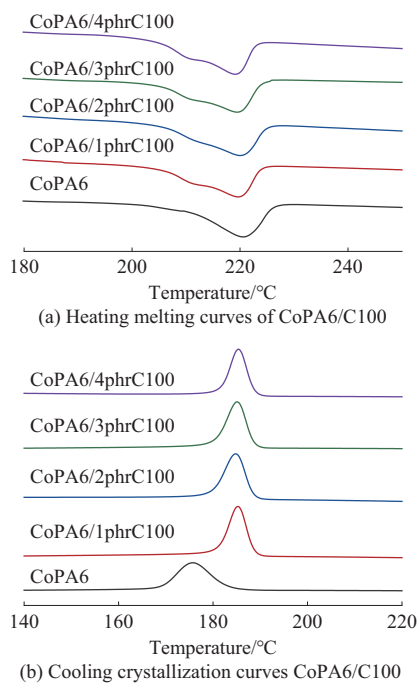


图3 CoPA6/C100样品的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of CoPA6/C100 samples

表3 CoPA6/C100 DSC的测试数据

Tab. 3 DSC test data of CoPA6/C100

Samples	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
CoPA6	220.3	175.7	53.7	23.4
CoPA6/1phrC100	219.5	185.3	62.2	27.0
CoPA6/2phrC100	220.0	184.8	63.7	27.7
CoPA6/3phrC100	219.3	185.0	58.9	25.6
CoPA6/4phrC100	219.2	185.3	54.9	23.9

晶性能的影响呈现和PA6相似的规律,C100具有促进CoPA6结晶的作用,能够在更高温度结晶并形成更高的结晶度。

2.2 流变性能

为进一步探索C100的加入对PA6和CoPA6流变性的影响,对添加不同比例C100的两种复合材料进行流变测试。图4为PA6/C100与CoPA6/C100的复数黏度随角频率的变化曲线。随着C100添加量的增加,体系黏度发生了显著下降,所有样品均表现出剪切变稀特性。当添加量为4 phr时,PA6和CoPA6在低频段(0.1 Hz)时黏度降幅分别为81%和73%,而在高频段(100 Hz)时仍保持76%和79%的显著降幅,表明C100可有效改善PA6与CoPA6的流变性能。这一现象可从两方面解释:首先,C100具有丰富的支链和末端基团,形成近似球形的分子构型,这类支化分子能像“微型滚珠”一样嵌入PA6与CoPA6的线性分子链之间,通过物理隔离效应减小分子链间的摩擦阻力。其次,PA6与CoPA6熔体的高黏度主要源于分子链间复杂的物理缠结网络,C100独特的球形构型能有效渗透进入这些线性链的缠结空隙,这增加了分子链段运动所需的自由体

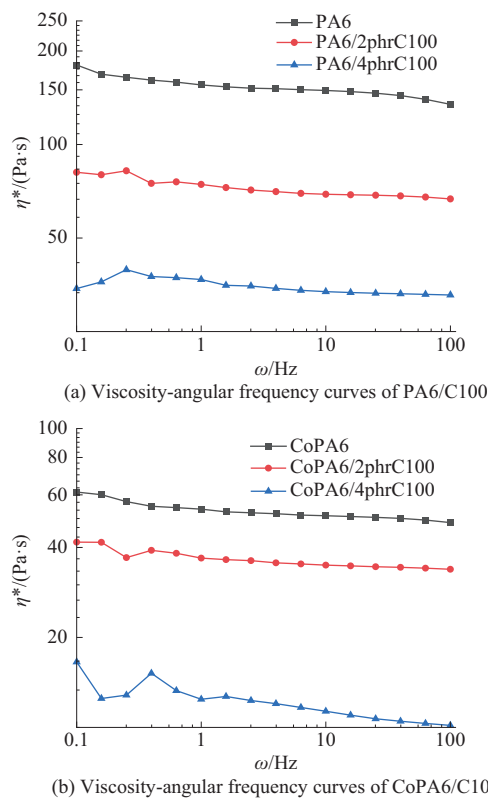


图4 PA6/C100与CoPA6/C100样品的复数黏度(η^*)-角频率(ω)曲线
Fig. 4 Complex viscosity(η^*)-angular frequency(ω) curves of PA6/C100 and CoPA6/C100 samples

积,进而发挥显著的内润滑作用。

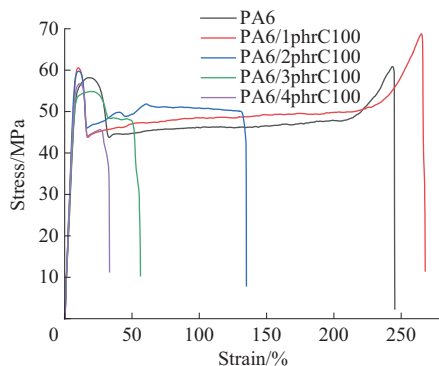
2.3 力学性能

为探究超支化聚酯对复合材料力学性能的影响,对各样条进行了拉伸性能测试。表4汇总了添加不同比例C100的PA6及CoPA6拉伸测试结果,典型的应力应变曲线图如图5所示。PA6与CoPA6的拉伸强度分别为58.2 MPa和68.3 MPa,C100的引入造成其力学强度出现先增加后降低的趋势,PA6/1phrC100的拉伸强度最高,达68.7 MPa,断裂伸长率由244.0%提升至265.2%,CoPA6/2phrC100的拉伸强度最高,达69.1 MPa,断裂伸长率由115.5%提

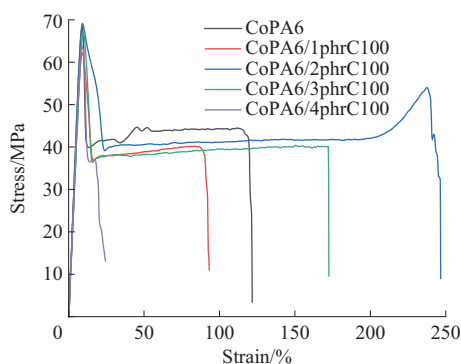
表4 PA6/C100和CoPA6/C100的拉伸测试数据

Tab. 4 The tensile test data of PA6/C100 and CoPA6/C100

Samples	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%
PA6	58.2±4.1	244.0±12.7
PA6/1phrC100	68.7±5.1	265.2±13.8
PA6/2phrC100	59.7±3.6	130.4±6.5
PA6/3phrC100	54.9±3.3	49.3±2.6
PA6/4phrC100	56.7±4.0	27.9±1.3
CoPA6	68.3±4.1	115.5±5.6
CoPA6/1phrC100	62.2±3.5	87.4±4.4
CoPA6/2phrC100	69.1±4.9	237.9±12.3
CoPA6/3phrC100	66.9±5.5	171.8±8.3
CoPA6/4phrC100	63.7±3.8	17.6±0.9



(a) Stress-strain curves of PA6/C100



(b) Stress-strain curves of CoPA6/C100

图5 PA6/C100与CoPA6/C100的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of PA6/C100 and CoPA6/C100

升至237.9%。这是由于适量添加C100可作为异相成核剂,促进晶体生长,使分子链在结晶区域内排列更加规整有序,从而增强分子间作用力,提升材料的拉伸强度。同时C100的引入使得材料的断裂伸长率有所提升,这是因为C100支化结构可嵌入PA6与CoPA6的线性分子链之间,有效缓解链间缠结,改善分子链的滑移能力,从而提升材料的断裂伸长率。当C100添加量过量时,易在基体中形成缺陷或应力集中点,破坏结晶的完整性与连续性,导致结晶程度下降,降低材料对拉伸变形的抵抗能力,导致断裂伸长率明显下降。

2.4 阻燃性能

为了进一步探究超支化流动剂的加入后PA6与CoPA6的阻燃性能变化,分别对添加了不同比例C100的PA6/C100和CoPA6/C100进行垂直燃烧与LOI测试,结果见表5。随着C100添加比例的增加,PA6/C100的LOI值呈上升趋势,LOI由23.2%提升至25.2%。在垂直燃烧测试中,所有样条点燃后均出现有焰熔滴滴落现象,这表明C100的加入可通过促进PA6熔滴的滴落带走热量,促进样品自熄,但滴落物可引燃下方脱脂棉,PA6/C100的垂直燃烧测试均为UL 94 V-2级。对于CoPA6/C100体系,随着C100添加比例的提高,CoPA6的LOI值显著升高,LOI由26.4%提升至30.4%。在垂直燃烧测试中,当C100添加量为2 phr时,滴落物未引燃脱脂棉,阻燃等级达到UL 94 V-0级。分析其机理可知:CoPA6中含有的少量磷元素可通过气相及凝聚相作用发挥基础阻燃效果,而C100的引入降低了CoPA6的熔体黏度,促使其在燃烧时更快产生熔滴以及时带走热量,有助于减少热量累积,从而在燃烧初期抑制火焰扩散。上述结果证实,C100的促熔滴作用与CoPA6中的自由基捕捉作用具有协同阻燃作用,可显著提升材料的阻燃性能。

3 结论

(1) C100的添加对PA6与CoPA6结晶性能有一定程度的影响,适量(2 phr)C100可促进晶体成核,提高材料的结晶度,过量添加(4 phr)则会对结晶性能产生不良影响。

(2) C100的加入有效改善了PA6与CoPA6的流变加工性能,当添加量为4 phr时,二者在低频段(0.1 Hz)与高频段(100 Hz)均呈现大幅降黏,证实C100可有效提升两类材料的流变加工适配性。

表5 PA6/C100与CoPA6/C100的垂直燃烧和LOI测试结果
Tab. 5 Vertical burning and LOI test results of PA6/C100 and CoPA6/C100

Samples	Vertical burning test		LOI/%
	Whether it ignites the absorbent cotton	UL 94 rating	
PA6	Yes	V-2	23.2±0.1
PA6/1phrC100	Yes	V-2	23.7±0.1
PA6/2phrC100	Yes	V-2	24.5±0.1
PA6/3phrC100	Yes	V-2	24.8±0.1
PA6/4phrC100	Yes	V-2	25.2±0.1
CoPA6	Yes	V-2	26.4±0.1
CoPA6/1phrC100	Yes	V-2	26.9±0.1
CoPA6/2phrC100	No	V-0	27.6±0.1
CoPA6/3phrC100	No	V-0	29.6±0.1
CoPA6/4phrC100	No	V-0	30.4±0.1

(3)适量C100的加入有助于提升材料的力学性能,加入1 phr C100,PA6的拉伸强度由58.2 MPa提升至68.7 MPa,断裂伸长率由244.0%提升至265.2%;加入2 phr C100,CoPA6的拉伸强度由68.3 MPa提升至69.1 MPa,断裂伸长率由115.5%提升至237.9%。

(4)随着C100的加入,样品的阻燃性得到显著提升。CoPA6/4phrC100的LOI由CoPA6的26.4%提升至30.4%,垂直燃烧测试达到UL 94 V-0等级,这是因为C100能有效提升熔体的流动性能,在燃烧时促进带焰熔体滴落及时带走燃烧区域热量,抑制火焰蔓延,从而提升材料的阻燃性能。

参考文献

- [1] 张露荣,胡清,赵彪,等.共聚阻燃聚酰胺研究进展[J].中国塑料,2024,38(11):130-136.
ZHANG Lurong, HU Qing, ZHAO Biao, et al. Research progress in flame-retardant modification of polyamide copolymers[J]. China Plastics, 2024, 38(11):130-136.
- [2] TAWIAH B, ULLAH S, CHENG Z X, et al. Microporous transition metal phosphide flame retardant toughened PA6 composites with excellent thermal conductivity and ferroelectric response[J]. Composites Part B:Engineering, 2025, 300. DOI:10.1016/j.compositesb.2025.112502.
- [3] KOLIBABA T J, NIGAM A, TAI B L, et al. Environmentally benign flame retardant polyamide-6 filament for additive manufacturing[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(9). DOI:10.1002/mame.202100245.
- [4] WU Y C, CHAI Y, YU L Q, et al. Eco-friendly flame-retardant polyamide 6 fabrics with balanced flame retardant and mechanical strength via composite synergies[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 204. DOI:10.1016/j.porgcoat.2025.109165.
- [5] CAI T M, WANG J L, ZHANG C H, et al. Halogen and halogen-free flame retarded biologically-based polyamide with markedly suppressed smoke and toxic gases releases[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 184. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.107737.
- [6] 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. polydegrad-stab.2025.111435.
- [7] 吴英杰.磷硫复合阻燃改性尼龙6纤维的研究[D].上海:东华大学,2024.
WU Yingjie. Study on phosphorus-sulfur composite flame retardant modification of nylon 6 fiber[D]. Shanghai: Donghua University, 2024.
- [8] BELYAMANI I, OTAIGBE J U, FIELDING W R. Development of new sustainable inorganic flame retardant additive system for polyamide 6, 6 with improved performance[J]. Polymer Engineering & Science, 2015, 55(8):1 741-1 748.
- [9] 李双庆,汤溢融,杨永波.阻燃尼龙研究进展[J].工程塑料应用,2020,48(2):132-138.
LI Shuangqing, TANG Yirong, YANG Yongbo. Research progress on fire retarded nylon[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2):132-138.
- [10] 邢晓华.新型阻燃剂十溴二苯乙烷的合成研究[D].济南:山东大学,2007.
XING Xiaohua. Research on the synthesis of novel flame retardant decabromodiphenylethane[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [11] 成沂南,田留华,吕文晏,等.阻燃型聚酰胺66的研究进展[J].合成树脂及塑料,2017,34(1):81-84,90.
CHENG Yinan, TIAN Liuhua, LV Wenyan, et al. Research progress of flame retardant PA66[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2017, 34(1):81-84, 90.
- [12] 刘昆玲.反应型无卤无甲醛磷系棉用耐久阻燃剂的研究[D].重庆:西南大学,2024.
LIU Kunling. Study on reactive halogen-free and formaldehyde-free durable flame retardant for phosphorus-based cotton[D]. Chongqing: Southwest University, 2024.
- [13] ZHANG J N, LIAN S M, HE Y F, et al. Intrinsically flame-retardant polyamide 66 with high flame retardancy and mechanical properties[J]. RSC Advances, 2021, 11(1):433-441.
- [14] ZHENG T, WANG W G, LIU Y C. A novel phosphorus-nitrogen

- flame retardant for improving the flame retardancy of polyamide 6: Preparation, properties, and flame retardancy mechanism[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(6):2 508–2 516.
- [15] SHA K, HU Y L, WANG Y H, et al. Preparation of flame retardant polyamide 6/melamine cyanurate via in situ polymerisation and its characterisation[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(S4):843–847.
- [16] LIU K, LI Y Y, TAO L, et al. Preparation and characterization of polyamide 6 fibre based on a phosphorus-containing flame retardant[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(17):9 261–9 271.
- [17] 刘娜. 基于纳米二氧化钛 PA6 复合材料的制备与性能研究[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- LIU Na. Preparation and performance study of PA6 composites based on nano-titanium dioxide[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019.
- [18] 陶皖. 新型含磷氮阻燃聚丙烯腈织物的制备与性能研究[D]. 广州:中国民用航空飞行学院, 2022.
- TAO Wan. Preparation and properties of a new flame retardant polyacrylonitrile fabric containing phosphorus and nitrogen[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022.
- [19] JO S, KWON D, YU J, et al. Taming the flow with hyperbranched polyamides as melt modifiers in polyamide composites[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2025, 46(9). DOI: 10.1002/marc.202570029.
- [20] LIANG X T, HU Q S, CHENG K, et al. Glass fiber reinforced PA6 composites with high strength and high flowability by hyperbranched polyesters[J]. *Journal of Polymer Science*, 2024, 62(24): 5 584–5 597.

「添加剂研讨会:成就可持续及优质塑料」首度亮相 CHINAPLAS

针对改性塑料界的重磅活动「添加剂研讨会:成就可持续及优质塑料」将首度亮相 CHINAPLAS。盛会汇聚助剂领袖,探讨高增值方案,助力企业突破成本与合规瓶颈,通过创新添加剂达成 ESG 目标、提升产品安全,预计将会有逾 300 名工程塑料供应商、研发专家及终端用户参与。

热题一:添加剂如何重塑塑料生命周期以达永续 ESG 目标? (4月22日下午)

研讨会首日下午将聚焦环保标准下的可持续发展。圣莱科特(SI Group)、龙盛集团、佳易容、光驭等公司的专家将分享闭环再生聚合物、长寿命材料及革命性琥珀效果颜料,实现塑料回收性能与外观的跨越式提升。

热题二:超越成本——添加剂赋予塑料制品安全溢价基因(4月23日上午)

研讨会次日则侧重于安全性竞争优势。陶氏(Dow)、LG电子、诺为、兴秀成等嘉宾将解析最新 PFAS-Free 方案、离子液体阻燃剂、生物降解包装,人形机器人、无人机及新能源汽车中的阻燃应用,提升安全溢价。

要把握时机业界交流可以提前到场(4.2H61 展台)出席设于会前的欢迎茶歇。

了解更多及报名:<https://adlnk.cn/e0plVXe>。