

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.010

透明脂环族聚酰胺 PAMACM12 的共聚增韧改性

易勇¹, 赖智强¹, 赖登旺¹, 胡峰¹, 邓如生², 刘跃军¹

(1. 湖南工业大学包装工程学院, 湖南株洲 412000; 2. 湖南泰塑新材料科技有限公司, 湖南株洲 412000)

摘要: 为提升由 3,3'-二甲基-4,4'-二氨基二环己基甲烷(MACM)与十二烷二酸合成的聚酰胺(PAMACM12)的综合性能并改善其韧性,采用长碳链脂肪族聚酰胺 1212(PA1212)对其进行共聚增韧改性。以脂环族二胺 3,3'-二甲基-4,4'-二氨基二环己基甲烷(MACM)、十二烷二酸、十二烷二胺为原料,通过一步熔融共聚制备长碳链透明共聚聚酰胺 PAMACM12/1212,并对其结构与性能进行表征分析,讨论了不同共聚单体含量对共聚聚酰胺性能的影响。结果表明,PAMACM12 及其共聚物均为非晶态聚合物,长碳链脂肪族聚酰胺 PA1212 的加入提高了共聚聚酰胺链的柔韧性,共聚聚酰胺的玻璃化转变温度和热稳定性呈下降趋势;力学性能测试结果表明随着 PA1212 含量的增加,共聚聚酰胺的拉伸强度与弯曲强度有所降低,缺口冲击强度与断裂伸长率显著提升,材料韧性提高,此外聚酰胺吸水性及透明性均略有降低。与 PAMACM12 相比,PA1212 质量分数为 40% 时共聚聚酰胺 PAMACM12/1212-40% 的拉伸性能与弯曲性能分别降低了 15.0% 和 14.6%,但冲击性能提升了 180.8%,透光率略微降低了 3.3%,吸水率下降了 60.7%。共聚增韧改性后的 PAMACM12 保持高透明性的同时兼备优异的韧性,在透明聚酰胺领域中具有潜在的应用价值。

关键词: 透明聚酰胺; PAMACM12; 共聚改性; 韧性; 透光率

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0080-07

Toughening modification of transparent cycloaliphatic polyamide PAMACM12 by copolymerization

YI Yong¹, LAI Zhiqiang¹, LAI Dengwang¹, HU Feng¹, DENG Rusheng², LIU Yuejun¹

(1. School of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China;

2. Taisu New Materials Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: To enhance the comprehensive performance and toughness of the polyamide(PAMACM12) synthesized from 3,3'-dimethyl-4,4'-diaminodicyclohexylmethane (MACM) and dodecanedioic acid, a copolymerization toughening modification was carried out using long-chain aliphatic polyamide(PA1212). The long-chain transparent copolyamide PAMACM12/1212 was prepared via one-step melt copolymerization using the alicyclic diamine MACM, dodecanedioic acid, and dodecanediamine. Its structure and properties were characterized, and the effects of the comonomer content on the properties were investigated. The results indicate that both PAMACM12 and its copolymers are amorphous. The incorporation of PA1212 enhances the flexibility of the copolymer chains, leading to a decrease in the glass transition temperature and thermal stability. Mechanical tests show that with increasing PA1212 content, the tensile and flexural strengths decrease, whereas the notched impact strength and elongation at break increase significantly, resulting in improved toughness. Additionally, the water absorption and transparency of the copolyamides slightly decrease. Compared with neat PAMACM12, the copolymer containing 40 wt% PA1212 (PAMACM12/1212-40%) exhibits reductions of 15.0% in tensile strength and 14.6% in flexural strength, but an increase of 180.8% in notched impact strength. Its light transmittance decreases slightly by 3.3%, while the water absorption decreases markedly by 60.7%. The toughened PAMACM12 maintains high transparency along with excellent toughness, demonstrating potential for application in transparent polyamide materials.

Keywords: transparent polyamide ; PAMACM12 ; copolymer modification ; toughness ; light transmittance

通信作者: 刘跃军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高分子材料加工工程

收稿日期: 2026-01-10

引用格式: 易勇, 赖智强, 赖登旺, 等. 透明脂环族聚酰胺 PAMACM12 的共聚增韧改性[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 80-86.

YI Yong, LAI Zhiqiang, LAI Dengwang, et al. Toughening modification of transparent cycloaliphatic polyamide PAMACM12 by copolymerization [J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 80-86.

聚酰胺(PA)自20世纪30年代问世以来,凭借其良好的力学性能、耐磨性、耐化学腐蚀性以及加工性能等,在众多领域得到了广泛应用^[1-2]。然而,传统聚酰胺由于其半结晶特性,在许多对透明性有严格要求的领域应用受限。为了满足这些特殊领域的需求,透明聚酰胺逐渐崭露头角。透明聚酰胺是一种几乎不结晶或结晶速率非常慢的聚酰胺,其不仅具备高透光率,同时还兼具抗冲击性、热稳定性等优点^[3]。透明聚酰胺不仅保留了聚酰胺的部分优良性能,还具备高透明度,拓展了聚酰胺材料的应用范围,成为聚酰胺领域的研究热点之一^[4-5]。透明聚酰胺按结构不同,主要可分为脂肪族透明聚酰胺、半芳香族透明聚酰胺、全芳香族透明聚酰胺,全芳香族透明聚酰胺因加工困难且成本昂贵,并未实现工业化生产,因此当前市场上透明聚酰胺主要以脂肪族与半芳香族为主。半芳香族透明聚酰胺以PA6T/6I、PA10T/10I、聚己二酰间苯二甲胺(PAMXD6)等为主,通过引入芳香环,破坏分子链对称结构,降低结晶速率以实现透明性^[6-8];脂肪族透明聚酰胺以聚(4,4'-二氨基二环己基甲烷十二烷二酰胺)(PAPACM12)、聚(3,3'-二甲基-4,4'-二氨基二环己基甲烷十二烷二酰胺)(PAMACM12)为主,利用大体积高位阻的脂肪环及长碳链的柔性抑制聚酰胺的结晶以达到透明性的目的^[9-11]。国内透明聚酰胺主要为半芳香族共聚透明聚酰胺,芳香环的引入使得分子链的刚性大幅度地提升,聚酰胺的力学性能和耐热性增强;但同时也使得其韧性下降,抗冲击性能差;而与半芳香族透明聚酰胺相比,脂环族透明聚酰胺具有与其相当的力学性能,同时透明性更高,抗冲击性更优,加工性能好,因此科学家逐渐将视野投入到脂环族透明聚酰胺的研究^[12-14]。刘含茂等^[15]以4,4'-二氨基二环己基甲烷(PACM)和十四烷二酸为原料,制备得到新型脂环族透明聚酰胺PAPACM14;相较于商业化的PAPACM12,两者透明度相当,而PAPACM14玻璃化转变温度更低,缺口冲击强度更高。Li等^[16]以PACM为共聚单体与PA66共聚制备得到一种高透明共聚聚酰胺,随着PACM6含量的增加,PA66/PACM6的晶相发生了明显的从 α 向 γ 的转变,当PACM6质量分数为40%时,共聚物的透过率最高达到92.5%。目前多为新型透明聚酰胺的开发与研究,少有对脂环族透明聚酰胺改性研究。

为进一步提高PAMACM12性能,增强其韧性,本文采用一步熔融聚合法将脂环族二胺3,3'-二甲基-4,4'-二氨基二环己基甲烷(MACM)、十二烷二酸、十二烷二胺进行熔融共聚制备一系列不同配比的长碳链脂环族共聚聚酰胺PAMACM12/1212,并研究共聚单体含量变化对共聚聚酰胺性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

MACM:工业级,纯度99.5%,深圳旭华生物科技有限公司;

十二烷二酸:工业级,纯度99.5%,山东瀚霖生物技术有限公司;

十二烷二胺:工业级,纯度99.5%,北京百灵威科技有限公司;

去离子水:自制。

1.2 主要仪器及设备

高温高压反应釜:FCF,威海煌恺化工机械有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FIIR)仪:Bruker tensor 20,德国Bruker公司;

核磁共振(NMR)仪:BRUKER PLUS 600 MHz,德国Bruker公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q20,美国TA仪器公司;

热重(TG)分析仪:TG209F1 Libra,德国Netzsch公司;

X射线衍射(XRD)仪:SmartLab SE,日本Rigaku公司;

万能试验机:EUT2503,深圳三思检测技术有限公司;

冲击试验机:GT-7045-MD,高铁科技股份有限公司;

透光率雾度测定仪:SGW-810,广东标际包装检测仪器有限公司。

1.3 试样制备

试验采用熔融聚合一步法制备共聚聚酰胺,分别将MACM、十二烷二酸和十二烷二胺按表1中配料比依次投入高温高压反应釜中,并加入适量去离子水。通过抽真空充入氮气的方式置换釜内空气三次,之后再次充入氮气至压力为0.5 MPa,闭合反应釜。温度设置为250℃,开始升温并开启搅拌,转速为5 r/min。待釜内压力升至2 MPa左右时,保压

2 h。保压结束缓慢打开反应釜排气阀,然后边升温边排气,釜内温度升至 280 ℃,排气至釜内压力为 0 MPa,打开真空泵,抽真空 1 h 后打开底阀出料切粒,得到目标产物。将得到的树脂颗粒放入烘箱 80 ℃ 烘干 12 h 得到最终产物。脂环族共聚聚酰胺的制备路线如图 1 所示。

表 1 不同共聚聚酰胺 PAMACM12/1212 的合成配方表
Tab. 1 Synthesis formula table of different copolymerized polyamides PAMACM12/1212

Samples	MACM	Dodecanedioic acid	1,12-diaminododecane
PAMACM12	2 034.2	1 965.8	0
PAMACM12/1212-10%	1 845.7	1 982.6	172.4
PAMACM12/1212-20%	1 654.1	1 998.3	347.5
PAMACM12/1212-30%	1 459.5	2 014.8	525.6
PAMACM12/1212-40%	1 261.4	2 029.8	706.0

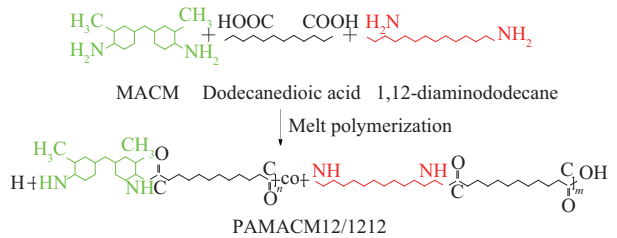


图 1 共聚聚酰胺 PAMACM12/1212 的合成路线
Fig. 1 Synthesis route of copolymerized polyamides PAMACM12/1212

1.4 性能测试与表征

1.4.1 FTIR 表征

将干燥后的样品进行粉碎,采用溴化钾压片法进行红外测试表征,测试波数范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为 16 次。

1.4.2 NMR 表征

利用 NMR 仪对不同样品的 ^1H -NMR 进行表征,溶剂选用氘代三氟乙酸。

1.4.3 DSC 测试

利用 DSC 仪对不同共聚聚酰胺熔融特性进行测试,DSC 升降温程序为由 25 ℃ 升至 300 ℃,保温 5 min 后降至 25 ℃,最后升温至 300 ℃,升降温速率为 10 ℃/min。

1.4.4 TG 测试

通过 TG 分析仪对共聚聚酰胺的热失重进行测试,在氮气氛围下,以 10 ℃/min 由 25 ℃ 升温至 600 ℃。

1.4.5 XRD 测试

利用 XRD 仪对共聚聚酰胺的结晶特性进行表征,Cu-K α 为发射源,以 5°/min 从 5° 扫描至 40°。

1.4.6 力学性能测试

不同共聚聚酰胺通过注塑机制备成哑铃型样条,注塑机各区温度设置为一区 255 ℃、二区 265 ℃、三区 270 ℃、四区 275 ℃、喷嘴 275 ℃;试样规格为 80 mm×10 mm×4 mm。拉伸性能按 GB/T 1040.1—2018 测试,拉伸速度为 50 mm/min;弯曲性能按 GB/T 9341—2008 测试,测试速率为 2 mm/min,跨距为 64 mm;冲击性能按 GB/T 1043.1—2008 测试,A 型缺口,摆锤能量 7.5 J。每组试样测试数量为 5 个,取平均值。

1.4.7 吸水性测试

取注塑后样条在真空干燥箱烘干后记录其初始质量,之后在室温下将样条放入水中浸泡 24 h 并记录质量,通过样条初始质量和在水中浸泡 24 h 后的质量计算其吸水率。每组试样测试数量为 5 个,取平均值。

1.4.8 透光率测试

将不同共聚聚酰胺通过模压机,模压成型为厚度 1 mm 的薄片,试样裁剪为直径 80 mm 的圆形试样。透光率、雾度按照 GB/T 2410—2008 测试。每组试样测试数量为 5 个,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

共聚聚酰胺的化学结构由 FTIR 和 NMR 谱图共同确定,图 2 为共聚聚酰胺的 FTIR 谱图,图中 1 643 cm^{-1} 和 1 540 cm^{-1} 处有明显酰胺谱带 I 和酰胺谱带 II 的吸收峰,其分别对应酰胺基团中 C=O 键伸缩振动峰和 C—N 伸缩振动及 O=C—N—H 弯曲振动的叠加吸收峰;3 300 cm^{-1} 吸收峰归属于 N—H 氢键伸缩振动吸收峰;2 924 cm^{-1} 与 2 852 cm^{-1} 处为亚甲基的对称和不对称伸缩振动吸收峰;1 450 cm^{-1} 处对应亚甲基的弯曲振动吸收。酰胺谱带的存在证实了制备所得的样品具有典型的聚酰胺结构。此外由图中可观察到,随着共聚单体 PA1212 的比例增加,FTIR 谱图中酰胺键相关吸收峰均出现略微红移,这表明酰胺键的密度随着 PA1212 含量的增加而逐渐降低,同时也导致氢键强度降低^[7]。图 3 为 PAMACM12 和 PAMACM12/1212-40% 的 ^1H -NMR 谱图,与 PAMACM12 相比,PAMACM12/1212-40% 共聚聚酰胺中酰胺键相邻的亚甲基(a,f)及脂肪长碳链上亚甲基(b,c,d,e)的特征质子峰上出现不同的分裂峰和峰强的变化,证实了 PA1212 链段成功地通

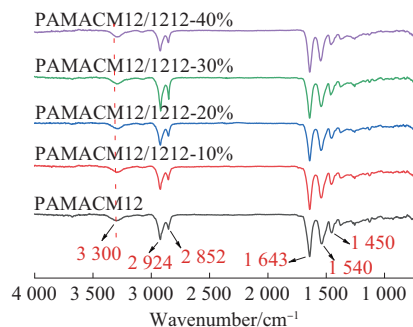
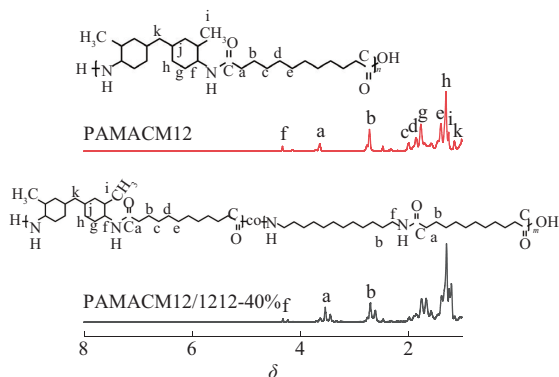


图2 不同共聚聚酰胺的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of different copolymerized polyamides

图3 不同共聚聚酰胺的¹H-NMR谱图Fig. 3 ¹H-NMR spectra of different copolymerized polyamides

过共聚方法引入了PAMACM12链段中。

此外还进一步通过GPC对制备的共聚聚酰胺进行了分子量的测定, GPC流出时间与分子量的关系如图4所示, 分子量相关数据经计算列于表2, 可见实验所制备的共聚聚酰胺分子量均高于 10^4 , 有较为均匀的分子量及其分子量分布, 这表明实验成功地制备了PAMACM12/1212共聚聚酰胺。

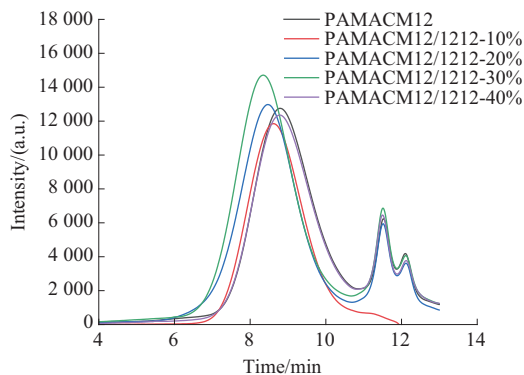


图4 不同共聚聚酰胺凝胶渗透色谱图

Fig. 4 Gel permeation chromatography spectrums of different copolymerized polyamides

2.2 热性能分析

采用DSC对不同聚酰胺树脂的熔融结晶行为进行分析表征, 不同聚酰胺的DSC升降温曲线如图

表2 不同共聚聚酰胺分子量相关数据表

Tab. 2 Molecular weight correlation data of different copolymerized polyamides

Samples	$M_n/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	$M_w/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	PDI
PAMACM12	12 834	25 796	2.01
PAMACM12/1212-10%	11 976	25 389	2.12
PAMACM12/1212-20%	12 939	28 853	2.23
PAMACM12/1212-30%	14 578	31 342	2.15
PAMACM12/1212-40%	12 234	26 792	2.19

Notes: M_n is number-average molecular weight; M_w is weight-average molecular weight; PDI is polydispersity index.

5所示。由DSC曲线可知, PAMACM12及其共聚物在熔融降温过程中没有明显的熔融峰与结晶峰, 即为非晶态聚合物没有固定的熔点, 表明在非等温结晶过程中聚酰胺分子链受大体积刚性脂肪环的影响, 分子链难以运动并发生有序排列, 故结晶行为受到抑制。图5a第二次升温曲线中出现的微小熔融峰为聚酰胺树脂的玻璃化转变温度(T_g), 相关温度见表3, 其中PAMACM12的 T_g 最高为 147.1°C , PAMACM12/1212-40%的 T_g 最低为 95.8°C 。 T_g 是高分子链段从冻结到运动的一个转变温度, 而链段的运动是通过主链的单键内旋转来实现的, 因此高分子链段的柔性是影响聚合物 T_g 的主要原因。随着共聚单体比例的增加, 聚酰胺树脂的 T_g 逐渐降低, 这是因为PA1212为柔性的脂肪族长链, 与PAMACM12共聚后能够一定程度上增加共聚聚酰胺

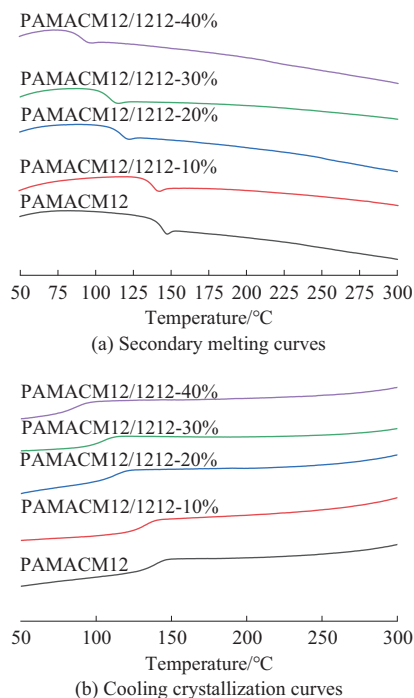


图5 不同共聚聚酰胺的DSC曲线

Fig. 5 DSC curves of different copolymerized polyamides

表3 共聚聚酰胺的热性能数据表

Tab. 3 Thermal property data of copolymerized polyamides

Samples	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_{5\%}/^\circ\text{C}$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$
PAMACM12	147.1	423.4	462.8
PAMACM12/1212-10%	141.5	420.5	461.7
PAMACM12/1212-20%	121.4	420.2	460.8
PAMACM12/1212-30%	113.8	417.2	460.1
PAMACM12/1212-40%	95.8	415.3	459.8

Notes: T_g is glass transition temperature; $T_{5\%}$ is temperature at 5% mass loss; $T_{\max}$ is temperature at maximum mass loss rate.

胺分子链的柔性,使得分子链链段运动所需的能量降低,因此随着PA1212的含量增加共聚物的 T_g 呈现下降趋势。

图6与图7分别为不同共聚聚酰胺的TG曲线和DTG曲线,具体数据见表3。由图6、图7可知,均聚树脂PAMACM12与共聚树脂PAMACM12/1212的热失重曲线基本相同,热稳定性相似,不同的树脂样品均呈现出一个热失重平台,同时DTG曲线为光滑单峰仅出现一个最大失重速率峰,为无规断裂一步降解过程。从表3中 $T_{5\%}$ 分解温度可知,PAMACM12树脂的热稳定性要略高于PAMACM12/1212共聚树脂,且随着共聚单体PA1212比例的增加,共聚树脂的热稳定性也随之下

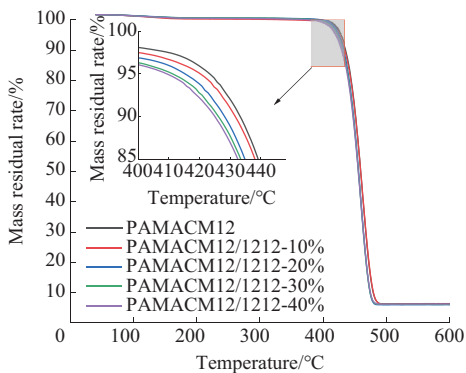


图6 不同共聚聚酰胺的TG曲线

Fig. 6 TG curves of different copolymerized polyamides

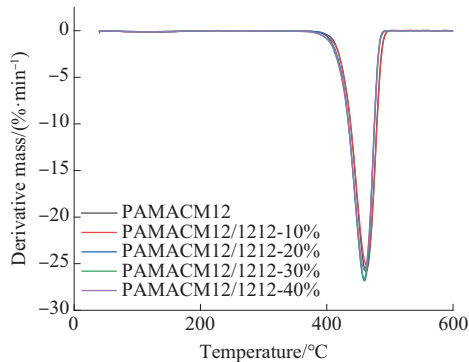


图7 不同共聚聚酰胺的DTG曲线

Fig. 7 DTG curves of different copolymerized polyamides

降,这说明共聚单体的引入一定程度上降低了聚酰胺分子链的刚性,从而导致共聚聚酰胺的热稳定性下降。不同聚酰胺树脂质量损失5%时温度均高于415.3 $^\circ\text{C}$,最大分解速率均在460 $^\circ\text{C}$ 左右,表现出优异的热稳定性。

2.3 XRD分析

PAMACM12及其共聚物的聚集形态通过XRD表征,表征图谱如图8所示,从图中可观察到聚合物的衍射峰都为弥散的隆峰,说明系列聚酰胺均为非晶态聚合物,与DSC结果相符合。随着共聚单体PA1212含量的增加,共聚聚酰胺衍射峰逐渐右移,说明共聚单体PA1212的引入使得PAMACM12/1212晶面间距减小^[18],这与链段的柔性有关,柔性脂肪链的加入使得共聚聚酰胺链段整体柔性也随之增加,因此表现出一定的结晶趋势。此外随着共聚单体的增加,共聚物衍射峰由弥散的宽峰逐渐向尖锐的窄峰变化也说明了随着共聚单体的增加共聚物具有结晶的趋势。

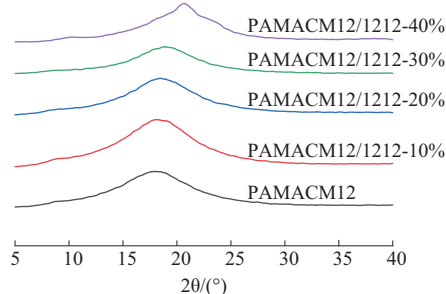
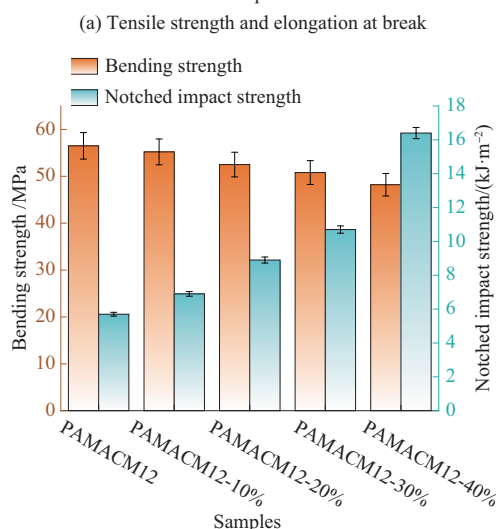
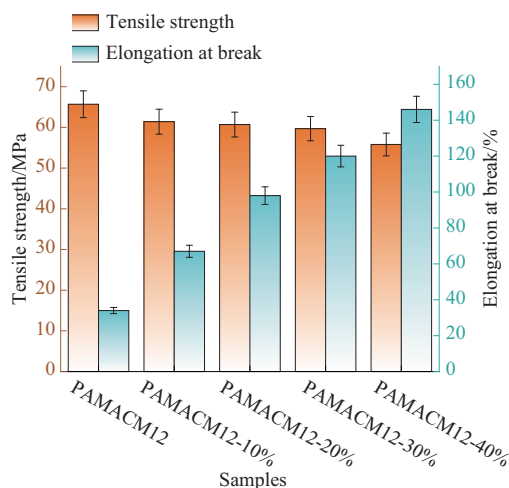


图8 不同共聚聚酰胺的XRD曲线

Fig. 8 XRD curves of different copolymerized polyamides

2.4 力学性能

PAMACM12具有较好的拉伸强度和弯曲强度,但延伸性和柔韧性一般。添加脂肪族PA1212单元是为了改善PAMACM12的延展性,而共聚物的力学性能主要取决于共聚物的组成。PAMACM12及其共聚物的力学性能数据列于图9,由图中数据可得,共聚聚酰胺的拉伸强度与弯曲强度随着PA1212共聚单体含量的增加逐渐减小,PAMACM12/1212-40%的拉伸性能与弯曲性能较PAMACM12分别降低了15.0%和14.6%;而缺口冲击强度与断裂伸长率则随着共聚单体含量的增加逐渐增大,冲击性能较PAMACM12提升了180.8%。这是PA1212脂肪族链具有更好的柔韧性所致。由于部分刚性脂肪环被脂肪链取代,PAMACM12/1212共聚物的分子链更加柔韧,链的迁移率增加,



(b) Flexural strength and notched impact strength

图9 不同共聚聚酰胺的力学性能

Fig. 9 Mechanical properties of different copolymerized polyamides

同时刚性脂肪环的密度降低,因此拉伸和弯曲强度降低,缺口冲击强度和断裂伸长率升高。

2.5 吸水性能

图10为PAMACM12及其共聚物的吸水性能图。从图中可观察到在系列聚酰胺中PAMACM12的吸水性最高为2.8%,PAMACM12/1212-40%的吸水性最低为1.1%,降低了60.7%。且随着共聚单体含量的增加,共聚聚酰胺的吸水率逐渐下降。聚酰胺的吸水性主要与其酰胺键的密度有关,随着共聚单体的引入,共聚聚酰胺的吸水性下降,说明PA1212的加入使得共聚聚酰胺PAMACM12/1212的酰胺键密度下降,因此吸水性降低。

2.6 光学性能

PAMACM12及其共聚物的光学性能如图11所示,可以观察到共聚物的透光性随着PA1212含量的增加而有所下降,高分子聚合物的透明性一般与其

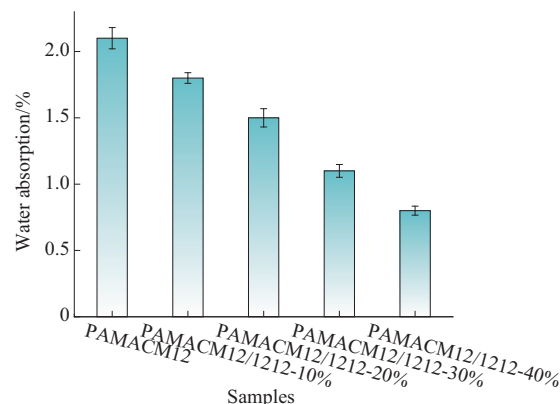


图10 不同共聚聚酰胺的吸水率

Fig. 10 Water absorption of different copolyamides

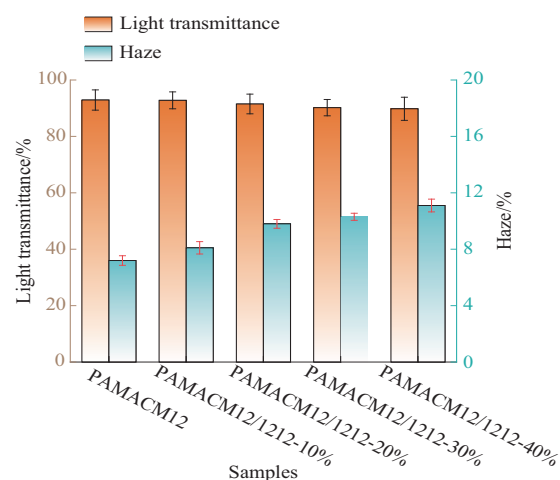


图11 不同共聚聚酰胺的光学性能

Fig. 11 Optical properties of different copolymerized polyamides

结晶度有关,这说明PA1212的引入能够一定程度地影响共聚聚酰胺的结晶度。但值得注意的是,相比于PAMACM12 92.9%的透光率,PAMACM12/1212-40%的透光率为89.8%,仅降低了3.3%,即其结晶趋势并不明显,PAMACM12共聚物仍保持较高的透明度。

3 结论

(1)以MACM、十二烷二酸、十二烷二胺为原料通过一步熔融聚合的方法制备了共聚聚酰胺PAMACM12/1212,并通过FTIR、¹H-NMR表征分析成功制备了目标共聚聚酰胺,此外利用了GPC测定了共聚聚酰胺的分子量,实验所制备的共聚聚酰胺具有较高的分子量,具备优异的性能。

(2)通过DSC与XRD表征分析,PAMACM12及其共聚物为非晶态聚合物,随着共聚单体PA1212含量的增加,聚酰胺分子链中刚性脂肪环逐渐被柔性脂肪链替代使得分子链柔性增加,共聚聚酰胺的 T_g 逐渐降低,PAMACM12的 T_g 最高为147.1℃。当

PA1212含量为40%时共聚聚酰胺具备一定的结晶趋势。此外TG结果显示,系列共聚聚酰胺最低分解温度415.3℃,最大分解温度均在460℃左右,具有优异的热稳定性。

(3)力学性能测试显示,系列共聚聚酰胺的拉伸强度与弯曲强度逐渐降低,缺口冲击强度与断裂伸长率逐渐升高,PA1212的引入使得聚酰胺树脂的刚性降低,韧性大幅度提高,同时吸水率和透光率均有所下降。在对PAMACM12增韧改性后,所得的共聚聚酰胺牺牲了部分刚性与透光率同时大幅提升其韧性,降低了其吸水率。

(4)增韧改性后的PAMACM12具备优异韧性和透光率,在透明聚酰胺薄膜、电子设备显示、光学仪器等透明聚酰胺应用领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Rulkens R, Koning C. Chemistry and technology of polyamides [M]. Polymer Science: A Comprehensive Reference. 2012:431–467.
- [2] SHARMA S, SARANGI P K, SAHOO A K. Polymer materials in daily life: Classification, applications, recent developments, and future prospects[J]. Macromolecular Symposia, 2025, 414(1). DOI: 10.1002/masy.202400159.
- [3] 罗隆毅, 李建林, 王文志. 透明尼龙的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2025, 48(5): 79–84.
LUO Longyi, LI Jianlin, WANG Wenzhi. Research progress of transparent nylon[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2025, 48(5): 79–84.
- [4] 金汉强, 李曜, 贾凤. 透明尼龙的应用研究进展与展望[J]. 化工新型材料, 2023, 51(增刊1): 279–283.
JIN Hanqiang, LI Yao, JIA Feng. Research progress and prospects of transparent nylon application[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(Suppl 1): 279–283.
- [5] 李汶穗, 唐嘉怡, 吴娟, 等. 透明聚酰胺的研究进展[J]. 上海塑料, 2025, 53(6): 1–7.
LI Wensui, TANG Jiayi, WU Juan, et al. Research progress of transparent polyamide[J]. Shanghai Plastics, 2025, 53(6): 1–7.
- [6] LIU B X, HU G S, ZHANG J T, et al. Synthesis, characterization and thermal decomposition kinetics of a bio-based transparent nylon 10I/10T[J]. Designed Monomers and Polymers, 2018, 21(1): 182–192.
- [7] ZOU G J, WANG P L, FENG W T, et al. Bio-based transparent polyamide 10T/10I/10I2 with high performance[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(13). DOI: 10.1002/app.47305.
- [8] 倪金平, 路丹, 郑振伟, 等. 透明尼龙 PA6T/6I 的黄变及透明性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(12): 62–65.
- NI Jinping, LU Dan, ZHENG Zhenwei, et al. Study on yellowing resistance and transparency of transparent nylon PA6T/6I[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(12): 62–65.
- [9] 邱嘉濠, 王春花, 易勇, 等. 生物基 PA510/D10 的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 9–15.
QIU Jiahao, WANG Chunhua, YI Yong, et al. Preparation and performance of biobased PA510/D10[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 9–15.
- [10] 逯维健, 王春花, 王文志, 等. 共聚聚酰胺 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.
- [11] CHEN C W, LIN C W, CHEN Y H, et al. The influence of 1, 4-cyclohexanedicarboxylic acid on the thermal and mechanical properties of copolyamides[J]. Polymer Bulletin, 2020, 77(1): 235–253.
- [12] 董思远. 两类脂环族透明聚酰胺的微观结构和性能调控[D]. 北京: 北京服装学院, 2019.
DONG Siyuan. Microstructure and property control of two kinds of alicyclic transparent polyamides[D]. Beijing: Beijing Institute of Clothing Technology, 2019.
- [13] ZHANG Y D, WU F, YANG H Y, et al. Synthesis of cycloaliphatic polyamides via palladium-catalyzed hydroaminocarbonylative polymerization[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146(19): 12 883–12 888.
- [14] JIN K, SUN Q S, FENG Y D, et al. Significant influence of alkyl substituents in the alicyclic rigid backbone on solubility and thermal stability of polyarylamide copolymers[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2021, 3(4): 2 120–2 130.
- [15] 刘含茂, 伍威, 曹凯凯, 等. 尼龙 PACM14 的制备及表征[J]. 塑料工业, 2021, 49(8): 128–131, 138.
LIU Hanmao, WU Wei, CAO Kaikai, et al. Preparation and characterization of nylon PACM14[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(8): 128–131, 138.
- [16] LI J L, YI Y, WANG C H, et al. An intrinsically transparent polyamide film with superior toughness and great optical performance [J]. Polymers, 2024, 16(5). DOI: 10.3390/polym16050599.
- [17] 陶磊. 基于生物基壬二酸的聚酰胺合成及结构性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
TAO Lei. Synthesis, structure and properties of polyamides with biobased azelaic acid[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [18] ZHAO H K, ZHANG D C, LI Y S. Morphology and crystallization kinetics of rubber-modified nylon 6 prepared by anionic in-situ polymerization[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27(1): 204–215.