

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.002

生物基 PA510/D10 的制备及性能

邱嘉濠¹, 王春花¹, 易勇¹, 朱嘉华¹, 王文志¹, 邓如生²

(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: 为改善生物基聚酰胺 510 (PA510) 的性能和扩宽其应用范围, 提出了一种在 PA510 主链上引入脂环结构的新方法。将 1,5-戊二胺、1,4-环己烷二胺分别与癸二酸反应得到 PA510 盐和聚酰胺 D10 (PAD10) 盐, 通过熔融共缩聚制备含脂环结构的生物基共聚酰胺 510/D10 (PA510/D10), 并对其化学结构、热性能、结晶性能、吸水性能、力学性能以及透光性能进行表征与分析。结果表明, 随着 PAD10 盐的质量分数增大, PA510/D10 的熔点、结晶温度和结晶度逐渐降低, 这表明引入的脂环结构破坏了 PA510 原有链段的规整性。PA510/D10 的初始热分解温度和最大热失重速率温度相较于 PA510 均有所提高, 其热稳定性得到了提升。与 PA510 相比, PAD10 盐的质量分数为 40% 的 PA510/D10 材料吸水率降低了 49%, 其缺口冲击强度和断裂伸长率分别提高了 38% 和 54%, 且在波长为 500 nm 时的透光率由原来的 75% 提高到 90%。结果表明, 脂环结构的引入有效地提高了 PA510 的热稳定性、韧性和透明性, 同时显著降低了其吸水率。本研究为生物基聚酰胺的改性提供了参考。

关键词: 生物基聚酰胺; 共聚酰胺; 1,5-戊二胺; 癸二酸; 1,4-环己烷二胺; 化学结构

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0009-07

Preparation and Performance of Biobased PA510/D10

QIU Jiahao¹, WANG Chunhua¹, YI Yong¹, ZHU Jiahua¹, WANG Wenzhi¹, DENG Rusheng²

(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 properties of bio-based polyamide 510 (PA510) and broaden its application scope, a novel method was proposed by introducing alicyclic structures into the PA510 backbone. PA510 salt and polyamide D10 (PAD10) salt were synthesized by reacting 1,5-pentanediamine and 1,4-cyclohexanediamine with sebacic acid, respectively. A bio-based copolyamide 510/D10 (PA510/D10) containing alicyclic structures was prepared via melt copolycondensation. And its chemical structure, thermal properties, crystallinity, water absorption, mechanical properties and light transmittance were characterized. The results show that as the mass fraction of PAD10 salt increases, the melting point, crystallization temperature, and crystallinity of PA510/D10 gradually decrease, indicating that introduction of alicyclic structures disrupts regularity of PA510 molecular chains. Compared with PA510, PA510/D10 exhibits improved thermal stability, with higher initial decomposition temperature and temperature at the maximum weight loss rate. When the mass fraction of PAD10 salt reaches 40%, the results show that the water absorption of PA510/D10 material is reduced by 49%, the notch impact strength and the elongation at break are increased by 38% and 54%, respectively, and the transmittance of PA510/D10 material is increased from 75% to 90% at the wavelength of 500 nm. The results indicate that the incorporation of alicyclic structures effectively enhances the thermal stability, toughness, and transparency of PA510, and significantly reduces its water absorption rate. This study provides a reference for modification of bio-based polyamides.

Keywords : bio based polyamide ; copolyamide ; 1,5-pentanediamine ; sebacic acid ; 1,4-diaminocyclohexane ; chemical structure

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2025JJ70050), 株洲市社会化出资项目(2024)

通信作者: 王春花, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为高性能聚酰胺材料的合成与改性

收稿日期: 2025-05-07

引用格式: 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.

聚酰胺(PA)也称尼龙,是一类分子链中含有重复酰胺键($-\text{NH}-\text{CO}-$)的聚合物的总称。PA因具有规则的结构和强大的分子间力,易于结晶,与普通塑料相比具有较高的力学性能、耐热性及耐磨性,被广泛应用于建材、航天、食品包装、汽车零部件、医疗器械和电子器件等领域^[1]。如今市面上99%的商用聚酰胺都是石油基聚酰胺,随着“碳中和”理念的提出,以及人们环保意识的不断增强,使得更加绿色环保的生物基材料成为了研究的热点^[2]。

生物基PA材料是指以可再生生物质为原料(如植物油和多糖衍生物),通过生物、化学和物理手段,生成用于合成PA的单体,然后将单体聚合制备具有绿色、环保、可再生特性的高性能PA材料^[3]。1,5-戊二胺是葡萄糖发酵过程中赖氨酸脱羧产生的重要生物基单体,通常与含X个碳的二羧酸聚合形成PA5X,例如PA54和PA56,其性能接近PA66^[4],广泛应用于纺织等领域。随着生物发酵技术的不断发展和完善,近年来中国科学院微生物研究所通过基因工程技术提高了酶的效率,使得1,5-戊二胺的生产通过淀粉发酵以低成本成功实现工业化^[5]。值得关注的是,生物基1,5-戊二胺可以和生物基癸二酸合成生物基PA510,PA510为全生物基材料,具有高熔点、低吸水性、低密度等优点^[6]。在相关研究领域,Zhu等^[4]以1,5-戊二胺和不同亚甲基的脂肪族二元酸采用熔融缩聚法合成了一系列生物基脂肪族PA。周一伟等^[7]以1,5-戊二胺、对苯二甲酸和癸二酸作为聚合单体,通过熔融缩聚的方法制备了PA5T/510。这些研究均聚焦于通过调整脂肪族或芳香族二元酸单体来构建PA体系,但目前国内外尚未有关于在PA510主链中引入脂环结构对PA510性能影响的系统性研究报道。

PA510热稳定性和尺寸稳定性较差,限制了其应用范围,为了改善其性能,笔者拟在PA510主链上引入六元脂环基团以提高PA510的热稳定性和尺寸稳定性^[8]。以生物基戊二胺、生物基癸二酸和1,4-环己烷二胺为原料,采用两步法制备生物基共聚酰胺510/D10(PA510/D10),对其结构进行了表征,并研究脂环基团对共聚物热性能、力学性能、吸水性和透光性的影响,从而扩宽生物基PA510的应用领域。

1 实验部分

1.1 主要原材料

癸二酸:工业级,河北凯德生物材料有限公司;

1,5-戊二胺:工业级,山东津盛泰化工有限公司;

1,4-环己烷二胺:工业级,上海化源世纪贸易有限公司;

去离子水:自制(电导率为 $3\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$);

氮气:工业级,株洲德顺工业气体。

1.2 主要仪器及设备

高温高压聚合反应釜:GSHA-5 10L,上海岩征实验仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:GREAT 20,中科瑞捷(天津)科技有限公司;

核磁共振(NMR)仪:BRUKER PLUS 600 MHz,德国布鲁克有限公司;

热重(TG)分析仪:DZ-TGA101,南京大展检测仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DZ-DSC300,南京大展检测仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:Rigaku SmartLab SE,日本理学公司;

紫外可见光分光光度计:UV-2600,日本Shimadzu公司;

平板硫化仪:HZ-7014A,东莞市力显仪器科技有限公司;

万能试验机:WDW-10,上海松顿仪器制造有限公司;

悬臂梁冲击试验机:HT-843-5.5D,广东宏拓仪器科技有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 PA510盐和PAD10盐的制备

将一定质量的1,4-环己烷二胺加入烧瓶中,再加入相同质量去离子水,保持体系温度为 $60\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,并缓慢搅拌至体系为白色悬浊液,然后,缓慢加入与1,4-环己烷二胺等物质的量比的癸二酸,将溶液pH值控制在 $7.2\sim 7.5$,静置等待固体析出。将析出的固体过滤,洗涤,然后移至鼓风烘箱,在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下干燥10 h。干燥后,移入真空干燥烘箱,在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下继续干燥10 h,干燥完成后得到PAD10盐。并以1,5-戊二胺为原材料采用同样的方法制备PA510盐。

1.3.2 生物基PA510和PA510/D10的制备

将总质量为4 kg的PA510盐和PAD10盐按表1的配比投入10 L高温高压反应釜内,加入400 g去离子水,闭合反应釜。先向釜内充入 N_2 ,再抽真空,重复三次除净釜内空气。继续充入 N_2 ,使釜内压力达到0.5 MPa,设定温度240~270 $^{\circ}C$,开始加热。待釜内盐融化,开启搅拌,转速5 r/min。当釜内温度升至240~270 $^{\circ}C$ 时,缓慢打开反应釜排气阀,排气至釜内压力0 MPa后,打开真空泵,抽真空1~1.5 h后

出料切粒。生物基PA510和生物基PA510/D10共聚酰胺的制备路线如图1所示。

表1 PA510和PA510/D10的配方(质量分数)

Tab. 1 Composition of PA510 and PA510/PAD10(mass fraction)

Samples	PA510 Salt	PAD10 Salt
PA510	100	0
PA510/D10-10%	90	10
PA510/D10-20%	80	20
PA510/D10-30%	70	30
PA510/D10-40%	60	40

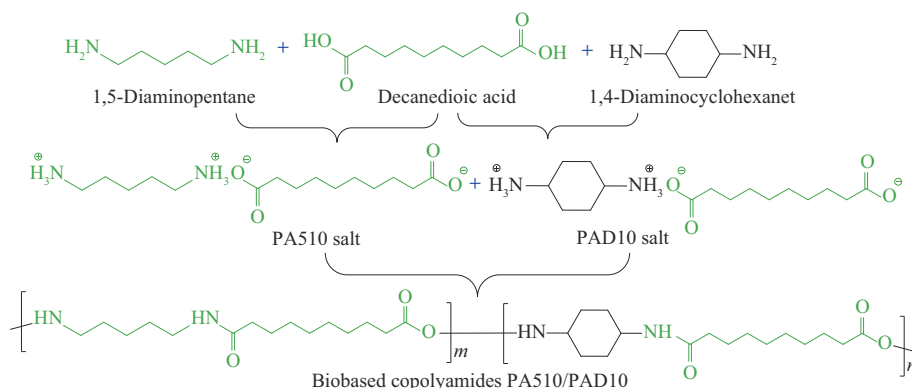


图1 生物基PA510和生物基PA510/D10的制备路线

Fig. 1 Preparation route of bio based PA510 and PA510/PAD10

1.4 测试与表征

(1)FTIR 表征:将PA510和PA510/D10充分干燥,使用平板硫化仪压在250 $^{\circ}C$ 条件下将PA510和PA510/D10压制成薄膜,膜厚度为1 mm,使用衰减全反射法进行测试,波数范围为4 000~400 cm^{-1} 。

(2)核磁共振氢谱(1H -NMR)表征:将样品彻底干燥,在室温下,使用NMR仪,选择氘代三氟乙酸作为溶剂,记录 1H -NMR谱图。

(3)TG 测试:在氮气气氛下,以10 $^{\circ}C/min$ 的速率升温,温度由25 $^{\circ}C$ 升至600 $^{\circ}C$ 。

(4)DSC 测试:在氮气气氛下,样品首先以10 $^{\circ}C/min$ 的速率由25 $^{\circ}C$ 加热至280 $^{\circ}C$ 并保持3 min以消除热历史,随后以相同速率冷却至25 $^{\circ}C$,最后再次升温至280 $^{\circ}C$ 。

(5)XRD 测试:使用Cu辐射靶,扫描速度为2 $^{\circ}/min$, 2θ 范围为5 $^{\circ}$ ~50 $^{\circ}$ 。

(6)吸水率测定:根据GB/T1034-2008,将试样在23 $^{\circ}C$ 的蒸馏水中浸泡48 h,分别测定浸泡前的初始质量(m_1)和浸泡后的饱和质量(m_2),计算吸水率(R),见式(1)。

$$R = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

(7)力学性能测试:拉伸性能按照GB/T 1040-2018测试,制备PA510和PA510/D10哑铃形样条进行测试,拉伸速率为20 mm/min。悬臂梁缺口冲击强度参照GB/T 1843-2008测试,试样规格为80 mm×10 mm×4 mm,且缺口半径为0.25 mm,实验采用能量为2.75 J的摆锤完成。所有测试均在室温下进行,并且结果为5次测试的平均值。

透光率测试:采用紫外可见分光光度计按GB/T 2410-2008测试。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

图2为PA510盐、PAD10盐、PA510和PA510/D10的FTIR谱图。图2a中,位于2 923 cm^{-1} 和2 855 cm^{-1} 的特征峰归属于亚甲基($-CH_2-$)基团的振动模式,其中2 923 cm^{-1} 对应反对称伸缩振动,2 855 cm^{-1} 对应对称伸缩振动;2 193 cm^{-1} 处吸收峰的出现可归因于 NH_3^+ 的倍频与合频振动叠加效应;1 644 cm^{-1} 处为羰基($C=O$)的伸缩振动所产生的强吸收峰,而1 514 cm^{-1} 处的复合峰则同时包含N—H面内弯曲振动和C—N键伸缩振动的特征信号。而700~1 000 cm^{-1} 波数范围内出现的尖锐吸收带是脂环族化合物的典型谱学特征^[9-10]。上述分析表明已经合

成PAD10盐。图2b中, $3\,301\text{ cm}^{-1}$ 附近的谱带归属于酰胺键N—H伸缩振动; $2\,929\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,855\text{ cm}^{-1}$ 处的双峰对应—CH₂—的对称和不对称伸缩振动^[11]。位于 $1\,639\text{ cm}^{-1}$ (酰胺 I 带)、 $1\,544\text{ cm}^{-1}$ (酰胺 II 带)和 $1\,251\text{ cm}^{-1}$ (酰胺 III 带)三个特征峰分别来源于C=O键的伸缩振动,N—H键的面内弯曲振动与C—N伸缩振动的耦合,C—N伸缩振动与C—H面内弯曲振动的复合吸收^[12-13]。且随着PAD10含量的增加,三个酰胺带的强度减小,表明酰胺键的密度随着PAD10含量的增加逐渐降低^[14]。

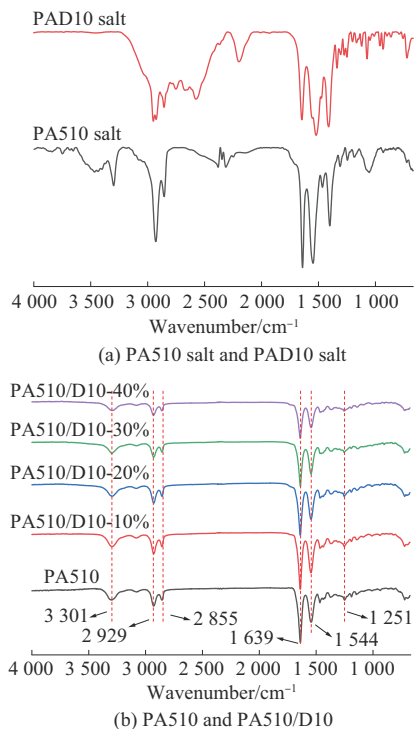


图2 PA510盐、PAD10盐、PA510和PA510/D10的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of PA510 salt, PAD10 salt, PA510 and PA510/D10

图3为PA510和PA510/D10的¹H-NMR图,图中位于e处的两个峰的化学信号分别为顺式、反式六元构型脂环结构与氨基相连的碳上的氢吸收,两个不同六元环的峰源于合成原料中的1,4-环己烷二胺存在顺式和反式结构。g和f处的峰分别归属于六元脂环结构中的平伏氢和直立氢特征吸收^[9]。峰a为与戊二胺氨基相连的第一个亚甲基上的氢吸收,峰d为与癸二酸羧基相连的第一个亚甲基上的氢吸收。峰b为戊二胺与癸二酸上的第二个亚甲基上的氢吸收,峰c为戊二胺与癸二酸上的其他亚甲基上的氢吸收。比较PA510和PA510/D10的¹H-NMR谱图上的峰,两者相差的为添加的脂环

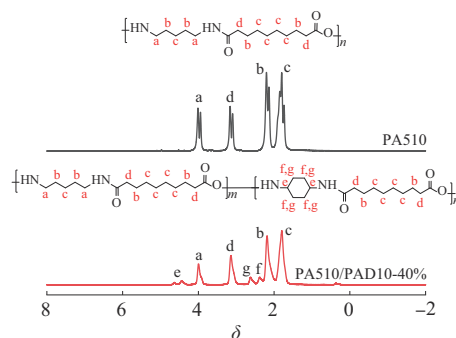


图3 PA510和PA510/D10的¹H-NMR图

Fig. 3 The ¹H-NMR of PA510 and PA510/D10

峰,¹H-NMR结果与FTIR结果结合可以证明成功制备了生物基PA510/D10。

2.2 热性能及结晶性能分析

聚合物的热稳定性对材料的加工和长期使用至关重要。图4和图5分别为PA510和PA510/D10的TG及DTG曲线,PA510和PA510/D10初始分解温度($T_{5\%}$)和最大热失重速率温度($T_{\max}$)见表2。由图4和表2可以看出PA510/D10共聚物的 $T_{5\%}$ 相较于PA510有一定提升,当PAD10盐的质量分数为40%时, $T_{5\%}$ 上升了 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为随着PAD10中脂环的引入,分子刚性增强导致分子链段的热运动受阻,使得共聚物的热稳定性得到了提升。由图5的DTG曲线可知,PA510/D10共聚物的 $T_{\max}$ 明显高于PA510,上升了 $16.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。DTG曲线中仅出现一个峰,表明PA510/D10的降解过程为一步反应,其机理主要涉及分子链的随机断裂^[14]。随着温度不断升高,分子主链开始发生断裂,首先从C—N键发生断裂,同时酰胺基团发生交联并脱水,生成的水分子进一步催化酰胺键的水解反应,随着温度升高至最大降解速率对应的峰值温度,C—C键开始大量断裂,导致材料迅速降解,最终,材料在高温下趋于完全降解^[15]。

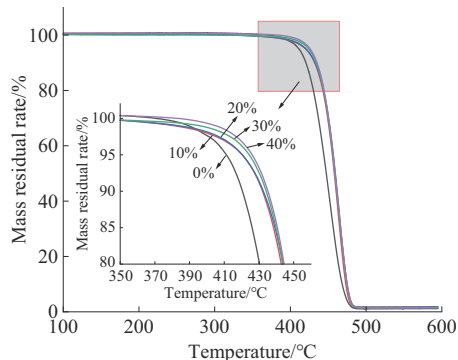


图4 PA510和PA510/D10的TG曲线

Fig. 4 TG curves of PA510 and PA510/D10

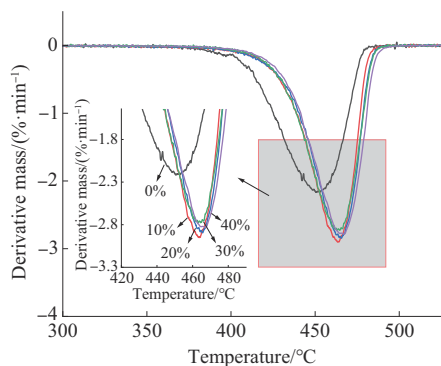


图5 PA510和PA510/D10的DTG曲线

Fig. 5 DTG curves of PA510 and PA510/D10

表2 PA510和PA510/D10的TG和DSC数据

Tab. 2 TG and DSC data of PA510 and PA510/D10

Samples	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{m}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{c}}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{m}}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_{\text{c}}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
PA510	411.5	450.6	216.3	176	52.30	46.57
PA510/ D10-10%	420.2	463.6	202.3	170	40.35	40.05
PA510/ D10-20%	420.9	465.0	195.6	161	16.47	28.73
PA510/ D10-30%	424.2	465.7	190.8	149	14.47	13.86
PA510/ D10-40%	426.3	466.7				

Notes: $T_{5\%}$ is mass loss 5% temperature; T_{max} is maximum decomposition temperature; T_{m} is melting temperature; T_{c} is crystallization temperature; ΔH_{m} is enthalpy of melting; ΔH_{c} is enthalpy of crystallization.

图6和图7为PA510和PA510/D10的DSC曲线,其结晶温度(T_{c})和熔融温度(T_{m})列于表2。随着PAD10盐质量分数的增加,共聚物的 T_{c} 和 T_{m} 逐渐下降。共聚物结晶度的下降是因为随着PAD10的加入,破坏了共聚物大分子链的规整性,造成共聚物的结晶度下降。而PAD10盐质量分数40%时没有明显结晶峰,这表明共聚物结晶受到抑制,分子链难以实现有序排列。共聚物的熔点主要受主链中的酰胺基团密度的影响^[16],随着主链上六元脂环基团的引入,酰胺基团与氢键密度下降,分子间排列规整度和分子间作用力下降,从而使共聚物熔点下降。

图8为PA510和PA510/D10的XRD曲线。从图8中可以看出,PA510在 2θ 为 21° 时出现强衍射峰,属于 γ 晶型衍射峰^[17]。PA510/D10共聚物拥有与PA510相似的衍射峰,这说明PAD10共聚组分并没有影响PA510分子链段的晶体结构^[14]。随着PAD10盐的质量分数增加,特征衍射峰逐渐向低的 2θ 方向移动,这表明随着PAD10的引入使晶胞发生畸变,晶面间距变大^[18]。随着PAD10的引入特征衍

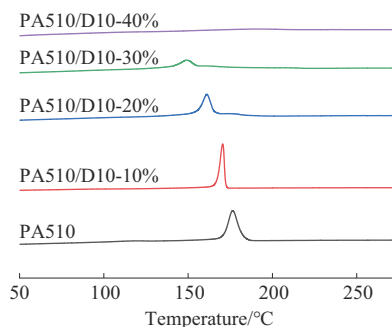


图6 PA510和PA510/D10的降温结晶DSC曲线

Fig. 6 DSC cooling crystallization curves of PA510 and PA510/D10

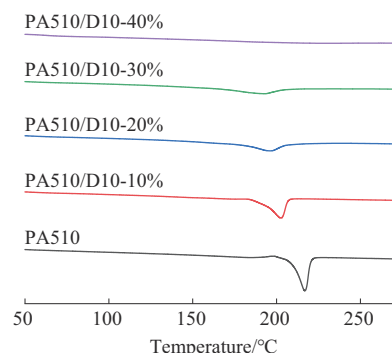


图7 PA510和PA510/D10的第二次升温熔融DSC曲线

Fig. 7 DSC second heating melting curves of PA510 and PA510/D10

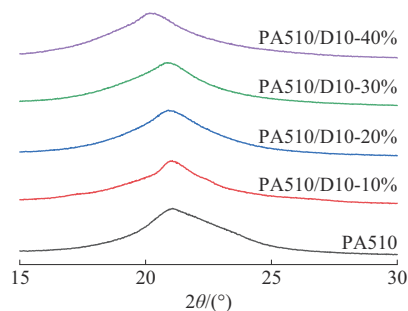


图8 PA510和PA510/D10的XRD曲线

Fig. 8 XRD curves of PA510 and PA510/D10

射峰逐渐变宽,这是因为脂环基团的引入抑制了聚合物分子链的规整排列,打破了聚合物的有序链排列,破坏了PA510晶体的形成^[19]。

2.3 吸水性能分析

由于亲水性酰胺基团的存在,PA在加工、储存和使用过程中很容易与环境中的水分子形成氢键,从而影响其尺寸稳定性和力学性能。图9为PA510和PA510/D10的吸水率曲线。由图9可知,PA510/D10的吸水率随着PAD10的含量的提升而下降。PA的吸水性能主要取决于其分子链中酰胺基团的密度,随着酰胺基团密度的下降,减少了可用于与水分子结合的位点的数量^[20],PA材料的吸水率会呈现下降趋势。PAD10的引入可降低分子链单位长

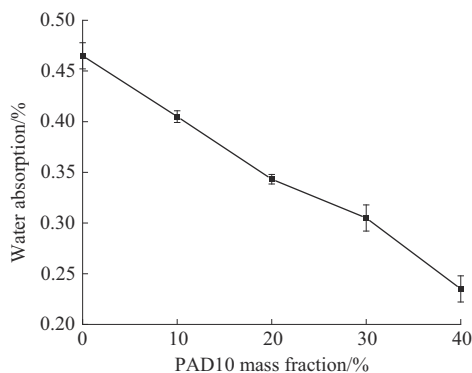


图9 PA510和PA510/D10的吸水率

Fig. 9 Water absorption of PA510 and PA510/D10

度上酰胺基团的密度,从而使得共聚物的吸水率下降。当PAD10盐的质量分数为40%时PA510/D10吸水率为0.236%,相较于PA510,吸水率降低了49%。

2.4 力学性能分析

图10和图11分别为PA510和PA510/D10的拉伸强度、断裂伸长率以及缺口冲击强度。随着PAD10含量的增加,PA510/D10的缺口冲击强度和断裂伸长率逐渐增大,而拉伸强度下降。当PAD10盐的质量分数为40%时,缺口冲击强度和断裂伸长

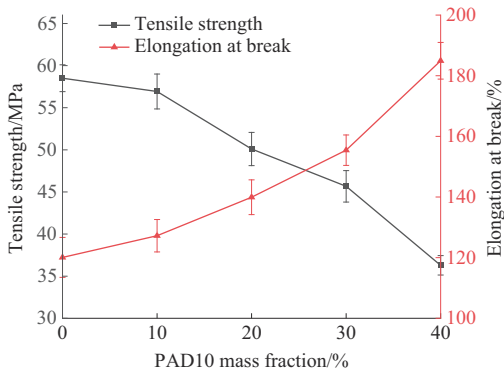


图10 PA510和PA510/D10的拉伸强度和断裂伸长率

Fig. 10 Tensile strength and elongation at break of PA510 and PA510/D10

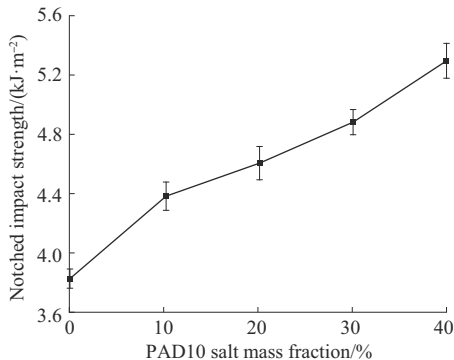


图11 PA510和PA510/D10的缺口冲击强度

Fig. 11 Notched impact of PA510 and PA510/D10

率分别为5.27 kJ/m²及185%,相较于PA510缺口冲击强度提高了38%,断裂伸长率增加了54%。脂环结构的引入破坏了PA510分子链的规整性,降低了PA510结晶度,形成了大量的无定形态非晶区,使其缺口冲击强度和断裂伸长率上升,而拉伸强度下降^[21]。

2.5 透光性能分析

图12为PA510和PA510/D10的透光率曲线,随着PAD10含量的增加,共聚酰胺的透光率不断增加。透光率和晶粒尺寸有关,当可见光波长大于晶粒尺寸时,可见光无法透过,导致材料不透明。PAD10的引入破坏了共聚酰胺大分子链的有序排列,导致结晶度下降。随着PAD10含量的不断增加,结晶能力不断下降,晶粒尺寸逐渐小。当晶粒尺寸越小时,透光率越高。当PAD10盐的质量分数为40%时,在波长为500 nm时的透光率由PA510的75%提高到90%。

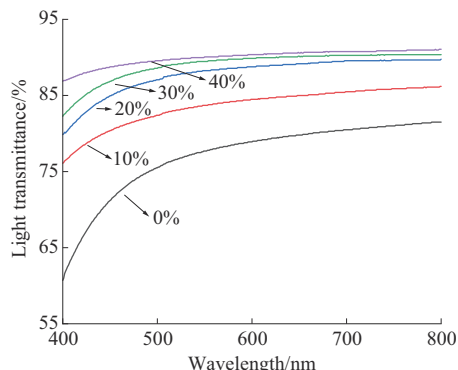


图12 PA510和PA510/D10的透光率曲线

Fig. 12 Light transmittance curves of PA510 and PA510/D10

3 结论

(1) 使用1,5-戊二胺、1,4-环己烷二胺分别与癸二酸反应得到PA510盐和PAD10盐,再通过熔融共缩聚制备出一种含脂环结构的生物基PA510/D10。通过FTIR与¹H-NMR分析证明成功制备了生物基PA510/D10。

(2) 随着PAD10含量的增加,共聚物的熔点、结晶温度和结晶度都逐渐下降,透光率明显上升。当PAD10盐的质量分数为40%时,共聚物在波长为500 nm时的透光率由PA510的75%提高到90%。

(3) PA510/D10有优异的热稳定性和较低的吸水率。当PAD10盐的质量分数为40%时,失重5%时的初始热分解温度为426.3℃,吸水率为0.236%,最大热失重速率温度相较于PA510上升了16.1℃。

(4) 随着 PAD10 含量的增加,共聚物的拉伸强度逐渐下降,但缺口冲击强度和断裂伸长率逐渐上升。当 PAD10 盐的质量分数为 40% 时,共聚物的缺口冲击强度和断裂伸长率分别为 5.27 kJ/m² 及 185%。

参考文献

- [1] RWEI S P, RANGANATHAN P, CHIANG W Y, et al. Synthesis and characterization of copolyamides derived from novel aliphatic bio-based diamine[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135 (48). DOI:10.1002/app.46878.
- [2] HABLOT E, DONNIO B, BOUQUEY M, et al. Dimer acid-based thermoplastic bio-polyamides: Reaction kinetics, properties and structure[J]. *Polymer*, 2010, 51(25):5 895–5 902.
- [3] ZHANG W, LIU J, LIU D, et al. Research on modification strategies of bio-based polyamide 56[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2025, 45(4):315–323.
- [4] ZHU R S, HU H M, SUN L N, et al. Tunable crystallization behavior, memory effect, and thermo-mechanical properties of biobased polyamides PA5X[J]. *Polymer*, 2024, 313. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127687.
- [5] AI T H, ZOU G J, FENG W T, et al. Synthesis and properties of biobased copolyamides based on polyamide 10T and polyamide 56 through one-pot polymerization[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(32):14 677–14 686.
- [6] 焦睿澍, 姜锋, 拖晓航, 等. 生物基聚酰胺 510 盐的制备及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(7):27–34.
JIAO Ruishu, JIANG Feng, TUO Xiaohang, et al. Preparation and properties of bio-based polyamide 510 salt[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(7):27–34.
- [7] 周一伟, 杨克俭, 马炼, 等. 半生物基尼龙 5T/510 的非等温结晶动力学研究[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(5):134–139.
ZHOU Yiwei, YANG Kejian, MA Lian, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of semi-biobased nylon 5T/510[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(5):134–139.
- [8] 熊峻博. 微波辅助制备六元脂环族聚酰胺[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
XIONG Junbo. Microwave-assisted synthesis of six-membered alicyclic polyamides[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.
- [9] 方思婷. 基于 1,4-环己二胺的六元脂环聚酰胺的合成及表征[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
FANG Siting. Synthesis and characterization of six-membered alicyclic polyamides based on 1,4-Cyclohexanediamine[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.
- [10] RADLMAIER V, HECKEL C, WINNACKER M, et al. Effects of thermal cycling on polyamides during processing[J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 648:44–51.
- [11] 田盼盼, 李迎春, 王文生, 等. 生物基聚酰胺 510 弹性体的制备及表征[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):33–38.
TIAN Panpan, LI Yingchun, WANG Wensheng, et al. Preparation and characterization of bio-based polyamide 510 elastomer[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3):33–38.
- [12] RWEI S P, RANGANATHAN P, CHIANG W Y, et al. Synthesis of low melting temperature aliphatic-aromatic copolyamides derived from novel bio-based semi aromatic monomer[J]. *Polymers*, 2018, 10(7). DOI:10.3390/polym10070793.
- [13] 黎杰, 王宜迪, 王兆程, 等. 一步法制备长碳链尼龙 1012 及其性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(7):29–36.
LI Jie, WANG Yidi, WANG Zhaocheng, et al. One-pot synthesis of long carbon-chain nylon 1012 and its properties[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(7):29–36.
- [14] FENG W T, WANG P L, ZOU G J, et al. Synthesis and characterization of semiaromatic copolyamide 10T/1014 with high performance and flexibility[J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2018, 21(1):33–42.
- [15] 沈嘉琪. 生物基尼龙 PA5T/5 F 的制备与性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.
SHEN Jiaqi. Preparation and properties of bio-based nylon PA5T/5 F[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- [16] 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 and characterization of polyamides derived from bio-based azelaic acid[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [17] 田盼盼. 生物基聚酰胺 510 弹性体的合成及性能表征[D]. 太原: 中北大学, 2024.
TIAN Panpan. Synthesis and characterization of bio-based PA510 elastomer[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [18] 廖名熹, 易勇, 李建林, 等. 生物基聚酰胺 510/聚酰胺热塑性弹性体的合成与性能[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(3):7–15.
LIAO Mingxi, YI Yong, LI Jianlin, et al. Synthesis and properties of bio-based polyamide 510/polyetheramine thermoplastic elastomer[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3):7–15.
- [19] 王忠强. 长碳链半芳香族耐热性聚酰胺的制备与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
WANG Zhongqiang. Synthesis and characterization of long-chain semi-aromatic polyamides with heat resistance[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [20] 刘宇辰. 半芳香族耐高温共聚酰胺 PA10T/11 的合成与表征[D]. 太原: 中北大学, 2013.
LIU Yuchen. Synthesis and characterization of semi-aromatic high-temperature copolyamide PA10T/11[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [21] 娄益波, 王书媚, 刘亚丽, 等. PA6/1,3-BAC-6 透明共聚尼龙的制备及性能[J]. *塑料工业*, 2022, 50(12):16–20.
LOU Yibo, WANG Shumei, LIU Yali, et al. Preparation and properties of PA6/1, 3-BAC-6 transparent copolymer nylon[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(12):16–20.