

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.005

生物基半芳香族 PA5T-co-56 的制备及性能

刘冰肖¹, 赵元博^{2,4}, 崔浩然¹, 朱允桢¹, 高凯¹, 杨晨^{2,4}, 张富春^{2,4}, 王忠强³

[1. 太原工业学院, 山西省聚酰胺工程技术创新中心, 太原 030051; 2. 上海凯赛生物技术股份有限公司, 上海 201203;

3. 广东中塑新材料股份有限公司, 广东东莞 523879; 4. 凯赛(太原)生物材料有限公司, 太原 030100]

摘要: 半芳香族聚对苯二甲酰戊二胺(PA5T)均聚物的熔融温度与热分解温度接近, 熔融加工时易分解。针对该问题, 以戊二胺、己二酸和对苯二甲酸为原料, 采用成盐+聚合法合成了 PA5T 和聚己二酰戊二胺(PA56)的共聚物(PA5T-co-56)。采用傅里叶变换红外光谱与核磁共振波谱测试对 PA5T-co-56 的结构进行了分析。在此基础上, 通过差示扫描量热分析、热重分析和 X 射线衍射分析对 PA5T-co-56 的热性能以及结晶性能进行了测试, 并对耐溶剂性进行了表征。结果显示: 随着共聚物结构中 PA56 链段含量的增加, PA5T-co-56 的结晶温度和熔融温度呈现逐渐下降的趋势, 当 PA56 链段的物质的量比为 40%, 50%, 60% 和 70% 时, 共聚物的熔融温度相较于 PA5T 的熔融温度分别下降了 56.42, 74.70, 83.03 °C 和 91.66 °C, 这主要是由于 PA56 链段的引入, 降低了聚合物分子链中刚性苯环的比例, 提升了分子链柔性所致; PA56 链段的引入并没有使聚合物热稳定性出现大幅度降低, 同时也没有改变聚合物的主要晶型, 晶体形式主要以 γ 型为主。

关键词: 生物基聚酰胺; 耐热性材料; 共聚酰胺; 聚对苯二甲酰/己二酰戊二胺; 半芳香族

中图分类号: TQ322.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0031-06

Preparation and properties of bio-based semi-aromatic PA5T-co-56

LIU Bingxiao¹, ZHAO Yuanbo^{2,4}, CUI Haoran¹, ZHU Yunzhen¹, GAO Kai¹, YANG Chen^{2,4}, ZHANG Fuchun^{2,4}, WANG Zhongqiang³

[1. Taiyuan Institute of Technology, Shanxi Center of Technology Innovation for Polyamide Materials, Taiyuan 030051, China;

2. Cathay Biotech Inc., Shanghai 201203, China; 3. Guangdong Sinoplast Advanced Material Co., Ltd., Dongguan 523879, China;

4. Cathay (Taiyuan) Biomaterial Co., Ltd., Taiyuan 030100, China]

Abstract : Poly (p-phthaloyl)pentanediamine (PA5T) homopolymer has a melting temperature close to its thermal decomposition temperature, making it prone to decomposition during melt processing. In response to the above issues, a copolymer (PA5T-co-56) of PA5T and poly (hexamethylene pentanediamine) (PA56) was synthesized using pentanediamine, adipic acid, and terephthalic acid as raw materials through salt formation+polymerization method. The structure of PA5T-co-56 was confirmed by fourier transform infrared spectroscopy and hydrogen nuclear magnetic resonance spectroscopy. On this basis, the thermal and crystallization properties of PA5T-co-56 were tested and studied by differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis and X-ray diffraction analysis, and its solvent resistance was characterized. The results show that with the increase in the content of PA56 segment in the copolymer structure, its crystallization temperature and melting temperature exhibit a gradual downward trend. When the mole percentages of the PA56 segment are 40%, 50%, 60% and 70%, the melting temperatures of the copolymer decrease by 56.42, 74.70, 83.03 °C and 91.66 °C respectively, compared to the melting temperature of PA5T. This is primarily attributed to the introduction of the PA56 segment, which reduces the proportion of rigid benzene rings in the polymer molecular chain and enhances the flexibility of the molecular chain. The introduction of PA56 segments does not significantly reduce the thermal stability of the polymer, and does not change the main crystallographic form of the polymer, which primarily consists of the γ -form.

Keywords : bio-based polyamide ; heat-resistant material ; copolyamide ; poly (p-phthaloyl/hexamethylene petanediamine) ; semi aromatic

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202303021222305), 太原市关键核心技术攻关“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0145), 太原工业学院人才引进博士(博士后)科研资助项目(2022KJ044)

通信作者: 杨晨, 博士, 主要从事生物基材料的研究

收稿日期: 2024-11-08

引用格式: 刘冰肖, 赵元博, 崔浩然, 等. 生物基半芳香族 PA5T-co-56 的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 31-36.

LIU Bingxiao, ZHAO Yuanbo, CUI Haoran, et al. Preparation and properties of bio-based semi-aromatic PA5T-co-56[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 31-36.

聚酰胺(PA)树脂可由内酰胺分子自聚而成或由二元胺和二元酸缩聚得到,根据其主链结构可分为脂肪族PA、半芳香族PA以及全芳香族PA^[1-3]。其中用量最大的脂肪族PA6和PA66具有优异的物理力学、耐摩擦、自润滑和噪声吸收性能,已被广泛应用于汽车、机械和电子电器等领域^[2-6]。随着表面贴装技术的发展(耐热温度 $\geq 270\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及光学、航空航天、军事等领域对材料耐热性、耐候性的较高要求,PA6和PA66等脂肪族PA的性能已经难以满足使用需求^[7-8]。全芳香族PA刚性苯环密度较大、耐热性优异,但其热分解起始温度低于熔融温度,因此难以进行熔融加工,限制了其进一步应用。半芳香族PA结构中同时包含柔性脂肪族链段和刚性苯环链段,结合了脂肪族PA良好的加工性和全芳香族PA卓越的耐热性^[9]。

目前,已经产业化的半芳香族PA主要有PA6T的共聚物、PA9T以及PA10T^[10-12]。相比于PA10T和PA9T,PA6T的耐热性较好、成本更低、市场竞争力较大。但石油基产品PA6T的发展局限于我国富煤、贫油、少气的能源现状和碳达峰、碳中和的环境压力^[13]。戊二胺与己二胺结构相近,凯赛生物公司生物基戊二胺已实现产业化^[14-16]。基于上述背景,以生物基戊二胺和对苯二甲酸为主要原料,制备得到了生物基聚对苯二甲酰戊二胺(PA5T),在此基础上,将脂肪族聚己二酰戊二胺链段(PA56)引入到PA5T分子主链中,制备得到加工窗口较宽的聚对苯二甲酰戊二胺和聚己二酰戊二胺的共聚物(PA5T-co-56),对PA5T和PA5T-co-56的结构进行了确认,同时对两者热性能、结晶性能以及耐溶剂性进行了测试表征。

1 实验部分

1.1 主要原材料

戊二胺:纯度 $>99.5\%$,上海凯赛生物技术股份有限公司;

对苯二甲酸:纯度 99% ,上海麦克林生化科技有限公司;

己二酸:纯度 $\geq 99\%$,上海麦克林生化科技有限公司;

去离子水:实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

磁力驱动反应釜:XSF-J,威海行雨化工机械有限公司;

循环水式多用真空泵:SHZ-95B,河南省予华仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-2001,上海一恒科学仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IS50,美国Thermo Nicolet公司;

核磁共振波谱仪:AVANCE III HD,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:Q5000,美国TA仪器公司;

X射线衍射(XRD)仪:TD3700,丹东通达科技有限公司。

1.3 PA5T和PA5T-co-56盐的制备

分别按照表1的配比称取适量戊二胺、己二酸、对苯二甲酸以及上述原料质量分数 30% 的去离子水,加入到三口烧瓶中,随后逐渐升温至 $50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此温度下持续反应 2 h ,调节pH值至适当值,反应结束后将样品放置于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的真空干燥箱中干燥 24 h ,得到PA5T和PA5T-co-56盐。

表1 PA5T和PA5T-co-56原料的物质的量比

Tab. 1 Molar ratio of raw materials for PA5T and PA5T-co-56

Samples	Pentanediamine	Terephthalic acid	Adipic acid
PA5T	1	1	0
PA5T-co-56-0.4	1	0.6	0.4
PA5T-co-56-0.5	1	0.5	0.5
PA5T-co-56-0.6	1	0.4	0.6
PA5T-co-56-0.7	1	0.3	0.7

1.4 PA5T和PA5T-co-56的制备

将得到的上述不同配方的盐及适量的去离子水加入高温高压聚合釜中,通入氮气吹扫聚合釜内 5 min ,随后将反应体系在 2 h 内逐步升温至 $220\sim 230\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此温度下维持釜内压力在 2.0 MPa ,反应 1 h 后,逐步泄压至常压,同时升温至 $240\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,继续抽真空至 -0.09 MPa ,在此温度和压力下反应 $1\sim 3\text{ h}$,取出样品。得到PA5T和PA5T-co-56聚合物。

1.5 测试与表征

FTIR测定:将少量样品与溴化钾进行混合、研磨后进行压片和测试,测试模式为透射模式。

核磁共振氢谱表征:将少量样品溶于氘代三氟乙酸溶剂中,随后进行测试和确认聚合物结构。

XRD测试:分别将各个配方聚合物样品放入XRD仪中进行测试,设置扫描范围为 $5^{\circ}\sim 80^{\circ}$,扫描速度为 $5^{\circ}/\text{min}$ 。

DSC 测试:称取 3~10 mg 样品置于坩埚中,以 40 °C/min 速率升温至样品熔融温度以上,在此温度下保持 5 min 来消除热历史,随后以 20 °C/min 速率降温至 30 °C,在此温度下保持 5 min,随后再以 20 °C/min 速率升温至样品的熔融温度以上,记录 DSC 的降温曲线和二次升温曲线。

TG 测试:将适量样品放置于坩埚,在氮气氛围下,以 10 °C/min 的速率逐步升温至 700 °C,记录 TG 曲线。

耐溶剂性测试:将适量样品分别置于四氢呋喃、二甲基甲酰胺、二甲基亚砆、苯、甲醇、浓硫酸等溶剂中,在 25 °C 温度条件下,打开搅拌,放置 24 h 后,测试质量是否发生变化,判断是否溶解,记录测试结果。

2 结果与讨论

2.1 PA5T 和 PA5T-co-56 的 FTIR 分析

PA5T 和 PA5T-co-56 的 FTIR 曲线如图 1 所示。图 1 中 3 300~3 500 cm^{-1} 处的峰对应氨基的 N—H 伸缩振动吸收峰;1 635 cm^{-1} 处为酰胺 I 带(C=O 的伸缩振动峰);1 547 cm^{-1} 处为酰胺 II 带(C—N 伸缩振动峰和 N—H 面内弯曲振动峰);1 496 cm^{-1} 处为酰胺 III 带(C—N 的伸缩振动峰和 C—H 面内弯曲振动峰);1 285 cm^{-1} 处对应酰胺 IV 带(C—C=O 的伸缩振动吸收峰)。720 cm^{-1} 处是 CH_2 摇摆振动峰,680 cm^{-1} 处对应 N—H 面外弯曲振动峰^[17]。PA5T-co-56 盐的 NH_3^+ 合频和倍频吸收峰在 2 130 cm^{-1} 附近也没有出现,证明确实合成了 PA5T 和 PA5T-co-56 树脂。

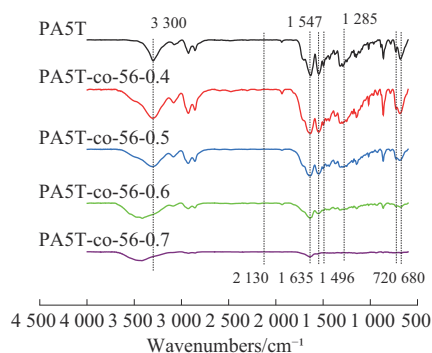


图1 PA5T 和 PA5T-co-56 的 FTIR 图

Fig. 1 FTIR spectra of PA5T and PA5T-co-56

2.2 核磁共振氢谱分析

图 2 为 PA5T 和 PA5T-co-56-0.6 的核磁共振氢谱图。图 2 位置 1 对应 PA5T 和 PA5T-co-56 聚合物在苯环上的氢原子,位置 2 对应酰胺基后第一个碳原子上的氢原子,位置 3 对应酰胺基后第二个碳原子

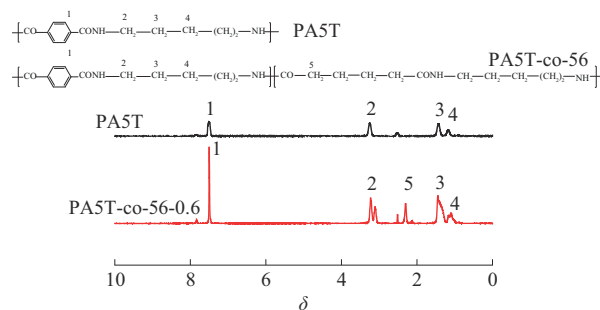


图2 PA5T 和 PA5T-co-56-0.6 的核磁共振氢谱图

Fig. 2 Hydrogen nuclear magnetic resonance spectroscopy of PA5T and PA5T-co-56-0.6

上的氢原子,位置 4 对应酰胺基后第 3 个碳原子上的氢原子。从图 2 还可以发现,相较于 PA5T,PA5T-co-56 的曲线中在位置 5 明显多出峰,该位置峰对应己二酸结构中酰胺基相连的第一个亚甲基上的氢原子。上述出峰位置与该聚合物的理论出峰位置一致,进一步确认了 PA5T 和 PA5T-co-56 树脂的结构。

2.3 DSC 分析

图 3 和图 4 分别为 PA5T 和 PA5T-co-56 的结晶曲线和二次升温熔融曲线图。各个配方的结晶温度和熔融温度值列于表 2。从图 3 可以看出,当聚合物分子链中引入 PA56 链段后,结晶峰的宽度无明显

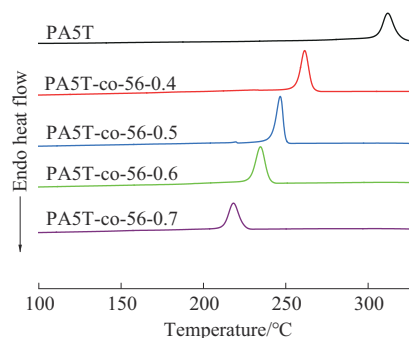


图3 PA5T 和 PA5T-co-56 的结晶曲线

Fig. 3 Crystallization curves of PA5T and PA5T-co-56

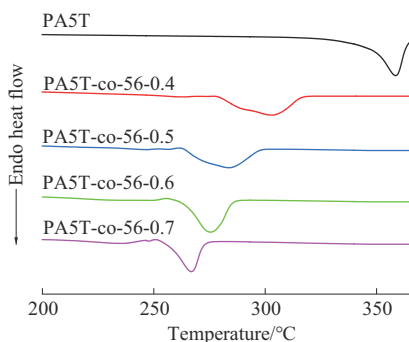


图4 PA5T 和 PA5T-co-56 的熔融曲线

Fig. 4 Melting curves of PA5T and PA5T-co-56

变化趋势,这可能是由于己二酸的四个亚甲基的长度为 0.508 nm。同时,对苯二甲酸的苯环与 35°链长方向的长度为 0.510 nm,己二酸和对苯二甲酸的链长相似,因此其晶体结构类似^[18]。从表 2 可以发现,随着 PA56 链段含量的增加,聚合物的结晶温度和熔

融温度均呈现递减趋势,这可能是由于 PA5T 的分子链中含有刚性苯环,而 PA56 链段是由脂肪族二胺和二酸反应制备得到,分子链柔性较大,随着 PA56 链段含量的增加,共聚物的分子链刚性逐渐降低,因此结晶温度和熔融温度逐渐降低。

表 2 PA5T 和 PA5T-co-56 的 DSC 和 TG 测试数据
Tab. 2 DSC and TG test datas of PA5T and PA5T-co-56

Samples	Melting temperature	Crystallization temperature	°C	
			Thermal decomposition 5% temperature	Maximum degradation rate temperature
PA5T	358.54	311.94	419.85	473.56
PA5T-co-56-0.4	302.12	261.50	390.64	463.98
PA5T-co-56-0.5	283.84	246.64	389.47	463.07
PA5T-co-56-0.6	275.51	234.66	395.56	460.92
PA5T-co-56-0.7	266.88	218.21	396.43	456.83
PA6T/66	Near 302	263.70	406.00	464.00

图 5 和图 6 分别为 PA5T 和 PA5T-co-56 的 TG 和 DTG 曲线图。不同配方的热分解 5% 温度、最大热降解速率温度列于表 2,从表 2 可以发现,当向 PA5T 分子链中引入 PA56 链段后,并未使聚合物热分解 5% 温度及最大热降解速率温度出现大幅度降低。而当加入 PA56 链段的物质的量比分别为 40%, 50%, 60% 和 70% 时,共聚物的熔融温度相较于 PA5T 的熔融温度分别下降了 56.42, 74.70,

83.03 °C 和 91.66 °C, PA56 链段的引入可显著降低聚合物的熔融温度。因此, PA5T-co-56 较 PA5T 具有更宽的加工窗口。同时可以发现, PA5T-co-56-0.4 熔融温度和热分解温度与 PA6T/66 性能接近,具有与 PA6T/66 相当的耐热性,可替代 PA6T/66 使用^[19]。

2.4 XRD 分析

PA5T 和 PA5T-co-56 的 XRD 曲线如图 7 所示,从图 7 可以发现, PA5T 和 PA5T-co-56 的曲线在 6.53° 和 21.00° 附近均出现了衍射峰,其中 6.53° 处为饱和烷烃链在进行有序排列后对 (001) 面的影射^[20]。而 21.00° 处较强的衍射峰峰高和峰宽均未随着 PA56 链段含量的增加有明显变化。通过计算, PA5T 和 PA5T-co-56 主要晶型尺寸列于表 3,从表 3 可以看出, PA5T 和 PA5T-co-56 具有相近的晶粒尺寸。PA56 链段的引入并没有对 PA5T 的主要晶形及

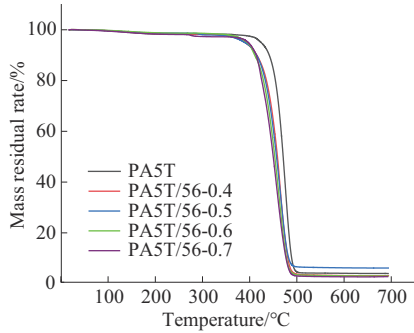


图 5 PA5T 和 PA5T-co-56 的 TG 曲线
Fig. 5 TG curves of PA5T and PA5T-co-56

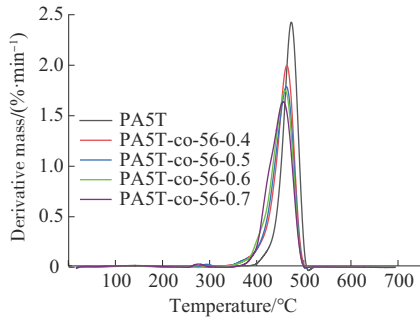


图 6 PA5T 和 PA5T-co-56 的 DTG 曲线
Fig. 6 DTG curves of PA5T and PA5T-co-56

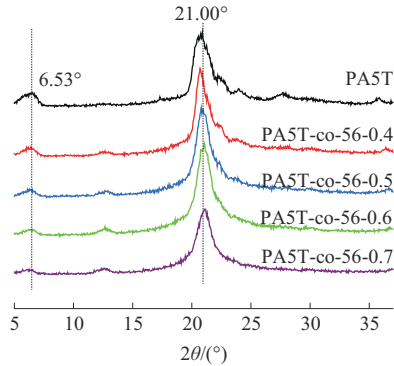


图 7 PA5T 和 PA5T-co-56 的 XRD 图
Fig. 7 XRD patterns of PA5T and PA5T-co-56

表3 PA5T 和 PA5T-co-56 的晶粒尺寸
Tab. 3 Grain size of PA5T and PA5T-co-56

Samples	PA5T	PA5T-co-56-0.4	PA5T-co-56-0.5	PA5T-co-56-0.6	PA5T-co-56-0.7
Grain size/nm	4.26	4.30	4.24	4.03	3.96

晶体尺寸造成较大影响,其晶型均以 γ 型为主,这与上述结晶曲线的结果分析一致^[21-22]。

2.5 耐溶剂性分析

表4为PA5T和PA5T-co-56的耐溶剂性测试结果,将PA5T和PA5T-co-56在25℃条件下放置24 h,在甲醇、苯、四氢呋喃、二甲基甲酰胺、二甲基亚砷等有机溶剂中,测试样品的质量没有发生变化,只在浓硫酸中完全溶解,各个配方样品均具有良好的耐溶剂性,这是由于PA分子链之间存在较强的氢键作用,分子间作用力较大所致。良好的耐溶剂性使PA5T和PA5T-co-56可满足在大多数耐腐蚀性的工况下使用。

表4 PA5T 和 PA5T-co-56 的耐溶剂性测试结果
Tab. 4 Solvent resistance test results of PA5T and PA5T-co-56

Materials	PA5T	PA5T-co-56-0.4	PA5T-co-56-0.5	PA5T-co-56-0.6	PA5T-co-56-0.7
Methanol	—	—	—	—	—
Benzene	—	—	—	—	—
Tetrahydrofuran	—	—	—	—	—
Dimethylformamide	—	—	—	—	—
Dimethyl sulfoxide	—	—	—	—	—
Concentrated sulfuric acid	+	+	+	+	+

Notes: + means dissolution; — means non-dissolution.

3 结论

以戊二胺、对苯二甲酸和己二酸为原料,分别合成了PA5T和PA5T-co-56,并对聚合物结构、热性能、结晶性能以及耐溶剂性能进行了表征分析。结果显示,随着PA56链段占比的增加,聚合物结晶温度和熔融温度均呈递减趋势,这是由于PA56链段的引入降低了聚合物的分子量刚性所致;PA56链段的引入没有使聚合物热稳定性出现大幅度降低,同时也没有改变PA5T的主要晶形,晶型均为 γ 型;PA5T和PA5T-co-56具有较好的热稳定性和耐溶剂性,当PA56链段含量达到50%时,共聚物熔融温度仍大于280℃,同时PA5T-co-56有更宽的加工窗口,在电子电器、LED以及汽车领域有较大应用前景。

参考文献

- [1] 费芙蓉,唐晓东,李晶晶.聚酰胺树脂的合成研究进展[J].化工新型材料,2023,51(S1):7-11,15.
FEI Furong, TANG Xiaodong, LI Jingjing. Progress in synthesis of polyamide resins[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(S1): 7-11, 15.
- [2] 胡君,贺金梅,黄玉东,等.半芳香聚酰胺合成研究现状[J].化工新型材料,2008(10):23-27.
HU Jun, HE Jinmei, HUANG Yudong, et al. Present status of synthesis investigation on semi-aromatic polyamides[J]. New Chemical Materials, 2008(10):23-27.
- [3] 方春晖.半芳香透明聚酰胺10I/10T的合成与表征[D].太原:中北大学,2017.
FANG Chunhui. Synthesis and characterization of semiaromatic transparent polyamide 10I/10T[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [4] 武嘉,田国锋,罗金华,等.半芳香族耐高温聚酰胺的制备及性能[J].工程塑料应用,2023,51(8):21-25.
WU Jia, TIAN Guofeng, LUO Jinhua, et al. Preparation and properties of semi-aromatic high-temperature resistant polyamide[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):21-25.
- [5] 吴娉婷.半芳香聚酰胺的可纺性能研究[D].上海:东华大学,2012.
WU Pingting. Study on the spinnability of semi-aromatic polyamide [D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [6] 刘悦.尼龙66及尼龙MXD6的合成及关键影响因素研究[D].北京:北京化工大学,2023.
LIU Yue. Study on the synthesis and key influencing factors of nylon 66 and nylon MXD6[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [7] 赖星,王纯,肖长发.芳香族聚酰胺分离膜制备方法及应用进展[J].纺织学报,2021,42(10):172-179.
LAI Xing, WANG Chun, XIAO Changfa. Progress in preparation and application of aromatic polyamide separation membrane[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(10):172-179.
- [8] 刘泽新,刘虎,袁鸣,等.熔融共混加工过程中的酰胺交换反应[J].高分子通报,2023,36(6):669-687.
LIU Zexin, LIU Hu, YUAN Ming, et al. Transamidation of polyamide melt blending process[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2023, 36(6):669-687.
- [9] 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. Preparation and properties of long carbon chain semi-aromatic heat resistance polyamides[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [10] 张美林,岳文斌,郎绪志,等.半芳香族聚酰胺特种工程塑料的发展与应用现状[J].中国塑料,2020,34(5):115-122.
ZHANG Meilin, YUE Wenbin, LANG Xuzhi, et al. Development

- and application of special engineering plastics: Semi-aromatic polyamide[J]. *China Plastics*, 2020, 34(5):115–122.
- [11] 贺爽爽,胡国胜,张静婷,等.半芳香族聚酰胺合成与改性研究进展[J].*工程塑料应用*,2020,48(10):151–156.
HE Shuangshuang, HU Guoshen, ZHANG Jingting, et al. Research progress on synthesis and modification of semi-aromatic polyamides[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10): 151–156.
- [12] 张凯,赵建青,刘述梅,等.半芳香族尼龙的结构性能及其应用[J].*石油化工*, 2015, 44(5). DOI: 10.3969/j. issn. 1000-8144.2015.05.002.
ZHANG Kai, ZHAO Jianqing, LIU Shumei, et al. Structure, properties and applications of semi-aromatic nylons[J]. *Petrochemical Technology*, 2015, 44(5). DOI: 10.3969/j. issn. 1000-8144.2015.05.002.
- [13] 刘思敏,齐海山.赖氨酸脱羧酶分子改造及固定化合成1,5-戊二胺研究进展[J].*生物工程学报*,2022,38(12):4 403–4 419.
LIU Simin, QI Haishan. Molecular engineering and immobilization of lysine decarboxylase for synthesis of 1, 5-diaminopentane: A review[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(12): 4 403–4 419.
- [14] 王晓晨.聚酰胺关键单体二元胺生产技术的进展[J].*石油化工*, 2023, 52(10):1 461–1 469.
WANG Xiaochen. Progress in production technology of polyamide key monomer diamine[J]. *Petrochemical Technology*, 2023, 52 (10):1 461–1 469.
- [15] 邓洁,高震,高华,等.生物酶法合成1,5-戊二胺的研究进展[J].*广西科学*,2017,24(1):40–47,53.
DENG Jie, GAO Zhen, GAO Hua, et al. Research progress on of the biosynthesis of 1, 5-diaminopentane[J]. *Guangxi Science*, 2017, 24(1):40–47, 53.
- [16] 倪金平,路丹,陈林飞,等.玻璃纤维增强生物基PA5T/56的制备与性能[J].*塑料工业*,2021,49(3):32–37.
NI Jinping, LU Dan, CHEN Linfei, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced bio-based PA5T/56 composites[J]. *Plastic Industry*, 2021, 49(3):32–37.
- [17] 刘冰肖,武宇,杨蕾蕾,等.生物基耐热性PA5T和PA5T/510的制备及性能[J].*工程塑料应用*,2022,50(11):39–43.
LIU Bingxiao, WU Yu, YANG Leilei, et al. Preparation and properties of Bio-based Heat-resistant PA5T and PA5T/510[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(11):39–43.
- [18] RWEI Syangpeng, TSENG Yuchi, CHIU Kueichen, et al. The crystallization kinetics of nylon 6/6T and nylon 66/6T copolymers [J]. *Thermochimica Acta*, 2013, 555:37–45.
- [19] 李远远.半芳香族耐高温聚酰胺6T/66的制备与性能研究[D].太原:中北大学,2019.
LI Yuanyuan. Preparation and properties of semi-aromatic high temperature resistant polyamide 6T/66[D]. Taiyuan:North University of China, 2017.
- [20] 李海杰.共聚酰胺PA5T/54的合成及结构研究[D].郑州:郑州大学,2021.
LI Haijie. Synthesis and structure of copolyamide PA5T/54[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2021.
- [21] 高远博.高耐热交替共聚酰胺的制备与性能研究[D].上海:东华大学,2022.
GAO Yuanbo. Synthesis and characterization of alternating copolyamides with high heat resistance[D]. Shanghai: Donghua university, 2022.
- [22] FENG Wutong, WANG Pingli, ZOU Guangji, 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.