

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.009

耐高温 PA5T/55 的制备及性能

刘羽玲¹, 贺爽爽², 刘冰肖², 李媛², 崔林晖², 谭善兴¹, 刘显勇¹, 王忠强¹, 张慧斌²

(1. 广东中塑新材料股份有限公司, 广东东莞 523860; 2. 太原工业学院, 太原 030051)

摘要: 半芳香族聚对苯二甲酰戊二胺(PA5T)的熔融温度与分解温度接近, 导致其加工时易分解。基于上述背景, 将脂肪族聚戊二酰戊二胺(PA55)链段引入 PA5T 均聚物中以改善其加工性。以戊二酸、对苯二甲酸和戊二胺为原料, 通过成盐、预聚和固相缩聚法制备了不同 PA55 链段含量的聚对苯二甲酰/戊二酰戊二胺共聚物(PA5T/55)。采用傅里叶变换红外光谱仪和核磁共振氢谱对共聚物的结构进行了确认, 在此基础上, 利用差示扫描量热仪、热重分析仪、X 射线衍射仪以及万能试样机分别对其熔融温度、热分解温度、结晶性能以及物理力学性能进行了测试表征。研究结果显示, 随着 PA55 链段含量的增加, PA5T/55 的结晶度和熔融温度均呈现下降趋势; 当共聚物二元酸中 PA55 链段物质的量为 50% 时, 其熔融温度为 311.4 °C, 质量损失 5% 时的温度为 426.15 °C, 最大热降解速率温度为 474.80 °C, 质量损失 95% 时的温度为 498.49 °C, 拉伸强度为 67.9 MPa, 综合性能优异。PA5T/55 共聚物具有良好的耐热性和比较宽的加工窗口, 在电子电器、LED 显示照明及汽车等领域有较大应用前景。

关键词: 固相聚合; 半芳香族聚酰胺; 生物基材料; 聚对苯二甲酰戊二胺

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0055-06

Preparation and performance of heat-resistant PA5T/55

LIU Yuling¹, HE Shuangshuang², LIU Bingxiao², LI Yuan², CUI Linhui²,
TAN Shanxing¹, LIU Xianyong¹, WANG Zhongqiang¹, ZHANG Huibin²

(1. Guangdong Sinoplast Advanced Plastic Co., Ltd., Dongguan 523860, China; 2. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract : The melting temperature and decomposition temperature of semi-aromatic poly (pentamethylene terephthalamide) (PA5T) are close, resulting in its easy decomposition during processing. Based on the above background, the aliphatic poly (glutaryl-pentanedi-amine) (PA55) segment was introduced into the homopolymer to improves its processability. PA5T/55 with different PA55 segment contents were prepared using glutaric acid, terephthalic acid, and pentanedi-amine as raw materials through salt formation, pre polymerization, and solid-phase condensation method. The structure of the copolymer was confirmed using Fourier transform infrared spectroscopy and hydrogen nuclear magnetic resonance spectroscopy. Based on these, the melting temperature, thermal decomposition temperature, crystallization performance, and physical and mechanical properties were tested and characterized by using differential scanning calorimetry, thermogravimetric analyzer, X-ray diffractometer, and universal testing machine. The research results show that the crystallinity and melting temperature of PA5T/55 show a downward trend with the increase of PA55 segment content. When the mole traction of 55 segments in the dibasic acid copolymer is 50%, its melting temperature is 311.40 °C, the temperature for thermal degradation of 5% is 426.15 °C, the maximum thermal degradation rate temperature is 474.80 °C, the temperature for thermal degradation of 95% is 498.49 °C, the tensile strength is 67.9 MPa, and the comprehensive performance is excellent. PA5T/55 copolymer has good heat resistance and a relatively wide processing window, and has great application prospects in fields such as electronics, LED display lighting and automobiles.

Keywords : solid phase polymerization ; semi-aromatic polyamide ; bio-based material ; poly(glutaryl-pentanedi-amine)

基金项目: 2023 年中塑公司-太原工业学院产学研合作项目(820668)

通信作者: 王忠强, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高分子合成与共混改性

收稿日期: 2024-02-01

引用格式: 刘羽玲, 贺爽爽, 刘冰肖, 等. 耐高温 PA5T/55 的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 55-60.

LIU Yuling, HE Shuangshuang, LIU Bingxiao, et al. Preparation and performance of heat-resistant PA5T/55[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 55-60.

聚酰胺(PA)材料又被称为尼龙,无毒、无味,一般呈颗粒或粉末状^[1]。其结构对称,易于结晶,具有良好的耐化学性、耐磨性和耐疲劳性,能够在长期使用中保持稳定的性能,被广泛应用于汽车、光学以及电子电器等领域^[2-4]。脂肪族PA由脂肪族二胺和脂肪族二酸缩聚反应制得。目前,应用最广泛的脂肪族PA为聚己内酰胺(PA6)和聚己二酰己二胺(PA66)^[5-7]。全芳香族PA由芳香族二胺和芳香族二酸反应聚合而成,其苯环密度及分子间作用力较大,熔融温度很高,大于材料热分解起始温度,导致无法熔融加工^[8]。半芳香族PA结构中具有耐热性苯环以及柔性脂肪族链段,兼具耐热性及可加工性^[9-14]。

随着表面贴装技术(SMT)的发展,要求树脂能够承受较高的回流焊温度^[8]。同时,LED照明及汽车领域也对树脂的耐热性提出了更高的要求。传统的脂肪族PA6和PA66的熔融温度低于260℃,其耐热性已经难以满足使用需求,而对于全芳香族PA,加工难度高及较高的成本限制其进一步应用,因此半芳香族PA成为了理想材料。

目前,聚对苯二甲酰己二胺(PA6T)、聚对苯二甲酰壬二胺(PA9T)以及聚对苯二甲酰癸二胺(PA10T)已实现产业化应用。PA9T的主要原料壬二胺可生产公司较少且工艺较为复杂;PA10T成本较PA9T有所下降,但仍处于较高水平。PA6T成本较低,目前在半芳香族耐高温PA中应用较为广泛,但PA6T为石油基产品^[15]。近年来,日益消耗的石化能源对环境造成的压力日趋增加,生物基的材料制备和使用有助于减少对传统石油化学产物的依赖,降低环境污染,推动可持续发展^[16-18]。基于上述背景,开发低成本生物基半芳香族耐高温PA成为了研究趋势。

戊二胺的初始原料为玉米,与己二胺分子量和结构相似,成本与己二胺接近。但聚对苯二甲酰戊二胺(PA5T)的熔融温度与其热降解起始温度接近,熔融加工时易分解^[19-20]。通常向分子链中引入脂肪族链段、硫醚基等柔性基团可以降低聚合物分子链刚性和进行聚合物结晶度调节,改善聚合物加工性^[21-23]。李海杰^[24]以戊二胺、对苯二甲酸和丁二酸为原料,分别通过高温熔融聚合和低温直接固相聚合制备得到PA5T/54,指出反应温度是影响共聚物酰亚胺化及颜色变化的主要因素,同时对两种合成

方式制备共聚物的结构、热性能、结晶性能进行了研究。叶耀挺等^[25]以戊二胺、对苯二甲酸和己二酸为主要原料,采用高温溶液聚合法合成了PA5T和聚己二酰戊二胺(PA56)的共聚物PA5T/56,并将PA5T/56与聚对苯二甲酰己二酰己二胺(PA6T/66)的熔融温度、热稳定性、动态热机械性能和力学性能进行了测试研究。结果显示PA5T/56和PA6T/66综合性能基本一致。杨克俭等^[26]对无规和嵌段共聚的PA5T/56结构和性能进行测试研究,表明无规共聚PA5T/56的平均结晶速率和结晶能力较嵌段共聚PA5T/56更高。

基于上述背景,以生物基戊二胺、对苯二甲酸以及戊二酸为原料,通过将脂肪族戊二酰戊二胺(PA55)链段引入分子主链中,合成了聚对苯二甲酰/戊二酰戊二胺(PA5T/55)共聚物,并对共聚物结构和PA55链段对共聚物热性能和结晶性能的影响规律进行了测试研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

戊二酸:化学纯,上海麦克林生化科技有限公司;

戊二胺:化学纯,上海凯赛生物技术股份有限公司;

对苯二甲酸:化学纯,上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

真空干燥箱:DZF-6055,上海一恒科学仪器有限公司;

搅拌器:JJ-1,常州荣华仪器制造有限公司;

恒温智能油浴锅:HH-S2,巩义市予华仪器责任有限公司;

聚合釜:XSF-10,威海行雨化工机械有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:TENSOR27,德国布鲁克公司;

热重(TG)分析仪:TGA2-SF,德国耐驰公司;

X射线衍射(XRD)仪:TD-3700,丹东通达科技有限公司;

核磁共振仪:Bruker DPX-400,美国Bruker公司;

万能试样机:AI,高铁检测仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q20,美国TA公司。

1.3 试样制备

1.3.1 PA5T/55 盐的制备

将戊二胺、对苯二甲酸(PTA)和戊二酸按表1中的配方及适量去离子水加入聚合釜中,待全部加入后开启搅拌,升温至50℃,反应1.5 h后得到不同PA55链段含量的PA5T/55盐乳液。对乳液进行抽滤,再在真空干燥箱里烘干12 h,去除水分,得到不同PA55链段含量的PA5T/55盐。

表1 PA5T/55盐制备实验配方

Tab. 1 PA5T/55 experimental formula

Sample	Pentanediamine	PTA	Glutaric acid
S1	1	0.5	0.5
S2	1	0.6	0.4
S3	1	0.7	0.3

1.3.2 PA5T/55 聚合物的制备

PA5T/55聚合物的制备流程如下。将不同配方的盐分别加入聚合釜中,同时加入适量去离子水。首先通5 min氮气置换聚合釜中空气,然后开始程序升温,待温度上升到200~260℃时,保温保压反应一段时间。最后将气体缓慢放气至常压,负压继续反应一段时间后,取出样品,得到聚合物。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试:将聚合物粉末与溴化钾混合压片。使用FTIR仪的TR模式进行结构检测。

¹H NMR测试:利用高分辨液体核磁共振波谱仪检测所制备的生物基PA5T/55样品的¹H NMR谱图,氢谱的测试频率为400 MHz,称量2~3 mg样品加入到核磁氢谱专用核磁管,用氘代三氟乙酸为溶剂,溶解24 h后对样品进行结构表征。

XRD测试:将PA5T/55样品粉碎,取适当大小的样片,将样片放在XRD仪上开始测试,采用连续扫描的方法,以6°/min的扫描速度,在5°~80°范围内扫描得到PA5T/55的衍射图样。

DSC测试:将所制备样品称取30~50 mg在小坩埚中制样,然后升高温度到PA5T/55熔融温度以上,一段时间后系统消除热力学历史,然后以10℃/min速率降至常温,再以10℃/min速率升高温度至PA5T/55熔融温度以上,记录相应曲线。

TG测试:称取适量样品,在通氮气的情况下,以10℃/min的速度开始升温,从常温升温至800℃,得到PA5T/55的TG和DTG曲线。

拉伸强度测试:按照GB/T 1040-2006标准进行拉伸强度测试,拉伸速率为50 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 PA5T/55 的FTIR分析

图1为PA5T/55(S1)的FTIR谱图。从图1可以看出,3 307 cm⁻¹处的峰为N—H的伸缩振动吸收峰,2 929 cm⁻¹和2 860 cm⁻¹处的峰是—CH₂—的伸缩振动吸收峰,位于1 643,1 537,1 289,1 020 cm⁻¹处的峰分别对应PA的I带到IV带,682 cm⁻¹处的峰为N—H面外弯曲振动峰,这与文献[7]中PA的FTIR图出峰位置一致,证明成功合成了PA5T/55共聚物。

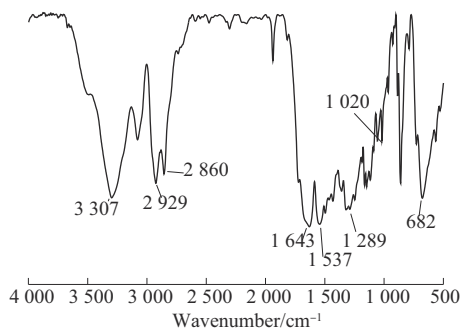


图1 PA5T/55(S1)的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR spectra of PA5T/55 (S1)

2.2 ¹H NMR分析

图2为PA5T/55(S1)的¹H NMR图。其中,位置1的峰对应的是PA5T/55共聚物苯环上的氢原子,位置2和位置3的峰分别对应戊二胺上与酰胺基连接的第一个亚甲基上的氢原子以及戊二胺上与酰胺基相连接的第二个亚甲基上的氢原子,位置4的峰对应的是戊二胺上与酰胺基相连接的第三个亚甲基上的氢原子,位置5的峰对应的是戊二酸上第一个亚甲基上的氢原子。上述位置的峰与PA5T/55的理论出峰位置一致,进一步确认了PA5T/55共聚物的结构。

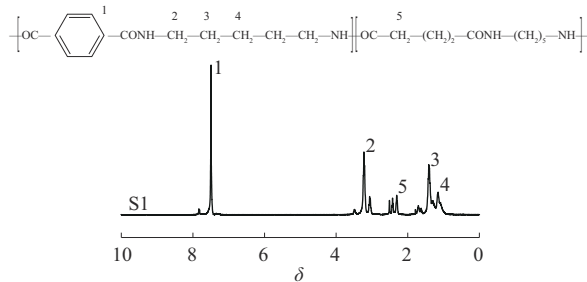


图2 PA5T/55(S1)的¹H NMR谱图

Fig. 2 ¹H NMR spectra of PA5T/55 (S1)

2.3 PA5T/55 聚合物的结晶性能

图3显示了不同PA55链段含量的PA5T/55的

XRD图谱,峰值列于表2。从图3和表2可以看出,随着PA55链段含量的增加,PA5T/55在22°附近均出现了一个宽的吸收峰,且随着PA55链段含量的增加,吸收峰略微变宽,峰值逐渐降低。这是由于随着分子链中PA55链段含量的增加,共聚物分子链的规整性逐渐变差,以及结晶能力和结晶度下降而导致X射线衍射峰变宽。

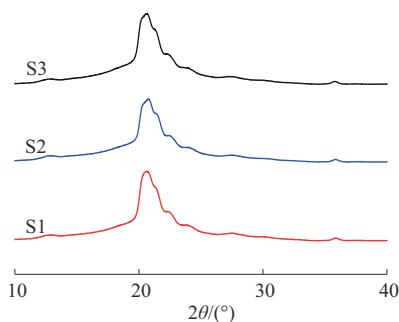


图3 不同PA55链段含量的PA5T/55的XRD图谱

Fig. 3 XRD pattern of PA5T/55 with different PA55 segment content

表2 PA5T/55(S1)的XRD, DSC和TG参数

Tab. 2 XRD, DSC and TG parameters of PA5T/55 (S1)

Samples	Peak value	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_{5\%}/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_{95\%}/^\circ\text{C}$
S1	63 346	311.40	426.15	474.80	498.49
S2	69 209	315.19	—	—	—
S3	70 833	327.20	—	—	—

Note: T_m is melting temperature; $T_{5\%}$ is mass loss 5% temperature; T_p is maximum thermal degradation rate temperature; $T_{95\%}$ is mass loss 95% temperature.

2.4 DSC分析

图4为不同PA55链段含量的PA5T/55的DSC曲线图。熔融温度值列于表2。从图4和表2可以观察到,共聚物结构中PA55链段含量的增加导致共聚物的熔融温度呈现逐渐下降的趋势。这一方面是由于PA55链段为脂肪族链段,随着PA55链段含量的增加,共聚物中刚性苯环的占比下降,共聚物分子链柔性增加;另一方面,55链段的加入破坏了分子链的规整性,导致共聚物结晶度有所下降,这与XRD分析一致。上述两方面原因导致随着PA55链段含量的增加,PA5T/55共聚物的熔融温度逐渐

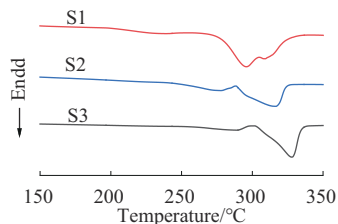


图4 PA5T/55的DSC图

Fig. 4 DSC melting curves of PA5T/55

下降。同时,针对市场应用产品的需求,将PA5T/55的熔融温度控制到满足实际应用的温度(310~315 °C较佳),确定这3个实验配方中S1最佳,其熔融温度为311.40 °C,故以下重点对S1进行分析。

2.5 TG分析

由于PA55链段的加入对PA5T/55共聚物的分解温度影响不大,故重点对PA5T/55 (S1)进行分析。图5显示了PA5T/55 (S1)的TG和DTG曲线。从图5可以发现,聚合物在升温过程中只出现了一个失重峰,说明PA5T/55是一步降解,这与现有的文献报道一致^[27]。其质量损失5%温度($T_{5\%}$)、最大热降解速率温度(T_p)和质量损失95%温度($T_{95\%}$)等参数见表2。从表2可以看出,PA5T/55 (S1)的 $T_{5\%}$ 为426.15 °C, T_p 达到474.80 °C,具有优异的热稳定性。同时,PA5T/55 (S1)的熔融温度(T_m)为311.40 °C,表明共聚物具有较宽的加工窗口。

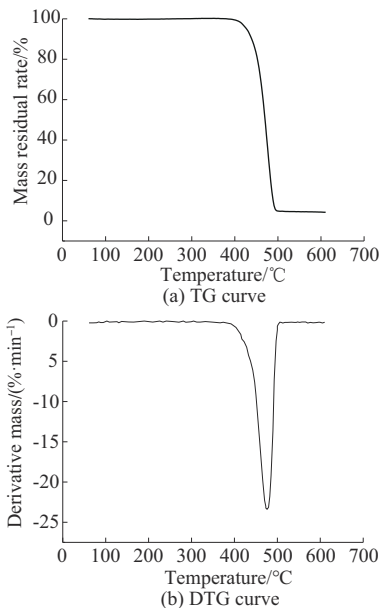


图5 PA5T/55 (S1)的TG和DTG曲线图

Fig. 5 TG and DTG curves of PA5T/55 (S1)

2.6 力学性能分析

PA5T/55的拉伸强度见表3,随着PTA的添加量增加,PA5T/55拉伸强度略微增加,其中PA5T/55 (S1)拉伸强度达到67.9 MPa,远大于PA10T/11的30 MPa,但低于PA6T/66的90.5 MPa^[28-29]。相对来看,PA5T/55具有较高的拉伸强度。

表3 PA5T/55, PA6T/66和PA10T/11拉伸强度对比

Tab. 3 Tensile strength of PA5T/55, PA6T/66 and PA10T/11

Item	S1	S2	S3	PA6T/66	PA10T/11
Tensile strength/MPa	67.9	68.3	68.9	90.5	30

3 结论

以戊二酸、对苯二甲酸和戊二胺为原料,先在低温下成盐,后在高温高压聚合釜中合成了不同PA55链段含量的PA5T/55共聚物。对共聚物结构进行了表征,同时对其结晶性能及热性能进行了测试分析。

(1) XRD分析显示随着PA55链段含量的增加,共聚物的结晶能力和结晶度下降而导致X射线衍射峰变宽。

(2) DSC分析发现随着PA55链段含量的增加,共聚物的熔融温度呈现下降趋势,这是由于PA55链段的引入,对共聚物化学结构和晶体结构的综合影响所致。

(3) TG分析结果显示,PA5T/55共聚物具有良好的热稳定性,且具有较宽的加工窗口。

(4)当PA55链段物质的量为50%时,其拉伸强度为67.9 MPa。

综上所述,同时针对市场应用产品的需求(熔融温度在310~315℃较佳),相较于对苯二甲酸和戊二酸物质的量比分别为0.7:0.3(S3)和0.6:0.4(S2),当对苯二甲酸和戊二酸物质的量比为0.5:0.5(S1)时,合成得到的PA5T/55聚合物熔融温度为311.40℃,其加工窗口较宽,具有良好的综合性能。

参考文献

- [1] LI Shuangcui, HAO Chuncheng, SUN Weifeng. Cross-link degree dependence of electronic, water uptakes and thermal-mechanical properties of epoxy resin polymers: Molecular simulations[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12(2). DOI: 10.1149/2162-8777/acb969.
- [2] 张媛媛, 曾艳, 王钦宏. 合成生物制造进展[J]. 合成生物学, 2021, 2(2):145-160.
ZHANG Yuanyuan, ZENG Yan, WANG Qinrong. Progress in manufacturing synthetic biology[J]. Chinese Journal of Synthetic Biology, 2021, 2(2):145-160.
- [3] 王琳琳, 陈衍玲, 刘彩云, 等. 生物基塑料及其在包装行业的应用[J]. 塑料包装, 2022, 32(5):12-16.
WANG Linlin, CHEN Yanling, LIU Caiyun, et al. Bio-based plastics and their application in packaging industry[J]. Plastic Packaging, 2022, 32(5):12-16.
- [4] EWA L. Effect of innovative bio-based plastics on early growth of higherplants[J]. Polymers, 2023, 15(2). DOI:10.3390/polym15020438.
- [5] PENG Shumin, PENG Lu, YI Chunwang, et al. A novel synthetic strategy for preparing semi-aromatic components modified polyamide 6 polymer[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2018, 56(9):959-967.
- [6] LIU Yuan, WANG Qi. The investigation on the flame retardancy mechanism of nitrogen flame retardant melamine cyanurate in polyamide 6[J]. Journal of Polymer Research, 2009, 16:583-589.
- [7] ZHAGN Cailiang, LI Wan, GU Xueping, et al. A study on a pre-polymerization process of aromatic-contained polyamide copolymers PA(66-co-6T) via one-step polycondensation[J]. Macromolecular Reaction Engineering, 2015, 9(5):512-521.
- [8] ZHAGN Chuanhui. Progress in semicrystalline heat-resistant polyamides[J]. e-Polymers, 2018, 18(5):373-408.
- [9] FERREIRO J, CAMPA J, LOZANO A, et al. Polyisophthalamides with heteroaromatic pendent rings: Synthesis, physical properties, and water uptake[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2005, 43(21):5300-5311.
- [10] NOVISTSKY T, LANGE C, MATHIAS L, et al. Eutectic melting behavior of polyamide 10, T-co-6, T and 12, T-co-6, T copolyterephthalamides[J]. Polymer, 2010, 51(11):2417-2425.
- [11] ZHANG Gang, YAN Guangming, YU Ting, et al. Semiaromatic polyamides containing carboxyl unit: Synthesis and properties[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(33):9275-9284.
- [12] UDDIN A, GOTOH Y, OHKOSHI Y, et al. Crystal modulus of a new semiaromatic polyamide 9-T[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(2):331-337.
- [13] ZHANG Chuanhui, HUANG Xianbo, ZENG Xiangbin, et al. Fluidity improvement of semiaromatic polyamides: Modification with oligomers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(7):5621-5633.
- [14] YAN Guangming, ZHANG Gang, REN Haoao, et al. Synthesis and characterization of semiaromatic polyamides with dicyclohexane units[J]. RSC Advances, 2016, 6(80):76490-76497.
- [15] 王孝明, 张乃恩, 杜维元, 等. 生物基与石油基高温尼龙的热学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4):674-678.
WANG Xiaoming, ZHAGN Naen, DU Weiyan, et al. Thermal properties of bio based and petroleum based high-temperature nylon[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(4):674-678.
- [16] 唐赛珍. 生物基塑料发展前景展望[J]. 新材料产业, 2013(3):8.
TANG Saizhen. Development prospect of bio-based plastics[J]. New Materials Industry, 2013(3):8.
- [17] VELTHOVEN V, GOOTJES L, NOORDOVER B, et al. Bio-based, amorphous polyamides with tunable thermal properties[J]. European Polymer Journal, 2015, 66:57-66.
- [18] WANG Zhao, WEI Tao, XUE Xiao, et al. Synthesis of fully bio-based polyamides with tunable properties by employing itaconic acid[J]. Polymer, 2014, 55(19):4846-4856.

- [19] LIU Bingxiao, ZHANG Shuo, MA Liqun, et al. Synthesis, characterization and crystallization kinetics of a bio-based, heat-resistance nylon 5T/10T[J]. RSC advances, 2023, 13(26): 17 874–17 882.
- [20] 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.
- [21] NECHIFOR M. Novel chalcone-based aromatic polyamides: synthesis, characterization, and properties[J]. Designed Monomers & Polymers, 2016, 19(2): 161–171.
- [22] HSIAO Shenghui, PENG Siaoqi, KUNG Yuruei, et al. Synthesis and electro-optical properties of aromatic polyamides and polyimides bearing pendent 3, 6-dimethoxycarbazole units[J]. European Polymer Journal, 2015, 73: 50–64.
- [23] ZHANG Gang, ZHOU Yuxuan, KONG Yu, et al. Semiaromatic polyamides containing ether and different numbers of methylene (2-10) units: synthesis and properties[J]. Rsc Advances, 2014, 4(108): 63 006–63 015.
- [24] 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 structural study of co amide PA5T/54[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [25] 叶耀挺, 杨克俭, 陈林飞, 等. 半生物基耐高温尼龙5T/56制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11): 46–50.
YE Yaoting, YANG Kejian, CHEN Linfei, et al. Preparation and properties of semi bio-based heat-resistant nylon 5T/56 [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 46–50.
- [26] 杨克俭, 马炼, 陈林飞, 等. 共聚序列结构对生物基共聚尼龙5T/56非等温结晶动力学影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6): 129–135.
YANG Kejian, MA Lian, CHEN Linfei, et al. The effect of copolymer sequence structure on the non isothermal crystallization kinetics of biobased copolymer nylon 5T/56[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6): 129–135.
- [27] 李建伟, 麦杰鸿, 姜苏俊, 等. 耐高温聚酰胺6T/66的热降解机理[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5): 121–125.
LI Jianwei, MAI Jiehong, JIANG Sujun, et al. The thermal degradation mechanism of high-temperature resistant polyamide 6T/66 [J]. Engineering Plastic Applications, 2022, 50(5): 121–125.
- [28] 王双. 半芳香聚酰胺PA6T/66的合成工艺及性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
WANG Shuang. Synthesis and properties of semi-aromatic polyamide PA6T/66[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [29] 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 resistant copolyamide PA10T/11[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.