

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.029

# 改性尼龙的结晶行为调控研究进展

陈华义<sup>1</sup>, 李联峰<sup>1</sup>, 郭子健<sup>2</sup>, 谢县委<sup>1</sup>, 夏学莲<sup>3</sup>, 刘晓蕊<sup>3</sup>

(1.河南神马华威塑胶股份有限公司,河南平顶山 467200;

2.平顶山神马工程塑料科技发展有限公司,河南平顶山 467200; 3.河南城建学院,河南平顶山 467036)

**摘要:**本文综述了改性尼龙结晶行为调控的研究进展,重点介绍了合金化、复合改性、原位聚合、共聚改性、交联等因素对尼龙结晶行为的影响机制。分析了不同改性方法如何通过异相成核、晶型转变、结晶度和结晶速率变化等途径影响尼龙结晶行为。结晶行为的改变对尼龙的力学性能、热稳定性、加工性,甚至是功能特性产生影响,因此,在对尼龙进行改性时,应关注各种改性方式对尼龙结晶行为的影响机制,并对结晶行为进行调控。未来研究应注重多尺度结构调控与性能的关联,探索高效的结晶调控策略,以推动高性能尼龙材料的开发与应用。

**关键词:**尼龙;结晶;性能;异相成核;晶型

**中图分类号:**TQ323.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)01-0219-06

## Progress in regulation researchon crystallization behavior of modified nylon

CHEN Huayi<sup>1</sup>, LI Lianfeng<sup>1</sup>, GUO Zijian<sup>2</sup>, XIE Xianwei<sup>1</sup>, XIA Xuelian<sup>3</sup>, LIU Xiaorui<sup>3</sup>

(1.Henan Shenma Huawei Plastic Co., Ltd, Pingdingshan 467200, China; 2. Shenma Engineering Plastics Technology Development Co., Ltd, Pingdingshan 467200, China; 3. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

**Abstract:** Recent advances in controlling the crystallization behavior of modified nylons were summarized, focusing on the mechanisms by which strategies such as alloying, composite modification, in-situ polymerization, copolymerization, and crosslinking influence crystallization. How these modification methods affect nylon crystallization through pathways like heterogeneous nucleation, crystal polymorphism, alterations in crystallinity and crystallization rate was analyzed. Since changes in crystallization behavior directly impact the mechanical properties, thermal stability, processability and even functional characteristics of nylon, when modifying nylon, attention should be paid to the influence mechanism of various modification methods on the crystallization behavior of nylon, and the crystallization behavior should be regulated. Future research should emphasize the structure-property relationships across multiple scales and explore efficient crystallization control strategies to advance the development and application of high-performance nylon materials.

**Keywords:** nylon; crystallization; performance; heterogeneous nucleation; crystal form

尼龙(PA)是一类应用广泛<sup>[1-2]</sup>的半结晶性高分子材料<sup>[3]</sup>,与其他高分子材料相比,其线性大分子链结构对称、规整,主链上含有大量的酰胺键,酰胺键之间容易形成作用较强的分子间氢键,这种极强的分子间或分子内氢键使其容易形成规整的二维片状晶体结构。PA结晶行为在很大程度上影响其力学性能、加工性能、尺寸稳定性、热稳定性等。晶体结构中的分子链排列有序、致密,赋予材料较高的强度、优异的刚性和抗蠕变性<sup>[4]</sup>,以及较好的热稳定性。提高PA的结晶度,

会使材料的刚性增加、拉伸强度升高<sup>[5]</sup>;PA的结晶速率增加、结晶温度升高,便于熔体固化,有利于成型加工<sup>[6]</sup>;晶型对PA的热稳定性能有较大影响;晶体尺寸增加,会造成韧性降低。

对PA进行改性,会在很大程度上改变PA的结晶行为,而PA的结晶行为对其综合性能有重大影响,因此,对PA进行改性时,需要关注其结晶行为的变化及规律,调控PA的结晶行为,最终提升PA基材料的综合性能<sup>[7-8]</sup>。本文主要从复合改性、合金化改性、共聚改性、原位聚合改性、氢键作用、交

**基金项目:**河南省科技攻关项目(252102230151),河南省教育厅高等学校重点科研项目(25B430024),河南省大学生创新训练计划项目(S202511765043)

**通信作者:**夏学莲,博士,副教授,主要从事尼龙合成及改性研究

**收稿日期:**2025-10-17

**引用格式:**陈华义,李联峰,郭子健,等.改性尼龙的结晶行为调控研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(1):219-224.

CHEN Huayi, LI Lianfeng, GUO Zijian, et al. Progress in regulation researchon crystallization behavior of modified nylon[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 219-224.

联等方面,阐述PA结晶行为的内在影响因素和影响机制,以及调控结晶行为的策略。PA的结晶行为研究对其综合性能的提升、拓宽应用领域意义重大。

## 1 合金化

以某一种特定的PA为基体,以其他高分子材料或其他PA为改性添加剂,通过多组分间协同作用使PA合金化,可提高韧性、强度、耐磨性,降低成本,赋予阻燃、抗菌、导电<sup>[9]</sup>等新功能,拓展应用领域。改性添加剂以微米至亚微米尺度分散在PA基体中,构成非均相PA合金体系,会对PA聚集态结构造成一定的影响,改性添加剂的含量越高,对PA结晶影响越大<sup>[10]</sup>。

解娜等<sup>[11]</sup>以PA6为基体,PA612为改性添加剂,经熔融挤出-流延成膜制备PA6/PA612薄膜。与PA6相比,PA6/PA612复合材料薄膜晶体尺寸减小,且结晶结构不完整,结晶行为变化后更容易进行双向拉伸。毛旭升等<sup>[12]</sup>采用熔融共混的方式在PA56中加入PA11制备PA56/PA11合金,研究显示,PA11的加入降低了PA56的结晶温度、结晶度和结晶完善程度,使PA56/PA11合金韧性提升,强度与热稳定性降低。Chong等<sup>[13]</sup>通过挤出共混在PA610中引入马来酸酐、甲基丙烯酸甲酯双单体接枝增韧剂POE-g-MA/MM制备PA合金,当POE-g-MA/MM添加20%时,PA610的结晶温度从233.9℃降至227.3℃,降低了6.6℃;熔融焓从73.7 J/g降至38.4 J/g,结晶度降低,促使材料的冲击强度最高提升13倍。魏菊等<sup>[14]</sup>在PA66中加入马来酸酐接枝乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVAC-g-MAH)制备合金,加入20%的EVAC-g-MAH之后,抑制PA66结晶,导致晶体缺陷增多,结晶度下降,提升材料抗静电性能,但力学性能有所降低,结晶行为直接关联材料的韧性与导电性平衡。Chong等<sup>[15]</sup>通过熔融共混在PA56中引入聚乙烯-辛烯共聚物接枝马来酸酐与甲基丙烯酸缩水甘油酯(POE-g-MAH-GMA)和聚苯醚(PPO)构建“海-岛”结构的PA56/POE-g-MAH-GMA/PPO三元合金,添加剂破坏了PA56分子链的有序性,使结晶度从19.46%降至11.56%,利于提升韧性,使缺口冲击强度最高提升至纯PA56的11.7倍。Zhang等<sup>[16]</sup>通过熔融共混在PA66中加入PPO和高抗冲击苯乙烯接枝马来酸酐添加剂制备PA基三元合金,添加剂破坏了PA66分子链的规整性,抑制了PA66结晶,使结晶温度降低。

PA合金化改性通过引入异相组分,从多角度影响其结晶行为。在相界面处,微相分离可提供异相成核位点,促进成核;但若分散相与基体相容性好或存在氢键作用,则会加剧链缠结,抑制晶体生长。当两相均为PA时,可能生成嵌段共聚物,扰乱氢键网络,降低结晶完整性与晶片厚度。从动力学角度看,异相组分导致Avrami指数下降,结晶机制由体相成核( $n \approx 3$ )转向受限生长( $n \approx 2$ ),形成更小、更不完整的晶体。同时,异相引入提高结晶能垒,结晶温度降低。这些结

构变化影响材料性能,小尺寸、不完善晶体利于拉伸取向,结晶度下降虽略微削弱刚性,但显著提升韧性。

## 2 复合改性

为了提高PA的强度<sup>[17]</sup>、韧性、耐磨性,或赋予PA阻燃性<sup>[18]</sup>、抗菌性、阻隔性、电性能<sup>[19]</sup>等功能,常通过物理共混的方式将改性剂添加到PA树脂中,对其进行复合改性。PA基体中加入化学异质的改性剂,会对PA的结晶行为产生影响。

苏似鑫等<sup>[20]</sup>采用熔融共混制备了短切玻璃纤维(SGF)增强PA66复合材料(SGF/PA66),SGF加入提高了复合材料的结晶温度、结晶速率、结晶度,使复合材料热稳定性增强,但韧性下降。苏会博<sup>[21]</sup>将有机化改性碳纤维(NCF)与PA6熔融共混制备高强度NCF/PA6复合材料,通过调控碳纤维表面,诱导PA6基体形成更稳定的 $\alpha$ 晶型,提升结晶度,有利于提升材料的拉伸强度、模量及热稳定性。王春雨<sup>[22]</sup>采用熔融共混法将蒙脱土(MMT)加入PA6中,MMT起到异相成核的作用,稳定晶核,提高PA6的结晶温度和结晶度,促进 $\alpha$ 晶型向 $\gamma$ 晶型转变,结晶行为的改变可使复合材料强度提高、韧性和热稳定性降低。Gao等<sup>[23]</sup>通过熔融共混在PA11中加入成核剂炭黑,添加5%炭黑使其结晶温度从纯PA11的178℃升高至182℃,半结晶时间缩短约25%,使其能在更高温度下、更快完成结晶、缩短成型周期,提高加工效率。董亚鹏等<sup>[24]</sup>在100份PA6中加入0.5份复配成核剂,显著提高了结晶速率、结晶度和晶体完整性,从而增强了材料的缺口冲击强度和拉伸强度,但对PA6的晶型影响不大。Xun等<sup>[25]</sup>采用熔融共混在PA56中引入成核剂纳米SiO<sub>2</sub>,添加0.5%纳米SiO<sub>2</sub>后,结晶温度从211.6℃提升至228.2℃;结晶度从纯PA56的27.8%提升至29.6%,从而提高其力学强度和热稳定性。朱永军等<sup>[26]</sup>在熔融挤出过程中添加成核剂Cav102,使PA6的结晶温度提高了0.38℃,结晶度提高了0.42%,诱发形成较小的球晶,缩短成型时间,改善脱模性,冲击强度提高20%。李桂丽等<sup>[27]</sup>将5%的三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)和10-(2,5-二羟基苯基)-10-氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO-HQ)分别与PA56熔融共混制备了PA56/MCA、PA56/DOPO-HQ复合材料。DOPO-HQ的加入阻碍了PA56分子链有序排列,降低了结晶温度和结晶速率,影响加工性能,导致加工周期延长;而MCA起异相成核的作用,促进PA56结晶,有利于缩短注塑或挤出成型周期,提高生产效率。

根据经典成核理论,高分子熔体结晶可通过均相成核与异相成核两种机制进行。均相成核依赖于分子热运动形成晶胚,但大部分晶胚因未能跨越成核能垒而解离<sup>[28]</sup>;而异相成核则借助外来界面降低成核所需的自由能垒,其效果受界面润湿性影响。为调控PA结晶行为,常通过添加成核剂引入异相成核位点,从而降低能垒、增加晶核密度、提高结晶速率、细化晶粒并优化结晶结构,最终实现PA材料高性能化与高效加工。在PA中引入改性剂会对PA的结晶行为产生双

重影响<sup>[29]</sup>。改性剂作为异相成核剂,可缩短成核时间,从而提升结晶速率与结晶温度,有利于加工。然而,其引入也会限制分子链运动,抑制晶体生长,并可能改变结晶度、晶型及晶体尺寸,对结晶形态产生复杂影响。

### 3 原位聚合改性

PA 原位聚合改性是将碳纳米管、石墨烯<sup>[30]</sup>、二氧化硅等材料分散在 PA 单体或 PA 盐中,参与聚合反应,使其以更小尺度分散在 PA 基体中,甚至通过化学键与 PA 基体连接,产生纳米复合效应,提升力学性能的同时,还可赋予 PA 导热、导电等功能性。原位聚合改性也会对 PA 结晶行为造成影响。

Zhu 等<sup>[31]</sup>在己内酰胺单体中添加改性 MgO 晶须,原位聚合生成 PA6/MgO 复合材料,MgO 的引入使材料的结晶温度和结晶度分别从纯 PA6 的 167 °C 升高至 171 °C、23.0% 提升至 28.2%,协同提升材料的拉伸强度、冲击强度、耐热性、抗蠕变能力等。Lin 等<sup>[32]</sup>通过原位聚合工艺将短切 CF(SCF)引入到 PA6 基体中制备 SCF/PA6 复合材料,SCF 作为成核剂与热处理协同效应作用,提高了结晶度、结晶温度,提升了材料的致密性,协同提升了力学与摩擦学性能。Wang 等<sup>[33]</sup>在 PA6 聚合过程中引入改性钛酸钾晶须(MPTW)与纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 原位聚合制备 PA6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MPTW,纳米粒子的引入细化晶体、完善晶体结构、提高结晶度,有效提升材料的力学性能强度、模量、韧性和热稳定性。He 等<sup>[34]</sup>将改性的纳米纤维素(CNF)加入  $\epsilon$ -己内酰胺熔体进行原位聚合,合成浇铸 PA6/CNF 复合材料,CNF 提供了大量异相成核位点,显著提升了 PA 的结晶速率与成核密度,并减小了球晶尺寸,直接增强了复合材料的力学性能、热稳定性及尺寸稳定性。刘滨滨<sup>[35]</sup>采用氧化石墨烯(AGO)与己内酰胺单体原位聚合制备 PA6/氧化石墨烯纳米复合材料(PA6/AGO),AGO 的加入提高了复合材料的结晶温度,降低了结晶速率和结晶度,促进了  $\alpha$  和  $\gamma$  晶型的共存,这种结晶结构的变化增强了材料的拉伸强度、热稳定性,大幅提升了韧性和断裂伸长率。韩娟等<sup>[36]</sup>通过原位母料法将纳米 SiO<sub>2</sub> 接枝到 PA6 分子链上, SiO<sub>2</sub> 作为异相成核点提高了 PA6 的结晶度和结晶速率,同时阻碍分子链运动使结晶温度降低。这种结晶行为的改变细化了晶体,增强了界面强度,从而显著提升了复合材料的拉伸强度、冲击强度和耐磨性能。

原位聚合与复合改性均通过引入纳米材料影响 PA 结晶行为,其作用机制具有一定相似性。低含量纳米材料可作为异相成核位点,降低成核能垒,促进高温区结晶并提高结晶速率;而高含量纳米材料则会阻碍分子链扩散,降低结晶度与晶体完整性,并可能诱导晶型转变。然而,两种改性方法在作用效果上存在本质区别。原位聚合可实现纳米材料的分子级均匀分散,形成分布密集且均匀的异相成核点,结晶细化效果显著;而复合改性中填料分散尺度多为微米/亚微

米级,易团聚,成核效率较低。在界面相互作用方面,原位聚合通过强氢键甚至化学键连接,显著限制链段运动并影响构象,深度调控结晶过程;复合改性则界面作用较弱,即便通过马来酸酐等功能化处理改善相容性,其结合强度与分散性仍不及原位体系。

### 4 共聚改性

均聚 PA 存在熔点高、难加工、易吸湿、低温韧性差、易老化发黄等固有的性能缺陷,PA 共聚改性是在合成过程中,加入其他单体进行共聚<sup>[37]</sup>,在 PA 主链上引入其他结构单元<sup>[38]</sup>,针对特定性能需求进行“基因改良”。PA 共聚属于分子化学结构层面的改性,会在很大程度上影响 PA 的结晶。

Puiggali<sup>[39]</sup>通过在 PA 共聚过程中引入甘氨酸或丙二酰胺等特殊单元,对 PA 结晶行为进行调控,使晶体从  $\alpha$  或  $\gamma$  型片晶转变为更复杂的多向氢键网络,影响球晶形态、Brill 转变温度、结晶完善度,最终达到力学强度、热稳定性、尺寸稳定性、韧性和加工窗口等综合性能的优化。张佳晖<sup>[40]</sup>以羧基封端的 PA1212 预聚体为硬段、聚醚二元醇为软段合成出 PA 弹性体(EGBA),通过调控 PA1212 硬段与聚醚软段的分子量和微相分离结构,精确控制结晶温度、晶型完善程度。硬段结晶作为固定相提供形状固定,软段结晶作为可逆相实现形状回复。结晶行为优化使材料表现出优异的形状记忆性能,形状固定率和回复率最高分别可达 96% 和 100%。Liu 等<sup>[41]</sup>在 PA5T 聚合过程中引入柔性 10T 单元制备 5T/10T 共聚 PA,并通过 10T 含量调控结晶行为。随 10T 物质的量增加,共聚 PA 的结晶速率和结晶温度先降低后升高;当 10T 物质的量分数为 60% 时,显著拓宽加工窗口的同时保持优异的耐热性。Meng 等<sup>[42]</sup>通过戊二胺、己二酸和对苯二甲酸一步高温高压聚合法,在 PA56 中引入苯二甲酸,合成 PA56-5T 共聚 PA,通过改变共聚 PA 中苯环的量调控结晶行为。当苯环物质的量分数为 30% 时,球晶数量最多、尺寸最小,结晶速率最快;苯环含量过低或过高均会降低结晶性能。别致<sup>[43]</sup>将癸二酸、对苯二甲酸(PTA)、己二胺共成盐缩聚合成共聚 PA610-6T,结果显示,当 PTA 质量分数升高至 30%~40% 时,共聚 PA610-6T 结晶较完善、规整,结晶速率较高;结晶温度显著升高,因为 PTA 中的苯环降低了大分子链的柔顺性,运动能力降低,高温下形成的晶核更稳定;同时,在较高温度下形成更为稳定的晶型,力学性能、热稳定性及尺寸稳定性均得到增强,体现出结晶行为对材料综合性能的关键调控作用。祝东红等<sup>[44]</sup>将二甲基环状赖氨酸单体与己内酰胺共聚物合成二甲基环状赖氨酸-己内酰胺共聚物(PLA6),与 PA6 相比,PLA6 中二甲基环状赖氨酸削弱了氢键作用,分子链更容易运动,在较高温度下发生结晶;然而破坏了分子链规整性,结晶度降低,提升了熔体流动性,改善加工性能。Ma 等<sup>[45]</sup>将 PA5T 盐和 PA56 盐混合后缩聚,通过共聚的方式在 PA5T 中引入 PA56,PA56 扰乱 PA5T 的分子链规整性,削弱氢键作

用,使熔点降低,改善其加工性能。

在PA主链中引入共聚单元会显著改变其结晶行为。根据Flory晶格理论,共聚结构破坏分子链规整性,削弱结晶驱动力并提高结晶能垒。动力学上,球晶生长从三维转为二维模式,导致结晶峰宽化、温度降低和速率减慢。Keith-Padden理论指出共聚单元形成排斥场,阻碍链段排入晶格,使晶体尺寸减小、结构不完整。

## 5 交联

PA作为热塑性塑料,在电器、汽车发动机部件等领域应用时<sup>[46]</sup>,需要提升尺寸稳定性和耐瞬时高温,常通过化学或辐照交联技术对其进行改性,以结合热塑性的易加工特性和热固性塑料的高稳定性<sup>[47]</sup>。然而,交联反应会显著改变PA的结晶行为,这是实现高性能化过程中需要重点关注和调控的核心问题。

沈超等<sup>[48]</sup>在PA1012盐中引入三官能度的双六甲基三胺交联剂,结果表明,随着双六甲基三胺含量增加,PA1012支化度、交联度增加,分子链的规整程度降低,运动困难,分子间相互作用减弱,结晶温度降低。华林林等<sup>[49]</sup>在PA6中加入光交联剂后采用紫外光辐照制备交联PA6,结果显示,交联主要发生在无定形区,限制了分子链的运动与有序排列,导致结晶度和熔点下降。这种结晶结构的破坏虽然降低了材料的熔融特性,但提高了拉伸强度和热稳定性<sup>[50]</sup>。Leo等<sup>[51]</sup>的研究中,PA66经过交联后结晶度降低。另外,辐照会同时引发交联和降解<sup>[52]</sup>,可以通过交联剂、辐照剂量等调控交联和降解行为。李志宏等<sup>[53]</sup>在PA1010中加入交联剂双马来酰亚胺(BMI)后进行辐照,研究显示,BMI促进交联、抑制结晶,导致晶面受损。Li等<sup>[54]</sup>通过高温引发PA1012分子链相邻的端氨基发生脱氨反应生成仲胺基团,并与另一条PA1012分子链的端氨基或酰胺基团发生反应,形成三维的网络交联结构,破坏了长程有序序列,导致结晶度降低,结晶完善度降低。Yang等<sup>[55]</sup>高温处理聚醚型PA弹性体,使PA硬段形成更致密的物理交联网络,显著抑制了PA链段的结晶能力,导致结晶温度从106.8℃降至89.6℃,结晶度也有所降低。Kumar等<sup>[56]</sup>将交联剂三聚氰胺与PA66熔融共混制备交联PA66,交联后结晶度从41%降至28%,晶体尺寸减小,晶体层厚度从34.4 nm降至25 nm。

PA为半结晶性聚合物,聚集态结构由结晶区和非晶区构成,交联反应主要在非晶区进行,发生交联反应,限制了线性大分子链有序排列,分子链柔性降低,空间位阻增大,大分子链运动能力降低,堆积密度减小,非晶区向晶区扩张,晶区减小,结晶度降低。

## 6 其他

除以上因素外,其他因素如氢键作用也会对PA结晶产生影响。PA高分子间氢键可增强链段规整性与分子内聚能密度,协同促进结晶。因此,增强氢键作用或提高其密度的

因素有利于PA结晶;反之,氢键作用减弱则导致结晶能力下降。张景阳等<sup>[57]</sup>分别将氢键桥联剂和氢键抑制剂与PA12熔融共混,结果显示,氢键桥联剂加入提升了结晶温度、结晶速率和结晶度;而氢键抑制剂加入导致结晶温度、结晶度和结晶速率降低,这些结晶行为的调控直接影响材料的力学性能和热性能。Tseng等<sup>[58]</sup>将PA66溶液沉淀,诱导分子链重排形成氢键有序区,这些区域作为成核点,使后续熔体结晶的速率加快、晶体尺寸更小、球晶分布更均匀、晶体更完善,增强材料的力学性能、热稳定性。Arioli等<sup>[59]</sup>认为PA分子链中亚甲基长度分布不同,会影响氢键排列的规整性;PA中二胺亚甲基数目增加会削弱氢键作用,使结晶从 $\alpha$ 晶型转向拟六方结构<sup>[60]</sup>;进而改变其结晶度、熔点、晶型,影响其力学性能和热性能。总之,加强PA分子间、分子内氢键的因素均有利于结晶,削弱氢键作用的因素会抑制结晶。

## 7 结语与展望

为了实现PA在多研究领域的广泛应用,需要对其进行改性。本文重点阐述了合金化、复合改性、原位聚合、共聚改性、交联以及其他因素对PA结晶行为造成的影响,从高分子结晶理论的角度深入剖析这些改性方式对结晶的影响机制,以及结晶行为的改变对PA的综合性能的影响。基于此,在对PA进行改性时,关注各种改性方式对PA结晶行为的影响效果及影响机制,反向对结晶行为进行调控,进而实现对其力学性能、热稳定性、加工性及功能特性的优化与设计。

未来PA结晶行为的研究及调控,将更注重多尺度结构的协同调控与机理深化。借助原位表征与模拟计算,从分子、片晶到球晶层面,深入揭示结构演变与宏观性能的构效关系,实现材料精准设计。同时,开发多元协同改性、外场辅助结晶与序列精准共聚等高效复合调控策略,将成为突破现有性能瓶颈、发展高性能与功能化PA的重要方向。

### 参考文献

- [1] JI F. *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*, 2023, 54(5): 609-614.
- [2] TAHERKHANI B, et al. *Advanced engineering materials*, 2024, 26(21). DOI:10.1002/adem.202302216.
- [3] AROOJ N, et al. *Journal of applied polymer science*, 2023, 140(18). DOI:10.1002/app.53790.
- [4] YAGHINI N, et al. *Peters Macromolecules*. 2021, 54(4): 1 894-1 904.
- [5] DUAN G, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025. DOI: 10.1002/app.57053.
- [6] REIZABAL A, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2023, 44(24). DOI:10.1002/marc.202300424.
- [7] MANCHI P, et al. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(9). DOI:10.1002/adfm.202416018.
- [8] HE Z L, et al. *Advanced Functional Materials*, 2025. DOI: 10.1002/adfm.202503523.

- [9] DEOGAONKAR-BARIDE S. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(26). DOI:10.1002/app.52443.
- [10] SAHAR K. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(34). DOI:10.1002/app.52812.
- [11] 解娜,等. *合成纤维工业*,2024,47(5):14-19.  
XIE Na, et al. *China Synthetic Fiber Industry*, 2024, 47(5):14-19.
- [12] 毛旭升,等. *包装学报*,2024,16(2):15-23.  
MAO Xusheng, et al. *Packaging Journal*, 2024, 16(2):15-23.
- [13] CHONG Y, et al. *Journal of Polymer Research*, 2025, 32(47). DOI:10.1007/s10965-025-04277-4.
- [14] 魏菊,等. *塑料科技*,2024,52(7):38-42.  
WEI Ju, et al. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(7):38-42.
- [15] CHONG Y, et al. *Advances in Polymer Technology*, 2023. DOI: 10.1155/2023/3114639.
- [16] ZHANG Z, et al. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(9):7 939-7 951.
- [17] BOOPATHY G, et al. *Journal of Nanomaterials*, 2022. DOI: 10.1155/2022/4920774.
- [18] LI X, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025. DOI: 10.1002/app.57158.
- [19] GULAHMADOW O, et al. *Energy & Environmental Materials*, 2025, 8(3). DOI:10.1002/eem2.12880.
- [20] 苏似鑫,等. *工程塑料应用*,2021,49(11):119-125.  
SU Sixin, et al. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11):119-125.
- [21] 苏会博. 改性碳纤维增强尼龙6复合材料的制备及性能研究[D]. 北京:中国石油大学,2021.  
SU Huibo. Study on preparation and performance of modified carbon fiber reinforced nylon 6 composite[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2021.
- [22] 王春雨. 不同改性蒙脱土的制备及其对尼龙6结构与性能的影响研究[D]. 北京:北京化工大学,2024.  
WANG Chunyu. preparation of different modified montmorillonite and its effects on the structure and properties of nylon 6[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [23] GAO J, et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025: 1-12. DOI:10.1007/s10973-024-13909-8.
- [24] 董亚鹏,等. *塑料工业*,2024,52(10):150-156.  
DONG Yapeng, et al. *China Plastics Industry*, 2024, 52(10):150-156.
- [25] XUN Z, et al. *ACS Applied Polymer Materials*. 2022, 4:4 949-4 960.
- [26] 朱永军,等. *塑料工业*,2021,49(10):148-153.  
ZHU Yongjun, et al. *China Plastics Industry*, 2021, 49(10):148-153.
- [27] 李桂丽,等. *化工新型材料*,2025,53(4):151-156.  
LI Guili, et al. *New Chemical Materials*, 2025, 53(4):151-156.
- [28] 许世华,等. *复合材料学报*,2021,38(7):2 218-2 223.  
XU Shihua, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(7):2 218-2 223.
- [29] 郑利杭. 连续碳纤维增强PA6复合材料的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2021.  
ZHENG Lihang. Research on continuous carbon fiber reinforced PA6 composites[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [30] LIM J V, et al. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2023, 18(6). DOI:10.1142/S1084944723430012.
- [31] ZHU Y, et al. *Polymer Science Series B*, 2023, 65(3):372-386.
- [32] LIN J, et al. *Materials Letters*, 2023, 338. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.134005.
- [33] WANG Z S, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2460. DOI:10.1088/1742-6596/2460/1/012101.
- [34] HE X, et al. *Polymers*, 2023, 15(719). DOI: 10.3390/polym.15030719.
- [35] 刘滨滨. 改性氧化石墨烯/尼龙6复合材料的制备及其性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.  
LIU Binbin. Preparation and properties of modified graphene oxide/nylon 6 composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2021.
- [36] 韩娟,等. *现代塑料加工应用*,2025,37(1):1-5.  
HAN Juan, et al. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2025, 37(1):1-5.
- [37] LYU W, et al. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(19). DOI:10.1002/anie.202402541.
- [38] LANG F, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(31). DOI:10.1002/app.50750.
- [39] PUIGGALÍ J. *Polymer Crystallization*, 2021, 4. DOI: 10.1002/pcr2.10199.
- [40] 张佳晖. 尼龙1212热塑性聚酰胺弹性体的形状记忆行为[D]. 郑州:郑州大学,2021.  
ZHANG Jiahui. Shape memory behavior of nylon 1212 thermoplastic polyamide elastomer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [41] LIU B, et al. *RSC Advances*, 2023, 13:17 874-17 882.
- [42] MENG C, et al. *Journal of Polymer Research*, 2021, 28(383). DOI: 10.1007/s10965-021-02727-3.
- [43] 别致. 新型共聚尼龙610-6T的制备及性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2024.  
BIE Zhi. Preparation and properties of new copolymer nylon 610-6T[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2024.
- [44] 祝东红,等. *能源化工*,2025,46(1):55-59.  
ZHU Donghong, et al. *Energy Chemical Industry*, 2025, 46(1):55-59.
- [45] MA Z, et al. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(19):12 164-12 175.
- [46] 杨刚,等. CN202211450943.5[P]. 2024-08-27.

- YANG Gang, et al. CN202211450943.5[P]. 2024-08-27.
- [47] 杨俊杰,等. CN202010907882.5[P]. 2020-12-15.  
YANG Junjie, et al. CN202010907882.5[P]. 2020-12-15.
- [48] 沈超,等. 合成纤维工业, 2024, 47(1):28-32.  
SHEN Chao, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2024, 47(1): 28-32.
- [49] 华林林,等. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3):35-38.  
HUA Linlin, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(3):35-38.
- [50] 华林林. 尼龙6的紫外光交联及其阻燃材料的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2013.  
HUA Linlin. Studies on photo-crosslinking of PA6 and its flame retardant materials[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [51] LEO C P, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 122(5): 3 339-3 350.
- [52] SHIVAMURTHY A, et al. Polymer Engineering & Science, 2024, 64(3):1 365-1 377.
- [53] 李志宏,等. 辐射研究与辐射工艺学报, 2007(5):257-260.  
LI Zhihong, et al. Journal of Radiation Research, 2007(5): 257-260.
- [54] LI X, et al. Macromolecules, 2022, 55(17):7 674-7 682.
- [55] YANG F, et al. Polymer, 2025, 319. DOI: 10.1016/j. polymer. 2025.128058.
- [56] KUMAR S V, et al. Chemical Engineering Journal, 2025, 523. DOI:10.1016/j.cej.2025.168195.
- [57] 张景阳,等. 弹性体, 2024, 34(4):52-57.  
ZHANG Jingyang, et al. China Elastomerics, 2024, 34(4):52-57.
- [58] TSENG C H. Polymers, 2022, 14(442). DOI: 10.3390/polym. 14030442.
- [59] ARIOLI M, et al. Thermochemica Acta, 2024, 735. DOI:10.1016/j. tca.2024.179721.
- [60] ARIOLI M, et al. Fibers, 2025, 13(86). DOI: 10.3390 / fib13070086.