

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.030

# 尼龙成核剂应用研究进展

黄婷,袁美娇,赵亚琼,胡正煜,张跃飞

(长沙理工大学化学与医药工程学院,电力与交通材料保护湖南省重点实验室,长沙 410114)

**摘要:**添加成核剂是一种用量少、操作简便且效果显著的改性技术手段。尼龙成核剂分为无机、有机和高分子三类。主要简述了近5年来不同种类尼龙成核剂的研究进展,分别介绍了各类成核剂以及复合成核剂的特点,重点分析了成核剂对尼龙结晶行为与性能的影响,并探讨了其成核机理。分析表明成核剂可通过诱导异相成核,降低尼龙结晶能垒,细化球晶结构,从而加速结晶并改善力学性能。未来研究可聚焦于开发兼具环保与多功能性的尼龙成核剂,进一步拓展尼龙在多元领域的应用价值。

**关键词:** 尼龙;成核剂;异相成核;结晶行为;结构与性能

**中图分类号:** TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0229-05

## Research progress in application of nylon nucleating agents

HUANG Ting, YUAN Meijiao, ZHAO Yaqiong, HU Zhengyu, ZHANG Yuefei

(Hunan Provincial Key Laboratory of Materials Protection for Electric Power and Transportation, School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract :** The addition of nucleating agents is a modification technique characterized by low dosage, ease of operation, and significant effectiveness. Nylon nucleating agents are categorized into three types: inorganic, organic, and polymeric. An overview of research progress on various types of nylon nucleating agents over the past five years was provided, introducing the characteristics of each type of nucleating agent and composite nucleating agents. It focused on analyzing the impact of nucleating agents on the crystallization behavior and properties of nylon and explored their nucleation mechanisms. Analysis indicates that nucleating agents can accelerate crystallization and improve mechanical properties by inducing heterogeneous nucleation, reducing the crystallization energy barrier of nylon, and refining the spherulite structure. Future research should focus on developing environmentally friendly and multifunctional nylon nucleating agents to further expand the application value of nylon in diverse fields.

**Keywords :** nylon ; nucleating agent ; heterogeneous nucleation ; crystallization behavior ; structure and property

尼龙(PA)在五大通用工程塑料中占据首位,因其具有较高的力学强度、耐腐蚀性、加工性能等,被广泛应用于汽车、电子电器、家用电器、航空航天及机械部件中<sup>[1-4]</sup>。但是大多数PA材料在生产加工过程中普遍存在吸湿性强、结晶速率慢、尺寸稳定性差、生产周期长等缺点,导致PA的应用拓展受到限制<sup>[5]</sup>。因此,可通过对PA改性使得材料的性能得到一定的提升,以制备综合性能优异的产品<sup>[6]</sup>。添加成核剂是一种用量少、操作简便且效果显著的改性技术手段<sup>[7-8]</sup>。常见的PA成核剂可分为三大类,分别为无机成核剂、有机成核剂、高分子成核剂。PA是一种典型的半结晶聚合物,常见的两种晶型分别为 $\alpha$ 晶型和 $\gamma$ 晶型,而成核剂的加入可能会导

致晶型发生转变从而使材料的性能发生显著变化<sup>[9-10]</sup>。根据近年来不同成核剂对PA材料在结晶行为及力学性能等方面的应用笔者进行了总结,综述了各类PA成核剂的应用进展,希望可以促进PA材料的高性能开发与应用。

## 1 尼龙成核剂的分类及应用

### 1.1 无机成核剂

常见的无机成核剂主要有滑石粉<sup>[11]</sup>、蒙脱土<sup>[12]</sup>、二氧化硅<sup>[13]</sup>、碳纳米管<sup>[14]</sup>等,是较早开发的一类成核剂。这类成核剂具有来源广泛、成本较低、易于获取等优点,因此在工业领域得到广泛的应用。在PA中引入无机成核剂可有效促进其成核,提高结晶速率,同时一定条件下还能够改善材料的

**基金项目:** 湖南省企业科技特派员项目(2021GK5007)

**通信作者:** 张跃飞,博士,教授,博士生导师,主要从事高分子材料改性研究

**收稿日期:** 2025-10-03

**引用格式:** 黄婷,袁美娇,赵亚琼,等.尼龙成核剂应用研究进展[J].工程塑料应用,2025,53(12):229-233.

HUANG Ting, YUAN Meijiao, ZHAO Yaqiong, et al. Research progress in application of nylon nucleating agents[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 229-233.

力学性能和热稳定性。无机成核剂在PA基体中的分散性通常较差,容易因分散不均而降低成核效果,并导致PA制品透明性下降,对产品外观造成影响,限制了其在对透明性要求较高的应用领域中的应用。

Guo等<sup>[15]</sup>研究了不同添加量的滑石粉(Tac)对尼龙6(PA6)复合材料的影响,并成功制备了适用于熔融沉积成型的PA6/Tac复合线材。结果表明,因异相成核作用,添加质量分数5% Tac的复合材料的结晶温度较纯PA6提高了17℃,结晶度提升至24%,而商业e-PA6线材的结晶度仅为10%。此外,复合材料的拉伸强度从54.7 MPa提升至67.1 MPa。Tac的加入有效解决了空白PA6在3D打印过程中由于收缩和翘曲引起的尺寸稳定性差的问题。添加了成核剂的PA6不管是在结晶性能还是力学性能方面都要优于商业e-PA6线材,在实际应用方面能够有效节约成本。由于Tac添加质量分数超过5%后,复合材料容易出现团聚现象使得黏度大幅度增加,导致挤出过程困难,因此,解决高含量无机填料在PA6中的团聚问题还需要更深入的研究。

丁剑峰等<sup>[16]</sup>将钛酸钾晶须(PTW)、高岭土(Kaolin)和滑石粉(Tac)作为成核剂分别添加到PA6/碳纤维(CF)中。扫描电子显微镜(SEM)观察显示,这三种成核剂在复合材料中均实现了均匀分散。通过差示扫描量热(DSC)分析对上述3种无机成核剂改性PA6/CF的非等温结晶行为进行系统研究,发现与PTW和Kaolin这两种无机成核剂相比,Tac的异相成核效果更好,不仅显著提高了复合材料的结晶温度,还增加了结晶度,促进了更完善的PA6晶体形成,从而增强了材料的热稳定性。力学性能测试结果显示,添加质量分数2%的Tac可使PA6/CF复合材料的冲击强度提高44.5%,其改善效果优于其他两种成核剂。

Gohn等<sup>[17]</sup>研究了碳纳米管(CNT)对尼龙66(PA66)结晶动力学的调控机制,揭示了异相成核与流动诱导结晶(FIC)之间的竞争关系。CNT是一种可诱导PA66异相成核的高效成核剂。通过原子力显微镜(AFM)测试,观察到未添加CNT的PA66球晶结构较大,且随着CNT添加量的增加,球晶结构逐渐变为点状结构,成核密度得到了显著提高,球晶尺寸也因此减小。同时,当CNT的添加质量分数 $<0.5\%$ 时,CNT异相成核与FIC协同加速结晶。但是当CNT的添加量 $\geq 1\%$ 时,CNT提供的成核位点会达到饱和,进一步增加CNT的量反而会抑制FIC效应。此研究为工程塑料结晶行为调控提供了理论与应用价值的见解。

Yu等<sup>[18]</sup>通过原位聚合法成功制备了CNTs/PA6纳米复合材料,并首次利用熔融纺丝技术实现了高含量CNTs/PA6复合纤维的连续制备。研究结果显示,CNTs的最佳添加质量分数为4%,此时PA6的结晶温度提高约15℃,且晶体结构仍以 $\alpha$ 晶型存在。力学性能测试表明,复合材料的拉伸强度较纯PA6有所提升,说明CNTs的引入对材料强度具有增强作用。在导电性方面,随着CNTs用量增加,复合材料的电阻率逐渐下降,导电性能不断增强。尽管在纺丝过程中,过

高的CNTs含量会导致导电性能出现一定下降,但该研究首次实现了高含量CNTs/PA6复合纤维的连续纺丝,证明了该体系具有良好的可纺性,为智能纺织品的开发提供了新思路。然而,过量CNTs的加入易引发团聚现象,这不仅会抑制PA6的结晶过程,还可能使材料的力学性能有所下降。因此,未来研究可聚焦于通过工艺优化解决高含量CNTs的分散问题,以实现导电性与力学性能的同步提升,从而进一步拓展PA6复合材料在智能纺织品等领域的应用潜力。

Fu等<sup>[19]</sup>将添加质量分数为1%~10%的蒙脱土(MMT)引入尼龙610(PA610)中,运用熔融聚合法制备MMT/PA610复合材料。研究显示,MMT是一种有效的成核剂,低含量的MMT能够诱导PA610进行异相成核,提高PA610的结晶度,并使复合材料的晶体尺寸更小更均匀。然而,当MMT含量过高时,其在PA610基体中易发生团聚现象,阻碍晶体生长。采用三种动力学模型对PA610的非等温结晶动力学进行对比,结果表明莫志深方法最能准确描述非等温结晶的全过程。该结论为高含量填充尼龙复合材料加工工艺优化提供了理论依据。

## 1.2 有机成核剂

有机成核剂在一定程度上克服了无机成核剂的某些固有缺点,并可改善制品的透明性与光泽度<sup>[20]</sup>。同时,有机成核剂与PA基体的相容性较好,易在PA基体中均匀分散,因此该类成核剂能有效提升结晶效果。

单体浇铸尼龙(MCPA6)是一种优异的工程塑料,相较于其他PA材料,其制备工艺更简单,力学强度更高,尺寸稳定性更好。然而,MCPA6材料存在吸水率高和热变形温度低等缺点限制了其在某些领域的应用。Yin等<sup>[21]</sup>将与PA6具有良好相容的自组装 $N,N'$ -二环己基-2,6-萘二甲酰胺(NUDA)成核剂溶解在 $\epsilon$ -己内酰胺单体中,并通过阴离子开环聚合合成了MCPA6-NUDA复合材料。NUDA与MCPA6之间存在较强的氢键作用和良好的晶体匹配关系,在结晶过程中降低成核势垒、诱导晶核形成,从而增强MCPA6的结晶能力,使其结晶度可由33.0%增至40.7%,且球晶尺寸减小。与空白MCPA6相比,当NUDA添加质量分数为0.5%时,MCPA6-NUDA复合材料的抗拉强度和冲击强度分别提高了22%和16%,断裂韧性提升了近3倍。该方法有效避免了成核剂在PA中因分散不均导致的团聚问题,结合其优异的力学性能,MCPA6将有望作为金属材料的理想替代品<sup>[22]</sup>。

Kremer等<sup>[23]</sup>将一种基于反式-1,4-二取代环己烷核心的双脲衍生物超分子添加剂,通过熔融共混的方式引入PA6,这种添加剂能显著促进PA6通过氢键作用形成 $\alpha$ 晶结构,使 $\alpha$ 晶含量从57%提高到90%。复合材料的结晶温度在添加剂质量分数只有0.02%的情况下,提高了5℃,大大缩短了半结晶时间,显示出高效的成核能力。根据结晶动力学分析,PA6在添加了成核剂后,由均相成核转变为异相成核;用偏光显微镜观察复合材料的球晶尺寸明显缩小,说明添加剂提供了更多有效的成核位点,从而使成核密度增加,因此,复

合物中的球晶尺寸明显缩小。同时,复合材料的雾度降低了79%,透明度提升43%,力学性能更好。在实际应用中,为了满足某些高附加值产品的特定需求,PA往往需要更高的透明度,该双脲衍生物超分子添加剂的引入为PA6复合材料的高透明度制备提供了重要的指导意见。

Ma等<sup>[24]</sup>利用Mo方程系统地研究了M-木质素(M-lignin)/PA6复合材料的非等温结晶动力学。研究表明,用异氰酸酯改性后的M-lignin是一种高效的有机成核剂,通过异相成核机制显著提升结晶性能,在较低的冷却速率下可显著增加结晶峰温度并加快结晶速率且成核剂最佳的添加质量分数为10%。然而,当M-lignin的添加质量分数大于15%时,过量的M-lignin引起分子链缠结从而阻碍分子链的运动,导致复合材料结晶速率减慢。基于此,Mo方程能够全面表征复合材料在非等温条件下的结晶动力学过程,是分析此类生物基复合材料结晶行为的重要方法,并为进一步调控这类材料的结晶性能提供了新的理论指导。

### 1.3 高分子成核剂

高分子类成核剂可有效解决小分子引起缺陷的问题,能够有效促进PA成核,改善结晶行为,提高复合材料的综合性能<sup>[25]</sup>。但高熔点聚合物与树脂相容性较差,难以在基体中均匀分布。由于高熔点聚合物的分子链与PA基体之间的相互作用较弱,导致成核剂在基体中的分布不均匀。这种不均匀分布不仅影响了材料的结晶效果,还可会降低复合材料的其他性能。因此,解决高分子成核剂与PA基体的相容性问题,是提高复合材料整体性能的关键。

Zhao等<sup>[26]</sup>通过原位合成挤出法制备了亚微米级丙烯酸-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)与PA6的复合材料。当添加质量分数为5%~15%时,ABS作为异相成核剂加速PA6结晶,PA6的半结晶时间( $t_{1/2}$ )明显降低,成核位点增多进而提高成核密度,结晶温度出现上升,且ABS以亚微米粒状态在PA6中均匀分布。这表明两者的界面相容性较好。同时,复合材料的分子链缠结增强,弹性增大。Sohel等<sup>[27]</sup>通过DSC系统分析了不同含量的ABS与PA6共混物的热性能。结果表明,ABS在混合物中的玻璃化转变温度保持不变,表明该共混体系体现出相容性。由于ABS的加入,PA6的熔点也随之降低,这是因为ABS在复合材料中起到了成核剂的作用。同时,共混物的熔融焓与结晶度随ABS含量的增加呈线性下降趋势。相较于PA6,ABS的部分热性能与力学性能较差,但因其具备低模具收缩率和高耐水特性,可有效弥补PA6在加工时稳定性较差的缺点。因此,通过将两者共混改性,不仅能结合两种材料的优点,提升复合材料的尺寸稳定性等综合性能,还能扩展PA6材料的应用潜力。

Liu等<sup>[28]</sup>将聚乙烯吡咯烷酮(PVP)加入到PA66中发现,两者通过分子链间相互作用使得氢键从无序状态变为有序状态,焓值较大程度降低,结晶温度降低3.1℃,在一定程度上抑制分子链的重排与结晶速率。当PVP的添加质量分数为5%时,熔体黏度大幅度降低,这说明复合材料的流动性较

好,可有效解决注塑过程中不均匀的问题。同时,在注塑流场中,二维广角X射线衍射结果显示复合材料的皮层和芯层的晶体赫曼斯取向因子趋近于零,这表明PVP有效抑制了剪切力作用下的取向结晶,从而消除了材料的各向异性结构。该研究为在注塑过程中降低翘曲等缺陷提供了理论依据,进一步推动了该材料在高性能注塑制品中的应用潜力。

Shui等<sup>[29]</sup>针对生物基可降解尼龙4(PA4)加工窗口窄和韧性差两大应用难题,通过硫醇-烯点击反应成功合成出三种不同支链长度的长链超支化聚酯(LHBPx,  $x=1, 2, 3$ ),并采用溶液共混法制备了LHBPx/PA4共混材料。研究发现,LHBPx的引入显著拓宽了PA4的热加工窗口,改善其熔体流变性能,从而使加工性能得到提升;同时,材料的韧性也显著升高,断裂伸长率增加20.4%,并成功实现了PA6由脆性断裂向韧性断裂的转变,其中效果最佳的为长支链的LHBP3。该研究提供了一种通过物理共混方式改善PA4热加工性和韧性的策略,对于扩大PA4在工业塑料领域的应用具有重要的实践意义,此改性方法同样适用于PA6改性。表1总结了部分无机、有机、高分子成核剂的应用特点。

## 2 复合成核剂

不同类型的成核剂对尼龙的改性效果不同,为优化成核剂成核效果并提升材料综合性能,可将同类型或不同种类的成核剂进行复配,形成二元或多元体系<sup>[30-31]</sup>制备成复合成核剂。

无机-无机复合成核剂因操作简单且无机成核来源广等优势被广泛应用于PA的改性研究中。Boucenna等<sup>[32]</sup>将短玻璃纤维(GF)、炭黑(CB)两种无机成核剂复合制备成复合成核剂添加至PA66中。利用多种动力学方法研究了该复合体系的非等温结晶行为。综合DSC,SEM分析可知,GF与CB都是高效的异相成核剂,可以促进 $\alpha$ 晶的形成使得晶体尺寸减小。两者经过协同作用大大提高了PA66的结晶温度和结晶速率,并显著地降低了结晶活化能,提高成核效率。动力学结晶理论的研究表明,复合成核剂与PA66具有良好的界面相容性,且复合材料遵循二级反应减速结晶机制,为今后优化注塑冷却速率的研究提供了理论基础。

Ahlatli等<sup>[33]</sup>以PA6为基体,将玄武岩纤维(BF)分别与两种纳米填料——纤维素纳米纤维(CNF)、埃洛石纳米管(HNTs)复合,制备三元复合材料,并分析了其微观形貌、力学性能、流变行为和热性能。当BF的添加质量分数为20%、HNTs的添加质量分数为5%时,PA6的拉伸强度提高60%,冲击强度提高235%,这表明BF与HNTs两者进行复合后,材料刚性和韧性都得到了大幅度上升。动态力学分析显示,在该复配体系下PA6的储能模量高达9.5 GPa,远远高于纯PA6,这说明纳米填料HNTs和BF的经过协同作用提高了PA6的尺寸稳定性。此外,该复合成核剂使得PA6结晶温度提高5℃,材料热稳定性显著改善。该研究表明,改性PA6因其优异的力学性能与热稳定性具有广阔应用前景,可应用于汽车、建筑等行业,发挥更大优势,同时为开发性能优异的

表1 不同种类的尼龙成核剂的比较

Tab. 1 Comparison of different types of nylon nucleating agents

Types of nucleating agents		Application features	References
Inorganic nucleating agent	Tac	Significantly increases crystallization temperature of PA6 and markedly improves tensile strength.	[15]
	PTW/Kaolin/ Tac	Kaolinite helps improve tensile modulus, talc helps improve impact strength, and PTW decreases tensile strength significantly.	[16]
	CNTs	Promotes the formation of $\alpha$ crystals, effectively improving tensile strength and material conductivity.	[18]
	MMT	Improve crystallinity while making the crystals in the composite material smaller and more uniform.	[19]
Organic nucleating agent	NUDA	Notably improved the material's impact and tensile strength, with elongation at break increasing approximately threefold.	[21]
	Bisurea compounds	Effectively induces PA6 to form $\alpha$ crystals through hydrogen bonding, effectively improving the transparency of the product.	[23]
	M-lignin	Significantly improves crystallization performance and significantly increases the crystallization peak temperature at lower cooling rates.	[24]
Polymer nucleating agent	ABS	Good compatibility with PA6, significantly increasing elasticity.	[26]
	PVP	Reducing the viscosity of the melt can effectively solve the problem of unevenness during the injection molding process.	[28]
	LHBP $x(x=1, 2, 3)$	Effectively improves the rheological properties of PA4 melt and significantly enhances the toughness of the material.	[29]

绿色化复合材料提供了思路。

无机-有机复合成核剂通过协同效应能够细化材料晶粒、调控结晶行为,并最终提升材料性能。Huang等<sup>[34]</sup>利用水热法制备了氧化石墨烯(GO)/苯甲酸钠(Sb)复合成核剂(GO-Sb)。GO-Sb作为高效的异相成核剂,有效促进了PA6的结晶过程,不仅能改善复合材料的结晶温度、结晶度和维卡软化温度等热性能,还可以促进 $\gamma$ 晶型的生成。并且随着Sb添加量的增多, $\gamma$ 晶型衍射峰增强,说明Sb的加入对 $\gamma$ 晶型有一定的促进作用。此外,GO-Sb在复合材料中均匀分散并与基体形成强界面相互作用,使材料的拉伸强度和冲击强度得到一定的提升。具体而言,PA6-GO-Sb(100/0.05/0.25)纳米复合材料的拉伸强度和冲击强度比空白PA6分别提高了69.9%和157.1%,力学性能明显优于PA6-GO复合材料。与此同时,GO-Sb纳米粒子在复合材料中分散性好,界面相互作用强,促使材料形成连续导热网络,使复合材料热导率显著提高,提升幅度达到258.8%,该特性有效解决了电子电器元件中PA6的低导热性问题,为开发具有优异力学性能和导热性能的复合材料提供了有力的理论支持。

有机-有机复合成核剂通常具有更好的成核效率与更好的相容性。董亚鹏等<sup>[35]</sup>将褐煤蜡酸钙成核剂(TMN-102)与芥酸酰胺复配成功制备了复合成核剂(TMN-102E)。在相同的冷却速率下,PA6/TMN-102E复合材料的结晶温度和结晶度较单一的成核剂而言提高幅度更大。同时发现,芥酸酰胺的加入使得TMN-102在PA6基体中的分散更均匀,也不会使PA6晶型及其含量发生改变。通过力学性能测试可知,添加了TMN-102E的复合材料冲击强度提高了12.9%,抗拉强度提高5.4%。

较单一成核剂而言,复合成核剂可以起到协同作用,使PA在保持刚性的同时韧性得到一定的提升。同时,成核剂在PA基体中的分散性得到了改善,减少团聚现象,更显著地提高结晶温度和结晶速率,改善材料的力学性能,缩短成型

周期等。但复合成核剂的开发成本较高,且制备过程较为复杂,这在一定程度上限制了其在工业中的大规模应用。未来,复合成核剂将在兼具成本和性能的优势下投入工业生产中。

### 3 成核剂作用机理

成核剂是一类通过诱导异相成核调控半结晶聚合物结晶过程的助剂,通过挤出熔融与聚合物进行共混,能够显著提升结晶度、加快结晶速率,细化球晶结构,并在一定程度上改善复合材料的力学性能<sup>[36]</sup>。

PA是一种线型高分子聚合物,主链中的酰胺基团(—CO—NH—)间容易形成较强的分子间氢键,赋予材料优异的力学性能<sup>[37-38]</sup>,然而纯的PA成核能垒较高、结晶时间较长、球晶尺寸较大<sup>[39]</sup>。基于Chen等<sup>[40]</sup>粗粒化模拟研究,PA6结晶可分为两步概括:(1)在降温过程中,PA6结晶首先经历氢键层的快速形成阶段,在静电作用驱动下酰胺基团自发排列成规整层状结构,此时主链仍处于无序扭曲状态,有序度与主链长度慢慢增长;(2)此后进入主链重排阶段,氢键层结构保持相对稳定,主链的有序度和晶片厚度增大,最终形成高结晶度的稳定结构。成核剂与聚合物分子链存在化学相互作用时,能够使得复合材料的分子链排序更加有序,从而有效降低活化能,促进晶体的形成并加快结晶速率,使得复合材料的性能得到一定的提升。

### 4 结语

近年来,成核剂在提高PA材料的结晶性、热稳定性、力学性能和加工性能方面的研究取得了显著的进展。随着市场对PA应用范围和需求的不断扩大,各类新型成核剂得到了广泛关注,鉴于复合成核剂可通过协同作用有效提升材料整体性能,目前使用复合成核剂改善PA材料的性能已成为当前研究热点。

未来PA成核剂的研究在绿色化、功能化的发展趋势下将围绕低毒、环保及高功能化等方向展开。通过赋予成核剂

更多附加功能,不仅能够显著提升PA材料的力学性能,还可以使其具备抗菌、阻燃等特性,进而拓宽其应用范围并增强产品附加值。随着多功能成核剂的研发应用,PA材料的综合性能或将实现大幅提升,从而更好地满足不同行业对于PA的多元需求。因此,新型成核剂的研发不仅是提升PA性能的核心手段,更是推动其广泛应用的关键动力。

#### 参考文献

- [1] PARVEEZ B, et al. *Polymers*, 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14225007.
- [2] KUNDU C K, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 156:362–371.
- [3] 贺春尧,等. *工程塑料应用*, 2024, 52(5):181–187.  
HE Chunyao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(5): 181–187.
- [4] GAO J C, et al. *Compos Part C: Open Access*, 2022, 9. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100297.
- [5] LI G Z, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(9):7 801–7 810.
- [6] 袁嘉晨,等. *工程塑料应用*, 2024, 52(5):159–165.  
YUAN Jiachen, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(5):159–165.
- [7] LI T Y, et al. *Polymer*, 2024, 290. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126557.
- [8] GU Y X, et al. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*, 2023, 38 (1):237–243.
- [9] MENG C, et al. *Journal of Polymer Research*, 2025, 32(3). DOI: 10.1007/s10965-025-04303-5.
- [10] GUO Y, et al. *Polymer*, 2024. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127723.
- [11] 于开锋,等. *化工设计通讯*, 2021, 47(8):36–37.  
YU Kaifeng, et al. *Chemical Engineering Design Communications*, 2021, 47(8):36–37.
- [12] WANG L, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(2):544–552.
- [13] PEI X, et al. *Polymer Composites*, 2025. DOI:10.1002/pc.29526.
- [14] TRIPATHY S, et al. *Applied Nanoscience*, 2024, 14(3):465–475.
- [15] GUO Z C, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(9). DOI:10.1002/mame.202000355.
- [16] 丁剑峰,等. *中国塑料*, 2020, 34(12):8–16.  
DING Jianfeng, et al. *China Plastics*, 2020, 34(12):8–16.
- [17] GOHN A M, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2022, 43(24). DOI:10.1002/marc.202270074.
- [18] YU C X, et al. *Polymer Science, Series B*, 2023, 65(5):648–656.
- [19] FU Y, et al. *Nanomaterials*, 2023, 13(12). DOI: 10.3390/nano13121814.
- [20] 杨依维,等. *上海塑料*, 2023, 51(5):14–18.  
YANG Yiwei, et al. *Shanghai Plastics*, 2023, 51(5):14–18.
- [21] YIN X, et al. *Polymer International*, 2023, 72(7):629–639.
- [22] 郝新宇,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(1):173–178.  
HAO Xinyu, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(1): 173–178.
- [23] KREMER D, et al. *Journal of Polymer Science*, 2025. DOI: 10.1002/pol.20250350.
- [24] MA Zhihui, et al. *Journal of Macromolecular Science, Part B* 2024, 63(10):930–940.
- [25] CANDAU N, et al. *Polymer*, 2022, 238. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124424.
- [26] ZHAO D J, et al. *ACS Omega*, 2020, 5(25):15 257–15 267.
- [27] SOHEL M A, et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 129(3):1 689–1 695.
- [28] LIU Y, et al. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2023, 41(3): 394–404.
- [29] SHUI L Y, et al. *Polymers*, 2025, 17(3). DOI: 10.3390/polym17030318.
- [30] KIM D, et al. *International Journal of Applied Glass Science*, 2024, 15(3):243–255.
- [31] ZHANG Y F, et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(23):13 375–13 384.
- [32] BOUCENNA Y, et al. *Materials*, 2023, 16(22). DOI: 10.3390/ma16227073.
- [33] AHLATLI O, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(15): 13 753–13 771.
- [34] HUANG H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022, 139(10). DOI:10.1002/app.51761.
- [35] 董亚鹏,等. *塑料工业*, 2024, 52(10):150–156, 162.  
DONG Yapeng, et al. *China Plastics Industry*, 2024, 52(10):150–156, 162.
- [36] LI X H, et al. *Polymer*, 2020, 189. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122165.
- [37] PARK M, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(14):4 538–4 550.
- [38] GAO Y B, et al. *Polymer*, 2021, 237. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124385.
- [39] UEMATSU H, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 176. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107837.
- [40] CHEN R, et al. *Macromolecules*, 2024, 58(1):424–438.