

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.024

# 聚酰胺6X系列脂肪族弹性体研究进展

戚新宇<sup>1</sup>,杨博<sup>3</sup>,柏葵<sup>2</sup>,刘雪<sup>2</sup>,林枳播<sup>1</sup>,薛心雨<sup>1</sup>,石巧利<sup>1</sup>,刘振国<sup>1,3,4</sup>(1. 河南大学柔性电子学院/河南省柔性电子产业技术研究院, 郑州 450046; 2. 河南大学化学与分子科学学院, 河南开封 475001;  
3. 西北工业大学宁波研究院, 浙江宁波 315000; 4. 西北工业大学柔性电子研究院, 西安 710129)

**摘要:** 根据聚合单体的不同,聚酰胺(PA)的分类可高达数十种,其中以综合性能较为优异的脂肪族PA6,PA66和PA610应用较为广泛。介绍了PA6X系列脂肪族弹性体的合成路线、性能表征及应用领域。分析表明,PA弹性体拥有较为优异的力学、耐热、耐磨、耐低温等性能,并且其自身性质稳定,易于加工,还可与玻璃纤维、碳纤维等增强纤维共混改性以提高其自身性能。为了进一步预测PA弹性体的发展方向,立足于弹性体的自身结构及合成方式,对脂肪族PA6,PA66,PA610弹性体的各项性能及应用领域进行综合叙述。

**关键词:** 聚酰胺弹性体;脂肪族聚酰胺;聚酰胺6;聚酰胺66;聚酰胺610;进展

中图分类号: TQ311

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2025)02-0174-06

## Progress of polyamide 6X series aliphatic elastomers

QI Xinyu<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>3</sup>, BAI Yan<sup>2</sup>, LIU Xue<sup>2</sup>, LIN Zhibo<sup>1</sup>, XUE Xinyu<sup>1</sup>, SHI Qiaoli<sup>1</sup>, LIU Zhenguo<sup>1,3,4</sup>(1. School of Flexible Electronics, Henan University/Henan Flexible Electronics Industry Technology Research Institute, Zhengzhou 450046, China;  
2. Henan University, School of Chemistry and Molecular Science, Kaifeng 475001, China; 3. Northwestern Polytechnical University, Ningbo Research Institute, Ningbo 315000, China; 4. Northwestern Polytechnical University, Institute of Flexible Electronics, Xi'an 710129, China)

**Abstract :** According to the different polymeric monomers, polyamides(PA) can be classified into dozens of kinds, among which the aliphatic groups PA6, PA66 and PA610 with excellent comprehensive properties were widely used. The synthesis route, characterization and application of PA6X series aliphatic elastomers were introduced. The analysis shows that PA elastomer has excellent mechanical, heat resistance, wear resistance, low temperature resistance and other properties, and its own property is stable, easy to process, and can also be modified with glass fiber, carbon fiber and other reinforced fibers to improve its own performance. In order to further predict the development direction of PA elastomers, the properties and applications of aliphatic PA6, PA66 and PA610 elastomers were described comprehensively based on the structure and synthesis methods of the elastomers.

**Keywords :** polyamide elastomer ; aliphatic polyamides ; PA6 ; PA66 ; PA610; progress

聚酰胺(PA)又称为尼龙,是主链上含有重复酰胺基团(-[NHCO]-)的热塑性树脂总称。PA根据其大分子链上的主链结构是否含有苯环,又分为脂肪族PA(如PA6,PA66等)、半芳香族PA(如MXD6,PA6T,PA9T等)和芳香族PA(如Kevlar,Nomex等)。由于脂肪族PA具有强度高、耐磨性好、韧性优等优异性能,其自身及复合材料在服装、家居、工业、军事等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。值得注意的是,脂肪族PA目前主要分为两大类:①由二胺和二酸缩聚得到的PA<sub>m</sub>n系列,例如PA66,其结构通式为:H-[HN(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>NHCO(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CO]<sub>n</sub>-OH;②内酰胺缩聚或开环聚合得到的PA<sub>n</sub>系列,例如PA6,其结构通式为:H-[NH(CH<sub>2</sub>)<sub>5</sub>CO]<sub>n</sub>-OH。

其中,如图1所示,由刚性PA(-[NHCO]-)(硬段)和柔性聚醚(-[R-O-R']-)(软段)嵌段所组成的聚醚酰胺嵌段共聚物被称为PA弹性体,其自身具有轻质、强度高、柔韧好、使用周期长、回弹性高、抗冲能力强、耐低温性能好、透气、永久抗静电等优异特性,被广泛应用于户外装备、电子设备、防水服装、医疗器材等领域。

在PA弹性体中,作为硬段部分的长碳链PA能够赋予弹性体较好的刚性、稳定的化学结构以及优异的尺寸稳定性。所以在PA弹性体市场供给链中,长碳链PA相较于组成软段的醚类材料处于优先供给地位。如东辰瑞森新材料科技有限公司统计的2021~2023年全球长碳链PA市场供给需求所

**基金项目:** 河南省重点研发专项(231111232500),工信部高质量发展专项(TC220A04A-206),浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划[2024C01251(SD2)]

**通信作者:** 刘振国,博士,教授,研究生/博士生导师,研究方向为高性能聚酰胺材料

**收稿日期:** 2024-12-12

**引用格式:** 戚新宇,杨博,柏葵,等.聚酰胺6X系列脂肪族弹性体研究进展[J].工程塑料应用,2025,53(2):174-179.

QI Xinyu, YANG Bo, BAI Yan, et al. Progress of polyamide 6X series aliphatic elastomers[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 174-179.

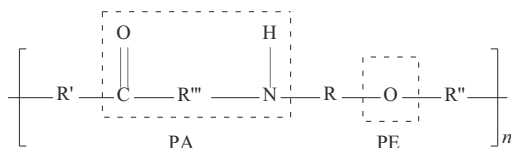


图1 热塑性PA弹性体化学结构(R为脂肪族链)

Fig. 1 Chemical structure of thermoplastic PA elastomer

(R is an aliphatic chain)

示(图2):早在2021年,全球长碳链PA的市场规模总需求量约为11 100余吨,而山东东辰瑞森新材料科技有限公司生产的长碳链PA的生产占有率仅为28%,在全球长碳链PA的市场占有率中处于较低水平。到了2023年,虽然全球长碳链PA市场规模总需求有所波动,但是山东东辰瑞森新材料科技有限公司的长碳链PA生产占有率仍然稳步提升,提高到了37.9%,同比2021年增长了9.9%。这说明,目前国内生产长碳链PA的厂家依然在不断創新合成技术,优化生产工艺,逐步完善高性能长碳链PA的产业链,不断提升国产高质量长碳链PA在全球市场的占有率。

就目前而言,国内外PA弹性体的市场需求日益增多,尤其是综合性能更优、加工性能更好的脂肪族PA弹性体,其综合性能更加优异、应用领域更为宽广。但是,相应的弹性体产品同质化现象严重,众多企业内部缺乏有关PA弹性体合成领域的技术创新。笔者回顾了如今较为成熟的PA6, PA66, PA610系列的脂肪族PA弹性体的合成方法,并对其测试表征及应用领域进行归纳总结。

## 2 PA6弹性体

### 2.1 制备方式

PA6主要由己内酰胺(CL)水解开环聚合所得,由于PA6自身化学结构并不满足弹性体要求,往往需要与其他高聚物进行共聚复合。

例如, Han等<sup>[2]</sup>将聚甲基乙撑碳酸酯(PPC)(自制)与PA6采用传统的两步溶液聚合的方法制备了PPC-mb-PA6弹性体,其不仅具有优异的拉伸强度范围,还拥有一定的形状记忆效应。但是由于异种高聚物共聚过程具有一定的无规性<sup>[3]</sup>,如图2所示。反应位点较难预测,这种状况会因高聚物之间的相容性较差导致生成的高聚物出现相分离现象。

为进一步提高弹性体分子链的规整度与反应过程中的相容性,可以将反应单体与相容剂共混。例如, Gao等<sup>[4]</sup>使用马来酸酐接枝聚苯乙烯/乙烯-丁烯/聚丁二烯三嵌段共聚物(SEBS-g-MAH)作为反应的相容剂,以在挤出机中熔融共混的方式制备了PA6/SEBS弹性体。经过测试表征,证明了在两相界面中形成SEBS-g-PA接枝共聚物,这使得SEBS基质与PA6之间具有良好的黏附力。或者如胡纲<sup>[5]</sup>采用马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物(POE-g-MAH)作为相容剂,和两种热塑性聚酰胺弹性体(TPAE)作为增韧剂添加至PA6,成功实现了对PA6的增强改性与韧性调控。

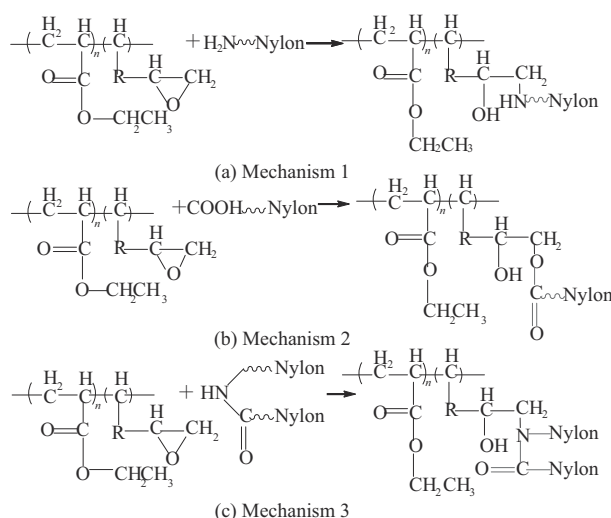

 图2 PA6与丙烯酸酯橡胶(ACM)熔融共聚中可能存在的机理<sup>[3]</sup>

 Fig. 2 Possible mechanism of fusion copolymerization of PA6 and ACM<sup>[3]</sup>

### 2.2 热稳定性

纯PA6具有较为优异的热稳定性,这取决于其自身化学结构的稳定性:PA分子主链中[R'-NH-R''-CO-R]基团上存在三个活泼的氢原子,自由基在攻击这些氢原子后的链转移速度很慢<sup>[6]</sup>,表明纯PA6有很好的耐高温性能。

但是,PA6与其他高聚物聚合成PA弹性体复合材料后热稳定性会呈现下降趋势,均小于其合成原料。例如, Bertolla等<sup>[7]</sup>通过将己内酰胺(德国BASF公司)、己二胺(比利时Antwerp公司)和壬二酸(意大利Novamont S.P.A公司)熔融共聚得到PA69-ran-PA6弹性体并测得其热分解趋势, PA6, PA69及PA69-ran-PA6弹性体热分解温度见表1。

 表1 PA6, PA69及PA69-ran-PA6弹性体初始热解温度<sup>[7]</sup>

 Tab. 1 Initial thermal decomposition temperature of PA6, PA69 and PA69-ran-PA6 elastomers<sup>[7]</sup>

| Item                   | PA69  | Polyamide<br>PA69-6<br>(PA6-20%) | Polyamide<br>PA69-6<br>(PA6-40%) | PA6   |
|------------------------|-------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| Melting temperature/°C | 220±5 | 216±2                            | 144±2                            | 220±2 |

PA6弹性体热稳定性的下降可能由于以下原因:①弹性体内部出现了一定的相分离现象,这导致高聚物在高温下具有很强的相互作用<sup>[8]</sup>;②在250~300 °C的温度范围内加热弹性体时,聚酯和PA在接触界面会发生交换反应,生成嵌段和接枝共聚物,这些生成的共聚物降低弹性体的热稳定性<sup>[9]</sup>;③在PA6的大分子链段中部分氨基(尾端)会被形成的环氧基反应所破坏,这会将PA6的大分子链段降解为分子量较低的片段,加快其热分解<sup>[10]</sup>。

### 2.3 力学性能

PA具有良好的拉伸性能,这得益于分子链中众多的酰胺键,酰胺键之间具有独特的共振现象,彼此之间形成一种高度稳定的三维结构<sup>[11]</sup>。PA中酰胺键的结构特性使PA6在

弹性体复合材料中成为硬段部分,通过调节其含量,可以控制弹性体拉伸强度、断裂伸长率等力学性能。

例如,Crisenza等<sup>[12]</sup>使用CPE Tyrin CM 3630E陶氏聚合物(氯含量35%)与PA6(美国DuPont公司)在Haake record中以180℃的温度共聚制备的PA/CPE弹性体,其拉伸强度和断裂伸长率分别随着PA6含量的增加呈现出下降和增加的趋势。Lim等<sup>[13]</sup>使用PA6(Akulon F 232-D,荷兰DSM Engineering Plastics公司)与聚乙烯-辛烯共聚物接枝马来酸酐(POE-g-MAH)(接枝量为0.6%)(台湾RuiSheng公司)在Werner & Pfeiderer ZSK-30双螺杆挤出机中以210~245℃、螺杆转速300 r/min的参数下熔融共聚制备了PA6/POE-g-MAH弹性体,在POE-g-MAH质量分数仅为10%时,弹性体的断裂韧性就已高达46 kJ/m<sup>2</sup>。这是由于,裂纹尖端所产生的三轴应力导致原位聚合弹性体中PA与POE-g-MAH之间出现了强附着力与弹性模量失配现象,这促进了POE-g-MAH颗粒的气蚀现象<sup>[14]</sup>,在气蚀过程中POE-g-MAH颗粒逐渐被气蚀呈线状排列,可消除周围的膨胀应力,提升弹性体断裂韧性。

#### 2.4 结晶能力与晶体结构

在PA6的XRD衍射图谱中,其α晶型的(002)和(200)特征衍射峰分别位于20.1°和23.8°附近,γ晶型的特征衍射峰位于21.3°附近<sup>[15]</sup>。随着聚酰胺(PEA)分子量的增加,特征衍射峰变得更加尖锐,这是因为PEA弹性体内部的部分γ晶型逐渐转变为更加稳定的α晶型,这说明PEA弹性体拥有比PA6基体更加稳定的晶体结构<sup>[16]</sup>。

但是,由于共聚弹性体为非均相聚合物,聚合物的晶体结构和每个相各不相同,结晶内晶胞的随机取向会使其结晶度同比聚合单体低<sup>[17]</sup>。例如,在PA69-ran-PA6弹性体<sup>[7]</sup>中:PA6和PA69的结晶度分别为32%和31%,PA69-ran-PA66结晶度为24%(PA6-20%),PA69-ran-PA66的结晶度为22%(PA6-40%)。低结晶度这一特性给PA69-ran-PA6弹性体带来了比PA6和PA69更高的透明度,拓宽了PA6基弹性体在透明塑料领域的应用。

#### 2.5 阻燃材料中的应用

Li等<sup>[18]</sup>使用聚酰胺亚胺(PEI)和PA6之间的氢键效应制备了PA6/PEI弹性体;后续二乙基次膦酸铝(ADP)的引入还赋予了弹性体优异的阻燃性能。ADP/PEI-PA6在缩合相中发挥的协同作用,能够提高复合材料在热分解过程中的残碳率,为开发高性能无卤阻燃材料提供了新的方向。其中,PA6/PEI弹性体链段结构及其阻燃机理如图3所示。

### 3 PA66弹性体

#### 3.1 制备方式

PA66为己二酸(HOOC(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>COOH)和1,6己二胺(NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>NH<sub>2</sub>)缩聚而成,具有较高的疲劳强度和刚性,耐热性能较好且摩擦系数低等优势。与PA6情况一致,因自身不存在醚键(R—O—R')结构,PA66在制备弹性体聚合物时往往也需要与其他高聚物共聚。例如,郭梓栋<sup>[19]</sup>采用与氯化聚乙

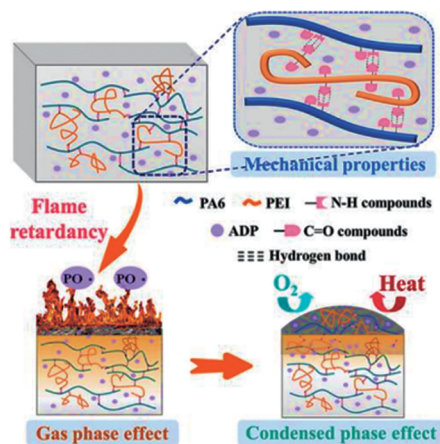


图3 PA6/PEI弹性体链段结构及其阻燃机理<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Structure of PA6/PEI elastomer segments and their flame retardant mechanism<sup>[18]</sup>

烯、丁腈粉末、POE-g-MAH等几种材料分别与PA66共混以制备弹性体,经过表征对比,证明使用POE-g-MAH可以实现对尼龙66的增韧最大化,其设计的TPAE弹性体化学结构如图4所示。

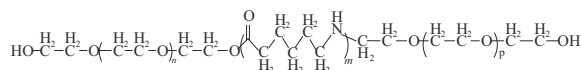


图4 TPAE的化学结构<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Chemical structure of TPAE<sup>[19]</sup>

PA66基弹性体不仅能以母粒的形式生产,还可以经过静电纺丝工艺制作成柔性织物或是纤维膜。例如,Cao等<sup>[20]</sup>采用静电纺丝的方式将PA66(中国神马集团)与聚醚砜(PES)(中国天津博迪化工公司)共聚制备PA66/PES弹性体滤膜,具有良好的亲水性、吸附能力和截留能力且拉伸性能优异,其对PM<sub>0.3-5</sub>表现出高效的过滤效率能够拓宽PA66/PES弹性体滤膜在废气防治领域的应用。

当然,增容剂对PA66系列弹性体的制备依旧有效。例如,Zhang等<sup>[21]</sup>在添加热塑性树脂扩链剂ADR后熔融共混制备了PA66/PA56弹性体复合材料。结果表明,添加增容剂显著提高了弹性体的黏弹性和发泡性能,并提高了PA66/PA56弹性体的结晶速率。

#### 3.2 热稳定性

在PA66弹性体中会由于聚合物相分离所引发的界面相互作用,导致其热稳定性较基体材料会有一定下降<sup>[22]</sup>。例如,PA66/PES弹性体<sup>[20]</sup>的初始热分解温度约为280℃,较PA66基体下降了约22.2%。

利用氢键作用可以在一定程度上增强弹性体的热稳定性,例如PA66/PES弹性体<sup>[23]</sup>虽然初始热分解温度较低,但是热分解速率最大处的温度几乎与PA66处于同一水平,并且与PA66拥有相似的热分解趋势,这是由于PES的磺酰基与PA66的酰胺之间的氢键能够对PA66的分解过程起一定的抑制作用。

### 3.3 力学性能

PA66与EP-g-MAH熔融共聚所制备的弹性体<sup>[24]</sup>,其冲击强度最高约为370 J/m,远高于PA66基体(最高约210 J/m),并且随着环境温度的升高,弹性体冲击强度存在一定的上升趋势。同样,无机纳米填料的引入不仅在一定程度上提高弹性体的力学性能,还可以改善弹性体因为相分离所导致的热稳定性下降问题。例如,在PA66/POE-g-MAH弹性体中引入纳米CaCO<sub>3</sub><sup>[25]</sup>,无机纳米填料进入高聚物基体后可导致高聚物成核方式由均相成核转变为非均相成核<sup>[26]</sup>,弹性体的熔融温度与结晶温度均明显提高,这对弹性体力学性能的提升起到了正面促进作用。

当然,无机填料与增强纤维的共混还能够进一步增强弹性体的力学性能。例如,在PA66/三氯乙烯-马来酸酐接枝聚丙烯(TCE-MAPE)复合材料中加入了短碳纤维(SCF)和石墨烯纳米片(GNPs)<sup>[27]</sup>,单独添加SCF后,SR-2样品(只添加SCF)的拉伸强度陡然提升,相对SR-1样品(无任何添加剂)提高了131.1%。继续添加GNPs后,SR-5样品的拉伸强度较SR-1和SR-2样品分别增加了144.4%和5.7%,弹性体的拉伸弹性模量也得到一定提升。这是因为MAPE能够在与SCF接触表面的同时形成共价键,使SCF与聚合物基体能够紧密连接<sup>[28]</sup>,SCF与GNPs都能够在弹性体的拉伸过程中起到一定的应力传递和桥接作用。这一现象与滑石粉增强PA66/POE-g-MAH弹性体<sup>[25]</sup>的拉伸弹性模量结果一致,证明了该方法的可行性。

### 3.4 异形构件领域的应用

由于部分PA66基弹性体材料具有良好的可加工性和稳定的力学性能,往往会通过挤出成型的方式制备可用于电子电器、电气精密仪器、汽车、机械等领域所用的封装膜或结构件。

例如,Suresha等<sup>[27]</sup>使用石墨烯纳米片和碳纤维成功实现了对PA66/热塑性共聚酯弹性体的力学性能增强,制备的弹性体材料具有较好的流动性与界面黏附力,可以应用于电子电器与电气精密仪器用封装膜或电源保护壳的吹塑与注塑成型。林爱琴等<sup>[29]</sup>使用POE-g-MAH对PA66进行增韧改性,所得弹性体的简支梁缺口冲击强度是纯PA66的4倍,该弹性体可以通过滚塑或挤出成型制备箱体和异型件以应用于汽车和机械领域。

## 4 PA610弹性体

### 4.1 制备方式

PA610即聚癸二酰己二胺,通过己二胺与癸二酸缩聚而成,其中的癸二酸来源于蓖麻植物,大大提高了PA610的环境友好性,当今全球面临着化石原料紧缺的危机,PA610材料在未来会得到越来越多的应用。

同样,PA610也可与其他高聚物共聚接枝制备PA610系列弹性体。例如,Tian等<sup>[30]</sup>采用PA610(德国BASF公司)与棒状微尺度纤维素纤维(CF)(德国JRS公司)、球形纤维素纳米晶体(CNC)(加拿大CelluForce公司)<sup>[31]</sup>在双螺杆挤出机中

熔融共聚以制备PA610/CF-CNC弹性体。由于球形的CNC具有较高的比面积,并且其与基体PA610的界面处会出现大量的氢键<sup>[32]</sup>,这一现象导致CNC加入之后使得原本低阻尼的PA610拥有了高阻尼的特性<sup>[33]</sup>;同时,CF的加入后提高了PA610的吸湿性,这也会增加弹性体自身的基础阻尼,这种增强高阻尼的特性可以为其他低阻尼聚合物的阻尼提升提供理论指导和数据支撑。再如,Fu等<sup>[34]</sup>采用PA610溶液(中国平顶山神马工程塑料有限公司)与改进后的蒙脱土(MMT)在高压反应釜中,以原位聚合的方法制备出了PA610/MMT弹性体。结果表明,较低的MMT含量能有效促进PA610的结晶。这是因为,较少含量的MMT能够充当PA610的结晶位点,使其结晶方式由均相成核转变为异相成核<sup>[26]</sup>。

并且,在PA610系列弹性体中加入特定性能的无机填料还可以提高弹性体自身的相关特性。例如,Fang-Cheng Pai等<sup>[35]</sup>使用聚乳酸(聚丙交酯,PLA)(美国Natureworks LLC公司)与PA610(德国BASF公司)在塑料搅拌机(PL-2000,德国Brabender公司)中以100 r/min的转速在220℃下制备PA610/PLA弹性体,并在熔融过程中加入六方氮化硼(BN)作为导热填料。实验结果表明,BN以片状形态分散在弹性体中,并使其力学性能有一定的提升,当BN质量分数为33.3%时弹性体的导热系数提升到了0.86 W/(m·K)。同样,Marsset等<sup>[36]</sup>使用PA610(法国IFS公司)与高岭土纳米管(HNTs)(西班牙Sigma Aldrich公司)在双螺杆挤出机中熔融共聚制备PA610/HNTs弹性体,HNTs的加入能够显著减少弹性体在燃烧过程中排放的有害气体。

### 4.2 热稳定性

增强PA610基弹性体的热稳定性可以通过添加无机填料来解决。例如,通过对PA610与PLA/BN复合材料所制备PA610/PLA-BN弹性体的热重分析可得<sup>[35]</sup>:在弹性体中引入BN后,弹性体整体的热分解温度均有不同程度的提升。并且,随着BN的含量增加,弹性体的热稳定性也呈上升趋势。这是由于BN在弹性体内分散较为均匀,拥有“血小板”结构的BN呈现出优异的热阻特性,可以有效提高基体材料的热稳定性和结构稳定性。

### 4.3 力学性能

无机填料拥有良好的尺寸稳定性和空间位阻效应<sup>[37]</sup>,在聚合物拉伸过程中能够起到桥接和应力集中的作用,可以有效提高聚合物的拉伸强度。例如,将具有片状结构的BN加入到PA610/PLA弹性体中<sup>[37]</sup>,由于BN自身的刚性,能够有效提高弹性体的拉伸强度。但是当BN质量分数超过40份时,因为发生团聚现象而劣化弹性体的拉伸性能<sup>[38]</sup>;故在制备弹性体混合物时,应控制无机填料的含量。

### 4.4 结晶能力与晶体结构

在无机填料与PA基体采用熔体聚合方式制备弹性体后,并不会对PA基体的晶体结构产生影响。例如,采用原位聚合后生成的PA610/MMT弹性体<sup>[34]</sup>,PA的(100)镜面在 $2\theta=21.6^\circ$ 处出现,表明MMT的加入并没有改变基体材料PA610

的 $\alpha$ -三斜晶系;而且,其特征衍射峰峰值和峰宽的变化表明MMT的加入改变了PA610的结晶度,结晶度的变化会在一定程度上影响其力学性能<sup>[39]</sup>。

由于晶体间存在竞争生长与位阻现象,并且在结晶过程中外来界面用完后将不再产生新的晶粒,所以与弹性体共混的无机填料不一定对弹性体的结晶起促进作用。例如,将BN加入PA610/PLA弹性体中<sup>[35]</sup>,BN的加入阻碍了PA610在弹性体中的结晶堆积现象,并阻碍内部大分子链的结晶行为,这就导致了弹性体结晶度的下降<sup>[40]</sup>。同时,由于BN会阻碍PA610在弹性体中的结晶堆积,弹性体的熔化焓也会降低。

#### 4.5 高阻尼材料领域的应用

由PA610与CNC,CF共混所制备的PA610/CF-CNC弹性体在CNC自身独特的化学结构下被赋予了“高阻尼”这一特性<sup>[30]</sup>。并且,由于纤维素纤维与PA610自身存在“吸水”这一特性,被吸收的水分提升了弹性体内部的自由体积,使得大分子链段的运动能力得到提升,并且能够在一定程度上增大链段之间的内摩擦<sup>[41]</sup>,从而在保水状态下进一步提升了弹性体的阻尼。

不仅如此,高聚物之间的相容性增加或增加链段中的侧链数目和极性(氢键)也可提高复合材料的阻尼性能<sup>[42-43]</sup>。PA610/CF-CNC弹性体以其优异的减振降噪性能,能够在远洋船舶、海上平台等诸多领域得到越来越广泛的应用<sup>[44]</sup>。

#### 4.6 阻燃材料中的应用

将HNTs加入到PA610中可使PA610/HNTs弹性体获得优异的阻燃性能<sup>[36]</sup>。随着HNTs的加入,可以显著降低热释放率的峰值,这种热量释放的改善可以使挥发性的热分解产物产生传质延迟现象,使其被困在HNTs的管腔内部,阻止燃烧。PA610/HNTs弹性体的阻燃机理如图5所示。

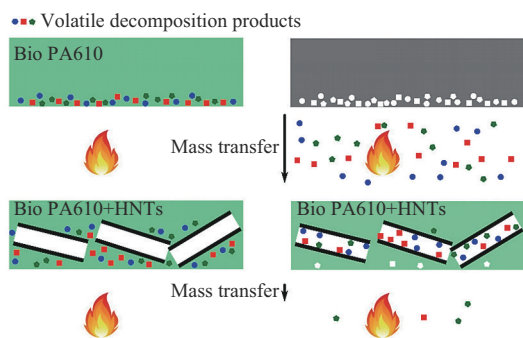


图5 BioPA610和bioPA610+HNTs中通过截留挥发性分解产物和延迟传质来增强HNTs阻燃性<sup>[36]</sup>

Fig. 5 Enhancing flame retardancy of HNTs by intercepting volatile decomposition products and delaying mass transfer in bioPA610 and bioPA610+HNTs<sup>[36]</sup>

同时,HNTs的加入可以使得弹性体在燃烧过程中产生碳层<sup>[45]</sup>,阻碍了基体材料与氧气的直接接触,并减缓挥发性产物的溢出<sup>[46]</sup>,从而达到优异的阻燃效果。

## 5 总结与展望

主要就目前市场中常见的PA6、PA66和PA610系列的脂肪族PA弹性体制备方式、性能和应用场景进行综述。其中,PA6X弹性体系列的制备方式主要以熔融聚合为主。并且,由于PA弹性体中会出现微相分离现象,这使得其热稳定性较PA原料有所下降。但是,可以通过添加无机填料的方式进一步提升弹性体的结晶能力和力学性能。这些灵活可调的性能使得PA6X系列弹性体在高阻尼、生物医用和阻燃领域得到广泛的应用。

《中国尼龙弹性体行业市场调研与未来预测报告》表示:在国内市场中,短链PA弹性体以国内自主研发为主,其主要产品应用在消费电子和发泡领域,例如电子器件、电容笔芯、鞋材等。而长链PA弹性体目前主要依靠进口,其应用场景多为高端领域,例如高端运动鞋底、雪橇、汽车工业和医疗器械等领域。由此可见,国内自主生产高性能的PA弹性体技术还需要朝着提升性能、降低成本的方向发展,并且还可以将PA弹性体与其他高性能材料共聚生成热塑性弹性体合金,进一步提升PA弹性体的性能。今后应开拓PA弹性体的应用新领域,减弱国内高端PA弹性体相关技术和对应产品对外依赖度,扩大其下游应用领域。

## 参考文献

- [1] SAFAEI B, et al. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024(33):6 261–6305.
- [2] HAN W K, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141 (43):e56154. DOI:10.1002/app.56154.
- [3] ABT T, et al. Polymer International, 2020(69):794–803.
- [4] GAO W T, et al. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(4): 1 052–1 060.
- [5] 胡纲.工程塑料应用, 2022, 50(2):144–149.  
HU GANG. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2): 144–149.
- [6] 马立群,等.工程塑料应用, 2018, 46(10):137–140.  
MA Liquan, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10): 137–140.
- [7] BERTOLLA M, et al. Polymers, 2022, 14(19). DOI: 10.3390/ polym14194115.
- [8] 曾妍,等.高分子材料科学与工程, 2024. DOI: 10.16865/j. cnki.1000-7555.2024.0213.  
ZENG Yan, et al. Polymer materials Science & Engineering, 2024. DOI:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0213.
- [9] 张春梅,等.工程塑料应用, 2020, 48(6):103–107.  
ZHANG Chunmei, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48 (6):103–107.
- [10] 李建伟,等.工程塑料应用, 2022, 50(5):121–125.  
LI Jianwei, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5): 121–125.
- [11] MAHESH S, et al. Molecules: A Journal of Synthetic Chemistry and Natural Product Chemistry, 2018, 23(10). DOI: 10.3390/

- molecules23102615.
- [12] CRISENZA T, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2012, 33(2):114–119.
- [13] LIM S, et al. *Composites Science and Technology. Polymer Nanocomposites-Modeling, Mechanical and Functional Properties*, 2007, 67(14):2 914–2 923.
- [14] 张梓轩,等. *中国表面工程*, 2024, 37(5):88–101.  
ZHANG Zixuan, et al. *China Surface Engineering*, 2024, 37(5): 88–101.
- [15] XU J, et al. *Macromolecules*, 2018(51):137–150.
- [16] 周仕龙,等. *工程塑料应用*, 2020, 48(3):115–120.  
ZHOU Shilong, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48 (3):115–120.
- [17] SHUAI C J, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 9 (30):2 425–2 435.
- [18] LI J X, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 48(139). DOI:10.1002/app.53226.
- [19] 郭梓栋.增韧阻燃尼龙66配方设计及工艺研究[D].郑州:河南工业大学, 2024.  
GUO Zidong. Study on formula and process of toughened and flame-retardant nylon 66[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.
- [20] CAO J, et al. *Materials Letters*, 2017(192):12–16.
- [21] ZHANG Z, et al. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(24): 11 193–11 214.
- [22] DING Y, et al. *Small*, 2024, 20(34). DOI: 10.1002/ smll.202401942.
- [23] POPE C A, et al. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006(56):709–742.
- [24] ALSEWAILEM F, et al. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2008(84):693–703.
- [25] LIU Z, et al. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2011 (50):484–492.
- [26] QIANG T, et al. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(13):12 243–12 265.
- [27] SURESHA B, et al. *Materials Research Express*, 2020, 7(1). DOI: 10.1088/2053–1591/ab648 d.
- [28] LIAO L, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(8):7 087–7 101.
- [29] 林爱琴,等. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3):225–230.  
LIN Aiqin, et al. *Journal of Jianghan University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(3):225–230.
- [30] TIAN Y, et al. *Materials Today Communications*, 2022, 33. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104325.
- [31] PENG Y, et al. *Cellulose*, 2015, 22(5):3 199–3 215.
- [32] CHOI W, et al. *ACS applied Materials & Interfaces*, 2022, 26(14): 30 056–30 066.
- [33] LAN Y, et al. *Macromolecular Theory and Simulations*, 2022, 31 (3). DOI:10.1002/mats.202100095.
- [34] FU Y, et al. *Nanomaterials*, 2023, 13(12). DOI: 10.3390/ nano13121814.
- [35] PAI F C, et al. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2019, 52(1): 53–69.
- [36] MARSET D, et al. *Polymers*, 2020, 12(12). DOI: 10.3390/ polym12123050.
- [37] ZHANG J, et al. *Advanced Functional Materials*, 2022, 43(32). DOI:10.1002/adfm.202207101.
- [38] YANG S, et al. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2017, 38:796–800.
- [39] 潘宇,等. *工程塑料应用*, 2020, 48(10):110–115.  
PAN Yu, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10): 110–115.
- [40] DUAN Z, et al. *Journal of Membrane Science*, 2013, 445:112–118.
- [41] BANDI S, et al. *Macromolecules*, 2006, 39(19):6 537–6 545.
- [42] FENG M, et al. *European Polymer Journal*, 2024(220). DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113446.
- [43] XIE Y, et al. *European Polymer Journal*, 2024(202). DOI:10.1016/ j.eurpolymj.2023.112647.
- [44] 杨岱鑫,等.高阻尼系泊系统及其对海上漂浮平台动力响应的抑制效果[C]//第33届全国结构工程学术会议论文集(第II册).北京:中国力学学会结构工程专业委员会, 2024:1–7.  
YANG Daixin, et al. High-damping mooring systems for structural response reduction of floating offshore renewable energy applications[C]//Proceedings of the 33rd National Conference on Structural Engineering (Volume II). Beijing: Structural Engineering Committee of Chinese Society of Mechanics, 2024:1–7.
- [45] TAN Y, et al. *Materials*, 2020, 13(20). DOI:10.3390/ma13204509.
- [46] YUAN W, et al. *Polymers*, 2022, 14(10). DOI: 10.3390/polym 14102055.