

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.029

尼龙在汽车工业中的应用研究进展

郭应辉^{1,2}, 覃清钰¹, 李艳华¹, 秦海¹, 黄湘琦¹, 刘睿轩¹

(1. 上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西新能源汽车实验室, 广西柳州 545007; 2. 中国科学技术大学能源科学与技术学院, 广州 510650)

摘要: 聚焦尼龙在汽车工业中的应用, 阐述尼龙的分类、性能特点及其在汽车工业中的应用, 介绍了功能性尼龙(如耐高温尼龙、长碳链尼龙、透明尼龙和尼龙弹性体等)在汽车发动机、燃料系统、内外饰件等部件中的应用。通过增强改性、添加改性剂和复合改性等手段, 开发出如玻璃纤维增强尼龙、阻燃尼龙、尼龙丁腈橡胶复合材料等高性能材料, 进一步提升了尼龙的力学性能、耐热性和加工性。此外, 生物基尼龙材料的出现, 为尼龙的可持续发展提供了新方向。未来, 尼龙有望凭借其综合性能优势, 获得更广泛的应用。

关键词: 尼龙; 汽车工业; 功能性尼龙; 尼龙改性材料; 生物基尼龙

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0229-07

Research progress on application of nylon in automobile industry

GUO Yinghui^{1,2}, QIN Qingyu¹, LI Yanhua¹, QIN Hai¹, HUANG Xiangqi¹, LIU Ruixuan¹

(1. Guangxi Laboratory of New Energy Automobile, SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China;

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Guangzhou 510650, China)

Abstract : The application of nylon in the automotive industry was focused, the classification and performance characteristics of nylon as well as its applications in the automotive industry were expounded, and the application of functional nylon such as high temperature resistant nylon, long carbon chain nylon, transparent nylon and nylon elastomer in automobile engines, fuel systems, interior and exterior parts were introduced. High-performance materials such as glass fiber reinforced nylon, flame retardant nylon, and nylon nitrile rubber composites were developed by means of reinforcement, modifier addition, and composite modification, which further improved the mechanical properties, heat resistance, and processability of nylon. In addition, the emergence of bio-based nylon materials provides a new direction for the sustainable development of nylon. In the future, nylon is expected to be more widely used by virtue of its comprehensive performance advantages.

Keywords : nylon ; automotive industry ; functional nylon ; modified nylon material ; bio-based nylon

随着现代经济发展和科技的不断进步,人们对于汽车的安全性、轻量化、节能性以及舒适性等方面的追求与日俱增。汽车工业作为现代制造业的重要支柱,对于材料的性能和特性有着极高的要求。尼龙具备出色的强度、韧性、耐磨、耐热及抗化学腐蚀等特性,可满足汽车零部件在复杂工况下的使用要求。尼龙材料的轻量化优势能够有效降低车辆整体质量,提升燃油经济性并减少尾气排放,契合当前汽车工业可持续发展趋势。此外,尼龙良好的加工性能与设计灵活性,使其可适配多样化形状和结构的汽车零部件制造,为汽车设计提供了更宽泛的创新空间。笔者综述了针对汽车工业尼龙的研究、应用现状以及未来发展的趋势,推动汽车制造技

术的进步并分析了行业对尼龙利用产生的重要意义^[1]。

1 尼龙材料及其应用概述

尼龙又称为聚酰胺(PA),是一种以酰胺基团作为特征基团在分子链上重复的热塑性树脂的总称。尼龙大多数是以二元酸和二元胺(或 ω -氨基酸、内酰胺)为聚合单体,通过酰胺键的键连方式缩聚而成的高分子化合物。尼龙分子链内相邻的酰胺键之间存在着大量的氢键相互作用,使其具有高强度、高韧性、高耐磨以及易于加工等特点。另外,尼龙还有一大特点是具有吸水性,这是由于尼龙分子中含有的酰胺基团为亲水性基团,在含水量增加后,尼龙及其制品的物理、力学性能均呈现不同程度下降,进而影响使用安全和寿命,且

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA23062065,桂科AA23062063),广西青年科技人才托举工程项目(2025YESSGX206)

通信作者: 郭应辉,硕士,工程师,研究方向为生物基材料

收稿日期: 2025-06-14

引用格式: 郭应辉,覃清钰,李艳华,等. 尼龙在汽车工业中的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 229-235.

GUO Yinghui, QIN Qingyu, LI Yanhua, et al. Research progress on application of nylon in automobile industry[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 229-235.

尼龙材料中的酰胺基密度越大,吸水率越高^[2]。

随着现代工业的不断发展,对尼龙材料的需求也与日俱增,各类尼龙材料在诸多领域里被广泛应用^[3]。尼龙最受大众熟知的领域是服装和家用纺织品,因其耐磨性、吸湿性、染色性、耐疲劳性和高弹性等特点备受追捧^[4-5]。在电子电器领域,尼龙因其良好的绝缘性能、耐高温性能、力学强度和低成本,被制成电器开关、插座、电子元件的支撑架、绝缘子等^[6-7]。航空航天领域需要材料耐高温、耐低温、耐腐蚀和耐磨等性能,尼龙材料的特点正好可以满足其需求,可被制成飞机中的气压计、温度传感器、电路板等^[8]。

近十几年来,汽车工业迅速发展,特别是新能源汽车的发展势头更是强劲。人们对汽车的低能耗、高环保、智能化等需求不断增加,汽车行业的未来发展也将朝轻量化、电智能化和低碳化的方向前进。在这样的背景下,尼龙作为一种易加工、可回收、来源充足且耐磨、耐腐蚀、强度高、自润滑等综合性能优异的材料,在汽车工业中的应用得到了巨大的发展,不仅被用于汽车发动机、结构部件上,还广泛应用在消费者能直接接触的内外饰件上。

表1 某乘用车上应用通用尼龙的零部件

Tab. 1 Components using general nylon in a motor vehicle

Application position/part	PA6	PA66
Interior and exterior trim area	Plastic dashboard base/Cable tie	Shift fixing strap/Center armrest bushing/Sun visor screw cover
Door area	Strut clamp/Stopper block	Strut clamp/Stopper block
Body area	Hole plug	Partition block
Electronic area		Switch sheath/Coil plastic housing/End cap/USB socket
Air conditioning area	Nozzle	
Chassis area		Gear/Bearing/Pedal bushing
Engine area		Booster hose clamp/Brake hard tube assembly/Fuel bundle assembly tube clamp

2.2 功能性尼龙

随着行业的不断变化,对材料的耐冲击、耐高温、抗疲劳等性能的要求逐渐升高,传统的常规尼龙具有亲水性强、不耐高温、透明性差等缺点,制约了其在汽车工业中的应用。为了改善传统尼龙的适用性,可以通过引入更多新的合成单体进行合成,也被叫做原位共聚改性,进而制成可以满足不同使用场景、不同材料特性的功能性尼龙产品,例如耐高温尼龙、长碳链尼龙、透明尼龙和尼龙弹性体等^[12]。

耐高温尼龙的熔融温度接近或超过300℃,长期使用温度在150℃以上,在较宽的温度范围和高湿度的环境中,仍然能保持优异的力学性能,具有优异抗腐蚀性、耐热性、耐磨性和较低吸水性及较高的力学强度。耐高温尼龙的种类主要为半芳香族尼龙和芳香族尼龙,即合成尼龙单体中含有共轭结构的芳香环。芳香环可以提高分子链的刚性,削弱分子链活性,提高尼龙的玻璃化转变温度,并保持或增加尼龙原有的优异性能^[13]。常见的耐高温尼龙有PA4T,PA5T,PA6T,PA9T,PA10T,PA12T等。耐高温尼龙在汽车领域里应用很广泛,因其质量轻、长期耐热性、燃料阻隔性等特点,被用于制作制动管、油管和进气歧管等,还被用于制作发动机周边的零部件以及一些齿轮和轴承传动部件,以满足各类零件耐

2 汽车工业中尼龙材料的应用

从国内外情况来看,车用塑料使用量已成为发达国家衡量汽车设计与制造水平的重要指标。据中国工程塑料加工协会统计报告显示,截至2013年,我国单车尼龙用量达16.8 kg,且该数据呈逐年上升趋势^[9]。

2.1 通用尼龙

通用尼龙一般是指PA6,PA66等未经过其他改性处理的基础树脂材料。相较于目前被广泛研究的改性尼龙,通用尼龙虽然在极端工况下功能表现不佳,但由于基础力学性能均衡,仍可以满足普通条件下对一般性功能的需求。在大规模产能下,通用尼龙材料的成本远低于多数改性尼龙,更具有价格优势。得益于广泛的场景适配性及成熟稳定的供应链体系,通用尼龙在汽车工业尼龙制零部件所占的比例可以达到89%。以塑料制品率最高的德国轿车为例,在一辆普通轿车上,通用材料注塑件质量可达32.5 kg。零部件主要应用功能区包括发动机区、燃料系统、电气电子系统、底盘系统、安全系统等^[10-11]。表1为上汽通用五菱某乘用车车型通用尼龙应用的零部件分布。

腐蚀、耐冲击的需求。Kuraray公司^[14]拥有自主产品牌号Genestar的系列半芳香族尼龙产品PA9T树脂是由壬二胺和对苯二甲酸通过熔融缩聚工艺合成的,该材料具有高达125℃的玻璃化转变温度,熔点超过260℃。凭借其高结晶性、低翘曲度以及卓越的耐腐蚀性能,PA9T树脂能够在高温条件下维持出色的强度与韧性,因此已被广泛应用于汽车发动机罩等关键部件。

长碳链尼龙也是功能性尼龙的一种,一般是指分子链中亚甲基数目在10个以上的尼龙,具有高韧性^[15],并且由于亚甲基数量多,酰胺键浓度相对更低,可以有效抑制尼龙材料的吸水能力^[2,16-17]。常见的长碳链尼龙产品有PA11,PA12,PA1010,PA1212等^[18]。PA12吸水率可以达到0.3%,远低于PA6的1.8%,并同样具有短链尼龙加工温度宽且易于成型加工的特点,在低温下环境下仍能保持较好的柔韧性和力学性能,对很多化学物质具有良好的耐受性。因此,它在潮湿、对尺寸稳定性要求高的环境下具有独特的优势。长碳链尼龙是制造汽车油管的理想材料,相关报告说明发达国家60%~70%的长碳链尼龙用于生产汽车软管,如刹车管、输油管、离合器软管等,PA12在美国汽车软管中的使用率达50%,欧洲达到70%。另外长碳链尼龙还能用作消音齿轮、轴承、止推

垫、抗震件、刮水器^[19]。

透明尼龙是一种无定型或微结晶的热塑性尼龙,在拥有传统尼龙特性的基础上,透光率可以达到90%,透明度在聚碳酸酯和聚甲基丙烯酸甲酯之间。尼龙的透明性一般是采用支化法在分子链上引入侧链取代基,进而抑制尼龙结晶体的形成来实现的,可见光不会在产品发生散射,因而在肉眼观测下材料呈现透明状态^[20]。在继承了传统尼龙材料优秀的耐候、耐磨等性能下,透明尼龙还以独特的透明、抗紫外光等性能,被广泛用于汽车内饰、仪表板、控制台等与乘员频繁交互的部件^[21]。透明尼龙确保了其在整车生命周期内既能保持观感、触感的持久,又能保证造型设计的自由度和完整性。EMS的Grilamid TR 90被应用于梅赛德斯奔驰SLK系列车型的灯光装饰条,BASF的Ultramid Vision系列被用于背光元件^[22],例如开关、耐光罩等。

尼龙弹性体也被称为聚酰胺类热塑性弹性体(TPAE),是由具有结晶结构的聚酰胺硬段和非结晶结构的聚酯或聚醚软段组合合成的既有塑料的可加工性,又有橡胶高弹性的高分子化合物。硬段的聚酰胺结晶作为物理交联点,将无定型的软段进行交联,赋予了其熔融加工性能、力学性能以及较好的回弹性和低温柔韧性。TPAE在汽车工业中被应用在隔音车门等部件,也在例如鞋材、消费电子等其他领域大放异彩^[23],但较高的成本在某种程度上也制约了其应用。

2.3 尼龙改性材料

随着人们生活水平的日益提升,对于尼龙的需求也日新月异,通用尼龙产品已经无法满足市场对尼龙多样化的需求,不断推动着尼龙通过各类改性方法进行发展与创新,为实现其功能性、实用性和经济性的全面提升,尼龙改性材料应运而生。常见的尼龙改性材料包括增强型尼龙材料、添加改性剂型尼龙材料、复合型尼龙材料^[24]等,除上述改性方法以外,还有化学改性、辐射改性和表面改性等手段可以对尼龙进行改性处理。

2.3.1 增强型尼龙改性材料

通常通过添加玻璃纤维、碳纤维等增强材料来合成增强型尼龙材料。其中,玻璃纤维是目前应用最广泛的尼龙增强材料,具有成本低廉、拉伸强度高、断裂伸长率低、拉伸弹性模量高等优良的力学性能,以及良好的耐热性和尺寸稳定性。通过玻璃纤维增强,尼龙材料的综合性能得到显著提升,广泛应用于汽车、电子、航空航天等领域^[25]。由于玻璃纤维与尼龙树脂的极性不同、相容性较差、界面作用力较弱,二者在外力作用下会降低材料的冲击性能。所以在利用玻璃纤维进行改性时,一般会对玻璃纤维表面进行有机化改性,操作上则是在二者混合加强之前,先对玻璃纤维进行上浆操作,上浆剂多为环氧类、聚氨酯类和硅烷偶联剂^[26-27]等,让纤维表面接入大量活性官能团,提高在共混过程中与尼龙分子链的反应程度,使界面结合强度增加,有助于改善和提高改性材料的力学性能、耐水解性能等^[28]。碳纤维增强尼龙改性材料则是另一大重要分支。碳纤维较玻璃纤维模量更高、强度

更大、质量反而更轻,并且在力学性能表现上也会更优于玻璃纤维增强尼龙改性材料。同样的,碳纤维表面的活性官能团极少,通常在改性材料合成前,也需要对碳纤维进行表面物理或化学改性处理,包括湿法改性、干法改性和纳米材料多尺度改性等^[29]。

在汽车制造领域,玻璃纤维增强尼龙材料被广泛应用于发动机盖罩和散热格栅等部件。例如,奥迪A6的发动机装饰盖、奥迪和捷达的散热器水室、桑塔纳的油箱、捷达的油门踏板以及速腾和迈腾的燃油管路等,均已采用这种材料并实现量产^[30]。Teixeira等^[31]对影响应用于发动机舱的玻璃纤维增强PA66的力学性能和微观结构的加工因素进行探究,结果表明,材料的力学性能取决于玻璃纤维长度以及模塑产品内纤维的取向,玻璃纤维倾向于沿着注入流平面排列,当限制注塑流体流动取向后,虽然纤维长度减小,但拉伸强度仍会有所提高,因此后者的影响更为显著。Wei等^[32]对应用于汽车燃料系统中的玻璃纤维增强半芳香族尼龙稳定性进行了研究,在更苛刻的工作环境(80%石油+20%生物柴油混合物)中对比了玻璃纤维增强尼龙与通用尼龙的阻隔性能,前者通过吸附极少量的燃料不仅使得塑性增加,并且使玻璃纤维和半芳香族尼龙基质之间的玻璃化转变温度升高且提升界面完整性,使得在长时间暴露下仍不产生负面影响,被认为是应用于燃料系统中的理想材料。玻璃纤维增强尼龙材料在汽车零件上的部分应用示例见表2。

碳纤维增强尼龙材料的相关研究同样也有很多,包括碳纤维含量的影响、加工工艺的影响、碳纤维表面改性影响等。王峰等^[33]在PA66基体中掺杂质量分数5%~20%的碳纤维,以改善PA66的力学性能和热稳定性,结果证明,相比未改性的PA66,碳纤维质量分数为15%时,碳纤维增强尼龙材料拉伸强度可以达到180 MPa,比纯尼龙材料提升177%;拉伸弹性模量为19 867 MPa,比尼龙材料提高了7.1倍,材料综合性能都有不同程度的提高,这为实现在汽车轻量化领域应用打下基础。在汽车领域,碳纤维增强复合尼龙材料主要应用在小批量车型、高级轿车和F1赛车上的车体部分、发动机部件、底盘系统等^[34]。Lopera-Valle等^[35]为了顺应英国发布的欧洲循环经济一揽子计划中对于碳纤维增强聚合物材料发展需求,采用机械研磨和注射成型工艺制备不同含量再生碳纤维增强PA66,探究了其力学性能的变化。结果表明,其力学性能的变化与纤维长度平均值和分布的变化有关。另外,Oliver-Ortega等^[36]利用石杉木木纤维增强PA11替代由玻璃纤维增强聚丙烯来制成车门把手,并对二者力学性能进行了比较。结果发现两种材料的宏观性能是相似的,并达到了类似的拉伸强度和弯曲强度,能够实现替换的同时,零件还可回收、可生物降解。

玻璃纤维和碳纤维对尼龙均具有增强效果,二者同时加入可以起到协同增强效果。赵丽等^[37]利用硅烷偶联剂KH550对玻璃纤维、碳纤维均进行了表面处理,再用双螺杆挤出造粒和注射成型方式制备出玻璃纤维/碳纤维增强PA66

表 2 玻璃纤维增强尼龙材料在汽车零件上的部分应用示例

Tab. 2 Partial application examples of glass fiber reinforced nylon materials in automobile parts

Automobile manufacturer	Materials	Grade	Component
General motors	PA66-GF30	Vydyne R530H BK0201	 Radiator water chamber
Chery automobile	PA66-GF30	Vydyne R530H BK0201	 Radiator water chamber
SAIC GM Wuling Atomobile Co.,Ltd.(SGMW)	PA6-GF30	AG30NC201	 Exterior door handle skeleton

复合材料,其冲击强度随着碳纤维添加量的增加呈先增后降的趋势,在碳纤维质量分数为 11.8%时,复合材料的冲击强度最大。在汽车工业中,这一类由增强、填充手段对尼龙进行改性的材料应用最为广泛^[38]。

2. 3. 2 添加改性剂型尼龙改性材料

添加改性剂型尼龙改性材料是在尼龙的生产过程中通过添加不同的改性剂来改善尼龙的特性而制成的尼龙改性材料。常用的改性剂包括阻燃剂、增塑剂、耐热稳定剂、耐候剂等,可以分别提高尼龙的阻燃性、加工能力、耐高温性能、抗紫外线和气候老化能力等。增塑剂则可以通过影响尼龙分子间由于强极性导致的氢键、范德华力,进而抑制结晶的形成,提高聚合物材料的塑性和成型加工性能^[39]。阻燃改性尼龙不仅可以通过添加阻燃剂至尼龙基体中,再通过挤出共混的方法,使阻燃剂分散在基体中,进而达到阻燃效果,还能将阻燃剂作为反应单元通过一定的化学结合方式连接到大分子链上,成为结构单元中的阻燃成分。常见的阻燃剂包括溴系阻燃剂、磷系阻燃剂、氮系阻燃剂和无机阻燃剂等,最新研究的阻燃剂还有磷-氮协效膨胀型阻燃剂、纳米阻燃协效剂等^[40-41]。张绪杰^[42]通过合成含三嗪环磷氮反应型阻燃剂,并将其嵌入 PA66 大分子中,经过阻燃性能研究表明,其极限氧指数和 UL-94 阻燃等级最高分别可以达到 30.2% 和 V-0 级,并且力学性能并不会因为阻燃剂的加入而受到明显影响。阻燃改性尼龙现已被应用到汽车上座椅、仪表盘、内饰板、发动机周边部件和电子电气配件等部件上。朗盛工程塑料和 Infac 共同开发了新型电池模块外壳 Durethan BKV30FN04,采用无卤、阻燃和玻璃纤维增强的 PA6 材料,可耐受 800 V 的电压,并具有很强的阻燃性能,能有效避免电池模组因高温或电压击穿带来的自燃或整车漏电等事故^[43]。

2. 3. 3 复合型尼龙改性材料

除了上述两种常见的改性技术之外,复合改性同样也是常见的尼龙改性手段之一,主要是通过与其他材料进行复合改性,以获得综合性能更强的改性尼龙材料。聚丙烯是一种常见的改性 PA 的材料,其结晶度高,具有良好的力学性能,

二者混合改性后可以同时兼顾高冲击强度、高拉伸强度、良好的自润滑性和化学稳定性等。但由于极性的尼龙和非极性的聚丙烯之间的相容性较差,因此会通过添加相容剂,即添加适量具有反应性官能团的接枝聚合物来改善两组分的界面张力以实现复合。周松等^[44]采用熔融共混法制备了马来酸酐接枝聚丙烯/尼龙 6 (PP-g-MA/PA6) 复合材料,经过比较其存在更强的界面黏附,冲击强度较原材料更高,同时拉伸、弯曲和压缩性能均得以保持。添加橡胶组分也可以增加尼龙在低温和干态下冲击性能,丁腈橡胶(NBR)是一种常用的橡胶材料,具有耐油、耐老化和耐磨性能,在跟尼龙动态硫化工艺加工复合后,可以具有较高的拉伸强度和良好的耐磨性能。汲长远等^[45]通过将不同用量的 NBR 和乙烯丙烯酸酯橡胶等与 PA6 进行共混复合,结果显示,随着橡胶含量的增加,复合材料的弯曲强度有所下降,但断裂伸长率显著提高,冲击性能也得到了明显改善。尼龙/NBR 复合材料的制备依赖于动态硫化工艺,而不同的硫化速度和方法会对最终产品的性能产生显著影响。邢立华等^[46]研究表明,采用双螺杆挤出机进行动态硫化制备的 NBR/PA12 复合材料呈现出典型的两相“海岛结构”。随着挤出机螺杆转速的提高,复合材料的硬度、拉伸强度和断裂伸长率先增加,随后又逐渐降低;而撕裂强度和压缩永久变形则呈现下降趋势。此外,挤出机温度的升高会使复合材料的硬度和拉伸强度逐渐增大,但 NBR 颗粒会变大且分布不均匀。尼龙/NBR 复合材料因其优异的性能,在汽车领域被广泛应用于燃油管、燃油滤清器外壳、汽车动力传动同步带、减震垫、门窗密封条等部件的制备。纳米材料作为填料已被证实可以显著提升大多数聚合物复合材料的力学性能。早在 1990 年,日本丰田中央研究所和宇部兴产公司就率先成功开发出 PA6 纳米复合材料^[47],开启了纳米尼龙材料研究的大门。张硕程等^[48]通过甲酸-水-尼龙三元机械混合法将石墨烯纳米片均匀地包裹在尼龙球形粉体表面,最终得到石墨烯增强尼龙复合材料,结果表明其拉伸极限达到(46.51±2.29) MPa,断裂伸长率达到(55.74±7.18)%。

随着多年来尼龙复合材料的发展,尼龙改性的方法也不

再是单一类型,协同多手段改性方法能满足更高、更复杂的要求,生产出更具综合竞争力的新型尼龙复合材料,如玻璃纤维增强聚丙烯/尼龙混杂板材^[49]、阻燃剂改性的玻璃纤维增强尼龙复合材料^[50]、改性剂多壁碳纳米管增强PA6复合材料^[51]等。广汽集团^[52]提出了一种用于车内冷却系统内水室、冷却管路、管路接头等零件的玻璃纤维增强聚丙烯/尼龙耐水解材料,每100质量份里,除了低碳聚酰胺树脂,还有10~20份聚丙烯、10~30份玻璃纤维、0.1~6份偶联剂和0.3~18份功能助剂,在保证其功能完整实现的基础上,还做到了低碳排放。

2.4 生物基尼龙改性材料

随着环保和可持续发展的社会需求不断高涨,绿色材料应运而生,开发生物基材料也成为全世界的发展共识。尼龙改性材料顺应全球可持续发展大背景,已经发展出了各类新型生物基尼龙改性材料。生物基尼龙改性材料一般都是由生物质原料制备出的生物基尼龙单体经过合成而制成。生物基尼龙单体的生成一般分为两条路线,一条是多糖路线,一条是油脂路线^[53-54]。多糖路线所用可再生原料包括葡萄糖和纤维素,基本原理是利用微生物对生物质原料采用固定菌株发酵合成尼龙单体,进而合成生物基尼龙。目前研究该路线生成的生物基单体有 γ -氨基丁酸、己内酰胺、己二酸等,合成的生物基尼龙有PA4,PA8F等。但多糖路线因原料来源不稳定、合成路线复杂且反应条件苛刻,几乎没有在工业领域投产。相对地,油脂路线则被大多数企业选择为主要生产生物基尼龙的路线。该路线所用的原料资源包括蓖麻油、油酸和亚油酸等,经过酯交换、高温裂解等一系列化学转化制备出生物基尼龙单体进而合成生物基尼龙。生产原料中最常用的是蓖麻油,其转换出来的单体包括 ω -十一氨基酸、癸二酸、壬二酸等。常见的生物基尼龙产品包括PA56,PA510,PA10T等。生物基尼龙在汽车工业中也已经有不少的应用,如田国锋^[55]采用生物基PA56/5T,PA512作为基材,通过添加玻璃纤维增强及相关功能助剂,制作出了具有加工性能良好、力学性能满足汽车发动机汽缸盖罩复合材料。付雪梅等^[56]利用玻璃纤维增强的生物基PA10T材料用于生产汽车镜座支架,该生物基尼龙材料不仅成本更低,制造环节简单方便,制造成本也更低。为了拓宽生物基尼龙在汽车内饰中的应用,Passinger等^[57]对三种生物基尼龙PA510,PA610,PA1010进行了标准化紫外光老化实验,并探究了三种材料的适用性。结果表明,在标准工业紫外老化后,生物基尼龙的拉伸强度和断裂伸长率显著下降。然而,通过光谱分析和机械测试可以看出,生物基尼龙能够被稳定化。生物基尼龙零件的气味排放结果表明,半挥发性有机化合物和挥发性有机化合物的排放均低于制造商的一般排放限值和聚酰胺组分的规定限值,这表明了生物基尼龙在汽车内饰件中的应用潜力。

未来,面对日益严峻的石油短缺问题,利用和发展生物基可再生资源,将成为一大解决能源问题的途径。汽车工业

中积极推进生物基尼龙材料的研究和制造,不仅可以满足行业低碳要求,还能降低成本,实现轻量化、绿色化的发展需求。

3 结语及展望

在现代汽车工业的庞大体系中,尼龙凭借一系列卓越特性,成功占据了不可或缺的地位,其高强度、耐磨损、耐腐蚀的材料属性,不仅被应用到发动机及其周边关键部件、品质内饰组件,还被应用在车内电气系统、高效动力传递的传动装置等。尼龙成为汽车性能提升、成本控制以及轻量化设计的关键助力,完美契合汽车行业对高性能材料的追求,以及环保节能的时代诉求^[59]。

展望未来,汽车工业正向着电动化、智能化和轻量化的方向迅猛发展,这无疑为尼龙材料开辟了广阔的发展天地,同时也带来了全新的挑战。在电动化进程中,电池组件和电机外壳等核心部件对材料的绝缘性和耐化学腐蚀性有着极高要求,尼龙恰好能凭借其自身优势,为电动汽车的安全稳定运行筑牢根基,有望获得更为广泛的应用。智能化浪潮的兴起,促使汽车内部电子元件数量激增,尼龙与电子元件的良好兼容性,使其在汽车智能传感器、车内智能交互系统外壳等领域极具发展潜力,有望开拓出全新的应用版图。轻量化作为汽车工业长期追求的目标,高性能尼龙复合材料的持续研发将成为关键突破口。通过研发创新,进一步降低汽车重量,提升能源利用效率,减少碳排放,这不仅是尼龙在汽车工业应用的重要发展方向,更是推动整个汽车行业向绿色、高效迈进的关键举措。

随着材料科学技术的日新月异,尼龙材料的性能将持续优化,成本也将逐步降低,将为其在汽车工业中赢得更为广阔的应用空间,全方位推动汽车行业迈向更高发展水平。

参考文献

- [1] ZHANG K, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 153-158.
- [2] 宁冲冲,等.塑料科技,2013,41(1):105-109.
NING Chongchong, et al. Plastics Science and Technology, 2013, 41(1):105-109.
- [3] 钱伯章.国外塑料,2011,29(2):36-43.
QIAN Bozhang. World Plastics, 2011, 29(2):36-43.
- [4] 张甲宏.化纤与纺织技术,2021,50(4):11-12.
ZHANG Jiahong. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(4):11-12.
- [5] 王卉,等.广东化工,2023,50(14):74-75,79.
WANG Hui, et al. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14):74-75, 79.
- [6] 王海龙.电子电器用阻燃耐漏电尼龙的制备与性能[D].杭州:浙江大学,2008.
WANG Hailong. Preparation and properties of flame-retardant Nylon with high comparative tracking index. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [7] 徐亮,等.天津科技,2016,43(12):25-27.

- XU Liang, et al. *Tianjin Science & Technology*, 2016, 43(12): 25–27.
- [8] 水中岩. 大飞机, 2020(1):77–80.
- SHUI Zhongyan. *Jetliner*, 2020(1):77–80.
- [9] 韩小梅. 科技创新与应用, 2012, 2(24). DOI: 10.19981/j.cn23–1581/g3.2012.24.071.
- HAN Xiaomei. *Technology Innovation and Application*, 2012, 2(24). DOI: 10.19981/j.cn23–1581/g3.2012.24.071.
- [10] 刘金鹏. 汽车零部件的塑料化趋势及尼龙产品的目标市场定位[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- LIU Jinpeng. *Engineering plastics application and nylon target market in the automotive parts*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [11] RAUSHAN R, et al. *Journal of Physics:Conference Series*, 2024, 2763(1). DOI: 10.1088/1742–6596/2763/1/012007.
- [12] 张丽. 化学工业, 2023, 41(1):35–43.
- ZHANG Li. *Chemical Industry*, 2023, 41(1):35–43.
- [13] 郑天成, 等. 材料导报, 2023, 37(增刊1):541–544.
- ZHENG Tiancheng, et al. *Materials Reports*, 2023, 37(Suppl 1): 541–544.
- [14] 贺春尧. 工程塑料应用, 2024, 52(5):181–187.
- HE Chunyao. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(5): 181–187.
- [15] 胡双俊. 现代塑料加工应用, 2024, 36(1):56–59.
- HU Shuangjun. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2024, 36(1):56–59.
- [16] 别致, 等. 橡塑技术与装备, 2022, 48(11):50–55.
- BIE Zhi, et al. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2022, 48(11): 50–55.
- [17] 王汉, 等. 科技资讯, 2017, 15(34):91–92.
- WANG Han, et al. *Science & Technology Information*, 2017, 15(34):91–92.
- [18] 黎杰, 等. 工程塑料应用, 2024, 52(7):29–36.
- LI Jie, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(7):29–36.
- [19] REN M Q, et al. *Polymer*, 2004, 45(10):3 511–3 518.
- [20] 曹民, 等. 化工新型材料, 2014, 42(6):213–215, 225.
- CAO Min, et al. *New Chemical Materials*, 2014, 42(6): 213 – 215, 225.
- [21] 张萌萌. 西部皮革, 2016, 38(8). DOI: 10.20143/j. 1671 – 1 602.2016.08.004.
- ZHANG Mengmeng. *West Leather*, 2016, 38(8). DOI: 10.20143/ j.1671–1 602.2016.08.004.
- [22] 金汉强, 等. 化工新型材料, 2023, 51(增刊1):279–283.
- JIN Hanqiang, et al. *New Chemical Materials*, 2023, 51(Suppl 1): 279–283.
- [23] 谷宗洋. 合成纤维工业, 2023, 46(4):63–66.
- GU Zongyang. *China Synthetic Fiber Industry*, 2023, 46(4):63–66.
- [24] 徐强. 化纤与纺织技术, 2024, 53(10):22–24.
- XU Qiang. *Chemical Fiber & Textile Technology*, 2024, 53(10): 22–24.
- [25] 江风, 等. 塑料, 2023, 52(6):100–104, 129.
- JIANG Feng, et al. *Plastics*, 2023, 52(6):100–104, 129.
- [26] DONG Y B, 等. 复合材料 A 辑: 应用科学与制造, 2017, 102: 357–367.
- DONG Y B, et al. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102:357–367.
- [27] YANG L, et al. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(5):1 947–1 954.
- [28] JIA M Y, et al. *IOP Conference Series:Materials Science and Engineering*, 2016, 137. DOI:10.1088/1757–899X/137/1/012053.
- [29] 舒礼伟, 等. 工程塑料应用, 2023, 51(8):178–183.
- SHU Liwei, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(8): 178–183.
- [30] 田永, 等. 汽车工程师, 2013(4):54–56.
- TIAN Yong, et al. *Auto Engineer*, 2013(4):54–56.
- [31] TEIXEIRA D, et al. *Materials & Design*, 2013, 47:287–294.
- [32] WEI X F, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121453.
- [33] 王峰, 等. 塑料科技, 2024, 52(7):101–104.
- WANG Feng, et al. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(7): 101–104.
- [34] 吴汾, 等. 江苏科技信息, 2015, 32(7):45–48, 57.
- WU Fen, et al. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2015, 32(7):45–48, 57.
- [35] LOPERA-VALLE A, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 507. DOI:10.1016/j.jclepro.2025.008960.
- [36] OLIVER-ORTEGA H, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226:64–73.
- [37] 赵丽, 等. 沈阳化工大学学报, 2011, 25(3):246–249.
- ZHAO Li, et al. *Journal of Shenyang University of Chemical Technology*, 2011, 25(3):246–249.
- [38] 彭治汉, 等. 塑料工业, 2002, 30(5):1–4.
- PENG Zhihan, et al. *China Plastics Industry*, 2002, 30(5):1–4.
- [39] 王小斌. 尼龙 6 的增韧增透改性及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- WANG Xiaobin. *Study on the properties of toughening and transparent modified nylon 6*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [40] 鲁哲宏, 等. 化学研究, 2018, 29(3):310–316, 330.
- LU Zhehong, et al. *Chemical Research*, 2018, 29(3):310–316, 330.
- [41] 余厚咏, 等. 纺织高校基础科学学报, 2024, 37(3):22–29, 45.
- YU Houyong, et al. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2024, 37(3):22–29, 45.
- [42] 张绪杰. 含三嗪环磷氮阻燃剂的合成及其本质阻燃尼龙 66 的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- ZHANG Xujie. *Synthesis of triazine ring containing nitrogen-phosphorus flame retardants and its modified inherent flame-retardant polyamide 66*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero-

- navitics and Astronautics, 2016.
- [43] 吴志强,等.工程塑料应用,2023,51(3):152–156.
WU Zhiqiang, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 152–156.
- [44] 周松,等.塑料,2014,43(5):51–53.
ZHOU Song, et al. Plastics, 2014, 43(5):51–53.
- [45] 汲长远,等.声学电子工程,2016(2):38–43.
JI Changyuan, et al. Acoustics and Electronics Engineering, 2016 (2):38–43.
- [46] 邢立华,等.合成橡胶工业,2020,43(4):323–327.
XING Lihua, et al. China Synthetic Rubber Industry, 2020, 43(4): 323–327.
- [47] 张怀中,等.工程塑料应用,2001,29(11):26–30.
ZHANG Huaizhong, et al. Engineering Plastics Application, 2001, 29(11):26–30.
- [48] 张硕程,等.沈阳航空航天大学学报,2021,38(4):35–42.
ZHANG Shuocheng, et al. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(4):35–42.
- [49] 张藕生,等.纤维复合材料,2024,41(1):9–17.
ZHANG Ousheng, et al. Fiber Composites, 2024, 41(1):9–17.
- [50] 章建忠,等.复合材料学报,2025,42(5):2 414–2 429.
ZHANG Jianzhong, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5):2 414–2 429.
- [51] 葛冬冬.多壁碳纳米管增强 APA6 复合材料的制备及性能研究 [D]. 株洲:湖南工业大学,2023.
- GE Dongdong. Study on the preparation and performance of MWCNTs reinforced APA6 Compos[D]. Zhuzhou:Hunan University of Technology, 2023.
- [52] 陈燕飞,等.一种尼龙复合材料及其制备方法:CN119752164A [P]. 2023-09-27.
CHEN Yanfei, et al. A nylon composite material and its preparation method: CN119752164A [P]. 2023-09-27.
- [53] 高晗,等.生物产业技术,2017(3):63–67.
GAO Han, et al. Biotechnology & Business, 2017(3):63–67.
- [54] 魏延雨.现代塑料加工应用,2020,32(2):59–63.
WEI Yanyu. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(2):59–63.
- [55] 田国锋.发动机气缸盖罩用生物基尼龙复合材料的研究[M]. 2024.
TIAN Guofeng. Research on bio-based Nylon composites for engine cylinder head covers.
- [56] 付雪梅,等.汽车实用技术,2023,48(24):125–130.
FU Xuemei, et al. Automobile Applied Technology, 2023, 48(24): 125–130.
- [57] PASSINGER T, et al. Polymer Testing, 2025, 146. DOI:10.1016/j. polymertesting.2025.108796.
- [58] LEE J A, et al. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(14):5 604–5 614.
- [59] 何晓夏,等.汽车文摘,2021(10):31–35.
HE Xiaoxia, et al. Automotive Digest, 2021(10):31–35.