

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.025

尼龙材料在汽车行业的应用及展望

张坤¹, 谢剑虹², 刘骞¹, 沈言锦¹

(1. 湖南汽车工程职业学院, 湖南株洲 412000; 2. 湖南省教育科学研究院, 长沙 410005)

摘要: 介绍了在日益提高的节能环保标准下, 汽车产业在新型发动机研发、新能源化转型、汽车轻量化等领域进行的全新探索, 以及汽车产业变革为尼龙(PA)等工程塑料带来的巨大增量市场。阐述了 PA 材料由于其耐热性、耐油性、阻燃性、轻量化等多方面的优势, 在汽车发动机、电气系统、底盘系统中的应用范围及主要优点。重点分析了无卤阻燃性 PA6 在电池箱体的应用、长玻纤维增强 PA6 在仪表台横梁中的应用、PA12 在新能源汽车冷却管路中的应用、阻燃增强 PA66/PA6 合金在高压连接器中的应用、耐寒增韧改性 PA66 在汽车轧带中的应用等典型案例。最后, 对国内汽车产量以及汽车 PA 用量进行了展望。并指出伴随着新能源汽车行业的发展和单台汽车 PA 用量的提高, 汽车行业对 PA 材料需求将持续增加。

关键词: 尼龙; 改性; 阻燃; 轻量化; 新能源汽车

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0153-06

Application and Prospect of Nylon Materials in Automobile Industry

Zhang Kun¹, Xie Jianhong², Liu Qian¹, Shen Yanjin¹

(1. Hunan Automobile Engineering Vocational College, Zhuzhou 412000, China;

2. Hunan Academy of Educational Sciences, Changsha 410005, China)

Abstract : The new exploration of the automotive industry in the fields of new engine research and development, new energy transformation, and vehicle lightweight under the increasingly improved energy conservation and environmental protection standards, as well as the huge incremental market brought by the automotive industry transformation for engineering plastics such as nylon(PA) were introduced. The application scope and main advantages of nylon materials in automotive engines, electrical systems, and chassis systems due to their advantages in heat resistance, oil resistance, flame retardancy and lightweight were described. The application of halogen-free flame retardant PA6 in the battery box, the application of long glass fiber reinforced PA6 in the instrument panel crossbeam, the application of PA12 in the cooling pipeline of new energy vehicles, the application of flame retardant reinforced PA66/PA6 alloy in high-voltage connectors, and the application of cold resistance and toughening modification in automotive ties were emphatically analyzed. Finally, the domestic automotive production and automotive nylon consumption were prospected. It was pointed out that with the development of the new energy automotive industry and the increase in the amount of PA used in a single vehicle, the demand for PA materials in the automotive industry will continue to increase.

Keywords : nylon ; modification ; flame retardant ; lightweight ; new energy vehicle

能源安全和大气污染是各国面对的共同难题, 绿色低碳发展已经成为全世界的共识。汽车产业是国家发展的支柱产业, 也是碳排放的主要来源之一。因此, 汽车节能减排是缓解环境问题、实现可持续发展的重要途径。

面对日益提高的节能环保标准, 汽车产业主要采取了三方面措施: 一是研发技术更为先进的内燃机, 二是发展以纯电动汽车、插电式混合动力汽车为代表的新能源汽车, 三是实现汽车的轻量化^[1]。

基金项目: 2023 年度湖南省社科基金项目教育学专项(23JJ231997), 湖南省芙蓉学者奖励计划项目

通信作者: 刘骞, 副教授, 博士研究生, 主要从事新能源汽车与汽车新材料研究

收稿日期: 2023-03-07

引用格式: 张坤, 谢剑虹, 刘骞, 等. 尼龙材料在汽车行业的应用及展望[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 153-158.

Zhang Kun, Xie Jianhong, Liu Qian, et al. Application and prospect of nylon materials in automobile industry[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 153-158.

1 汽车产业发展背景

1.1 内燃机汽车节能减排的发展趋势

2016年,中国环境科学研究院发布了《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》(中国第六阶段)》^[1](简称为国六标准),该标准适用于最高车速大于或等于50 km/h的轻型车辆。根据规划,国六标准分国六A和国六B两个阶段,国六A标准已经从2020年7月1日起实施,国六B标准将从2023年7月1日起实施,届时低于相应排放标准的车辆将不能出售和注册。与国家第五阶段机动车污染物排放标准(简称为国五标准)^[2]相比,国六标准更严格地控制了一氧化碳、非甲烷烃、氮氧化物、PM细颗粒物等污染物排放限值,见表1。

表1 国五与国六标准排放物限值的对比

排放物	国五标准/ (mg·km ⁻¹)	国六A标准/ (mg·km ⁻¹)	国六B标准/ (mg·km ⁻¹)
一氧化碳	1 000	700	500
非甲烷烃	68	68	35
氮氧化物	60	60	35
PM细颗粒物	4.5	4.5	3
PN颗粒物	/	6×10 ¹¹ 颗/km	6×10 ¹¹ 颗/km

2020年,中国汽车工程学会发布了《节能与新能源汽车技术路线图2.0》^[4]。路线图显示,我国汽车产业碳排放2028年达到顶峰,2035年全国碳排放总量将下降20%以上。此外,路线图还综合考虑了汽车技术进步和测试工况改变带来的影响,提出在2025年、2030年、2035年,传统能源乘用车(不包括新能源汽车)的新车百公里燃油消耗分别降低至5.6、4.8、4.0 L。

车辆环保政策的每一次改变都将深刻影响行业格局。为了满足更严格的汽车环保标准,主机厂纷纷开始研发全新车型或者新型发动机,汽车配件制造企业也同步开发应用新型材料的配套产品^[5],以期更快地抢占市场,实现业绩的增长。未来伴随着汽车排放标准的不断提高,传统汽车行业对工程塑料需求逐渐增加,将会带动尼龙(PA)等工程塑料市场的持续发展^[6]。

1.2 新能源汽车市场的快速崛起

2013年以来,伴随着普惠式补贴政策的出台,我国新能源汽车产销量迎来爆发式增长^[7]。根据中国汽车工业协会提供的数据,2022年全国新能源汽车销量完成688.7万辆,市场占有率达到25.6%。国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》^[8]提出,2035年新能源汽车将成为新车销售主流,公共领域车辆将全面实现电动化^[8]。

内燃机汽车经过百年发展,结构与技术已经相对成熟,工程塑料在内燃机汽车中的用量虽近年来有所增长,但是正在逐渐趋于稳定。新能源汽车与内燃机汽车的结构有较大的区别。以纯电动汽车为例,纯电动汽车以动力电池、驱动电机取代了内燃机汽车的油箱、发动机、变速器等系统,其制动系统、空调系统等也与内燃机汽车有较大的区别。新能源汽车因其结构和技术上的革新,为PA等工程塑料带来更大的增量市场^[9]。

1.3 汽车轻量化的迫切需求

车辆行驶中的所受到的滚动阻力、加速阻力、爬坡阻力均与汽车的质量相关。减轻汽车质量是提高能量利用效率、降低污染物排放的有效措施。对内燃机汽车而言,整车自重每降低10%,可以减少5%~6%的二氧化碳。对于新能源汽车来说,制约其续航里程的核心因素是车辆的综合能量密度,也就是动力系统所包含的能量与整车质量的比值^[10]。据实车测试数据统计,新能源汽车自重每减轻100 kg,其续航里程可增加6%至11%。

汽车轻量化可以从结构、制造工艺和材料三个方面入手,尤其是工程塑料等轻量化材料的使用,对汽车的减重效果最为明显^[11]。目前汽车行业已经大量使用了PA等工程塑料零部件。PA材料主要应用于动力系统、底盘系统,约占整车塑料的20%^[12]。从整体来看,我国汽车轻量化程度依然较低,随着环保政策倒逼车企加快轻量化进程,我国PA材料等工程塑料的应用依然具备较大的发展潜力。

2 车用PA材料发展现状

我国汽车行业产能增长迅猛,车用工程塑料产业发展空间广阔。工程塑料正在取代金属材料,并且逐渐从装饰件向结构件与功能件拓展^[13]。工程塑料在汽车中的应用,提高了汽车造型的美观性和设计的多样性,降低了汽车部件加工、装配和修理的费用,使汽车向美观、节能、环保等方向发展的必然选择。

PA是一种优异的工程塑料,其化学性能十分稳定,对润滑油和汽油有优秀的抵抗性。在节能减排的社会背景下,PA材料由于其在轻量化、耐热性、耐油性、阻燃性等多方面的优势,在汽车行业中的渗透率正在逐步提高^[14]。目前PA材料在汽车发动机系统、电气系统、底盘系统中都有应用,见表2。其中,PA6和PA66的用量占各类PA材料总量90%以上^[15]。PA11和PA12具有良好的柔韧性、耐腐蚀性、耐油性和尺寸稳定性,在燃油管、燃料盖、制动管等部件中也获得了广泛应用。

3 PA在汽车中的典型应用

3.1 PA6材料的典型应用

电池箱体是新能源汽车动力电池系统的重要组件,主要用于保护和支撑动力电池模组、电池温控系统、电池管理系统等部件,防止动力电池系统在外界冲击或者机械应力下发生损坏。电池箱体对保障动力电池系统的机械安全有重要意义,因此对冲击强度、拉伸强度等力学性能有较高的要求。目前电池箱体一般选用PA材料,其中以PA6材料居多。阻燃性能也是新能源汽车电池箱体材料选用的重要参考指标,未改性的PA6材料极限氧指数一般仅在20%~22%,阻燃等级仅能达到UL 94 V-2级^[16],难以满足新能源汽车严苛的阻燃要求。一般来说,用于PA6的阻燃剂包括卤系、磷系、氮系等多种类型。其中,卤系阻燃剂在燃烧过程中产生腐蚀性气体及致癌烟雾,在2003年初欧盟发布《电子电器设备中限制使用某些有害物质指令》之后其使用受到了限制。

表2 PA在汽车中的应用

系统	部件	材质	优点
发动机	机油集滤器	PA6+GF	空气混入率降低10%~30%,节约成本50%,减轻质量70%
	发动机罩盖	PA6+GF,PA66+GF	强度高,韧性好,低翘曲,隔音降噪,表观质量高,易于进行快速加工
	进排水口管件	PA6+GF,PA66+GF,PA46+GF	进水口管件耐温130℃,排水口管件耐温230℃
	气缸头盖	PA66+GF	有效降低发动机噪声
	进气歧管	PA6+GF,PA6+GF	表面光滑、噪音小、质量轻、成本低
	涡轮增压器与中冷器之间的进气管路	PA66+GF	热稳定性高
燃油供给系统	燃料盖	PA6,PA66,PA11,PA12	耐冲击性好,燃料挥发透过率低
	燃油管	PA11,PA12,PA1010,PA1012,PA612,PA1212	抗疲劳性、柔韧性和耐候性好
	快速接头	PA12	耐油性、尺寸稳定性高
	燃油导轨	PA66+GF	耐油、耐热、隔温、耐压力、抗冲击、密封性好
	活性炭罐	PA6+GF,PA66+GF	耐热、耐冲击、耐振动
	燃料喷射器	PA66+GF,PA6T,PA9T,PA46	耐热性好
汽车电气系统	配电装置(连接器、电线固定器等)	PA66,PA6,PA6T	耐湿、耐热、耐腐蚀、耐老化、重量轻、成本低
	传感器外壳	PA6+GF,PA66+GF	
	开关外壳	PA66	
	安全气囊支架	PA6+GF	
	马达外壳	PA6T+GF	
底盘系统	马达齿轮	PA66+GF	耐磨、耐腐蚀、韧性好、抗蠕变性能好、生产工艺成熟
	变速控制杆罩	PA6+GF,PA66+GF	
	正时链条导轨	PA66,PA6	

近年来,众多研究者开展了无卤阻燃性PA6材料研究,并取得了诸多成果。磷系阻燃剂低毒无污染、稳定性高,是市场前景最好的无卤阻燃剂之一^[17]。Sun等^[18]使用呋喃胺和氯化磷合成了呋喃磷酰胺(POCFA)阻燃剂,并进行了阻燃测试和力学性能实验。实验结果显示,5%(质量分数)的POCFA可以使PA6/POCFA复合材料的极限氧指数提升到27.2%,并达到UL 94 V-0阻燃等级。同时,POCFA和PA6在加工过程中会发生的多重反应,有助于使下降的力学性能逐步恢复,为实现PA6材料的力学性能和阻燃性能的均衡提供了一种很好的途径。常金鑫等^[19]制备了磷聚磷酸酯多元醇(PHPOP)阻燃剂,并进行了阻燃性能实验。实验结果表明,20%(质量分数)PHPOP可以使PA6/PHPOP复合材料的极限氧指数提升到27.5%,阻燃等级达到UL 94 V-0。热降解和炭层形貌分析结果显示,PHPOP阻燃剂对PA6在降解中的成炭有非常好的促进作用,提高了炭层的致密性,减少了可燃气体与热量的传递,显著提高了PA6材料的阻燃性能。氮类阻燃剂阻燃效果好、热稳定性高、腐蚀性弱,也是目前PA6阻燃剂研究的热点。岳成^[20]在对阻燃性PA6的研究中发现,氨基磺酸胍阻燃剂可以带来PA6阻燃性能的显著提升,但同时也伴随着拉伸强度30%的下降。目前氮系阻燃剂在PA6材料上的应用初见成效,但是其耐老化性能暂未得到验证。鉴于新能源汽车车用材料在使用过程中面临的腐蚀老化、温度老化等使用寿命衰减的问题,进一步提升PA6材料的综合性能,拓展此类材料在新能源汽车领域的应用具有一定的现实意义。

众多工程塑料公司也致力于研发无卤阻燃PA6材料。例如,朗盛集团推出了3种以PA6为基体的Tepex材料^[21]。Tepex材料含有较高的纤维量,因此不仅具备极高的刚度、强度和能量吸收水平,还具有UL 94 V-0等级的阻燃特性。其中,Tepex dynalite 102fr-RG600 (x)/47%采用粗纱玻璃纤维增强,这些纤维呈多轴排列,不仅可以实现良好的阻燃效果,还可以精确地匹配部件中的负载路径,可以应用于新能源汽车电池箱体的控制单元外壳、隔板、盖板等高压部件^[22]。

长玻纤增强PA6在汽车结构件中的应用也逐渐普及。玻纤作为增强骨架贯穿于PA6基体,可以有效增强塑料制品的抗冲击性能、抗蠕变性能和尺寸稳定性。长玻纤增强PA6具备与金属相媲美的诸多优点,适合制作复杂的汽车模块制品^[23]。以仪表台横梁为例,仪表台横梁与车身直接连接,承受并传递人机交互设备及装饰部件的载荷,并与其它安全部件构成了cockpit安全系统,直接影响着汽车的操控性和安全性。仪表台横梁能够缓冲正面碰撞时前舱传递的冲击力,并为乘客安全气囊的爆破提供支撑。此外,仪表台横梁与方向盘、转向管柱构成的系统需要满足一定的NVH模态要求,避免产生共振^[24]。长玻纤增强PA6仪表台横梁已经开发成功并在部分车型上大量应用。在完全满足仪表台横梁作为承载件必须具备的刚性和强度同时,长玻纤增强PA6仪表台横梁具有优秀的抗蠕变性能和耐疲劳性能以及出色的高低温抗冲击性能。全塑仪表台横梁的设计不仅带来了生产效率的提升,也有助于实现轻量化与NVH目标。

3.2 PA12材料的典型应用

在传统的内燃机汽车领域,杜邦、Arkema、BASF等大型工程塑料公司均开发了不同耐温等级的PA12材料,并广泛用于油箱注油管、燃油输油管、曲轴箱通风管、发动机进气管、真空制动管等油液与气体管路之中^[25]。但是,由于PA12的耐高温性能并不出众,在工作温度较高的管路中无法长期使用^[26]。例如,内燃机汽车的发动机冷却水管一般仍然选用金属或者橡胶管路,而非PA12管路。一般来说,新能源汽车的电机冷却系统工作温度一般低于80℃,电池冷却系统工作温度一般低于60℃,PA12材质完全可以满足新能源汽车冷却系统的耐温要求^[27]。

与橡胶管路相比,PA12管路可以有效降低系统质量。PA12的密度为1.02 g/cm³,而传统汽车管路中经常选用的EPDM橡胶密度为1.1~1.2 g/cm³。同时,PA12管路的管壁相对较薄。以内径15~18 mm的管路为例,PA12水管仅为1.25~1.5 mm,而EPDM橡胶管路的壁厚一般为3.5~4 mm^[28]。综合计算,选用PA12材质可以使管路减重65%。例如,广州汽车集团股份有限公司某车型采用PA12管路方案^[29],相比传统的金属和橡胶管路,管路系统质量实际减轻了56%。

此外,由于EPDM橡胶材质刚度较小,如果用于较长的管路,需要设置较多的固定点^[30]。因此在传统内燃机汽车的冷却系统中,较长的管路一般选用金属材质,仅在转接部分选用EPDM橡胶材质。在金属管路与橡胶管路的配合方案中,存在大量的转接部位,这不仅大大增加了零件的数量,也提高了泄漏的风险^[31]。而PA12管路刚度较高,可以使用一体成型的方式制造完整的水管,有效降低了零件的数量,提高了系统的可靠性。例如,广州汽车集团股份有限公司某车型采用PA12管路方案,相比传统的金属和橡胶管路,管路系统中的零件数量减少了77%。与金属管路和橡胶管路相比,PA12管路重量更轻,刚性更强,空间占用更小,可靠性更高,在新能源汽车中极具推广价值。

此外,众多研究者开展了满足其他特定场景需求的PA12管路研究。例如,日本Toray公司和Polyplastics-Evonik公司合作研发了一种三层挤压管^[32],这种挤压管的外层PA12材料和内层的聚苯硫醚树脂材料用一种特殊的黏结剂粘合在一起,不仅可以承受130℃的高温,还具有好的耐水解性和耐热性,可以应用于较高温度要求的汽车冷却管路系统中。

由于PA12对汽油有良好的耐渗透性能,已经被验证是安全可靠的燃油管路材质。然而,随着添加甲醇或者乙醇的混合燃油的出现和使用,对燃油管路的耐渗透性有了更高的要求。混合燃油中的甲醇或乙醇具有较强的渗透性和溶解性,容易造成碳氢化合物渗出从而不满足相关的环保标准^[33]。张颖^[34]开展了低渗透、低析出汽车燃油管路的研发工作。通过深入剖析各种原料的物性,对可应用于燃油管路的材料进行开发,通过对加工工艺的摸索、管材力学性能确认、

加工工艺参数的修正等多次循环,研发了满足燃油管路低渗透标准要求的PA12对称结构五层管复合管材以及由复合管材所组成的燃油管路总成系统。

3.3 PA66材料的典型应用

在“以塑代钢”的汽车轻量化的大趋势下,PA66在传统内燃机汽车和新能源汽车领域都贡献了突出的价值,直接或间接地实现了低碳排放的社会愿景。在零部件生产过程中,凭借着十倍于PA6的结晶速度,PA66可以在模具中快速成型,大大提高了生产效率^[35]。PA66的性能与PA6相比也极为出色,具有更高的尺寸稳定性、更低的吸水率和更高的熔点。各主机厂将PA66广泛应用于汽车各系统,以期在保持或超越现有动力输出的同时,提高车辆经济性、降低有害气体排放。

以进气歧管为例,早期的内燃机汽车进气歧管主要选用PA6材料,随着集成增压器的应用和发动机的紧凑化,进气歧管的耐温要求从130℃上升到200℃,主机厂也逐渐倾向于选择更高熔点的PA66实现性能升级。PA66的另一个典型应用是发动机支架或者驱动电机支架^[36],该类结构件早期一般选用钢铁或者铝合金材质。因为PA材料本身具有阻尼减振效果,PA66玻纤增强产品在发动机、驱动电机支架中的应用,可以有效降低发动机或驱动电机的振动和噪声。此外,由于PA66可以耐受160~180℃的烤漆温度,将其集成于汽车白车身内部,不仅有助于增强车身力学性能,在车辆发生碰撞时,PA66增强材料能够有效吸收碰撞能量,最大限度保护司乘人员和动力电池,还可以使车身获得超过30%的减重,提高车辆的操控性和续航里程^[37]。

在新型PA66材料的研究方面,众多研究者也开发了适用于特定汽车部件的PA66材料。例如,新能源汽车中的车载充电机、DC/DC控制器、PTC加热器、高压接线盒均属于高压部件。高压部件与高压线束之间的高压连接器多选用无卤阻燃增强PA66,尤其是有机磷阻燃PA66。无卤阻燃增强PA66具有良好的阻燃性能和力学性能,但是受到上游原材料供应的影响,价格波动较大。而PA6原材料供应充足,价格相对较低。因此无卤阻燃增强PA66/PA6合金成为了有前景的替代技术方案。叶士兵等^[38]研究了在阻燃增强PA66/PA6合金中,当PA66和PA6比例不同时合金的阻燃性能、电学性能、力学性能、耐热性能的变化,发现随着PA6比例的升高,合金的韧性指标略有上升,但是阻燃性能和力学强度略有下降。随着PA6比例的降低,拉伸强度有所降低,但是韧性显著提高。

PA66在新能源汽车电池箱体中也有应用。刘颖等^[39]开展了不同纤维含量的短切碳纤维增强PA66力学性能研究,并进行了该材料应用于轻量化电池箱的性能评价和仿真分析。研究结果显示,相对于金属电池箱体,短切碳纤维增强PA66材料箱体在质量上减轻了84%,在颠簸路面和急转弯工况下箱体最大应力减小了30%~50%,同时还发现碳纤维含量对电池箱体的最大位移影响较大,在颠簸路面和急转弯

工况下碳纤维含量的增加可以显著减少箱体位移。

目前汽车上所使用的30 cm以上的轧带,多数使用PA66材质。PA66在低温条件下韧性较差,需要进行耐寒增韧改性。陆大光等^[40]采用双螺共混法,通过选用不同类型的增韧剂和不同黏度的PA66原料,制备了适用于汽车轧带使用的耐寒增韧改性PA66材料,并研究了不同挤出工艺、不同类型和不同含量的弹性体以及不同黏度的PA66基料对材料性能的影响。实验结果表明,马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物与马来酸酐接枝三元乙丙橡胶的添加,以及不同黏度PA66原料的搭配,可以获得汽车轧带专用料流动性与低温韧性的平衡;通过使用螺杆剪切强度挤出工艺,并且添加13%的接枝弹性体,可获得汽车轧带专用料刚性与低温韧性的平衡。

PA66具有较好的耐热性、耐腐蚀性和韧性,可以替代长链PA成为车用PA水管的选择材质。但是由于PA66分子链中存在强极性的酰胺基团,使得PA66与冷却液接触时容易发生变形和水解反应。针对该问题,张松峰等^[41]首先通过添加增韧剂和耐水解剂对PA66材料进行共混改性,提高了其耐水解性和韧性,然后使用常规软管挤出工艺对改性材料进行软管挤出试制,成功开发了以PA66为主体的汽车用冷却水管。通过测试,共混改性后的PA66软管的爆破强度大于2.6 MPa,并且其材料成本降低了40%,解决了长链PA软管生产工艺复杂、价格昂贵的问题。

4 结语

车辆塑料用量在某种程度上可以作为衡量汽车设计与制造水平高低的标志之一。目前发达国家内燃机汽车单台塑料用量为约为150 kg,其中PA所占比例约为20%^[42]。当前国内内燃机汽车单台PA用量约为8 kg,预计2025年将达到15 kg,2030年有望增至30 kg。关于新能源汽车的PA用量,参考特斯拉Model 3等车型,预估2030年新能源汽车单台PA用量可以达到50 kg。

中国乘用车市场信息联席会数据统计显示,2022年全国内燃机汽车销量为1 486.8万辆,同比减少了230.2万辆,内燃机汽车正在以惊人的速度失去市场份额。国内外车企公布的停止研发内燃机汽车的时间节点一般在2030年左右^[43],在此之后内燃机汽车将逐渐退出历史舞台。与此同时,新能源汽车市场迎来了高歌猛进的发展。在中国电动汽车百人会上,中国科学院院士欧阳明高预计,2025年全国新能源汽车销量将达到700万~900万辆,2030年将达到1 700万~1 900万辆^[44]。华安证券研究所预估,2030年车用PA材料用量将达到144万t^[45]。

总之,发动机技术的进步、汽车新能源化转型和汽车轻量化发展在有效促进节能减排水平和社会运行效率提升的同时,也为PA等工程塑料的应用带来巨大的增量市场。在可以预见的未来,汽车行业对PA材料需求将持续增加,PA材料产业已经进入了高速发展时期。

参考文献

[1] 王荆玲.长三角机动车污染排放特征及控制政策评价研究[D].杭

州:浙江大学,2018.

Wang Jingling. Research on the characteristics of motor vehicle pollution emission and control policy evaluation in the yangtze river delta[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[2] 段肖宁,等.现代化工,2021,41(7):41-45.

Duan Xiaoning, et al. Modern Chemical Industry, 2021, 41(7): 41-45.

[3] 朱庆功,等.中国环境科学,2022,42(3):1 066-1 072.

Zhu Qinggong, et al. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1 066-1 072.

[4] 于永初.汽车工艺师,2020(11):8-10.

Yu Yongchu. Automotive Craftsman, 2020(11): 8-10.

[5] 李文翔,等.系统仿真学报,2021,33(6):1 451-1 465.

Li Wenxiang, et al. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1 451-1 465.

[6] 陈剑锐,等.工程塑料应用,2022,50(4):159-164.

Chen Jianrui, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4): 159-164.

[7] 刘进.我国新能源汽车财政补贴效应研究[D].北京:中国财政科学研究院,2017.

Liu Jin. Research on the effect of financial subsidies for new energy vehicles in China[D]. Beijing: China Academy of Financial Sciences, 2017.

[8] 臧金环,等.汽车工艺师,2021(Z1):32-34.

Zang Jinhuan, et al. Automotive Craftsman, 2021(Z1): 32-34.

[9] 刘俊聪,等.工程塑料应用,2012,40(10):100-104.

Liu Juncong, et al. Engineering Plastics Application, 2012, 40(10): 100-104.

[10] 张传远.我国新能源汽车产业发展路径和策略研究[D].北京:华北电力大学,2018.

Zhang Chuanyuan. Research on the development path and strategy of China's new energy vehicle industry[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[11] Zope Bhagyashri, et al. Engineering Research Express, 2022, 4(3). DOI:10.1088/2631-8695/AC7125.

[12] Vicyra Horacio, et al. Polymers, 2022, 14(16). DOI: 10.3390/POLYM14163412.

[13] 刘莹莹,等.工程塑料应用,2022,50(9):20-26.

Liu Yingying, et al. Application of Engineering Plastics, 2022, 50(9): 20-26.

[14] 高驰.汽车与配件,2020(23):46-47.

Gaochi. Automobile and Accessories, 2020(23): 46-47.

[15] 左雄志.合成纤维工业,2022,45(5):75-79.

Zuo Xiongzh. Synthetic Fiber Industry, 2022, 45(5): 75-79.

[16] 周燕雪.磷硅硼阻燃剂的合成及其在聚酰胺6中的应用[D].广州:华南理工大学,2012.

Zhou Yanxue. Synthesis of phosphorus silicon boron flame retardant and its application in polyamide 6[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[17] 田保政.中国塑料,2022,36(2):197-208.

Tian Baozheng. China Plastics, 2022, 36(2): 197-208.

[18] Sun Jinhao, et al. Polymer, 2020, 210: 1-11.

[19] 常金鑫,等.塑料科技,2018,46(1):112-116.

- Chang Jinxin, et al. Plastic Science and Technology, 2018, 46(1): 112–116.
- [20] 岳成. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(19):104–106.
Yue Cheng. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2018, 38(19):104–106.
- [21] Grace. 上海化工, 2019, 44(8). DOI: 10.16759/j.cnki.issn.1004-017x.2019.08.008.
Grace. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(8). DOI: 10.16759/j.cnki.issn.1004-017x.2019.08.008.
- [22] Chi Zhang, et al. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2017, 30(4):342–351.
- [23] Tomiak Florian, et al. Polymers, 2022, 14(6). DOI: 10.3390/POLYM14061263.
- [24] Huang Caihong, et al. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(9). DOI:10.1080/00423114.2021.1930071.
- [25] 王娟. 广州化工, 2019, 47(6):31–32, 38.
Wang Juan. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(6):31–32, 38.
- [26] Teo How Wei Benjamin, et al. Materials Today: Proceedings, 2022, 70. DOI:10.1016/J.MATPR.2022.09.018.
- [27] Huy Vu Van, et al. Russian Journal of Applied Chemistry, 2022, 94 (12). DOI:10.1134/S1070427221120028.
- [28] 齐亮, 等. 橡胶工业, 2020, 67(12):954–958.
Qi Liang, et al. Rubber Industry, 2020, 67 (12):954–958.
- [29] 万星荣. 汽车实用技术, 2020(14):51–53.
Wan Xingrong. Automotive Practical Technology, 2020(14): 51–53.
- [30] 杨阳, 等. 舰船科学技术, 2021, 43(3):68–70.
Yang Yang, et al. Ship Science and Technology, 2021, 43(3): 68–70.
- [31] 肖坤, 等. 振动与冲击, 2019, 38(23):239–245, 258.
Xiao Kun, et al. Vibration and Impact, 2019, 38(23):239–245, 258.
- [32] 蔡彤旻. 新型阻燃生物基半芳香聚酰胺复合材料的设计及燃烧机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020. DOI:10.27517/d.cnki.gzkju.2020.000220.
Cai Tongmin. Design and combustion mechanism study of a new type of flame retardant bio based semi aromatic polyamide composite material[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju. 2020. 000220.
- [33] Okubo Satoshi, et al. Additive Manufacturing, 2023, 63. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2022.103385.
- [34] 张颖. 低析出、低渗透的燃油管路系统开发与应用[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Zhang Ying. Development and application of low precipitation and low permeability fuel pipeline systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [35] Yang Liu, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2023, 41(3): 394–404.
- [36] 苏亚辉, 等. 时代汽车, 2019(13):83–86.
Su Yahui, et al. Times Auto, 2019(13):83–86.
- [37] 黄珍媛, 等. 复合材料科学与工程, 2022(9):83–89.
Huang Zhenyuan, et al. Composite Materials Science and Engineering, 2022(9):83–89.
- [38] 叶士兵, 等. 合成材料老化与应用, 2023, 52(1):6–8, 140.
Ye Shibing, et al. Aging and Application of Synthetic Materials, 2023, 52(1):6–8, 140.
- [39] 刘颖, 等. 复合材料科学与工程, 2021, 332(9):46–54.
Liu Ying, et al. Composite Science and Engineering, 2021, 332(9): 46–54.
- [40] 陆大光, 等. 塑料工业, 2020, 48(12):165–167.
Lu Daguang, et al. Plastic Industry, 2020, 48(12):165–167.
- [41] 张松峰, 等. 汽车工艺与材料, 2023(2):16–19, 24.
Zhang Songfeng, et al. Automotive Technology and Materials, 2023 (02):16–19, 24.
- [42] 郑宁. 合成材料老化与应用, 2020, 49(4). DOI:10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2020.04.053.
Zheng Ning. Aging and Application of Synthetic Materials, 2020, 49(4). DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2020.04.053.
- [43] 汪啸, 等. 油气储运, 2022, 41(8):885–891.
Wang Xiao, et al. Oil and Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8):885–891.
- [44] 魏一凡, 等. 汽车工程, 2022, 44(4):449–464, 444.
Wei Yifan, et al. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 449 – 464, 444.
- [45] 王敏, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(3):170–175.
Wang Min, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3): 170–175.

(上接第127页)

- [9] 王荣兴, 张祖新, 陈日清, 等. 三(2-羟乙基)异氰尿酸酯改性三聚氰胺甲醛浸渍树脂的机理研究[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(2): 126–132.
Wang Xingrong, Zhang Zuxin, Chen Riqing, et al. Synthesis mechanism of tris(2-hydroxyethyl) isocyanate modified melamine formaldehyde impregnated resin[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2018, 38(2):126–132.
- [10] 陈由亮, 辛浩波, 杨锋, 等. 固化剂三(2-羟乙基)异氰尿酸酯对聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5):428–432.
Cheng Youliang, Xin Haobo, Yang Feng, et al. Effect of THEIC used as curing agents on properties of polyurethane elastomers[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(5):428–432.
- [11] Little E D, Poon B T. Production of 2-oxazolidones; US, 3108115 [P].1963-10-22.
- [12] 谢富春, 张玉清, 朱长春, 等. 二醇扩链剂对聚醚聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 粘接, 2006(3):4–5, 8.
Xie Fuchun, Zhang Yuqing, Zhu Changchun, et al. Effect of glycol-chain-extender on polyether-polyurethane elastomer properties[J]. Adhesion, 2006(3):4–5, 8.
- [13] Lin F, Lin H Z, Ke J M, et al. Preparation of reactive and additive flame retardant with different oxidation state of phosphorus on the thermal and flammability of thermoplastic polyurethane[J]. Composite Materials, 2019, 3(2):43–53.