

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.10.027

CFRP在汽车轻量化中的应用研究进展

张坤, 张丹, 邹瑞睿, 沈言锦

(湖南汽车工程职业学院, 湖南株洲 412000)

摘要: 碳纤维增强复合材料(CFRP)凭借其不可比拟的密度、比强度、比模量等全方位力学性能,在汽车轻量化领域拥有巨大的应用潜力。从汽车次结构件、主结构件、安全部件等几个方面阐述了CFRP在汽车轻量化领域中的应用,从安全性、舒适性、经济性和环保性等角度分析了CFRP在汽车中的应用优势,并展望了CFRP在汽车工业中的应用前景,并指出CFRP在汽车行业的应用范围将不断扩大,应用层次将不断提高,由次结构件向主结构件发展,由小批量生产向智能化、数字化规模生产转变是今后的发展方向。

关键词: 汽车轻量化;碳纤维复合材料;成型工艺;进展

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)10-0154-05

Application Research Progress of CFRP in Automobile Lightweight

Zhang Kun, Zhang Dan, Zou Ruirui, Shen Yanjin

(Hunan Automotive Engineering Vocational College, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has great application potential in the field of automobile lightweight due to its incomparable mechanical properties such as density, specific strength and specific modulus. The application of CFRP in the field of automobile lightweight was described from the aspects of automobile secondary structure parts, main structure parts and safety parts. The application advantages of CFRP in automobile were analyzed from the aspects of safety, comfort, economy and environmental protection, the application prospect of CFRP in automobile industry was forecasted. It was pointed out that the application scope of CFRP in automobile industry will be continuously expanded, the application level will be continuously improved. Developing from secondary structural parts to main structural parts and from small batch production to intelligent and digital scale production transformation would be future development direction.

Keywords: automobile lightweight; carbon fiber composite; molding process; progress

随着汽车产量和保有量的不断增加,汽车在为人们带来便利的同时也加剧了能源安全、环境污染等方面的问题^[1]。在当前形势下,为实现汽车产业的可持续发展,需要在节能减排领域开发新技术,用以降低汽车的能耗和污染物排放。在不影响整车性能的前提下,汽车轻量化是实现节能减排的有效途径之一^[2]。

汽车轻量化可以通过轻量化材料、结构优化设计和先进的生产工艺来实现,轻质材料的选取则是重中之重^[3]。轻质材料不仅可以显著降低车重,而且还可以根据结构设计进行二次优化减重。在众多轻量化材料中,碳纤维增强复合材料(CFRP)凭借其不可比拟的密度、比强度、比模量等全方位力

学性能,使其在汽车轻量化领域拥有巨大的应用潜力^[4-5]。笔者从汽车次结构件(包括车身、罩件、座椅等)、主结构件(发动机、传动、刹车系统等)、安全部件(保险杠等)几个方面阐述CFRP在汽车中的应用,从安全性、舒适性、经济性和环保性等角度分析了CFRP在汽车中的应用优势,并展望了CFRP在汽车工业中的应用前景。

1 汽车领域节能要求与轻量化材料

为解决环境污染与能源危机,世界上许多个国家和地区都制定了节能减排目标,我国也明确了2022年乘用车新车的平均燃油消耗量要达到5L/100 km。在当前诸多节能减排途径中,汽车轻量化是最容易实现的,具有较大的开发潜力。

基金项目: 2021年湖南省自然科学基金项目(2021JJ50061),湖南省“芙蓉学者”奖励计划第二批青年学者

通信作者: 张丹,硕士,主要研究方向为交通新能源、汽车轻量化

收稿日期: 2022-08-02

引用格式: 张坤,张丹,邹瑞睿,等.CFRP在汽车轻量化中的应用研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(10):154-158.

Zhang Kun, Zhang Dan, Zou Ruirui, et al. Application research progress of CFRP in automobile lightweight[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 154-158.

对于乘用车而言,车重每减少100 kg,百公里油耗降低0.3~0.6 L,CO₂排放量减少5 g/km^[6]。

为了满足油耗要求,采用轻质材料替代金属等常规材料,使汽车轻量化是实现节能减排的有效途径。目前,在汽车领域中广泛采用的轻质材料多为轻金属材料,其中具有代表性的有铝合金、镁合金等。与钢相比,铝合金具有导热系数高、耐腐蚀、加工性能好等优点,是一种优质的轻量化材料。相关研究表明,采用铝合金代替低碳、铸铁或高强度钢可以使整车质量减轻30%~60%^[7]。相较于钢和铝合金,镁的密度为1.74 g/cm³,是铝的2/3、钢的1/4。在实际应用中,铝合金在焊接时容易出现气孔、氧化物夹杂等问题,镁合金存在易氧化燃烧、成型难、强度低、塑性和耐腐蚀性差等缺点,这导致轻金属材料不能很好地满足使用要求^[8]。

目前,汽车上应用最广泛的复合材料是CFRP,它是以碳纤维为增强材料,以树脂等为基体的复合材料的总称^[9]。相较于轻金属材料,CFRP在汽车轻量化领域的优势表现为以下方面:一是密度小,强度高,在减轻车重的同时不损失强度和刚度,车辆的安全系数不降反升;二是韧性好,具有良好的抗冲击性和能量吸收能力,提升车身及其结构件的碰撞吸能能力;三是阻尼高,抗震性能好,对汽车整体降噪效果显著,提高驾乘人员的乘坐舒适性;四是抗疲劳强度高,延长承载零部件的使用寿命,提升车身及其结构件的可靠性;五是优异的耐腐蚀性和抗辐射性,使得CFRP在新能源汽车领域占有一席之地;六是成型工艺多、可设计性强,易于实现零部件一体化生产,节约成本的同时极大地缩短了研发周期^[10]。

CFRP按基体性质可分为热固性复合材料(树脂基体主要有环氧、聚酯、乙烯基树脂、酚醛等)和热塑性复合材料(例如聚酰胺树脂基体)两大类。当前,汽车用CFRP仍以热固性树脂为主,特别是片状模塑料(SMC)相当广泛地用于汽车零部件的制造,尤其是在美国和德国。

2 CFRP在汽车中的应用

CFRP在汽车轻量化上的应用已然成为业内的焦点,在汽车车身及覆盖件、制动系统、轮毂、发动机部件、传动轴、座椅和内饰等方面有着广泛的应用。CFRP的应用不仅能够实现汽车的轻量化,而且还能够兼顾汽车的安全性、舒适性、可靠性、经济性及环保性等方面^[11]。

2.1 车身、罩件、座椅等次结构部件中的应用

在保证安全性的前提下,CFRP应用于汽车车身及覆盖件,具有十分明显的减重效果。以宝马为例,作为碳纤维应用的尝试者及高压树脂传递模塑成型技术的推行者,宝马实现了碳纤维在车身中的应用。宝马i3 2013年款车型的车身碳纤维用量达到49.41%,宝马i8 2014年款车身碳纤维用量为43%,这两款车也成为CFRP在汽车构件中大幅度应用的标杆车型^[12]。宝马在2016款7系轿车的A柱、B柱、C柱与门槛等部位大量采用了碳纤维复合材料与钢或铝合金结合的方式,实现轻量化的同时保证整体结构的力学性能。除了宝马,奥迪Quattro系列、尼桑GTR和Fairladyz车型、阿斯顿·

马丁V8 Vantage Coupe车型和Mazda RX-8车型上也大量使用了CFRP制造的车身结构件^[13]。

姜哲^[14]以电动车EVB60车身前地板以及B柱加强板为研究对象,通过材料轻量化的方式进行机构优化设计。在保证性能的前提下,基于电动车EVB60结构、侧面碰撞性能、白车身弯扭性能及自由模态性能,采用T300碳纤维进行零部件优化设计,实现车身前地板减重54.68%,B柱加强板减重78.33%。

徐作文等^[15]以汽车前车门为研究对象进行碳纤维结构设计及铺层形式进行研究。根据T300牌号碳纤维材料的特点,设计不等厚的CFRP前车门总成,并对其进行模态、刚度、静强度、侧碰安全方面进行性能分析,达到减重54.94%的轻量化效果。

此外,CFRP在发动机罩件中也得到了广泛应用。通用Chevrolet Corvette Z06纪念版轿车发动机罩盖采用碳纤维复合材料,该车发动机罩盖外板完全采用碳纤维/环氧复合材料制备,内板为碳纤维SMC和低密度玻纤SMC共混而成,质量仅为9.3 kg^[16]。在不影响安全性的情况下,国内奇瑞和北汽的发动机罩也采用了CFRP,并获得了显著的轻量化效果。随着技术的发展,国内其他车企也相继推出了碳纤维汽车构件应用的车型,如上汽荣威E50的机盖、一汽红旗的翼子板等^[17]。

叶辉等^[18]以碳纤维、玻璃纤维为增强材料,以环氧树脂为基体树脂制造发动机罩,实现减重51.2%,并对复合材料发动机罩铺层进行了优化设计,质量再次减轻9.7%,最大限度发挥了CFRP的优势。

吴方贺^[19]将纤维复合材料用于车身覆盖件(发动机罩)作为研究目标,采用碳纤维和少量玻璃纤维两种增强体进行铺层设计,通过有限元仿真和样件试验的方法对CFRP发动机罩的各项基本性能进行研究,制造出了通过行人保护性能测试的CFRP发动机罩,验证了CFRP作为轻量化材料替换车身金属覆盖件的可行性。

秦晓宇等^[20]以某款混合动力汽车发动机油底壳作为研究对象,采用T700型碳纤维单向带配合BAC172环氧树脂对金属油底壳进行CFRP轻量化设计。通过Fibersim软件验证了金属结构简化后CFRP油底壳结构可满足0°、90°和±45°铺覆要求,对比分析了剪口方案和分块方案的不合格率和完整度,最终确定剪口方案优于分块方案。

廖耀青^[21]以汽车座椅为研究对象,分别采用科思创公司生产的M3107材料和Bayblend T88 GF30材料对靠背骨架的结构板和加强筋进行一体化设计。基于CFRP/钢制靠背骨架座椅的安全性能试验的仿真结果对比,发现CFRP靠背骨架座椅在满足相关安全性能法规要求的同时,靠背骨架质量减轻了39.12%。

赫氏与NaCa Systems合作,赫氏提供环氧预浸料的优化版本,NaCa Systems提供天然纤维复合材料,共同开发一种轻量化的碳纤维预浸料,并采用快速模压成型工艺研制

CFRP和木纤维复合材料制成的跑车座椅靠背^[22]。

程章等^[23]以CFRP翼子板为对象,在保证性能要求的前提下,采用自由尺寸优化方法进行翼子板结构优化设计。在优化的翼子板结构基础上,搭建了安装点刚度与铺层方式的Kriging模型,并引入期望改进准则不断改进模型精度。基于构造的Kriging近似模型,利用遗传算法完成翼子板铺层优化,得到最佳铺层顺序。计算结果表明,由平纹机织CFRP所制翼子板质量减轻43.1%,铺层优化后较之前翼子板安装点刚度提高了12.3%。

2.2 保险杠等安全结构部件中的应用

CFRP具有良好的抗冲击性、能量吸收能力,可以提升车身及结构件的碰撞吸能能力。虽然CFRP的质量比钢的轻50%左右、比镁/铝合金的轻30%左右,但其碰撞吸能能力却是钢的6~7倍、铝的3~4倍,大大提升了汽车的碰撞安全性^[24]。梅赛德斯-奔驰也利用了这种特性,在SLR跑车上配备了CFRP制成的两根纵梁和乘客舱,在车辆发生正面碰撞时,两根纵梁可以完全吸收碰撞产生的能量,确保乘客舱结构基本不受影响;在汽车受到尾部或侧面撞击时,由CFRP制成的乘客厢可以为驾乘人员乘客提供可靠的安全空间。由于CFRP超强的碰撞吸能能力,在F1、Aston Martin等高性能跑车上得到广泛应用^[25]。

汽车保险杠是安装在汽车车身后两端的部件,是汽车低速碰撞时的主要承载和吸能构件。王庆等^[26]设计了一种整体式碳纤维增强树脂基复合材料汽车保险杠,所用CFRP中的碳纤维丝为台丽TC33,基体材料为LY1564SPIAradur3486环氧树脂。在有限元仿真的基础上,以耐撞性为约束对结构进行轻量化优化设计,采用拉丁超立方采样、Kriging近似建模技术等进行优化求解。结果表明,优化后的CFRP保险杠能够满足耐撞性要求,所得CFRP复合材料保险杠较原铝合金保险杠减重0.91 kg,达到了减重率36.4%的轻量化效果。

田凯^[27]以5205环氧树脂基体,T300作为铺层材料,对CFRP防撞梁进行轻量化设计。首先确定横截面形状和铺层顺序的最优组合,然后对防撞梁结构铺层厚度进行多目标优化,在其碰撞性能提高的基础上,减重效果达到将近65%,充分验证了CFRP巨大的轻量化优势。

吴飞^[28]采用碳纤维增强环氧树脂(以环氧树脂基体,向其中添加连续碳纤维配制而成)作为原料,对传统的一体式结构的汽车保险杠进行了改进。改进的汽车保险杠包括蒙皮、吸能装置和保险杠梁,在保证安全性的前提下对各部件的厚度和结构进行优化,设计出质量更轻的保险杠。研究发现,当汽车时速不超过4 km/h,发生正面碰撞时,除了汽车保险杠之外,车身纵梁、座舱等结构均无较大形变。

2.3 传动及发动机等主结构部件中的应用

CFRP具有较大的减振系数和较强的吸振能力,因此可用于传动系统和发动机部件。这样不仅能够减轻整车质量,而且能够降低振动和噪音,进而提高乘坐舒适性。野马采用

碳纤维集成制造的传动轴减重60%~70%,英国GNK公司研发的碳纤维传动轴广泛应用于奥迪A4等车型,丰田开发的Driveshaft Shop碳纤维驱动轴不仅将重量减半,而且驱动效率更高^[29]。

曹培欢等^[30]提出一种适用于CFRP汽车传动轴的材料、结构、性能一体化设计方法。既实现了CFRP在汽车零部件轻量化设计中的应用,同时解决传动轴优化设计过程中铺层缠绕工艺约束不易添加的问题。由T700/5015环氧树脂单向纤维复合材料所制的传动轴满足扭转刚度及模态性能要求,且有铺层缠绕工艺约束的CFRP传动轴相比原钢制传动轴质量减轻了22.8%。

张运东等^[31]选择12KT700碳纤维加环氧树脂为传动轴管材料,采用缠绕法成型工艺完成碳纤维复合材料轴管的成型,铆粘连接技术实现轴管与金属万向节的可靠连接,开发的碳纤维复合材料传动轴减重超过40%。台架试验结果显示,产品静扭强度、扭转疲劳寿命、临界转速等各项性能指标均满足国家汽车行业标准QC/T29082—2019《汽车传动轴总成技术条件及台架试验方法》的要求。

轮毂是汽车最重要的部件之一,不仅支撑着整车的重量和载荷,还承担驱动功率和扭矩的传递。因此,车辆的轮毂不仅要具有良好的抗冲击性,还要有优异的耐久性和耐热性。在保证力学性能的前提下,澳大利亚Carbon Revolution公司开发的CFRP轮毂比铝合金轮毂轻40%~50%,英国Kahm公司在RX-X汽车中使用的特殊碳纤维车轮仅重66 kg,瑞典Koenigsegg公司在Agera R上使用中空、片式CFRP轮毂使其非簧载质量减少约20 kg^[32]。

近年来,随着涡轮增压器发动机技术日趋成熟,日本开始在涡轮增压器压气机叶轮的制造中使用CFRP替代铝合金,这不仅使叶轮质量降低48%,而且使得转子的转动惯量减小,提高了转子加速性能,涡轮增压器的响应延迟问题得到改善,为后续CFRP在发动机上的应用提供了很好的借鉴,并指明了研发方向^[33]。

2.4 刹车系统中的应用

CFRP不仅具有良好的抗冲击性,同时还具有优秀的耐高温和耐摩擦性能。CFRP制动衬片的平均使用寿命可高达8~12万km以上,是普通汽车制动使用寿命的3~6倍,且硬度值好、刹车时无噪音,保证了轿车快速行驶中刹车的平稳性、安全性与舒适性。如今许多赛车和豪华车型已经在使用碳纤维刹车片。西格里生产的CFRP制动盘具有优异的制动稳定性,并已应用于保时捷Porsche AG、911 Turbo GT等车型。随着CFRP价格的逐年下降,由CFRP制成的高性能刹车片将得到广泛应用^[34]。

CFRP摩擦材料组成包括黏结树脂、纤维材料和摩擦改性剂等。目前普遍采用酚醛树脂作为黏结树脂基体。但为改善其在耐高温方面的缺陷,通常采用改性的方法,例如:(1)化学改性。即在酚醛树脂的分子链上通过化学反应的方式接入其他改性分子,主要包括环氧化反应和醚化羟基反

应;(2)共混改性。即加入无机纳米粒子、纤维、橡胶等材料进行共混,发挥其他材料的特点;(3)多组分改性。例如,加入植物油改性酚醛柔韧性,通过硼改性提高其耐热性^[35]。

在刹车片材料种类中,除酚醛树脂外,聚酰亚胺作为黏结树脂基体材料,因其具有良好的热稳定性和抗冲击性,同时在极端环境下具有优异的摩擦性能,在刹车片领域的应用潜力巨大^[36]。

3 CFRP在汽车工业中的前景

3.1 制造成本、环保方面的优势

与轻质合金材料相比,CFRP制成的车身不再需要冲压和焊接,而是采用模压和粘结工艺,节约了模具、夹具、生产线等设施的投资,大大降低了综合生产成本。根据英国材料系统实验室的一项研究,当汽车产量低于2万辆时,采用树脂传递模塑工艺生产的CFRP车身的总体成本低于金属车身,这说明CFRP不仅具有先进生产工艺的技术优势,同时兼有小批量生产成本低的经济优势^[37]。

如前所述,在轻量化效果方面,由CFRP制成的车身部件比铝制部件可以减重30%以上,比同类钢制零件减重50%以上。相关研究表明,车重每减少10%,油耗可降低6%,有助于节能减排^[38]。因此,在开发环保型汽车方面,CFRP具有很强的竞争优势。

3.2 国内外发展现状

国外碳纤维的开发应用时间早、生产技术成熟,碳纤维性能优越。发展至今,已不再局限于军工、航空航天等领域,已延伸至日常生活领域^[39]。

相较于发达国家,我国对于CFRP在汽车领域的应用研究起步较晚,技术相对落后,还处于应用推广阶段。近年来,伴随着碳纤维生产技术的不断提高,生产规模的不断扩大,加之自主品牌的强势崛起,为我国车用CFRP的发展夯实了基础^[40]。

2014年,奇瑞汽车与国内科研院所联合研发了一款插电式混合动力汽车(艾瑞泽7),这是国内首款采用CFRP打造车身的量产车型,车身质量为218 kg,比金属车身轻48%^[41]。2015年,江苏奥新研发的新能源汽车E25A级车在盐城生产下线,车身客舱采用全碳纤维制造,较老款车型减重50%。另外,通过优化集成零件模块的方式,将汽车零部件的数量减少到现有汽车零部件的40%^[42]。2016年以来,北汽集团先后成功研发CFRP发动机罩、车身功能件等,并将CFRP发动机罩应用在新款SUV上,实现相应部件减重50%^[43]。在“十三五”开局之年,长安汽车响应国家号召,依托“新能源汽车”重大科技专项“轻量化纯电动汽车集成开发技术”项目,于2020年4月成功试制下线首款具有自主知识产权的碳纤维/铝合金混合结构车身,为碳纤维在纯电动轿车上的规模化应用提供强有力的支撑^[44]。

3.3 汽车工业中CFRP应用瓶颈及发展方向

从目前的应用状况来看,CFRP在汽车领域的应用主要集中在赛车、超级跑车等高端车型,经济型轿车的应用相对

较少。随着碳纤维元素的加入,汽车充满了科技感,但加工制造成本高、生产工艺复杂、回收再利用困难等限制了碳纤维在汽车轻量化领域的大规模应用^[45]。尽管CFRP在汽车领域的应用前景在业内存在争议,但CFRP本身的性能优势是毋庸置疑的。随着CFRP设计方法和加工技术的逐渐成熟,CFRP在汽车行业的应用范围将不断扩大,应用层次也将不断提高,具体体现为以下几个方面:

(1)由“小众车”向大众车转变。在CFRP发展之初,由于其成本高、制造工艺复杂,只用于对性能有高要求的赛车和跑车上。随着CFRP成本的降低和制造工艺的不断改进,CFRP汽车零部件将越来越多地应用于家用汽车和新能源汽车。

(2)由次结构件向主结构件发展。考虑到安全性、制造工艺等问题,CFRP仅用于内饰件和车身覆盖件等性能要求不高的次结构件,往往导致材料性能“供大于求”。随着结构设计方法和成型加工技术的逐步成熟,CFRP不断应用在传动轴、刹车片、轮毂等结构件上,材料的综合性能得到进一步开发。

(3)由小批量向规模化转变。在CFRP汽车零部件的制造工序上,现有的小批量的生产方式大多存在制造成本高,生产效率低的问题。随着CFRP汽车零部件应用需求的不断提高,需要向以自动化、数字化、智能化为主的批量化生产方式转变,助力CFRP在汽车轻量化上的应用向好、向快发展。

4 结语

为了实现节能减排目标,在汽车上应用CFRP等轻质材料已是业内共识。由于CFRP的优异性能,被应用于汽车车身及覆盖件、制动系统、轮毂、发动机部件、传动轴、座椅和内饰等部件,实现整车质量减重30%以上,但加工制造成本高、生产工艺复杂、回收再利用困难等限制了碳纤维在汽车轻量化领域的大规模应用。随着碳纤维价格的不断下降和应用技术的不断成熟,CFRP等轻质材料将逐步取代轻合金材料,成为车用材料的中流砥柱。

参考文献

- [1] 张方超,等.合成纤维,2013,42(6):26-29.
Zhang Fangchao, et al. Synthetic Fiber in China, 2013, 42(6):26-29.
- [2] 雷瑞,等.合成纤维,2014,43(7):37-40.
Lei Rui, et al. Synthetic Fiber in China, 2014, 43(7):37-40.
- [3] 张婧,等.科技导报,2016,34(8):26-30.
Zhang Jing, Science & Technology Review, 2016, 34(8):26-30.
- [4] 孙延.粘接,2019,40(9):71-73.
Sun Yan. Adhesion, 2019, 40(9):71-73.
- [5] 孙延.粘接,2019,40(12):104-106.
Sun Yan. Adhesion, 2019, 40(12):104-106.
- [6] 方鲲,等.新材料产业,2020(2):63-69.
Fang Kun, et al. New Material Industry, 2020(2):63-69.
- [7] 罗栋.合成材料老化与应用,2016,45(2):91-94.

- Luo Dong. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(2): 91-94.
- [8] 林刚. 纺织科学研究, 2020(5):42-63.
- Lin Gang. Textile Science Research, 2020(5):42-63.
- [9] Chen J, et al. Polymers, 2019, 11(6):1062.
- [10] 李嘉, 等. 高科技纤维与应用, 2017, 42(2):10-16.
- Li Jia, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2017, 42(2):10-16.
- [11] 解江浩. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(5):87-91.
- Xie Jianghao. Small Internal Combustion Engine And Vehicle Technology, 2018, 47(5):87-91.
- [12] 张宇, 等. 纤维复合材料, 2019, 36(3):53-57.
- Zhang Yu, et al. Fiber Composites, 2019, 36(3):53-57.
- [13] 宋燕利, 等. 材料导报, 2016, 30(17):16-25, 50.
- Song Yanli, et al. Materials Review, 2016, 30(17):16-25, 50.
- [14] 姜哲. 某电动汽车典型碳纤维车身零部件优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Jiang Zhe. Optimization design of typical carbon fiber body parts of an electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [15] 徐作文, 等. 科技创新与应用, 2018(36):79-81.
- Xu Zuowen, et al. Technology Innovation and Application, 2018, (36):79-81.
- [16] 罗益锋. 高科技纤维与应用, 2019, 44(6):1-12.
- Luo Yifeng. Hi-Tech Fiber & Application, 2019, 44(6):1-12.
- [17] 姜立业, 等. 塑料工业, 2022, 50(1):14-19.
- Jiang Liye, et al. China Plastics Industry, 2022, 50(1):14-19.
- [18] 叶辉, 等. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(2):417-425.
- Ye Hui, et al. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2020, 50(2):417-425.
- [19] 吴方贺. 碳纤维复合材料发动机罩结构设计与优化[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Wu Fanghe. Structural design and optimization of carbon fiber composite Engine Hood[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [20] 秦晓宇, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(2):61-68.
- Qin Xiaoyu, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2): 61-68.
- [21] 廖耀青. 碳纤维复合材料汽车座椅靠背骨架结构与仿真 [D]. 温州: 温州大学, 2021.
- Liao Yaoqing. Structural design and simulation of carbon fiber composite automobile seat back frame[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [22] 郭智臣. 化学推进剂与高分子材料, 2020(2):70.
- Guo Zhichen. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2020(2):70.
- [23] 程章, 等. 汽车工程学报, 2015, 5(5):367-374.
- Cheng Zhang, et al. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2015, 5(5):367-374.
- [24] 史践, 等. 汽车工艺与材料, 2021(12):7-11.
- Shi Jian, et al. Automobile Technology & Material, 2021(12): 7-11.
- [25] 常燕, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(7):154-157.
- Chang Yan, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 154-157.
- [26] 王庆, 等. 上海交通大学学报, 2017, 51(2):136-141.
- Wang Qing, et al. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(2):136-141.
- [27] 田凯. 电动汽车碳纤维复合材料保险杠防撞梁轻量化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Tian Kai. Lightweight design of anti-collision beam of electric automobile carbon fiber composite bumper[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [28] 吴飞. 塑料工业, 2018, 46(8):14-17.
- Wu Fei. China Plastics Industry, 2018(8):14-17.
- [29] 于勤勤, 等. 汽车工艺与材料, 2017(10):61-64.
- Yu Qinqin, et al. Automobile Technology & Material, 2017(10):61-64.
- [30] 曹培欢, 等. 东华大学学报: 自然科学版, 2021, 47(5):89-96.
- Cao Peihuan, et al. Journal of Donghua University: Natural Science, 2021, 47(5):89-96.
- [31] 张运东, 等. 汽车工艺与材料, 2022(4):20-24.
- Zhang Yundong, et al. Automobile Technology & Material, 2022 (4):20-24.
- [32] 陈康达, 等. 碳纤维复合材料在汽车轻量化上的应用现状及发展前景展望[C]/2018中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 中国汽车工程学会, 2018:634-639.
- Chen Kangda, et al. Application status and development prospect of carbon fiber composites in automobile lightweight[C]/Proceedings of the 2018 annual meeting of the society of automotive engineers of China. Shanghai: the society of automotive engineers, 2018:634-639.
- [33] 马晓坤, 等. 化工新型材料, 2020, 48(11):223-226.
- Ma Xiaokun, et al. New Chemical Materials, 2020, 48(11): 223-226.
- [34] 黄纯可, 等. 时代汽车, 2022(3):21-22.
- Huang Chunke, et al. Auto Time, 2022(3):21-22.
- [35] Liu Y Q, et al. Wear, 2016, 261(2):225-227.
- [36] 赵天德. 塑料工业, 2019, 47(7):104-107.
- Zhao Tiande. China Plastics Industry, 2019, 47(7):104-107.
- [37] Hao H, et al. Energy, 2016, 94(C):755-765.
- [38] 陈珍, 等. 农机使用与维修, 2021(6):33-34.
- Chen Zhen, et al. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2021(6):33-34.
- [39] 杨桂英, 等. 当代石油石化, 2020, 28(10):24-28.
- Yang Guiying, et al. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28 (10):24-28.
- [40] 王军照, 等. 中国新技术新产品, 2020(18):53-57.
- Wang Junzhao, et al. New Technology & New Products of China, 2020(18):53-57.
- [41] 杨洋, 等. 黑龙江科学, 2020, 11(18):25-26, 29.
- Yang Yang, et al. Heilongjiang Science, 2020, 11(18):25-26, 29.
- [42] 陈一哲, 等. 材料工程, 2020, 48(12):36-43.
- Chen Yizhe, et al. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(12): 36-43.