

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.030

汽车门模块轻量化进展

黄佳佳¹, 张云青²

(1. 江苏金发科技新材料有限公司, 江苏昆山 215300; 2. 上海金发科技发展有限公司, 上海 201714)

摘要:介绍了汽车门模块产生的背景、功能及特点,简要回顾了汽车门模块设计方案轻量化的演变历史,同时结合大量汽车门模块设计案例研究信息,对比分析了不同时期门模块在材料选用、结构设计、工艺成型、量产应用等方面的情况。基于汽车门模块结构集成化、设计数字化、方案多样化三个方面轻量化现状的详细描述,论证了汽车门模块开发技术日益成熟,且通过多途径不断向高轻量化方向发展的趋势,并对未来轻量化门模块发展方向作出了总结与展望。

关键词:汽车门模块;集成;高轻量化;设计数字化

中图分类号: TQ320.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0157-06

Lightweight Advancement of Vehicle Door Module

Huang Jiajia¹, Zhang Yunqin²

(1. Jiangsu Kingfa Science & Technology Advanced Materials Co., Ltd., Kunshan 215300, China;

2. Shanghai Kingfa Science & Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201714, China)

Abstract : The background, function and characteristics of vehicle door module were introduced. And door module light weight evolution history was reviewed briefly. At the same time, combined with many door module design cases research information, the door modules in different periods of material selection, structural design, process molding, mass production application and other aspects were comparatively analyzed. Increasingly mature door module technology & high light weight tendency were proven with detailed description of door module structure integration, design digitization, scheme diversification. Finally the future development direction of door module was summarized and prospected.

Keywords : door module ; integration ; high light weight ; design digitization

现代化的汽车工业中,为了提升装配效率,降低生产成本,提高产品质量及竞争力,迎合汽车市场对小批量、多品种、个性化的需求,一些汽车整车厂逐渐开始将原来直接由各供应商提供单个零件、由整车厂在生产线上组装的生产模式逐步转变为由一级供应商承担模块供货、整车厂仅做模块组装的模块化生产模式^[1]。其中,汽车门模块(也称“汽车门基板”、“汽车门内板模块”等)作为汽车中的典型模块之一,正是在这一背景下而产生。

汽车门模块是指将传统意义车门系统中众多车门功能附件与部分车门钣金或内饰组件结构集成为一体,形成一个相对独立完整的功能模块组件,是完整车门系统重要组成部分。车门模块主要功能是为车门众多功能附件提供安装平台(挂载点)、刚度支撑平台(装配组件后不同受力工况下

变形满足设计要求)、满足强度要求(极限或长期受力工况下不破坏)及密封隔音要求(防水密封及隔音降噪)等^[2]。车门模块所搭载或集成的车门附件一般包括车门玻璃升降器、锁体、内外拉手、玻璃升降器、玻璃后下导轨、扬声器、扶手安装支架、车门密封组件、电器线束、电器控制模块、碰撞传感器、吸能安全保护结构等^[3-6]。在具体零件设计要求上,需要确保玻璃升降器、拉手、密封等位置长期使用工况,保证门模块总成所有组件精确装配,满足高低温极限环境下正常使用,不同行驶工况条件下抵抗强烈震动等^[7-8]。

早在20世纪90年代,汽车车门系统就已开始采用模块化概念设计,早期的方案主要是基于模块集成化,装配效率提升等概念下的钢材质门模块设计,并没有过多注重门模块整体的减重效果,集成度也并不高。然而,随着近年来日

通信作者: 黄佳佳,工程师,主要从事汽车产品设计与开发 E-mail: hjj690475963@126.com

收稿日期: 2020-10-12

引用格式: 黄佳佳,张云青. 汽车门模块轻量化进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):157-162.

Huang Jiajia, Zhang Yunqin. Lightweight advancement of vehicle door module[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):157-162.

益严苛的油耗及排放法规的实施,汽车整车轻量化技术逐渐成为行业关注的热点。即使对于当前正摆脱对燃油依赖的新能源汽车而言,由于其动力电池储能密度技术尚未突破瓶颈,因里程焦虑问题所带来的整车轻量化需求更加迫切。因而,探索成熟的轻量化汽车门模块解决方案成为各主机厂、零部件供应商重点研发的方向之一,近年来也不断取得新进展。笔者首先从门模块设计演变历史入手,继而详细论述门模块轻量化技术现状,最终总结出门模块未来轻量化发展方向。

1 演变历史

在基于模块化制造,以提高生产装配效率、降低生产成本的驱动力作用下,“车门模块”这一零件概念早在20世纪90年代之前就被人们所提出,随着逐渐被越来越多的汽车主机厂及车门系统制造商所认可接受,车门模块开始批量生产应用于现代汽车车门系统结构中。迄今为止,世界上已有25%以上的汽车车门系统采用车门内板模块进行制造。基于选材或结构设计概念的不同,车门模块的演变主要分为金属方案、全塑方案、复材方案三个阶段。

最早期的门模块设计概念相对较为简单,如图1所示^[9],通过在过渡钢制支架或连接板(模块载体)上设计出车门相关附件的安装孔位^[5],然后在汽车主机厂或零部件供应商处将有限的部分车门附件零件实现集合装配形成模块化总成制件,再将组装好的模块总成制件装配到车门上形成完整车门系统。很显然早期的门模块设计集成度并不高,但对于生产装配效率的提升,以及门模块设计概念的快速应用升级具有重要意义。在此之后,集成度更高,能搭载更多车门附件,实现更多功能的车门模块成为行业继续探索创新的目标,在20世纪90年代后,门模块设计概念较为成熟的金属门模块方案开始逐渐进入大家的视野,即一体化金属(钢或铝合金)冲压门模块方案,如图2所示。采用金属钢板或铝板一次冲压成型搭载安装车门附件的金属基板件,整个门模块不仅取代了传统车门内板部分钣金结构,而且还实现了更多车门附件或功能的集成,大大提高了车门模块设计集成度以及系统化装配效率。而对于钢制或铝制门模块的选择,主要还是基

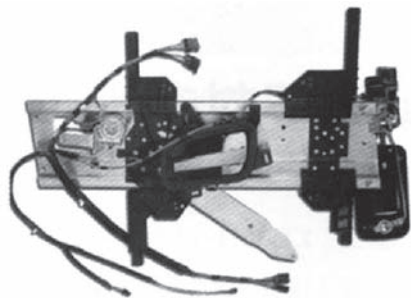


图1 早期门模块示意图

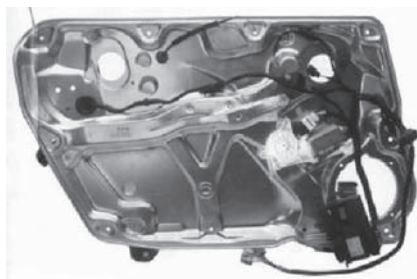


图2 金属门模块示意图

于不同的轻量化需求。金属门模块经历了较长时间的发展,在2010年前后,此种方案在汽车车门系统应用上达到了巅峰。

几乎也同在20世纪90年代,由恩坦华(原德尔福内饰和照明系统公司)采用SABIC聚碳酸酯(PC)/聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)树脂完成了全球第一款全塑门模块结构,如图3所示^[10],这是全塑门模块设计概念首次被提出并付诸实践。该款全塑车门模块替换了40个独立的金属零件,能够降低10%的成本,使每扇车门减重1.49 kg,并且实现了车门装配过程简化。

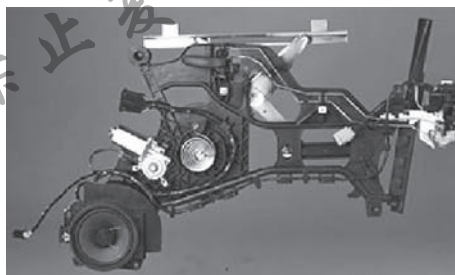


图3 德尔福 Super Plug™ 门模块

进入2010年以后,以塑料取代金属的全塑门模块设计方案开始真正兴起并实现规模化应用,主要得益于汽车节能减排、汽车新能源等政策背景的推动,汽车轻量化观念开始逐步渗入整个行业,以门模块等为代表的典型汽车半结构件开始大量采用“以塑代钢”轻量化设计,同时受到电动化、智能化等功能性空间需求驱动,促使了全塑门模块设计方案在这一阶段的快速发展。此后,市场上陆续推出了包括PC/PBT、玻纤热塑性复合材料(GMT)、木纤维增强聚乙烯(PE)、长玻纤增强聚丙烯(LGFPP)、碳纤维增强热塑性复合材料(CFRT)/LGFPP等在内的多种材料选型方案的全塑门模块,其中以LGFPP材料方案应用最为成熟,由于其力学性能优异、耐冲击、低密度、低翘曲、尺寸稳定性好、低蠕变、耐腐蚀、易加工成型等优点^[11-12],使得该类材料方案门模块相比于钢质金属门模块方案在减重、装配效率、成型效率、综合成本等诸多方面更具产品优势。图4为2011款现代索纳塔全塑车门模块^[13],该门模块采用30%长玻纤填充增强聚丙烯材料,使单个车门平均减重约0.5 kg,并采用注塑成型成功将21

个部件集成为一个零件,将5个装配流程精简至1个,有效降低了车门系统综合成本。全塑门模块从兴起至今,LGFPP全塑门模块几乎以绝对优势占据了整个门模块市场,典型应用车型还包括2012款大众途观、2013款福特嘉年华、2014款斯柯达野帝、2015款现代途胜、2016款Jeep自由侠、2018款XC40。时至今日,这类材料方案门模块依旧保持旺盛的生命力。

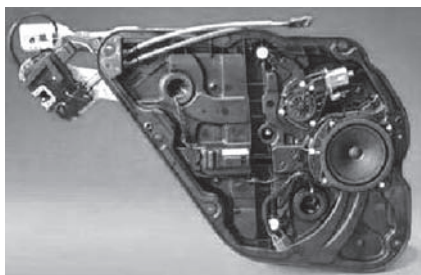


图4 2011款现代索纳塔车门模块

近年来,随着汽车轻量化需求日益迫切,在现有成熟全塑门模块方案基础上又创新发展出了一些更具特色的门模块设计方案,其中比较典型的要数采用有机复合板材及长纤维增强热塑性材料(LFT)混合材料方案,并通过模压结合注塑工艺所成型的热塑性复材门模块。由于门模块主体结构有机复合板材采用连续纤维材料,并且纤维材料采用交叉层叠或编织形式,有效提升了材料的性能。这使得通过局部有针对性地采用有机复合板增强的复材门模块质量更轻、强度更高、效率更高、集成度更高、生产及装配工艺更少。2018年全球首款量产的全新福克斯复材车门模块,如图5所示,通过采用金发提供的厚度仅0.6 mm连续纤维增强热塑性有机复合板及30%长玻纤增强聚丙烯材料,即使相比于仅采用LGFPP全塑门模块,仍实现了单个产品约0.5 kg减重效果,且同时保证良好吸能安全性^[14]。复材门模块方案的成功量产化不仅为行业树立了标杆,也在一定程度上引领了未来轻量化门模块的发展方向。

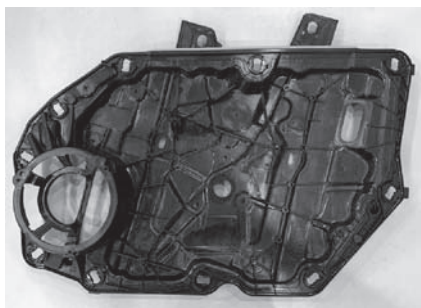


图5 2018款福特福克斯复材门模块本体

2 轻量化现状

作为汽车车门系统重要的半结构组件,车门模块的轻量化设计探索一直被业内持续广泛关注,从20世纪90年代

至今已经历了近30年的轻量化历程,车门模块轻量化技术得到了快速迭代更新。从材料角度而言,多种主流轻量化材料(高强钢、铝合金、全塑及复合材料)都已经量产应用于汽车门模块设计方案,形成了如今市场上多种轻量化方案并存,既相互竞争又互为补充的局面。随着各主流汽车制造商、核心零部件供应商以及材料供应商的共同努力与持续关注,车门模块的轻量化设计日益向高轻量化方向发展,笔者将从结构集成化、设计数字化、结构多样化三个方面进行详细论述^[2]。

2.1 结构集成化

集成化设计是车门模块设计的主要特点之一,结构集成化程度越高意味着门模块整体功能体现要求更丰富,集成设计要素也越多,设计控制要求也更多,装配制造更复杂,因此,门模块结构集成化程度也直接体现了其设计水平的高低。而门模块结构集成化程度越高对于车门系统则意味着设计自由度更大、零件数量及装配制造工序越少、轻量化效果越好、综合成本更低。因此,站在平衡兼顾车门系统各方面要求的角度,合理的门模块结构集成化设计思路是一款门模块整体设计方案成功的关键。

通过对大量门模块设计案例研究,门模块结构集成化主要可以分为两个层次,一个层次为车门零件与门模块本体仅表现为装配或搭载关系的连接性集成,即车门模块本体并没有融合集成零件任意部分结构,仅通过连接方式或关系的变化整合为一体。以往传统金属车门模块主要是通过这种方式实现集成化。而另一层次则通过门模块本体多样化结构设计替代或融合集成车门零件部分甚至全部结构或功能而实体一体化集成,相比前者结构集成化程度提升的同时带来显著的轻量化效果,这在当前主流的全塑门模块设计方案上得到了较好的体现,主要得益于门模块结构注塑成型所带来的优势,也是未来轻量化门模块首选集成化方式。

尽管当前门模块设计技术已日趋成熟,但为了应对智能化、电动化汽车对于车门系统更多组件安装空间、功能及整体轻量化的要求,门模块结构正逐步向高集成化设计方向发展。目前主流门模块在传统结构集成化方案(即集成内拉手、扬声器、电器线束、吸能缓冲结构、扶手支架、锁体、外把手基座、玻璃升降后部下导轨、锁执行器、碰撞传感器、密封组件等)基础上,已成熟实现门模块本体与玻璃升降器系统(含导轨、电机安装座、卷轴器安装支架等)、内拉手安装座、扬声器安装座、线束固定结构、扶手支架等复杂结构部件的一体化结构集成,并向集成更多车门结构或功能(如车门窗框、车门玻璃、玻璃升降导轨、内饰功能等)方向发展。图6为零部件供应商博泽所推出的集成了玻璃升降器系统、车门腰部窗框、内水切等结构的高集成化代表性门模块方案。



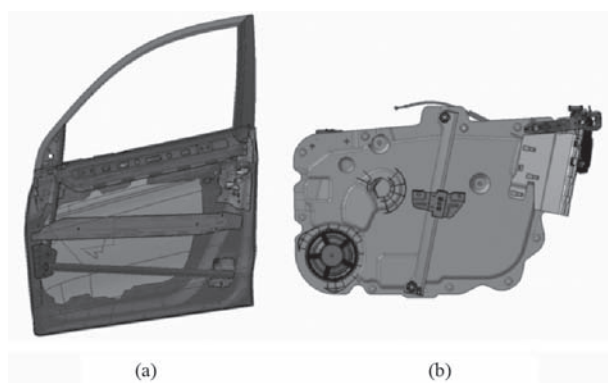
图6 博泽高集成化门模块方案

2.2 设计数字化

在现代汽车工业中,利用 Catia/UG/Solidworks 等各类图形设计软件进行产品数字化设计已经成为不可或缺的环节。在汽车门模块设计阶段,通过这类软件可以进行合理结构空间布置、人机校核、造型设计等,从而建立与实物尺寸一致的模块数字化模型,准确实现门模块整体结构和局部细节设计。同时依托虚拟性能仿真、成型仿真、装配制造仿真等计算机辅助工程技术,快速实现门模块数字化模型更迭与优化设计。设计数字化的实现,精准避免了空间干涉、结构冗余、性能过剩、成型缺陷、装配异常等非合理结构设计,为门模块精益轻量化提供可靠保证^[15]。

汽车设计数字化经过长时间的发展,对于诸如门模块此类零件设计数字化技术已经相对比较完备,现阶段考虑更多的则是如何更充分创新利用,发掘并拓展现有设计数字化技术。其中,以门模块数字化设计过程中的配合部件间的空间间隙校核为例,主流设计主要是通过设计状态几何尺寸测量、关键典型位置截面切割、常规 DMU 运动机构仿真等技术方法实现。对于模块级门模块总成而言,因轻量化集成设计搭载组件众多,在有限车门钣金空间设计环境下,门模块在形成装配总成后需要装配至车门钣金过程中极易发生装配干涉或无法装配等严重设计缺陷问题,基于 Catia 软件环境建立门模块 DMU 装配分析模型,通过设计数字化实现对装配分析过程的准确模拟,并结合实际装配过程中柔性组件可允许的变形等设计参考,从而及时发现并有效解决门模块总成轻量化集成设计所带来的装配干涉风险。图7、图8分别为基于某款车型门模块设计所完成的装配仿真数据示意图、装配仿真过程示意图。

此外,对于轻量化门模块而言,周围安装部位尺寸变形的控制也是其设计挑战难点之一,目前市面上主流轻量化门模块方案几乎都以采用 LGFP 注塑成型,由于成型过程中制件内部不同取向纤维差异化分布较大而造成产品收缩不均,极易引起门模块零件安装周围发生严重变形,进而影响到整个车门总成安装防水密封性。而数字化预变形设计技术则是解决门模块此类变形问题的高效途径,这种通过对数字设计模型预先增加一定预变形量从而纠正或改善最终产



a—门钣金总成; b—门模块总成

图7 车门模块装配仿真数据示意图

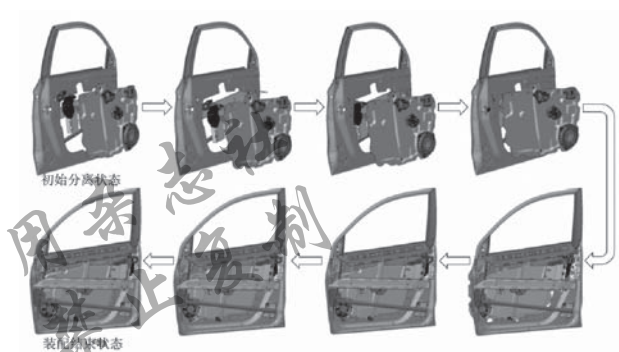


图8 车门模块装配仿真过程示意图

品变形量的技术实现已经成熟,但由于预变形量一般难以精确掌控,往往需要一定真实对标数据对设计或仿真加以验证,才能获得理想的数字化设计效果^[16]。

2.3 方案多样化

从材料选型角度而言,以高强度、铝合金、塑料以及复合材料为代表的主流轻量化材料方案都已在轻量化门模块上实现应用。尽管不同材料方案门模块都能为传统车门系统带来一定的减重、集成化、制造节省等效果,但受到目前汽车迫切轻量化以及更多功能化布置空间需求,高集成度的轻量化门模块仍然被需求。目前钢、铝合金材质金属冲压门模块方案已基本被市场所淘汰,取而代之的是采用单一 LGFP 门模块方案,以及采用连续玻纤增强热塑性复合有机板及 LGFP 混合材料门模块方案。前者为目前门模块主流材料方案,采用注塑工艺成型,成型效率高,且该材料方案门模块集成度高、重复制造性好、综合制造成本低,普遍为各大主机厂所认可及接受。由于材料性能上的优势可以实现更佳轻量化效果,后者成为汽车门模块轻量化热门选材方案,通过采用复杂的模压结合注塑工艺成型,集成度及轻量化效果更显著,但因有机复合板材料品质控制难度高及门模块整体制造成型工艺复杂,导致其重复制造性不如前者,制造设备投

入大,综合制造成本高。但无论如何后者方案对于门模块轻量化趋势发展起到了一定引领作用,为车门极致轻量化需求提供了更大选择空间及可能性^[17]。

从结构设计角度而言,门模块轻量化已形成多思路方向并行发展态势,其中方向一是以博泽、麦格纳为代表的将车门附件与部分车门钣金集成成为门模块设计思路,但二者在具体设计方案上又有所不同。博泽先进门模块方案(如图6)在结构上已率先实现了门模块与玻璃升降器导轨、车门腰部窗框在内的大面积车门钣金的设计集成,实际上这在一定程度上要归功于博泽率先在门模块使用高性能复合有机板材料上的创新。麦格纳先进门模块方案如图9所示,虽然集成了部分车门钣金结构,但其不同于常见门模块设计结构,最大特点在于将门锁系统、玻璃导轨、玻璃升降器、车门玻璃实现了高度融合集成,并同时带来玻璃减重及升降稳定性改善。方向二则是以安通林为代表的将车门附件与车门内饰集成成为一体的门模块设计思路,如图10所示,安通林以其在车门内饰领域设计优势,创新将车门内饰护板与扬声器、玻璃升降器、电器线束、车门内拉手、密封组件、安全系统组件等集成为一体,由于车门内饰系统本身结构复杂性,这种门模块系统组件集成通常表现为装配连接性集成形式,轻量化贡献点主要在于车门附件安装钣金结构的节省,其对于车门装配结构简化的意义更多于轻量化减重。总体来说,不同设计思路车门模块所呈现的结构方案上差异较大,但均体现了通过结构集成、装配简化的方式来实现门模块轻量化减重的特点^[14,18-20]。

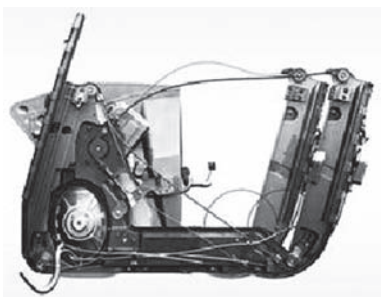


图9 麦格纳创新门模块方案

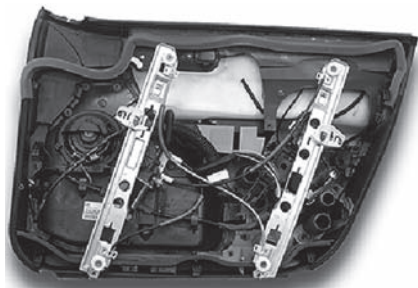


图10 安通林创新门模块方案

3 结语与展望

经过近30年的发展,汽车门模块在市场上已得到广泛应用,并实现了多代产品更新升级,其设计技术日益成熟,且向高轻量化方向发展,具体表现为:

(1) 门模块结构正逐步向挑战难度更高的高集成化设计方向发展,一方面通过将门模块集成组件或功能采用轻量化程度更高的一体化集成,而非简单连接性集成。另一方面则通过扩大门模块集成范围,如集成更多车门组件、钣金结构或功能。

(2) 先进设计数字化方法越来越多被运用到门模块设计开发过程中,精准避免了装配异常、结构变形、性能过剩、成型缺陷等非合理结构设计,为门模块精益轻量化提供了更可靠保证。

(3) 多样化的选材方案及结构设计思路,尤其是对于复合材料模块方案的探索创新,使得门模块轻量化设计更加灵活多变,为门模块极致轻量化设计提供了更多的选择及可参考空间。

综合以上,高集成模块化设计、先进的设计数字化方法、多样化的选材方案及结构设计思路,不仅使门模块高轻量化发展趋势得到了较好的体现,更是门模块实现高轻量化的有效途径。在汽车日趋轻量化的大背景下,汽车门模块高轻量化设计不仅是行业共识,更是行业所趋。未来随着汽车轻量化驱动力的不断推动,轻量化门模块将具有更广阔的市场应用前景,与此同时,更具创新及性价比的新型轻量化门模块将成为技术开发的热点。而基于不同车型差异化需求,结合实际车型设计状态及开发需要,并与主机厂达成设计共识的高轻量化门模块方案将更具市场潜力及竞争力。

参考文献

- [1] 蒋鼎丰. 汽车与配件, 2006(36):36-37
Jiang Dingfeng. Automotive & Parts Technology, 2006(36):36-37.
- [2] 张云青, 等. 塑料工业, 2020, 48(3):20-24.
Zhang Yunqing, et al. China Plastics Industry, 2020, 48(3):20-24.
- [3] 周建强. 汽车实用技术, 2017(19):64-66.
Zhou Jianqiang. Automobile Applied Technology, 2017(19):64-66.
- [4] Tochioka T. Development of integrated functions module carriers by injection molding with long glass fiber reinforced polypropylene[C]. SAE International Congress and Exposition, 2003.
- [5] Ciliberti M, et al. Developments in Thermoplastic Door Modules[C]. SAE 2003 World Congress & Exhibition, 2003.
- [6] 程莉. 基于知识的车门附件布置设计系统的集成与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
Cheng Li. Integration and application of knowledge-based door Attachment layout design system[D]. Changchun: Jilin University, 2004.

- [7] Reaburn, T., et al. Ultra-Light Weight Automotive Door: Design and Validation[C]. WCX World Congress Experience, 2018. doi:10.4271 / 2018-01-0111.
- [8] Plourde, L., et al. MMLV: Door design and component testing[J]. SAE 2015 World Congress & Exhibition, 2015. doi:10.4271 / 2015-01-0409.
- [9] 王强,等. 汽车工艺与材料, 2012(10):36-38
Wang Qiang, et al. Automobile Technology & Material, 2012(10):36-38
- [10] Husic J M, et al. Non-linear dynamic analysis of a Super Plug™ door module response to a door slam event[C]. SAE International Congress and Exposition, 1999. doi:10.4271/1999-01-0406.
- [11] Tochioka T, et al. Development of Module Carriers by Injection Molding with Long Glass-Fiber Reinforced Polypropylene[C]. SAE World Congress & Exposition, 2003.
- [12] Schijve W. Long glass fiber PP -StaMax P, High performance at medium fiber length[J]. Baden -Baden:3rd AVK-TV Conference, 2000.
- [13] 艾邦高分子. 历史回顾:LFT-PP长玻纤增强聚丙烯门内板曾获得SPE创新大奖[EB/OL].[2017-10-13]. https://www.sohu.com/a/197901509_167954#.
Abone polymer. Historical overview:LFT-PP long glass fiber reinforced polypropylene door panel has won the SPE innovation award[EB/OL].[2017-10-13]. https://www.sohu.com/a/197901509_167954#.
- [14] 朱敏慧. 汽车与配件, 2019(7):45-46.
Zhu Minhui. Automobile & Parts, 2019(7):45-46
- [15] 邹殿龙. DMU在车身产品开发中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Zhou Dianlong. The study of DMU application in vehicle body development[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [16] 黄佳佳,等. 工程塑料应用, 2019, 47(10):69-74.
Huang Jiajia, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):69-74.
- [17] Marcus Klopp, et al. 汽车与配件, 2019(16):74-75.
Marcus Klopp, et al. Automobile & Parts, 2019(16):74-75.
- [18] Bushi L, et al. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(2):310-323.
- [19] Bushi L, et al. Magna's new ultralight door — A comparative LCA study of the lightweight design as per ISO 14040 / 44 LCA standards and CSA Group LCA guidance document for auto parts[C]. SAE Technical Paper, 2018. doi:10.4271 / 2018-01-0661.
- [20] Hoff T, et al. Design and development of a generic door Hardware module concept[J]. SAE Technical Paper, Automotive Sector, 1998.
- (上接第156页)
- [25] Didane N, et al. Polymer Degradation & Stability, 2012, 97(3):383-391.
- [26] Min XiaoDong, et al. Procedia Engineering, 2016, 135:243-247.
- [27] 闫启东,等. 工程塑料应用, 2019, 47(1):143-147.
Yan Qidong, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):143-147.
- [28] 陈妍,等. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2004(5):18-21.
Chen Yan, et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004(5):18-21.
- [29] Xue Baoxia, et al. Applied Surface Science, 2017, 412(8):545-553.
- [30] 荣智,等. 现代化工, 2020, 40(7):50-54.
Rong Zhi, et al. Modern Chemical Industry, 2020, 40(7):50-54.
- [31] Boon P C, et al. Scientific Reports, 2019, 9(1). doi:10.1038 / s41598-019-52039-2.
- [32] Réti C, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2008, 19(6):628-635.
- [33] Jia Puyou, et al. Scientific Reports, 2019, 9(1). doi:10.1038 / s41598-018-38407-4.
- [34] Si Chen, et al. Materials Chemistry and Physics, 2020, 52. doi:10.1016 / j.matchemphys.2020.123222.