

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.028

车用树脂基复合材料部件替代性设计研究进展

马其华^{1,2}, 王顺¹, 甘学辉²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 高性能纤维及制品教育部重点实验室(B类) 东华大学, 上海 201620)

摘要: 车用部件的轻量化设计对汽车工业的可持续发展具有十分重要的意义,树脂基复合材料的替代性设计具有因素多、难度高和灵活性大的特点。综述了近年来车用树脂基复合材料的替代性设计研究工作,梳理研究者对于车用树脂基复合材料设计关键:复合材料和成型工艺的选取、初步结构的替代设计方法和复合材料部件的优化设计方法。通过以上设计内容和主要优化方法的特点与应用,以期对车用树脂基复合材料部件的替代性设计工作具有一定的推动作用。

关键词: 复合材料; 汽车部件; 替代性设计研究; 轻量化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0147-08

Research Progress on Alternative Design of Automotive Resin Matrix Composite Components

Ma Qihua^{1,2}, Wang Shun¹, Gan Xuehui²

(1. School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology (B), Shanghai 201620, China;

2. Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The lightweight design of automotive components is of great significance to the sustainable development of the automotive industry. The alternative design of resin matrix composites is characterized by multiple factors, high difficulty and great flexibility. An overview research work on the alternative design of automotive resin matrix composites in recent years is reviewed, and the key points for the design of automotive resin matrix composites are summarized: the selection of composite materials and moulding process, the alternative design method of preliminary structure and the optimal design method of composite components. Through the above design contents and the characteristics and application of the main optimization methods, it is expected to promote the alternative design of automotive resin matrix composites.

Keywords: composite material; automotive components; research on alternative design; lightweight

由于气体排放法规的加强和高燃油效率的要求,汽车工业的轻量化水平日益提高^[1-2]。目前,树脂基复合材料在汽车上的替代应用是实现汽车轻量化的一种有效的方式,减重效果明显。树脂基复合材料被广泛应用于各种汽车零部件中,替代传统的金属材料^[3-4]。复合材料的替代性设计与金属材料结构设计相比更加复杂。因为在设计之初,除了材料性质所决定的结构特殊性改变,还有针对工艺的结构并行设计,因此复合材料的替代不是简单的替代,而是更多的理念上的改变与重建^[5]。笔者整理近年来的树脂基复合材料部件替代性设计工作,对复合材料替代性设计的一般设计流程、替代设计和优化设计(包括结构和铺层两个方面)进行

介绍,以期对今后的复合材料替代性设计工作提供一定借鉴。

1 车用树脂基复合材料特点与设计流程

树脂基复合材料是由纤维等增强材料与树脂基体通过各种工艺手段组合而成的混合材料,具有质量轻、强度高、刚度好的特点。基于此,树脂基复合材料在航空、汽车等领域得到了广泛应用。复合材料作为各向异性的非均质材料,具有如下特点:

(1) 比强度与比模量高。比强度、比模量是指材料的强度和模量与密度之比,比强度越高,零件自重越小;比模量越高,零件的刚性越大。因此对高速运转的结构件或需减轻自

基金项目: 纤维材料改性国家重点实验室开放课题(KF1826),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2232018A3-02)

通信作者: 马其华,副教授,博士研究生,主要从事复合材料汽车轻量化的研究 E-mail: mqh0386@sues.edu.cn

收稿日期: 2020-09-03

引用格式: 马其华,王顺,甘学辉. 车用树脂基复合材料部件替代性设计研究进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11):147-154.

Ma Qihua, Wang Shun, Gan Xuehui. Research progress on alternative design of automotive resin matrix composite components[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):147-154.

重的运输工具具有重要意义。

(2) 纤维增强复合材料中的纤维与基体间的界面能够有效地阻止疲劳裂纹的扩展,外加载荷由增强纤维承担。大多数金属材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的 30%~50%,而复合材料则可达 60%~80%。

(3) 在热塑性树脂基复合材料中掺入少量的短切碳纤维可大大地提高它的耐磨性,因此可作为轴承等耐磨零件的良好材料。

(4) 耐高温烧蚀性好。树脂基复合材料的熔点(或软化点)一般都在 2000℃ 以上,用这些纤维与金属基体组成的复合材料,高温下强度和模量均有提高,故可做车用耐高温耐烧蚀材料。

(5) 工艺性与可设计性好。调整增强材料的形状、排布及含量,可满足构件强度和刚度等性能要求,且材料与构件可一次成型,减少了零部件、紧固件和接头数目,材料利用率大大提高。

金属和复合材料结构设计的根本区别在于复合材料设计过程包括材料设计,这涉及到纤维和基体材料结合的结构形式。因此其零部件的结构设计必须要与材料设计、结构成型同步进行,从而决定了复合材料构件“设计—材料—工艺”三者的密不可分,在研制过程中必须实施设计、分析、制造的一体化^[6]。其具体过程与可供运用的主要方法如图 1 所示。

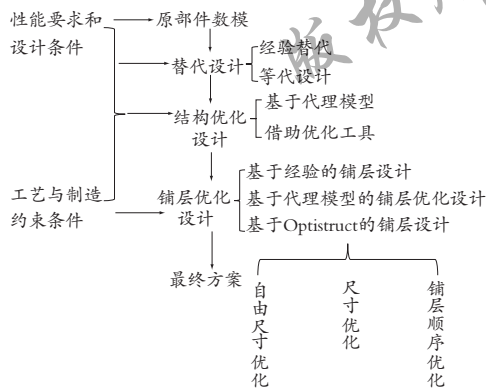


图 1 车用树脂基复合材料设计过程与主要方法

树脂基复合材料的替代性设计,其主要内容包括材料类型的选择、成型工艺的选择和结构与铺层的设计。目前,用于替代车用金属材料的树脂基复合材料主要有玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料以及玄武岩纤维复合材料、生物纤维复合材料等。各种材料随着纤维增强体以及树脂基体的不同表现出差异明显的力学及物化性能。纤维和树脂决定复合材料的最佳效能,纤维主要起到增强的作用,而基体则对纤维起到支撑、保护作用并传递载荷,且树脂基体性能直接关系到复合材料的基本性能;固化工艺决定了结构件的

成型工艺和制造成本。近年来研究者在进行树脂基复合材料设计上做了大量的研究工作,见表 1。

表 1 树脂基复合材料在汽车部件中的应用研究

增强纤维	常用基体	常用成型工艺	应用部件	综合评价
碳纤维	环氧树脂	树脂传递模塑工艺 (RTM) ^[7-9] 、真空树脂传递模塑工艺 (VARTM) ^[10]	保险杠 ^[7,8,13] 、保险杆 ^[9,10,14-17]	轻量化效果最好,成本较高
		真空导入成型工艺 (VARI) ^[11]	电池箱体 ^[11,12] 、顶盖 ^[19] 、悬架控制臂 ^[20-21]	
		真空注射工艺 (VIP) ^[12]		
		模压成型工艺 (CM) ^[9,22]	保险杠、发动机机底护板 ^[22]	轻量化效果一般,成本较低,可回收
玻璃纤维	环氧树脂	拉挤成型工艺 ^[23-24]	保险杠 ^[23-24] 、板簧 ^[25-28]	环氧/E-玻璃板簧减重均 50% 以上
碳纤维/玻璃纤维	环氧树脂	模压成型工艺 (CM) ^[30]	发动机引擎盖 ^[29] 、板簧 ^[30]	轻量化效果较好,成本一般,质量减轻 50%
玄武岩纤维	环氧树脂	片状模塑料 SMC 工艺 ^[31]	保险杠 ^[31]	与 GMT 材料比较,具有一定的应用潜力

2 车用树脂基复合材料部件的替代设计

复合材料的替代设计要将其结构设计与材料设计并行开展,在设计过程中要建立综合设计的思想^[5]。对于原采用金属材料的零部件在经论证具有复合材料替代前景后,在综合设计思想指导下,一般首先通过拉伸、弯曲等力学试验在获取树脂基复合材料的基本材料参数的基础上,按照复合材料设计要求和替代设计的方法确定一种初始方案,初步地设计出可以理想地替代原来金属件功用和空间位置的复合材料部件。

车用复合材料零件的设计需要注意以下几个一般原则:由于汽车上部件尺寸相对较小和复合材料的成型难度较金属材料更大,在复合材料的替代设计时需要适当地简化部件(尤其指汽车上的钣金件)的结构造型,如简化金属方案的加强槽、加强筋和不必要的开孔等;根据所选材料和工艺确定铺层过渡方式,这部分内容可以查阅相关的铺层过渡设计原则;层压结构的圆角半径与所选用材料的柔性、模具、层压件厚度等有关,圆角半径过小,容易产生制造缺陷等,开孔对工艺性的影响^[5]见图 2 所示。层压件的开口设计有时不可避免,开孔难免影响复合材料结构强度,增加工艺难度,这时就要考虑开孔尺寸和形状,应根据纤维的铺设方向尽可能少地切断纤维。基于原金属部件的替代设计,主要有经验替代法和等代设计法^[13]两种。

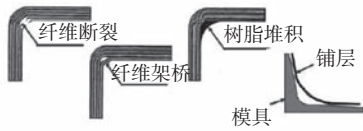


图2 增大半径以改善工艺性

2.1 经验替代法

经验替代法就是按照复合材料设计要求由设计者根据经验进行灵活设计基本结构的方法,该方法在B柱^[32-35]、保险杠系统^[17,24,36,37]、板簧^[26,27,38]和电池箱体^[11,12,39]等部件的替代设计中均有应用。Liu Zhao等^[17]对碳纤维复合材料汽车保险杠灵活设计,开发新的设计理念,先是使用铝合金材料设计一体化保险杠系统,并预先嵌入到保险杠梁,保证结构完整性,再采用碳纤维复合材料对拖钩组件的外表面进行包裹,进而获得一体式复合材料保险杠系统。张晓红等^[11]在电池箱体的替代设计中,将其外包络设计为接近方形的箱体结构,在箱体某些结构面进行加强,设计箱体与金属部件的连接方式,进而确定初始方案。复合材料板簧结构设计通常运用钢板弹簧的理论设计方法^[30],在确定簧片长度时有作图和计算两种方法^[28],算法更常用。采用经验替代法设计过程较为常规,应用广泛,但后续的优化空间较大。

2.2 等代设计法

等代设计法是工程复合材料中较常采用的一种设计方法,一般是指在载荷和使用环境基本不变的情况下,考虑复合材料的特点,采用相同形状(或适当改变形状和尺寸)的复合材料构件替代其他材料,并用原来材料的设计方法进行设计^[40]。等代设计方法通常按照等刚度原则进行产品设计,等刚度近似理论^[41]如下:

$$E_c I_c = E_s I_s \quad (1)$$

$$E_c \frac{b_c h_c^3}{12} = E_s \frac{b_s h_s^3}{12} \quad (2)$$

对于薄壁结构而言,横截面积的宽度 $b_c = b_s$,

$$\text{则 } h_c = \sqrt[3]{\frac{E_s h_s^3}{E_c}} \quad (3)$$

式中: E_c 为复合材料层合板的等效模量; I_c 为复合材料结构横截面的惯性矩; E_s 为原结构材料的弹性模量; I_s 为原结构横截面的惯性矩; h_c , h_s 为横截面高度,亦为厚度。

根据式(3)可以初步确定替换材料的厚度,为了保证替换材料之后结构的刚度,往往基于单个钣金件刚度为厚度的非线性函数关系对板件不同位置进行厚度调整,其近似关系表达为:

$$K = CEt^\lambda \quad (4)$$

式中: C 为几何系数; E 为弹性模量; t 为材料厚度; λ 为厚度指数系数。根据式(4),材料等刚度替换前后的厚度之比为:

$$\frac{t_1}{t_0} = \left(\frac{E_0}{E_1} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (5)$$

式中: t_0 , t_1 分别为材料替换前后的厚度; E_0 , E_1 分别为材料替换前后的弹性模量; 对于车身结构, λ 通常取值为1~2,几乎很少小于1或大于3。

例如,韩鹏^[42]、郭永奇^[41]、黄继峰^[29]等学者在设计碳纤维或碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料发动机罩时均采用了等刚度原则,轻量化效果明显;侯凡龙^[43]、陈伟^[44]、马芳武^[7]和孙冬鸣^[45]等采用等代设计方法完成碳纤维复合材料汽车B柱或B柱加强板的替代设计;张海洋等^[9]根据等刚度原则对防撞梁进行长玻纤热塑性复合材料和碳纤维复合材料的替代设计,验证这两种材料均优于铝合金材料,且碳纤维复合材料的轻量化与综合性能优势明显。刘越等^[21]、张子鹏^[46]在设计碳纤维复合材料悬架控制臂和碳纤维复合材料前纵梁前段时同样也采用了等代设计法,也都获得了较好的减重效果。按照等代设计方法(常基于等刚度原则)进行薄壁金属部件的替代设计,更加科学准确地确定复合材料部件的初始厚度,根据初始厚度就基本可以确定铺层数目,因此这种替代设计方法对复合材料的替代性设计具有一定指导意义。

3 车用树脂基复合材料部件的优化设计

仅靠替代设计,对于复合材料部件设计的冗余度较大,需要通过结构和材料再优化获得最佳的部件力学性能,从而更好地改善结构的综合性能和发挥材料的优势。

3.1 结构优化设计

结构优化设计是汽车轻量化的主要手段,也是一种最为直观、可行的手段^[47],其目的是设计出力学性能更好、制造成本合适的结构^[48]。结构优化主要是将数学规划理论和力学分析方法结合起来,以计算机为工具进行辅助设计和分析,对结构设计自动地改进和优化,进而获得可行的优化方案^[49]。树脂基复合材料结构优化设计主要分为基于代理模型的结构优化设计和借助优化工具的结构优化设计。

(1) 基于代理模型的结构优化设计。

优化设计过程中主要的计算内容包括有限元分析和寻优两个部分。由于计算模型复杂,每进行一次有限元分析计算都是非常耗时的。且不论计算量本就已很大的遗传算法、粒子群算法,单以经典的梯度算法为例,由于梯度算法在每一个迭代步中都需要构造寻优方向,而在复杂问题下,目标函数与设计变量之间的关系很难写成具体的解析形式,导致寻优方向只能通过差分法进行求解,而后者需要进行多次有限元分析。因此采用梯度算法作为复杂问题的优化算法将带来巨大的计算量。此外,梯度算法属于局部优化算法,无法保证寻优得到的最优解为全局最优解。

为了减小计算量以及保证计算精度,研究者们多采用构建代理模型的方法,即构造一个计算量小,但计算结果与有限元分析相近的数学模型,实现目标函数与设计变量的显式相关。代理模型的构造主要分为如下几步:

①根据试验设计,在设计空间中确定构造模型所用的样本点的位置,其是一个 m 维的空间点。

②利用有限元分析确定样本点处的响应值,组成一系列样本对。

③以一部分样本对为基础,构造一个合适的代理模型,使得相符合,并用剩余的样本对对模型进行检验。如果模型拟合精度满足要求,则代理模型构建完成;否则,构造新的代理模型,直到其满足要求为止。

最重用的代理模型有多项式响应曲面法,克里金法,梯度增强克里金法(GEK),支持向量机,空间映射和人工神经网络^[50]。在树脂基复合材料的结构优化设计中代理模型被研究者逐渐应用,采用如在保险杠^[17,51,52]和电池箱体^[12]上。表2以保险杠为例梳理了响应面法在复合材料结构设计中的应用。

表2 以复合材料保险杠为设计对象的优化设计

作者	优化模型	优化算法	优化过程
Liu Zhao ^[17]	Kriging 代理模型	改进的拉丁超立方优化算法	以结构参数为变量,以静强度、低速碰撞和模式工况为约束
Guohua Zhu ^[51]	响应面模型	遗传算法	以横梁碰撞中心区的铺层数,结构参数为变量,建立最小峰值载荷和最小质量为优化目标
白云静 ^[52]	径向基代理模型	非支配排序遗传算法(NSGA-II)	选取防撞梁、吸能盒和纵梁的厚度为优化设计变量,以吸能最大和质量最小为优化目标
吴飞 ^[16]	Kriging 代理模型	遗传算法	以板厚作为变量,以保险杠撞击安全性能参数为约束和以质量为优化目标,进多次优化圆整
仲伟东 ^[53]	响应面模型	多目标遗传算法	以传统防撞梁性能指标为约束,以复合材料的铺设层数和其余部件的厚度作为设计变量,以质量作为优化目标

(2) 基于优化工具的结构优化设计。

Matlab 的优化工具箱含有丰富的函数库,且 Matlab 中函数表达简洁,可调用多种优化算法,参数设置自由,所以可供我们方便和高效地解决(非)线性规划、二次规划、多目标决策和最大最小问题等各种优化问题^[54]。优化问题数学模型可表示为如下形式:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, m \\ & h_i(x) \leq 0, i=m+1, m+2, \dots, p \end{aligned}$$

设计变量为 x ; 目标函数为 $f(x)$; 约束条件为 $g_i(x) \leq 0$,

$i=1, 2, \dots, m$ 及 $h_i(x) \leq 0, i=m+1, m+2, \dots, p$ 。

Matlab 中的优化算法具有很强的全局寻优能力,可以高效地解决复合材料板簧的结构优化设计问题^[27]。学者李未^[25]、赵燕等^[26]、柯俊等^[27]、苑琳^[28]和 Chen Qian 等^[55]对汽车复合材料板簧的设计大多采用了这种方法。其过程包括,根据层合板力学的相关理论对复合材料板簧进行优化设计,一般选择板簧尺寸设计为优化变量,以刚度、强度和重量为约束或优化目标,建立优化数学模型,借助 Matlab 软件优化工具箱寻找最优方案。另外,国外研究者 Do-Hyoung Kim 等^[56]运用微遗传算法对玻璃/碳复合缓冲梁的结构优化。

3.2 铺层优化设计

树脂基复合材料属于各向异性材料,其结构是每一单层板按照一定的次序角度铺叠而成的。因此铺层设计对部件的整体性能影响巨大^[39]。通过对基本模型的铺层优化设计获得满足工况与质量要求的设计方案,最后通过实验验证其设计的可靠性,是复合材料零部件设计的关键。树脂基复合材料铺层的优化设计主要可分为:基于经验的铺层设计、基于代理模型的铺层优化设计和基于 Optistruct 软件的铺层优化设计。

(1) 基于经验的铺层设计。

这类方法是先根据铺层设计要求^[58]和设计经验确定多种铺层方案,结合仿真分析结果对比,直接选出最优铺层方案或借助正交设计实验(DoE)^[58-59]方法确定最优铺层方案,无需建立复杂的数学模型和优化计算方法。基于经验的铺层设计方法,优点是直接,设计思路简单,缺点是铺层设计方案样本点少,优化选择不够全面,但也可作为铺层方案设计提供一种方法。

张晓红等^[11]基于铺层设计制定的碳纤维复合材料电池箱体的铺层方案,经仿真验证,性能满足要求,且比片状模型料(SMC)方案减重达 22%。吴琼^[60]设计碳纤维复合材料保险杠横梁时,根据经验直接设计该模型的多种铺层方案,结合仿真分析结果选择最终铺层设计方案,证明了复合材料保险杠横梁碰撞性能更优异。田凯^[61]设计了多种铺层方案的碳纤维复合材料防撞梁结合仿真分析,并基于防撞梁形状和铺层顺序两种变量,通过正交实验设计对其进行优化,确定最终设计方案。刘越等^[21]按照铺层设计原则对碳纤维增强复合材料(CFRP)悬架控制臂进行了铺层设计,结合正交实验设计方法,将 CFRP 控制臂铺层中 A, B, C, D 共四个分区,选取三种经典铺层作为实验的三个水平,采用正交表(L_93^4)仿真分析,通过对以上方案的仿真分析,以控制臂结构性能作为评价指标,进而确定最终铺层方案。

(2) 基于代理模型的铺层优化设计。

各类复合材料车用零件因其工况各异,可采用各种代

理模型将复杂的层合结构铺层优化问题转化为容易计算的数学问题,运用优化算法求得最优解。基于代理模型的铺层优化设计方法可以降低设计成本和优化过程的计算负担,最优结果的准确性很大程度上取决于输入的数据集和建模结构,这种优化方法在工程上已有大量应用,可以保证设计的有效性;相对于基于经验的铺层设计方法,前者提供的铺层方案更全面、优化效果更好、设计精度更高。该建模方法有助于改善优化过程的计算负担。近年来基于代理模型的铺层优化设计见表3。

表3 基于代理模型的铺层设计研究工作一览

设计对象	作者	约束	优化目标	响应模型	优化算法
保险杠	DaWei Gao ^[62]	峰值载荷; 侵入量; 吸能量	转向柱碰撞后位移量	Kriging 模型	自适应遗传算法
翼子板	程章 ^[63]	初始刚度; 翼尖刚度; 最大的变形量和应力	安装点刚度	Kriging 模型	遗传算法
悬架控制臂	杨绍勇 ^[20]	制动和转向工况点的位移; 一阶固有振动频率	控制臂刚度和低阶振动频率		非支配排序遗传算法
B 柱	Qiming Liu ^[64]	顶板强度; b 柱侵入速度和侵入量	质量	响应面模型	遗传算法
	Lee ^[65]		弯曲变形最小		遗传算法
	李勇俊 ^[66]	侧撞中 B 柱总体侵入量	质量	径向基人工神经网络	多岛遗传算法
车门	Wu, Chi ^[67]	扭转刚度; 垂直度刚度; 一阶固有频率	加权总柔度最小		序列二次规划

(3) 基于 Optistruct 的铺层设计。

优化技术应用于产品设计,除了要考虑结构的强度、刚度、稳定性和质量等这些因素外,还必须考虑生产工艺方面的要求。基于 Optistruct 复合材料优化技术考虑到了优化结果的可加工性,在自由尺寸优化的概念设计阶段就施加了非强制的制造约束,在层叠次序优化的详细设计阶段施加更详细的制造约束。其设计过程是采用自由尺寸优化,尺寸优化和铺层顺序优化三个步骤。通过自由尺寸优化来获取每种铺层角度的最佳铺层厚度;通过自由尺寸优化,能较好地确定每种铺层角度所需的铺层厚度;铺层顺序优化,实际的目的是为了获得结构的最大刚度系数矩阵,从而使结构的刚度达到最大。最终获取的优化方案通过试验进行进一步论证。三个步骤分别以厚度、单层厚度和各层顺序为变量,工艺限制和载荷要求为约束,质量最小或刚度最大为目标函数进行优化。图3为 Optistruct 的优化流程。该方法目前广泛应用于车用复合材料部件的优化设计,肖志等^[68]的连续碳纤维优化复合材料汽车顶盖设计,马芳武等^[7]、张君媛等^[35]的碳纤维复合材料汽车 B 柱加强板的优化,余海燕等^[69]的大学生

方程式赛车复合材料单体壳车身优化,鲁亚妮等^[70]的复合材料赛车电池箱的优化设计,戚振杰等^[71]的某 SUV 纯电动汽车的碳纤维复合材料后背门设计和蒋荣超等^[72]的碳纤维复合材料横梁的优化设计。

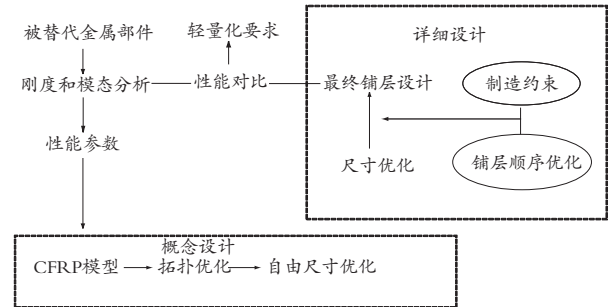


图3 Optistruct 的优化流程图

4 结语

车用树脂基复合材料的替代性设计研究工作取得了很好的进展,碳纤维树脂基复合材料凭借其高弹性模量和综合优异性能具有明显的选择优势,在汽车结构上应用最广泛,另外,考虑到制造成本,混合纤维复合材料也得到一定的关注;车用树脂基复合材料的替代性设计工作是材料、结构和制造工艺的综合设计,这对研究人员提出了更全面的要求;在替代设计阶段以经验设计方法为主,对于钣金件的替代设计则更多的应用等代设计方法;在优化设计阶段,研究者们主要基于层合板理论、有限元法、代理模型和优化算法以及一些成熟的商业软件等方式实现复合材料的优化设计,研究人员可根据具体结构选用适合的设计与优化方法。

参考文献

- [1] Wells P, et al. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 47, 28–41.
- [2] Ke Jun, et al. Composite Structures, 2019, 226. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111277.
- [3] Fuchs E R H, et al. Composites Science and Technology, 2008, 68(9): 1989–2002.
- [4] Lee J M, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(4), 479–485.
- [5] 赵美英,等. 复合材料结构力学与结构设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [6] 张丽华,等. 宇航材料工艺, 2010, 40(1): 14–18.
- [7] 马芳武,等. 湖南大学学报: 自然科学版, 2019, 46(8): 36–44.
- [8] 熊长丽. 碳纤维复合材料汽车 B 柱加强板的轻量化设计研究 [D].

- 长春:吉林大学,2018.
- Xiong Changli. Study on lightweight design of automotive B-pillar reinforced plate with carbon fiber reinforced plastic material[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [9] 张海洋,等. 玻璃钢/复合材料,2017(10):34-40.
Zhang Haiyang, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(10):34-40.
- [10] 李贝. 纤维增强型复合材料保险杠轻量化设计与优化[D]. 长沙:湖南大学,2016.
Li Bei. Lightweight design and optimization on bumper beam of fiber enhanced composite[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [11] 张晓红,等. 上海汽车,2014(9):60-62.
Zhang Xiaohong, et al. Shanghai Auto, 2014(9):60-62.
- [12] Liu Zhao, et al. Composite Structures, 2018, 204(11):239-255.
- [13] 陈伟,等. 汽车实用技术,2018(15):221-223.
Chen Wei, et al. Automobile Technology, 2018(15):221-223.
- [14] 臧杰,等. 机械设计,2019,36(4):87-91.
Zang Jie, et al. Journal of Machine Design, 2019, 36(4):87-91.
- [15] 童小伟. 碳纤维复合材料保险杠优化设计及其性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
Tong Xiaowei. Optimum design and performance study of carbon fiber reinforced plastic bumper[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [16] 吴飞. 塑料工业,2018,46(8):14-7.
Wu Fei. China Plastics Industry, 2018, 46(8):14-7.
- [17] Liu Zhao, et al. Composite Structures, 2016, 140:630-643.
- [18] 李明秋. 电池包箱体的有限元分析和结构优化设计[D]. 长春:吉林大学,2017.
Li Mingqiu. Finite element analysis and structural optimization design of battery pack enclosure[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [19] 廖勇. 机电产品开发与创新,2016,29(1):26-28.
Liao Yong. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2016, 29(1):26-28.
- [20] 杨绍勇,等. 工程设计学报,2016,23(6):600-605, 619.
Yang Shaoyong, et al. Journal of Engineering Design, 2016, 23(6):600-605, 619.
- [21] 刘越,等. 玻璃钢/复合材料,2019(8):47-52.
Liu Yue, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2019(8):47-52.
- [22] 谢新艳. 复合材料汽车底护板的优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
Xie Xinyan. Research on optimum design of automotive protected-board with composite material[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [23] Belingardi G, et al. Composite Structures, 2015, 120:483-495.
- [24] Belingardi G, et al. Composite Structures, 2013, 102(Complete): 217-225.
- [25] 李未. 复合材料板簧的优化设计及有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
Li Wei. Optimize design and finite element analysis of the compound material leaf spring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [26] 赵燕,等. 汽车工程师,2014(11):28-32.
Zhao Yan, et al. Auto Engineer, 2014(11):28-32.
- [27] 柯俊,等. 西安交通大学学报,2015, 49(8):102-108.
Ke Jun, et al. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8):102-108.
- [28] 苑琳. 复合材料板簧结构优化设计及力学性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
Yuan Lin. Optimum design and mechanical properties analysis of composite leaf spring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, China, 2018.
- [29] 黄继峰. 混杂纤维复合材料汽车引擎盖结构优化设计[D]. 常州:江苏理工学院,2018.
Huang Jifeng. Structural optimization design of hybrid fiber composite vehicle engine hood[D]. Changzhou: Jiangsu University of Technology, 2018.
- [30] 宋倩倩. 玄武岩纤维复合材料板簧结构设计与静动特性分析研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
Song Qianqian. Study on structure signed dynamic characteristics basalt fiber composite[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [31] Shokrieh M M, et al. Composite Structures, 2003, 60(3):317-325.
- [32] 王爱华. 碳纤维复合材料 B 柱设计与仿真[D]. 大连:大连理工大学,2017.
Wang Aihua. Design and simulation of CFRP B-pillar[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [33] 薛姣. 碳纤维复合材料汽车 B 柱简化结构参数分析[D]. 太原:中北大学,2013.
Xue Jiao. Simplified structural parameters analysis of carbon fiber composite automobile B-pillar[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [34] 李勇俊,等. 汽车工程,2017, 39(8):968-976.
Li Yongjun, et al. Automotive Engineering, 2017, 39(8):968-976.
- [35] 张君媛,等. 汽车工程,2018, 40(10):1 166-1 171, 1 178.
Zhang Junyuan, et al. Automotive Engineering, 2018, 40(10):1 166-1 171, 1 178.
- [36] 张振明. 变厚度复合材料汽车防撞梁优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
Zhang Zhenming. Research on optimal design of composite anti-collision beam with variable thickness[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [37] 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.
- [38] 李宇菲. 复合材料汽车板簧的优化设计及其有限元分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
Li Yufei. Optimization design and finite element analysis of the

- composite leaf spring for automobile[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [39] 陈静,等. 汽车工程, 2020, 42(2):257-263+277.
Chen Jing, et al. Automotive Engineering, 2020, 42(2):257-263+277.
- [40] 王耀先. 复合材料力学与结构设计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
Wang Yaoxian. Mechanics and structural design of composite materials[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology press, 2012.
- [41] 郭永奇,等. 汽车实用技术, 2017(19):100-103.
Guo Yongqi, et al. Automobile Applied Technology, 2017(19):100-103.
- [42] 韩鹏. 碳纤维复合材料发动机罩优化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Han Peng. Research on optimization design of carbon fiber composite hood[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [43] 侯凡龙. 科技创新与应用, 2016(11):43.
Hou Fanlong. Technology Innovation and Application, 2016(11):43.
- [44] 陈伟,等. 汽车实用技术, 2018(15):221-223.
Chen Wei, et al. Automobile Applied Technology, 2018(15):221-223.
- [45] 孙冬鸣,等. 玻璃钢/复合材料, 2018(11):58-63.
Sun Dongming, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2018(11):58-63.
- [46] 张子鹏. 汽车前纵梁复合材料结构设计与吸能特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Zhang Zipeng. Research on the front longitudinal beam composite design and absorption characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [47] 赵晓东,等. 现代制造工程, 2017(10):157-162.
Zhao Xiaodong, et al. Modern Manufacturing Engineering, 2017(10):157-162.
- [48] Keshtegar B, et al. Defence Technology, 2020. doi: 10.1016 / j.dt.2020.02.020.
- [49] 许素强,等. 航空学报, 1995(4):2-13.
Xu Suqiang, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995(4):2-13.
- [50] Animescu C, et al. Computer Mater Contin, 2019, 59(1):345-359.
- [51] Zhu Guohua, et al. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22:365-376.
- [52] 白云静. 碳纤维车身结构精细化仿真设计与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Bai Yunjing. The refined simulation and optimization of carbon fiber body structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [53] 仲伟东,等. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2019, 41(4):463-471.
Zhong Weidong, et al. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2019, 41(4):463-471.
- [54] 黄海燕,等. 计算机与现代化, 2002(6):55-57.
Huang Haiyan, et al. Computer and Modernization, 2002(6):55-57.
- [55] Chen Qian, et al. Composite Structures, 2017, 168.
- [56] Kim D H, et al. Composite Structures, 2017, 176:780-789.
- [57] Gibson R F. Principles of Composite Material Mechanics[M]. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2011.
- [58] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Fang Kaitai. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [59] 杨卓懿,等. 玻璃钢/复合材料, 2017(4):24-28.
Yang Zuoyi, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(4):24-28.
- [60] 吴琼. 碳纤维轿车保险杠横梁的设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
Wu Qiong. Design of carbon fiber car bumper beam[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [61] 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 for carbon fiber composite material anti-collision beam of electric Car[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [62] Gao Dawei, et al. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 12. doi: 10.1155 / 2019 / 8948315.
- [63] 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.
- [64] Liu Qiming, et al. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57:965-975.
- [65] Lee J M, et al. Materials, 2019, 12(14):2309.
- [66] 李勇俊,等. 汽车工程, 2017, 39(8):968-976.
Li Yongjun, et al. Automotive Engineering, 2017, 39(8):968-976.
- [67] Wu Chi, et al. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(4). doi:10.1115 / 1.4042222.
- [68] 肖志,等. 汽车工程, 2017, 39(6):722-728.
Xiao Zhi, et al. Automotive Engineering, 2017, 39(6):722-728.
- [69] 余海燕,等. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(11):1729-1734, 1748.
Yu Haiyan, et al. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(11):1729-1734, 1748.
- [70] 鲁亚妮,等. 塑料工业, 2019, 47(8):57-64.
Lu Yani, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(8):57-64.
- [71] 戚振杰,等. 武汉科技大学学报, 2019, 42(3):199-206.
Qi Zhenjie, et al. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 42(3):199-206.
- [72] 蒋荣超,等. 汽车工程, 2020, 42(2):264-269.
Jiang Rongchao, et al. Automotive Engineering, 2020, 42(2):264-269.