

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.011

基于 Fibersim 的碳纤维复合材料油底壳设计

秦晓宇^{1,2,3}, 马其华^{1,2,3}, 周琪¹, 甘学辉^{2,3}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 东华大学民用航空复合材料东华大学协同创新中心, 上海 201620;

3. 上海市高性能纤维复合材料协同创新中心(省部共建), 上海 201620)

摘要: 在汽车轻量化背景下, 对金属油底壳进行碳纤维复合材料轻量化设计。首先从轻量化程度、设计性和安全性三个方面出发确定油底壳构件碳纤维复合材料化的可行性; 其次, 通过 Catia 软件对原金属油底壳进行结构简化处理, 根据复合材料结构设计的规范, 去除相关后期机加工结构。通过等刚度替换原理初步确定碳纤维复合材料油底壳的总体厚度为 3 mm。依据结构优化、工艺设计和铺层结构等方面的设计规范, 利用 Fibersim 软件进行油底壳结构的铺层设计, 探讨盒类复杂件的铺层裁剪方案。分别对碳纤维复合材料油底壳结构的 0°, 90°, -45° 和 45° 的铺层进行铺覆可行性分析, 对不满足铺覆可行性的铺层分别使用剪口和分块方案并评估, 最终依据不合格率和完整度两项指标确定剪口方案为最佳方案。

关键词: 油底壳; 轻量化; 碳纤维复合材料; 等刚度替换; 铺覆可行性分析

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)02-0061-08

Design of Oil Pan in Carbon Fiber Composite Material Based on Fibersim

Qin Xiaoyu^{1,2,3}, Ma Qihua^{1,2,3}, Zhou Qi¹, Gan Xuehui^{2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. Shanghai Collaborative Innovation Center of High Performance Fibers and Composites (Province-Ministry Joint), Shanghai 201620, China)

Abstract : Under the background of automobile lightweight, the design of oil pan in carbon fiber composite material has been carried out which can also provides some guidance for the design of other parts in composite material. Firstly the feasibility of carbon fiber composites for oil pan components was determined from three aspects: lightweight, design and safety. Then the structure of the original metal oil pan was simplified by Catia software, and the related post machining structure was removed according to the specification of composite structure design. Based on the principle of equal stiffness replacement, the overall thickness of the carbon fiber composite oil pan was determined to be 3 mm. Based on the design specifications of structural optimization, process design and layout structure, Fibersim software was used to design the layout of the oil pan structure and to explore the layout cutting scheme of the complex parts of the box. The feasibility analysis was conducted for the 0°, 90°, -45° and 45° plies of the carbon fiber composite oil pan structure, then the cutting and blocking schemes were used respectively for the layering that does not meet the feasibility of the laying, and the cutting scheme was finally determined as the best scheme according to the two indexes of unqualified rate and integrity rate.

Keywords : oil pan ; lightweight ; carbon fiber composite ; equal stiffness substitution ; feasibility analysis of draping

碳纤维增强复合材料最早出现于 1879 年, 发展至今已成为高性能和轻量化的代名词。近年来, 随着国家能源战略的推进以及绿色发展理念深入人心, 轻量化被视为最直接有效的节能减排措施。排

放污染较为严重的汽车行业, 轻量化是整个行业亟待解决的关键问题, 而碳纤维复合材料的特性恰好契合轻量化对于构件材料性能的苛刻要求, 因此其在汽车零部件上的应用得到了广泛研究。洪宝剑^[1]

基金项目: 上海市高性能纤维复合材料协同创新中心开放课题 (X12812101/020)

通信作者: 马其华, 副教授, 主要从事复合材料汽车轻量化研究

收稿日期: 2021-12-05

引用格式: 秦晓宇, 马其华, 周琪, 等. 基于 Fibersim 的碳纤维复合材料油底壳设计 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2):61-68.

Qin Xiaoyu, Ma Qihua, Zhou Qi, et al. Design of oil pan in carbon fiber composite material based on Fibersim[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):61-68.

研究了传动轴的复合材料替换,利用有限元软件对碳纤维复合材料传动轴进行强度校核并运用 Tsai-Wu 失效准则分析了不同的铺层次序、角度和厚度对传动轴扭转刚度和强度的影响,通过缠绕成型法制造了样件,最后通过试验验证了有限元设计方法的准确性。李永刚^[2]按照欧盟汽车标准体系 (ECE) 对保险杠的要求,通过有限元仿真软件验证了碳纤维复合材料保险杠的可靠性,得到吸能效果最好的铺层设计。王庆等^[3]以某款电动车保险杠为原型,设计了碳纤维复合材料保险杠,并利用 Opti Stuct 软件对其进行质量优化,优化结果满足碰撞法规要求并减重达 36%。吴方贺^[4]研究开发了碳纤维复合材料发动机罩,结合碳纤维复合材料铺层设计原则和有限元仿真分析,制造出了通过行人保护性能测试的碳纤维复合材料发动机盖,验证了碳纤维复合材料作为轻量化材料替换车身金属覆盖件的可行性。生产制造工艺对复合材料的力学性能影响至关重要,而上述研究未充分考虑所设计零部件的剪切、铺覆技术等制造工艺,这会导致设计的产品不一定能投入生产且其力学性能会与设计的性能出现偏差。因此,在进行碳纤维复合材料零部件设计时,要充分考虑实际的制造工艺水平,设计出满足生产和使用要求的零部件。Fibersim 软件拥有独特的复合材料铺覆仿真技术,可帮助工程师在产品初期就发现纤维铺覆情况,进而调整产品结构和铺覆方案,保证产品的制造可行性,实现复合材料产品设计、制造及工艺一体化。笔者通过对钢制油底壳进行等刚度替换来初步确定碳纤维制油底壳的厚度,再基于 Fibersim 软件对构件进行铺覆性分析验证;分别利用分块和剪口处理两种方案对不满足铺覆性要求的铺层进行处理,并分析对比两种方案的优缺点,最后得到具备可制造性的碳纤维复合材料油底壳铺覆方案。

1 碳纤维复合材料油底壳可行性分析

当前使用的燃油发动机汽车存在诸多问题,据统计在 80% 的路况下,一辆乘用车只利用了燃油燃烧产生的 40% 能量,在市区工况更是跌至 25%,造成了极大能源浪费,但更严重的是因为排放尾气造成环境污染,是导致温室效应的重要原因之一^[5-7]。为改善环境,电动汽车应运而生,然而受限于按当前电池技术的阻碍,电动汽车的推广和应用进度较慢。迫使工程师设计出了混合动力汽车,即节约了能源又减少了环境污染。

混合动力车的动力能源中电动机系统所占空间比重大,对发动机的空间要求小,且随着人们对于汽车舒适度的追求,发动机舱的设计越来越小,给与乘坐空间极大的舒适度。因此发动机动力总成朝着轻量化和小型化发展。笔者以某款混合动力汽车发动机油底壳作为研究对象,对其碳纤维复合材料化的可行性进行研究分析。

1.1 轻质高强

油底壳常用的材料包括钢、铝合金和尼龙塑料,它们与碳纤维复合材料的性能参数对比见表 1。由此可见,碳纤维复合材料的比强度和比模量是其它材料的 1~5 倍,并且密度小,同等体积下质量更轻^[8]。

表 1 碳纤维复合材料与油底壳常用材料对比

材料	密度 / (g · cm ⁻³)	拉伸强 度 /GPa	比强度 / 10 ⁷ mm	拉伸弹 性模 量 /GPa	比模量 / 10 ⁹ mm	线膨胀系数 / (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)
钢	7.8	1.4	1.8	210	2.7	96.48
铝合金	2.8	0.5	1.7	77	2.8	132.12
尼龙 6	1.2	0.07	0.06	2.7	0.02	187.2
玻璃钢	2.0	1.5	7.5	40	2.5	--
环氧 / 碳纤维	1.6	1.8	11.3	128	8.0	58.25

1.2 可设计性强

目前通过结构优化的方法对发动机油底壳进行轻量化设计难以取得重大突破,而碳纤维复合材料其可设计性强,通过混合法则,选取不同的纤维材料或树脂材料,并控制纤维含量和进行铺层结构设计,可以制造出满足工况要求的高性能油底壳,实现油底壳产品的轻量化。

1.3 高安全性

油底壳除储油功能,还需满足轻量化、集成化和小型化发展需求。在此过程中需保证油底壳的安全性。在强度方面,除了要求承受储油重力和发动机运作产生的激励振动外,还有在行驶过程路面颠簸导致储油振动对油底壳施加额外的冲击载荷,并且还需验证油底壳承受发动机重量的可行性。由表 1 可知,碳纤维复合材料的强度优于金属材料,满足强度要求。在耐久方面,油底壳在工作状态下温度处于 -40~150℃ 之间,需保持尺寸精度,抵抗变形;并且在长期的使用中须具有耐油性,抵抗外部水分盐分的腐蚀。碳纤维复合材料的耐热性与耐腐蚀性主要取决于其基体材料的选择,环氧树脂作为广泛应用的树脂基体,其加工型、耐热性和成型性都十分优异,可以保证成型部件的耐热性能,而通过程度高

的固化工艺和表面处理,可以保证碳纤维与基体件的界面粘结力,阻挡腐蚀介质渗透、扩散,保障产品的耐腐蚀性^[9]。

2 复合材料层压板结构设计原则

在设计碳纤维复合材料零件时,需要根据零件所处工况设计满足强度要求的铺层结构,同时还需要对其可制造性进行验证,保证设计零件可生产制造。因此碳纤维复合材料零件的设计是材料、结构和工艺一体化的并行设计,在结构设计过程中要考虑工艺的可实现性。

2.1 铺层设计一般原则

(1) 铺层角度的设计要考虑零件在工况载荷下的强度和刚度要求,为制造出满足要求的碳纤维复合材料层合板,可以设计任意方向铺层,但过多的角度的铺层会导致设计的繁琐、分析的复杂以及工艺设计的困难,因此在实际设计中通常只采用四个角度的铺层,即 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ 铺层。

(2) 在一个零件的铺层结构设计中应尽可能同时包含 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ 四种铺层,考虑到设计分析以及工艺制造的简化, $\pm 45^\circ$ 铺层应成对出现。其中,如果 $\pm 45^\circ$ 铺层设计的尽量接近,则可以减少层压板的弯扭耦合,避免对层压板有效刚度和稳定性的影响;如果 $\pm 45^\circ$ 铺层设计时较为分散,则可以有效降低层间剪切应力,因此 $\pm 45^\circ$ 铺层设计时要按照实际工况需求决定其距离^[10]。

(3) 各角度铺层的体积分数应为 10%~60% 之间,即单方向铺层数占总铺层数的比值^[11]。

①在设计单轴零件时, 0° 铺层应占 50%~60%; $\pm 45^\circ$ 铺层应占 30%~40%; 90° 铺层大约占 10%, 0° 主要承受拉、压载荷。

②在设计承受剪切载荷零件时, 0° 铺层应占 10%~30%; $\pm 45^\circ$ 铺层应占 60%~80%; 90° 铺层大约占 10%, $\pm 45^\circ$ 主要承受剪力。

③在设计承受多向载荷的零件时, 0° 铺层应占 25% 左右; $\pm 45^\circ$ 铺层应占 50%; 90° 铺层应占大约 25%。

(4) 层合板泊松比差异较大会导致横向收缩不同,进而出现层间应力,通常使用 90° 铺层来调整泊松比。

(5) 相同角度的铺层连续铺覆不能大于 4 层,连续的相同角度铺层过多会导致分层、基体开裂等现象,以及和螺栓连接时的剪切破坏等。

2.2 铺层拼接设计原则

当设计零件较大且形状复杂时,会导致碳纤维复合材料单向带的幅宽不足和铺覆效果不理想,难免会对复合材料碳纤维单向带进行裁剪,来解决幅宽问题和满足铺覆可行性。裁剪后的碳纤维复合材料单向带之间需要进行连接设计,通常有对接和搭接两种方式。

(1) 对接。

如图 1 所示,对接方案中,同一铺层面内,铺层的对接间隙不大于 0.25 mm,连续的两层铺层平面内,其铺层对接位置应相隔不小于 (25 ± 4) mm,即保证对接位置错开,如果要在相同位置处出现对接间隙,则应该至少隔 4 层才能出现。

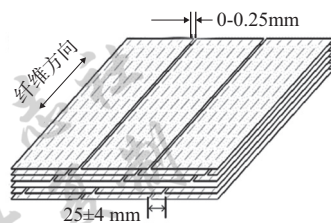


图 1 对接方案示意图

(2) 搭接。

如图 2 所示的搭接方案,同一铺层平面内,分块铺层连接时,采用一块铺层搭在另一块铺层上,搭接量为 12~25 mm,连续的两层铺层平面内,相邻铺层搭接位置之间至少有 2000 mm 的错开量。在以下情况应避免使用搭接:①作为装配面的零件表面,应避免使用搭接,会导致装配时发生密封不可靠的;②对表面美观有要求的 A 级曲面,应避免使用搭接,搭接产生的厚度不均匀会影响美观。

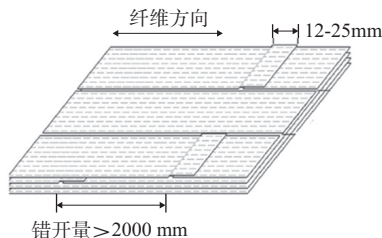
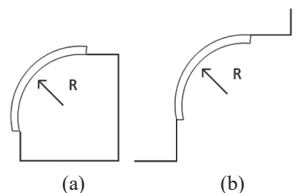


图 2 搭接方案示意图

2.3 圆角半径设计原则

层压板构件通常不是一个直板,而是拥有各式各样形状的零件,在构件出现曲率变化或特征凸起时,会产生圆角,其圆角半径的大小与材料的材质、采用的模具类型以及层压零件厚度等有关。最小圆角半径的确定决定着层压板零件拐角处的质量,如

果圆角半径过小,会在拐角区域发生纤维拉断、架桥和树脂堆积等制造缺陷,因此,拐角处圆角半径在不妨碍功能的前提下应尽可能的大,避免形成尖锐的棱角。根据工程师经验总结,用预浸料成型的碳纤维层压板件圆角半径设计规则见图3与表2。



a—阳模(凸模); b—阴模(凹模)

图3 不同模具下圆角

表2 碳纤维层压板圆角半径设计规则表

t 层压件厚度	阳模成型	阴模成型
$t < 2.5 \text{ mm}$	$R \geq \text{Max}(2t, 2.0 \text{ mm})$	$R \geq 2t + 1.5 \text{ mm}$
$t \geq 2.5 \text{ mm}$	$R \geq \text{Max}(t, 5.0 \text{ mm})$	

3 碳纤维复合材料油底壳的等代设计

碳纤维复合材料油底壳的等代设计是通过原钢制冲压油底壳的结构进行材料替换设计,由于碳纤维复合材料性能与工艺差异,需对原钢制油底壳的结构进行更改,再进行铺覆仿真分析,确定碳纤维复合材料油底壳的结构形状。

3.1 等刚度替换原理

采用轻量化潜能高的轻质高强材料替换原材料是目前最有效的轻量化方法,在进行材料替换时,通常采用的是等刚度替换原理来初步确定替换后结构件厚度^[12]。

基于等刚度近似理论的替代公式如下所示:

$$E_M I_M = E_c I_c \quad (1)$$

$$E_M \frac{b_M h_M^3}{12} = E_c \frac{b_c h_c^3}{12} \quad (2)$$

其中, E_c 、 E_M 分别为碳纤维复合材料层压板的等效模量和金属材料的弹性模量, I_c 、 I_M 分别为碳纤维复合材料层压板结构截面惯性矩和金属结构的界面惯性矩。在薄壁结构中,横截面积的宽度有如下关系:

$$b_M = b_c \quad (3)$$

因此,横截面积高度(即厚度)关系式如下:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{E_M h_M^3}{E_c}} \quad (4)$$

通过查阅相关文献可得^[13],钣金件刚度 K 与厚度的关系式如下:

$$K = CEt^3 \quad (5)$$

其中 C 为几何系数, E 为材料弹性模量, t 为结

构的厚度值, α 为厚度指数系数。

通过对以上公式进行替换转化后可得碳纤维复合材料替换金属材料前后厚度比值:

$$\frac{t_M}{t_c} = \left(\frac{E_c}{E_M} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

其中, t_c 、 t_M 分别为替换后碳纤维复合材料结构截面厚度和原金属结构截面厚度,对于汽车零件,取值通常在 1~3 之间。

采用 T700 型碳纤维单向带配合 BAC172 环氧树脂,该组合制成的碳纤维复合材料制品力学性能优异且工艺可操作性强。油底壳材料替换厚度指数系数取 2.07,基于上述理论公式可得碳纤维复合材料油底壳的初步厚度见表 3。

表3 油底壳材料替换前后厚度对比

零件	材料	等效弹性模量 /GPa	厚度 /mm
油底壳	A8 钢板	206	1.5
	碳纤维复合材料 (T700/BAC172)	49.2	3

3.2 原金属油底壳结构形式

发动机油底壳的主要功能是储存并收集发动机各部件表面的机油,是发动机润滑系统中重要的一部分。钢制油底壳三视图与轴测视图如图4所示,油底壳多为阶梯状,在四周墙壁上多布有加强筋结构,上表面均匀分布了涂胶槽,通过密封胶与螺栓配合与发动机连接,实现密封,通常在底部还布置有放油螺塞。由于油底壳布置于发动机底部,服役环境恶劣,除满足基本储油功能外,还要求油底壳要抵抗冷热变化冲击以及承受复杂道路状况的严峻考验。



图4 钢制油底壳三视图与轴测视图

3.3 碳纤维复合材料汽车油底壳的设计

进行钢制油底壳的碳纤维复合材料替换设计,首先需要保证碳纤维复合材料油底壳满足金属材料油底壳的功能要求,包括与发动机的密封要求,与放油螺栓的连接要求,满足各工况要求下的强度要求等;然后再保证碳纤维复合材料油底壳的工艺可制造性,最终实现轻量化设计。

由于碳纤维复合材料零件设计与金属材料零件设计有较大差别,因此在原钢制油底壳结构的基

础上,进行结构调整,使其满足复合材料的零件设计要求以及成型工艺要求,如图 5 所示。

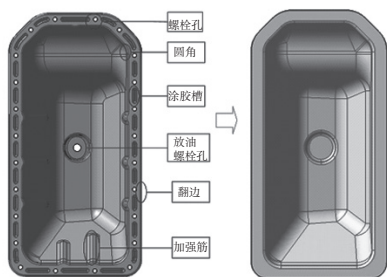


图 5 碳纤维复合材料油底壳替换模型

(1) 结构改进方面。

①金属油底壳设置加强筋结构主要是为了提高自身强度和刚度,从而提升固有频率,避免共振现象发生,而碳纤维复合材料其强度和刚度远大于金属材料,因此碳纤维复合材料产品固有频率较高,不会发生共振,基于此,取消原结构的加强筋,进行光滑处理,还有利于铺层的铺覆。

②通常冲压件会在模具的作用下,将坯料的边缘冲制成竖立边,而树脂传递模塑成型 (RTM) 的碳纤维复合材料零件的多余边料通常采用裁切的方式去除,没有翻边的存在,因此将原金属油底壳的外缘的翻边去除,形成光滑的外缘。

(2) 工艺设计方面。

①为保证铺覆工艺的质量和效率,进行铺层铺覆时,将与发动机进行螺栓连接的螺栓孔拉平,保证铺层的完整性,在成型完成后再进行统一的开孔处理,如果在铺覆过程中就进行开孔,会增加铺层铺覆的难度,螺栓孔位置出现偏差。

②考虑到铺层铺覆效果,去除涂胶槽特征,保证与发动机连接的平面的平滑。

③考虑到油底壳上表面需要与发动机连接并密封,因此,采用阳模作为铺覆模具,即从密封平面开始铺覆,保证密封面的平面度。

④采用阳模铺覆需要对其圆角大小进行改进,如表 2 所示,碳纤维复合材料油底壳的厚度初定为 3.2 mm,小于 5 mm,则油底壳结构中的圆角大小都必须 ≥ 5 mm,因此,将金属油底壳中所有小于 5 mm 的圆角都更新为 5 mm,保证铺覆可行性。

⑤图 6 是金属油底壳与放油螺栓连接方式截面图,图 7 是碳纤维油底壳金属预埋件位置截面图。如图 6 所示,原金属油底壳的放油螺栓是通过焊接

在油底壳上的螺母进行连接,而碳纤维复合材料无法进行焊接操作,如果考虑在碳纤维复合材料油底壳成型后,将螺母通过胶接粘在油底壳放油螺栓开孔处,在多次拧紧操作下,胶接强度能否满足存疑,因此考虑采用预埋件,如图 7 所示,在放油螺栓位置处,将金属预埋件埋在铺层中间并定位,与碳纤维复合材料油底壳一起共固化成型,然后在定位的预埋件位置进行攻丝操作,既满足了强度要求又复合了密封要求。

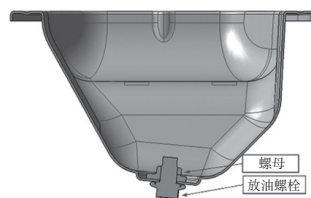


图 6 金属油底壳与放油螺栓连接方式截面图

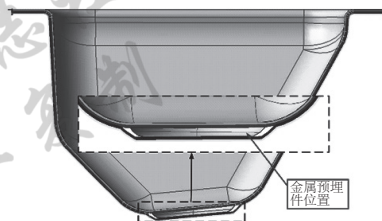


图 7 碳纤维油底壳金属预埋件位置截面图

(3) 铺层结构方面。

基于等刚度替换原理,初步确定了碳纤维复合材料油底壳的厚度为 3 mm,每层碳纤维材料的厚度为 0.15 mm,考虑到铺层结构的连续性,碳纤维复合材料同一角度的铺层为一个整体,因此初步设定碳纤维复合材料的铺层设计为 $[45_s/-45_s/0_s/90_s]$ (右下角 5 表示为 5 层),如图 8 所示。

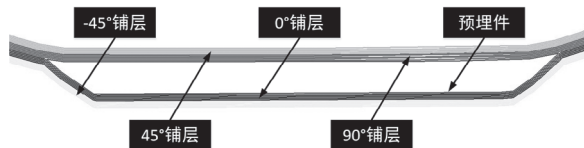


图 8 碳纤维油底壳金属预埋件位置处铺层信息图

4 碳纤维复合材料油底壳的铺层工艺仿真

碳纤维复合材料油底壳等代设计完成后,需要对其铺覆可行性进行验证,保证其工艺可行性。对于薄壳零件,同一角度铺层的铺覆效果受厚度影响不大,因此对各角度铺层 (45° , -45° , 0° , 90°),只展示一层铺覆效果。

Fibersim 是复合材料设计及铺覆工艺仿真的专业工程软件,其可精确地预测铺层与模具之间的贴

合情况,对于复合材料零部件的设计研究意义非凡。Fibersim 拥有极强的兼容性,其可与各主流三维设计软件兼容,并输出适合各分析软件的格式,适合各类工程师应用。工程师通过 Fibersim 软件,可直观快速的查看到设计初级阶段的缺陷,及早的采取措施进行设计改进和工艺优化,节省了时间成本和物料成本。

利用集成于 Catia 的 Fibersim 软件进行碳纤维复合材料油底壳铺覆仿真,在此之前,需要确定铺覆仿真的五要素,如图 9 所示。制造边界为实际铺覆时,应当铺覆至最大边界,保证产品留有余量进行修剪加工;设计边界为所设计零件的边界,也即最终成品的边界;铺覆原点一般取铺覆面的中间点,当没有另外确定铺覆点时,默认铺层是从铺覆原点开始向四周铺覆;坐标系 0° 方向即碳纤维复合材料的纤维方向;铺覆面为铺层铺覆的表面,它决定着铺覆形状和方向。

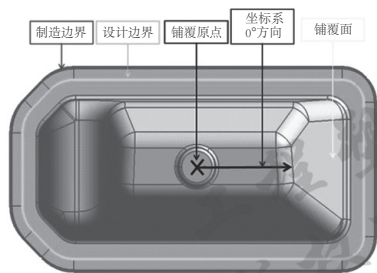
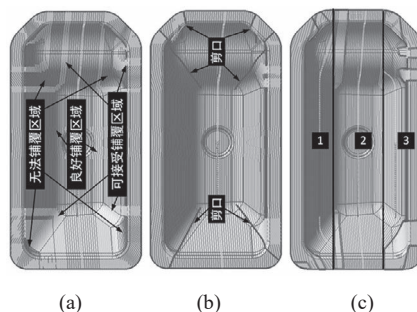


图9 铺覆仿真五要素图

4.1 0° 铺层的铺覆可行性分析

采用 0° 铺层后,铺覆效果如图 10 所示。从图 10a 可以看出,在油底壳的四角处出现大片的无法铺覆区域(见图中所示),在 Fibersim 软件中有如下规定,当铺层变形角度大于等于 15° ,即该区域实际无法铺覆,见图中所示;当铺层变形角度小于 15° 大于等于 10° ,铺覆效果一般,为可以接受区域,见图中所示;当铺层变形角度小于 10° ,是不存在制造问题的区域,见图中所示。很明显看出,在曲率变化范围较大的四角圆角处,产生了实际无法铺覆的结果,通常情况下需要对该缺陷区域进行剪口或分块处理。剪口处理一般在曲率变化大的圆角处进行裁剪,因为曲率变化大,平整的碳纤维布会在圆角处出现褶皱,影响零件的力学性能,如图 10b 所示,对曲率变化大的 6 处圆角处进行了剪口处理, 0° 铺层的铺覆效果大幅提升,原先无法铺覆的区域基本变为可接受区域(见图中所示),只存在些许缺陷区域,该区域可经过后续真空带压缩使其完成铺覆;分块处理

一般沿平行于铺层角度方向进行分块,不伤害沿纤维方向的力学性能,为保证分块少,保证铺层的完整性,并保证铺覆效果,对 0° 铺层分块如图 10c 所示,将 0° 铺层分为竖直三块,且铺覆效果可以接受。

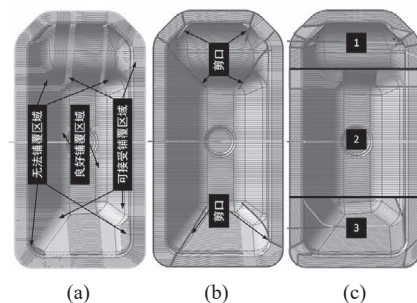


a—未处理; b—剪口处理后; c—分块处理后

图10 0° 铺层铺覆效果

4.2 90° 铺层的铺覆可行性分析

90° 铺层铺覆效果如图 11 所示。从图 11a 可以看出, 90° 铺层的铺覆缺陷与 0° 方向的铺覆缺陷相似,采用两种方案处理。在曲率变化大的圆角处进行剪口处理,需要注意的是,剪口位置应与 0° 方向错开,避免相同位置处出现强度薄弱区域,如图 11b 所示,通过 6 处剪口处理后, 90° 铺层的铺层效果可接受;按与纤维方向平行的分块方法进行分块处理,如图 11c 所示,将 90° 铺层划分为横向三段,并保证了较好的铺覆性。

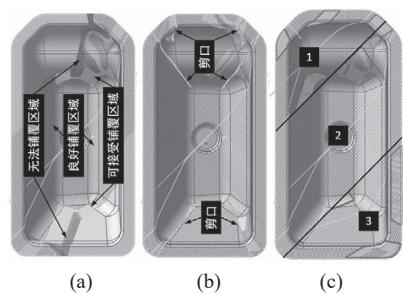


a—未处理; b—剪口处理后; c—分块处理后

图11 90° 铺层铺覆效果

4.3 45° 铺层的铺覆可行性分析

45° 铺层铺覆效果如图 12 所示。从图 12a 所示,油底壳不仅出现了铺覆缺陷区域(见图中所示),而且在油底壳右下角和左上角出现了缺料现象,这是因为铺层发生皱褶现象,无法铺平展开。首先采用剪口方案,如图 12b 所示,通过 6 处剪口操作, 45° 铺层的铺覆效果达到了可接受的程度;再尝试使用分块方案,如图 12c 所示,沿纤维方向将 45° 铺层划分为三块,虽然有些许警告区域,但可通过 RTM 的模压工艺处理小范围褶皱。

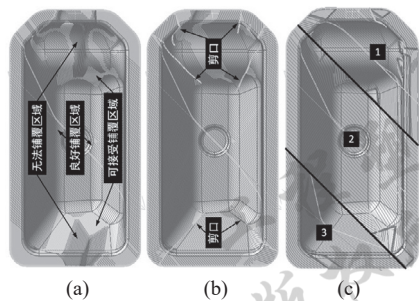


a—未处理; b—剪口处理后; c—分块处理后

图 12 45° 铺层铺覆效果

4.4 -45° 铺层的铺覆可行性分析

-45° 铺层铺覆效果如图 13 所示。从图 13 可知, -45° 铺层也出现了 45° 铺层一样的铺覆缺陷, 只是位置不同。采取同样剪口操作, 如图 13b 所示, 只有油底壳上侧有小片缺陷区域(见图中所示), 可通过 RTM 模压工艺压实解决, 整体铺覆效果可以接受; 依旧沿纤维方向进行分块处理, 如图 13c 所示, 将 -45° 铺层划分成三分, 整体铺覆效果可接受。



a—未处理; b—剪口处理后; c—分块处理后

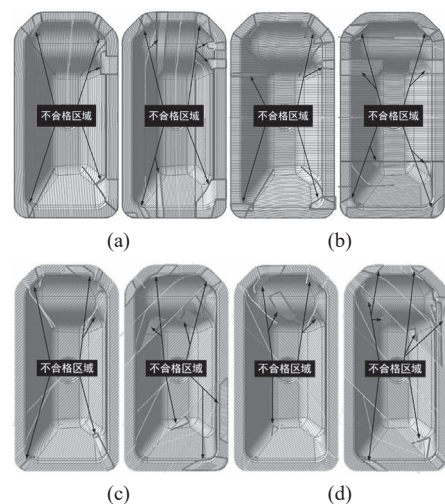
图 13 -45° 铺层铺覆效果

4.5 剪口与分块方案分析及讨论

对于曲率变化大, 形状复杂的零件, 无法用完整的碳纤维铺层铺覆, 需要对其进行裁剪处理, 保证铺覆可行性。上述对油底壳模型的铺层设计采用了剪口和分块两种方案, 为后续实际工程应用提供参考, 现规定两个指标来选择最佳方案:

(1) 不合格率。

不合格率即进行剪口或分块处理后, 可接受区域与缺陷区域面积占总面积的比值, 其中缺陷区域面积按实际面积的两倍计算。图 14 为剪口与分块方案不合格区域对比图, 可接受和缺陷不合格区域见图中所示。其中, a 左图为剪口方案, a 右图为分块方案。图 14b~图 14d 同理。若铺层中不合格区域多, 则在最终成型时会对碳纤维复合材料产品的力学性能造成影响。通过 Catia 软件对这些区域面积进行计算, 并除以整层铺层的面积 0.16 m^2 , 便可算出两种方案下各角度的不合格率, 见表 4。



a—0°; b—90°; c—45°; d—45°

图 14 剪口与分块方案不合格区域对比图

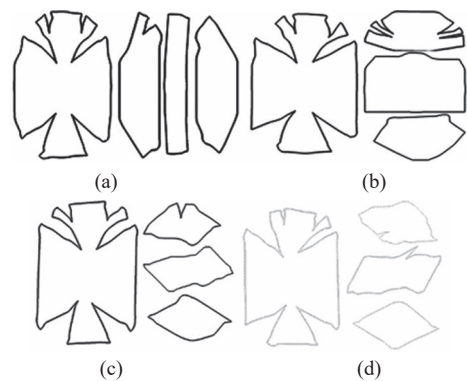
表 4 剪口与分块方案下不同角度的不合格率 %

项目	铺层角度			
	0°	90°	45°	-45°
剪口方案	2	6.5	4	3.8
分块方案	9	12.3	8.8	6.9

由表 4 可以发现, 剪口方案下, 各角度铺层的不合格率都基本小于或等于分块方案的不合格率, 这是因为剪口方案是对铺覆较差的区域进行处理, 而分块处理要保证沿纤维方向的要求, 存在局限性, 会对铺覆效果好的地方造成损伤, 最终导致铺层的不合格率大于剪口方案。

(2) 完整度。

完整度即油底壳周长与铺层展开后的总周长之比, 碳纤维复合材料的传力性能是基于其自身完整度实现的, 对纤维破坏越小, 一体化程度越高力学性能越高, 因此对铺层完整度的比较, 也是对其力学性能的重视。两种方案不同角度的铺层展开图如图 15 所示。其中, a 左图为剪口方案, a 右图为分块方案。图 15b~图 15d 同理。



a—0°; b—90°; c—45°; d—45°

图 15 剪口与分块方案铺层展开图

通过 Catia 软件测量展开图的周长,再被油底壳的周长 1 243.8 mm 所除,便可得到表 5 中的完整度数值。

表 5 剪口与分块方案下不同角度铺层的完整度 %

项目	铺层角度			
	0°	90°	45°	-45°
剪口方案	41	41.7	41.1	41.2
分块方案	38	34.5	39.8	37.9

从表 5 可以看出,剪口方案下的完整度都高于分块方案,这是因为分块数量越多,其边长越多,所导致的分块总周长越长,而完整度下降。综上,采用剪口方案更适用于油底壳模型,既保证铺覆可行性又能保证碳纤维复合材料完整度;而分块方案多适用于大型部件制造,因为大型部件必会引起碳纤维布幅宽不足的问题,此时,只能使用分块方案处理。

5 结论

对碳纤维复合材料油底壳的结构与工艺一体化进行设计。首先对原金属结构进行简化使其符合碳纤维复合材料设计的要求,再通过等刚度替换原理初步确定结构厚度,基于 Fibersim 对铺覆可行性进行验证,得出如下结论:

根据碳纤维复合材料零件的特点调整原金属油底壳的结构形状,并通过等刚度原理初步确定了碳纤维复合材料油底壳厚度为 3 mm,以每层碳纤维厚度为 0.15 mm 设定碳纤维复合材料铺层设计为 $[45_s/-45_s/0_s/90_s]$ 。

为保证铺覆可行性,依据复合材料层合板设计原则,将油底壳结构中所有小于 5 mm 的圆角更新为 5 mm。

通过 Fibersim 软件验证了金属结构简化后碳纤维复合材料油底壳结构可满足 0°,90° 和 $\pm 45^\circ$ 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。

参考文献

- [1] 洪宝剑. 碳纤维复合材料传动轴的设计研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
Hong Baojian. Design of CFRP transmission shaft[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [2] 李永刚. 碳纤维复合材料汽车保险杠的研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
Li Yonggang. Study on carbon fiber composite automobile bumper[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015.
- [3] 王庆, 卢家海, 刘钊, 等. 碳纤维增强复合材料汽车保险杠的轻量化设计 [J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(2):136-141.
Wang Qing, Lu Jiahai, Liu Zhao, et al. A lightweight design of carbon fiber reinforced plastic auto bumper[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(2):136-141.
- [4] 吴方贺. 碳纤维复合材料发动机罩结构与优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
Wu Fanghe. Structural design and optimization of carbon fiber reinforced plastic engine hood[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [5] Kim D H, Jung K H, Kim D J. Improving pedestrian safety via the optimization of composite hood structures for automobiles based on the equivalent static load method[J]. Composite Structures, 2017, 176:780-789.
- [6] 郭占轩. 轻量化碳纤维夹芯结构复合材料在轨道交通领域的具体应用分析 [J]. 现代商贸工业, 2021, 42(29):167-168.
Guo Zhanxuan. Specific application analysis of lightweight carbon fiber sandwich structure composite materials in the field of rail transit[J]. Modern Business Trade Industry, 2021, 42(29):167-168.
- [7] 王小兰. 近 5 年中国汽车轻量化进展探究 [J]. 汽车文摘, 2021(2):30-34.
Wang Xiaolan. Research on the development of automobile lightweight in China in recent five years[J]. Automotive Digest, 2021(2):30-34.
- [8] Hyo S.L, Soon H H, Jae R L, et al. Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(6):1 265-1 272.
- [9] 张凯, 马艳, 杨世全, 等. 碳纤维复合材料的耐腐蚀性能 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009(4):1-4.
Zhang Kai, Ma Yan, Yang Shiquan, et al. Corrosion behavior of carbon fiber composites[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2009(4):1-4.
- [10] 余海燕, 徐豪, 周辰晓. 大学生方程式赛车复合材料单体壳车身优化 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(11):1 729-1 734, 1 748.
Yu Haiyan, Xu Hao, Zhou Chenxiao. Optimization of a carbon fiber composite monocoque car body for formula society of automotive engineers[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(11):1 729-1 734, 1 748.
- [11] 张胜男, 刘艳兵. 汽车用碳纤维复合材料的结构设计与加工工艺 [J]. 汽车工艺与材料, 2018(9):1-8, 14.
Zhang Shengnan, Liu Yanbing. Structural design and processing technology of carbon fiber composite material for automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2018(9):1-8, 14.
- [12] 郭永奇, 黄小征, 王帅, 等. 基于等刚度原理的碳纤维发动机罩开发 [J]. 汽车实用技术, 2017(19):100-103.
Guo Yongqi, Huang Xiaozheng, Wang Shuai, et al. Development of carbon fiber enginehood based on the equal stiffness principle[J]. Automobile Applied Technology, 2017(19):100-103.
- [13] Li F, Patton R, Moghal K. The relationship between weight reduction and force distribution for thin wall structures[J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(4):591-616.