

碳纤维复合材料汽车 B 柱加强板的优化与性能分析

马芳武¹,熊长丽²,杨猛¹,蒲永锋^{1†},王晓军¹,支永帅¹

(1.吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,吉林 长春 130025 ;
2.上海汽车集团股份有限公司技术中心 安全工程与虚拟技术部,上海 201804)

摘要:通过建立 B 柱总成的有限元仿真模型,在等刚度原则下,对碳纤维复合材料 B 柱加强板进行自由尺寸优化、尺寸优化、铺层角度优化设计,并对 B 柱总成进行三点弯曲有限元仿真,获取优化后模型的最大位移及最大强度.通过真空导入成型工艺制作 B 柱加强板样件,并对碳纤维复合材料 B 柱总成进行三点弯曲试验,校核总成的强度指标.最后基于 2018 版 C-NCAP 标准分析整车侧面碰撞性能.通过对比刚度、弯曲性能、侧面碰撞侵入量、侧面碰撞侵入速度、侧面碰撞加速度,优化设计后的碳纤维复合材料 B 柱加强板可在保证刚度、强度及侧面碰撞性能的前提下替代原钢制 B 柱加强板,并使 B 柱加强板减重 1.376 kg,减重比达到 76.4%.

关键词:碳纤维复合材料;轻量化;B 柱加强板;优化设计

中图分类号:U465.6

文献标志码:A

Optimization and Performance Analysis of CFRP Automotive B-pillar Reinforced Plate

MA Fangwu¹, XIONG Changli², YANG Meng¹, PU Yongfeng^{1†}, WANG Xiaojun¹, ZHI Yongshuai¹

(1.State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;

2.Safety Engineering and Virtual Technology Department, SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China)

Abstract: This study starts from setting up the finite element simulation model of B-pillar assembly. Then, the size, free size and laminate orientation of carbon fiber composite B-pillar reinforced plate were optimized based on the principles of constant stiffness. Maximum strength and displacement of the assembly were obtained through Finite Element (FE) simulation of quasi-static three-point bending test on B-pillar assembly. B-pillar sample was fabricated by a Vacuum Infusion Process (VIP) and conducted on a three-point bending test to check the strength index of the B-pillar assembly. Finally, according to 2018 C-NCAP standards, side impact performance of vehicle was elaborated. The comparison results among stiffness, flexural property, side impact intrusion, intrusion velocity and acceleration indicate that the optimization design of CFRP can replace the original B-pillar steel reinforced plate under the premise of ensuring rigidity, strength and side impact performance. CFRP B-pillar reinforcement plate is 1.376kg lighter than that of the conventional one, and the weight loss ratio is up to 76.4%.

Key words: Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP); lightweight; B-pillar reinforcement plate; optimization

* 收稿日期:2018-05-31

基金项目:国家重点研发资助项目(2016YFB0101601),The National Key Research and Development Program of China(2016YFB0101601);吉林省省校共建计划专项项目(SXGJQY2017-2-1-5),Special Project of Jilin Province and Jilin University(SXGJQY2017-2-1-5)

作者简介:马芳武(1960—),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: puyongfeng@jlu.edu.cn

近年来,能源危机和环境污染使汽车轻量化显得尤为重要,碳纤维复合材料(CFRP)由于其优越的力学性能如高机械强度和弹性模量、低密度和良好的耐热性和可设计性而在汽车结构中被广泛应用^[1],国内外学者对其在汽车结构上的轻量化设计均进行了相关研究。

郭永奇等^[2]基于等刚度代换理论对钢结构发动机罩进行了碳纤维复合材料的替换,使替换后不同工况下结构刚度提升,减重达到 46%。王庆等^[3]对某款纯电动汽车的保险杠进行了设计,优化出了一种整体式碳纤维增强树脂基复合材料保险杠,在满足耐撞性的前提下,减重可达 36%。美国通用汽车研发中心运用结构优化技术设计碳纤维复合材料乘用车顶棚,选用单向带和编织布的数据,以复合材料失效理论作为约束,设计复合材料铺层厚度和角度,与金属相比减重高达 70%^[4]。SangHuyk 等^[5]对 CFRP 材料的汽车的控制臂进行拓扑优化,运用均匀场理论,采用有限元方法优化设计碳纤维复合材料下控制臂,同时保证该结构的刚度和耐久性要求,使结构轻量化效果提升 30%。Kim^[6]等运用等效静载荷原理对碳纤维复合材料发动机罩盖的铺层角度和次序进行优化设计,达到弯曲和扭转刚度的同时,对行人的保护效果大幅提升。Kim 等^[7]采用经典层合板理论确定层合板的机械性能,基于 UGA 优化算法优化设计汽车保险杠结构,通过有限元方法优化得到最优方案,最后进行验证得到最轻质的保险杠结构。而目前国内外对于 B 柱,尤其是复合材料 B 柱的研究较少。李勇俊等^[8]以轻量化为目标,构建代理模型并采用多岛遗传算法进行优化,得到各个子层区域的铺层层数。结果表明在满足工艺要求的条件下,整车在顶压和侧面碰撞中的耐撞性得到了明显提升,同时 B 柱重量减轻了 61.4%。赵运等^[9]采用数值模拟与试验相结合的方法,研究了汽车 B 柱 22MnB5 高强度钢热冲压成形工艺,并验证了该成型工艺的可靠性。Liu 等^[10]提出了一种新的复合材料 B 柱结构,并对其进行了优化设计和全局灵敏度分析。优化后的复合材料 B 柱能够实现轻量化的目的并能提升耐撞性。

以上几个方面的研究内容,对碳纤维复合材料车身覆盖件的结构优化设计提供了丰富的经验和指导。与在汽车覆盖件上的应用研究相比,碳纤维复合材料在车身结构件上的应用较少。B 柱作为车身典型的结构件,其结构相对独立,为保证整车良好的侧面碰撞性能,B 柱通常使用多块加强板,不利

于轻量化设计而且给车身设计和装配增加了复杂度,本文选择具有代表性的 B 柱组件作为研究对象进行优化设计分析。

1 碳纤维复合材料参数的获取

本文通过力学性能试验获取工程常数,选用单向碳纤维(台丽)与环氧树脂(昆山珍实复合材料有限公司),其性能见表 1,采用 RTM 成型工艺,注射机型号为 Isojet Piston4000。将裁剪好的碳纤维单向布按标准的铺层方式铺设在模具中,将环氧树脂 A 剂和 B 剂按 4:1 的质量比混合后,加入到 RTM 注射机内并注射。待模具内碳纤维布完全浸润后,将其放置在 60 °C 的烘箱内固化 2 h。将制作好的层合板根据 ASTM^[11-13]试验标准切割成特定形状并进行力学性能试验,万能试验机型号为 WANCE-ETB-B。

由于复合材料应变很小,采用普通应变测量方法误差较大,本次性能试验采用非接触全场应变测量系统(DIC)测量材料的应变。力学性能试验主要包括:0°/90°拉伸试验,0°/90°压缩试验,±45°剪切试验,试验结果如表 2 所示。

表 1 碳纤维复合材料中纤维与树脂的参数

Tab.1 Basic properties of fiber and epoxy resin

材料	抗拉强度 X_t /MPa	弹性模量 E /GPa	密度 ρ /(g·cm ⁻³)
TC-35-12K 单向碳纤维	4 000	240	1.8
5113-81A 环氧树脂	63.7	2.9	1.12
5113-94B 固化剂	63.7	2.9	1.03

表 2 碳纤维复合材料力学参数

Tab.2 Mechanical properties of CFRP

参数	符号	数值
0°弹性模量	E_1 /GPa	114
90°弹性模量	E_2 /GPa	8.28
泊松比	ν_{12}	0.31
xy 方向剪切模量	G_{12} /GPa	4.28
xz 方向剪切模量	G_{1z} /GPa	4.28
yz 方向剪切模量	G_{2z} /GPa	2.85
0°拉伸强度	X_t /MPa	1 809.08
0°压缩强度	X_c /MPa	1 163.68
90°拉伸强度	Y_t /MPa	75.3
90°压缩强度	Y_c /MPa	183.88
面内剪切强度	S /MPa	134.6
密度	ρ /(g·cm ⁻³)	1.5

2 复合材料有限元建模

使用 CATIA 进行有限元建模, 并使用 Hyperworks 进行参数设定和网格划分. 采用的有限元模型材料有两类, 各向同性材料与各向异性材料. 其中 B 柱外板材料为 DC54D 钢, 其密度为 7.89 g/cm^3 , 泊松比为 0.33, 弹性模量为 210 GPa. 复合材料采用胶粘连接, 结构胶的弹性模量 0.9 GPa, 密度 1.26 g/cm^3 , 泊松比 0.35. 按照表 2 对碳纤维复合材料的材料属性赋值, 其采用 $[0/45/90/-45/0/45/0/-45]_s$ 对称铺层方案, 单层厚度为 0.3 mm, 铺层总厚度为 4.8 mm.

选取 5 mm 为基本单元尺寸划分网格, 胶粘连接采用体单元和刚性连接单元模拟, 划分完网格的 B 柱中总的单元数为 3 767, 其中三角形单元仅占 2.7%, 节点数为 3 929. 整个 B 柱加强板有限元模型其中单元数为 17 850, 三角形单元占总单元的 3.25%, 节点数为 18 403. 因为碳纤维复合材料在力学性能上表现为各向异性, 在有限元建模中需要定义 0° 纤维的方向, 其他角度的纤维方向参考该方向^[14]. 根据 B 柱的典型受力状况, 选取自由模态 M_f , 轴向拉伸 N_x 、轴向压缩 N_c 、后向弯曲 N_y 、侧向弯曲 N_z 工况. 其中约束加载点在 x, y, z 轴的平动分别用 1、2、3 表示, 绕着 x, y, z 轴的转动用 4、5、6 表示. 在外板顶部建立 RBE2 刚性单元, 其中刚性单元的中心节点为力的加载点 P_1 , 后车门上铰链安装孔 P_2 , 前门锁扣安装孔 P_3 , 后车门下铰链安装孔 P_4 . 四个工况受力示意图如图 1 所示, 四个工况的边界条件设置见表 3.

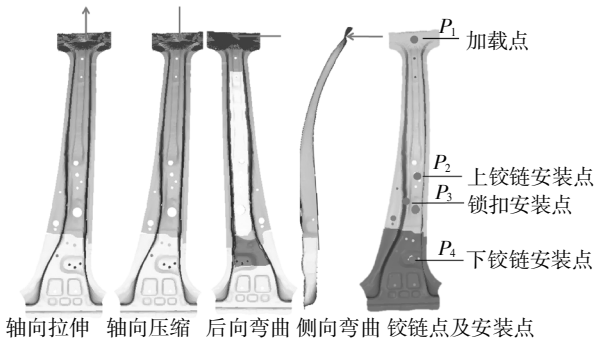


图 1 四种工况受力示意图

Fig.1 Force schematic diagram of four working conditions

表 3 四个工况边界条件设置

Tab.3 Boundary conditions of four working conditions

项目	加载点约束	P_1 加载方式
N_x	2,4,5,6	$F_x = 20\ 000 \text{ N}$
N_c	2,4,5,6	$F_c = -20\ 000 \text{ N}$
N_y	2,4,6	$F_y = 1\ 000 \text{ N}$
N_z	1,5,6	$F_z = 1\ 000 \text{ N}$

3 结构优化设计

使用 Hyperworks 下的 Optistruct 模块进行优化设计.

3.1 自由尺寸优化

为探究板壳结构上每个单元的最佳厚度, 将复合材料层合板按 SMEAR 方式的超级层进行铺层, 得到复合材料的平均力学性能^[15]. 对碳纤维复合材料 B 柱加强板自由尺寸优化的表示为:

$$\text{优化变量: } \mathbf{t} = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T \quad (1)$$

式中: t_i 是 B 柱加强板上每个单元的第 i 超级层的厚度. 本优化选择常用的 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 四个角度的铺层作为超级层, 故 n 取值为 4.

$$\text{优化目标: } \min(v) = \sum_{i=1}^n s_i t_i \quad (2)$$

式中: v 为复合材料 B 柱加强板体积, s_i 为每一铺层材料的面积, t_i 为单层板厚度.

根据本优化的目标, 建立约束条件,

$$\begin{cases} Z_{N_x} \leq Z_{N_x0} \\ Z_{N_c} \geq Z_{N_c0} \\ X_{N_x} \leq X_{N_x0} \\ Y_{N_y} \leq Y_{N_y0} \\ T_{\theta=45^\circ} \leq T_{\theta=-45^\circ} \\ 0.3 \leq t_i \leq 0.3 \\ T_{\theta=0^\circ}, T_{\theta=90^\circ}, T_{\theta=\pm 45^\circ} \leq 0.1T \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z_{N_x} 为在拉伸工况下加载点 z 向的位移; Z_{N_c} 为在压缩工况下加载点的 z 向位移; X_{N_x} 是侧向弯曲工况下加载点 x 向的位移; Y_{N_y} 是在后向弯曲工况下, 加载点 y 向的位移; T 为铺层厚度; t_i 为单层板厚度.

以表 4 中原钢制加强板四个工况刚度计算结果作为约束条件, 式(3)中 Z_{N_x0} 取 1.430, Z_{N_c0} 取 -1.430, X_{N_x0} 取 7.163, Y_{N_y0} 取 9.738, 尺寸优化后体积逐渐减小, 直至收敛, 如图 2 所示. 四个工况的加载点的位移减小, 相对于原钢制 B 柱来讲, 刚度增加, 如图 3 所示.

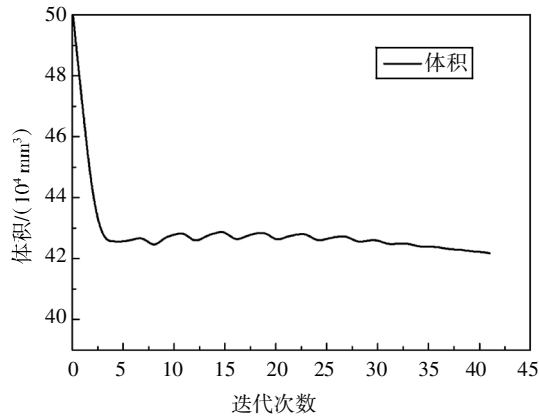
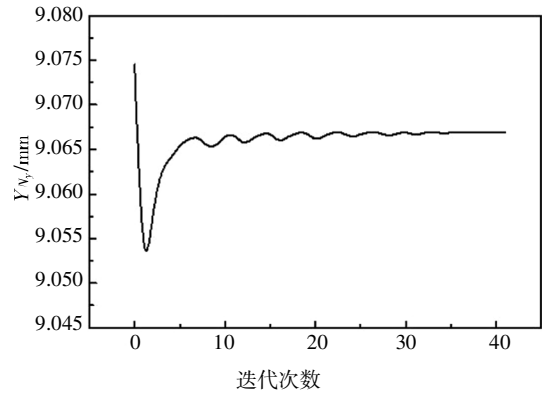


图 2 优化中的体积变化

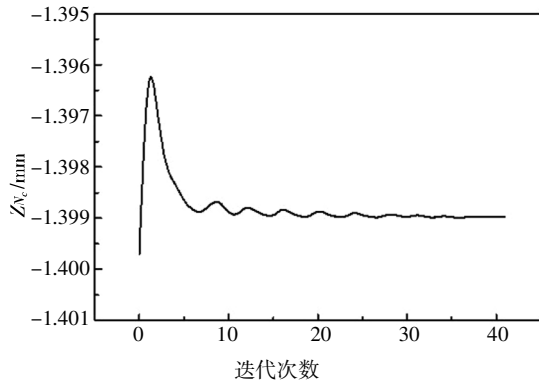
Fig.2 Volume changes during optimization



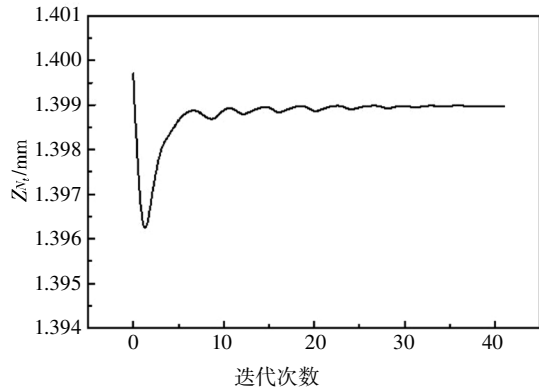
(d)侧向弯曲工况

图 3 优化过程中四种工况下的位移

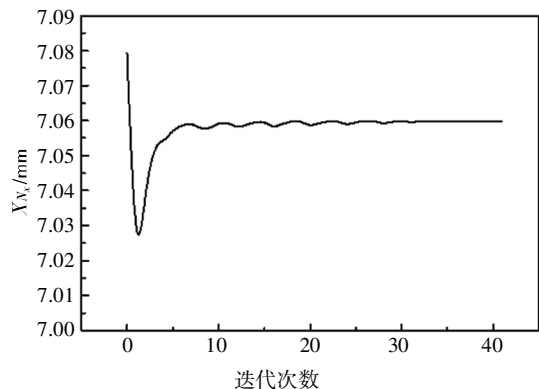
Fig.3 Displacement under four conditions during optimization



(a)轴向压缩工况



(b)轴向拉伸工况



(c)后向弯曲工况

3.2 尺寸优化

尺寸优化是在经自由尺寸优化后得到了每个超级层的厚度以及铺层裁剪形状的基础上,将每一超级层由 j 个小层进行表示^[16],简化重建有限元模型,并确定每一小层的厚度的具体数值 t_{ij} 的优化过程.

优化变量:

$$\mathbf{t} = (t_{11}, t_{12} \cdots t_{1j} \cdots t_{ij} \cdots t_{41}, t_{42} \cdots t_{4j})^T \quad (4)$$

式中: t_{ij} 为第 i 超级层第 j 小层的厚度,本优化将每一超级层由四个小层进行表示,故 j 取 4;共简化为 16 个小层的铺层.

优化目标:

$$\min(m) = \rho \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 s_i t_{ij} \quad (5)$$

式中: ρ 代表材料密度; s_i 为每个小层的面积; t_{ij} 为每个小层的厚度.

根据约束类型建立尺寸优化的约束条件为:

$$\begin{cases} \omega_{N_t} \leq \omega_{N_{t0}} \\ \omega_{N_c} \leq \omega_{N_{c0}} \\ \omega_{N_x} \leq \omega_{N_{x0}} \\ \omega_{N_y} \leq \omega_{N_{y0}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_{N_t} 是拉伸压缩工况下的应力; ω_{N_c} 是侧向弯曲工况下的应力; ω_{N_x} 是后向弯曲工况下的应力. 将原钢制加强板四个工况应力计算结果作为约束条件,式 (6) 中 $\omega_{N_{t0}}$ 取 68.68, $\omega_{N_{c0}}$ 取 68.68, $\omega_{N_{x0}}$ 取 343.1, $\omega_{N_{y0}}$ 取 120.4, 16 种形状铺层块的具体厚度如图 4.

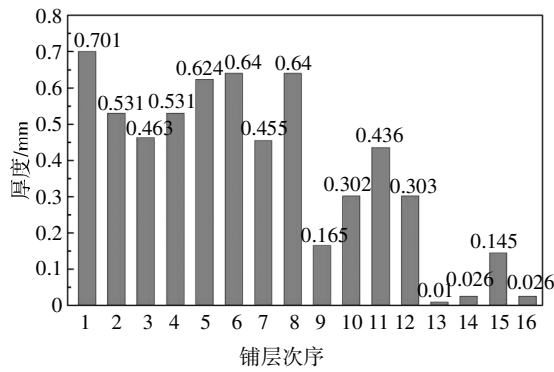


图4 每个铺层的具体厚度
Fig.4 Specific thickness for each layer

3.3 铺层角度次序优化

由于碳纤维复合材料为各向异性,铺层角度次序影响材料整体性能.通过优化复合材料层合板的铺层角度次序来提升B柱加强板的性能.

$$\text{优化变量: } \theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k)^T \quad (7)$$

式中: θ_k 是B柱加强板尺寸优化后的第k层纤维的铺层角度,经尺寸优化后单元最大尺寸是4.5mm,故k取15.

$$\text{优化目标: } \min(W) = \sum w_i c_i \quad (8)$$

式中:W是结构的柔度; w_i 为加权的权重; c_i 是每一部分的柔度,即目标为结构刚度最大.

本B柱加强板按照图5所示优化出的铺层角度次序使结构的刚度最大.

Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5	Iteration 6	Legend
61101	62311	63401	63401	63101	63101	63101	0.0 degrees
61102	64101	63101	63101	63201	63201	63201	45.0 degrees
62101	61101	61101	63201	61101	61101	61101	0.0 degrees
63101	63101	63201	61101	61401	63301	61401	-45.0 degrees
64101	61102	61401	63301	63301	61401	63301	
6501	62201	61301	61401	61102	61102	61102	
62201	64201	62101	61301	61301	61301	61301	
63201	63201	64101	61102	63401	63401	63401	
64201	61201	61102	62101	62101	62101	62101	
61301	63301	62201	64101	64101	64101	64101	
63301	62301	64201	61501	61501	61201	61201	
61401	64401	61201	62201	62201	62201	62201	
62401	61301	63301	64201	64201	64201	64201	
63401	63401	62401	62401	62401	62401	62401	
64401	61401	64401	64401	64401	64401	64401	

图5 铺层次序优化每一步迭代的铺层次序
Fig.5 Sequence of ply orientation angles during optimization

3.4 刚度结果对比

原车金属B柱总成的刚度分析结果、碳纤维复合材料初始铺层的B柱总成刚度分析结果与采用先进复合材料优化方法优化后的碳纤维复合材料的B柱总成刚度的求解计算结果对比见表4.

由对比结果可知:采用碳纤维复合材料[0/45/90/-45/0/45/0/-45]_s的16层铺层的碳纤维复合材料B柱加强板的刚度较原钢制B柱加强板的轴向刚度提升4.2%,后向刚度提升7.2%,侧向弯曲性能

表4 刚度结果对比

Tab.4 Comparison of stiffness results

项目	原钢制加强板方案	4.8 mm 对称铺层方案	优化后的方案
参数			
外板厚度/mm	2.50	2.50	2.50
加强板厚度/mm	2.40	4.80	4.50
外板质量/kg	5.74	5.74	5.74
加强板质量/kg	1.80	0.475	0.42
质量			
总质量/kg	7.54	6.21	6.16
模态			
扭转模态	72.61	76.01	75.32
弯曲模态	149.62	156.03	154.21
轴向			
变形/mm	1.430	1.370	1.427
后向			
变形/mm	9.738	9.037	9.238
侧向			
变形/mm	7.875	7.163	7.389
减重			
加强板减重比/%	—	73.6	76.4
减重/kg	—	1.330	1.376

提升9.1%,减重73.6%.优化后15层铺层的碳纤维复合材料相对优化前总体刚度略小,较金属轴向刚度提升0.2%,侧向弯曲性能提升6.2%,后向刚度提升5.1%,其对各个铺层形状进行裁剪以及减薄了一层为0.3mm的纤维,使减重达1.376kg,减重比为76.4%.以上结果说明经过优化后的B柱总成,强度、刚度既不存在过剩的问题,也不存在不足的问题,材料得到了充分的利用,结构性能得到充分发挥,优化结果比较理想.

4 三点弯曲验证

4.1 边界条件

本文对碳纤维复合材料B柱加强板的总成进行准静态三点弯曲分析,使用的软件为LS-DYNA.模型装配图及边界约束方式如图6所示.刚性圆柱直径为165mm,位置固定于两支点z轴坐标中点B柱外表面上边缘,B柱下端约束1、2、3、5、6五个自由度,x轴方向上可以自由转动,上端约束1、2、5、6四个自由度即B柱端头能沿z轴自由滑动和绕x轴自由转动.对刚性圆柱在沿y轴方向匀速地施加80mm的强制位移.

采用真空导入成型工艺对B柱加强板进行制备,然后将加强板与外板通过结构胶进行胶粘连接.按照仿真模型的边界条件对碳纤维复合材料B柱

加强板的样件进行三点弯曲试验, 试验使用 WANCEWANCE 型液压伺服万能试验机. 如图 7 所示, 为保证试验过程为准静态过程, 压头的下压速度为 4 mm/min, 试验在室温下进行, 相同条件下, 进行三次重复试验.

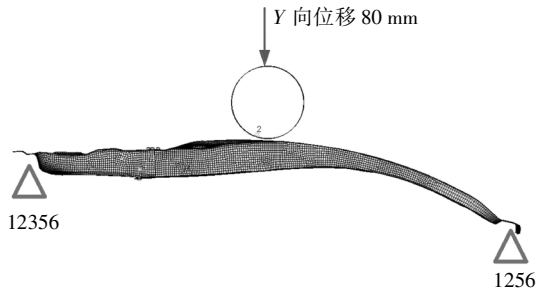


图 6 三点弯曲仿真模型的边界条件示意图

Fig.6 Boundary condition of three-point bending simulation



图 7 样件三点弯曲试验图

Fig.7 Sample of three-point bending test

4.2 结果对比

图 8 为三点弯曲过程中刚性柱与 B 柱之间的 Y 向接触力曲线对比. 金属 B 柱加强板三点弯曲仿真试验的最大接触力在钢柱下压距离 D 为 45 mm 时, F_{Ns} 为 34 175 N; 碳纤维复合材料 B 柱总成三点弯曲仿真试验, D 为 60 mm, 最大接触力 F_{Nc} 为 34 744 N. 碳纤维复合材料样件三次试验的最大接触力 F_{Nt} 均值为 33 397 N.

由仿真试验结果可知, 碳纤维复合材料 B 柱加强板总成与压头钢柱的接触力大于金属 B 柱加强板总成, 即碳纤维复合材料 B 柱加强板的强度高于原钢制材料. 由图 9 仿真与试验的接触力结果对比可知, 碳纤维复合材料样件试验接触力结果较仿真

结果减小 3.9%, 接触力变化趋势与仿真一致. 由表 5 中 B 柱总成的最大变形情况对比可知, 样件试验中, B 柱总成平均变形量为 83.42 mm, 最大变形处在金属刚柱下压也就是 B 柱中间的位置, 如图 10 所示, 与仿真一致. 在工艺和误差的允许范围内, 仿真结果与试验结果是一致的, 验证了碳纤维复合材料 B 柱加强板的三点弯曲性能.

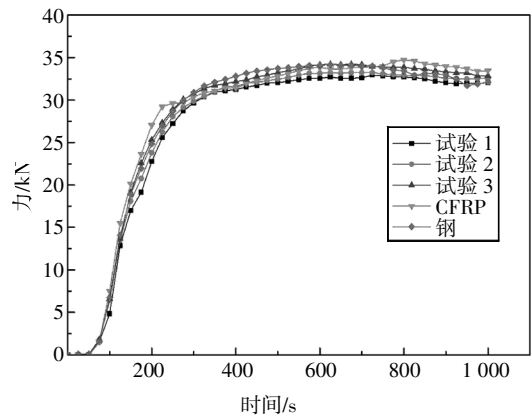


图 8 三点弯曲的接触力曲线对比

Fig.8 Comparison of the contact force curve of three-point bending tests

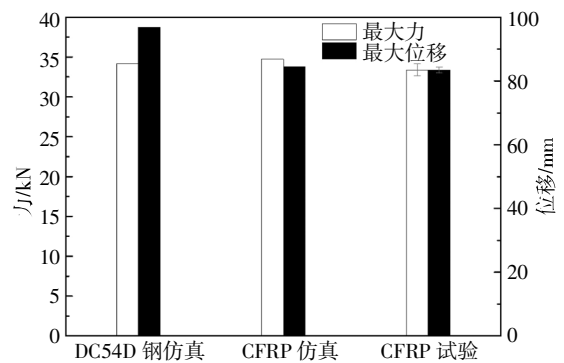


图 9 仿真与试验结果对比

Fig.9 Comparison of simulation and test results

表 5 强度结果对比

Tab.5 Comparison of strength results

试验类型	最大位移 D/mm	最大接触力 F_N/N	破坏位置	破坏形式
金属材料仿真	96.872	34 175	B 柱中上部	变形
CFRP 仿真	84.48	34 744		
CFRP 样件 试验	试验 1	84.14	刚性柱下 压位置处	纤维 断裂
	试验 2	83.76		
	试验 3	82.37		
	均值	83.42		

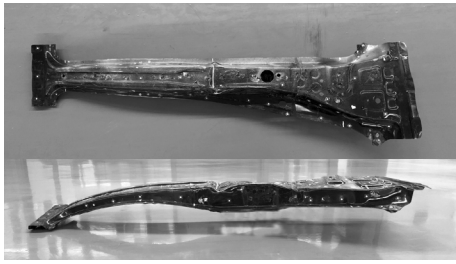


图 10 样品三点弯曲试验变形情况

Fig.10 Deformation of three-point bending test sample

5 整车侧碰仿真分析

5.1 模型建立

使用 LS-DYNA 进行侧面碰撞仿真验证. 在对装有碳纤维复合材料 B 柱加强板的整车进行侧面碰撞仿真分析验证时,将金属 B 柱加强板的材料替换为碳纤维复合材料,加强板与外板采用胶接的连接方式,同时保持 B 柱与其相邻零部件的连接关系与原车模型一致^[17].按照 2018 版 C-NCAP 对侧面碰撞的规定调整有限元模型^[18],更新侧面碰撞壁障,保证接触关系正确.本模型赋予 50 km/h 的初始速度,计算时间为 0.15 s. 图 11 为不同应变速率下碳纤维应力-应变曲线,图 12 为试样图.图 13 为碰撞过程中的能量曲线,主要由动能、内能和沙漏能组成.可以看出,碰撞过程中能量守恒.

图 14 为仿真试验测得的碳纤维复合材料 B 柱(a)与金属 B 柱(b)侧面碰撞时的最大变形情况.从总体的车辆变形来讲,带有碳纤维复合材料 B 柱加强板的整车侧面碰撞最大位移为 1 260 mm,而原车金属 B 柱加强板的最大位移为 1 284 mm,从整车破坏和变形情况考虑,带有碳纤维复合材料 B 柱加强板的整车侧面碰撞效果要好于金属 B 柱加强板的整车碰撞效果.

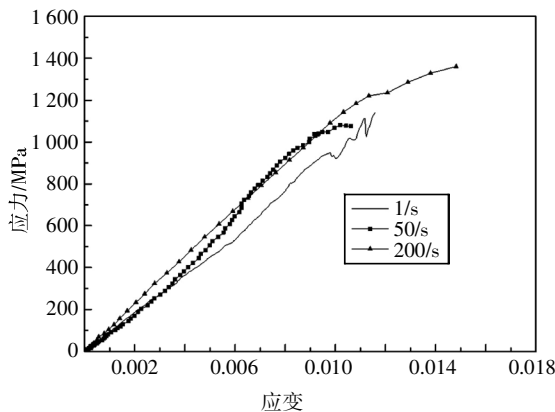


图 11 不同应变率下材料应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of different strain rates

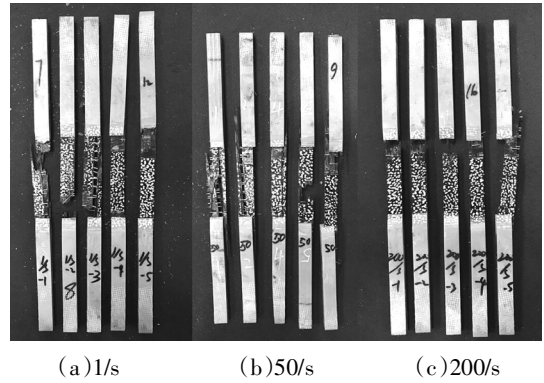


图 12 不同应变率材料试样

Fig.12 Samples of different strain rates

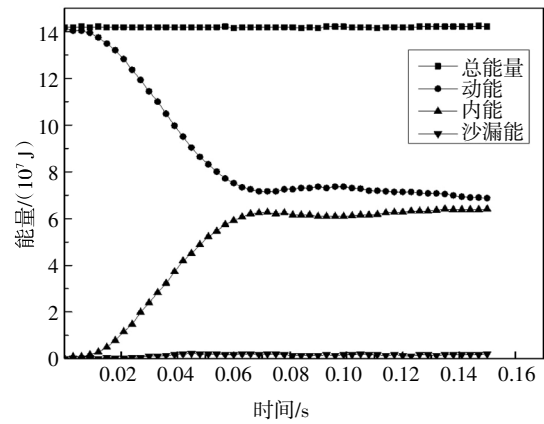
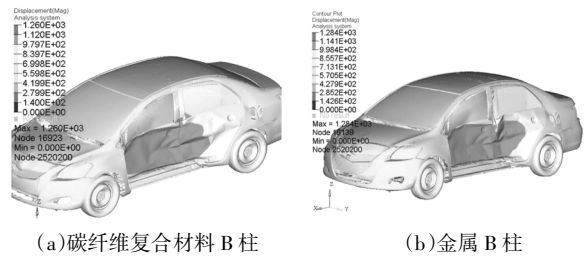


图 13 侧面碰撞能量曲线

Fig.13 Energy curves of side impact



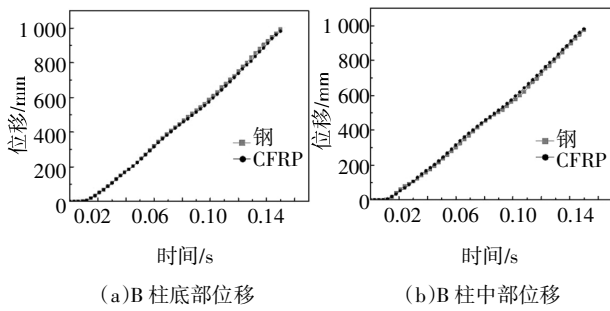
(a)碳纤维复合材料 B 柱 (b)金属 B 柱

图 14 整车变形对比

Fig.14 Comparison of vehicle deformation

5.2 整车侧碰结果对比

图 15 分别为仿真测得的金属及带有碳纤维复合材料加强板 B 柱总成底部(a)和中部(b)的位移曲线.由曲线对比可知,无论是底部还是中部,对于 B 柱的动态位移来讲,带有碳纤维复合材料 B 柱加强板的整车侧面碰撞位移量与金属 B 柱加强板的大小基本相同,在 B 柱底部位置,碳纤维复合材料的位移更小.

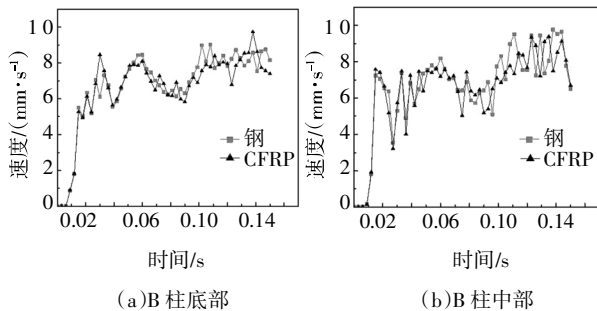


(a) B 柱底部位移 (b) B 柱中部位移

图 15 B 柱变形量对比曲线

Fig.15 Curves of B-pillar deformation

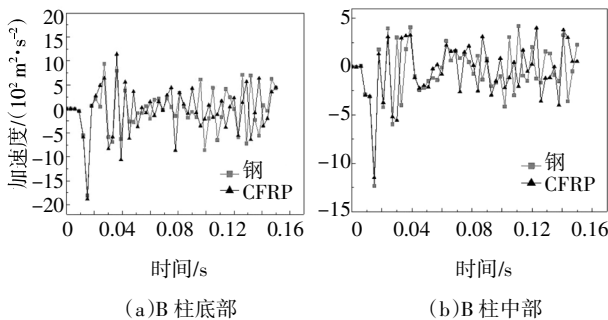
图 16 分别为仿真测得的金属及带有碳纤维复合材料加强板 B 柱总成底部(a)和中部(b)动态侵入速度曲线. 由数据对比可知, 无论是底部还是中部, 对于 B 柱的动态侵入速度来讲, 带有碳纤维复合材料 B 柱加强板的整车侧面碰撞速度与金属 B 柱加强板的整车侧面碰撞的速度相差不大, 而且在中部的速度变化趋势要更趋于平缓. 从图 17 动态加速度曲线可以看出, 金属与 CFRP 的加速度曲线吻合较好, 在 B 柱底部位置上, 复合材料比金属的动态加速度小, 中间位置加速度基本一致.



(a) B 柱底部 (b) B 柱中部

图 16 B 柱侵入速度对比曲线

Fig.16 Curves of B-pillar intrusion velocity



(a) B 柱底部 (b) B 柱中部

图 17 B 柱侵入加速度对比曲线

Fig.17 Curves of B-pillar intrusion acceleration

B 柱上对应假人位置参考点示意图如图 18 所示, 表 6 为 B 柱内板上对应假人的头部、上肋、中肋、下肋、腹部、骨盆位置点的动态最大侵入量和最大侵入速度的对比^[9]. 由对比结果可以分析, 碳纤维复合材料加强板方案 B 柱总成上假人对应的最大侵入量总体比原金属方案小, 碳纤维复合材料 B 柱加强板方案最大侵入速度在 B 柱上各个参考点的侵入速度均有下降, 其中最大侵入速度趋于均值有利于对假人的保护, 故使用碳纤维复合材料 B 柱加强板, 更利于对车内乘员的保护.

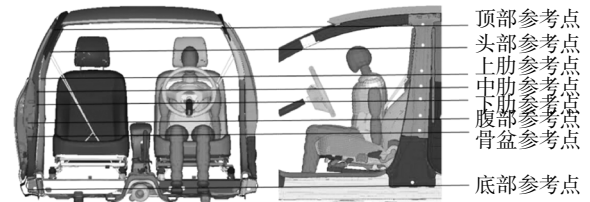


图 18 B 柱上对应假人位置参考点示意图

Fig.18 Position of the reference points corresponding to the dummy on the B-Pillar

表 6 B 柱侵入量及侵入速度对比

Tab.6 Comparison of B-pillar intrusion and invasion velocity

测点位置	动态最大侵入量/mm		动态最大侵入速度/(m·s ⁻¹)	
	DC54D 钢	CFRP	DC54D 钢	CFRP
B 柱上部	51.10	48.15	9.17	9.15
假人头部	116.30	113.02	10.70	9.68
上肋	200.52	199.60	8.25	8.17
中肋	211.77	210.71	9.25	8.86
下肋	227.41	225.70	8.79	8.69
腹部	237.91	235.87	8.98	8.90
骨盆	243.64	240.80	7.97	7.95
B 柱底部	104.44	99.10	9.10	8.84

6 结论

1)对碳纤维复合材料进行自由尺寸优化、尺寸优化、铺层角度次序优化, 对比金属与优化前后碳纤维复合材料加强板的总成刚度. 用先进复合材料优化方法优化后的 B 柱加强板在保证刚度的前提下, 结构减重达 76.4%.

2)对碳纤维复合材料 B 柱加强板及其总成进

行弯曲试验验证,与金属 B 柱总成相比,强度增加 1.7%。在破坏变形方面,碳纤维复合材料 B 柱总成变形减小 12.8%。

3)建立与 2018 版 C-NCAP 对应的侧面碰撞有限元模型,从变形、侵入速度、侵入加速度、测量点动态侵入量、动态侵入速度等方面,对比碳纤维复合材料与金属材料 B 柱加强板的整车侧面碰撞的结果,可知碳纤维复合材料 B 柱加强板对乘员保护效果更好。

参考文献

- [1] 马芳武,陈实现,赵花垒,等. 强度、刚度与模态约束下的 FSC 赛车车架轻量化 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(4):18—25.
MA F W, CHEN S X, ZHAO H L, *et al.* Lightweight on frame of FSC with constraints of strength, stiffness and modal [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(4): 18—25. (In Chinese)
- [2] 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 Y Q, HUANG X Z, WANG S, *et al.* Development of carbon fiber engine hood based on the equal stiffness principle [J]. Automobile Applied Technology, 2017(19): 100—103. (In Chinese)
- [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 Q, LU J H, LIU Z, *et al.* A lightweight design of carbon fiber reinforced plastic auto bumper [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(2): 136—141. (In Chinese)
- [4] BOTKIN M E. Modeling and optimal design of a carbon fiber reinforced composite automotive roof [J]. Engineering with Computers, 2000, 16(1): 16—23.
- [5] YOO S H, DOH J, LIM J, *et al.* Topologically optimized shape of CFRP front lower control ARM [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(4): 625—630.
- [6] 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.
- [7] KIM D H, KIM H G, KIM H S. Design optimization and manufacture of hybrid glass/carbon fiber reinforced composite bumper beam for automobile vehicle [J]. Composite Structures, 2015, 131: 742—752.
- [8] 李勇俊,雷飞,刘启明,等. 考虑结构、材料和工艺要求的复合材料 B 柱优化 [J]. 汽车工程, 2017, 39(8): 968—976.
LI Y J, LEI F, LIU Q M, *et al.* Optimization of composite B-pillar with considerations of structures, materials and processes requirements [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(8): 968—976. (In Chinese)
- [9] 赵运运,李亨,李明,等. 汽车 B 柱高强度钢热冲压工艺 [J]. 锻压技术, 2017, 42(2): 66—71.
ZHAO Y Y, LI H, LI M, *et al.* Hot stamping process of high-strength-steel for automotive B-pillar [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(2): 66—71. (In Chinese)
- [10] LIU Q M, LI Y, CAO L, *et al.* Structural design and global sensitivity analysis of the composite B-pillar with ply drop-off [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(3): 965—975.
- [11] ASTM D3410 Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials [S]. ASTM International, 2009.
- [12] ASTM D3039 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials [S]. ASTM International, 2014.
- [13] ASTM D3518 Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate [S]. ASTM International, 2013.
- [14] WANG T, LI Y. Design and analysis of automotive carbon fiber composite bumper beam based on finite element analysis [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 222—223.
- [15] 洪清泉. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2013:33—98.
HONG Q Q. Theoretical foundation and engineering application of OptiStruct & HyperStudy [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013: 33—98. (In Chinese)
- [16] ABHISHEK K, DATTA S, MAHAPATRA S S. Multi-objective optimization in drilling of CFRP (polyester) composites: Application of a fuzzy embedded harmony search (HS) algorithm [J]. Measurement, 2016, 77: 222—239.
- [17] YU H J, ZHU Z Y. Research on carbon fiber-reinforced plastic bumper beam subjected to low-velocity frontal impact [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 40—52.
- [18] 王月,肖海涛,张海洋,等. 2018 版 C-NCAP 侧面碰撞分析 [J]. 汽车工程师, 2017(1): 41—46.
WANG Y, XIAO H T, ZHANG H Y, *et al.* Study on side impact of 2018 version C-NCAP [J]. Automotive Engineer, 2017(1): 41—46. (In Chinese)
- [19] 张芳芳. 基于 B 柱的汽车侧面碰撞特性及乘员保护措施的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2013.
ZHANG F F. Study on crashworthiness and occupant protection measures of vehicle side impact based on B-pillar [D]. Wuhan: School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, 2013. (In Chinese)