

基于 ABAQUS 的碳纤维顶盖雪压及抗凹性能分析

肖志, 杜庆勇, 莫富源*, 邢杨, 李贝

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 中国, 410082

摘要: 在全球节能减排的趋势下, 汽车零部件的轻量化要求越来越高, 而碳纤维复合材料由于其密度小, 比强度、比刚度都比较大的优势而逐渐成为替代传统钢材的首选材料。本文结合有限元软件对碳纤维复合材料力学性能、碳纤维顶盖的雪压分析及抗凹性能分析进行了相关研究。材料性能分析所得应力应变曲线与试验结果进行了对比, 对比结果显示分析结果均处于误差允许范围之内。在碳纤维顶盖分析当中, 三层碳纤维顶盖能够同时满足雪压和抗凹性能要求, 且使用碳纤维复合材料后顶盖质量与传统钢材相比减少了 58.2%。

关键词: 碳纤维复合材料; 汽车顶盖; 雪压分析; 抗凹分析

Snow Load and Dent Resistance Analysis of Carbon Fiber Roof Based on ABAQUS

Xiao Zhi, Du Qingyong, Mo Fuhao*, Xing Yang, Li Bei

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturer for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China, 410082

Abstract: With the trend of energy conservation and emission reduction, lightweight requirements of automotive parts are become higher and higher, and the carbon fiber reinforced composite has gradually become an ideal substitute material for their advantages of lightweight, lower density, higher specific stiffness and higher specific strength. The mechanical property of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) as well as snow load simulation and dent resistance analysis of carbon fiber roof are invested in this paper. And also the stress-strain curves of tension and three-point bend test obtained from finite element method were compared with the results of an experimental case study. The results are within the coefficient of variation of the experiments values. Also the carbon fiber roof which consists of there-plies plain weaves can satisfy the stiffness requirements of snow load simulation and dent resistance analysis. And 58.2% reduction of roof weight is achieved using the carbon fiber reinforced polymer compared to steel counterpart.

Keywords: CFRP; automotive roof; snow load analysis; dent resistance analysis

1 引言

汽车轻量化技术能够有效降低燃油消耗、减少废气排放, 提高汽车的节能性与环保性。研究表明, 汽车整车重量降低 10%, 燃油效率可提高 6%~8%^[1], 汽车装备质量每减少 100 公斤, 百公里油耗可降低 0.3~0.6 升, 二氧化碳排放可减少 8~11g。而碳纤维复合材料是一种高强度复合材料, 与传统钢材相比, 密度要比钢材低 4 倍左右, 碳纤维复合材料车身质量是钢材的 25%, 但强度是钢材的 10 倍, 可以看出碳纤维复合材料在众多轻量化材料中具有较高的比强度, 比刚度, 轻量化效果较为明显, 在航空航天、军工产品中得到了广泛的应用^[2]。随着技术的发展, 碳纤维复合材料开始逐渐应用于汽车车身结构当中, 减重效果尤为明显, 比钢铁减轻 50%, 比铝材减轻 30%, 因此得到国内外各大汽车公司的广泛青睐。

车身覆盖件在使用过程中, 如果刚度不足, 在高速行驶的过程中可能会出现振动和噪音, 影响汽车的使用性能。汽车顶盖尺寸较大, 在汽车整个寿命周期历程中常常会受到外界载荷的作用, 容易在载荷的作用下发生凹陷或者永久变形^[3]。而汽车顶盖的局部抗凹性能是反映顶盖刚度性能的重要指标, 因此对汽车顶盖进行抗凹分析是评价和反映覆盖件表面质量和使用性能的一项重要方法, 越来越受到设计部门的重视。

此外, 乘用车顶盖主要由薄壁板件和顶盖横梁组成, 在设计过程中汽车顶盖除了对刚度模态有一定的要求之外, 对其承受积雪载荷的能力也有一定的要求。特别是近年极端天气多发, 各地频繁遭受特大暴雪袭击, 汽

车顶盖经过雪压载荷后能否恢复变形逐渐为人们所关注^[4]。本文根据汽车顶盖在室外积雪过程的实际情况，将一个复杂的非线性动载模拟简化为分布均匀加载的静态刚度试验模拟系统。将乘用车顶盖积雪这一随机过程量化，通过分析加载前后顶盖位移变化来评判顶盖在积雪过程中是否出现了永久变形及屈曲现象，进而为正向开发设计提供一定的技术支持，也为汽车顶盖更好的适应实际工况做一定的指导。

本文基于有限元分析软件并结合某汽车公司要求，使用隐式静态几何非线性算法，考虑了几何非线性、边界条件非线性和卸载后的残余变形，对某车型碳纤维顶盖进行了雪压屈曲分析、静态抗凹性能分析，了解碳纤维顶盖的承载及变形能力，判断所选碳纤维材料是否满足汽车顶盖所需要的刚度要求。

2 碳纤维顶盖有限元模型

2.1 碳纤维材料力学试验及性能分析

在碳纤维材料力学性能测定试验中，原材料选用江苏宏发纵横生产的碳纤维织物 CC-P200-3、CC-P400-12 及上海惠柏新材生产的环氧树脂 LTC-6010A/B，通过真空辅助成型工艺制备碳纤维复合材料板材，如图 1 所示。根据 GB/T 3354-1999 及 GB 1449-2005 分别对板材进行了拉伸和三点弯曲试样的裁剪，并使用微机控制电子万能试验机 CMT5105 及 CMT4304 分别进行了碳纤维复合材料拉伸和三点弯曲性能测定试验，最后通过有限元分析软件 Ls-Dyna 对材料进行力学性能分析，并与试验结果进行了对比，使得分析所得材料力学性能参数能够同时满足拉伸和三点弯曲试验，最后将材料参数应用到汽车碳纤维顶盖的分析当中，具体如图 2、图 3 所示。在使用 Ls-Dyna 分析中，通过定义壳单元沿厚度方向的积分点数量来定义复合材料铺层数量，一个积分点代表一层复合材料铺层，每个积分点处的材料坐标系旋转角度代表单层碳纤维的铺层方向角^[5]。本文在复合材料模拟的过程选用 54 号本构模型进行了模拟仿真，铺层方式为[0/90]₄，失效方式为 Chang-Chang 失效准则^[6,7]，该准则包含了四种失效准则，即纤维拉伸破坏，纤维压缩破坏，基体开裂和基体挤压^[8]。

对于拉伸纤维模式 $\sigma_{11} > 0$ ，则 $E_1 = E_2 = E_{12} = \mu_{12} = \mu_{21} = 0$ 且判断

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{F_2^{tu}} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{F_{12}^{su}} \right)^2 \begin{cases} \geq 1 & \text{failed} \\ < 1 & \text{elastic} \end{cases} \quad (1)$$

对于压缩纤维模式 $\sigma_{11} \leq 0$ ，则 $E_1 = \mu_{12} = \mu_{21} = 0$ 且判断

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{F_1^{cu}} \right)^2 \begin{cases} \geq 1 & \text{failed} \\ < 1 & \text{elastic} \end{cases} \quad (2)$$

对于拉伸基体模式 $\sigma_{22} > 0$ ，则 $E_2 = \mu_{21} = G_{12} = 0$ 且判断

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{F_2^{tu}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{F_{12}^{su}} \right)^2 \begin{cases} \geq 1 & \text{failed} \\ < 1 & \text{elastic} \end{cases} \quad (3)$$

对于压缩基体模式 $\sigma_{22} \leq 0$ ，则 $E_2 = \mu_{21} = \mu_{12} = G_{12} = 0$ 且判断

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2F_{12}^{su}} \right)^2 + \left[\left(\frac{F_2^{cu}}{2F_{12}^{su}} \right) - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{F_2^{cu}} \left(\frac{\sigma_{12}}{F_{12}^{su}} \right)^2 \begin{cases} \geq 1 & \text{failed} \\ < 1 & \text{elastic} \end{cases} \quad (4)$$

式中“1”表示纤维方向，“2”表示垂直于纤维方向， σ 表示应力， e_f 、 e_m 、 e_d 、 e_c 分别表示各模式下判断失效与否的参数。

Ls-Dyna 分析所得曲线与试验曲线进行了对比，对标曲线如图 4 所示，分析产生误差均处于允许范围之内，

满足应用要求。

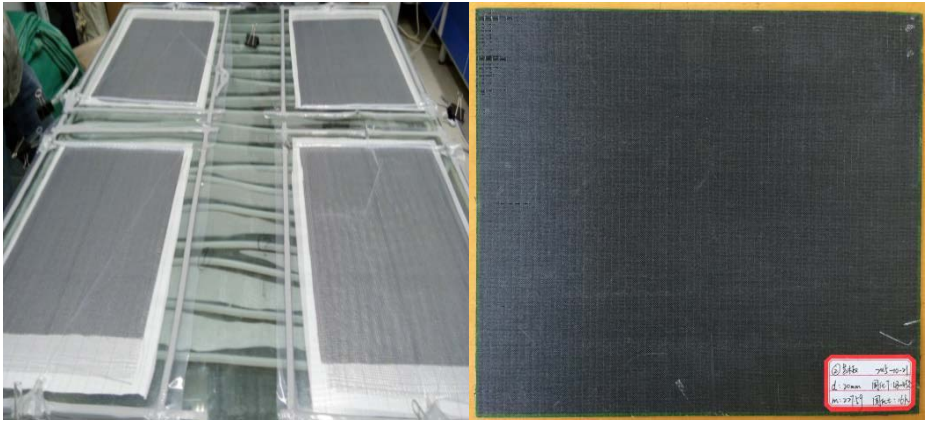


Figure 1. The preparation of CFRP plate

图 1 碳纤维板材制备

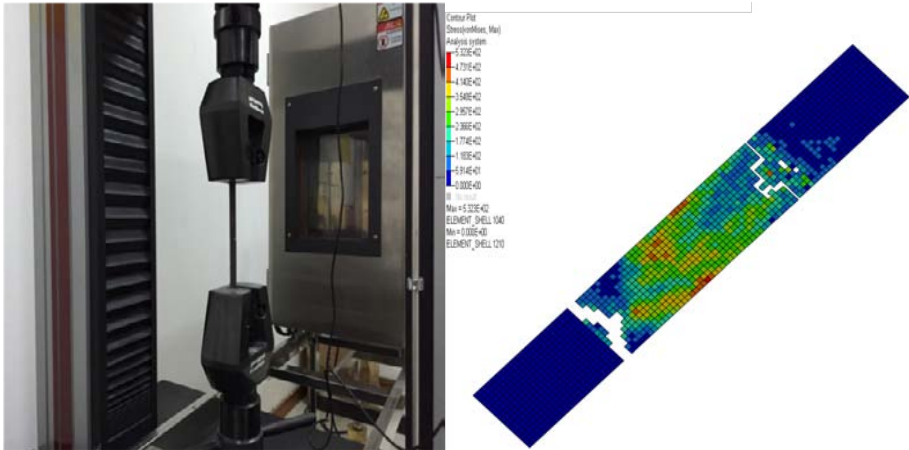


Figure 2. Tension test and simulation of CFRP

图 2 碳纤维复合材料拉伸试验及仿真分析

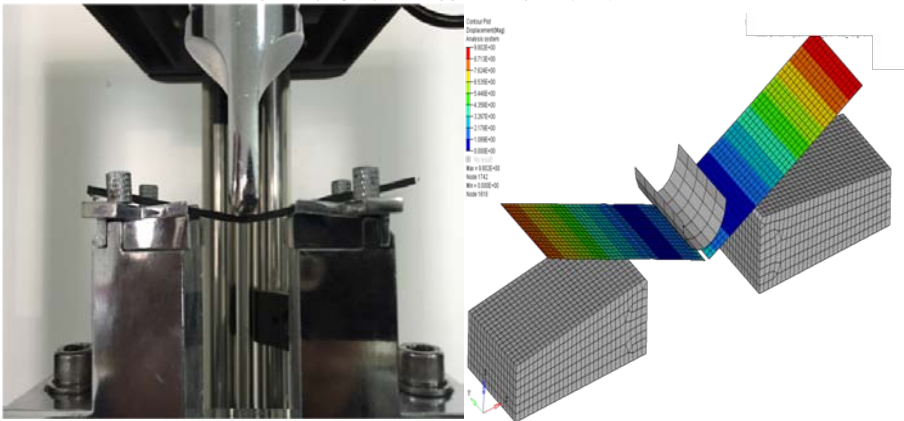


Figure 3. Three-point bend test and simulation of CFRP

图 3 碳纤维复合材料三点弯曲试验及仿真分析

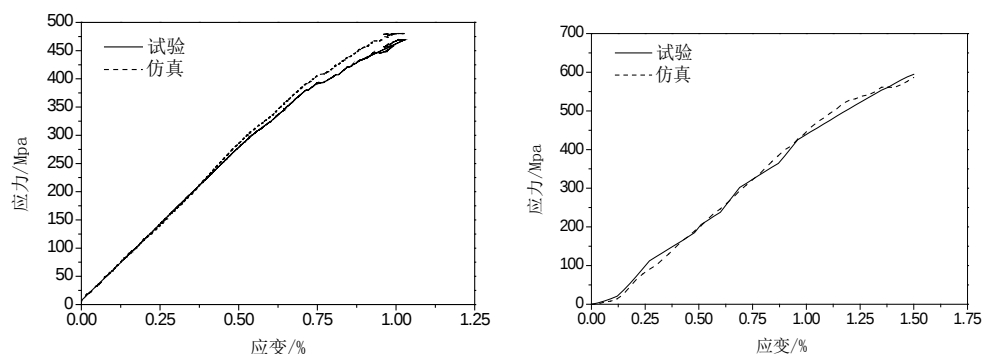


Figure 4. Stress-strain curves for tension and three-point bend test compared with simulation

图 4 碳纤维材料拉伸和三点弯曲应力应变对标曲线

2.2 碳纤维顶盖雪压分析模型建立

根据某汽车厂对汽车顶盖雪压分析要求及汽车顶盖的实际受载情况,将 CATIA 模型导入到 Hypermesh 中,并进行几何清理,在 Hypermesh 中截取汽车顶盖以下 600mm 作为分析研究对象,网格基本尺寸为 5mm×5mm,共有单元数量为 268054,对车身侧围截断位置约束 X, Y, Z 三个方向的平动,同时对碳纤维顶盖采用 3 个 step 分别进行加载,具体加载形式为:在 step1 施加重力,在 step2 施加 1.28kPa 面压,模拟在积雪厚度为 55cm 时顶盖沿 Z 轴方向均布受压情形,在 step3 卸掉外板压力载荷,分析目标为碳纤维顶盖在雪压的作用下不发生屈曲现象,雪压分析有限元模型如图 5 所示。

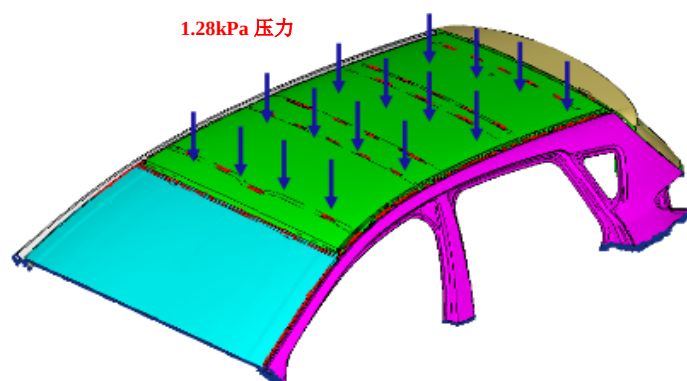


Figure 5. Finite element model of snow load analysis

图 5 碳纤维顶盖雪压分析有限元模型

2.3 碳纤维顶盖抗凹分析模型建立

以碳纤维顶盖雪压分析模型为基础,建立碳纤维顶盖抗凹分析有限元模型。其中,抗凹选用圆形压头直径为 120mm,将车身侧围截断位置约束 X, Y, Z 三个方向的平动和转动,而后在碳纤维顶盖薄弱区域建立刚性压头与碳纤维顶盖之间的接触关系,并且在 12 个分析点处建立垂直于碳纤维顶盖外板的局部坐标系, Z 方向垂直于顶盖向上。在局部坐标系下对刚性压头施加约束除 Z 向平动外的 5 个自由度,同时在局部坐标系下对压头沿局部坐标系 Z 轴负方向施加 100N 的载荷,判断加载点在 100N 载荷作用下的变形,要求最大位移变形量小于 5mm,有限元模型如图 6 所示。

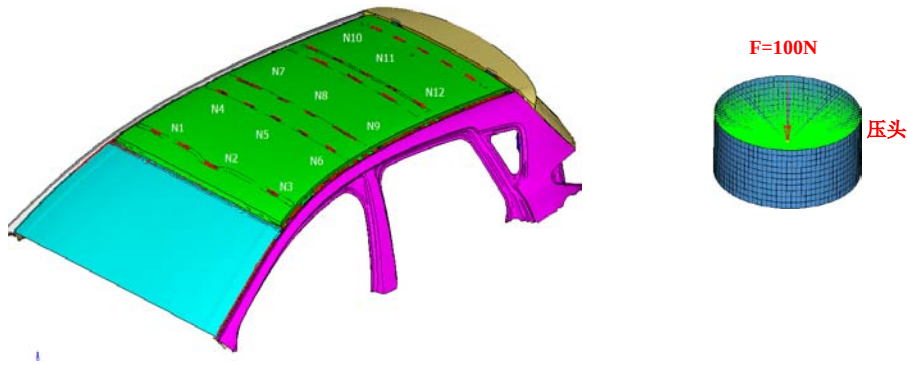


Figure 6. Finite element model of dent resistance analysis

图 6 碳纤维顶盖抗凹分析有限元模型

3 碳纤维顶盖数值计算

3.1 两层碳纤维顶盖雪压分析

考虑到碳纤维顶盖制造成本及汽车轻量化要求，在初步设计阶段采用两层平纹织物作为环氧树脂的增强体材料，厚度约为 1.0mm，进行了有限元分析。分析结果表明，两层碳纤维复合材料制备的顶盖在加载过程中出现随着加载进行到 step2，顶盖变形量有一个明显的激增、骤然下降而后激增的震荡过程，其中最大变形量为 19.8mm。这一过程表明，顶盖在受载过程中出现了翻转、大变形，无法满足刚度要求，step2 位移变化简略过程及顶盖初始变形量最大节点处位移随时间变化曲线如图 7 所示。

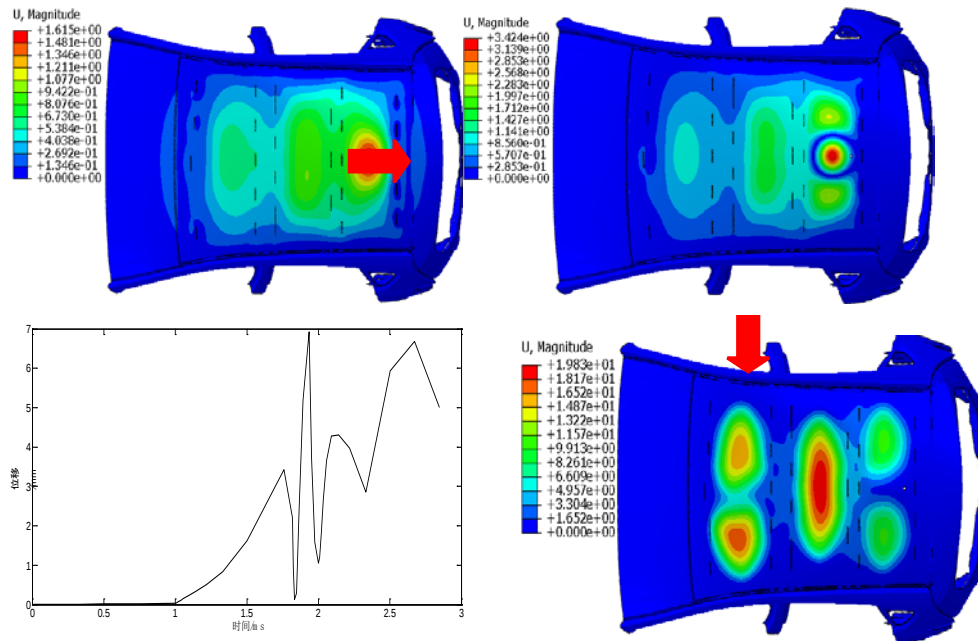


Figure 7. Deformation progress of step 2 of two-ply carbon fiber roof

图 7 两层碳纤维顶盖 step2 变形过程

3.2 碳纤维顶盖雪压分析铺层优化

根据两层碳纤维复合材料计算结果可知，在顶盖受载过程中该方案设置无法满足相应的雪压分析要求，故在考虑成本与相应刚度要求的过程中，选择增加一层碳纤维织物，即碳纤维复合材料选择三层平纹织物，厚度为 1.5mm，进行优化分析。分析结果表明，三层碳纤维织物顶盖在进行有限元分析计算的过程中，step2 顶盖最

大变形量为 1.922mm，与钢制顶盖分析结果 0.769mm（如图 9 所示）对比可以发现，虽然变形量大于钢制顶盖变形量，但是变形依然处于弹性范围之内，未出现屈曲现象，且可以看出在三层碳纤维顶盖的整个分析过程中，位移变化趋势相对于两层碳纤维顶盖较为稳定，因此判断三层碳纤维顶盖未出现类似于两层碳纤维顶盖出现的较为明显的屈曲现象，刚度能够满足相关要求，step2 最终位移云图及顶盖初始变形量最大节点位移随时间变化曲线如图 8 所示。

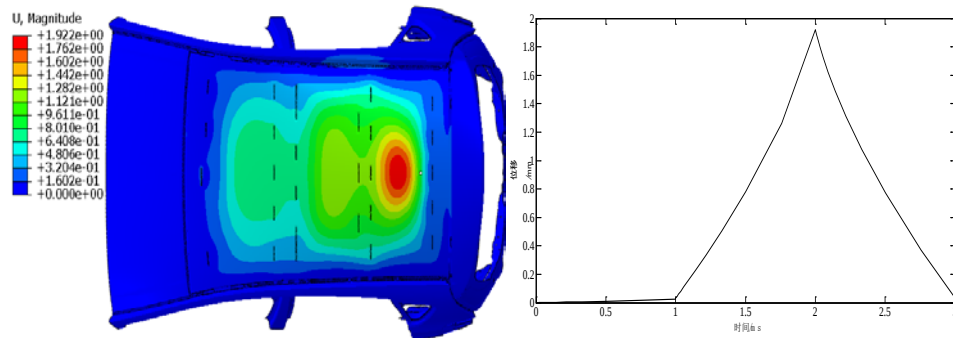


Figure 8. The analysis results of two-ply carbon fiber roof

图 8 三层碳纤维顶盖分析结果

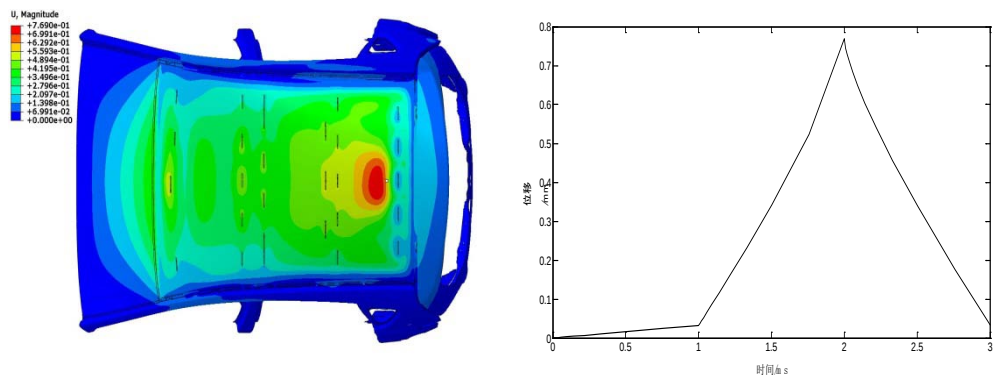


Figure 9. The analysis results of steel roof

图 9 钢制顶盖分析结果

3.3 碳纤维顶盖抗凹分析

根据雪压分析选取三层碳纤维顶盖作为抗凹分析研究对象，并与钢制顶盖抗凹分析进行了对比。根据已分析完毕的雪压分析结果，选取 12 个变形量相对较大的位置作为抗凹分析测试点，其中最大变形量为 3.869mm，与分析目标值 5mm 相比较仍有较大变形空间，满足抗凹性能要求。各个采样点具体分析测试结果如下表 1 所示

Table 1. The results of dent resistance analysis

表 1 碳纤维顶盖抗凹分析结果

Point	顶盖类型		目标值/mm
	碳纤维顶盖分析值	钢制顶盖分析值	
1	2.782	1.014	5
2	2.684	0.978	5
3	2.835	0.949	5
4	2.440	4.288	5
5	2.886	4.334	5
6	3.021	4.402	5
7	2.374	3.771	5
8	3.325	3.821	5
9	3.306	4.103	5
10	3.621	3.537	5
11	3.671	3.867	5
12	3.869	3.738	5

4 结论

本文通过对碳纤维复合材料的力学性能分析，得出能够同时满足碳纤维复合材料拉伸和三点弯曲试验的力学性能参数，并将分析所得拉伸及三点弯曲应力应变曲线与试验测得应力应变曲线进行了对比，结果表明分析曲线与试验曲线趋势基本一致，材料失效位置处于误差允许范围之内。此外，本文将分析所得材料参数应用到汽车顶盖的雪压分析和抗凹性能分析当中，分析结果表明，两层碳纤维顶盖无法满足相关要求，三层碳纤维顶盖能够同时满足雪压和抗凹分析要求。同时，使用碳纤维材料后顶盖质量由原来的 10.3kg 降低到 4.3kg，减少了 58.2%，减重效果较为明显。

参考文献

- [1] Joseph C, Benedyk K. Light metals in automotive applications. Light Metal Age, 2000, 10(2): 34-35
- [2] 张强. 碳纤维复合材料汽车引擎盖的设计和工艺研究[D]. 武汉理工大学, 2014.
- [3] 李佩, 廖毅, 刘乐平. 车身外覆盖件抗凹性的分析及改进[J]. 企业科技与发展, 2014, 09: 35-36+39.
- [4] 金常忠, 马东宇, 王朋波. 基于 Gap 单元的汽车顶盖抗凹分析新方法[C]// 第八届中国 CAE 工程分析技术年会暨 2012 全国计算机辅助工程 (CAE) 技术与应用高级研讨会论文集. 2012.
- [5] 杨旭静, 张振明, 郑娟, 段书用. 复合材料前防撞梁变截面多工况多目标优化设计[J]. 汽车工程, 2015, 10: 1130-1137+1143.
- [6] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[G]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [7] 张振明. 变厚度复合材料汽车防撞梁优化设计研究[D]. 湖南大学, 2014.
- [8] Feraboli P, Wade B, Deleo F, et al. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2011, 42(11): 1809-1825.