

# 基于 ABAQUS 的碳纤维复合材料轨道车辆车门设计

蔡继文<sup>1a</sup>, 贡智兵<sup>2</sup>, 陶杨洋<sup>1b</sup>

(1. 南京航空航天大学 a. 机电学院; b. 材料学院; 江苏 南京 210016; 2. 南京康尼机电股份有限公司, 江苏 南京 210038)

**摘 要:** 碳纤维具有较高的比强度, 可以实现轨道交通的轻量化需求。采用对称铺层方式对轨道车辆车门用碳纤维层合板的铺层形式进行了设计, 并且对层合板进行冲击仿真, 发现在内蒙皮的上铺层中最大应力达到 178.5 MPa。通过损伤分析发现各向同性的单层板发生损伤的面积比有铺设角度的各向异性单层板更大。在此基础上设计了碳纤维蜂窝夹芯门板, 对门板进行弯曲仿真。结果表明, 最大应力出现在蜂窝的边角上, 达到了 246.5 MPa; 而碳纤维层合板的应力分布均较小, 最大值只有 40.03 MPa。

**关键词:** ABAQUS; 碳纤维复合材料; 轨道交通; 车门

**中图分类号:** U260.32    **文献标志码:** B    **文章编号:** 1671-5276(2020)06-0124-04

## Car Door Design of Carbon Fiber Composite Rail Vehicle Based on ABAQUS

CAI Jiwen<sup>1a</sup>, GONG Zhibing<sup>2</sup>, TAO Yangyang<sup>1b</sup>

(1a. College of Mechanical and Electrical Engineering,

1b. College of Material science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing Kangni Mechanical and Electrical Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

**Abstract:** Carbon fiber is characteristic of high specific strength, the rail vehicle made of it meets the lightweight demand. The symmetrical lay-up method is used to form the carbon fiber laminates for rail vehicle doors, and the laminates are subjected to the simulated impact. It is found that the maximum stress in the upper cladding of the inner skin is up to 178.5 MPa. Through the damage analysis, it is found that the damaged area of isotropic single-layer board is larger than one of anisotropic single-layer boards with laying angles. Based on this, a carbon fiber honeycomb sandwich door panel is designed, and the bending simulation of the door panel is done. The results show that the maximum stress appearing at the corners of the honeycomb is up to 246.5 MPa; while the stress distribution of the carbon fiber laminates is small, its maximum value is only 40.03 MPa.

**Keywords:** ABAQUS; carbon fiber composite; rail transit; car door

## 0 引言

碳纤维具有密度小、比模量高、比强度高以及良好的抗震性能等优点, 且具有良好的可设计性而被应用于车辆的传动部件中, 并且能够满足轨道客车轻量化的要求而被逐渐应用于轨道客车中<sup>[1-2]</sup>。不同的铺层角度以及堆叠顺序对碳纤维板的力学性能影响很大<sup>[3]</sup>, 而碳纤维复合材料良好的设计性就体现在不同的铺层角度以及堆叠顺序上。何坤等<sup>[4]</sup>对无人机机身进行了 3 个阶段(铺层厚度、铺层层数、铺层顺序)的复合材料非均匀铺层优化设计, 发现在满足力学性能以及工艺要求的前提下, 采用非均匀铺层优化设计方法比均匀铺层优化设计方法所设计的轻了 50%。徐作文等<sup>[5]</sup>对汽车前车门进行碳纤维结构以及铺层设计, 对门板进行不同铺层形式研究, 并且进行了一阶弯曲和扭转模态分析以及侧面碰撞分析, 发现不同铺层形式的车前门在刚度以及强度上均比金属门的性能好, 在碰撞方面能够满足标准规定的性能要求, 并使车门整体达到 54.94% 的减重。在螺母轴向方向取了 3 个测试

截面进行了螺母表面残余应力测试分析, 通过对不同截面以及螺母整体残余应力的显著性分析, 得出较为优异的喷丸强化工艺参数。肖志等<sup>[6]</sup>进行了汽车顶盖连续碳纤维增强复合材料铺层优化, 通过自由尺寸优化、尺寸优化以及层组优化, 并且在满足工艺约束与制件刚度的情况下, 使得汽车顶盖的质量减轻了 59.3%。要实现轨道客车的轻量化需求, 还需要对车门进行结构设计优化, 实现车门的轻量化。贾亚丽等<sup>[7]</sup>研究了碳纤维车门设计的关键技术, 认为为了满足车门的抗交变载荷以及冲击载荷的要求, 纤维铺设方向至少要有 0°、45°、-45°、90°方向的, 且通过理论计算发现蜂窝夹芯的碳纤维板比铝蒙皮具有更大的刚度以及更小的质量。

高速的轨道交通车辆, 空气阻力约占能耗的 70%, 实现车辆轻量化是降低能源消耗的重要手段。碳纤维复合材料密度是铝合金的 2/3, 可大幅降低车身自重。另外, 碳纤维复合材料构件的强度可超过高强度钢, 力学性能优异, 同时耐腐蚀、耐高温和阻燃, 可大幅提高车身安全性能。要实现车门的轻量化, 并且具备一定刚度和强度, 需要对车门的结构进行优化设计。

本次研究基于 ABAQUS 的模型库,通过调用库中的冲击模型来进行不同铺层形式碳纤维层合板的应力分布以及损伤情况研究。实现碳纤维铺层形式的优化后,建立蜂窝夹芯碳纤维门板进行弯曲测试模型,并进行了蜂窝夹芯门板强度测试。

## 1 碳纤维层合板冲击模拟

### 1.1 铺层方案设计

为了避免碳纤维层合板的各向异性差异过大,通常采用对称铺层的方式。层合板的铺层方式如图 1 所示,其中外蒙皮采用 $[3K/\text{芳纶平纹} \times 3/(90/0)_c/\pm 45_c/\pm 45_c/(90/0)_c/\text{芳纶平纹} \times 3]$ 的铺层方式,内蒙皮采用 $[(90/0)_c/\pm 45_c/\text{芳纶平纹} \times 3/\pm 45_c/(0/90)_c]$ 的铺层方式,在内蒙皮和外蒙皮之间加入 55 mm 厚的 PMI 泡沫芯材。其中,铺层角度为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 的材料为 T700, $45^\circ$ 和 $-45^\circ$ 的材料为斜纹玻纤。

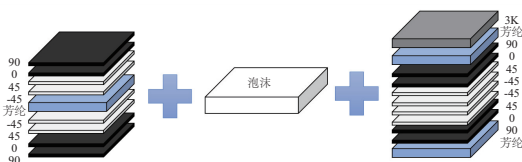


图 1 层合板铺层方式示意图

### 1.2 层合板冲击模型

碳纤维层合板子弹冲击模型如图 2 所示,其中子弹位于层合板中心位置,距离中心表面 $<1$  mm。在模拟过程中子弹设置为弹塑体,采用 Johnson-Cook 损伤准则对其冲击过程中发生的损伤进行模拟。对于层合板冲击后的损伤采用了修改后的三维 Hashin 准则和 Puck 准则,而层合板四周采用完全固定的方式,子弹弹头以 100 m/s 的速度向层合板冲击。

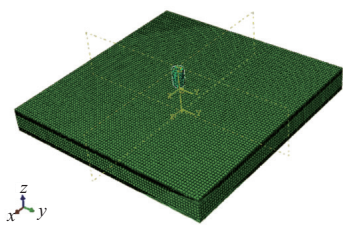


图 2 碳纤维层合板冲击有限元模型

### 1.3 材料的本构模型

所设计的碳纤维层合板中,3K 即为 T300,芳纶平纹采用 K49,铺层角度为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 的材料为 T700, $45^\circ$ 和 $-45^\circ$ 的材料为斜纹玻纤,其力学性能如表 1 所示;泡沫芯材采用 $52 \text{ kg/m}^3$ 的 PMI 材质,力学性能如表 2 所示;在冲击模型中,子弹弹头采用 2024-T3 铝合金,其本构模型参数如表 3 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 材料力学性能参数

| 材料参数       | 材料      |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|
|            | T300    | K49     | T700    | 斜纹玻纤    |
| 轴向弹性模量/GPa | 71      | 35      | 125     | 43      |
| 径向弹性模量/GPa | 70.0    | 34.0    | 8.4     | 20.0    |
| 轴向拉伸强度/MPa | 834     | 521     | 2 500   | 583     |
| 轴向压缩强度/MPa | 870     | 346     | 1 400   | 693     |
| 径向拉伸强度/MPa | 837     | 451     | 35      | 86      |
| 径向压缩强度/MPa | 589     | 138     | 1 100   | 705     |
| 轴向泊松比      | 0.259 0 | 0.120 0 | 0.268 0 | 0.270 0 |
| 径向泊松比      | 0.129 0 | 0.233 0 | 0.095 6 | 0.061 0 |

表 2 PMI 材料力学性能参数

| 弹性模量/<br>MPa | 泊松比  | 拉伸强度/<br>MPa | 压缩强度/<br>MPa | 剪切强度/<br>MPa |
|--------------|------|--------------|--------------|--------------|
| 190          | 0.39 | 4.6          | 3.8          | 2.6          |

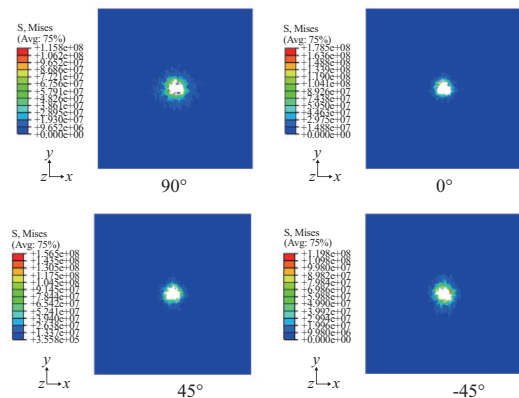
表 3 2024-T3 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数<sup>[9]</sup>

| A/MPa  | B/MPa  | C        | n       |
|--------|--------|----------|---------|
| 289.05 | 410.65 | 0.040 25 | 0.493 5 |

### 1.4 层合板冲击结果分析

#### 1) 层合板应力状态分析

图 3-图 4 显示了层合板各部分受到子弹冲击后的应力状态。从图 3-图 4 中可以看出,层合板被全部穿透,并且在相同的冲击载荷下,外蒙皮的应力比内蒙皮的应力小,内蒙皮的最大应力值达到了 178.5 MPa,出现在上铺层中的 $0^\circ$ 碳纤维铺层;外蒙皮的最大应力值为 152.2 MPa,出现在上铺层中的 $90^\circ$ 碳纤维铺层。在内蒙皮的上、下铺层中,对于 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 碳纤维层,上、下铺层的应力分布大小接近;对于 $90^\circ$ 和 $-45^\circ$ 碳纤维层,下铺层应力均大于上铺层。在外蒙皮的上、下铺层中,对于 $90^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $-45^\circ$ 碳纤维层,上铺层应力均大于下铺层;对于 $45^\circ$ 碳纤维层,上铺层应力小于下铺层;并且下铺层中各铺层角度的碳纤维层应力大小接近。



(a) 对称铺层上铺层

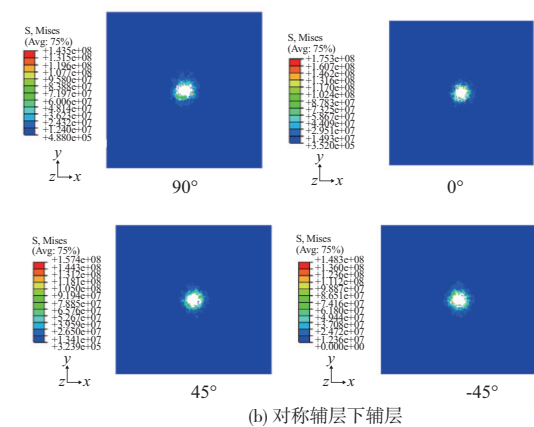


图3 内蒙皮应力云图

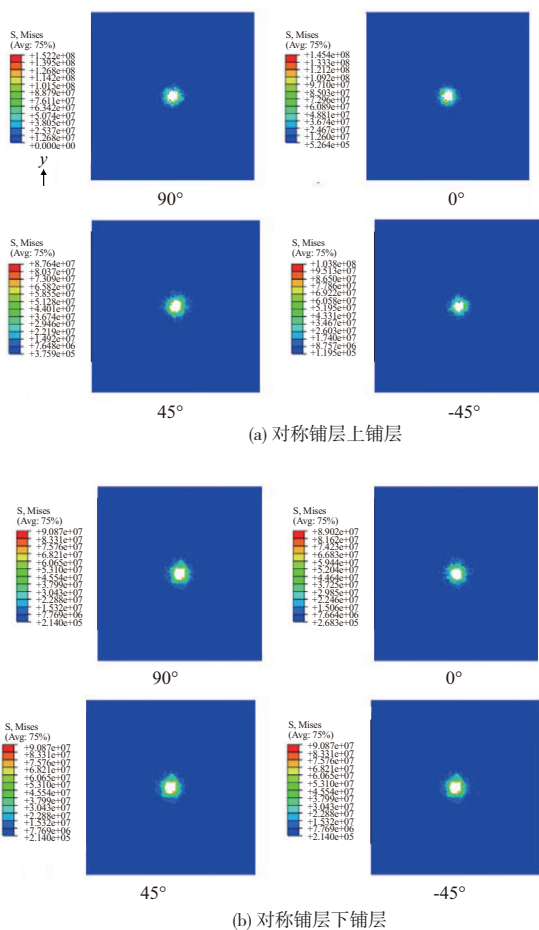


图4 外蒙皮应力云图

## 2) 层合板损伤状态分析

图5~图7显示层合板各部分和子弹冲击后的损伤状态。从图5~图7中可以看出,相对于各向异性有铺设角度的单层板而言,各向同性的单层板发生损伤的面积更大。另外从最先受到冲击的3K损伤图7(a)发现,除受冲击的地方,在完全固定的两端也出现损伤,这表明在冲击过程中可能会出现脱框的情况。另外,从图7(f)可以发现,子弹在模拟过程中,相对于层合板而言,几乎不出现损伤。

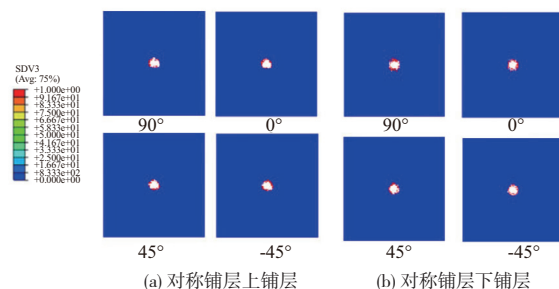


图5 内蒙皮损伤云图

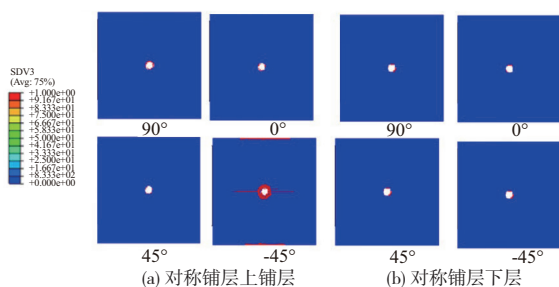


图6 外蒙皮损伤云图

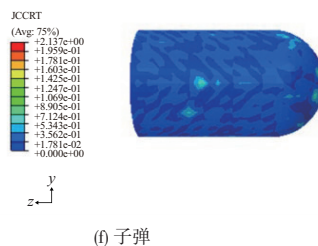
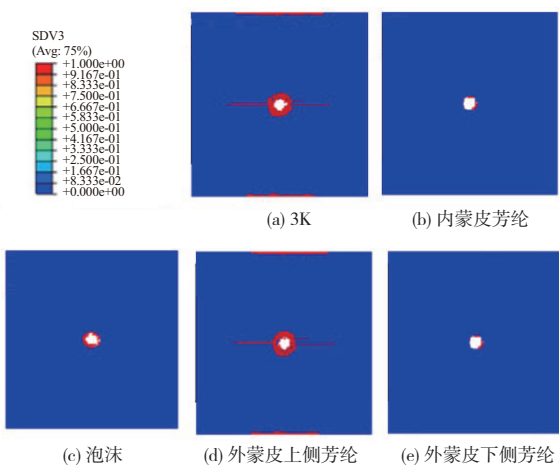


图7 其余部分损伤云图

## 2 碳纤维门板弯曲模拟

### 2.1 碳纤维门板弯曲模型

建立碳纤维门板弯曲测试的有限元模型,如图8所示。其中,门板的上、下以及四周表面采用第1节所述铺

层形式的碳纤维层合板,中间采用铝蜂窝进行填充。采用三点弯曲测试方法对门板的强度进行测试。

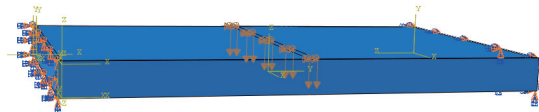


图8 碳纤维门板弯曲测试有限元模型

## 2.2 碳纤维门板弯曲测试结果分析

门板弯曲仿真结果如图9所示。从图9中可以看出,在层合板的两侧中间部位的应力最大,上侧层合板的最大应力值达到 35.25 MPa,下侧层合板的最大应力值达到 40.03 MPa。上侧层合板中间部位的应力最小,下侧层合板中间部位应力较大,约为 27~30 MPa。从图9(b)铝蜂窝的应力分布来看,在蜂窝的中间以及4个角落存在较大的应力分布,且最大值达到了 246.5 MPa。

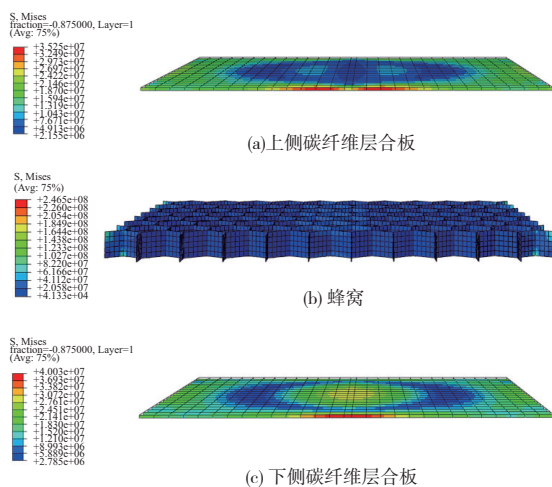


图9 门板弯曲仿真结果

## 3 结语

对碳纤维层合板的铺层形式进行了设计,内蒙皮采用

[3K/芳纶平纹×3/(90/0)<sub>G</sub>/±45<sub>C</sub>/±45<sub>C</sub>/(90/0)<sub>G</sub>/芳纶平纹×3],内蒙皮采用[(90/0)<sub>G</sub>/±45<sub>C</sub>/芳纶平纹×3/±45<sub>C</sub>/(0/90)<sub>G</sub>],并且对设计的层合板进行了冲击仿真,观察层合板各部分的应力分布以及损伤状态,采用所设计的层合板与铝蜂窝进行了蜂窝夹芯门板弯曲仿真,得到如下结论:

1) 在碳纤维层合板的冲击仿真中,发现子弹穿透层合板应力的最大值出现在内蒙皮的上铺层中,铺层角度为0°的碳纤维层应力达到了 178.5 MPa,而内蒙皮的最大应力值为 152.2 MPa;

2) 在碳纤维层合板的冲击仿真中,发现相对于各向异性有铺设角度的单层板而言,各向同性的单层板发生损伤的面积更大,并且除了受冲击的地方,在完全固定的两端也出现损伤;

3) 在碳纤维蜂窝夹芯门板弯曲仿真中,发现最大应力出现在蜂窝的边角上,达到了 246.5 MPa,上侧层合板的最大应力值达到了 35.25 MPa,下侧层合板的最大应力值达到了 40.03 MPa。上侧层合板中间部位的应力最小,下侧层合板的中间部位应力较大,约为 27~30 MPa。

### 参考文献:

- [1] 施琪,吴亚平,王利霞,等. 碳纤维复合材料层合板抗弯性能试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2009,28(4): 58-60.
- [2] 王珂,程磊,董建娜,等. 不同纤维铺层方式对环氧玻璃钢层合板力学性能的影响[C]// 北京:中国化学会第28届学术年会第7分会场摘要集,2012.
- [3] 吕超,徐艳英,王志,等. 铺层方式对碳纤维/环氧材料性能的影响[J]. 消防科学与技术,2018,37(9): 19-21.
- [4] 何坤,刘强. 碳纤维复合材料无人机机身铺层优化设计[J]. 中国设备工程,2018,393(8): 91-93.
- [5] 徐作文,陈伟,赵春. 碳纤维复合材料汽车前车门轻量化设计与分析[J]. 科技创新与应用,2018,256(36): 85-87.
- [6] 肖志,杜庆勇,莫富源,等. 连续碳纤维增强复合材料汽车顶盖铺层优化[J]. 汽车工程,2017(6): 120-126.
- [7] 贾亚丽,赵刚,曾宇,等. 碳纤维复合材料轨道车辆车门设计关键技术研究[J]. 机械制造,2018,56(11): 23-25,30.
- [8] 刘富,张嘉振,童明波,等. 2024-T3 铝合金动力学实验及其平板鸟撞动态响应分析[J]. 振动与冲击,2014(4): 113-118.

收稿日期:2019-11-21

(上接第119页)

的六自由度数学模型。通过数学仿真和试验测量得出洗衣机筒体上一点对脱水振动的稳态响应,以此表征整个悬挂系统的振动。通过对比得到滚筒洗衣机在整个转速区间内的振幅变化趋势以及分析了造成二者出现差异的原因。同时明确了滚筒洗衣机在何种工况和转速区间会出现最大振动响应,为后续的仿真和试验提供了方向,可以指导滚筒洗衣机的减振研究。

### 参考文献:

- [1] 付素芳. 滚筒洗衣机动态特性建模与结构参数优化研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
- [2] 洪仲昆. 滚筒洗衣机悬挂系统优化设计[D]. 南京:东南大学,2015.

- [3] 范攀攀. 滚筒式洗衣机动力学特性分析与参数优化[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [4] 王豪,刘雷. 滚筒洗衣机悬挂系统动力学建模与试验[J]. 中国机械工程,2017,28(11): 1305-1311.
- [5] PINAR Boyraz, MUTLU Gündüz. Dynamic modeling of a horizontal washing machine and optimization of vibration characteristics using Genetic Algorithms[J]. Mechatronics,2013,23(6): 581-593.
- [6] 付素芳,张秋菊,安伟,等. 滚筒洗衣机悬挂系统动力学建模分析[J]. 机械设计与研究,2007(6): 109-112.
- [7] 王豪. 滚筒洗衣机悬挂系统动力学建模及减振技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

收稿日期:2019-11-14