

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.08.004

大学生方程式赛车碳纤维轮圈结构与优化

严择圆, 郭 巍, 鲁亚妮, 郝黎艳, 朱鹏屹

(武汉理工大学 a. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室;
b. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

摘要:大学生方程式赛车轮圈的轻量化设计对减轻簧下质量, 提高赛车性能有着重要意义。采用有限元法研究赛车碳纤维轮圈的轻量化设计, 对轮辐结构形式进行探究以寻求更高刚度, 在多工况条件下对设计方案铺层结构进行多步优化以实现质量的减轻。分析表明, 具有斜辐板设计的轮圈比直辐板轮圈有着更好的刚性; 碳纤维铺层厚度分区优化是实现轻量化的有效方法, 最终设计较原铝合金轮圈质量减轻 56%; 对碳纤维轮圈的结构优化使材料的最大应力和应变减小, 整体刚性提高 35%, 失效因子降低 8.1%。

关键词:碳纤维复合材料; 有限元分析; 轮圈; 轻量化设计

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)08-030-09

Design and optimization of carbon fiber rim structure of Formula SAE racing car

YAN Zeyuan, GUO Wei, LU Yani, HAO Liyan, ZHU Pengyu

(a. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components;
b. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: The lightweight design of the Formula SAE racing rim is important for reducing unsprung mass and improving the performance of the car. In this paper, the finite element method is used to study the lightweight design of carbon fiber rims of Formula SAE racing car. The spoke structure is explored to find higher stiffness, and multi-step optimization of the laminates structure under multiple operating conditions is implemented to reduce weight. The analysis shows that the rim with oblique spoke design have better stiffness than the straight spoke rim. The optimization of carbon fiber laminate thickness is an effective method to achieve lightweight, and the weight of the improved rim is reduced by 56% compared with that of the original aluminum alloy rim. The structural optimization of the rim can reduce the maximum stress and strain of the material, while increasing the wheel stiffness by 35% and reducing the failure factor by 8.1%.

Keywords: carbon fiber reinforced composite; finite element analysis; rim; lightweight design

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51605356); 2018 年国家级大学生创新创业训练计划资助项目(20181049707008); 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地资助项目(B17034)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605356), Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (20181049707008) and Overseas Expertise Introduction Project for Discipline Innovation (B17034).

作者简介: 严择圆 (1997—), 男, 武汉理工大学学生, 主要从事车辆空气动力学研究, (E-mail) 2251385893@whut.edu.cn。

通讯作者: 郭巍, 男, 武汉理工大学讲师, 博士, (E-mail) whutgw@126.com。

随着大学生方程式赛车(Formula SAE,简称 FSAE)基本机械结构的设计日趋成熟,轻量化以提高性能成为每支队伍争夺的高地^[1],目前在赛事中广泛运用的铝合金赛车轮圈普遍存在质量较大和性能过剩的问题^[2]。对赛车轮圈的轻量化设计不仅实现了赛车整车质量的减轻,还因减轻了簧下质量而更有效地提升了赛车性能^[3]。应用轻量化材料并对轮圈现有结构进行优化设计是实现 FSAE 赛车轮圈轻量化的有效方法^[4]。

碳纤维复合材料(CFRP)是轻量化新型材料的典型代表^[5],CFRP 在汽车结构中应用很多^[6],但在车轮结构上的研究和应用很少。文献[7]对比 CFRP 层合板三点弯曲试验与有限元仿真结果,表明可利用有限元技术进行 CFRP 层合板设计及优化;文献[8]根据车轮弯曲疲劳试验数据建立有限元模型,分析表明 CFRP 车轮在保证与铝合金车轮刚度相同的前提下质量更轻;文献[9]建立 CFRP 轮圈冲击试验有限元模型,分析结果表明 CFRP 车轮具有比铝合金车轮更优的抗冲击性能;文献[10]提出碳纤维材料应用“材料-结构”一体化问题,使用拓扑优化方法对 CFRP 车轮进行设计、优化、再设计流程的研究。虽然 CFRP 在汽车车轮上的应用有诸多优势,但 CFRP 车轮的设计资料大多被大型公司封闭。由于 FSAE 赛事的特点,赛车车轮不需要满足乘用车车轮严苛的测试标准,设计制造难度相对较小,轻量化空间相对更大^[11]。因此笔者将 CFRP 应用到 FSAE 赛车轮圈中,综合考虑轮圈的静态、动态载荷特性,利用有限元法设计优化轮圈结构,实现赛车的轻量化。

1 仿真模型

1.1 材料参数

仿真原材料为上纬(江苏)新材料有限公司生产的 2554 环氧树脂基 T300-3K 平纹碳纤维预浸料,单层厚度为 0.2 mm,材料性能参数由拉伸试验数据获得,如表 1 所示。在满足受力条件下,为简化设计、减少工作量,选取常用的 0°、±45°和 90°4 种典型纤维铺层方向,并定义轮圈结构的轴线方向为纤维 0°铺层方向,周向为 90°铺层方向,±45°为与 0°方向呈 45°夹角的方向。

表 1 材料性能参数

Table 1 Material performance parameters

单位面积 质量/ (g·m ⁻²)	树脂含量/ %	固化后 单层厚度/ mm	杨氏模量/ Pa	泊松比	剪切模量/ Pa	拉伸强度/ MPa	层间剪切 强度/ MPa
200	40~44	0.2	6.76e+10	0.037	1.8e+10	836.9	109.2

1.2 轮圈结构基本要求

轮圈的固定安装根据不同的 FSAE 赛车有着不同的要求,这里所用轮圈模型尺寸限制源于武汉理工大学 WUTE 车队现役 Keizer 铝合金轮圈,名义直径 254 mm,正偏距 52 mm,轮辋最小内径 112 mm。美国轮胎协会(TRA)数据要求工业标准金属制车用轮圈需有 21 项标准参数,这在 FSAE 赛事中是不必要的,因此将关键参数简化为 8 个以减少工作量,具体数据如图 1 所示。

1.3 载荷计算

有限元模型按 FSAE 赛车在赛道中行驶时的几种极限工况下轮圈的受力情况进行加载与约束,该项赛事中赛车的极限工况通常有以下 4 种:

- 1) 极限加速/制动——轮圈受纵向与垂直方向载荷;
- 2) 极限匀速转向——轮圈受横向与垂直方向载荷;
- 3) 极限加减速与转向结合——主要承受垂直方向与横向载荷;
- 4) 路面冲击——主要受垂直方向冲击。

车辆动态过程中的载荷转移情况可由式(1)和式(2)计算得到^[12],结合赛车传感器实地测试动态过程的极限加速度数据,仿真计算时对载荷数值向上取整以保留一定性能余量,最终确定用于仿真的加载情况如表 2 所示。

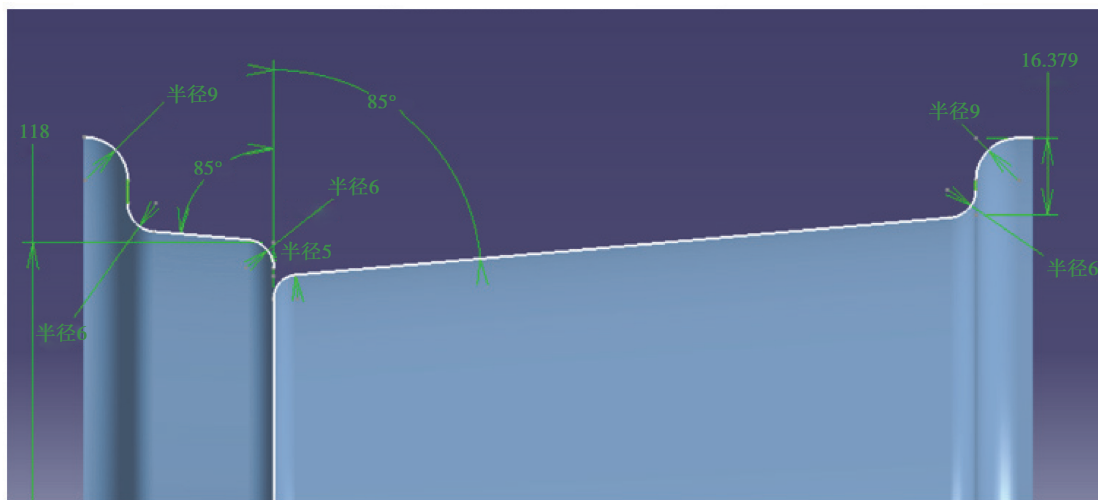
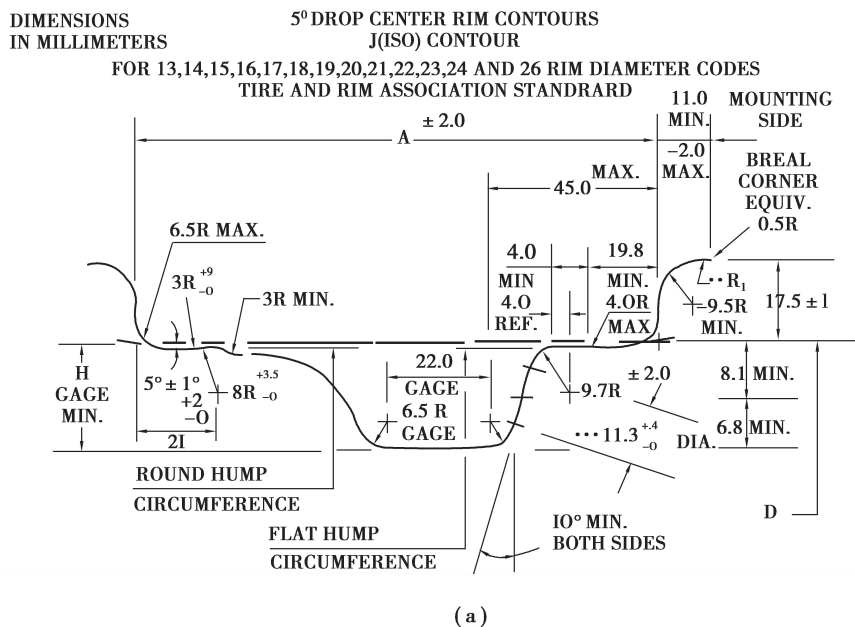


图 1 某种车用轮圈 TRA 标准(a)和简化后的轮圈模型设计草图(b)

Fig. 1 Some vehicle rim TRA standard (a) and simplified rim model design sketch (b)

$$\frac{\Delta W_F}{A_y} = \frac{W_s}{t_F} \left(\frac{H * K_F}{K_F + K_R} + \frac{b}{l} * Z_{RF} \right), \tag{1}$$

$$\frac{\Delta W_R}{A_y} = \frac{W_s}{t_R} \left(\frac{H * K_R}{K_F + F_R} + \frac{a}{l} * Z_{RR} \right), \tag{2}$$

式中: W_s 为整车质量; t_F, t_R 分别为前后轮轮距; H 为整车重心高度; K_F, K_R 分别为前后侧倾刚度; Z_{RF}, Z_{RR} 分别为前后侧倾中心高度。

表 2 仿真加载情况

Table 2 Simulation loading

方向	仿真加载力/N			
	极限转弯	极限加速或制动	加减速与转弯	冲击
纵向	0	1 500	1 250	0
横向	1 800	0	1 550	0
垂直向	1 600	1 000	1 500	2 200

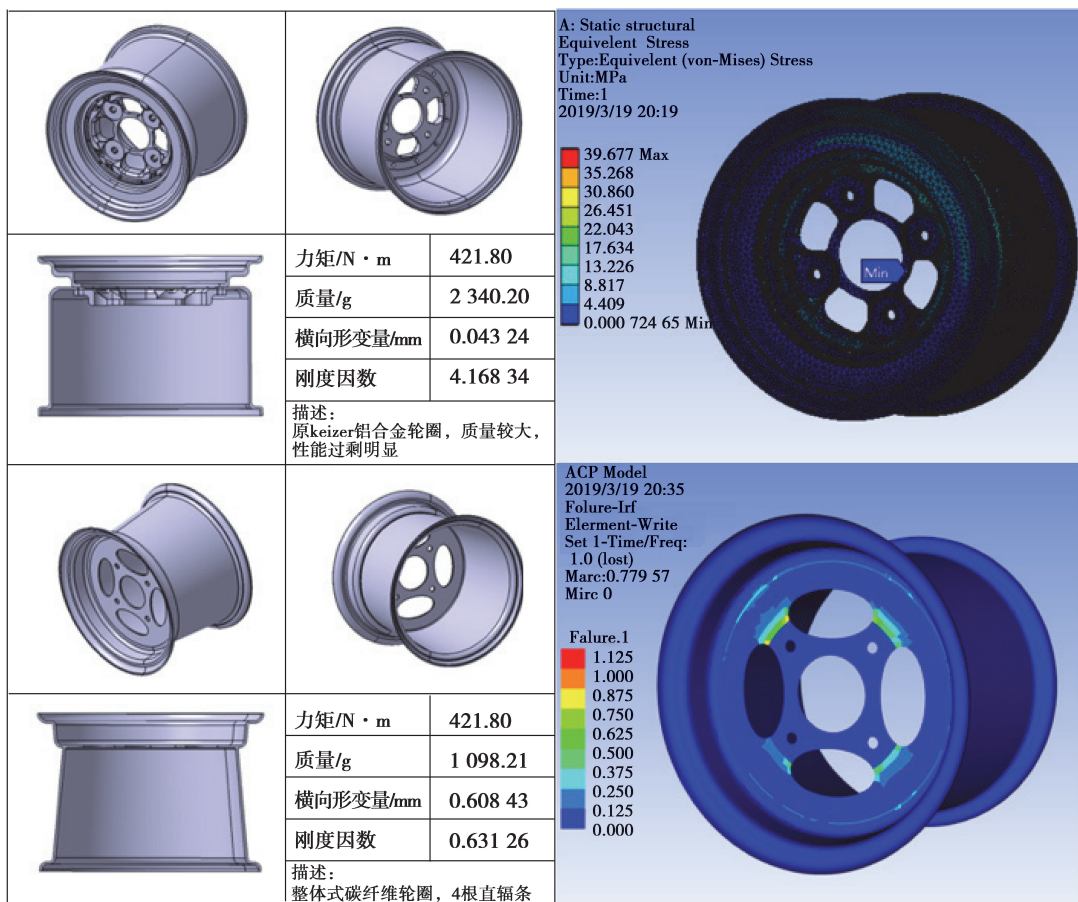
1.4 评价标准

此碳纤维轮圈设计为 FSAE 赛车专用,因此评价方式相较乘用车轮圈有所不同;赛车运行工况往往较为严苛,车辆机械结构的每一部分均以逼近极限为设计与优化的目标,轮圈本身的位移变形将导致车轮定位参数变化,从而影响到赛车操控,同时这一变形又是相对不可控的因素,因此需要尽可能减轻其影响,其中轮圈的横向变形位移量影响最大。故根据载荷情况、轮圈横向位移量和轮圈质量 3 个关键指标,建立了如式(3)所示的评价公式,用以评判设计与优化过程中各方案的优劣。

$$\text{刚度因数} = \frac{\text{所受弯矩}}{\text{轮圈质量} \times \text{最大横向位移量}} \quad (3)$$

2 结构设计

由于尺寸限制,设置轮圈结构设计的变量为中央辐板形式与数量,利用 ANSYS Composite PrePost 有限元模块进行仿真分析,使用 shell181 单元进行网格划分,网格节点总数 20 333,单元总数 19 889;失效判据采用蔡-吴失效准则,失效因子小于 1 则表示结构未被破坏。根据相关研究,将 1.3 节中的载荷施加在约 60°范围的胎圈座表面,按轮圈与轮毂的装配方式用 Bonded 方法约束 4 个螺栓孔和中心轮毂孔,并限制轮圈中心内表面的横向自由度。5 种碳纤维轮圈结构设计初始方案及其与原铝合金轮圈的对比结果如图 2 所示。



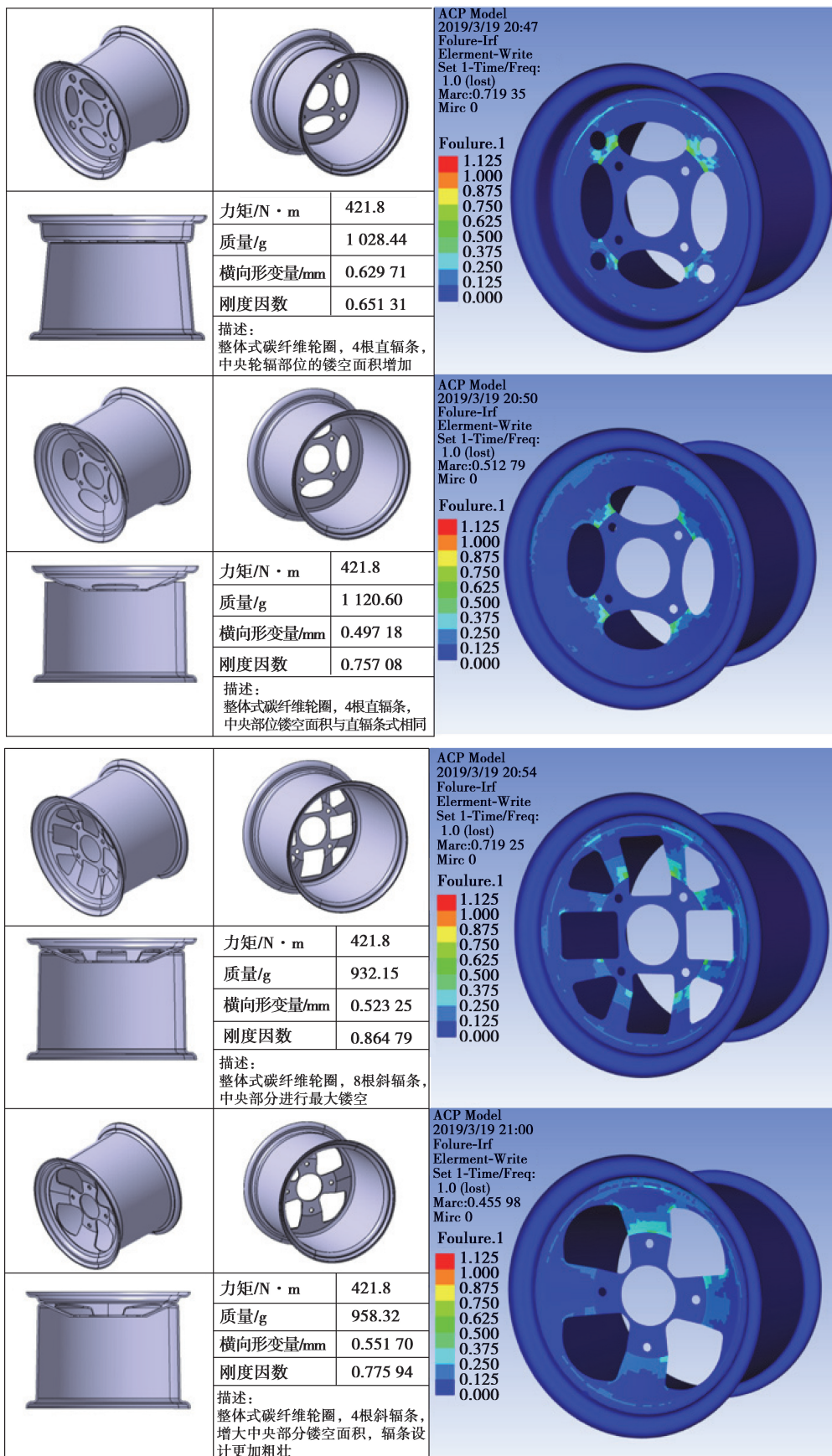


图 2 轮圈初始结构分析结果对比

Fig. 2 Analysis of initial structure of rim

表 3 轮圈分区铺层厚度优化结果

分区	优化厚度	选用厚度	0°铺层厚度	45°铺层厚度	90°铺层厚度	-45°铺层厚度
1	4.131	4.2	1.2	0.4	2.2	0.4
2	2.953	3.0	1.0	0.2	1.6	0.2
3	4.558	4.6	1.2	0.6	2.2	0.6

依据分区厚度优化结果需对轮圈结构进行重新设计,如图 5 所示,在分区边界处构造平滑过渡结构以避免厚度突变,在有限元模型中,力是通过面网格相应层节点进行传递,故铺层厚度突变不会对结果造成影响。

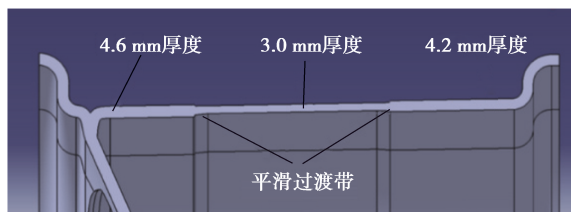


图 5 重新设计的轮圈横截面厚度分布

Fig. 5 Thickness distribution of redesigned rim cross-section

再以最大刚性为目标进行纤维铺层顺序优化。根据铺层顺序原则,同一方向纤维在厚度方向的铺设应具有均匀性,相邻的同一方向铺层一般不超过 4 层,因此设置铺层对称以保证其均衡性,减少工艺变形;设置同一方向相邻铺层数不超过 4 层;将±45°铺层设置在轮圈内、外表面以增强轮圈的抗冲击和抗压性能^[16-17]。经过 3 步迭代获得了如图 6 所示的最佳铺层顺序。

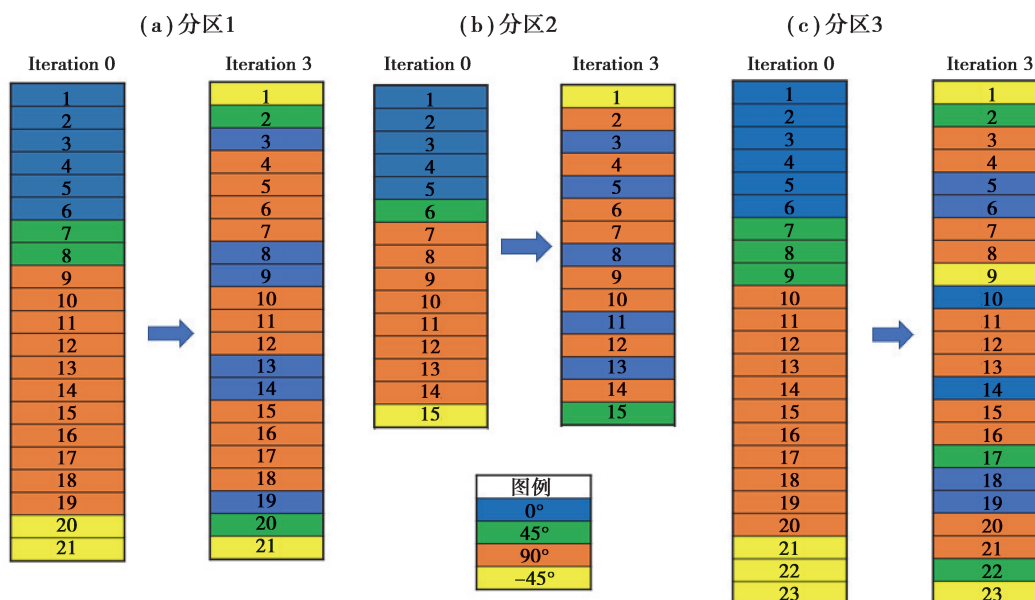


图 6 轮圈纤维铺层最佳顺序

Fig. 6 Optimal sequence of rim fiber layup

4 优化结果对比

将完成各阶段结构优化的碳纤维轮圈代入同一有限元静力学模型进行仿真,结果如表 4 和图 7 所示,其中编号 1~4 分别表示原铝合金轮圈、初始碳纤维轮圈、尺寸优化后碳纤维轮圈以及铺层顺序优化后碳纤维轮圈的分析结果。

表 4 各阶段结构优化参数值

Table 4 Structural optimization parameter values for each stage

工况	编号	最大应力/MPa	最大应变	横向最大位移/mm	轮圈质量/g	蔡-吴失效因子
极限转弯	1	39.68	2.36E-04	0.043 24	2 340.20	—
	2	91.11	1.51E-03	0.551 70	985.32	0.455 98
	3	58.27	8.30E-04	0.385 92	960.44	0.425 21
	4	57.43	8.18E-04	0.383 78	960.44	0.419 18
冲击	1	24.35	1.42E-04	0.036 55	2 340.20	—
	2	30.93	5.03E-04	0.140 14	985.32	0.134 08
	3	13.82	2.03E-04	0.100 70	960.44	0.138 55
	4	16.66	2.46E-05	0.099 24	960.44	0.131 83
加减速与转弯	1	36.28	2.16E-04	0.048 56	2 340.20	—
	2	94.81	1.50E-03	0.592 33	985.32	0.496 42
	3	61.19	8.64E-04	0.518 67	960.44	0.555 56
	4	59.16	8.35E-04	0.508 63	960.44	0.510 89
极限加速或 制动	1	29.92	1.64E-04	0.044 29	2 340.20	—
	2	21.89	3.48E-04	0.171 80	985.32	0.136 27
	3	20.10	2.86E-04	0.125 07	960.44	0.128 94
	4	19.82	2.82E-04	0.124 47	960.44	0.121 94

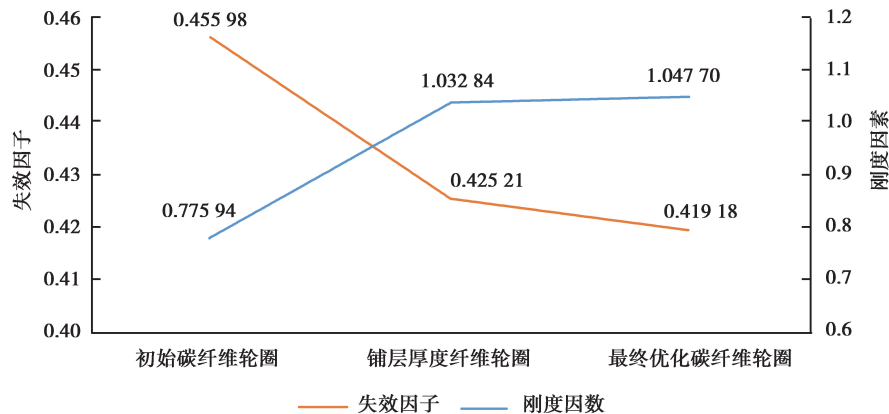


图 7 极限转弯工况结构优化各阶段重要参数变化折线图

Fig. 7 Structural optimization line chart of important parameters at each stage of cornering case

5 结 论

1) 原铝合金轮圈质量过大,最小安全因子大于 4,对于 FSAE 赛车而言性能过剩,使用碳纤维复合材料制造的赛车轮圈在满足使用强度条件下可减轻质量 50% 以上,是轻量化的有效途径。

2) 结构优化使各铺层复合材料的性能得到更好的发掘,纤维单层最大应力降低 15%,最大应变降低 22%,轮圈的刚性得到增强的同时失效因子明显降低,碳纤维轮圈整体性能的提升效果显著。

3) 对于本文的轮圈款式,斜辐板设计相较于直辐板设计更有利于改善碳纤维轮圈的刚性,辐板数量的增加也可以提高刚性,但会增加加工难度,轮圈的模具设计和实际的铺层操作手法有待进一步探究。

参考文献:

- [1] Hamilton L, Joyce P, Forero C, et al. Production of a composite monocoque frame for a formula sae racecar[J/OL]. SAE International, 2013: 2013-01-1173[2019-01-16]. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1173>.
- [2] 方鲲,顾轶卓.碳纤维增强(树脂基)热塑性复合材料汽车轮毂[C/OL].2014 全国高性能纤维及复合材料新技术应用与产

- 业化推进研讨会,2014年10月24日-26日,杭州.中国材料研究学会,中国高科技产业化研究会成果转化下载工作委员会.2015-05-18[2018-01-23]. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=conference&id=8449121.
- FANG Kun, GU Yizhuo. Carbon fiber reinforced (resin based) thermoplastic composite automotive wheel[C/OL]. 2014 National High Performance Fiber and Composite Materials New Technology Application and Industrialization Promotion Seminar, October 24 - 26, 2014, Hangzhou. Chinese Material Research Society, 2015-05-18[2018.01.23]. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=conference&id=8449121. (in Chinese)
- [3] 孙文龙.轻质材料应用于汽车轮毂的轻量化技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
SUN Wenlong. The research of lightweight technology of lightweight materials applied in electric vehicle hub[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 谢逸,宋鹏涛,王永宁,等.碳纤维材料的性能及应用[J].科技创新与应用,2013(18):51.
XIE Yi, SONG Pengtao, WANG Yongning, et al. Properties and application of carbon fiber materials X[J]. Technology Innovation and Application, 2013(18): 51. (in Chinese)
- [5] 冯瑞华.碳纤维在汽车领域的应用[J].新材料产业,2014(8):15-18.
FENG Ruihua. Carbon fiber in the automotive field[J]. Advanced Materials Industry, 2014 (8): 15-18. (in Chinese)
- [6] 邵建波,郭巍,叶海涛,等.CFRP层合板力学性能影响因素研究[J].塑料工业,2018,46(7):101-107.
SHAO Jianbo, GUO Wei, YE Haitao, et al. Study on influencing factors of mechanical properties of CFRP laminates[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(7): 101-107. (in Chinese)
- [7] 边文凤,刘国军,贾宝贤,等.复合材料汽车车轮的强度分析与铺层设计[J].机械强度,2008,30(2):315-318.
BIAN Wenfeng, LIU Guojun, JIA Baoxian, et al. Intensity analysis and layer design for automobile wheel made of complex material[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(2): 315-318. (in Chinese)
- [8] 畅世为,张维刚.复合材料车轮冲击试验仿真分析[J].汽车工程,2010,32(1):65-68.
CHANG Shiwei, ZHANG Weigang. A simulation analysis on the impact test of composite wheel[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(1): 65-68. (in Chinese)
- [9] 邱瑞斌.碳纤维复合材料轮辋结构设计及优化[D].长沙:湖南大学,2017.
QIU Ruibin. Design and optimization of carbon fiber composite wheel rim structure[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [10] Bhagwat P. Design and analysis of a 10" carbon fiber wheel for a Formula SAE racecar[D]. Arlington: The University of Texas at Arlington,2017.
- [11] William F M, Douglas L M. Race car vehicle dynamics[M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1995.
- [12] Chauhan M R, Kotwal G, Majge A. Numerical simulation of tire and wheel assembly impact test using finite element method: symposium on international automotive technology [J/OL]. SAE International, 2015-01-14 [2019-05-18]. <https://saemobilus.sae.org/content/2015-26-0186>.
- [13] Chang C L, Yang S H. Simulation of wheel impact test using finite element method[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(5): 1711-1719.
- [14] 中国航空研究院.复合材料结构设计手册[M].北京:航空工业出版社,2001.
Chinese Aeronautical Establishment. Composite structure design manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [15] 王佩艳,董永朋,王富生,等.大展弦比复合材料机翼分区分级优化[C]//复合材料:创新与可持续发展(下册).北京:中国科学技术出版社,2010.
WANG Peiyan, DONG Yongpeng, WANG Fusheng, et al. Classification optimization of large aspect ratio composite wing[C]// composites: innovation and sustainability (Volume II). Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [16] Lienhard J, Böhme W. Characterisation of resin transfer moulded composite laminates under high rate tension, compression and shear loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 149: 338-350.
- [17] An H C, Chen S Y, Huang H. Laminate stacking sequence optimization with strength constraints using two-level approximations and adaptive genetic algorithm[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(4): 903-918.