

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.014

主副式复合材料板弹簧结构设计及性能验证

周洲,肖罗喜,程杨,李建林,刘波,王明星,周滨

(株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南株洲 412000)

摘要:针对某型新能源车板弹簧轻量化需求,设计开发了主副式结构复合材料板弹簧,主簧为金属簧,副簧为复合材料簧,从而有效结合各材料特性。通过有限元应力分析与试验测试,发现在各工况下复合材料副簧最大应力为-469.6 MPa,安全系数为1.7。采用该结构形式的复合材料板簧,总重为20.24 kg,相比于原金属板簧减重50%以上。最终成型的主副式板弹簧刚度达标,并通过24万次台架疲劳试验与6000 km装车综合路试,主副簧外观与刚度无明显变化,满足该车的使用寿命。

关键词:主副式;复合材料板弹簧;疲劳试验;刚度

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0074-04

Structure Design and Performance Verification of Main and Secondary Composite Leaf Spring

Zhou Zhou, Xiao Luoxi, Cheng Yang, Li Jianlin, Liu Bo, Wang Mingxing, Zhou Bin

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract : Aiming at a type of new energy vehicle leaf spring lightweight demand, main and secondary type composite leaf spring was designed and developed, the main spring was made of metal, the auxiliary spring was made of composite, which effectively combined the characteristics of each material. Finite element stress analysis and the experiments showed that under all the conditions of leaf spring, maximum stress was -469.6 MPa, and the safety coefficient was 1.7. The composite spring with this structure had a total weight of 20.24 kg, which was more than 50% less than the original metal leaf spring. The rigidity of the main and secondary leaf spring is up to standard, and through the 240 thousand stage fatigue test and the 6000 km loading road test, the appearance and rigidity of the composite leaf springs are not changed, which meets the service life of the vehicle.

Keywords : main and secondary ; composite leaf spring ; fatigue test ; stiffness

板弹簧是汽车悬架重要的组成部分,传统合金钢板弹簧占到汽车质量的5%~7%。目前减轻汽车质量,降低燃油消耗及改善行驶舒适性是汽车行业追求的目标^[1-4]。通过采用复合材料取代传统钢板弹簧可以有效实现汽车轻量化需求^[5-14],但目前纵置板弹簧受力工况复杂,除了垂向载荷外,还有S变形制动、侧倾等受力的影响,单纯的复合材料板弹簧很难满足各个方向的应力要求。

笔者针对某型新能源汽车板弹簧需求,创新性地采用主副式复合材料板弹簧结构,主簧为钢板簧,主要承担S变形、侧倾等引起的非纤维方向的应力,副簧为复合材料板簧(采用自制的玻纤含量为70%

的单向环氧树脂预浸料,面密度为1600 g/m²,通过模压工艺而成),主要承担垂向应力。采用有限元对主副式复合材料板弹簧进行了结构设计与应力分析,并通过台架与装车路试对其进行可行性验证。

1 主副式板弹簧机构设计

1.1 设计要求

主副式复合材料板弹簧设计的目的是取代现有传统的钢板多片簧,需要考虑与其互换性,参考钢板簧的安装及设计要求制定了复合材料板弹簧的主要设计参数,如表1所示。

1.2 结构设计

复合材料板弹簧采用主副式结构,如图1所示,

通讯作者:周洲,博士,主要从事复合材料车辆轻量化产品开发 E-mail: zhouzhou3@csrzc.com

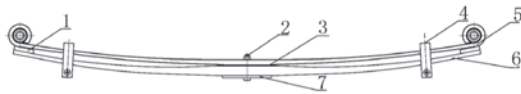
收稿日期:2018-04-17

引用格式:周洲,肖罗喜,程杨,等.主副式复合材料板弹簧结构设计及性能验证[J].工程塑料应用,2018,46(7):74-77,82.

Zhou Zhou, Xiao Luoxi, Cheng Yang, et al. Structure design and performance verification of main and secondary composite leaf spring[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):74-77,82

表1 板弹簧的主要设计参数

项目	参数值
空载 / N	7 855
满载 / N	11 225
自由弧高 / mm	74 ± 6
刚度 / (N · mm ⁻¹)	130 × (1 ± 10%)
宽度 / mm	75
压平弦长 / mm	1 400 ± 3
中间压板长度 / mm	150
吊耳内销直径 / mm	20
板簧安装面与车轮中心的高度差 / mm	65
板簧安装面与地面的高度差 / mm	296



1—摩擦片; 2—中心螺栓; 3—中间垫板; 4—卡箍;

5—主簧; 6—副簧; 7—金属压板

图1 主副式复合材料板簧结构

主簧为钢板簧,副簧为复合材料板簧,板簧两端吊耳采用原有设计,直接将衬套压入主簧卷耳内;另外在主副簧两端之间安装有摩擦片,避免复合材料副簧与金属主簧的直接摩擦;在平直段安装有中部垫板及压板。

金属主簧主要承担侧向与扭转力,复合材料副簧主要承担大部分垂向作用力,两者的刚度设计比例为4:6,总刚度为 $130 \times (1 \pm 8\%) \text{ N/mm}$,即主簧承担刚度 $52 \times (1 \pm 8\%) \text{ N/mm}$,复合材料副簧承担刚度 $78 \times (1 \pm 8\%) \text{ N/mm}$ 。

在薄片簧设计过程中,需要给主簧一定程度的预应力,从而改善在板弹簧总成垂向力作用下的应力情况。表2为主副簧的预应力分配及特性。通过预应力的计算获得每一片簧的弧高 H ,如图2所示。

表2 主副簧设计要求

部位	中间厚度 / mm	弹性模量 / GPa	预应力 / MPa
主簧	17	210 000	71.7
副簧	30	40 000	23.8

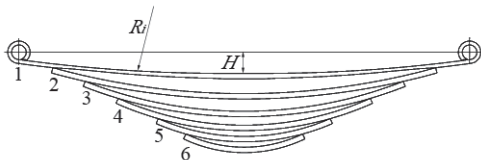


图2 薄片簧组装机

弹簧自由状态下的曲率半径按式(1)计算:

$$R_i = R_0 / [1 + (2\sigma_{0i} R_0) / (E h_i)] \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 片弹簧自由状态下的曲率半径,mm; R_0 为钢板弹簧总成在自由状态下的曲率半

径,mm; σ_{0i} 为各片弹簧的预应力,MPa; E 为材料弹性模量,MPa,钢板簧取 $E=2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,副簧取 $4.0 \times 10^4 \text{ MPa}$; h_i 为第 i 片弹簧的厚度,mm。

如果第 i 片弹簧的片长为 L_i ,则其弧高为:

$$H_i \approx L_i^2 / (8 R_i) \quad (2)$$

通过公式(1)和(2)对主副式复合材料板弹簧弧高进行计算,主簧弧高为65 mm,副簧弧高为67 mm。优化后的板弹簧总成中间为56 mm,两端厚度为36 mm。总成弧高为74 mm。

2 有限元分析

2.1 材料参数

两片式板弹簧为金属板簧与复合材料板簧的组合,其中金属材料的拉伸弹性模量取 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,拉伸强度为1200 MPa;由于复合材料板簧在各工况下主要受垂直载荷作用,铺层都采用 0° 方向,主要的力学性能参数如表3所示,其中 X 方向为 0° 方向(板簧长度方向), Y 为宽度方向, Z 为厚度方向。

表3 复合材料力学性能参数

项目	数值
X 方向拉伸弹性模量 / MPa	45 000
Y 方向拉伸弹性模量 / MPa	6 530
Z 方向拉伸弹性模量 / MPa	6 530
YX 方向剪切弹性模量 / MPa	2 433
XZ 方向剪切弹性模量 / MPa	2 433
ZY 方向剪切弹性模量 / MPa	1 698
XY 方向泊松比	0.217
XZ 方向泊松比	0.217
ZY 方向泊松比	0.366
拉伸强度 / MPa	1 100
压缩强度 / MPa	802
树脂的剪切强度 / MPa	60

2.2 有限元模型及加载条件

对优化后的主副式板弹簧采用Abaqus 6.10进行有限元分析,选用C3D8R作为模型的单元类型进行划分,总单元数为120 231个,主副式板弹簧在装载时,预应力将两片板簧结合在一起,并通过U型螺栓加载一个375 kN的夹紧力,主簧与摩擦片之间建立摩擦界面,系数为0.2,金属压板与板簧本体建立接触。在两端吊耳施加 Y 与 Z 方向约束,中部施加 Z 方向载荷(垂向载荷)、 Y 方向侧向载荷以及 X 方向制动载荷,其有限元模型如图3所示。

2.3 结果分析

采用Abaqus对主副式复合材料板弹簧满载、两倍满载、满载S变形制动以及满载侧倾工况下的应力分布情况进行分析。其中,满载为11 225 N,

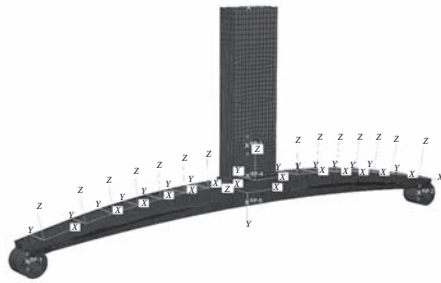
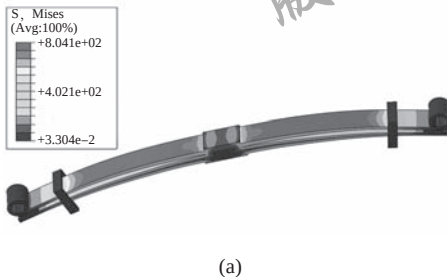


图3 有限元模型

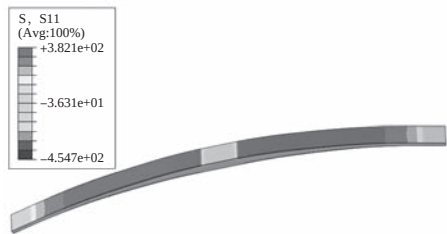
满载S变形制动力为14 112 N,侧倾力为9 800 N,扭转为6°。应力分析结果如表4所示,1方向表示板簧长度X方向,2方向表示宽度Y方向,3表示厚度Z方向,如S11代表沿板簧长度方向的主应力。各种工况中最大板簧长度方向应力分别为-256.5, -382, -469.6, -248 MPa(负数代表压应力),与材料本身压缩强度802 MPa相比,具有1.7的安全系数。其中两倍满载、满载S变形制动以及满载侧倾主副簧的应力分布如图4~图6所示。

表4 板弹簧仿真应力结果

工况	复合材料板簧最大应力/MPa						主簧最大应力/MPa
	S11	S22	S33	S12	S13	S23	
满载	-256.5	-56	-15.4	22.2	4.4	6.1	370.7
2倍满载	-382	-66.5	-24.6	40.8	8.2	7.1	804
S变形制动	-469.6	-76.2	-28	41.3	8.4	8.6	842.7
侧倾	-248	-57.4	-16	-26	12.8	-9.2	-248



(a)



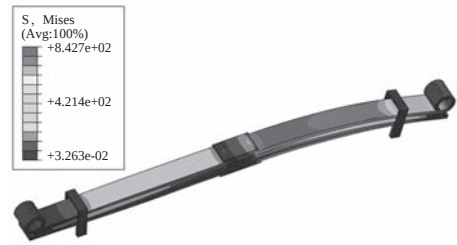
(b)

a—主簧应力分布;b—副簧应力分布

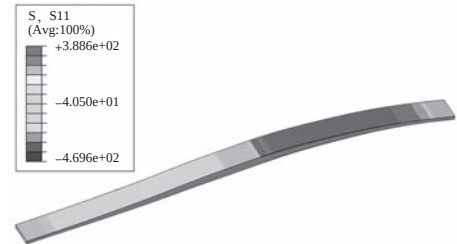
图4 两倍满载主副簧应力分布

3 板弹簧制造与试验验证

根据主副式板弹簧受力工况及结构设计情况,采用单向纤维预浸料及模压工艺^[14-15],工艺制度为



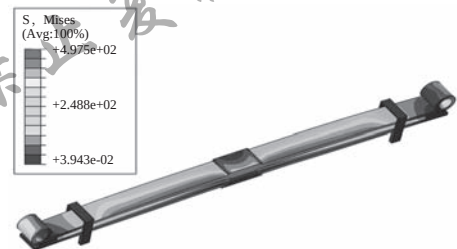
(a)



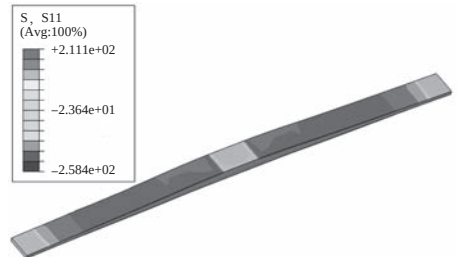
(b)

a—主簧应力分布;b—副簧应力分布

图5 满载S变形制动主副簧应力分布



(a)



(b)

a—主簧应力分布;b—副簧应力分布

图6 满载侧倾主副簧应力分布

80℃预热30 min+140℃固化+90℃后固化90 min,模压压力为10 MPa,主簧安装设计要求将弹簧钢轧制成型,通过中心螺栓将主副簧连接,并在吊耳处安装轴套。设计出主簧质量为12.4 kg,副簧质量为4.2 kg,总质量为20.24 kg,减重约50%。对主副式复合材料板弹簧进行刚度、疲劳及最终的装车路试。静态刚度试验垂向满载 $P=12\,225\text{ N}$,垂向加

载到 $1.5P$, 加卸载速度 50 mm/min , 记录第三次加载、卸载曲线并计算加载和卸载区间 $0.7P \sim 1.3P$ 的平均垂向刚度, 要求刚度值为 $130 \times (1 \pm 10\%) \text{ N/mm}$ 。刚度测试分别为 135, 132, 133 N/mm , 误差在允许范围内。垂向疲劳试验是模拟装车垂向工况, 载荷作用在中间位置, 载荷范围为 $0.3P \sim 2.3P$, 加载频率为 1.5 Hz , 疲劳台架试验如图 7 所示。经过 24 万次疲劳试验后主副簧整体状态无异常, 刚度与弧高无明显变化。



图 7 刚度及疲劳测试图

综合路试验是板弹簧测试的最终考验, 需要通过扭曲路段、比利时路、卵石路段、搓板路段等复杂的路况共 6000 km, 图 8 为复合材料板弹簧装车图示。通过 15 d 连续试验, 板弹簧外观良好, 刚度无明显下降, 可以判断: 该主副式复合材料板弹簧可以满足某车型的使用寿命要求。

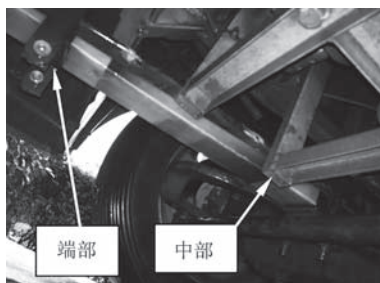


图 8 路试装车图

3 结论

(1) 有限元仿真设计能较好地指导主副式复合材料板弹簧的机构设计与优化, 验证了有限元模型的有效性;

(2) 钢板主簧与复合材料副簧的结合, 很好地避开了复合材料各向异性造成的 90° 方向上力学性能的不足, 同时又很好地实现了汽车轻量化的要求;

(3) 通过 24 万次台架疲劳试验与 6000 km 综合路试验的验证, 外观和刚度无明显异常与下降, 有效证明了主副式复合材料板弹簧的可靠性, 可在汽

车轻量化方面应用与推广。

参考文献

- [1] 杨德旭, 祝海峰, 张林文. 复合材料板簧研究进展 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2014(10):84-89.
Yang Dexu, Zhu Haifeng, Zhang Linwen. Research progress of composite leaf spring[J]. FRP / CM, 2014(10):84-89.
- [2] 杨昂, 孙营, 吴晓明, 等. 重型牵引车复合材料板弹簧的开发与验证 [J]. 汽车工程, 2015, 37(10):1 221-1 225.
Yang Ang, Sun Ying, Wu Xiaoming, et al. Development and verification of the composite leaf spring for a heavy tractor[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(10):1 221-1 225.
- [3] 郭红, 周晓伟, 张恒. 复合材料板弹簧的结构设计及其应力场分析 [J]. 复合材料学报, 1996, 13(4):64-69.
Guo Hong, Zhou Xiaowei, Zhang Heng. Stress field analysis and structure design of composite material plate spring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1996, 13(4):64-69.
- [4] Kumar D S, Radhika S, Ravindra K. Improved design optimization of a composite leaf spring using warm intelligence[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2011(6):193-200.
- [5] 吴辉, 李再轲, 姜其斌. 复合材料板式弹簧的研制及性能 [J]. 塑料工业, 2012, 40(8):103-106.
Wu Hui, Li Zaike, Jiang Qibin. Development and characteristics of composite's leaf spring[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(8):103-106.
- [6] Subramanian C, Senthilvelan S. Joint performance of the glass fiber reinforced polypropylene leaf spring[J]. Composite Structures, 2011, 93:759-766.
- [7] Yu W J, Kim H C. Double tapered FRP beam for automotive suspension leaf spring[J]. Compos Struct, 1988, 9:279-300.
- [8] 王莉, 郭立群, 吴晓涛, 等. 重型牵引车复合材料板簧的设计及应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2013(10):1-7.
Wang Li, Guo Liqun, Wu Xiaotao, et al. Design and application of the composite leaf spring for a heavy tractor[J]. Automobile Technology & Material, 2013(10):1-7.
- [9] Chiu C, Hwan C, Tsai H, et al. An experimental investigation into the mechanical behaviors of helical composite springs[J]. Composite Structures, 2007, 77(3):331-340.
- [10] Fuentes J J, Aguilar H J, Rodriguez J A, et al. Premature fracture in automobile leaf springs[J]. Engineering Failure analysis, 2009, 16(2):648-655.
- [11] 李磊, 任勇生, 孙爱芹, 等. SMA 纤维复合材料板簧刚度性能分析 [J]. 机械设计与研究, 2008, 24(3):57-61.
Li Lei, Ren Yongsheng, Sun Aiqin, et al. Stiffness analysis of SMA fiber composite leaf spring[J]. Machine Design & Research, 2008, 24(3):57-61.
- [12] 赵洪斌, 陈宏章, 刘忠珊. 纤维复合材料单片板簧的研制 [J]. 纤维复合材料, 2000(3):29-31.

(下转第 82 页)

当挤出机螺杆长径比一定时,熔融长度越短,物料可以在输送过程中充分地混合,提高熔体的均匀性,从而导致制品的内部缺陷不断减少,证实了超声波检测结果。

4 结论

利用超声波检测技术实验研究了机筒结构和螺杆结构对沟槽机筒挤出机塑化特性的影响。研究表明,在螺杆结构一定的条件下,3#机筒塑化效果最好;在机筒结构一定的条件下,S1螺杆塑化效果最好。机筒压缩段开设螺旋沟槽有利于物料的熔融,机筒沟槽和螺杆螺槽耦合作用产生的剪切热与较高固体输送量所需熔融热相匹配,有效提高了沟槽机筒简单螺杆挤出机熔融效率。

参考文献

- [1] 薛平,贾明印,金晓明.一种沟槽机筒挤出机,201310261134.4 [P].2013-06-27.
Xue Ping, Jia Mingyin, Jin Xiaoming. A grooved barrel extruder, 201310261134.4 [P].2013-06-27.
- [2] 李晨昕,薛平,贾明印,等.沟槽机筒简单螺杆挤出机塑化性能的模拟研究[J].中国塑料,2017,31(2):99-107.
Li Chenxin, Xue Ping, Jia Mingyin, et al. Simulation study on plasticizing performance of single screw extruder with grooved barrel [J]. China Plastics, 2017, 31(2):99-107.
- [3] 李晨昕,薛平,贾明印,等.沟槽机筒简单螺杆挤出机塑化特性的实验研究[J].中国塑料,2017,31(6):111-117.
Li Chenxin, Xue Ping, Jia Mingyin, et al. Experimental study on plasticizing characteristics of single screw extruder with grooved barrel[J]. China Plastics, 2017, 31(6):111-117.
- [4] 金晓明.沟槽机筒简单螺杆挤出机熔融理论研究[D].北京:北京化工大学,2015.
Jin Xiaoming. Study on the melting theory of grooved barrel single screw extruder[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [5] 李晨昕.机筒沟槽和螺杆螺槽耦合作用下熔融塑化研究[D].北京:北京化工大学,2017.
Li Chenxin. Research on melting and plasticizing under the coupled action of barrel groove and screw channel[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [6] Seto D, Weber W. Developments in using ultrasound for QNDE of polymer melts[C]// Quantitative Nondestructive evaluation. American Institute of Physics, 2002:1 727-1 734.
- [7] 金艳,吴大鸣,何亚东,等.超声波测量聚合物熔体密度[J].塑料,2011,40(5):102-105.
Jin Yan, Wu Daming, He Yadong, et al. Ultrasonic measurement of polymer melt density[J]. Plastics, 2011, 40(5):102-105.
- [8] 蔡伟.精密超声波温度测量仪的研究[D].重庆:重庆理工大学,2012.
Cai Wei. Research on precision ultrasonic thermometer[D]. Chongqing:Chongqing University of Technology, 2012.
- [9] Yan D, Sutcliffe M, Wright B, et al. Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fibre-reinforced polymer[J]. Insight:Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013, 55(9):477-481.
- [10] 王峰,王召巴,陈友兴,等.聚合物混合状态的超声检测及在线监控[J].塑料科技,2010,38(2):85-88.
Wang Feng, Wang Zhaoba, Chen Youxing, et al. Ultrasonic testing and on-line monitoring for blending state of polymer[J]. Plastic Science and Technology, 2010, 38(2):85-88.
- [11] 孙会波.基于超声波测量的聚合物共混物相容性表征方法研究[D].广州:华南理工大学,2012.
Sun Huibo. Research on ultrasonic characterization of polymer blends compatibility[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2012.
- [12] 韩婧.表征聚合物共混状态的超声特征信号处理技术研究[D].太原:中北大学,2014.
Han Jing. Research on signal processing technology for represent polymer compounding state[D]. Taiyuan:North University of China, 2014.
- [13] 赵洋,王克俭.超声法表征高密度聚乙烯的PVT和熔融过程[J].高分子材料科学与工程,2012,28(11):121-124.
Zhao Yang, Wang Kejian. Ultrasonic characterizing of PVT and melting of high density polyethylene[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(11):121-124.
- [14] 吕文丽,李再珂,王甲士,等.复合材料板弹簧用预浸料的固化工艺[J].武汉工程大学学报,2014,36(11):54-59.
Lyu Wenli, Li Zaike, Wang Jiashi, et al. Curing process of prepreg for composite leaf spring[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(11):54-59.
- [15] 周洲,王明星,肖罗西,等.厚壁复合材料纵置板弹簧预浸料固化工艺及验证[J].塑料工业,2018,46(1):10-13.
Zhou Zhou, Wang Mingxing, Xiao Luoxi, et al. Curing process and verification of prepreg for composite longitudinal leaf spring with thick wall[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):10-13.

(上接第77页)

Zhao Hongbin, Chen Hongzhang, Liu Zhongshan. Development of single leaf spring for fiber composite[J]. Fiber Composite, 2000(3):29-31.

- [13] 王甲士,李再珂,吴辉,等.汽车复合材料板弹簧的有限元分析及性能测试[J].汽车技术,2012(4):55-57.
Wang Jiashi, Li Zaike, Wu Hui, et al. Finite element analysis and performance test of composite leaf spring for automobile[J]. Automobile Technology, 2012(4):55-57.
- [14] 吕文丽,李再珂,王甲士,等.复合材料板弹簧用预浸料的固化