

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.014

玄武岩纤维增强复合材料板簧设计与制备

王慧军, 惠林海, 丁笑晖, 张璐, 王丹勇, 王少明, 李英建, 刘发杰, 李华, 周宁

(济南市汽车轻量化复合材料与制品工程技术研究中心, 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要:以某轻型货车用板簧为研究对象,以玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料代替弹簧钢减轻车辆板簧质量为目的,通过材料优化设计、结构优化设计,确定了复合材料设计方案,利用 ANSYS 仿真设计软件对复合材料板簧进行了力学性能分析,采用树脂传递模塑 (RTM) 制备工艺制备了玄武岩增强复合材料板簧。结果表明,优化后的玄武岩纤维增强复合材料板簧静态强度、动态疲劳寿命能够满足设计和使用要求,通过了静载和台架疲劳试验,且质量相对于弹簧钢板簧减重 55%。

关键词:板簧;玄武岩纤维;环氧树脂;复合材料

中图分类号:U463.33+4.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)08-0065-05

Design and Preparation of Basalt-Fiber Reinforced Composite Leaf Spring

Wang Huijun, Hui Linhai, Ding Xiaohui, Zhang Lu, Wang Danyong, Wang Shaoming, Li Yingjian, Liu Fajie, Li Hua, Zhou Ning
(Jinan Automobile Lightweight Composite Material and Product Engineering Technology Research Center, China North Industries Group Corporation
Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract : The basalt fiber reinforced epoxy resin composite material instead of the metal material was used to reduce the weight of the leaf spring used by someone light-duty truck, through the material and structure optimal design to determine the design scheme of the composite, and ANSYS was used to verify the mechanical properties of the leaf spring. Basalt reinforced composite leaf spring was prepared by resin transfer molding (RTM) process. The results show that the static strength and dynamic fatigue life of the basalt fiber reinforced composite spring can meet the requirements of design and use, and the static load and bench fatigue test are carried out, and it is important that the composite leaf spring reduces the weight by 55% compared with the metal leaf spring.

Keywords : leaf spring ; basalt fiber ; epoxy resin ; composite

板簧是货车、卡车或客车悬架的重要组成部分,承受和传递车架与车桥之间各方向力及力矩作用。目前量产应用的板簧主要由优质合金钢板制成,故称钢板弹簧,其质量占车体自重的 5%~7%,存在自重、生产工序多、设备占地面积大、能耗高等缺点^[1]。

随着汽车工业的发展,汽车轻量化已成为汽车制造工业技术发展的一个重要趋势,特别是新能源汽车有迫切减重需求,非主承力外覆盖件(包括“四门两盖”、车顶等)由于受力小,属非关键部件最早被用于复合材料轻量化研发,随着减重需求的深入,作为承力结构的板簧部件也逐渐成为复合材料轻量化研发的热点^[2-6]。目前国内开发复合材料板簧的厂家和科研机构较多,北京中材汽车复合材料有限公司、哈尔滨玻璃钢研究所、哈尔滨工业大学、同济大学等在这方面均开展过项目研究,北京中材汽车复合材料有限公司开发的复合材料板簧已经在国外

依维柯车型上获得了批量应用^[7]。

连续玄武岩纤维是一种综合性能优良、性价比比较高的纤维材料,是一种低投入、高产出、低能耗、少排放、能循环、可持续发展的资源节约型、环境友好型的新材料^[8]。树脂传递模塑 (RTM) 工艺已经发展成为纤维增强树脂基复合材料的主导工艺技术之一,因其制作工艺具有成本低、制品性能高、可加预埋件等优势,已成为复合材料制造工艺中发展速度最快的工艺之一,广泛应用于航空航天、汽车、船舶等领域中,近年来对其工艺的完善和研究热度仍不减,RTM 工艺技术方法也日趋成熟和普及^[9-12]。

济南市汽车轻量化复合材料与制品工程技术研究中心采用 RTM 工艺成功制备了玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料板簧,已经通过了台架 20 万次

联系人: 王慧军, 副研究员, 本科, 主要研究轻量化结构复合材料
收稿日期: 2017-05-29

疲劳试验,静载性能满足使用要求。

1 实验部分

1.1 原材料

单向玄武岩纤维布: 300 g/m^2 , 吉林通鑫玄武岩科技股份有限公司;

环氧树脂、固化剂、增韧剂: 自制;

聚合物微粉: SN358, 黄山贝诺科技有限公司;

界面改性剂、表面弹性涂层: 自制。

1.2 仪器及设备

RTM 注塑机: SPARTAN-2 型, 北京科拉斯科技有限公司;

桥式切割机: 山东通佳机械有限公司;

疲劳试验机: INSTRON8032 型, 英国 Instron 公司。

1.3 复合材料板簧制备

首先进行模具清理, 清除杂物并用高压气体吹模具表面。然后进入模具准备环节, 包括对模具表面进行涂覆脱模剂处理和模具预加热。在模具准备的同时, 可进行预成型材料准备, 将玄武岩纤维单向布按设计尺寸裁切待用, RTM 注塑机树脂预加热开启, 检查、调节 RTM 注塑机各树脂比例调节阀以使树脂的配置比例准确。在预成型体制备过程中要保证玄武岩纤维布各铺层方向、铺层顺序和层数准确无误, 铺放过程中可利用定型剂辅助铺放, 以防止纤维层窜动造成的铺层方向偏差。

待 RTM 注射前准备工作完成后, 合模加压至 2 MPa , 连接注射头开启注塑机注射, 注射结束后继续加压至 10 MPa , 模具按固化制度升温开始进行产品固化。

固化完成后脱模, 取出后切割成板簧设计宽度, 然后进行安装配件及后处理。其具体的工艺流程图如图 1 所示。

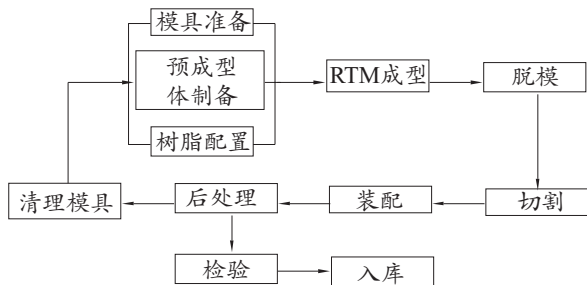
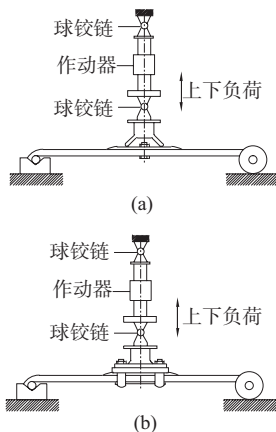


图1 复合材料板簧制备工艺流程图

1.4 性能测试

按照 GB/T 19844-2005 测试, 板簧一端固定安装, 另一端在支架上水平单方向自由活动, 对复合

材料板簧进行静载及动态疲劳载荷试验, 试验测试安装示意图如图 2 所示。



a—自由状态; b—夹紧状态

图2 样件台架试验安装示意图

2 结果与讨论

2.1 板簧材料的设计

由于板簧特殊的受力工况, 要求在满足刚、强度要求的前提下同时具有良好的韧性及疲劳可靠性。高性能碳纤维复合材料虽然具有较高的强度和模量, 但其断裂伸长率差, 不适于板簧这类形变较大的结构承载构件, 虽然其它先进有机纤维如芳纶纤维断裂强度高, 但其不适应制备热固性结构复合材料构件。无碱玻璃纤维复合材料的拉伸弹性模量较低, 拉伸强度较低, 导致玻璃纤维制备的复合材料板簧变形量较大, 可承受的应力等级低, 产品耐应力蠕变性差, 与之相比, 玄武岩纤维具有良好的断裂伸长率及较高的拉伸弹性模量, 其耐高低温性能优于无碱玻璃纤维, 价格也较低, 具有较优良的性价比^[13]。

树脂基体选用自制低黏度高性能环氧树脂体系。针对板簧较为严苛的使用工况, 主要从树脂增韧和界面性能改善两方面对树脂体系进行优化。采用复合添加纳米聚合物微粉方法, 增加树脂基体的韧性, 添加量为 $3\% \sim 5\%$; 针对玄武岩纤维-环氧树脂体系, 添加一种玄武岩纤维专用界面改性剂, 该改性剂由 KH-560 和特制界面改性剂复配, 能够很好地改善玄武岩纤维和环氧树脂基体界面性能。

2.2 复合材料板簧结构设计

(1) 复合材料铺层设计。

根据金属板簧结构图纸, 结合复合材料性能及成型工艺特点, 提出的复合材料板簧结构如图 3 所示, 复合材料板簧采用玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料, 采用两种铺层方式, 分别为单向复合材料

铺层(纤维方向为板簧伸直方向)以及正交铺层(纤维方向为伸直方向及垂直于伸直方向)。深色部分为单向纤维增强树脂基复合材料;浅色部分为(1:1纤维布)正交布增强树脂基复合材料,复合材料板簧几何尺寸如图4所示,宽度为50 mm。



图3 复合材料板簧伸直后结构图

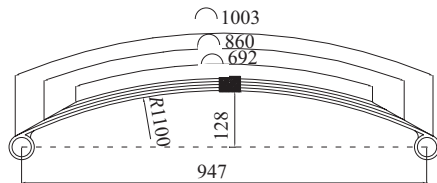


图4 复合材料板簧几何尺寸图

对复合材料板簧设计方案进行了静载条件ANSYS有限元数值模拟与验算。复合材料板簧承受950,2450 N的Y向力作用变形计算结果如表1所示,分别计算考虑和未考虑连接孔中橡胶轴套变形影响。计算结果显示,设计方案均满足静载荷变形量设计要求。

表1 板簧受压后变形结果

载荷(P)/ N	Y向最大变 形量 ¹⁾ /mm	Y向最大变 形量 ²⁾ /mm	静载荷变形量设计 要求/mm
0	0	0	
950	20.2	21.7	22 ± 5
2450	52.0	54.3	55 ± 5

注:1)未考虑连接孔中橡胶轴套变形影响;2)考虑连接孔中橡胶轴套变形影响。

图5、图6为复合材料板簧承受950,2450 N时Y方向变形图。



图5 载荷950 N时复合材料板簧Y方向变形图



图6 载荷2450 N时复合材料板簧Y方向变形图

ANSYS计算模拟结果显示,通过不同铺层厚度、不同铺层角复合材料板簧结构有限元计算,可以获取适合于变形技术要求的铺层厚度、铺层角结构

方案。根据金属板簧结构图,按照复合材料替代方法,根据复合材料工艺特点,设计的复合材料板簧简化替代结构。在板簧依次承受950,2450 N集中力计算条件下,玄武岩纤维增强树脂基复合材料板簧满足给定的刚度变形技术要求。

(2) 连接结构设计。

复合材料板簧的关键部位为两端部的金属吊耳的连接,通常的结构连接形式如参考文献[14],其结构形式均为一体成型,带来两个方面问题,一是整体结构热处理工艺困难;二是安装时易损坏连接部位的复合材料。

图7为优化后的吊耳结构形式。将吊耳结构分为两部分制作,一方面制作成本降低,另一方面安装方便且不会造成复合材料板簧的表面损伤。连接孔优化为两孔错位连接,限制连接部件的不同平面方向的滑动。连接工艺为机械连接配合胶接方式,机械连接采用螺栓或铆接连接,螺栓连接时应配合螺纹紧固胶使用,胶粘剂均匀涂抹在连接面,未固化前紧固连接后放入固定工装中后固化。

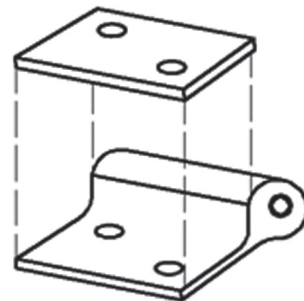


图7 优化后的吊耳结构形式

2.3 复合材料板簧成型工艺优化

(1) 工艺温度的确定。

RTM工艺对树脂的黏度要求较高。树脂黏度的增加带来树脂对纤维的浸润性变差和注塑压力的增大,采取加热树脂原材料的方法能够有效地降低树脂黏度,配合加热模具,使树脂能够在模具内更好地浸润纤维,同时减少缺陷的产生。图8为温度对树脂黏度的影响。树脂加热到80℃以上时,黏度降低至240 mPa·s,基本达到了最佳注射黏度范围,故树脂加热的工艺温度设定为80~100℃。

复合材料板簧用树脂的固化工艺如图9所示。采用三步升温法固化工艺,RTM工艺操作时模具加热严格按固化工艺控制。

(2) 成型压力控制。

RTM工艺压力控制主要考虑注射初期对纤维

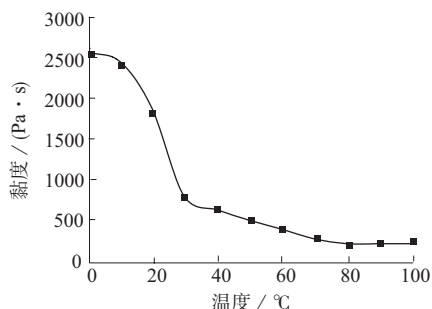


图8 温度对树脂黏度的影响

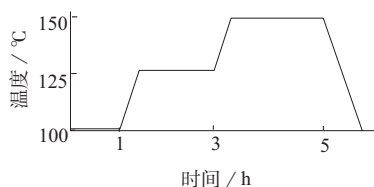


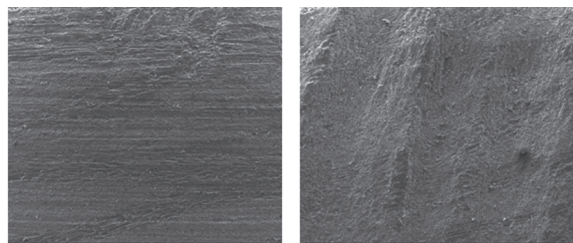
图9 成型固化工艺

织物预成型体纱线排布的影响和浸润速率等方面。在板簧成型过程中压力控制的优化更多的是对制品质量的干预。采取恒压注射,中间注射过程采取以下步骤排除“短路”等缺陷^[15],当流动前沿到达排气孔时,关闭排气孔,保持注射口打开,直至型腔内压强与注射口相同后,保压一段时间,然后重新打开排气孔,一部分树脂会与空气同时流出型腔,重复上述过程可获得较好的效果,提高复合材料成型质量。

(3) 切割工艺。

常用的复合材料切割工艺有高压水切割和金刚石锯片切割方法。高压水切割的方法虽然具有精度控制高及冷切割的优点,但是高压考验着复合材料薄弱的层间强度,容易产生分层缺陷,且水射流散发导致切割厚度方向尺寸偏差,高速的刚性砂的喷射也会损伤复合材料切割面。

相对于高压水切割方法,金刚石锯片切割方法更适合切割复合材料的板簧,不同工艺切割后表面的对比图如图10所示。



(a) 金刚石锯片切割后表面; (b) 高压水切割后表面
图10 不同切割加工工艺对比

由图10可见,金刚石锯片切割面损伤更小,切

割面平滑平整。

2.4 复合材料板簧性能及应用

采用RTM工艺制备的玄武岩复合材料板簧实物样品如图11所示,达到的性能如下:

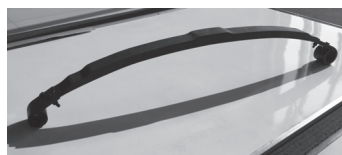


图11 玄武岩复合材料板簧实物照片

- (1) 负荷为950 N时,板簧变形量为 (22 ± 5) mm;
- (2) 负荷为2450 N时,板簧变形量为 (55 ± 5) mm;

(3) 复合材料板簧在20万次往复载荷(频率1 Hz,7350 N)条件下未发生破坏;

(4) 制备的玄武岩板簧重11.7 kg,对比钢板弹簧(25.9 kg)减重约55%。

目前,玄武岩复合材料板簧已通过地面台架试验,正进行试车试验,截至发稿期试验过程良好。

3 结论

(1) 玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料板簧经过材料、结构设计优化后,设计的产品能够满足静载及疲劳载荷性能要求。

(2) 玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料板簧采用RTM工艺制备,在成型过程中严格执行各工序质量控制要点要求,制备的复合材料板簧能够满足汽车批量化生产质量一致性控制要求。

(3) 制备的复合材料板簧质量较轻,相对钢板弹簧减重达55%,若替代钢板弹簧整车可减重约56 kg,可明显降低车辆油耗量和减少碳排放量,符合当代汽车工业轻量化需求和低碳、绿色环保发展趋势。

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簧的开发与验证[J]. 汽车工程,2015,37(10):1221-1225.
Yang Ang, Sun Ying, Wu Xiaoming, et al. Development and verification of the composite leaf spring for heavy tractor[J]. Automotive Engineering,2015,37(10):1221-1225.
- [3] 史文库,钱坤,柯俊,等. 轻型客车复合材料板簧模态的预测和分析[J]. 振动与冲击,2016,35(24):139-144.

- Shi Wenku, Qian Kun, Ke Jun, et al. Prediction and analysis for the modal of a composite leaf spring in a light bus[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24):139–144.
- [4] Sureshk S M, Tamtelselvam P, Kuma R R, et al. Design, fabrication and analysis of a hybrid fiber composite monoleaf spring using carbon and E-glass fibers for automotive suspension applications[J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(1):115–122.
- [5] 赵燕, 蔡艳涛, 王声涛, 等. 复合材料汽车板簧的优化设计[J]. 汽车工程师, 2014(11):28–32.
- Zhao Yan, Cai Yantao, Wang Shengtao, et al. Optimization design of automotive composite material leaf spring[J]. Auto Engineer, 2014(11):28–32.
- [6] 管鸣, 任勇生, 孙祥正. 基于 ANSYS 的形状记忆合金复合材料板簧的模态分析[J]. 山东科技大学学报, 2012, 31(6):106–112.
- Guan Ming, Ren Yongsheng, Sun Xiangzheng. Modal analysis of composite leaf spring with SMA based on ansys[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2012, 31(6):106–112.
- [7] 任坤, 蔡金刚, 武海鹏. 汽车用前置复合材料板簧的研究[J]. 纤维复合材料, 2015, 31(4):31–33.
- Ren Kun, Cai Jingang, Wu Haipeng. Research on composite front leaf spring for automobiles[J]. Fiber Composites, 2015, 31(4):31–33.
- [8] 胡显奇. 我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议[J]. 高科技纤维与应用, 2008(6):12–18.
- Hu Xianqi. The overview of the present development of basalt fiber in China[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008(6):12–18.
- [9] 刘志杰, 闫超, 罗辑, 等. 复合材料多隔板框架结构的 RTM 工艺成型[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(1):82–87.
- Liu Zhijie, Yan Chao, Luo Ji, et al. A resin transfer molded(RTM) processing methods to produce typical[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(1):82–87.
- [10] 何先成, 刘刚, 包建文. 预浸料在 RTM 工艺中的应用研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(4):71–75.
- He Xiancheng, Liu Gang, Bao Jianwen. Application of prepreg in RTM process[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(4):71–75.
- [11] 陈蓉, 吴安如, 孙振起, 等. 基于 RTM 工艺成型复合材料风机叶片的质量控制研究进展[J]. 湖南工程学院学报, 2016, 26(3):28–75.
- Chen Rong, Wu Anru, Sun Zhenqi, et al. Research process of quality control on composite wind turbine blade based on RTM proces[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2016, 26(3):28–75.
- [12] 李伟东, 刘刚, 安学锋, 等. Z 向流动 RTM 工艺树脂的流动浸润行为[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6):82–88.
- Li Weidong, Liu Gang, An Xuefeng, et al. Investigation of resin flowing and in filtration behavior during Z direction flowing RTM proces[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6):82–88.
- [13] 高磊, 胡国辉, 徐楠, 等. 玄武岩纤维工程性质研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2):1 749–1 754.
- Gao Lei, Hu Guohui, Xu Nan, et al. Advances in research on engineering properties of basalt fiber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2):1 749–1 754.
- [14] 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(9):29–31.
- Zhao Hongbin, Chen Hongzhang, Liu Zhongshan. Development of fiber composite single leaf spring[J]. Fiber Composites, 2000(9):29–31.
- [15] 陈展, 杨波. RTM 工艺干斑缺陷形成分析及其两相流仿真预测研究[J]. 橡塑技术与装备 (塑料), 2016, 42(20):65–68.
- Chen Zhan, Yang Bo. RTM process dry spot defect analysis and two phase flow simulation prediction research[J]. China Rubber / Plastics Technology And Equipment (Plastics), 2016, 42(20):65–68.

(上接第 59 页)

- Hao Wei, Ma Kefeng, Luo Yuqing. Research progress of aramid paper honeycomb and sandwich structure[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(6):81–85.
- [13] Aminanda Y, Castanié B, Barrau J J, et al. Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores[J]. Applied Composite Materials, 2005, 12(3):213–227.
- [14] 刘文品, 杨进军, 马建忠. YT822A 型芳纶纸蜂窝性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(1):58–61.
- Liu Wenpin, Yang Jinjun, Ma Jianzhong. Study on the properties of YT822A aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2015, 40(1):58–61.
- [15] Hayes M W, Degrange J E, Rice C V, et al. Honeycomb cores for aerospace applications:US,10/236,361[P]. 2002-09-06.
- [16] Yam L H, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification[J]. Composite Structures, 2003, 60:403–412.
- [17] Kelsey S, Gellatly R A, Clark B W. The shear modulus of foil honeycomb cores: A theoretical and experimental investigation on cores used in sandwich construction[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1958, 30(10):294–302.
- [18] Grediac M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. International journal of solids and structures, 1993, 30(13):1 777–1 788.