



复合材料汽车板簧的应用研究进展

王振兴¹, 竺铝涛^{1,2}, 沈伟²

(1.浙江理工大学纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 杭州 310018;
2.绍兴宝旌复合材料有限公司, 浙江绍兴 312000)

摘要: 为了降低燃油消耗和污染排放, 汽车零部件开始选用轻质高强的复合材料替代钢材。板簧是汽车悬架系统的关键性零部件, 也是汽车减重的重要组成部分。相对于钢板弹簧, 复合材料板簧在至少减重50%的同时还具有更高的疲劳寿命、更佳的阻尼效果以及更良好的耐腐蚀性等性能。介绍了复合材料板簧在国内外的应用和研究现状, 分析了复合材料板簧的主要成型工艺及性能特点, 并对今后的发展方向进行了思考: 应从复合材料板簧的目标应用角度出发, 建立从原材料制备、结构设计、工艺优化、自动化生产及性能检测为一体复合材料板簧生产流程, 只有生产出兼具高性能和低成本的材料板簧才能推动其在汽车行业更普遍的应用。

关键词: 复合材料; 板簧; 研究进展; 生产工艺; 性能特点; 轻量化

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2022)01-0038-06

Progress in the application research of composite automobile leaf springs

WANG Zhenxing¹, ZHU Lütao^{1,2}, SHEN Wei²

(1.College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2.Shaoxing Baojing Composite Material Co., Ltd., Shaoxing 31200, China)

Abstract: To reduce fuel consumption and pollution emissions, auto parts begin to select lightweight and high-strength composite materials to replace steel. The leaf spring is a key component of automobile suspension system, and an important part of weight reduction of vehicles. Compared with steel leaf springs, composite leaf springs not only can reduce the weight by 50%, but also have higher fatigue life, better damping effect, and better corrosion resistance, etc. This paper presents an overview of the application and research status of composite leaf springs, analyzes the main forming process and properties of composite leaf springs and reflects on the future development trend: we should set up a production process of composite leaf springs that integrate raw material preparation, structure design, process optimization, automatic production and performance test into one, from the target application of composite leaf springs. Only by producing composite leaf springs with both high performance and low cost can they have more widespread use in the automobile industry.

Key words: composite; leaf spring; research progress; production process; properties; lightweight

0 引言

板簧是汽车悬架系统的重要组成部分,也是支撑起汽车主体部分的关键零部件。纵置板簧在汽车中的位置如图 1 所示,其主要作用是连接车架与车桥,通过板簧的挠度变化吸收来自垂直方向上的振动、冲击和碰撞载荷,从而将势能存储在板簧中,缓冲减震使汽车行驶更加平稳。钢板弹簧(见图 2)的结构由多片宽度和曲率相等,长度不相同的弧形合金钢板所组成,总重量约占簧下重量的 10%~20%^[1],由于具有载重能力强、价格便宜的优点而被广泛的应用在汽车的悬架系统中。



图 1 纵置板簧在汽车中的位置



图 2 钢板弹簧

机动车污染物排放标准的日益严苛和新能源汽车提高续航里程的迫切需要都对汽车的轻量化提出了更高的要求。当汽车的重量下降 10%,燃油消耗将下降 8%,燃油效率将提升 6%~8%,污染物排放量排放将减少 4%^[2-3]。采用轻质高强的复合材料替代笨重的钢材是汽车减重的一种有效方式^[4]。近年来复合材料在汽车中的应用已从非装饰性作用的部件扩大到板簧、传动轴等影响行车安全的关键承力零部件^[5]。

复合材料板簧是由高性能纤维和树脂在一定的温度和压力下固化得到的一种截面较厚且外形带有弧度的纤维增强树脂基复合材料。相比于钢板弹簧,复合材料板簧不仅能够在不影响承载能力和刚度的前提下减重 50%以上^[5-6],还具有许多独特的性能优势(见表 1)。

表 1 钢板弹簧和复合材料板簧的特点

钢板弹簧	复合材料板簧
多片钢板组成,重量大	单片,减重效果达到 50%~80%
疲劳寿命一般不超过 10 万次	疲劳寿命在 30 万次以上
外力持续作用下漆层剥落会出现生锈现象	高性能纤维及树脂组成,物理化学性质稳定
一旦出现裂纹,将迅速扩展直到断裂	部分纤维断裂后荷载会重新分配,不会突然断裂
行驶过程中多片钢板之间摩擦产生噪音	阻尼较高,产生噪音小
笨重难以拆卸	部件简化,拆装更容易

复合材料板簧优异的性能可以被广泛应用于不同车型的悬架系统中,卡车、货车等重型车辆上的纵置多片钢板弹簧替换为复合材料板簧之后,可获得明显的减重效果^[4];轿车、SUV 等车型上使用的螺旋弹簧替换为横置复合材料板簧之后,减少了螺旋弹簧所占用的垂直空间,这不仅可以降低车辆重心从而使操控性能更佳,还可以获得更大的后备厢空间^[7-8]。

1 国外的应用和研究现状

基于复合材料板簧的众多优良特性,国外的学者早在 20 世纪 60 年代就开展了相关的研究。20 世纪 70 年代初,通用汽车公司就采用拉挤成型工艺^[9]制备出了复合材料板簧,并进行了台架实验和装车实验,实测弯曲疲劳寿命达到 50 万次^[10],验证了该产品的性能优势,但由于其成本过高且无法适应当时的市场,该产品的开发被迫中止。直到 1977

年,由于汽车行业开始注重燃油经济性,通用公司重启了复合材料板簧项目。在原材料筛选过程中,通过对多种增强材料和树脂的一系列试验,最终采用环氧树脂和玻璃纤维为原材料;并利用缠绕成型工艺^[11]制备出较低成本且顺应市场需求的 Liteflex™ 复合材料板簧。在经过了 5800 万次疲劳测试和 500 多万千米的车辆实际路测之后, Liteflex™ 复合材料板簧终于在 1981 年首次成功应用到科尔维特 C4 的后悬挂系统中,该复合材料板簧仅重 3.6 kg,相比于原来重达 18.6 kg 的十片钢板弹簧减轻了 15 kg^[12]。鉴于此复合材料板簧表现出的优异减重效果和耐疲劳性,越来越多的汽车厂商开始尝试并接纳复合材料板簧,如科尔维特 C5、C6、C7 在前后悬架系统同时采用了复合材料板簧。截至 1992 年,美国的重型卡车和牵引车已广泛采用了复合材料板簧^[13]。1996 年,沃尔沃首次在 960 车型上使用的横置复合材料板簧,相比于传统的钢质螺旋弹簧减重

4.5 kg^[14],如今该技术方案已经推广至沃尔沃的中高端车型,如沃尔沃 XC60、S90、V90 等车型采用 HP-RTM 工艺^[15]制备的玻璃纤维增强聚氨酯横置板簧,实现了减重 65% 的效果^[16]。自 2006 年起,奔驰 Sprinter、道奇 Sprinter、大众 Crafter 等车型已开始大规模使用复合材料板簧^[17]。2019 年,福特首次在 Transit 车型上采用了玻璃纤维/环氧树脂预浸料制备的复合材料纵置板簧,实现减重 50%。同年,福特与 Kordsa 公司合作,共同开发了用于重型卡车的复合材料纵置板簧,该板簧采用模压成型工艺制备,最大厚度为 110 mm,可承载 13.4 t 的重量,与钢板弹簧相比,减重效果达到了 75%^[18]。

1.1 国外复合材料板簧的理论研究

复合材料板簧能够得到大规模的应用,主要是基于学者对其理论和实验的深入研究。对复合材料板簧的理论研究主要是利用计算机辅助软件进行结构设计,如采用 Ansys、Abaqus 等有限元软件进行分析模拟,利用算法进行优化。Shokrieh 等^[19]利用 Ansys 对轻型车辆后悬挂系统中的四片钢板弹簧组进行有限元分析,基于分析得到的应力和挠度结果,在 Ansys 中设计了复合材料板簧并对其几何形状进行优化,最终得到的最佳几何形状宽度呈双曲线减小,厚度从端部到中心点线性增加,该形状下的复合材料板簧相比于原来的四片钢板弹簧组减重效果达到 80%。Kueh 等^[20]分别采用环氧树脂和乙烯基树脂与 E 玻璃纤维复合制备板簧,并用 Ansys 分析了其静载和疲劳性能,结果显示复合材料板簧的刚度相比钢板弹簧提高了 74.80%,疲劳寿命提高了 2~4 倍。Soliman 等^[21]利用 Ansys 对比分析钢板弹簧和复合材料板簧的力学性能,发现复合材料板簧在减重 79% 的同时还具有更高的安全系数和固有频率。Manjunath 等^[22]使用 Ansys 分析发现复合材料板簧比多片钢板弹簧应力低 67.35%,刚度高 64.95%,固有频率高 126.92%。Ali 等^[23]利用 SolidWorks 对钢板弹簧建模,并使用 Ansys 进行有限元分析,根据分析结果制备了以碳纤维和玻璃纤维为增强体,环氧树脂为基体的复合材料板簧,其减重效果与钢板弹簧相比上升 85%。Venkatesan 等^[24-26]使用 Ansys 对不同纤维/树脂比例复合材料板簧的抗弯刚度、位移进行分析,选出最佳的组合。Gaylo 等^[27]在 Abaqus 中创建了以 E 玻璃纤维和乙烯基酯为原材料的复合材料板簧分析模型,并对其刚度进行模拟,提出了一种用于重型卡车的复合材料板簧的设计及优化方法,优化后的板簧在减重

30% 的同时表现出更加优异的力学性能。Rajendran 等^[28]提出了基于达尔文的进化论和孟德尔的遗传学理论的遗传算法(GA)来改进和优化复合材料板簧的设计,该算法不仅能够自动搜索获取和积累信息,还可以控制搜索过程最终获得全局最优解,因此该算法具有并行性、高效率和抗干扰能力的特点^[29],可以通过将复合材料板簧的优化变量编码为遗传算法的基因,利用算法得到最优设计方案。

1.2 国外复合材料板簧的实验研究

当前制备复合材料板簧的增强纤维原材料主要是 E 玻璃纤维、碳纤维和玄武岩纤维,其物理性能如表 2 所示。E 玻璃纤维的主要优点是在拥有较好力学性能的同时价格最低,良好地平衡了产品的性能和价格,适合工业化量产。碳纤维具有极高的弹性模量,拉伸强度和较低的断裂伸长率,力学性能最佳;但是由于碳纤维的价格昂贵,限制了其在汽车零部件领域的大规模应用。玄武岩纤维的弹性模量和拉伸强度相对较高,但是天然玄武岩各组分的组成存在较大差异,导致连续玄武岩纤维的性能不稳定,也影响了其在汽车领域的应用。综合考虑,目前市场上普遍采用 E 玻璃纤维作为复合材料板簧的增强材料。

表 2 复合材料板簧主要纤维原料物理性能^[30]

纤维类型	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂伸长 率/%	价格/ (\$·kg ⁻¹)
E 玻璃纤维	3100~3800	72.5~75.5	4.7	1.1
碳纤维	3500~6000	230~600	1.5~2.0	30.0
玄武岩纤维	3000~4840	19.3~93.1	3.1	2.5

目前制备复合材料板簧的树脂主要有聚酯树脂和环氧树脂。聚酯树脂在固化过程中会释放一种名为苯乙烯的有毒气体,给生产生活带来安全隐患,除此之外,聚酯树脂固化后的力学强度比等量的环氧树脂低;而环氧树脂具有成本低、机械性能优异,层间剪切强度较高且固化收缩率较低的优点^[31],因此成为了复合材料板簧的首选树脂基体。

制备复合材料板簧的工艺主要有拉挤工艺、纤维缠绕工艺、高压树脂传递模塑工艺(HP-RTM)和模压工艺等^[32]。拉挤工艺的优点是可以连续成型,生产效率高,但也存在无法生产变截面复合材料板簧且制品的横向力学性能较差的缺点,因此关于使用拉挤工艺制备复合材料板簧的相关研究越少^[4]。纤维缠绕工艺的优点是制品的强度和疲劳性能好^[4],缺点是制品存在层间结合力较弱,铺层角度和尺寸控制不够精确,并且缠绕过程及合模过程中存

在树脂流失过多的现象^[33]。HP-RTM 工艺制品的优点是纤维体积分数高、孔隙率低,其工艺的优点是加工周期短、生产效率高;但是高压注射机和带有清洁功能的模具大多需要从国外进口,设备的投资过高,同时存在成型速度过快带来的纤维浸润不良、界面性能不好的问题。模压工艺的优点是成型过程简便,易实现机械化和自动化生产,可以用较低的成本生产中、小型复合材料产品^[34],且制品的内应力较低、表面光滑、尺寸精确,可重复性高^[4];缺点是工艺参数设置不当会导致产生内部孔隙、气泡等缺陷。此外,压机和模具设计与制造较复杂,初期投入较高。综合对比复合材料板簧制备工艺的优缺点及成本、制品的性能及稳定性,模压工艺是目前制备复合材料板簧最理想的制备工艺。

2 国内的应用和研究现状

2.1 国内复合材料板簧的理论研究

国内对于复合材料板簧的理论研究主要是从结构的设计、刚度的匹配、几何形状的优化等直接影响产品性能的方面入手。宋倩倩^[35]以玄武岩纤维/环氧树脂作为板簧的制造材料,通过理论和仿真相结合的方式实现了复合材料板簧的结构设计和关键性能分析。Yang 等^[36]考虑了中性层与每个矩形截面厚度不一致的影响,提出了一种基于复合材料力学和能量法的刚度预测模型,并在有限元软件中进行了分析,并与台架试验的测试结果进行对比,发现该模型可较准确地预测制品的刚度。Shi 等^[37]从复合材料的力学角度出发,提出了一种在弯曲条件下评估复合材料板簧中性层位置的方法,并通过影响刚度的关键设计参数进行敏感性分析,建立了可快速准确预测刚度的理论模型。李宇菲^[38]基于复合材料层合板的力学模型,建立了可以推导出层合板内任意一点的应力、应变、内力之间关系的数学模型,然后采用 Matlab 软件对复合材料板簧的结构进行非线性优化,将在 Pore 软件中建立的有限元分析模型导入 Ansys 中进行疲劳寿命和刚度仿真分析。柯俊等^[39]对复合材料板簧的结构和铺层进行了初步设计,采用基于遗传算法建立了混合法的的目标函数,根据刚度、强度和质量的优先顺序设置了权重系数,综合利用这两种方法建立了多目标优化模型对复合材料板簧进行优化;然后以 E 玻璃纤维和聚氨酯为原材料,选用 HP-RTM 工艺制备了复合材料板簧,并利用台架试验测试其力学性能,对比试验结果发现复合材料板簧质量在减重 60% 的前提下,其

疲劳寿命提高了 3 倍。Qian 等^[29]在层方案设计方法和三明治单元概念的基础上,提出了非连续层截面和堆叠顺序,并使用遗传算法优化堆叠顺序。

2.2 国内复合材料板簧的实验研究

国内对于复合材料板簧实验的相关研究开始于 1985 年,同济大学与上海汽车钢板弹簧厂合作开发复合材料板簧^[40]。1989 年,袁皎秋^[41]从原材料的选择和固化成型工艺入手,设计不同的增强体、树脂和固化剂进行交叉实验,最终筛选出一款最优的树脂固化体系;通过采用差示扫描量热法(DSC)确定了复合固化温度,采用扭辫分析法(TBA)确定了加压时机,利用模压工艺制备出的复合材料板簧仅有 2.4 kg,相比原来 15 kg 的钢板弹簧减重效果达到 84%。1996 年,郭红等^[42]设计制造了一款钢-复合材料板夹层板簧,并采用有限元方法研究了该板簧结构内部的应力场和位移场。随着人们对资源和环境问题越来越重视,越来越多的学者开始研究复合材料板簧。由于复合材料板簧的截面较厚,在固化过程中会因为尺寸效应而出现温度分布不均匀,导致内部树脂固化不完全的现象。为解决此问题,2018 年周洲等^[43]采用非等温 DSC 测试得到了不同升温速率所对应的树脂体系热力学参数,将热电偶置于模腔内采集了厚截面复合材料内部的温度场分布数据,通过将两组实验结果相结合制定出了合理的固化成型工艺。2014 年吕文丽等^[44]根据树脂体系在不同升温速率下的 DSC 实验数据计算得到固化动力学参数,然后在此基础上制定了合理的针对厚截面复合材料层合板的固化成型工艺。针对模压工艺过程中易出现的白斑、气泡和孔隙等缺陷,2018 年蔡焯梦等^[45]研究了固化成型的压力、时间和温度等参数对板簧的外观质量和力学性能的影响规律。

由于制造成本、加工工艺水平以及设计水平的限制,目前复合材料板簧在国内未有大批量产业化应用,还处在实验试制、理论研究的阶段,仅有个别公司进入实践应用阶段。例如:北京中材汽车复合材料有限开发的复合材料板簧已成功应用于依维柯 Daily 车型,株洲时代新材料有限公司研制的复合材料板簧已通过宇通客车等厂商的综合路测实验。除此之外,哈尔滨玻璃钢研究院^[46]、吉林大学^[11,35,47]、哈尔滨工业大学^[48]、武汉理工大学^[38,40,49]、浙江理工大学等^[50]都在积极开发复合材料板簧,虽然目前还没有大规模商业化量产,但是已经有越来越多的研究机构、高校和企业投入到了复合材料板簧的产业化研究中,相信在可以预见的未

来,国产化复合材料板簧能够得到广泛地应用。

3 结论

相对于钢板弹簧,复合材料板簧具有很多优势,应用前景广泛,在汽车轻量化发展的大趋势下具有取代钢板弹簧的积极优势。目前国外在此领域的研究较为先进,不仅进行了大量的理论和实验研究,还成功应用于实践,已有多家世界知名车企采用了复合材料板簧替代了原来的钢板弹簧,并且市场规模呈现出不断扩大的趋势。

相比国外,国内关于复合材料板簧的研究和应用还较为滞后,许多科研机构 and 高校院所在研究也大多处于实验研究和试装阶段,虽然国产复合材料板簧在客车上已有应用案例,但在兼顾安全性和舒适性的中高端汽车上尚未见报道。调查发现,目前阻碍复合材料板簧大规模推广应用的阻碍是板簧的生产工艺不成熟、以及由此带来的综合性能不稳定和生产成本居高不下。故今后应从复合材料板簧的目标应用出发,建立从原材料制备、结构设计、工艺优化、自动化生产及性能检测为一体的复合材料板簧生产流程,只有生产出兼具高性能和低成本的复合材料板簧才能推动其在汽车行业更普遍的应用。

参考文献:

- [1] Tanabe K, Seino T, Kajio Y. Characteristics of carbon/glass fiber reinforced plastic leaf spring [J]. SAE Transactions, 1982; 1628-1636.
- [2] Cheah L W. Cars on a diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the US [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010; 13-18.
- [3] Joost W J. Reducing vehicle weight and improving US energy efficiency using integrated computational materials engineering [J]. JOM, 2012, 64 (9): 1032-1038.
- [4] 柯俊, 吴震宇, 史文库, 等. 复合材料板簧制造工艺的研究进展 [J]. 汽车工程, 2020, 42(8): 1131-1138.
- [5] 柯俊, 史文库, 钱琛, 等. 复合材料板簧刚度的预测及匹配设计方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49 (11): 2103-2110.
- [6] 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.
- [7] 骆涛. 轿车悬架运动学及整车平顺性仿真 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008: 17-18.
- [8] Ke J, Wu Z, Chen X, et al. A review on material selection, design method and performance investigation

- of composite leaf springs [J]. Composite Structures, 2019, 226: 111277.
- [9] 竺铝涛, 代翔宇. 一种高效制备板簧的拉挤装置: 202020850897.8 [P]. 2021-01-29.
- [10] 李未. 复合材料板簧的优化设计及有限元分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 2-6.
- [11] Richard D. Automotive suspension systems benefit from composites [J]. Reinforced Plastics, 2003, 47 (11): 18-21.
- [12] Kirkham B E, Sullivan L S, Bauerle R E. Development of the lifeflex tm suspension leaf spring [J]. SAE Transactions, 1982, 91: 663-673.
- [13] 钱琛. 某轻型客车复合材料板簧关键特性建模与性能优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2018: 4-11.
- [14] 孟凡壹, 邹志伟, 秦闯, 等. 浅谈批产复合材料板簧成型工艺 [J]. 纤维复合材料, 2020, 37(2): 41-44.
- [15] Kim R W, Kim C M, Hwang K H, et al. Embedded based real-time monitoring in the high-pressure resin transfer molding process for CFRP [J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1795.
- [16] Moon M S, Yun Y, Yoo M H, et al. Carbon fiber manufacturing and applications as a benchmark for nanotube superfiber development [J]. Nanotube Superfiber Materials (Second Edition), 2019: 879-896.
- [17] Deringer T, Drummer D. The influence of mold temperature on thermoset in-mold forming [J]. Journal of Polymer Engineering, 2020, 40(3): 256-266.
- [18] Bircicek S, Bora M O, Arkin E, et al. Design and analysis of thermoplastic prepreg based heavy commercial vehicle seat [J]. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 2020, 11: 98-105.
- [19] Shokrieh M M, Rezaei D. Analysis and optimization of a composite leaf spring [J]. Composite Structures, 2003, 60(3): 317-325.
- [20] Kueh J T J, Faris T. Finite element analysis on the static and fatigue characteristics of composite multi-leaf spring [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2012, 13(3): 159-164.
- [21] Soliman E S M M. Static and vibration analysis of CFRP composite mono leaf spring [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(1): 5-14.
- [22] Manjunath H N, Manjunath K, Rangaswamy T. Static analysis and fatigue life prediction of composite leaf spring for a light commercial vehicle (TATA ACE) [J]. International Journal of Engineering Research, 2014, 3(7): 422-425.
- [23] Ali K S A, Manuel D J, Balamurugan M, et al.

- Analysis of composite leaf spring using ANSYS software[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37: 2346-2351.
- [24] Venkatesan M, Gandhi V, Janarthan E. Performance analysis of composite leaf spring in a defence sumo vehicle [J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2015, 10(5): 680-691.
- [25] Khatkar V, Behera B K. Experimental investigation of composite leaf spring reinforced with various fiber architecture[J]. *Advanced Composite Materials*, 2020, 29(2): 129-145.
- [26] Shibi S M, Tamilselvan C K. Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 21: 45-51.
- [27] Gaylo R, Farahani S, Schmuesser D, et al. Optimization of a mono-composite leaf spring using a hybrid fiber-layup approach[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, 14(2): 407-421.
- [28] Rajendran I, Vijayarangan S. Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms [J]. *Computers & Structures*, 2001, 79(11): 1121-1129.
- [29] Qian C, Shi W K, Chen Z Y, et al. Fatigue reliability design of composite leaf springs based on ply scheme optimization[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 40-46.
- [30] 李新娥. 玄武岩纤维和织物的研究进展[J]. *纺织学报*, 2010, 31(1): 145-152.
- [31] 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.
- [32] Ma L L, He J W, Gu Y Z, et al. Structure design of GFRP composite leaf spring: An experimental and finite element analysis[J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 1193.
- [33] 张小燕, 席长飞, 王大鹏, 等. 汽车材料板簧的制备方法 & 性能测试[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(S1): 250-252.
- [34] 李雷. 汽车复合材料板簧研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 23-39.
- [35] 宋倩倩. 玄武岩纤维复合材料板簧结构与静动特性分析研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018: 28-36.
- [36] Yang S X, Shi W K, Chen Z Y, et al. Composite mechanics and energy method based stiffness prediction model for composite leaf springs[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2019, 47(3): 375-386.
- [37] Shi W K, Qian C, Chen Z Y, et al. Establishment of theoretical model of composite leaf springs by using the mechanics of composite materials [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(18): 1316-1326.
- [38] 李宇菲. 复合材料汽车板簧的优化设计及其有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 16-28.
- [39] 柯俊, 史文库, 钱琛, 等. 采用遗传算法的复合材料板簧多目标优化方法[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(8): 102-108.
- [40] 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.
- [41] 袁皎秋. 复合材料板簧的选材和固化工艺研究[D]. 上海: 同济大学, 1989: 12-29.
- [42] 郭红, 周晓伟, 张恒. 复合材料板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.
- [43] 周洲, 王明星, 肖罗喜, 等. 厚壁复合材料纵置板簧用预浸料固化工艺及验证[J]. *塑料工业*, 2018, 46(1): 10-13.
- [44] 吕文丽, 李再轲, 王甲世, 等. 复合材料板簧用预浸料的固化工艺[J]. *武汉工程大学学报*, 2014, 36(11): 54-58.
- [45] 蔡焯梦, 孙树凯. 玻璃纤维预浸料制备板簧模压成型工艺研究[J]. *合成纤维工业*, 2018, 41(6): 31-35.
- [46] 任昆, 蔡金刚, 武海鹏. 汽车用复合材料前置板簧的研究[J]. *纤维复合材料*, 2015, 32(4): 31-33.
- [47] 史文库, 刘鹤龙, 刘巧斌, 等. 复合材料板簧非线性迟滞建模和参数识别[J]. *振动工程学报*, 2019, 32(6): 1050-1059.
- [48] 苑琳. 复合材料板簧结构优化设计及力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 12-55.
- [49] Zheng Y H, Xue K, Huang Z G. Finite element analysis of composite leaf spring [C]//2011 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, 2011: 316-319.
- [50] 柯俊, 史文库, 袁可. 基于整车性能的复合材料板簧阻尼特性研究[J]. *汽车工程*, 2019, 41(12): 1424-1429.

(责任编辑: 刘国金)