

玻璃纤维增强环氧树脂复合材料板簧缠绕成型与质量分析

张靠民¹ 赵 焱² 王 玮³ 李如燕²

(1.昆明理工大学民航与航空学院,昆明 650504;2.昆明理工大学固体废弃物资源化国家工程研究中心,昆明 650093;3.河北省应急救援和训练中心,石家庄 050000)

摘 要 采用缠绕成型工艺,成功制备了车用变宽度等截面连续纤维增强环氧树脂基复合材料板簧,从纤维质量分数、微观形貌、疲劳寿命及破损方式等方面初步分析了复合材料板簧的成型质量和疲劳寿命。结果表明,相对于阳模面,复合材料板簧阴模面具有更高的纤维质量分数,更容易出现贫胶现象。疲劳寿命实验表明,所制备的复合材料板簧疲劳寿命高达 22 万次以上,拉伸破坏发生在纤维质量分数较高的阴模面。

关键词 复合材料板簧,缠绕成型,疲劳寿命,轻量化

Quality of FRP leaf spring influenced by tension through filament winding

Zhang Kaomin¹ Zhan Yan² Wang Wei³ Li Ruyan²

(1.Faculty of Civil Aviation and Aeronautics,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650504;2.National Engineering Research Center of Waste Resource Recovery,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650093;3.Emergency Rescue and Training Center of Hebei Provincial,Shijiazhuang 050000)

Abstract Vehicle lightweight is a hot topic in the research and development of automotive materials and structures.Continuous fiber reinforced epoxy resin matrix composite springs with variable width were successfully prepared by winding process.The forming quality and service performance of springs were analyzed due to the fiber quality fraction,micromorphology,fatigue life and breakage model.The results shown that,compared to male surface,the female surface had higher fiber quality fraction,and was more prone to poor glue.The fatigue life test showed that the fatigue life of the springs was more than 220000 times,and the tensile failure occurred on the female surface with high fiber quality fraction.

Key words composite material leaf spring,filament winding,fatigue life,light weight

近年来,随着新能源汽车的发展,汽车轻量化成为制约汽车工业持续发展的关键。连续纤维增强复合材料具有质轻高强、耐腐蚀、耐疲劳、可整体成型等特点,广泛应用于航空航天、交通运输等领域,单片式复合材料板簧就是先进复合材料在汽车工业的典型应用之一。相比传统钢板簧,复合材料板簧具有质量轻、弹性应变大、疲劳寿命高、装配简单等诸多优点^[1-3]。由于汽车板簧占车体自重的 5%~7%^[4],发展复合材料板簧可显著减轻汽车重量,同时延长板簧使用寿命,这对于新能源汽车至关重要。美国早在 20 世纪 80 年代就对复合材料板簧的成型工艺进行了研究^[5-6],开发了复合材料板簧批量化制造技术,推动了复合材料板簧在美国汽车工业的规

模化应用。国内关于复合材料板簧的研究始于 20 世纪 90 年代^[7],但从公开的文献报道看,一直没有取得技术突破。

连续纤维增强复合材料板簧的成型工艺主要有预浸料模压成型、缠绕成型以及树脂传递模塑成型(RTM)3 种工艺。其中预浸料模压成型可精确控制温度、压力等工艺参数,并且预浸料的使用确保了纤维与树脂良好的浸渍,因此预浸料模压成型制备复合材料板簧成型质量高。但是,模压成型工艺在成型变宽度、变厚度连续纤维增强复合材料板簧时,板簧长度方向会有纤维不连续的现象,影响材料性能的发挥。此外,预浸料的剪裁和铺放用时较长,降低了复合材料板簧的成型效率。RTM 成型工艺在

基金项目:国家自然科学基金(51563013)

作者简介:张靠民(1980-),男,博士,讲师,主要从事聚合物基复合材料方面的教学与研究。

材料体系研究成熟的条件下虽具有较高的成型效率,但其预成型体的制作较为复杂。尤其是以单向纤维增强的等截面变厚度复合材料板簧,其截面形状沿纤维方向不断变化,且制件较长、厚度大,预成型体制作困难。缠绕成型工艺中,纤维丝束在浸胶后直接缠绕于模腔内,简化了工艺步骤,保证纤维的连续性。并且缠绕成型用模具采用多模腔结构,一次缠绕可以同时成型多件板簧,提高生产效率,降低了生产成本,但其工艺参数的精确控制和材料体系对工艺的适应性是难点。

综合来看,缠绕成型工艺更适于复合材料板簧的高效率低成本成型,难点在于其工艺参数的精确控制,而缠绕工艺参数对复合材料板簧的成型质量具有关键影响^[8-10]。本研究采用缠绕成型工艺制备了玻璃纤维增强环氧树脂复合材料板簧,对复合材料板簧的成型质量和疲劳寿命进行了初步分析,为缠绕成型复合材料板簧提供有益借鉴。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

双酚 A 型环氧树脂 E51,无锡树脂厂;酸酐固化剂,自制;E 型无碱玻璃纤维,泰山玻璃纤维有限公司。

卧式疲劳试验机,辽阳弹簧设备厂;光学数码金相显微镜(BX51 型),日本 Olympus 公司;扫描电子显微镜(SEM,CS3400 型),英国 Cam scan 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复合材料板簧缠绕成型

等截面变宽度复合材料板簧结构如图 1 所示,其横截面积处处相等,两端和中间为等宽等厚段,而从中间到两端的过渡段为变宽变厚部分。

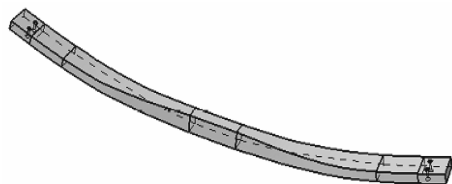


图 1 复合材料板簧结构

复合材料板簧缠绕成型工艺流程如图 2 所示,

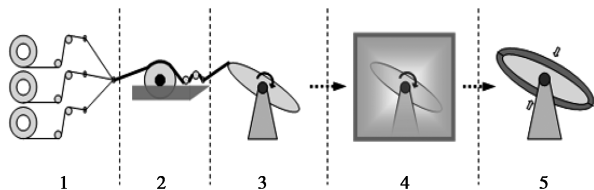


图 2 复合材料板簧缠绕成型工艺示意图

(1;纤维预加张力;2;纤维浸胶;3;纤维缠绕;4;预凝胶;5;模压固化)

包括缠绕(包括施加预张力、纤维浸胶、纤维缠绕)、预凝胶、模压固化 3 个关键工艺单元。

缠绕阶段是纤维经浸胶槽浸胶后缠绕入模腔的工艺单元,缠绕张力的施加、纤维和树脂的浸渍在此单元完成,缠绕张力为 80N,模具转速 5r/min;缠绕完成后将模具放入凝胶炉中进行预热凝胶。在此阶段,整个模具和缠绕好的板簧预成型体放入凝胶炉中,凝胶炉温度设定为 80℃,模具在凝胶炉内的转速为 3r/min,保持 30min;然后加压升温至 100℃固化 1h;最后将温度升至 120℃保持 1.5h 完成固化,自然冷却脱模。

1.2.2 纤维质量分数测试

为考察板簧制件的均匀性,在板簧长度方向的中间段、变宽段和端部段 3 个区域进行取样,并标记为 I、II、III;将每个区域中的阴模面、阳模面和中间层单独取样测试纤维质量分数,测试方法参考 GB/T 2577—2005。

1.2.3 板簧疲劳寿命测试

复合材料板簧疲劳强度测试参考钢制板簧疲劳强度测试标准^[11]。板簧夹持方式见图 3(a),加载方式如图 3(b)所示,图中纵坐标表示板簧加载中心在加载方向上的位移。没有施加预加载时,板簧加载中心的纵坐标为 0mm,施加预加载后,其坐标为 33mm,这部分载荷在整个疲劳实验过程中保持不变。另一部分为动态载荷,以预加载坐标 33mm 为原点,在相同方向上继续施加 55mm 的预加变形,这时板簧加载中心的坐标为 88mm,以此纵坐标为原点,施加频率为 3HZ 的 55mm 振幅的动态载荷,直到板簧出现破损为止。

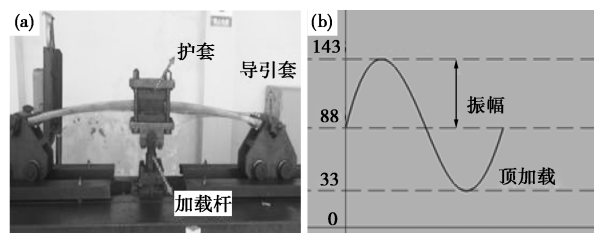


图 3 板簧疲劳强度实验实物图(a)和加载方式示意图(b)

1.2.4 纤维断裂横截面微观形貌分析

取疲劳实验后纤维断裂面制备扫描电子显微镜试样,观察纤维断裂面的微观形貌,分析纤维的破损模式。在未做疲劳实验板簧的阳模面、阴模面和中间位置分别取样,利用金相显微镜观察内部形貌,分析复合材料板簧内部成型质量及缺陷分布。

2 结果与讨论

2.1 板簧成型质量与疲劳特性分析

图4是复合材料板簧的实物照片,由图可见,板簧阳模面有明显的富树脂现象,颜色较深;在变宽度位置,板簧阴模面明显发白,而且在变宽度的侧面颜色泛黄,有集中放热现象。缠绕成型时,纤维是以直线的形式缠绕在芯模上,而由于变宽度结构,板簧长度方向边缘是弧线形,纤维难以完全填充弧形区域,造成弧线形边缘处有较多的树脂富集,固化过程中易发生集中放热,导致局部温度过高,这是造成此处固化后轻微发黄的原因。

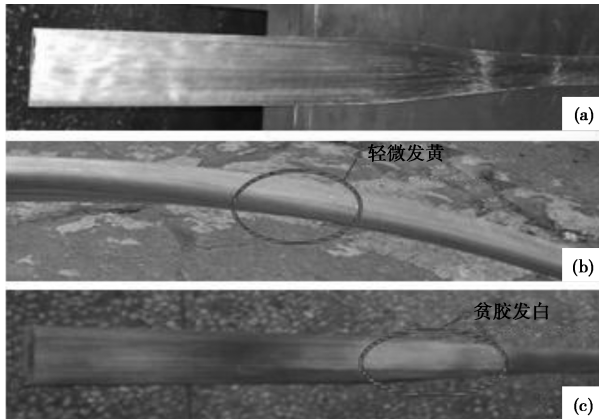


图4 复合材料板簧实物图
[(a)阳模面;(b)侧面;(c)阴模面]

为了考察复合材料板簧制件纤维含量的均匀性,测试了复合材料板簧不同区域的纤维质量分数,测试结果如表1所示。从测试结果看,复合材料板簧的纤维含量在长度方向上具有较高的均匀性,但在变宽度(Ⅱ区)区域的厚度方向纤维质量分数变化较大,阳模面只有74.6%,而阴模面为83.7%,这是

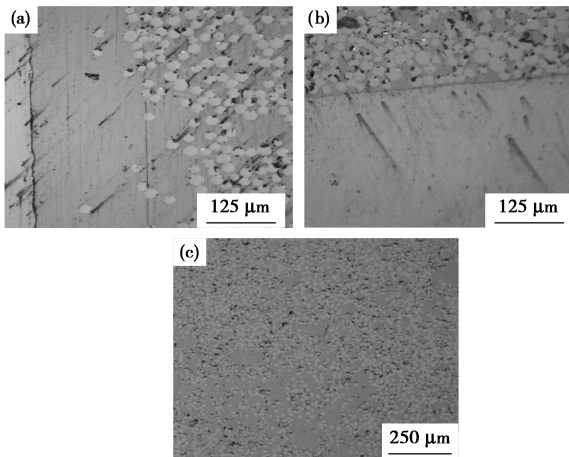


图5 复合材料板簧厚度方向横截面显微照片
[(a)阳模;(b)阴模;(c)中间层]

表1 板簧不同区域纤维质量分数

取样位置	I区	Ⅱ区	Ⅲ区
阳模面侧/%	79.2	74.6	77.1
中间层/%	80.2	78.9	78.1
阴模面侧/%	81.1	83.7	79.9

阳模面富树脂而阴模面贫胶的直接原因。图5是板簧厚度方向上阳模面、阴模面和中间区域的金相纤维形貌,可以看到,板簧阳模面存在富树脂薄层,这一薄层内树脂较多、纤维较少。在板簧阴模面,树脂和纤维的分布和阳模面相反,树脂较少而纤维较多,形成贫胶区。总体上看,板簧阳模面纤维质量分数低于阴模面纤维质量分数,这和上述测得的纤维质量分数结果一致。

疲劳测试表明,复合材料板簧的疲劳寿命高达 22×10^4 次,达到了汽车板簧的疲劳寿命和设计要求。

2.2 复合材料板簧疲劳破坏形貌研究

根据复合材料板簧疲劳破坏断裂SEM微观形貌(图6),板簧的破损位置为变宽度处的阴模面,为了进一步表征破坏模式,在板簧疲劳破坏部位取样进行微观形貌观察。从SEM图看,板簧破坏断面呈现典型的纤维拔脱和断裂特征,表明板簧破坏断面的损伤形式为拉伸破坏。板簧的破坏部位处于板簧的阴模面,而在疲劳加载过程中,阳模面受压、阴模面受拉,可见,板簧破坏断面的破坏模式与受力分析是一致的。这表明,要想进一步提高复合材料板簧的疲劳寿命,需要重点提高阴模面变宽度处纤维和树脂的复合质量,提高板簧阴模面处的受拉强度和服役寿命。

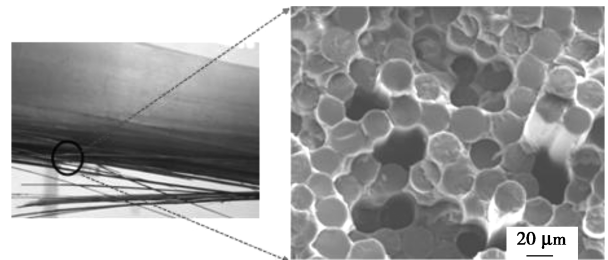


图6 板簧疲劳破坏断裂微观形貌

3 结论

(1)采用缠绕成型工艺制备的变宽度等截面复合材料板簧玻璃纤维分布基本均匀,但在变截面处厚度方向上,玻璃纤维分布分散性较大,靠近阳模面纤维含量少,靠近阴模面纤维含量多。

(2)复合材料板簧疲劳破坏首先发生在变宽度

处纤维含量较高的阴模面,纤维破损为拉伸断裂。为了进一步提高板簧的疲劳寿命,应提高板簧变宽度区域复合材料的拉伸强度和界面粘结性能。

参考文献

- [1] Pozhil A, Parameshwaran T. Comparison of performance of glass fiber reinforced plastic leaf spring with steel leaf spring [J]. International Journal of ChemTech Research, 2013, 5(3): 1339.
- [2] Ijaya B, Akshmi L, Satyanara I. Static and dynamic analysis on composite leaf spring in heavy vehicle international [J]. Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2012, 2(1): 80.
- [3] Devendra K, Rangaswamy T. Evaluation of thermal properties of E-Glass/ Epoxy composites filled by different filler materials [J]. International Journal of Computational Engineering Research, 2012, 2(5): 1708.
- [4] 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(8): 103.
- [5] The Japan Society for Composite Materials. Composite materials proceedings of japan-US conference [C]. Tokyo: The Japan Society for Composite Materials, 1981.
- [6] Dharam C K. The ASME winter annual meeting, American Society of Mechanical Engineers 1978 [C]. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers, 1978.
- [7] 江梅, 李尹熙. 纤维复合材料板簧的研究 [J]. 汽车工艺与材料, 1992(9): 25.
- [8] Tabuchi D, Sajima T, Doi T, et al. Development of a filament winding machine based on internal heating by a high-temperature fluid for composite vessels [J]. Sensors and Materials, 2011, 23(6): 347-58.
- [9] Mertiny P, Ellyin F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites [J]. Composites, Part A, 2002, 33: 1615.
- [10] Cohen D. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength [J]. Composites Part A, 1997, 28A: 1035.
- [11] 辽阳汽车钢板弹簧研究所. QCT 29035—1991 汽车钢板弹簧技术条件 [S]. 北京: 中国汽车工业总公司, 1992.

收稿日期: 2019-07-10

(上接第 165 页)

(3) 键合剂能明显地改善推进剂的力学性能, 采用 N 和 T 组合键合剂可以使推进剂高温、低温和常温强度达到 0.653MPa、2.228MPa 和 0.693MPa, 延伸率分别为 47.0%、62.1% 和 42.3%。

参考文献

- [1] 翟进贤, 杨荣杰, 朱立勋. BAMO-THF 复合推进剂能量特性计算与分析 [J]. 含能材料, 2009, 17(1): 73-78.
- [2] 吴文辉, 黎玉钦, 张聪, 等. 中性聚合物键合剂对硝酸推进剂相界面的作用 [J]. 推进技术, 2001, 22(4): 337-340.
- [3] 陈胜, 刘云飞, 姚维尚. 组分对高能 HTPB 推进剂燃烧性能和力学性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(5): 62-65.
- [4] 谢五喜, 刘春, 张伟, 等. 少烟 NEPE 推进剂的动态力学性能 [J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 45-48.
- [5] 王敦举. 键合剂在固体推进剂中的应用进展 [J]. 四川兵工报, 2009, 30(4): 33-36.
- [6] 张海燕. 中性聚合物键合剂改善高能推进剂力学性能的机理分析 [J]. 飞航导弹, 1995(9): 38-40.
- [7] 姚莹莹, 张教强. 硝酸推进剂用聚合物键合剂的研究进展 [J]. 中国胶粘剂, 2009, 18(5): 56-59.

收稿日期: 2018-08-19

(上接第 168 页)

- [2] Marengo Giovanni Antonio, Roberts Paul Michael, Moram Jonathan. Diaphragm forming: US2010/0269978 [P]. 2010-10-28.
- [3] Hallamder Per, Petersson Mikael. Hot drape forming by means of a stiffness controlled vacuum bag: US2011/0254207 [P]. 2011-10-20.
- [4] 陈亚莉. 复合材料成型工艺在 A400M 军用运输机上的应用 [J]. 航空制造技术, 2008(10): 32-35.
- [5] 匡载平, 戴棣, 王雪明. 热隔膜成型技术 [C]. 长沙: 第十六届全国复合材料学术会议论文集, 2010.
- [6] 吴志恩. 复合材料热隔膜成型 [J]. 航空制造技术, 2009(增刊 2): 113-116.
- [7] 边旭霞, 顾轶卓, 孙晶等. 热隔膜工艺温度与成型速率对 C 形复合材料成型质量的影响 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(5): 45-50.
- [8] 姚双, 李敏, 顾轶卓. 碳纤维复合材料 C 形结构热隔膜成型工艺 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 95-99.
- [9] 杨霓虹, 杨洋, 余永波. 大型民机复合材料 C 形梁预成型工艺初探 [C]. 北京: 第一届中国国际复合材料科技大会全文集, 2013.

收稿日期: 2018-09-04