

2.5 维编织复合材料振动非线性特性试验研究

刘杰明

(南京航空航天大学 航空发动机热环境与结构工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要:通过强迫振动试验测试,探索 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板结构中的振动非线性特性。为了抑制材料的大变形行为,将 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板结构置身于不同边界条件、不同幅值水平基础激励下进行扫频强迫振动试验。试验结果表明:在微幅变形条件下复合材料平板的强迫振动响应呈现出明显的非线性特征。

关键词:2.5 维编织复合材料;树脂基;振动非线性;强迫振动

中图分类号:TB53; V250 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0048-04

Experimental Study on Vibration Nonlinearity Characteristic of 2.5D Braided Composites

LIU Jieming

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The vibration nonlinear characteristics of 2.5D weft resin-based braided composite plate structure is explored by forced vibration test. In order to suppress the large deformation behavior of the material, the plate structure of 2.5D weft resin-based braided composite, subjected to different boundary conditions and different levels of basic excitation, is tested by means of swept frequency forced vibration. The experimental results show that the forced vibration response of the composite plate presents obvious nonlinear characteristics under the condition of slight deformation.

Keywords: 2.5D braided composite; resin-based; vibration nonlinearity characteristic; forced vibration

0 引言

复合材料的力学性能通常呈较强的非线性特性,其非线性因素可能源自于基体组分材料固有的黏弹性力学行为特性抑或复合材料内部缺陷或细小损伤(界面脱黏、分层、基体开裂、纤维断裂等)^[1]。在线性振动理论范畴内,结构在简谐激励下的共振频率、模态阻尼比等动力学特性与结构的振幅无关。但在非线性振动理论范畴内,结构在简谐激励下的强迫振动特性与激振力水平或振幅水平表现出强相关。陈建恩^[2]应用解析方法和数值方法研究了点阵夹芯板的非线性振动响应、非线性刚度特性等问题,分析了分叉和混沌运动,并且实验研究了碳纤维复合材料层合板的非线性动力学特性。TABIEI A 等^[3]在微观力学层面研究了编织复合材料的材料与几何非线性特性,并进行了微观力学层面的有限元分析。AMABILI M 等^[4]研究了矩形复合材料层合板在不同边界条件下非线性振动特性。PICKARD A^[5]通过高周疲劳试验研究了两种不同试件损伤情况下的非线性响应,观察了不同模态下非线性行为之间的相关性,并研究了由于损伤增加而引起的变化。

当前针对 2.5 维编织复合材料的损伤研究多集中在强度方面^[6],有关振动非线性的研究尚未出现。陈晶^[7]在探索 2D 针刺 C/SiC 复合材料的振动性能时,通过给复

合材料悬臂平板施加不同水平的基础激励载荷,在振动台上进行悬臂平板振动试验。试验结果表明,随着基础激励水平的提高,共振频率出现向左移动的“刚度软化”现象,并且当基础激励载荷达到一定水平时,频响函数出现了振幅突升/突降的“跳跃”现象。该论文将这种振动非线性现象产生的原因归结于基体裂纹的开闭合行为和纤维/基体界面的滑移行为。然而在该试验中,悬臂平板在承受激励幅值为 $3g$ (g 表示加速度,取 10 m/s^2) 以上的基础激励载荷时,平板结构发生了明显的振幅过大引起的大变形现象,而结构大变形会引起几何非线性。本文认为悬臂平板的强迫振动试验难以准确诠释复合材料自身的材料非线性特性,需在此试验基础上对大变形行为进行抑制,从而削弱几何非线性因素。

1 基础激励扫频强迫振动测试

1.1 试验件制备

本文采用的基础激励扫频强迫振动试验件基于 T800/BMP350 材料体系,采用 RTM 工艺成型。纤维材料选用国产 T800-12K 纤维,其中 12K 代表单束纤维由 12000 根 T800 碳纤维单丝构成,树脂选用聚酰亚胺 BMP350 树脂。最终成型整板尺寸为 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,其纬纱层数为 4 层;机织结构形式为纬向浅交弯联

作者简介:刘杰明(1995—)男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为航空发动机结构动力学。

结构;纤维体积含量为 45%;预制整板厚度为 2 mm;整板质量为 203 g。成型后的复合材料整板经实际测量发现,除整板件的边缘部分存在树脂分布不均外,其余部分树脂填充较为均匀,故认为成型效果良好。

进行试验的 2.5 维树脂基编织复合材料平板试验件尺寸有两种尺寸规格,分别是尺寸为 130 mm×30 mm×2 mm 的悬臂平板和尺寸为 160 mm×30 mm×2 mm 的两端固支约束平板。

1.2 试验设备

试验激振设备采用苏式振动台,型号为 DC-600,为扫频振动测试提供幅值恒定的基础简谐激励;激光位移传感器型号为 OPTEX CD33-85N,用于实时测取测点位置的位移变化;采集和分析数据采用动态信号分析仪。

1.3 试验测试方法

考虑到悬臂平板在高幅值水平的基础激励下发生强迫振动时,会产生由于振幅过大引起的结构大变形,因此分别开展了一端固支一端自由的悬臂平板和两端固支平板试验件的扫频振动测试。两端固支的约束方式可以有效约束平板结构在高幅值水平基础激励下的振幅,避免由于结构大变形引发的几何非线性因素,便于考察在微幅变形下 2.5 维编织树脂基复合材料平板的振动非线性现象。

采用图 1 所示的试验装置,开展 2.5 维树脂基编织复合材料两端固支平板的基础激励扫频强迫振动测试,移除一端固支约束夹块即可实现悬臂平板约束边界条件。最后通过动态分析仪获取平板结构在不同幅值水平的基础激励下的强迫振动响应曲线,揭示材料自身的振动非线性特性。

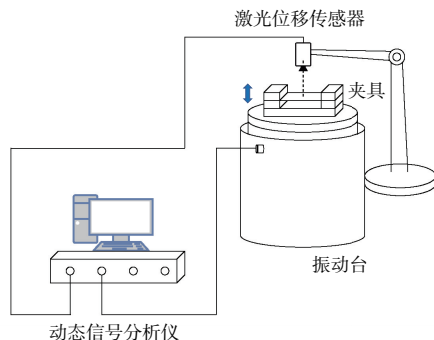


图 1 简支平板强迫振动测试系统示意图

正式试验开始前,首先通过加速度大小为 0.1g 的低激振力水平基础激励扫频试验确定其初始一阶共振频率,并在测试结果中用虚线标出。正式试验时,在悬臂平板初始共振频率附近进行窄带扫频试验,扫频带宽为 40 Hz。设置试验设备的采样频率为 2000 Hz;采样精度为 0.1 μm;扫频速率为 0.1 oct/min;每根试验件均依次设置 0.1g、0.5g、1g、3g、5g、7g 共 6 个加速度载荷水平,并且在每个加速度载荷水平下分别进行频率递增的正向扫频和频率递减的逆向扫频。测试系统仅能输出“时间-位移”数据,可使用 Matlab 软件通过傅里叶变换得到“频率-位移”曲线。

2 试验结果

2.1 悬臂平板基础激励扫频测试结果

正式试验开始前,先通过加速度大小为 0.1g 的低激振力水平基础激励扫频试验确定其初始一阶共振频率,试验测试系统安装状态如图 2 所示。

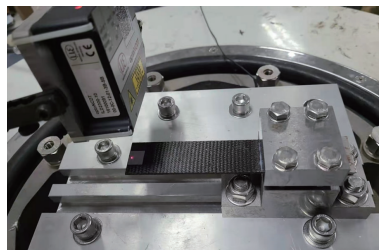


图 2 悬臂平板基础激励测试系统安装状态

正式试验时,在悬臂平板初始共振频率附近进行窄带扫频试验,扫频带宽为 40 Hz。最终的测试结果包含了经、纬向 2.5 维编织树脂基复合材料悬臂平板在不同水平基础激励下的正向和逆向扫频振动测试结果,如图 3-图 6 所示。

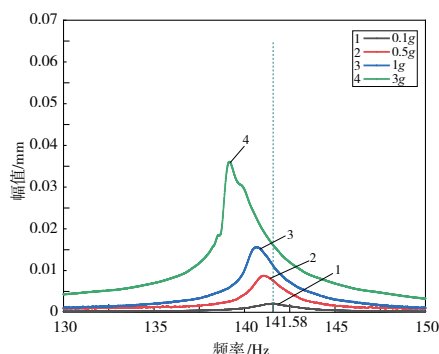


图 3 经向悬臂平板正向扫频结果

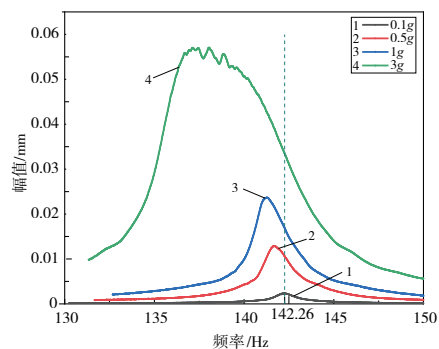


图 4 经向悬臂平板逆向扫频结果

图 3 和图 4 中未展示 5g、7g 两个加速度载荷水平的强迫振动响应曲线是因为经向 2.5 维编织树脂基复合材料悬臂平板在经历了 3g 的基础激励正向扫频测试后产生了肉眼可见的破坏性裂纹损伤,为安全起见没有继续进行更高幅值水平的扫频振动测试。

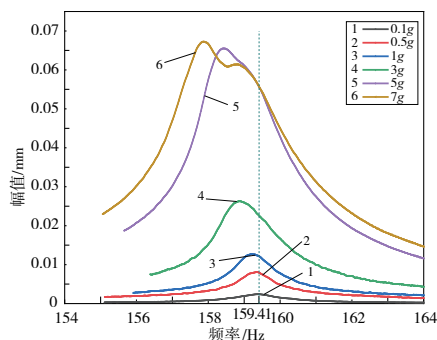


图5 纬向悬臂平板正向扫频结果

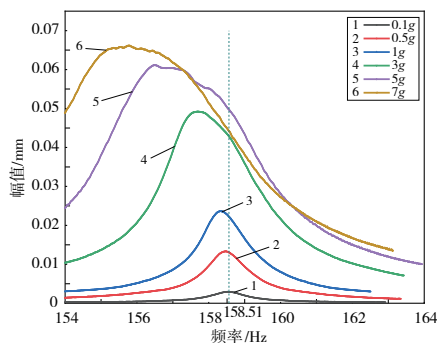


图6 纬向悬臂平板逆向扫频结果

观察图3-图6所示的测试结果发现:1)随着基础激励水平的提高,经、纬向2.5维树脂基编织复合材料悬臂平板的正向扫频和逆向扫频幅频曲线均表现出共振频率左移,共振振幅增大的“刚度渐软”特性。2)同一基础激励水平下,经、纬向2.5维树脂基编织复合材料悬臂平板的正向扫频和逆向扫频结果存在共振频率不一致的现象。造成该现象的原因可能是2.5维树脂基编织复合材料平板在承受幅值为0.1g的激励载荷时就会产生内部损伤,同时也不排除振动台测试系统本身也存在正/逆向扫频结果不一致的问题。3)在高加速度幅值($\geq 3g$)的基础激励下,悬臂平板发生了明显的振幅过大现象,这使得所观察到的振动非线性现象可能包含了材料自身的材料非线性和大变形行为引起的几何非线性。为了能够有效抑制材料的大变形行为,下文将通过两端固支平板的基础激励扫频试验来考察2.5维树脂基编织复合材料的振动非线性特性。

2.2 两端固支平板基础激励扫频测试结果

两端固支约束平板强迫振动试验使用的试验件长宽高尺寸为160 mm×30 mm×2 mm,两端各约束30 mm,激光测点布置在整个平板的中心位置,测试系统安装状态如图7所示。

与悬臂平板的测试流程相同,首先通过加速度大小为0.1g的低激励力水平基础激励扫频试验确定其初始共振频率。接着在初始共振频率附近进行窄带扫频试验,扫频带宽为40 Hz。最终的测试结果包含了经、纬向2.5维编

织树脂基复合材料两端固支平板在不同水平基础激励下的正向和逆向扫频振动测试结果,如图8-图11所示,图中虚线标示的频率为初始共振频率。

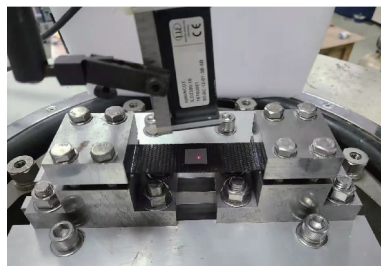


图7 两端固支约束平板基础激励测试系统安装状态

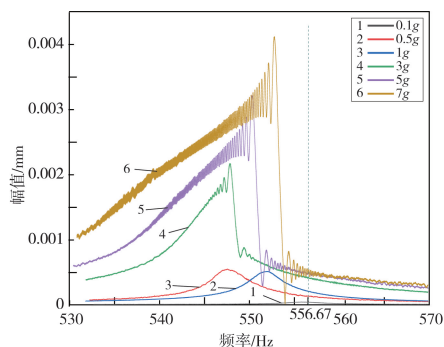


图8 经向两端固支平板正向扫频结果

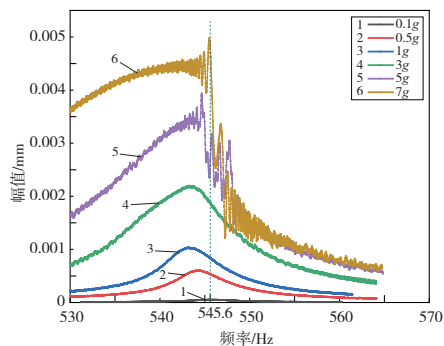


图9 经向两端固支平板逆向扫频结果

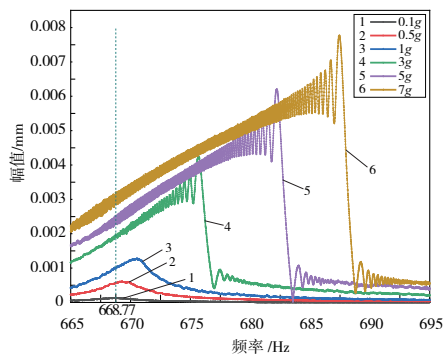


图10 纬向两端固支平板正向扫频结果

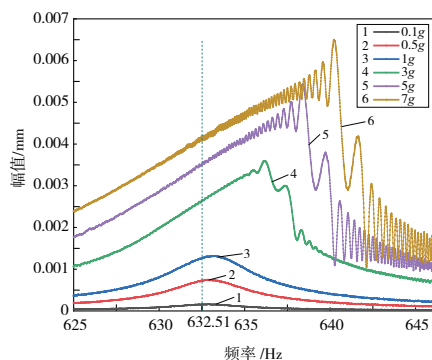


图 11 纬向两端固支平板逆向扫频结果

观察图 8-图 11 所示的测试结果发现:1) 经、纬向 2.5 维树脂基编织复合材料两端固支平板在低幅值水平激励下,其强迫振动响应均呈线性振动的特点,并且共振频率变化很小;2) 经向 2.5 维编织树脂基复合材料两端固支平板的测试结果揭示了刚度“软化”现象,其在高幅值水平激励条件下还发生了显著的振幅突升/突降的“跳跃”现象;3) 纬向 2.5 维树脂基编织复合材料两端固支平板的测试结果揭示了非常显著的刚度“硬化”现象和振幅“跳跃”现象;4) 在两端固支约束条件下,整个 2.5 维树脂基编织复合材料平板的基础激励扫频试验过程中并未观察到肉眼可辨的振幅过大现象。由此可排除由于大变形引发的几何非线性因素的影响。

3 结语

采用两端固支约束平板的基础激励扫频振动测试避免了因材料结构大变形引起的几何非线性因素影响,能够

准确揭示 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板试验件在高水平幅值基础激励、微幅变形条件下的振动非线性特征,包括材料的变刚度特性(刚度软化/刚度硬化)和非线性振动的振幅“跳跃”现象。通常复合材料的基体材料都具有非线性黏弹性性质,同时复合材料结构非主拉伸方向内面剪应力-应变呈非线性关系。因而在微幅变形条件下,复合材料的宏观强迫振动特性也呈现非线性特征。本文开展的 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板的基础激励扫频振动试验研究工作,可为今后振动非线性特性的理论研究工作提供参考。

参考文献:

- [1] 宋健. 2.5 维机织复合材料力学行为及寿命预测模型研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [2] 陈建恩. 轻质材料层合板的非线性动力学理论分析与实验研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2013.
- [3] TABIEI A, IVANOV I. Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2004, 39(2): 175-88.
- [4] AMABILI M, KARAZIS K, KHORSHIDI K. Nonlinear vibrations of rectangular laminated composite plates with different boundary conditions [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2011, 11(4): 673-95.
- [5] PICKARD A. Composite non-linearity in high cycle fatigue experimentation [M]. [S.L.: s.n.], 2014: 183-192.
- [6] 王柱成, 温卫东. 2.5 维机织复合材料冲击剩余强度试验研究 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 47-49.
- [7] 陈晶. 陶瓷基复合材料本构模型及振动分析 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.

收稿日期:2021-01-22

(上接第 29 页)

3 结语

1) 采用田口正交试验法,以筋高、横向筋条宽度、纵向筋条间距为参数,以横向筋条失稳风险和高筋蒙皮的质量为目标构建了高筋蒙皮热压弯成形的仿真试验方案,通过横向筋条纵向位移表征筋条失稳的风险,通过方差分析确定了各结构参数对失稳和质量影响的显著性。

2) 筋高对高筋蒙皮质量的影响较大,增大筋高会有效减轻蒙皮的质量。横向筋条的筋宽对筋条失稳的影响较大,在筋宽<2 mm 时筋条极易发生失稳缺陷。

3) 针对 5A06 铝合金高筋蒙皮的热压弯成形,得到了较好的结构参数组合 $A(\bar{T}_4)$ 、 $B(\bar{T}_1)$ 、 $C(\bar{T}_1)$,即筋高取 25 mm,筋宽取 4 mm,纵向筋间距取 50 mm,并通过模拟仿真验证所得参数的可靠性。

参考文献:

- [1] 赵长喜,李继霞. 航天器整体壁板结构制造技术[J]. 航天制造技术,2006(4):44-48.
- [2] 王正超,赵东伟,尹怀仙. 基于近似模型的城市客车车架轻量

化设计研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):169-171,187.

- [3] 郝永刚,张志超,祝全超,等. 铝合金带筋板柔性多点模渐进压弯成形工艺仿真与实验[J]. 塑性工程学报,2020,27(11):12-17.
- [4] 付守冲,杨立军,王扬,等. 5A06 铝合金交叉筋壁板激光诱导自由成形扭曲现象研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(35):45-51.
- [5] WANG HY, XIE H, CHENG W, et al. Multi-objective optimisation on crashworthiness of front longitudinal beam (FLB) coupled with sheet metal stamping process [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 132:36-47.
- [6] 欧玲,浦荣,曾方欣,等. 5A06 合金高温塑性变形行为[J]. 锻压技术,2018,43(6):123-128.
- [7] 秦中环,李保永,韩春岭,等. 5A06 铝合金高筋蒙皮热压成形规律及尺寸精度研究[J]. 锻压技术,2020,45(8):76-82.
- [8] OLIAEI E, HEIDARI B S, DAVACHI S M, et al. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using taguchi, ANOVA and artificial neural network methods [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(8):710-720.

收稿日期:2021-03-09