

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.012

CFRP 层合周期结构的阻尼性能

张锦光^{1,2}, 刘海鑫¹, 窦玉宽¹, 文湘隆^{1,3}, 万萌¹

(1. 武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学先进材料制造装备与技术研究院, 武汉 430070;

3. 湖北省磁悬浮工程技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 碳纤维复合材料(CFRP)层合周期结构由于具有优异的阻尼性能,适用于多种减振装置,但是,其刚度、阻尼等振动特性会受到铺层方式的周期变化、纤维的非连续性等因素的影响。针对CFRP层合周期结构的特点,设计了一种沿长度方向单周期包含两个元胞的CFRP层合周期结构板,制备了相应试验件并进行了自由模态试验,研究该结构阻尼性能变化规律。实验结果表明,随着周期个数与元胞单元厚度占比的增加,一阶和二阶阻尼损耗因子逐渐变大,一阶和二阶弯曲固有频率逐渐下降;保持CFRP层合周期结构中一个元胞的铺层角度不变,随着另一个元胞铺层角度的增加,一阶、二阶阻尼损耗因子都呈现先增大后减小的趋势,一阶和二阶弯曲固有频率在铺层角度为15°时达到最大值,之后随着铺层角度的增加呈现出轻微上下波动的变化,并未出现较大波动。当CFRP层合周期结构板元胞单元厚度占比为50%、周期个数为4时,相比于传统的CFRP层合板,前两阶弯曲模态下的阻尼损耗因子分别提高19.59%和15.63%,通过三点弯曲试验测试结果得知,该结构弯曲刚度相比传统CFRP层合板降低18.21%。

关键词: 碳纤维复合材料;周期结构;阻尼;固有频率;刚度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0083-06

Damping performances of CFRP laminated periodic structures

ZHANG Jingguang^{1,2}, LIU Haixin¹, DOU Yukuan¹, WEN Xianglong^{1,3}, WAN Meng¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Advanced Material and Manufacturing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Magnetic Suspension, Wuhan 430070, China)

Abstract : Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) laminated periodic structures are suitable for a variety of vibration damping devices due to their excellent damping properties. However, its vibration characteristics, such as stiffness and damping, are affected by periodic changes in the layup method and discontinuity of the fibers. According to the characteristics of the CFRP laminated periodic structure, a CFRP laminated periodic structure plate containing two cells in a single period along the length direction was designed, and the corresponding test samples were prepared and the free-modal test was completed to study the variation law of the damping performances of the structure. The experimental results show that with the increase of the number of periods and the proportion of cells thickness in the plate, the first-order and second-order damping loss factors gradually increase, and the first-order and second-order bending natural frequencies gradually decrease. Keeping the ply angle of one cell in CFRP laminated periodic structure unchanged, with the increase of the angle of the other cell, the first-order and second-order damping loss factors first increase and then decrease, the natural frequencies of the first and second order bending reach the maximum value when the ply angle is 15°, and then show a slight upward and downward fluctuation with the increase of the ply angle, but there is no large fluctuation. When the proportion of cells thickness of the CFRP laminated periodic structure plate is 50% and the number of periods is 4, the damping loss factors are increased by 19.59% and 15.63% respectively compared with the traditional CFRP laminate in the first two bending modes, and the flexural stiffness of the structure is reduced by 18.21% through the three-point flexural test results.

Keywords : carbon fiber reinforced polymer ; periodic structure ; damping ; natural frequency ; stiffness

基金项目: 2023年湖北省重大攻关项目(JD)(2023BAA028)

通信作者: 文湘隆,副教授,博士,主要从事高性能复合材料应用技术研究

收稿日期: 2024-09-29

引用格式: 张锦光,刘海鑫,窦玉宽,等.CFRP层合周期结构的阻尼性能[J].工程塑料应用,2024,52(12):83-88.

ZHANG Jingguang, LIU Haixin, DOU Yukuan, et al. Damping performances of CFRP laminated periodic structures[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 83-88.

碳纤维复合材料(CFRP)由于具有优良的力学性能,被广泛应用于各种工程领域^[1]。相比于金属材料,CFRP具有更优的阻尼特性,用CFRP做成层合板会获得更优的减振效果^[2]。CFRP层合周期结构由上下面板和中间的元胞组成,相比于传统的CFRP层合板存在带隙现象^[3]。除了带隙特性之外,CFRP层合周期结构因其铺层方式的周期变化、纤维的非连续性会对层合板的刚度造成不利影响并增加了树脂与纤维的界面,这都会对结构件的阻尼、固有频率等振动特性造成影响。针对工程应用中因不可避免的振动、冲击和噪声等引起的零件失效、精度下降和结构损伤等一系列负面影响,结构阻尼性能的研究显得尤为重要^[4],对CFRP层合周期结构阻尼特性的研究将对工程领域中的减振问题具有重要意义。

纤维复合材料层合板阻尼性能会受到多因素影响,武海鹏^[5]研究了纤维种类、纤维角度、加载频率等参数对复合材料阻尼性能的影响。Zhang等^[6]综合分析了E-玻璃纤维体积分数和铺设角度对复合材料层合板阻尼和强度的影响。陈运彪等^[7]研究了轻质玻纤增强热塑性复合材料的密度及悬臂梁长度对材料阻尼比、固有频率的影响。Wang等^[8]测试了纤维类型和纤维构象对复合材料阻尼性能的影响。Huang等^[9]研究了含有不同程度二氧化硅纳米颗粒和橡胶颗粒的纤维/环氧复合材料的阻尼性能。黄鑫^[10]研究发现复合材料内部混杂纤维比例、混杂纤维分布、混杂纤维厚度对复合材料阻尼性能产生了较大的影响。Zheng等^[11]通过将高分子材料嵌入酚醛树脂基玻璃纤维增强层压板中发现,与传统的阻尼复合材料相比,共固化复合材料的阻尼性能得到了显著提高。Bulut等^[12]研究了玄武岩/芳纶纤维掺比不同的玄武岩/芳纶/环氧杂化复合材料的阻尼和振动特性。吴帅等^[13]采用模压成型工艺制备纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料(LRPJC),动态热机械测试结果显示,随着温度的升高,LRPJC具有更好的黏塑性和阻尼性能。

另有学者发现,在单层预浸料中改变纤维方向同样会对阻尼造成影响,Mohamed等^[14]采用高阶剪切柔性模型,分析了层压矩形/倾斜复合板的阻尼能力。Pereira等^[15]研究发现改变纤维方向可以显著改善复合层压板的阻尼特性。Pereira等^[16]证实了通过探索改变纤维方向来调节并提高复合材料层合板

阻尼水平的设计策略的有效性。Cao等^[17]详细分析了各向异性层合阻尼板损耗因子的参数影响。以上学者针对于传统的CFRP层合板的阻尼特性,从纤维种类、树脂含量、叠层方向、掺杂种类等因素进行了多方位的研究。目前,少有学者对CFRP层合周期结构板进行相关研究,而该类结构具有良好的阻尼特性,因此笔者设计一种CFRP层合周期结构,采用自由模态试验的方法对该结构阻尼特性进行相关研究,为减振领域层合板的应用提供一种新的设计思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维预浸料:C200R3624T,基体为5001环氧树脂,增强体为syt45-24k连续碳纤维,树脂体积分数为36%,连云港神鹰复合材料科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

热压罐:YT-2018-07,大连樱田机械制造有限公司;

PULSE测试系统:丹麦Brüel & Kjaer声学振动测量公司;

电子万能力学试验机:DNS100,长春机械科学研究院有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 CFRP层合周期结构几何特征

CFRP层合周期结构由上、下面板和元胞组成,其中上下面板铺层方式保持一致,均为 $[0^\circ/90^\circ]_n$,元胞a铺层为 $[0^\circ]_n$,元胞b铺层为 $[\theta^\circ]_n$,元胞a和b为一个周期,图1为沿长度方向4周期的CFRP层合周期结构模型示意图。

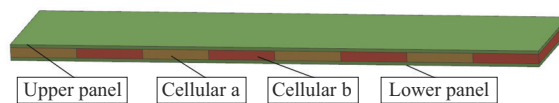


图1 沿长度方向4周期的CFRP层合周期结构模型示意图
Fig. 1 Model schematic diagram of CFRP laminated periodic structure with 4 periods along length direction

沿长度方向的CFRP层合周期结构板样件的平面示意图和主要几何尺寸(L 为样件长度、 H 为样件厚度、 L_1 为单个周期长度、 h 为元胞单元厚度)如图2所示。

1.3.2 CFRP层合周期结构方案设计

为了研究CFRP层合周期结构板中周期个数、元胞单元厚度占比、元胞单元铺层角度对结构板阻尼性能的影响,设计了A,B,C,D 4种方案,所有方

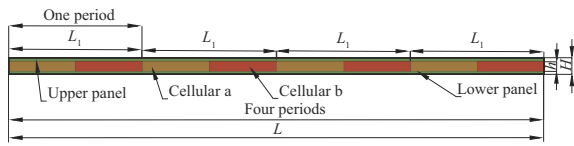


图2 沿长度方向4周期的CFRP层合周期结构板平面示意图

Fig. 2 Plane schematic diagram of CFRP laminated periodic structural plate with 4 periods along length direction

案样件长度 L 为250 mm,宽度为50 mm,厚度 H 为3.2 mm,具体方案见表1。

A方案:CFRP层合板,作为对照组。

B方案:保持总长度 L 不变,通过改变单个周期的长度 L_1 ,研究沿长度方向的周期个数对结构板阻尼性能的影响。

C方案:保持总厚度 H 不变,通过改变元胞a,b厚度 h ,研究元胞单元在整个结构中的厚度占比对结构板阻尼性能的影响。

D方案:上下面板铺层角度 $[0^\circ/90^\circ]_2$,元胞a的铺层角度 $[0^\circ]_8$,通过改变元胞b的铺层角度 $[\theta^\circ]_8$ 来研究结构板阻尼性能的变化。

在表1的铺层方案中,c表示保持总长度 L 不变,单层碳纤维预浸料由括号内的角度串联而成,比如 $(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c$ 表示0.25 L 长的 0° 单层预浸料依次串联0.25 L 长的 90° 单层预浸料、0.25 L 长的 0° 单层预浸料和0.25 L 长的 90° 单层预浸料,从而组成总长为 L 的混合角度单层预浸料。

表1 层合周期结构板铺层方案

Tab. 1 Laminated periodic structural plate layup scheme

Scheme	Layup scheme	Scheme	Layup scheme
A	$[0^\circ/90^\circ]_8$	D1	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-0^\circ-0^\circ-0^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
B1	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$	D2	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-15^\circ-0^\circ-15^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
B2	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$	D3	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-30^\circ-0^\circ-30^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
B3	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$	D4	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-45^\circ-0^\circ-45^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
C1	$[0^\circ/90^\circ]_3/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_4/[0^\circ/90^\circ]_3$	D5	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-60^\circ-0^\circ-60^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
C2	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$	D6	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-75^\circ-0^\circ-75^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$
C3	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_{12}/[0^\circ/90^\circ]_2$	D7	$[0^\circ/90^\circ]_2/[(0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ)_c]_8/[0^\circ/90^\circ]_2$

1.3.3 CFRP层合周期结构板样件制备

首先通过裁剪机将碳纤维单向预浸料裁剪成需要的尺寸大小,其次采用手工铺贴的方式进行制作,最后用热压罐通过模压工艺成型。固化工艺参数:一次行程持续加温至80℃,在温度到达60℃开始加压至0.1 MPa,保持30 min;二次行程温度持续升高至100℃,在温度到达80℃加压至0.3 MPa,保持60 min;三次行程温度持续升高至120℃,在温度到达110℃加压至0.6 MPa,保持210 min。待热压罐冷却至室温后,即可取出试验样件。

1.4 测试与表征

自由模态试验:首先用柔性绳将试验样件悬挂,使其保持自由状态,然后通过力锤对各测点进行敲击,最后将测试信号传输给控制分析软件,通过后处理即可得到CFRP层合周期结构试验样件的振形、固有频率、阻尼比。

在工程实际应用中,如飞机、船舶和火箭等在工作中处于自由模态,采用自由边界条件可以更方便实现试验和理论模态响应相关性。在结构阻尼的测量过程中,简单支撑或约束边界条件会引入一些外界阻尼,使实际测量阻尼产生一定误差。因此采用自由边界条件对层合周期结构板进行阻尼测

量,并对其阻尼性能进行研究。

三点弯曲试验:参照GB/T 1449-2005测量试样的弯曲性能,通过三点弯曲测试方法进行测试,试验速度2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 CFRP层合周期结构板弯曲性能分析

CFRP层合周期结构板因为存在纤维的非连续性,会对自身力学性能造成影响,使其刚度下降,利用电子万能试验机,对元胞单元厚度占比为50%、周期个数为4时的CFRP周期结构板(B3)和传统的CFRP层合板(A)进行三点弯曲试验,其中方案A和B3各制备3组试验样件,跨距设定为200 mm,施加载荷为5 mm,施加载荷速度为2 mm/min,试验结果见表2。

试验结果表明,CFRP层合周期结构板弯曲刚

表2 三点弯曲试验结果

Tab. 2 Three-point flexural test results

Scheme	Flexural stiffness/(N·mm ⁻¹)	Average/(N·mm ⁻¹)
A-1	48.01	45.91
A-2	43.42	
A-3	46.31	
B3-1	37.63	37.55
B3-2	35.59	
B3-3	39.43	

度为 37.55 N/mm, 相比于 CFRP 层合板刚度的 45.91 N/mm, 降低了 18.21%, 这是由于纤维的非连续性造成 CFRP 层合周期结构板的刚度下降。

2.2 CFRP 层合周期结构板自由模态分析

测试 CFRP 层合周期结构板的阻尼性能时, 假定在一个振动周期内阻尼比容 Ψ 在任意时刻都是相等的, 因此 CFRP 层合周期结构板的阻尼比容 Ψ 和阻尼损耗因子 η 是相等的, 即阻尼比容 Ψ 为模态固有频率下损耗应变能 ΔU 与总的应变能 U 的比值, 见公式(1)。

$$\Psi = \frac{\Delta U}{U} = \eta = 2\xi \quad (1)$$

式中: ξ 为阻尼比。

CFRP 层合周期结构自由模态试验采用 PULSE 测试系统, 该系统主要由数据采集系统、控制与分析软件、力锤和加速度传感器 4 部分组成, 如图 3 所示。

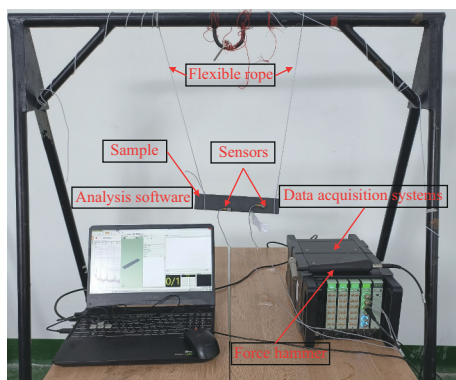


图3 用于自由模态试验的 PULSE 测试系统

Fig. 3 PULSE test system for free-modal test

在进行自由模态试验时, 需要在控制分析软件中建立三维模型, 在模型中将试验样件划分的网格节点设置为力锤敲击点, 并在完成传感器识别设定后, 按照自动生成的敲击路径依次完成敲击, 通过力锤产生脉冲信号, 由加速度传感器将输出信号输送给数据采集系统, 在完成傅里叶变换后得到各个敲击点的频响曲线, 在控制分析软件中进行处理分析后即可得到试验件的振形、频率和阻尼比。

2.2.1 不同周期个数的 CFRP 层合周期结构板自由模态分析

通过自由模态试验, 可得到沿长度方向的不同周期个数对层合周期结构板阻尼性能的影响, B 方案前两阶弯曲模态下的试验结果如图 4 所示。由图 4 可知, 随着沿长度方向周期个数的增加, 一阶和二阶弯曲固有频率呈现逐渐下降的趋势, 下降趋势比

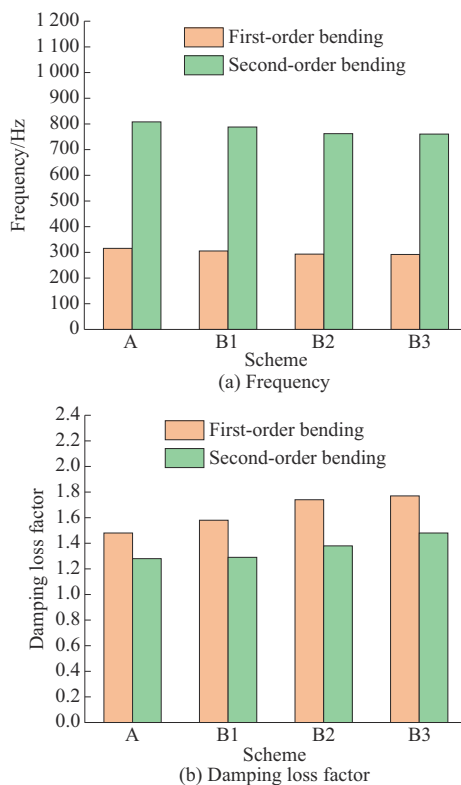


图4 B 方案层合周期结构板自由模态试验结果

Fig. 4 Free-modal test results of laminated periodic structural plate with scheme B

较平缓, 并未出现较大波动; 一阶和二阶阻尼损耗因子随着沿长度方向周期个数的增加呈现逐渐变大的趋势。这是因为在质量一致的情况下, 随着周期个数的增多, CFRP 层合周期结构试验样件的刚度会逐渐下降, 从而导致固有频率呈逐渐下降的趋势; 而周期个数的增加, 会导致树脂与纤维界面的增加, 在振动过程中可以更多地耗散能量从而导致阻尼损耗因子的增大。

另外研究结果发现, CFRP 层合周期结构板的阻尼性能相比于传统的 CFRP 层合板有所提升, 当元胞单元厚度占比 50% 时, 4 周期 CFRP 层合周期结构板的前两阶弯曲模态下的阻尼损耗因子相比于传统的 CFRP 层合板分别提高 19.59% 和 15.63%。

2.2.2 不同元胞单元厚度占比的 CFRP 层合周期结构板自由模态分析

通过自由模态试验, 可得到元胞单元厚度占比对层合周期结构板阻尼性能的影响, C 方案前两阶弯曲模态下的试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 随着元胞单元厚度占比的增加, 一阶和二阶弯曲固有频率呈现逐渐下降的趋势, 下降趋势比较平缓, 并未出现较大波动; 一阶和二阶阻

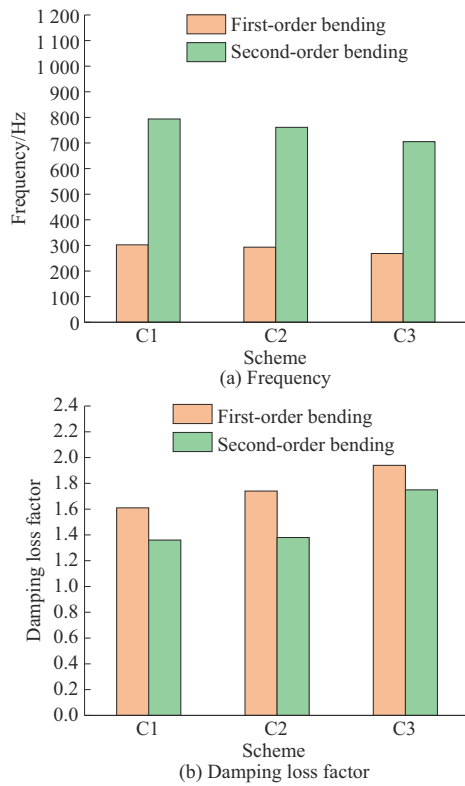


图5 C方案层合周期结构板自由模态试验结果

Fig. 5 Free-modal test results of laminated periodic structural plate with scheme C

尼损耗因子随着元胞单元厚度占比的增加呈现逐渐变大的趋势。这是因为在质量一致的情况下,随着元胞单元厚度占比的增加,CFRP层合周期结构试验件的刚度会逐渐下降,从而导致固有频率呈逐渐下降的趋势;而元胞单元厚度占比的增加,会导致树脂与纤维界面范围的增大,在振动过程中可以更多地耗散能量从而导致阻尼损耗因子增大。

2.2.3 不同元胞单元铺层角度的CFRP层合周期结构板自由模态分析

通过自由模态试验,可得到不同元胞单元铺层角度对层合周期结构板阻尼性能的影响,D方案前两阶弯曲模态下的试验结果如图6所示。

由图6可知,随着元胞b铺层角度的增加,一阶和二阶弯曲固有频率在铺层角度为15°时达到最大值,之后随着铺层角度的增加呈现出轻微上下波动的变化,并未出现较大波动;一阶阻尼损耗因子随着元胞b铺层角度的增加先呈现逐渐变大的趋势,在铺层角度为60°时达到最大值,随后略有下降,二阶阻尼损耗因子呈现先增大后减小的趋势,在铺层角度为30°时达到最大,随后逐渐下降,在60°之后趋于平缓。这是因为在质量一致的情况下,元胞单

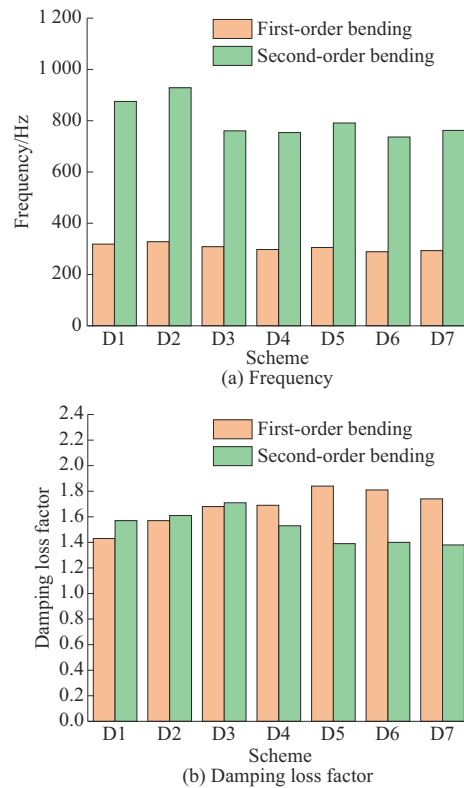


图6 D方案层合周期结构板自由模态试验结果

Fig. 6 Free-modal test results of laminated periodic structural plate with scheme D

元b铺层角度的变化,会对CFRP层合周期结构试验件的刚度造成一定影响,导致固有频率出现一定的波动。另外,因为CFRP的3个方向阻尼损耗因子不同,当纤维铺层角度发生变化时,结构件的阻尼损耗因子会随之发生变化,因此随着元胞单元b铺层角度的增大,CFRP层合周期结构试验件阻尼损耗因子会呈现先增大后下降的趋势。

3 结论

(1)当CFRP层合周期结构板元胞单元厚度占比为50%、周期个数为4时,相比于传统的CFRP层合板,结构板前两阶弯曲模态下的阻尼损耗因子分别提高19.59%和15.63%,刚度降低18.21%。

(2)随着沿长度方向周期个数及元胞单元厚度占比的增加,CFRP层合周期结构板的一阶和二阶弯曲固有频率逐渐下降;一阶和二阶阻尼损耗因子逐渐变大。

(3)随着元胞b铺层角度的增加,一阶和二阶弯曲固有频率在铺层角度为15°时达到最大值,之后随着铺层角度的增加呈现出轻微上下波动的变化,并未出现较大波动。一阶阻尼损耗因子随着元胞b铺层角度的增加先逐渐变大后略有下降,在铺层角

度为 60° 时达到最大值;二阶阻尼损耗因子呈现先增大后减小的趋势,在铺层角度为 30° 时达到最大,随后逐渐下降,在铺层角度为 60° 之后趋于平缓。

参考文献

- [1] 朱子旭,朱锡,李永清,等.复合材料夹芯结构研究现状及其在船舶工程的应用[J].舰船科学技术,2018,40(3):1-7.
ZHU Zixu, ZHU Xi, LI Yongqing, et al. Present researches about sandwich composite structures and its applies in ship industry[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(3):1-7.
- [2] 杨海如.基于材料与结构阻尼的CFRP筏架阻尼性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2021.
YANG Hairu. Reserach on damping characteristics of CFRP raft based on material and structure damping[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [3] DOU Y K, ZHANG J G, WEN X L, et al. Free vibration characteristics of CFRP laminate with one-dimensional periodic structures [J]. Polymers, 2023, 15(5). DOI:10.3390/polym15051118.
- [4] 孙国栋,吕龙飞,解静,等.碳纤维增强复合材料阻尼性能的研究进展[J/OL].材料导报,2024:1-22[2024-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20240401.2012.034.html>.
SUN Guodong, LYU Longfei, XIE Jing, et al. Research progress on damping properties of carbon fiber reinforced composites[J/OL]. Material Reports, 2024:1-22[2024-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20240401.2012.034.html>.
- [5] 武海鹏.复合材料层合板阻尼性能的预测与分析[J].材料导报,2021,35(S1):617-620,627.
WU Haipeng. Anticipation and analysis of the damping performance of composite laminate[J]. Material Reports, 2021, 35(S1): 617-620, 627.
- [6] ZHANG B, LI Z, WU H W, et al. Research on damping performance and strength of the composite laminate[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1). DOI:10.1038/s41598-021-97933-w.
- [7] 陈运彪,宋学谦.基于LabVIEW的GMT振动阻尼性能实验研究[J].工程塑料应用,2015,43(2):85-89.
CHEN Yunbiao, SONG Xueqian. Experimental study on vibration and damping properties of GMT based on LabVIEW[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):85-89.
- [8] WANG X, CHEN W, WANG J, et al. The influence of fiber type and conformation on the damping property of FRP composite[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition), 2012, 27(3):450-453.
- [9] HUANG C Y, TSAI J L. Characterizing vibration damping response of composite laminates containing silica nanoparticles and rubber particles[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(5): 545-557.
- [10] 黄鑫.碳纤维/玻璃纤维混合增强环氧树脂基复合材料阻尼性能及力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
HUANG Xin. Damping and mechanical properties of carbon fiber/glass fiber composites reinforced with epoxy resin matrix[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [11] ZHENG C S, ZHAI Y C, LIANG S. Improving damping performance of fiberglass-reinforced resin matrix composites by designing viscoelastic sandwich layer[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 28(21):2 202-2 209.
- [12] BULUT M, BOZKURT Ö Y, ERKLIĞ A. Damping and vibration characteristics of basalt-aramid/epoxy hybrid composite laminates [J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36(2):173-180.
- [13] 吴帅,吴华伟,王春红,等.纱罗网格织物增强PP/黄麻复合材料力学性能[J].工程塑料应用,2022,50(3):1-7,24.
WU Shuai, WU Huawei, WANG Chunhong, et al. Mechanical properties of leno mesh fabric reinforced PP/Jute composite[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):1-7, 24.
- [14] MOHAMED H, GUNASEKARAN V, PITCHAIMANI J, et al. A comprehensive damping study of variable stiffness composite rectangular/skew laminates reinforcement with curvilinear fibers by higher-order shear flexible model[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30(14):2 806-2 825.
- [15] PEREIRA D, SALES T, RADE D. Multi-objective frequency and damping optimization of tow-steered composite laminates[J]. Composite Structures, 2021, 256. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.112932.
- [16] PEREIRA D, GUIMARÃES T, RESENDE H, et al. Numerical and experimental analyses of modal frequency and damping in tow-steered CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2020, 244. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112190.
- [17] CAO Y H, LI M J, SU Y, et al. Studies on damping characteristics and parameter optimization of anisotropic laminated damped structure[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2002, 74(4):332-337.