

# 碳纤维增强复合材料结构阻尼性能研究

李瑞杰<sup>1</sup> 何安荣<sup>2</sup> 徐超<sup>3</sup> 林松<sup>3</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 二炮驻 211 厂军事代表室,北京 100076)

(3 西北工业大学航天学院,西安 710072)

**文 摘** 碳纤维增强复合材料的阻尼性能对所应用结构的动态承载能力、可靠性和安全性有重要影响。复合材料阻尼机理复杂,很难采用理论方法研究。本文基于瞬态激励法原理,设计了悬臂梁振动试验,利用有理分式多项式法提取试样的模态频率和模态损耗因子。分别对 603 和 603A 两种树脂基体,各三种 T300 纤维铺层方向的复合材料试样进行了振动测试,获得了材料 1 kHz 以内的动刚度和阻尼特性。结果表明,基体材料组分和纤维铺层方向对碳纤维增强复合材料的结构刚度和阻尼性能有重要影响;603A 基体的碳纤维增强复合材料具有较 603 基体材料更好的损耗因子。铺层方向对结构阻尼的影响主要是通过对结构刚度的影响而体现出来的,不同纤维铺层方向的复合材料试样刚度差别很大。

**关键词** 碳纤维复合材料,阻尼,振动梁实验,损耗因子

## Structural Damping Determination of Carbon Fiber Reinforced Composite

Li Ruijie<sup>1</sup> He Anrong<sup>2</sup> Xu Chao<sup>3</sup> Lin Song<sup>3</sup>

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 PLA Representative office in 221 Factory, Beijing 100076)

(3 College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** Structural damping of carbon fiber reinforced laminate composite is experimentally determined using a cantilever beam test with an impulse excitation. Continuous carbon fiber reinforced laminates with different lamina orientation were fabricated from MT300/603 and MT300/603A to investigate the effect of matrix properties and fiber orientation on the damping of composite. The results show that the MT300/603A composite has a higher loss factor than MT300/603. Fiber orientation has an important effect on the modal frequency and modal damping and the effect is characteristic as changing structural flexibility. The 0° material exhibits a lighter damping loss factor than the other fiber orientation.

**Key words** Carbon fiber reinforced composite, Damping, Vibration beam experiments, Loss factor

### 0 引言

以碳纤维复合材料为代表的先进复合材料由于比强度、比模量高和可设计性强等优点,在航空航天飞行器上的应用越来越广泛。飞行器结构大多受动载荷作用。振动过大会造成结构疲劳破坏、使控制系统、电子器件、仪器仪表失效,从而严重影响飞行器的可靠性和安全性。因此,复合材料结构的阻尼特性研究是一项极为重要的课题<sup>[1]</sup>。

研究表明,复合材料的阻尼机理与普通金属或合金材料不同,分别与基体和纤维自身的黏弹性阻尼、纤维/基体界面相阻尼、复合材料微结构损伤导致的

摩擦阻尼、局部应力集中的非线性黏弹性阻尼及周期热流动产生的热弹性阻尼等机理密切相关<sup>[2]</sup>。由于复合材料阻尼机理的复杂性,以微观力学理论和应变能法为主要依据的结构阻尼分析方法在应用中往往不能满足实际需求<sup>[3]</sup>。因此,以振动实验代表的实验表征方法仍是当前复合材料结构阻尼测定和研究的主要手段。复合材料结构阻尼的具体振动实验测试方法按照所采用的激励影响可分为稳态正弦激励法、随机激励法、瞬态激励法等<sup>[4]</sup>。稳态正弦激励和随机激励法利用激振器连续激励结构,经过信号处理,获得频响函数而得到模态频率和阻尼。瞬态激励

收稿日期:2012-06-01;修回日期:2012-06-18

作者简介:李瑞杰,1973年,高级工程师,主要从事复合材料结构阻尼性能研究。E-mail:lijr@arimt.com

法利用力锤施加瞬态脉冲激励,采集结构强迫和自由衰减段的响应信息,进而识别结构模态阻尼特性。文献[5-6]对该方法都给予了充分肯定,认为其快捷,可用于现场在线测试,分辨率较高。

碳纤维增强复合材料的阻尼性能与基体的粘弹性、纤维铺层顺序等因素密切相关。本文采用振动实验方法,制备了不同树脂基体和不同纤维铺层方向的碳纤维复合材料试样,基于瞬态激励法测试原理,设计了相应的实验装置和测试方法,对试样进行了悬臂梁实验,测定了 1 kHz 以内复合材料试样的结构阻尼

特性,研究不同基体和纤维铺层对阻尼性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

MT300/603:国产标模高强碳纤维增强环氧树脂复合材料,自制。

MT300/603A:国产标模高强碳纤维增强增韧环氧树脂复合材料,自制。

两种复合材料的基本力学性能见表 1,阻尼结构的不同铺层设计试件见表 2。单层铺层公称厚度均为 0.125 mm。

表 1 MT300/603 和 MT300/603A 复合材料单向板力学性能

Tab.1 Mechanical properties of MT300/603 and MT300/603A composites unidirectional plates

材料	0°拉伸		0°压缩		层间剪切强度 /MPa	层间断裂韧度 /J·cm <sup>-2</sup>
	强度/MPa	模量/GPa	强度/MPa	模量/MPa		
MT300/603	1470	126	1540	132	108	-
MT300/603A	1510	126	1350	113	112	202

表 2 试验样件参数及编号

Tab.2 Parameters and numbers of test samples

材料	试件组号	铺层	数量	规格/mm	描述
MT300/603	HT-GC-C01-01	[0] <sub>16</sub>	5	240×15	单向带,记为 C01
	HT-GC-C02-01	[45/-45/0/90] <sub>2S</sub>	5	240×15	单向带,记为 C02
	HT-GC-C03-01	[0/90/-45/45] <sub>2S</sub>	5	240×15	单向带,记为 C03
MT300/603A	HT-GC-Z01-01	[0] <sub>16</sub>	5	240×15	单向带,记为 Z01
	HT-GC-Z02-01	[45/-45/0/90] <sub>2S</sub>	5	240×15	单向带,记为 Z02
	HT-GC-Z03-01	[0/90/-45/45] <sub>2S</sub>	5	240×15	单向带,记为 Z03

### 1.2 实验装置

采用瞬态激励法测定复合材料的结构阻尼,实验原理如图 1 所示。复合材料梁试样一端被固定在一大质量块上,在梁末端安装一加速度计,所用的加速度计型号为 DYTRAN 3089A,质量为 0.8 g,远小于梁本身的质量(约 11.5 g),且模态频率并不是本次试验所要测量的重点,因此这里忽略加速度计的附加质量对复合材料梁模态的影响。

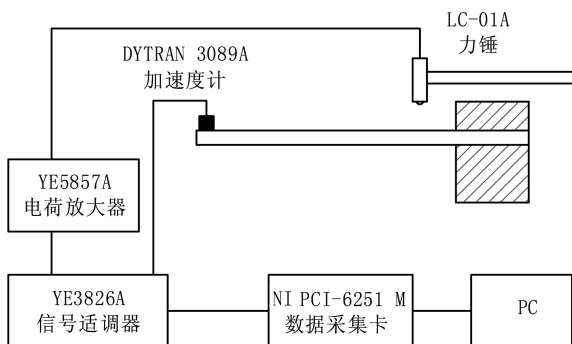


图 1 试验测量框图

Fig. 1 Test measurement chart

加速度计直接连接到 YE3826A 恒流适调器,而冲击力锤通过电荷放大器后连接到恒流适调器。恒宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期

流适调器的输出信号通过 NI 公司的 PCI-6251M 数据采集卡进行采集,并在 PC 机上进行处理。

试验时,将试件用两颗螺栓紧固在一个大质量块上,拧紧螺栓时要注意保持两边的平衡。然后将加速度计安装在悬臂梁的端部,安装好试件后,用力锤敲击梁根部,测量力信号和加速度信号,计算频响曲线,再通过有理分式多项式法拟合测得频响曲线,并提取相应的模态参数,即模态频率  $f_i$  和模态阻尼比  $\xi_i$ 。经测试,试件中用力锤敲击梁根部时,脉冲宽度为 0.8 ~ 1.2 ms,则能激起的最大频率为 1.2 ~ 1.8 kHz。各组试件的前两阶模态基本是在这个范围或略超出能激起的最大频率。

实验测试时,每组试件包含 5 根试样,所有试件的悬臂长度都为 160 mm,每根试件测量 5 次,最后用这 25 次测量结果的平均值来表征该组试件的模态频率和模态阻尼。

### 1.3 频率和阻尼参数计算方法

模态参数提取方法为有理分式多项式法<sup>[7]</sup>。由于该方法用于参数识别的数学模型采用频响函数的有理分式形式,未使用简化的模态展式,理论模型是精确的,因而具有较高的识别精度。一般的,多自由

度粘性阻尼线性系统的传递函数可表示为:

$$H(s) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{A_k}{s - s_k} + \frac{A_k^*}{s - s_k^*} \right) \quad (1)$$

将上式用有理分式多项式可表示为:

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_{2N}s^{2N}}{b_0 + b_1s + \dots + b_{2N}s^{2N}} \quad (2)$$

式中,  $N$  为模态阶数,  $a_k$  和  $b_k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, 2N$ ) 为待定系数。令  $j\omega = s$ , 并且令  $b_{2N} = 1$ , 则得到频响函数:

$$H(j\omega) = \frac{a_0 + a_1(j\omega) + \dots + a_{2N}(j\omega)^{2N}}{b_0 + b_1(j\omega) + \dots + b_{2N-1}(j\omega)^{2N-1} + (j\omega)^{2N}} \quad (3)$$

通过曲线拟合, 使理论频响函数  $H(j\omega)$  与实测

频响函数  $\tilde{H}$  之间的误差最小, 则可求得待定系数  $a_k$  和  $b_k$ 。然后求解频响函数的极点, 即令

$$b_0 + b_1s + \dots + b_{2N-1}s^{2N-1} + s^{2N} = 0 \quad (4)$$

解上述方程即可求出  $N$  对复根  $s_i$  和  $s_i^*$ , 由于

$$\begin{cases} s_i = -\xi_i\omega_i + j\omega_i\sqrt{1 - \xi_i^2} \\ s_i^* = -\xi_i\omega_i - j\omega_i\sqrt{1 - \xi_i^2} \end{cases} \quad (5)$$

最后可求得固有频率  $\omega_i$  和阻尼比  $\xi_i$ , 即:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \sqrt{s_i s_i^*} \\ \xi_i &= \frac{s_i + s_i^*}{2\omega_i} \end{aligned} \quad (6)$$

## 2 结果及讨论

表 4 不同基体材料试件固有频率对比

Tab. 4 Nature frequency comparison of the samples with different matrix material

基体材料	$f_1/\text{Hz}$			$f_2/\text{Hz}$			$f_3/\text{Hz}$		
	01 铺层	02 铺层	03 铺层	01 铺层	02 铺层	03 铺层	01 铺层	02 铺层	03 铺层
C 组	120.41	68.70	82.40	802.86	458.38	534.33	2198.33	1298.85	1505.77
Z 组	107.52	62.89	77.56	705.65	417.04	509.17	1994.30	1186.48	1434.58
有限元	115.67	67.94	82.31	717.45	423.28	511.87	1982.30	1179.72	1420.31

表 5 不同基体材料试件阻尼值对比

Tab. 5 Damping value comparison of the samples with different matrix material

材料	$\xi_1/\%$			$\xi_2/\%$		
	01 铺层	02 铺层	03 铺层	01 铺层	02 铺层	03 铺层
603 组	0.435	1.205	0.741	0.665	1.296	0.946
603A 组	0.887	1.539	0.916	0.820	1.373	0.9821

从表 5 可知, 不同树脂基体的复合材料试样的模态阻尼值也不同。整体而言, 各种铺层方向下, 603A 基体的试样阻尼性能要优于 603 基体的试样。甚至对于  $[0]_{16}$  的试样, 前者的阻尼值为后者的两倍多, 这与不同基体的界面相阻尼能力不同有关系。因此, 树脂基体性能对碳纤维增强复合材料的结构阻尼特性有重要影响。通过对基体增韧处理后, 材料的阻尼

## 2.1 不同树脂基体属性对结构阻尼性能的影响

表 3 中对比了 C 组和 Z 组两种基体材料试件的前两阶固有频率, 并给出了利用 MSC. NASTRAN 软件进行固有特性有限元分析得到的结果作为比较。有限元计算时, 铺层材料参数通过查找手册获得, 具体数值如表 3 所示。

表 3 有限元计算时的铺层材料参数

Tab. 3 Requested laminate material parameters when calculating with finite element method

$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$\mu_{12}$	$\rho$ /kg·m <sup>-3</sup>
135	9.76	5.24	3.49	0.3	1600

从表 4 中可以看出, 各组试件采用本文的实验装置和方法获得的模态频率和有限元预测结果的误差都比较小, 表明了实验装置很好的模拟了悬臂固支的边界条件, 所采用的分析方法能够很好的识别出结构的各阶模态和频率。

对比两种基体可知, 相同纤维铺层方向的试样, 603A 基体的各阶固有频率均略低于 603 基体, 这表明以 603 基体的碳纤维增强复合材料试样具有更高的动刚度特性。

取相同纤维铺层方向、不同基体的复合材料试样的模态阻尼比进行对比, 结果见表 5。

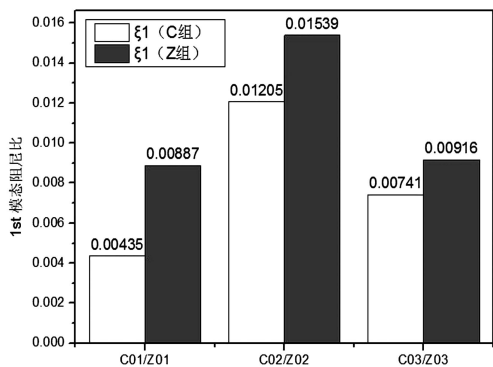
性能有所提高。

## 2.2 不同纤维铺层方向对阻尼性能的影响

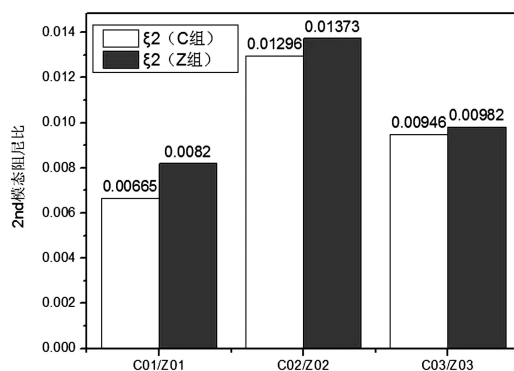
图 2 中给出了不同纤维铺层不同基体组合的前两阶模态的模态阻尼对比情况。可以看出, 基体相同时, 三种铺层试样的模态阻尼值不同。 $[0]_{16}$  铺层的试样模态阻尼值最小, 这是因为该铺层方向下, 结构的刚度最大, 相近的激励条件下, 材料的内形变小, 因而能量耗散能力差。 $[45/-45/0/90]_{2s}$  铺层的结构刚度最小, 材料的形变大, 内摩擦耗能较多, 因而阻尼值较高。 $[0/90/-45/45]_{2s}$  铺层介于两者之间。

纤维铺层方向对复合材料的结构阻尼性能有显著影响, 但主要是通过通过对结构刚度的影响而间接表现出来的, 可见, 对  $[0]_{16}$  铺层的复合材料, 结构阻尼必然随着铺向角相对  $0^\circ$  的偏置增大而增大, 在  $90^\circ$  时复合材料的刚度和阻尼能力将主要由基体支配, 此时结

构阻尼值较高。这与文献[8]的研究结论是吻合的。



(a) 一阶



(b) 二阶

图2 不同铺层复合材料试件模态频率对比

Fig.2 Comparison of modal frequency of the samples with different stacking

### 3 结论

(1)铺层方向相同时,603A基体的碳纤维增强复合材料具有较603基体的材料具有更好的损耗因子。两种基体的材料动刚度差别不大,603基体的复合材料具有更好的刚度特性。

(2)铺层方向对复合材料的阻尼性能有重要影响,0°铺层的材料损耗因子最低。但是,铺层方向对结构阻尼的影响主要是通过对结构刚度的影响而体现出来的,不同纤维铺层方向的复合材料试样刚度差别很大。

#### 参考文献

[1] Finegan I C, Gibson R F. Recent research on enhancement of damping in polymercomposites [J]. Composite Structures, 1999, 44:89-98

[2] 任勇生,刘立厚. 纤维增强复合材料结构阻尼研究进展[J]. 力学与实践,2004,26(2): 9-16

[3] Berthelot J M, Sefrani Y. Damping analysis of unidirectional glass and Kevlar fiber composites [J]. Composite Science

and Technology, 2004, 64:1261-1278

[4] Gibson R F. Damping characteristics of composite materials and structures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1992,1:11-20

[5] Gibson R F. Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60:2769-2780

[6] Vasques C M A, Moreira R A S, Rodrigues J D. Viscoelastic damping technologies- part II: experimental identification procedure and validation [J]. Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering, 2010, 1:96-110

[7] 李德葆,陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004

[8] Berthelot J M, Sefrani Y. Damping analysis of unidirectional glass fiber composite with interleaved viscoelastic layers: experimental investigation and discussion [J]. Journal of Composite Materials, 2006, 40:1911-1922

(编辑 李洪泉)