

文章编号:1006-1355(2018)06-0205-04

约束阻尼板结构模态实验及阻尼特性研究

王金朝, 王志强, 徐 宁, 任 彤

(洛阳双瑞橡塑科技有限公司, 河南 洛阳 471023)

摘 要:约束阻尼结构可在较宽的频带范围内抑制结构振动,已在机械和交通等领域得到广泛应用。采用多输入多输出(MIMO)的锤击法,对一种约束阻尼板进行模态实验,通过参数识别得到其固有频率、振型及模态阻尼。通过模态实验和有限元结果的相互对比,验证了模态测试结果的可靠性。在此基础上,对敷设黏弹性阻尼的悬臂板结构进行阻尼特性研究,讨论材料参数和结构参数对模态阻尼的影响,可为结构的减振降噪及优化设计提供依据。

关键词:振动与波;约束阻尼板;模态实验;模态阻尼;有限元;

中图分类号:TB535⁺.1

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.06.039

Modal Experiment and Damping Characteristics Analysis of Constrained Damping Plates

WANG Jinzhao, WANG Zhiqiang, XU Ning, REN Tong

(Luoyang Sunrui Rubber & Plastic Technology Co. Ltd., Luoyang 471003, Henan China)

Abstract: Constrained damping structure can suppress vibration of the structure in a wide frequency band, and has been widely used in mechanical and traffic fields. In this paper, the modal experiment of a constrained damping plate was carried out by the hammering excitation with the multiple input and multiple output (MIMO) method. The natural frequencies, mode shapes and modal damping ratio were obtained by parameter identification. The reliability of the modal experiment results was verified by comparing the modal test results with the finite element results. On this basis, damping characteristics of a cantilever plate structure with viscoelastic damping layer were studied and the effects of material parameters and structural parameters on modal damping were discussed. This study provides a reference for the vibration and noise reduction and optimization design of structures.

Keywords: vibration and wave; constrained damping plate; modal experiment; modal damping; finite element method

结构在受到外界激励或干扰时会产生疲劳和振动,甚至伴随着严重的辐射噪声,对其正常运行和人类的生活环境产生不利影响。黏弹性材料具有良好的阻尼特性,通过进行合理的阻尼结构设计及优化,能够在较宽的频带内抑制薄壁结构的振动和噪声,因此被广泛应用于阻尼减振技术。

目前,基于弹性阻尼材料的减振结构主要有自由阻尼结构(FLD)和约束阻尼结构(CLD)2种。自由阻尼结构是将一定厚度的黏弹性材料涂敷于结构件表面,通过阻尼层的拉压变形来耗损振动能量,其工艺简单、成本低、优化设计方便,但对低频结构的减振降噪效果较差。约束阻尼结构是在自由阻尼处

理层外表面再粘贴一弹性层,主要通过阻尼层的剪切变形来耗损振动能量。大量计算表明,拉伸耗能远小于剪切耗能,因此约束阻尼结构的减振降噪效果优于自由阻尼结构。自上世纪50年代以来,国内外不断研制出高分子的黏弹性材料,已广泛应用于航空、航天和机械等领域。目前黏弹性材料已经形成标准化、系列化的产品,如3M公司的ISD系列、Soundcoat公司的GP系列以及EAR公司的1000、2000、3000等系列阻尼材料。

约束阻尼材料的优越性能吸引了国内外众多学者对其减振机理和应用设计等方面进行研究^[1-3]。由于黏弹性结构振动方程的求解涉及复数域内的高阶非线性方程组问题,因此对复杂阻尼结构的计算与优化还存在很多难点。本文运用脉冲锤击法对一种约束阻尼板结构进行模态实验研究,通过参数识别得到其固有频率、振型及模态阻尼,同时进行了有限元仿真验证,具有一定的实际意义。在此基础上,

收稿日期:2018-03-10

作者简介:王金朝(1992-),男,河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究方向为减振降噪材料研发、结构振动噪声分析。

E-mail: wjinzha08@163.com

对敷设黏弹性阻尼的悬臂板结构进行了阻尼特性的研究,分析结构和材料参数的影响,为科学合理配置阻尼结构参数提供借鉴。

1 模态阻尼比计算模型

利用有限元技术分析阻尼结构的损耗因子一般有三种方法:复刚度法、直接频率响应法、模态应变能法。模态应变能法是在非阻尼处理结构下将适当的阻尼项代入模态运动方程来表达阻尼处理结构,而在非阻尼处理结构下将适当的阻尼项代入模态参数来充分地近似阻尼处理模态参数,这样可避免大量的多特征值计算^[4]。

1962年,德国学者UNGAR^[1]等人利用模态应变能法对黏弹性阻尼结构损耗因子的计算公式作了进一步的补充和完善,并将其扩展到其它类型的复合结构。下面给出模态应变能法的计算公式。

含任意黏性阻尼系统振动微分方程的矩阵形式为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 是 $n \times n$ 矩阵,分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 是 n 维列向量,分别为系统的位移、速度、加速度向量, F 为外力向量。

对于任意附加阻尼结构,可分析结构的耗能和总的动态应变能,然后以耗散能量与总应变能的比值确定结构的损耗因子。

$$\eta = \frac{D}{2\pi W} = \frac{D_d + D_0}{2\pi(W_d + W_0)} \quad (2)$$

式中: D 、 D_0 、 D_d 分别代表附加阻尼结构总耗损能、原结构耗能及阻尼层耗能; W 、 W_0 、 W_d 分别代表附加阻尼架构总的应变能、原结构应变能及阻尼层应变能。

任何一种结构的应变能都可以表示为

$$W = \frac{1}{2} x^T K x \quad (3)$$

其中,位移矢量 x 可用模态参数表示为

$$x = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\varphi_i \cdot \varphi_i}{a_i(j\omega - \lambda_i)} + \frac{\bar{\varphi}_i \cdot \bar{\varphi}_i}{\bar{a}_i(j\omega - \bar{\lambda}_i)} \right] F \quad (4)$$

式中: φ_i 、 $\bar{\varphi}_i$ 是 i 阶振型共轭成对出现的复特征矢量; λ_i 、 $\bar{\lambda}_i$ 是复特征值; a_i 、 \bar{a}_i 是矩阵转换时引入的系数。

相应地,阻尼层的应变能为

$$W_d = \frac{1}{2} x_i^T K_d x_i \quad (5)$$

式中: K_d 为阻尼层的刚度矩阵, x_i 是阻尼层的位移矢量。

对阻尼值较小的基层,可用实模态特征矢量来

代替复矢量计算应变能,将式(3)改写为

$$W_0 = \frac{1}{2} \varphi_i^T K_0 \varphi_i \quad (6)$$

式(6)即为原始结构的第 i 阶模态的应变能,其中 K_0 是原始结构的刚度矩阵。若 η_0 、 η_d 分别为原始结构和阻尼材料的材料损耗因子,则其第 i 阶原始结构的耗损能量为

$$D_0 = \eta_0 \cdot 2\pi W_0 \quad (7)$$

第 i 阶阻尼层的耗损能量表示为

$$D_d = \eta_d \cdot 2\pi W_d \quad (8)$$

式中: η_d 为阻尼材料的材料损耗因子。将式(5)、式(6)、式(7)、式(8)代入式(2),忽略原结构和约束层的阻尼耗能,考虑约束层的应变能,得到约束阻尼结构第 i 阶模态损耗因子

$$\eta_i = \frac{D}{2\pi W} = \frac{D_d}{2\pi(W_d + W_0 + W_c)} \quad (9)$$

根据理论定义,损耗因子等于阻尼比的2倍,由此得到约束阻尼结构的模态阻尼比。

2 模态实验

2.1 实验方法

锤击法设备简单,操作方便,是试验模态分析的常用方法。本文采用多点激励多点响应(MIMO)的锤击方法对一约束阻尼板进行模态实验,通过参数识别得到其固有频率、阻尼及振型。

图1为实验现场约束阻尼板的实物图,实验模型用细长钢丝绳悬空吊挂在固定台架上模拟自由边界,试验在室温下进行。



图1 实验现场

结合板结构的几何形式和激励方式,试验中力锤激励位置选在非对称的两点。约束阻尼板中基层、阻尼层、约束层厚度分别为0.007 m、0.008 m、0.001 m,长宽尺寸均为1.61 m×1.82 m。基层和阻尼层使用普通钢材,材料参数为: $E=206$ GPa, $\rho=7\ 860$ kg/m³, $\mu=0.3$ 。约束阻尼板中黏弹性阻尼层材料参数为: $E=5$ MPa, $\rho=1\ 450$ kg/m³, $\mu=0.495$ 。材料的损耗因数依据国标GJB 981-1990《黏弹阻尼材料强迫共振型动态测试方法》使用DMA+450黏弹谱仪测试得到,取其在1 Hz~50 Hz频段内的平均值 $\eta_d=0.2$ 。

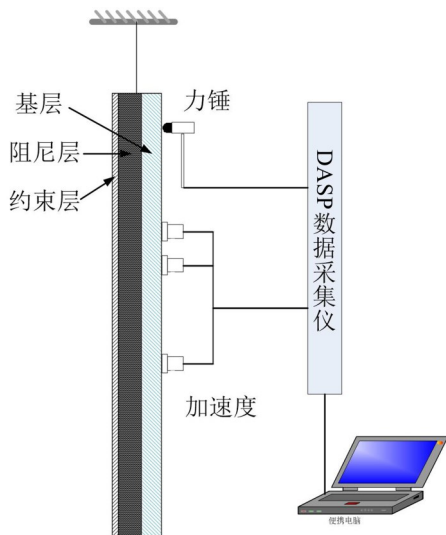


图2 模态测试示意图

图2给出了结构模态试验的测试流程,整个测试系统的实验设备主要有:DASP 3062C多通道数据采集仪、PCB力锤和加速度传感器、若干连接线。

2.2 平板实验及仿真分析

经过DASP软件采集测量信号并分析生成频响函数后进行模态分析。由于矩形板在测试频段内模态密集,为了保证后续阻尼比识别的准确性,可借鉴有限元(FEM)仿真结果找到相近频率下的同阶模态,同时也作为测试结果的对比验证。有限元计算使用商用软件ANSYS进行网格划分和模态计算,其中,阻尼层采用SOLID185单元,基层和约束层相对很薄,采用偏心4节点SHELL181单元进行模拟,壳单元和体单元共节点。在ANSYS计算中,对于阻尼材料的损耗因子,通过命令“mp, damp”赋值 $\eta_d/2$ 输入材料阻尼。

表1列出了自由边界条件下约束阻尼板的实验和仿真计算结果对比。

表1 实验和仿真结果对比

阶数	实验结果		有限元结果	
	f/Hz	$\xi/(\%)$	f/Hz	$\xi/(\%)$
1	7.02	4.57	9.80	3.45
2	10.70	3.88	14.04	3.82
3	17.66	3.09	17.73	3.63

可以看出,本文方法计算得到的固有频率与实验结果吻合较好,其中最大的偏差百分比出现在第1阶固有频率,原因是低频段的相干性较差,且试验中用钢丝绳模拟自由边界对低频影响很大。

图3给出了具有代表性的几阶振型图,有限元结果作为参照也列在其中。可以看出,由于板结构的弯曲刚度远小于其面内拉伸刚度,结构中低频段内的振型全部表现为弯曲振动。其中,第1阶振型

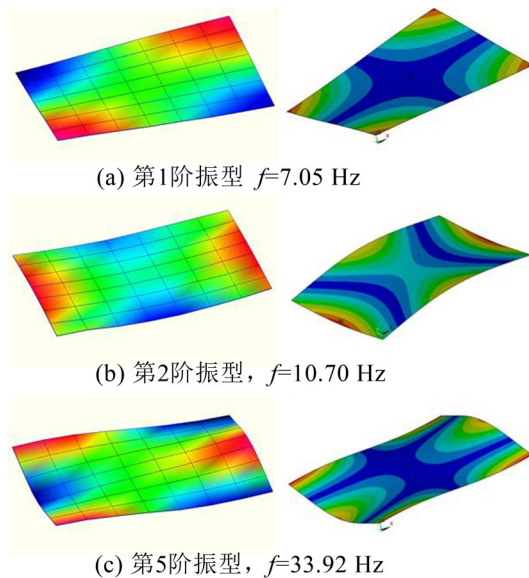


图3 实验和仿真振型对比

关于板的对角线对称,同一条边上两端响应点的振动相位相反,为板的1阶弯曲振动。第2阶振型关于板的两条中心线对称,为自由板的2阶弯曲振动。随着频率的升高,第5阶的振型更加复杂。

以此类推,通过对比仿真和实验中测试点的振动形式,可以正确识别与验证各阶振型。相比于理论计算结果,因为实验中测点数目的限制和各种因素带来的误差,模态测试结果的振型曲线显得不够光滑,整体上两种方法得到的振型结果吻合很好,验证了实验结果的准确性和可靠性。

3 约束阻尼板仿真分析

虽然结构的总体减振性能与结构的阻尼、刚度等综合因素有关,但结构阻尼与共振放大率成反比,对于提高减振性能具有最重要的作用,下面利用有限元仿真从阻尼的角度分析约束阻尼结构中材料参数和结构参数的影响。阻尼比是衡量结构阻尼性能的重要指标,表示材料由于内部原因将机械振动转化为热能而进行耗散的能力。对于实际应用的减振降噪材料,一般希望其损耗因子尽量大,振动能量经过材料传递以后,能量能得到衰减和削弱。如不另外说明,本小节中约束阻尼板的各参数与上小节一致,边界条件取为一端固支一端自由。

3.1 阻尼层材料损耗因子的影响

取黏弹性阻尼层的损耗因子 η_d 分别为0.1、0.2、0.6、1,假定其它参数不变,计算得到约束阻尼板结构的前12阶模态阻尼比如图4所示。

可以看出,材料损耗因子相同,模态阻尼比的大小随阶数升高并无明确规律。而阻尼材料的损耗因子增大,结构的各阶模态阻尼比均增大。因此,材料

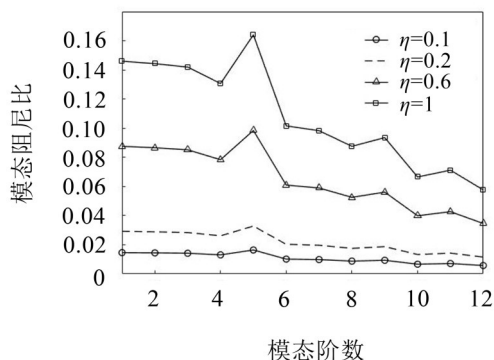


图4 阻尼层材料损耗因子对模态阻尼比的影响

损耗因子越大,结构的减振效果越好,这是橡胶等黏弹性材料广泛应用于设备减振降噪的主要原因。

3.2 金属层厚度的影响

改变约束阻尼板的基层厚度 h_1 和约束层厚度 h_2 ,保持阻尼层厚度和其它参数不变,计算得到约束阻尼板结构的前12阶模态阻尼比如图5所示。

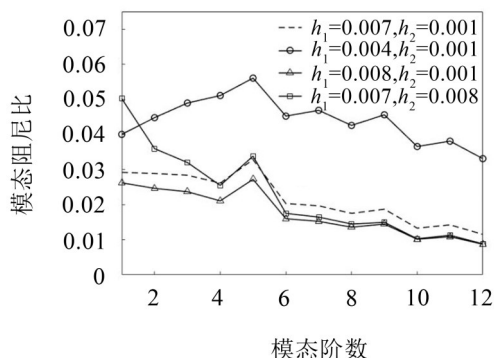


图5 金属层厚度对模态阻尼比的影响

可以看出,由于金属材料的损耗因子相对阻尼层很小,随着基层厚度 h_1 的增加,阻尼层占板结构的厚度比减小,因此各阶模态阻尼比均减小。但约束层的厚度增加,结构的前3阶模态阻尼比反而变大,表明阻尼层的厚度占比并非越大效果越好。GRATES^[9]等人通过实验证明约束层与阻尼层厚度比为1:1时阻尼最大,也有人认为阻尼层厚些更好,至今尚未定论。

3.3 金属层材料的影响

约束阻尼结构的基层和约束层通常采用金属板,保持阻尼层材料和其它参数不变,金属层分别取为普通钢板和铝板,计算得到约束阻尼板结构的前12阶模态阻尼比如图6所示。

可以看出,除了前2阶模态阻尼比外,金属层选用铝板时结构的各阶模态阻尼比均大于钢板。所以相比于钢板,金属层为铝材料时,减振效果会更好。

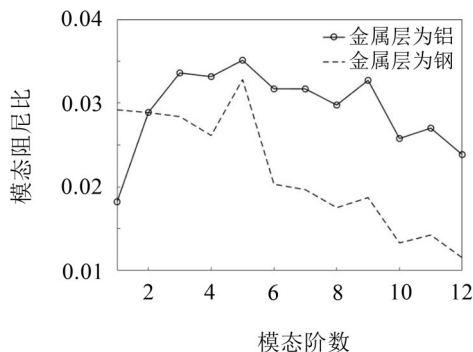


图6 金属层材料对模态阻尼比的影响

4 结语

本文采用多输入多输出的锤击法,对一种约束阻尼板进行模态实验,通过参数识别得到其固有频率、振型及模态阻尼。对比实验结果和有限元计算结果验证了模态测试结果的可靠性。在此基础上,利用约束阻尼板结构的有限元模型,讨论了材料参数和结构参数对模态阻尼的影响。分析表明:阻尼层材料损耗因子越大,结构的减振效果越好;阻尼层厚度占比对结构的模态阻尼比有很大影响,但并非越大效果越好;相比于钢板,金属层选用铝材更有利于提高结构的模态阻尼比。

参考文献:

- [1] UNGAR E E, KERWIN JR E M. Loss factors of viscoelastic systems in terms of energy concepts[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34 (7): 954-957.
- [2] SHEN I Y. Stability and controllability of Euler-Bernoulli beams with intelligent constrained layer treatments[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1996, 118(1): 70-77.
- [3] 周云. 黏弹性阻尼减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
- [4] 王正兴, 代会军. 黏弹性阻尼材料在板结构中的优化计算[J]. *噪声与振动控制*, 2000, 30(6): 18-21.
- [5] 张安付, 闫孝伟, 盛美萍, 等. 自由阻尼结构损耗参数的换算方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2015(3): 572-577.
- [6] 贺红林, 周楠兰, 刘文光, 等. 黏弹性阻尼板结构减振动力学特性分析与优化[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(7): 203-207.
- [7] 应怀樵, 王亚涛. INV 阻尼计在阻尼材料损耗因子测试中的应用[C]. 全国振动与噪声高技术及应用会议. 2007.
- [8] 王正敏, 李德玉. 黏弹性阻尼材料损耗因子的测试及误差分析[J]. *广东造船*, 2017, 36(2): 47-50.
- [9] GRATES J A, THOMAS D A, HICKEY E C, et al. Noise and vibration damping with latex interpenetrating polymer networks[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1975, 19(6): 1731-1743.