

约束层边界条件对约束阻尼梁的影响

张大庆 张强星

(中国科学院力学研究所)

摘 要

在实际结构发生振动后, 粘贴约束阻尼层是一种有效的减振办法。本文探讨了约束阻尼层的边界条件的影响。

前 言

使用约束阻尼结构来控制由宽频带随机激励引起的结构多共振峰现象, 近三十年已得到迅速发展, 并取得了良好的效果。八十年代以前国外有关这方面的工作可由综述文献[1][2]查到。文献[3]则是这一领域卓有成效的工作总结。随着理论的不断深入, 实际应用的不推广, 合理设计约束阻尼结构, 最大限度地发挥它的减振效果, 已成为这一领域最为活跃的课题之一。

文献[4][5]讨论了约束层长度的优化; 文献[6]提出了给定阻尼材料剪切模量 G' 、损耗因子 β , 寻找最佳约束层和阻尼层厚度; 文献[7]则提出了每一种结构都有一个最佳的 $(\frac{G'}{f})_{opt}$ 值, 相应于每个共振频率 f 的 G' 设计值, 损耗因子 β 才能发挥作用; 文献[8]以工程应用为目的, 提出了约束阻尼结构动力学的有限元摄动法和以粘弹性材料剪切模量 G' 为主要目标的优化设计思想; 文献[9]对于在多种约束条件下, 讨论了使系统得到最大损耗因子和最小位移响应的方案。

约束阻尼减振技术经常用来解决工程上发生剧烈振动, 即我们在不改变原有设计的基础上, 粘贴约束阻尼层来吸收振动能量。从实践中, 发现约束阻尼层边界条件显著影响减振效果。因而, 本文采用实际粘弹性材料数据, 即剪切模量 G' 、损耗因子 β 均为频率的函数, 通过有限元计算和实验, 探讨了约束层边界条件在减振中的作用。

一 约束层边界条件

本文对全部覆盖和部分覆盖约束阻尼层结构, 对约束层两端是自由-自由或铆接-铆接两种边界条件进行了讨论(图1)。

二 有限元计算

由于约束阻尼结构振动方程复杂^{[10][11]}, 除了简支-简支边界条件外, 要获得其它边

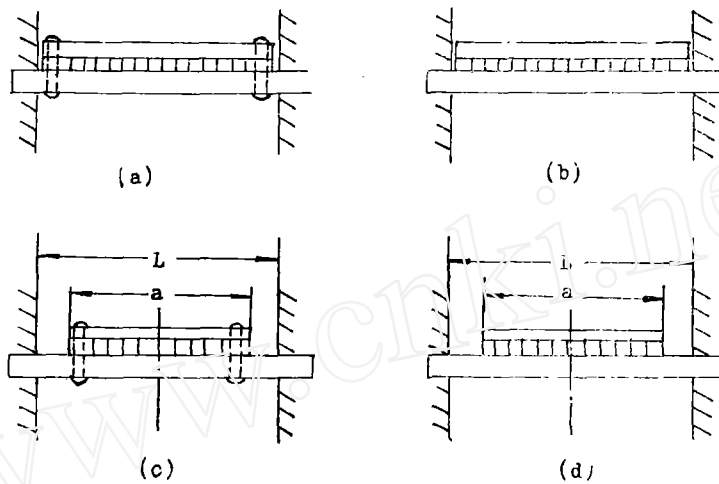


图 1 边界条件

界条件下的损耗因子 η_a 和共振频率 f_a 的解析式非常困难。因此,本文利用根据文献[12]所提出的有限元模型(图 2a)所导出图 2b 所示有限元模型的刚度矩阵和质量矩阵所编制的程序,计算了上述二种边界条件下的损耗因子 η_a 及共振频率 f_a 。

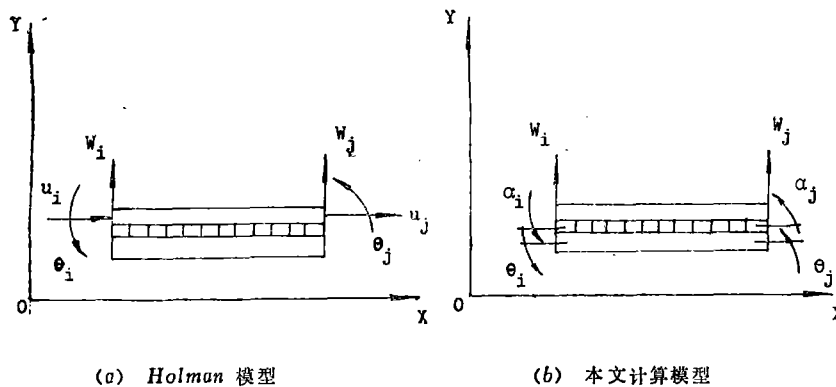


图 2

理论上所依据的基本假设是:

1. 弹性层弯曲是 Euler 梁弯曲。
2. 弹性层与阻尼层接触面之间无相对滑移。
3. 阻尼层变形主要是剪切变形,不考虑拉伸影响。同时采用复刚度本构方程,即,

$$G^* = G'(1 + i\beta)$$

在上述假设下,首先假设阻尼层是弹性的,通过 Hamilton 原理,再应用弹-粘弹对应原理,最终导出单元的动力方程:

$$[m]^e \{\ddot{\delta}\}^e + [K^*]^e \{\delta\}^e = \{F\}^e \tag{1}$$

其中

$$\{\delta\}^e = [W_i^T \quad Q_i \quad \alpha_i \quad W_j^T \quad Q_j \quad \alpha_j]^T$$

$[M]^e$ 、 $[K]^e$ 是单元刚度矩阵、质量矩阵,详细推演可在文献[13]中查到。本文计算共振频率 f_n 和损耗因子 η_n 是采用直接频率响应法和半功率带宽法(图3);

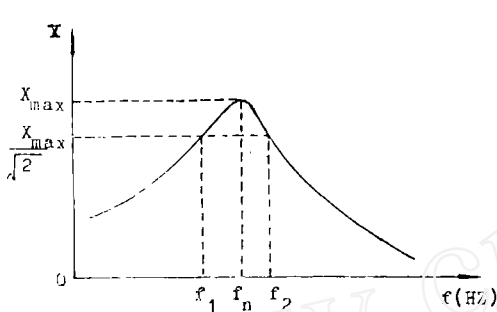


图3 半功率带宽法

$$\eta_n = \frac{f_2 - f_1}{f_n} \quad (2)$$

其中 f_2 、 f_1 为半功率点所对应的频率。该方法的特点是给定一个频率计算一个响应,通过响应找出共振频率 f_n 和损耗因子 η_n 。该方法特别适用于剪切模量 G' 、损耗因子 β 均为频率的函数情况。

本文计算所用的粘弹性材料的剪切模量 G' 、损耗因子 β 取自 DAYTON 大学 [14]。附表 1—附表 3 给出了约束阻尼梁的

尺寸、材料性能。计算结果如图4—图7及表1所示。

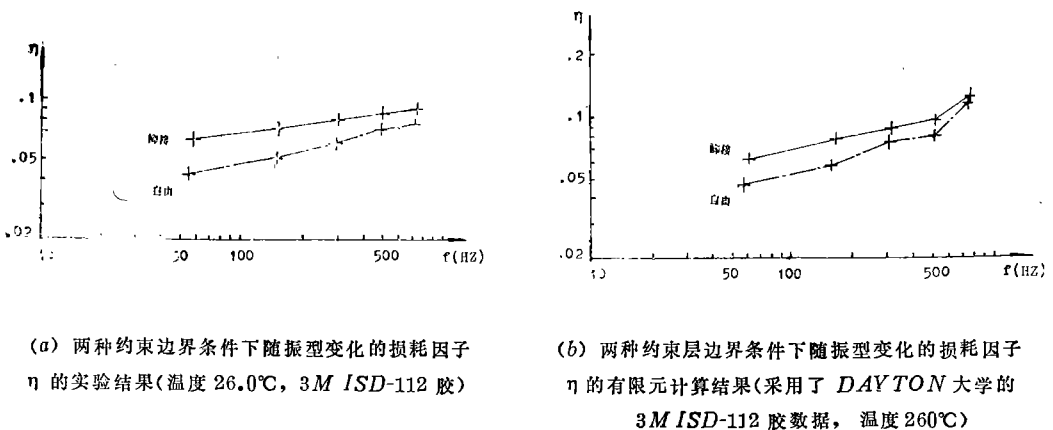
三 实 验

本文实验装置如图8所示。激振方式采用正弦激励。计算损耗因子 η 仍采用半功率带宽法 [15] (公式(2))。阻尼材料是 3M ISD-112。取二件试件的平均值。

本文就全部覆盖约束阻尼层下,两种不同约束层边界条件进行了实验。其结果显示在图4a和图5上。

四 计算、实验结果的讨论

从图4、图5可见,计算结果与实验符合得很好。



(a) 两种约束边界条件下随振型变化的损耗因子 η 的实验结果(温度 26.0°C, 3M ISD-112 胶)

(b) 两种约束层边界条件下随振型变化的损耗因子 η 的有限元计算结果(采用了 DAYTON 大学的 3M ISD-112 胶数据, 温度 260°C)

图 4

从图4可见,随振型提高,约束层边界条件的影响减小,但对一、二阶振型,影响是明显的。为此,图5详细地给出了一阶振型的损耗因子 η_1 与其共振频率 f_1 之间关系曲线,所用方法是改变试件长度,可改变第一振型的共振频率。从该曲线可见,若把约束层

两端自由-自由改为铆接-铆接, 则最大损耗因子 η_{\max} 能提高 40% 左右, 因而可见约束层边界条件在低阶振型显著影响约束阻尼结构的最大损耗因子 η_{\max} 。

剪切参数 X_0 是约束阻尼结构设计中的一个重要参数^{[6][7]}, 其定义为^{[6][7]}

$$X_0 = C \left(\frac{G'}{f} \right)$$

其中

$$C = \frac{B}{2\pi K H_v} \sqrt{\frac{(EI)_c}{m}}$$

G' ——粘弹性材料实剪切模量

f ——共振频率

B ——梁宽

$$K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

$$K_i = E_i A_i \quad (i = 1, 2)$$

A_i ——第 i 弹性层的截面积

m ——单位长梁重量

H_v ——阻尼层厚度

要使阻尼梁的损耗因子 η 达到最大 η_{\max} 值, 它的剪切参数 X_0 必须最佳, 即

$$(X_0)_{\text{opt}} = C \left(\frac{G'}{f} \right)_{\text{opt}} \quad \text{若 } C = \text{常数}.$$

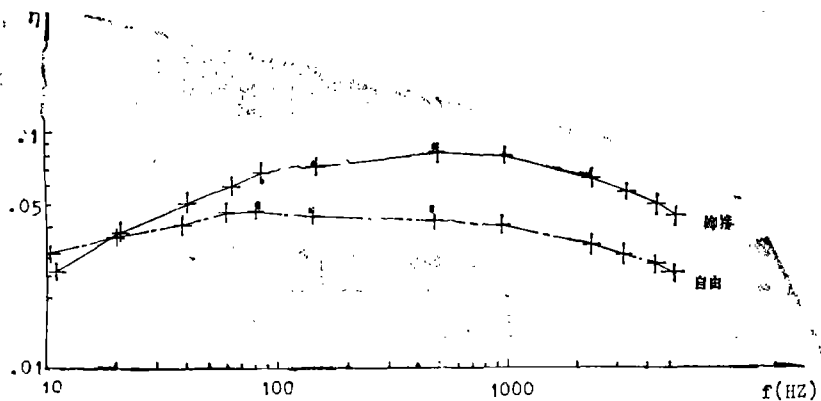


图 5 在改变梁长下, 第一振型损耗因子 η 的有限元计算(由 + 点表示)和实验

(约束层铆接由 · 表示, 约束层自由用 ■ 表示)

(采用了 DAYTON 大学的 3M ISD-112 胶数据, 温度 21.0°C)

对照图 5 中两种边界条件, 可以看出, 最佳剪切参数 $(X_0)_{\text{opt}}$ 受到边界条件的显著影响。

文献[11][16]曾认为边界条件仅仅影响最佳参数 $(X_0)_{\text{opt}}$, 而不影响最大损耗因子 η_{\max} 。本文结果表明, 最大损耗因子 η_{\max} 明显地受到约束层边界条件的影响。

对于对称于梁中间部分复盖约束阻尼层的结构图 1、图 6、图 7 及表 1 表明, 约束层

两端自由-自由边界条件下, 最大损耗因子 η_{lmax} 随覆盖度 ($\frac{\text{约束阻尼层长度}}{\text{结构长度}}$) 变化不大; 相反, 约束层两端铆接-铆接边界条件下, 最大损耗因子 η_{lmax} 随覆盖度减小急剧下降。

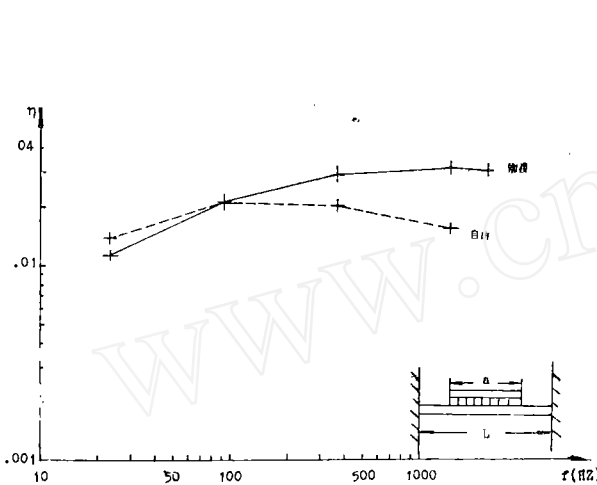


图6 部分覆盖约束层梁第一振型的损耗因子 η 的有限元计算(采用 DAYON 大学 3M I SD-112 胶数据; 温度 21.0°C)

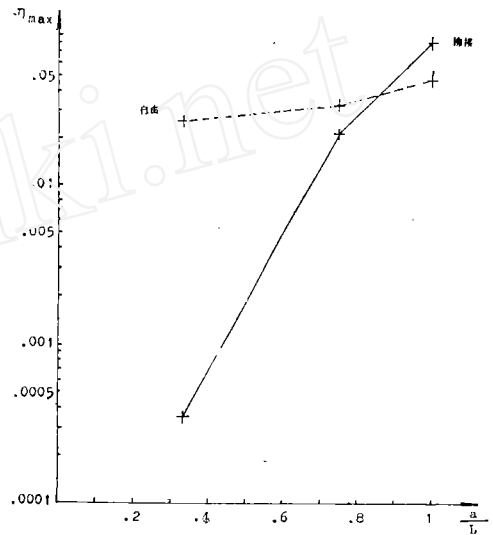


图7 第一振型最大损耗因子 η_{max} 随覆盖度 $\frac{a}{L}$ 的变化曲线

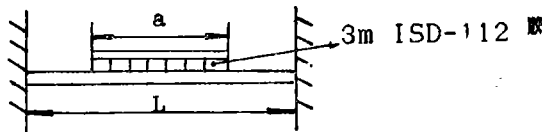


表 1

21.0°C

a (m)	L (m)	约束层两端自由		约束层两端铆接	
		第一振型		第一振型	
		f(HZ)	η	f(HZ)	η
$\frac{L}{3}$	1.23			6.51	.3095E-3
	.93			11.39	.3538E-3
	.66	22.0	0.1934	22.61	.3445E-3
	.33	87.03	.02510	90.61	.2970E-3
	.15	415.79	.02194	437.16	.1815E-3

五 结 论

本文计算、实验显示:

1. 无论是全部覆盖还是部分覆盖约束阻尼层, 约束层边界条件都明显地影响着低阶

振型的最大损耗因子 η_{max} 和最佳剪切参数 $(X_0)_{opt}$ 。

2. 对于全部覆盖约束阻尼层, 两端铆接将比两端自由的结构有更好的减振效果。

3. 对于部分覆盖的约束阻尼层, 覆盖度小于 75%, 则两端自由将比两端铆接的结构有更好的阻尼减振效果。

研究工作得到中国科学院科学基金资助。

(本文于 1986 年 10 月 18 日收到)

参 考 文 献

1. B.C.Nakra, "Vibration control with viscoelastic materials, "Shock and Vibration Digest, 8, (6), 3-12, June (1976)
2. B.C.Nakra, "Vibration control with viscoelastic materials- I, "Shock and Vibration Digest, 8, (1), 17-20, January(1981)
3. A.D.Nashi, U.I.G.Jones and J.P.Herson, "Vibration damping", John Wiley & Son, Inc. New York, 1955.
4. R.Plunkett and L.C.Lee, "Length optimization for constrained viscoelastic layer damping, " J.Acoust.Soc.Amer., 48, 150-161(1970)
5. 田千里 朱新瑜, "具有约束阻尼的拉压元件的研究", 《机械强度》, 7, 30-36(1978)
6. J.E.Ruyicka and T.F.Derby, "Loss factor and resonant frequency of viscoelastic shear damped structural composites, "NASA CR-1269(1969)
7. 张强星, "对称阻尼结构的初步设计参数, "中国科学院力学研究所科研报告(1980)
8. 曹西盛, "粘弹性约束阻尼结构的动力分析及优化设计的有限元摄动法及其应用", 博士论文, 西安交通大学(1985)
9. A.K.Lall, B.C.Nakra and N.T.Asnani, "Optimum design of viscoelastically damped sandwich panels, "Engineering Optimization, 6, 197-205(1983)
10. R.A.DiTaranto, "Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite-length beams, "J Appl.Mech., 32, 881-886(1965)
11. D.J.Mead and S.Markus, "Loss factors and resonant frequency of encastre damped sandwich beams, "J.Sound and Vib., 12(1), 99-112(1970)
12. R.E.Holman and J.M.Tanner, "Finite-element modeling techniques for constrained layer damping, "AIAA/ASME/ASCE/AHS 22nd Strure, Structural dynamics, and Materials Conference, 8-16 (1981)
13. 张大庆, "约束阻尼结构设计", 硕士论文, 中国科学院力学研究所(1986)
14. M.F.Kluesmer and M.L.Drake, "Damped structure design using finite element analysis, "Shock and Vib Bull., 52, part 5 of 5 parts, 1-12, (1982)
15. 马邦安 张强星, "测定软粘弹性材料阻尼性能的振动梁法", 《机械强度》, 37-41(1978)
16. D.K.Rao, "Frequency and loss factors of sandwich beams under various boundary conditions", J. Mech.Engi.Sci., 20(5), 271-282(1978)
17. 中国科学院力学研究所振动组, "大阻尼结构简介", 《机械强度》, 7, 23-29(1978)