

板类约束阻尼结构的层间厚度参数优化

黄加才 游少雄 赵云峰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 将梁结构剪切中性轴的概念推广至约束阻尼板结构中,提出了剪切中性面的概念。基于变形能原理,对板类约束阻尼结构的结构损耗因子进行层间厚度参数优化理论分析,并进行试验验证。结果表明,阻尼层较薄时,阻尼层厚度和约束层厚度的优化理论分析结果与试验数据变化趋势一致,表明了理论分析方法的合理性。

关键词 约束阻尼结构,阻尼板,结构损耗因子,优化

Optimization Method to Optimize Layer Thickness for Constrained Damping Plate

Huang Jiakai You Shaoxiong Zhao Yunfeng

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

Abstract The concept of “Shear Neutral Area” was proposed for constrained damping plate compared to “Shear Neutral Axis” for beam. Based on Deformed Energy Principle, structural loss factor was analyzed by optimizing the thickness of damping layer, and then tests were executed. Results show when damping layer is thin, the thickness of damping layer and constrained layer are consistent to actual measurement, indicating the rationality of the analysis method.

Key words Constrained damping structure, Damping plate, Structural loss factor, Optimization

0 引言

在航天领域,约束阻尼作为一种有效的被动减振方法,常应用在梁和板壳类结构上^[1-4]。在此类结构中,阻尼层由于振动中两表层的相对位移而产生剪切变形,从而产生结构阻尼。通过选择不同的材料,约束阻尼结构可以获得适宜的损耗因子。

在约束阻尼结构的发展过程中,如何对结构进行几何优化以达到最佳的减振效果,一直是一个令广大专家学者关注的问题。20世纪50年代,E. M. Kerwin首先提出并对约束阻尼梁结构的剪切阻尼进行分析,随后又对计算式进行了充实完善,并应用于其他类型的阻尼多层结构^[5];D. J. Mead^[6]对边界条件进行了修正补充,重新推导了相应的计算式。其阻尼特性可表述如下:

$$\eta = \frac{\beta XY}{1 + (2 + Y)X + (1 + Y)(1 + \beta^2)X^2} \quad (1)$$

式中, η 为损耗因子, X 为剪切参数, Y 为刚度参数, β

为材料阻尼系数。

以式(1)为基础,可对阻尼梁结构进行几何参数优化,以得到最优的减振效果。

对于板类约束阻尼结构的几何参数优化,目前大多用有限元法进行分析^[7],并用有限元法进行几何参数优化。但受有限元模型和材料本构关系的影响,精度有限,并且计算周期长,费用较高。

卢秉恒等人在考虑约束阻尼梁结构的位置优化时提出了“剪切中性轴”的概念^[8]。由于在约束阻尼结构中基层和约束层的弯曲,使阻尼层的上、下表面分别压缩和拉长,每个阻尼微元都发生了角应变,因此阻尼层中心总存在一个零剪应变轴,即中性轴。

本文应用中性轴的概念,在变形能原理的基础上,针对板类约束阻尼结构提出了中性面的概念,对板类约束阻尼结构的损耗因子进行几何参数优化。

1 几何参数优化分析

1.1 优化机理

结构损耗因子是用来衡量结构耗散振动能量的指标,用以标志结构的阻尼值。根据变形能理论,结构损耗因子 η 为结构耗散的能量和总的弹性变形能的比值。对于约束阻尼结构,忽略阻尼层拉伸变形的影响和基层、约束层的材料阻尼,则结构耗散的能量 U_d 为:

$$U_d = \beta U_{\text{shear}} \quad (2)$$

式中, U_{shear} 为阻尼层弹性剪切变形能。

对于基层和约束层,当发生弯曲时,其截面上既有弯矩,又有剪力,因此截面上既有正应力,又有剪应力。但对于金属弹性层,忽略剪切应变仍具有足够的精度,因此,约束阻尼结构总的变形能为:

$$U = U_1 + U_3 + U_{\text{shear}} \quad (3)$$

式中, U_1 为基层弯曲变形能, U_3 为约束层的弯曲变形能。

约束阻尼结构的损耗因子 η 为:

$$\eta = \frac{U_d}{U} = \beta \frac{U_{\text{shear}}}{U_1 + U_3 + U_{\text{shear}}} \quad (4)$$

可以看出, U_{shear} 越大,越有利于提高约束阻尼结构的损耗因子,优化的目的也正是选取适当的阻尼层厚度和约束层厚度,以使结构损耗因子最大。

1.2 变形能计算

在分析中采用 Kirchhoff 薄板理论假设。

(1) 变形前垂直于薄板中性层的直线段(法线),在薄板变形后仍保持为直线,且垂直于弯曲变形后的中面,其长度不变。

(2) 与 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 等相比,垂直于中面方向的正应力 σ_z 很小,在计算应变时可略去不计。

(3) 薄板弯曲变形时,中面内各点只有垂直位移 w ,而无 x 和 y 方向的位移。

如图 1 所示的板类约束阻尼结构中取出阻尼层内的一个微分平行六面体,此微元体所受的剪应力如图 2 所示。

根据剪切中性轴的概念,分析剪应力对 τ_{xz}/τ_{zx} 对剪切耗能的贡献。当板绕 y 轴弯曲时,将在阻尼层内产生剪应力对 τ_{xz}/τ_{zx} ,在结构中取出与 x 轴平行,宽度为 dy 的微分段,设该微分段向上弯曲,如图 3 所示。 OO' 表示结构未变形前剪切中性轴的位置, $O'O'$ 表示变形后剪切中性轴的位置。

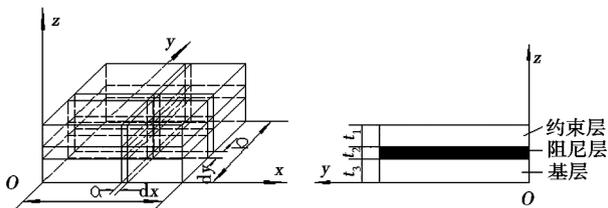


图 1 板类约束阻尼结构

Fig 1 Structure of constrained damping plate

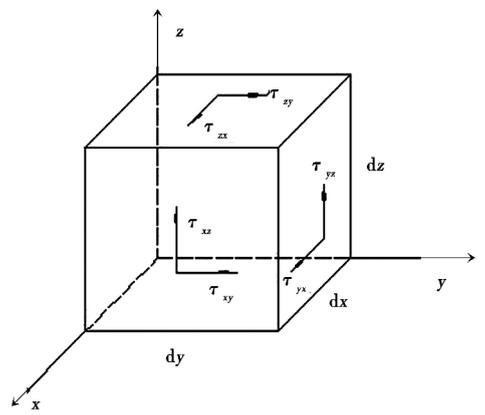


图 2 阻尼层内微元体所受剪应力示意图

Fig 2 Shear stress of cubic element in damping layer

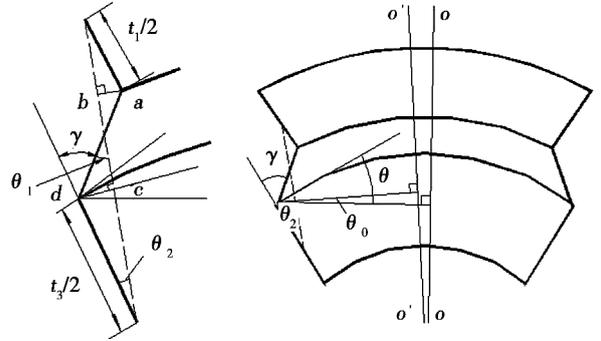


图 3 结构变形时的剪应变几何关系图

Fig 3 Geometric relation of shear strain during structural deformation

由于剪切中性轴处没有剪切应变,因此剪切中性轴总是指向阻尼层厚度的方向。图 3 中的虚线通过基层板和约束层厚度的中点(即中性层所处的位置),在变形前沿阻尼层厚度的方向,变形后由于中性层内无应变,且由于基层和约束层同位移场振动,因此,虚线仍保持为沿阻尼层厚度的方向。

则阻尼层的剪应变为:

$$\gamma = \theta_1 + \theta - \theta_0 \quad (5)$$

由几何关系,可由下式表示:

$$\gamma = H(\theta - \theta_0)t_2 \quad (6)$$

式中, $H = (t_1 + t_3 + 2t_2)/2$ 。

设板横向振动的振型为 $w(x, y)$, 剪切中性轴坐标为 (x_n, y) , 设 $x_n = f(y)$, 即在板类约束阻尼结构中,剪切中性轴变成了剪切中性面,则:

$$\theta - \theta_0 = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} \quad (7)$$

剪应力对 τ_{xz}/τ_{zx} 的剪切变形能为:

$$U_{\text{shear}}^{xz} = \frac{1}{2} G_2 \frac{H^2}{t_2} \int_0^a \int_0^b \left[\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} \right]^2 dx dy \quad (8)$$

式中, G_2 为黏弹性阻尼材料的复剪切模量的实部。

剪切平衡条件决定了对应于剪应力对 τ_{xz}/τ_{zx} 的剪切中性面的位置,由下式决定:

$$\int_0^a \left[\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} \right] dx = 0 \quad (9)$$

积分得:

$$\frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} = \frac{1}{a} [w(a, y) - w(0, y)] \quad (10)$$

同理,由剪应力对 $\tau_{yz}/\tau_{zy}, \tau_{yx}/\tau_{xy}$ 产生的阻尼层剪切变形能分别为:

$$U_{\text{shear}}^{yOz} = \frac{1}{2} G_2 \frac{H^2}{t_2} \int_0^a \int_0^b \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=g(x)} \right]^2 dx dy \quad (11)$$

$$U_{\text{shear}}^{xOy} = \frac{1}{6} G_2 \frac{t_3}{t_1 + t_2} (t_1^3 + t_3^3) \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dx dy \quad (12)$$

1.3 优化分析

由式(8)、(11)、(12)知板类约束阻尼结构中总的剪切变形能为:

$$U_{\text{shear}} = U_{\text{shear}}^{xOz} + U_{\text{shear}}^{yOz} + U_{\text{shear}}^{xOy} \quad (13)$$

由于式(14)中积分项为 $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2$, 故同 τ_{xz}/τ_{zx} 和 τ_{yz}/τ_{zy} , 所产生的剪切变形能相比, 剪应力对 τ_{yx}/τ_{xy} 产生的剪切变形能可忽略不计。由式(13)可得:

$$U_{\text{shear}} = U_{\text{shear}}^{xOz} + U_{\text{shear}}^{yOz} \quad (14)$$

由弹性理论,约束层和基层的弯曲变形能分别为:

$$U_1 = \frac{E_1 t_1^3}{24(1 - \mu_1^2)} \int_0^a \int_0^b [B]^T [D]_1 [B] dx dy \quad (15)$$

$$U_3 = \frac{E_3 t_3^3}{24(1 - \mu_3^2)} \int_0^a \int_0^b [B]^T [D]_3 [B] dx dy \quad (16)$$

式中, E_1, E_3 为约束层和基层的弹性模量, μ_1, μ_3 为约束层和基层的泊松比。

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}^T$$

$$[D]_1 = \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 & 0 \\ \mu_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu_1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[D]_3 = \begin{bmatrix} 1 & \mu_3 & 0 \\ \mu_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu_3}{2} \end{bmatrix}$$

将式(14)~(16)代入(4)中,可得:

$$\eta = \beta \frac{\frac{1}{2} G_2 \frac{H^2}{t_2} V_2}{\frac{E_1 t_1^3}{24(1 - \mu_1^2)} V_1 + \frac{E_3 t_3^3}{24(1 - \mu_3^2)} V_3 + \frac{1}{2} G_2 \frac{H^2}{t_2} V_2} \quad (17)$$

式中:

$$V_1 = \int_0^a \int_0^b [B]^T [D]_1 [B] dx dy \quad (18)$$

$$V_3 = \int_0^a \int_0^b [B]^T [D]_3 [B] dx dy \quad (19)$$

$$V_2 = \int_0^a \int_0^b \left\{ \left[\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} \right]^2 + \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=g(x)} \right]^2 \right\} dx dy \quad (20)$$

1.3.1 阻尼层厚度 t_2 的优化

总剪切变形能越大,约束阻尼结构的结构损耗因子越大。由式(17)可知, U_1 和 U_3 均不含参数 t_2 , 而 V_2 也与 t_2 无关,故可令:

$$T = \frac{H^2}{t_2} = \frac{(t_1 + t_3 + 2t_2)^2}{4t_2} \quad (21)$$

对 t_2 求导,并令之为零,得:

$$t_2 = \frac{t_1 + t_3}{2} \quad (22)$$

即在 $t_2 = (t_1 + t_3)/2$ 时, T 取极小值,此时 U_{shear} 也取极小值。因此,当约束层厚度一定时,应当尽量避免阻尼层厚度为 $(t_1 + t_3)/2$ 。在约束层厚度一定的情况下,约束阻尼结构的结构损耗因子随阻尼层厚度的变化趋势如图4所示。可以看出,随阻尼层厚度的增加,结构损耗因子先减小后增大,表明阻尼层的厚度并非越厚效果越好。

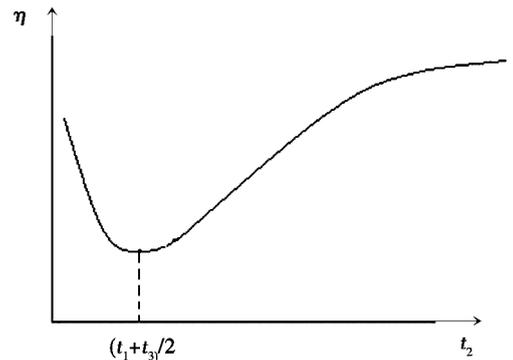


图4 结构损耗因子随阻尼层厚度的变化趋势

Fig 4 Changing trend of structural loss factor with thickness of damping layer

1.3.2 约束层厚度 t_1 的优化

设约束层与基层厚度之比为 y , 即 $y = t_1/t_3$, 将其代入式(17)中并整理得:

$$\eta = \beta \frac{12 G_2 \frac{1}{t_2 t_3} \left(y + 1 + 2 \frac{t_2}{t_3} \right)^2 V_2}{\frac{E_1}{1 - \mu_1^2} y^3 V_1 + \frac{E_3}{1 - \mu_3^2} V_3 + 12 G_2 \frac{1}{t_2 t_3} \left(y + 1 + 2 \frac{t_2}{t_3} \right)^2 V_2} \quad (23)$$

由 $\frac{\partial \eta}{\partial y} = 0$ 得:

$$y^3 + 3\left(1 + 2\frac{t_2}{t_3}\right)y^2 = 2\frac{E_3}{E_1} \cdot \frac{1 - \mu_1^2}{1 - \mu_3^2} \cdot \frac{V_3}{V_1} \quad (24)$$

此即为板类约束阻尼结构对约束层厚度的参数优化方程。可见, t_1/t_3 的最佳值与基层、约束层的材料特性有关, 与阻尼层厚度也有关系。

对于整体覆盖的约束阻尼板, 若基层与约束层采用相同的材料, 式(24)可进一步简化为:

$$y^3 + 3\left(1 + 2\frac{t_2}{t_3}\right)y^2 = 2 \quad (25)$$

在阻尼层厚度一定的情况下, 约束阻尼结构的结构损耗因子随约束层厚度的变化趋势如图5所示。

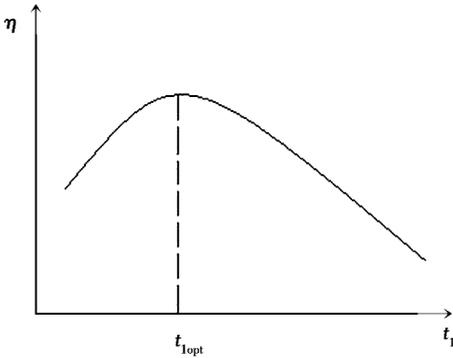


图5 结构损耗因子随约束层厚度的变化趋势
Fig. 5 Changing trend of structural loss factor with thickness of constrained layer

分析式(24)可知: 当 E_3/E_1 较大时, $y = t_1/t_3$ 也较大, 增大 t_1 可使阻尼层产生较大的剪应变, 而 U_1 增大相对不多, 故有利于增大结构损耗因子。利用各种扩变层可以有效的增大阻尼层剪应变, 而基层和约束层的弯曲变形能几乎不变, 是一种增大结构损耗因子的有效方法。

实际应用中, 可以利用式(24)或(25), 对于不同的 t_2/t_3 , 分别求 t_1/t_3 的最优值, 然后将其代入式(23), 求得结构损耗因子 η 的最优值随 t_2/t_3 的变化关系, 根据振动水平要求, 选取适当的阻尼层厚度 t_2 和约束层厚度 t_1 。

1.3.3 V_1, V_2, V_3 的计算

由表达式(18)~(20)可以看出, 要求得 V_1, V_2, V_3 的值, 必须已知约束层和基层的各阶模态振型, 以及对应的中性面的位置。而在实际工程应用中, 结构基频对应的振型对结构的影响较大, 因此需要严格控制其振动特性。对板类结构, 由模态实验或理论分析可知, 其一阶模态振型在大多情况下都是对称振型, 在整体约束阻尼处理时, 阻尼层内的横向剪切力在其几何中点处达到平衡。根据剪切中性面的物理意义可知, 阻尼层的几何中点即为剪切中性面的位置, 剪应力对 τ_{xz}/τ_{zx} 和 τ_{yz}/τ_{zy} 对应的剪切中性面的位置分别为:

$$\frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=f(y)} = \frac{1}{a} [w(a, y) - w(0, y)] = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=g(x)} = \frac{1}{b} [w(x, b) - w(x, 0)] = 0 \quad (27)$$

由模态实验或理论分析得出板的一阶模态振型, 然后结合式(26)和(27)即可求得 V_1, V_2, V_3 的值。

2 试验验证

设计约束阻尼板如图6所示。

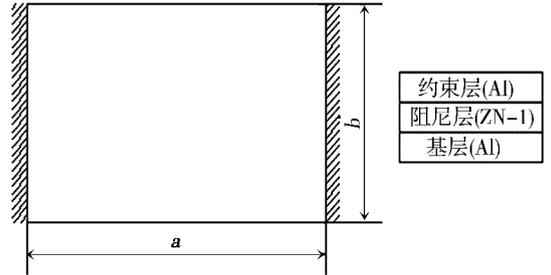


图6 实验件几何尺寸及边界条件

Fig. 6 Geometric size of experimental sample and boundary condition

约束层和基层均采用铝, 材料性能参数: 弹性模量 72 GPa, 泊松比为 0.33, 密度为 2.7 g/cm^3 。阻尼层材料为 ZN-1, 其密度为 0.98 g/cm^3 , 剪切模量和损耗因子随频率的变化见表1。

表1 ZN-1 阻尼材料的剪切模量和损耗因子

Tab. 1 Shear module and loss factor of ZN-1 damping material

频率/Hz	剪切模量/MPa		材料损耗因子 β	
	200℃	300℃	200℃	300℃
0	0.38	0.35	0.50	0.32
10	0.79	0.60	0.92	0.65
100	1.40	1.15	1.20	1.10
200	2.00	1.85	1.25	1.30
400	3.10	2.15	1.15	1.30
700	5.00	2.85	1.10	1.25

在实验时, 均采用随机振动, 条件如图7所示。

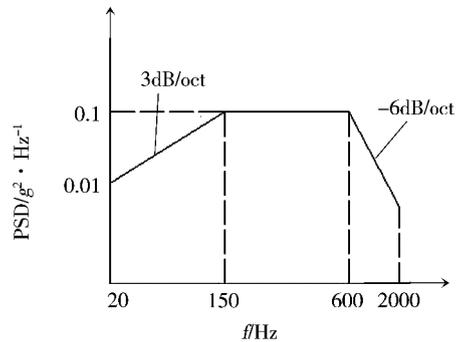


图7 振动实验条件

Fig. 7 Conditions of vibration experiment

2.1 阻尼层厚度优化理论的验证

表3 不同约束层厚度下的结构损耗因子

Tab.3 Structural loss factor with various thickness of constrained layer

t_1/mm	计算结果	实验结果
0.5	0.166	0.122
1.0	0.191	0.163
1.5	0.191	0.208
2.0	0.171	0.187
2.5	0.144	0.202
3.0	0.118	0.189
4.0	0.081	0.181

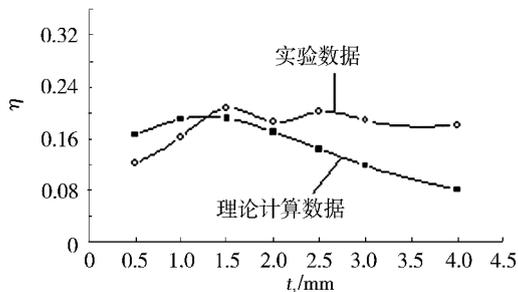


图9 结构损耗因子随约束层厚度的变化曲线

Fig.9 Curves of structural loss factor with thickness of constrained layer

可以看出,在约束层厚度为 1.5 mm 时,结构损耗因子最大,接近于理论计算结果。

试验数据普遍较理论计算值大,一方面,可能是由于理论计算时并没有考虑结构约束处的摩擦阻尼而造成的;另一方面,约束层较厚时会带来结构频率较大的变化,从而影响阻尼材料的物理性质。除个别数据点外,两条曲线的变化趋势也是一致的,说明了本计算方法的合理性。

3 结论

(1) 基于约束阻尼板的剪切中性面对结构损耗因子进行了层间厚度参数优化理论分析,阻尼层较薄时,分析结果与试验数据变化趋势一致,最优点位置相同,表明了理论分析方法的合理性。

(2) 本文采用的方法,不仅可应用在三层板类约束阻尼结构中,也可推广应用在多层约束阻尼结构和梁类约束阻尼结构中,具有一定的理论价值。

参考文献

- [1] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,1991
- [2] 刘向群. 粘弹阻尼材料和夹层阻尼结构的研制[J]. 宇航材料工艺,1993(6):41-44
- [3] 梁鲁,刘明辉,张静,等. 附加约束阻尼层对星箭系统动特性的影响分析[J]. 应用力学学报,2007(4):669-673

(下转第 38 页)

为研究约束阻尼板结构的结构损耗因子随阻尼层厚度变化的关系,取图 6 板的尺寸 a 为 175 mm, b 为 105 mm,基层和约束层厚度均为 1.0 mm,而阻尼层厚度取不同值,进行理论计算和实验验证。

表2 不同阻尼层厚度下的结构损耗因子

Tab.2 Structural loss factor with various thickness

t_2/mm	计算结果	试验结果
0.5	0.307	0.303
0.8	0.285	0.293
1.0	0.282	-
1.2	0.284	0.281
1.5	0.291	0.337
2.0	0.307	0.379
3.0	0.346	0.444
5.9	0.451	0.468

如前所述,当阻尼层厚度 $t_2 = (t_1 + t_3)/2$ 时,结构损耗因子 η 最小,而从图 8 中可以看出,由实验数据拟合的曲线在 t_2 为 1 mm 附近达到最小值,验证了理论分析的正确性。

当阻尼层较薄时($t_2 < 1.2$ mm),由实验数据拟合的曲线和理论计算数据曲线比较一致;但当阻尼层较厚时,实验数据拟合曲线和理论计算数据拟合曲线差别较大,原因在于:(1)理论计算时并没有考虑结构各约束点处的摩擦阻尼,将其看成是理想约束;(2)阻尼层较厚时,基层和约束层的位移是不同的,但在进行理论计算时,假设其位移是一样的。

阻尼层较薄时,理论计算数据拟合曲线和由实验数据拟合的曲线的变化趋势是一致的,说明这种优化理论是合理的。

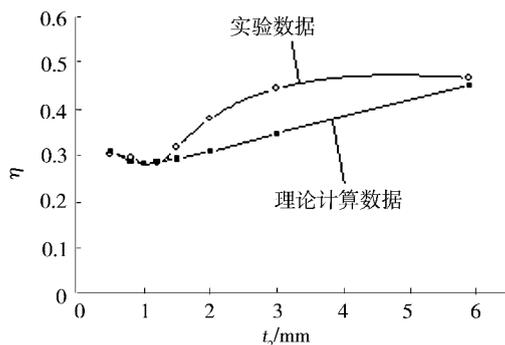


图8 结构损耗因子随阻尼层厚度变化的曲线

Fig.8 Curves of structural loss factor with thickness of damping layer

2.2 约束层厚度优化理论的验证

为研究约束阻尼板结构的结构损耗因子随约束层厚度改变的性质,取图 6 板的尺寸 a 为 213 mm, b 为 127 mm,基层和阻尼层厚度分别为 2.0 mm 和 0.5 mm,约束层厚度取表 3 所示厚度分别进行理论计算和实验验证。试验结果如表 3 和图 9 所示。