

共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的阻尼性能*

王绍清^{1,2}, 梁森², 刘鹏¹

(1. 潍坊科技学院山东省高校设施园艺实验室 潍坊, 262700) (2. 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛, 266000)

摘要 为了获取共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的阻尼特性, 基于一阶剪切理论模型, 利用 Rayleigh-Ritz 法计算共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的固有频率和损耗因子, 将计算结果同有限元法计算结果进行对比, 验证该理论的正确性, 同时分析结构固有频率和损耗因子随阻尼层位置和剪切模量变化的规律。结果表明: 结构固有频率随着两阻尼层中面距离的增大先减小后增大, 存在极小值; 增大两阻尼层中面的距离, 结构损耗因子先增大后减小, 存在设计的最佳值; 结构的固有频率随着结构剪切模量的增加而单调增加; 随着剪切模量的增加, 结构的损耗因子不再单调变化。

关键词 复合材料; 黏弹性材料; 共固化; 固有频率; 损耗因子
中图分类号 TH113.1; TB332

1 问题的引出

共固化双层阻尼薄膜复合材料结构 (co-cured composite structures with double-layer damping membranes embedded, 简称 CCSDDME) 是在特定环境下将 3 种不同性质的材料通过人工或现代工艺复合而成的一种多相固体^[1-6]。这 3 种材料在性能上相互协调, 大大提高了结构的阻尼性能, 并获得了单一材料难以比拟的动力学性能。该结构在智能化温室、航天飞机、卫星和建筑等领域有着极其广泛的应用前景^[7]。由于 CCSDDME 具有可设计性, 包括黏弹性阻尼材料、阻尼层几何尺寸、增强材料和基体材料种类等, 这些为 CCSDDME 的力学性能改善和极端使用环境提供了可能, 其结构如图 1 所示。

固有频率和损耗因子是共固化双层阻尼薄膜复合材料结构动力学性能的重要指标^[8]。文献[9-12]对单一阻尼层嵌入的连续阻尼结构动力学性能、隔声性能、疲劳性能以及低速冲击性能进行了研究。文献[13]利用模态应变能方法研究了嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构在不同参数下的固有频率和模态损耗因子。文献[5]按照固化过程工艺曲线制成了嵌入式中温共固化多层阻尼薄膜复合材料试样, 并用模态应变能的方法研究了该结构的阻尼性能。文献[14]研发一种新型 5 层夹芯复合材料仪表板, 并将该仪表板中心层和上、下蒙皮设计成共固化多层阻尼复合材料结构, 通过模态实验和模态应变能有限元相结合的方法研究了黏弹性材料层和泡沫

材料层厚度变化对固有频率和模态损耗因子的影响。综上所述, 研究人员对单一阻尼层和多个阻尼层嵌入的共固化复合材料结构动力学性能的研究多采用模态实验和模态应变能有限元法, 但模态应变能有限元法对单元依赖性较强, 精确度浮动较大。利用 Rayleigh-Ritz 可以较精确地求解结构的固有频率和损耗因子。

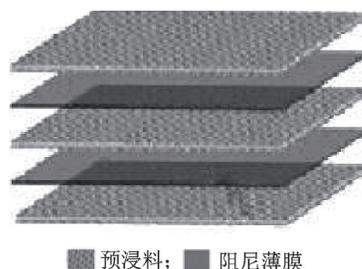


图 1 CCSDDME 试件结构

Fig.1 Structure of CCSDDME specimens

笔者应用 Rayleigh-Ritz 法研究了结构的动力学性能, 并计算了结构的固有频率和损耗因子, 得到了固有频率和损耗因子随阻尼层位置和剪切模量的变化规律, 为轻质大阻尼复合材料结构设计提供了理论支撑。

2 CCSDDME 固有频率和损耗因子的推导

为了得到控制方程, 假设如下: ① CCSDDME 在厚度方向的变形忽略不计; ② CCSDDME 每层界

* 国家自然科学基金资助项目(51375248); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE088); 山东省高校设施园艺实验室资助项目(2018YY049); 潍坊市科技计划资助项目(2018GX068)

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-06-18

面之间不发生滑移;③CCSDDME各层之间的位移关系符合1阶剪切变形理论;④CCSDDME中黏弹性层具有相同的力学性能,剪切模量采用复常数模量。CCSDDME面内位移如图2所示。

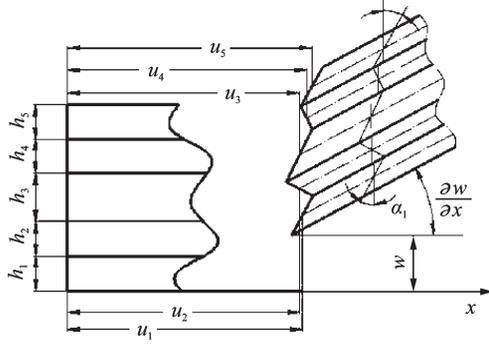


图2 CCSDDME面内位移

Fig.2 In-plane displacement of CCSDDME

2.1 结构的几何方程及本构关系

根据1阶剪切变形理论和上述假设,结构的各层位移可表示为

$$\bar{U}_i(x, y, z, t) = u_i(x, y, t) + z^{(i)}\alpha_i(x, y, t) \quad (1)$$

$$\bar{V}_i(x, y, z, t) = v_i(x, y, t) + z^{(i)}\beta_i(x, y, t) \quad (2)$$

$$\bar{W}(x, y, z, t) = w(x, y, t) \quad (3)$$

$$(-h_i/2 \leq z^{(i)} \leq h_i/2)$$

其中: \bar{U}_i , \bar{V}_i , \bar{W} 分别为坐标系中第*i*层内在*x*,*y*,*z*轴方向的位移; u_i , v_i , w 分别为中面内各点沿着*x*,*y*,*z*轴的位移; α_i , β_i 分别为各层的中面法线绕*x*轴和*y*轴的转角; h_i 为第*i*层的厚度。

由于层与层之间为理想黏接,无缝隙、无滑动,可知第2层上表面和第3层下表面的位移相同,第2层下表面和第1层上表面的位移相同。化简后得

$$u_2 = (u_1 + u_3)/2 + (h_1\alpha_1 - h_3\alpha_3)/4 \quad (4)$$

$$v_2 = (v_1 + v_3)/2 + (h_1\beta_1 - h_3\beta_3)/4 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = (u_3 - u_1)/h_2 - (h_1\alpha_1 + h_3\alpha_3)/2h_2 \quad (6)$$

$$\beta_2 = (v_3 - v_1)/h_2 - (h_1\beta_1 + h_3\beta_3)/2h_2 \quad (7)$$

同样可得第4层中面位移为

$$u_4 = (u_3 + u_5)/2 + (h_3\alpha_3 - h_5\alpha_5)/4 \quad (8)$$

$$v_4 = (v_3 + v_5)/2 + (h_3\beta_3 - h_5\beta_5)/4 \quad (9)$$

$$\alpha_4 = (u_5 - u_3)/h_4 - (h_3\alpha_3 + h_5\alpha_5)/2h_4 \quad (10)$$

$$\beta_4 = (v_5 - v_3)/h_4 - (h_3\beta_3 + h_5\beta_5)/2h_4 \quad (11)$$

结构第*i*层的位移-应变关系表示为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^{(i)} \\ \epsilon_y^{(i)} \\ \gamma_{xy}^{(i)} \\ \gamma_{yz}^{(i)} \\ \gamma_{xz}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_i \\ \bar{V}_i \\ \bar{W}_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: $\epsilon_x^{(i)}$, $\epsilon_y^{(i)}$ 分别为第*i*层上沿*x*轴和*y*轴的线应变; $\gamma_{xy}^{(i)}$, $\gamma_{yz}^{(i)}$, $\gamma_{xz}^{(i)}$ 为第*i*层上的剪应变。

每层的应力-应变关系表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^{(i)} \\ \sigma_2^{(i)} \\ \tau_{12}^{(i)} \\ \tau_{23}^{(i)} \\ \tau_{13}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^{(i)} & Q_{12}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12}^{(i)} & Q_{22}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1^{(i)} \\ \epsilon_2^{(i)} \\ \gamma_{12}^{(i)} \\ \gamma_{23}^{(i)} \\ \gamma_{13}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: $\sigma_1^{(i)}$, $\sigma_2^{(i)}$ 为正应力分量; $\tau_{12}^{(i)}$, $\tau_{23}^{(i)}$, $\tau_{13}^{(i)}$ 为剪应力分量。

第*i*层的刚度矩阵表示为

$$\begin{cases} Q_{11}^{(i)} = E_1^{(i)} / (1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}) \\ Q_{12}^{(i)} = \nu_{12}^{(i)}E_2^{(i)} / (1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}) \\ Q_{22}^{(i)} = E_2^{(i)} / (1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}) \\ Q_{44}^{(i)} = G_{23}^{(i)} \\ Q_{55}^{(i)} = G_{13}^{(i)} \\ Q_{66}^{(i)} = G_{12}^{(i)} \end{cases} \quad (i=1, 2, 3)$$

其中: $E_1^{(i)}$, $E_2^{(i)}$ 为第*i*层的弹性模量; $\nu_{12}^{(i)}$, $\nu_{21}^{(i)}$ 为第*i*层的泊松比; $G_{12}^{(i)}$, $G_{13}^{(i)}$, $G_{23}^{(i)}$ 为第*i*层的剪切模量。

通过坐标变换,可得到*x*-*y*坐标中的应力-应变关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^{(i)} \\ \sigma_y^{(i)} \\ \tau_{xy}^{(i)} \\ \tau_{yz}^{(i)} \\ \tau_{xz}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}^{(i)} & \bar{Q}_{12}^{(i)} & \bar{Q}_{16}^{(i)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12}^{(i)} & \bar{Q}_{22}^{(i)} & \bar{Q}_{26}^{(i)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{16}^{(i)} & \bar{Q}_{26}^{(i)} & \bar{Q}_{66}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44}^{(i)} & \bar{Q}_{45}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45}^{(i)} & \bar{Q}_{55}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^{(i)} \\ \epsilon_y^{(i)} \\ \gamma_{xy}^{(i)} \\ \gamma_{yz}^{(i)} \\ \gamma_{xz}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中: \bar{Q}_{ij} 为变换刚度矩阵。

2.2 控制微分方程的推导

根据上面得到的应力-应变关系式计算层合板的应变能和动能为

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 \iiint_V (\epsilon_x^{(i)}\sigma_x^{(i)} + \epsilon_y^{(i)}\sigma_y^{(i)} + \gamma_{xy}^{(i)}\tau_{xy}^{(i)} + \gamma_{yz}^{(i)}\tau_{yz}^{(i)} + \gamma_{xz}^{(i)}\tau_{xz}^{(i)}) dV \quad (15)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 \iint_S \rho_i h_i \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dS + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i \iint_S \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} \right)^2 \right] dS + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i^3 \iint_S \left[\left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial t} \right)^2 \right] dS \quad (16)$$

结构在边界*x*=0和*x*=*a*处的边界条件为: $N_x^{(i)}=0$; $v_i=0$; $w=0$; $M_x^{(i)}=0$; $\beta_i=0$ 。其中*i*=1, 3, 5。

结构在边界*y*=0和*y*=*b*处的边界条件为:

$N_y^{(i)}=0; u_i=0; w=0; M_y^{(i)}=0; \alpha_i=0$ 。其中 $i=1,3,5$ 。

应用 Navier 型解法,满足四边简支边界条件的位移函数表达式为

$$\begin{cases} u_i(x, y, t) = U_i \cos(n\pi x/a) \sin(m\pi y/b) e^{i\omega t} \\ v_i(x, y, t) = V_i \sin(n\pi x/a) \cos(m\pi y/b) e^{i\omega t} \\ w(x, y, t) = W \sin(n\pi x/a) \sin(m\pi y/b) e^{i\omega t} \\ \alpha_i(x, y, t) = F_i \cos(n\pi x/a) \sin(m\pi y/b) e^{i\omega t} \\ \beta_i(x, y, t) = H_i \sin(n\pi x/a) \cos(m\pi y/b) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (17)$$

其中: $i=1, 3, 5; m$ 和 n 为整数。

对于不同的 m 和 n , 结构将作不同波形的固有振动, 也就有不同的固有频率。

利用 Rayleigh-Ritz 法可以得到共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的控制方程, 从而求解结构的各阶固有频率

$$\frac{\partial}{\partial U_i} (U - T) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial V_i} (U - T) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial W} (U - T) = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial F_i} (U - T) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial H_i} (U - T) = 0 \quad (22)$$

$$(i = 1, 3, 5)$$

将位移表达式代入控制方程并简化成矩阵形式

$$(K - (\omega^*)^2 M) X = 0 \quad (23)$$

其中: M 为质量矩阵; K 为复刚度矩阵; $X = (U_1, U_3, U_5, V_1, V_3, V_5, W, F_1, F_3, F_5, H_1, H_3, H_5)^T$

共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的固有频率和损耗因子按式(24)进行计算

$$\begin{cases} \omega = \sqrt{\text{Re}(\omega^*)^2} \\ \eta = \text{Im}((\omega^*)^2) / \text{Re}(\omega^*)^2 \end{cases} \quad (24)$$

3 算例分析与讨论

为了检验推导公式的正确性, 利用模态应变能有限元法分别计算双层阻尼薄膜嵌入的四边简支夹芯板的固有频率和损耗因子, 其中损耗因子为无量纲参数。结构单元类型选为 Solid185, 单元尺寸取 1 mm, 材料参数分别如表 1 和表 2 所示。将模态应变能有限元法计算结果与 Rayleigh-Ritz 求解结果进行比较, 如表 3 和表 4 所示

由表 3 和表 4 可知, 由有限元计算出的固有频率和损耗因子与本研究算法计算的固有频率和损耗因子误差在 5% 以内。该理论所做的基本假定和有限

表 1 弹性层材料参数

Tab.1 Material parameters of composite layer

参数	数值
弹性模量/GPa	$E_1 = E_3 = E_5 = 68.9$
泊松比	$\nu_1 = \nu_3 = \nu_5 = 0.3$
密度/(kg·m ⁻³)	$\rho_1 = \rho_3 = \rho_5 = 2740$
(长, 宽)/mm	$a = 304.8, b = 348.0$
厚度/mm	$h_1 = h_3 = h_5 = 0.508$

表 2 黏弹性层材料参数

Tab.2 Viscoelastic material parameters

参数	数值
剪切模量/MPa	$G_2 = G_4 = 0.896$
泊松比	$\nu_2 = \nu_4 = 0.49$
密度/(kg·m ⁻³)	$\rho_2 = \rho_4 = 999$
厚度/mm	$h_2 = h_4 = 0.127$
损耗因子	$\eta_2 = \eta_4 = 0.5$

表 3 固有频率计算结果对比

Tab.3 Comparison of natural frequency calculation results

阶数	Hz		
	ANSYS 解	本研究解	误差/%
1	60.56	61.36	1.32
2	115.63	114.08	1.34
3	131.88	127.66	3.20
4	169.95	168.46	0.88

表 4 损耗因子计算结果对比

Tab.4 Comparison of loss factor calculation results

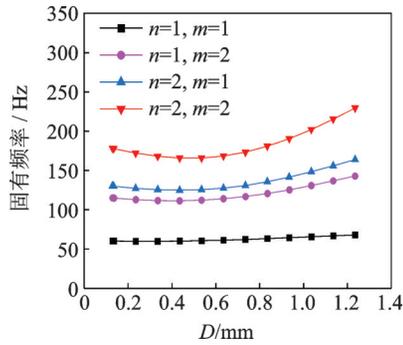
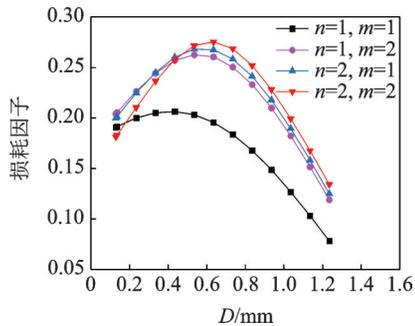
阶数	误差/%		
	ANSYS 解	本研究解	误差/%
1	0.210	0.200	4.80
2	0.260	0.260	0
3	0.255	0.268	5.00
4	0.273	0.275	0.73

元中单元格的大小都是造成误差的原因, 但求解结果基本是吻合的, 验证了该理论分析的正确性。

3.1 阻尼层位置对 CCSDDME 固有频率和损耗因子的影响

保持结构总厚度不变, 研究阻尼层位置对 CCSDDME 固有频率和损耗因子的影响。为了便于表述, 引入变量 D , 将其定义为两阻尼层中面间的距离, 如图 3 所示。 D 取不同值时, 分别计算结构的固有频率和模态损耗因子, 计算结果见图 4 和图 5。

由图 4 可知, 两阻尼层中面间的距离对 1 阶固有频率影响较小, 当 D 约为 0.435 mm 时, 结构的 2 阶、

图3 双层阻尼薄膜中面距离 D Fig.3 Mid-surface distance D of double-layer damping film图4 固有频率随 D 的变化规律Fig.4 Change law of natural frequency with the mid-surface distance D 图5 损耗因子随 D 的变化规律Fig.5 Change law of loss factor with the mid-surface distance D

3阶和4阶固有频率出现极小值。由图5可知,结构损耗因子随着 D 的增大先增大后减小,存在设计最佳值。当 D 值分别为0.435, 0.535, 0.535和0.635 mm时,结构的1阶、2阶、3阶和4阶损耗因子分别达到峰值。这是由于双层阻尼薄膜嵌入结构后,分别受到中间层和上下侧材料层的共同约束,随着 D 值的增加,阻尼层得到充分的受力变形,使CCSDDME的模态损耗因子增大;而当 D 值继续增大,结构总厚度不变,结构上下层材料厚度减薄,使阻尼层的剪切应变减小,结构的损耗因子随之减小。

3.2 阻尼层剪切模量对CCSDDME固有频率和损耗因子的影响

保持其他参数不变,研究阻尼层剪切模量对CCSDDME阻尼性能的影响,分别计算不同的剪切

模量下的固有频率和损耗因子,计算结果如图6和图7所示。

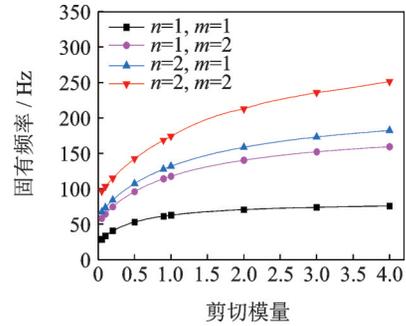


图6 固有频率随剪切模量的变化规律

Fig.6 Change law of natural frequency with shear modulus

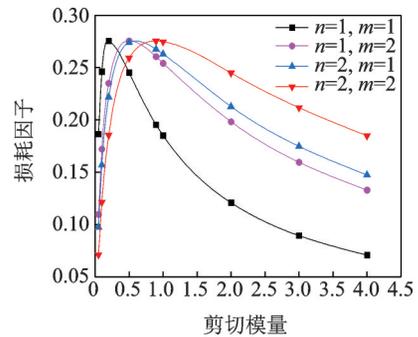


图7 损耗因子随剪切模量的变化规律

Fig.7 Change law of loss factor with shear modulus

由图6和图7可知,随着结构剪切模量的增加,结构的整体刚度和固有频率随着增大。结构的损耗因子随着剪切模量的增大先增大后减小,存在设计的最佳值。当结构的剪切模量分别为0.2, 0.5, 0.5和0.896 MPa时,结构的1阶、2阶、3阶和4阶损耗因子分别出现峰值。同时可以看出:剪切模量较高时,CCSDDME高阶损耗因子高于低阶损耗因子;剪切模量较低时,CCSDDME高阶模态损耗因子低于低阶损耗因子。

4 结论

1) 将该理论计算的固有频率和损耗因子同有限元计算结果进行对比,验证了该理论的正确性。

2) 结构固有频率随着两阻尼层中面距离的增大先减小后增大,存在极小值;结构损耗因子随着两阻尼层中面距离的增大先增大后减小,存在设计的最佳值。

3) 随着结构剪切模量的增加,结构的固有频率随着增大。结构的损耗因子随着剪切模量的增大先增大后减小,存在极大值。当剪切模量较高时,高阶损耗因子高于低阶损耗因子;当剪切模量较低时,高

阶模态损耗因子低于低阶损耗因子。

参 考 文 献

- [1] LIANG S, LIANG KY, LUO L, et al. Study on low-velocity impact of embedded and co-cured composite damping panels with numerical simulation method [J]. *Composite Structures*, 2014, 107:1-10.
- [2] LIANG S, XIU YY, WANG H. A research on sound insulation characteristics and processing of the embedded and co-cured composite damping structures [J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47 (9) : 1169-1177.
- [3] 梁森,王辉,张忠胜. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构动力学性能实验研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(20):97-101,106.
LIANG Sen, WANG Hui, ZHANG Zhongsheng. Tests for dynamic performance of embedded high-temperature co-cured composite damping structures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20) : 97-101, 106. (in Chinese)
- [4] 张忠胜,梁森. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构层间结合性能[J]. *复合材料学报*, 2013(4):185-191.
ZHANG Zhongsheng, LIANG Sen. Interlaminar bonding property of embedded high-temperature co-cured composite damping structure [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013(4):185-191. (in Chinese)
- [5] 梁森,李雪,王东山,等. 多层阻尼薄膜嵌入的共固化复合材料结构的动力学性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5):116-123.
LIANG Sen, LI Xue, WANG Dongshan, et al. Dynamics property of co-cured composite structure with multilayer damping membranes embedded [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32 (5) : 116-123. (in Chinese)
- [6] 雒磊,梁森,张乾,等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构吸湿处理后的层间结合性能[J]. *复合材料学报*, 2015 (2):608-615.
LUO Lei, LIANG Sen, ZHANG Qian, et al. Interlaminar bonding properties of embedded co-cured composite damping structures after moisture absorption treatment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015 (2) : 608-615. (in Chinese)
- [7] 梁森,梁磊,米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展[J]. *应用力学学报*, 2010, 27(4):767-771.
LIANG Sen, LIANG Lei, MI Peng. New development of the embedded and co-cured composite damping structures [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2010, 27(4):767-771. (in Chinese)
- [8] 唐宇航,梅志远,陈志坚. 船用钢/复合材料组合系统的内损耗组成分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(1): 15-24.
TANG Yuhang, MEI Zhiyuan, CHEN Zhijian. Composition analysis of damping loss of steel/composite materials composite structure for ships [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39 (1) : 15-24. (in Chinese)
- [9] 杨先锋. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构弯曲疲劳性能研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2017.
- [10] LIANG S, LIANG K Y, LUO L, et al. Study on low-velocity impact of embedded and co-cured composite damping panels with numerical simulation method [J]. *Composite Structures*, 2014, 107:1-10.
- [11] 米鹏,梁森,张义霞. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构低速冲击性能数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(14):98-101.
MI Peng, LIANG Sen, ZHANG Yixia. Numerical simulation on performance of embedded and co-cured composite damping structure under low velocity impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(14) : 98-101. (in Chinese)
- [12] 米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构动力学性能的数值模拟与实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.
- [13] 王辉,梁森,王常松. 嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构动力学性能分析[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(1): 187-193.
WANG Hui, LIANG Sen, WANG Changsong. Dynamic property analysis of the embedded co-cured perforated damping layer composite structure [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31 (1) : 187-193. (in Chinese)
- [14] 梁森,张术国,梁天锡,等. 大阻尼高比刚度复合材料仪表板结构设计及动态特性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(6):212-217.
LIANG Sen, ZHANG Shuguo, LIANG Tianxi, et al. Structural design and dynamic characteristics of large damping and high specific stiffness composite panels [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6) : 212-217. (in Chinese)



第一作者简介:王绍清,男,1985年11月生,博士生。主要研究方向为复合材料结构分析与优化设计。曾发表《复合材料层合板动力学性能及影响参数的研究》(《玻璃钢/复合材料》2018年第12期)等论文。

E-mail:740174584@qq.com

通信作者简介:梁森,男,1962年9月生,博士、教授、高级工程师。主要研究方向为机械结构振动、结构与功能复合材料设计理论及工艺。

E-mail:liangsen98@mailst.xjtu.edu.cn