

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.015

多夹芯层的复合材料开口圆柱壳动力学性能

李之光, 张毅

(太原学院机电与车辆工程系, 太原 030000)

摘要: 为了提升传统复合材料开口圆柱壳结构的阻尼性能,改善其在动载荷工况下的稳定性及承载能力,采用模态分析和数值模拟的方法研究了具有多层连续夹芯结构(简称多夹芯层)的复合材料开口圆柱壳动力学性能。基于模态应变能法,探讨了多夹芯层几何参数对复合材料开口圆柱壳动力学性能的影响。首先,通过将有限元数值模拟结果与已有文献对比,验证了有限元模型的有效性;然后,进一步研究了单种夹芯材料的夹芯层总厚度相同时夹芯层数量及厚度分布、多种夹芯材料的夹芯层相对位置及厚度变化对开口圆柱壳动力学性能的影响规律。结果表明,随夹芯层数量增加,结构的一阶固有频率在有限范围内增大,而其阻尼性能得到相对较大的提高。同时,以损耗因子较低的夹芯层材料为中间层,损耗因子较高的夹芯层材料对称分布时,保持一定的距离(2 mm)分布可获得较好的阻尼性能。最终发现通过合理设计夹芯层的数量、种类、位置及厚度分布,能够改善复合材料开口圆柱壳结构的阻尼性能。本研究为轻质大阻尼复合材料开口圆柱壳设计理论和制作工艺的进一步研究提供了参考。

关键词: 多夹芯层; 开口圆柱壳; 固有频率; 损耗因子; 动力学; 数值模拟

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0116-06

Dynamics performances of composite open cylindrical shells with multiple sandwich layers

LI Zhiguang, ZHANG Yi

(Department of Electromechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to enhance the damping performance of the open cylindrical shell structures of traditional composites and improve their stability and load-bearing capacity under dynamic load conditions, the dynamics performances of composite open cylindrical shells with multi-layer continuous sandwich structure (multiple sandwich layers) were studied by modal analysis and numerical simulation. Based on the modal strain energy method, the influences of geometric parameters of the multiple sandwich layers on the dynamics performances of composite open cylindrical shells were investigated. Firstly, the validity of the finite element model was verified by comparing the numerical simulation results with existing literature. Then, the influence laws of the number and thickness distribution of sandwich layers with the same total thickness for single sandwich material, the relative positions and thickness variation of sandwich layers with multiple sandwich materials on the dynamics performances of the open cylindrical shell were further studied. The results show that as the number of sandwich layer increases, the first-order natural frequency of the structure rises within a limited range, while its damping performance is relatively significantly improved. Meanwhile, when the sandwich layer materials with higher loss factors are symmetrically distributed with using the sandwich layer material with a lower loss factor as the middle layer, maintaining a certain distance (2 mm) distribution can achieve better damping performances. It is ultimately discovered that by reasonably designing the number, type, position and thickness distribution of the sandwich layers, the damping performances of the composite open cylindrical shell structure can be improved. The research provides reference for further studies on the design theory and manufacturing process of lightweight and high damping composite open cylindrical shells.

Keywords: multiple sandwich layers ; open cylindrical shell ; natural frequency ; loss factor ; dynamics ; numerical simulation

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2024L385)

通信作者: 张毅, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属成型、机械结构设计

收稿日期: 2025-11-18

引用格式: 李之光, 张毅. 多夹芯层的复合材料开口圆柱壳动力学性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 116-121.

LI Zhiguang, ZHANG Yi. Dynamics performances of composite open cylindrical shells with multiple sandwich layers[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 116-121.

圆柱壳因其结构的特殊性,在管道运输^[1]、水下潜航器及潜艇船舶^[2-5]、兵器装备^[6-7]和航空航天^[8]等领域得到广泛的应用。随着科学技术的飞速发展,作为一种重要部件,相关领域对圆柱壳的动力学和静力学性能提出了更高的要求。而夹芯层结构由多个刚性层和中间的软芯组成,图1为多层连续夹芯(以下简称多夹芯层)结构示意图(L 为轴向长度, h_i 为第 i 层厚度, R_i 为第 i 层半径, θ 为开口角度),其中,刚性层承受大部分弯曲载荷,软芯则因相邻刚性层形变而易发生剪切变形,多种材料在性能上互相协调使得该结构具有优良的动力学和静力学性能^[9-14]。因此,研究具有夹芯层的复合材料圆柱壳的动力学性能对于拓展复合材料圆柱壳的应用具有重要意义。

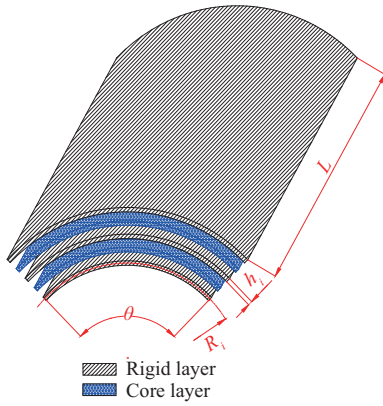


图1 多层连续夹芯结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-layer continuous sandwich structure

目前,许多学者对夹芯结构的动力学性能进行了大量研究。Alavi等^[15]研究了具有时变特性的正交各向异性的黏弹性实芯扇形板和环形扇形板的面内和面外自由振动,并分析了阻尼等关键参数对其自由振动的影响。王绍清等^[16]研究了多层阻尼嵌入的板、梁结构中阻尼层位置等参数对结构阻尼性能的影响。梁森等^[17]设计并制作了一种五层夹芯的多层阻尼嵌入的复合材料仪表板,通过模态实验、有限元数值模拟,研究了该结构的动力学特性。在文献[10,13,18-21]中对复合材料圆柱壳体的固有频率或动力学特性进行了研究,其中文献[10,19-20]以夹芯圆柱壳为对象,研究了夹芯层几何参数对结构的动力学性能的影响,考虑了夹芯圆柱壳中黏弹性夹芯层剪切变形和各层间的相互作用;而王光等^[22]探讨了夹芯层厚度对夹芯复合材料环筋开口圆柱壳动力学性能影响。综上所述,国内外学者的研究主要体现在两方面:单层、多层夹芯的复合材料

板或者单层夹芯的复合材料圆柱壳的动力学性能。鲜有文献研究多夹芯层的复合材料开口圆柱壳的动力学性能。为此,本文通过将有限元数值模拟结果与已有文献[10]中的结果对比,验证有限元模型的可靠性;然后进一步借助有限元数值模拟模型研究多层、多种材料夹芯下夹芯层分布、厚度等因素对复合材料开口圆柱壳动力学性能的影响,为轻质高刚度高阻尼的复合材料圆柱壳的设计提供参考。

1 结构应力-应变关系

由于结构是由多层材料组成,根据Hooke定律,其每层的应力-应变关系可统一表示为式(1)。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}^{(i)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(i)} \\ \tau_{x\theta}^{(i)} \\ \tau_{\theta z}^{(i)} \\ \tau_{xz}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11}^{(i)} & Q_{12}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21}^{(i)} & Q_{22}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55}^{(i)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^{(i)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(i)} \\ \gamma_{x\theta}^{(i)} \\ \gamma_{\theta z}^{(i)} \\ \gamma_{xz}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Q_{11}^{(i)} = \frac{E_1^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}}, Q_{12}^{(i)} = Q_{21}^{(i)} = \frac{\nu_{21}^{(i)}E_2^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}},$$

$$Q_{22}^{(i)} = \frac{E_2^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)}\nu_{21}^{(i)}}, Q_{33}^{(i)} = G_{12}^{(i)},$$

$$Q_{44}^{(i)} = G_{23}^{(i)}, Q_{55}^{(i)} = G_{13}^{(i)}$$

式中: $\sigma_{xx}^{(i)}$ 、 $\sigma_{\theta\theta}^{(i)}$ 为第 i 层沿圆柱壳轴向、周向的正应力分量; $\tau_{x\theta}^{(i)}$ 、 $\tau_{xz}^{(i)}$ 、 $\tau_{\theta z}^{(i)}$ 为第 i 层剪应力分量; $\varepsilon_{xx}^{(i)}$ 、 $\varepsilon_{\theta\theta}^{(i)}$ 分别为第 i 层沿轴向、周向的线性应变; $\gamma_{x\theta}^{(i)}$ 、 $\gamma_{\theta z}^{(i)}$ 、 $\gamma_{xz}^{(i)}$ 分别为第 i 层的剪切应变; $E_1^{(i)}$ 、 $E_2^{(i)}$ 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。其中,上述各应力、应变、模量和泊松比的下标数字1和2分别代表平行于和垂直于纤维取向的方向,3表示垂直于1-2平面的方向。

对于纤维复合材料而言,考虑到其会有不同的铺层角度,通过坐标变换进一步得到每层的应力-应变关系,见式(2)。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}^{(i)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(i)} \\ \tau_{x\theta}^{(i)} \\ \tau_{\theta z}^{(i)} \\ \tau_{xz}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Q}_{11}^{(i)} & \bar{Q}_{12}^{(i)} & \bar{Q}_{13}^{(i)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{21}^{(i)} & \bar{Q}_{22}^{(i)} & \bar{Q}_{23}^{(i)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{31}^{(i)} & \bar{Q}_{32}^{(i)} & \bar{Q}_{33}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44}^{(i)} & \bar{Q}_{45}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{54}^{(i)} & \bar{Q}_{55}^{(i)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^{(i)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(i)} \\ \gamma_{x\theta}^{(i)} \\ \gamma_{\theta z}^{(i)} \\ \gamma_{xz}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $\bar{Q}_{jk}^{(i)}$ ($j, k = 1, 2, 3, 4, 5$) 为变换刚度矩阵元素。

2 有限元建模分析与结果验证

根据文献[10],利用ANSYS19.2进行有限元建模,模型几何尺寸见表1,材料力学性能参数见表2,采用四边简支的边界条件。除特殊说明外,模型的材料参数以及四边简支的边界条件将应用于下文的讨论分析中。选用solid185单元,通过求解得到结构的各阶固有频率、模态振型。

表1 模型尺寸

Tab. 1 Model dimensions

Parameters	Values
Axial length L/m	10
Thickness of rigid layer $h_1(=h_3)/\text{mm}$	10
Thickness of sandwich layer h_2/mm	5
Opening angle $\theta/(\circ)$	$\pi/6$

Notes: h_1, h_2, h_3 represent thicknesses of lower rigid layer, sandwich layer and upper rigid layer, respectively.

为求得结构的损耗因子,采用模态应变能法。该方法的合理性已有学者进行了实验验证^[17],将第 r 阶振型下提取的应变能带入到式(3)得到结构模态损耗因子的近似结果^[23]。

表3 本文有限元数值模拟结果与文献[10]结果对比

Tab. 3 Comparison between finite element numerical simulation results in this paper and those in reference[10]

Items		Modal shape			
		(1,1)	(2,1)	(2,2)	(2,3)
Natural frequency/Hz	Theory ^[10]	11.607	16.898	20.255	28.472
	ANSYS in this paper	11.696	17.241	20.535	29.133
Loss factor/ $(\times 10^{-2})$	Theory ^[10]	4.780	12.207	8.970	4.943
	ANSYS in this paper	5.286	13.754	10.246	5.551

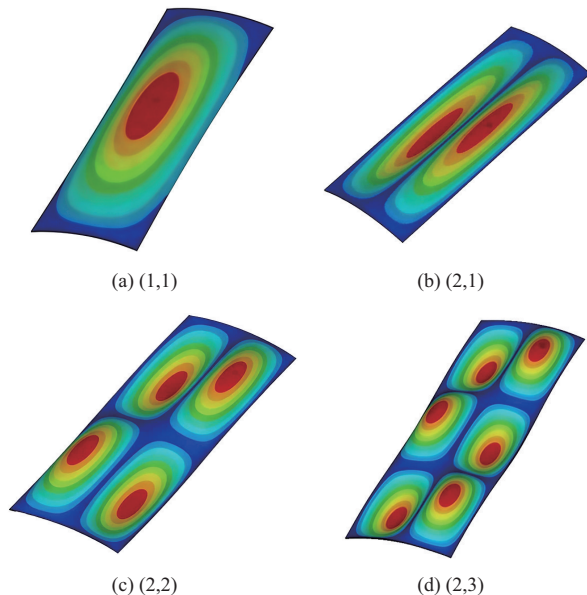


图2 有限元数值模拟结果模态振型图

Fig. 2 Modal shape diagram of finite element numerical simulation

results

表2 材料力学性能参数

Tab. 2 Material mechanical property parameters

Parameters	Values
Elastic modulus of rigid layer/GPa	210
Density of rigid layer/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
Poisson's ratio of rigid layer	0.3
Complex shear modulus of sandwich layer/MPa	$2.3(1+0.5i)$
Density of sandwich layer/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	999
Poisson's ratio of sandwich layer	0.34

$$\eta^r = \frac{\eta_v U_v^r + \eta_u U_u^r}{U_s^r} \quad (3)$$

式中: η^r 为结构中第 r 阶模态损耗因子; η_v 为夹芯层材料的损耗因子, U_v^r 为第 r 阶模态振型下的夹芯层材料的应变能; η_u 为刚性层材料的损耗因子, U_u^r 为第 r 阶模态振型下的刚性层材料的应变能; U_s^r 为第 r 阶模态振型下结构总应变能。

将有限元数值模拟结果与文献[10]表2中的结果进行对比,具体见表3,从中可以看出,两者结果具有较好的一致性。其中,振型 (m,n) 的 m 为周向半波数, n 为轴向半波数。有限元模拟所得表3中的振型 (m,n) 具体如图2所示。

3 参数变化对结构动力学性能影响

3.1 夹芯层数量

当壳体总厚度为26 mm、轴向长度为10 m、中间层半径为5 m、夹芯层总厚度相同(即6 mm)时,比较含有多层均匀厚度的较薄夹芯层的开口圆柱壳的固有频率和损耗因子。其夹芯层数分别为1、2、3、4、5层,相应的夹芯层厚度分别为6、3、2、1.5、1.2 mm,结构截面如图3所示。夹芯层数量对结构一阶固有频率及损耗因子的影响如图4所示。由图4可知,在夹芯层总厚度相同的情况下,随夹芯层数量增大,结构的一阶固有频率在有限范围内增大,而其阻尼性能得到相对较大的提高,并且阻尼性能随着层数的增加变化趋于平缓。这表明相对于单层较厚的夹芯层,适当数量离散分布的较薄夹芯层可以较好地提高结构的阻尼性能。这是因为,在夹芯层总厚度不变的条件下,夹芯层数量增大,意味着其厚度相对约束层更小,在约束层中分布更加均匀,在一

阶振型(如图2a)中夹芯层受力产生的应变更充分地,所以结构的损耗因子较大,而当夹芯层厚度减小到一定程度后,损耗因子对其不再敏感。

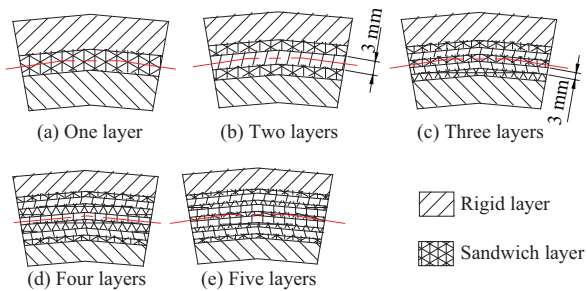


图3 不同数量的夹芯层示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different numbers of sandwich layers

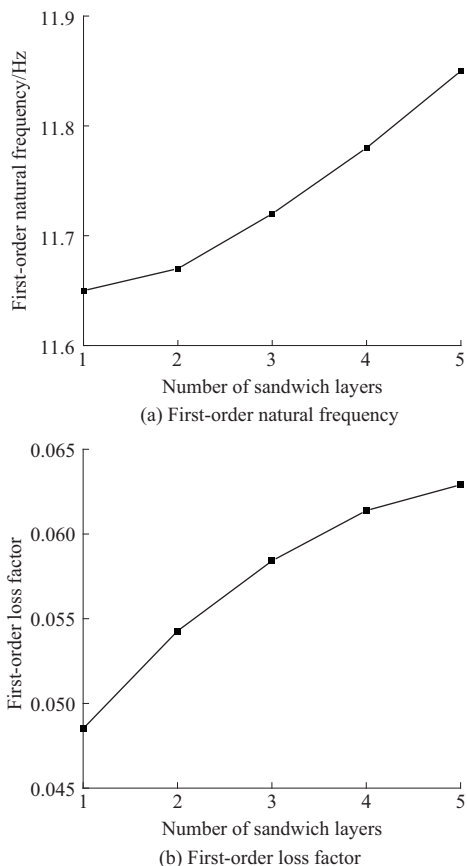


图4 夹芯层数量对一阶固有频率及损耗因子的影响

Fig. 4 Effect of sandwich layer number on first-order natural frequency and loss factor

3.2 夹芯层厚度分布

当夹芯层总厚度以及层数相同时,研究夹芯层厚度以一定比例($\lambda = D_1/D_2 = D_2/D_3$)从壳体中性线向两边变化对结构一阶固有频率及损耗因子的影响。相关参数含义如图5所示。

以壳体总厚度为26 mm、轴向长度为10 m、中间层半径为5 m,夹芯层总厚度为6 mm、层数为5、

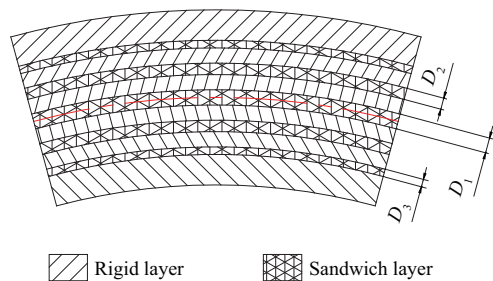


图5 几何参数 D_1 、 D_2 、 D_3 含义示意图

Fig. 5 Schematic diagram illustrating meanings of geometric parameters D_1 , D_2 and D_3

层间约束层厚度为3 mm的结构为例,夹芯层厚度分布对结构一阶固有频率和损耗因子的影响如图6所示。由图6可知,在夹芯层总厚度以及层间约束层厚度相同的条件下,随 λ 不断增大,结构的一阶固有频率在有限范围内降低,最后变化速率趋于平缓;同样,一阶损耗因子也在有限范围内降低,但其变化速率与一阶固有频率呈现相反的趋势。这是因为,随着 λ 不断增大, D_1 越大,相较于层间的约束层厚度比值变大,同时夹芯层的受力产生的剪切应

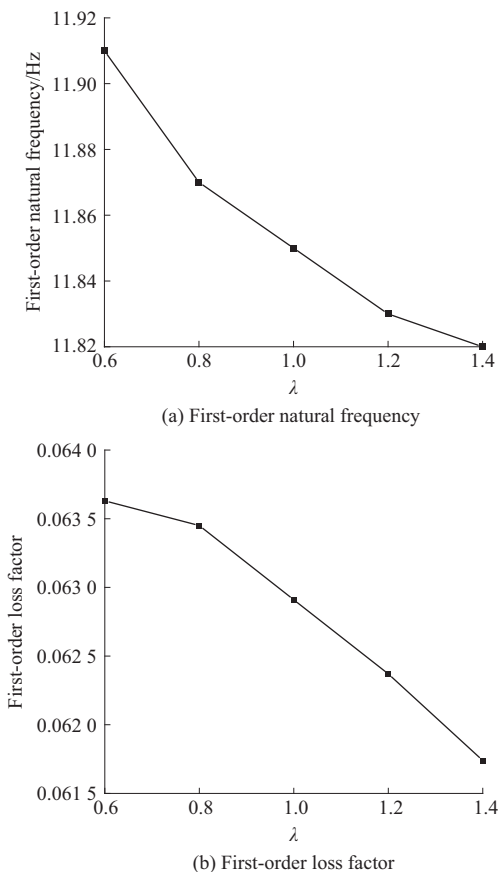


图6 夹芯层厚度分布对一阶固有频率和损耗因子的影响

Fig. 6 Effect of sandwich layer thickness distribution on first-order natural frequency and loss factor

变不充分,所以其一阶损耗因子降低。

3.3 两种夹芯层材料的分布及厚度

进一步探究两种损耗因子不同的夹芯层材料间的位置关系及厚度变化对结构动力学性能的影响。以壳体总厚度为 26 mm、轴向长度为 10 m、中间层半径为 5 m 的结构为例,相关几何参数 E_1 和 d_1 、 d_2 的含义如图 7 所示。其中,黏弹性材料为表 2 中的夹芯层材料,损耗因子为 0.5;聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫性能参数见表 4^[17]。

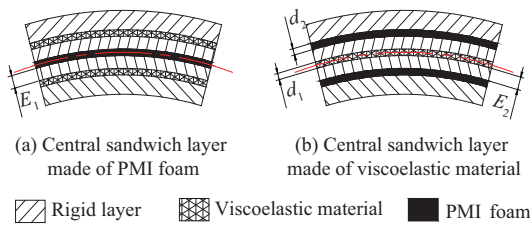


图 7 几何参数 E_1 和 d_1 、 d_2 的含义示意图

Fig. 7 Schematic diagram illustrating the meanings of geometric parameters E_1 and d_1 、 d_2

表 4 PMI 泡沫性能参数

Tab. 4 PMI Foam performance parameters

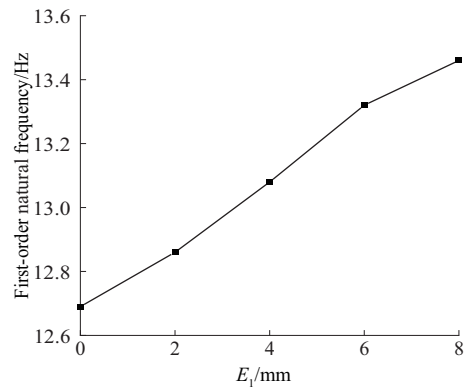
Parameters	Values
Elastic modulus/MPa	180
Density/(kg·m ⁻³)	110
Poisson's ratio	0.286
Shear modulus/MPa	70
Loss factor	0.01

结构中有一层 PMI 材料与两层黏弹性材料的夹芯层(各夹芯层厚度均为 2 mm)时,黏弹性材料与 PMI 材料间的距离(即图 7 的 E_1)对结构固有频率及损耗因子的影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着 E_1 的不断增大,结构的一阶固有频率在有限范围内增大;而其一阶损耗因子在 $E_1=2$ mm 时达到最大值,随后降低。这表明,当结构存在多层夹芯时,通过将夹芯层以适当的距离分布,可获得较好的阻尼性能。究其原因是,在该距离(2 mm)下夹芯层受到的剪切作用更加充分。

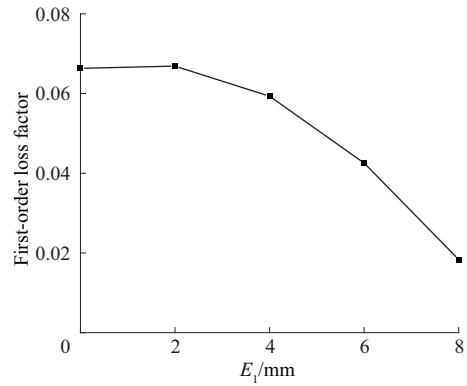
以一层黏弹性材料(厚度为 6 mm)与两层 PMI 材料作为夹芯层、层间间隔为 4 mm 为例,研究黏弹性材料与 PMI 材料的夹芯层间厚度变化($\xi=d_1/d_2$)对结构动力学性能的影响,如图 9 所示。由图 9 可知,随 ξ 不断增大,结构的一阶固有频率及损耗因子在有限范围内降低,且固有频率变化速率也逐渐由大变小,趋于平缓。

4 结论

(1)当夹芯层总厚度相同时,随夹芯层数量增



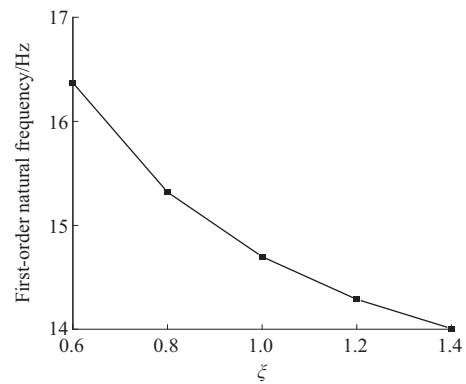
(a) First-order natural frequency



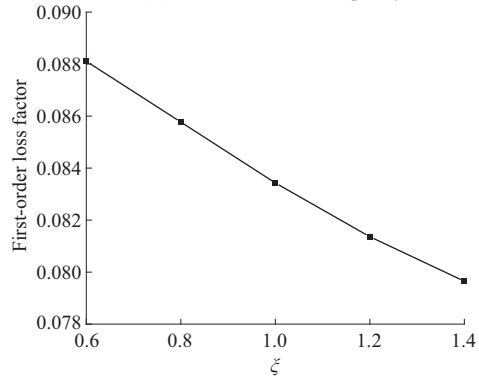
(b) First-order loss factor

图 8 E_1 对一阶固有频率及损耗因子的影响

Fig. 8 Effect of E_1 on first-order natural frequency and loss factor



(a) First-order natural frequency



(b) First-order loss factor

图 9 ξ 对一阶固有频率及损耗因子的影响

Fig. 9 Effect of ξ on first-order natural frequency and loss factor

大,多层夹芯的开口圆柱壳结构的一阶固有频率在有限范围内增大,而其阻尼性能得到相对较大的提高。

(2)当夹芯层总厚度及层数相同,中间夹芯层到最外夹芯层的厚度依次呈等比关系变化时,随中间层厚度逐渐增大,结构的一阶固有频率及损耗因子在有限范围内降低。

(3)当中间层为损耗因子较低的夹芯层、两边对称分布损耗因子较高的夹芯层时,将两种夹芯层分开适当的距离(2 mm)可获得较好的阻尼性能。

(4)当中间层为损耗因子较高的夹芯层且厚度不变时,随两边对称分布的损耗因子较低的夹芯层厚度变小,结构的一阶固有频率及损耗因子在有限范围内降低。

参考文献

- [1] 朱浩杰,纪冲,王昕,等.聚脲弹性体涂覆圆柱壳复合结构抗重复爆炸荷载冲击响应[J].北京理工大学学报,2025,45(11):115–1124.
ZHU Haojie, JI Chong, WANG Xin, et al. Impact response of polyurea elastomer coated cylindrical shell composite structures subjected to repeated blast loads[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(11):115–1124.
- [2] 仝博,张振海,于本泽,等.静水压力下纤维复合材料圆柱壳三维弹性稳定性[J].复合材料学报,2026,43(2):1184–1195.
TONG Bo, ZHANG Zhenhai, YU Benze, et al. Three dimensional elastic stability of fiber composite cylindrical shells under hydrostatic pressure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(2):1184–1195.
- [3] YANG Y, DAI H L, CHENG C C. Investigation on fatigue characteristics of transparent submersible manned cabin structure[J]. Marine Structures, 2023, 90. DOI:10.1016/j.marstruc.2023.103447.
- [4] 王晓旭,张典堂,钱坤,等.深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳力学性能的研究进展[J].复合材料学报,2020,37(1):16–26.
WANG Xiaoxu, ZHANG Diantang, QIAN Kun, et al. Research progress on mechanical properties of deep-sea fiber reinforced resin composite cylindrical pressure shells[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1):16–26.
- [5] HE D Z, WANG Q S, ZHONG R, et al. A unified analysis model of FGM double-layered submarine type coupled structure with spectral geometry method[J]. Ocean Engineering, 2023, 267. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113213.
- [6] 李永康,赵亚鹏,李苗.复合材料发射筒筒体发射力学特性仿真分析与优化[J].舰船科学技术,2024,46(2):180–184.
LI Yongkang, ZHAO Yapeng, LI Miao. Simulation analysis and optimization of launch mechanics characteristics of composite launch tube barrel[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(2):180–184.
- [7] 郝陈朋,吴成.爆炸载荷下导弹类目标毁伤特性的数值仿真研究[J].弹箭与制导学报,2013,33(6):82–85,109.
HAO Chenpeng, WU Cheng. The numerical simulation of damage characteristics of missile target under blast load[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6):82–85,109.
- [8] FRIEDRICH L, SCHRÖDER K U. Discrepancy between boundary conditions and load introduction of full-scale built-in and sub-scale experimental shell structures of space launcher vehicles[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 98:403–415.
- [9] QATU M S, SULLIVAN R W, WANG W C. Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009[J]. Composite Structures, 2010, 93(1):14–31.
- [10] ZHAI Y C, CHAI M J, SU J M, et al. Dynamics properties of composite sandwich open circular cylindrical shells[J]. Composite Structures, 2018, 189:148–159.
- [11] 秦翰,沈彦杰,陆宏,等.金属-聚氨酯硬质泡沫塑料夹芯板的三点弯曲性能[J].热固性树脂,2025,40(4):49–56.
QIN Han, SHEN Yanjie, LU Hong, et al. Three-point bending performance of metal-polyurethane rigid foam plastic sandwich panels[J]. Thermosetting Resin, 2025, 40(4):49–56.
- [12] 陈枢航,朱书华,刘翀,等.泡沫夹芯板低速冲击试验与数值仿真研究[J].航空精密制造技术,2025,61(5):18–21.
CHEN Shuhang, ZHU Shuhua, LIU Chong, et al. Low-speed impact test and numerical simulation study of foam sandwich panel[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2025, 61(5):18–21.
- [13] 翟彦春,岳修杰,王鹏昊,等.开口角度对复合材料夹芯圆柱壳自由振动的影响[J].复合材料科学与工程,2022(2):19–22.
ZHAI Yanchun, YUE Xiujie, WANG Penghao, et al. Effect of opening angle on free vibration of composite sandwich cylindrical shells[J]. Composites Science and Engineering, 2022(2):19–22.
- [14] 李华冠,丁颖,章月,等.玻璃纤维立体织物增强环氧树脂泡沫夹层复合材料的制备及力学性能[J].复合材料学报,2023,40(1):601–612.
LI Huaguan, DING Ying, ZHANG Yue, et al. Preparation and mechanical properties of glass fiber reinforced 3D fabric reinforced epoxy foam sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1):601–612.
- [15] ALAVI S K, EIPAKCHI H R. Parametric vibration analysis of sector plates using perturbation technique[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023, 51(10):5407–5426.
- [16] 王绍清,梁森,刘鹏.共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的阻尼性能[J].振动.测试与诊断,2021,41(3):547–551,624.
WANG Shaoqing, LIANG Sen, LIU Peng. Damping properties of co-cured composite structures with double-layer damping membranes embedded[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3):547–551,624.