

# 格栅夹层板抑振性能研究\*

陆姗姗 盛美萍 任杰安

(西北工业大学航海学院,西安 710072)

**摘要** 为了有效降低铺板与圆柱壳体耦合结构中因铺板振动而引起的壳体振动,提出了以格栅夹层板作为一种铺板结构.以格栅夹层板安装于带有端板的圆柱壳体上作为研究模型,采用有限元软件对格栅夹层板的抑振性能展开了仿真分析,讨论了格栅结构参数对其抑振效果的影响,并实验验证了格栅夹层板的抑振效果.仿真和实验结果一致表明:格栅夹层板能有效降低圆柱壳体的振动响应,尤其是在中高频段抑振效果显著;格栅的结构参数对抑振效果影响规律比较复杂,格栅夹层的上层面板采用阻尼较大的材料利于提高其抑振效果.

**关键词** 铺板, 格栅, 夹层板, 抑振

## 引言

铺板是实际工程中应用较广的一类典型平板结构,广泛应用于飞机、轮船以及潜艇等一些航行器中.通常,航行器内部动力设备安装于铺板之上,当动力设备工作时,引起铺板结构的振动,铺板将振动传递到与之连接的壳体上,壳体振动并带动周围流体介质产生辐射噪声,这是航行器结构振动及其辐射噪声的主要来源之一<sup>[1]</sup>.目前工程实际中常用的铺板结构多为简单的单层板结构,通过改变铺板的结构形式,使其具有良好的抑振性能对于降低艇体的振动、提高航行器的隐身性能具有重要的意义.

由工程实践可知,对于隔振系统,当大机械阻抗层和小机械阻抗层交替布置时,利用结构间的阻抗失配原理<sup>[2]</sup>能够达到良好的隔振效果,据此原理,本文提出了夹层铺板结构,并选用当前应用较为广泛的新一代先进轻质超强韧材料结构—格栅作为铺板夹层结构.格栅材料因具有优越的力学性能日益引起国内外学者的关注<sup>[3-5]</sup>.目前,国内外对于格栅材料的研究主要集中于格栅板壳结构<sup>[6]</sup>和格栅加筋板壳结构<sup>[7]</sup>,对格栅夹层结构<sup>[8-9]</sup>研究较少,国内学者中刘均和程远胜<sup>[10]</sup>在经典夹层板理论的基础上应用 Hamilton 变分原理,导出了格栅夹层板的振动控制方程,并利用傅立叶级数和迦辽

金法求解,给出了四边简支夹层板的固有频率的半解析解.由于格栅独特的结构形式,力学分析比较复杂,少有人从理论上分析格栅夹层板的振动传递特性;从现有的文献来看,还没有涉及到从工程结构的角度考虑格栅夹层板对结构减振降噪的影响.

为了有效地降低壳体的振动响应,本文将格栅融入铺板结构设计之中,以格栅夹层板作为一种新型的铺板结构替代传统的单层铺板,并对其抑振性能展开了相关分析.本文采用有限元软件作为分析工具,建立了将格栅夹层板安装于带有端板的圆柱壳体上的有限元模型.在比较采用单层板和格栅夹层板时结构的振动响应的基础上,分析了格栅铺板的抑振性能,进而讨论了格栅结构参数对其抑振性能的影响.最后,针对格栅夹层板的抑振效果展开了实验研究,验证了格栅夹层板的抑振效果,并实验分析了格栅夹层板上层面板材料的改变对其抑振性能的影响.本文的研究结果为格栅夹层板的工程应用提供了参考实例,并为舰艇内部铺板的结构设计提供了参考依据.

## 1 格栅夹层板—圆柱壳体耦合模型

格栅夹层板的模型如图 1 所示,由上层面板、夹层格栅、下层面板组成,考虑到工程制取的方便性,格栅选用方形.采用有限元软件 ANSYS 13 进行建模以及通过谐响应分析来获取结构的振动响

应,夹层格栅选用 solid185 单元,其它为 shell181 单元. 格栅夹层板—圆柱壳的有限元耦合模型如图 2 所示,整个结构由三部分组成,即圆柱壳体、格栅夹层板、端板,其中格栅夹层板通过其下层面板直接与壳体连接,下层面板与圆柱壳圆心垂直距离为圆柱壳半径的二分之一,壳体两端置有端板.

模型的结构参数为:上层面板长度  $L_u$  为 2.9m,宽度  $L_w$  为 1.3m,厚度  $h_t$  为 0.006m;夹层格栅长度  $L_l$  为 2.9m,宽度  $L_w$  为 1.2m,高度  $H_x$  为 0.03m,格壁厚度  $h_x$  为 0.02m,格壁间距  $L_x$  为 0.1m,采用方格;下层面板长度  $L_{lb}$  为 2.9m,宽度  $L_{wb}$  为 1.33m,厚度  $h_b$  为 0.007m;圆柱壳直径为 1.55m,长度为 3m,厚度为 0.014m;端板厚度为 0.014m.

夹层格栅材料参数为:密度  $880\text{kg/m}^3$ ,杨氏模量为  $2.2 \times 10^8\text{N/m}^2$ ,泊松比 0.1. 其它结构全部采用钢,材料参数为:密度  $7800\text{kg/m}^3$ ,杨氏模量  $21.6 \times 10^{10}\text{Pa}$ ,泊松比 0.28. 假设设备激励力幅度为 100N,白噪声激励,作用于上层面板中心位置.

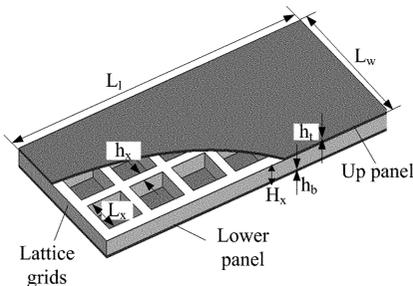


图1 格栅夹层板示意图

Fig. 1 Schematics of sandwich plate with lattice grids

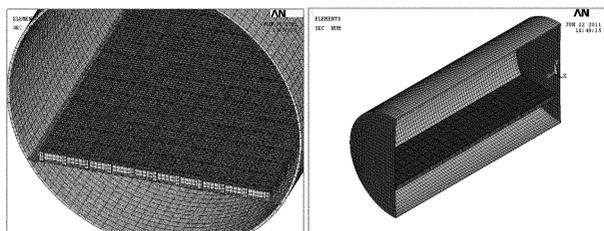


图2 格栅夹层板—圆柱壳耦合的有限元模型

Fig. 2 Model of sandwich plate with lattice grids coupled with a cylindrical shell

## 2 仿真结果分析与讨论

本文通过与单层板—圆柱壳耦合模型的响应对比,来评价格栅夹层板的抑振效果. 因为采用新的铺板结构的目的在于降低壳体的振动响应,所以对比分析主要针对圆柱壳体的平均振动加速度而

开展. 选用的单层铺板的长宽与格栅夹层板的下层面板相同,厚度取为 0.014m,重量与格栅夹层板相当,避免了质量负载效应对格栅夹层板抑振效果的影响.

图 3 给出了采用格栅夹层板时壳体的平均振动加速度级曲线,加速度参考值取  $1 \times 10^{-5}\text{m/s}^2$ ,图中虚线表示采用单层板时壳体的平均振动响应. 从图 3 的仿真曲线可以看出,尽管在较低频率段,采用格栅夹层板后,个别频点上壳体的振动响应会放大,但在中高频段,壳体的振动响应显著降低,这说明格栅夹层板在中高频段能有效地降低壳体的振动响应,抑振效果显著.

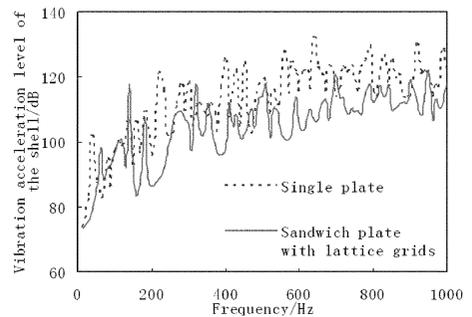


图3 分别采用单层板和格栅夹层板时壳体平均振动响应比较

Fig. 3 Shell's vibration response comparison using single plates and grid sandwich plate

下面通过分析夹层格栅的厚度、格壁厚度、格壁间距对格栅夹层板抑振效果的影响,为格栅夹层板的结构参数的优化提供参考依据.

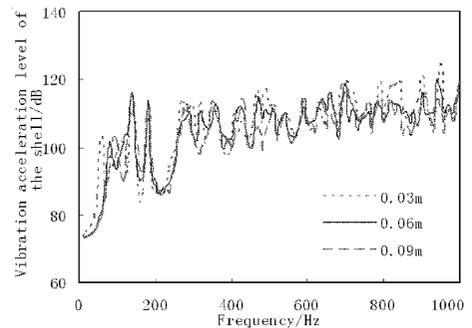


图4 夹层格栅厚度不同时壳体平均平均振动响应曲线

Fig. 4 Shell's vibration response comparison when the grid's thickness is different

图 4 给出了夹层格栅厚度不同时壳体的平均振动响应曲线,其中夹层格栅的厚度分别为 0.03m、0.06m、0.09m. 由图 4 可以看出:随着夹层格栅厚度的增加,壳体的第一阶共振频率会向高频偏移,从总体上看,随着格栅厚度的增加,壳体的振动

响应会降低. 从工程实际考虑, 对于内部空间有限圆柱壳体而言, 不允许格栅夹层板占用空间过大, 所以应根据实际情况合理选取夹层格栅厚度.

在以上研究的基础上, 进一步仿真分析了格栅夹层板的格壁厚度、格壁间距对其抑振效果的影响, 研究发现二者对壳体振动响应的影响较为复杂, 没有明显的规律性, 且抑振量值相当. 这是因为夹层格栅为周期结构, 它的通带、阻带特性使其对不同频率的振动传递能力不同, 因此在设计选取格壁厚度和间距时, 还需根据实际激励频率合理选取.

### 3 实验验证

#### 3.1 实验模型及测试系统

被测格栅夹层板试件如图 5 所示, 在制备格栅夹层板时, 格栅夹层和上下层面板通过强力胶粘接的方式连接, 为了便于将其安装在壳体端板上, 下层平板的长度较上层平板略宽, 结构参数为: 上层面板长度  $L_{li}$  为 1.3m, 宽度  $L_{wi}$  为 0.45m, 厚度  $h_i$  为 0.002m, 材料为钢; 格栅夹层长度  $L_l$  为 1.3m, 宽度  $L_w$  为 0.45m, 高度  $H_x$  为 0.018m, 格壁厚度  $h_x$  为 0.015m, 格壁间距  $L_x$  为 0.055m, 材料为密度板; 下层面板长度  $L_{lb}$  为 1.39m, 宽度  $L_{wb}$  为 0.45m, 厚度  $h_b$  为 0.002m, 材料为钢.

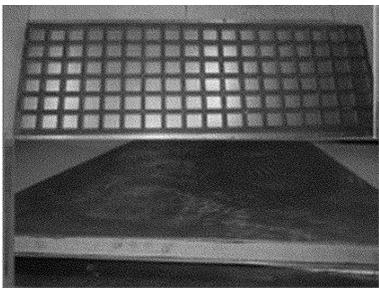


图 5 格栅夹层板试件

Fig. 5 Specimen of grid sandwich plate

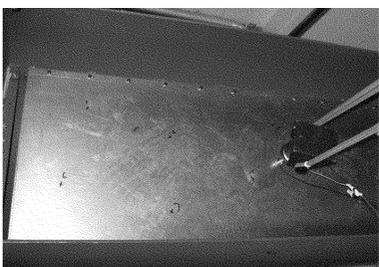


图 6 夹层格栅厚度不同时壳体平均平均振动响应曲线

Fig. 6 Internal structure of experimental model

为了便于测试、安装和更换格栅夹层板, 对壳体进行了开槽处理以及在格栅夹层板的下层面板打孔, 用螺栓将其与壳体连接, 如图 6 所示. 实验中将壳体采取用弹性绳吊挂的方式模拟近似自由边界条件. 圆柱壳体长度为 1.4m, 半径为 0.3m, 壳体和端板厚度均为 0.005m, 材料为钢; 单层钢板厚度为 0.005m.

测试系统如图 7 所示, 加速度传感器均匀布置在壳体与铺板上选好的测点位置. 测量时, 由激振器对平板的中心点进行稳态激励, 从阻抗头输出激振力信号和平板激励点的加速度信号; 其余加速度传感器则拾取平板和壳体的振动加速度信号. 实验中由于测点较多, 用移动加速度传感器的方法得到所有测点的振动响应.

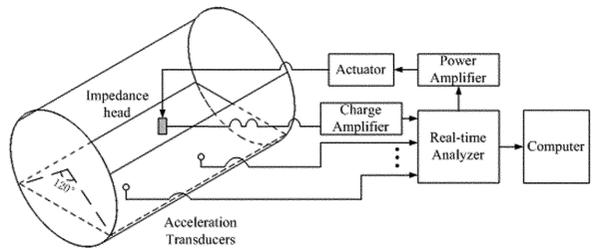


图 7 测试系统示意图

Fig. 7 Schematic of test system

#### 3.2 实验结果分析

图 8 给出了安装格栅夹层板时壳体的实测平均振动响应, 为了便于比较抑振效果, 图中用虚线表示安装单层板时壳体的平均振动响应. 为了数据比较的一致性, 图中壳体加速度响应都作了归一化处理. 由图 8 可以看出: 采用格栅夹层板后, 壳体振动响应在低频段与单层板时相差较小, 与仿真结果一致; 但在 500Hz 以上频率段, 壳体的振动响应显著下降, 尤其在 1.5kHz 以上频段, 壳体的振动响应约降低 20dB. 实验结果表明: 格栅夹层板在低频段抑振效果不理想, 在中高频段抑振效果显著.

阻尼材料在结构的减振降噪领域有着广泛的应用, 实验研究中选用阻尼较大的铝塑复合板为上层面板开展了对比测试, 实测的铝塑复合板损耗因子约为  $2 \times 10^{-2}$ .

图 9 给出了格栅夹层板上层面板材料为铝塑复合板时壳体的平均振动响应, 图中虚线表示上层面板为钢板时壳体的振动响应. 由图 9 可以看出: 当上层面板采用铝塑复合板时, 在高频段壳体的平

均振动响应有显著下降;在低频段壳体的振动响应放大,这是因为在低频段,铺板的质量对壳体振动响应影响较大,而铝塑复合板密度比钢板小.以上结果表明上层面板采用阻尼较大且密度大的材料利于提高格栅夹层板的抑振效果.

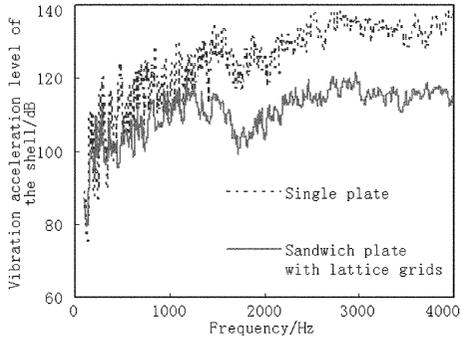


图8 安装格栅夹层板试件下壳体的平均振动响应

Fig. 8 Shell's vibration response comparison installing grid sandwich plate

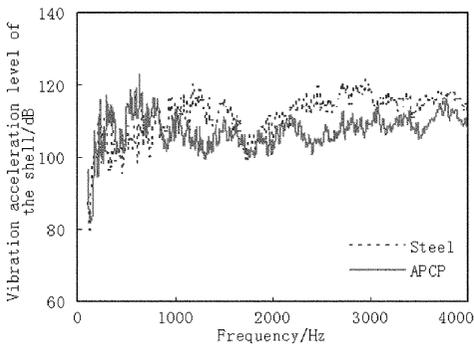


图9 上层面板材料为铝塑时壳体的平均振动响应

Fig. 9 Shell's vibration response comparison when the upper plate is APCP

## 4 结论

本文以格栅夹层板作为一种新的铺板结构,建立了将其安装于带有端板的圆柱壳体上时有限元模型,仿真分析了格栅夹层板的抑振性能,讨论了格栅结构参数对其抑振效果的影响,并实验验证了格栅夹层板的抑振效果.本文研究为格栅夹层板的工程应用提供了依据,亦为铺板结构设计提供了新的思路.主要结论如下:

(1) 格栅夹层板能有效的降低壳体的振动响应,具有良好的抑振效果,尤其在高频段,其抑振效果明显.

(2) 格栅结构参数对格栅夹层板的抑振效果影响规律复杂,需根据实际应用合理选取.

(3) 采用阻尼较大的材料制备格栅夹层板能有效地提高其抑振效果.

## 参 考 文 献

- 俞孟萨,黄国荣,伏同先. 潜艇机械噪声控制技术的现状与发展概述. 船舶力学, 2003, 7(4): 110 ~ 120 (Yu M S, Huang G R, Fu T X. Development review on mechanical-noise control for submarine. *Journal of Ship Mechanics*, 2003, 7(4): 110 ~ 120 (in Chinese))
- 左鹤声. 机械阻抗方法与应用. 北京: 机械工业出版社, 1986 (Zuo H S. The method Mechanical impedance and application. Beijing: China Mechine Press, 1986 (in Chinese))
- 范华林,金丰年,方岱宁. 格栅结构力学性能研究进展. 力学进展, 2008, 38: 35 ~ 52 (Fan H L, Jin F N, Fu T X. Structural mechanics of lattice grids. *Advances in Mechanics*, 2008, 38: 35 ~ 52 (in Chinese))
- V V Vasiliev, et al. Anisogrid lattice structures-survey of development and application. *Composite Structures*, 2001, 54: 361 ~ 370
- 孙佳,张伟,陈丽华等. 蜂窝夹层板的非线性动力学研究. 动力学与控制学报, 2008, 6(2): 150 ~ 155 (Sun J, Zhang W, Chen L H, et al. Nonlinear dynamics of the honeycomb sandwich plates. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(2): 150 ~ 155 (in Chinese))
- 王闯,刘荣强,邓全宗等. 铝蜂窝结构的冲击动力学性能的试验及数值研究. 振动与冲击, 2008, 27(11): 56 ~ 61 (Wang C, Liu R Q, Dun Z Q, et al. Experimental and numerical studies on aluminum honeycomb structure with various cell specifications under impact loading. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(11): 56 ~ 61 (in Chinese))
- Wodesenbet E, Kidane S, Pang S S. Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels. *Composite Structures*, 2003, 60: 159 ~ 169
- Fan H L, Meng F, Yang W. Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers. *Composite Structures*, 2007, 81: 533 ~ 539
- 傅强,庄苗. 新型碳纤维格栅夹层结构模拟研究. 强度与环境, 2006, 33(3): 49 ~ 55 (Fu Q, Zhuang Z. Simulation of the new type of carbon fiber grid structures. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 33(3): 49 ~ 55 (in Chinese))
- 刘均,程远胜. 考虑芯层离散特性的方形蜂窝夹层板自由振动分析. 固体力学学报, 2009, 30: 90 ~ 94 (Liu J,

Cheng Y S. Free vibration analysis of square-honeycomb sandwich plates considering discrete characteristics of the

core. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2009, 30: 90 ~ 94 (in Chinese))

## VIBRATION SUPPRESSION PERFORMANCE RESEARCH OF SANDWICH PLATE WITH LATTICE GRIDS\*

Lu Shanshan Sheng Meiping Ren Jian

(*School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

**Abstract** To reduce shell vibration response caused by deck vibration, a grid sandwich structure with lattice grids was introduced as a new deck structure, according to the theory of impedance mismatch. The sandwich plate mounted on a cylindrical shell with end plates was studied, and the finite element software was used to simulate the sandwich plate's vibration suppression performance. The structural parameters affecting the vibration suppression were discussed, and an experimental study was carried out. Both simulation results and experimental data show that the grid sandwich plate can effectively reduce the vibration response of cylindrical shell. The vibration suppression in the high-frequency is excellent. The impact of grid structural parameters on the vibration suppression is complex, but using damping material as sandwich grid upper panel can improve the vibration suppression.

**Key words** deck, lattice grid, sandwich plate, vibration suppression