

文章编号:1006-1355(2017)04-0034-06+68

基于 Virtual. Lab Acoustics 的蜂窝夹层板 结构传声特性分析

范鑫, 崔洪宇, 洪明

(大连理工大学 船舶结构强度振动噪声研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对蜂窝夹层板进行传声特性仿真计算分析。基于声学间接边界元理论,利用有限元软件 Patran 进行夹层板的三维实体建模和模态分析,采用声学软件 Virtual. Lab Acoustics 计算结构的传声性能,得到场点声压分布、构件两侧声压级差和结构隔声量曲线。在此基础上系统地探讨面板厚度和密度以及芯层高度、壁厚及壁长五个设计参量对蜂窝夹层板传声性能的影响。结果显示,面板厚度与芯层高度对结构在低频段尤其是刚度控制区域的隔声性能影响显著。

关键词:振动与波;蜂窝夹层板;声学间接边界元;传声损失;仿真

中图分类号:TU112.41;TU112.594;TB535.1 **文献标识码:**A **DOI编码:**10.3969/j.issn.1006-1355.2017.04.008

Analysis of Acoustic Performance of Honeycomb Sandwich Panels Based on Virtual. Lab Acoustics

FAN Xin, CUI Hong-yu, HONG Ming

(Institute of Ship Structure Strength and Vibration Noise, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning China)

Abstract: The acoustic performance of a honeycomb sandwich panel is studied by numerical simulation. Based on the acoustic indirect boundary element theory, a 3D model is established and then modal analysis is conducted with the help of finite element software Patran. To obtain the sound pressure distribution, sound pressure level difference and transmission loss of the panel, the acoustic software Virtual. Lab Acoustics is used in the process of the acoustic performance calculation. On this basis, the influences of the face thickness and density, the thickness of the core, the thickness and the length of the honeycomb wall on the sound transmission loss are analyzed systematically. The results indicate that the face thickness and the core thickness play a significant role in the acoustic performance of the honeycomb sandwich panel in low frequency range, especially in the stiffness control area.

Key words: vibration and wave; honeycomb sandwich panel; acoustic indirect boundary element; sound transmission loss; simulation

蜂窝夹层板作为一种仿生结构,具有较高的比刚度和比强度。同时,由于蜂芯空腔中能使入射到结构的热量和声波进行多次反射,从而该结构也具备很好的隔热、隔音性能^[1],在航空航天、船舶制造等许多领域得到广泛应用。因此,对该结构的声振特性进行研究以实现辐射噪声的定量描述以及掌握其传声特性具有重要意义。

目前,夹层板传声损失预测通常采用解析法、统计能量法、数值计算以及实验研究这四类方法^[2]。

Ran Zhou 基于波阻抗模型,分析面板为石墨纤维、芯层为泡沫填充的蜂窝夹芯结构的传声损失^[3]并对比 Dym 等人的研究结果,表明该方法能够准确地预测正交各向异性非对称夹层结构的传声损失^[4]。Efimtsov 和 Baranov 测量不同结构形式夹层板的传声损失和辐射效率,以此分析芯层厚度和蜂窝尺寸对隔声性能的影响^[5-6]。王盛春在对夹层板隔声特性结构参数影响机理的研究中,基于双三角函数的方法,建立无限大障板上结构隔声量的理论模型^[2]。而辛锋先在夹层结构的传声损失研究中更多采用声压速度势与空间谐波展开的方法,从理论角度研究平面声波穿过芯层为周期性结构夹层板的传声特性,通过与实验对比证明该方法在有限大双板

收稿日期:2017-01-11

作者简介:范鑫(1991—),男,江苏省南通市人,硕士,研究方向为蜂窝夹层结构振动与噪声控制。

E-mail: fanxin_dlut@163.com

空腔结构、波纹芯层夹层板以及正交加筋夹层板结构的声振耦合特性研究中具有很好的准确性^[7]。

综上,针对蜂窝夹层板的结构特征,在分析其隔声量理论公式基础上确定影响结构隔声性能的物理参数,应用商业软件 Patran 和 Virtual. Lab Acoustics 对四边简支蜂窝夹层板进行了振动和声学特性的仿真计算,对于模型的准确性进行解析解比对。同时,基于理论隔声特性曲线对数值仿真结果进行分析。最后,文章系统探讨了面板厚度和密度以及芯层高度、壁厚及壁长对结构传声特性的影响。

1 理论模型

1.1 问题说明

如图1所示,蜂窝夹层板的主要结构参数有长度 a 、宽度 b 、面板厚度 d 、芯层高度 h 、蜂窝壁长 l 、壁厚 t 。混响声场声波入射到上面板诱发结构振动并通过芯层连接引发下面板振动,从而向外辐射噪声。

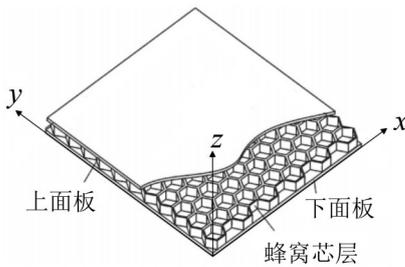


图1 蜂窝夹层板模型图

1.2 隔声量的理论计算

隔声特性曲线通常用来描述结构的隔声性能,如图2所示。其主要包括刚度控制、共振、质量定律和吻合效应四个阶段。在刚度控制段,隔声量随着激励频率的增大而减小;在共振段,隔声量波动上升;之后,曲线进入III区按质量定律变化;当频率增大到一特定值时,结构弯曲波与入射声波发生了共振,即产生吻合效应,隔声量明显下降。当然,实际过程中曲线并非完全按理论趋势发展,但是大体符合上述规律。

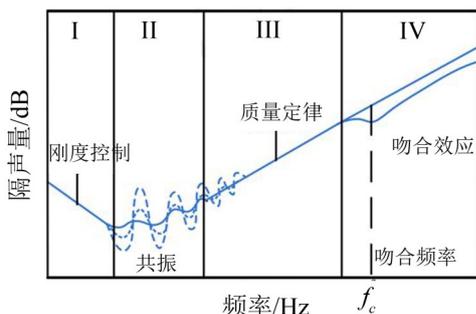


图2 隔声特性曲线

夹层结构隔声理论计算可参考下式^[1]

$$STL = 10 \log \left\{ \left[1 + \frac{\eta \pi \bar{\rho} f}{\rho c} \left(\frac{f_{mn}}{f} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\pi \bar{\rho} f}{\rho c} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{f_{mn}}{f} \right)^2 \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中 η 为阻尼损耗因子, ρc 为介质阻抗, $\bar{\rho}$ 为单位面积质量,其表达式为 $\bar{\rho} = h\rho_e + 2d\rho_f$, ρ_e 为芯层等效密度, ρ_f 为面板密度, f 是激励频率, f_{mn} 是结构固有频率。影响固有频率的因素有很多,基于 Reissner 夹层板理论,以四边简支为例,其解析表达式可以写成如下形式^[8]

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D\pi^4 (n^2 + \lambda^2 m^2)^2}{\rho b^4 (1 + \kappa^2 (n^2 + \lambda^2 m^2))}}, \quad m, n = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

式中 $\kappa = \frac{\pi}{b} \sqrt{\frac{D}{C}}$ 为夹层板无量纲参数, $\lambda = \frac{b}{a}$ 为边长比,夹层板抗弯刚度和剪切刚度分别为

$$D = \frac{E_f (h + d)^2 d}{2(1 - \nu_f^2)} \quad \text{和} \quad C = G_e h$$

其中 E_f 、 ν_f 、 G_e 分别代表面板杨氏模量、泊松比和芯层剪切等效模量。

综上,影响夹层板隔声量的因素有阻尼损耗因子、单位面积质量、介质阻抗、结构固有频率以及激励频率。而结构固有频率又与其自身结构形式、尺寸大小、边界条件等因素有关,为了更好地刻画结构自身形式对隔声性能的影响,选取五个典型的参量进行建模分析。

1.3 测量原理

声学实验中,隔声量的测量通常采用混响室-消声室法^[9],如图3所示:左侧为混响室,右侧为消声室,在两个房间之间的壁面上固定测试件,分别测量出入射到测试件上的声功率 W_i 和测试件辐射到消声室的声功率 W_t ,从而得到测试件的隔声量 $STL = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right)$ 。当然,在实际工程中有时为了测量的方便,仅选取隔声件两侧测点的平均声压级差

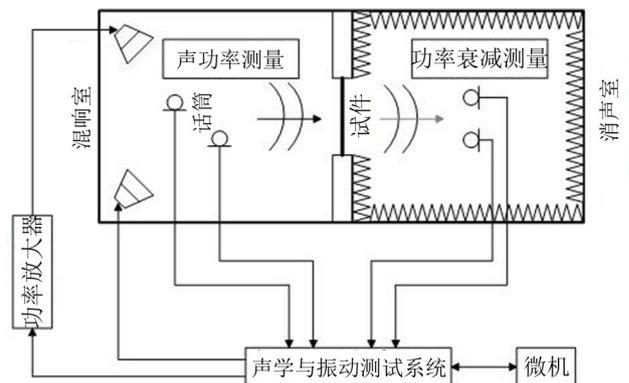


图3 隔声测试原理图

来计算表观隔声量 R ,在此基础上通过一定的计权得到测试构件最终的隔声量, R 的表达式为: $R = D + 10 \lg \frac{S}{A}$, 其中 D 为试件两侧平均声压级差, S 为隔声构件面积, A 为接收室等效吸声量, 其表达式可参考 Sabine 公式: $A = \frac{0.16V}{T}$, 以上参量 R 和 A 均是频率的函数^[10]。

文中使用 Virtual. Lab Acoustics 声学软件来模拟上述测试过程。

2 数值模拟

2.1 模型的建立

考虑到建模和网格划分的工作量及工程实际, 所选用的模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

结构参数/mm						材料参数(铝)		
a	b	d	h	l	t	E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
480	415.7	1	10	8	0.1	72	0.33	2 850

声学数值模拟通常需要用结构网格、边界元网格和场点网格^[8]。观察图 1, 可以发现实体蜂窝结构呈现出规整的周期性特征, 因此合理选取周期单元对于结构整体有限元建模具有重要意义, 文中选取图 4 所示单元作为周期单元。由于面板和芯层的胶合近似于固定连接, 其变形过程在结构不开裂的情况下也保持一致, 故建模时通过网格节点的合并操作(Equivalence)来实现。之后, 将赋予材料属性的有限周期单元作为一个组(Group)进行阵列操作(Transform), 从而形成夹层板整体结构。在此基础上, 对下面板四周节点进行简支约束, 最后进行模态分析得到声学仿真时所需的结构振动信息“.op2”文件。需要注意的是, 为了防止节点编号在声学软件中的冲突, 所导入的网格要有各自的节点编号方式。

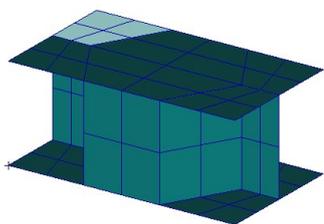


图 4 蜂窝夹层板周期单元

上文提到的三种网格均可在有限元软件中生成, 在导入声学软件时只取其网格划分部分, 在实际操作时借助有限元软件 Patran 分别生成格式为“.bdf”的边界元网格和场点网格以及“.op2”形式的结构模态输出文件。由于文中采用间接边界元法对结构进行声振耦合计算, 故边界元网格的上下层应与

结构网格的上下表面完全重合; 此外, 为计算结构的辐射声功率, 场点网格取为一个覆盖结构的半球。对于线性有限元和边界元模型, 通常假设在最小波长内有 6 个单元, 即单元长度应满足: $L \leq c/6f_{\max}$ ^[9]。文中最高计算频率为 3 000 Hz, 介质为空气, 据此, 最大单元应小于 18.9 mm, 实际过程中, 结构网格最大 12 mm, 边界元网格 15 mm。另外, 运用 Virtual. Lab Acoustics 进行声学分析时, 可考虑声的反射、衍射和折射等效应, 为了消除声音沿夹层板边缘的衍射, 软件提供了障板功能。具体仿真界面见图 5。

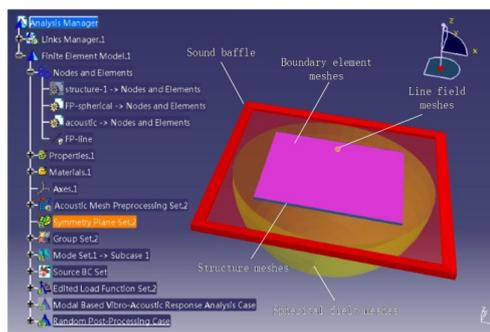


图 5 声学数值仿真图

混响室中, 入射声功率采用如下公式^[11]: $W_i = \frac{P_{\text{rms}}^2}{4\rho c} S$, 其中, P_{rms} 为混响室声压均方根值, S 为结构网格表面积。入射参数如下: $P = 1 \text{ Pa}$, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $c = 340 \text{ m/s}$, 此时 $W_i = 2.395 \times 10^{-4} \text{ W}$ 。辐射声功率为复数, 其实部向外辐射声能称为有用声功率, 虚部仅做声能震荡并不做功。由于混响室的模拟采用平面波叠加的形式, 故总有用声功率也是所有工况的叠加。

2.2 场点声压分布及隔声量计算

模型的准确性将直接影响到模态分析以及声学仿真的可靠性, 表 2 将模态分析数值解与解析解进行了对比, 其结构参数如表 1 所示, 约束条件为四边简支。

表 2 数值模拟解与解析解对比

Mode	(m, n)	数值解/Hz	解析解/Hz	误差/(%)
1	(1, 1)	421.3	402.8	4.59
2	(2, 1)	785.7	821.0	-4.3
3	(1, 2)	885.5	943.4	-6.14
4	(2, 2)	1 219.6	1 273.6	-4.24
5	(3, 1)	1 348.7	1 373.7	-1.82
6	(1, 3)	1 555.1	1 621.8	-4.11

由上表可知, 数值模拟解与解析解吻合良好。同时, 图 6 给出了夹层板振动的前 6 阶模态振型, 符合板振动的振型变化规律, 据此, 可以认为振动数值

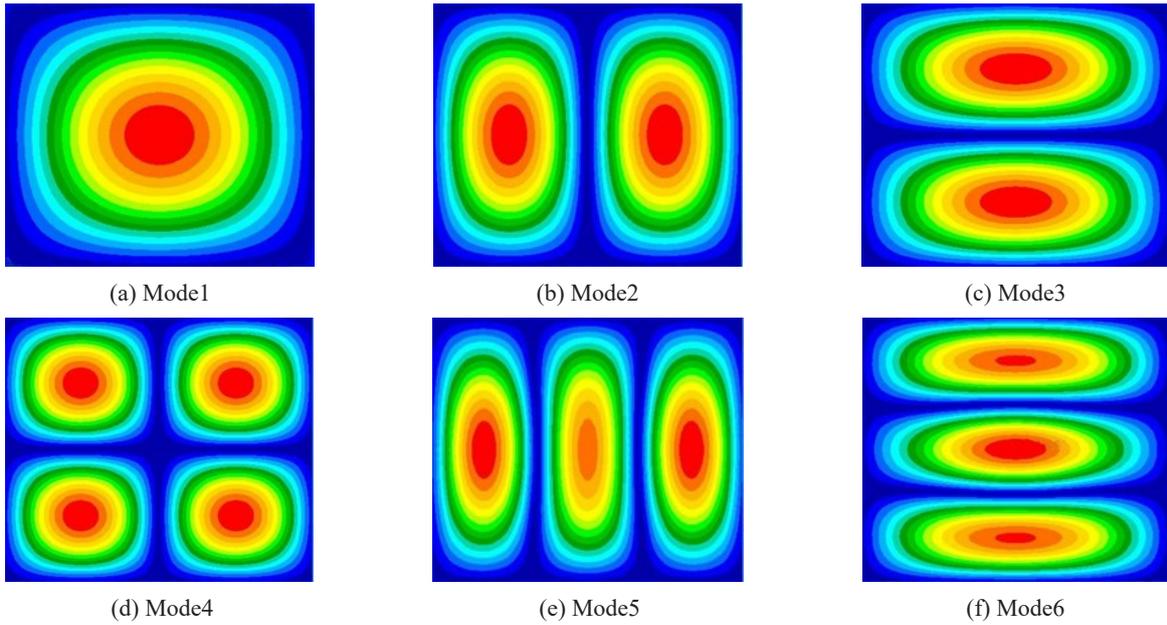


图6 夹层板前6阶模态振型图

模型是准确的。

基于上述模型,计算结构的传声性能。图7给出了在混响条件下,某列幅值为0.21 Pa、频率为410 Hz的平面波以77.5°入射时场点的声压分布。可以看出,此时声压在垂直面分布呈现以中心向四周衰减的形式。同时,分别在距结构上下表面中心处100 mm的地方设置两个场点以及一个覆盖结构的半球形场点来分别计算模型两侧的声压级差和隔声量,结果如图8所示。

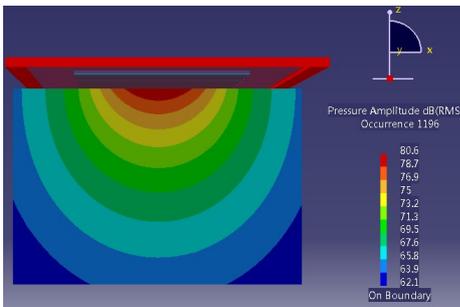
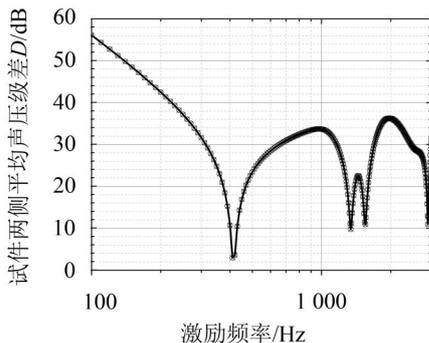


图7 平面声压分布图

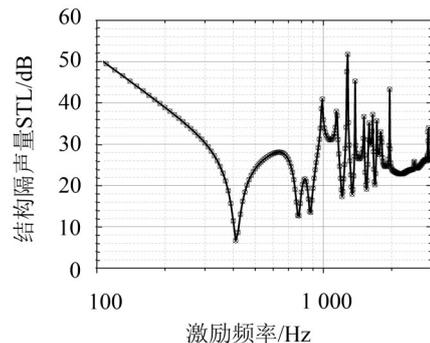
从图8(a)可以看出,结构中心点处的声压级差

在1阶、5阶、6阶以及11阶(表2并未列出)固有频率处出现了低谷,并且在1阶时最小。结合表2和图6,并参考观测点的位置可以发现,这些激励与结构固有频率一致,发生共振,进而引发与下面板相邻的空气质点剧烈振动,透射声功率急剧提高,而测点也恰好落在这些振型的峰值处,故该处的声压级差出现低谷。该现象也说明,模型两侧的声压级差依赖于测试者所选取的测点位置。因而,若选用计权表观隔声量来表征结构的隔声性能需要一定数量的测点声压级差的平均才有意义,单个测点声压级差仅能反映该方向上的插入传声损失,并不能完整反映结构的隔声性能。由于随着激励频率的增加,结构振型峰值数也在增加,即能量峰值出现的位置在增加,从而声压级差呈现震荡向上趋势。

图8(b)中呈现的是结构整体隔声量随激励频率的变化,其峰值与低谷数量明显较左图要多,这是因为从能量的角度考虑,每当激励频率与结构固有频率一致时都有可能造成结构隔声量的突变。1阶固有频率之前,隔声量都随着激励频率的增加不断减



(a) 试件两侧平均声压差



(b) 结构隔声量

图8 结构传声损失变化曲线

小,之后曲线逢固有频率出现突变,并呈现震荡向上趋势。由于结构复杂程度以及计算频率的限制,仿真阶段仅局限在共振以及刚度控制区。

3 系统参数影响研究

通过改变结构设计参数,系统探讨影响蜂窝夹层板隔声性能的相关因素。

3.1 面板厚度对隔声量的影响

图9与理论隔声量曲线吻合良好,并且在计算频域内出现明显的刚度控制和共振段。除去共振点处的值,结构整体隔声量与面板厚度变化呈正相关关系且在刚度控制区更加明显,即面板厚度越大,结构刚度越大,刚度控制区的隔声性能越好。此外,面板厚度的增大导致共振点向低频移动,从而计算频域内模态密度也有所增加。

3.2 面板密度对隔声量的影响

从图10可以看出,面板密度对结构隔声量的影响并不明显。结合式(1)和图2,可以发现,尽管理论上面板密度对隔声量确有影响,但其影响并不是在每个频段内都起作用,其作用区域更多是在质量定律段,即图2中的III阶段。由于文中计算频域是在刚度控制和共振段,故面板密度对结构隔声性能的影响并不能在图中很好反映出来。

3.3 芯层高度对隔声量的影响

从图11可以发现,结构隔声量对芯层高度变化

具有高度的敏感性。从力学角度出发,夹层板可视为工字梁,其芯层高度远大于面板厚度,剖面惯性矩与之近似成三次方的关系,从而芯层越高刚度越大,相应的固有频率也就越大,这使得稍微增加芯层高度就可以在刚度控制区获得较好的隔声效果。

3.4 芯层壁厚对隔声量的影响

从图12可以看出芯层壁厚对结构隔声量的影响并不明显。随着壁厚的增加,结构隔声性能略微提高,共振点也向着高频移动。这是因为增加壁厚导致芯层等效剪切刚度 C 增加,从而夹层板无量纲参数 k 减小,再由式(2)可知结构固有频率增加。

3.5 芯层壁长对隔声量的影响

图13刻画了壁长对结构隔声性能的影响。可以看出,随着壁长的增加,隔声曲线对应的波峰和波谷在向低频移动。这是由于壁长的增加导致单位面积内面板的支撑数减少或者说支撑的跨距变大,即结构变柔,对应的固有频率变低,计算频域内模态密度变大。从而,声激励下结构更容易被激起振动,致使隔声性能被削弱,这一点在刚度控制区体现得尤为明显。

4 结语

运用 Virtual. Lab Acoustics 声学软件基于间接边界元理论对蜂窝夹层板结构进行了隔声量的计算,探讨了结构设计参数对隔声性能的影响。结果

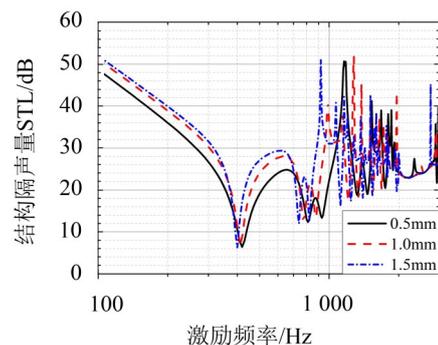
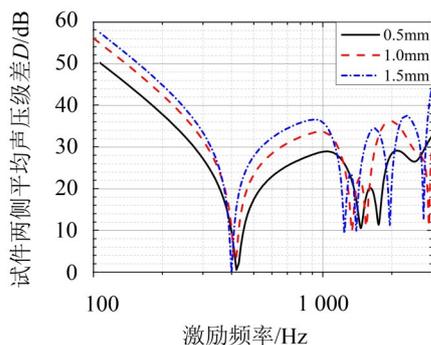


图9 面板厚度对传声损失影响

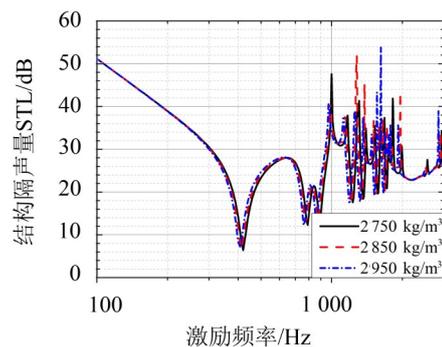
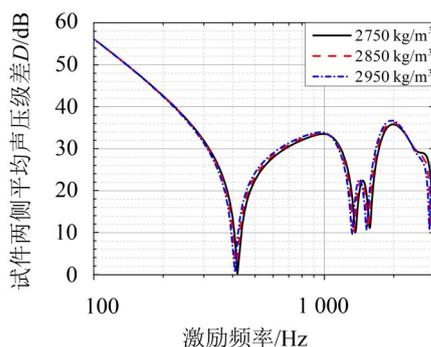


图10 面板密度对传声损失影响

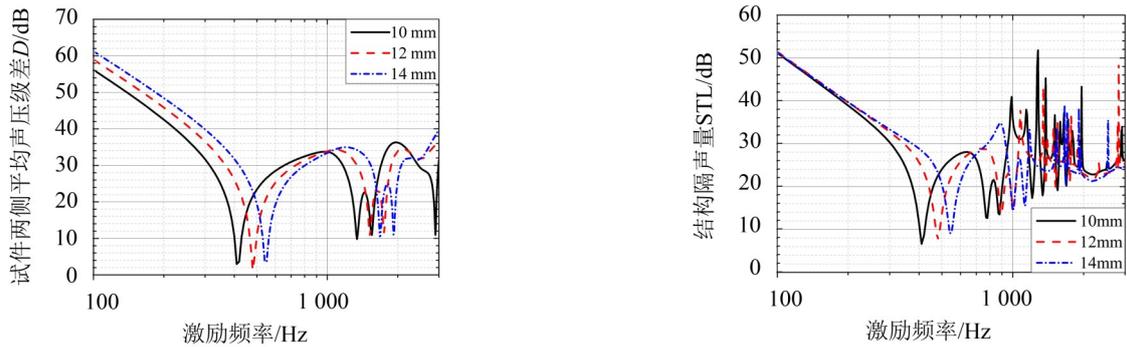


图 11 芯层高度对传声损失影响

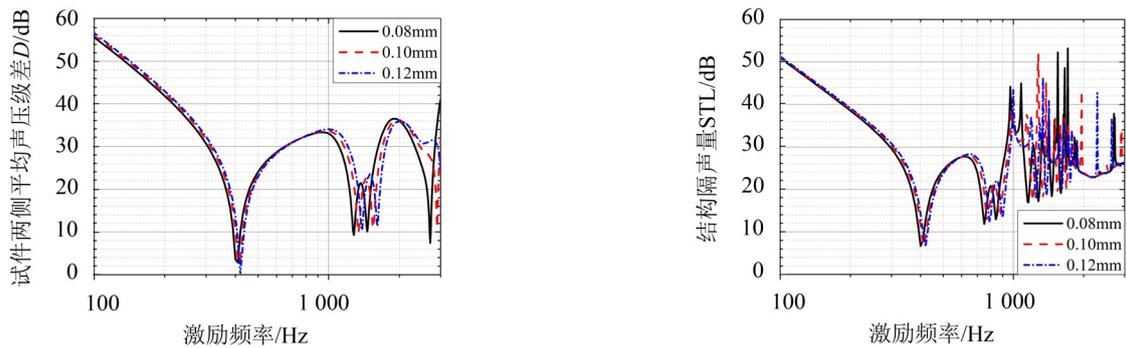


图 12 芯层壁厚对传声损失影响

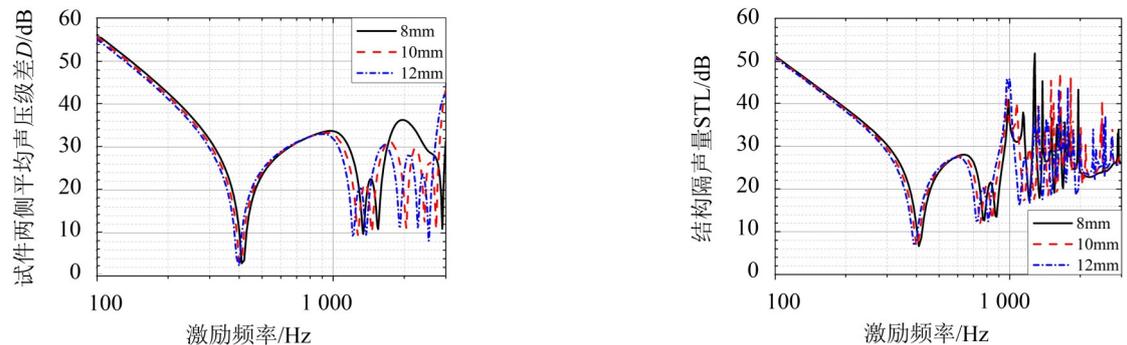


图 13 芯层壁长对传声损失影响

表明,弯曲刚度对夹层板隔声量在刚度控制和共振段起着重要作用,其他结构参数则或多或少都可以通过改变该因素来影响夹层板的隔声性能。

(1) 面板厚度和芯层高度对隔声性能尤其是在低频段影响显著。芯层高度的增加使刚度控制区得以扩展,而增加面板厚度更多的是提高相应区域内的隔声性能从而使得整个计算频域内的隔声性能有所提高。芯层壁长的增加则导致单位面积内面板的支撑跨距变大,结构变柔,隔声性能被削弱。

(2) 面板密度和芯层壁厚在计算频域内对于结构隔声性能的影响并不明显。分析发现,由于面板密度主要作用区在质量定律段,而文中由于计算规模的限制并未到达这一区域,因而面板密度对结构隔声量的影响并未显现。这也就告诉我们,对于复杂结构,尽管影响其隔声性能的因素有很多,但其各

自作用的主要区域并不相同,试图通过优化结构参数来改善结构隔声性能要根据其所处环境的主要激励以及该参数的主要作用区域综合而定。

正是由于具备较高比刚度这一特点,在同等条件下蜂窝夹层板在低频域隔声效果更加显著,这为一些在设计上既需要满足强度要求又有一定声学要求的结构提供了更广的选择空间。

参考文献:

- [1] 刘海. 隔吸声复合式蜂窝夹层板结构的设计与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [2] 王盛春. 蜂窝夹层结构复合材料的声振特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [3] RAN Z, MALCOLM J C. Sound transmission characteristics of asymmetric sandwich panels[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2010: 31011-31012.