

文章编号: 1674-8190(2024)05-135-13

# M 型皱褶芯材夹层板隔声性能研究

叶语睿, 王志瑾

(南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016)

**摘要:** 作为先进复合材料夹层结构, 皱褶芯材构型多样, 先前研究大多围绕 V 型皱褶芯材展开, 鲜有对其他构型的隔声性能研究。建立垂直入射声压激励下的四边简支 M 型皱褶芯材夹层板数值模型, 基于有限元软件对其隔声性能进行数值仿真, 并将理论预测的蜂窝夹层板隔声曲线与仿真结果进行对比; 基于仿真模型, 研究 M 型皱褶芯材夹层板结构的隔声性能, 讨论皱褶芯材胞元几何参数对隔声性能的定性影响规律; 研究双层芯材的 M 型皱褶芯材夹层板上下两层芯材的相对铺设错位、铺设角度对隔声性能的影响。结果表明: 上下两层芯材在胞元 Z 形线步长方向错位叠放时隔声效果提高, 且优于同面密度的单层皱褶芯材夹层板; 在上下两层芯材相对铺设角度变化时, 上下层芯材轴线垂直铺设时计权隔声量最大。

**关键词:** 夹层板; M 型皱褶芯材; 胞元参数; 隔声性能; 双层芯材; 铺设方式

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.14

## Research on sound insulation performance of the M-type folded core sandwich panel

YE Yurui, WANG Zhijin

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** As an advanced composite sandwich structure, the configuration of folded core is diverse, and previous research has mostly focused on the V-shaped folded core, while there is still relatively little research on the sound insulation performance of other configurations. A numerical model of a four sided simply supported M-shaped folded core sandwich panel under vertical incident sound pressure excitation is established, and the numerical simulation of its sound insulation performance based on finite element software is conducted. The theoretical predicted sound transmission loss curve of the honeycomb sandwich panel is compared with the simulation results. Based on simulation models, the sound insulation performance of M-type folded core sandwich panel structure is systematically studied, and the qualitative influence of geometric parameters of folded core cell on sound insulation performance is discussed. The influence of relative misalignment and laying angle of the upper and lower layers of M-type folded core sandwich panel with double-layer core on sound insulation performance is proposed and studied. The results show that the sound insulation performance is improved when the upper and lower layers of core are staggered and stacked in the Z-shaped line step direction of the cell, and it is better than single-layer folded core sandwich panel with the same surface density. When the relative laying angle of the upper and lower layers of core changes, the maximum weighted sound insulation reached the most value while the axis of the upper and lower layers of core is vertically laid.

**Key words:** sandwich panel; M-type folded core sandwich panel; cellular parameters; sound insulation performance; double-layer core; laying method

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-07-04

通信作者: 王志瑾(1963-), 女, 博士, 教授。E-mail: zhijin@nuaa.edu.cn

引用格式: 叶语睿, 王志瑾. M 型皱褶芯材夹层板隔声性能研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 135-147, 154.

YE Yurui, WANG Zhijin. Research on sound insulation performance of the M-type folded core sandwich panel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 135-147, 154. (in Chinese)

## 0 引言

噪声问题在现代飞行器设计和航空运输业中具有关键性的影响,直接影响到消费者在航空旅行中的体验,这就要求航空航天结构特定部位在满足承载以及质量要求的基础上,还具备一定的降噪隔声能力。从 20 世纪 60 年代开始,航空航天领域开始采用夹芯结构,其中研究较成熟且应用比较广泛的是蜂窝夹芯结构<sup>[1-2]</sup>。在蜂窝结构中,由于每个蜂窝孔都相当于是一个独立的赫姆霍兹共振腔,当声波的频率与腔体的固有频率匹配时,会在腔内产生共振现象,使得声波的能量被吸收和耗散,从而达到减少噪声的效果<sup>[3]</sup>。然而在后来的实际应用中这种结构具有其局限性:蜂窝芯材只适宜制作平板或小曲度板的芯材;同时,其封闭的单胞芯格结构导致芯材内的水分遇低温容易凝结并滞留在夹芯内,使夹芯结构失效<sup>[4]</sup>。这些不利因素限制了蜂窝夹芯结构在航空航天领域某些结构部位的应用。皱褶芯材是 20 世纪 90 年代为适应飞行器发展而研制出的一种异型芯材<sup>[5]</sup>。相比于蜂窝芯材,皱褶芯材构型多样,可用于曲面芯材设计<sup>[6-8]</sup>,设计参数多,而且其内部构型复杂,但具有开放通道,有助于快速排除内部的湿气和热量,同时其复杂构型使结构具有隔热、降噪及雷达散射等特点<sup>[9]</sup>。

考虑到皱褶芯材的高度可设计性,通过合理的设计方法,可以充分发挥其在隔声和吸声方面的潜力。因此,在航空航天等重要工程领域,对皱褶芯材的隔声特性研究就显得尤为重要。

研究者对不同皱褶构型的几何设计<sup>[10]</sup>、力学模型<sup>[11]</sup>、热力学响应<sup>[12]</sup>等进行了深入探索,为皱褶芯材结构的隔声性能研究建立了基础。关于声学计算的方法有波展开法、有限元法、阻抗分析法等。由于皱褶芯材的构型复杂,其理论方面的研究目前相对较少,Pratapa 等<sup>[13]</sup>提出了一个广义的 Bloch 波框架,并将其应用于皱褶结构的声学设计,通过对结构分析中常用的标准 Bloch 波进行拓展,选择单元的几何形状和结构的折叠状态作为设计变量,设计了可调和可编程的声学超材料,研究发现皱褶结构是噪声控制、振动隔离、冲击吸收和波导等声学超材料的理想候选材料。

对于声学仿真和实验,从 20 世纪 90 年代开始,已有研究者对皱褶夹芯结构的隔声性能开展

研究工作。邵长林等<sup>[14]</sup>对 8# 箱纸板制成的 V 型皱褶芯材的隔声性能进行实验,发现 V 型皱褶芯材结构具有宽带隔声特性,能显著提高中低频率范围内的隔声量;王志瑾等<sup>[15]</sup>通过设计制作不同几何特征参数和构型的 V 型皱褶芯材夹层板试验件,采用混响室—消声室法进行了隔声量试验,通过对比试验,给出了隔声性能与其特征参数及构型之间的基本关系;顾志武<sup>[16]</sup>利用工程软件 ANSYS 对 28 种不同参数的 V 型皱褶芯材夹层板和 12 种不同参数的六角单元蜂窝夹层板进行了隔声性能计算,得出了各个参数对结构隔声性能的影响,并分析了可能的原因;袁新浩<sup>[17]</sup>通过对 V 型皱褶芯材和蜂窝夹层板进行隔声性能分析,得出在等面密度的前提下,存在皱褶芯材夹层板比蜂窝芯材夹层板隔声性能更好的结论。

对于皱褶芯材夹层板,不论是理论还是仿真实验,国内外虽然已经进行一定的研究,但主要是围绕 V 型皱褶芯材展开,与其他皱褶构型不同的是, M 型皱褶芯材构型具有更多的皱褶平面,多个皱褶形成了一系列的隔声腔室,从而能更好地吸收和反射声波,产生不同的隔声效果。目前鲜有对 M 型皱褶芯材夹层板的隔声性能的仿真研究,因此其各个构型参数对隔声性能影响的研究亟待展开。

本文旨在通过对 M 型皱褶芯材胞元几何参数的改变,探索各个参数对隔声性能的影响。但也正是因为其结构复杂、参数多,难于用声学理论计算出它的隔声量的理论解,而数值仿真方法具备模拟复杂过程和施加多种方向荷载的能力,同时具有求解速度快、成本低廉等优势,因此被广泛应用于求解复杂声振响应问题。本文在利用有限元计算软件 Comsol Multiphysics 的基础上,对 M 型皱褶芯材夹层板进行数值建模仿真,首先研究 M 型皱褶夹芯结构胞元的各个构型参数对其隔声性能的影响,通过理论与仿真的对比验证数值模拟的真实性;随后提出并探索双层芯材皱褶芯材夹层板中,两层芯材相对铺设方式对隔声性能的影响,以期将来 M 型皱褶芯材的隔声设计提供参考。

## 1 M 型皱褶构型几何设计

皱褶芯材按照其皱褶胞元型式不同可以分为 V 型, M 型, S 型等构型形式(如图 1 所示),相比

于V型皱褶芯材,M型皱褶芯材构型皱褶平面更多,这种结构能够增加芯材的刚度和稳定性,从而提高了其耐久性和抗冲击性能<sup>[18]</sup>。同时其在加工制造时比S型构型更加易于成型,只需要经过简单的皱褶。本文主要对M型皱褶芯材进行研究。

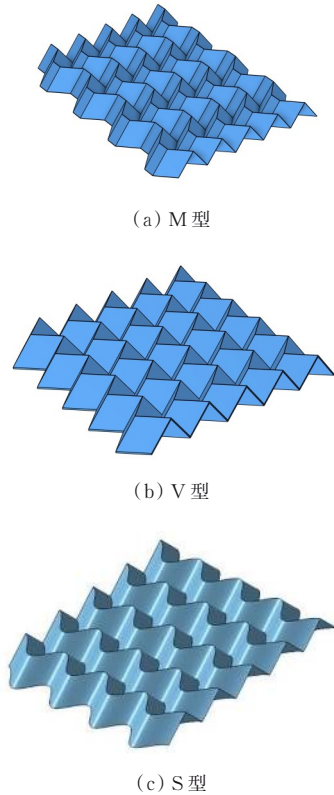


图 1 不同皱褶构型

Fig. 1 Different folded configurations

等高度M型皱褶芯材是周期性的空间立体构型,包含多个重复的M型皱褶胞元,它是由平板材料(金属薄板、复合纸等)按有规律的线系网格(画线样板如图2所示)进行局部皱褶而得到的立体构型<sup>[19]</sup>,如图3所示。皱褶后得到的立体结构可看成是由很多矩形单元1和平行四边形单元2形成的具有凹凸表面的构型。图2所示的画线样板上有间隔的实线和虚线,将实线往上折,虚线往下折(反之亦然),就得到图3所示的M型皱褶芯材构型。选取具有代表性的典型M型皱褶胞元进行分析,在画线板中任意选取一个代表单元,在皱褶构型中选取一个胞元体。

M型皱褶构型画线样板胞元体如图4所示,在M型皱褶构型画线样板的胞元体上, $2L_p$ 为M型皱褶单元画线样板Z形线步长, $2S_p$ 为画线样板上M形线的步长, $B$ 为画线样板上M形线的间距, $V_p$ 为

画线样板上M形线的折幅。

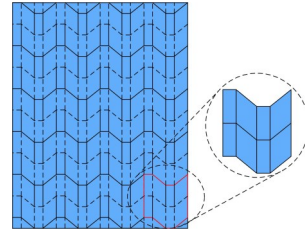


图 2 M型皱褶构型画线样板及胞元体

Fig. 2 M-type folded configuration line template and cell

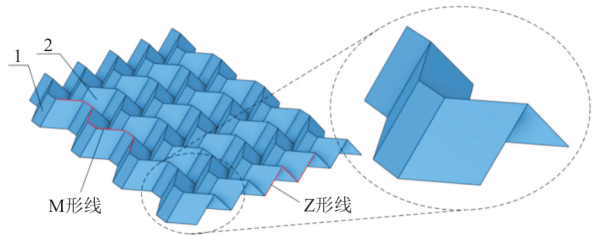


图 3 M型皱褶芯材及其胞元体

Fig. 3 M-type folded core and cell

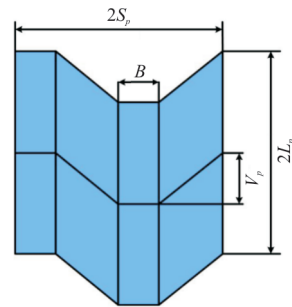


图 4 M型皱褶构型画线样板胞元体

Fig. 4 M-type folded configuration line template cell

皱褶后的M型皱褶胞元体示意图如图5所示,图中 $2L$ 为皱褶胞元的Z形线步长, $2S$ 为皱褶胞元的M形线步长, $B$ 为皱褶胞元M形线间距, $V$ 为皱褶胞元M形线的折幅, $H$ 为皱褶胞元的高度,因此,对于一个M型皱褶胞元体,只需要 $S$ 、 $L$ 、 $B$ 、 $V$ 、 $H$ 五个独立变量便可唯一确定其几何特性。

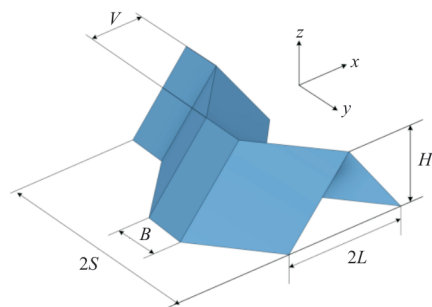


图 5 M型皱褶胞元体

Fig. 5 M-type folded cell

平面画线样板与立体胞元之间的几何关系如图 6 所示。

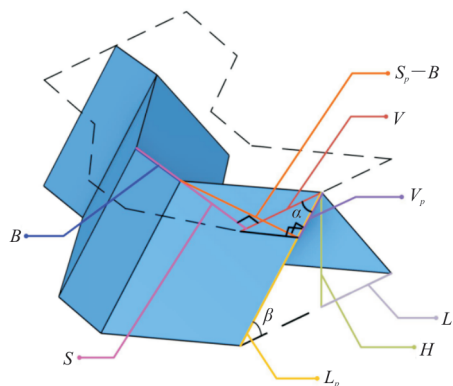


图 6 平面画线样板与立体胞元之间的几何关系  
Fig. 6 The geometric relationship between planar line template and three-dimensional cell

图 6 中虚线为皱褶胞元体展开后的平面画线样板轮廓,根据图中平面 M 型皱褶单元画线样板

$$\rho = \frac{4L_p S_p \delta_m}{4LSH} \rho_m = \frac{B\sqrt{H^2 + L^2} + \sqrt{(H^2 + L^2)(S - B)^2 + H^2 V^2}}{LSH} \delta_m \rho_m \quad (7)$$

式中:  $\delta_m$  为芯材材料的厚度;  $\rho_m$  为芯材材料的密度;  $\rho$  为 M 型皱褶单元的当量密度。

由于夹层板芯材部分高度处处相等,因此将

$$\rho_c = \frac{B\sqrt{H^2 + L^2} + \sqrt{(H^2 + L^2)(S - B)^2 + H^2 V^2}}{LS} \delta_m \rho_m \quad (8)$$

## 2 有限元建模及仿真验证

考虑到几何建模的便捷性和工程实际,以及为后续工作提供参照,本文设计的皱褶芯材夹层板如图 7 所示,板长( $x$  方向)300 mm,宽( $y$  方向)200 mm,上下面板厚度  $d$  均为 0.3 mm,并选取 Z 形线步长  $L$  为 8 mm, M 形线步长  $S$  为 8 mm, M 形线折幅  $V$  为 8.2 mm, M 形线间距  $B$  为 3 mm,胞元高度(即芯材的厚度)  $H$  为 10 mm,芯材皱褶胞元壁厚  $t$  为 0.3 mm,此参数作为皱褶芯材的基准参数;面板和芯材材料相同,均采用铝箔,其中  $E_m = 70$  GPa,  $\nu_m = 0.33$ ,  $\rho_m = 2\,700$  kg/m<sup>3</sup>,则根据公式(8)可计算得到皱褶芯材的当量面密度  $\rho_c = 1.802$  kg/m<sup>2</sup>,而夹层板的当量面密度  $\rho_p = \rho_c + 2d\rho_m$ ,本文所讨论面密度均为芯材的当量面密度。

与立体 M 型皱褶胞元体之间的几何变换关系<sup>[20]</sup>,可以推导出 M 型皱褶胞元体皱褶前后的几何参数关系为

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{V_p}{V} \quad (2)$$

$$\cos \beta = \frac{L}{L_p} \quad (3)$$

因此有:

$$L_p = \sqrt{H^2 + L^2} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{LV}{\sqrt{H^2 + L^2}} \quad (5)$$

$$S_p = B + \sqrt{(S - B)^2 + \frac{H^2 V^2}{H^2 + L^2}} \quad (6)$$

由于皱褶前平面画线样板单元体质量与皱褶后胞元体质量相同,因此得到 M 型皱褶芯材的当量密度为

当量密度乘以芯材高度  $H$  得到 M 型皱褶构型的当量面密度公式:

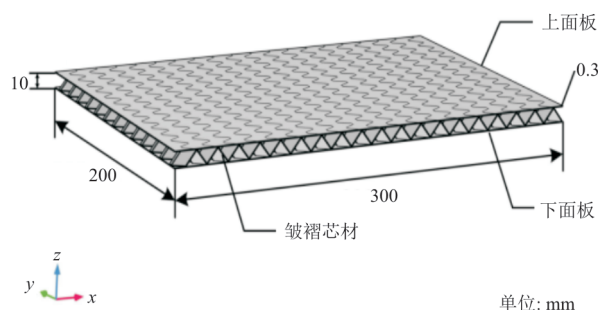


图 7 M 型皱褶芯材夹层板  
Fig. 7 M-type folded core sandwich panel

考虑到网格数量以及计算成本,本文设置皱褶芯材夹层板面板两侧矩形空气域高 50 mm,通常,皱褶芯层充盈着空气,因此同样将皱褶芯材内部胞元空腔部分设置为空气域, M 型皱褶芯材夹层板声场模型如图 8 所示。



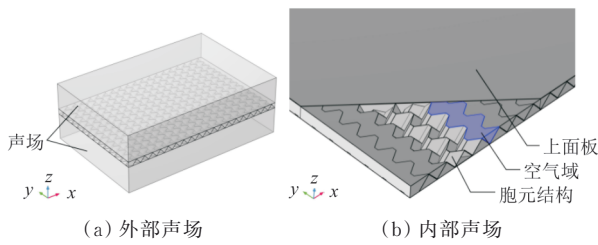


图8 M型皱褶芯材夹层板声场模型  
Fig. 8 Sound field model of M-type folded core sandwich panel

本文采用 Matlab 语言结合 Comsol 多物理场分析软件进行有限元参数化建模。通常采用数值方法进行结构声学模拟时对网格尺寸有一定的要求,即在计算时要求一个波长内至少包含 6 个网格,故需要网格单元最大尺寸小于波长的 1/6,本文计算中声音传播速度为 340 m/s,计算最高频率为 5 000 Hz,因此可以得到网格最大尺寸为 11.3 mm。

对于边界条件的设置,为了尽量接近实际,上下面板与芯材固定连接,并对夹层板的 4 个边界面上的所有节点施加  $z$  方向位移约束。同时,在上板空气域添加沿  $z$  轴负方向(垂直于板面方向)入射的平面波辐射,压力幅值为 1 Pa。网格划分采用自由四面体网格,设置最大单元尺寸为 11.3 mm,对于接近芯材固体部分的狭窄区域,则需要更密的有限元网格,在 Comsol 中,可通过狭窄区域分辨率这一参数值来调节狭窄区域网格的精细度,通过增加网格的分辨率,尤其是在狭窄区域附近,可以更准确地捕捉和模拟该区域内的细节和特征,提高模拟的准确性,但同时也会增加计算成本,经过计算测试本文设置狭窄区域分辨率为 0.5,并构建有限元模型,如图 9 所示。

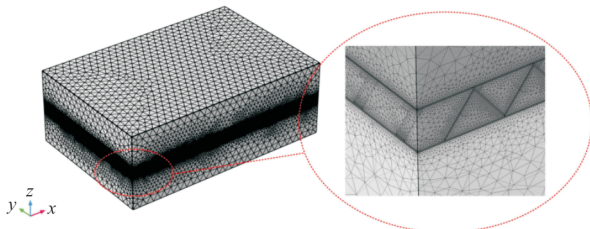


图9 M型皱褶芯材夹层板有限元网格模型  
Fig. 9 Finite element mesh model of M-type folded core sandwich panel

通过对声波入射平面和声波接收平面声强的积分即可得到声场的入射声功率  $W_i$  和透射声功率  $W_t$ ,其中入射声功率定义为

$$W_i = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_A p_i v_i^* dA \quad (9)$$

类似地,透射声功率可以用式(10)表示。

$$W_t = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_A p_t v_t^* dA \quad (10)$$

式中: $v$ 为当地流体质点速度; $*$ 为复共轭。

则隔声量公式定义为

$$S_{TL} = 10 \lg \left( \frac{W_t}{W_i} \right) \quad (11)$$

根据以上原理,在 Comsol 中设定相应的边界条件和积分计算公式对隔声量进行计算,求解频率范围为 100~5 000 Hz,整体计算步长 50 Hz,从而得到 100~5 000 Hz 区间内的传声损失并拟合为  $S_{TL}$  曲线,如图 10 所示。

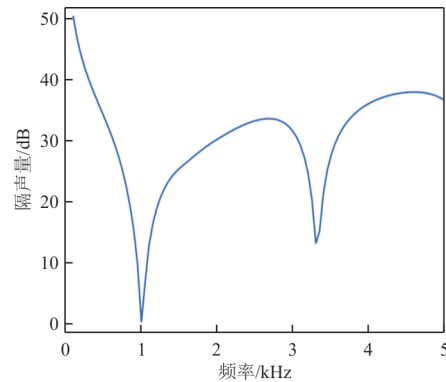


图10 基准M型皱褶芯材夹层板隔声量曲线  
Fig. 10 Sound transmission loss curve of reference M-type folded core sandwich panel

从图 10 可以看出:在低频范围内皱褶芯材夹层板结构也存在劲度控制区、质量控制区,符合板结构隔声的基本规律。在 1 000 和 3 500 Hz 左右出现两个隔声低谷区,说明这些频率点夹层板的传声损失很小,其本质是由于这些频率与夹层板的固有频率相重合,引发了板的共振,进而夹层板质点和相邻的空气质点剧烈震动,导致透射声功率升高。典型声压级分布如图 11 所示,1 000 和 3 300 Hz 的透射声压较强,分别对应图 10 中的两处隔声波谷,通过对夹层板特征频率分析得到对应有振型如图 12 所示。

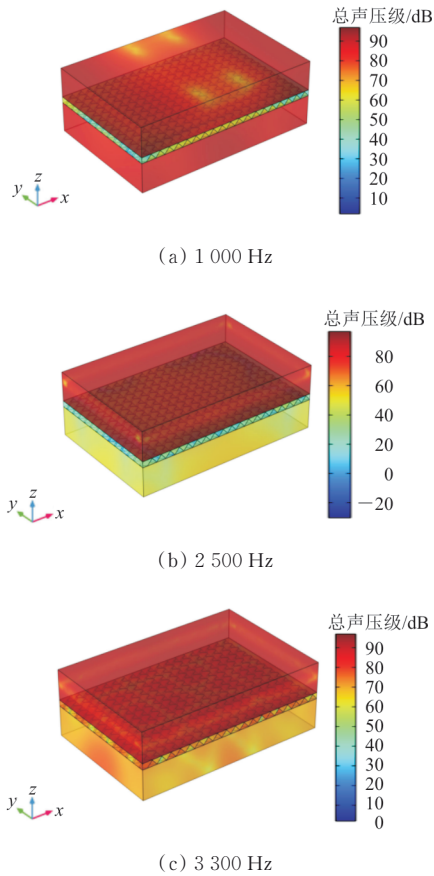


图 11 M型皱褶芯材夹层板隔声仿真声压级分布  
Fig. 11 Simulation sound pressure level distribution of M-type folded core sandwich panel for sound transmission loss

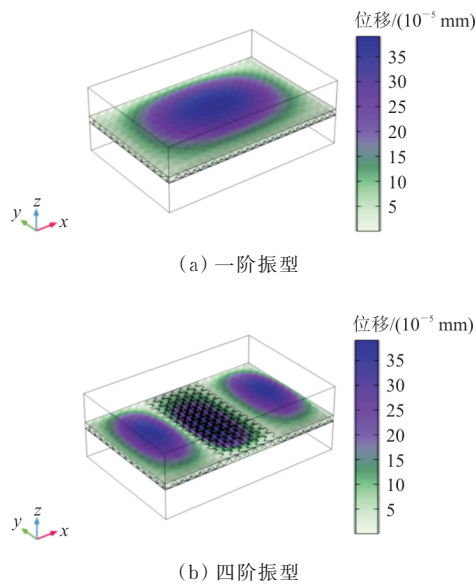


图 12 M型皱褶芯材夹层板隔声低谷对应振型  
Fig. 12 The vibration mode corresponding to the sound insulation trough of the M-type folded core sandwich panel

为了验证该数值模拟方法的正确性,本文选取文献[2]中所给的蜂窝芯材夹层板进行验算。由于二者均为夹层板结构,且具有相似的几何特征,区别在于周期排布的芯材胞元结构不同,但在仿真方法上蜂窝结构可以沿用M型皱褶芯材仿真过程。因此本文在遵循文献[2]结构参数的基础上,按照与前文M型皱褶芯材夹层板相同的仿真方法对蜂窝芯材夹层板进行隔声性能仿真计算。在仿真过程中,二者均采用相同的声源加载办法,对其上板空气域施加平面波辐射,通过式(9)、式(10)对上下面板平面的声强分布积分,利用式(11)得到传声损失。同时,根据蜂窝芯材的结构尺寸使用相同方法划分有限元网格,对于边界条件,本文模型和文献[2]均采用四边简支约束的方法,最终得到蜂窝夹层板结构声压级分布(如图13所示)和隔声量曲线(如图14所示),并将结果与文献[2]中的理论值进行比较。

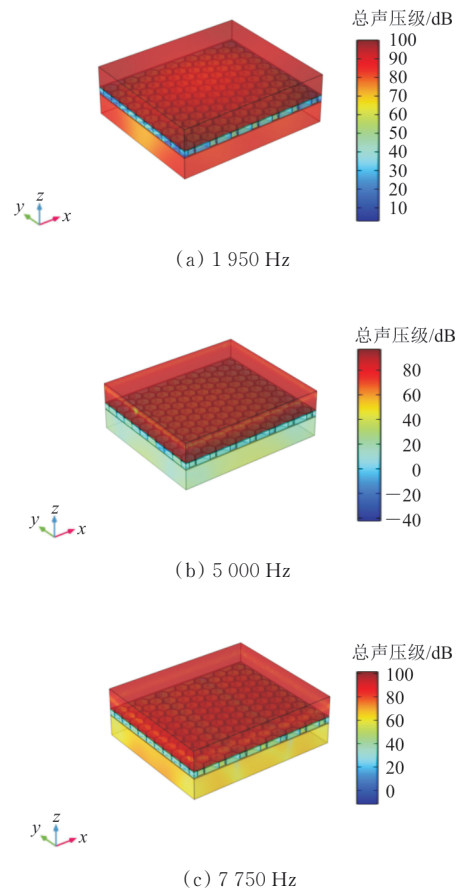


图 13 蜂窝芯材夹层板声压级分布  
Fig. 13 Sound pressure level distribution of honeycomb core sandwich panel

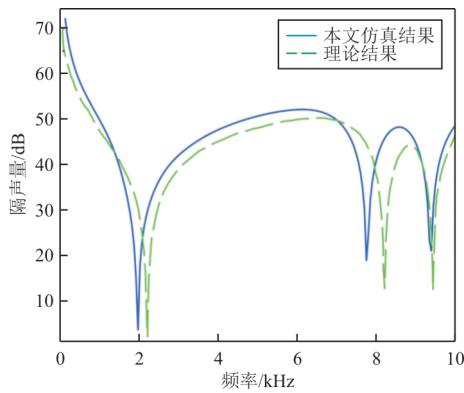


图14 蜂窝芯材夹层板隔声量仿真与理论值对比  
Fig. 14 Simulation and theoretical comparison of sound transmission loss in honeycomb core sandwich panel

从图14可以看出:本文仿真结果与理论结果存在一定的误差,这是由于文献[2]的理论计算基于Reissner理论,该理论把夹层板面板看作为一薄膜,认为只承受平面力,同时只考虑夹层板的反对称变形,而夹芯则认为只承受抗剪作用<sup>[21]</sup>。这种简化假设会使理论计算结果与仿真结果产生一定偏差。而本文计算结果与文献[2]给出的理论值变化趋势基本一致,数值基本接近,可以有效地反映本文夹层板结构隔声量仿真方法和结果的正确性。

### 3 M型皱褶构型参数对夹层板隔声性能影响分析

确定M型皱褶芯材胞元的构型参数有5个,其中胞元高度 $H$ 决定了上下面板之间的距离,而其余四个参数共同确定胞元在芯材平面的构型。本文在固定胞元高度 $H$ 的基础上,以基准胞元参数为基础,单独改变 $L$ 、 $S$ 、 $V$ 、 $B$ 中的任何一个参数,计算其对应的隔声量和当量面密度,探索几何参数对M型皱褶夹芯板隔声性能的影响。

#### 3.1 Z形线步长 $L$ 对隔声性能的影响

M型皱褶芯材夹层板中Z形线的步长 $L$ 确定了胞元在此方向上的跨度,板长一定时, $L$ 越大,对应方向胞元数量越少,相应的层芯等效刚度和剪切刚度发生改变,进而对隔声性能产生影响。在声压垂直入射条件下,保持基准胞元其他尺寸不变( $S=8$  mm,  $V=8.2$  mm,  $B=3$  mm,  $H=10$  mm),只改变Z形线的步长 $L(6, 8, 12, 16$  mm),通过仿真计算得到了M型皱褶芯材夹层板的传声

损失随入射声压频率变化的规律,如图15所示,并计算其100~3 150 Hz频率下16个1/3倍频程频率隔声量,按照GB/T 50121—2005计权隔声量计算方法<sup>[22]</sup>,得到每种参数情况下的计权隔声量 $R_w$ 和当量面密度大小 $\rho_c$ 如表1所示。

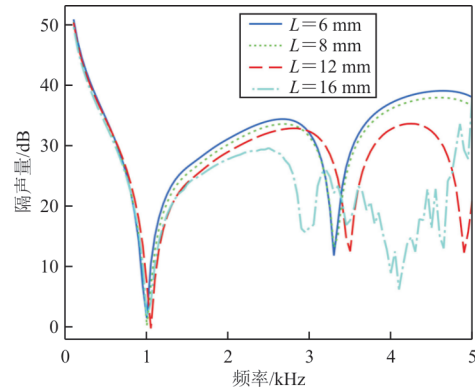


图15 Z形线步长 $L$ 对隔声性能的影响  
Fig. 15 The influence of Z-shaped line step length  $L$  on sound transmission loss

表1 Z形线步长 $L$ 对M型皱褶芯材夹层板隔声性能影响  
Table 1 The influence of Z-shaped line step length  $L$  on the sound transmission loss of M-type folded core sandwich panel

Z形线步长 $L$ /mm	计权隔声量 $R_w$ /dB	当量面密度 $\rho_c$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )
6	23.65	2.287
8	22.60	1.802
12	24.19	1.350
16	21.14	1.149

从图15和表1可以看出:当M型皱褶芯材的Z形线步长 $L$ 增大,其他构型参数不变时,在1 000 Hz以下低频段隔声量差异并不明显,而在1 000 Hz以后的高频段,隔声效果明显变差。从几何构型的角度分析,当其他参数不变时,随着 $L$ 的增大,整个结构越来越趋于一个平面,当 $L$ 无限大时, $\beta$ 角将趋于 $0^\circ$ ,中间层的皱褶结构成为平面,这时结构的刚度会很快下降,直接影响到M型皱褶芯材夹层板的隔声量。特别的,在高频段因刚度下降而导致的隔声量降低也愈加明显。 $L$ 增大到16 mm时,结构刚度下降导致隔声曲线在3 000~5 000 Hz开始波动,隔声性能急剧下降。从当量面密度的角度分析,由表1和式(8)可知,芯材当量面密度 $\rho_c$ 随 $L$ 的增大减小。一般情况下,质量和刚度是影响隔声性能的重要因素之一,夹层板的面密度越大,其隔声性能可能也会更好,这在一定程度上解释了其隔声量下降的原因。而 $L=12$  mm时

计权隔声量的增加则是由于其计算方式中更多地考虑了隔声频率特性曲线的隔声低谷和主观听感相符的隔声效果。因此在设计中如果更侧重于 2 000 Hz 以下的低频隔声效果,可以通过适当提高 Z 形线步长  $L$  来提升隔声效果;若对高频隔声有所要求,则需要尽可能小的 Z 形线步长  $L$  以提供足够的刚度。

### 3.2 M 形线步长 $S$ 对隔声性能的影响

作为皱褶芯层的重要结构参数,M 形线步长  $S$  对隔声量也具有相当的影响。从夹层板模型可以看出,在有限宽度的夹层板中,参数  $S$  决定了胞元在宽度方向上的数量。为了研究 M 形线步长  $S$  对夹层板结构的隔声性能影响,在基准胞元参数基础上 ( $L=8$  mm,  $V=8.2$  mm,  $B=3$  mm,  $H=10$  mm),仅调整 M 形线步长  $S$  (6, 8, 12, 16 mm) 进行仿真计算,得到 M 形线步长  $S$  对 M 型皱褶芯材夹层板传声损失的影响规律如图 16 所示,对应计权隔声量和当量面密度如表 2 所示。

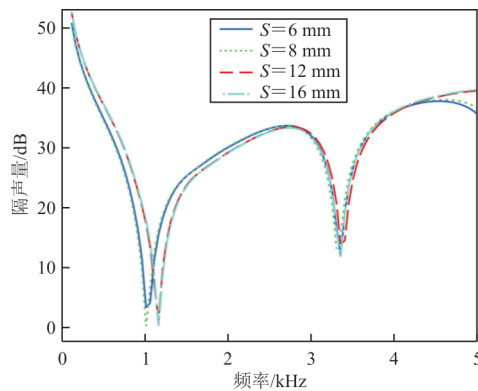


图 16 M 形线步长  $S$  对隔声性能的影响  
Fig. 16 The influence of M-shaped line step length  $S$  on sound transmission loss

表 2 M 形线步长  $S$  对 M 型皱褶芯材夹层板隔声性能影响  
Table 2 The influence of M-shaped line step length  $S$  on the sound transmission loss of M-type folded core sandwich panel

M 形线步长 $S$ /mm	计权隔声量 $R_w$ /dB	当量面密度 $\rho_e$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )
6	23.77	2.175
8	22.60	1.802
12	26.18	1.517
16	25.89	1.417

从图 16 和表 2 可以看出:随着 M 形线步长  $S$  的增加,隔声量曲线十分接近,总体来说,计权隔声量的变化趋势与 Z 形线步长  $L$  变化时影响相似,

不同的是较大的 M 形线步长  $S$  在高频段的隔声量略有提升,同时,结构传声损失的波谷略微向高频偏移,且低频范围隔声量提升较为明显。因此可以得出,结构刚度对 M 形线步长  $S$  的变化并不敏感。一般来说,由于芯材当量密度随  $S$  增大而减小,隔声量也应该减小,而结果显示计权隔声量随  $S$  增大相对于当量面密度较小情况均有所增大,得到了相反的结果,这说明 M 型皱褶芯材参数  $S$  对夹层板隔声规律影响大于质量定律,具有其自身特殊性。上述结果表明,在设计 M 型皱褶芯材结构隔声板时,可通过适当增大 M 线步长  $S$  降低材料密度,同时改善夹层板在低频范围的隔声性能。

### 3.3 M 形线折幅 $V$ 对隔声性能的影响

M 形线折幅  $V$  决定了皱褶结构胞元平面内的尺寸,其值越大,表明折幅越深,皱褶愈加明显。为了考察 M 型皱褶芯材夹层板面内尺寸对其隔声性能的影响,在基准胞元构型参数基础上 ( $L=8$  mm,  $S=8$  mm,  $B=3$  mm,  $H=10$  mm) 仅改变 M 形线折幅  $V$  (6.0, 8.2, 12.0, 16.0 mm),通过仿真计算得到隔声量曲线如图 17 所示,计算对应的计权隔声量和当量面密度如表 3 所示。

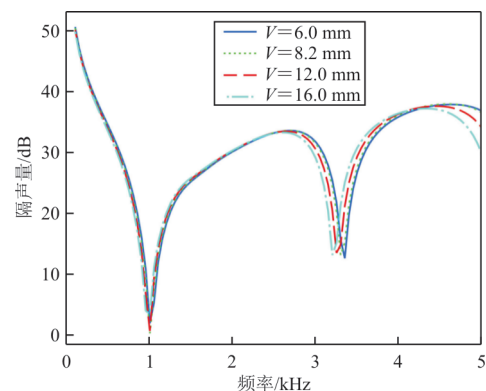


图 17 M 形线折幅  $V$  对隔声性能的影响  
Fig. 17 The influence of M-shaped line folding amplitude  $V$  on sound transmission loss

表 3 M 形线折幅  $V$  对 M 型皱褶芯材夹层板隔声性能影响  
Table 3 The influence of M-shaped line folding amplitude  $V$  on the sound transmission loss of M-type folded core sandwich panel

M 形线折幅 $V$ /mm	计权隔声量 $R_w$ /dB	当量面密度 $\rho_e$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )
6.0	23.28	1.597
8.2	22.60	1.802
12.0	22.30	2.208
16.0	21.91	2.667



从图 17 和表 3 可以看出:随着 M 形线折幅  $V$  的增大,结构当量面密度逐渐增大,而计权隔声量呈减小的趋势,同时较大的 M 形线折幅  $V$  在接近 5 000 Hz 时隔声量下降较为明显。从结构角度分析,计权隔声量的下降可以认为是由芯材结构变化引起的,当 M 形线折幅  $V$  减小时,M 形线的形状可以提供更多的支撑面和传力路径,使得声波能量更多地散射、吸收和损失,进而增加了隔声效果。从理论的角度通过计算分析,给出 M 型皱褶单元在  $xz$  平面内的当量剪切模量  $G_{xz}$  和  $yz$  平面内的当量剪切模量  $G_{yz}$  如式(12)~式(13)所示。

$$G_{xz} = \frac{S\delta_m H}{LL_\rho(B + \sqrt{(S-B)^2 + V^2})} G_m \quad (12)$$

$$G_{yz} = \frac{LH\delta_m(\sqrt{(S-B)^2 + V^2} + B)}{L_\rho^3 S} E_m \quad (13)$$

式中: $G_m$  和  $E_m$  分别为皱褶芯材板材的剪切模量和弹性模量。

随着  $V$  的增大, $G_{xz}$  减小而  $G_{yz}$  增大,两个平面内的剪切刚度变化趋势相反,共同决定了结构隔声量变化规律。在综合作用下,参数  $V$  在 6~16 mm 变化的过程中整体呈减小的趋势,因此设计时可以通过适当减小 M 线折幅  $V$  降低材料密度,同时改善夹层板的隔声性能。

### 3.4 M 形线间距 $B$ 对隔声性能的影响

M 形线间距  $B$  决定了倾斜平行四边形单元之间的距离,其取值范围在  $0 \sim S$  之间。当  $B=0$  时,相邻倾斜平行四边形单元结合,M 型皱褶单元退化为 V 型皱褶单元(如图 18(a)所示);当  $B=S$  时,胞元同一侧的倾斜平行四边形单元处于垂直矩形单元在同一平面内,退化为矩形皱褶结构(如图 18(b)所示)。

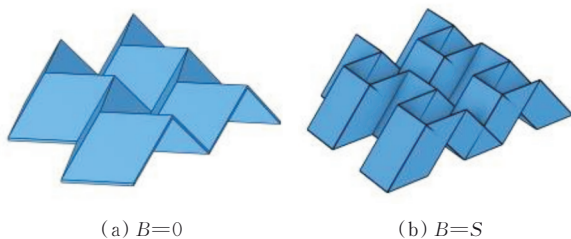


图 18  $B$  不同取值下的 M 型皱褶胞元

Fig. 18 M-type folded cells with different values of  $B$

为了探索 M 形线间距  $B$  对 M 型皱褶夹层结构隔声性能的影响,其他相关几何参数保持基准胞元参数不变( $L=8$  mm,  $S=8$  mm,  $V=8.2$  mm,  $H=10$  mm),  $0 \sim 5$  000 Hz 范围内当  $B$  为 2、3、5、7 mm 时的传声损失曲线(隔声量)如图 19 所示,得到的相应计权隔声量以及当量面密度结果如表 4 所示。

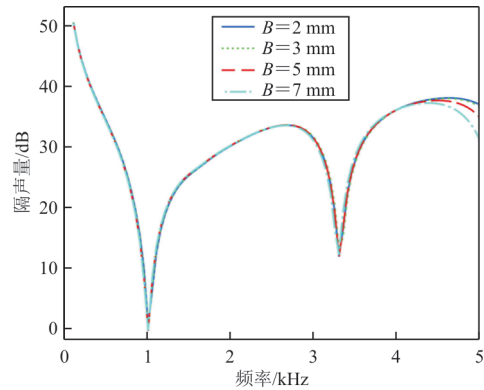


图 19 M 形线间距  $B$  对隔声性能的影响

Fig. 19 The influence of M-shaped line spacing  $B$  on sound transmission loss

表 4 M 形线间距  $B$  对 M 型皱褶芯材夹层板隔声性能影响  
Table 4 The influence of M-shaped line spacing  $B$  on the sound transmission loss of M-type folded core sandwich panel

M 形线间距 $B/\text{mm}$	计权隔声量 $R_w/\text{dB}$	当量面密度 $\rho_e/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
2	22.76	1.745
3	22.60	1.802
5	22.38	1.955
7	22.30	2.184

从图 19 和表 4 可以看出:M 形线间距  $B$  对结构的传声损失影响较小,在 4 500 Hz 以前,不同取值的隔声曲线基本重合,仅在曲线末端高频区域差别较大, $B$  取值越小,末端高频隔声效果越好。分析表 4 数据,M 型皱褶芯材的当量面密度随  $B$  取值的增大而增大,而计权隔声量呈小幅下降趋势。由此可知在低频范围内 M 型皱褶夹层结构的计权隔声量随着  $B$  的取值增大而减小,同时在接近高频范围时较小的 M 形线间距隔声效果更优。综合以上分析,在对 M 型皱褶芯材夹层板进行隔声设计时,较小的 M 形线间距不论在计权隔声量或重量方面都更优。

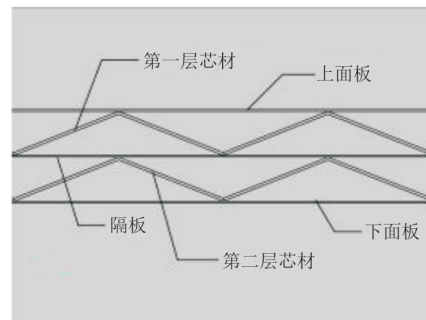
## 4 双层 M 型皱褶芯材铺设错位及铺设角度对隔声性能影响

基于单层芯材的 M 型皱褶夹层板结构几何特征参数对夹层板隔声性能的影响,本文对双层芯材的情况进行分析。定义沿 M 型皱褶胞元 Z 形线步长方向为  $L$  方向(图 7 中  $x$  方向),M 形线步长方向为  $S$  方向(图 7 中  $y$  方向),以  $L$  方向的一个胞元周期长度  $2L$  为  $T_L$ , $S$  方向的一个胞元周期长度  $2S$  为  $T_S$ 。对于一个胞元,其在面板平面内  $L$ 、 $S$  方向上半周期长度所确定的交点  $(0.5T_L, 0.5T_S)$  为胞元的几何中心点,垂直面板平面通过此点的轴线称为旋转轴。上层芯材绕某一胞元旋转轴逆时针转过的角度为铺设角  $\varphi$ ,定义此胞元为旋转轴胞元。由于皱褶芯材是由皱褶胞元在  $L$ 、 $S$  两个方向上周期排布形成的,因此对于铺设双层芯材,上层芯材就可以相对于下层芯材在  $L$  或  $S$  方向进行一个周期以内的错位铺设(错位整数个胞元周期就相当于上下层芯材同位铺设),以及上层芯材绕旋转轴胞元的旋转轴进行旋转,改变上下层芯材的相对铺设角度。当下层芯材位置以及角度确定后,相对下层改变上层芯材错位周期或铺设角度,都会导致皱褶芯层传力结构以及夹层板刚度的改变,进而影响夹层板的隔声性能。本文以上下两层芯材同位铺设(即上层芯材在  $L$  和  $S$  方向上相对于下层芯材均没有错位)为基础,对两种情况分别进行讨论:当两层芯材铺设角度相同时,使上层芯材仅在  $L$  或  $S$  方向相对下层错位  $0.5T_L$  或  $0.5T_S$ ,探索不同方向的错位铺设对隔声性能影响,并与相同面密度情况下的单层芯材 M 型皱褶夹层板的隔声曲线进行比较,分析产生差异的原因;当同位铺设时,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内等间隔改变上层芯材铺设角度,探索其隔声性能随芯材铺设角度变化的情况。

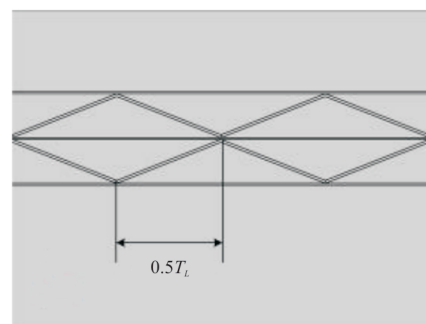
### 4.1 芯材错位对隔声性能影响

由于是双层芯材皱褶夹层板,必须在两层芯材中间加一层隔板,方便固定皱褶芯材。本文对同位铺设和  $L$ 、 $S$  两个方向的单独错位铺设进行隔声量数值仿真分析。对于同位铺设,相当于上下层芯材在  $L$  和  $S$  方向上每个胞元周期对齐;对于错位铺设,以  $L$  方向错位举例,则是保持上下层胞元

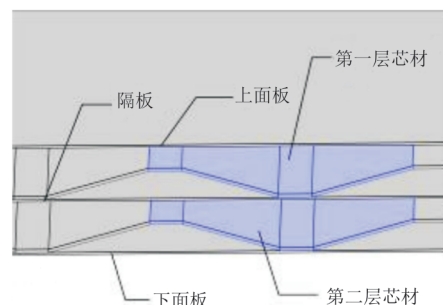
在  $S$  方向的胞元周期内一一对齐,而上层芯材的胞元铺设周期在  $L$  方向上与下层胞元错位  $0.5T_L$ , $S$  方向错位与之同理。不同的铺设方式示意如图 20 所示。为了将双层芯材皱褶夹层板隔声量与单层芯材进行对比,通过参数设计使双层芯材的面密度与基准单层芯材的面密度相等,同时将上下面板厚度各分配  $0.1 \text{ mm}$  到两层芯材中间,形成中间隔板,这样就保持了夹层板结构中面板总厚度不变。单双层芯材皱褶夹层板胞元具体参数如表 5 所示,其中面板厚度对应着上一中一下三个面板的厚度。需要注意的是同位铺设和不同方向错位铺设胞元参数完全相同,仅铺设位置不同,因此不在表中区分。



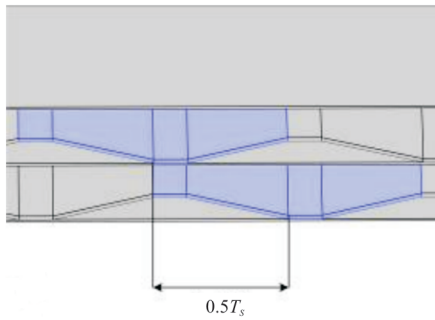
(a)  $L$  方向同位铺设



(b)  $L$  方向错位  $0.5T_L$



(c)  $S$  方向同位铺设



(d) S方向错位  $0.5T_s$

图 20 双层芯材皱褶夹层板芯材同、错位铺设方式  
Fig. 20 Same position and staggered laying methods of core for double-layer core folded sandwich panel

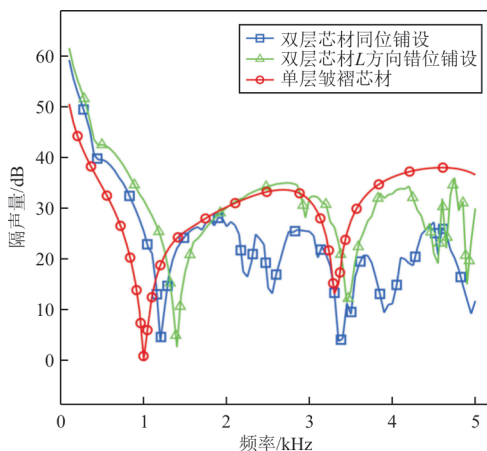
表 5 单、双层芯材皱褶夹层板参数  
Table 5 Parameters of single and double-layer core folded sandwich panel

层数	H/mm	L/mm	S/mm	V/mm
单层	10	8.00	8.00	8.2
双层	5	11.89	11.86	6.0

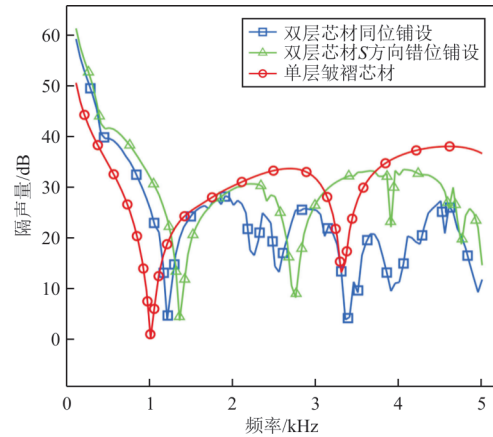
  

层数	B/mm	芯材材料厚度/mm	面板厚度/mm	芯材面密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )
单层	3	0.3	0.3+0.3	1.802
双层	3	0.3	0.2+0.2+0.2	1.802

按照上述参数分别对两个方向错位铺设和同位铺设的双层 M 型皱褶芯材夹层板进行有限元建模和隔声量仿真,得到声传输损失曲线如图 21 所示。



(a) L方向同位、错位铺设及单层芯材隔声曲线对比



(b) S方向同位、错位铺设及单层芯材隔声曲线对比

图 21 双层芯材不同方向错位铺设隔声曲线  
Fig. 21 Sound transmission loss curve of double layer core with different directions of staggered laying

从图 21 可以看出:相比于单层芯材,双层芯材的第一个隔声波谷频率更高,且在低频段(0~1 000 Hz),双层芯材的隔声量明显好于单层。而在双层同位铺设时,隔声曲线在 2 000 Hz 产生波动,标志着随着频率升高而被激发了更多的共振模态。这是由于双层皱褶芯材上下面板较薄,同时为保持与单层芯材面密度相等,双层芯材中的胞元数量减少,导致夹层板的抗弯刚度下降,因此在中高频段隔声曲线不再像单层芯材隔声曲线那样平滑,产生了更多的共振模态,隔声性能下降。而 L 方向错位铺设情况下则到 4 000 Hz 以后隔声性能才开始明显下降,因此 L 方向错位铺设在一定程度上能够抑制导致隔声效果下降的共振模态被激发,从而在中低频段(0~3 500 Hz)表现出较好甚至优于单层芯材皱褶夹层板的隔声能力。对于低频段隔声(0~1 000 Hz),相同面密度的情况下双层芯材错位铺设和同位铺设的隔声能力均优于单层芯材皱褶夹层板,而高频段(3 500~5 000 Hz)则单层芯材皱褶夹层板最优。

同样的,S方向错位铺设的双层芯材皱褶夹层板在低频段(0~1 000 Hz)隔声效果优于单层芯材,且相比于同位铺设隔声效果有了大幅提升,与 L 方向错位不同的是,S方向错位铺设的双层芯材皱褶夹层板在 3 000~4 500 Hz 隔声性能相对稳定,其第一个隔声波谷提前在 2 800 Hz 左右出现,在 4 500 Hz 以后隔声性能开始下降。

综上所述,双层芯材皱褶夹层板在低频区域(0~1000 Hz)隔声性能均优于等面密度情况下的单层芯材皱褶夹层板。而对于双层芯材,不同方向的错位铺设相比于同位铺设均能在很大程度上改善隔声性能。 $L$ 方向的错位铺设在中低频段(0~3 500 Hz)的隔声性能较好甚至优于单层芯材皱褶夹层板,因此在注重中低频段隔声而又对质量要求严苛时,可以考虑双层 $L$ 方向错位铺设的方式进行隔声; $S$ 方向错位铺设的隔声性能则在3 000~4 500 Hz的中高频段表现更优。由此可以得出,对于双层芯材M型皱褶夹层板,不同的铺设位置对其隔声性能影响较大,在设计时要根据隔声频率区间选择芯材的错位方式。

## 4.2 芯材铺设角度对隔声性能影响

对于芯材胞元铺设角度影响的研究,本文以下层芯材 $0^\circ$ 铺设的胞元为基础,将上层芯材绕旋转轴胞元的旋转轴逆时针转过的角度设为铺设角 $\varphi$ 。为方便对比,保持上下层皱褶芯材参数与表5中的双层皱褶芯材参数相同,即面密度不变,令上层芯材中位于 $L$ 、 $S$ 方向的第一个胞元作为旋转轴胞元,仅使上层芯材绕其旋转轴逆时针旋转铺设角 $\varphi$ ,并通过阵列旋转后的胞元,补齐芯材旋转产生的空位,同时删除夹层板边缘以外的多余胞元,得到不同芯材铺设角下的双层芯材变角度夹层板模型,用这种方法建立上层芯材铺设角度分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$ 的夹层板模型,典型铺设如图22所示,并分别计算在100~5 000 Hz范围内的传声损失,为了更加直观地观察计权隔声量随铺设角度变化规律并进行预测,对计算数据进行三次样条曲线拟合,绘制计权隔声量与铺设角度关系的预测曲线如图23所示。

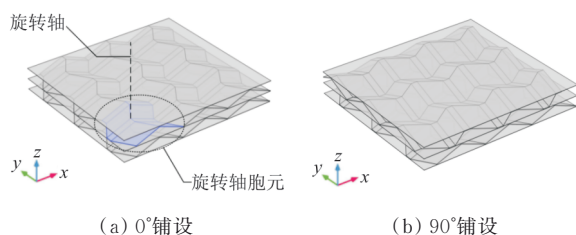


图22 双层芯材M型皱褶夹层板典型芯材铺设角度  
Fig. 22 Typical laying angle of M-type folded sandwich panel with double-layer core

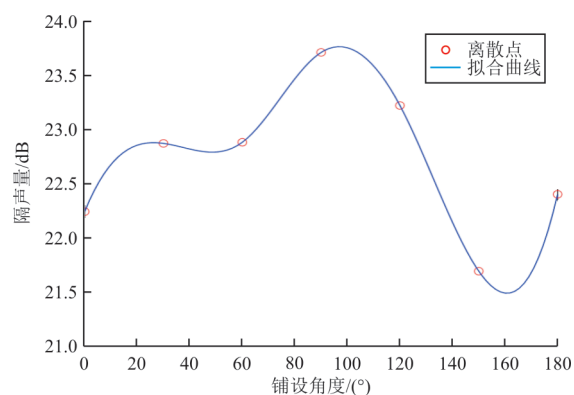


图23 双层芯材M型皱褶夹层板计权隔声量随芯材铺设角度变化趋势

Fig. 23 The trend of average sound transmission loss of M-type folded sandwich panel with double-layer core as a function of the relative laying angle of the core axis

从图23可以看出:改变芯材铺设角度同样可以增大双层芯材皱褶夹层板的计权隔声量,且相比于其他角度,当上下两层芯材垂直铺设时隔声效果最优。这一规律与多层复合材料纤维铺层有着相似之处,在复合材料对铺层性能的影响中,铺层角度的选择与材料的刚度有很大关系。若采用 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 方向的单向铺层结构,弯曲时不易破裂,但由于其横向的合成刚度较弱,刚度明显低于 $\pm 45^\circ$ 铺层结构。因此可以将单层排列的胞元看成某一方面刚度较大的单层板,而另一垂直方向刚度的不足则由垂直铺设的单层弥补,因此 $90^\circ$ 垂直铺设隔声性能更好。同时,将上述芯材相对垂直铺设的隔声曲线与芯材在 $L$ 、 $S$ 两个方向错位铺设和同位铺设(即双层芯材相对 $0^\circ$ 铺设)的隔声曲线汇总在一个图里进行对比分析,如图24所示。

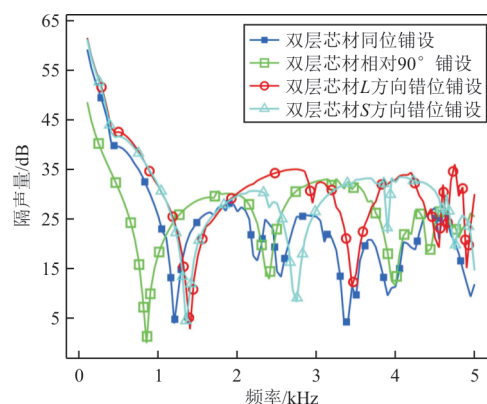


图24 双层芯材相对 $90^\circ$ 铺设与 $L$ 、 $S$ 方向错位铺设对比  
Fig. 24 Comparison of  $90^\circ$  relative laying of the axis of the double-layer core with staggered laying in the  $L$  and  $S$  directions



从图24可以看出:双层芯材相对 $90^\circ$ 铺设隔声曲线的第一个隔声波谷出现得更早,在1 000 Hz以下的低频区域隔声效果不如双层芯材两个方向的错位铺设和同位铺设,然而在1 500 Hz以后的区域,双层芯材相对 $90^\circ$ 铺设的隔声峰值与趋势和错位铺设相似,同时也改善了2 000 Hz以后双层芯材同位铺设隔声性能下降、隔声曲线波动的问题;双层芯材 $90^\circ$ 铺设相对于同位铺设(即双层芯材相对 $0^\circ$ 铺设)隔声效果有一定的提升,但提升效果不如双层芯材两个方向的错位铺设。总的来说,对于相同面密度的双层芯材皱褶夹层板,芯材铺设角度对其隔声性能有一定的影响,在使用双层芯材皱褶夹层板进行隔声时,可以通过调整使芯材胞元垂直铺设来增大隔声量。虽然双层芯材皱褶夹层板的加工制作比较麻烦,但是其能够通过改变芯材铺设角度来改善隔声效果,对噪声控制有较高要求的应用上具有重要意义。

## 5 结 论

1) 当皱褶芯材胞元其他构型参数相同时,较小的M形线折幅 $V$ 和M型线间距 $B$ 可提供更好的隔声效果,并减小芯层的当量面密度。

2) Z形线步长 $L$ 和M形线步长 $S$ 计权隔声量变化趋势相似,但是在2 000 Hz以上的高频区域的隔声效果对Z形线步长 $L$ 的变化更加敏感,增大 $L$ 会导致高频隔声性能变差。固定其他胞元参数不变,适当地增大M形线步长 $S$ 可以降低芯材当量面密度,同时改善皱褶芯材夹层板在低频范围内的隔声性能。而对于Z形线步长 $L$ 的设计则需要考虑重点关注的隔声区间。

3) 对于双层芯材M型皱褶夹层板,当两层芯材铺设角度相同时,胞元沿 $L$ 方向错位铺设总体隔声性能优于相同面密度情况下的单层芯材M型皱褶夹层板,且弥补了双层芯材同位铺设时在中高频(2 000~5 000 Hz)由于共振模态被激发导致的隔声效果迅速下降的缺陷,同时在中低频(0~3 500 Hz)隔声性能表现优异,而沿 $S$ 方向错位铺设则在3 000~4 500 Hz隔声曲线更加稳定;当芯材相对铺设角度在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 范围内变化时,计权隔声量变化趋势曲线以 $90^\circ$ 铺设为中心近似呈对称分布,并且上下层芯材相对 $90^\circ$ 铺设隔声效果最好。

## 参 考 文 献

- [1] TANG Y, LI F, XIN F, et al. Heterogeneously perforated honeycomb-corrugation hybrid sandwich panel as sound absorber[J]. *Materials Design*, 2017, 134: 502-512.
- [2] 任树伟, 辛锋先, 卢天健. 蜂窝层芯夹层板结构振动与传声特性研究[J]. *力学学报*, 2013, 45(3): 349-358.  
REN Shuwei, XIN Fengxian, LU Tianjian. Vibroacoustic performance of simply supported honeycomb sandwich panels [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(3): 349-358. (in Chinese)
- [3] 纪双英, 郝巍, 刘杰. 共振吸声结构在航空发动机上的应用进展[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(3): 302-308.  
JI Shuangying, HAO Wei, LIU Jie. Application progress of resonance sound absorption structure in aero engines[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(3): 302-308. (in Chinese)
- [4] 邓云飞, 曾宪智, 周翔, 等. 复合材料皱褶夹芯结构研究进展[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12): 2966-2983.  
DENG Yunfei, ZENG Xianzhi, ZHOU Xiang, et al. Research progress for the composite sandwich structure with foldcore [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 2966-2983. (in Chinese)
- [5] KHALIULIN V L, DESYATOV V E. On the calculation of process characteristic for the production of folder filler panels[J]. *Aeronautical Technique*, 1992, 4: 46-50.
- [6] TALAKOV A M. Investigation of folded structure geometry with double curvature [J]. *Russian Aeronautics*, 2010, 53(3): 334-338.
- [7] 杜响桐. 曲面折纸型轻质结构设计及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
DU Yuntong. Design and mechanical performance of lightweight structures based on curved-crease origami[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] GATTAS J M, WU W, YOU Z. Miura-base rigid origami: parameterizations of first level derivative and piecewise geometries [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2013, 135: 111011.
- [9] KHALIULIN I V. Cyclic folding of composite zigzag structures and calculating of equipment parameters [J]. *Russian Aeronautics*, 2017, 60(2): 278-285.
- [10] 王志瑾, KHALIULIN V I, SKRIPKIN E. 皱褶结构芯格构型的几何设计方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2002(1): 6-11.  
WANG Zhijin, KHALIULIN V I, SKRIPKIN E. Geometry design method of folded structure [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002(1): 6-11. (in Chinese)
- [11] ZHOU X, WANG H, YOU Z. Mechanical properties of Miura-based folded cores under quasi-static loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 82, 296-310.
- [12] 李丝丰, 王志瑾. V型皱褶芯材夹层板对流换热性能评价及优化[J]. *航天器环境工程*, 2022, 39(4): 346-354.  
LI Sifeng, WANG Zhijin. The evaluation and the optimization of convective heat transfer performance of V-pattern folded core sandwich panels [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(4): 346-354. (in Chinese)