

# 三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能研究<sup>\*</sup>

刘杰 林春贯 文桂林<sup>†</sup>

(广州大学 机械与电气工程学院 特种装备先导技术研究中心 广州 510006)

**摘要** 极小曲面夹芯结构具有高比刚度、良好吸能等优点,在实际工程中展现了广泛的应用前景,而其隔声性能并未得到充分的研究.基于此,利用数值分析和试验方法研究了 D 型和 I-WP 型三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能.首先,基于声振耦合理论,建立极小曲面夹芯结构有限元模型;然后使用声阻抗管法验证了有限元模型的精度;最后,利用验证后的有限元模型系统分析了夹芯厚度、面板厚度、弹性模量、极小曲面常数和周期常数等重要参数对极小曲面夹芯结构隔声性能的影响.研究发现 I-WP 型极小曲面夹芯结构在 4400Hz-5000Hz 频段,隔声量可达 60dB.本研究有望为高速列车等领域轻质结构被动隔声提供新的解决方案.

**关键词** 三重周期极小曲面, 夹芯结构, 隔声性能, 声阻抗管法

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-027

## 引言

高速列车等运载装备在作业时,机械动力、空气摩擦等会产生高分贝噪声,这些噪声会严重影响驾驶员和乘客的身心健康,因而,对其进行隔声降噪十分有必要<sup>[1]</sup>.此外,为了满足实际服役环境的需求,高速列车等运载装备关键结构设计对比刚度、比模量等要求越来越高<sup>[2]</sup>.因此,高比刚度、高比模量以及良好隔声性能的轻质结构是设计人员追求的目标.

三明治夹芯结构是典型的高比刚度和高比模量轻质结构,其面内、面外准静态和动力学性能已得到了广泛的研究<sup>[3,4]</sup>,而其在隔声降噪方面的研究相对较少.de Melo Filho 等<sup>[5]</sup>研究了一种局域共振型声子晶体的夹芯结构,提出了预测超材料双板夹芯结构声传递损失的方法.Wen 等<sup>[6]</sup>设计了一种超轻立方芯夹层结构,通过数值方法和试验研究了该结构的隔声性能.Liu 等<sup>[7]</sup>利用数值和试验手段研究了空心 and 实心金字塔夹芯点阵结构隔声性能,并利用结构优化方法进一步提升了其中、高频段的隔声能力.Wang 等<sup>[8]</sup>对实心金字塔点阵夹芯结构的隔声性能进行了理论研究;将实心金字塔点阵夹芯结构等效为二维周期性欧拉-伯努利梁,并利用空间调和展开式和虚功原理得到其周期控制方程.

Wen 等<sup>[9]</sup>研究了六个半球壳结构相互嵌入组成的新型夹芯结构的隔声特性.Guo 等<sup>[10]</sup>基于 Reissner 夹层板理论和声振耦合构建夹层板控制方程,研究了沙漏型点阵夹芯结构的声传递率.Li 等<sup>[11]</sup>研究了具有六边形、内凹六边形和矩形混合胞芯的夹芯板,采用谱元法在较宽的频率范围内准确地预测了夹芯结构的隔声性能.虽然上述夹芯结构具有良好的被动隔声性能,但同样存在一定的局限性:①对于高速列车等运载装备,人耳比较敏感的频段主要在 250Hz~5000Hz,而现有夹芯结构在该频段的隔声性能还需进一步提升;②现有夹芯结构在刚度和隔声性能综合能力方面还有较大的改善空间.基于三重周期极小曲面的夹芯结构,由于夹芯独特的几何拓扑构型,具有更高的比刚度和比模量,在吸能、缓冲、吸声、压电等领域已经证明了其优良的性能<sup>[12-18]</sup>,但其隔声性能还未得到充分的研究.

因此,利用数值和试验方法研究三重周期极小曲面夹芯结构隔声特性.首先,建立基于三重周期极小曲面的夹芯结构的声振耦合响应仿真模型,分析和预测极小曲面夹芯结构的隔声特性.其次,通过 3D 打印技术制造三重周期极小曲面夹芯试件,并在声阻抗管中进行隔声试验验证仿真模型.最后,系统地研究极小曲面夹芯结构的夹芯厚度、面板厚度、弹性模量和极小曲面常数对极小曲面夹芯

2021-03-02 收到第 1 稿,2021-04-14 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(11902085, 11832009)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: glwen@gzhu.edu.cn

结构的隔声特性的影响.

## 1 三重周期极小曲面几何模型与有限元模型建立

### 1.1 几何建模

利用数学软件 Mathematica, 基于式(1)和式(2)分别建立 I-WP 和 D 型极小曲面.

$$\begin{aligned} \Psi_D = & \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) \\ & - \sin(\omega_x x) \sin(\omega_y y) \sin(\omega_z z) = C \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{I-WP} = & 2[\cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) + \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) + \\ & \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y)] - [\cos(2\omega_x x) + \cos(2\omega_y y) + \\ & \cos(2\omega_z z)] = C \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 2\pi/T$ ,  $T$  为单胞尺寸,  $C$  为常数, 可控制极小曲面不同空间几何拓扑构型. 图 1(a) 和图 1(b) 分别为常数  $C$  取值  $-0.4, -0.2, 0, 0.2$  和  $0.4$  时 I-WP 和 D 型极小曲面的空间几何拓扑构型.

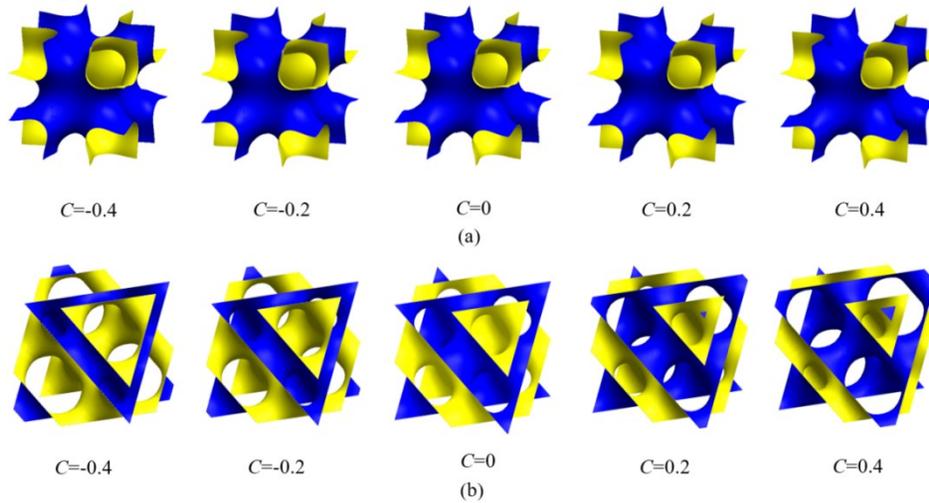


图1 不同极小曲面常数  $C$  下的 D 型和 I-WP 型极小曲面: (a) I-WP 型极小曲面; (b) D 型极小曲面

Fig.1 D-type and I-WP type minimal surfaces with different constants  $C$ : (a) I-WP type minimal surfaces; (b) D type minimal surface

考虑声阻抗管对安装试样的要求, 三重周期极小曲面夹芯结构设计为圆柱状外形. 图 2(a) 和图 2(b) 分别为 D 型和 I-WP 型三重周期极小曲面夹芯结构的几何建模过程. 在 Mathematica 中建立圆柱状外形的三重周期极小曲面夹芯, 并覆盖上、下面板构成完整的夹芯结构. 其中, 三重周期极小曲面夹芯结构保持夹芯部分包含一个完整单胞, 其结构参数为:  $d$  为面板厚度,  $t$  为夹芯厚度,  $T$  为极小曲面单胞周期,  $h$  为夹芯结构整体厚度, 即  $h = T + 2d$ ,  $R$  为夹芯结构圆柱外形直径, 即声阻抗管的内径. 三重周期极小曲面夹芯结构面板厚度  $d$  为 1mm, 夹芯厚度  $t$  为 1mm, 极小曲面单胞周期  $T$  为 20mm, 夹芯结构圆柱外形直径  $R$  为 100mm, 极小曲面常数  $C$  为 0.

### 1.2 有限元模型

利用商用软件 Virtual.lab 中的直接声振耦合模块, 建立夹芯结构与入射空气层、辐射空气层的流固耦合模型, 以直接声振耦合计算夹芯结构在入射声波激励下的声振响应, 其中, 忽略面板中间的空气层. 图 3 给出了 I-WP 型三重周期极小曲面夹芯结构的有限元模型. 仿真的频段为 250Hz~1600Hz, 步长为 25Hz. 在夹芯前后分别建立前、后空气层并

生成声学包络网格, 以自动匹配层 (AML) 方式设置入射面和辐射面, 模拟声波入射和完全辐射. 声源模拟声阻抗管从入射面以平面波形式指向辐射面入射, 声压为 1Pa, 声速为 340m/s, 空气密度为  $1.225\text{kg/m}^3$ . 考虑胶黏剂引入阻尼对结构声振耦合的影响, 设夹芯结构阻尼为 0.1<sup>[9]</sup>. 夹芯结构的上、下面板分别与入射、辐射空气层的内面耦合, 使声波可以从空气层传递至上面板处激励夹芯结构振动, 下面板可以通过耦合面向辐射空气层辐射声波. 夹芯结构面板边缘固定, 声波的能量通过直接声振耦合从入射空气层传递并转化为结构振动, 结构振动会向辐射空气层辐射声波, 最终在辐射面以 AML 形式进行无反射的声波辐射消耗.

三重周期极小曲面几何构型复杂, 较大的单元尺寸会影响有限元计算精度, 需要在一个波长内包含 6 个以上的单元. 因此, 综合考虑有限元计算效率和精度, 夹芯结构的网格尺寸划分约为 1mm. 夹芯结构在 Hypermesh 中划分网格, 网格类型为 Pshell 三角形壳单元; 其中, D 型极小曲面夹芯的节点数为 45999, 单元数为 93300, I-WP 型极小曲面夹芯的节点数为 44270, 单元数为 89330. 同时在夹

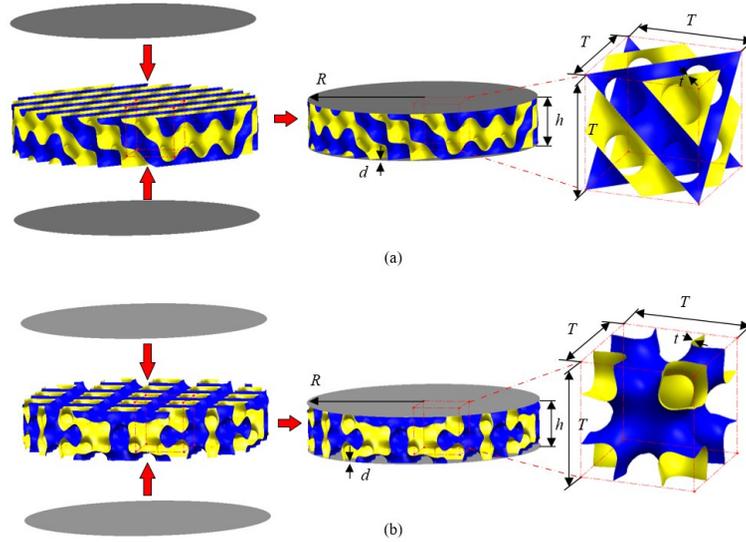


图2 极小曲面夹芯结构几何建模:(a) D型极小曲面夹芯结构;(b) I-WP型极小曲面夹芯结构

Fig.2 Geometrical modeling of the sandwich structure with minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

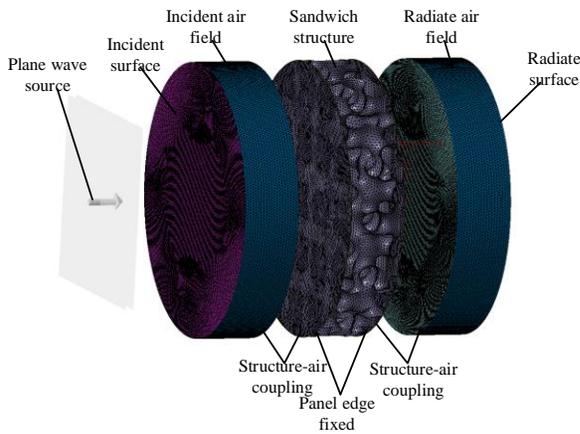


图3 I-WP型极小曲面夹芯结构直接声振耦合声学有限元模型  
Fig.3 Direct acousto-vibration coupled acoustic finite element model of the sandwich structure with I-WP type minimal surface core

芯结构前后建立圆柱状实体空气层,网格类型为 Psolid 四面体单元,节点数为 176756,单元数为

861506. 夹芯结构使用光敏树脂材料构成,其杨氏模量、泊松比和密度分别为 145.1MPa、0.4 和 1160kg/m<sup>3</sup>. 其中杨氏模量由图 4 所示的材料拉伸试验确定.

## 2 三重周期极小曲面夹芯结构试样制备和隔声试验研究

图 5(a)和图 5(b)分别给出了 D 型和 I-WP 型三重周期极小曲面夹芯结构试样制备过程. 利用 3D 打印机(型号: Form2, Formlabs)分别打印出上面板、下面板和三重周期极小曲面夹芯,打印材料为光敏树脂(Grey V4). 首先将上面板与三重周期极小曲面夹芯通过胶黏剂(BYB-A001)粘成一体,待固化后翻转,再将下面板与三重周期极小曲面夹芯粘接并等待固化.

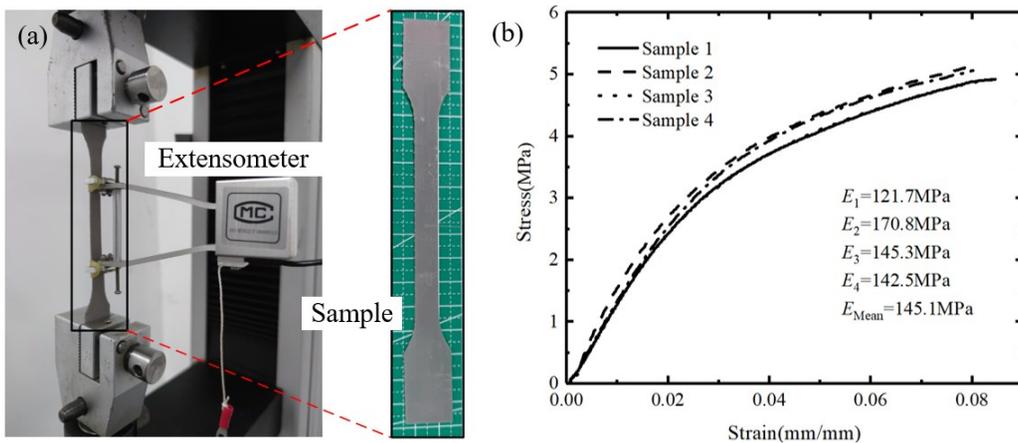


图4 材料弹性模量测试:(a) 拉伸试验安装示意图;(b) 真实应力应变曲线

Fig.4 Testings for Young's modulus of the material used : (a) Installation of the tensile test; (b) the true stress-strain curve

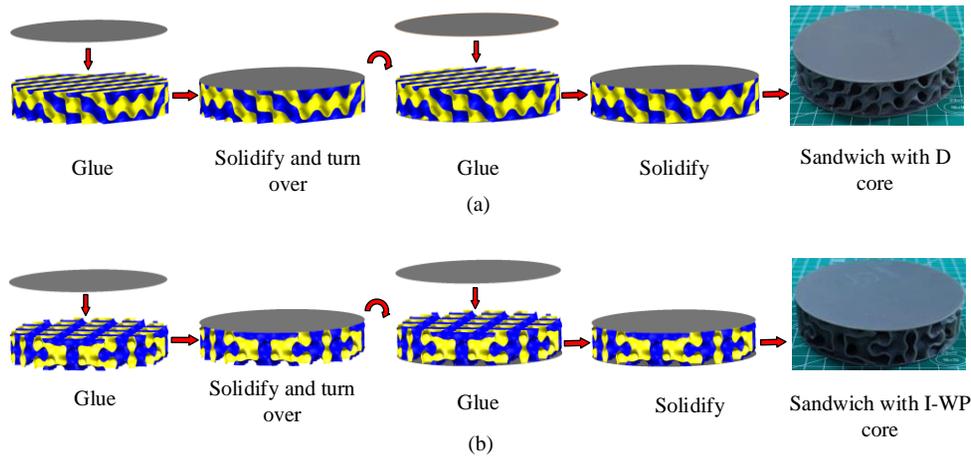


图 5 极小曲面夹芯结构试样制备流程:(a) D型极小曲面夹芯结构;(b) I-WP型极小曲面夹芯结构

Fig.5 Sample manufacturing process of the sandwich structures with minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

利用声阻抗管(BSWA SW422)对三重周期极小曲面夹芯结构进行隔声性能研究.试验设备及试验原理如图 6 所示,其中,红色箭头与线表示设备间的连接与信号传递.PC 机通过测试软件和信号分析仪(MC3642)生成白噪声信号,功率放大器(PX3)将白噪声放大并通过扬声器辐射至声阻抗管内.扬声器发出的声波在声阻抗管中形成驻波,

在声阻抗管内的试样两端分别安装两个传声器(BSWA MPA416),传声器记录试样两端的声压及相位信号,最终在信号分析仪中分析处理,计算试验样品的声传递损失.在试验开始前需对四个传声器分别用声校准器(CA111)进行校正,校准四个通道的灵敏度.试验样品安装时用凡士林将样品和声阻抗管间隙密封,防止漏声.

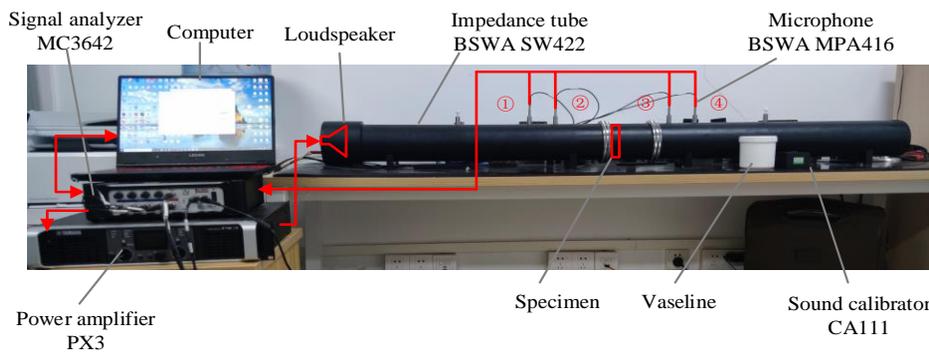


图 6 声阻抗管试验设备及工作原理

Fig.6 Equipment and working principle of the acoustic impedance tube

试验过程中每个样品测试三次,并取平均值作为一次试验数据,两种极小曲面夹芯结构均制造多个试样,并多次试验取均值减少误差,试验与仿真的对比结果如图 7.图 7(a)和图 7(b)分别为 D 型和 I-WP 型极小曲面夹芯结构的声传递损失试验值与仿真对比.在 250Hz~300Hz 频段,两种夹芯结构的隔声曲线趋势均随频率升高而上升,这是因为在低频段声波穿透力更强.对于 D 型极小曲面夹芯结构,有限元分析和试验结果分别在 600Hz、1400Hz 和 590Hz、1400Hz 左右出现两个隔声低谷;而 I-WP

型极小曲面夹芯结构分别出现在 590Hz、1300Hz 和 590Hz、1380Hz 左右.可以发现对于两种夹芯结构,数值仿真和试验得到的基频和第二阶固有频率结果相近;此外,前者比后者有较高的固有频率.再者,综合考虑试样制造误差、低频噪声难以隔绝,声学试验环境等因素,数值仿真和试验结果有较好的趋势一致性,可以认为有限元模型有较高的精度.需要指出的是,实验的频段选择主要受限于实验条件,即使用的声阻抗管的测试频段范围为 250Hz 至 1600Hz.

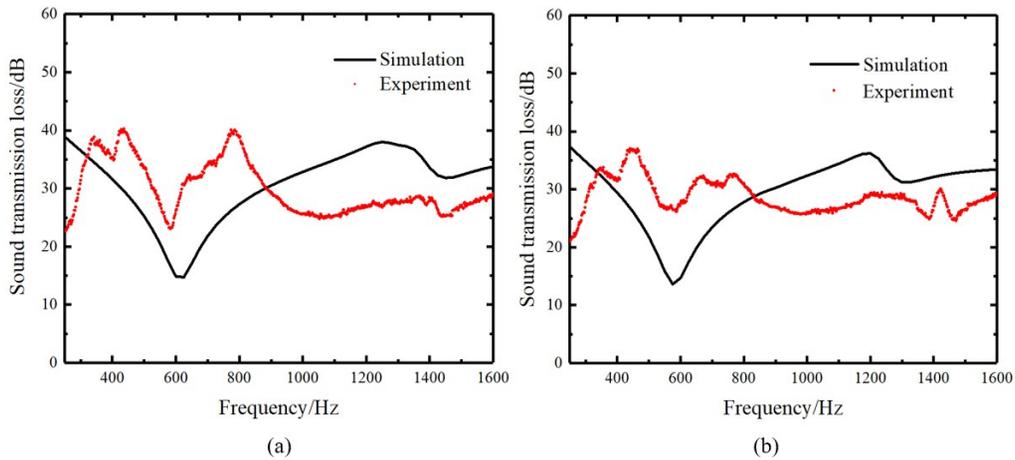


图7 声学试验与仿真结果对比:(a) D型极小曲面夹芯结构;(b) I-WP型极小曲面夹芯结构  
Fig.7 Comparison of the experiments and simulations: (a) sandwich structure with D-type minimal surface;  
(b) sandwich structure with I-WP type minimal surface

### 3 关键参数对隔声性能影响分析

利用上述验证的有限元模型进一步研究D型和I-WP型极小曲面夹芯结构关键参数对其隔声性能的影响.其中,参数包括夹芯厚度 $t$ ,面板厚度 $d$ ,弹性模量 $E$ ,极小曲面常数 $C$ 和周期常数 $T$ .需要指出的是,高速列车等运载装备运行时对人体产生健康影响的噪声的频段分布主要集中在5000Hz以下<sup>[19]</sup>,因此取分析的频段为250Hz~5000Hz.

#### 3.1 夹芯厚度 $t$

保持参数 $T$ 、 $d$ 、 $E$ 和 $C$ 分别为20mm、1mm、145MPa和0不变,分析D型和I-WP型极小曲面夹芯结构的夹芯部分厚度 $t=0.7\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $1.3\text{mm}$ 时

的声传递损失.由图8(a)可知,对于D型三重周期极小曲面夹芯结构,增加夹芯厚度可以提高250Hz~4000Hz频段隔声量,但在4000Hz~5000Hz频段会降低隔声量,增加0.3mm夹芯厚度可提高平均隔声量(ATL)约2dB.由图8(b)可知,在250Hz~2500Hz频段,增加夹芯厚度可以提高I-WP型三周期极小曲面夹芯结构的隔声量,而在2500Hz~5000Hz频段效果则不明显,增加0.3mm的夹芯厚度 $t$ 提升约1dB的ATL.D型与I-WP型极小曲面夹芯结构在250Hz~5000Hz频段内有较大频段均有较好隔声性能,且I-WP型极小曲面夹芯结构在4050Hz其隔声量可达60dB,这比现有研究具有更好的隔声效果<sup>[20]</sup>.

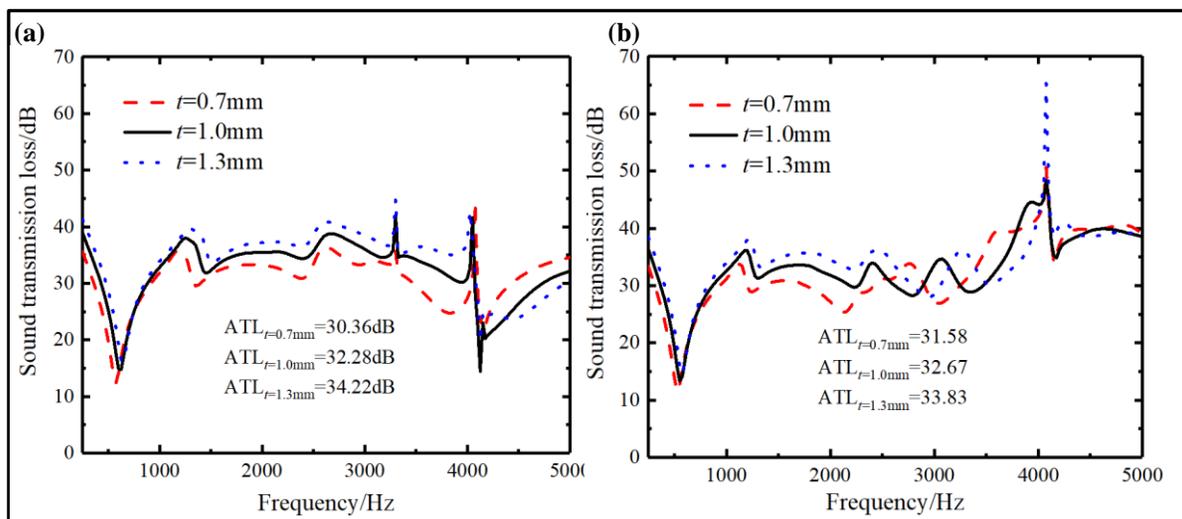


图8 夹芯厚度 $t$ 对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响:(a) D型极小曲面夹芯结构;(b) I-WP型极小曲面夹芯结构

Fig.8 Influence of the sandwich core thickness  $t$  on the sound insulation performance of sandwich structures with the triply periodic minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

### 3.2 面板厚度 $d$

保持参数  $T$ 、 $t$ 、 $E$  和  $C$  分别为 20mm、1mm、145MPa 和 0 不变,研究面板厚度在 0.7mm、1mm 和 1.3mm 时对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能的影响.由图 9(a)可知,提高面板厚度会增加 D 型极小曲面夹芯结构在 250Hz~5000Hz 的隔声量,且频率越高效果越显著;而从图 9(b)可知,I-WP 型极小曲面夹芯结构在 250Hz~2500Hz 增加面板厚度

可以提高隔声量,而高于 2500Hz 则效果不明显.D 型和 I-WP 型极小曲面夹芯结构在面板厚度从 0.7mm 增加到 1mm 时 ATL 分别增加约 2.4dB 和 1.7dB,但面板厚度从 1mm 增加至 1.3mm 时 ATL 分别增加约 1.4dB 和 0.6dB,由此可知 D 型和 I-WP 型极小曲面夹芯结构面板厚度在高于 1mm 时对隔声性能的影响大幅减少.

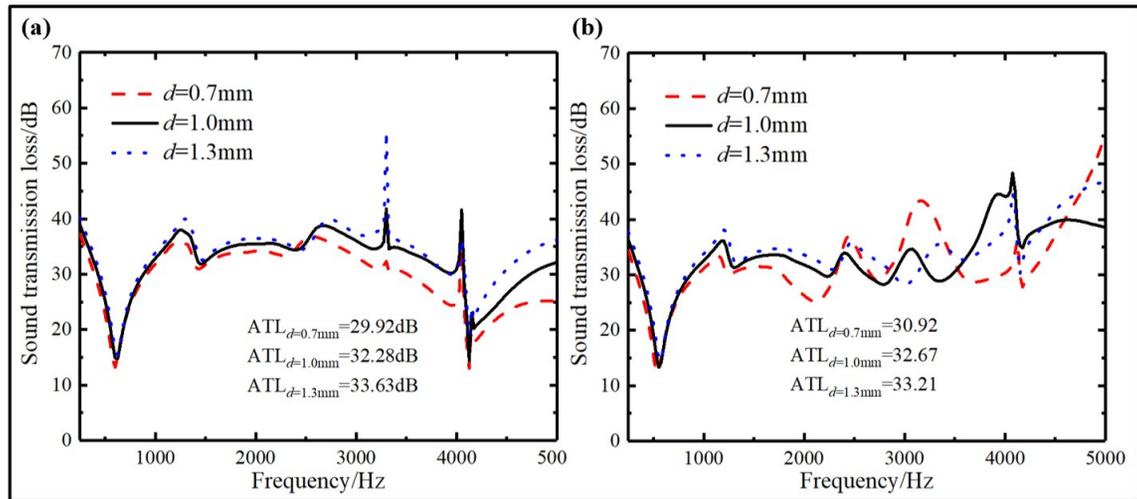


图9 面板厚度  $d$  对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响:(a) D型极小曲面夹芯结构,(b) I-WP型极小曲面夹芯结构

Fig.9 Influence of the panel thickness  $d$  on the sound insulation performance of sandwich structures with the triply periodic minimal surface core:

(a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

### 3.3 极小曲面常数 $C$

保持  $T$ 、 $t$ 、 $E$  和  $d$  分别为 20mm、1mm、145MPa 和 1mm,分析极小曲面常数  $C$  为 0.3、0 和 -0.3 时对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响.由图 11(a)可知, $C$  值取 0.3 或 -0.3 时,D 型极小曲面夹芯结构在 250Hz~3700Hz 频段会减少隔声量,但在 3700Hz~5000Hz 频段的隔声量会大幅上升,且在 4200Hz~5000Hz 频段能达到 50dB 以上的隔声量,隔声效果显著;同时,由于 D 型极小曲面特性, $C$  值的正负对结构的几何拓扑构型并无影响,所以  $C$  取 -0.3 和 0.3 时其隔声量几乎不变.而图 11(b)可知,增加极小曲面常数时,I-WP 型极小曲面夹芯结构在 2500Hz~3500Hz 频段会提高隔声量,但在 4000Hz~5000Hz 频段会减少隔声量,其 ATL 在 0.1dB 左右波动,几乎不受  $C$  值变化影响.

### 3.4 周期常数 $T$

保持参数  $C$ 、 $t$ 、 $E$  和  $d$  分别为 0、1mm、145MPa 和 1mm 不变,探讨  $T$  取值 15mm、20mm 和 25mm 时对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响.由图 11(a)可知,D 型极小曲面夹芯结构增加周期常数

时,在 250Hz~5000Hz 频段均降低隔声量.从图 12(b)可知 I-WP 型极小曲面夹芯结构增加周期常数时会减少 250Hz~2000Hz 频段的隔声量,但会大幅增加 4000Hz~5000Hz 频段的隔声量,且在 4400Hz~5000Hz 频段其隔声性能可达 60dB 以上的隔声量.因此,周期常数对 D 型和 I-WP 型极小曲面夹芯结构的平均隔声性能影响较大,D 型极小曲面夹芯结构在  $T$  为 15mm 时,可实现 35.88dB 的隔声量,而 I-WP 型极小曲面夹芯结构在  $T$  为 25mm 时具有 36.13dB 的 ATL.

### 3.5 弹性模量 $E$

保持参数  $C$ 、 $t$ 、 $T$  和  $d$  分别为 0、1mm、20mm 和 1mm 不变,研究弹性模量的值为 115MPa、145MPa 和 175MPa 时,三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能.图 12(a)中 D 型极小曲面夹芯结构在 3200Hz~4000Hz 频段增加弹性模量可以提高隔声量,其余频段效果不明显;而图 12(b)中表明增加弹性模量使 I-WP 型极小曲面夹芯结构的隔声波谷频率增大,但对隔声量影响很小.由 ATL 可知,D 型极小曲面夹芯结构隔声量对弹性模量更敏感,弹

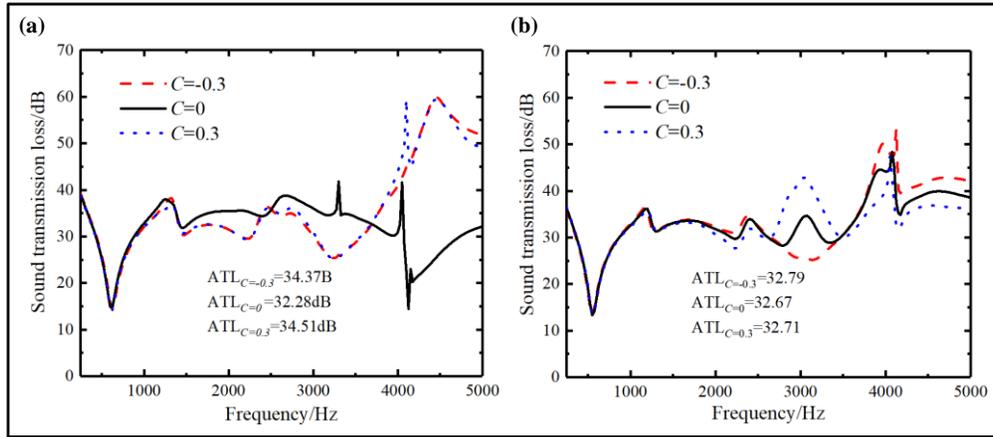


图10 极小曲面常数  $C$  对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响: (a) D型极小曲面夹芯结构, (b) I-WP型极小曲面夹芯结构  
 Fig.10 Influence of the triply periodic minimal constant  $C$  on the sound insulation performance of sandwich structures with the triply periodic minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

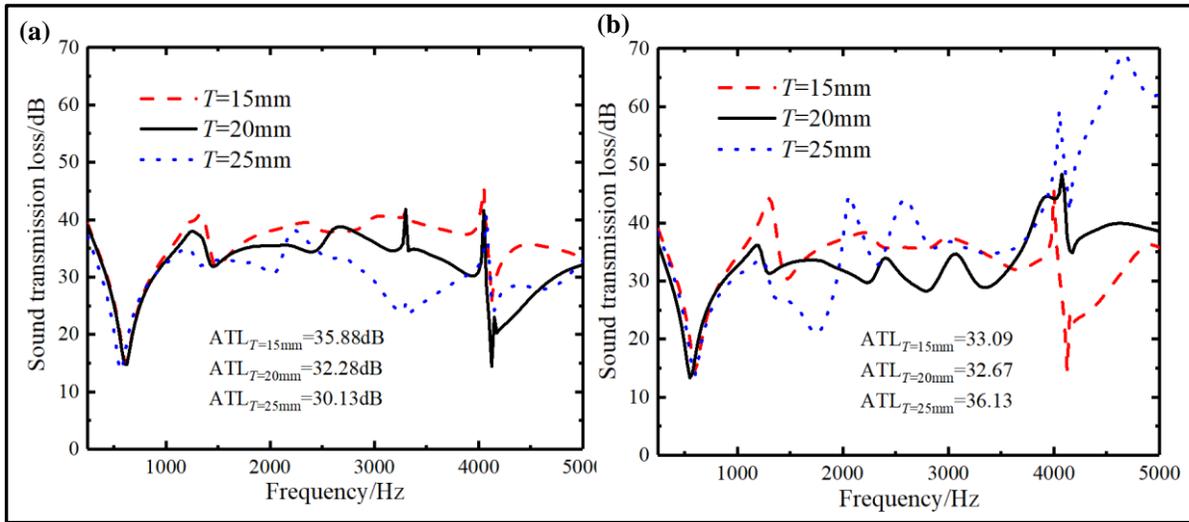


图11 周期常数  $T$  对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响: (a) D型极小曲面夹芯结构; (b) I-WP型极小曲面夹芯结构  
 Fig.11 Influence of the periodic constant  $T$  on the sound insulation performance of sandwich structures with the triply periodic minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

性模量从 115MPa 增加至 175MPa 时, D 型极小曲面夹芯结构平均隔声量增加 2dB 左右, 而 I-WP 型极

小曲面夹芯结构的平均隔声量则只有 0.3dB 左右.

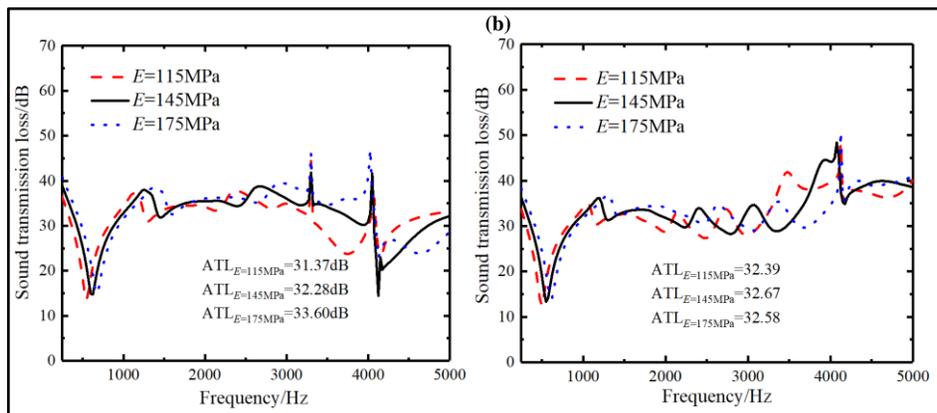


图12 弹性模量  $E$  对三重周期极小曲面夹芯结构隔声性能影响: (a) D型极小曲面夹芯结构; (b) I-WP型极小曲面夹芯结构  
 Fig.12 Influence of the elastic modulus  $E$  on the sound insulation performance of sandwich structures with the triply periodic minimal surface core: (a) D-type minimal surface; (b) I-WP type minimal surface

## 4 结论

利用有限元仿真和试验方法研究了D型和I-WP型三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能,并进一步探讨了夹芯结构的重要参数,即面板厚度 $d$ 、夹芯厚度 $t$ 、极小曲面常数 $C$ 、极小曲面单胞周期 $T$ 和弹性模量 $E$ 对隔声性能的影响.得到如下结论:

(1) D型和I-WP型三重周期极小曲面夹芯结构在高速列车高分贝噪声频段250Hz~5000Hz内具有较好的隔声性能,平均隔声量达到30dB以上;且对于人耳敏感的噪声频段1000Hz~5000Hz具有明显的噪声抑制效果,该频段隔声量接近40dB,在4400Hz~5000Hz频段可高于60dB,比传统夹芯结构具有更好的隔声效果.

(2) D型极小曲面夹芯结构隔声性能对设计参数的变化更敏感,而I-WP型极小曲面夹芯结构的隔声性能更稳定,且两种夹芯结构均可通过调整结构参数达到较优的隔声性能.

需要指出的是,本工作只在二维平面对三重周期极小曲面单胞进行阵列,在厚度方向为单胞.从结构优化的角度分析,如果在保持夹芯结构厚度不变,厚度方向上增加单胞个数的话,会大大增加夹芯结构的设计自由度,将会有更好的隔音效果和更丰富的隔声性能.我们正在从理论、数值仿真和实验三个方面做进一步的探索.

## 参 考 文 献

- 1 陈建国,夏禾,蔡超勋,等.高速列车引起的环境噪声及声屏障测试分析.振动工程学报,2011,24(3):229~234(Chen J G, Xia H, Cai C X, et al. Test and analysis of high-speed trains induced environmental noise and sound barriers. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(3): 229~234(in Chinese))
- 2 李田,张继业,张卫华.横风下高速列车流固耦合动力学联合仿真.振动工程学报,2012,25(2):138~145(Li T, Zhang J Y, Zhang W H. Co-simulation of high-speed train fluid-structure interaction dynamics in crosswinds. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(2): 138~145(in Chinese))
- 3 邓云飞,曾宪智,周翔,等.复合材料褶皱夹芯结构研究进展.复合材料学报,2020,37(12):1~17(Deng Y F, Zeng X Z, Zhou X, et al. Research progress for the composite sandwich structure with foldcore. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 1~17(in Chinese))
- 4 Birman V, Kardomateas G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142: 221~240
- 5 de Melo Filho N G R, Claeys C, Deckers E, et al. Meta-material foam core sandwich panel designed to attenuate the mass-spring-mass resonance sound transmission loss dip. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 139: 106624
- 6 Wen Z H, Wang D W, Ma L. Sound transmission of composite sandwich panel with face-centered cubic core. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019: 1700433
- 7 Liu J, Chen T T, Zhang Y H, et al. On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure. *Composite Structures*, 2019, 208: 385~394
- 8 Wang D W, Ma L, Wang X T, et al. Sound transmission loss of sandwich plate with pyramidal truss cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2020, 22(3): 551~571
- 9 Wen G L, Zhang Y H, Liu J. Sound insulation properties of sandwich structure with hemispheric shell cores: numerical and experimental studies. *Applied Acoustic*, 2020, 162: 107209
- 10 Guo Z K, Hu G B, Sorokin V, et al. Sound transmission through sandwich plate with hourglass lattice truss core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2020, DOI: 10.1177/1099636220906819
- 11 Li Q, Yang D Q. Mechanical and acoustic performance of sandwich panels with hybrid cellular cores. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2018, 140(6): 061016
- 12 Zhang L, Feih S, Daynes S, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 505~515
- 13 Zhao M, Zhang D, Liu F, et al. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 167: 105262
- 14 Tran P, Peng C X. Triply periodic minimal surfaces sandwich structures subjected to shock impact. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2020: 1099636220905551
- 15 Yang L, Yan C, Han C, et al. Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 148: 149~157
- 16 Wang Z, Wang X, Gao T, et al. Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading. *Mechanics of Advanced*

- Materials and Structures*, 2020;1829756
- 17 Yin H F, Zheng X J, Wen G L, et al. Design optimization of a novel bio-inspired 3D porous structure for crashworthiness. *Composite Structures*, 2021, 255: 112897
- 18 Xu H, Xie Y M, Chan R, et al. Piezoelectric properties of triply periodic minimum surface structures. *Composites Science and Technology*, 2020, 200:108417
- 19 戴然婕. 基于自相关函数和互相关函数的高速铁路环境噪声烦恼度研究[硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019 (Dai R J. High-speed railway environmental whose annoyance study Check-based auto-correlation function and interaural cross-correlation function [Master Thesis]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019(in Chinese))
- 20 徐秋婷, 张学飞, 李晔, 等. 发泡铝夹芯板的隔声性能及其优化. *机械工程材料*, 2018, 42(10): 81~86 (Xu Q T, Zhang X F, Li Y, et al. Sound insulation property of aluminum foam sandwich panel and its optimization. *Materials for Mechanical Engineering*, 2018, 42(10): 81~86 (in Chinese))

## STUDY ON SOUND INSULATION PERFORMANCE OF SANDWICH STRUCTURES WITH TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE CORES \*

Liu Jie Lin Chunguan Wen Guilin<sup>†</sup>

(Center for Research on Leading Technology of Special Equipment, School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** A sandwich structure with minimal surfaces has advantages of high specific rigidity and good energy absorption and has shown a wide range of application prospects in practical engineering. But its sound insulation performance has not been thoroughly studied. The sound insulation performance of the D-type and I-WP type sandwich structure with the triply periodic minimal surface is studied using numerical and experimental methods in this paper. First, based on the theory of acoustic-vibration coupling, a finite element (FE) model of sandwich structure with the triply periodic minimal surface cores is established. Then, the accuracy of the FE model is verified by the acoustic impedance tube method. Finally, as the thickness of the sandwich core  $t$ , the thickness of the panel  $d$ , the elastic modulus  $E$ , the minimal surface constant  $C$  and the periodic constant  $T$  are the key parameters their influences, on the acoustic insulation performance of the sandwich structure with the minimal surface is systematically analyzed by using the validated finite element model. Results reveal that the I-WP type sandwich structure has sound insulation of up to 60dB in the 4400Hz-5000Hz frequency band. This research is expected to provide new solutions for passive sound insulation of lightweight structures in high-speed trains and other fields.

**Key words** triply periodic minimal surface, sandwich structure, sound insulation, impedance tube method

Received 2 March 2021, revised 14 April 2021

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11902085, 11832009)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: glwen@gzhu.edu.cn