

# 加筋位置对铝型材板振动声辐射特性的影响分析

张芙蓉, 沈火明, 张鑫, 王宇星

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:**以高速列车的内部带三角形空腔的四边固支铝型材外地板为研究对象,采用有限元方法对其进行结构振动特性和声辐射特性研究。重点探究了结构在 20 Hz ~ 800 Hz 的中低频区域内,不同加筋位置对板结构振动声辐射特性和隔声量的影响。研究表明:在中低频范围内,铝型材板加筋后,其辐射声压和声功率能得到很好的抑制效果,在下底板加筋时的抑制效果最为明显,其声学性能最佳;加筋对铝型材板结构隔声量的影响不明显。

**关键词:**结构振动;声辐射;高速列车;铝型材板;有限元方法

**中图分类号:**U270.32

**文献标志码:**A

## 引言

为了实现高速列车的轻量化,各个国家都对自己的高速列车车体材料进行了革新,普通钢制材料被逐渐淘汰,质量轻而且性能好的铝合金开始被广泛使用。随着列车运行速度的增大,噪声也急剧增长<sup>[1]</sup>,过量的振动和噪声不仅严重影响乘客和轨道沿线人员的正常生活,还可能引起相关设备、结构和周围建筑物的疲劳损坏,缩短其使用寿命。因此,高速列车运行过程中的振动与噪声控制一直以来都是研究的重点。

陆红艳<sup>[2]</sup>建立了板的声辐射模型和声功率与振动速度之间的关系,分析了阻抗矩阵的特征值,并用 Lamé 方程描述自由阻尼层的运动,从而得到结构损耗因子和辐射声功率的计算公式。张媛媛<sup>[3]</sup>研究了高速列车中空铝型材带筋板的布筋方式,得出在矩形、三角形和梯形三种布筋方式中,三角形布筋方式下变形最小,稳定性最好。张斌<sup>[4]</sup>通过有限元法对高速列车铝型材板进行模态分析,以及用锤击激振法分别对无阻尼材料型材、与阻尼材料复合后铝合金型材和进口复合铝合金型

材进行实验模态分析,确定了阻尼减振降噪的方法及阻尼材料在铝合金型材上的复合位置。沈火明<sup>[5]</sup>等通过周期子结构原理和混合有限元-统计能量法,建立了高速列车铝型材外地板声学仿真模型,根据结构的传递损失来评价其隔声性能,研究了铝型材板结构、铝型材板分别加上板和下板结构以及铝型材板加夹板结构时,不同腹板倾角下的隔声性能。赵志高<sup>[6]</sup>等基于有限元和边界元法,分析计算了薄板结构的声辐射功率,以及当激励频率与薄板的固有频率特别接近时,薄板的声辐射特性,研究了薄板厚度和它的激振频率的关系,从理论上指出了激振频率和薄板厚度对薄板结构的声辐射影响。

现在对于高速列车的研究多集中于车体整体结构模型研究分析,研究方向多偏向于车体振动特性和空间降噪技术探索。在已有的对高速列车铝型材板的研究中,对结构的振动和噪声控制主要采用增加地板厚度和敷设阻尼材料的方法来提高铝型材板刚度<sup>[7]</sup>,改善其声学性能,但是结构质量也会大幅增加,这与高速列车轻量化要求不符。因此考虑在铝型材板底板和腹板处添

收稿日期:2016-03-21

基金项目:牵引动力国家重点实验室开放课题(TB1305);四川省青年科技创新团队(2013TD0004)

作者简介:张芙蓉(1992-),女,四川西昌人,硕士生,主要从事结构振动控制方面的研究,(E-mail)yfgrong1992@163.com;

沈火明(1968-),男,江苏苏州人,教授,博士,主要从事结构振动和微动磨损方面的研究,(E-mail)hmshen@126.com

加筋条,以此实现在质量尽可能小的情况下改善其振动和声学性能。

## 1 有限元模型建立

在 ANSYS 建模过程中,考虑到铝型材地板由上、下底板和腹板组成,在一定频率下,腹板也会发生变形和振动,在腹板和底板的连接处可能会发生应力集中现象,底板和腹板的厚度对整个铝型材板结构的振动影响不可忽略。因此,为保证计算的精确性,采用能更好描述局部信息的 8 节点 Solid 185 实体单元<sup>[8]</sup>建模,如图 1 所示,约束条件为四边固支。模型尺寸及材料参数见表 1。将建立好的模型导入 LMS VirtualLab 声学分析软件,并在结构外侧建立声腔,设置材料属性为 Air,以此建立结构的声学有限元模型,如图 2 所示。由于在声波传播过程中,声波会在两种不同介质的交界面发生反射、折射和透射,这些都会影响声波传播和能量传递计算的精确性,所以将声腔的外边界单元设置为 AML 属性,保证声腔接收声波后发生散射,不会在边界处发生反射,以此实现无反射声学边界条件的数值模拟<sup>[9]</sup>。

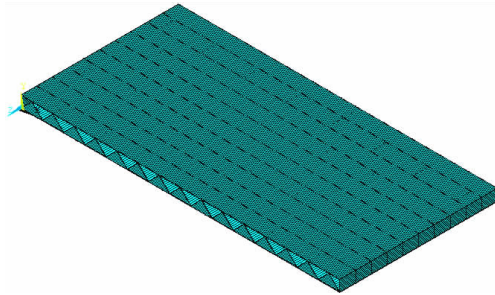


图 1 铝型材板有限元模型

表 1 模型尺寸及材料参数

弹性模量 $E/\text{Pa}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	长×宽×高 /mm	板厚 $d/\text{mm}$
$7.1 \times 10^{10}$	2700	0.33	2025 × 1000 × 70	2.7

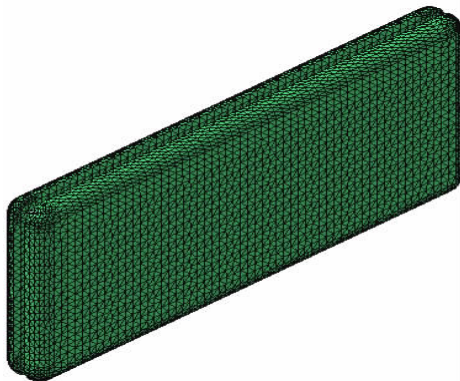


图 2 铝型材板声学模型

## 2 加筋铝型材板结构振动声辐射特性

### 2.1 铝型材板振动特性分析

分别在铝型材板底板和腹板处添加尺寸为  $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  的筋条,如图 3 与图 4 所示。通过计算其前十阶固有频率(表 2),发现添加筋条后其固有频率相较于裸板略有降低,究其原因,虽然结构整体刚度有所增加,但质量增加的幅度大于刚度增加幅度,所以固有频率反而有所降低<sup>[10]</sup>。

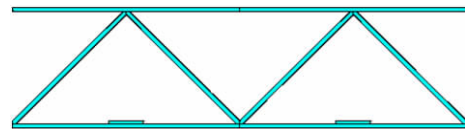


图 3 底板加筋

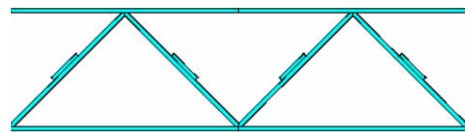


图 4 腹板加筋

表 2 不同加筋位置下铝型材外地板前十阶

阶次	固有频率(单位:Hz)		
	裸板	底板加筋	腹板加筋
1	435.3	433.8	431.7
2	524.8	524.1	522.2
3	567.0	565.3	563.6
4	567.0	565.5	563.9
5	574.4	572.8	570.4
6	574.7	573.3	571.5
7	586.6	586	584.3
8	587.2	586	585.3
9	588.4	586.5	585.7
10	588.5	586.7	585.7

### 2.2 铝型材板声辐射特性

在铝型材板正中心施加  $10 \text{ N}$  的激励荷载,让结构在荷载激励作用下产生振动与声音,并向四周辐射能量。选取另一侧中心点为声压场点,以  $5 \text{ Hz}$  窄带为计算步长,读取铝型材板在  $20 \text{ Hz} \sim 800 \text{ Hz}$  中低频区的声压级和辐射声功率级,分别如图 5 与图 6 所示。

从图 5 表示的计算结果可以看出,在铝型材板达到第一阶固有频率(约  $435 \text{ Hz}$ )之前,结构在腹板加筋情况下比裸地板声压级降低了约  $5 \text{ dB}$ ,底板加筋情况下比裸地板声压级降低了  $10 \text{ dB}$  左右,在  $560 \text{ Hz}$  附近,腹板加筋情况下比裸地板降低了约  $10 \text{ dB}$ ,底板加筋情况下比裸地板声压级降了约  $35 \text{ dB}$ 。

从图 6 可以看出,在铝型材板达到第一阶固有频率

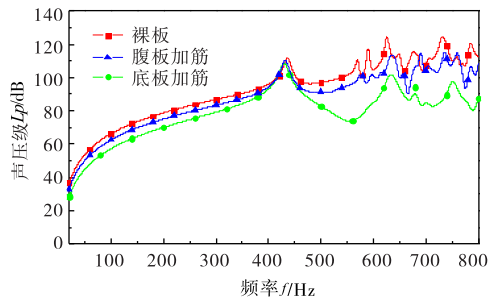


图5 不同加筋位置铝型材板声压级

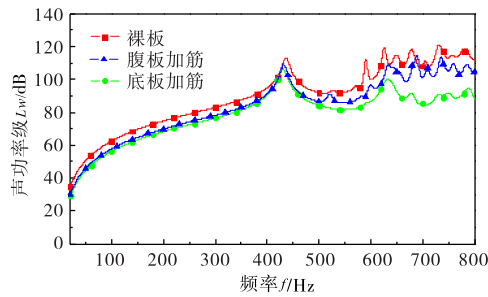


图6 不同加筋位置下铝型材板辐射声功率级

(约 435 Hz)之前,裸地板的声功率最大,结构在底板加筋情况下比裸地板声功率级降低了约 8 dB,腹板加筋情况下声功率比底板加筋情况下略微高一点,但不明显。在 630 Hz 附近,腹板加筋情况下比裸地板声功率级整体降低了约 5 dB,而底板加筋情况下声功率级比裸地板整体降低了约 30 dB。

结构的辐射声压级和声功率级均整体随着频率的增加而增加,且都在结构各阶固有频率处达到峰值,与实际情况相符。在 20 Hz ~ 800 Hz 之间,相同频率下,裸地板辐射声压级与声功率级均最高,底板加筋情况下最低,随着频率的升高,加筋对辐射声压级与声功率的抑制现象也越来越明显。图 5 ~ 图 6 的仿真表明:加筋能有效抑制 800 Hz 以下的中低频辐射声压与声功率,底板加筋时的抑制作用最为明显。根据前面的计算和分析,铝型材外地板在加筋后固有频率均有所降低,所以加筋板在声压级频率响应曲线中也表现出了声压级峰值的略微前移,但整体变化趋势保持一致。

### 3 加筋铝型材板结构隔声性能

在声学模型中,定义左侧为混响室声腔,右侧为消声室声腔,在铝型材板声腔左侧布置混响声源,如图 7 所示,对两侧包络铝型材板的声学有限元网格都定义 AML 属性,左边 Receiver 面设置为接收声音,右边 Sender 面设置为辐射声音,如图 8 所示。通过直接声耦合方法,测量出入射到铝型材板上的声功率和铝型材板辐

射到消声室的声功率后,可以得到铝型材板的隔声量<sup>[11]</sup>,如图 9 所示。

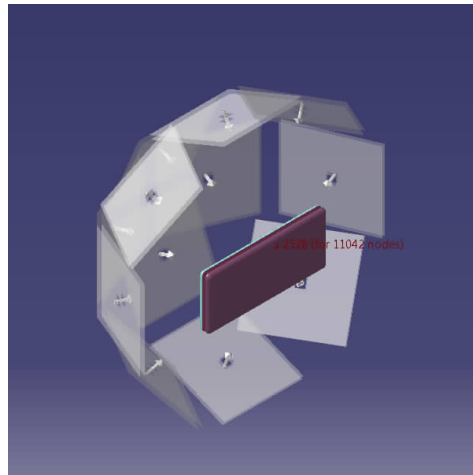


图7 混响声源布置示意图

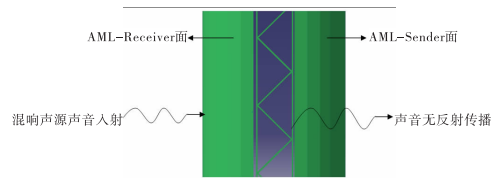


图8 结构隔声量计算属性设置示意图

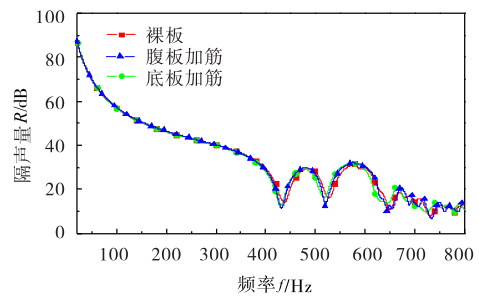


图9 不同加筋位置下铝型材板辐射声功率级隔声量

图 9 表明,在 20 Hz ~ 400 Hz 之间,加筋板与裸地板的隔声量无明显变化,隔声量频率响应曲线基本重合,且随着频率的增加隔声量均呈降低趋势;在 440 Hz 左右第一阶固有频率处和 520 Hz 左右的第二阶固有频率处,裸地板隔声量最大,腹板加筋情况下隔声量最小,但是相差不大;在 520 Hz ~ 580 Hz 之间,加筋板呈现出隔声量比裸地板略大的趋势,其中底板加筋的铝型材板隔声量最大,但是加筋板与裸地板隔声量也相差不大,仅高了 2 dB 左右。在 600 Hz 以后,在不同频率下,加筋板隔声量与裸地板相比时大时小,三者之间没有明显变化规律可寻,但整体变化趋势仍一致。

综上所述,在铝型材板的腹板和底板加筋对其隔声量没有太大的影响。

## 4 结 论

通过使用 ANSYS 建立高速列车铝型材板结构的有限元分析模型以及使用 LMS VirtualLab 声学分析软件建立其声学模型,并采用 5 Hz 窄带对加筋铝型材板进行声辐射特性进行分析,得到以下主要结论:

(1) 铝型材板结构辐射声压级与声功率级均有整体随着频率的增大而增大的趋势。结构各阶固有频率处声压级与声功率级均达到峰值,与实际情况相符。

(2) 在中低频范围内,在铝型材结构底板和腹板处添加筋条,均能够起到有效的辐射声压和声功率抑制作用,底板加筋时抑制作用最为明显,结构的声学性能最优。

(3) 结构隔声量随着频率的增大呈降低趋势,加筋对铝型材板结构隔声量的影响较小。

### 参 考 文 献:

- [1] 俞悟周,王晨,毛东兴,等.高速铁路动车组列车的噪声特性[J].环境污染与防治,2009,31(1):71-74.  
 [2] 陆红艳.板结构的振动声辐射及其隔声性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2003.  
 [3] 张媛媛.高速列车铝型材外地板结构振动与减振降

噪性能分析研究[D].成都:西南交通大学,2013.

- [4] 张斌.客车车体用铝合金型材阻尼减振降噪效果的分析与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
 [5] 沈火明,张玉梅,肖新标,等.高速列车波纹外地板低噪声优化设计[J].交通运输工程学报,2011,11(2):65-71.  
 [6] 赵志高,黄其柏,何钰.基于有限元边界元方法的薄板声辐射分析[J].噪声与振动控制,2008,10(1):39-43.  
 [7] 符俊杰,韩宝坤,鲍怀谦,等.敷设粘弹性阻尼的板的振动与声辐射分析[J].声学技术,2009,28(6):142-144.  
 [8] 康国政,阚前华,张娟.大型有限元程序的原理、结构与使用[M].2 版.成都:西南交通大学出版社,2008.  
 [9] 金乃麒,张丰收,张春岩,等.高速列车铝型材板振动声辐射特性研究[J].应用数学和力学,2014,35(s1):118-122.  
 [10] 高淑英,沈火明.振动力学[M].北京:中国铁道出版社,2011.  
 [11] 王瑞乾.高速列车地板结构隔声及隔声提高方法探究[D].成都:西南交通大学,2014.

## Study on the Influence of Reinforced Location on Vibration and Sound Radiation of the Aluminum Plate

ZHANG Yingrong, SHEN Huoming, ZHANG Xin, WANG Yuxing

(School of Mechanics & Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A finite element model of the fixed supported plate is developed, where the triangular cavity is considered, also the vibration and the sound radiation characteristics of this fixed supported plate have been studied. In the range of low and medium frequency (20 Hz ~ 800 Hz), the effects of different reinforced locations on the acoustic radiation and the sound transmission losses behavior were mainly studied. The numerical results showed that: in the range of low and medium frequency, the reinforced aluminum plate experienced a good inhibitory effects on the radiation and acoustic power characteristics. Furthermore, the most obvious inhibitory effects were found when the reinforced location was at the bottom of the plate, but the inhibitory effects on the sound transmission losses were quite negligible.

**Key words:** structural vibration; acoustic radiation; high speed train; aluminum alloy extrusion; finite element method