

文章编号:1006-1355(2017)02-0121-06

## 温度对敷有阻尼层的铝型材声学性能的影响

陈 沛<sup>1</sup>, 沈火明<sup>1</sup>, 张 捷<sup>2</sup>, 肖新标<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 力学与工程学院, 成都 610031

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

**摘要:**为了研究温度变化对敷有黏弹性阻尼层的高速列车车体铝型材结构声学性能的影响,建立高速列车车体铝型材隔声和振动声辐射计算模型,其中100 Hz~500 Hz中低频段采用混合有限元-统计能量分析法(FE-SEA),630 Hz以上高频段采用统计能量分析法(SEA)。基于试验测试数据,考虑黏弹性材料温变特性对其杨氏模量和阻尼损耗因子的影响。通过数值模型,研究不同温度条件下铝型材隔声量及振动声辐射性能的变化,分析温度对敷有阻尼层的铝型材声学性能的影响。结果显示:温度的影响主要集中在共振区及1 600 Hz以上的高频段。阻尼层在10 ℃~50 ℃环境中,即处于黏流态时对铝型材声学性能的优化作用较好,但在10 ℃以下环境中敷设阻尼层的降噪效果将有所减弱。

**关键词:**声学;阻尼层;温度影响;隔声量;振动声辐射

**中图分类号:** TB535

**文献标识码:** A

**DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.025

## Influence of Temperature on Acoustic Characteristics of Extruded Aluminum with Damping Layers

CHEN Pei<sup>1</sup>, SHEN Huo-ming<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, XIAO Xin-biao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study the influence of temperature on the acoustic performance of extruded aluminum structures with viscoelastic damping layers of the car-bodies of high-speed trains, the models for sound transmission loss prediction and sound radiation characteristics prediction are established respectively. The acoustic performances of the models are analyzed using the hybrid FE-SEA within the low and medium frequency range of 100 Hz-500 Hz and using the SEA in the high frequency range above 630 Hz respectively. Based on the measurement data, the influence of temperature-varying characteristics of the viscoelastic material on its Young's modulus and damping loss factor is analyzed. The sound transmission loss and sound radiation characteristics of the extruded aluminum under different temperatures are calculated using the numerical models. The influence of the temperature on the acoustic performance of the extruded aluminum with damping layers is investigated. The results show that the influence of the temperature is focused on the resonance frequency region and the high frequency region above 1 600 Hz. The viscoelastic damping layer has a great noise control effect in the temperature range of 10 ℃-50 ℃, but will lose its effect for noise reduction below 10 ℃.

**Key words:** acoustics; damping layer; influence of temperature; sound transmission loss; sound radiation characteristics

收稿日期:2016-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1434201、51475390);

国家重点研发计划课题资助项目

(2016YFB1200503、2016YFB1200506);

牵引动力国家重点实验室自主课题资助项目

(2015TPL\_T08)

作者简介:陈沛(1991—),男,江苏省常州市人,硕士研究生,

目前从事高速列车噪声与振动控制研究。

E-mail: chenpei1207@qq.com

通信作者:沈火明,男,教授,博士生导师。

E-mail: hmshen@126.com

随着我国轨道交通事业的不断发展,高铁线路不断延升,我国高铁线路如今南起海南三亚北至齐齐哈尔,跨越热带、亚热带、温带,气温跨度高达60摄氏度以上,这对我国轨道车辆各部件性能的温度稳定性提出了更高的要求。温度是黏弹性阻尼材料性能的重要影响因素,而在实际工程应用中,黏弹性材料往往作为特定的铺层嵌入到复合材料结构中去,与复合材料一起固化成型,在保证复合材料强度和刚度的前提下,可大幅度提高复合材料的阻尼性能<sup>[1-2]</sup>。目前,我国高速列车铝型材关键结构上多数

设有黏弹性阻尼层,以抑制其振动及声辐射,由此,温度变化对铝型材隔声及振动声辐射特性的影响值得关注。

王瑞乾等通过实验,探究阻尼材料对高速列车铝型材地板的减振降噪效果<sup>[3]</sup>;张媛媛等基于统计能量分析法,计算阻尼层敷设位置对型材减振降噪的影响<sup>[4]</sup>;吴健等基于FE-SEA法预测了敷有黏弹性阻尼层铝型材振动声辐射特性<sup>[5]</sup>。然而目前对高速列车车体铝型材的隔声及振动声辐射特性研究多停留在常温状态下,在较宽温度环境跨度下,车体构件的隔声及振动声辐射特性研究作为高速列车发展中的一个必要课题仍有所欠缺。

文中将简述黏弹性材料随着温度的变化其自身性能的变化规律,并针对敷设黏弹性阻尼层的高速列车车体铝型材结构,建立高速列车车体铝型材隔声和振动声辐射计算模型,进而根据实验得到的黏弹性材料属性包括杨氏模量和阻尼损耗因子随温度变化而变化的规律,计算敷设黏弹性阻尼层铝型材结构随温度变化的隔声量及振动声辐射变化,进而分析温度对敷有黏弹性阻尼层铝型材声学性能的影响。

## 1 黏弹性材料的性质

黏弹性材料的能量耗散主要取决于杨氏模量和材料阻尼系数,这两个参数皆与温度有关且可以通过实验测试得出<sup>[1-2]</sup>。

以实验测得的某高速列车铝型材黏弹性阻尼层的动态力学性能为例,图1给出了黏弹性阻尼层的动态力学性能温度谱,可见阻尼层力学性质随温度的变化大致表现出3种不同的状态,温度由低到高分别为玻璃态、黏流态以及高弹态<sup>[1]</sup>。

(1) 玻璃态:低温(约0℃以下)环境下,材料处于玻璃态,较为坚硬,杨氏模量很高且随温度变化不大,阻尼层剪切应变及损耗因子较小。

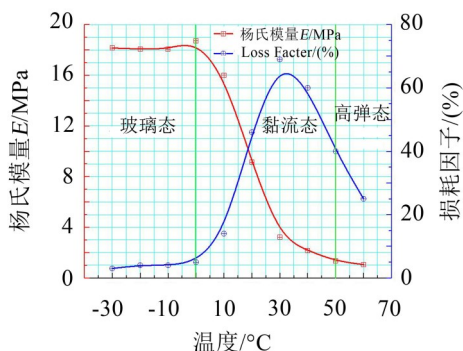


图1 黏弹性阻尼层的动态力学性能温度谱

(2) 高弹态:高温(约50℃以上)环境下,材料处于高弹态,较为柔软,杨氏模量很小且随温度变化不

大,阻尼层剪切应力及损耗因子较小。

(3) 黏流态:在约0℃~50℃的中温环境下,材料处于黏流态(过度区),阻尼层刚度及杨氏模量大幅度下降,介于玻璃态与高弹态之间,剪切应变能及阻尼损耗因子较大。

## 2 仿真实验方法简介

### 2.1 统计能量分析法(SEA)

统计能量分析法(SEA)是预测结构-声耦合动态系统中振动传递的一种方法,适用于复杂结构系统的高频振动声学分析。

对一定频带宽内的一系列单自由度系统组成的一般子结构,系统的耗散功率为

$$P_{\text{diss}} = \omega \eta E \quad (1)$$

式中  $\omega$  为频带的中心频率,  $h$  为对应该频带范围的平均损耗因子,  $E$  为振动系统能量。

以两个子结构组成的最简单的统计能量模型为例,建立其功率平衡方程。由功率流平衡关系,可得

$$\begin{cases} P_1 = \omega \eta_1 E_1 + \omega \eta_{12} E_1 - \omega \eta_{21} E_2 \\ P_2 = \omega \eta_2 E_2 + \omega \eta_{21} E_2 - \omega \eta_{12} E_1 \end{cases} \quad (2)$$

有

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{12} \\ -\eta_{21} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $P_1$ 、 $P_2$  分别为外界激励源对子系统1和子系统2的输入功率;  $E_1$ 、 $E_2$  为子系统1和子系统2储存的能量;  $h_1$ 、 $h_2$  为子系统1和子系统2的内损耗因子;  $h_{12}$ 、 $h_{21}$  为子系统1与子系统2之间的耦合损耗因子。

通过上式,代入内损耗因子、耦合损耗因子、输入功率等统计能量分析法分析参数,即可求出目标子结构的平均能量水平,进而确定板件的隔声性能<sup>[6-7]</sup>。

同时,已知激励源对子系统输入功率及子系统能量分析参数的情况下,通过功率频率流平衡方程,求解子系统间能量传递及子系统时空均方能量等,即可解出铝型材向半空间辐射的声功率。

### 2.2 混合有限元-统计能量分析法(FE-SEA)

统计能量分析法的运用需满足子结构有足够多的共振模态及足够高的模态叠合系数的假设,这就是SEA法在中低频域应用的局限性。混合有限元-统计能量分析法(FE-SEA)将传统有限元分析法(FE)用于确定性子结构的动态描述,从而建立由有限元结构模型与统计能量法声场激励模型组合而成的混合模型理论,使所构建的混合模型既能准确预测系统中有限元结构的动态位移响应,又能从统计的角度预测统计能量法中子结构的平均能量响应,以更好地解决中低频问题<sup>[8-9]</sup>。

根据能量守恒方程,得出 FE-SEA 耦合系统的功率平衡方程为

$$P_{\text{in,dir}}^{(m)} = P_{\text{out,rev}}^{(m)} + P_{\text{diss,m}} \quad (4)$$

式中  $P_{\text{in,dir}}^{(m)}$  为直达场中的输入功率;  $P_{\text{out,rev}}^{(m)}$  为直达场在边界约束处做功消耗的功率;  $P_{\text{diss,m}}$  为子系统内部的能量耗损。

由式(4)可得整体系统的能量平衡矩阵方程,进而得到各子系统的能量,代入 FE-SEA 整体平均响应方程

$$\langle S_{qq} \rangle = D_{\text{dir}}^{-1} \left( S_{ff}^{\text{ext}} + \sum_m \frac{4E_m}{\pi\omega n_m} \text{Im} \{ D_{\text{dir}}^{(m)} \} \right) D_{\text{dir}}^{-H} \quad (5)$$

即可得到 FE 子系统各节点的位移动态响应  $\langle S_{qq} \rangle$ 。式中,  $D_{\text{dir}}$  为 SEA 子系统的直达场与 FE 子系统的联合整体刚度矩阵;  $S_{ff}^{\text{ext}}$  为施加在 FE 子系统上的外部作用力;  $\omega$  为圆频率;  $E_m$  为 SEA 子系统  $m$  的能量;  $\text{Im} \{ D_{\text{dir}}^{(m)} \}$  为 SEA 子系统  $m$  对整体刚度矩阵的贡献量;  $H$  表示对矩阵进行共轭转置<sup>[5,7,10]</sup>,进而即可求出系统的传递损失及辐射声功率。

### 3 仿真模型建立

文献[4]认为阻尼敷设位置对铝型材结构隔声量的影响不大,文献[5]计算结果表明铝型材受激励面敷设阻尼层对铝型材的振动声辐射具有最好的降噪率,因此,文中将研究黏弹性阻尼层敷设于铝型材的受激励面时,铝型材隔声及振动声辐射特性随温度的变化情况。

以我国某高速列车典型侧墙铝型材结构为例,其长、宽、高尺寸为 0.98 m×0.97 m×0.05 m,截面形式如图2所示。

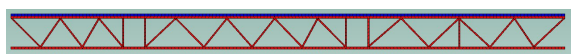
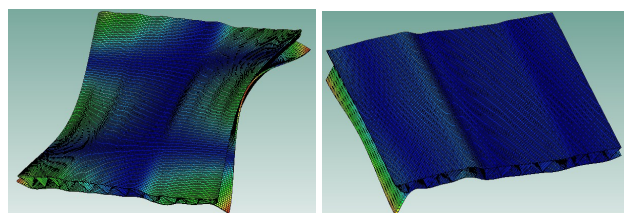


图2 铝型材截面形式

其中,上板、下板均为 4.0 mm 厚铝板,筋板为 2.5 mm 厚铝板。铝的杨氏模量  $E=7.1 \times 10^{10}$  Pa,泊松比  $\nu=0.33$ ,密度  $\rho=2740$  kg/m<sup>3</sup>。黏弹性阻尼层的其他材料属性为泊松比  $\nu=0.48$ ,密度  $\rho=980$  kg/m<sup>3</sup>。通过有限元分析,计算铝型材结构的模态分布特性,典型结果如图3所示。



(a) 5阶模态 (551 Hz)

(b) 6阶模态 (775 Hz)

图3 铝型材模态截止频率

由图3可见,铝型材在 500 Hz 左右存在一个截止频率。在此频率以下,铝型材模态主要表现为结构整体模态振动,而截止频率以上,铝型材模态主要表现为结构局部模态振动,结构有足够高的模态叠合系数。

因此,截止频率以下,即 100 Hz~500 Hz 中低频段,选用混合有限元-统计能量分析法 (FE-SEA) 进行隔声及振动声辐射性能预测;而 630 Hz 以上高频段采用统计能量分析法 (SEA) 进行隔声及振动声辐射性能预测。

#### 3.1 隔声特性仿真模型

对 100 Hz~500 Hz 中低频段,在 Hyper Mesh 中建立铝型材 FE 实体模型,再导入 VA One 中建立基于混合有限元-统计能量分析法 (FE-SEA) 的铝型材隔声特性预测模型。在铝型材两侧各连接一个半无限流体场 (SIF) 以考虑其声辐射,在敷设阻尼层侧施加单位幅值的混响场,来模拟无规入射声场,进而预测分析铝型材的隔声特性,模型如图4所示。

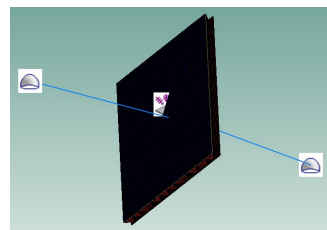


图4 中低频段 FE-SEA 隔声量预测模型

对敷设的阻尼层,将根据阻尼层的几何参数,以三维实体有限单元来对其建模,调查阻尼层厚度的影响通过改变三维实体阻尼层厚度来实现。

对 630 Hz 以上高频段,在 VA One 中建立高频段 SEA 模型,在板件两面各建立一个声空腔来模拟发声室及接受室,对各个声空腔的容积进行参数重置,模拟足够大的标准混响室。然后,在发声室空腔上施加混响场激励,通过统计能量分析法求得两个声空腔的声学响应,进而确定铝型材板件的隔声性能,模型如图5所示。

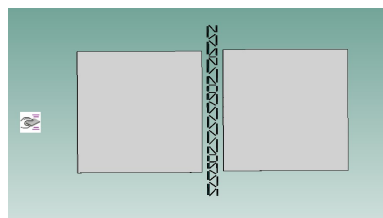


图5 高频段 SEA 隔声量预测模型

模型中,敷设阻尼层的铝型材顶板是以 Laminate 层合板来建模的,阻尼材料作为 Laminate 层合板的一层,按具体的厚度敷设在铝型材顶板上,调查阻尼层厚度影响通过改变 Laminate 层合板中阻



尼层厚度来实现。

为了对所建模型进行验证,参考文献[3、10]的相关结果及阻尼层对铝型材结构隔声特性影响规律。根据所建铝型材结构隔声特性预测分析模型,对常温下(20℃)阻尼层对铝型材隔声量的影响进行预测,结果如图6所示。

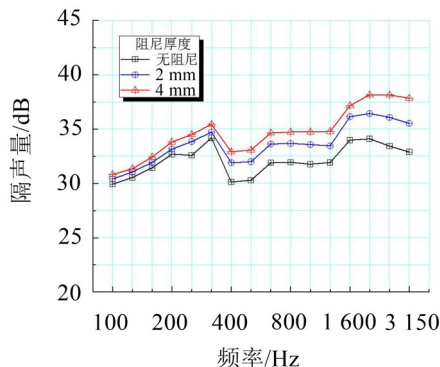


图6 常温下铝型材隔声量1/3倍频程频谱

由图6可见,添加2 mm阻尼层能在铝型材裸板的基础上使计权隔声量提高2.1 dB,阻尼层厚度增至4 mm,计权隔声量再提高1.1 dB,且得出的规律与文献[3]通过实验得出的规律类似:阻尼层的效果在共振区及高频段较为明显,且随着阻尼层厚度的增加,铝型材的计权隔声量大小呈现递增趋势。由此可见,建立的隔声特性预测分析模型是可信的。

### 3.2 振动声辐射特性仿真模型

振动声辐射特性仿真模型中,铝型材结构(包括敷设阻尼层)采用与隔声特性预测一样的模型,区别主要在载荷激励和响应设置上。载荷激励方面,为减小载荷施加位置对振动声辐射的影响,在敷设黏弹性阻尼层面相同位置随机施加8个幅值为1 N的点激励;响应设置上,在铝型材另一侧连接一个半无限流体场(SIF)以其接收铝型材发出的能量来评价铝型材的振动声辐射特性。振动声辐射仿真模型如图7和图8所示。

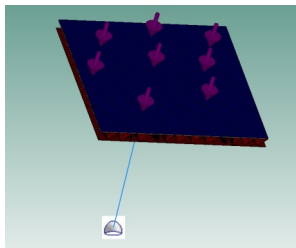


图7 中低频段基于FE-SEA的振动声辐射特性预测模型

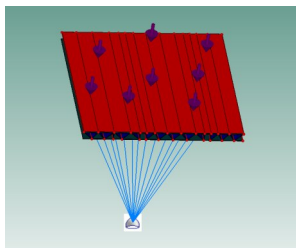


图8 高频段基于SEA的振动声辐射特性预测模型

以此模型计算常温下(20℃)阻尼层对铝型材振动声辐射特性的影响,结果如图9所示。

由图9可见,阻尼层对铝型材振动声辐射的减振效果在铝型材的共振区最为明显,同时在中高频段

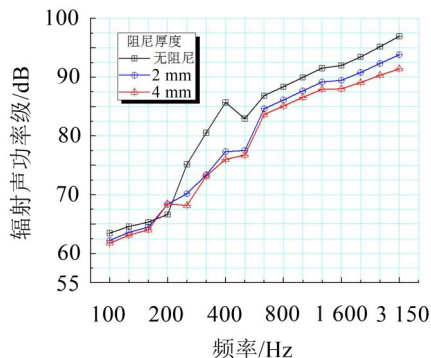


图9 常温下铝型材振动声辐射

也有较好的减振效果,在裸板的基础上敷设2 mm阻尼材料,振动声辐射在400 Hz处可降低8.4 dB,在此基础上再增加2 mm阻尼,减振作用仍有一定的增强,这与隔声量预测结果及文献[3]的规律类似。由此可见,建立的振动声辐射特性预测分析模型是可信的。

## 4 温度对阻尼层型材声学性能的影响

基于所建立的隔声量预测模型,采用图1所示的不同温度下黏弹性阻尼层的杨氏模量及损耗因子(考虑到铝的材料属性随温度变化很小,故忽略其影响),对敷设有3 mm阻尼层的铝型材隔声量进行仿真预测,结果如图10所示。

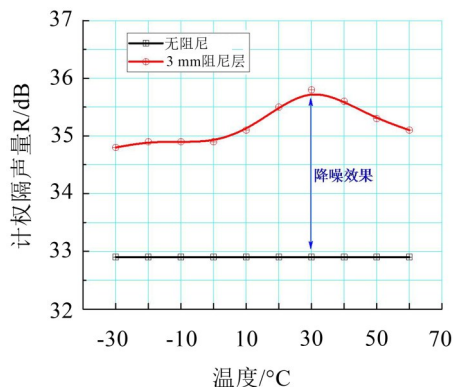


图10 温度对铝型材计权隔声量的影响

由图10可见,在铝型材上敷设3 mm厚的黏弹性阻尼层,在常温下可提升铝型材计权隔声量2.7 dB,而低温情况下计权隔声量仅有1.7 dB的提升,相对常温隔声量将下降1.0 dB,故温度影响不可忽视。阻尼层在30℃左右环境下对铝型材板件的降噪效果最为突出,而在10℃以上(阻尼材料处于黏流态或高弹态的情况下)基本可以达到应有的降噪水平。

为了进一步了解温度对铝型材不同频率隔声量的影响情况,选取常温下阻尼层降噪效果较好的4个频段:250 Hz(224 Hz~280 Hz)、400 Hz(355 Hz~450 Hz)、500 Hz(450 Hz~560 Hz)以及3150 Hz

(2 800 Hz~3 550 Hz)进行分析。图11给出了敷有3 mm阻尼层的铝型材板件在这些频率下的隔声量随温度变化的规律。

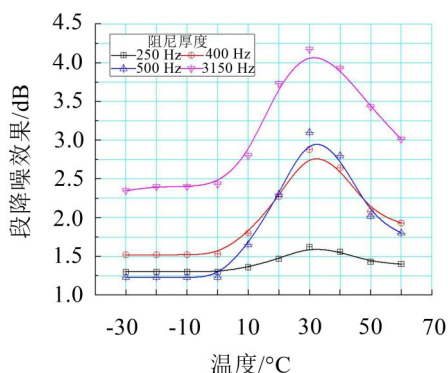


图11 温度对敷设有3 mm阻尼层铝型材在关注频段降噪效果的影响

由图11可见,整体上,阻尼层在3 150 Hz频段的降噪效果最好,在2.4 dB~4.3 dB之间;其次是500 Hz频段,紧接着是400 Hz频段,相对最小是250 Hz频段。

温度变化对敷有3 mm阻尼层铝型材在各频段隔声量均匀一定影响,其中对500 Hz频段温度影响可达1.9 dB(30 °C最高,为3.1 dB,而-10 °C以下较低,为1.2 dB,两者相差1.9 dB),影响最大;其次是3 150 Hz频段,温度影响为1.8 dB,然后是400 Hz频段,温度影响为1.4 dB,相对最小为250 Hz频段,仅有0.3 dB。

基于所建立的振动声辐射特性预测模型,采用图1所示的不同温度下黏弹性阻尼层的材料属性,对敷设有3 mm阻尼层的铝型材振动声辐射特性进行仿真预测。同样分析上述4个频段:250 Hz(224 Hz~280 Hz)、400 Hz(355 Hz~450 Hz)、500 Hz(450 Hz~560 Hz)以及3 150 Hz(2 800 Hz~3 550 Hz)。图12给出了敷设有3 mm阻尼层的铝型材板件的减振效果在这些频率段内随温度变化的规律。

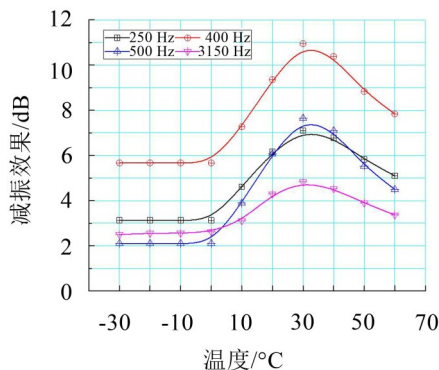


图12 温度对敷设有3 mm阻尼层铝型材在关注频段减振效果的影响

由图13可见,整体上,阻尼层对铝型材在各选定频段均有好的减振效果,其中对400 Hz频段的减振效果最好,在5.67 dB~10.95 dB之间;其次是500 Hz频段、250 Hz频段及3 150 Hz频段。

同时可以看出温度变化对敷有3 mm阻尼层铝型材在各选定频段振动声辐射均有较大影响,其中对400 Hz及500 Hz频段温度影响分别可达5.3 dB及5.6 dB,对250 Hz及3 150 Hz频段也有4.0 dB及2.3 dB的影响。这与图9显示的常温下阻尼层减振效果的分布相吻合:敷设阻尼层对铝型材共振频率处的减振效果最佳,其减振效果受温度影响也最大。

由图10至图12可见,在10 °C~50 °C温度范围内,即阻尼材料处于黏流态时,阻尼层基本可以起到对铝型材声学性能的优化作用。其中在30 °C环境下,阻尼效果最好;而在10 °C以下的较低温环境中,即阻尼材料处于玻璃态时,阻尼层对铝型材声学性能优化作用相对较差。

## 5 温度对敷有不同厚度阻尼层的型材隔声性能的影响

基于所建立的隔声量预测模型,采用图1中不同温度下黏弹性阻尼层的材料参数,分别对敷设有2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm、4 mm厚阻尼层的铝型材隔声性能进行仿真预测。不同厚度的阻尼层在不同温度下对铝型材隔声性能的优化效果如图13所示。

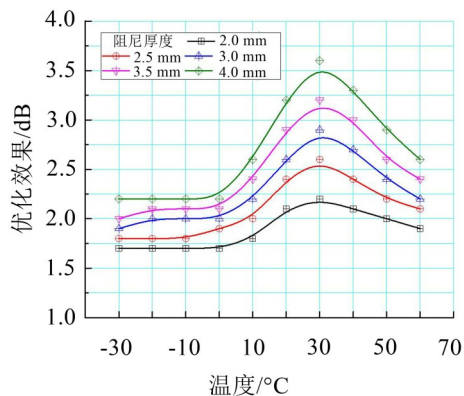


图13 温度对敷设有不同厚度阻尼层型材计权隔声量优化效果的影响

由图13可见,温度对敷有不同厚度阻尼层的铝型材隔声性能的影响规律基本与阻尼层厚度为3 mm时情况一致:阻尼层在10 °C~50 °C环境中,即处于黏流态时,对铝型材隔声性能的优化作用较好。

随着阻尼层厚度的增加,温度对铝型材的计权隔声量影响逐步增大。阻尼层厚度由2 mm增大至4 mm时,温度影响量也由0.8 dB增长至1.4 dB。

同时对不同温度,阻尼层厚度对铝型材隔声性能的影响也不同:在0℃以下的环境中,增大阻尼层厚度,铝型材的隔声性能基本不变;而在30℃温度下,增大阻尼层厚度隔声性能优化最为明显,在2 mm阻尼层的基础上将阻尼层厚度增大到4 mm,计权隔声量仍可再提升1.4 dB。

## 6 结 语

针对温度对敷设黏弹性阻尼层的铝型材声学性能影响的问题,建立铝型材隔声量及振动声辐射预测模型,代入不同温度下阻尼层不同的材料属性,分析温度因素对敷设黏弹性阻尼层的铝型材声学性能(阻尼层降噪效果)的影响,得出以下结论:

(1) 温度因素对敷设黏弹性阻尼层铝型材隔声性能有明显影响。其中,对常温下阻尼层降噪效果较好的频段,即共振区及高频段影响较大。对于所计算的阻尼材料,在30℃左右环境中,阻尼层对铝型材的降噪效果最为明显。同时,温度对敷设不同厚度阻尼层的型材隔声性能的影响规律基本一致,但阻尼层越厚,温度对其降噪效果的影响也越明显,换言之其温变特性越明显。

(2) 温度对阻尼层减振效果,即铝型材振动声辐射性能也有明显影响。其中,对常温下阻尼层减振效果较好的频段,即共振区影响最大。对于所计算的阻尼材料,在30℃左右环境中,阻尼层对铝型材的减振效果最为明显。

(3) 阻尼材料处在黏流态情况下,阻尼层对铝型材声学性能的优化效果最好,而在高温环境中,材料处于高弹态,阻尼效用有所下降,但仍优于低温环

境中(玻璃态情况下)。

### 参考文献:

- [1] 潘利剑,张博明,戴福洪.黏弹阻尼层共固化复合材料不同温度下的阻尼性能[J]. **复合材料学报**, 2008, 25(1): 168-172.
- [2] ASSAF S, GUERICH M. Influence of temperature on sound transmission through viscoelastic sandwich plate [C]. *Coustics'08 Paris*, 2008: 4431-4436.
- [3] 王瑞乾,肖新标,刘佳,等.高速列车阻尼喷涂式铝型材减振降噪特性试验[J]. **噪声与振动控制**, 2014, 34(4): 52-55.
- [4] 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.
- [5] 吴健,肖新标,张玉梅,等.基于FE-SEA混合的铝型材振动声辐射特性预测[J]. **噪声与振动控制**, 2015, 35(3): 33-35.
- [6] RAMACHANDRAN P, NARAYANAN S. Evaluation of modal density, radiation efficiency and acoustic response of longitudinally stiffened cylindrical shell[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2007, 304(1-2): 154-174.
- [7] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2005, 288(3): 669-699.
- [8] 纪琳.中频振动分析方法[M].北京:机械工业出版社, 2013.
- [9] SGARD F, ATALLA N, NICOLAS J. A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2000, 108(6): 2865-2872.
- [10] 王平.车内中频噪声混合FE-SEA方法研究[D].长春:吉林大学,2015.

(上接第120页)

## 4 结 语

减小曳引机下橡胶隔振垫的刚度并替换为相同刚度的橡胶弹簧之后,电梯系统固有频率均减小,且一直不会与曳引机的激振频率相同,避免共振发生,轿厢的垂直振动被大大削弱,图13证明文中的减振策略效果明显。同时仿真结果也验证了如果电梯系统垂直方向的固有频率与曳引机的激振频率一致,电梯轿厢将出现共振的动力学特性。

### 参考文献:

- [1] LORSBACH G P. Analysis of elevator ride quality[J]. **Vibration Elevator World**, 2003, 51(6): 108, 110-111, 113.
- [2] 张国华,于克勇.钢丝绳对电梯垂直振动的影响分析[J].

**金属制品**, 2016, 42(1): 43-46.

- [3] 张长友,朱昌明.电梯系统动态固有频率计算方法及减振策略[J]. **系统仿真学报**, 2007, 19(16): 3856-3859.
- [4] 王艳军,任立刚,于杰.电梯系统动态固有频率分析[J]. **机械设计与研究**, 2010, 37(1): 35-36.
- [5] 张长友.电梯钢丝绳参数激励横向振动研究[D].上海:上海交通大学,2005.
- [6] 胡庆.高层电梯垂直运动的鲁棒控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2010.
- [7] YOUNG MAN CHO, RAJESH RAJAMANI. Identification and experimental validation of a scalable elevator vertical dynamic model[J]. **Control Engineering Practice**, 2001, (9): 181-187.
- [8] 金卫清,张惠侨,郑延军.电梯机械系统动态特性的建模[J]. **机械设计与研究**, 1999(3): 53-56.