文章编号：1006-1355(2021)01-0027-05

高寒区高速列车阻尼铝型材低温环境下隔声特性研究

王 雷[1]，葛剑敏[2]，孙 强[1]，孟凡甫[2]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司，长春 130062； 2. 同济大学 声学研究所，上海 200092）

摘 要：随着环境温度的降低，含阻尼层铝型材的隔声性能逐渐降低。通过理论分析阐明传播媒质特性阻抗对隔声的影响。通过隔声试验，分析从20°C变化到−40°C含阻尼层铝型材在400 Hz～2 500 Hz 1/3倍频程的隔声规律。建立含阻尼层铝型材的有限元模型，进行温度场仿真计算、隔声仿真技术和阻尼优化设计。理论分析表明：温度降低使空气特性阻抗增大，进而隔声量降低。试验结果表明：2 000 Hz频段的隔声量对温度变化最为敏感，灵敏度达0.17 dB/°C，其次是2 500 Hz频段和500 Hz频段。仿真优化表明：使用耐低温阻尼替换原阻尼，可明显提高低温环境下的隔声量。

关键词：声学；低温；阻尼层；铝型材；隔声试验；有限元分析

中图分类号：U238；TU112. 2+1 **文献标志码：**A **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.006

Analysis of Sound Insulation Performance of Extruded Aluminum with Damping Layers in Low Temperature Environments

WANG Lei[1], *GE Jianmin*[2], *SUN Qiang*[1], *MENG Fanfu*[2]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;
2. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract : As temperature decreases, the sound insulation capacity of extruded aluminum with damping layers gradually decreases. In this paper, the effect of the characteristic impedance of the medium on sound insulation is clarified theoretically. Through the test, the sound insulation performance of extruded aluminum with damping layers from 20 °C to −40 °C at 400 Hz - 2 500 Hz 1/3 octave is revealed. Finite element model of the extruded aluminum is established, the temperature field is simulated, sound insulation technique and damping optimization are designed. Theoretical analysis shows that temperature decreasing can increase the characteristic impedance of the air, thereby reduce the sound insulation. The test results show that the sound insulation in the 2 000 Hz frequency band is most sensitive to the temperature change, the sensitivity can reach 0.17 dB/°C, followed by 2 500 Hz and 500 Hz frequency bands. Simulation optimization shows that the extruded aluminum is an orthotropic structure. Using low-temperature-resistant damping material instead of the original damping material can significantly improve the sound insulation capacity in low temperature environments.

Key words : acoustics; low temperature; damping layer; extruded aluminum; sound insulation test; finite element analysis

随着国内高速铁路网的发展，中国高铁开始走向国外，我国已与多个国家建立了高速铁路合作项目，如：莫斯科至喀山高速铁路，其室外最低环境温度在−40°C以下。然而低温环境对阻尼等黏弹性材料的性能影响很大，进而影响含阻尼层构件的隔声性能，导致车内噪声水平相比常温环境下更为严峻。所以研究低温下温度梯度对构件隔声性能的影响，以及保持列车在低温环境下的隔声性能至关重要。

孙强等[1]对−30°C低温环境下250 km/h高速列车车内客室端部噪声进行了测试，并分析了运行环境温度对车内噪声影响规律和低温环境下高速列车减振降噪措施。由于冬季高速列车运行时转向架区域的减振性能会下降，使得振动更容易传递至车内激发车内客室空腔的声学模态而增大车内噪声。提出了用金属减振器构成浮置地板结构，从而改善了低温环境下客室端部异常噪声问题。

收稿日期：2020-05-20

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2016YFB1200506-07）

作者简介：王雷（1981−），男，长春市人，高级工程师，主要研究方向为高速动车组总体设计。

通信作者：葛剑敏，男，教授，博士生导师。

E-mail: jmge@tongji.edu.cn

本文以-40°C低温环境下400 km/h高速列车含阻尼层的地板铝型材为主要研究对象，将根据试验结果，分析其在不同温度梯度下的隔声曲线变化规律，并且建立该结构的有限元模型，验证其在温度场影响下的隔声性能。通过替换耐低温材料等对该结构进行声学优化设计，得到了较优的-40°C低温环境下400 km/h高速列车含阻尼层的地板铝型材结构的设计方案。

1 不同温度下媒质特性阻抗对隔声影响

首先讨论传播媒质随温度的变化对隔声量的影响。假设一厚度为D、特性阻抗为$R_2=\rho_2c_2$的待测隔声构件（媒质Ⅱ）置于特性阻抗为$R_1=\rho_1c_1$的半无限媒质Ⅰ和特性阻抗$R_3=\rho_3c_3$的半无限媒质Ⅲ之间，如图1，并假设Ⅰ和Ⅲ均为理想流体媒质。

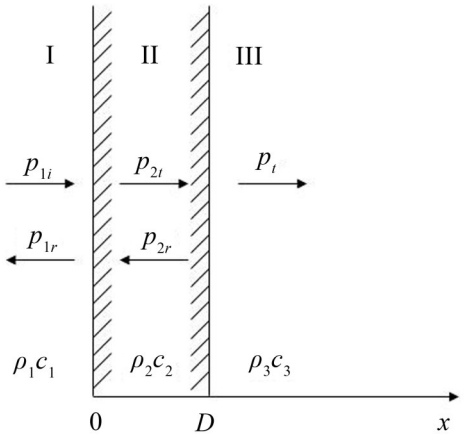


图1 通过中间媒质透射的情况

当一列平面声波（p_{1i}，v_{1i}）垂直入射到媒质Ⅱ，则空间中存在的各列反射和透射声波，其声压和质点速度可表示为

$$p_{1i}=p_{ia}e^{j(\omega t-k_1x)}$$
$$v_{1i}=v_{ia}e^{j(\omega t-k_1x)}$$
$$p_{1r}=p_{1ra}e^{j(\omega t+k_1x)}$$
$$v_{1r}=v_{1ra}e^{j(\omega t+k_1x)}$$
$$p_{2t}=p_{2ta}e^{j(\omega t-k_2x)}$$
$$v_{2t}=v_{2ta}e^{j(\omega t-k_2x)}$$
$$p_{2r}=p_{2ra}e^{j(\omega t+k_2x)}$$
$$v_{2r}=v_{2ra}e^{j(\omega t+k_2x)}$$
$$p_t=p_{ta}e^{j[\omega t-k_3(x-D)]}$$
$$v_t=v_{ta}e^{j[\omega t-k_3(x-D)]}$$

式中：$k_1=\frac{\omega}{c_1}=\frac{2\pi}{\lambda_1}$，$k_2=\frac{\omega}{c_2}=\frac{2\pi}{\lambda_2}$，$k_3=\frac{\omega}{c_3}=\frac{2\pi}{\lambda_3}$，分别对应媒质Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的声波波数。

在$x=0$和$x=D$处，应用声压连续和法向质点振速连续的条件为

$$p_{1i}+p_{1r}=p_{2t}+p_{2r}$$
$$v_{1i}+v_{1r}=v_{2t}+v_{2r}$$
$$p_{2t}+p_{2r}=p_t$$
$$v_{2t}+v_{2r}=v_t$$

综合代数运算，可得声强透射系数

$$\tau=\frac{4Z_1Z_3}{(Z_1+Z_3)^2\cos^2k_2D+(Z_2+\frac{Z_1Z_3}{Z_2})^2\sin^2k_2D}$$

式中：$Z_1=\frac{\rho_1c_1}{\cos\theta_i}$，$Z_2=\frac{\rho_2c_2}{\cos\theta_{2t}}$，$Z_3=\frac{\rho_3c_3}{\cos\theta_t}$，其中：$\theta_i$为声波入射角，$\theta_{2t}$为Ⅱ中折射角，$\theta_t$为透射角。

隔声量R的定义为$R=10\cdot\lg(1/\tau)$，结合声强透射系数公式可知，隔声量不仅与隔声构件本身有关，还与构件两侧媒质的特性阻抗Z_1和Z_3有关。一般地，对于较厚的固体板件处于空气中的情形，假设板件的特性阻抗远大于空气的特性阻抗，即$Z_2\gg Z_1$，$Z_2\gg Z_3$，在标准气压下，空气温度降低，密度增大，特性阻抗增大。当降低外侧（媒质Ⅰ）温度，保持内侧（媒质Ⅲ）为常温时，计算出的隔声量要比两侧均为常温时的隔声量偏低，理论偏移量如表1所示。

表1中的偏移量为单侧空气温度变化时的值，当两侧温度都变化时的偏移量是单侧温度变化偏移量的叠加值。

2 隔声试验分析

试验件为两面涂有阻尼浆的列车地板铝型材，具体尺寸参数如表2所示。

试验在隔声箱中进行，发声室为可控温湿度环境，内部放置平面声源。接收室为常温半自由场环境，测量时控制恒温在20°C，本文的主要分析带宽为400 Hz～2 500 Hz 1/3倍频程。

表1 标准气压下空气随温度变化

(外侧温度，内侧温度)	声速/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})	特性阻抗	偏移量/dB
(20°C，20°C)	343	1.205	413.32	0
(0°C，20°C)	331	1.293	427.98	-0.15
(-20°C，20°C)	319	1.396	445.32	-0.32
(-40°C，20°C)	307	1.520	466.64	-0.53

表 2 带阻尼地板铝型材尺寸参数

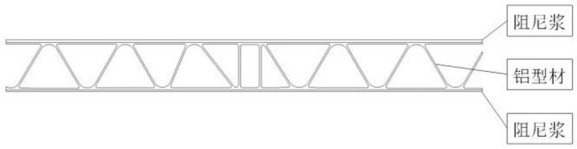
结构参数	尺寸规格
	
试件尺寸	1 000 mm×1 000 mm
总厚度	80 mm
上面板厚度	3 mm
筋板厚度	2.5 mm
下面板厚度	3 mm
内侧阻尼厚度	4.5 mm
外侧阻尼厚度	2.5 mm



图 2 接收箱体内部

在发声室布置一个平面传声器测点，贴附在试件中心，接收室内分别沿中心轴距离试件表面 100 mm 和 200 mm 各布置一个测点[2]，如图 3 所示。

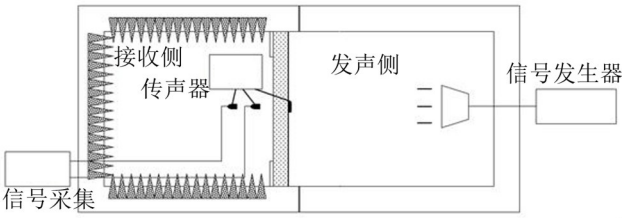


图 3 隔声测量示意图

在试件各表面设置热电偶以便监测温度变化。以发声室空气中的热电偶测量温度为基准，每间隔 10°C 进行一次测量，测量要待各热电偶温度达到稳定后再进行，测量时信号发生器发出白噪声信号，使入射声场达到 100 dB 以上。待声源开启声场稳定后，采集三组稳态噪声数据，完成后关闭声源。通过测量得到的隔声曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，在测量频率范围内，随着温度降低，含阻尼层铝型材的整体隔声曲线下降，温度对隔声性能的影响主要体现在 500 Hz、2 000 Hz 和 2 500 Hz 三个频段，对应阻尼控制区和吻合效应控制区，其余频段隔声量随温度变化不明显。假设隔声量对温度的灵敏度＝隔声偏移量/温度偏移量，单位

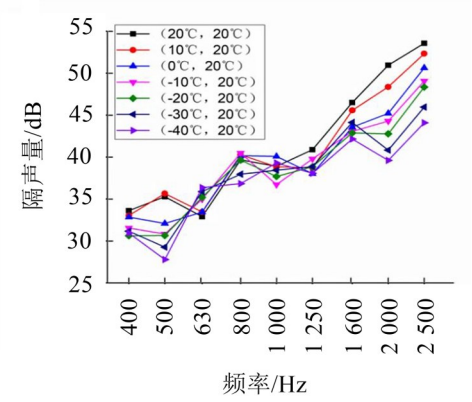


图 4 带阻尼铝型材 1/3 倍频程隔声曲线

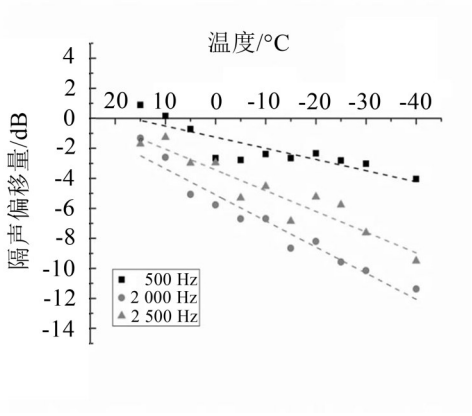


图 5 三个频段隔声偏移量随温度变化

dB/°C。从 20°C 降至 −40°C 范围内，上述三个频段的隔声偏移量随温度的变化可近似为线性变化，曲线如图 5 所示，拟合函数如表 3 所示。

表 3 隔声偏移量函数

1/3 倍频程中心频率	拟合函数	方差 R^2
500 Hz	$\Delta R = 0.074T - 1.24$	0.75
2 000 Hz	$\Delta R = 0.174T - 5.08$	0.95
2 500 Hz	$\Delta R = 0.138T - 3.42$	0.90

由图 5 和表 3 可知，2 000 Hz 频段隔声量随温度衰减最大，灵敏度为 0.17 dB/°C，2 500 Hz 频段次之，灵敏度为 0.14 dB/°C，500 Hz 频段衰减较小，灵敏度为 0.07 dB/°C。故温度对含阻尼层铝型材的影响主要在吻合效应和阻尼控制区。

3 隔声特性的有限元仿真计算

为了方便设计和优化含阻尼层铝型材的声学性能，借助有限元方法进行温度梯度下有阻尼构件隔声性能的仿真计算。隔声模型依据实际尺寸建立，在 Virtual. Lab 中建立的常温 FEM(Finite element method)隔声模型的步骤如图 6 所示。

空气参数按表 1 中所列的数据选取，阻尼浆的杨氏模量为 1.3 GPa，泊松比为 0.48，密度为 1 400 kg/m^3，损耗因子随温度变化，具体数值通过悬臂梁

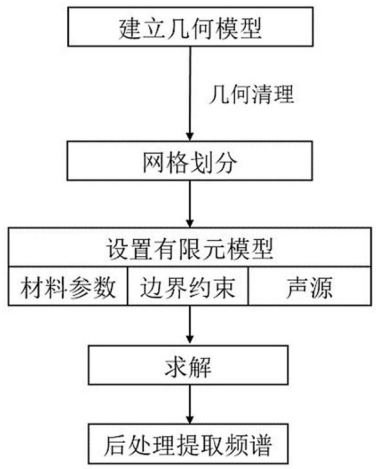


图 6 直接声固耦合计算步骤

法测量计算后得到[3]；铝合金的杨氏模量为71 GPa，泊松比为0.33，密度为2 780 kg/m^3，铝型材的损耗因子相比阻尼层很小，在10^{-3}～10^{-2}量级，本文取常值0.01。

在Virtual.Lab中设置型材结构和阻尼结构为各向同性3D实体单元，空气定义为流体属性，实体与流体之间通过Coupling surface set设置声固耦合面，入射面和辐射面定义AML（Automatic matching layer）属性，模拟无反射边界，声源使用Distributed acoustic plane waves来模拟实际发声情况，最终建立的有限元隔声模型如图7所示。

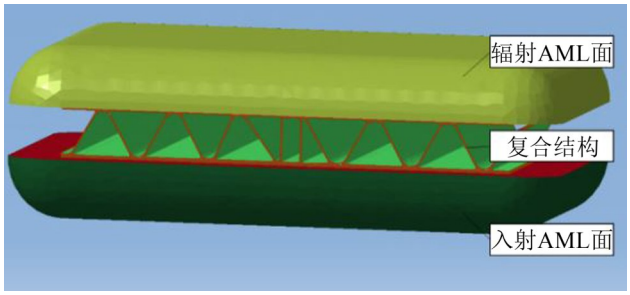


图 7 含阻尼层铝型材的FEM隔声模型

对于受温度梯度影响的有限元模型，需要先将建成后的模型通过ANSYS的Steady-state thermal模块进行不同温度场计算，计算前需要以变量形式输入可能受到温变影响的属性，如各个材料的损耗因子、杨氏模量和导热系数等，且模型需要考虑空气与结构之间的对流换热。然后再进行直接声固耦合隔声计算。

为了验证模型的准确性，分别将温度梯度（20°C，20°C）和（−40°C，20°C）的计算结果与相应实测结果进行对比，如图8和图9所示。

由图8和图9可知，常温下的仿真与实测结果吻合度很高，误差在2.0 dB以内，而低温下的仿真值与实测值发生了一定的频率偏移，这主要是边界条件

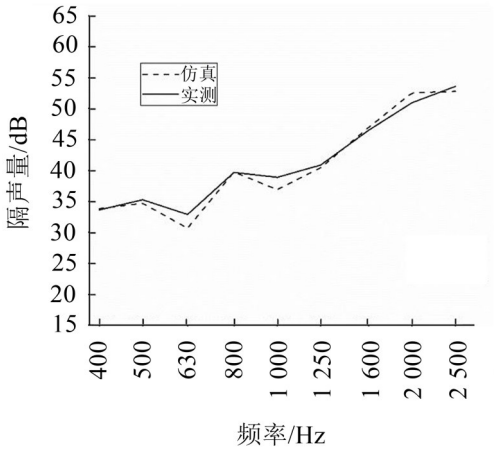


图 8 温度梯度（20°C，20°C）时的隔声曲线对比

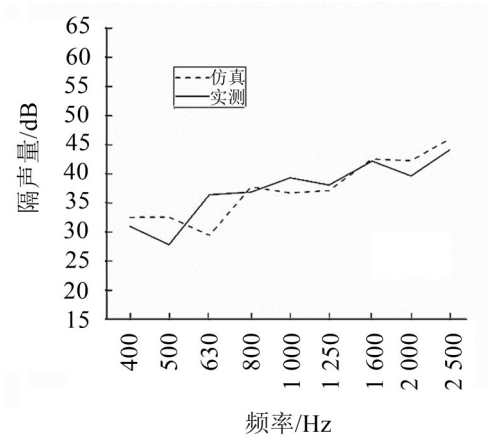


图 9 温度梯度（−40°C，20°C）时的隔声曲线对比

变化导致的：因为在实际测量时，构件四周使用螺栓进行紧固，在温度发生变化时，各部位热膨胀程度发生变化，四周边界的约束条件减弱，而边界约束条件对构件的固有频率的影响很大[4]，故而隔声曲线向低频偏移。

不同温度梯度下的仿真隔声曲线如图10所示。

由图10分析可知，1 250 Hz频段以上的隔声量随温度变化较大，尤其在2 000 Hz频段以后的吻合控制区。500 Hz、2 000 Hz和2 500 Hz三个频段，对应的隔声量随温度变化曲线如图11所示，拟合函数如表4所示。

表 4 隔声偏移量函数

1/3倍频程中心频率/Hz	拟合函数	方差R^2
500	$\Delta R = 0.030T - 1.72$	0.97
2 000	$\Delta R = 0.159T - 3.96$	0.99
2 500	$\Delta R = 0.098T - 3.28$	1

由图11和表4分析可知，500 Hz、2 000 Hz和2 500 Hz隔声量随温度的灵敏度分别为0.03 dB/°C、0.16 dB/°C和0.10 dB/°C，2 000 Hz频段的灵敏度与实测结果较为接近。

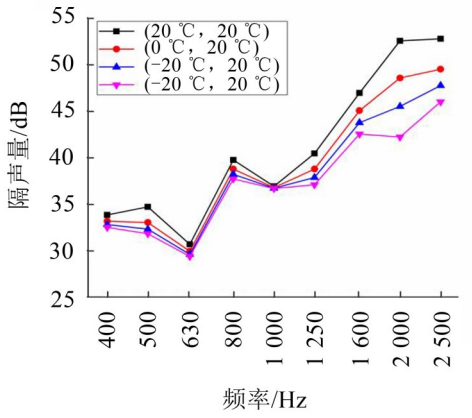


图 10　不同温度梯度下的复合结构隔声频谱

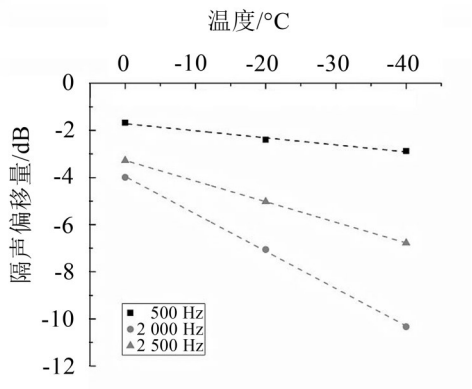


图 11　隔声偏移量随温度变化

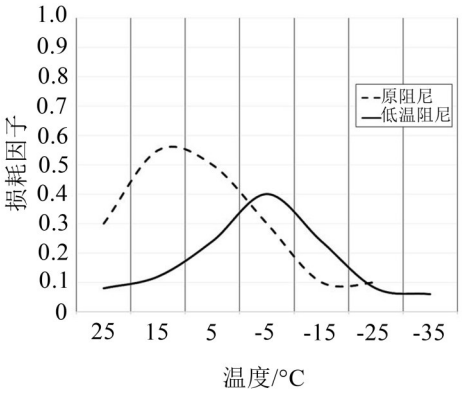


图 12　耐低温阻尼浆温度谱

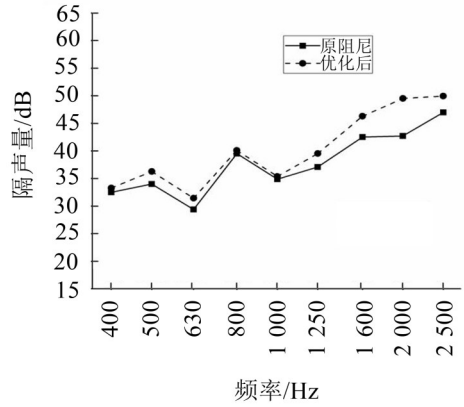


图 13　耐低温阻尼与原阻尼的隔声频谱对比

4　阻尼材料的优化设计

由于原阻尼浆的适用温度较高，低温环境下其损耗因子较低。故可以通过调整分子结构，加入增塑剂，共聚或共混等方法，实现阻尼的适用温度向低温移动，但峰值损耗因子会有所下降[5]。本文引入新型耐低温阻尼浆，其损耗因子温度谱如图 12 所示。其余参数不变。

在模型中使用耐低温阻尼浆材料替换原阻尼浆材料，计算温度梯度（−40°C，20°C）条件下的隔声量如图 13 所示。

结果表明：敷设耐低温阻尼浆的复合结构对全频带隔声量均有明显提升效果，其中 2 000 Hz 频段的隔声量提高了 6.4 dB。

5　结　语

本文针对含阻尼层的铝型材结构，开展了不同温度梯度下的隔声试验，进行了有限元隔声性能的仿真计算与声学结构的优化设计，得出结论如下：

（1）对于任意隔声构件，温度变化首先会影响构件两侧媒质特性阻抗的变化。随着温度降低，空气特性阻抗增大，构件的隔声量降低，温度梯度（−40°C，20°C）时隔声量相比常温下可降低 0.5 dB。

（2）对于含阻尼层型材结构，由于阻尼材料的损耗因子随温度变化较大，导致隔声量受温度影响很大。温度对含阻尼层铝型材的影响主要体现在 500 Hz、2 000 Hz 和 2 500 Hz 频段，这与阻尼的主要作用频段也是相吻合的。

（3）仿真结果与实测结果吻合度较好。

（4）使用耐低温阻尼替换原阻尼，可显著增加低温环境下的隔声量，改善车内的声环境。

参考文献：

[1] 孙强，张捷，肖新标，等. 低温环境下高速列车车内噪声问题及控制方案[J]. 振动、测试与诊断，2018，38(6)：1217-1222.

[2] 宋拥民，盛胜我. 小尺寸构件隔声测量方法的研究[J]. 噪声与振动控制，2002，22(5)：32-34.

[3] 全国声学标准化技术委员会. GB/T 16406−1996 声学 声学材料阻尼性能的弯曲共振测试方法[S].

[4] 张捷，肖新标，王瑞乾，等. 高速列车铝型材声振特性测试及等效建模[J]. 浙江大学学报（工学版），2017，51(3)：545-553.

[5] 常冠军. 黏弹性阻尼材料[M]. 北京：国防工业出版社，2012：148-153.