DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.127

基于粒子阻尼的高铁内装木地板减振降噪设计

汤晏宁[1]，戴　宇[2]，肖望强[2]，邵　堃[2]
（1. 中车长春轨道客车股份有限公司 声学实验室，吉林 长春 130062；
2. 厦门大学 航空航天学院，福建 厦门 361000）

摘　要：随着高铁速度的不断提升，振动噪声问题越来越显著，这对高铁内装木地板的隔声性能和轻量化提出了更高的要求。文章对某尺寸内装木地板进行隔声性能研究，首先基于离散元法，对内装木地板粒子阻尼器的外观和结构进行设计，以满足安装要求；然后，通过统计不同粒子阻尼器配置下的耗能值，研究不同安装区域、不同粒子材质和不同粒子粒径对于内装木地板隔声效果的影响，从而得到最优配置方案；最后，通过隔声试验进行验证。试验数据表明，不同粒子阻尼器配置方案的隔声性能与离散元仿真结果一致，证明了离散元模型的有效性，并且最优粒子阻尼器配置方案的各频段隔声量提升明显，计权隔声量提升了3.9 dB，完全符合预期目标，证明了粒子阻尼器对于内装木地板减振降噪的有效性。通过将粒子阻尼技术应用于高速动车组内装木地板的减振降噪中，为高速动车组内装地板等结构的减振降噪提供了新的思路，具有重要的工程意义和应用价值。

关键词：高铁内装木地板；粒子阻尼；离散元法；隔声性能；高速动车组

中图分类号：U292.91+4；U270.1+6　**文献标识码：**A　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0085-08

0　引言

随着经济的发展，高速动车组越来越成为人们日常出行不可或缺的交通工具[1-2]，其运行过程中的振动与噪声问题也引起了人们普遍的关注。高速动车组为了追求良好的运输效率使得运行速度越来越高，速度400 km/h已提到实现日程上[3]。随着高铁运行速度的不断提升，轻量化与振动噪声问题成为影响列车运行速度的关键因素[4-5]。目前，胶合地板和铝蜂窝地板已广泛应用于高铁内装地板上，但存在胶合地板重量大、防火性能较差，铝蜂窝地板隔声量太小等问题。内装木地板由于具有重量较轻、高阻燃等其他地板不能比拟的优点，受到了广泛关注，但其隔声量有待进一步提高[6]。

粒子阻尼技术是一种将粒子材料填充到机构内部或附加腔体中进行振动衰减的被动减振技术[7]。当机构振动时，粒子之间、粒子与机械部件之间不断地摩擦和碰撞消耗了机构的振动能量，从而实现了减小结构振动的目的，进而达到增加隔声量的效果。该技术具有显著的减振效果、耐高温和恶劣环境、附加质量要求小、对机构形式改动小等优点[8-9]，使其在机械工程[10-12]、轨道交通[13-15]和航空航天[16-18]等领域得到了广泛应用。本文通过将粒子阻尼技术应用于高速动车组内装木地板的减振降噪中，为高速动车组内装地板等结构的减振降噪提供一种新的思路和参考。

1　基于耗能的粒子阻尼器设计

1.1　粒子阻尼器外观结构设计

内装木地板位于地板铝型材上层，通过木骨、弹

基金项目：国家重点研发计划（2021YFB3801803）；福建省科技计划项目（2022H6003）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（20720210042）；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划（P2021J035）

通信作者：肖望强（1981—）男，博士，教授，博士生导师，主要从事振动噪声控制方面的研究；E-mail: wqxiao@xmu.edu.cn

引用格式：汤晏宁, 戴宇, 肖望强, 等. 基于粒子阻尼的高铁内装木地板减振降噪设计[J]. 机车电传动, 2024(1): 85-92.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.127.

Citation：TANG Yanning, DAI Yu, XIAO Wangqiang, et al. Particle damping-based vibration and noise reduction design for high speed rail interior wooden flooring[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 85-92.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.127.

性支承与地板铝型材相连，如图1所示。其中，木骨与弹性支承胶接于地板铝型材上，而内装木地板又胶接于木骨和弹性支承上。以内装木地板试验件为例，内装木地板试验件外形尺寸（长×宽×厚）为985 mm×970 mm×15 mm，质量为8.3 kg，内装木地板试验件木骨与弹性支承位置如图2所示。

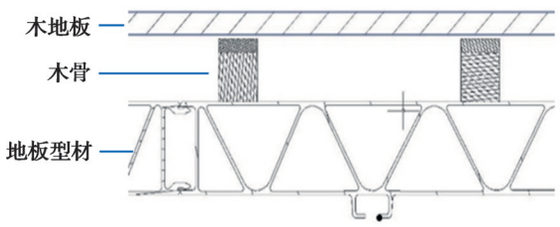


图1 内装木地板位置

Fig. 1 Position of interior wood flooring

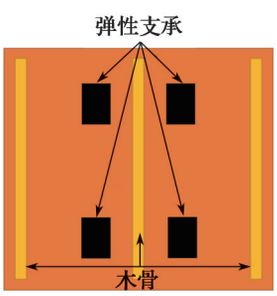


图2 木骨与弹性支承位置

Fig. 2 Wooden frame and elastic support position

粒子阻尼器的设计与安装应满足以下要求：①阻尼器应避开木骨与弹性支承的位置，不影响木骨、弹性支承与地板铝型材的安装，无须改变内装木地板原始结构，方便安装；②粒子阻尼器应与内装木地板表面紧密贴合，保证阻尼器与内装木地板充分接触，从而发挥最好的隔声效果；③保证粒子阻尼器有足够的可靠性和寿命。因此，依据内装木地板的结构特征，阻尼器外壳设计为薄壁式阻尼器，在保证阻尼器可靠性的同时又有利于高速动车组的轻量化。

如图3所示，粒子阻尼器由壳体和盖板组成，为了避免粒子堆积影响减振性能，在壳体内设置4个空腔用来填充粒子，填充粒子后将盖板与壳体固定；粒子阻尼器采用胶接的方式与内装木地板连接。初步设计阻尼器外壳外形尺寸（长×宽×高）分别为150 mm×150 mm×13 mm，粒子阻尼器采用的外壳材质为重量较轻

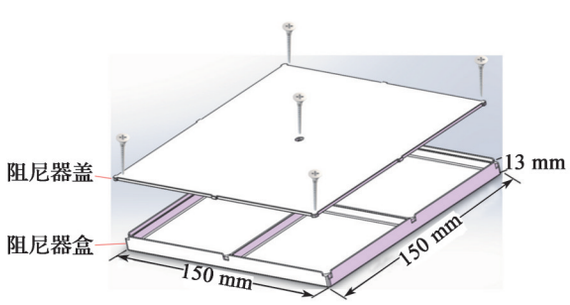


图3 粒子阻尼器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of particle damper

的光敏树脂外壳，粒子填充率为95%，阻尼器的安装位置、填充粒子材质和粒子粒径由具体耗能值得出。

1.2 “内装木地板–粒子阻尼器”离散元耗能模型

离散元法将每一个粒子视为1个单元，每一个粒子单元都有相应的体积和形状，它们共同组成了1个不连续的整体。在离散元模型中粒子模型分为软球模型和硬球模型，其中，软球模型将粒子间的法向接触力简化为弹簧和阻尼器，切向接触力简化为弹簧、阻尼器和滑动器，引入刚度系数和阻尼系数等参量，不考虑粒子表面变形，依据粒子间法向重叠量和切向相对位移计算接触力，不考虑接触力加载历史；硬球模型完全忽略粒子接触力大小和粒子表面变形细节，接触过程简化为瞬间完成的碰撞过程，碰撞后速度直接给出，是接触过程中力对时间积分的结果，碰撞过程中能量的耗散采用粒子表面恢复系数予以表达。由于硬球模型完全忽略粒子接触力大小和粒子表面变形细节，故本文通过Hertz接触理论，将单个粒子视为刚性体，整个粒子系统的变形由每个粒子的变形组成；粒子接触为软球点接触，即存在重叠量；高铁内装木地板离散元耗能模型如图4所示。

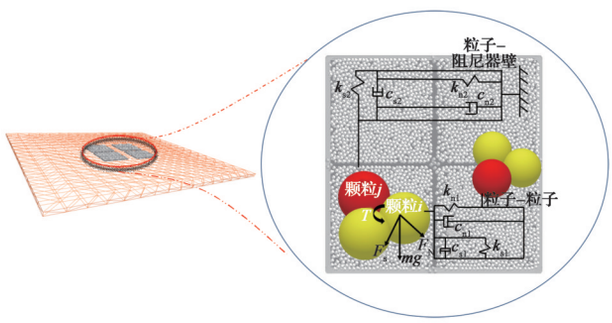


图4 粒子阻尼器离散元模型

Fig. 4 Discrete elemental modeling of particle damper

如图4所示，内装木地板系统的离散元模型由粒子与粒子、阻尼器壁的振动模型和接触模型组成。其中，粒子i的自身重力为mg，颗粒与阻尼器壁接触法向力为F_N、切向力为F_S以及外力矩为T，k_{n1}、c_{n1}分别为粒子与粒子的法向弹性系数与法向阻尼系数，k_{n2}、c_{n2}分别为粒子与阻尼器壁的法向弹性系数与法向阻尼系数，k_{s1}、c_{s1}分别为粒子与粒子的切向弹性系数与切向阻尼系数，k_{s2}、c_{s2}分别为粒子与阻尼器壁的切向弹性系数与切向阻尼系数。粒子的振动模型可分解为法向振动、切向滑动和粒子滚动，这3种振动形式的运动方程为：

$$\left.\begin{aligned} m_{ij}\frac{\mathrm{d}^2x_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t^2}+c_\mathrm{n}\frac{\mathrm{d}x_\mathrm{n}}{\mathrm{d}t}+k_\mathrm{n}x_\mathrm{n}=F_\mathrm{N}\\ m_{ij}\frac{\mathrm{d}^2x_\mathrm{s}}{\mathrm{d}t^2}+c_\mathrm{s}\frac{\mathrm{d}x_\mathrm{s}}{\mathrm{d}t}+k_\mathrm{s}x_\mathrm{s}=F_\mathrm{S}\\ I_{ij}\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+c_\mathrm{s}\frac{\mathrm{d}x_\mathrm{s}}{\mathrm{d}t}r+k_\mathrm{s}x_\mathrm{s}r=T \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：m_{ij}为粒子与粒子接触的等效质量；I_{ij}为粒子与粒子接触的等效转动惯量；x_n,x_s分别为粒子法向与切向的接触位移；r为旋转半径。

粒子与粒子的法向接触系数k_{n1}为

$$k_{n1}=\frac{2E}{3\left(1-\varepsilon^2\right)}\sqrt{R_{ij}} \tag{2}$$

式中：E为弹性模量；ε为泊松比；R_{ij}为粒子i与粒子j接触的等效半径。

粒子与粒子的切向接触系数k_{s1}为

$$k_{s1}=8G_{ij}\sqrt{R_{ij}x_n} \tag{3}$$

式中：G_{ij}为粒子i与粒子j的等效剪切模量。

粒子i与阻尼器壁间的法向接触系数k_{n2}为

$$k_{n2}=\frac{4}{3}\left(\frac{1-\varepsilon_i^2}{E_i}+\frac{1-\varepsilon_j^2}{E_j}\right)^{-1}\sqrt{R_i} \tag{4}$$

粒子i与阻尼器壁间的切向接触系数k_{s2}为

$$k_{s2}=8G_{ij}\sqrt{R_ix_n} \tag{5}$$

粒子i与粒子j间的法向阻尼系数c_n与切向阻尼系数c_s分别为：

$$c_n=-\frac{2\ln\left(e\sqrt{m_{ij}k_n}\right)}{\sqrt{\pi^2+\ln^2 e}} \tag{6}$$

$$c_s=-\frac{2\ln\left(e\sqrt{m_{ij}k_s}\right)}{\sqrt{\pi^2+\ln^2 e}} \tag{7}$$

式中：e为粒子的恢复系数。

1.3　粒子能量耗散模型

粒子阻尼器之所以能加强高铁内装木地板的隔声效果，其本质是减小内装木地板的振动特性。当高速动车组高速行驶时，内装木地板由于振动会带来辐射噪声，通过粒子阻尼器随内装木地板结构的振动，使得粒子与粒子、阻尼器壁产生强烈碰撞，将外界的振动能量通过碰撞、摩擦等形式耗散，从而达到降振、提高内装木地板的隔声效果。

粒子能量耗散主要包括碰撞消耗的能量和摩擦消耗的能量，当相邻粒子i和j碰撞时，碰撞耗能为

$$\Delta E_{\mathrm{coll}-ij}=\sum_{i=1,i\neq j}^{j}\left[\frac{\left(1-e^2\right)}{2\left(\frac{1}{m_i}+\frac{1}{m_j}\right)}\right]\left|\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}y_j}{\mathrm{d}t}\right|^2 \tag{8}$$

摩擦所消耗的能量根据摩擦力做功确定，可表示为

$$\Delta E_{\mathrm{fric}-ij}=\sum_{i=1,i\neq j}^{k}\left(\mu F_{nij}\Delta S_\mu\right) \tag{9}$$

式中：μ为粒子之间的摩擦因数；F_{nij}为接触粒子间法向压力；ΔS_μ为接触粒子间切向相对位移。

粒子与阻尼器壁碰撞所消耗的能量和摩擦所消耗的能量计算方法与粒子之间的耗能计算方法相似，分别记为$\sum E_{\mathrm{coll}-im}$和$\sum E_{\mathrm{fric}-im}$，因此粒子系统的总体能耗为

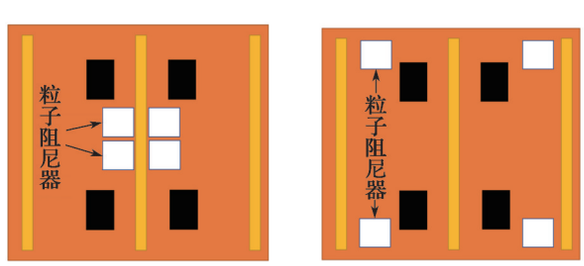
$$E=\sum E_{\mathrm{coll}-ij}+\sum E_{\mathrm{coll}-im}+\sum E_{\mathrm{fric}-ij}+\sum E_{\mathrm{fric}-im} \tag{10}$$

2　粒子阻尼器配置影响分析

粒子阻尼系统的耗能直接受单个粒子质量、恢复系数、相对速度、切向相对位移、摩擦因数等因素的影响，在实际中表现为受到粒子粒径、材质、填充率、安装位置等因素影响。根据相关文献的研究，对于不同填充率的耗能情况，粒子填充率的变化就是粒子流态的变化，表现为粒子等效粘滞系数的变化。粒子从低填充率向高填充率的变化过程，实际是粒子从惯性流到弹性流的变化过程。粒子的填充率直接影响阻尼器内的粒子数量和粒子的相对运动空间，过低的粒子填充率会导致阻尼器内部粒子数量不足、降低碰撞概率，还会降低阻尼效应产生的速率，进而导致耗能减少，减振效果不佳。根据不同填充率的耗能情况研究，当粒子填充率为95%左右时，阻尼器耗能最大，故本文基于95%的填充率对粒子材质、粒子粒径和粒子阻尼器安装位置等因素的影响开展仿真分析研究。

2.1　粒子阻尼器安装位置研究

在粒子阻尼器设计参数中，阻尼器在内装木地板上的安装位置是影响粒子阻尼器减振效果的主要因素。这是由于当高速动车组在高速运行时，内装木地板会受到不同频率的激励作用，导致内装木地板的不同位置产生不同程度的位移变形，粒子系统产生不同的阻尼力。在合适的位置安装粒子阻尼器能够有效提高粒子阻尼的碰撞与摩擦效应，形成的等效黏性阻尼系数可降低内装木地板的振动程度。因此，为了确定粒子阻尼器合理的安装位置，使粒子阻尼器充分地发挥阻尼作用，需要研究在不同位置安装粒子阻尼器对于地板铝型材的减振效果。初步选取“方案一”与“方案二”对应的2个区域作为粒子阻尼器的安装位置，2种位置方案如图5，根据粒子阻尼器及其型腔尺寸，在内装木地板表面对应位置型腔内各安装4个粒子阻尼器。



(a) 方案一　　(b) 方案二

图5　粒子阻尼器布置方案

Fig. 5　Layout options of particle damper

为了保证计算内装木地板耗能效果数据的准确性，仿真计算时填充的粒子材质、填充率和粒径等相关参数保持一致，只改变粒子阻尼器的安装位置。将内装木地板四周固定，并设置内装木地板的材料参数：密度为600 kg/m^3，弹性模量为11 GPa，泊松比为0.3；在内装木地板表面所对应位置安装粒子阻尼器，粒子材料的密度为1 840 kg/m^3，恢复系数为0.37，泊松比为0.28，粒径为3 mm，填充率为95%，阻尼器壁的恢复系数取0.2；设置激励为100 Hz的定频激励，激励力取单位力。通过改变粒子阻尼器不同安装位置来确定不同布置方案的耗散能量值，不同粒子阻尼器安装位置耗能值如图6所示。

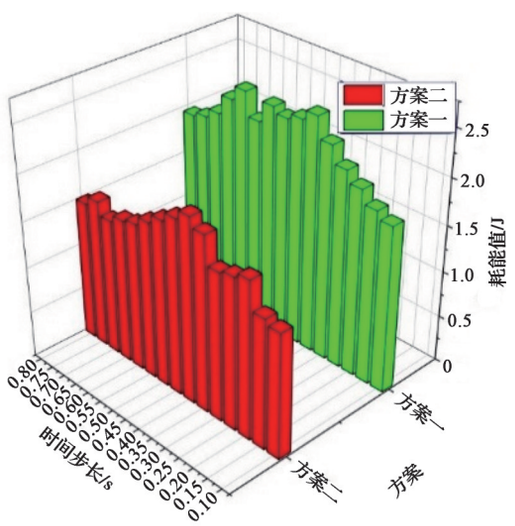


图6　不同布置方案耗能值

Fig. 6　Energy consumption values for different layout options

由图6可知，对于激励为100 Hz的定频激励，“方案一”的耗能值远大于“方案二”，因此粒子阻尼器的安装位置选定为“方案一”。

2.2　粒子阻尼器粒子材质研究

粒子阻尼器的粒子材质是影响阻尼器耗能值的主要因素。不同的粒子材质有不同的材料参数，而弹性模量、剪切模量、泊松比、恢复系数等因素将直接影响系统耗能值。由于要考虑实际工程应用，所以采用市场中应用广泛的铁基粒子、钨基粒子和陶瓷基粒子进行仿真和试验。不同粒子材料参数如表1所示，粒子材质的耗能模型如图7所示。

在粒子阻尼器中分别添加铁基粒子、陶瓷基粒子和钨基粒子，粒子粒径按3 mm计算，填充率为95%，仿真计算中设置的激励为100 Hz的定频激励，激励力取单位力，其他相关参数保持一致，通过改变粒子材质参数来确定不同方案的耗散能量值，不同粒子材质耗能值如图8所示。

通过比较不同粒子材质的耗能值，可发现在同等条件下，钨基粒子耗能值比陶瓷基粒子、铁基粒子大，这可能是由于在粒子表面摩擦因数和粒子表面恢复系数相同的情况下，粒子材料密度越大，相同体积的粒子单次碰撞过程中的接触力更大，碰撞耗能和摩擦耗能越大，从而粒子的耗能增大，减振效果越好。因此，本文选用钨基粒子作为粒子材质。

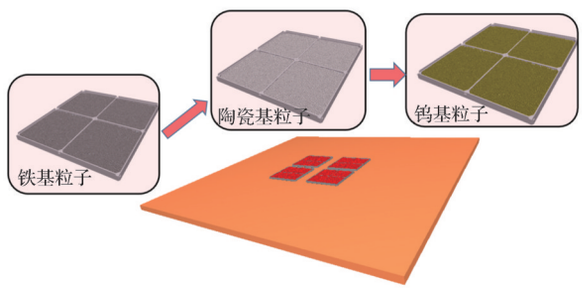


图7　不同粒子材质耗能模型

Fig. 7　Energy consumption model for different particle materials

表1　不同粒子材料参数

Table 1　Parameters of different particle materials

粒子材料	密度ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量E/GPa	剪切模量G/GPa	摩擦因数μ
陶瓷基	2 750	43.6	16	0.35
铁基合金	7 850	200.0	80	0.30
钨基合金	1 840	340.0	130	0.28

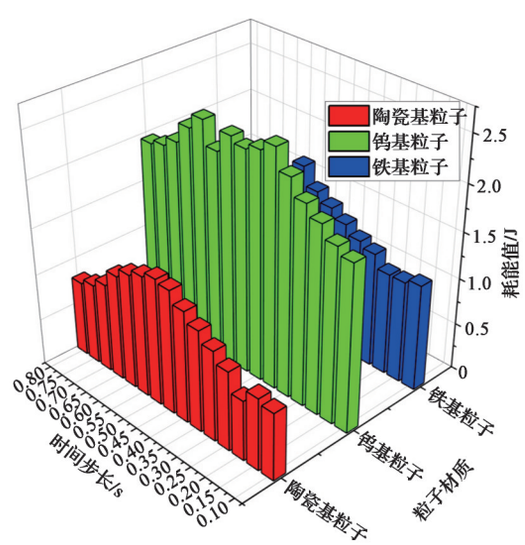


图8　不同粒子材质耗能值

Fig. 8　Energy consumption values for different particle materials

2.3　粒子阻尼器粒子粒径研究

粒子粒径是影响粒子阻尼器效果的一个主要因素，粒子耗能效果并不是与粒径成正比；若粒子粒径过小，虽然同等体积下粒子数量最多，粒子间更容易发生接触与碰撞，但是粒子粒径小会直接导致粒子间摩擦因数变小。粒径较大的粒子间虽然接触面积较大，但是相同容积下数量太少导致碰撞次数太少，不利于耗能的增加，所以最佳粒径采用离散元软件进行具体分析。粒子粒径的能量耗散模型如图9所示。

在粒子阻尼器中添加钨基粒子，粒径分别为2

mm、3 mm、4 mm，填充率为95%。计算中设定激励为100 Hz的定频激励，激励力取单位力，其他相关参数保持一致，通过改变粒子粒径来确定不同方案的耗散能量值，不同粒子材质耗能值如图10所示。

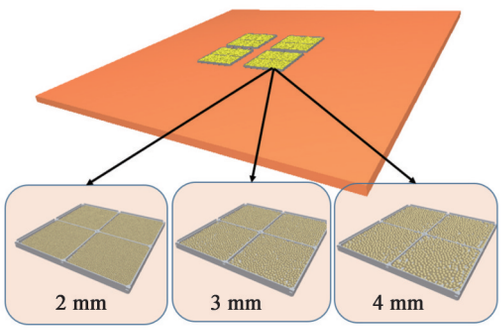


图9　不同粒子粒径能量耗散模型

Fig. 9　Energy dissipation models for different particle sizes

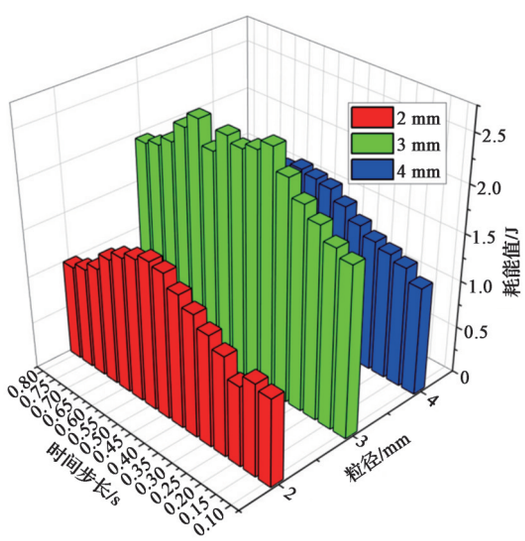


图10　不同粒子粒径耗能值

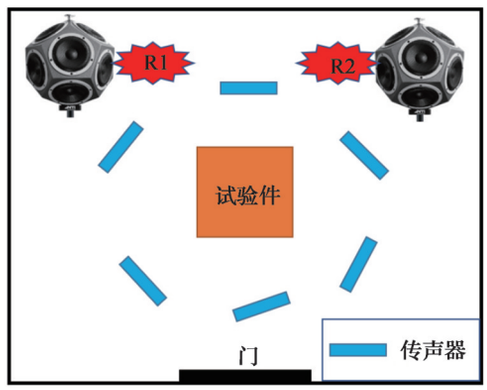
Fig. 10　Energy consumption values for different particle sizes

由图10可知，当粒子粒径为3 mm时，内装木地板结构粒子阻尼器耗能最大。当粒子粒径太小时，粒子接触面大幅增大，摩擦耗能增大，碰撞耗能减少，粒子不能充分运动；当粒子粒径太大时，单次碰撞耗能增大，但过少的粒子会减少碰撞和摩擦的次数，耗能减少，减振效果变差；在粒子粒径适当时，粒子之间碰撞与摩擦充足，耗能高，因此粒子阻尼器填充粒子粒径初步定为3 mm。

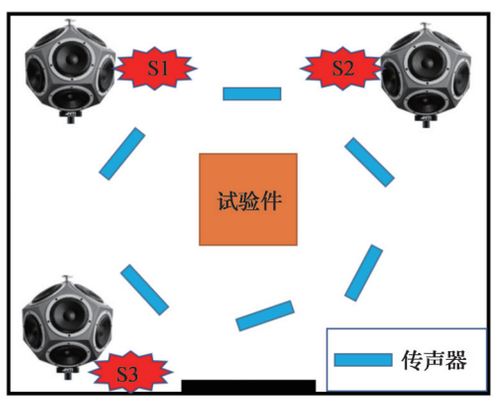
3　内装木地板隔声试验验证

3.1　试验方案

为了验证不同配置粒子阻尼器的隔声效果和离散元模型的有效性，在某声学实验室进行隔声测试。本次试验采用上下混响室方案，下方混响室为发声室，上方混响室为接收室。在上下混响室内布置声压传感器，传感器布置示意图如图11所示。



(a) 发声室示意图



(b) 接收室示意图

图11　声源及声压传感器位置

Fig. 11　Positions of sound source and sound pressure transducer

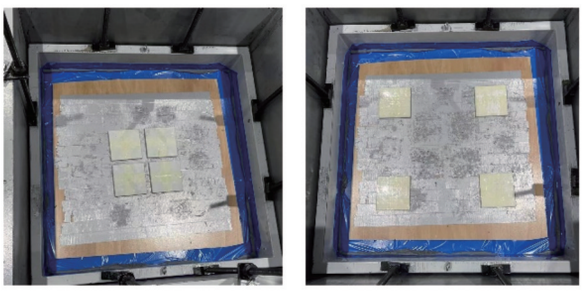
首先，将无指向声源放置于声源室的第一个测试位置，用白噪声产生100 dB以上的声源室声场；待声源开启1 min后，声场达到均匀稳定状态，开始声源室和接收室的声压级测试，数据采集时间为60 s，重复该步骤6次，得到6组数据；第1个位置点的数据采集完成后，将声源换置到声源室的第2个测试位置，并按声源在第1个测试位置的测试方法，再次采集6组声压级数据，测得的数据将用于无修正声压级差的计算；在安静状态下，采集1组时长60 s的背景噪声数据，读取背景噪声总值大致值，并进行记录，作为后续处理数据是否进行修正的判据；最后，进行混响测试。

3.2　粒子阻尼器不同安装位置隔声试验验证

将粒子阻尼器按“方案一”与“方案二”的位置胶粘于内装木地板上，粒子阻尼器为光敏树脂外壳，填充3 mm的钨基颗粒，填充率为95%，现场工况如图12所示。

通过测试得到不同方案的隔声曲线，并与内装木地板空板进行比较，对比如图13所示。

由图13曲线形态可知，“方案一”对于中低频隔声效果较好，而“方案二”对中高频隔声效果较好，与仿真结果结论完全一致，证明了离散元方法的有效性。



(a) 方案一　　(b) 方案二

图 12　现场工况图

Fig. 12　On-site working condition diagram

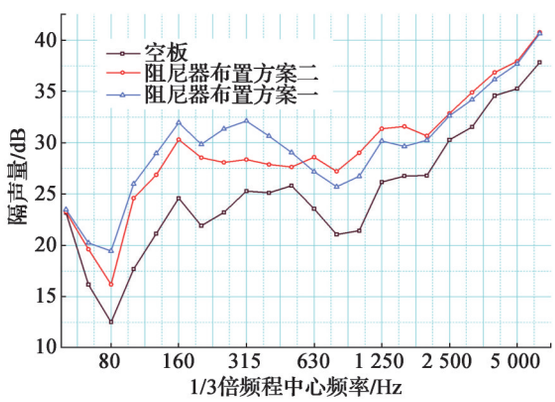


图 13　不同布置方案隔声曲线图

Fig. 13　Sound insulation curves for different layout options

3.3　粒子阻尼器不同粒子材质试验验证

将粒子阻尼器按“方案一”的位置胶粘于内装木地板上，粒子阻尼器外壳为光敏树脂外壳，分别填充粒径 3 mm 的铁基粒子、陶瓷基粒子和钨基粒子，填充率为 95%。通过测试得到的不同方案的隔声曲线，并与内装木地板空板的隔声曲线进行比较，隔声曲线对比如图 14 所示。

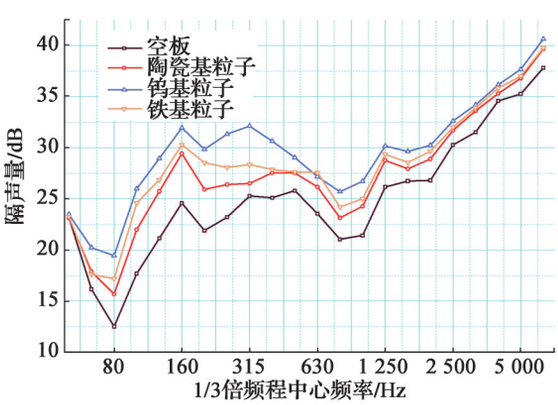


图 14　不同粒子材质隔声曲线图

Fig. 14　Sound insulation curves for different particle materials

由图 14 可知，相较于铁基粒子和陶瓷基粒子，钨基粒子各频段的隔声量提升较为明显，与仿真结果结论完全一致，证明了离散元方法的有效性。

3.4　粒子阻尼器不同粒径试验验证

将粒子阻尼器按“方案一”的位置胶粘于内装木地板上，粒子阻尼器为光敏树脂外壳，分别填充粒径 2 mm、3 mm 和 4 mm 的钨基粒子，填充率为 95%，通过测试得到的不同方案隔声曲线，并与内装木地板空板的隔声曲线进行比较，隔声曲线对比如图 15 所示。

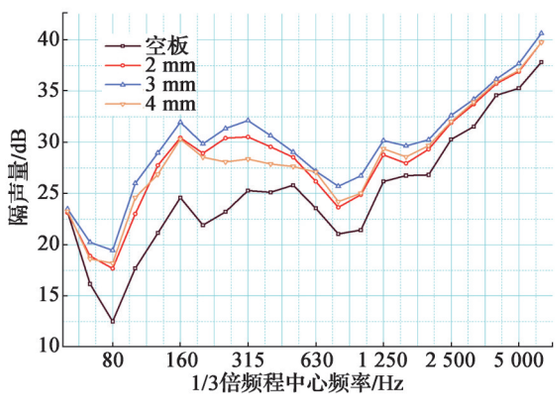


图 15　不同粒子粒径隔声曲线图

Fig. 15　Sound insulation curves for different particle sizes

由图 15 可知，相较于粒径 2 mm 和 4 mm 的粒子，粒径 3 mm 的粒子阻尼器各频段的隔声量提升较为明显，与仿真结果结论完全一致，证明了离散元方法的有效性。

试验证明，当布置位置为“方案一”、阻尼器外壳为光敏材质外壳、粒子材质为钨基粒子、粒子直径为 3 mm 时，内装木地板的隔声效果最好，各频段隔声量提升明显，计权隔声量提升 3.9 dB，完全符合预期目标要求，证明了粒子阻尼技术对于高铁内装木地板减振降噪的有效性。

4　结论

针对高速动车组内装木地板振动噪声和轻量化设计的要求，对某尺寸内装木地板进行隔声性能研究。通过粒子阻尼器外观设计、“内装木地板–粒子阻尼器”离散元耗能模型和粒子能量耗散模型的构建，分别研究粒子阻尼器的安装位置、粒子材质和粒子粒径等因素的影响，得到以下结论：

①对粒子阻尼器外观进行设计，使其满足安装和工艺需求，且不影响其余部件工作；通过离散元软件建立高铁内装木地板系统离散元耗能模型，并对粒子阻尼器安装位置、不同粒子阻尼器粒子材质和粒子粒径进行优化，从而得出最优的粒子阻尼器配置。

②通过隔声试验对于离散元耗能仿真结果进行验证，验证不同配置方案对于内装木地板的隔声性能，以及最佳配置方案的隔声性能，试验结果证明了离散元方法的有效性。

③本文将粒子阻尼技术应用于内装木地板的隔声设计中，为高铁内装木地板等结构的减振降噪提供新的思路，为工程应用提供参考。

参考文献：

[1] 丁叁叁, 陈大伟, 刘加利. 中国高速列车研发与展望[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 35-50.
DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China high-speed train[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2021, 53(1): 35-50.

[2] GONG Dao, ZHAO Kuo, LIU Guangyu, et al. Modal vibration decomposition method and its application on multimode vibration control of high-speed railway car bodies[J]. Journal of the Franklin institute, 2022, 359(10): 4699-4726.

[3] 时瑾, 孙征南, 孙宪夫, 等. 现行350 km/h高铁线路技术条件运营400 km/h高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2171-2180.
SHI Jin, SUN Zhengnan, SUN Xianfu, et al. Research on the adaptability of high-speed train running at 400 km/h under current 350 km/h high-speed railway technical conditions[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(9): 2171-2180.

[4] 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): 74-77.
YU Wuzhou, WANG Chen, MAO Dongxing, et al. Noise characteristics of China railway high-speed[J]. Environmental pollution and control, 2009, 31(1): 74-77.

[5] KAWAGUCHI T, SUEKI T, KITAGAWA T. Railway noise above 10 kHz generated on a curved section of high-speed railway line[C]//Institute of Noise Control Engineering. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Chicago: Institute of Noise Control Engineering, 2018: 2790-2801.

[6] 周洲, 蒋兴雷, 熊俊清, 等. 轨道车辆用酚醛发泡地板隔声特性[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9): 103-108.
ZHOU Zhou, JIANG Xinglei, XIONG Junqing, et al. Sound insulation characteristics of phenolic foamed floor for railway vehicles[J]. Engineering plastics application, 2019, 47 (9): 103-108.

[7] XIAO Wangqiang, XU Zhanhao, WANG Sheng, et al. Research on vibration reduction characteristics of continuum and noncontinuum system on coupling for high-power gear transmission based on particle damping materials[J]. Shock and vibration, 2021, 2021: 8845526.

[8] WU Yuren, CHUNG Y C, WANG Icheng. Two-way coupled MBD-DEM modeling and experimental validation for the dynamic response of mechanisms containing damping particles[J]. Mechanism and machine theory, 2021, 159: 104257.

[9] 肖望强, 陈辉, 许展豪, 等. 基于颗粒阻尼的内燃动车组动力包构架多工况减振研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 250-257.
XIAO Wangqiang, CHEN Hui, XU Zhanhao, et al. Study on the vibration reduction of internal combustion EMU powerpack frame under multiple loading conditions based on particle damping[J]. Journal of mechanical engineering, 2022, 58(4): 250-257.

[10] 和东平, 徐慧东, 刘元铭, 等. 基于颗粒阻尼吸振的波纹辊轧机非线性垂振控制[J]. 钢铁, 2023, 58(8): 129-137.
HE Dongping, XU Huidong, LIU Yuanming, et al. Nonlinear vertical vibration control of corrugated rolling mill based on particle damping absorber[J]. Iron & steel, 2023, 58(8): 129-137.

[11] 唐泽坤, 闫兵. 颗粒阻尼器减振性能的联合仿真研究和实验验证[J]. 机械工程与自动化, 2022(6): 48-51.
TANG Zekun, YAN Bing. Joint simulation and experimental verification of vibration reduction performance of particle damper[J]. Mechanical engineering & automation, 2022(6): 48-51.

[12] 王朝, 高静, 尹忠俊. 活塞杆颗粒阻尼器优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(20): 168-175.
WANG Chao, GAO Jing, YIN Zhongjun. Optimization design of a piston particle damper[J]. Journal of vibration and shock, 2022, 41(20): 168-175.

[13] 王金朝, 张用兵, 樊永欣, 等. 颗粒阻尼吸振器用于轨道系统减振降噪效果研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 220-224.
WANG Jinzhao, ZHANG Yongbing, FAN Yongxin, et al. Research on vibration and noise reduction effect of particle damping absorbers for track systems[J]. Noise and vibration control, 2022, 42(3): 220-224.

[14] 李艳. 基于颗粒阻尼机理的钢轨动力吸振器设计研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(4): 41-45.
LI Yan. Design of rail dynamic vibration absorber based on particle damping mechanism[J]. Railway construction technology, 2022(4): 41-45.

[15] 李小珍, 郑净, 毕然, 等. 轨道交通桥梁减振降噪2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43 (增刊1): 142-151.
LI Xiaozhen, ZHENG Jing, BI Ran, et al. State-of-the-art review of vibration and noise reduction of rail transit bridges in 2020[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2021, 43(Suppl 1): 142-151.

[16] 申智春. 颗粒阻尼在航天器减振中的应用与前景[J]. 应用力学学报, 2011, 28(6): 608-612.
SHEN Zhichun. Application of particle damping in spacecraft vibration suppression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2011, 28(6): 608-612.

[17] 付月, 李洪彬, 任建楠, 等. 阻尼减振技术在航空航天领域中的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(4): 656-662.
FU Yue, LI Hongbin, REN Jiannan, et al. Research progress

of damping and vibration reduction technology used in aerospace[J]. Materials research and application, 2022, 16(4): 656-662.

[18] 段勇, 陈前, 林莎. 颗粒阻尼对直升机旋翼桨叶减振效果的试验[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2113-2118.
DUAN Yong, CHEN Qian, LIN Sha. Experiments of vibration reduction effect of particle damping on helicopter rotor blade[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30 (11): 2113-2118.

Particle damping-based design for vibration and noise reduction of interior wooden flooring in high-speed railway trains

TANG Yanning[1], DAI Yu[2], XIAO Wangqiang[2], SHAO Kun[2]

(1. Acoustic Laboratory of CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China;
2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: With the continuously increasing speeds of high-speed trains, the impacts of vibration and noise have become more significant. Consequently, there is an escalating demand for enhanced sound insulation performance and lighter design of interior wooden flooring in high-speed trains. This paper presented a design aimed at improving the sound insulation performance of interior wooden flooring with specific sizes. The design process initially involved the appearance and structure of particle dampers for the interior wooden flooring. The approach utilized the discrete element method to meet the installation requirements. Subsequently, an investigation was conducted into the sound insulation effects of various factors on the interior wooden flooring, including installation areas, particle materials, and particle sizes, through the calculations of energy consumption values for different particle damper configurations. This step identified an optimal configuration option. Finally, sound insulation tests were conducted to verify the effectiveness of the chosen option. The experimental data show the consistency between the sound insulation performance under different particle damper configurations and the discrete element simulation results, thereby demonstrating the effectiveness of the discrete element model. Moreover, the optimal particle damper configuration yields a significant improvement in sound insulation across all frequency bands, resulting in a weighted sound insulation increase of 3.9 dB. This result successfully achieves the desired goal and substantiates the efficacy of the particle damper in reducing vibration and noise in interior wooden flooring. The application of particle damping technology to address vibration and noise reduction in interior wooden flooring of high-speed trains provides a novel idea for vibration and noise reduction in structures similar to the interior flooring of high-speed trains, which has both important engineering significance and application value.

Keywords: interior wooden flooring in high-speed train; particle damping; discrete element method; sound insulation performance; high-speed EMUs

收稿日期：2023-09-28；修回日期：2023-12-12