文章编号：1006-1355(2014)04-0048-04+55

喷涂阻尼厚度对车轮振动声辐射的影响

周 信，肖新标，王瑞乾，赵 悦，温泽峰，金学松
（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031）

摘 要：在列车车轮表面喷涂阻尼材料可以降低车轮振动声辐射，通过试验调查喷涂阻尼厚度对其减振降噪性能的影响。在半消声室进行对比试验，测试了斜曲型辐板车轮在无阻尼、喷涂1 mm和2 mm情况下的振动声辐射，和双S型辐板车轮在无阻尼、喷涂1 mm和4 mm阻尼下的声辐射。测试结果表明：对于斜曲型辐板车轮，2 mm阻尼层对车轮的减振区域和减振量均优于1 mm阻尼层，在径向和轴向激励下，1mm阻尼层降噪量分别为2.0 dB(A)和1.0 dB(A)；对于双S型辐板车轮，在径向和轴向激励下，1 mm阻尼层降噪量分别为1.9 dB(A)和1.1 dB(A)。对于这两种辐板形式车轮，阻尼层增厚，降噪效果均增加。对于斜曲型车轮，在径向激励下阻尼具有更好的降噪效果，对于双S型车轮，在径向激励和轴向激励下阻尼降噪效果近似相同。

关键词：振动与波；喷涂式阻尼车轮；阻尼厚度；声辐射

中图分类号：TB53；U260. 331^{+}.1 **文献标识码：**A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.04.011

Influence of Sprayed Damping Thickness on Vibration and Sound Radiation of Damped Wheels

ZHOU Xin, XIAO Xin-biao, WANG Rui-qian, ZHAO Yue, WEN Ze-feng, JIN Xue-song
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract : Spraying damping materials on the surface of wheels is an effective measure to reduce vibration and sound radiation. In this paper, the influence of spread damping thickness on the vibration and sound radiation of a sprayed damping wheel is investigated experimentally. The comparative experiments are carried out in a semi-anechoic room. The vibration and sound radiation of obliquely curved wheel with 1 mm and 2 mm thick sprayed damping layers and without damping material are measured respectively. Then the sound radiation of a double-S shaped wheel with 1mm and 4 mm thick damping layers and without damping material is also measured respectively. The results show that the 2 mm thick damping material has better vibration absorption and noise reduction performance for the obliquely curved wheel than that of the one with 1mm thick damping layer. And the noise reductions of 1mm thick damping layer are 2.0 dB(A) and 1.0 dB(A) respectively under radial and axial excitations. For the double-S shaped wheel, the noise reductions of 1mm thick damping layer are 1.9 dB(A) and 1.1 dB(A) respectively under radial and axial excitations. Noise reduction increases as the thickness of the damping layer increases for the two types of wheels. For the obliquely curved wheel, the effects of sprayed damping layer are more effective under radial excitations. While for double-S wheel, the effects of the sprayed damping layer are almost the same under radial and axial excitations.

Key words :vibration and wave ; spraying damped wheel ; damped material thick ; sound radiation

轨道交通发展要求重点解决噪声问题[1]。轮轨噪声是列车辐射噪声主要组成部分，对车轮采取减振降噪措施是降低轮轨噪声的有效办法之一[2—4]。车轮噪声控制措施主要包括车轮形状优化、阻尼车轮、弹性车轮、车轮噪声屏蔽板。其中阻尼车轮安装简便、安全性高，得到较多应用研究[5—7]。喷涂阻尼车轮是加工最为简单的一种，虽然阻尼减振与降噪在一些工程领域中已取得了有效的结果，但对于列车车轮而言，还需要通过具体的工程实践；探索其结构的优化和比较，最后进行验证和确定。

收稿日期：2013-10-10
基金项目：国家科技支撑计划(基金编号：2009BAG12A01-B06)；国家863计划(基金编号：2011AA11A103-2-2、2011AA11A103-4-2)；教育部创新团队(基金编号：IRT1178)；中央高校基本科研业务费专项资金资助（基金编号：SWJTU12ZT01）；牵引动力国家重点实验室自由探索自主研究课题（基金编号：2011TPL_T05）
作者简介：周 信（1988- ），男，江苏扬州人，博士研究生，目前从事高速列车振动与噪声研究。
E-mail: wszhouxin@qq.com
通信作者：金学松，男，教授，博士生导师。
E-mail: xsjin@home.swjtu.edu.cn

1　测试概况

在车轮双侧直接喷涂厚度均匀阻尼层，阻尼材料损耗因子≥ 0.08。在半消声室中进行测试，为避免阻尼材料温变和湿变特性的影响，测试中保持温度和湿度基本一致，试验温度为25 °C，湿度为80 %。

图1给出喷涂式阻尼车轮现场测试示意图。测试中，布置4个加速度计和1个声学传感器。加速度计分别位于车轮踏面、轮辋、辐板外部和辐板中心位置。声学传感器与轮毂孔高度一致，距离车轮1.9 m。为了保证激励相同，测试采用落球撞击激励，落球从相同高度沿着光滑滑道滚落撞击在车轮名义滚动圆和轮辋位置。每个工况重复测量3次，最后取平均值。

为了准确评价阻尼对车轮的减振降噪效果，在振动和声学分析中，考虑阻尼对落球激励后的衰减特性，自落球撞击车轮开始，选取4s连续测试时间进行分析。振动级或声压级在1/3倍频程下的值可由式(1)得到。

图1 喷涂式阻尼车轮测试现场

$$L = 10\lg \frac{\frac{1}{n_j}\cdot\sum_{k=1}^{n_j}\int_{\Delta f_j} F[t\cdot h_k(t)\cdot w(t)]^2\cdot \mathrm{d}f}{E_{\mathrm{ref}}^{\ 2}} \tag{1}$$

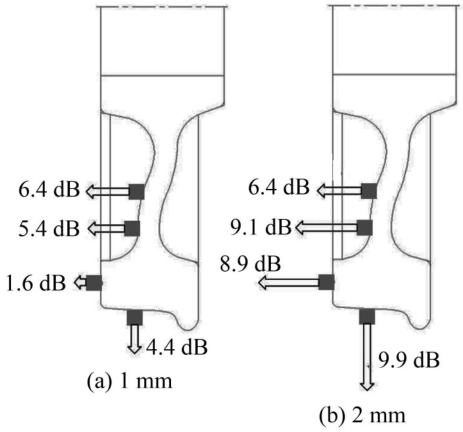
式中j表示1/3倍频程；n_j表示测量次数；Δf_j表示1/3倍频程频带范围；F表示傅里叶变换；t表示自落球撞击车轮后的4 s分析时间；$h_k(t)$表示第k次测量的加速度或者声压时间历程；$w(t)$表示加在时间历程上的时间窗。E_{ref}表示参考加速度或声压，加速度参考量为1.0 m/s^2，声压参考量为2×10^{-5} Pa。将振动和声的1/3倍频程能量叠加，可得到全频带振动级或A计权声压级。

2　振动衰减分析

图2和图3给出了斜曲型车轮在喷涂阻尼后全频段（80 Hz～6 300 Hz）振动级衰减量，分析频率为80 Hz～6 300 Hz。图中灰色方块表示振动传感器，箭头表示法向振动加速度的衰减量，箭头长短与衰减量成正比。

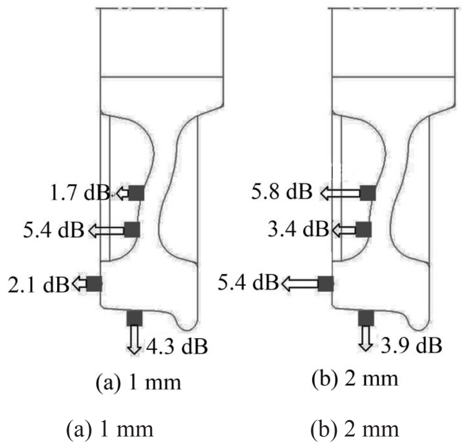
由图2可见，在径向激励下，喷涂1 mm阻尼层，车轮振动衰减1.6 dB～6.4 dB，其中对辐板中心位置振动衰减6.4 dB，对轮辋位置振动衰减1.6 dB，主要衰减了踏面和辐板位置的振动能量。喷涂2 mm阻尼层振动衰减6.4 dB～9.9 dB，其中对踏面位置振动衰减9.9 dB，对辐板中心位置振动衰减6.4 dB。相对于1 mm阻尼层，喷涂2 mm阻尼层除了在辐板中心位置的振动衰减量没有增加外，在其它位置衰减量有大幅增加。

在轴向激励下，喷涂1 mm阻尼层振动衰减-1.7 dB～5.1 dB，其中对辐板外部位置振动衰减5.1 dB，对辐板中心位置振动衰减-1.7 dB，有一定负作用。喷涂2 mm阻尼层振动衰减3.4 dB～5.8 dB，其中对辐板中心位置振动衰减5.8 dB，对辐板外部位置振动衰减3.4 dB。相对于1 mm阻尼层，喷涂2 mm阻尼层除了在辐板外部和踏面位置的振动衰减量有所降低，在其它位置的振动衰减量有所增加。增加阻尼厚度有利于增大有效减振区域，同时增加了振动衰减量。



(a) 1 mm阻尼层　　(b) 2 mm阻尼层

图2 斜曲型车轮喷涂阻尼振动级衰减量分布（径向激励）



(a) 1 mm　　(b) 2 mm

图3 斜曲型车轮喷涂阻尼振动级衰减量分布（轴向激励）

3 喷涂阻尼降噪效果分析

3.1 斜曲型车轮

表1给出了径向激励和轴向激励下，喷涂阻尼对斜曲型车轮在全频段（80 Hz~63 00 Hz）的降噪效果。从表中可以看出，喷涂1 mm阻尼层后全频段噪声降低2.0 dB(A)，喷涂2 mm阻尼层后全频段噪声降低5.8 dB(A)。在轴向激励下，喷涂1 mm阻尼层后全频段噪声降低1.0 dB(A)，喷涂2 mm阻尼层后全频段噪声降低2.2 dB(A)。喷涂阻尼对径向激励更加有效；同时，阻尼厚度增加，降噪效果增大。

为了进一步分析喷涂阻尼层对车轮噪声各频段的降噪效果，图4和图5分别给出了径向激励和轴向激励下车轮辐射噪声的频谱特性。从图4可以看出，径向激励下，斜曲型标准车轮辐射噪声显著频率为2 500 Hz～6 300 Hz，在这些频率范围，喷涂1 mm阻尼层降噪量为0.6 dB～8.1 dB，喷涂2 mm阻尼层降噪4.7 dB(A)～11.6 dB(A)。在峰值频段3 150 Hz，2 mm阻尼层降噪4.6 dB，比1 mm高4.1 dB(A)，降噪性能大幅提升，这是由车轮振动特性和阻尼材料特性决定的。在3 150 Hz频带范围内（2 818 Hz～3 548 Hz），如图5中的小图所示。标准车轮存在三个声压级峰值，分别为2 920 Hz、3 130 Hz、3 120 Hz，其中声压级最大的峰值在3 130 Hz，对应车轮(径向，0)阶模态，喷涂阻尼后，共振频率和声压级均有降低，喷涂1 mm阻尼层共振频率下降2 Hz，声压级下降2.8 dB，喷涂2 mm阻尼层共振频率下降10 Hz，声压级下降10.3 dB，说明车轮的径向扩张/收缩运动使阻尼形成较大挤压变形，阻尼厚度增加，损耗因子增加，因此降噪量增大。其它两个峰值频率2 920 Hz和3 120 Hz均对应车轮轴向模态，声压级峰值比3 130 Hz分别低15.5 dB和26.5 dB，喷涂1 mm阻尼没有降噪效果，声压级在2 920 Hz升高0.8 dB，在3 120 Hz升高7.3 dB，喷涂2 mm阻尼则大幅度降低了这两个频率的声压级，均在10 dB以上，这可能是由于阻尼厚度增大，同时增大了阻尼损耗因子和阻尼在此模态的挤压变形量，提高了阻尼的耗散能。

由图5可以看出，在轴向激励下，斜曲型标准车轮辐射噪声显著频率为500 Hz、800 Hz、2 000 Hz～ 4 000 Hz和6 300 Hz。在这些频率范围，1 mm阻尼层降噪0～8.6 dB，2 mm阻尼层降噪0.6 dB～12.1 dB，在峰值频率4 000 Hz，1 mm 和2 mm阻尼层降噪量均比较低，只有0.5 dB～1.4 dB。由于峰值频率处的声压级对总声压级有显著贡献；因此，阻尼层对轴向激励下车轮的降噪效果不显著。

在径向激励和轴向激励下，阻尼材料对2 000 Hz以上的显著噪声频段有较好降噪效果。但是轴向激励会激出1 000 Hz以下频段的较大噪声，此时阻尼材料并未起明显降噪效果，导致在斜曲型车轮辐板两侧喷涂阻尼材料对径向激励更加有效。

3.2 双S型车轮

表2给出了径向激励和轴向激励下，喷涂阻尼对双S型车轮在全频段（80 Hz～6 300 Hz）的降噪效果。从表中可以看出，喷涂1 mm阻尼层后全频段噪声降低1.9 dB(A)，喷涂4 mm阻尼层后全频段噪声降低4.7 dB(A)。在轴向激励下，喷涂1 mm阻尼层后全频段噪声降低1.1 dB(A)，喷涂4 mm阻尼层后

表1 阻尼对斜曲型车轮全频段降噪量

声压级	径向激励			轴向激励		
	标准车轮	1 mm阻尼	2 mm阻尼	标准车轮	1 mm阻尼	2 mm阻尼
L_p	82.3	80.3	76.5	85.3	84.3	83.1
	降幅	2.0	5.8	降幅	1.0	2.2

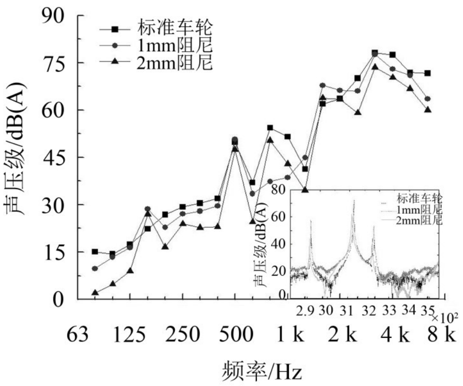


图4 斜曲型车轮1/3倍频程频谱特性(径向激励)

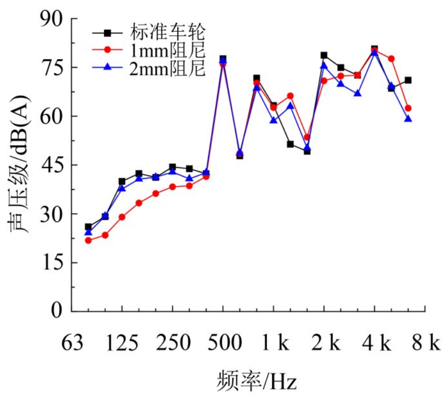


图5 斜曲型车轮1/3倍频程频谱特性(轴向激励)

全频段噪声降低4.8 dB(A)。喷涂阻尼对径向激励和轴向激励均有效，阻尼厚度增加，降噪效果增大。

图6和图7分别给出了在径向激励和轴向激励下双S型车轮辐射噪声的频谱特性。从图6可以看出，在径向激励下，双S型标准车轮辐射噪声显著频段为1 600 Hz～5 000 Hz，在这些频率范围，1 mm阻尼层降噪量为-2 dB～9.5 dB，4 mm阻尼层降噪量为2.8 Hz～9.3 dB(A)，在峰值频率5 000 Hz，1 mm阻尼层降噪量比4 mm高4.1 dB，因此，增加阻尼厚度并没有进一步降低峰值频率噪声，但是在其它主要频率，4 mm阻尼层具有更好降噪效果。

轴向激励下，双S型标准车轮辐射噪声显著频率为400 Hz、630 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、3 150 Hz、4 000 Hz和6 300 Hz。在这些频率范围，1 mm阻尼层降噪量为-3.1 dB～9.3 dB，4 mm阻尼层降噪量为2.1 dB～12.4 dB，在峰值频率2 000 Hz，1 mm阻尼层降噪量比4 mm高0.5 dB，增加阻尼厚度

同样没有进一步降低峰值频率处噪声，但是在4 000 Hz，1 mm阻尼层造成了新的更大的峰值，限制了降噪效果。

在径向激励和轴向激励下，虽然双S型标准车轮和斜曲型标准车轮辐射噪声频率特性类似，但是在轴向激励下，在双S型车轮辐板两侧喷涂阻尼可显著降低1 000 Hz以下峰值频率噪声，因此对双S型车轮喷涂阻尼在径向激励和轴向激励下均有效。这种差别可能是由于辐板差异引起。

表2 阻尼对双S型车轮全频段降噪量

声压级	径向激励			轴向激励		
	标准车轮	1 mm 阻尼	4 mm 阻尼	标准车轮	1 mm 阻尼	4 mm 阻尼
L_p	83.4	81.5	78.7	86.5	85.4	81.7
	降幅	1.9	4.7	降幅	1.1	4.8

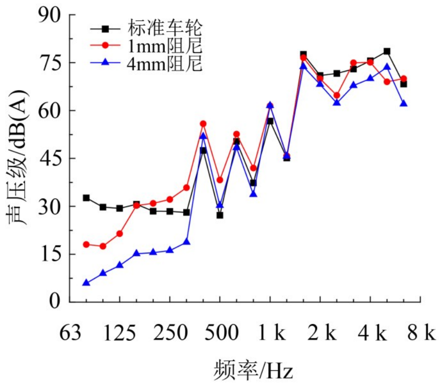


图6 双S型车轮1/3倍频程频谱特性(径向激励)

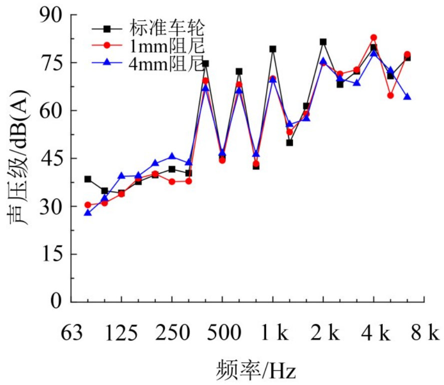


图7 双S型车轮1/3倍频程频谱特性(轴向激励)

4 结 语

利用半消声室法进行室内对比试验，测试了斜曲型辐板车轮在无阻尼、喷涂1 mm和2 mm情况下的振动声辐射，S型辐板车轮在无阻尼、喷涂1 mm和4 mm阻尼下的声辐射，得到如下结论：

（1）对于斜曲型辐板车轮，不管是径向激励还是轴向激励，喷涂1 mm阻尼层只对车轮部分区域有减振效果，喷涂2 mm阻尼层增大了减振区域和振动衰减量；

（2）对于斜曲型辐板车轮，在径向激励下1 mm阻尼层降低全频段噪声2.0 dB(A)，2 mm阻尼层降低全频段噪声5.8 dB(A)；在轴向激励下，1 mm阻尼层降低全频段噪声1.0 dB(A)，2 mm阻尼层降低全频段噪声2.2 dB(A)；相同阻尼在径向激励条件下具有更好降噪效果；

（3）对于双S型辐板车轮，在径向激励下，1 mm阻尼层降低全频段噪声1.9 dB(A)，4mm阻尼层降低全频段噪声4.7 dB(A)；在轴向激励下，1 mm阻尼层降低全频段噪声1.1 dB(A)，4 mm阻尼层降低全频段噪声4.8 dB(A)。阻尼在径向激励和轴向激励条件下具有相近降噪效果；

（4）相同辐板形式标准车轮在不同激励条件下，辐射噪声的主要频带有较大差异，在径向激励下主要是1 600 Hz以上高频噪声，在轴向激励下，除了有高频噪声，400 Hz～1 000 Hz之间也会出现较大峰值，这是相同阻尼厚度在径向激励和轴向激励下对车轮降噪效果有差异的主要原因。

（下转第55页）