

文章编号: 1006-1355(2014)04-0039-05

高速列车夹芯地板结构隔声特性研究

孙加平, 张丽荣, 孙海荣, 王志海, 王永成

(唐山轨道客车有限责任公司, 河北 唐山 063035)

摘要: 采用传递矩阵法, 建立高速列车内地板的声学特性分析模型, 探索不同三明治夹芯板材料和结构对高速列车内地板隔声特性的影响, 并根据内地板结构的传递损失评价具有不同参数的三明治夹芯板的隔声性能。通过不同的表层材质(木材、铝材、钢材)、厚度和蜂窝夹层密度, 进行了内地板隔声量变化规律的分析 and 比较。探寻拟定隔声性能优越的三明治夹芯板材料类型和结构型式。结果表明, (1) 表层夹板厚度一定, 钢材作为表层材料, 内地板隔声量最好, 其次是铝材, 最后是木材; (2) 表层厚度影响, 木材夹层板, 厚度每增加 1 mm, 各个频段隔声量增加 1 dB ~ 1.5 dB。铝材夹层板, 厚度每增加 1 mm, 各个频段隔声量增加 1 dB ~ 3 dB。钢材夹层板, 厚度每增加 1 mm, 各个频段隔声量增加 1 dB ~ 5 dB; (3) 蜂窝板密度降低一半, 内地板隔声量有增加趋势, 但影响较小。

关键词: 声学; 隔声; 高速列车; 隔音垫; 传递矩阵法

中图分类号: O42; U270.1⁺6

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.04.009

Sound Transmission Loss of Sandwich Panels Floor of High-speed Trains

SUN Jia-ping, ZHANG Li-rong, SUN Hai-rong,
WANG Zhi-hai, WANG Yong-cheng

(Tangshan Railway Vehicle Co. Ltd., Tangshan 063035, Hebei China)

Abstract: The model for analyzing the acoustic characteristics of interior floor of high-speed trains is established. The sandwich panels with three different materials, timber, aluminum and steel, and the honeycomb cores with different thicknesses and densities, are used for the interior floor. The transfer matrix method is employed for analyzing the model. The sound insulation effects of different materials and structures of the sandwich panels are evaluated and compared. The results show that (1) when the thickness of the surface layer of the sandwich panel keeps constant, the interior floor with steel as the surface layer has the best sound transmission loss effect, and followed by aluminum, and timber; (2) when the thickness of the surface layer is additionally increased by 1 mm, the transmission loss of the floor can be increased by 1 dB ~ 1.5 dB for timber sandwich panel, 1 dB ~ 3 dB for aluminum sandwich panel and 1 dB ~ 5 dB for steel sandwich panel respectively; (3) the density of the honeycomb core has only a little influence on the transmission loss of the interior floor. When the density is reduced by a half, the sound transmission of the floor has a little tendency of increase.

Key words: acoustics; transmission loss; high speed train; sound insulating pad; transfer matrix method

随着京沪高铁客运专线、京津城际、武广客运专线、郑西客运专线的开通运营, 中国已开始进入高铁

时代。高速铁路给人们带来快捷、安全、舒适的同时, 也带来了环境污染噪声和振动。

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 最高运营速度 380 km/h 高速动车组研制
(2010DFB80050)

作者简介: 孙加平(1967-), 男, 高级工程师, 长期从事轨道车辆研发设计。

E-mail: sjc-sunjiaping@tangche.com

张伟^[1]、张捷^[2]等, 对高速列车在不同运行速度下车内噪声分别进行了现场测试, 用声品质响度评价高速列车车内噪声环境, 发现车内噪声环境需要进一步改进以满足人类听觉舒适。YuYu^[3], 对高速列车车内噪声进行了仿真预测分析, 结果表明, 地板空气传声是车内噪声的主要贡献者之一。因此, 优化地板结构, 提高地板隔声性能, 极有必要。说明, 降

低车内噪声,改善车内声场环境,地板隔声量提高是关键问题。张玉梅等^[4],基于混合有限元—统计能量法及周期子结构原理,建立了高速列车波纹外地板声学特性仿真模型,根据波纹外地板结构的传递损失评价隔声性能,探寻隔声性能优越的外地板类型和结构型式。已有研究表明,复合型吸声材料的应用对高速列车车内减震降噪具有十分重要的意义^[5,6]。本文通过仿真手段,结合现有高速列车典型内地板结构,调研内地板关键结构,研究三明治夹芯板材料、厚度参数对内地板声学性能的影响规律,为高速列车复合型内地板降噪设计和选材提供依据。

典型高速列车内地板结构从上往下,由地板布、三明治夹芯板、隔音垫三部分组成。本文利用传递矩阵法研究三明治夹芯板材料参数、厚度对整个内地板隔声性能的影响。材料和结构声学性能的分析方法有多种,其传递矩阵法因其推导直观、易于建立,且可用于分析均匀介质和非均匀介质构成的任意有限厚度的分层介质,在分层介质声学特性分析中应用较为广泛。

杨德林等^[7],引入了传递矩阵的概念计算分层介质中的声透射。庞培森等^[8],推导了用传递矩阵法计算微穿孔板结构声学性能的计算公式,并与用声电类比法计算的结果、试验测定数据进行了对比,结果显示,传递矩阵法是可以作为微穿孔板结构设计和多层结构的一种简单而有效的参考方法。

1 内地板结构隔声计算模型

文献^[9]对采用传递矩阵法计算层状复合结构隔声量的有效性进行了详细参数,结果表明,仿真与试验结果吻合较好,传递矩阵法能够有效计算复合板的隔声特性。

针对图1所示高速列车内地板结构,采用传递矩阵法,参考文献^[9],在 ESI Nova 2010 软件系统,建

立了高速列车内地板隔声计算模型,如图2所示。其中,内地板结构从上往下,由3 mm地板布、15 mm 三明治夹芯板、5 mm 隔音垫三部分组成,其中各结构及材料参数如表1所示。

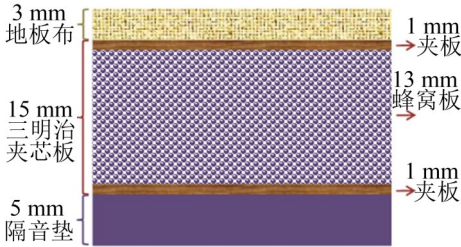


图 1 内地板结构示意图



图 2 内地板隔声计算模型

在 100 Hz~3 150 Hz 频率范围,基于内地板隔声计算模型,将计算分析三明治夹芯板不同材料参数和厚度对整个内地板隔声量的影响。

2 三明治夹芯板参数调研

2.1 参数调研

三明治夹芯板不同结构对内地板隔声量影响,分别调研,不同表层材质(木材、铝材、钢材)、不同蜂窝夹层密度及随厚度变化下,内地板隔声量变化规

表 1 内地板各结构的材料参数

| 结构 | 材料名 | 密度/(kg/m ³) | 杨式模量/(N/m ²) | 孔隙率 | 泊松比 | 阻尼系数 |
|--------|-------------------|-------------------------|--------------------------|------|------|-------|
| 地板布 | Cotton shoddy pad | 100 | 2 000 | 0.92 | — | — |
| | Plywood(木材) | 700 | 6 ⁹ | — | 0.25 | 0.01 |
| 夹板 | Aluminum(铝材) | 2 742 | 6.9 ¹⁰ | — | 0.33 | 0.007 |
| | Steel(钢材) | 7 841 | 2 ¹¹ | — | 0.32 | 0.007 |
| 三明治夹芯板 | Honeycomb-48 | 48 | 3 ⁷ | — | 0.2 | 0.01 |
| | Honeycomb-24 | 24 | 3 ⁷ | — | 0.2 | 0.01 |
| 蜂窝板 | | | | | | |
| 隔音垫 | Hard rubber | 1 100 | 2.3 ⁹ | — | 0.49 | 0.08 |

律,如表2所示。其中,地板布、隔音垫参数固定,具体参数如表1所示。

表2 三明治夹芯板隔声量计算工况

| | 表层 | | | 夹心层 | |
|------|----|----|----|--------------------------|-----------------------------|
| | 木材 | 铝材 | 钢材 | Honeycomb (=48 kg/m3) | Honeycomb 24 (=24 kg/m3) |
| 夹芯板1 | √ | | | √ | |
| 夹芯板2 | √ | | | | √ |
| 夹芯板3 | | √ | | √ | |
| 夹芯板4 | | √ | | | √ |
| 夹芯板5 | | | √ | √ | |
| 夹芯板6 | | | √ | | √ |

2.2 平均和计权隔声量

内地板隔声量计算结果如表3所示。

图3给出了表层材质不同(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度不同及随厚度变化下,内地板计权隔声量。从图中可以看出。

(1) 改变三明治夹芯板表层材质(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度、及两者厚度分布,内地板计权隔声量在30.6 dB和48.4 dB间变化;

(2) 三明治夹芯板表层材质对内地板隔声量的影响,表层夹板厚度一定,钢材作为表层材料,内地板隔声量最好,其次是铝材,最后是木材;

(3) 三明治夹芯板夹板厚度与蜂窝板厚度分布对内地板隔声量的影响,三明治夹芯板总厚度不变,改变夹板厚度(1 mm~7.5 mm变化),钢材与铝材作为表层时对比,内地板隔声量提高5.7 mm~7.6 dB;铝材比木材内地板隔声量提高2.5 mm~7.3 dB;钢材最优表层厚度为3 mm~6 mm,最大计权隔声量为48.3 dB;铝材最优表层厚度为4 mm~5 mm,最大计权隔声量为41.6 dB;木材最优表层厚度为5 mm~7 mm,最大计权隔声量为36.4 dB;

(4) 蜂窝板夹层材料密度对内地板隔声量的影响,蜂窝板密度降低50 %,内地板隔声量有增加趋势,但影响较小;但对木材,在夹板厚度为7 mm时,隔声量提高1.5 dB。

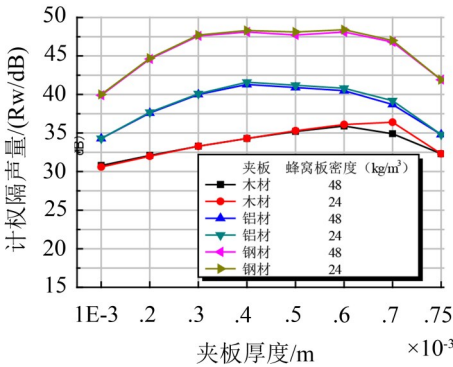


图3 内地板计权隔声量

图4给出了表层材质不同(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度不同及随厚度变化下,内地板平均隔

表3 不同材料、厚度夹板下内地板隔声量(dB)

| 工况 | 表层厚度/m | 夹芯板 1 | | 夹芯板 2 | | 夹芯板 3 | | 夹芯板 4 | | 夹芯板 5 | | 夹芯板 6 | |
|----|--------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | | 平均 | 计权 | 平均 | 计权 | 平均 | 计权 | 平均 | 计权 | 平均 | 计权 | 平均 | 计权 |
| 1 | 0.001 | 27.3 | 30.8 | 27.2 | 30.6 | 30.9 | 34.2 | 30.9 | 34.2 | 36.4 | 39.9 | 36.5 | 40.0 |
| 2 | 0.002 | 28.6 | 32.1 | 28.6 | 32.0 | 34.1 | 37.6 | 34.2 | 37.7 | 41.1 | 44.6 | 41.1 | 44.7 |
| 3 | 0.003 | 29.7 | 33.3 | 29.8 | 33.3 | 36.3 | 40.0 | 36.4 | 40.1 | 43.8 | 47.6 | 43.8 | 47.7 |
| 4 | 0.004 | 30.7 | 34.2 | 30.8 | 34.2 | 37.3 | 41.3 | 37.5 | 41.6 | 44.5 | 48.1 | 44.6 | 48.3 |
| 5 | 0.005 | 31.5 | 35.2 | 31.6 | 35.3 | 37.4 | 40.9 | 37.6 | 41.2 | 44.8 | 47.7 | 45.0 | 48.1 |
| 6 | 0.006 | 32.0 | 35.9 | 32.3 | 36.1 | 37.5 | 40.5 | 37.7 | 40.8 | 45.6 | 48.1 | 45.7 | 48.4 |
| 7 | 0.007 | 31.2 | 34.9 | 32.4 | 36.4 | 37.4 | 38.7 | 37.7 | 39.2 | 45.8 | 46.8 | 46.0 | 47.0 |
| 8 | 0.0075 | 29.7 | 32.3 | 29.7 | 32.3 | 35.7 | 34.8 | 35.7 | 34.8 | 43.6 | 41.9 | 43.6 | 41.9 |

声量。从图中可以看出,改变三明治夹芯板表层材质(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度、及两者厚度分布,内地板平均隔声量在 27.3 dB 和 45.8 dB 间变化。隔声量随各参数变化与上面计权隔声量同。

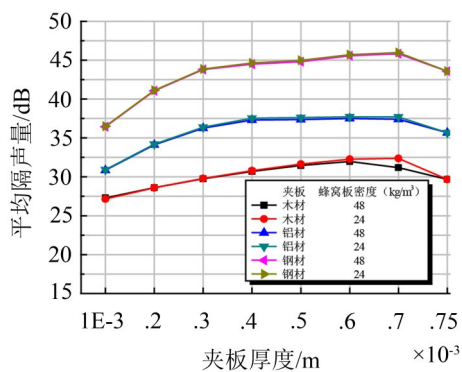


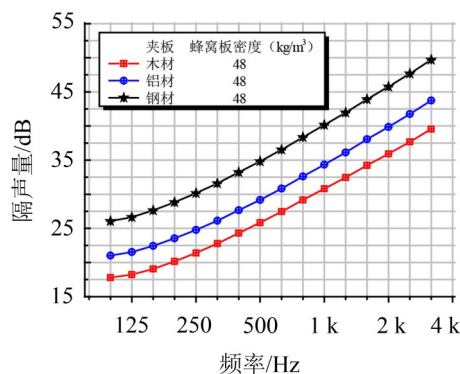
图4 内地板平均隔声量

2.3 频率隔声量

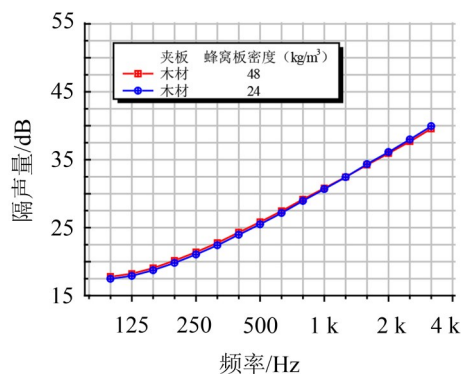
2.3.1 不同材料对内地板频率隔声量的影响

为进一步研究三明治夹芯板材料参数对内地板隔声量的影响,图5给出了1 mm厚表层夹板,在不同材料、蜂窝夹层(铝)下,内地板频率隔声量。

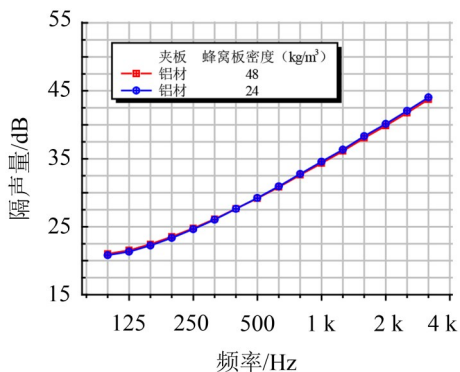
由图5可以看出:



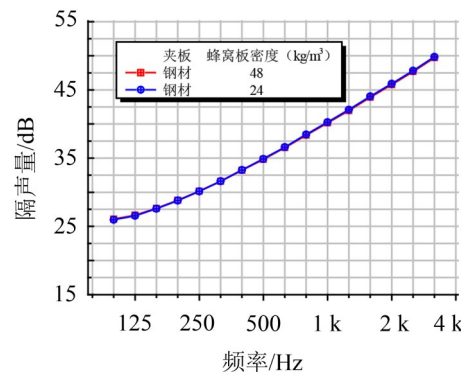
(a)不同表层材料



(b)木材+不同密度内置蜂窝材料



(c)铝材+不同密度内置蜂窝材料



(d)钢材+不同密度内置蜂窝材料

图5 内地板频率隔声量(同一厚度:夹板1mm厚)

(1) 表层夹板厚度 1 mm 时,钢材作为表层材料,内地板隔声量在各个频段都最好,其次是铝材,最后是木材。其中钢材作为表层,各频段隔声量比木材作为表层时提高约 8 dB;铝材作为表层时,各频段隔声量比木材作为表层时提高约 3 dB;

(2) 改变蜂窝夹层板密度,对整个内地板隔声特性几乎无影响。

2.3.2 不同材料对内地板频率隔声量的影响

为进一步研究三明治夹芯板表层、蜂窝夹层板厚度分布对内地板隔声量的影响,图6给出了相同材料参数下,表层厚度 0~7.5 mm 变化时,内地板的频率隔声量。从中可以看出:

(1) 表层材料不变,增加表层夹板厚度,内地板各频段隔声量普遍提高。但当厚度达到一定时,内地板隔声量在高频出现低谷;

(2) 木材夹层板,厚度每增加 1 mm,各个频段隔声量提高 1 dB~1.5 dB。铝材夹层板,厚度每增加 1 mm,各个频段隔声量提高 1 dB~3 dB。钢材夹层板,厚度每增加 1 mm,各个频段隔声量提高 1 dB~5 dB。

由三明治夹芯板表层材质对内地板隔声量的影

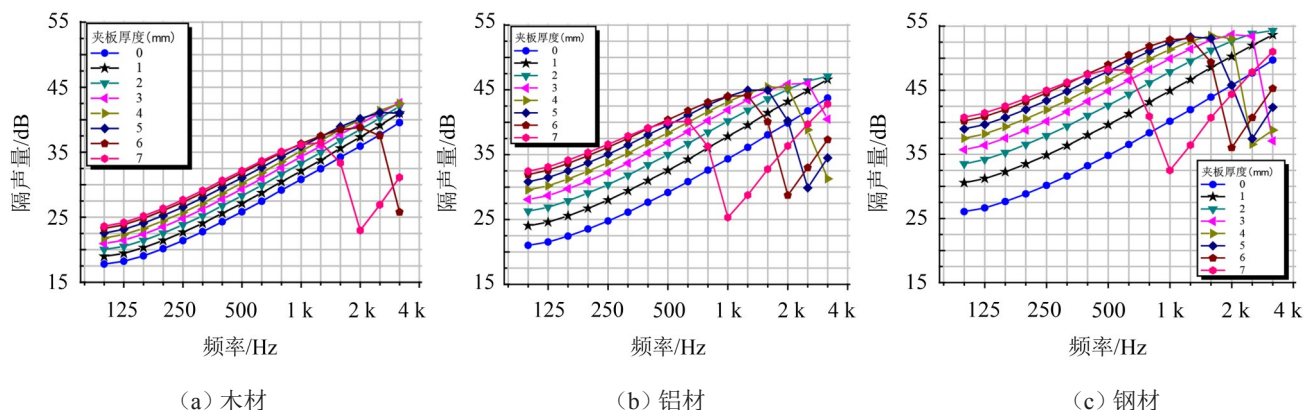


图6 内地板频率隔声量(同一材料,不同厚度)

响表明,表层夹板厚度一定,钢材作为表层材料,内地板隔声量最好,其次是铝材,最后是木材。

3 结 语

三明治夹芯板不同结构对内地板隔声量影响,分别调研表层材质不同(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度不同及随厚度变化下,内地板隔声量变化规律。

改变三明治夹芯板表层材质(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度后,内地板隔声量仿真结果表明:

(1) 改变三明治夹芯板表层材质(木材、铝材、钢材)、蜂窝夹层密度、及两者厚度分布,内地板计权隔声量在30.6 dB和48.4 dB间变化;

(2) 三明治夹芯板表层材质对内地板隔声量影响,表层夹板厚度一定,钢材作为表层材料,内地板隔声量最好,其次是铝材,最后是木材。三明治夹芯板总厚度不变,变化夹板厚度(1 mm~7.5 mm变化),钢材与铝材作为表层时对比,内地板隔声量提高5.7 dB~7.6 dB;铝材与木材作为表层时对比,内地板隔声量提高2.5 dB~7.3 dB;

(3) 三明治夹芯板夹板厚度与蜂窝板厚度分布对内地板隔声量影响,木材夹层板,厚度每增加1 mm,各个频段隔声量提高1 dB~1.5 dB,木材最优表层厚度为5 mm~7 mm,最大计权隔声量为36.4 dB;铝材夹层板,厚度每增加1 mm,各个频段隔声量提高1 dB~3 dB,铝材最优表层厚度为4 mm~5 mm,最大计权隔声量为41.6 dB;钢材夹层板,厚度每增加1 mm,各个频段隔声量提高1 dB~5 dB,钢材最优表层厚度为3 mm~6 mm,最大计权隔声量为48.3 dB;

(4) 蜂窝板夹层材料密度变化对内地板隔声量影响不大。蜂窝板密度降低50%,内地板隔声量有增加趋势,但影响较小。

参考文献:

- [1] 张伟,陈光雄,肖新标,金学松. 高速列车车内噪声声品质客观评价分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 13-18.
- [2] ZHANG Jie, Xiao Xin-biao, JIN Xue-song. Interior sound quality of a high-speed train running at more than 300 km/h[A]. STECH'12, Seoul, Korea, 2012.
- [3] YU Yu, XIAO Xin-biao, JIN Xue-song, WANG Di, WANG Heng-yu. Prediction of interior noise in a cabin of high speed train using FE-SEA hybrid methods[C]. Inter-Noise, 2011, Osaka, Japan, 2011.
- [4] 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, 1671-1637 (2011): 65-71.
- [5] 丁晓,王昌田,韩宝坤,鲍怀谦,符俊杰. 泡沫铝复合板低频吸声性能实验分析与研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(5): 196-198.
- [6] 万翀,吴锦武. 传递矩阵法分析复合材料层合板的传声损失[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(1): 45-50.
- [7] 杨德林,章向明,王安稳. 分层介质系统声透射问题的传递矩阵方法[J]. 海军工程大学学报, 1009-3486 (2000) 03-0028-03.
- [8] 庞培森,汪鸿振. 用传递矩阵法分析微穿孔板的声学特性[J]. 声学技术, 1000-3630 (2006)-01-0048-04.
- [9] J. F. Allard. Propagation of sound in porous media[J]. Elsevier Applied Science, London, 1993:174-175.