第59卷第3期
2019年5月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol.59, No.3
May 2019

文章编号:1000-8608(2019)03-0296-06

基于轮胎滚动下落法的PA路面噪声性能影响因素研究

张怡文, 韩 森*, 刘亚敏

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为了更好地模拟轮胎-路面交通噪声产生机理,提出了轮胎滚动下落的室内试验方法.基于此方法,研究了不同影响因素(空隙率、路面厚度、公称最大粒径、TPS改性剂用量)对PA(大空隙沥青)路面噪声性能的影响.研究表明:PA路面的噪声主体集中分布在400～5 000 Hz,噪声尖峰分布在630～800 Hz,与实际交通噪声频谱图分布情况一致.随着空隙率、TPS改性剂用量以及路面厚度增大,A计权声压级明显降低,PA路面噪声性能显著改善;由公称最大粒径的改变引起的声压水平变化不甚明显.此外,灰关联度计算结果显示,不同因素对噪声性能影响程度大小依次为路面厚度＞TPS改性剂用量＞公称最大粒径＞空隙率.

关键词:轮胎滚动下落法;大空隙沥青路面;噪声性能;灰关联度

中图分类号:U416.217 **文献标识码**:A **doi**:10.7511/dllgxb201903011

0 引 言

随着交通事业的迅速发展,基本通行功能已经不能满足道路发展的需要,包括抗滑、降噪性能等在内的路面功能性研究逐渐成为重点课题.大空隙沥青路面(porous asphalt pavement,简称PA路面)作为新型路面结构,由于粗集料多、空隙率大等特点,具备良好的抗滑、降噪性能,从经济发展的长远性考虑,被广泛用于公路及城市道路.研究数据表明[1],与普通沥青路面相比,PA路面噪声水平可降低3～6 dB(A),能显著改善高速行驶下的道路交通噪声.

现阶段,科研人员大多以吸声系数作为评价指标,基于阻抗管测试方法,对PA路面噪声性能进行了研究.研究发现[2-4]:空隙率、路面厚度等材料体积参数的改变均会对材料吸声性能造成影响.虽然一定程度上,吸声系数可以反映路面材料的吸声降噪特性,但由于其与实际轮胎-路面交通噪声不能建立直接联系,用来评价路面噪声特性仍存在片面性.

基于此,本研究提出室内轮胎滚动下落的测试方法,该方法能有效模拟实际路面交通噪声产生情况,使得噪声数据与分析结果更具代表性.本文以PA路面作为研究对象,基于轮胎滚动下落法,主要研究空隙率、路面厚度、TPS改性剂用量和公称最大粒径改变时,PA路面噪声特性的变化规律,以期为缓解交通密集地区的噪声问题提供解决方案.

1 测试方法

1.1 测试装置及试验环境

本研究采用课题组自主研发的轮胎滚动下落法进行噪声测试,测试装置如图1所示,为减少背景噪声及反射噪声的干扰,试验在半消音室环境中进行.测试轮胎选择型号GT 185/70R13 86H普通小汽车轮胎(无轮毂),试验时轮胎充气胎压为230 kPa.为了防止轮胎下落弹起时撞击吸声尖劈造成的破坏,在测试板件与吸声尖劈之间设置防护装置.

1.2 轮胎-路面交通噪声模拟机理

研究表明[5-6],轮胎-路面交通噪声主要由轮胎振动噪声、空气泵吸噪声和空气动力噪声组成,其中空气动力噪声一般忽略不计.该试验条件下,

收稿日期:2018-12-13; 修回日期:2019-03-21.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578076);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102219207).
作者简介:张怡文(1994-),女,硕士生,E-mail:yiwenzhang331@163.com;韩 森*(1958-),男,教授,博士生导师,E-mail:hyram_hs@chd.edu.cn.

图 1　轮胎滚动下落法测试装置

Fig. 1　Tire-rolling-down method test device

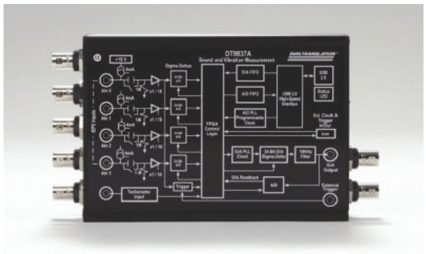

图 3　动态信号分析仪

Fig. 3　Dynamic signal analyzer

轮胎升至固定高度，由静止状态自由滚动下落. 忽略轨道摩擦力对轮胎滚动速度的影响，经物理计算，轮胎下落接触板件瞬间，水平方向分速度为 26 km/h，竖直方向分速度为 15 km/h. 在水平方向分速度的作用下，轮胎接触测试板件后继续向前滚动，经高速摄像机同步观测，得到轮胎在测试板件上滚动时间为 28 ms. 轮胎滚动过程中，胎面凸起的花纹与测试板件不断碰撞，产生导致轮胎滑移的切向力，轮胎-测试板件间的摩擦引起胎面变形，从而产生振动噪声. 同时，轮胎在向前滚动过程中，轮胎花纹沟槽内的空气被快速地挤出或吸入，这种空气泵吸效应产生的气流带动周围气压的变化，导致空气泵吸噪声的产生. 由于轮胎振动噪声及空气泵吸噪声是交通噪声的主要来源，该室内试验能有效模拟实际道路交通噪声产生机理.

1.3　噪声采集装置及分析系统

试验噪声采集系统主要由两部分组成：声压传感器和动态信号分析仪. 试验采用 INV9206A 型高精度 ICP 式声压传感器，其主要由驻极体传声器和 ICP 前置放大器组合而成，如图 2 所示. 测试时，声压传感器置于距测试板件侧边中点 10 cm 处，进行声压数据采集. 采用美国 Data Translation 公司生产的 DT9837 型号便携式动态信号分析仪，该分析仪小巧便携，适用于高精度测量，如图 3 所示. 动态信号分析仪与 DEWESoft7.0.6 软件系统配套使用，对声音信号进行采集、截取及导出. 对已经导出的声压数据，采用 DASP-V10 分析软件对其进行转换、分析，进而得到 A 计权声压级和 1/3 倍频程频谱图结果作为噪声评价指标.

图 2　声压传感器

Fig. 2　Sound pressure sensor

2　试验方案

2.1　原材料

集料为闪长岩，矿粉为磨细的石灰岩，基质沥青采用双龙 70# 沥青，添加剂为 TPS 高黏改性剂. 本试验采用干法改性的方法，将 TPS 颗粒在规定温度下首先与集料均匀拌和，再依次加入沥青、矿粉拌和制备沥青混合料.

2.2　试验设计

通过查阅相关研究资料，确定最佳油石比为 4.8%，TPS 改性剂用量为 10%（以改性沥青总质量计），矿料级配曲线如图 4 所示.

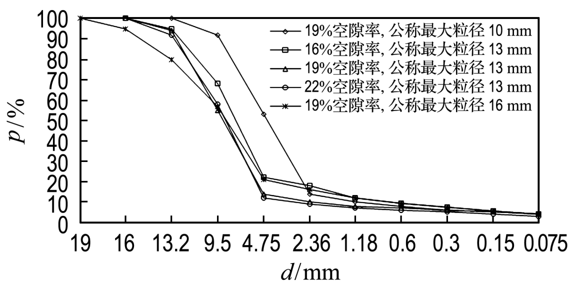

图 4　试验中采用的级配曲线

Fig. 4　Gradation curve used in the test

采用控制变量法对研究变量进行控制，其余参数保持不变，具体试验设计如表 1 所示. 参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定的方法[7]，采用轮碾成型仪成型 30 cm×30 cm×5 cm 的车辙板试件用于试验测试.

表1 变量控制设计方案

Tab.1 Variable control design scheme

空隙率/%	路面厚度/cm	TPS改性剂用量/%	公称最大粒径/mm
16	5	10	13
19	5	10	13
22	5	10	13
19	4	10	13
19	5	10	13
19	6	10	13
19	8	10	13
19	10	10	13
19	5	0	13
19	5	6	13
19	5	10	13
19	5	14	13
19	5	18	13
19	5	10	10
19	5	10	13
19	5	10	16

3 试验结果与分析

对采集到的噪声数据进行分析处理，以A计权声压级(dB(A))和1/3倍频程频谱图作为噪声性能评价指标.规定A计权声压级结果误差在0.5 dB(A)以内的试验为有效试验，每块测试板件进行3次有效试验，取其平均值作为最终结果，试验结果保留1位小数.不同参数下，噪声测试结果如表2所示.

3.1 空隙率对噪声性能的影响

由表2可知，空隙率从16%变化到19%时，A计权声压级减小量约3 dB(A)，降噪效果显著；当空隙率从19%变化到22%时，降低约1 dB(A).考虑实际PA路面的衰减、堵塞、耐久性等问题，空隙率宜控制在20%左右.由图5可知，空隙率变化时，噪声主体均分布在400～5 000 Hz，噪声尖峰处于630～800 Hz，这与实际交通噪声频谱图分布趋于一致.随着空隙率的增大，各中心频率处声压水平逐渐减小，在200～5 000 Hz下降幅度尤其明显.

由于空隙率的增大，人耳在敏感频率范围(1 000～5 000 Hz)内接收到的噪声减小，首先直观感受到的噪声有所下降.其次，碰撞、冲击作用主要影响1 000 Hz以下频率的声压水平，泵吸作用主要影响1 000 Hz以上频率的声压水平.当空隙率增加时，路面明显呈现为多孔结构，混合料内部的连通空隙增多，轮胎-路面作用产生的声波在

表2 不同参数下PA路面A计权声压级

Tab.2 A-weighted sound pressure level of porous asphalt pavement with different parameters

影响因素	取值	有效试验测试结果/dB(A)			A计权声压级/dB(A)
		1	2	3	
空隙率/%	16	95.1	95.2	95.1	95.1
	19	92.2	92.2	92.2	92.2
	22	91.0	90.6	90.8	90.8
路面厚度/cm	4	94.3	94.4	94.2	94.3
	5	94.1	94.2	94.4	94.2
	6	94.0	94.2	93.9	94.0
	8	91.1	91.0	90.9	91.0
	10	88.5	88.5	88.5	88.5
TPS改性剂用量/%	0	96.5	96.8	96.6	96.6
	6	95.4	95.1	95.2	95.2
	10	93.4	93.4	93.4	93.4
	14	92.6	92.4	92.3	92.4
	18	90.8	90.8	90.8	90.8
公称最大粒径/mm	10	92.1	92.3	92.2	92.2
	13	93.6	93.8	93.5	93.6
	16	91.6	91.5	91.6	91.6

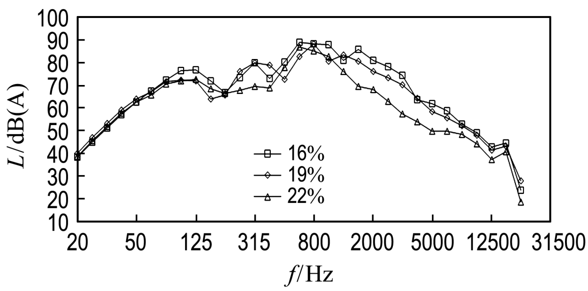

图5 不同空隙率下噪声1/3倍频程频谱图

Fig.5 1/3 Octave frequency spectrum of noise under different void ratios

这些空隙中传播的路径变长.轮胎撞击板件的振动噪声、空气泵吸噪声更多地被空隙吸收.加之热传导效应，声能在空隙中传播时转变为热能耗散掉，声压水平进一步降低.

3.2 路面厚度对噪声性能的影响

由表2可知，当路面厚度变化不大时(从4 cm变化至6 cm)，噪声水平变化甚微，几乎可忽略不计；当路面厚度显著变化时(厚度变化至10 cm)，A计权声压级降低约6 dB(A)，降噪效果十分明显.由图6可知：路面厚度变化时，噪声尖峰均处于800 Hz附近；1 000 Hz以下频率的声压水平差异不大；当路面厚度增至8、10 cm时，各中心频率下的声压水平显示出明显差异，在400～5 000 Hz变化尤为显著.

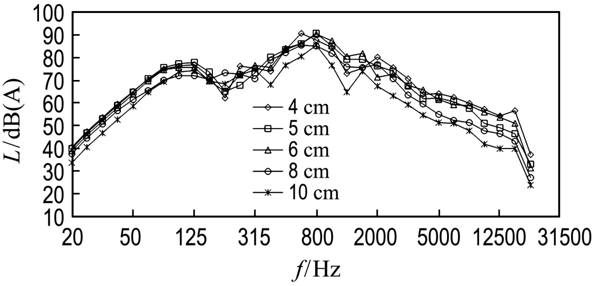

图 6　不同路面厚度下噪声 1/3 倍频程频谱图

Fig. 6　1/3 Octave frequency spectrum of noise under different road thicknesses

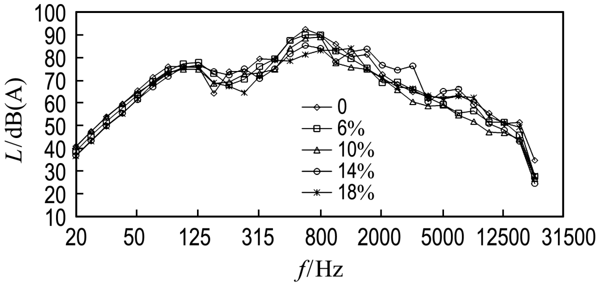

图 7　不同 TPS 改性剂用量下噪声 1/3 倍频程频谱图

Fig. 7　1/3 Octave frequency spectrum of noise under different TPS modifier dosages

分析其原因，由于测试板件位置恒定，板件厚度变化不大时，轮胎接触板件时的速度几乎无差别．加之混合料级配、空隙率等均未改变，故试件表面纹理也无明显变化．轮胎在接触板件并向前滚动的过程中，胎面花纹与路面板件接触、碰撞，产生相似的切向力和胎面变形，从而产生的轮胎振动噪声趋于一致，因此表现为各中心频率处声压级差别甚微．而当板件厚度明显增加，轮胎滚动下落时，相对提前与板件接触，受到一个缓冲的作用，使得轮胎运动速度减小，水平方向的分速度也随之减小．因此轮胎在路面板件上短暂滚动前进过程中，轮胎由于碰撞、冲击作用产生的切向力和胎面变形相应变小，从而产生的轮胎振动噪声减小．再加上速度的减小，空气吸入或排出时周围气压变化减小，使得空气泵吸噪声减小．因此板件厚度显著变化时，各中心频率下声压水平显著降低，最终表现为 A 计权声压级减小．

3.3　TPS 改性剂用量对噪声性能的影响

由表 2 可知，随着 TPS 改性剂用量的增多，路面噪声水平持续下降，当 TPS 改性剂用量大于 10％时，与基质沥青 PA 路面相比，其噪声水平降低 3 dB(A)以上，降噪效果显著．此外，由图 7 可知，不同 TPS 改性剂用量下，噪声尖峰均处于 630 Hz 附近；在整个频率范围内，声压水平的变化趋势一致，TPS 改性剂用量变化时，噪声峰值处声压水平差异较大．

分析认为，TPS 改性剂的主要成分为热塑性橡胶、黏结性树脂等具有弹性的材料，具有一定的减振作用．TPS 改性剂均匀分散于沥青混合料中，路面受到轮胎作用时，TPS 改性剂颗粒产生变形，轮胎振动产生的部分能量存储在分子链中．当轮胎作用消失后，分子链中存储的能量又重新释放、消散．此外，随着 TPS 改性剂用量的增多，沥青混合料的阻尼随之变大，在受到外力作用时，阻尼也会将部分由于振动产生的能量消耗．因此，PA 路面的噪声性能随着 TPS 改性剂用量的增多而改善，尤其在 630 Hz 附近的噪声峰值处，改善效果尤其明显．值得注意的是，虽然 PA 路面噪声性能随着 TPS 改性剂用量增多有所改善，但过多的 TPS 改性剂用量使得工程造价高、经济性不好，因此在实际应用中，TPS 改性剂用量应该控制在合适范围内，一般以 10％～15％为宜．

3.4　公称最大粒径对噪声性能的影响

由表 2 可知，公称最大粒径为 10 和 16 mm 时噪声水平较 13 mm 虽有所降低，但降低幅度较小，且 PA 路面噪声变化不存在明显的规律性．此外，由图 8 可知，公称最大粒径变化时，各中心频率处的声压级并无明显区别，声压变化趋于一致，噪声峰值均集中分布在 800 Hz 附近．

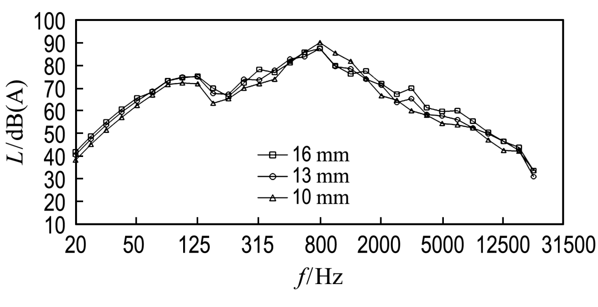

图 8　不同公称最大粒径下噪声 1/3 倍频程频谱图

Fig. 8　1/3 Octave frequency spectrum of noise under different nominal maximum sizes

究其原因，一方面，集料间形成的孔径越小，连通空隙较多的材料具有更好的吸声性能[8]．公称最大粒径为 10 mm 时，混合料内部形成的空隙孔径小，更易形成较多的连通空隙，进而通过空隙吸声作用使得噪声性能得以改善．另一方面，在相

同的空隙率条件下,公称最大粒径为10 mm的板件表面纹理更密,即在单位面积下的构造数量更多,能对噪声进行有效反射,一定程度上消耗噪声能量,对噪声性能具有改善作用.

4 噪声性能影响因素灰关联分析

为进一步分析基于轮胎滚动下落法的不同影响因素序列关联性,以及确定影响噪声性能的主要参数,在得到不同影响因素下PA路面的噪声结果后,采用灰关联分析技术对其进行分析处理.

灰关联分析技术的一般步骤如下:①确定行为序列,包括参考序列 $x_0(k)$ 和比较序列 $x_i(k)$;②对原始数据进行数据处理,使其转化为数量级相当的量纲一数据;③数据计算,依次确定绝对差序列、关联系数、关联度,其中邓氏灰关联系数 $r(x_0(k),x_i(k))$ 和灰关联度 $r(x_0,x_i)$ 计算公式见式(1)和(2);④优势分析.

$$r(x_0(k),x_i(k))=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta_{\max}} \tag{1}$$

$$r(x_0,x_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}r(x_0(k),x_i(k)) \tag{2}$$

式中:$\Delta_{\min}=\min\limits_{i}\min\limits_{k}\Delta_{0i}(k)$ 为两极最小差,$\Delta_{\max}=\max\limits_{i}\max\limits_{k}\Delta_{0i}(k)$ 为两极最大差;$\Delta_{0i}(k)=|x_0(k)-x_i(k)|$ 为参考序列和比较序列差的绝对值;ρ 为分辨系数,一般取0.5.

首先利用均值法对试验数据进行量纲一化处理,处理前后的数据曲线如图9、10所示.处理后的数据,曲线分布集中,消除了量纲的影响,数据更具可比性.

按上述提及的计算步骤,得到各关联序列的关联系数计算结果如表3所示.

空隙率、路面厚度、公称最大粒径、TPS改性剂用量与PA路面噪声性能的灰关联度分别为0.499、0.855、0.773和0.830.各因素对PA路面噪声性能的影响程度从大到小排列依次为路面厚度>TPS改性剂用量>公称最大粒径>空隙率.说明不同因素中,路面厚度对噪声性能的影响最为显著,而TPS改性剂用量和公称最大粒径的影响作用次之,在该试验条件下,空隙率对噪声性能的影响并不十分明显.

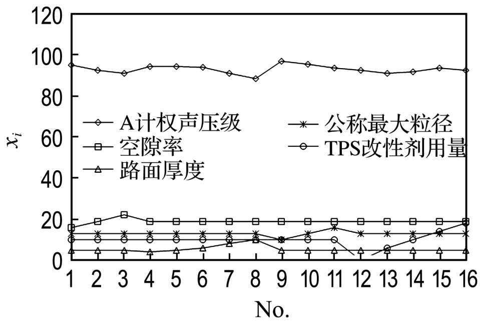

图9 量纲一化处理前试验数据曲线

Fig. 9 Test data curve before dimensionless treatment

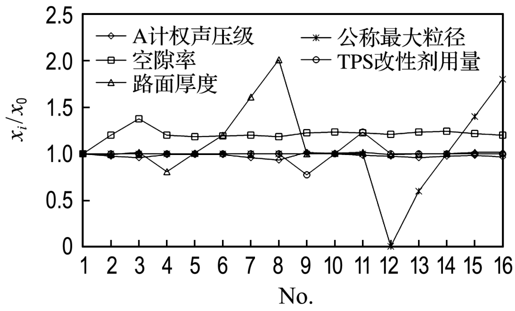

图10 量纲一化处理后试验数据曲线

Fig. 10 Test data curve after dimensionless treatment

表3 关联系数计算结果

Tab. 3 Result of correlation coefficient

试验编号	关联系数			
	空隙率	路面厚度	公称最大粒径	TPS改性剂用量
1	1	1	1	1
2	0.473	0.967	0.803	0.941
3	0.333	0.901	0.733	0.915
4	0.503	0.747	0.937	0.983
5	0.519	0.972	0.929	0.981
6	0.510	0.717	0.915	0.977
7	0.461	0.451	0.743	0.918
8	0.456	0.333	0.642	0.875
9	0.501	0.968	0.335	0.969
10	0.473	0.987	0.992	0.998
11	0.465	0.944	0.333	0.965
12	0.468	0.967	0.814	0.333
13	0.432	0.922	0.733	0.578
14	0.439	0.946	0.803	0.941
15	0.476	0.951	0.887	0.539
16	0.469	0.914	0.772	0.367

5 结 论

(1)轮胎滚动下落法能有效模拟实际轮胎-路面交通噪声的产生机理,且轮胎振动噪声与空气泵吸噪声为主要噪声来源.

(2)PA路面的噪声主体集中分布在400~5 000 Hz,噪声尖峰分布在630~800 Hz,与实际交通噪声频谱图分布情况一致.

(3)当空隙率增大、路面厚度增加以及TPS

改性剂用量增多时，路面噪声水平显著降低；当公称最大粒径改变时，噪声水平变化不大.综合考虑路面噪声性能及经济性，建议PA路面设计空隙率20%、TPS改性剂用量10%～15%为宜.

（4）灰关联度计算结果表明，各因素对PA路面噪声性能的影响程度依次为路面厚度＞TPS改性剂用量＞公称最大粒径＞空隙率.

参考文献：

[1] GIBBS D，IWASAKI R，BERNHARD R，*et al*. **Quiet Pavement System in Europe** [M]. Washington D C：Federal Highway Administration，U. S. Department of Transportation，2005.

[2] KNABBEN R M，TRICHES G，GERGES S N Y，*et al*. Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures [J]. **Applied Acoustics**，2016，**114**:266-274.

[3] ALBER S，RESSEL W，LIU P，*et al*. Influence of soiling phenomena on air-void microstructure and acoustic performance of porous asphalt pavement [J]. **Construction and Building Materials**，2018，**158**:938-948.

[4] CHU L，FWA T F，TAN K H. Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement [J]. **Construction and Building Materials**，2017，**141**：402-409.

[5] 许雪莹，曹卫东，葛剑敏，等. 骨架密实型低噪声路面降噪机理的实验研究 [J]. 应用声学，2008，**27**(1):7-10.
XU Xueying，CAO Weidong，GE Jianmin，*et al*. Experimental study of noise-reducing mechanism of dense framework structure and low noise pavement [J]. **Applied Acoustics**，2008，**27**(1)：7-10. (in Chinese)

[6] 刘 威，易 文，何贤锋，等. 轮胎/路面噪声影响因素研究 [J]. 湖南交通科技，2016，**42**(2):31-33,80.
LIU Wei，YI Wen，HE Xianfeng，*et al*. Study on factors of tire-road noise [J]. **Hunan Communication Science and Technology**，2016，**42**(2)：31-33，80. (in Chinese)

[7] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程：JTG E20—2011 [S]. 北京：人民交通出版社，2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering：JTG E20-2011 [S]. Beijing：China Communications Press，2011. (in Chinese)

[8] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京：南京大学出版社，2001.
DU Gonghuan，ZHU Zhemin，GONG Xiufen. **Acoustic Basis** [M]. Nanjing：Nanjing University Press，2001. (in Chinese)

Study of influence factors of noise performance of porous asphalt pavement based on tire-rolling-down method

ZHANG Yiwen，HAN Sen*，LIU Yamin

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education，Chang'an University，Xi'an 710064，China)

Abstract：In order to simulate the mechanism of tire-road traffic noise efficiently，a laboratory test method of tire-rolling-down is proposed. Based on this method，the effects of different factors (void ratio，road thickness，nominal maximum size and TPS modifier dosage) on the noise performance of porous asphalt pavement are studied. The results show that based on this laboratory test method the noise main body is distributed in 400-5 000 Hz and the noise peaks are concentrated at 630-800 Hz for porous asphalt pavement，which is consistent with the spectrum distribution of field traffic noise. With the increase of void ratio，TPS modifier dosage and road thickness，A-weighted sound pressure level decreases，the noise performance of porous asphalt pavement is improved significantly；but the variation of sound pressure level caused by the change of nominal maximum size is not obvious. In addition，the calculation result of grey relational grade shows that the influence degree of each factor on noise performance is road thickness ＞ TPS modifier dosage ＞ nominal maximum size ＞ void ratio.

Key words：tire-rolling-down method；porous asphalt pavement；noise performance；grey relational grade