

# 新型多孔弹性低噪音路面开发与测试评估

何昕<sup>1</sup>, 吴润华<sup>2\*</sup>, 徐粒<sup>1</sup>, 彭慧婷<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京市 100084)

**摘要:**该文研究开发了新型降噪路面——多孔弹性低噪音路面,针对空隙率和弹性对降噪影响展开试验研究。设计3种不同空隙率级配的混合料车辙板标准试件,进行室内轮胎加速下落试验和阻尼减振降噪试验。结果表明:多孔弹性低噪音路面相比于普通的沥青混凝土路面具有更好的降噪能力。且两种方式的降噪能力相比于传统的密级配AC-13沥青混凝土的降噪能力强,随新材料聚烯烃弹性体 Poly Olefin Elastomer(POE)掺量增加,轮胎/路面的系统阻尼变大,路面减振降噪能力增强,可以为POE材料应用以及降噪方面的道路铺面工程提供合适的理论参考依据。

**关键词:**道路工程; 降噪路面; 聚乙烯弹性体; 多孔弹性; 沥青混合料

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

随着中国道路交通事业的快速发展,交通通行量日益增加,车速明显提高,交通带来的噪声污染也更加严重,给城市居民带来了严重的交通噪声和道路生态问题。同时,交通噪声对人们的身心健康造成巨大的危害,容易使人产生紧张感和压力感,危害人们的身心健康,严重的容易使人产生疾病<sup>[1]</sup>。研究表明:交通噪声主要是由轮胎与路面的相互作用接触引起。当行车车速大于50 km/h时,轮胎与路面接触产生的噪声是主要噪声源<sup>[2]</sup>。因此研究者认为降低交通噪声最有效的方法是通过改变路面的结构特性进而降低交通噪声<sup>[3]</sup>。

目前,根据轮胎与路面接触产生噪声的机理,国际上提出了3种不同的沥青混凝土降噪模式<sup>[4]</sup>:①多孔吸声模式;②声波漫的反射及相互干涉模式;③弹性模式。Wang等<sup>[5]</sup>开发了一种能完全代替沥青的、环保、可持续发展的新型黏结剂,经过试验研究发现,该黏结剂具有良好的降低噪声的能力和行车舒适性;Ejsmont等<sup>[6]</sup>开发了一种新型的路面多孔弹性沥青路面,即PERS,研究发现这种路面的降噪能力相比传统的密级配沥青混凝土降噪提升10 dB;孙晓立等<sup>[7]</sup>发现轮胎的作用次数是影响噪声的关键因素,微表处噪声大于沥青混凝土。目前研究较为普遍的是第①种和第③种的结合,即多孔弹性路面(PERS)。虽然单一模式都有涉及研究,但是并不完善,没有形成完备的流程,多孔弹性路面容易随着时间的推移而呈现出空隙

易堵塞、耐久性严重不足的问题。自20世纪80年代以来,为了降低路面的噪声,很多道路工作者做了大量的研究,发现多孔弹性路面(即PERS路面)具有优异的降低路面形成噪声的能力<sup>[8]</sup>。这种路面的特点是其空隙率能达到18%~25%,这种大空隙率材料对铺面结构吸声性能产生了良好增益,可有效吸收路面与轮胎产生的噪声<sup>[9]</sup>。值得一提的是这种路面还具有良好的黏弹性,可增加系统阻尼,从而起到减振降噪的效果。

基于此,该文在岩沥青可充分改善沥青混合料的水稳定性性能、抗疲劳性能、抗老化性能的基础上<sup>[10-11]</sup>,用新材料高分子弹性体 Poly Olefin Elastomer(简称POE)设计了多孔弹性路面,将多孔隙和高弹性结构模式两者复合得到多孔弹性路面,试验发现开发的新型铺面层在降噪方面具有良好表现。

## 1 试验

### 1.1 原材料

沥青:东海牌70#基质沥青,相关技术指标符合规范要求;岩沥青: BRA布敦岩沥青,工业品;聚烯烃弹性体(POE):美国Dupont DOW弹性体化学公司生产,8150热塑性弹性体,基本技术指标见表1;粗细集料:机制石灰岩(棱角形),北京市政路桥集团有限公司生产;橡胶颗粒:废旧轮胎橡胶:2~4 mm。

收稿日期:2020-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51568063)

作者简介:何昕,男,硕士研究生。E-mail: hx18801381237@163.com

\*通信作者:吴润华,男,副教授,博士生导师。E-mail: guorh@tsinghua.edu.cn

表 1 POE 的基本技术指标

项目	单位	技术指标	测试方法
密度	g/cm <sup>3</sup>	0.868	ASTM D792
熔流率(190 ℃/2.16 kg)	g/(10 min)	0.5	ASTM D1238
门尼黏度 (ML 1+4, 121 ℃)		33.0	ASTM D1646
抗张强度(断裂, 模压成型)	MPa	9.5	ASTM D638
玻璃转化温度	℃	-52.0	内部方法
维卡软化温度	℃	46.0	ASTM D1525
熔融温度(DSC)	℃	55.0	内部方法
结晶峰温度(DSC)	℃	42.0	内部方法
伸长率(断裂, 模压成型)	%	810.0	ASTM D638
撕裂强度	kN/m	37.3	ASTM D624

1.2 PELNRS(多孔弹性低噪音路面)沥青混合料专用黏结剂的制备

将基质沥青加热到 160 ℃, 然后加入 POE 让其进行溶胀 10 min, 然后利用高速剪切乳化机在温度 160 ℃、速率 5 000 r/min 左右环境下剪切 10 min 后停止; 然后再加入布敦岩沥青 BRA, 最后在相同的环境下继续剪切 20 min 后停止。将剪切好的黏结剂复合改性沥青在温度 160~170 ℃ 的环境下发育 2~4 h 待用<sup>[12]</sup>。

1.3 配合比设计

利用已有的研究经验公式<sup>[13]</sup>进行混合料空隙率的初始级配设计并使之满足规范要求, 以下对设计不同类型空隙率的级配编号分别为: PELNRS-I、PELNRS-II、PELNRS-III。级配设计见图 1。此外, 为了与传统的密级配沥青混凝土进行噪声对比, 设计了 AC-13 级配。把不同的空隙率与相对应的不同级配类型转化为表格的形式见表 2, 试验所需的编号见表 3, 具体的不同含量比例见表 4。

范取得。计算出混合料的油石比如表 5 所示。最后进行谢伦堡沥青析漏试验进行检验, 均满足规范要求。

表 2 空隙率与级配类型的对应关系

空隙率/%	级配类型	空隙率/%	级配类型
18.0	PELNRS-I	4.5	AC-13
20.0	PELNRS-II	5.0	SMA-13
22.0	PELNRS-III		

表 3 空隙率与各类型编号的关系

配合比 编号	空隙率/%		
	18 (PELNRS-I)	20 (PELNRS-II)	22 (PELNRS-III)
A	PELNRS-1	PELNRS-6	PELNRS-11
B	PELNRS-2	PELNRS-7	PELNRS-12
C	PELNRS-3	PELNRS-8	PELNRS-13
D	PELNRS-4	PELNRS-9	PELNRS-14
E	PELNRS-5	PELNRS-10	PELNRS-15
	AC-13		

表 4 不同类型与各比例含量的关系

混合料 类型	POE 含量/%	岩沥 青/%	基质沥 青/%	橡胶颗 粒/%	硅烷偶 联剂/%
A	4	10	86	5	4
B	5	10	85	5	4
C	6	10	84	5	4
D	7	10	83	5	4
E	8	10	82	5	4
AC-13	—	10	100	5	4

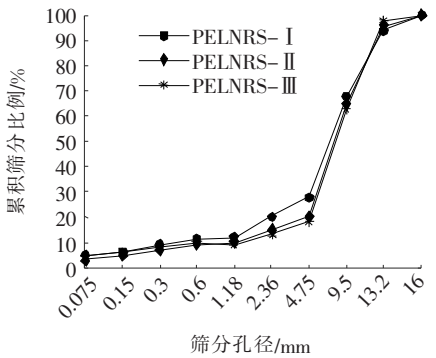


图 1 不同类型空隙率合成级配曲线

该文采用宋建生等<sup>[14]</sup>的经验计算公式确定最佳油石比, AC-13、SMA-13 的最佳油石比确定参照规

表 5 油石比的计算

级配类型	油石比/%	级配类型	油石比/%
PELNRS— I	4.8	PELNRS— Ⅲ	4.6
PELNRS— Ⅱ	4.5		

1.4 噪声采集原理

1.4.1 室内轮胎加速下落法噪声试验

采用室内轮胎下落测试噪声的方法进行噪声测试,试验示意图如图 2 所示<sup>[14]</sup>。斜坡长度为 100 cm,顶端高度 60 cm,倾角为 30°,轮胎由斜坡的顶端落下,轮胎落下接触车辙板时,同时具有水平加速度和竖向冲击力,更接近实际路面的受荷状态,可在一定程度上模拟轮胎/路面相互作用。分别在距离声源半径 1 m (近轮距离)、1.9 m(半车道宽)和 3.75 m(一车道宽)3 个位置分别放置噪声计,以模拟距离噪声源不同距离的听者感受。试件为试验室碾压车型的标准车辙板试件。测试所用的轮胎为标准小型汽车轮胎。

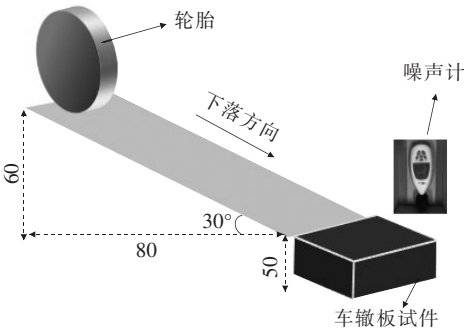


图 2 轮胎加速下落法斜坡示意图(单位:cm)

1.4.2 阻尼减振降噪测试

轮胎垂直振动衰减试验测试原理是把自由振动法运用到轮胎/路面振动噪声的评价上,轮胎垂直振动衰减试验是由轮胎下落法发展而来的,因此可以定量评价轮胎对沥青路面的振动衰减能力。根据振动理论,可将轮胎/路面系统简化为有阻尼的单自由度振动衰减模型<sup>[15]</sup>,如图 3 所示。

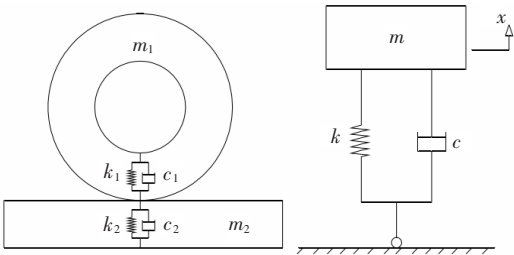


图 3 轮胎/路面振动系统模型

根据振动方程:

$$ma + cv + kx = 0 \tag{1}$$

式中: $m$  为轮胎/路面系统的等效振动质量; $k$  为轮胎/路面系统的劲度; $c$  为轮胎/路面系统的黏性阻尼系数; $a$ 、 $v$ 、 $x$  分别为轮胎/路面系统振动的加速度、速度和幅值。

上述方程的解为:

$$x = Ae^{-\xi t} \cos(\omega_0 t + \phi) \tag{2}$$

式中: $\omega_0 = k/m$  为振动角频率; $\xi = c/(2m)$  为振动衰减系数。

由解的结构形式可以知道,该方程解的包络线方程为:

$$x = Ae^{-\xi t} \tag{3}$$

由上述包络线方程可以知道只要求出自由下落振动的衰减包络线方程,就可以由方程的幂指数获得轮胎/路面系统的振动衰减系数。

试验测试系统所需的设备如图 4 所示,试验所选用的轮胎为胎压 250 kPa,195/60R14 的标准小型汽车轮胎,所用试件为已成型好的 300 mm×300 mm×50 mm 标准车辙板试件,在进行试验时首先将 ICP 加速度传感器垂直安装在轮胎侧面,通过试验装置调整轮胎的下胎面距离车辙板面垂直高度 3 cm,使得轮胎垂直落下,测试垂直的轮胎下落加速度,然后把加速度传感器连接到 ZD740 单通道振动分析仪上,将采集数据导入 Matlab 进行数据分析。



图 4 轮胎自由振动衰减装置

2 结果与分析

2.1 室内轮胎加速下落法试验结果与分析

进行 A 计权声压级测试数据见图 5。结果表明:相比传统密级配 AC—13 混合料而言,具有较大孔隙特点的 PELNRS 路面能显著降低路面的噪声。PELNRS 路面在近轮、半车道、一车道处的降噪能力平均值比传统的密级配 AC—13 路面分别降低 6.7 dB、3.7 dB、3.4 dB。PELNRS 试件的降噪能力随其与声源距离的增加而衰减。在 POE 掺量一定的情况下,随着

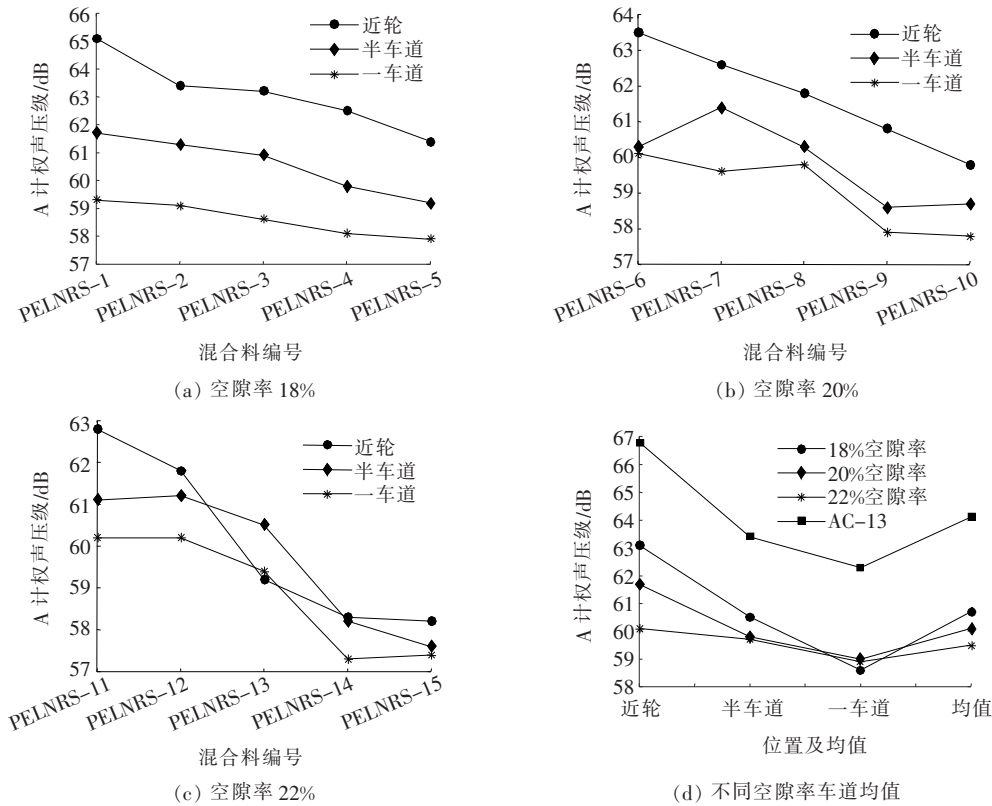


图 5 不同类型编号路面噪声水平比较

空隙率的增加,PELNRS 的降噪能力逐步增强,相对于空隙率为 22%,路面类型为 PELNRS-15 近轮的情况下,路面的降噪能力比传统密级配路面降低了 8.6 dB。

分析产生该现象的原因有两点:① 空隙率的增大使得路面更好地吸收胎/路接触时产生的噪声;② 路面类型为 PELNRS-15 比其他的路面参加的 POE 含量要多,能降低轮胎与路面接触时产生的竖向振动,从而降低路面的噪声。

2.2 阻尼减振降噪测试数据分析

对不同的 PELNRS 沥青混合料路面,此次试验选用的是空隙率为 22% 的 PELNRS-11 路面,其他类型的路面不再具体分析,具体的编号类型参考表 3。进行轮胎垂直振动衰减试验结果处理分析,然后绘制振动曲线以及振幅包络线拟合曲线见图 6,不同类型路面对比见图 7。

图 6 表明:POE 的掺量由 4% 增加到 8% 时,其轮胎/路面的振动衰减系数随 POE 掺量增加而增加,表明随 POE 掺量增加,轮胎/路面的系统阻尼变大,路面减振降噪能力增强。

分析其原因:首先 POE 掺入使得沥青混合料中沥青用量提高,在一定程度上增加了沥青混合料的黏弹

性能,从而提高了沥青混合料的阻尼性能;其次 POE 材料本身具备良好的阻尼性能,使得轮胎/路面的振动噪声在传播过程中所产生的振动能量得到有效耗散。POE 材料本身的加入也提高了混合料的空间韧性,从而进一步提高了沥青混合料的阻尼减振降噪性能。

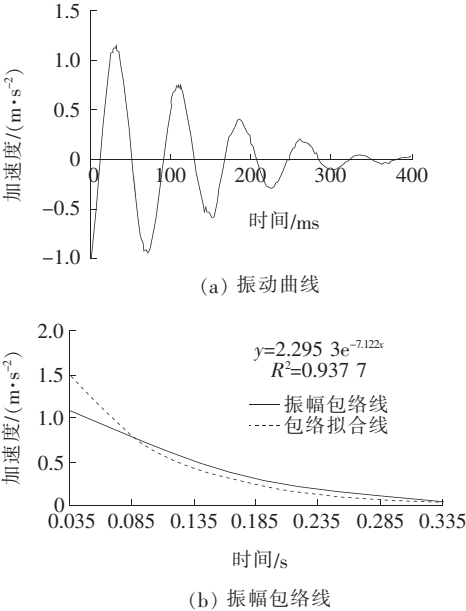
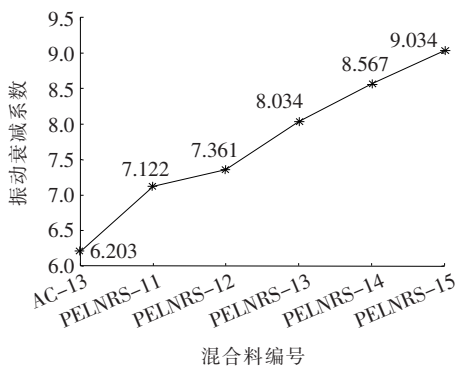
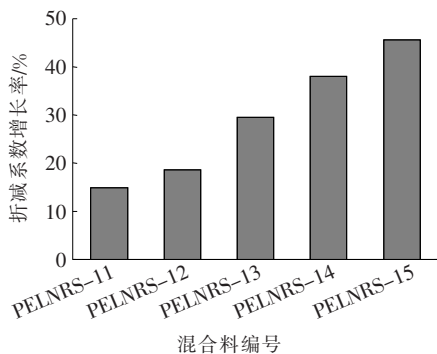


图 6 PELNRS-11 轮胎振动曲线及振幅包络线





(a) 不同类型路面振动系数



(b) 与 AC-13 折减系数对比

图 7 不同类型路面振动对比

### 3 结论

介绍和开发了一种新型的多孔低噪音路面,对不同类型 POE 橡胶复合材料多孔低噪音路面进行了具有代表性的多孔吸声降噪测试和阻尼减振降噪试验,并根据不同类型的 PELNRS 路面实测数据进行分析,得出以下结论:

(1) 通过室内轮胎加速下落试验,发现空隙率为 22% 的 PELNRS 路面在近轮、半车道、单车道的情况下降噪能力平均值比传统的密级配 AC-13 路面分别降低噪声值 6.7 dB、3.7 dB、3.4 dB,说明多孔弹性低噪音路面相对于传统的密级配路面具有更强的降低噪声的能力。

(2) 由轮胎加速下落试验发现当空隙率为 22%,路面类型为 PELNRS-15 近轮的情况下,路面的降噪能力比传统密级配路面降低了 8.6 dB,说明随着空隙率的增大 PELNRS 路面的降噪能力逐步加强。

(3) 通过阻尼减振降噪试验发现当 POE 的掺量由 4% 增加到 8% 时,轮胎/路面的振动衰减系数逐渐增加。表明随着 POE 掺量的增加,轮胎/路面的系统

阻尼越大,路面的减振降噪能力越强。

(4) 通过阻尼减振降噪试验发现,POE 材料的加入使得路面系统的整体弹性增加,降低了轮胎与路面接触时产生的竖向振动。随着 POE 掺量的增加,PELNRS 路面的降噪能力逐步加强。

### 参考文献:

- [1] 谭伟,张崇高,曹卫东,等. 轮胎/路面噪声机理与降噪路面[J]. 公路与汽运,2008(4):85—87.
- [2] 吕泽华. 硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青混合料路面及减振降噪性能研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [3] 马保国,魏定邦,李相国,等. 低噪声沥青路面吸声特性研究[J]. 新型建筑材料,2009,36(8):18—20.
- [4] 王旭东. 我国低噪音沥青路面的现状及发展[C]. 中国公路养护技术大会,2012.
- [5] WANG D, SCHACHT A, LENG Z, et al. Effects of Material Composition on Mechanical and Acoustic Performance of Poroelastic Road Surface (PERS) [J]. Construction & Building Materials, 2017, 135:352—360.
- [6] EJSMTONT J, GOUBERT L, RONOWSKI G, et al. Ultra Low Noise Poroelastic Road Surfaces [J]. Coatings (Basel), 2016, 6(2):18.
- [7] 孙晓立,张肖宁,蔡旭. 不同类型微表处噪声特性的室内试验[J]. 公路交通科技,2012,29(2):18—22.
- [8] EJSMTONT Jerzy, SANDBERG Ulf, SWIECZKO-ZUREK Beata, et al. Tyre/Road Noise Reduction by a Poroelastic Road Surface [J]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2014, 249(8):106—117.
- [9] 魏建军,孔永健. 多孔隙低噪声沥青路面降噪机理的研究[J]. 黑龙江工程学院学报,2004(1):11—13.
- [10] 欧毅,李光,李佳庆. 岩沥青 AC-25 沥青混合料材料组成设计及性能检验[J]. 湖南交通科技,2018,44(3):18—20.
- [11] 尚晓峰. BRA 岩沥青与 SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 公路工程,2016,41(4):78—83,101.
- [12] 唐永新,邓先科,龙涛. 一种新型高弹改性沥青的制备方法[J]. 化工管理,2019(28):81—82.
- [13] 余金波,黄晓明. 均匀设计在 OGFC 混合料设计中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2014,25(6):62—65.
- [14] 宋建生,吕伟民. 储存式沥青混合料组成设计的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),1998,26(6):664—668.
- [15] 李骅. 空隙特征对排水路面降噪性能的影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.