第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0123-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:黄志勇, 张肖宁, 陈　搏, 等. 轮胎接触构造分布对沥青路面降噪特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 123—128
Huang Zhiyong, Zhang Xiaoning, Chen Bo, et al. Impact of tire contact texture on noise reduction characteristics of asphalt pavement[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 123—128

轮胎接触构造分布对沥青路面降噪特性的影响

黄志勇[1]　张肖宁[1,2]　陈　搏[1,2*]　虞将苗[1,2]　陈富达[2]

(广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司[1], 广州 510641;华南理工大学土木与交通学院[2],广州 510640)

摘　要　从轮胎与路面的噪声产生机理出发,采用主驱动轮式路面功能评价系统开展不同级配的沥青路面噪声特性研究;并基于胎/路接触特性提出路面降噪效果的评价指标。结果表明:胎/路接触界面的开口空隙率可以有效评价路面空气泵吸作用;相比沥青混合料内部空隙率和路表构造深度,轮胎有效接触界面的开口空隙率与路面噪声相关性更高,路面噪声随着轮胎接触界面的开口空隙率的增加而降低。建议混合料设计时适当增加 4.75 mm 以上的粗集料比例(4.75 mm 筛孔通过率推荐为 30% ~33%),有助于提高沥青路面开口构造比例及其长期稳定性。建立轮碾作用下的路表开口空隙率与噪声 A 计权声压级的相关性模型,其相关性显著性水平达到 0.001,进一步验证开口空隙率指标的合理性。研究可为低噪声沥青混合料级配设计与降噪效果评价提供参考依据。

关键词　沥青路面　　噪声　　轮胎接触构造　　开口空隙率　　空气泵吸作用

中图法分类号　U416.2;　　**文献标志码**　A

随着汽车工业与道路建设的迅猛发展,交通噪声已经成为干扰人们生产和生活的一个主要问题。交通噪声主要来源于车辆系统的振动噪声、动力系统噪声,及轮胎与路面耦合作用噪声[1]。近年来汽车工业的进步,使得车身结构振动和动力系统噪声已经得到有效的控制;而轮胎与路面耦合作用产生的噪声是交通噪声的主要来源。改善交通噪声主要有两个途径:汽车轮胎设计与路面结构优化。从汽车轮胎的角度出发,主要针对胎面花纹设计参数对噪声的影响、轮胎结构的发声机理以及仿真模型等方面开展研究工作[1,2]。但仅依赖于轮胎改良设计的被动降噪,降噪幅度有限,且代价较高。国内外研究进展发现轮胎噪声主要分为轮胎振动噪声和泵吸噪声,轮胎与路面间的泵吸作用是轮胎噪声产生的主要原因,而道路的表面纹理特征是影响轮胎噪声的主要因素[3—5]。为此,Hamet 等通过数值模型评估了路面构造轮廓对道路噪声组成的影响[6]。Ling 和 Hanson 研究了不同路面纹理对噪声的影响,发现粗糙的集料构造和较大的空隙率能够有效降低路面噪声,而减小集料公称粒径亦可以降低振动噪声[7,8]。

国内外的研究大多集中于轮胎角度考虑的降噪机理、降噪措施及轮胎发声模拟仿真研究[9],但所使用的有限元理论、边界元理论,均将路面简化为平整道面。而从路面角度进行的主动降噪研究,仍停留于通过改善沥青路面构造深度和混合料材料特性来降低行车噪声。单一的轮胎或者路面结构特征难以精确评价与预测噪声特性,胎/路噪声归根到底由轮胎与路面接触界面特性决定。因此,胎/路接触界面的特性研究是关键。本文拟采用一种高精度的压力薄膜系统测量轮胎与实际路面的接触印痕,基于轮胎有效接触界面的构造分布特性进行胎/路噪声水平的影响研究;并进一步探索不同沥青混合料级配的降噪效果及衰减规律,以期指导降噪沥青混合料设计。

1　轮胎噪声产生机理

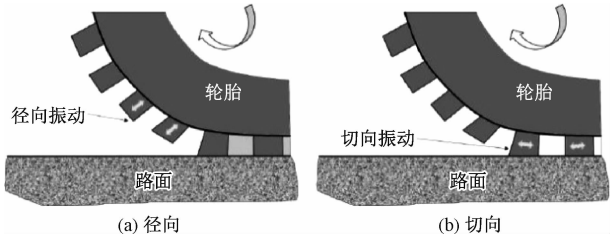
轮胎/路面噪声主要分为轮胎振动噪声和空气动力噪声。振动噪声主要为胎面花纹块对路面的撞击、路面不平整引起的振动、轮胎与路面的摩擦等。轮胎胎面从接触路面到离开的过程中,胎面花纹块对路面的撞击及胎体产生的变形,均会导致轮胎出现振动,并沿着轮胎径向传播,引起整个轮胎胎面及

2018 年 8 月 3 日收到　　广东省科技厅科技计划(2014B010105005)和国家自然科学基金(51378223)资助

第一作者简介:黄志勇(1988—),男,汉族,广东梅州人,硕士,工程师。E-mail:46544269@qq.com。

*通信作者简介:陈　搏(1991—),男,汉族,广东徐闻人,博士。E-mail:857615741@qq.com。

侧壁的振动,示意如图 1 所示。其强弱主要取决于轮胎的橡胶材料、胎面花纹设计和路面平整特性。振动噪声是胎/路高频部分噪声的来源之一,噪声频率大于 2 kHz。

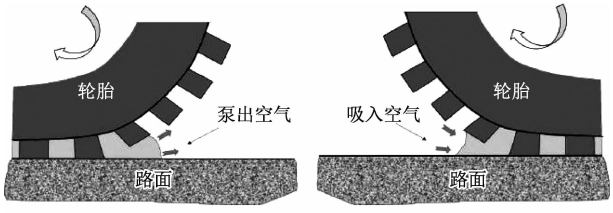


(a) 径向 (b) 切向

图 1 轮胎振动噪声

Fig. 1 Tire vibration and noise

空气动力噪声包括空气泵吸作用、空气湍流效应、声管共振效应及赫姆霍茨共振效应等,其中空气泵吸噪声对空气动力噪声贡献度最大[4,5]。当轮胎在路面上滚动时,接触部位胎面发生变形,胎面花纹块与路面间会形成许多小空腔。轮胎前进过程中与路面紧密接触,小空腔内空气被挤压,部分空气排出形成局部不稳定气流,残留部分在空腔内形成较大压强的气团;当轮胎离开路面,压缩的小空腔容积突然增大,形成局部真空度,空气被急剧吸入,这种现象即空气泵吸作用,如图 2 所示。空气泵吸噪声频率在 1 kHz 左右的中频段,是高速行车噪声的主要来源。



(a) 泵出 (b) 吸入

图 2 空气泵吸作用

Fig. 2 Air pumping effect

2 轮胎接触构造测试方法

FUJI 在彩色胶片方面具有先进的技术,其生产的 Prescale 胶片可以精确地测量接触面积和压力分布。根据微胶囊缓释控制技术(PSC),Prescale 胶片发色剂层中不同的微胶囊对应不同压力水平,不同微胶囊在相应的压力水平下释放不同显色剂进行化学反应,从而表现出不同浓度的红色。其工作原理如图 3 所示,具体操作流程见课题组前期成果[10]。压力胶片薄膜厚度为 90 μm,单点检测精度达 0.016 mm^2,系统误差为 ±3% 以内,检测面积达 300 mm × 260 mm 以上,可以有效测量轮胎与路面构造的真实接触状态。

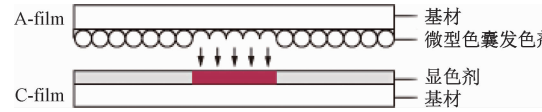


图 3 压力胶片工作原理

Fig. 3 Working principle of pressure film

3 路面噪声评价指标

声音大小可以用声压的幅度、频率和相位来表征,是空间和时间的函数,为了更加精确描述,通常使用声压级来表达声学量值,数学表达式为

$$\overline{L_p} = 10\lg\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{0.1(L_{pi}-K_{1i})}\right] - K_2 - K_3 \tag{1}$$

式(1)中:$\overline{L_p}$ 为测试对象的声压级,dB(A);N 为单位时间内的测点数量;L_{pi} 为第 i 点测的声压级,dB(A);K_{1i} 为第 i 点的背景噪声修正值;K_2 为使用环境修正值;K_3 为温度和气压修正值。

人耳对于不同频率的噪声敏感程度不相同,为了使路面噪声的客观量度和人的听觉一致,需要对路面噪声进行一定频率计权网络修正。其中 A 计权声级频率响应最接近于人耳的听感特性,测量方法简单合理,已成为噪声测量采用最广泛的评价参量。根据国际标准 IEC 61672A 规定,A 计权网络曲线函数为

$$A(f) = 20\lg\frac{f_4^2 f^4}{(f^2+f_1^2)(f^2+f_2^2)^{\frac{1}{2}}(f^2+f_3^2)^{\frac{1}{2}}(f^2+f_4^2)} - A_{1\,000} \tag{2}$$

式(2)中:$A_{1\,000}$ 为 1 kHz 时的声压级;f 表示计算频率;f_1 = 20.6 Hz、f_2 = 107.7 Hz、f_3 = 737.9 Hz、f_4 = 12 194 Hz。

4 试验设计

4.1 混合料设计

基于广东省最常用的改进型骨架密实型 GAC-16 沥青混合料,根据磨耗层粗细集料关键筛孔 4.75 mm的比例控制[11],设计了四种混合料级配(以 4.75 mm 控制筛孔的中值 35% 为分界线,分别设计 26% ~35% 、35% ~44% 范围各两种级配),形成不同的道路表面构造和内部骨架结构。混合料采用 SBS 改性沥青(PG76-22);粗集料采用广东河源芙蓉石场辉绿岩碎石,细集料采用 0 ~3 mm 石灰岩机制砂。原材料各项指标均满足施工规范对高等级路面的设计标准。经马歇尔试验验证,混合料级配组成与最佳油石比见表 1。

4.2 试验过程

(1)分别成型四个级配的沥青混合料弧形车辙

表 1　级配组成

Table 1　Gradation of asphalt mixtures

级配类型	筛孔的百分通过率/%											最佳油石比/%
	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
级配 1	100	97.4	84.7	57.3	30.8	22.4	18.2	14.1	11.2	7.8	5.4	4.7
级配 2	100	97.4	84.7	57.3	33.1	23.7	18.2	14.1	11.2	7.8	5.4	4.7
级配 3	100	98.7	81.6	59.8	35.3	25.5	19.3	14.1	9.2	7.4	5.8	4.8
级配 4	100	98.7	81.6	59.8	38.7	27.9	19.3	14.1	9.2	7.4	5.8	4.8

板试件,每组 8 块试件,共 32 块。测定各试件的初始构造深度后安装试件,如图 4(a)所示。

(2)根据前期试验测试[10],选择普通小汽车轮胎进行加载,如图 4(b)所示。轮胎单轮荷载为7.5 kN,胎压为 350 kPa,选用 LLLW 型号(量程为 0.2 ~ 0.6 MPa)压力胶片获取轮胎与路面的接触印痕。

(3)采用主驱动式路面功能加速加载试验系统[12],选择 1 000 ms/rad 的标准运行速度模拟轮胎与路面接触耦合作用。在距轮胎与试件表面接触点附近设置传声器,如图 4(c)所示。使用 AWA6228 型多功能声级计可测得实时声压级的大小,进而对噪声信号进行频谱分析。



(a) 试件安装



(b) 胶片试验



(c) 噪声测试

图 4　试验流程

Fig. 4　The test flowsheet

5　试验结果分析

5.1　初始状态的噪声分析

从轮胎工业角度看,为了提高车辆摩擦制动力,常用的轮胎基本都携带胎面花纹块设计。轮胎花纹加上沥青路面的凹凸不平度,所引起的车辆振动与空气动力噪声不容忽视。为了减少振动噪声的影响,试件成型过程使用直尺法严格控制表面平整度。分别测试密实型混合料不同级配的试件空隙率、路表构造深度和 A 计权声压级,试验结果见表 2。

由表 2 可知,不同混合料试件的内部空隙率在 3% ~5% 范围,满足密实型混合料级配要求。随着混合料级配粗集料比例的增加(以 4.75 mm 为关键筛孔),试件的构造深度增大,其中级配一的 4.75 mm以上粗集料比例最大,构造深度达到 1.21 mm,而级配四的粗集料比例最小,填料较大,故成型试件的构造深度最小。不同混合料类型所对应的 A 计权声压级显示:级配一降噪效果最优,级配二

表 2　不同路面测试结果

Table 2　The test results of different pavement

项目	背景噪音	级配一	级配二	级配三	级配四
空隙率/%	–	4.2	4.3	4.2	3.9
构造深度 T_D/mm	–	1.21	1.11	1.12	1.07
声压级 L_p/dB(A)	38.1	49.2	51.8	53.1	56.6
空隙率与噪声的关系			$y=-14.056x+111.01$, $R^2=0.6255$		
构造深度与噪声的关系			$y=-47.757x+106.52$, $R^2=0.8404$		

降噪性能次之,级配四噪声最大。不同路面降噪效果的差异与空隙率、构造深度等具有一定相关性(表2)。而对于人体感官,不同噪声组成成分的影响更大,需要对不同噪声进行频谱分析,如图5所示。

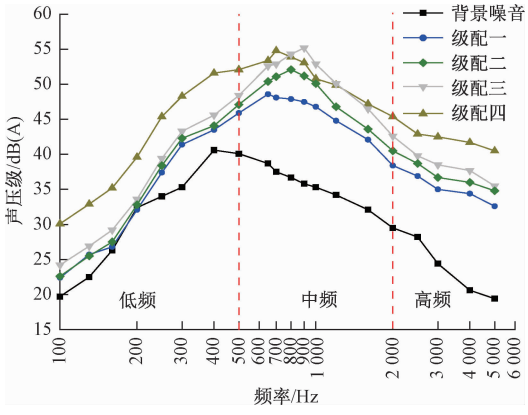


图5 不同路面的噪声频谱图

Fig. 5 Noise spectrum of different types of pavement

四种路面噪声频谱均为宽广连续谱,频谱峰值依次向中高频移动。噪声频率主要分为低频(20 ~ 500 Hz)、中频(500 ~ 2 kHz)、高频(2 ~ 16 kHz)。人耳可识别的声音频率范围主要为20 ~ 20 kHz,尤其对500 ~ 6 000 Hz频段声音敏感。对比频谱曲线发现,中频段的路面噪声差异性显著,级配三和级配四试件表面噪声峰值明显,噪声最大值出现在600 ~ 1 000 Hz;相较之下,级配一峰值不明显,噪声最大值在600 ~ 800 Hz;而空转下的背景噪声峰值在300 ~ 500 Hz的低频段。结合胎/路噪声机理,级配二、级配三与级配四的路面噪声峰值往1 000 Hz处移动,说明空气泵吸噪声的影响显著。

5.2 胎/路接触界面开口空隙率评价指标

采用压力胶片测量较具代表性的小汽车砌块花纹轮胎与不同沥青混合料表面构造的接触状态,如图6所示。空气泵吸作用产生的噪声与胎/路接触界面的空气体积流密切相关,单位时间内空气体积流流量越大,则产生的空气泵吸噪声也越大[7]。而不同的路面构造间空隙产生的空气体积流均有差别。轮胎与路面接触界面的空气体积流主要与接触界面的构造间隙有关,构造开口空隙越少,闭口空隙越多,则轮胎与路面间会形成很多小空腔,加剧空气泵吸作用。因此,定义开口空隙率指标评价胎/路接触界面的空腔密集程度(图7),数学表达式如下:

$$K_L = \frac{A_L}{A_0 - A_E} \times 100\% = \frac{A_0 - A_E - A_B}{A_0 - A_E} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中:K_L 为开口空隙率,%;A_L 为胎/路接触界面的开口空隙面积,mm^2;A_B 为 A_L 为胎/路接触界面的闭口空隙面积,mm^2;A_0 为轮胎接地印痕的轮廓面积,mm^2;A_E 为轮胎与路面的有效接触面积,mm^2。

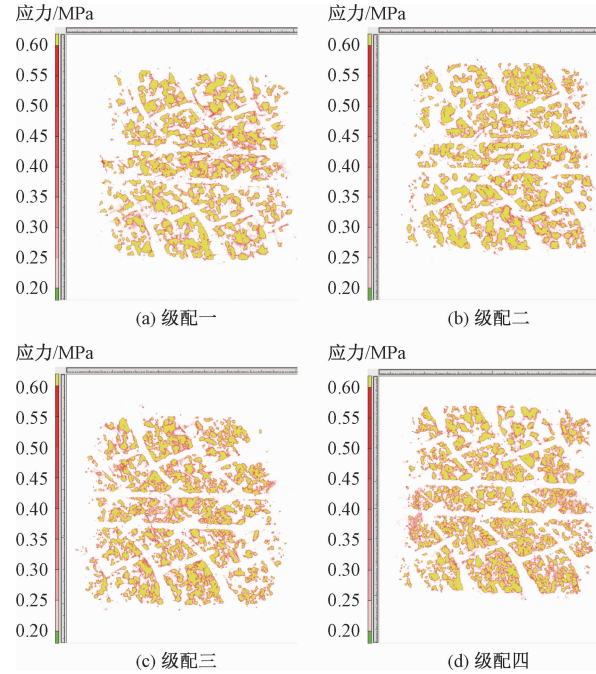


图6 轮胎与不同试件的接触印痕

Fig. 6 Contact pattern between tire and different pavement

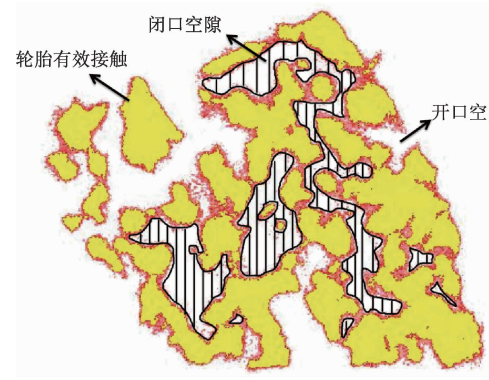


图7 轮胎接触构造示意图

Fig. 7 Schematic diagram of tire contact texture

当轮胎与路面接触界面的开口空隙越多,则轮胎滚动过程中形成封闭空腔的概率越小,轮印区域的空气能够顺畅流动,则可以有效降低空气泵吸效应,从而减小空气动力噪声。

通过FPD—8010E专用软件分别计算不同混合料试件的轮胎接触面积和接触界面构造空隙分布面积,统计结果如表3所示。粗集料比例较多的级配一试件与轮胎接触界面的开口空隙率最大,达到71.48%,说明接触界面的大部分空隙为开口连通间隙,该部分空隙形成可供空气自由流动的通道。粗集料比例最少的级配一混合料表面开口空隙率最低,为45%左右,说明轮胎接触界面有一半以上的空隙为闭口空隙,所形成的小空腔会产生较大的空气动力噪声。

表 3　初始状态的胎/路接触界面统计结果

Table 3　Statistical results of initial tire/road contact interface

路面类型	印痕轮廓面积/mm²	有效接触面积/mm²	空隙总面积/mm²	闭口空隙/mm²	开口空隙率/%
级配一	25 589	12 442	13 147	3 750	71.48
级配二	25 387	12 268	13119	4 337	66.94
级配三	26 109	12 480	13 629	5 810	57.37
级配四	26 409	13 704	12 705	6 983	45.04

5.3　轮载作用下的路面噪声衰减分析

为了研究工程现场的路面随着运营时间的长期噪声特性,使用主驱动轮式加速加载试验系统对不同路面的施加不同的轮碾作用,模拟长期交通荷载的影响,如图 8 所示。随着轮载作用次数的增加,路面噪声均呈现持续递增趋势。不同路面的噪声有所区别,其中级配一噪声最小,而在衰减末期跟级配二接近;级配四无论初始状态还是使用过程,其表面噪声水平均比其他级配的混合料高。不同轮载作用次数下的胎/路接触界面的开口空隙率变化规律如图 9所示,随着轮载作用的增加,路面开口空隙率呈现下降趋势,该规律与路面噪声衰变规律一致。结合近年来广东省高速公路沥青路面建设的工程经验,使用聚合物 SBS(I-D 类)改性沥青胶结料的路面施工过程中,4.75 mm 关键筛孔通过率在 30% 以下时,难以保证混合料的施工均匀性和密水性能。兼顾上面层的抗滑性能和降噪性能考虑,建议 4.75 mm关键筛孔通过率控制在 30% ~33% 范围。

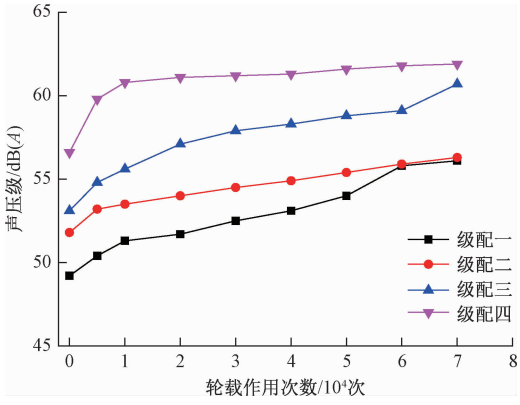


图 8　不同路面的噪声衰变特性

Fig. 8　Noise decay characteristics of different pavements

5.4　相关性验证

建立开口空隙率与噪声 A 计权声压级的相关关系,如图 10 所示。开口空隙率与声压级的相关系数为 0.894 8,大于显著性水平为 0.001 的 r 检验临界值 0.652 4。相比混合料构造深度和内部空隙率指标,胎/路接触界面的开口空隙率与噪声声压级相关性更好,说明轮胎与路面的接触界面开口空隙率

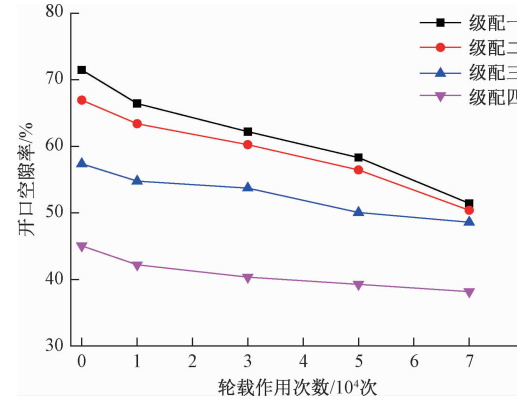


图 9　开口空隙率衰减规律

Fig. 9　The attenuation law of the open void ratio

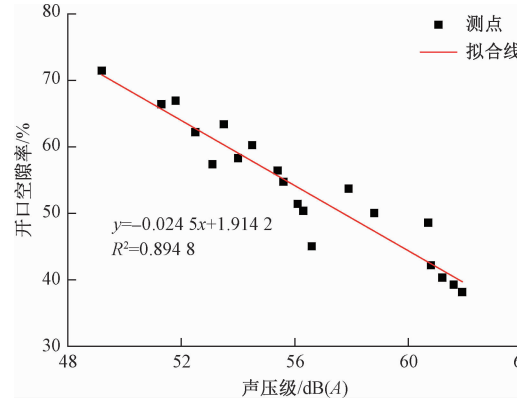


图 10　开口空隙率与声压级的相关关系

Fig. 10　The correlation between the open void ratio and the sound pressure level

与轮胎噪声具有良好的线性相关关系。随着开口空隙率的增加,可以有效减少轮胎与路面间的封闭小空腔,减缓“空气泵吸作用”,从而降低胎/路间的空气动力噪声。结合混合料级配设计和胎/路接触界面的开口空隙分布规律分析,适当增加 4.75 mm 以上粗集料比例,有助于提高沥青混合料的表面构造及其嵌挤稳定性,从而在轮载作用下能够保持较好的路表开口空隙率,有效降低行车噪声对环境的污染。

6　结论

(1)轮胎与路面的耦合作用是影响路面噪声的最直接因素,基于高精度压力胶片技术开展轮胎与粗糙路面的接触特性分析,提出开口空隙率指标描述轮胎接触界面的空腔密集程度,可以间接评价密实型沥青路面的空气泵吸作用。

(2)相比沥青混合料内部空隙率和路表构造深度,轮胎有效接触界面的开口空隙率与路面噪声相关性更高;随着胎/路接触界面开口空隙率的增加,胎/路间的噪声减小。

(3)通过不同级配沥青混合料路面的轮载碾压试验,随着车轮作用次数的增加,路面构造逐渐被碾压密实,开口空隙率下降,对应的路面噪声增大;混合料设计时适当增加 4.75 mm 以上的粗集料比例(建议通过率为 30% ~33% 区间),有助于提高沥青混合料的表面开口构造比例及其长期稳定性。

(4)建立衰减过程的路面开口空隙率与噪声 *A* 计权声压级的相关性模型,在 0.001 的显著性水平下,开口空隙率与路面噪声呈现出良好的线性相关,进一步验证胎/路有效接触界面开口空隙率指标的合理性。

参 考 文 献

1 Ouis D. Annoyance from road traffic noise: A review. Journal of Environmental Psychology, 2001;21(1):101—120

2 王方甫. 轮胎花纹噪声的控制与优化. 郑州:郑州大学,2016
Wang Fangfu. The control and optimization of tire tread pattern noise. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016

3 Mak K L, Hung W T, Lee S H. Exploring the impacts of road surface texture on tyre/road noise—A case study in Hongkong. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2012;17(2):104—107

4 王鹏斌. 道路/轮胎泵气噪声的流固耦合分析. 湘潭:湘潭大学,2016
Wang Pengbin. Fluid-solid coupling analysis of tire/pavement air pumping noise. Xiangtan: Xiangtan University, 2016

5 初建鹏. 密实型沥青路面轮胎/路面噪声影响因素研究及声品质评价. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016
Chu Jianpeng. Investigation on effect factors of tire/road noise and evaluation of sound quality for compact asphalt pavement. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016

6 Hamet J F. Tire/road noise: Time domain Green's function for the orthotropic plate model. Acta Acustica United with Acustica, 2001;87(4):470—474

7 Cong L, Swiertz D, Bahia H. Mix design factors to reduce noise in hot-mix asphalt. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2013; 2372(1):17—24

8 Hanson D I. Noise characteristics of hot mix asphalt and Portland cement concrete pavements in United States. Journal of the Acoustical Society of America, 2005; 118: 1915—1916

9 周海超. 花纹结构对轮胎花纹沟噪声和滑水性能影响规律及协同提升方法研究. 镇江: 江苏大学, 2013
Zhou Haichao. Investigate into influence of tire tread pattern on noise and hydroplaning and synchronously improving methods. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013

10 李伟雄, 张肖宁, 陈 搏,等. 基于接触应力集中的沥青路面抗滑性能评价. 科学技术与工程, 2018;18(16): 107—113
Li Weixiong, Zhang Xiaoning, Chen Bo, *et al.* Evaluation on asphalt pavement skid resistance based on contact stress concentration. Science Technology and Engineering, 2018; 18(16): 107—113

11 石立万. 基于细观力学性能的功能型沥青混合料研究. 广州: 华南理工大学, 2014
Shi Liwan. Research on functional asphalt mixture based on mesomechanical performance. Guangzhou: South China University of Technology, 2014

12 蔡 旭, 王端宜. 轮胎/路面噪音室内测量系统研究. 土木建筑与环境工程, 2011;(增刊1): 161—165
Cai Xu, Wang Duanyi. Indoor evaluation system for tire/ pavement noise characteristic. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011;33(S1):161—165

Impact of Tire Contact Texture on Noise Reduction Characteristics of Asphalt Pavement

HUANG Zhi-yong[1], ZHANG Xiao-ning[1,2], CHEN Bo[1,2*], YU Jiang-miao[1,2], CHEN Fu-da[2]

(Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou[1], Guangzhou 510641, China;
School of Civil and Transportation, South China University of Technology[2], Guangzhou 510640, China)

[**Abstract**] Based on the noise generation mechanism of tires and pavement, a device called "Driving Wheel Pavement Analyzer" was used to study the noise characteristics of asphalt pavement with different graduation. An index for evaluating pavement noise reduction effect was proposed based on the tire/road contact characteristics. The results showed that: the open void ratio of the tire/road contact interface can effectively evaluate the level of air pumping effect. Compared with the asphalt mixture void ratio and mean texture depth, the open void ratio of tire-pavement effective contact interface is more closely related to the road noise. The road noise decreased as the open void ratio of the tire contact interface increases. It is recommended to increase the proportion of coarse aggregate (>4.75 mm) during the mixture designing (recommend 4.75 mm mesh pass rate is 30% ~33%), which will help to improve the proportion of the open void ratio of the asphalt pavement texture and its long-term stability. The correlation model between the open void ratio of the pavement and the *A*-weighted sound level is established, and the high correlation significance level reaches 0.001, which further verifies the rationality of the open void ratio index. This study will provide reference for the gradation design and noise reduction evaluation of low noise asphalt mixture.

[**Key words**] asphalt pavement noise tire contact texture the open void ratio air pumping effect