

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2023.1113002

文章编号: 1672-9331(2024)03-0061-18

引用格式: 韩大勇, 王亮, 郭朋召, 等. 密级配橡胶沥青路面降噪技术原理与研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 61-78, 106.

Citation: HAN Dayong, WANG Liang, GUO Pengzhao, et al. Review of principles and research on noise reduction technology for dense-graded rubber asphalt pavements[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(3): 61-78, 106.

密级配橡胶沥青路面降噪技术原理与研究综述

韩大勇¹, 王亮¹, 郭朋召², 鲁巍巍², 杨兴旺³

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 海淀区 100089; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 河南金欧特实业集团股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 密级配橡胶沥青路面是低噪声路面发展的新形式。为了推动低噪声路面的发展, 阐述了轮胎/路面噪声的产生、增强机理及密级配橡胶沥青路面的降噪机理和降噪效果。首先介绍大孔隙和密级配两种类型降噪沥青路面及其降噪机理, 然后对轮胎/路面噪声的产生和增强机制进行论述, 接着针对密级配降噪沥青路面降噪模式、胎路噪声的影响因素及检测方法进行重点评述, 最后对密级配低噪声沥青路面的发展及优化方向进行展望。大多数低噪声沥青路面都偏向于开级配大孔隙类型, 对密级配沥青路面的降噪机理及实现路径研究较少。开级配大孔隙沥青路面在孔隙堵塞时, 其降噪效果急剧下降, 并且堵塞的孔隙难以恢复, 这制约了其广泛使用。而密级配橡胶沥青路面通常依靠自身丰富的表面纹理及橡胶颗粒的弹性实现吸声阻尼降噪, 故不存在上述不足。密级配橡胶沥青路面虽在降噪效果方面不如开级配大孔隙路面, 但因其优异的路用性能和持久稳定的降噪效果, 已成为低噪声路面在实际工程应用中的重要选择。为了更好地应用密级配橡胶降噪沥青路面, 未来应重点研究影响其降噪效果的诸多重要因素, 如橡胶颗粒的掺入方式、粒径和掺量等。

关键词: 道路工程; 降噪路面; 沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA); 密级配橡胶沥青路面; 降噪机理; 噪声检测

中图分类号: U416

文献标志码: A

Review of principles and research on noise reduction technology for dense-graded rubber asphalt pavements

HAN Dayong¹, WANG Liang¹, GUO Pengzhao², LU Weiwei², YANG Xingwang³

(1. Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

3. Henan Jinoute Industrial Group Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Dense-graded rubber asphalt pavements are the new forms developed from low-noise pavements. In order to promote the development of low-noise pavements, the generation and the enhancement mechanisms of tyre/pavement noise were described, as well as the noise reduction mechanism and the effect of dense-graded rubber asphalt pavements. Firstly, two types of noise reduction asphalt pavements with large porosity and dense gradation and their noise reduction mechanisms were introduced. The generation and the enhancement mechanisms of tyre/pavement

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2023-12-14; 接受日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078063); 中电建路桥集团有限公司科技项目(LQKY2022-02)

通信作者: 鲁巍巍(1982—) (ORCID: 0009-0005-7003-1990), 男, 正高级工程师, 主要从事耐久性路面结构与材料、废旧路面材料再生利用、路面养护材料与技术。E-mail: lww_cs@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

noise were discussed. Secondly, the noise reduction mode, influencing factors of tyre/pavement noise, and detection methods of dense-graded asphalt pavements were emphatically reviewed. Finally, the development and the optimization directions of dense-graded low-noise asphalt pavements were prospected. Most of the low-noise asphalt pavements are open-graded ones with large porosity, while there are less researches on noise reduction mechanism and the realization path of dense-graded asphalt pavements. When the pores are blocked, the noise reduction effect decreases sharply and the blocked pores are difficult to recover, which restrict the wide application of open-graded asphalt pavements with large porosity. In contrast, the dense-graded rubber asphalt pavements usually rely on their own rich surface textures and the elasticity of rubber particles, so as to achieve sound absorption damping and noise reduction, avoiding the above shortcomings. Although the noise reduction effect of dense-graded rubber asphalt pavements is not as good as that of open-graded pavements with large porosity, dense-graded rubber asphalt pavements have excellent road performances and long-lasting noise reduction effects, thus becoming an important choice for low-noise pavements in practical engineering applications. In order to better use dense-graded rubber asphalt pavements with noise reduction effects, future researches should focus on various important factors affecting the noise reduction factors of the pavements, such as the incorporation of rubber particles, particle size, content and so on.

Key words: road engineering; noise reduction pavement; stone mastic asphalt (SMA); dense-graded rubber asphalt pavement; noise reduction mechanism; noise detection

Foundation items: Project (52078063) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (LQKY2022-02) supported by Science and Technology Foundation of Power China Road Bridge Group Co., Ltd.

Corresponding author: LU Weiwei (1982—) (ORCID:0009-0005-7003-1990), male, professor of engineering, research interests: durable pavement structure and materials, recycling of waste pavement materials, pavement maintenance materials and technology. E-mail: lww_cs@csust.edu.cn

0 引言

近年来,随着人均交通工具持有量的增加和城市道路系统的现代化发展,人们对交通基础设施的要求不断提高。目前,道路沿线的交通噪声成为主要的城市噪声,且污染程度不断加剧,已成为严重危害社会环境的因素之一^[1]。国家统计局公布的《中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报》数据表明:在320个城市中,全年昼间声环境质量好的城市只占5.0%,较好的占66.3%,一般及以下的占28.7%。在这些主要由交通噪声污染导致昼间声环境较差的城市中,交通噪声严重影响居民的生活质量。有研究表明^[2-3]长期高分贝的噪声环境严重影响人的生理及心理健康。

国外研究和应用低噪声路面比较早,主要研

究轮胎/路面噪声的形成机理,并指出噪声主要由三部分组成:轮胎/路面的碰撞与冲击声、轮胎/路面的摩擦声和空气动力性噪声^[4-6]。首先,当小汽车、卡车行驶速度分别超过30~45 km/h、45~50 km/h时,轮胎与路面接触产生的噪声是道路噪声重要的组成部分^[7];其次,铺筑不同类型的低噪声试验路,并分析其在长期服役条件下的降噪性能^[4];最后,采取不同的改善措施,分别从声音的源头与路面入手以达到降低噪声和减少道路噪声对沿线居民的危害。

降低道路噪声的措施主要有噪声隔离与噪声吸收。噪声隔离通过吸收或者多次折射声音以降低噪声的强度^[8-9],主要包括增设隔音墙、绿化带与障碍物等方法。而噪声吸收主要通过优化路面结构、改善路面材料和增加路面表面纹理等方法实现^[10]。鉴于噪声隔离只能从传播路径降低噪声,因此有学者从噪声吸收并降低道路噪声的角度提

出“低噪声路面”的概念。近年来,铺设低噪声路面是一种从源头降低交通噪声、改善道路沿线环境的有效措施,是国内外路面技术发展的一个方向,也是一种具有技术、经济综合优势的降噪措施。

为降低道路交通噪声,不同类型的低噪声路面已被研究开发,如多孔开级配沥青路面、密级配沥青路面和具有纹理优化的超薄磨耗层^[11]等。目前,国内外研究并投入使用的低噪声路面主要分为两大类:多孔开级配沥青路面、密级配橡胶沥青路面。其中,多孔开级配沥青路面按照路面材料的组成主要分为多孔沥青路面、多孔橡胶沥青路面;密级配橡胶沥青路面按级配类型主要分为连续密级配、间断密级配沥青路面。

多孔橡胶沥青路面是在多孔沥青混合料中掺加橡胶颗粒,使路面在具有较大的空隙率的同时也具有较好的弹性及阻尼性能,其降噪性能优于多孔沥青路面的。然而,随路面使用年限的增加,多孔橡胶沥青路面易出现孔隙堵塞等问题,并在运行不到一年后其耐久性能与降噪性能急剧下降^[12]。

骨架密实型结构的密级配橡胶沥青路面既有一定数量的粗集料构成骨架,又有富余的空隙供细集料及弹性橡胶颗粒填充。沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt, SMA)沥青路面属于典型的间断密级配类型,通过在SMA混合料中掺加废胎橡胶颗粒,不仅增强了路面的耐久性,降低了孔隙堵塞的风险,还能够提高路面的减振降噪能力,以及减缓由于焚烧或者填埋废轮胎带来的环境压力^[13]。

本文主要对目前已有低噪声路面形式及降噪效果进行回顾和介绍,分析轮胎/路面噪声的产生、增强及降噪机理,并从弹性及孔隙降噪的角度讨论、展望了密级配橡胶沥青混合料的发展前景。

1 路面噪声的组成

交通噪声的形成因素非常复杂。道路交通噪声主要由车辆动力系统、车辆鸣笛和轮胎/路面产生的噪声组成。动力噪声主要指动力系统辐射的噪声,而发动机是主要的噪声源。动力噪声包括发动机振动噪声、燃烧噪声、冷却风扇噪声、排气

噪声及传动机械声等。随着汽车制造工业的蓬勃发展和汽车结构的日益优化,由汽车动力装置及汽车结构本身挤压碰撞产生的噪声不断减小。2022年实施的《中华人民共和国噪声污染防治法》对城市道路交通中汽车鸣笛噪声进行了限制,之后城市道路中汽车鸣笛噪声有逐渐降低的趋势。研究证明,对于小汽车、卡车分别以30~45 km/h、45~50 km/h的速度行驶在城市道路上,此时在轮胎与路面之间产生的噪声是道路噪声中的重要组成部分。目前,轮胎/路面噪声已成为当前道路交通噪声污染的主要来源,特规定采用声压级评价人耳对声音强弱的主观感受,并用数值加分贝(dB)来定量表示声音强弱。

1.1 轮胎/路面噪声产生机理

当车辆的轮胎与路面接触时,噪声来源于轮胎的胎面花纹块与路面之间的复杂相互作用。本节从噪声产生角度出发,对轮胎/路面噪声源的机制进行分析。

1.1.1 花纹块撞击

图1为轮胎橡胶胎面与路面碰撞的示意图。轮胎在路面上滚动时,由于车辆自身重量的影响,轮胎上的花纹块起到类似橡皮锤的作用,不断地接触并“敲击”路面上的纹理,从而在轮胎与路面之间产生噪声。因此,可以通过增加轮胎与路面之间的阻尼作用来降低这种噪声^[14]。

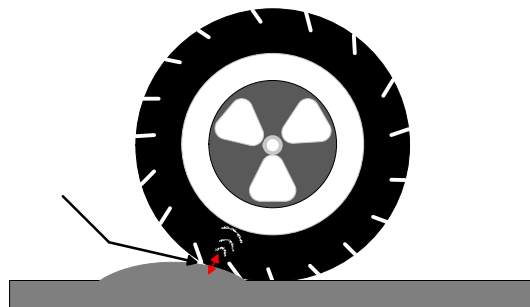


图1 轮胎橡胶胎面与路面碰撞^[14]

Fig. 1 Rubber tread of tyre colliding with pavement^[14]

这类噪声主要受轮胎胎面花纹和路面平整度的影响,其频率一般在1 000 Hz以下。优化路面的平整度可以有效控制这类噪声。DEL等^[15]认为轮胎/路面之间由轮胎振动引起的噪声为结构噪声,由轮胎与路面之间的空气压缩和膨胀引起的噪声为空气传播噪声,此外还认为轮胎腔内的声压场还受轮胎环面共振的影响。谭伟等^[16]认为这

种噪声的产生涉及两个过程:其一是因轮胎/路面接触区前、后端胎面元素垂直分速度的突然减小和增大而引起的加速度噪声;其二是撞击引起的胎体振动噪声。

1.1.2 泵气噪声

当轮胎接触地面时,车辆速度的变化与重力导致轮胎的胎面沟槽被压缩而变形,致使轮胎花纹空腔中的气体被迅速压缩和挤压,从而形成局部不稳定的空气体积流,如图2所示。

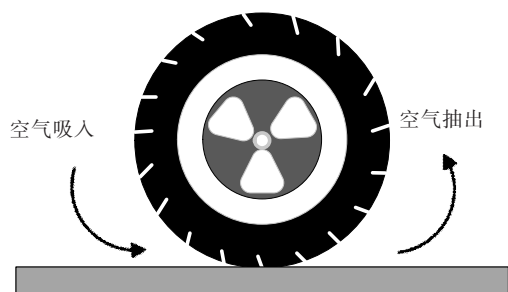


图2 轮胎与路面泵吸发生示意图

Fig. 2 Generation of tyre and pavement pumping

胎面花纹块在离开接触面时瞬间弹性恢复,使得花纹空腔体积瞬间增大而形成负压,周围的空气被迅速吸入空腔。这种在轮胎和路面孔隙之间往返的空气体积流运动形成单极子噪声源,而胎面表面与路面之间形成的几何形状起到“声喇叭”效应将上述噪声放大^[17]。卢磊^[18]分析不同轮胎胎面花纹对轮胎/路面噪声的影响,证实胎面的凹槽、胎面的花纹块均与气泵效应有密切关系。ONGEL等^[19]认为轮胎/路面的泵气行为是由轮胎花纹空腔中的空气运动产生的,空腔在接触区域产生空气泵送是轮胎/路面噪声形成的一个重要因素。CHHAY等^[20]认为轮胎/路面噪声主要来自车辆轮胎与路面之间的轮胎振动和空气泵送。当轮胎通过路面时,闭孔会形成大的压力团;当轮胎离开孔隙接触面时,周围的空气会被重新吸入胎面与轮胎的花纹空腔与孔隙,从而形成空气泵送现象。

1.1.3 滑黏噪声

在轮胎与路面之间的接触面产生的摩擦力会引起轮胎振动进而产生噪声。当胎面在接触面被压扁时,轮胎与路面接触界面产生摩擦力和切向力。当切向力大于摩擦力时,轮胎将会在路面上出现滑移,这个过程称为“打黏/黏滞”。随着摩擦

力的增加,噪声水平增大,当橡胶轮胎离开接触面时,路面与橡胶之间的黏合断裂,也会产生噪声。路面表面纹理会使摩擦增大,从而增加滑黏/黏滞噪声,如图3所示。

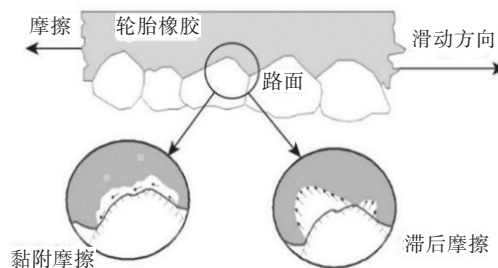


图3 轮胎/路面滑黏效应示意图^[21]

Fig. 3 Slippery sticking effect of tyres/pavements^[21]

1.2 轮胎/路面噪声增强机理

汽车在道路行驶过程中,轮胎/路面之间的接触过程特别复杂,涉及许多物理问题,其中的一些能增强轮胎/路面噪声。

1.2.1 “号筒”效应

轮胎表面与路面接触的几何形状形成天然的“号筒”。在“号筒”附近产生的空气泵吸及气体湍流效应,在轮胎胎面与路面之间经多次反射之后被“号筒”放大。放大后的噪声能量得到强化,并进一步扩散到环境中^[3],如图4所示。KUIJPERS等^[22]指出“号筒”效应在800~2 000 Hz的增强效应最为显著。GRAF等^[23]发现“号筒”效应可放大噪声10~20 dB,其放大程度主要受轮胎的曲率半径、荷载以及轮胎宽度的影响。

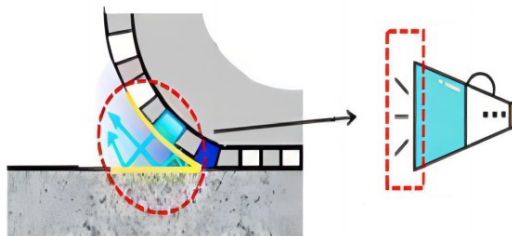


图4 “号筒”效应^[3]

Fig. 4 "Horn" effect^[3]

1.2.2 管柱腔体和亥姆霍兹共振腔效应

汽车轮胎外凸橡胶纹路与路面构成了大量类似于管道几何形状的空腔。当车辆在道路上高速行驶时,带动的气流穿过管道产生声音,而该声音被几何管柱形空间共振放大,形成管柱腔体共振,如图5(a)所示。

当轮胎离开接触区域时,空气在轮胎和路面相交的空腔内像一个弹簧一样做上下往复振动,并在较窄的频率范围内产生亥姆霍兹共振效应,同时这种效应具有很强的频率选择性^[24],如图5(b)所示。一般来说,管柱腔体共振和亥姆霍兹共振的放大效应均比角效应小得多。

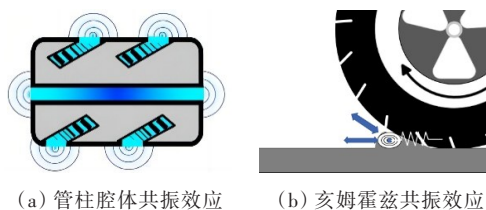


图5 管柱腔体和亥姆霍兹振动^[24]

Fig. 5 String cavity vibration and Helmholtz vibration^[24]

1.2.3 胎体及胎侧振动

在行驶状态下,轮胎胎面橡胶块如“橡皮锤”般不断地敲打路面,胎面整体发生激振效应,带动胎侧花纹块振动。由胎侧产生的振动辐射与“号筒”效应及其他共振效应之间相互影响,对轮胎/路面噪声起到一定的放大作用,如图6所示。

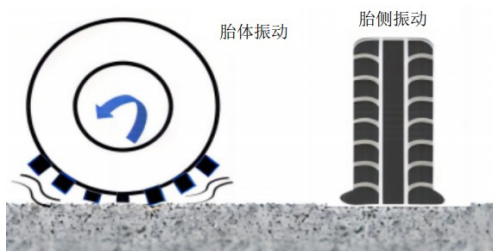


图6 胎体及胎侧振动

Fig. 6 Vibration of tyre around treadband and at sidewall of contact patch

2 降噪沥青路面类型与降噪机理

2.1 多孔开级配沥青路面降噪机理

多孔沥青混凝土(porous asphalt concrete, PAC)或开级配沥青混凝土于20世纪50年代在欧洲开始投入使用,其空隙率一般在15%~20%。该路面主要通过大孔隙吸收轮胎/路面的泵吸噪声。路面内部的孔隙相互连接,并与外部空气相连通,使多孔沥青混凝土的空隙率在吸音特性方面起决定性作用。较大的空隙率对降低轮胎/路面的噪声存在显著作用,且降噪效果良好^[25-26]。汽车在

多孔沥青路面行驶过程中产生的声波传到路面时,一部分通过表面折射回去,另一部分通过路面的内部连通孔隙在路面内部结构传播,空气与孔壁之间的摩擦和黏阻力使部分声能转化为热能。另外,声波在内部孔隙中多次折射后衰减,从而降低了路面噪声^[27]。综上所述,多孔沥青路面通过噪声在孔隙内部能量形式的转化及衰减,降低轮胎/路面产生的泵吸噪声。多孔沥青路面的降噪的相关结论与效果如表1所示。

表1 大空隙沥青路面降噪效果

Table 1 Noise reduction effect of asphalt pavements with large porosity

研究者	路面结构	相关结论	降噪效果
GU等 ^[28]	OGFC	OGFC路面结构可有效降低轮胎/路面噪声	较传统AC、SMA路面的噪声降低3~6 dB(A)
CAI等 ^[29]	OGFC-13	与AC-13、SMA-13的降噪效果相比,OGFC-13的最明显	较AC路面的噪声降低3 dB(A)以上
WANG等 ^[30]	R-OGFC	降噪效果更明显,性能提高,存在一个最优橡胶掺量	较AC路面噪声降低4~9 dB(A)
EJSMONT等 ^[31]	PERS	与DAC-8的吸声效果相比,PERS的最明显	较DAC-8路面噪声降低6~7 dB(A)

注: OGFC为开级配抗滑磨耗层(open-grade friction courses); AC为沥青混凝土(asphalt concrete); R-OGFC为橡胶改性开级配磨耗层(rubberized OGFC); PERS为多孔弹性路面(porous elastic road surface); DAC为密集配沥青混凝土(dense graded asphalt concrete)。

WU等^[32]发现路面松动和孔隙堵塞会降低路面降噪的效果,同时空隙率与表面特性(尤其纹理深度)是影响路面降噪效果的主要因素。与寿命约为18 a的传统密级配路面相比,多孔沥青路面的平均寿命为10~12 a,这是因为大的空隙率使路面的强度与疲劳性能大大削弱,且表面的骨料易剥落损失。当多孔沥青路面的空隙率从25%降到12%时,吸声范围向低频率移动,但混合料中孔隙堵塞会导致吸声系数变小,同时轮胎/路面降噪效果显著降低。

与传统的密级配沥青路面相比,OGFC具有更大的表面积。然而,由于多孔结构容易导致水、氧

气等腐蚀性介质出现在黏结剂的表面、渗透到骨料与黏合剂之间的界面,并破坏两者的黏结性、甚至使骨料脱落。另外,孔隙堵塞会使路面的降噪效果急剧下降,且对堵塞的孔隙进行维修养护特别困难。这些都是制约OGFC路面作为低噪声路面长期使用的关键因素。

2.2 密级配橡胶沥青路面吸声与减振降噪机理

2.2.1 吸声降噪机理

路面材料与结构是影响路面降噪效果的两大因素。

首先,降噪路面的材料应具有良好的吸声系数。吸声系数是衡量材料吸声降噪性能的关键指标^[33]。阻尼是指材料耗散振动能量的能力,可将振动的噪声能量转化为热能或其他形式的耗散能量,因此橡胶沥青路面可以降低汽车在行驶过程中的振动和冲击作用,达到减振降噪的效果。橡胶颗粒具有的高阻尼与高弹性性能使声波在传播过程中引起大分子热运动,从而削减声波在传输过程中的能量^[2]。橡胶沥青路面的吸声降噪机理主要依靠三种途径^[34]。其一,分子弛豫吸收途径是声波在介质中传播时,介质的振动与声波的传播周期不同步,进而导致声能的损耗。其二,热传导吸收途径是由于介质密度不一致,介质之间存在温度梯度,从而使相邻颗粒之间产生热交换,声波逐渐转换成热量。其三,黏滞吸收途径是当声波在介质中传播时,介质中质点的不同运动速度导致相邻质点间发生相互作用并将声能转化为热量,从而达到吸声效果^[31]。通过阻抗管法分析发现,小粒径的橡胶颗粒吸声率更高,这主要是因为小粒径橡胶颗粒产生更好的交联链和更少的弱键,从而使吸声系数更高。

其次,路面的结构特征影响轮胎/路面噪声在其内部的传播途径。结构内部空隙率越大,噪声在内部传播路径越长、折射次数越多,声能耗散越快;反之噪声通过表面折射到外部,辐射到环境中,容易造成声污染。密级配沥青混合料空隙率约为3%~5%,较小的空隙率导致其吸声降噪效果不如大孔隙降噪沥青混合料的。但通过级配设计掺入一定量的橡胶颗粒,既不会对级配产生干涉,又能增加混合料的弹性性能,且能改善路面的降噪功能,如图7所示。

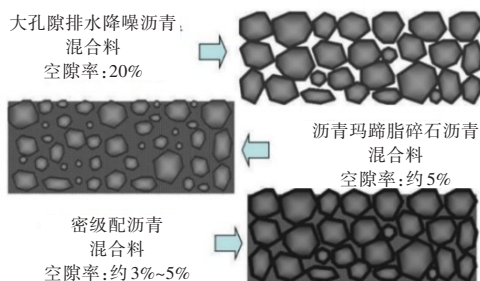
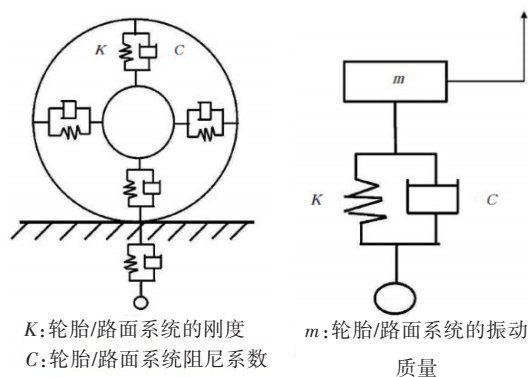


图7 不同路面类型的空隙率^[3]

Fig. 7 Porosity of different types of pavements^[3]

2.2.2 减振降噪机理

汽车在行驶过程中产生的振动是影响轮胎/路面噪声的重要因素之一。根据振动学原理,轮胎和路面本身均具有一定的阻尼性能,其力学模型如图8(a)所示。为便于分析,可将该系统简化为单自由度简化模型,如图8(b)所示。在轮胎/路面系统的阻尼和刚度的共同作用下,在道路上行驶的轮胎将在竖直方向上产生一维阻尼振动。橡胶沥青混合料可视为阻尼结构,其振动阻尼性能可通过测量和计算进行定量分析^[35]。



(a) 轮胎/路面系统振动模型 (b) 轮胎/路面单自由度简化模型

图8 轮胎/路面振动力学模型^[36]

Fig. 8 Tyre/pavement vibration dynamical model^[36]

CHU等^[33]、KEHAGIA等^[12]均以掺入橡胶颗粒的骨架密实型沥青路面与普通AC沥青路面进行对比试验,结果表明掺橡胶颗粒的骨架密实降噪路面的噪声较普通AC沥青路面的降低1~3 dB,且密实型橡胶路面具有更好的高温稳定性和低温抗裂性。通过增加橡胶颗粒的掺量来增加路面的阻尼和减振指数,可以使动态模量减小、相位角增大,进而提高路面的减振和降噪能力。CHANDRAN等^[37]研究不同掺量的废轮胎橡胶颗粒对路面减振降噪的影响,证实适当增大橡胶掺

量可以明显改善路面的减振降噪效果。目前,橡胶沥青路面噪声的测试方法主要有重复加载试验、车辆振动试验、轮胎振动衰减试验等。相关研究表明,与普通沥青路面相比,橡胶沥青路面降噪效果更佳^[12],可降低噪声约1~3 dB。温学钧等^[38]对掺废轮胎橡胶的SMA-13沥青混合料进行疲劳性能、回弹模量和变形性能试验,并提出具有良好路用性能和减噪效果的废轮胎橡胶颗粒掺量。

2.3 密级配降噪路面的降噪模式

2020年,GARDZIEJCZYK等^[39]用不同掺量的橡胶沥青、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene block copolymer, SBS)改性沥青制备SMA。其试验结果表明,橡胶颗粒的掺量与黏合剂的类型对混合料性能有显著影响:添加橡胶颗粒的混合料弹性性能明显提高,具有更优的减振降噪特性。SMA沥青混合料属于骨架密实结构,具有粗骨料多、矿粉多、沥青含量多、细集料少等特点,其空隙率为3%~8%^[40]。密级配路面的空隙率较低,不能通过多孔吸声模式降低路面噪声,只能通过声波漫反射模式、相互干扰模式与黏弹性模式达到降低路面噪声的效果。

2.3.1 声波漫反射模式及相互干扰模式

声波漫反射模式及相互干扰模式主要通过路表面纹理使噪声在传播中形成漫反射,并相互干涉来达到降低噪声的效果,如图9所示。

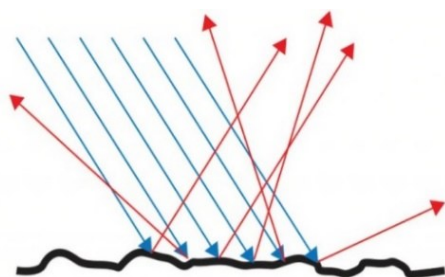


图9 声波的漫反射

Fig. 9 Diffuse reflection of sound waves

轮胎/路面噪声水平大部分取决于路面的表面纹理特性,可将路面的平均剖面深度作为表面纹理整体性质的指标,用于估算轮胎/路面的噪声^[41]。噪声水平根据路面类型的变化差异较大,相关研究表明,宏观纹理增加低频噪声,较高的空隙率能降低高频噪声水平。宏观纹理主要是由细集料与粗骨料的表面粗糙度形成的。表面纹理越

丰富且纹理的连通性越高,越有利于降低泵送效应,从而降低泵气噪声^[42]。

2.3.2 黏弹性模式

黏弹性模式主要利用路面材料的黏弹特性降低路面振动,并将振动噪声能量转化为热量或其他消耗的能量,从而达到降噪的目的。

密级配沥青路面拥有密实的路面结构,相应空隙率较小,须通过添加黏弹性材料来提高路面的降噪能力。选择合适的路面材料对降低道路噪声具有重要作用,若将不同掺量与粒径的废轮胎橡胶颗粒应用到道路工程建设,不但减少对环境的破坏,同时提高路面的路用性能,还能降低轮胎/路面的噪声^[43-44]。因此,将废轮胎橡胶应用到密级配沥青混合料具有广泛的应用前景。早在2006年,伊利诺伊州公路利用磨碎轮胎橡胶改性沥青表面混合料,其试验结果表明,橡胶的添加对SMA的路用性能与降噪特性有改善效果^[45]。当橡胶掺量增加、粒径减小时,沥青混合料的动态模量增大,竖向振动加速度及相位角减小,这表明橡胶的掺入可以降低密级配沥青路面的噪声^[46]。

3 密级配沥青路面噪声的影响因素

车辆在密级配橡胶沥青路面行驶过程中产生的噪声受多方面因素影响。本文仅讨论一些影响较大的因素,如图10所示。

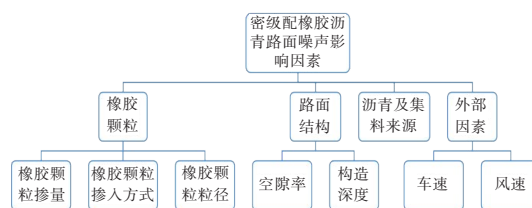


图10 密级配沥青路面噪声的影响因素

Fig. 10 Factors affecting noise of dense-graded asphalt pavements

鉴于多孔沥青路面在长期服役下存在路面耐久性较差、吸声降噪功能丧失较快等缺陷,实际工程中的大多数低噪声路面是对SMA沥青混合料的级配进行优化调整,以橡胶颗粒替代部分集料来制备密级配橡胶沥青混合料,即橡胶颗粒的高阻尼、高弹性特性与路面本身良好的宏观构造可以

达到优异的降噪效果。随着橡胶粒径与掺量的同时增加,橡胶颗粒会对混合料的级配产生干涉,因此为避免产生级配干涉,橡胶的粒径须小于4.75 mm且橡胶掺量小于集料质量的5.0%。此时适当增大橡胶的粒径与掺量可以更好地降低路面噪声。

3.1 沥青路面材料组成对噪声的影响

3.1.1 橡胶掺加方式、掺量与粒径

将废旧轮胎橡胶颗粒应用于降噪路面的工艺可分为干、湿法两类。干法指先将橡胶颗粒与骨料均匀混合,使橡胶颗粒替代部分粒径的骨料,之后添加沥青;湿法是将沥青与橡胶进行充分剪切反应后制成的橡胶改性沥青与矿料混合^[47]。沥青中添加废轮胎橡胶颗粒铺筑的橡胶沥青混合料路面的噪声可降低3 dB^[12]。HAO等^[48]通过湿法添加橡胶颗粒,并进行路用性能与声学性能检测,结果证明添加橡胶颗粒作为沥青的改性剂可以改善路面的路用性能,降低轮胎/路面的噪声水平。KUENNEN^[49]对沥青混合料的不同掺入橡胶方法(干、湿法)进行声学性能评估,结果表明干法掺入橡胶更有利于降低轮胎/路面的噪声水平。朱永^[50]分析了湿法、干法工艺掺加橡胶对沥青混合料的影响,其中湿法工艺主要改善沥青混合料对疲劳裂缝、反射裂缝、车辙等的抵抗能力,但在施工时会导致混合料和易性较差。干法工艺简单,施工方便,添加的橡胶颗粒在拌和过程中未完全反应,橡胶颗粒极大地保留其弹性,沥青混合料的减振降噪效果更明显,但路面后期容易出现破坏,对混合料路用性能改善较小^[51]。VÁZQUEZ等^[52]研究了干法添加橡胶对SMA-8沥青混合料声学的影响,发现不同的表面特性,如平均断面深度(mean profile depth, MPD)、不均匀性(international roughness inde, IRI)、动态刚度等都与轮胎/路面噪声水平有关。上述资料显示,采用干法工艺掺加橡胶的沥青混合料具有更优异的减振降噪性能,具有较大的发展潜力与空间。

橡胶颗粒的掺量与粒径是影响密级配橡胶沥青路面降噪效果的两个显著因素。橡胶颗粒的掺量对SMA沥青路面降噪的影响效果如表2所示。橡胶颗粒是典型的弹性材料,其抗压强度远小于矿料,添加到沥青混合料中起到填充作用,不能充

当骨架材料。因此,橡胶颗粒只能作为细集料填充骨料的空隙,不能影响骨架的形成,橡胶颗粒的最大公称粒径应不大于4.75 mm^[53]。橡胶颗粒掺量的增加对轮胎/路面的噪声水平起到缓和的作用,不仅降低路面的动态模量,而且使路面的弹性增大,从而起到减振降噪的作用。但橡胶颗粒粒径过大会导致铺筑的沥青混合料抗压强度降低,并且橡胶与沥青反应会发生溶胀,使沥青路面产生早期破坏,影响沥青混合料的抗水损害能力。国内外研究表明,橡胶颗粒掺量一般为集料干重的1.0%~3.0%。AMJADIAN等^[54]探究三种不同掺量的橡胶对SMA沥青混合料性能的影响,结果表明增加橡胶的掺量会导致最佳沥青含量、未经冻融试验组试件的劈裂抗拉强度、回弹模量与流动值均增大,而经过冻融试验的沥青混合料试件的劈裂抗拉强度和抗车辙性能下降。添加定量的橡胶可以改善混合料的路用性能,但掺量不能过大,否则会导致沥青混合料的路用性能急速下降,甚至不符合路面应用的要求。徐雪莹等^[55]使用驻波法测量AC沥青路面、不同橡胶粉掺量的骨架密实型低噪声沥青路面的吸声系数,发现橡胶粉掺量为3.0%的骨架密实型路面减振降噪效果最好。

表2 橡胶掺量对SMA沥青路面降噪的影响

Table 2 Effect of rubber content on noise reduction of SMA pavements

研究者	路面结构	橡胶掺量	降噪效果
曹卫东等 ^[53]	SMA-13	集料质量的1.0%~3.0%	较AC路面的噪声降低2~3 dB(A)
SANGIORGI等 ^[56]	SMA-10	集料质量的0.8%、1.2%	较非掺加橡胶的SMA路面的噪声降低1~3 dB(A)
VÁZQUEZ等 ^[52]	SMA-8	混合料总质量的0.5%	较传统AC-16路面的噪声降低约3 dB(A)

曹卫东等^[53]、CHANDRAN等^[37]分别研究了SMA沥青混合料在掺入橡胶颗粒后形成的骨架密实型路面(skeleton dense-graded pavement, SDGP)、AC沥青混合料在橡胶颗粒掺量分别为0.0%、1.0%、2.0%、3.0%时的水稳定性变化情况,结果如图11所示。从图11看出,随着橡胶颗粒掺量的增加,反映混合料的水稳定性的指标—冻溶劈裂强度比逐渐降低。刘曾倩等^[57]对不同橡胶颗粒掺量的SMA,即rubberized SMA(R-SMA)沥青混合料进

行马歇尔性能试验,结果证明随着橡胶颗粒的掺入,混合料的多项性能指标均得到提升,但在掺量达到一个临界值之后,性能开始逐渐下降。造成这种现象的原因是过多的橡胶颗粒发生了溶胀反应,干涉了SMA的骨架密实结构,导致由集料碎石填充的骨架结构被破坏,混合料的颗粒变得松散,强度及稳定性均变差。

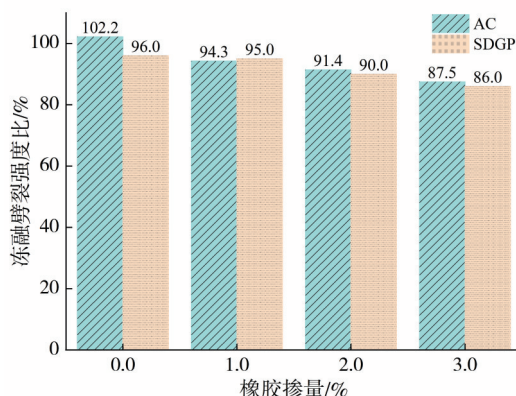


图11 不同橡胶掺量下SDGP、AC型沥青混合料的冻融劈裂强度比

Fig. 11 Freeze-thaw splitting tensile strength ratio of SDGP and AC asphalt mixtures with different rubber contents

3.1.2 沥青混合料的最大公称粒径

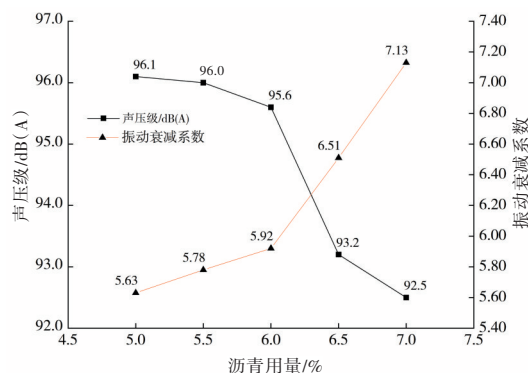
最大公称粒径指保留在最大尺寸的标准筛上的沥青混合料颗粒含量不超过10%时的最小标准筛筛孔尺寸,一般用来控制沥青混合料的集料尺寸、摊铺厚度与路面的表面纹理。对于沥青混合料,无论是密实型沥青混合料还是多孔沥青混合料,其最大公称粒径减小,意味着粗纹理尺度也减小,这有利于降低轮胎/路面的噪声。路面厚度一般根据最大公称粒径而定,研究者发现路面厚度对轮胎/路面的噪声影响不大^[58]。SMA路面的轮胎/路面噪声往往随着骨料总尺寸的增大而增大,多孔沥青路面的噪声水平从相对安静到相对嘈杂,也取决于骨料尺寸^[40]。WINROTH等^[59]认为路面的粗糙度与混合料的最大公称粒径有关,减小路面的宏观纹理粗糙度有利于降低轮胎/路面的噪声,因此小的集料尺寸更有利于降低噪声。刘亚敏等^[60]基于具有抗滑降噪功能的SMA的配合比设计结果,发现宏观构造越明显,轮胎/路面之间的空气越能及时得到释放,从而更有利于降低泵吸噪声。分析各种因素对SMA路面噪声的影响

程度,发现最大公称粒径影响程度最大,沥青用量次之,集料类型最小。混合料最大公称粒径会影响路面粗糙度(表面纹理),从而影响轮胎/路面的噪声水平,但粒径对噪声水平的具体影响还需要进一步研究。

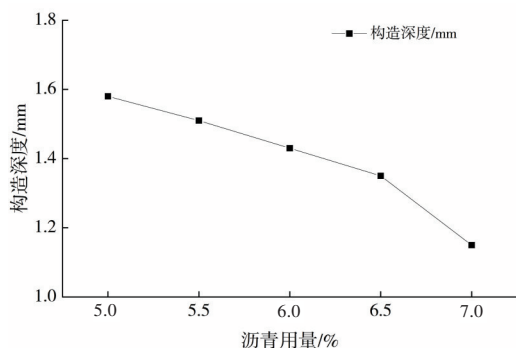
3.1.3 沥青混合料的沥青用量

沥青用量也是影响轮胎/路面噪声的重要因素之一。增加沥青用量可以改善沥青混合料的减振降噪效果,随着沥青用量的增加,轮胎/路面的噪声也会降低。杨斌^[61]对SMA橡胶沥青路面轮胎/路面噪声进行了试验评价,如图12(a)所示。从图12(a)可知,沥青用量从5.0%增加到7.0%时,声压级从96.1 dB(A)降到92.5 dB(A),路面的振动衰减系数增加了26.64%,路面的降噪效果显著。这是因为当沥青用量较少时,在6.0%附近,集料表面的沥青膜厚度较薄,无法充分发挥橡胶沥青的阻尼减振作用;随着沥青用量增加,集料表面沥青膜的厚度增大,被沥青填充的集料间空隙增大,混合料整体的阻尼性能提高,从而改善了混合料的减振降噪性能。从图12(a)还可以看出,沥青用量从6.0%增加到6.5%时,声压级相应降低2.4 dB;沥青用量从6.5%增加到7.0%时,声压级相应降低0.7 dB。两者相比,后者降噪效果明显减弱。这是因为当沥青用量过多时,沥青容易堵塞路表连通孔隙,路表甚至出现泛油现象,使泵吸噪声有所增加,从而削减了降噪效果。从图12(b)可知,随着沥青用量的增加,构造深度不断减小,导致泵吸噪声增加。

因此,实际应用必须综合考虑路面的基本路用性能和经济因素,严格控制沥青的合适用量,不能为追求降噪效果而盲目地增加沥青用量。



(a) 构造深度、振动衰减系数变化



(b) 构造深度变化

图 12 不同沥青用量对降噪性能的影响^[61]Fig. 12 Effect of different asphalt content on noise reduction performance^[61]

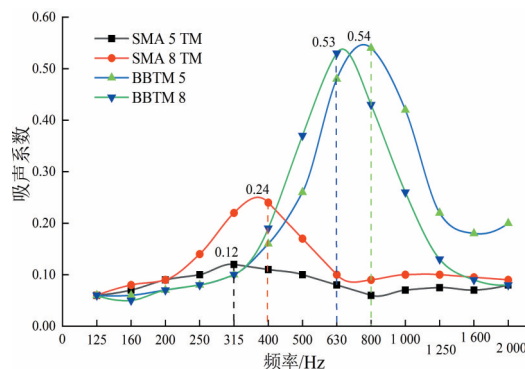
3.2 路面结构对路面产生噪声的影响

3.2.1 空隙率

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规定,沥青混合料根据剩余空隙率的大小分为密级配、开级配及半开级配类型,而密级配根据矿料级配类型又分为连续级配和间断级配。其中,密级配混合料的空隙率应小于6%;开级配混合料的空隙率要求大于18%,包括排水式磨耗层和排水式沥青碎石基层(asphalt-treated permeable base, ATPM);半开级配混合料的空隙率为6%~12%,主要有沥青碎石混合料等。

研究表明,空隙率的增大对轮胎/路面降噪起积极作用,但同时造成路面在长期服役期间的耐久性与路用性能急速下降^[62]。KNABBEN等^[63]使用阻抗管法分析沥青混合料的吸声能力,发现混合料相互连接的孔隙对吸声性能影响较大。谭伟等^[16]从降噪的角度考虑,认为路面空隙率越大越好,设计值应不低于20%,理想值为25%~30%。目前的研究表明,较大的空隙率确实可以降低轮胎/路面的噪声水平,但由于较大空隙率会降低路面的耐久性,故应综合考虑路面的耐久性与降噪特性。ŠERNAS等^[64]设计了4种不同级配类型的沥青混合料,发现较大的空隙率对沥青混合料降噪有明显改善效果,如图13所示。从图13看出,当混合料类型相同时,混合料集料最大公称粒径越大,其吸声系数峰值一般也越大;极薄沥青混合料(betonbitumineux tres mince, BBTM)的吸声系数较相同最大公称粒径的SMA的更大,这也与BBTM具有更高的空隙率直接相关。较大的空隙

率可吸收来自轮胎的泵吸效应和来自振动作用产生的噪声,同时噪声在路面内部空隙中经过的路径较长,导致声能量损耗较多,故空隙率越大,产生的噪声越小。

图 13 不同级配混合料吸声效果^[64]Fig. 13 Sound absorption effect of mixtures with different gradations^[64]

3.2.2 表面构造与纹理

轮胎/路面噪声在很大程度上取决于路面的纹理特性,这是因为后者有助于降低轮胎/路面在低频下的声学性能。1987年,研究人员发现轮胎/路面的噪声频谱与纹理具有相关性,当噪声频率低于1.5 kHz时,噪声水平随着纹理水平的增加而增加。VAZQUEZ等^[42]研究了采用相同的聚合物改性黏合剂的SMA-11与SMA-16沥青混合料,后者的降噪水平更高,主要原因是后者具有更高的纹理水平。LIU等^[65]研究发现轮胎/路面的噪声和摩擦力随着路面纹理幅值、纹理形状(“正”“负”纹理)与纹理分布的变化而变化。CHEN等^[66]也发现沥青混合料的防滑与降噪水平受路面纹理水平的影响较大。HYUN等^[41]对沥青混凝土路面的MPD、平均波长和轮胎/路面的噪声进行统计分析,发现轮胎/路面的噪声水平随着平均剖面深度与沥青路面波长的增大而增加。研究表明,对于密级配沥青混合料不透水沥青路面,表面纹理会增加低频率(低于1 600 Hz,尤其在500 Hz)的噪声水平。因此想要有效降低噪声水平,应尽量减少MPD表面纹理。王淦^[67]对比不同级配的沥青混合料的表面构造深度,得出表面构造深度与A计权声压级成负相关关系,即A计权声压级随着表面构造深度的增大而减小,并且各沥青混合料按照声压级从小到大排序依次为OGFC-13、SMA-13、AC-13。其原因是SMA路面相较于其他密级配路

面具有丰富的表面纹理,能够使噪声在其空腔内部互相反射,并发生亥姆霍兹共振而有效地消耗声能,另外气流可以自由出入表面的连通孔隙,从而削减了泵气噪声。

综上所述,路面的表面纹理对轮胎/路面噪声的影响因素主要包括表面构造深度、平均剖面深度及“正”“负”纹理等。表面构造深度越大,意味着路面的表面空隙越丰富,空气经轮胎进入路表空隙并在与空隙内壁摩擦过程中耗散的声能就越大,降噪效果越好。平均剖面深度变小,相应的轮胎/路面噪声也减小。“正”纹理指颗粒或边缘由于突出路面而产生的纹理,有助于增加噪声;“负”纹理主要指表面平整的粒子间形成的空隙,有助于降低噪声。

3.3 外部因素对路面噪声的影响

在路面自身因素以外,一些外部因素也会对路面噪声产生影响,如汽车行驶速度与气候条件等。

3.3.1 车速

大量研究证明轮胎/路面的噪声明显受车速变化的影响,即车速增加越多,噪声水平增加越大^[68-69]。LEUNG^[46]使用近距离法(close proximity, CPX)及控制通过法(controlled pass-by, CPB)测试不同类型车辆以不同速度经过不同路面时的噪声级。结果显示,对于同类型车辆同类型路面,交通噪声级随着车速的增大而增大,而与沥青类型无关。通常,当轻型汽车的车速大于30 km/h时,轮胎/路面的摩擦声将成为主要的交通噪声源^[4]。周海生等^[35]通过不同加载频率的动态试验表明,车速越大,轮胎/路面的能量衰减越慢,振动噪声越大。随着车速的增大和单位时间内轮胎转数的增加,轮胎与路面接触的速度增加,加剧了轮胎花纹块敲击路面的频率,同时也增加了轮胎/路面接触边缘吸入和排出空气的次数。因此,车速变化对轮胎/路面的噪声水平影响很大,且车速的增大会使轮胎胎面花纹相关噪声的频率相应增大;而对于与胎面无关的噪声分量,其振幅随车速速度的增大而增大,但频率保持不变。此外,轮胎接触面的后缘产生的噪声比前缘产生的对速度更敏感。

曹卫东等^[70]采用单车通过法对试验路段进行噪声测试,其结果表明,随着车速的增大,噪声也相应增大,且SMA橡胶沥青路面与普通AC路面相

比可使噪声多降低2.0~3.0 dB(A),平均最大降噪量达到3.3 dB(A)。SANDBERG等^[3]对SDGP、AC、PAC路面进行相同车速下的噪声值研究,试验结果如图14所示。

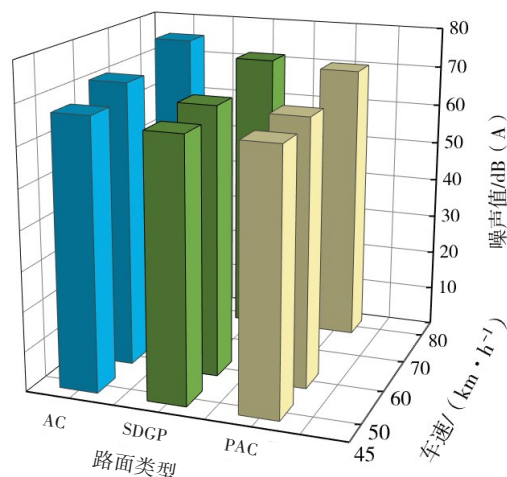


图14 不同路面在相同车速下的噪声值^[3]

Fig. 14 Noise value of different pavements at the same speed^[3]

由图14可知,随着车速的增大,三种类型路面的噪声值增大,在相同车速下,这三种类型路面按照噪声值从小到大排序依次为PAC、SDGP、AC。经分析,PAC路面由于其丰富的孔隙特征,声波在其内部通过能量转化的方式耗散。而对于SDGP路面,一方面加入的高阻尼、高弹性的橡胶颗粒减缓了轮胎对路面的冲击力,对花纹块撞击产生的噪声起到了部分消减作用;另一方面由于路面的弹性性能得到增强,轮胎在接触路面时发生瞬时变形,间接影响了轮胎/路面的泵气噪声。

3.3.2 气候条件(温度与湿度)

欧洲研究报告指出,路表水对轮胎/路面的噪声水平有显著影响。目前缺乏相应的充足数据,仅用接近修正系数的方法进行处理。密实沥青混凝土中的SMA路面在不同潮湿状态下的修正系数不同,其数值随着潮湿状态的加剧而增大^[4]。在干燥道路上的小汽车、卡车的速度分别达到50~60 km/h、70~80 km/h时,轮胎/路面噪声上升为车辆噪声的主导声源;在潮湿道路条件下,车速较低时的轮胎/路面噪声也较突出^[71-72]。ANFOSSO-LÉDÉE等^[73]检测了不同温度时的7种路面的噪声情况,得出沥青路面的噪声水平与空气温度变化存在约为0.100 0 dB(A)/°C的线性系数,但多孔路

面的系数降至 $0.060\text{ dB(A)}/^{\circ}\text{C}$ 。HUNG等^[74]采用CPX方法检测4种SMA路面、4种耐磨路面在不同温度时的噪声变化,发现SMA路面比耐磨路面对温度的变化更敏感。BUENO等^[75]和WANG等^[76]发现轮胎/路面的振动与冲击机制、接触轮胎和路面的摩擦和黏附机制都可能受温度变化的影响,并指出路面温度影响中高频噪声的主要原因是温度升高使沥青的表面刚度降低,进而影响轮胎/路面的振动与冲击机制。

4 轮胎/路面噪声的检测

4.1 室内检测方法

目前室内检测方法主要有阻抗管法、轮胎掉落法、混响室法、转鼓法等。

广泛应用的阻抗管法主要测量材料的吸声系数,多用于评估材料的吸声性能。阻抗管装置的主要结构是截面均匀、内壁光滑的圆管。扬声器与试件分别安装在管的两端。由于管子的形状,声波在管内以平面波的形式传播。当声波作为平面波入射试件表面时,一部分声波被试件吸收,一部分被反射形成反射波,然后根据收集的信号计算试件的阻抗比与吸声系数^[77]。

轮胎掉落法分轮胎垂直下落法与轮胎加速滚动下落法。轮胎垂直下落法是将标准轮胎从一定高度自由下落,模拟轮胎撞击路面产生噪声的过程,通过声级计测量轮胎/路面的噪声,分析不同路面材料的吸声降噪性能。李俊等^[78]采用室内落胎法分析路面纹理、路面噪声与不同表面特征水泥土板的相关性,并提出一种改进的轮胎/路面噪声测试方法,即轮胎加速滚动下落法。轮胎加速滚动下落法是在轮胎自由下落法基础上,使标准轮胎具有一定的水平速度和垂直速度,并沿着轨道从一定高度滚动到被检测的试样上。这种方法保证轮胎对路面的垂直冲击,模拟了轮胎在路面上的水平滚动过程,能更好地模拟轮胎与路面的相互作用^[79]。与只能测量材料在声波垂直入射时的吸声系数相比,轮胎加速滚动下落法是一种实用的噪声评估方法,可以测量路面材料的减振性能,也可以随时调整轮胎的角度方向来测量轮胎/路面噪声,使测试结果更接近真实的路面状况。

混响室法是在一个密闭的小型半消声室内测试扩散入射频带的吸声系数,有利于减少材料的各向异性性质对结果的影响,适用于法向和横向结构明显不同的材料^[61]。

转鼓法是在半消声室内通过一个直径为 $1.5\sim 3.0\text{ m}$ 的转鼓带动轮胎,对近场噪声进行测试。测试时,轮胎以预设的压力与路面试件接触,并按照一定的转速在转鼓上滚动从而模拟实际轮胎在路面上的运动状态,同时采集声压信号和频谱^[58]。

4.2 室外检测方法

室外噪声检测方法主要分为两大类,即近场测试法和远场测试法。

近场测试法可以近距离采集轮胎/路面的噪声。一般在轮胎附近 $10\sim 20\text{ cm}$ 的范围内布置若干传声器来采集轮胎/路面噪声信号,其中使用比较广泛的是CPX^[80]和随车声强法(on-board sound intensity method, OBSI)^[81]。CPX是在一个内部高度简化的拖车框架上,搭载一个具有优异隔音吸声能力的隔声罩,保证实地检测噪声能比较准确地反映轮胎/路面噪声。这种方法相对于远场测试法,减少了环境、气候对测量结果的影响,可以采集真实的轮胎/路面噪声从而充分反映路面噪声的实际情况。OBSI是在汽车轮胎外侧安装支架,每个支架前缘、后缘配备了两个探测器,且两个探测器间距 16 mm 、离轮胎外侧 100 mm 、离地面 75 mm ,并采用标准轮胎进行声级计A计权网络测试。近场测试法记录规定测量时间内A计权声压级的能量平均值,用时间平均法评价噪声的影响,可以直接比较不同道路的噪声状况。SANDBERG等^[82]通过引入轮胎橡胶的硬度与温度参数来校正、改进CPX法。

最常用的远场测试法是CPB和统计通过法(statistics pass-by, SPB)。CPB是在统计通过法的基础上,对测试环境有严格要求,必须封闭交通、研究车辆分别以空挡滑行、怠速、加速等不同状态通过测试点时的轮胎/路面噪声变化规律。SPB通过测量不同类型的车辆以恒定速度经过测量点时产生的噪声,对数据进行统计分析,对每一种车辆都确定一条噪声回归线(反映最大噪声与车速对数的比值),从而确定参照车速时的道路噪声水平。这种方法是对道路上实际混合车流的噪声测

试。测试对象为自由交通流,测得的是包括路面噪声、车辆发动机和机械噪声等在内的人们实际听到的噪声。测试结果反映了不同交通流组成的变化状态,可以很好地评价混合交通流对路面噪声的影响。LAI等^[83]使用加权声压级传感器分析了长期服役中的开级配沥青路面在不同车速、加载条件(干或湿)和结构深度影响下的降噪效果。CHEN等^[84]开发了基于驱动轮路面分析仪(driving wheel pavement analyzer, DWPA)的加速测试方法,用于分析 OGFC-13、SMA-13、AC-13 沥青混合料的降噪性能。

5 轮胎/路面噪声模型

为准确获得轮胎/路面的噪声值,揭示轮胎/路面噪声的产生机理,从而反映路面的降噪性能,国内外许多学者们结合机械、声学、电学等领域的基础理论,设计出多种噪声模型并分析每种方法的优缺点。

SUN等^[85]利用有限元方法建立沥青混合料孔隙结构的微观模型,其模拟沥青路面的降噪特性的结果表明 OGFC-13 的降噪效果最好, SMA-13 的次之, AC-13 的最差。与其他现有的 Berengier 模型相比, LOSA 等^[86]使用 Neithalath 微观结构模型,从孔隙几何形状的角度预测吸声系数,因具有已准确定义的混合体内部结构,故无须对混合料进行其他类型测量,仅考虑成分材料(骨料、沥青)和压实水平。据统计,轮胎/路面噪声模型主要分为以下三类:确定性模型、统计模型、混合模型^[87]。

5.1 确定性模型

确定性模型也被称为解析模型或数值模型,包括有限元法和边界元法等。这些方法不仅计算量大,还需要大量参数,如轮胎的几何形状、轮胎的变形、材料参数和边界条件等。此外,确定性模型也用于研究单个参数对轮胎/路面噪声的影响。一般来说,轮胎的确定性模型在建模时需要几种材料或结构作为输入参数。其子类别主要包括常规物理模型、有限元模型、边界元模型、计算流体力学模型,缺点是仅限于计算低频率噪声,仅适用于密级配沥青路面,并且误差较大。

5.2 统计模型

随着人们对轮胎/路面噪声的研究越来越深入,轮胎/路面噪声产生机理在更大程度上被揭示,相关统计模型也越普遍。统计或半经验模型研究试验测量的噪声数据与各种轮胎、路面参数的相关性,例如轮胎/路面噪声可以与路面纹理相关联,而后者包括纵向方向上不同波长的纹理水平和整体 MPD。统计模型的子类别包括传统回归模型、主成分分析模型、模糊曲线拟合模型,其主要缺点是对噪声产生机制缺乏对应的分析。

5.3 混合模型

混合模型包括确定性子模型和统计子模型。在确定性子模型中,须对输入量进行物理预处理和调节,以获得中间参数作为统计子模型的输入资料。在大多数情况下,对包含数据的预处理可以显著改善统计子模型中的参数关系。混合模型的目的是在物理细节的水平和统计的准确性之间找到一个折中方案。近年来,混合模型变得更加流行,因为该模型既保留了统计模型的准确性,也提供了对物理模型等机制的见解。其子类别包括轮胎/路面界面模型、结构分析模型、噪声传播模型,主要缺点是以路面材料和结构为主要输入参数,但不能确定轮胎输入参数。

6 结语

本研究阐述了密级配橡胶沥青路面的降噪机理及研究进展,重点论述了密级配低噪声橡胶沥青路面的实现路径、降噪机理、影响因素等。主要结论如下:

1) 轮胎/路面噪声产生与增强机理在轮胎、路面的相互作用下共同存在,受多方面因素影响,且不同因素之间存在非常复杂的关系。噪声主要由三部分组成:轮胎和路面之间的碰撞与泵吸噪声、轮胎和路面之间的摩擦噪声、空气动力性噪声。

2) 目前国内外研究与开发的低噪声路面主要为多孔沥青路面、密实型沥青路面两大类,对应的路面降噪水平分别约为 3~6 dB(A)、1~3 dB(A)。由于多孔沥青路面存在在长时间服役下的降噪效果不佳、耐久性差、维护困难等问题,在实际工程中更倾向于密级配降噪路面。

3) 橡胶是典型的阻尼材料,通过添加橡胶使密级配路面达到显著的减震降噪效果,其中干法的密级配路面降噪效果更佳。但是橡胶与沥青之间存在的溶胀与降解反应,以及橡胶颗粒掺量对沥青混合料的级配产生的干涉作用,均会影响路面整体的强度。

4) 密级配橡胶沥青主要应用在骨架密实结构 SMA 沥青混合料中,既能大幅提高路面的降噪性能,也保证了路面的路用性能。密级配橡胶沥青路面的降噪性能受多种因素影响,其中的关键因素是橡胶的掺加方式、掺量与粒径。因此,在实际应用中须对密级配橡胶沥青路面的设计及施工工艺进行不断优化。

5) 轮胎/路面的噪声测试系统及模型是道路环境噪声评估的重要组成部分,其测量设备的稳定性及模型的精确度直接影响试验的科学性。研究者须对噪声的产生与增强机理等多方面进行综合分析,以期降低轮胎/路面噪声提供理论支持。

7 展望

国内外在低噪声沥青路面研究领域已取得了较大突破,并且进行了良好的工程实践。目前,业界对密级配橡胶沥青路面的噪声产生机理与降噪机理等方面有了较全面的认识。但相关研究还须进一步完善与深入,主要包括以下几个方面:

1) 密集配橡胶沥青路面在制备过程中,常采用湿法添加粒径较小的橡胶颗粒,以提高路面性能。对于密级配大橡胶颗粒干法添加的应用还需进一步深入研究,特别是确定干法中的橡胶颗粒掺量与粒径,以及拌和成型工艺的关键技术。

2) 现阶段,在橡胶颗粒的掺量和粒径对密集配橡胶沥青混合料级配的影响方面存在研究深度不足。因此,研究橡胶颗粒的不同掺量与粒径大小对路面结构的影响是一项关键技术。

3) 道路噪声的评价受多方面因素影响,其中道路噪声只能从外部检测,而室内噪声测试方法不能有效模拟实际的交通道路噪声。关于室内模拟轮胎/路面噪声测试的相关设备和方法还须进一步开展研究,同时建立室内-室外噪声映射关系

对路面噪声的预测评估具有重要意义。

4) 轮胎/路面噪声是轮胎与路面相互影响的结果。目前,关于低噪声路面的研究主要集中在低噪声路面材料,但轮胎对轮胎/路面噪声的贡献也不可忽视。开发低噪声轮胎必是今后汽车工业和环保领域的研究热点。

5) 存在于橡胶沥青混合料中的体积膨胀现象容易导致路面出现早期损害。对长期服役条件下的密级配橡胶沥青路面的表面平整度特性进行持续观测及研究,是今后应该开展的研究工作之一。

[参考文献]

- [1] LOU K K, XIAO P, KANG A H, et al. Effects of asphalt pavement characteristics on traffic noise reduction in different frequencies [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 106: 103259. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103259.
- [2] 肖飞鹏,王涛,王嘉宇,等.橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J].中国公路学报,2019,32(4): 73-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.005. XIAO Feipeng, WANG Tao, WANG Jiayu, et al. Mechanism and research development of noise reduction technology of rubberized asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4): 73-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.005.
- [3] SANDBERG U, EJSMONT J A. Tyre/road noise reference book[M]. Kisa, Sweden: Informex, 2002.
- [4] 王旭东,李美江.低噪声沥青路面[M].北京:人民交通出版社,2015: 276. WANG Xudong, LI Meijiang. Low-noise asphalt pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2015: 276.
- [5] LING S L, YU F, SUN D Q, et al. A comprehensive review of tire-pavement noise: generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125056.
- [6] CHEN L X, CONG L, DONG Y S, et al. Investigation of influential factors of tire/pavement noise: a multilevel Bayesian analysis of full-scale track testing data [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121484.
- [7] 张荣荣,薛忠军,王春明,等.橡胶沥青开级配沥青混合料路用性能及降噪效果研究[J].公路,2016, 61(9): 247-249. ZHANG Rongrong, XUE Zhongjun, WANG

- Chunming, et al. Research on road performance and noise reduction effect of rubber asphalt open-grade asphalt mixture[J]. Highway, 2016, 61(9): 247-249.
- [8] LI M L, VAN KEULEN W, CEYLAN H, et al. Influence of changes in surface layer properties on tire/pavement noise[J]. Noise Control Engineering Journal, 2013, 61(4): 417-424. DOI: 10.3397/1/3761036.
- [9] 吴伟, 廖公云, 张乾坤, 等. 典型城市高架道路噪声环境降噪措施[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 75-85. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220726009.
- WU Wei, LIAO Gongyun, ZHANG Qiankun, et al. Noise-reduction measures for typical noise environments of the roads on urban viaduct[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1): 75-85. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220726009.
- [10] KOCAK S, KUTAY M E. Relationship between material characteristics of asphalt mixtures and highway noise[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2295(1): 35-43. DOI: 10.3141/2295-05.
- [11] 孔令绅, 李雪萍, 冯志强. 超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 9-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.04.002.
- KONG Lingshen, LI Xueping, FENG Zhiqiang. Study on performance of super viscous fine thin-layer overlay asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(4): 9-15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb. 2021. 04.002.
- [12] KEHAGIA F, MAVRIDOU S. Noise reduction in pavement made of rubberized bituminous top layer[J]. Open Journal of Civil Engineering, 2014, 4(3): 198-208. DOI: 10.4236/ojce.2014.43017.
- [13] SUN Junfeng, ZHANG Haitao, YU Tengjiang, et al. Influence of void content on noise reduction characteristics of different asphalt mixtures using meso-structural analysis [J]. Construction and Building Materials, 2022, 325: 126806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126806.
- [14] BERNHARD R, WAYSON R L, HADDOCK J. An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement [M]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2010.
- [15] DEL PIZZO L G, BIANCO F, MORO A, et al. Relationship between tyre cavity noise and road surface characteristics on low-noise pavements [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 98: 102971-102987. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102971.
- [16] 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, 127(4): 85-87. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2008.04.030.
- TAN Wei, ZHANG Chonggao, CAO Weidong, et al. Mechanism of tire/pavement noise and noise-reducing pavement [J]. Highways & Automotive Applications, 2008, 127(4): 85-87. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668. 2008.04.030.
- [17] RAFIQ KAKAR M, MIKHAILENKO P, PIAO Z Y, et al. High and low temperature performance of polyethylene waste plastic modified low noise asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128633. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2022.128633.
- [18] 卢磊. 轮胎花纹对轮胎噪声影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LU Lei. Study on the influence of tire tread on tire noise [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [19] ONGEL A, HARVEY J. Pavement characteristics affecting the frequency content of tire/pavement noise [J]. Noise Control Engineering Journal, 2010, 58(6): 563-571. DOI: 10.3397/1.3514588.
- [20] CHHAY L, KIM Y K, SOK T, et al. Effects of pavement texture characteristics on tire-pavement noise from dense-graded asphalt concrete pavement [J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2022, 148(3): 49-65. DOI: 10.1061/jpeodx.0000385.
- [21] 余苗, 童钊尧, 孔令云, 等. 轮胎-沥青路面摩擦测试及抗滑模型研究综述[J]. 公路交通科技, 2020, 37(10): 12-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.10.002.
- YU Miao, TONG Shiyao, KONG Lingyun, et al. A review of tire-asphalt pavement friction measurement and skid resistance model study[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(10): 12-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268. 2020. 10.002.
- [22] KUIJPERS A, VAN Blokland G. Simulation tool for road/tyre modeling: the influence of road parameters on tyre/road noise[J]. SILENCE Project, 2006, 46(5): 143-157. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109377.
- [23] GRAF R A G, KUO C Y, DOWLING A P, et al. On the horn effect of a tyre/road interface, part i: experiment and computation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 256(3): 417-431. DOI: 10.1006/jsvi.2001.4238.
- [24] PENG B, HAN S, HAN X, et al. Laboratory and field evaluation of noise characteristics of porous asphalt pavement [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(10): 3357-3370. DOI: 10.

- 1080/10298436.2021.1893319.
- [25] MIKHAILENKO P, PIAO Z Y, KAKAR M R, et al. Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: a literature review [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(6): 1911-1934. DOI: 10.1080/10298436.2020.1830091.
- [26] CHEN J S, LEE C T, LIN Y Y. Influence of engineering properties of porous asphalt concrete on long-term performance[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4): 1-7. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001768.
- [27] LIU M, HUANG X M, XUE G Q. Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016, 5(1): 183-196. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2016.02.001.
- [28] GU F, WATSON D, MOORE J, et al. Evaluation of the benefits of open graded friction course: case study [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189: 131-143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.185.
- [29] CAI X, WANG D Y, YU J M. Evaluation of the functional performance of paving materials based on the driving wheel pavement analyzer [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2410. DOI: 10.3390/app10072410.
- [30] WANG Y, WANG X G, ZHANG L W. Pavement and noise reduction performance of open-graded asphalt friction course improved by waste tire crumb rubber[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 9937293. DOI: 10.1155/2021/9937293.
- [31] EJSMONT J, GOUBERT L, RNOWSKI G, et al. Ultra low noise poroelastic road surfaces[J]. *Coatings*, 2016, 6(2): 18-34. DOI: 10.3390/coatings6020018.
- [32] WU H, YU J, SONG W M, et al. A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117759.
- [33] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.027.
- [34] 刘乃亮, 齐暑华, 周文英, 等. 吸声功能橡胶研究进展[J]. *特种橡胶制品*, 2008, 29(4): 45-50. DOI: 10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2008.04.014.
- LIU Nailiang, QI Shuhua, ZHOU Wenying, et al. Progress in research of sound absorption functional rubber[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2008, 29(4): 45-50. DOI: 10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2008.04.014.
- [35] 周海生, 吕伟民, 葛剑敏, 等. 阻尼沥青路面降噪特性的研究[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(8): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2005.08.002.
- ZHOU Haisheng, LYU Weimin, GE Jianmin, et al. Noise-reducing mechanics of damping asphalt pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(8): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2005.08.002.
- [36] 高明星. 连续级配橡胶颗粒沥青路面降噪特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- GAO Mingxing. Study on noise reduction characteristics of continuous gradation rubber particles asphalt pavement [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [37] CHANDRAN V, NAGARAJAN L, THOMAS M R. Evaluation of vibration damping behavior of different sizes of waste tyre rubber in natural rubber composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(18): 2493-2501. DOI: 10.1177/0021998317748467.
- [38] 温学钧, 杨群. 粗废轮胎橡胶粒SMA混合料减振降噪路面研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(2): 230-234. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2008.02.019.
- WEN Xuejun, YANG Qun. Study on the quiet pavement with SMA including coarse crumb-rubber[J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(2): 230-234. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2008.02.019.
- [39] GARDZIEJCZYK W, PLEWA A, PAKHOLAK R. Effect of addition of rubber granulate and type of modified binder on the viscoelastic properties of stone mastic asphalt reducing tire/road noise (SMA LA)[J]. *Materials*, 2020, 13(16): 3446. DOI: 10.3390/ma13163446.
- [40] STAIANO M A. Influence of pavement type and aggregate size on tire-pavement noise generation [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2021, 69(2): 162-172. DOI: 10.3397/1/376916.
- [41] HYUN T J, HONG S J, KIM H B, et al. Estimation of tire-pavement noise for asphalt pavement by mean profile depth[J]. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2013, 33(4): 1631-1638. DOI: 10.12652/ksce.2013.33.4.1631.
- [42] VÁZQUEZ V F, TERÁN F, LUONG J, et al. Functional performance of stone mastic asphalt pavements in Spain: acoustic assessment[J]. *Coatings*, 2019, 9(2): 123-146. DOI: 10.3390/coatings9020123.
- [43] XIAO F P, AMIRKHANIAN S N, PUTMAN B J, et al. Feasibility of superpave gyratory compaction of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1): 432-438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.024.

- [44] HANHUA Y, SHUN Y, ZHENGZHENG F. Noise-reducing pavement containing rubber tire particles: CN, 201510106914.0[P]. 2016-06-29.
- [45] LAI F, HUANG Z Y, GUO F. et al. Sound and vibration behavior assessment of different sizes of waste tyre rubber in natural rubber composites for damping applications [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24 (6) : 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2004.06.026.
- [46] LEUNG Y. Evaluation of sound attenuation abilities of various asphalt pavements [D]. Canada: University of Waterloo, 2007.
- [47] ROCHAT J L, DONAVAN P R. Investigations of effects of porous pavement on traffic noise and traffic noise prediction [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2362(1): 42-48. DOI: 10.3141/2362-06.
- [48] HAO K F, WANG W C, GUO X R, et al. High-value recycling of waste tire rubber powder by wet mixing method [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135592. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135592.
- [49] KUENNEN T. Asphalt rubber makes a quiet comeback [J]. Better Roads, 2004, 74(5): 32-38, 40, 42.
- [50] 朱永. 干法橡胶沥青混合料SMA的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
ZHU Yong. Research on application of dry-rubber-asphalt-mixture SMA [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [51] 王辉, 周争辉, 詹诗浩, 等. 废胶粉/SBS复合改性沥青混合料CR/SHMA-13的级配研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 1-7. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.20210918.001.
WANG Hui, ZHOU Zhenghui, ZHAN Shihao, et al. Study on gradation of waste crumb rubber/SBS composite modified CR/SHMA-13 asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 1-7. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.20210918.001.
- [52] VÁZQUEZ V F, HIDALGO M E, GARCÍA-HOZ A M, et al. Tire/road noise, texture, and vertical accelerations: surface assessment of an urban road [J]. Applied Acoustics, 2020, 160: 107153. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.107153.
- [53] 曹卫东, 吕伟民, 周海生. 多孔弹性路面的降噪机理与评价方法[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2004.06.026.
CAO Weidong, LYU Weimin, ZHOU Haisheng. Noise reduction mechanism and evaluation method of porous elastic pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24 (6) : 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2004.06.026.
- [54] AMJADIAN Y, ZIARI H, SHARIFI MOGHADDAM KAKHKI S M, et al. Evaluating the efficiency of SMA mixtures containing crumb rubber and WMA additives [J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2022, 148 (2) : 45-65. DOI: 10.1061/jpeodx.0000361.
- [55] 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试验研究[J]. 应用声学, 2008, 27 (1): 7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-310X.2008.01.002.
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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-310X.2008.01.002.
- [56] SANGIORGI C, TATARANNI P, SIMONE A, et al. Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: a laboratory and trial field evaluation [J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 200-209. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128.
- [57] 刘曾倩, 吴海涛, 朱仕卿. 橡胶颗粒对SMA沥青混合料性能的影响研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19 (2) : 173-176. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.02.032.
LIU Zengqian, WU Haitao, ZHU Shiqing. Study on the effect of rubber particles on the performance of SMA asphalt mixture [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, 19 (2) : 173-176. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.02.032.
- [58] LI W, HAN S, HUANG Q B. Performance of noise reduction and skid resistance of durable granular ultra-thin layer asphalt pavement [J]. Materials, 2020, 13 (19): 4260. DOI: 10.3390/ma13194260.
- [59] WINROTH J, KROPP W, HOEVER C, et al. Contact stiffness considerations when simulating tyre/road noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 409: 274-286. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.07.044.
- [60] 刘亚敏, 汪磊, 杨振. 沥青路面抗滑性能衰减规律及预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.001.
LIU Yamin, WANG Lei, YANG Zhen. Attenuation law and prediction model of skid-resistance performance of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(5): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.001.
- [61] 杨斌. SMA橡胶沥青路面的胎-路噪声评价方法及噪声预估模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004818.
YANG Bin. Tire-road noise evaluation method and noise prediction model for sma rubber asphalt pavement

- [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004818.
- [62] KOWALSKI K J, BRZEZIŃSKI A J, KRÓL J B, et al. Traffic analysis and pavement technology as a tool for urban noise control[J]. Archives of Civil Engineering, 2015, 61(4): 107-126. DOI: 10.1515/ace-2015-0039.
- [63] KNABBen R M, TRICHÊS G, GERGES S N Y, et al. Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures[J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 266-274. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.08.008.
- [64] ŠERNAS O, VAITKUS A, GRAŽULYTĖ J, et al. Development of low noise and durable semi-dense asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 13-26. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123413.
- [65] LIU Q F, SHALABY A. Relating concrete pavement noise and friction to three-dimensional texture parameters [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(5): 450-458. DOI: 10.1080/10298436.2015.1095897.
- [66] CHEN D, HAN S, LING C, et al. Prediction of asphalt mixture surface texture level and its distributions using mixture design parameters [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(5): 557-565. DOI: 10.1080/10298436.2017.1316644.
- [67] 王淞. 间断级配沥青混合料轮胎路面噪声特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
- WANG Song. Study on the tire road noise characteristics of intermittent graded asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [68] BENNERT T, HANSON D, MAHER A, et al. Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2005, 33(2): 94-100. DOI: 10.1520/jte12641.
- [69] AL-HADDAD A H A, IBRAHIM T K. Development of a trailer to measure the noise generated at the interface between tire and pavement surface [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2020, 48(1): 333-351. DOI: 10.1520/jte20180681.
- [70] 曹卫东, 葛剑敏, 周海生, 等. 骨架密实型降噪路面的试验研究及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 1026-1030. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X.2006.08.007.
- CAO Weidong, GE Jianmin, ZHOU Haisheng, et al. Experimental research and application of skeleton dense-graded noise reduction pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(8): 1026-1030. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X. 2006. 08. 007.
- [71] 麦剑, 孟宪东, 李力豪, 等. 基于室内轮胎加速下落法的排水沥青路面降噪吸声性能研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(10): 17-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.10.003.
- MAI Jian, MENG Xiandong, LI Lihao, et al. Study on denoising and sound absorption performance of drainage asphalt pavement based on indoor tire accelerated falling method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(10): 17-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268. 2022. 10.003.
- [72] LI T, FENG J, BURDISO R, et al. Effects of speed on tire-pavement interaction noise (tread-pattern-related noise and non-tread-pattern-related noise) [J]. Tire Science and Technology, 2018, 46(2): 54-77. DOI: 10.2346/tire.18.460201.
- [73] ANFOSSO-LÉDÉE F, PICHAUD Y. Temperature effect on tyre-road noise [J]. Applied Acoustics, 2007, 68(1): 1-16. DOI: 10.1016/j.apacoust. 2006.06.001.
- [74] HUNG W T, LAM Y K, KAM E K Y. Temperature effects on tyre/road noise on wearing course and stone mastic asphalt surfaces in Hong Kong [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(sup 4): 3226. DOI: 10.1121/1.4708031.
- [75] BUENO M, LUONG J, VIÑUELA U, et al. Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise [J]. Applied Acoustics, 2011, 72(11): 829-835. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.05.005.
- [76] WANG D W, SCHACHT A, LENG Z, et al. Effects of material composition on mechanical and acoustic performance of poroelastic road surface (PERS) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 352-360. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.207.
- [77] LENG C, LU G Y, GAO J L, et al. Sustainable green pavement using bio-based polyurethane binder in tunnel [J]. Materials, 2019, 12(12): 1990. DOI: 10.3390/ma12121990.
- [78] 李俊, 韩森, 曹东伟, 等. 植石水泥混凝土路面噪声特性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 45-48. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.04.012.
- LI Jun, HAN Sen, CAO Dongwei, et al. Analysis of noise characteristics of stone-planting cement concrete pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(4): 45-48. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.04.012.
- [79] CHEN D, LING C, WANG T T, et al. Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 801-810. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062.
- [80] MIODUSZEWSKI P, SOROCIAK W. Acoustic evaluation of road surfaces using different Close Proximity testing devices [J]. Applied Acoustics,

(下转第106页)

- DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.011.
- [19] 尹腾. 可储存式发泡沥青与温拌混合料性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.002140.
- YIN Teng. The study on performances of storable foamed asphalt and warm-mix mixture [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.002140.
- [20] HU J Y, MA T, YIN T, et al. Foamed warm mix asphalt mixture containing crumb rubber: foaming optimization and performance evaluation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130085.
- [21] 田小革, 卢雪蓉, 窦文利, 等. 再生沥青调和理论的适用性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 20-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.003.
- TIAN Xiaoge, LU Xuerong, DOU Wenli, et al. Research on the practicability of blending theory of recycled asphalt [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 20-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.003.
- [22] 蔡邦, 邓亚军, 朱兴龙, 等. SBR与生物油恢复老化SBS改性沥青性能及机理研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 39-49. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220813002.
- CAI Bang, DENG Yajun, ZHU Xinglong, et al. Performances of aged SBS modified asphalt regenerated with SBR and bio-oil and the regeneration mechanism [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2024, 21(1): 39-49. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220813002.
- [23] ZHOU T, KABIR S F, CAO L P, et al. Comparing effects of physisorption and chemisorption of bio-oil onto rubber particles in asphalt [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 123112. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123112.
- [24] 李强, 王锐军, 李斌, 等. 发泡剂对冷再生沥青混合料强度特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 282-287. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.02.010.
- LI Qiang, WANG Ruijun, LI Bin, et al. Effects of foaming agent on strength characteristics of cold recycled asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 282-287. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.02.010.
- [25] 杜全伟. 泡沫沥青宏观评价及混合料性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.000801.
- DU Quanwei. Foam asphalt macro and micro evaluation and mixture performance studies [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.000801.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)

(上接第78页)

- 2023, 204: 109255. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109255.
- [81] DONAVAN P R, LODICO D M. Estimation of vehicle pass-by noise emission levels from onboard sound intensity levels of tire-pavement noise [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2123(1): 137-144. DOI: 10.3141/2123-15.
- [82] SANDBERG U, EJSMTONT J A. Texturing of cement concrete pavements to reduce traffic noise [J]. Noise Control Engineering Journal, 1998, 46(6): 231-243. DOI: 10.3397/1.2828475.
- [83] LAI F, HUANG Z Y, GUO F. Noise reduction characteristics of macroporous asphalt pavement based on a weighted sound pressure level sensor [J]. Materials, 2021, 14(16): 4356. DOI: 10.3390/ma14164356.
- [84] CHEN S, LIN X C, ZHENG C F. Evaluation of siltation degree of permeable asphalt pavement and detection of noise reduction degree [J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 349-367. DOI: 10.3390/app11010349.
- [85] SUN J F, ZHANG H T, WU G Y, et al. Micro-structural analysis of noise reduction mechanism of porous asphalt mixture based on FEM [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2021, 17(6): 1154-1167. DOI: 10.1108/mmms-05-2021-0085.
- [86] LOSA M, LEANDRI P. A comprehensive model to predict acoustic absorption factor of porous mixes [J]. Materials and Structures, 2012, 45(6): 923-940. DOI: 10.1617/s11527-011-9808-8.
- [87] LI T, BURDISSO R, SANDU C. Literature review of models on tire-pavement interaction noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 420: 357-445. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.026.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平 赵冰)