

# 多孔性沥青混凝土路面降噪性能影响因素研究

何虹霖<sup>1,2</sup>, 邹晓翎<sup>2</sup>, 叶向前<sup>3</sup>, 曾涛<sup>2</sup>

(1. 中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆市 401121; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400041;

3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**大量室内/室外试验表明多孔性沥青混合料具有优良的降噪性能,但实测数据难以分析单一因素变化对吸声性能的影响,该文利用 Virtual. lab 有限元软件通过数值模拟的方式研究空隙率、厚度、黏滞特征长度和热效特征长度对多孔性沥青混合料吸声系数的影响规律,并基于灰色关联理论分析沥青混合料吸声系数的主要影响因素。研究结果表明:数值仿真模型具有较高的可靠性,随着厚度、空隙率和黏滞特征长度的增大,吸声系数分别呈现增大、增大、逐渐减小的趋势,而热效特征常数对吸声系数影响不大,影响程度大小依次为空隙率>厚度>黏滞特征长度>热效特征长度。为提高沥青混合料的吸声性能,宜在确保满足路用性能的情况下优先提升空隙率。

**关键词:**多孔性沥青混合料; 吸声系数; 数值模拟; 灰关联度

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

随着社会和科学的进步,交通量激增,道路交通噪声污染日益严重,对周边人们的生活和心理造成不利的影响,已受到社会公众广泛关注<sup>[1]</sup>。

多孔性沥青路面由于其较大的空隙率,可以有效地排除路表面积水,并能减弱胎/路的泵吸效应,吸收交通噪声,是解决交通噪声污染的重要途径<sup>[2-5]</sup>。

魏建军等<sup>[6]</sup>分析了吸声系数与多孔沥青混合料结构之间的关系,发现小粒径、大空隙率的混合料具有优良的降噪能力;董雨明<sup>[7]</sup>利用驻波管分析沥青混合料的吸声性能与空隙率、构造深度和粒径之间的关系,发现多孔沥青混合料等效的噪声水平能降低 3.4~6.7 dB(A),但影响多孔材料吸声性能的各因素并不都是相互独立的,传统试验方法不能研究某单一因素的变化对多孔材料吸声性能的影响,难以从理论上分析沥青混合料的降噪性能;梁小光<sup>[8]</sup>和蒋坤<sup>[9]</sup>分别基于 Virtual. lab 和 FOAM-X 软件对多孔吸声材料的吸声性能进行数值模拟研究,验证了利用有限元软件分析多孔材料吸声特性的可行性。

鉴于此,该文以多孔沥青混合料为研究对象,利用 Virtual. lab 建立单层多孔材料的吸声模型,基于灰色关联理论分析空隙率、厚度、孔径对混合料吸声系数的影响,并根据关联度判断各影响因素的影响程度并得出主要的影响因素,以期低噪声沥青路面研发提供新的分析手段。

## 1 多孔沥青混合料吸声系数仿真模拟

### 1.1 阻抗管法测吸声系数基本原理

阻抗管测量材料的吸声性能是基于传递函数法,将宽带稳态信号源分解为入射波  $p_1$  和反射波  $p_R$ ,设定两个传声器的间距为  $s$ ,第二个传声器到测量表面的间距设为  $l$ ,入射波和反射波声压可以分别写为:

$$p_1 = P_1 e^{jk_0 x} \quad (1)$$

$$p_R = P_R e^{jk_0 x} \quad (2)$$

式中: $P_1$  为基准面上  $p_1$  的幅值; $P_R$  为基准面上  $p_R$  的幅值; $k_0$  为波数。

两个传声器位置的声压为:

$$p_1 = P_1 e^{jk_0(s+l)} + P_R e^{-jk_0(s+l)} \quad (3)$$

$$p_2 = P_1 e^{jk_0 l} + P_R e^{-jk_0 l} \quad (4)$$

入射波和反射波传递函数为:

$$H_1 = \frac{p_{21}}{p_{11}} = e^{-jk_0 s} \quad (5)$$

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0 s} \quad (6)$$

由传声器的声压,并有  $P_R = rP_1$  ( $r$  为反射系数)可得到总声场的传递函数:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 l} + r e^{-jk_0 l}}{e^{jk_0(s+l)} + r e^{-jk_0(s+l)}} \quad (7)$$

将入射波传递函数和反射波传递函数代入式(7),  
可以求得反射系数为:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{j2k_0(s+l)} \tag{8}$$

吸声系数可通过反射系数,由式(9)得到:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \tag{9}$$

1.2 有限元模型建立

仿真模型如图 1 所示,利用驻波管法对多孔隙沥青进行声学仿真分析时,仅使用管内的声腔部分,并不需要建立驻波管精细的模型,只需建立内部声腔的模型,阻抗管长度  $L=300\text{ mm}$ ,横截面尺寸为  $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  的正方形,内部介质为空气,前端采用垂直入射的平面波模拟声源,后端为  $30\text{ mm}$  的多孔沥青混合料试验样品,将 Johnson-Champoux-Allard 作为混合料本构模型,由于道路噪声主要分布在  $250\sim 2\,000\text{ Hz}$  的范围内,因此模型计算最高频率设为  $2\,500\text{ Hz}$ ,为防止网格尺寸设置太过粗糙产生误差,网格尺寸设为  $10\text{ mm}$  满足小于最短波长  $1/6$  的要求。对声源端施加单位振动速度边界条件。根据传声器所测得的声压频率响应,利用传递函数理论公式求得多孔沥青混合料的吸声系数。

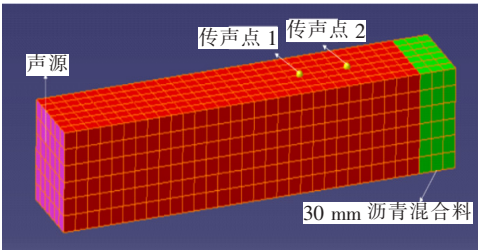


图 1 有限元仿真模型

材料参数:空气的密度为  $1.225\text{ kg/m}^3$ ,体积模量为  $142\text{ kPa}$ ,声音在空气中的传播速度为  $340\text{ m/s}$ ;路面多孔沥青混合料密度为  $2\,450\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $1\,300\text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.3$ 。

1.3 模型精度验证

为了比较 Virtual. lab 对吸声系数计算结果和试验室实测数据的差异,通过对多孔沥青混合料的配合比中级配、油石比、矿粉进行调整,击实  $20\%$  空隙率的混凝土试件,用驻波管按  $1/3$  倍频段中心频率进行测试,其结果如表 1 所示,由表 1 可以发现计算结果与实测值相对误差较小,由于计算模型未考虑混合料表面纹理和空隙不均匀分布,造成部分值相对误差大于  $10\%$ ,总体上该模型具有较高的拟合度。

表 1 计算结果和实测值对比

频率/ Hz	吸声系数		绝对误差	相对误差/ %
	实测值	计算值		
200	0.10	0.11	0.01	10.00
250	0.15	0.16	0.01	6.67
315	0.17	0.18	0.01	5.88
400	0.24	0.25	0.01	4.17
500	0.36	0.3	0.06	16.67
630	0.41	0.38	0.03	7.32
800	0.52	0.47	0.05	9.62
1 000	0.44	0.43	0.01	2.27
1 250	0.36	0.35	0.01	2.78
1 600	0.33	0.29	0.04	12.12
2 000	0.37	0.35	0.02	5.41

2 多孔沥青混合料吸声系数研究

2.1 热效特征长度和黏滞特征长度对多孔材料吸声性能的影响

热效特征长度和黏滞特征长度能够表征沥青混合料中孔径的大小,框架与流体之间的黏性能量交换可以用黏滞特征长度  $A_v$  来表征,约等于小孔之间的通道尺寸,框架与流体之间的热能量交换可以用热效特征长度  $A_t$  来表征,约等于沥青混合料小孔的尺寸,其物理意义示意图如图 2 所示。

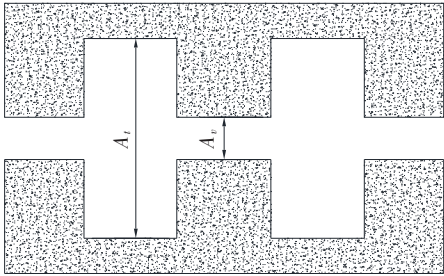


图 2 热效特征长度和黏滞特征长度物理意义示意图

为了研究黏滞特征长度对沥青混合料吸声系数的影响,假设其热效特征长度为定值,将黏滞特征长度设为单一变量  $0.05\text{ mm}$ 、 $0.1\text{ mm}$ 、 $0.15\text{ mm}$ ,吸声系数变化情况如图 3 所示。由图 3 可得:随着黏滞特征长度增大,吸声系数峰值逐渐减小,吸声系数峰值所对应的频率向着高频方向移动,因为随着黏滞特征长度增大,孔的连通性提高,利于高频声波进入空隙,但由于孔径增大空气流通阻碍较小,降低了声波与孔隙壁产

生摩擦的概率,能量消耗减少,吸声系数减小。

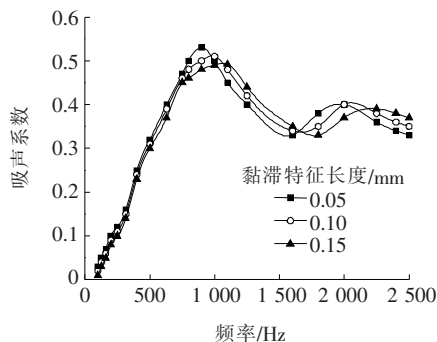


图3 黏滞特征长度对吸声系数的影响

热效特征长度对吸声系数的影响如图4所示,由图4可以看出:吸声系数曲线贴合紧密,在不同热效特征长度下变化很小,出现高度一致性,单一改变热效特征长度对沥青混合料吸声性能的影响并不大。

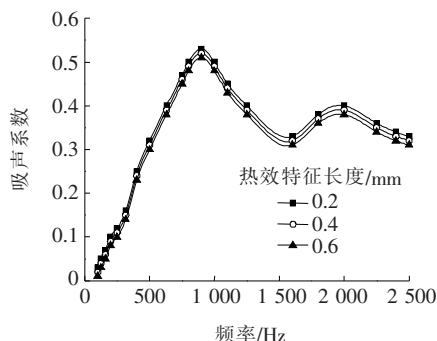


图4 热效特征长度对吸声系数的影响

因此,沥青混合料的吸声系数主要是受到连通孔的影响,只有连通孔才能将声波传递到材料的内部,达到吸声的效果,随着连通孔尺寸减小,入射到空隙的声波不容易反射回去,摩擦损失较大提高了吸声性能,吸声系数的峰值增大,所以在沥青混合料设计时,选择小粒径集料,可以减小连通孔的尺寸,提高沥青混合料的吸声性能。

## 2.2 空隙率对吸声系数的影响

将空隙率设为单一变量5%、10%、15%、20%、25%和30%,吸声系数曲线如图5所示,取用图5中频率为125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz处5个吸声系数的算术平均值,来表示沥青混合料的平均吸声系数,如图6所示。由图5、6可得:吸声系数曲线变化趋势基本相同,空隙率改变对沥青混合料500 Hz以下的低频范围的吸声性能影响不大,主要影响500 Hz以上中高频阶段的吸声性能,在全频域范围,随着空隙率提高,材料平均吸声系数和吸声系数峰

值显著提升,这是因为空隙率越大,空隙的曲折度越大,空隙连接通道越复杂,声音进入后发生折射和漫反射,在空隙壁摩擦力和空气黏滞阻力的作用下,声能转化为热能而被消散,普通沥青混合料平均吸声系数仅为0.1,而在空隙率达到20%的多孔沥青混合料,平均吸声系数达到了0.25,有了一个较大范围的提高,但过大的空隙率会影响材料的力学性能,因此在保证路用性能的前提下,多孔性沥青混合料的目标空隙率宜为20%~25%。

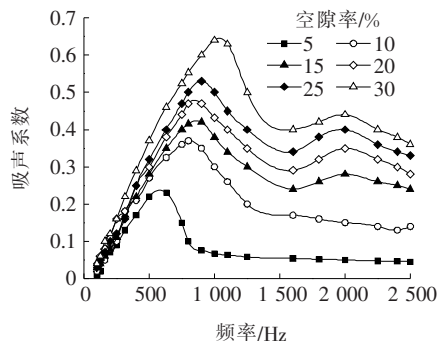


图5 不同空隙率下吸声系数的变化曲线

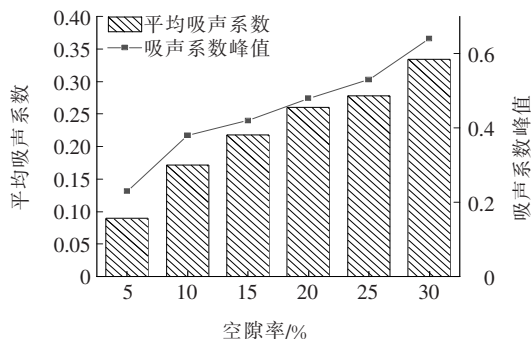


图6 不同空隙率下平均吸声系数

## 2.3 路面厚度对吸声系数的影响

将样品厚度设置为30 mm、40 mm、50 mm、60 mm,吸声系数变化情况如图7、8所示。

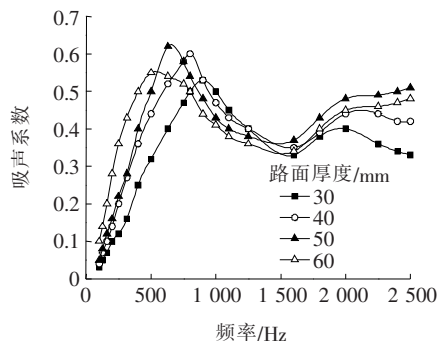


图7 不同路面厚度下吸声系数变化曲线

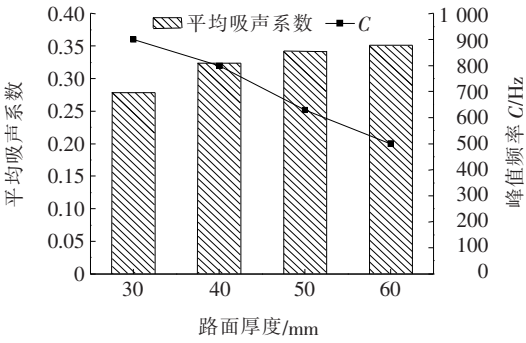


图 8 不同路面厚度下平均吸声系数

由图 8 可得:增加沥青混合料的厚度,材料平均吸声系数有着增大的趋势,吸声系数的峰值向着低频方向扩展,因为声波在沥青混合料内部传播的过程中,随着厚度增加,声波经过的通道更长,声波传递距离变远,增大了能量消耗,加大了声波能量的衰减,多孔材料表面主要吸收高频声波,内部主要吸收中低频声波,导致平均吸声系数增大,峰值往低频方向移动,当厚度大于 40 mm 后,吸声系数均值随厚度增加的增长趋势逐渐平缓,因此在低噪声沥青路面设计中不能一味地增加材料厚度,应将其控制在一个合理值,以免造成材料的浪费。

3 降噪性能影响因素灰关联分析

3.1 分析数列构建

沥青混合料降噪性能影响因素众多,很难确定因素间的关系,通过分析有限数据的灰色关联度,能够有效确定影响混合料降噪性能的主要因素。通过计算混合料的吸声系数与黏滞特征长度、热效特征长度、厚度、空隙率的关联系数来评价各因素对降噪性能的影响程度。利用声学有限元软件计算混合料吸声系数数据,结果如表 2 所示。

表 2 不同影响因素下混合料吸声系数统计数据

序号	厚度 ( $X_1$ )/ mm	空隙率 ( $X_2$ )/ %	黏滞特 征长度 ( $X_3$ )/mm	热效特 征长度 ( $X_4$ )/mm	吸声 系数
1	30	25	0.05	0.2	0.278
2	30	5	0.05	0.2	0.089
3	30	10	0.05	0.2	0.172
4	30	15	0.05	0.2	0.218
5	30	20	0.05	0.2	0.260

续表 2

序号	厚度 ( $X_1$ )/ mm	空隙率 ( $X_2$ )/ %	黏滞特 征长度 ( $X_3$ )/mm	热效特 征长度 ( $X_4$ )/mm	吸声 系数
6	30	25	0.05	0.4	0.276
7	40	5	0.05	0.6	0.150
8	30	30	0.05	0.2	0.334
9	30	25	0.05	0.6	0.273
10	40	25	0.05	0.2	0.324
11	50	25	0.05	0.2	0.342
12	60	25	0.05	0.2	0.351
13	30	25	0.10	0.2	0.274
14	30	25	0.15	0.2	0.258
15	30	10	0.05	0.3	0.160

3.2 均值化变换

由于系统中各影响因素的量纲各不相同,数据难以直接比较,为消除原始数据的量纲,求出各个序列的平均值,并利用平均值去除各序列的原始数据,得到无量纲的均值化序列。

3.3 绝对差序列

按式(10)计算出参考序列与各比较序列之间的绝对差,不同影响因素与吸声系数关联分析中最大差值  $\Delta_{\max}=1.596\ 69$ ,最小差值  $\Delta_{\min}=0.004\ 34$ 。

$$\Delta_{oi}(k)=|x_0(k)-x_i(k)| \tag{10}$$

式中: $\Delta_{oi}(k)$ 为参考序列与各比较序列之间的绝对差。

3.4 关联度计算

经均值化变换的母数列记为  $\{X_0(t)\}$ ,子数列记为  $\{X_i(t)\}$ 。由式(11)计算出空隙率、厚度、热效特征长度、黏滞特征长度与吸声系数的关联系数,由式(12)求出不同序列关联系数  $\epsilon_{oi}(k)$  的平均值作为各因素关联度。

$$\epsilon_{oi}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k)+\rho\Delta_{\max}} \tag{11}$$

$$\gamma_{oi}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\epsilon_{oi}(k) \tag{12}$$

式中: $\rho$  为分辨系数,取 0.5; $N$  为数据数列行数。

各影响因素的关联系数计算结果如表 3 所示,由表 3 可知:厚度、空隙率、黏滞特征长度、热效特征长度与吸声系数的灰关联度分别为 0.78、0.852、0.698、0.646。各因素对多孔性沥青混合料吸声性能的影响



表3 各影响因素关联系数

影响因素	关联系数																灰色关联度
$X_1$	0.770	0.614	0.821	1.000	0.826	0.776	0.593	0.634	0.785	0.856	0.916	0.711	0.782	0.834	0.783		0.780
$X_2$	0.836	0.891	0.822	0.887	0.978	0.829	0.703	0.810	0.819	0.979	0.900	0.865	0.822	0.772	0.865		0.852
$X_3$	0.747	0.630	0.849	0.962	0.799	0.753	0.777	0.619	0.761	0.638	0.604	0.588	0.585	0.354	0.808		0.698
$X_4$	0.683	0.684	0.951	0.857	0.726	0.692	0.335	0.574	0.422	0.591	0.561	0.547	0.692	0.732	0.638		0.646

程度依次为空隙率>厚度>黏滞特征长度>热效特征长度,可见空隙率对降噪性能最为显著。

4 结论

- (1) 利用 Virtual. lab 声学有限元软件能够有效地模拟测试多孔性沥青混合料吸声系数,具有较高的可靠性。
- (2) 随着空隙率增大、厚度增大以及黏滞特征长度减小,混合料吸声降噪性能增加,而热效特征长度几乎没有影响。
- (3) 灰关联计算结果表明,各因素对多孔性沥青混合料吸声性能影响程度依次为空隙率>厚度>黏滞特征长度>热效特征长度。

参考文献:

[1] 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.

[2] 丁庆军,沈凡,刘新权,等. 透水型沥青路面材料的降噪性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2010,30(2):24—28.

[3] 崔世富. 掺木质纤维的多孔沥青混合料性能研究[J]. 中外公路,2019,39(2):223—226.

[4] LIU Mei, HUANG Xiaoming, XUE Guoqiang. 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.

[5] 谭利,易文,何贤锋,等. 防滑降噪沥青路面施工工艺及质量控制[J]. 中外公路,2017,37(2):41—45.

[6] 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—13,19.

[7] 董雨明,柳浩,杨丽英,等. 沥青混合料声学性能试验研究[J]. 市政技术,2010,28(1):149—151,154.

[8] 蒋坤,向阳,张波. 基于 FOAM-X 的多孔材料吸声性能研究[J]. 舰船科学技术,2019,41(7):54—60.

[9] 梁小光. 基于 Virtual. lab 的多孔材料吸声性能仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.