

多孔沥青混合料吸声性能预测模型研究进展

孙俊锋^{1,*}, 蓝海明², 王琳³, 赵锐², 褚玉书², 刘立欣², 陈文博², 金明磊²

1. 东北林业大学, 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨, 150040
2. 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨, 150080
3. 黑龙江省交投高速公路集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨, 150028

摘要: 针对多孔沥青混合料吸声预测模型类型分散、参数获取方法不统一及结构信息利用不足的问题, 本文系统梳理了半经验阻抗模型、等效流体模型、孔弹性模型和孔隙尺度数值模型。阐述了吸声系数、特性阻抗、复波数和表面阻抗之间的计算关系, 比较了 Delany–Bazley、Miki、Johnson–Champoux–Allard (JCA)、Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL) 及 Biot 模型的输入参数、物理假设和适用范围。分析结果表明, 半经验模型参数少且计算效率高, 但对多孔沥青非均匀大孔结构的适应性依赖再标定; JCA 和 JCAL 模型能够通过孔隙率、流阻率、曲折因子及黏性和热特征长度描述空气—孔壁耗散, 是连接三维孔隙结构与吸声频谱的主要路径; Biot 模型可计入骨架振动, 但参数识别和计算成本较高。结合 CT 三维重构、传输参数数值计算和阻抗管反演建立多源参数体系, 并开展独立验证与不确定度分析, 可提高模型在配合比设计和服役性能评价中的可靠性。

关键词: 多孔沥青混合料; 吸声模型; 等效流体; JCA 模型; 孔隙结构; CT 重构

Research Progress on Sound Absorption Prediction Models for Porous Asphalt Mixtures

Junfeng Sun^{1,*}, Haiming Lan², Lin Wang³, Rui Zhao², Yushu Chu², Lixin Liu², Wenbo Chen², Minglei Jin²

1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
2. Heilongjiang Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd, Harbin 150080, China
3. Heilongjiang Jiaotong Expressway Group Co., Ltd, Harbin 150028, China

Abstract: To address the issues of dispersed sound absorption prediction models for porous asphalt mixtures, inconsistent parameter acquisition methods, and insufficient utilization of structural information, this study systematically reviews semi-empirical impedance models, equivalent fluid models, poroelastic models, and pore-scale numerical models. The calculation relationships among the sound absorption coefficient, characteristic impedance, complex wavenumber, and surface impedance are elucidated, and the input parameters, physical assumptions, and applicable scopes of the Delany–Bazley, Miki, Johnson–Champoux–Allard (JCA), Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL), and Biot models are compared. The analysis indicates that semi-empirical models require few parameters and offer high computational efficiency, but their adaptability to the heterogeneous macroporous structure of porous asphalt depends on recalibration. The JCA and JCAL models can describe air–pore wall dissipation through porosity, flow resistivity, tortuosity, and viscous and thermal characteristic lengths, making them a primary pathway linking three-dimensional pore structure to sound absorption spectra. The Biot model can account for skeleton vibration, but its parameter identification and computational cost are relatively high. Establishing a multi-source parameter system by integrating CT three-dimensional reconstruction, numerical calculation of transport parameters, and

impedance tube inversion, together with independent validation and uncertainty analysis, can improve the reliability of these models in mix design and service performance evaluation.

Keywords: Porous asphalt mixture; Sound absorption model; Pore structure; Impedance tube inversion; Uncertainty analysis

多孔沥青混合料内部包含尺度差异显著且相互连通的孔隙。声波进入孔隙后,空气质点在孔壁附近产生速度梯度和温度梯度,声能通过黏性摩擦与热交换转化为热能;同时,通道弯曲、孔喉收缩和局部死端改变传播路径及相位关系^[1-2]。阻抗管试验能够获得法向入射吸声系数,但单纯依靠试验难以分离厚度、连通性、曲折程度和孔径分布的独立作用。吸声预测模型通过特性阻抗和复波数描述材料内部的传播与耗散过程,可用于解释频谱差异、反演传输参数和筛选结构方案。

现有声学模型主要由参数较少的半经验关系逐步发展为等效流体、孔弹性及真实孔隙数值模型。不同模型的输出均可转换为表面阻抗和吸声系数,但输入参数、骨架假设及有效频率范围差异明显。本文以模型层级为主线,介绍了主要计算关系和参数物理意义,充分比较各类模型在多孔沥青混合料中的适用条件,并讨论CT三维结构参数、传输参数与吸声频谱之间的衔接方法。

1 吸声预测的基本关系

1.1 表面阻抗与吸声系数

对于刚性背衬、法向入射且忽略透射能量的材料层,吸声系数可由表面阻抗与空气特性阻抗之间的匹配程度确定。设材料表面复阻抗为 Z_s , 空气特性阻抗为 $Z_0=\rho_0c_0$, 反射系数为 R , 则有^[2-3]:

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (1)$$

$$R(f) = \frac{Z_s(f) - Z_0}{Z_s(f) + Z_0} \quad (2)$$

式中, ρ_0 和 c_0 分别为空气密度与声速。 Z_s 越接近 Z_0 , 界面反射越弱;但进入材料的声能还需在有限厚度内充分耗散,因此阻抗匹配与内部衰减共同决定吸声峰值和有效带宽。对于均匀等效流体层,其特性阻抗 Z_c 、复波数 k_c 和刚性背衬表面阻抗可写为:

$$Z_c = \sqrt{\tilde{\rho}(\omega)\tilde{k}(\omega)} \quad (3)$$

$$k_c = \omega\sqrt{\tilde{\rho}(\omega)/\tilde{K}(\omega)} \quad (4)$$

$$Z_s = -jZ_c \cot(k_c d) \quad (5)$$

式中, ω 为角频率, $\tilde{\rho}$ 和 $\tilde{K}$ 分别为材料内空气的动态等效密度与动态等效体积模量, d 为层厚度。各类吸声模型的核心差异在于 $\tilde{\rho}$ 、 $\tilde{K}$ 或 Z_c 、 k_c 的确定方式。多层路面可采用传递矩阵逐层组合,并在面层—基层界面引入连续性条件。

1.2 模型层级与基本假设

半经验模型利用流阻率与频率的回归关系直接计算 Z_c 和 k_c ;等效流体模型将固体骨架视为静止,以频率相关的等效密度和体积模量表示孔内空气运动;孔弹性模型进一步考虑骨架与孔隙流体的相对运动;孔隙尺度模型则在真实或理想化几何中直接求解声场、黏性流场和热场。模型复杂度提高后,结构解释能力随之增强,但参数数量、计算成本和不确定度传播也相应增加。

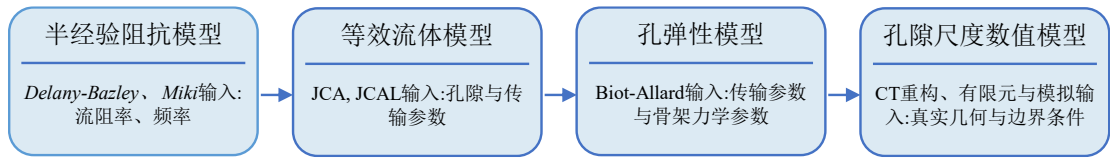


图 1 多孔材料吸声预测模型的层级与输入信息

Fig. 1 Hierarchy and input information of sound absorption prediction models for porous materials

2 半经验阻抗模型

2.1 Delany–Bazley 模型

Delany 和 Bazley 基于纤维吸声材料试验，以无量纲参数 $X=\rho_0 f l \sigma$ 建立特性阻抗和复波数的幂函数关系^[4]。其中 f 为频率， σ 为静态气流阻率。其常用表达式为：

$$\frac{Z_c}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0571 X^{-0.754} - j 0.087 X^{-0.732}$$

(6)

$$\frac{k_c}{k_0} = 1 + 0.0978 X^{-0.700} - j 0.189 X^{-0.595}$$

(7)

$$X = \rho_0 f / \sigma$$

(8)

该模型仅需流阻率即可获得吸声频谱，适合参数不足时的初步估算和敏感性分析。其回归样本主要为高孔隙率纤维材料，孔径尺度、孔道形态及频率适用区间与多孔沥青存在差异。直接应用时可能出现低频外推误差，并难以区分相同流阻率下孔隙率、曲折因子和特征长度的影响。因此，应利用目标混合料的阻抗管结果重新标定系数或限定有效 X 范围。

2.2 Miki 模型与路面经验模型

Miki 模型对 Delany–Bazley 关系的指数和系数进行了修正，使特性阻抗满足正实条件，并改善双层材料及原适用范围外计算的稳定性^[5]。该模型仍以流阻率作为主要材料参数，适用于方案快速比较，但不能显式表征孔喉收缩、通道弯曲和连通孔隙变化。针对多孔沥青，Losa 和 Leandri 等将混合料体积参数、厚度及声学参数引入吸声预测，用于分析单层和双层多孔结构^[11]。此类路面专用模型能够直接关联工程设计变量，但模型系数与集料级配、成型方式和测试频段有关，跨材料体系使用前需开展独立验证。

表 1 多孔材料吸声预测模型的特征比较

Table 1 Comparison of characteristics of sound absorption prediction models for porous materials

模型类型	代表模型	主要输入	主要输出	适用特点	主要局限
半经验	Delany–Bazley ^[4]	流阻率、频率	特性阻抗、复波数	参数少，适合快速计算	源于纤维材料；需限定无量纲频率范围
半经验	Miki ^[5]	流阻率、频率	特性阻抗、复波数	改善低频外推和多层计算稳定性	孔隙几何缺少显式物理参数
等效流体	JCA ^[6-7]	φ 、 σ 、 α_∞ 、 Λ 、 Λ'	等效密度、等效体积模量	可解释黏性与热耗散	低频热响应及参数识别存在偏差
等效流体	JCAL ^[8]	JCA 参数、静态热渗透率	全频域等效参数	改善低频体积模量描述	新增参数提高测试与反演难度
孔弹性	Biot–Allard ^[9-10]	传输参数、骨架密	快慢纵波、剪	适合骨架振动不可	参数多，边界条件和

模型类型	代表模型	主要输入	主要输出	适用特点	主要局限
路面专用 孔隙尺度	Losa-Leandri 等 ^[11] CT/有限元直接 计算 ^[16-17]	度与弹性参数	切波与吸声	忽略的材料	计算成本较高
		体积参数、厚度、 传输或拟合参数	吸声系数及峰 值	便于混合料设计变 量关联	依赖材料体系和试验 范围标定
		三维孔隙、空气性 质、边界条件	声场、耗散场 及等效参数	可识别局部孔喉和 连通效应	受分辨率、代表体积 和网格规模制约

3 等效流体与孔弹性模型

3.1 JCA 模型

Johnson–Champoux–Allard (JCA) 模型将连通多孔材料等效为具有频率相关密度和体积模量的流体, 采用连通孔隙率 ϕ 、静态气流阻率 σ 、高频曲折因子 α_∞ 、黏性特征长度 A 和热特征长度 A' 五个参数描述孔隙内的惯性、黏性与热耗散^[6-7]。在刚性骨架假设下, 动态等效密度为:

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \right] \sqrt{1 + j \frac{4 \alpha_\infty^2 \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \quad (9)$$

式中, η 为空气动力黏度, j 为虚数单位。低频时 σ 控制空气通过连通孔道的阻力; 频率升高后, α_∞ 和 A 对附加惯性及黏性边界层作用更为显著。动态等效体积模量可表示为^[7]:

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8 \eta}{j \omega \rho_0 P_r \Lambda'^2} \sqrt{1 + j \frac{\omega \rho_0 P_r \Lambda'^2}{16 \eta}} \right]^{-1}} \quad (10)$$

式中, γ 、 P_0 和 P_r 分别为空气比热比、静压和普朗特数。 A 控制孔内空气与固体界面的热交换尺度。将式 (9) 和式 (10) 代入式 (4), 即可计算刚性背衬材料层的吸声系数。JCA 参数均具有明确物理含义, 适合研究孔隙率、孔喉尺度、迂曲度和堵塞对吸声频谱的作用, 是当前连接多孔沥青三维孔隙结构与宏观吸声性能的主要模型。

3.2 JCAL 与 Biot 模型

JCA 模型对高频渐近行为描述较完整, 但低频热响应可能因缺少静态热传输信息而产生偏差。Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL) 模型引入静态热渗透率等参数, 改善低频动态体积模量的计算^[8]。当研究频段包含明显的低频吸声峰, 或材料具有多重孔隙和较强热弛豫效应时, JCAL 模型具有更高适用性; 新增参数也会增强反演参数之间的相关性, 需要更多独立测试进行约束。

JCA 与 JCAL 均建立在骨架静止假设上。多孔沥青骨架通常具有较高刚度, 法向入射吸声计算中可首先采用等效流体近似; 当低温、薄层、柔性基层或橡胶化多孔材料使骨架共振和结构阻尼不可忽略时, 可采用 Biot 孔弹性理论^[9-10]。Biot 模型除传输参数外, 还需要骨架密度、杨氏模量、泊松比和损耗因子, 并同时求解两类纵波及剪切波。该模型能够区分孔隙空气耗散与骨架振动耗散, 但参数测试和边界设置较复杂, 不宜在缺乏骨架动力学证据时增加模型自由度。

4 多孔沥青模型参数获取

4.1 直接测试与声学反演

参数获取方法可分为直接、间接和反演三类。连通孔隙率可通过开放孔隙试验或 CT 连通域统计获得; 静态气流阻率可由稳态压差—流量关系测定, 并在达西区间内通过空气黏度与渗透率换算。 α_∞ 、 A 和 A' 可采用超声、电类比或专用传输试验测定, 也可利用阻抗管复阻抗或传递函数进行反演

[18-19]。反演方法设备要求较低，但多个参数对频谱的影响存在相关性，单一厚度和单一边界条件可能产生多组近似解。宜采用多厚度、多背腔或多观测联合反演，并为各参数设置具有物理依据的取值范围。

4.2 CT 结构参数与传输参数映射

CT 三维重构能够提取连通孔隙率、等效孔径、喉道半径、通道长度、配位数、比表面积和几何迂曲度。 φ 可由贯通孔隙体积分数直接确定； Λ' 可依据孔隙体积与固—气界面面积估算； Λ 和 σ 对局部速度场及狭窄喉道更加敏感，宜在重构孔隙内分别求解稳态黏性流动和高频势流； α_∞ 应由高频惯性响应或场能量定义计算，不能简单等同于单一路径长度比[6-7,16-17]。CT 分辨率不足会遗漏小喉道并高估连通性，代表性体积过小则会放大局部级配差异，因此参数计算应报告体素尺寸、分割阈值、取样尺寸和方向。

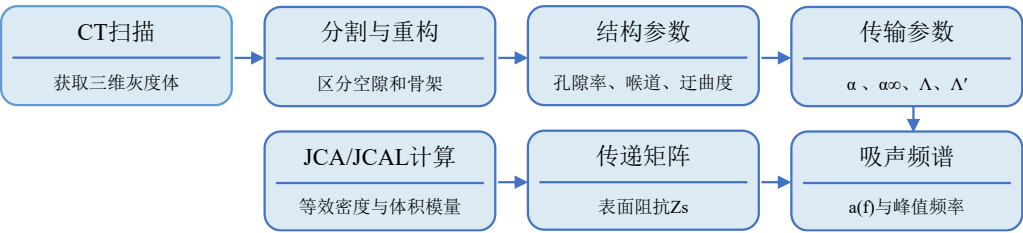


图 2 CT 孔隙结构驱动的 JCA 或 JCAL 吸声预测流程
Fig. 2 Workflow of JCA/JCAL sound absorption prediction driven by CT-derived pore structure

表 2 JCA 及扩展模型参数的获取方法与结构含义

Table 2 Acquisition methods and structural implications of parameters in the JCA and its extended models				
参数	物理含义	主要获取方法	与多孔沥青结构的联系	敏感作用
φ	连通孔隙率	开放孔隙试验；CT 连通域统计	决定可参与声传播的空气体积	影响阻抗匹配和总体吸声水平
σ	静态气流阻率	稳态压差—流量试验； $\sigma=\eta/k_0$	受喉道半径、堵塞及连通性控制	控制低中频黏性阻力
α_∞	高频曲折因子	超声或电类比；势流计算；反演	反映主通道弯曲与分支程度	影响有效惯性和峰值频率
Λ	黏性特征长度	传输参数反演；孔隙尺度流场计算	对狭窄孔喉和速度梯度敏感	控制黏性边界层耗散
Λ'	热特征长度	比表面积近似；热场计算；反演	与孔隙体积和固—气界面面积相关	控制热交换与等效压缩性
k_0'	静态热渗透率	热传输计算或吸声反演	描述低频热扩散通道	改善 JCAL 低频预测
d	材料层厚度	直接测量；分层结构分别输入	决定传播距离及背衬共振条件	显著改变峰值频率与有效带宽

5 模型选择与验证

模型选择应与研究目标和可获得参数相匹配。配合比初筛且仅有流阻率时，可采用经本地试验校准的 Delany–Bazley 或 Miki 模型；需要解释孔隙结构影响时，JCA 模型能够在参数数量和物理解释之间保持较好平衡；研究低频热弛豫时可采用 JCAL 模型；证实存在骨架振动或材料柔性较高时再采用 Biot 模型；需要识别局部孔喉耗散和非均匀声场时，可采用 CT 几何下的直接数值模拟，并

将计算所得传输参数输入等效流体模型进行尺度衔接。

模型验证应保留完整吸声频谱,除决定系数和均方根误差外,还应比较峰值吸声系数、峰值频率、有效吸声带宽及目标交通频带内的加权误差。用于参数反演的数据不宜同时作为唯一验证数据,可采用独立试件、不同厚度或不同配合比进行外部检验。参数敏感性分析应区分单参数局部扰动与多参数联合变化,并报告测量误差、CT分割误差和模型结构误差对预测区间的贡献。对于双层多孔路面,还应检验层间接触、上下层参数差异和背衬边界对峰值移动的影响。

6 现存问题与发展方向

现有多孔沥青吸声模型研究仍存在三方面限制:部分研究仅以总体空隙率或平均孔径解释吸声差异,未区分闭口、孤立和贯通孔隙,导致输入参数与实际传声通道不一致;模型参数常由同一条吸声曲线同时反演,参数相关性和解的不唯一性缺少检验;多数模型针对新制试件建立,尚未充分描述堵塞、磨损、水膜和温度引起的传输参数时变特征^[12-16]。后续研究应联合结构测量、传输计算、声学反演与独立验证,建立多环节衔接的参数体系,并以重复试件给出参数离散性和预测区间。

面向工程应用,可将CT孔隙网络参数与JCA或JCAL参数建立统计或机器学习映射,但训练数据应覆盖不同空隙率、最大公称粒径、级配、厚度和服役状态,并保留物理约束。对堵塞过程,应重点更新连通孔隙率、流阻率和特征长度;对层厚结构,应采用传递矩阵处理传播路径变化;对轮胎—路面噪声评价,还需将材料吸声频谱与交通噪声频带能量结合,避免将吸声系数直接等同于道路降噪量。统一参数定义、测试边界和误差报告方式,是提升不同模型与试验结果可比性的关键。

7 结论

(1) 多孔沥青吸声预测模型可分为半经验阻抗、等效流体、孔弹性和孔隙尺度数值模型。各类模型均通过表面阻抗计算吸声系数,主要差异在于特性阻抗、复波数及骨架运动的描述方式;

(2) Delany-Bazley和Miki模型适合参数不足条件下的快速估算,但需针对多孔沥青重新标定。JCA和JCAL模型以连通孔隙率、气流阻率、曲折因子及黏性和热特征长度描述主要耗散过程,具有较强结构解释能力;Biot模型适用于骨架振动不可忽略的材料;

(3) CT重构可直接获得连通孔隙与几何参数,并通过黏性流动、势流和热传输计算映射至JCA或JCAL参数。采用直接测试、数值计算和声学反演相互约束,并以独立频谱数据验证,可降低参数不唯一性;

(4) 模型评价应同时考察频谱误差、峰值位置、有效带宽和目标交通频带表现。将堵塞、磨损和温度造成的参数演化纳入模型,有利于由新制试件预测拓展至服役期吸声性能评价。

参考文献

- [1] Ling S, Yu F, Sun D, 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.
- [2] Allard J F, Atalla N. *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*[M]. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2009.
- [3] ISO 10534-2:2023. Acoustics—Determination of acoustic properties in impedance tubes—Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and impedance[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [4] Delany M E, Bazley E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J]. *Applied Acoustics*, 1970, 3(2): 105-116.
- [5] Miki Y. Acoustical properties of porous materials—Modifications of Delany-Bazley models[J]. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1990, 11(1): 19-24.

- [6] Johnson D L, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 176: 379-402.
- [7] Champoux Y, Allard J F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 70(4): 1975-1979.
- [8] Lafarge D, Lemarinier P, Allard J F, et al. Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(4): 1995-2006.
- [9] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- [10] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [11] Losa M, Leandri P. A comprehensive model to predict acoustic absorption factor of porous mixes[J]. Materials and Structures, 2012, 45(6): 923-940.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Nelson J T, Kohler E, Öngel A, et al. Acoustical absorption of porous pavement[J]. Transportation Research Record, 2008, 2058(1): 125-132.
- [15] Li M, Van Keulen W, TIjs E, et al. Sound absorption measurement of road surface with in situ technology[J]. Applied Acoustics, 2015, 88: 12-21.
- [16] 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.
- [17] Perrot C, Chevillotte F, Panneton R. Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(2): 940-948.
- [18] Salissou Y, Panneton R. Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(5): 2868-2876.
- [19] Doutres O, Salissou Y, Atalla N, et al. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(6): 506-509.

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金项目（2572024AW65）；黑龙江省交通运输厅科技项目：黑龙江省高等级公路沥青路面典型结构与长期性能研究（HJK2020A010）；黑龙江省交通运输厅科技项目：旧沥青混合料用于寒区路面厂拌水泥稳定冷再生基层的研究（HJK2019B017）。

^{1,*}第1作者&通讯作者简介：孙俊锋（1998-），男，博士研究生，研究方向：沥青路面结构与材料。
E-mail: junfeng6716@126.com。