

多孔沥青路面声学性能评价方法研究现状分析

孙俊锋^{1,*}, 王琳², 孙程³, 周策³, 金明磊³, 褚玉书³, 赵锐³, 那鹏³

1. 东北林业大学, 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨, 150040

2. 黑龙江省交投高速公路集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨, 150028

3. 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

摘要: 多孔沥青路面声学性能评价涵盖材料吸声、轮胎—路面耦合及环境传播等多个尺度, 不同测试方法所得吸声系数、近场声压或声强与路侧通过声级具有不同物理含义。本文梳理了阻抗管、原位吸声、轮胎冲击与滚落、室内滚筒、近场测试法(CPX)、车载声强法(OBSI)、统计通过法(SPB)及控制通过法(CPB), 并从控制条件、频率表征、适用场景和误差来源等进行了比较。结果表明, 阻抗管适合识别孔隙结构与吸声频域关系, 但不能直接代表轮胎激励; 室内滚动试验便于筛选混合料, 但受轮胎、速度和边界反射影响; CPX与OBSI对路面差异敏感, SPB与CPB更接近居民实际暴露, 但交通组成和传播环境增加了离散性。建立以1/3倍频程为共同数据层、以速度和温度修正为条件、以重复测试和参考路面为质量控制的多尺度评价体系, 可提高材料吸声结果与现场降噪效应的解释一致性。

关键词: 多孔沥青路面; 轮胎—路面噪声; 吸声系数; 评价指标

Analysis of Current Research on Acoustic Performance Evaluation Methods for Porous Asphalt Pavements

Junfeng Sun^{1,*}, Lin Wang², Ce Zhou³, Minglei Jin³, Yushu Chu³, Rui Zhao³, Peng Na³

1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2. Heilongjiang Jiaotong Expressway Group Co., Ltd, Harbin 150028, China

3. Heilongjiang Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd, Harbin 150080, China

Abstract: Acoustic evaluation of porous asphalt pavements spans material sound absorption, tire–pavement coupling, and environmental propagation. Absorption coefficients, near-field sound pressure or intensity, and roadside pass-by sound levels represent distinct physical quantities. Based on measurement object, test scale, and engineering application, this review examines impedance tube testing, in situ sound absorption testing, tire impact and rolling tests, indoor drum testing, the close-proximity method (CPX), the on-board sound intensity method (OBSI), the statistical pass-by method (SPB), and the controlled pass-by method (CPB). These methods are compared in control conditions, frequency characterization, applicability, and major error sources. Impedance tube testing identifies the frequency-domain relationship between pore structure and sound absorption but cannot directly represent tire excitation. Indoor rolling tests facilitate mixture screening but are affected by tire characteristics, speed, and boundary reflections. CPX and OBSI are sensitive to pavement differences, whereas SPB and CPB better reflect actual resident exposure, although traffic composition and propagation increase variability. A multiscale evaluation framework using one-third-octave-band data, speed and temperature corrections, repeated measurements, and reference pavements can improve interpretive consistency between material sound absorption and field noise reduction.

Keywords: Porous asphalt pavement; Tire–pavement noise; Sound absorption coefficient; Evaluation index

道路交通噪声在中高速条件下主要源于轮胎—路面相互作用,其声源涉及胎面振动、空气泵吸、黏滑及路表纹理激励等^[1-2]。多孔沥青路面依靠连通孔隙吸收声能,并通过调整表面纹理和接触刚度降低滚动激励,是道路源头降噪的重要技术^[3]。现有评价方法覆盖小尺寸材料试件、室内轮胎—路面装置、随车近场测试和路侧通过测试。不同方法测到的物理量并不相同:吸声系数表征材料对入射声能的耗散,近场声压或声强反映轮胎接地附近声源,远场通过声级则还包含传播衰减、车辆工况与环境反射。若将上述结果直接并列,易将材料吸声改善等同于现场降噪量,或以单一总声级掩盖频域变化。因此,本文系统梳理了多孔沥青路面声学性能的主要室内与现场方法,比较其控制条件、适用场景和误差来源,并讨论吸声频域曲线、轮胎—路面近场噪声与远场交通噪声之间的联系,说明评价方法应依据研究目标组合,避免以单一试验结果表征全部声学性能。

1 评价对象与尺度划分

路面声学评价可划分为四个由内到外的尺度。材料尺度以吸声、表面阻抗和孔隙连通性为对象;室内耦合尺度以轮胎经过或持续滚压试件时的声压为对象;近场道路尺度在行驶车辆或测试系统上测量轮胎接地附近声压或声强;远场环境尺度以车辆通过时路侧接收点的声级为对象^[4-6]。尺度越接近服役道路,结果越能反映实际暴露,但交通组成、速度、温度、风和背景噪声带来的变异也越大。材料与室内方法适合机理识别和配合比筛选,近场方法适合高效率路段连续检测,远场方法适合验证道路对周边环境的综合影响。

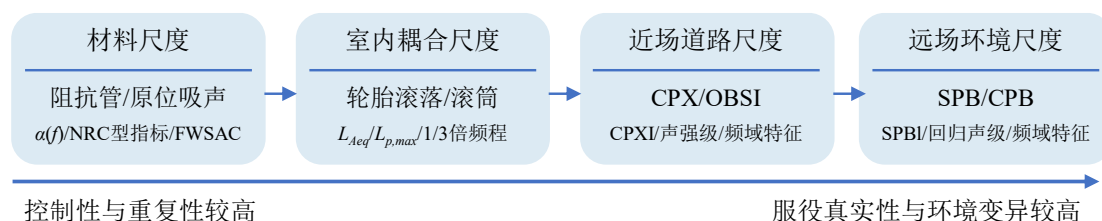


图1 多孔沥青路面声学性能的多尺度评价体系

Fig. 1 Multi-scale evaluation framework for the acoustic performance of porous asphalt pavements

2 室内评价方法

2.1 阻抗管与原位吸声测试

双传声器传递函数法按 ISO 10534-2 在阻抗管内形成近似平面波,由两测点复声压比求取法向入射反射系数与吸声系数^[7]。该法边界清晰、用样量小,适于识别孔隙率、连通孔隙、厚度及级配变化引起的吸声峰移动^[8-10];但低频结果易受管径、周边漏气和背腔影响,取芯也可能改变表面构造。因此试验报告应同时给出试件直径、厚度、背面封闭形式、温湿度、频率范围和重复样数量。原位吸声法将传声器阵列布置在实际路表上方,可减少取芯扰动并用于服役期连续观测,但有限尺寸、车流背景和路表非均匀性使反演过程更敏感^[11]。

两类结果的衔接应建立在相同频带和相近结构状态基础上。阻抗管测试宜选取多个位置的芯样,以降低表面构造与孔隙分布非均匀性造成的偏差;原位测试则应避开接缝、修补区及明显污染位置,并记录测点周围的有效铺面范围。比较两类结果时,可将窄带吸声系数转换为 1/3 倍频程均值,分析峰值频率、有效吸声带宽及频带积分量的变化方向。由于边界条件不同,两类方法更适合用于验证结构变化趋势,不宜依据吸声系数的绝对差值直接判定现场降噪量^[7,11]。

2.2 轮胎冲击、滚落与滚筒试验

轮胎垂直冲击、加速滚落和导向滚落试验以短时接触激励获得峰值或等效声级^[12-14]。其中滚落法能够保持轮胎转动状态,便于比较空隙率、试件厚度及轮胎类型的频域影响^[13]。试验装置应控制

释放高度、入射速度、轮胎气压与载荷、传声器距离及室内混响；分析时宜选取稳定接触区间，避免将撞击端部或离开试件时的短时声纳入评价。为获得更长的稳定滚动过程，可采用滚筒或轮载板装置，使轮胎在恒速恒载下反复作用^[15-16]。这类方法能够开展磨耗、堵塞或温度前后的重复比较，但筒面曲率、试件接口和封闭声场会改变接触形态与声传播，实测总值不宜直接作为现场值。

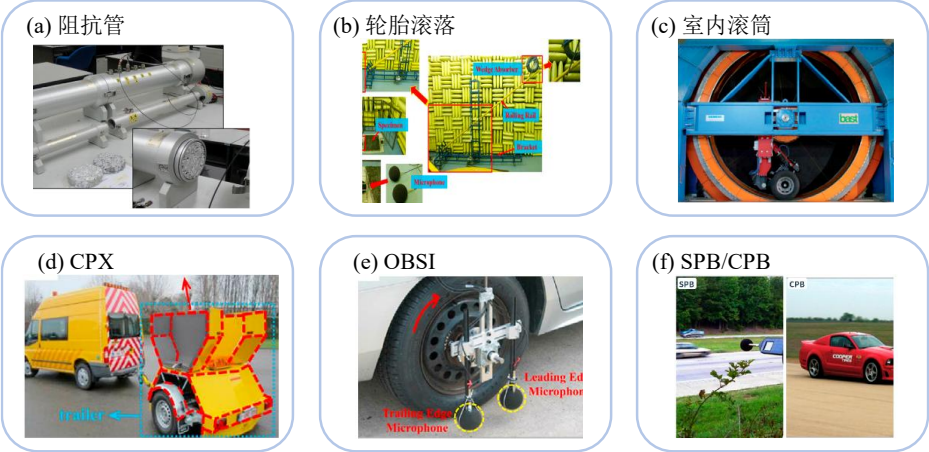


图 2 主要室内与现场声学评价方法示意^[2]

Fig. 2 Schematic of major laboratory and field acoustic evaluation methods^[2]

3 现场评价方法

3.1 统计通过法与控制通过法

统计通过法（SPB）在规定路侧位置记录自然交通车辆的最大 A 声级和速度，并按车型建立声级—速度回归关系，再计算路面影响指标 SPBI^[17-18]。该方法保留了实际交通和传播条件，适于比较不同路面在受声点处的综合效果；其可靠性依赖足够的有效样本、开阔场地、稳定车速和低背景噪声。控制通过法（CPB）使用指定车辆、轮胎和速度重复通过测试路段，降低交通组成的不确定性，适合新旧路面或两个试验段的对比^[19]。两种通过法均需记录气温、路表温度、风速风向、传声器高度与水平距离，并排除其他车辆、反射物和异常加减速。SPB 的统计代表性较强，CPB 的试验控制性更好，但二者测得的都是声源、传播与接收条件的综合响应，而非路面单一属性。

3.2 CPX 与 OBSI 近场方法

CPX 近场法按照 ISO 11819-2，将参考轮胎和传声器布置在专用测试系统或车辆附近，以规定速度连续测量轮胎—路面声压级^[20]。该方法对路面空间变化较为敏感，能够形成连续路段声级图，适用于施工验收和服役期定期检测^[21]。车载声强法（OBSI）将双传声器探头布置在轮胎前后接地区附近，利用声强的方向性减弱远处背景声影响^[22-24]。两种方法均需统一胎压、载荷、速度和探头几何位置，并对温度及设备系统偏差进行修正。CPX 的隔音结构可减少部分外界噪声干扰，但可能引入气动声和腔体反射；OBSI 具有较强的声源定位能力，但对探头间距、相位对应和支架振动更为敏感。

表 1 多孔沥青路面声学性能主要评价方法比较

Table 1 Comparison of principal acoustic evaluation methods for porous asphalt pavements					
尺度	方法	测量对象	主要指标	优点	局限性
材料	阻抗管 ^[7-10]	芯样法向入射吸声	α_{ij} 、峰值频率、频带均值	边界明确，重复性高，适用于配合比筛选	样品尺度较小；法向入射与现场扩散声场存在差异
材料	原位吸声 ^[11]	铺面表面反射与阻抗	原位吸声频域曲线、表面阻抗	无需取芯，可连续观测服役变化	低频精度和环境修正要求较高
室内	轮胎冲击/滚落 ^[12-14]	轮胎经过试件时的声压	L_{Aeq} 、 $L_{p,max}$ 、1/3 倍频程	装置结构简洁，可控制混合料与轮胎条件	速度作用过程较短，冲击和边界反射可能增大测试值

尺度	方法	测量对象	主要指标	优点	局限性
室内	滚筒/轮载板 [15-16]	稳态或循环 滚动噪声	声压级、频域特 征、声品质	速度稳定，可重复比较 磨损前后的变化	简面曲率及室内声场与实际 道路存在差异
近场	CPX ^[20-21]	参考轮胎近 场声压	CPXI、频域特 征	可连续测量，路段空间 识别能力较高	受参考轮胎、隔声结构气动 声和温度影响
近场	OBSI ^[22-24]	轮胎接地附 近声强	声强级、频域特 征	声源指向性较强，受背 景噪声干扰较小	探头布置及轮胎状态需保持 一致
远场	SPB ^[17-18]	自然车流最 大通过声级	回归声级、SPBI	接近实际交通暴露，可 区分车型与速度	所需样本量较大，并受交通 组成和传播环境制约
远场	CPB ^[19]	规定车辆与 速度通过声 级	$L_{A,max}$ 、频域特征	可控制车型、轮胎和速 度，适用于路面对比	测试组织成本较高，仍受气 象与场地条件影响

4 指标体系与多尺度结果解释

4.1 材料吸声指标

阻抗管结果应保留完整吸声频域曲线，并报告峰值吸声系数、峰值频率和目标频带均值。NRC 型平均值虽常用作综合指标，但多孔沥青吸声峰可能偏离中心频率，且交通噪声能量随车速、车型和路面状态变化，单一均值易高估与交通频域不重合的吸声能力。故可在统一 1/3 倍频程数据层上，按目标交通噪声能量占比计算各频带吸声系数，形成频带能量占比吸声指标。频带加权指标应基于目标交通条件下的实测噪声谱计算，将各 1/3 倍频程声级转换为线性能量，求各频带能量占比，再与相应吸声系数相乘并求和，以反映材料吸声频带与交通噪声优势频带的重合程度。其数值取决于参考车辆、速度和测量位置，因此应同时公布权重来源、频率上下限及各频带权重，避免不同交通场景采用同一组固定系数。用于配合比比较时，还应与吸声峰位置和有效带宽联合分析^[2,8-10]。

4.2 滚动噪声与通过声级指标

滚落、滚筒、CPX、OBSI 和通过法宜同时报告 A 声级与 1/3 倍频程结果。总声级可用于工程排序，频域特征则用于识别胎面振动占优的低中频、空气泵吸及孔隙吸声显著的中高频。不同装置间不宜直接比较实测总值，可采用同一装置内的参考路面差值、速度归一化后的变化量或相对降噪率。材料吸声与滚动噪声之间不存在一一对应关系：连通孔隙改善可能提高中高频吸声，但会随表面堵塞和孔隙塌陷衰减^[25]；温度会同时改变橡胶胎面和沥青混合料刚度，进而影响通过声级。因此，不同尺度结果的解释至少应同步记录孔隙率、表面纹理、温度、速度、轮胎和服役状态。

4.3 质量控制与方法组合

可比性取决于试验条件的完整记录。室内测试应报告设备构成、声场处理、样品数量、轮胎状态和数据时段；现场测试应报告测线、速度分布、路表温度、气象条件、背景噪声及有效样本数。各项结果宜给出平均值、标准差和重复次数，并在测试前后进行声学校准。SPB 和 CPB 可通过声级—速度回归或规定速度条件进行归一化；CPX 与 OBSI 宜设置参考路面或固定控制段，以区分路面差异、设备系统变化和季节变化^[17,20,23]。当背景噪声接近目标信号时，应按相应标准修正；不能修正的数据不予采用，也不能仅凭总声级差异作出结论。

评价方法的组合应依据研究目标确定。配合比研究需具有较高重复性的材料与室内试验结果，施工验收需连续路段数据，耐久性研究则需在相近季节和交通条件下开展长期重复测量。表 2 列出了 4 类常见研究目标的组合。组合评价用于检验不同尺度变化方向的一致性；当吸声性能提高而近场声级未同步降低时，应进一步分析纹理激励、轮胎状态及吸声频带与主要声能分布的对应关系。

跨尺度比较应以频带统一、工况可追溯和结果相对化为基本要求。首先，将阻抗管、室内滚动和现场测试结果统一至相同的 1/3 倍频程中心频率；其次，记录轮胎、速度、温度、路表状态及测试时间，使不同尺度的差异可追溯至明确条件；最后，以同一参考混合料或参考路面为基准计算相对变化量。若材料吸声、室内滚动噪声和近场声级变化方向一致，可认为配合比差异具有较稳定的声学响应；若近场与远场结果不一致，则需进一步考察交通组成、传播距离和周边反射^[4-6,20-24]。

表 2 不同研究目标下的评价方法组合

Table 2 Combinations of acoustic evaluation methods under different research objectives				
研究目标	建议方法	主控因素	主要结果	分析重点
配合比筛选	阻抗管+轮胎滚落 ^[7-10,13-14]	厚度、空隙率、轮胎、速度	吸声频域曲线、频带均值、相对声级	吸声频带与滚动噪声频带的对应关系
结构机理识别	阻抗管+原位吸声+纹理与孔隙测试 ^[7-11,25]	取样位置、表面状态、背腔、温度	吸声峰、表面阻抗、构造与连通孔隙	结构变量对声学响应的独立影响
施工验收	CPX 或 OBSI+CPB ^[19-24]	参考轮胎、速度、胎压、测试位置	路段连续声级、参考路面差值	局部异常与路段平均效果
服役耐久	原位吸声+CPX 或 OBSI+SPB ^[11,17-18,20-21,25]	测试季节、交通状态、清洁程度、同一测线	吸声衰减、近场声级变化、SPBI	堵塞、磨损与环境变化的区分

5 现存问题与发展方向

现有研究的主要限制在于不同测试结果缺少统一参照体系：实验室所报告的频率范围、平均方式和背景修正方法仍未统一，样品尺寸与重复数量常被省略；室内装置多采用自制结构，声场边界和轮胎工况难以进行装置间比较；现场研究常仅给出 A 声级差值，缺少与孔隙堵塞、表面纹理演化和吸声频域衰减的同步观测；新铺路面的短期降噪数据较多，长期声学耐久性资料仍较为有限。为此，材料阶段宜确定吸声频带和结构敏感性，室内阶段在控制轮胎与速度条件下筛选设计，现场阶段采用近场方法进行连续检测，并以通过法验证典型路段。各层应统一采用 1/3 倍频程、参考路面和元数据清单，并报告重复性与再现性指标。结合路面纹理、连通孔隙和气象数据开展不确定度分析，可提高不同装置、不同路段和不同服役期结果的可比性。

后续研究需加强声学性能衰减的连续观测。测试时间点宜覆盖新铺、初期稳定、污染堵塞和养护恢复等阶段，并同步测量空隙率、渗透性能、表面构造及交通荷载，以辨识声学变化的主控因素。对于跨地区数据，可建立包含设备类型、参考轮胎、道路结构、气象条件和频谱结果的标准化数据库，并分解量化试件差异、重复测量误差、车辆波动和环境修正误差。在此基础上形成按道路等级和交通速度划分的评价阈值，能够提高实验室筛选、施工验收与服役性能评估之间的连续性。

6 结论

- (1) 多孔沥青路面声学评价可划分为材料吸声、室内轮胎—路面耦合、近场滚动噪声和远场环境噪声四个尺度。各尺度测量对象不同，吸声系数、近场声压或声强与路侧通过声级不能相互替代；
- (2) 阻抗管适合机理识别和混合料筛选，轮胎滚落及滚筒试验适合受控比较，CPX 与 OBSI 适合连续路段评价，SPB 与 CPB 适合验证实际受声影响。方法选择应由研究目标决定，并通过参考路面、重复测量及速度、温度和轮胎条件统一控制；
- (3) 以 1/3 倍频程为共同数据层，同时保留 A 声级和频域信息，并将吸声频带与目标交通噪声频域分布相对应，可减少单一平均吸声指标或单一总声级造成的误解。多尺度组合试验是解释材料结构、滚动声源和服役降噪之间关系的合理路径。

参考文献

- [1] Sandberg U, Ejsmont J A. Tyre/Road Noise Reference Book[M]. Kisa: Informex, 2002.
- [2] 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.
- [3] 续安城, 朱洪洲. 道路交通噪声产生机理与防治措施研究综述[C]/2024 世界交通运输大会论文集(交通工程). 2024: 718-725.
- [4] Li T. A state-of-the-art review of measurement techniques on tire-pavement interaction noise[J]. Measurement, 2018, 128: 325-351.
- [5] Bernhard R J, McDaniel R S. Basics of noise generation for pavement engineers[J]. Transportation Research Record, 2005, 1941(1): 161-166.
- [6] Crocker M J, Hanson D, Li Z, et al. Measurement of acoustical and mechanical properties of porous road surfaces and tire and road noise[J]. Transportation Research Record, 2004, 1891(1): 16-22.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Nelson J T, Kohler E, Öngel A, et al. Acoustical absorption of porous pavement[J]. Transportation Research Record, 2008, 2058(1): 125-132.
- [11] 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.
- [12] Li B, Kang H W, Han S, et al. 基于轮胎加速下落法的水泥混凝土路面噪声特性[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(7): 59-62.
- [13] Zhang Y W, Han S, Liu Y M. Study of influence factors of noise performance of porous asphalt pavement based on tire-rolling-down method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(3): 79-84.
- [14] Ren W, Han S, Fwa T F, et al. A new laboratory test method for tire-pavement noise[J]. Measurement, 2019, 145: 137-143.
- [15] Zhang H, Liu Z, Meng X. Noise reduction characteristics of asphalt pavement based on indoor simulation tests[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 285-297.
- [16] Ullrich S. Tire noise testing on a laboratory roadwheel[J]. Sound and Vibration, 1993, 27(10): 10-14.
- [17] ISO 11819-1:2023. Acoustics—Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise—Part 1: Statistical Pass-By method[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [18] Copeland A, Wilhoit J. Statistical pass-by measurements on pavements in California[R]. Sacramento: California Department of Transportation, 2012.
- [19] Buret M, McIntosh J, Simpson C. Comparative assessment of low-noise pavements by ISO 11819 and OBSI[C]/INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2014, 249(5): 2871-2879.
- [20] ISO 11819-2:2017. Acoustics—Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise—Part 2: The close-proximity method[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [21] Vuye C, Bergiers A, Vanhooreweder B. The acoustical durability of thin noise reducing asphalt layers[J]. Coatings, 2016, 6(2): 21.
- [22] Donovan P R. Measuring tire-pavement noise at the source[R]. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2009.
- [23] AASHTO TP 76-13. Standard method of test for measurement of tire/pavement noise using the on-board sound intensity method[S]. Washington, D.C.: AASHTO, 2014.
- [24] Wang G H, Roeder A, Amirkhanian S, et al. On-board sound intensity tire-pavement noise study in North Carolina[R]. Raleigh: North Carolina Department of Transportation, 2011.
- [25] 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.

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。