



基于车辙试验仿真的沥青混合料力学与运动特性研究

胡奕琦¹, 王修山², 李震南¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江建设职业技术学院建筑设备学院, 杭州 311231)

摘要: 为进一步揭示不同类型沥青混合料在压密过程中的细观行为演化规律, 利用离散元软件建立三维车辙模型, 并通过智能颗粒监测结果对离散元模型精度进行验证, 探究 SMA-13、AC-13 和 AC-20 沥青混合料车辙演化过程中的细观运动规律和力学特性, 并分析不同粒径针片状骨料含量对内部应力的影响。结果表明: 车辙发展过程可分为初始压密与稳定蠕变两个阶段, 骨料平移与转动行为与车辙深度发展规律一致。SMA-13 骨料平动与转动幅度小, 接触力链分布均匀, 且传递效率高, 表现出最优的抗车辙能力; AC-13 骨料间接触较弱, 在荷载作用下易发生相对位移与转动, 高温稳定性较差; AC-20 因大粒径骨料增强了骨架的承载与约束作用, 性能居二者之间。针片状骨料含量显著降低了混合料内部应力的传递效率, 其中 SMA-13 中 9.50~13.20 mm 档位影响最突出, 因此该档位粒径针片状骨料含量宜控制在 10% 以下。该研究从细观角度揭示了沥青混合料的压密机理, 可为混合料设计、集料形态控制提供新的思路与理论依据。

关键词: 沥青混合料; 智能颗粒; 离散元; 针片状骨料含量; 车辙试验; 运动与力学特性

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)05-0239-10

引文格式: 胡奕琦, 王修山, 李震南. 基于车辙试验仿真的沥青混合料力学与运动特性研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 239-248.

Reference Format: HU Yiqi, WANG Xiushan, LI Zhennan. A study on the mechanical and kinematic characteristics of asphalt mixtures based on rutting test simulation[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 239-248.

A study on the mechanical and kinematic characteristics of asphalt mixtures based on rutting test simulation

HU Yiqi¹, WANG Xiushan², LI Zhennan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Construction Equipment, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: To further reveal the evolution of mesoscopic behavior during the compaction process of different types of asphalt mixtures, a three-dimensional rutting model was established using discrete element software, and its accuracy was verified by smart rock monitoring. The mesoscopic movement patterns and mechanical properties of SMA-13, AC-13, and AC-20 asphalt mixtures during rutting evolution were investigated, and the influence of flaky aggregate content in different particle sizes on the internal stress was also examined. The results show that the rutting development process can be divided into two stages: initial compaction and stable creep, with the translation and rotation behavior of aggregates consistent with the progression of rutting depth. SMA-13 exhibits the best rutting resistance

收稿日期: 2025-12-19 网络出版日期: 2026-01-26

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LGF22E080016)

作者简介: 胡奕琦(2001—), 男, 杭州人, 硕士研究生, 主要从事道路工程方面的研究。

通信作者: 王修山, E-mail: wxs77777@163.com

due to its small aggregate translation and rotation amplitudes, uniform distribution of contact force chains, and high transmission efficiency. In contrast, AC-13 shows weaker inter-aggregate contact, leading to pronounced relative displacement and rotation under load and thus poorer high-temperature stability. AC-20, with its larger aggregates enhancing the load-bearing capacity and structural confinement of the skeleton, demonstrates intermediate performance between SMA-13 and AC-13. The content of flaky aggregates significantly reduces the efficiency of internal stress transmission within the mixture, with the 9.50-13.20 mm fraction in SMA-13 having the most notable impact. Therefore, it is recommended that its content should be controlled below 10%. This study reveals the compaction mechanism of asphalt mixtures from a mesoscopic perspective, providing new insights and theoretical foundations for mixture design and aggregate morphology control.

Key words: asphalt mixture; smart rock; discrete element; flaky aggregate content; rutting test; motion and mechanical properties

0 引言

沥青路面凭借平整性好、噪声低、施工高效及行车安全等优点,已成为高等级公路最主要铺装形式,目前中国 95% 以上的高速公路均采用该类型路面^[1]。然而,在长期交通荷载与环境因素的耦合作用下,沥青路面易产生车辙病害;该病害会严重降低路面平整度与行车舒适性,是沥青路面主要的结构性破坏形式之一^[2]。车辙的产生与演化,本质上与沥青混合料内部骨料的运动状态密切相关。传统研究多依赖宏观力学试验与高度理想化的数值模型,虽能反映部分宏观力学响应,但难以真实、精细地刻画实际不规则骨料的形态及其在荷载作用下的细观运动行为,因而在揭示车辙形成的细观机理方面存在局限。

随着沥青混合料研究的深入,相关研究重点逐渐由宏观分析转向微细观机理的阐释。不少学者借助 CT 扫描和数字图像处理技术,从细观角度揭示沥青混合料的演化特征^[3]。Hassan 等^[4]通过 CT 扫描技术获取不同强度和形状骨料的马歇尔试件及车辙试件的内部骨架结构,发现骨料形态是影响混合料力学性能更为关键的因素;刘文昶等^[5]采用黄铜矿替代 9.5~13.2 mm 粒径的集料,并借助 CT 扫描技术实现了车辙试验过程中集料位移的细观追踪;Shi 等^[6]利用数字图像处理技术系统分析了沥青混合料中粗骨料的细观运动,揭示了骨料运动行为与混合料车辙发展的内在关联。

为进一步揭示细观机理,研究者从数值模拟的角度进行了分析。Cao 等^[7]通过离散元建立了压实模型,并分析了压实过程中颗粒的运动;念腾飞等^[8]构建了具有真实骨料形态的车辙试验离散元模型,并基于时温等效原理标定了各温度沥青胶浆的细观

参数;Ma 等^[9]采用 PFC^{2D} 构建仿真车辙模型,揭示了粗骨料运动及骨架接触力的演化规律;王强等^[10]则通过车辙试验与离散元模拟相结合的方法,揭示了单层与双层再生沥青混合料路面车辙演化的两阶段规律及层间剪应力分布特性;严兵等^[11]通过离散元软件构建单轴贯入试验模型,并对混合料骨架进行了优化设计;Li 等^[12]构建了单轴贯入试验模型,并分析了骨料形态对混合料运动特性以及裂纹发展的影响;邬金麒等^[13]通过构建真实骨料的三维马歇尔模型,对材料内部结构及力学响应进行了更为准确的表征。

近年来,智能传感技术的发展为细观研究提供了新的手段。Dan 等^[14]通过嵌入智能颗粒传感器开展现场与室内试验,揭示了振动压实过程中路面内部动态响应与外部压实参数之间的定量关系;张德等^[15]在桥梁面现场施工时埋入智能颗粒,分析了不同碾压作用下颗粒的细观动态响应规律;Wang 等^[16]通过智能颗粒开展双层沥青混合料车辙试验,采用可靠性指数来量化车辙深度演化规律;王修山等^[17]通过智能颗粒监测了不同工况条件下骨料的应力与加速度变化情况。

尽管已有研究在沥青混合料细观监测与数值模拟方面取得了重要进展,但现有三维车辙模型在细观运动数据监测的验证方面尚不充分,仅通过车辙深度变化来评判模型的准确性存在一定片面性;针对不同沥青混合料在压密过程中细观运动与力学响应的系统性对比分析仍较为缺乏;针片状骨料作为影响骨架稳定性的关键因素,其不同粒径范围含量对沥青混合料内部应力的影响尚未得到明确量化。为此,本文融合智能颗粒监测技术与三维离散元仿真方法,建立并验证三维车辙数值模型,系统分析 SMA-13、AC-13 与 AC-20

这3种典型沥青混合料在车辙加载过程中的细观运动与力学特性差异,并探究 SMA-13 中不同粒径档位针片状骨料含量对内部应力分布的影响。本文从细观角度阐明各沥青混合料抗车辙性能的结构机理,明确针片状骨料的临界控制含量,可为优化混合料设计、实现集料形态的精细化控制提供一定的理论依据与数据支持,以提升沥青路面的长期服役性能与耐久性。

1 试验材料与试验方案

1.1 沥青

本文试验中 AC-13、AC-20 沥青混合料采用 70# 基质沥青, SMA-13 沥青混合料采用 SBS 改性沥青,并依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)对沥青进行基本性能测定,测定结果如表 1 所示。

表 1 沥青性能指标

试验指标	70# 基质沥青		SBS 改性沥青	
	试验结果	规范要求	试验结果	规范要求
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm	68	60~80	55	40~60
软化点/°C	48.5	≥46	80	≥60
延度(15 °C)/cm			36	≥20
延度(5 °C)/cm	136	≥100		
密度/(g·cm ⁻³)	1.029	实测	1.022	实测

1.2 集料

本文所用集料为石灰岩,来自杭州市沥青拌和有限公司。根据《公路工程集料试验规程》(JTJ 3423—

2024)对集料进行性能指标测定,测试结果如表 2 所示,从表 2 可以发现,集料性能均满足要求。填料选取石灰岩加工而成的矿粉,技术指标满足要求。

表 2 粗细集料性能指标

集料	试验指标	试验结果	规范要求	试验方法
粗集料	压碎值/%	21.8	≤26	T0316
	洛杉矶磨耗损失/%	19.6	≤28	T0317
	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.71	≥2.6	T0308
	黏附性	4 级	≥4 级	T0616
	磨光值	48.9	≥42	T0321
	针片状含量	10.8	≤15	T0312
细集料	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.68	≥2.5	T0330
	坚固性/%	1.2	≤12	T0340
	砂当量/%	83	≥60	T0334
	亚甲蓝值/(g·kg ⁻¹)	17.8	≤25	T0349
	棱角性(流动时间)/s	43.8	≥30	T0345
	含泥量/%	0.7	≤3	T0333

1.3 智能颗粒

智能颗粒,是一种为满足铁路有砟道床与公路路面在受力、变形及稳定性等方面的细观监测需求而研制的耐高温传感器^[18]。其尺寸为 23 mm×23 mm×23 mm,内部集成了耐高温三轴应力传感器、三轴加速度传感器、三轴磁力计、低功耗蓝牙和耐高温电池等精密元件,并由 3D 打印外壳封装而成。试验过程中,智能颗粒内置的精密传感器实时采集应力、加速度等数据,并通过信号接收器将数据传输至云端平台。智能颗粒实物照片及工作示意图如图 1 所示。

1.4 级配组成

车辙试验选用 SMA-13、AC-13 以及 AC-20 的沥青

混合料,并确定油石比分别为 6.3%、4.8%以及 4.1%,其级配组成由表 3 所示,级配曲线如图 2 所示。

1.5 室内车辙试验

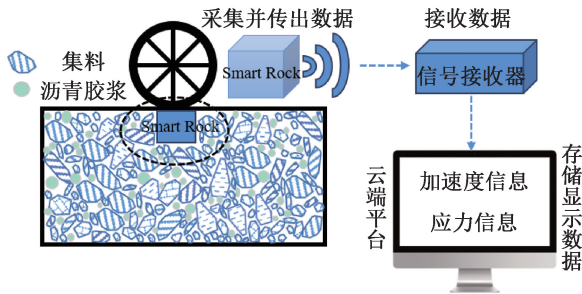
依据 1.4 节中的设计配合比,称取矿料与沥青,于 175 °C 烘箱中加热 4 h,在预热至 170 °C 的拌和机中加入矿料与沥青进行拌和;拌和完成后,将混合料均匀摊铺于预热至 100 °C 的试模中,经 LHCK-1 沥青混合料车辙试样成型机碾压成型为 300 mm×300 mm×50 mm 的标准试件。在试件中心位置嵌入 smart rock 智能颗粒,通过 SmartRock_BLE_GUI 软件连接并关闭睡眠模式。将试件置于 60 °C 的 LHCZ-5 全自动沥青混合料车辙试验机中,以

0.7 MPa 轮压、42 次/min 的频率进行往复碾压试验,同步采集智能颗粒数据。试验结束后停止采集,

取出智能颗粒并清洁表面。室内车辙试验流程如图 3 所示。



(a) 实物照片



(b) 工作示意图

图 1 智能颗粒实物照片及工作示意图

表 3 各沥青混合料合成级配表

筛孔尺寸/ mm	沥青混合料通过率/%		
	SMA-13	AC-13	AC-20
26.500	100.0	100.0	100.0
19.000	100.0	100.0	94.8
16.000	100.0	100.0	84.1
13.200	93.4	94.1	72.6
9.500	56.3	78.2	63.5
4.750	29.9	55.1	41.6
2.360	24.7	39.2	29.7
1.180	18.8	27.3	21.8
0.600	14.2	18.6	15.4
0.300	12.6	14.2	10.7
0.150	11.2	9.6	8.1
0.075	9.6	5.2	5.3

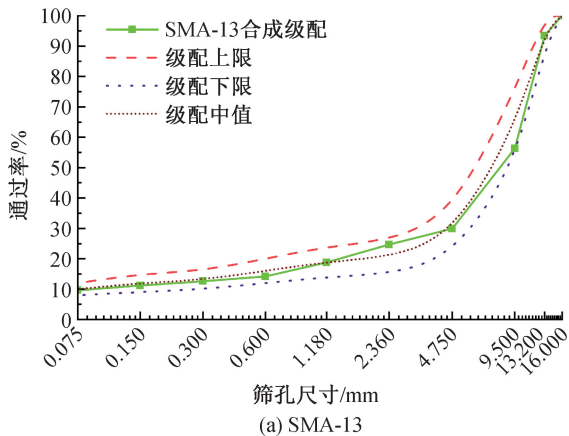
2 车辙模型建立

2.1 车辙模型参数确定

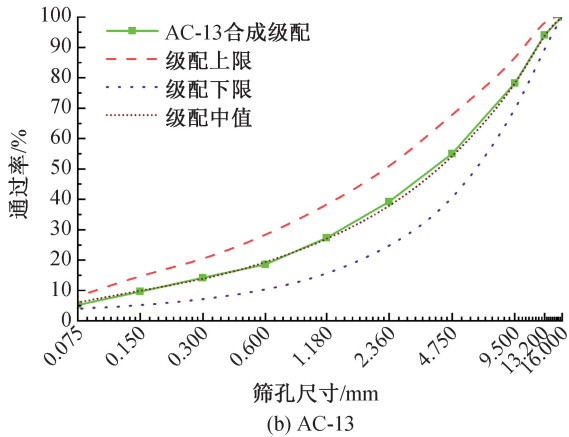
集料与集料之间的接触采用线性刚度模型,胶浆与胶浆以及胶浆与集料之间的接触采用 Burgers 模型,各组间接触所对应的本构模型如图 4 所示。

本文采用石灰岩,其宏观参数参照《岩石力学与工程》^[19] 设置,弹性模量范围为 10~80 GPa,泊松比范围为 0.20~0.35,综合考虑后设置石灰岩的弹性模量为 41 GPa,泊松比为 0.23,密度为 2700 kg/m³。集料间接触采用线性刚度模型,由于使用不同粒径的 Clump 单元模拟粗骨料,无法直接通过理论公式计算接触刚度,因此本文选用 contact method 进行刚度赋值,设定集料的弹性模量 deform 为 41 GPa,并取法向与切向刚度比 kratio 为 1/0.23。

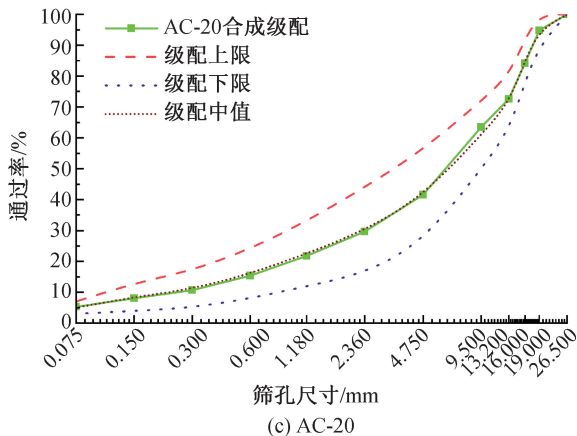
在车辙试验仿真过程中,由于计算机计算性能限制,为平衡计算精度与效率,将沥青以及粒径小于 2.36 mm 的细集料视为沥青胶浆^[8,20-23],并用半径为 1.00 mm 的小圆球等效替代。集料与胶浆、胶浆



(a) SMA-13



(b) AC-13



(c) AC-20

图 2 各沥青混合料合成级配曲线

与胶浆间接触采用 Burgers 模型,其宏观参数依据高虎等^[24]在 60 °C 下开展的沥青砂浆的短期蠕变试

验拟合结果确定,各沥青混合料 60 °C 下沥青胶浆 Burgers 接触模型的宏观参数如表 4 所示。

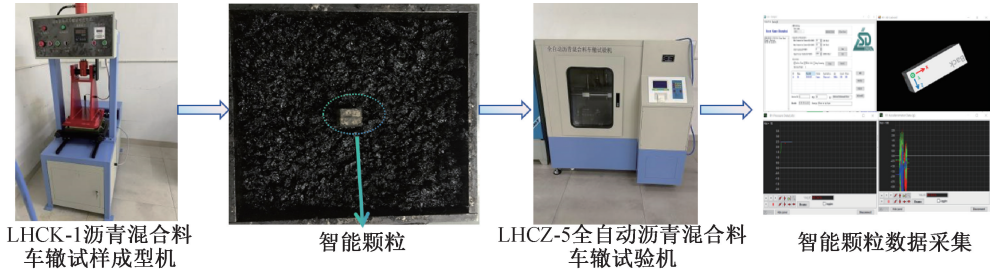


图 3 室内车辙试验流程图

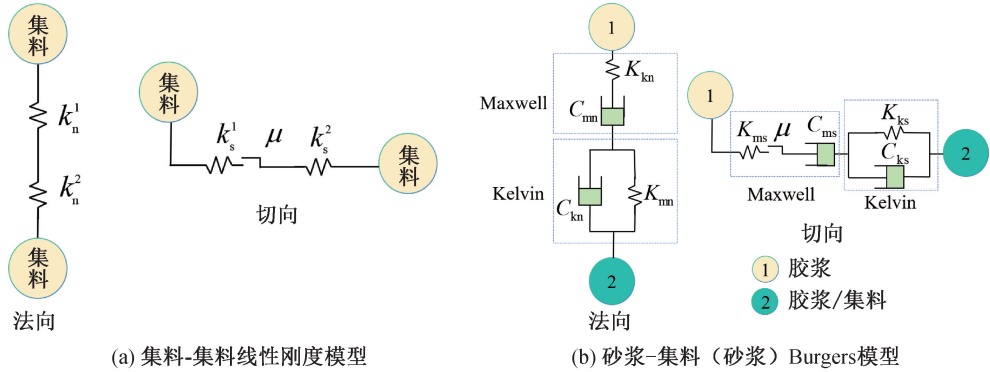


图 4 各组分接触本构模型

表 4 60 °C 下不同沥青胶浆 Burgers 接触模型宏观参数

沥青混合料类型	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$
SMA-13	0.5690	0.3290	973.214	65.412
AC-13	0.8123	0.1225	1143.500	45.090
AC-20	0.3890	0.2303	735.844	47.801

Burgers 模型细观参数由式(1)—(8)计算:

$$C_{mm} = \eta_1 l \quad (1)$$

$$C_{ms} = \frac{\eta_1 l}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$K_{mn} = E_1 l \quad (3)$$

$$K_{ms} = \frac{E_1 l}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$C_{kn} = \eta_2 l \quad (5)$$

$$C_{ks} = \frac{\eta_2 l}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$$K_{kn} = E_2 l \quad (7)$$

$$K_{ks} = \frac{E_2 l}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

沥青胶浆 Burgers 接触本质上是 2 个沥青胶浆颗粒构成的串联体系,因此由材料本体性质计算得到的参数需乘以 2,方能准确表征该接触模型的力学响应。

2.2 车辙模型构建

室内试验标准车辙试件尺寸为 300 mm×300

mm×50 mm,若直接建立该尺寸的离散元模型,将生成过多颗粒,计算效率过低。为提高计算效率,本文参考既有研究方法^[25],将模型尺寸简化为 300 mm×50 mm×50 mm 的长梁形试件。因仿真试验中无法精确模拟车轮的动态加载,参考已有研究^[17,26-28],通过在模型顶板中心生成 50 mm×50 mm 的加载板,并施加 0.7 MPa 的静态荷载来等效模拟车轮的动态碾压。车辙模型试件等效加载示意图如图 5 所示。

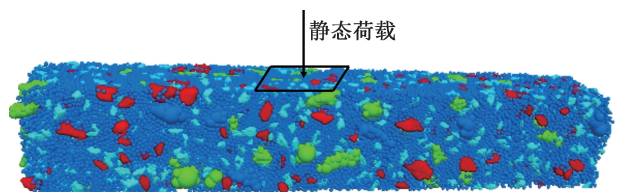


图 5 车辙模型试件等效加载示意图

静态荷载的作用时间需等效于动态车轮的碾压过程,经计算可得等效荷载作用时间 T 为 342 s,这在仿真试验中需要消耗大量的时间。为实现高效计算,本文引入时间缩减因子 λ ,基于时温等效原理对

Burgers 模型中的黏弹性参数进行修正^[29],从而在保持力学响应等效的前提下大幅缩短模拟时间。修正公式由式(9)–(11)表示:

$$T = \lambda T' \quad (9)$$

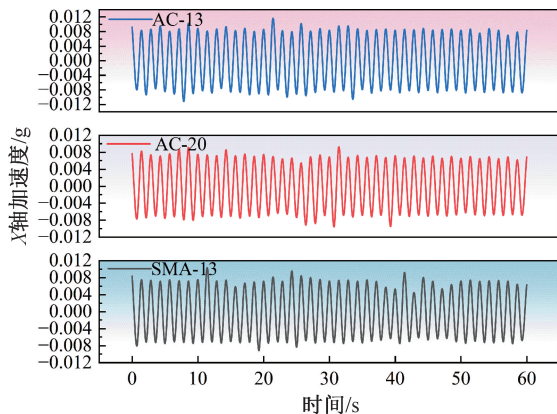
$$\bar{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{\lambda} \quad (10)$$

$$\bar{\eta}_2 = \frac{\eta_2}{\lambda} \quad (11)$$

$$\epsilon(T, t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t/\lambda}{\eta/\lambda} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t/\lambda}{\eta_2/\lambda}} \right) \right] = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t'}{\bar{\eta}_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t'}{\eta_2}} \right) \right] \quad (12)$$

其中: T 为等效荷载作用时间, T' 为等效缩短时间。

根据相关研究,将时间缩减因子 λ 控制在 10000 以内,既可保证计算结果的稳定性,又能满足模拟精度的要求^[30]。因此本文设定时间缩减因子 λ 为 10000,据此仿真加载时间缩减至 0.0342 s。

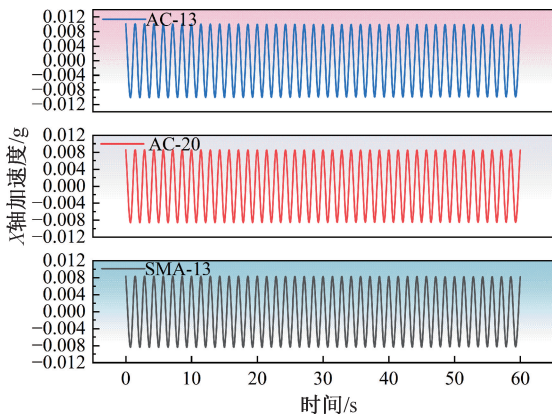


(a) 智能颗粒监测 X 轴加速度

3 结果与讨论

3.1 车辙试验模型验证

为验证模型的准确性,本文选取加载稳定阶段的 X 轴加速度监测数据进行对比分析,结果见图 6。从图 6 中可以看出:智能颗粒实测的 X 轴加速度变化趋势与仿真试验结果基本吻合。尽管实测数据因室内试验环境波动而存在一定幅值波动,但剔除异常峰值后,两者仍具有较高的一致性,其中: SMA-13、AC-13、AC-20 仿真试验 X 轴平均加速度分别在 $-0.00835g \sim 0.00835g$ 、 $-0.0101g \sim 0.0101g$ 、 $-0.00851g \sim 0.00851g$ 之间;相应室内试验试验结果分别在 $-0.00723g \sim 0.00723g$ 、 $-0.00869g \sim 0.00869g$ 、 $-0.00733g \sim 0.00733g$ 之间。三者 X 轴加速度幅值差异依次为 13.4%、13.9%、13.87%,均低于 15%,表明所建立的车辙模型具有良好的可行性与可靠性。



(b) 车辙仿真试验 X 轴加速度

图 6 室内与仿真车辙试验 X 轴加速度变化曲线

3.2 沥青混合料虚拟车辙演化规律研究

在仿真试验中,加载板竖向位移可以反映车辙深度,因此利用 History 命令监测加载板竖向位移,并通过时间-时步转换关系将计算时步转化为实际时间,绘制车辙深度发展曲线,结果如图 7 所示。图 7 表明,3 种沥青混合料的车辙深度发展曲线变化规律较为相似,均可分为初始压密和稳定蠕变两阶段。初始压密阶段车辙深度随时间增加而迅速增大,这主要是因为荷载的初始作用下,混合料内部空隙被压缩,骨料发生调整并趋于密实;随着加载进行进入稳定蠕变阶段,此时车辙深度增长缓慢,混合料已充分压实,内部骨架结构也已基本稳定。

为进一步验证模型准确性,将仿真试验与室内试验所得的永久变形量进行比较,结果如表 5 所示。对比表 5 中不同沥青混合料试件的仿真与室内车辙

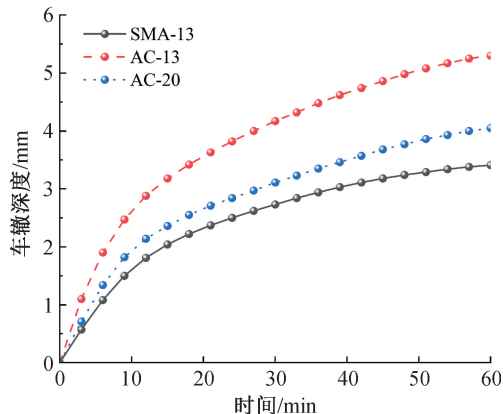


图 7 模型试验车辙深度发展曲线

试验永久变形量,可以发现仿真试验结果均高于室内试验值。产生该差异主要是因为建立数字模型时,将粒径小于 2.36 mm 的集料与沥青统一简化为 1.00 mm 的沥青砂浆,导致数字试件的空隙率高于真实试

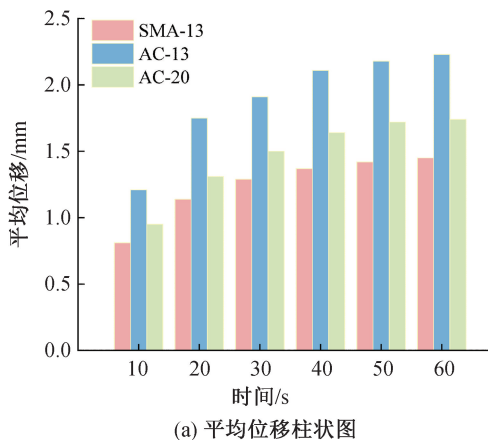
件,进而使得仿真试验中的车辙深度预测值偏大。在 3 种沥青混合料中, SMA-13 的误差最小,仅为 7.57%; AC-13 的误差最大,达到 10.18%。产生该差异与材料组成有关, AC-13 中沥青胶浆比例达到了 48.10%, 高于 SMA-13 的 38.00%, 因此误差相应增大。尽管仿真模型与真实试件的永久变形量存在偏差,但三者误差均小于 10.50%, 处于合理范围内,这进一步验证了仿真车辙试验方法的可行性与可靠性。

表 5 仿真车辙试验与室内车辙试验永久变形量

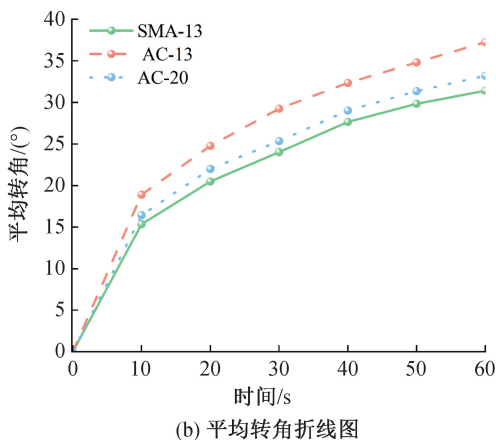
沥青混合料类型	永久变形量/mm		误差/%
	仿真试验	室内试验	
SMA-13	3.41	3.17	7.57
AC-13	5.30	4.81	10.18
AC-20	4.05	3.71	9.16

3.3 沥青混合料压密过程运动与力学特性研究

在加载过程中,骨料在荷载作用下发生平移和旋转,骨料运动主要集中于加载区域下侧,因此对 5 mm × 5 mm × 5 mm 的加载区域内的骨料运动进行分析,图 8 为加载过程中骨料的平均位移及转角演化规律。



(a) 平均位移柱状图



(b) 平均转角折线图

图 8 车辙试验骨料平均位移柱状图及平均转角折线图

车辙试验中,沥青混合料内部的力学响应随加载时间呈现显著的动态演化,图 9 为车辙试验前后接触力链的分布情况。根据图 9 所示,在车辙加载过程中,荷载主要沿竖向自上而下传递,并显著集中于加载区域附近;沥青混合料内部以压应力为主导,且该压应力随加载进行逐步增大。

为从细观尺度定量评估骨料在荷载传递中的作用,对混合料内部接触力进行统计分析,结果如图 10 所示。从图 10 可以看出: SMA-13 与 AC-20 的平均接触力以及骨料间接触力占比均显著高于 AC-13。这一差异主要源于三者各异的细观传力机制。SMA-13 内部骨料接触点数量多、分布均匀,形成了密集而稳定的力链网络,荷载主要通过刚性接触高

车辙的形成源于细观骨料的运动。由图 8 可知:在荷载作用下,骨料通过平移与旋转不断调整空间位置,重构骨架以抵抗外部荷载;而且骨料的平均位移与转角的变化趋势与车辙深度发展曲线高度一致。这表明宏观永久变形实质上是细观尺度上骨料运动的累积结果。

对比 SMA-13 与 AC-13 混合料发现,在最大粒径相同的情况下, SMA-13 中骨料的平均位移与转角均小于 AC-13。这主要归因于 SMA 混合料为骨架密实型结构,粗骨料间相互嵌挤形成紧密稳定的骨架,显著限制了骨料的平移与转动;而 AC 混合料为悬浮-密实型结构,粗集料悬浮于沥青胶浆中,骨架对整体运动的约束作用弱,在荷载作用下更易发生相对位移及转动,因此骨架密实型结构在承受荷载时表现出更强的抗变形能力。进一步对比 AC-13 与 AC-20 混合料发现,在混合料类型相同的情况下,沥青混合料抵抗荷载变形的能力随着最大公称粒径的增加而增强,这表明在合理的级配设计下增大集料粒径有助于提升混合料整体骨架的稳定性。

效传递,沥青胶浆主要起黏结与填充作用,因而表现出较高的平均接触力与荷载传递效率; AC-13 中骨料间有效接触较少,骨架未能形成主导传力路径,荷载传递很大程度上依赖于沥青胶浆的黏弹性流动,导致骨料骨架的传力占比较低,整体承载能力相对较弱; AC-20 的骨架接触密集程度虽不及 SMA-13,但其粗骨料粒径较大,所形成的宏观骨架刚度较高,因而仍具备较强的竖向荷载承担与传递能力。

3.4 不同粒径针片状骨料含量对沥青混合料内部应力影响

针片状集料是指长度或宽度与厚度方向尺寸比值大于 3 的集料,本文建立三维车辙模型时选用的针片状集料 stl 文件及生成的 Clump 模型图如图 11 所示。

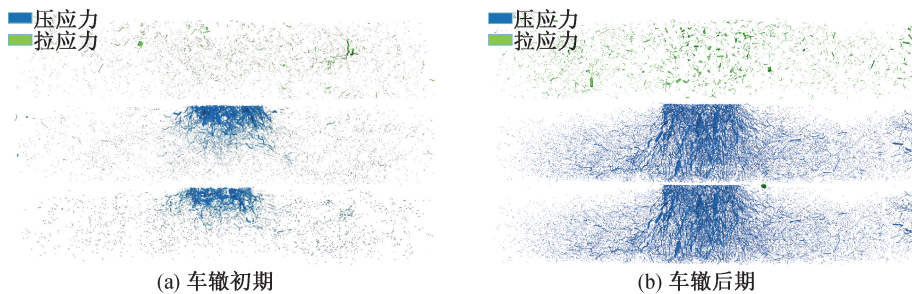


图9 车辙前后期接触力链图

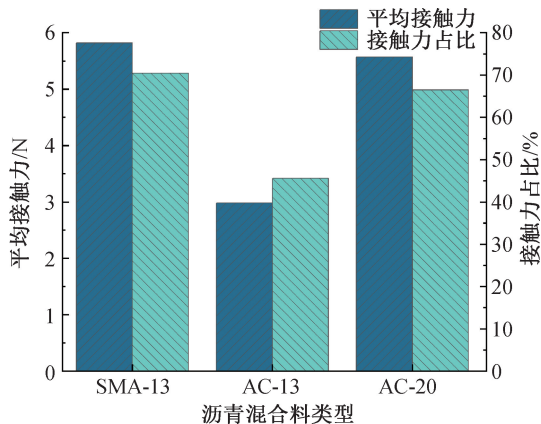


图10 骨料的平均接触力与接触力占比柱状图

状骨料显著减少了骨料间的有效接触面积,使其与周围骨料多为点或线接触,骨料间的嵌挤效应大幅降低,导致力链不连续,传力路径不稳定,荷载无法在骨架中有效传递。

对比不同粒径针片状骨料含量对混合料内部应力响应的结果发现,对于 SMA-13 混合料,9.50~13.20 mm 档位针片状骨料对应力响应的影响较 4.75~9.50 mm 档位更为显著。当 9.50~13.20 mm 档位骨料针片状含量由 5%增至 10%时,竖向应力下降 0.047 MPa,降幅达 17.3%;而 4.75~9.50 mm 档位骨料针片状含量从 5%增加至 10%时,竖向应力仅降低 0.021 MPa,变化幅度为 7.6%。然而当后者针片状含量从 10%增加至 15%时,竖向应力降低 0.044 MPa,变化幅度达 17.8%,表明该粒径范围内针片状含量较高时同样会显著削弱骨架稳定性。

上述结果表明,针片状骨料对沥青混合料应力传递效率的影响具有粒径依赖性与含量敏感性,尤其在中大粒径范围内,即使含量小幅增加也可能引起应力传递能力的显著下降。因此,为确保 SMA-13 沥青混合料的骨架稳定性与抗变形能力,建议将 9.50~13.20 mm 档位针片状含量控制在 10%以内,4.75~9.50 mm 档位控制在 15%以内。

4 结论

本文通过离散元法建立了三维车辙模型,并借助 smart rock 传感器监测结果验证了车辙模型的准确性,在此基础上对不同沥青混合料的车辙演化规律以及细观运动和力学特性的差异进行了分析,并针对 SMA-13 沥青混合料探究了不同档位粒径粗骨料针片状含量对沥青混合料内部应力的影响,主要结论如下:

a) 智能颗粒监测数据与离散元仿真结果的对比验证表明,所建立的三维车辙模型能够准确表征沥青混合料的细观力学响应,两者加速度幅值的平均误差低于 15%,这为从细观层面研究沥青混合料

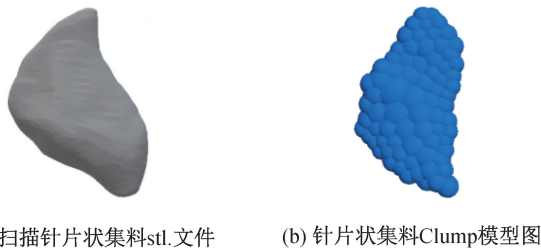


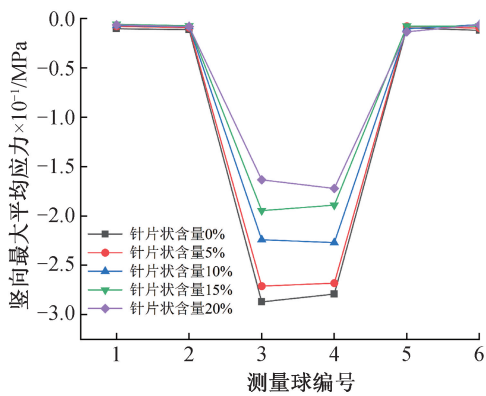
图11 针片状集料 stl. 文件及 Clump 模型图

过高的针片状含量引起沥青混合料性能的下降,为探究不同粒径范围粗骨料针片状含量对沥青混合料内部应力的影响,本文以 SMA-13 沥青混合料为例,针对 4.75~9.50、9.50~13.20 mm 档位的粗骨料,分别设定针片状含量分别为 0%、5%、10%、15%、20%,并在试件的中部设置 6 个半径为 10.00 mm 的测量球,调用 History 命令对车辙试验中测量球内的竖向及水平平均应力进行监测,测量球具体位置如表 6 所示,监测过程中竖向及水平最大平均应力结果如图 12 所示。

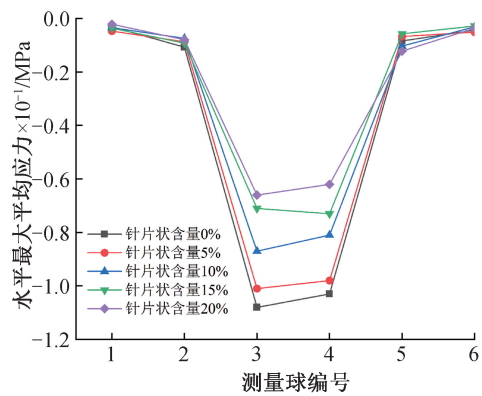
表6 测量球位置信息

测量球编号	1	2	3	4	5	6
X 轴坐标/m	-0.10	-0.06	-0.02	0.02	0.06	0.10

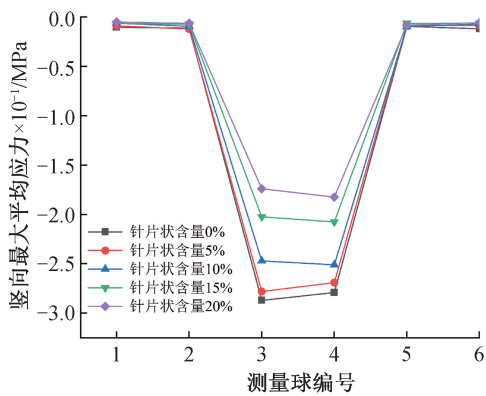
图 12 表明,混合料内部竖向应力显著高于水平应力,二者均主要集中于加载区域。随着针片状骨料含量增加,内部应力呈下降趋势。这是由于针片



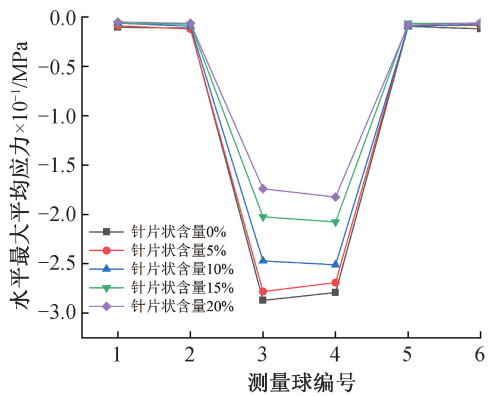
(a) 9.50~13.20 mm粒径骨料竖向最大平均应力图



(b) 9.50~13.20 mm粒径骨料水平最大平均应力图



(c) 4.75~9.50 mm粒径骨料竖向最大平均应力图



(d) 4.75~9.50 mm粒径骨料水平最大平均应力图

图12 SMA-13 沥青混合料内部最大平均应力随不同粒径针片状骨料含量变化曲线

的压密行为提供了较为有效且可靠的手段。

b) 车辙发展过程分为2阶段:初始压密阶段骨料调整迅速,变形发展快;稳定蠕变阶段骨架重构基本完成,变形缓慢,且骨料的平移与旋转行为与车辙发展规律具有一致性。

c) 不同沥青混合料的细观行为与宏观性能密切相关。SMA-13 骨料运动幅度最小,接触力链分布均匀,表现出最优的抗车辙能力;AC-13 骨料接触少,骨架作用弱,无法有效抑制变形过程骨料的运动,高温稳定性不足;AC-20 则因粗骨料粒径较大增强了骨架承受荷载以及约束骨料运动的能力,骨架稳定性介于两者之间。

d) 针片状骨料含量增加会削弱骨料间的有效接触与荷载传递效率,降低混合料骨架结构的稳定性。SMA-13 中 9.50~13.20 mm 档位骨料的针片状含量对混合料的力学特性影响更大,建议将该档位针片状含量控制在 10% 以内,4.75~9.50 mm 档位控制在 15% 以内。

本文从细观尺度揭示了不同沥青混合料在压密过程中的结构演化机理,明确了骨料形态对混合料性能的关键影响,为优化沥青混合料级配设计、严格控制集料形态提供了一定的理论依据与数据支持。

未来研究可进一步考虑动态荷载、温度耦合等更复杂环境因素对细观行为的影响。

参考文献:

- [1] 李波, 王宇, 康爱红, 等. 沥青混合料高温车辙虚拟仿真实验设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(5): 10-14.
- [2] 李喜, 王选仓, 房娜仁, 等. 基于温度与荷载实际耦合的沥青路面车辙预估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 67-75.
- [3] 高雪池, 申全军, 丛波日, 等. 基于 CT 扫描和随机森林算法的沥青混合料油石比检测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5725-5733.
- [4] Hassan H M Z, Wu K H, Huang W K, et al. Study on the influence of aggregate strength and shape on the performance of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2021, 294: 123599.
- [5] 刘文昶, 张曙光, 毛永强, 等. 车辙历程中的集料细观运动追踪方法及其应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14379-14386.
- [6] Shi L W, Wang D Y, Jin C N, et al. Measurement of coarse aggregates movement characteristics within asphalt mixture using digital image processing methods [J]. Measurement, 2020, 163: 107948.
- [7] Cao Y J, Zeng J, Muhsen S, et al. Particle dynamics and void

- distribution in Asphalt mixtures; Discrete element modeling[J]. Powder Technology, 2026, 467: 121486.
- [8] 念腾飞, 韩召, 魏智强, 等. 考虑骨料形态的沥青混合料细观数值建模方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(2): 639-652.
- [9] Ma T, Zhang D, Zhang Y, et al. Micromechanical response of aggregate skeleton within asphalt mixture based on virtual simulation of wheel tracking test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 153-163.
- [10] 王强, 卢晓锦, 孙宝生, 等. 基于离散元的再生沥青混合料车辙演化规律研究[J]. 公路, 2024, 69(9): 16-21.
- [11] 严兵, 姚波. 基于离散元法的多孔沥青混合料集料骨架优化研究[J]. 公路, 2025, 70(2): 14-21.
- [12] Li X X, Shi L W, Liao W J, et al. Study on the influence of coarse aggregate morphology on the meso-mechanical properties of asphalt mixtures using discrete element method [J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136252.
- [13] 邬金麒, 纪伦, 郭宏斌, 等. 实形粗集料三维离散元马歇尔仿真试件的构建与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(3): 1-13.
- [14] Dan H C, Yang D, Liu X, et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118592.
- [15] 张德, 谢胜加, 程志强. 基于智能颗粒的沥青路面压实现场测试研究[J]. 公路, 2023, 68(9): 104-109.
- [16] Wang N, Zhang C, Li Q, et al. Monitoring methods and micro-scale evolution mechanisms of rutting in asphalt mixtures: Smart aggregates and DEM [J]. Powder Technology, 2026, 469(P1): 121770.
- [17] 王修山, 刘天运, 张南童, 等. 粗集料形态特征及含量对沥青混合料压密行为的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 10084-10095.
- [18] 张德, 程志强, 谢胜加, 等. 基于沥青混合料接触应力测试的旋转压实嵌锁点判定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(12): 1919-1930.
- [19] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013: 51.
- [20] 柳力, 李理, 刘朝晖, 等. 内置应变传感器对沥青混合料力学性能的影响[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 179-194.
- [21] 刘天运, 王修山, 张南童, 等. 不同加载方式下沥青混合料的压实过程与集料运动特性研究[J]. 力学与实践, 2024, 46(5): 963-974.
- [22] 江训利, 何必想, 刘港归, 等. 基于塑性活化能的沥青混合料抗车辙性能优化[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(4): 486-497.
- [23] 冯卫东, 菅永明, 龚华勇. 沥青混合料弯曲疲劳性能演化规律的宏观试验表征[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 2984-2994.
- [24] 高虎, 杨新华, 唐鹏. 沥青混合料车辙变形的离散元数值模拟[J]. 固体力学学报, 2018, 39(3): 277-283.
- [25] 吴庭然, 李浩, 许建辉, 等. 再生沥青混合料复合骨架与细观力学性能的离散元分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(6): 1152-1158.
- [26] Abu Al-Rub R K, Darabi M K, Huang C W, et al. Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 13(4): 322-338.
- [27] Xue B, Xu J, Pei J Z, et al. Investigation on the micromechanical response of asphalt mixture during permanent deformation based on 3D virtual wheel tracking test [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121031.
- [28] 李南鹏, 王国清, 王志斌, 等. 高速公路胶粉沥青混合料疲劳损伤细观力学分析及试验研究[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 53-62.
- [29] 周志刚, 李利略, 袁秀湘. 再生沥青混合料单轴静态蠕变试验的离散元仿真[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(3): 1-7.
- [30] 张德育, 黄晓明, 高英. 沥青混合料三维离散元虚拟单轴蠕变试验[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 15-20.

团队介绍

王修山教授团队长期专注于高性能道路材料与智能化建养技术研究,致力于解决传统路面材料寿命短、养护决策依赖经验以及大量固废占用土地与污染环境等行业难题。团队在国家自然科学基金、省部级重大科技计划及重点工程合作项目的持续资助下,经过十余年的系统研究,提出了基于多尺度性能设计的长寿命沥青混合料方法、固废资源化的合理利用、路面结构状态智能感知与评估技术,揭示了材料组成—微观结构—路用性能的关联机理与演化规律,近年来在3D人工智能颗粒技术和沥青混合料压密行为表征方面取得了重要进展。

团队发表学术论文120余篇,其中SCI和EI检索论文46篇,出版本科教材5部,专著1部,推动了道路工程材料领域的进步。研究成果已应用于多个高速公路、国省干线及城市道路的修建与养护工程中,显著延长了道路使用寿命,降低了养护成本,取得了较为突出的经济社会效益。

(责任编辑:康 锋)