

DOI:10.11918/202309014

基于 Jamming 转变理论的沥青路面车辙演化机制

赵晓康, 张 凯, 裴建中, 张久鹏, 计 杰

(长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘 要: 沥青路面宏观车辙其本质是混合料细观结构演变的结果, 为了深入理解路面车辙流变行为的发展过程, 基于颗粒物质 Jamming 理论开展了沥青混合料车辙演化机制研究。采用图像处理技术构建了沥青混合料细观结构模型, 基于时-温等效原理开展了车辙仿真测试, 分析了车辙变形过程中混合料宏观细观结构的变化特征, 探究了沥青路面 Unjamming 转变行为的影响规律与车辙演化机制。结果表明: Jamming 理论可以很好地解释沥青路面的车辙演变全过程, 车辙深度与沥青混合料颗粒的堵塞程度密切相关; 随着加载时间和作用荷载的增加, 混合料 Jamming 堵塞程度增大, 车辙深度和面积分数也逐渐增加, 并最终趋于稳定, 颗粒体系 Jammed 态的转变受到了沥青砂浆和集料骨架共同作用的影响; 随着测试温度升高, 试件内部颗粒位移和位移差增大, 混合料 Jamming 堵塞程度降低。沥青路面颗粒体系由稳定的 Jammed 态转变为不稳定的 Unjammed 态, 是诱导路面车辙和泛油病害发生的内因, 研究结果实现了 Jamming 理论在非晶体系中的应用, 为深入理解沥青混合料的车辙演变行为提供了一种新的研究思路。

关键词: 道路工程; 车辙演化; 颗粒体系; Jamming 转变; 细观结构

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)09-0150-11

Rutting evolution mechanism of asphalt pavement based on the Jamming transition theory

ZHAO Xiaokang, ZHANG Kai, PEI Jianzhong, ZHANG Jiupeng, JI Jie

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The essence of macro rutting of asphalt pavement is the result of the evolution of the meso-structure of the mixture. To understand the development process of rutting behavior, the evolutionary mechanism of rutting in asphalt mixture was investigated based on the Jamming transition theory of particle materials. The image processing technology was used to construct a meso-structure model of the asphalt mixture. Rutting simulation tests were conducted based on the time-temperature equivalence principle. The macro and micro variations of the mixture structure during rutting deformation were analyzed. The influence of Unjamming behavior in asphalt pavement and the evolution mechanism of rutting were investigated. The results show that the rutting evolution process of the asphalt mixture can be explained well by the Jamming transition theory, in which the depth of rutting is closely related to the jamming degree of the asphalt mixture system. With the increase of loading time and loading force, the Jamming degree of the mixture particle system gradually increases, along with the increase of rut depth and area fraction, and eventually tends to a stable state. The Jammed state of the particle system is affected by the joint action of asphalt mortar and aggregate skeleton. With the increase in the test temperature, the particle displacement and displacement difference inside the specimens increased, and the Jamming blockage degree of mixture particle system decreased. The transition of the asphalt pavement particle system from a stable Jammed state to an unstable Unjammed state is the internal mechanism inducing rutting and oil flooding. This study successfully applied the Jamming theory to an amorphous system, providing a new research method for understanding the rutting evolution behavior of asphalt mixture.

Keywords: road engineering; rutting evolution; particle system; jamming transition; mesoscopic structure

沥青路面凭借其表面平整、无接缝、施工期短、养护维修简便等优点, 在中国高等级公路中得到了广泛应用^[1]。然而在夏季高温季节, 沥青路面强度

与刚度显著下降, 在车辆荷载的反复作用下, 沥青混合料会发生流变而引发车辙等病害^[2-3]。深入理解沥青路面的流变演化行为对提升路面抗车辙性能的

收稿日期: 2023-09-05; 录用日期: 2023-11-20; 网络首发日期: 2024-07-05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240705.1006.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51978068); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-373)

作者简介: 赵晓康(1987—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师

通信作者: 裴建中, peijianzhong@126.com

设计优化工作具有重要意义。

传统的沥青路面力学性能和损坏机理的分析方法主要基于连续介质理论和宏观试验方法,由于沥青混合料的研究尺度远大于集料的粒径,以至于其细观结构常被忽略或简化^[4-5]。此外,在连续介质力学模型中,沥青混合料被视为一种均匀、连续材料,这与沥青混合料具有颗粒属性且非均质的事实相违背。沥青混合料作为一种由集料、沥青、空隙构成的复合材料,其中集料颗粒部分体积比占到 85%,质量占比达到 90%^[6],从材料组成和对抵抗高温变形的贡献率来看,集料均发挥着主导作用,因此有必要将沥青混合料看作是一种特殊的颗粒材料,从颗粒物质的角度剖析其复杂流变行为的发生机制。

对于颗粒体系,由于其细观结构缺乏有序性和周期性,表现为集料在松散状态下类似于流体,在一定堆积密度后却又类似于固体颗粒体系,而聚集形态则存在着类固、类液态间的相互转变现象^[7-8],研究者据此提出了 Jamming 转变这一概念^[9]。Jamming 转变现象是颗粒系统在面积分数增大的过程中由无刚性类液态转变为有一定刚性的类固态的行为^[10],相反,由类固态向类液态转变的行为即为 Unjamming 转变。Liu 等^[9]首次提出了著名的 Jamming 相图,以温度、荷载、体积分数为控制因素,把类液-类固转变密度点称为 J 点,并以其作为体系稳定程度的判断依据。

集料颗粒体系剪切带的形成与发展同样具有明显的类固-类液转变特征^[11-12],因此沥青混合料的流变过程也属于 Unjamming 转变现象的范畴。沥青路面在无外荷载情况下可认为处于 Jammed 态;在荷载、温度作用下,沥青路面产生压密变形现象,转化为 Unjammed 态;随着时间的增加,车辙形变完

成,可认为沥青路面又逐渐进入 Jammed 态。在此过程中,沥青混合料粗集料的位置变化与荷载作用下 Jammed 态颗粒物质在类固-类液转化中的运动相对应^[13]。可见,车轮荷载和外界温度均是影响沥青路面 Unjamming 转变的重要因素。然而,目前在 Jamming 现象研究中采用的颗粒物质往往是非热体系^[10],大多忽略温度对转变行为的影响,而沥青混合料作为非晶体系,其剪切流变特性受温度影响较大,所以基于 Unjamming 转变的沥青混合料剪切流动破坏机理还需要作进一步的讨论。

本研究基于沥青混合料的颗粒属性和多尺度研究方法,通过分析不同温度、荷载条件下颗粒体系的宏细观结构的变化特征,以期建立颗粒 Unjamming 转变现象与沥青混合料车辙变形之间的联系,从更深层次解析集料颗粒和沥青混合料的车辙流变行为。

1 沥青路面车辙虚拟试件

1.1 细观模型重构

本研究采用图像处理技术来精确重构沥青混合料的二维细观模型^[14],作为车辙形变分析的基础模型。按照 AC-13 级配中值和 4.7% 最佳油石比,采用轮碾法室内成型车辙板试件,并切割获得 300 mm × 50 mm × 50 mm 的长条形试件,然后获取试件截面图像,识别出集料边界。最后,在 PFC 中选用 300 mm × 50 mm 的模型边界,按照六边形排列的方式填充半径为 0.5 mm 的基础单元颗粒体系^[15],通过用户自定义 MATLAB 程序将集料边界导入,形成粗集料与沥青砂浆两相体,建立具有骨料真实轮廓的细观模型,模型构建具体流程如图 1 所示。砂浆孔隙率为 4%,通过随机删除砂浆单元颗粒来实现^[16]。

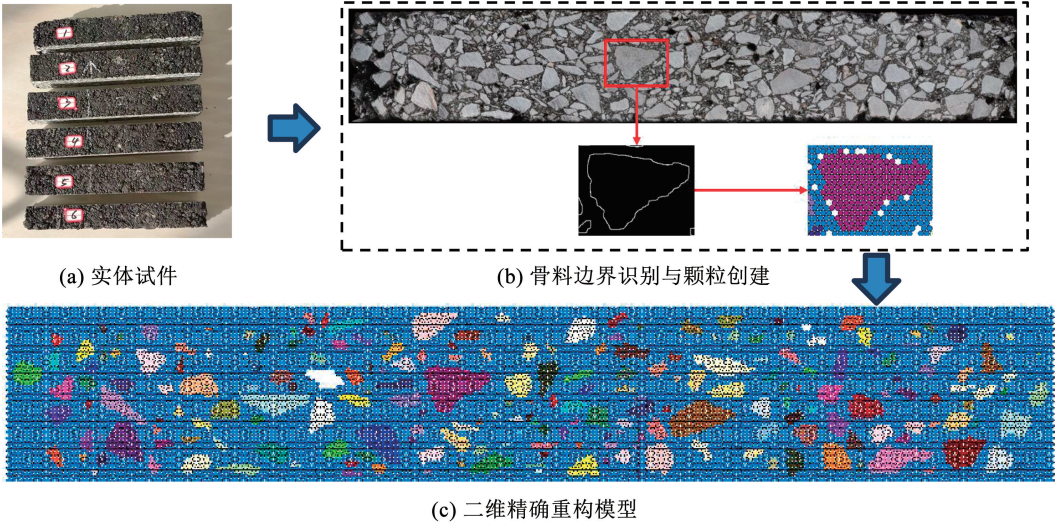


图 1 细观模型构建流程

Fig. 1 Mesoscopic model construction process

1.2 接触本构模型设定

本文中沥青混合料细观模型由集料和沥青砂浆两种实体介质组成,因此需要考虑集料颗粒内部、集料颗粒之间、沥青砂浆内部以及集料和砂浆界面共 4 种接触行为。其中,粗集料具有线弹性特征,沥青砂浆具有黏弹性特征,所以采用线性接触模型模拟集料内部单元间的接触行为^[17],沥青砂浆单元间的

接触本构采用 Burger's 模型来表征^[18-19]。对于粗集料与沥青砂浆的界面接触,本文采用弹簧表征集料, Burger's 模型表征砂浆,并使用串联的方式将二者连接在一起,构成修正 Burger's 模型,以反映集料与砂浆两种材料的力学特性。集料颗粒体间的力学行为可视为集料-沥青砂浆-集料的接触形式。各细观本构模型如图 2 所示^[20]。

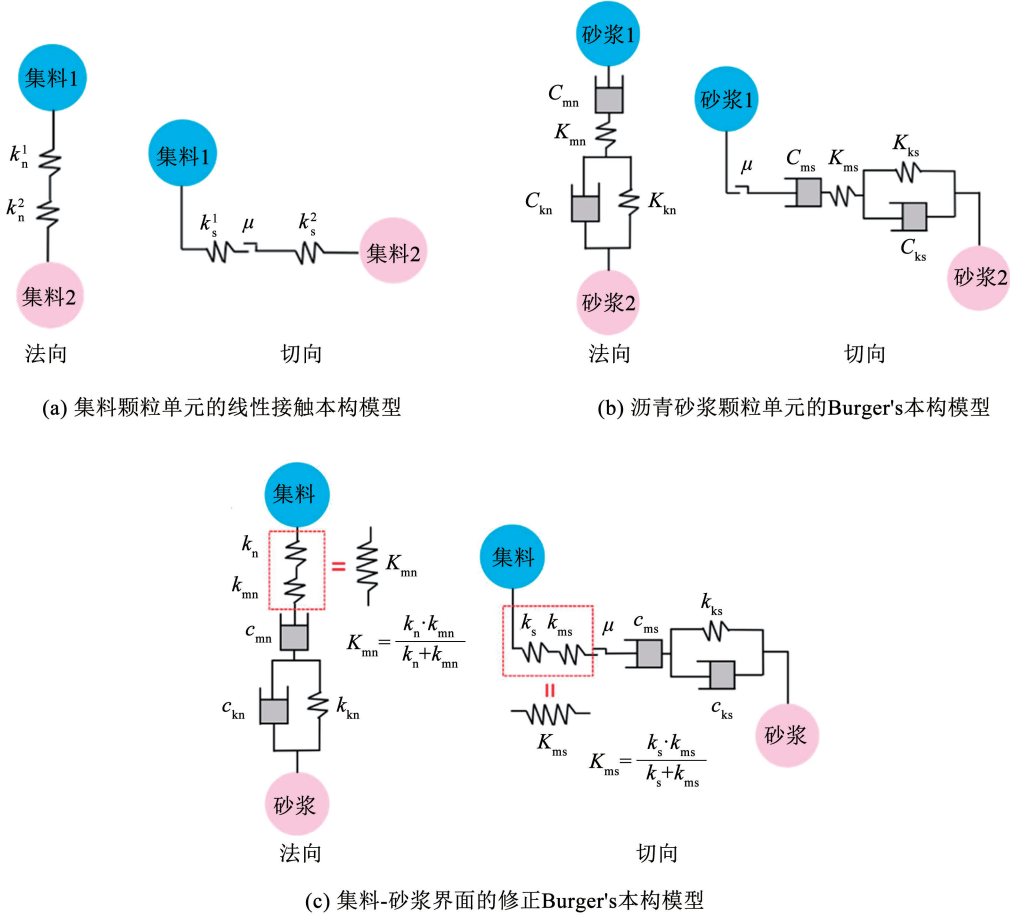


图 2 细观接触模型本构

Fig. 2 Mesoscopic contact model constitutive

1.3 材料参数确定

离散元中通过设置颗粒单元间的细观接触本构模型以及相应参数来间接模拟材料的宏观力学行为,根据弹性梁等效原理,集料相细观接触参数与材料力学参数存在如式(1)和式(2)的转换关系^[21-22],据此可以初步确定线性接触模型所需的材料参数。

$$k_n^1 = k_n^2 = 2Et \tag{1}$$

$$k_s^1 = k_s^2 = 2Gt = \frac{Et}{1 + \nu} \tag{2}$$

式中: k_n^1 、 k_n^2 、 k_s^1 、 k_s^2 分别为接触两端集料颗粒 1 和集料颗粒 2 的法向刚度和切向刚度; t 为二维颗粒厚度,本文取 1 mm; E 为集料的宏观弹性模量, G 为剪切模量, ν 为集料的泊松比, $E = 2G(1 + \nu)$ 。本文中粗集料选用的是质地优良的石灰岩,根据已有研

究^[23],将 E 取为 55.5 GPa, ν 取为 0.25,通过式(1)和式(2) 计算得到 $k_n^1 = k_n^2 = 11.1 \times 10^8$, $k_s^1 = k_s^2 = 4.44 \times 10^7$,同时,摩擦系数 μ 取定值 0.5^[24]。

根据黏性梁等效原理, Burger's 模型中宏观参数对应关系如式(3)所示^[18,25],其中共涉及 η_1 、 E_1 、 η_2 、 E_2 4 个宏观材料参数。本文通过单轴静载蠕变试验获取不同温度下砂浆材料的蠕变曲线,并按照式(4)计算获得沥青砂浆的宏观材料参数。测试温度分别选 20、30、40、50、70 °C,各个加载时刻对应的蠕变柔量如图 3 所示。通过简面体爬山算法与通用全局优化算法对蠕变柔量-时间关系曲线进行拟合,并基于时-温等效原理来对宏观本构参数进行修正^[26],以提升模型计算效率。Burger's 模型中,黏性参数 η_1 和 η_2 具有时间和温度双重依赖性,可在式(4)中引入位移因子 α ,使 η_1 、 η_2 和 T 同步减小,以

在不改变蠕变柔量 $J(T)$ 的前提下实现运算时间的缩减。本文中取 $\alpha = 1 \times 10^4$ ^[20]。对于两个砂浆颗粒相接触的情况, 可视为由两个砂浆的 Burger's 模型串联构成, 因此宏细观参数之间存在一个 2 倍的关系; 对于粗集料与砂浆之间的接触, 认为其是线性接触模型与 Burger's 模型的串联, 其等效结果如式(5)所示; 其他 C_{mn} 、 C_{kn} 、 C_{ms} 、 C_{ks} 参数与砂浆接触模型相一致。最终得到不同温度下 Burger's 模型接触细观参数的汇总见表 1。

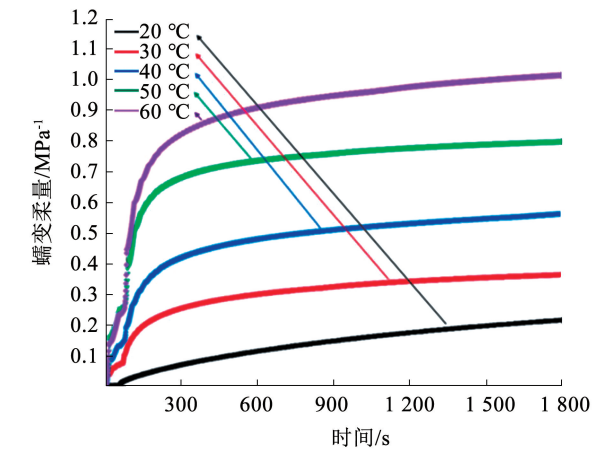


图3 不同温度下沥青砂浆蠕变柔量-时间关系曲线

Fig.3 Creep compliance-time curves of asphalt mortar at different temperatures

$$\begin{cases} C_{mn} = \eta_1 t, C_{ms} = \frac{\eta_1}{2(1+v)}t \\ C_{kn} = \eta_2 t, C_{ks} = \frac{\eta_2}{2(1+v)}t \\ K_{mn} = E_1 t, K_{ms} = \frac{E_1}{2(1+v)}t \\ K_{kn} = E_2 t, K_{ks} = \frac{E_2}{2(1+v)}t \end{cases} \quad (3)$$

$$J(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} + \frac{T}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}T}\right) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{K}_{mn} = \frac{2EE_1t}{E+E_1} \\ \dot{K}_{kn} = 2E_2t \\ \dot{K}_{ms} = \frac{2GE_1}{G(1+v)+E_1}t \\ \dot{K}_{ks} = \frac{E_2}{(1+v)}t \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{mn} 、 K_{mn} 、 C_{kn} 、 K_{kn} 为细观 Burger's 本构模型的 4 个法向参数, C_{ms} 、 K_{ms} 、 C_{ks} 、 K_{ks} 为细观 Burger's 本构模型的 4 个切向参数, η_1 、 E_1 、 η_2 、 E_2 为沥青砂浆材料的宏观 Burger's 参数, $J(T)$ 为蠕变柔量, 是蠕变应变 $\varepsilon(T)$ 与蠕变应力 σ_0 的比值, T 为加载时间, $\dot{K}_{mn}$ 、 $\dot{K}_{kn}$ 、 $\dot{K}_{ms}$ 、 $\dot{K}_{ks}$ 分别为修正 Burger's 模型的细观参数。

表1 不同温度下的 Burger's 模型接触细观参数

Tab.1 Contact mesoscopic parameters of Burger's model at different test temperatures

接触类型	温度/℃	接触细观参数							
		$K_{kn}/$	$K_{mn}/$	$K_{ks}/$	$K_{ms}/$	$C_{kn}/$	$C_{mn}/$	$C_{ks}/$	$C_{ms}/$
		(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)	(MPa·m)
砂浆-砂浆接触	20	19.74	84.04	6.58	28.01	0.960	5.380	0.320	1.790
	30	10.54	22.40	3.51	7.47	0.140	3.840	0.048	1.280
	40	6.44	14.94	2.15	4.98	0.070	2.890	0.023	0.960
	50	4.04	9.62	1.35	3.21	0.031	2.530	0.010	0.840
	60	3.12	6.30	1.04	2.10	0.024	1.980	0.008	0.660
砂浆-集料界面接触	20	19.74	83.98	6.58	67.13	0.960	5.380	0.320	1.790
	30	10.54	22.40	3.51	17.91	0.140	3.840	0.048	1.280
	40	6.44	14.94	2.15	11.95	0.070	2.890	0.023	0.960
	50	4.04	9.62	1.35	7.69	0.031	2.530	0.010	0.840
	60	3.12	6.29	1.04	5.04	0.024	1.980	0.008	0.660

2 虚拟车辙试验

2.1 虚拟车辙试验设计

本文根据动态荷载的滚动范围与静态荷载的接触长度的比例, 对动静加载时间进行等效换算, 进而

确定动态加载时间 1 h 对应的静态荷载作用时间为 342 s。然后采用刚性簇 clump 模拟测试轮胎进行竖向加载。轮胎 clump 由 25 × 10 个半径为 1 mm 的圆盘组成, 并以 wall 为模型边界对试件左右两侧和底面进行约束, 虚拟车辙试验设计结果如图 4 所示。

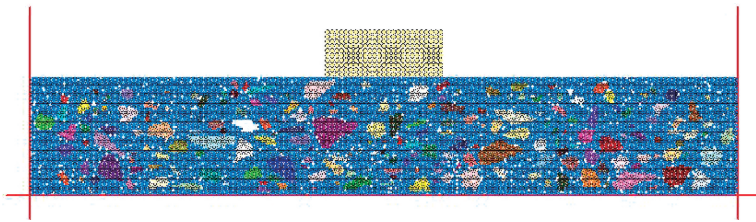


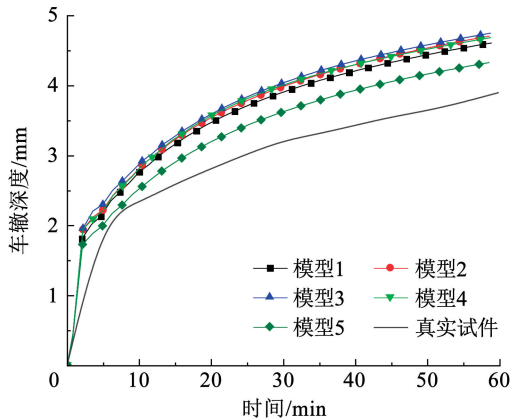
图 4 虚拟车辙试验设计效果图

Fig. 4 Schematic diagram of virtual rutting test

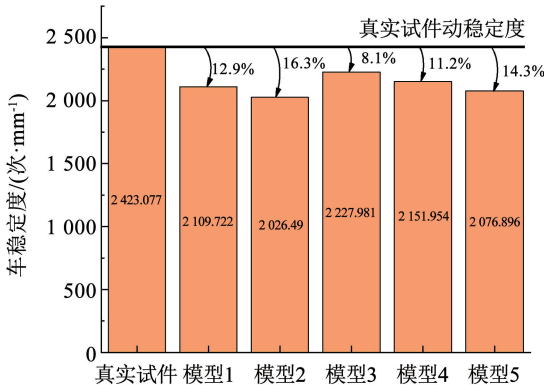
2.2 模型可靠性验证

为了验证车辙试件重构模型的可靠性,开展了 60 ℃测试温度和 0.7 MPa 荷载条件下的虚拟车辙仿真测试,并将仿真测试结果与室内测试结果进行比较,结果如图 5(a)所示,可见仿真试验与真实试验的车辙变形趋势大致相同,均表现出在加载初期车辙深度增长速度较快,随着时间的增长,车辙深度的增长速度逐渐降低的规律,但任意时刻虚拟试件的车辙深度都稍大于室内试验值,分析认为二维模

型中粗集料较少,骨架承载力较低,并且采用均匀分布的小球表征沥青砂浆,不能很好地反映出其黏结性能。在相同的试验条件下,以动稳定度来作为测试结果的可靠性评判指标,将仿真实验和室内真实试验测试结果进行对比,如图 5(b)所示,可见各虚拟模型的动稳定度较真实试件数值偏小,但平均误差稳定在 12.4%,表明所采用的建模方式、接触模型和相关参数的可靠性都较高,能够很好地对沥青混合料车辙变形的演化过程进行模拟。



(a) 车辙深度-时间曲线



(b) 动稳定度

图 5 60 ℃和 0.7 MPa 条件下仿真试验与实际试验的结果

Fig. 5 Results of simulation test and lab test under 60 ℃ and 0.7 MPa test conditions

3 基于 Jamming 转变的车辙演变过程分析

3.1 宏观形变行为分析

为了理解路面车辙流变行为的发展过程,基于颗粒物质 Jamming 理论开展了沥青混合料车辙演化行为研究,测试温度为 60 ℃,动态重复荷载 0.7 MPa。图 6 为虚拟试件的车辙形变随加载时间的演化过程,可以发现,随着加载时间的增加,车辙深度逐渐增长,最终形成的车辙形貌与真实试件接近。同时,在虚拟轮胎作用位置两侧还出现了局部隆起现象,为典型的失稳型车辙。为了分析车辙流变行为与颗粒物质 Unjamming 转化过程的联系,采用面积分数来表征加载过程中混合料颗粒系统的堵

塞情况,获取了加载过程中混合料面积分数的演化曲线,如图 7 所示。结果表明,面积分数的变化趋势与车辙深度的变化规律基本一致,在加载初始阶段,沥青混合料的面积分数最低,说明此时颗粒体系的堵塞程度最低,抵抗荷载的能力也最弱。在荷载作用下面积分数会迅速增加,混合料的堵塞程度也逐渐加大,堵塞程度的增长又会促使混合料抵抗外界荷载的能力增强,表现为面积分数的增长速度逐渐减缓并最终趋于稳定。

3.2 颗粒位移演变分析

图 8 为不同加载时刻内部砂浆颗粒和粗集料颗粒的最大位移,从中发现,不同加载时刻虚拟试件内部砂浆颗粒的最大位移均大于粗集料颗粒,并且随着加载时间的延长二者之间最大位移差也会随之增

加,表明荷载作用下沥青砂浆更容易发生塑性流动,而改变颗粒体系的堵塞状态,并且随着加载时间的增加,沥青砂浆会逐渐从粗集料之间被挤压出去,从而导致泛油类路面病害的发生。研究表明,在车辙

演变过程中,沥青砂浆相对材料颗粒体系 Jammed 态的转变起到了重要作用,黏结性能较弱砂浆材料,更易促使材料体系由稳定的 Jammed 态转变为不稳定的 Unjammed 态,从而诱导路面车辙的发生。

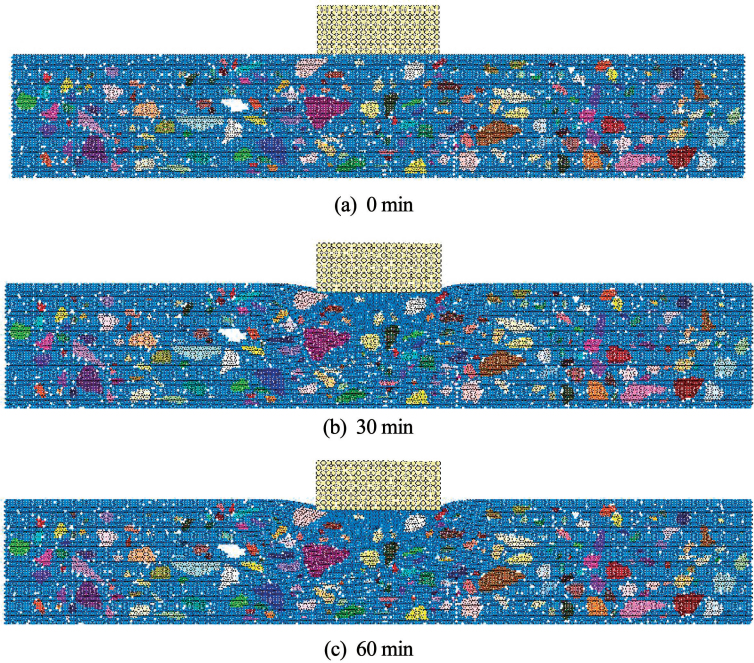


图 6 虚拟车辙形变演化过程

Fig. 6 Virtual rutting deformation evolution process

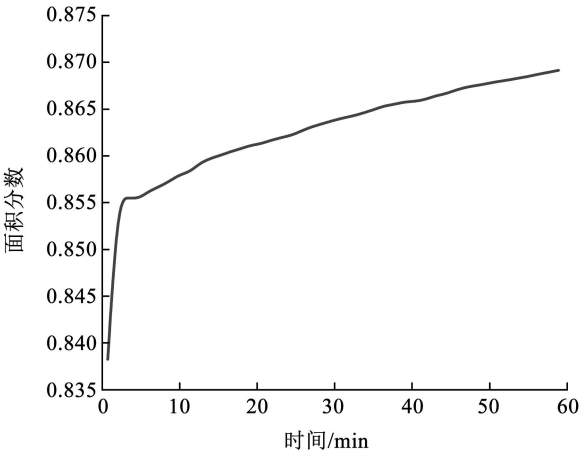


图 7 面积分数随加载过程的演变

Fig. 7 Evolution of area fraction with loading time

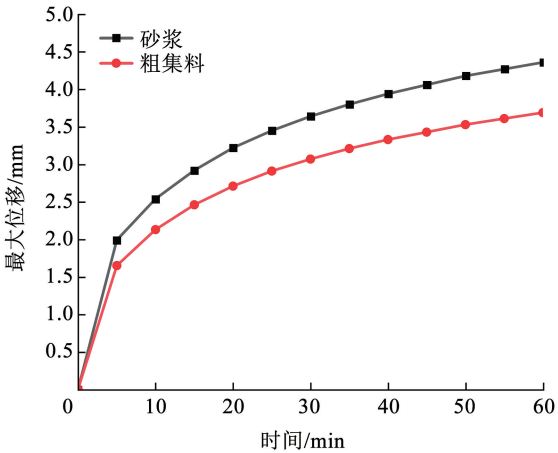


图 8 最大位移随加载过程的演变

Fig. 8 Evolution of maximum displacement with loading time

3.3 颗粒接触力链演变分析

试件内部颗粒间的受力状况对宏观车辙的演化过程具有重要影响,为了定量研究虚拟试件的力链结构演化特征,提取了不同时刻的接触数量和平均接触力,结果如图 9 所示。可以发现,对于 AC-13 悬浮密实型结构的沥青混合料,少量的粗集料-粗集料接触承受了更大的荷载作用力,起到了一定骨架支撑作用,其次是砂浆-粗集料的界面接触,砂浆-砂浆之间的平均接触力最小,但由于接触数量较多,其对结构体系的 Jammed 状态转变也至关重要。此

外,随着加载时间的增加,砂浆-砂浆、砂浆-粗集料的接触数和平均接触力都在增加,这是因为混合料在荷载作用下孔隙率降低,颗粒之间的接触数增加,颗粒之间的堵塞程度也会加深,因此在试件内部出现了更大的接触力。通过上述分析可知,在虚拟试件的车辙变形过程中,沥青砂浆和粗集料共同发挥了抵抗变形的作用,因此推荐选用性能优良的沥青胶结料,以获取黏结能力较强的沥青砂浆从而增强沥青路面的高温抗变形能力。

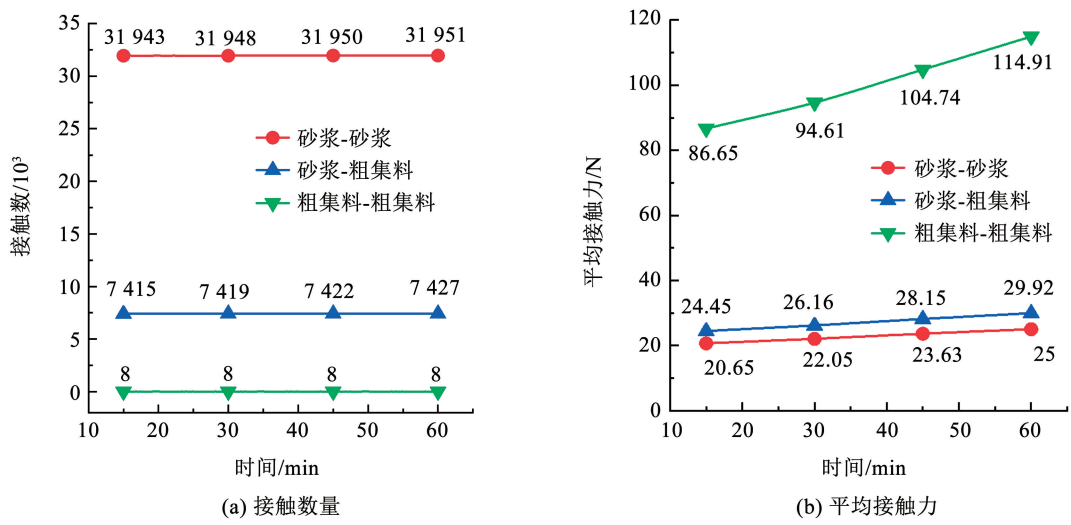


图 9 不同时刻虚拟试件内各类型接触数和平均接触力

Fig. 9 Contact number and average contact force at different loading time

3.4 受荷粗集料运动演变分析

沥青混合料中粗集料间嵌锁力与内摩阻力对其高温抗车辙能力至关重要,粗集料空间位置变化特征可以用位移和位移角来表征,本文虚拟试件中,大位移粗集料主要分布在加载区域正下方,所以仅对试件中部 50 mm × 50 mm 矩形区域内受荷粗集料的运动特征进行提取分析,结果如图 10 所示。从图 10(a)可以发现,粗集料的平均位移随着加载时间的延长而增加,并且增长速度呈减缓趋势,与车辙深度的变化规律相一致。图 10(b)为在不同加载时刻计算区域内粗集料的平均位移角,可以发现,粗集

料的平均位移角随加载时间增加而逐渐减小,并且加载前期平均位移角减小速率较快,后期逐渐趋于平缓,这与加载后期粗集料的位移变化速度减小有关。在加载初期混合料的孔隙率较大而主要发生压密变形,随着荷载的继续作用,混合料的堵塞程度增加,压密变形量逐渐减少,此时车辙变形主要由剪切荷载下粗集料的滑移变形和砂浆的流动变形所构成,而混合料堵塞程度的增加和边界条件都会对粗集料的运动产生一定限制,加载后期粗集料空间位置变化幅度呈现减小的趋势,进而使颗粒体系由不稳定的 Unjammed 态向更稳定的 Jammed 态转变。

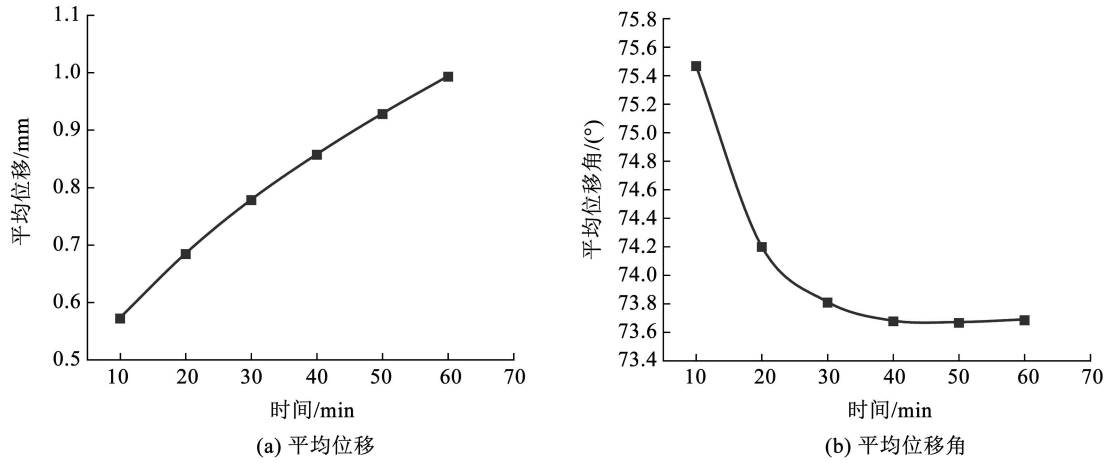


图 10 受荷粗集料随加载过程的演变

Fig. 10 Evolution of the coarse aggregate with loading time

4 沥青路面 Jamming 转变行为影响规律

4.1 温度对沥青路面车辙演化过程的影响

沥青混合料颗粒材料因具有温度敏感性而与普通颗粒物质存在一定差异,通过分析不同温度下沥

青混合料车辙形变的演化规律,探究温度对沥青混合料 Unjamming 转变行为的影响。本文根据表 1 设定不同温度下的 Burger's 接触模型细观参数来模拟不同的温度环境,在 0.7 MPa 荷载条件下分别进行了 20、30、40、50、70 ℃ 的车辙仿真试验,结果如

图 11 所示。从图 11(a) 可以看出, 随着测试温度升高, 各加载时刻对应的车辙深度也同步增加, 分析认为, 高温使得沥青砂浆的黏度和刚度减小, 砂浆相黏结作用减弱, 沥青混合料颗粒体系的堵塞程度下降, 导致结构抵抗荷载形变的能力降低。图 11(b) 为不同温度条件下加载末期 60 min 时砂浆颗粒和粗集料颗粒的最大位移, 可见, 砂浆颗粒和粗集料颗粒的最大位移都会随温度的升高而增大, 并且砂浆的最大位移大于粗集料, 二者之间的位移差也会随着温度的升高而增加, 说明砂浆相的可流动程度增强, 这

也解释了高温条件下沥青路面更易发生泛油病害。图 12 为在不同温度条件下加载末期 60 min 时内部接触力链的分布情况, 可以看出, 随着测试温度的上升, 试件内部整体接触力链分布范围缩小, 一方面由于高温时沥青混合料的抗变形能力弱, 内部应力可通过形变得到释放而减小; 另一方面, 在较高的温度情况下, 沥青混合料的堵塞程度相对较低, Unjammed 态更不稳定, 颗粒系统内部接触力链网络密度和颗粒间接触力降低, 因此表现为试件内接触力大小与温度之间呈现负相关关系。

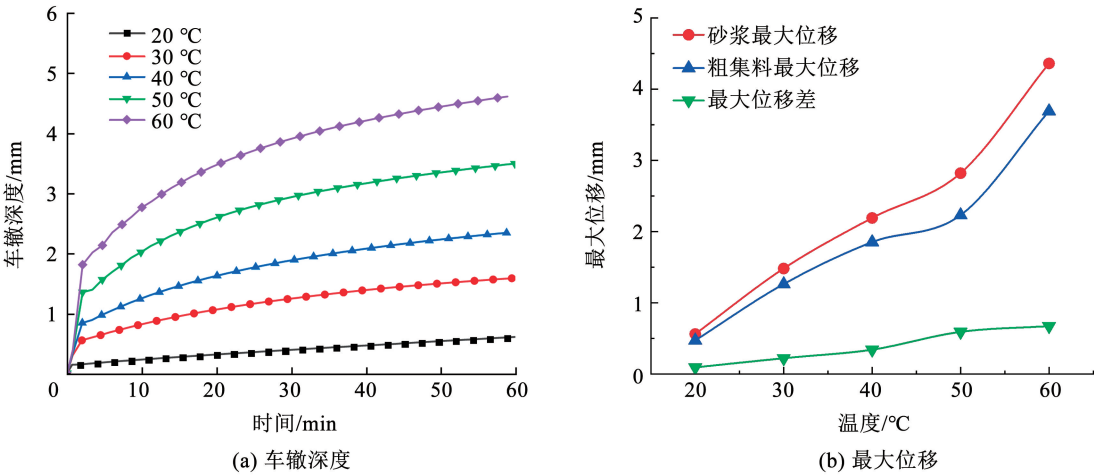


图 11 不同温度下的车辙演化曲线

Fig. 11 Rutting evolution curves at different test temperatures

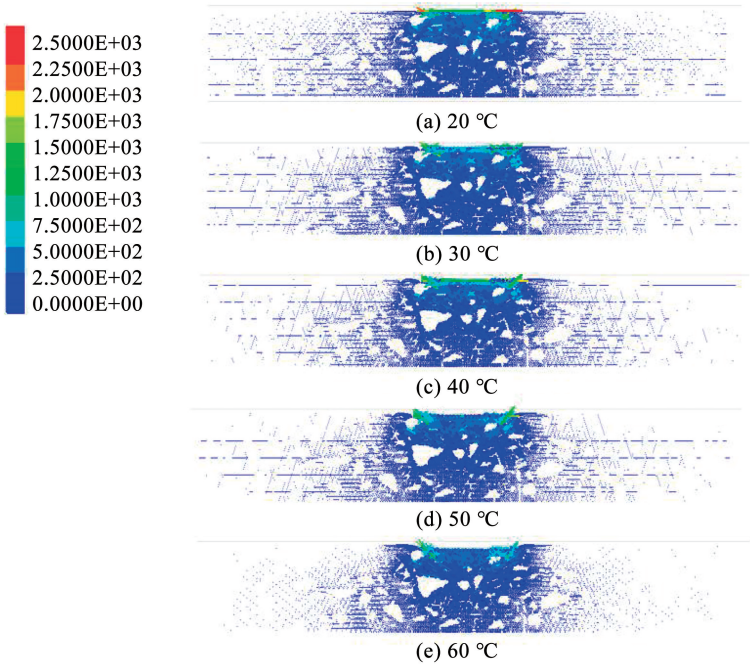


图 12 不同温度下虚拟试件内部的接触力链

Fig. 12 Contact force chain at different test temperatures

图 13 为不同温度条件下加载末期 60 min 时加载区域受荷粗集料的平均位移和平均位移角结果, 可以发现, 随着温度的升高, 粗集料的平均位移和平

均位移角也在升高, 体系 Unjammed 态也越不稳定。如果沥青路面的温度过高, 混合料内部粗集料的空间位置变化较大, 就会使得集料形成的骨架结构稳

定性降低甚至破坏,最终导致混合料在荷载作用下发生破坏现象。通过对不同温度下的车辙仿真发现,在低温条件下,沥青砂浆的黏结作用更强,使得结构抵抗变形能力提升,说明在低温条件下沥青混合料的 Jamming 堵塞程度更高;温度越高,颗粒单元位移越大,并且砂浆和粗集料最大位移差更大,表明温度越高,路面颗粒体系的 Unjammed 态也越不稳定,越易引发泛油病害;高温条件下受荷粗集料的平均位移和平均位移角也显著越大,导致骨架结构失稳而引发路面结构破坏。

4.2 荷载对沥青路面车辙演化过程的影响

选定 60 ℃ 的试验温度,分别开展 0.5、0.6、

0.7、0.8、0.9 MPa 5 种荷载条件的车辙仿真测试,研究荷载量对沥青路面车辙演化过程的影响规律,结果如图 14 所示。可以发现,在不同荷载条件下车辙深度的发展规律基本一致,且车辙深度随着荷载的增加而显著增大,增大的幅度也较为一致。图 14(b) 为不同荷载条件下加载末期 60 min 时试件内部砂浆颗粒和粗集料颗粒的最大位移,表现为砂浆颗粒和粗集料颗粒的最大位移会随着荷载的增加而增大,并且二者最大位移差会随着荷载的增加而增加,说明在重载条件下,结构体系的 Unjammed 态也越不稳定,沥青砂浆更易从粗集料间挤出而引起路面泛油。

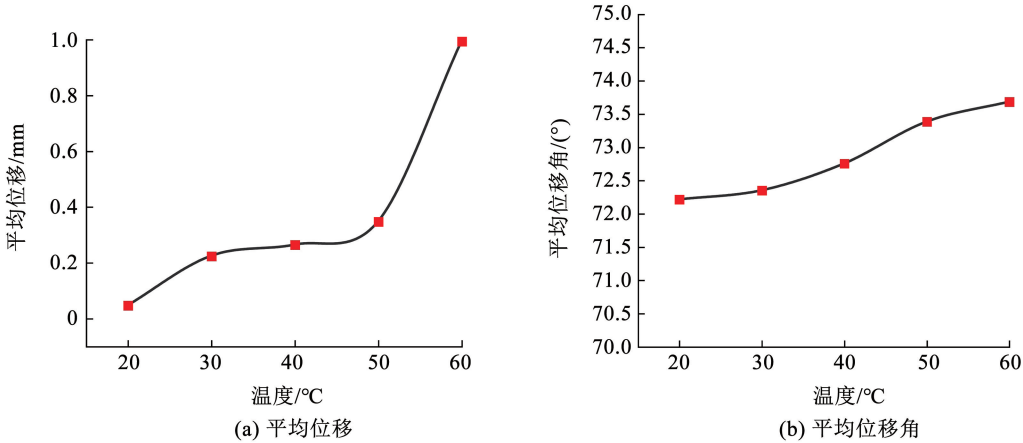


图 13 不同温度下受荷粗集料的位移情况

Fig. 13 Displacement of coarse aggregate at different test temperatures

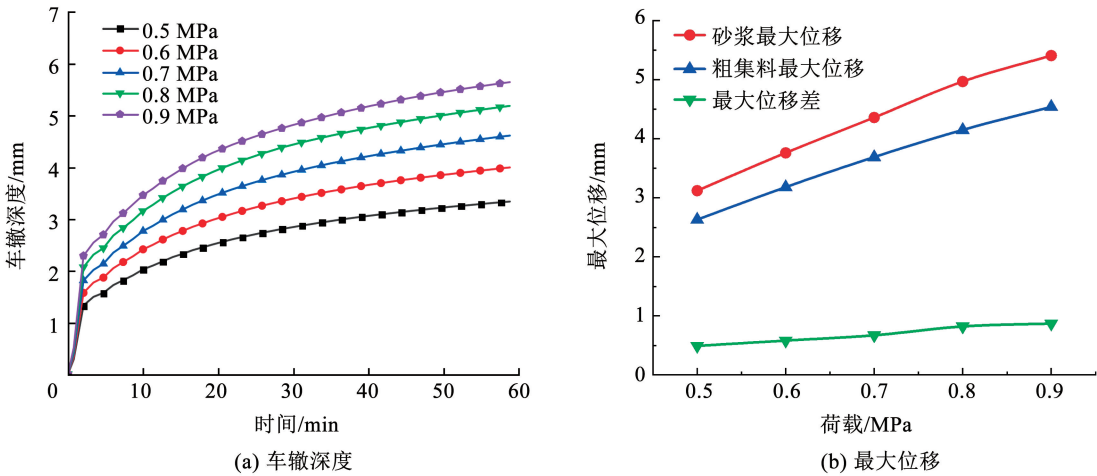


图 14 不同荷载条件下的车辙演化曲线

Fig. 14 Rutting evolution curves under different load conditions

图 15 为在不同荷载条件下加载末期 60 min 时内部接触力链的分布情况,可以发现随着荷载的增加,虚拟试件内部的整体接触力和最大接触力都会随之增大,表明荷载的增加引起了颗粒堵塞程度的提升,结构体系 Jammed 态愈发稳定,进而使得抵抗荷载能力增加。但接触力的持续增大可能会导致砂浆 - 砂浆和砂浆 - 粗集料界面之间的黏结失效,进

而使得混合料发生车辆荷载作用下的剪切破坏,使得路面层材料失稳而出现凹陷和横向位移。图 16 为不同荷载条件下加载末期 60 min 对应的受荷粗集料的平均位移结果,从图中可以发现随荷载增加,加载区域正下方受荷粗集料的平均位移也逐渐增大,但是荷载过大会导致粗集料的位移过大,使得混合料的骨架结构强度衰减,最终导致混合料失稳破坏。

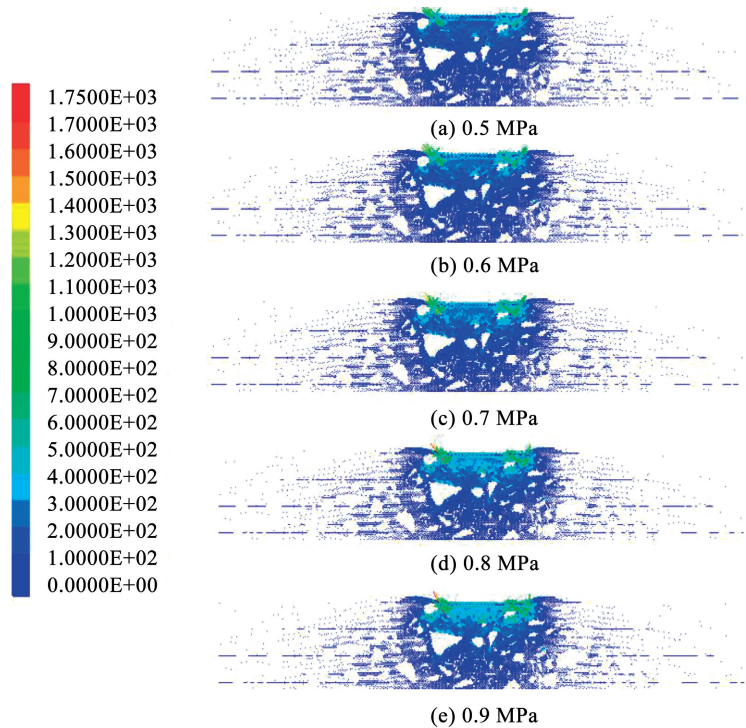


图 15 不同荷载下虚拟试件内部的接触力链

Fig. 15 Contact force chain under different load conditions

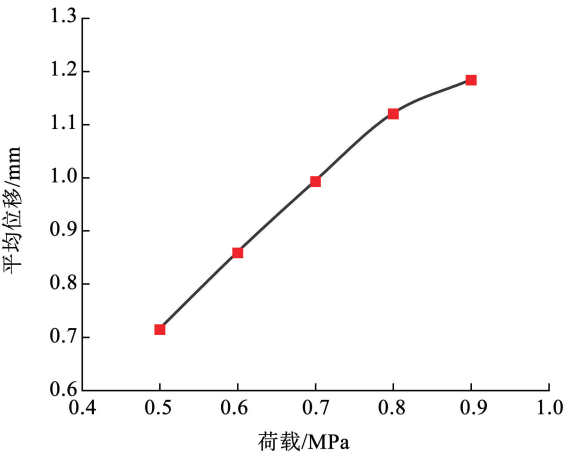


图 16 不同荷载下粗集料的平均位移

Fig. 16 Average displacement of coarse aggregate under different load conditions

通过不同荷载条件下的车辙仿真发现,荷载大小对车辙深度有显著影响,在超载情况下,试件内部颗粒的位移显著增大,砂浆和粗集料颗粒的最大位移差也会增加,混合料黏结破坏几率增加,表现为高荷载水平下沥青路面失稳型车辙;荷载的变化对粗集料的平均位移影响较大,对平均位移角无明显影响。

5 结 论

通过颗粒物质的 Jamming 理论开展了沥青混合料车辙演化机制研究,分析了车辙变形过程中结构宏细观的变化特征,探究了温度和荷载条件对沥青路面 Unjamming 转变行为的影响。主要结论如下:

1)采用图像处理技术精确重构了沥青混合料细观结构模型,基于宏观测试和时-温等效原理确定了 Burger's 模型的细观参数,验证了数值模型的可靠性。仿真试验结果和室内试验结果基本吻合,构建的细观模型能很好地再现路面车辙的演变过程。

2)虚拟车辙演变过程分析表明,车辙演变与颗粒物质 Unjamming 转化行为密切相关,随着加载时间的增加,混合料 Jamming 堵塞程度增大,车辙深度和面积分数也逐渐增加,并最终趋于稳定。同时,砂浆接触力和受荷粗集料位移也逐渐增大,说明沥青砂浆和集料骨架对材料颗粒体系 Jammed 态的转变起到了重要作用。

3)不同温度和荷载条件下的车辙仿真结果表明,沥青混合料颗粒体系 Jammed 态的转变受到了沥青砂浆和集料骨架共同作用的影响。混合料 Jamming 堵塞程度随温度增加而降低,随荷载水平升高而增大。沥青路面颗粒体系由稳定的 Jammed 态转变为不稳定的 Unjammed 态,是诱导路面车辙和泛油病害发生的内在机制。

参考文献

[1]《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1
Editorial Department of China Highway Journal. Review on China's pavement engineering · 2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1

- [2] GUO R, NIAN T F, ZHOU F. Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119237
- [3] ALBAYATI A H. A review of rutting in asphalt concrete pavement [J]. Open Engineering, 2023, 13(1): 20220463
- [4] YAO H, XU M, LIU J F, et al. Literature review on the discrete element method in asphalt mixtures [J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 879245
- [5] LI J, ZHANG J H, QIAN G P, et al. Three-dimensional simulation of aggregate and asphalt mixture using parameterized shape and size gradation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(3): 0002623
- [6] 裴建中. 道路工程学科前沿进展与道路交通系统的代际转换[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 1
PEI Jianzhong. Progress of highway engineering and generation upgrading of highway transformation system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 1
- [7] 费明龙, 徐小蓉, 孙其诚, 等. 颗粒介质固-流态转变的理论分析及实验研究[J]. 力学学报, 2016, 48(1): 48
FEI Minglong, XU Xiaorong, SUN Qicheng, et al. Studies on the transition between solid-and fluid-like states of granular materials [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(1): 48
- [8] 吕松涛, 杨硕, 范涛, 等. SMC 再生 SBS 沥青的流变性能和微观特性研究[J/OL]. 长沙理工大学学报(自然科学版). (2023-10-18). <https://link.cnki.net/doi/10.19951/j.cnki.1672-9331.20220514001>
LYU Songtao, YANG Shuo, FAN Tao, et al. Study on rheological properties and microscopic characteristics of SMC reclaimed SBS Asphalt [J/OL]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science). (2023-10-18). <https://link.cnki.net/doi/10.19951/j.cnki.1672-9331.20220514001>
- [9] LIU A J, NAGEL S R. Jamming is not just cool any more [J]. Nature, 1998, 396(6706): 21
- [10] ROBERT P B, CHAKRABORTY B. The physics of jamming for granular materials: a review [J]. Reports on Progress in Physics, 2019, 82(1): 012601
- [11] LIU G, CHEN L L, QIAN Z D, et al. Rutting prediction models for asphalt pavements with different base types based on RIOHTrack full-scale track [J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124793
- [12] 毕忠伟, 孙其诚, 刘建国, 等. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 372
BI Zhongwei, SUN Qicheng, LIU Jianguo, et al. Development of shear band in a granular material in biaxial tests[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 372
- [13] 裴建中, 樊泽鹏, 薛斌, 等. 沥青路面材料的颗粒物质视域: 理论、方法与进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 121
PEI Jianzhong, FAN Zepeng, XUE Bin, et al. Granular matter horizon of asphalt pavement materials: theory, method and progress [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 121
- [14] 刘文昶. CT 技术在沥青混合料研究中的应用[J]. 石油沥青, 2017, 31(1): 51
LIU Yongchang. Application of CT technology in asphalt mixture research[J]. Petroleum asphalt, 2017, 31(1): 51
- [15] 高萌, 韩旭, 田守成, 等. 含智能感知器件的沥青路面材料力学特性 PFC 数值分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 49
GAO Meng, HAN Xu, TIAN Shoucheng, et al. PFC numerical analysis of mechanical properties of asphalt pavement materials with intelligent sensing devices [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 49
- [16] MA T, ZHANG D Y, ZHANG Y, et al. Effect of air voids on the high-temperature creep behavior of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element modeling [J]. Materials & Design, 2016, 89: 304
- [17] 张小雪, 王滨生, 迟玉鹏, 等. 边坡稳定分析的颗粒流方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(5): 666
ZHANG Xiaoxue, WANG Binsheng, CHI Yupeng, et al. Research on particle flow method for slope stability analysis[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(5): 666
- [18] 肖敏敏, 程韦, 杨礼明. 考虑沥青混合料空隙率的蠕变特性及改进 Burgers 模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4): 1698
XIAO Minmin, CHENG Wei, YANG Liming. Considering the creep characteristics of asphalt mixture porosity and the improved Burgers model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(4): 1698
- [19] 查旭东, 刘宏富, 潘勤学, 等. 沥青路面蠕变响应现场预估方法与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 10
ZHA Xudong, LIU Hongfu, PAN Qinxue, et al. In-situ prediction method and test of creep response of asphalt pavement[J]. Chinese Journal of Highways, 2017, 30(9): 10
- [20] 薛斌. 沥青混合料细观力学特性与演化行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2020
XUE Bin. Research on meso-mechanical properties and evolution behavior of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020
- [21] DONG Q, ZHENG D B, ZHAO X K, et al. Mesoscale numerical simulation of fracture of cement treated base material during semi circular bending test with discrete element model [J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119981
- [22] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国工业建筑出版社, 2018
SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical simulation technology and application with Particle Flow Code (PFC5.0)[M]. Beijing: China Industrial Architecture Press, 2018
- [23] 马凯杰. 基于胎-路耦合的桥面铺装离散元细观动力学行为分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022
MA Kaijie. Meso-dynamic behavior analysis of discrete element of bridge deck pavement based on tire-road coupling [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022
- [24] 夏舜. 基于三维离散元法沥青路面面层力学响应预估[D]. 杭州: 浙江大学, 2020
XIA Shun. Prediction of mechanical response of asphalt pavement surface based on three-dimensional discrete element method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020
- [25] 李奕佳, 岳宗豪. 基于离散元的行车荷载作用下沥青砂浆迁移规律研究[J]. 市政技术, 2022, 40(1): 48
LI Yijia, YUE Zonghao. Research on asphalt mortar migration law under driving load based on discrete element method[J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(1): 48
- [26] 刘卫东, 高英, 黄晓明, 等. 沥青路面现场压实细观特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 99
LIU Weidong, GAO Ying, HUANG Xiaoming, et al. Mesoscopic characteristics of asphalt pavement during field compaction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 99