

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

李南鹏¹, 王国清², 王志斌², 张霞³, 司春棣¹

(1. 石家庄铁道大学 交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 河北雄安京德高速公路有限公司, 河北 雄安 071000; 3. 石家庄铁路职业技术学院 轨道交通系, 河北 石家庄 050062)

摘要:为探究重载车辆作用下高速公路胶粉沥青混合料(ARHM-20)面层的疲劳损伤机理及细观力学行为, 该文基于离散元方法, 构建混合料的三维细观结构模型, 研究从集料运动到形成宏观永久变形的损伤机理。采用Burger's本构模型表征沥青砂浆的黏弹属性, 通过沥青蠕变试验获取不同温度下Burger's模型的宏观力学参数, 基于宏观与细观的转换公式得到细观建模参数; 利用Solidworks软件制作不规则粗集料, 使得模型更接近实际工况。该文采用分布加载方式, 先让轮胎在地面滚动并提取与地面的接触力, 随后将接触力施加在模型上。依据实际公路工程级配, 制备车辙试验试件并进行室内车辙试验, 验证三维细观结构模型的有效性和正确性。研究结果表明: 离散元方法可用于研究沥青混合料的细观运动力学行为, 车辙演化宏观行为主要是由沥青混合料内部粗集料的细观受力分布及运动演化产生, 与未添加胶粉的沥青混合料相比, ARHM-20沥青混合料具有更好的高温抗疲劳能力。

关键词: 胶粉沥青混合料; 离散元方法; 细观力学行为; 损伤演化机理

中图分类号: U414

文献标志码: A

Micro Mechanical Analysis and Experiment on Fatigue Damage of Rubber Powder Asphalt Mixture of Expressway

LI Nanpeng¹, WANG Guoqing², WANG Zhibin², ZHANG Xia³, SI Chundi¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Hebei Xiong'an Jingde Expressway Co., Ltd., Xiong'an, Hebei 071000, China; 3. Department of Rail Transit, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050062, China)

Abstract: To explore the fatigue damage mechanism and micro-mechanical behavior of the pavement of rubber powder asphalt mixture (ARHM-20) of expressway influenced by heavy vehicles, a three-dimensional microstructural model of the mixture was built based on the discrete element method, and research on the damage mechanism from aggregate motion to macroscopic permanent deformation were conducted. The Burger's constitutive model was used to characterize the viscoelastic properties of asphalt mortar. The macro mechanical parameters of Burger's model at different temperatures were obtained through asphalt creep tests, and the micro modeling parameters were obtained based on the macro and micro conversion formulas. The irregular coarse aggregate was made by Solidworks software to make the model closer to the actual working conditions. In this paper, under the distributed loading method, the contact force was extracted after rolling the tire on the ground, and then the force was applied to the model. Based on the actual highway engineering gradation, the rutting test specimen was prepared and the laboratory rutting test was carried out to verify the

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 12072205); 河北省交通运输厅科技计划项目(编号: JD-202006, JD-202007)

作者简介: 李南鹏, 男, 硕士研究生. E-mail: 1370375495@qq.com

validity and correctness of the three-dimensional microstructure model. The research results show that the discrete element method can be used to study the micro motion-mechanical behavior of asphalt mixture. The macro behavior of rutting evolution is mainly generated by the micro stress distribution and motion evolution of the coarse aggregate in the asphalt mixture. Compared with the asphalt mixture without rubber powder, the ARHM-20 asphalt mixture has better high-temperature fatigue resistance.

Keywords: rubber powder asphalt mixture; discrete element method; micromechanical behavior; damage evolution mechanism

0 引言

随着中国交通运输行业的飞速发展,中国道路建设里程达到了空前规模。在重载车辆和道路环境的复杂应力状态下,导致沥青路面在道路运营期内过早破坏,沥青下面层作为沥青路面的主要支撑部位,对道路的使用寿命影响显著。温度变化等环境因素对疲劳损伤具有重要影响,且造成的内部损伤不易修复。因此,有必要研究温度变化对于沥青混合料疲劳损伤演化的细观机理。

路面内部损伤是由于在荷载作用下,沥青混合料空隙率逐渐减小,混合料变得更加密实,变形逐步积累形成的。沥青混合料的宏观变形与其细观力学属性息息相关。目前两种主流的沥青混合料细观结构建模方法为有限元法(FEM)和离散元法(DEM)。Kalyankar等^[1]采用FEM模拟胎-路相互作用,获得宏观路面粗糙度对车路相互作用的影响;李沛洪等^[2]借助有限元法建立二维非均质沥青混合料劈裂试验模型,测定劈裂受力状态下模型内部宏观应力值和应力分布情况;Tong等^[3]提出了基于热黏弹性模型的两种形式的屈服函数研究车辙的标准;Wang等^[4]利用Ansys有限元法对多跨连续梁桥在交通荷载和车辆动力相互作用下的动力特性进行了数值分析,说明有限元可以考虑复杂的桥梁和车辆模型,也可以考虑复杂的交通工况。但FEM建模在细观力学响应方面仍有所欠缺。可见,在沥青混合料的FEM建模中,一般假设其是连续均质的材料。事实上,沥青混合料是一种多向非均匀、不连续材料,由高强度骨料、黏性沥青和空隙组成。因此,均质模型不能很好地描述沥青混合料在车辙发展过程中的细观力学变化,比如混合料内部接触力的变化和骨料的运动,难以揭示其车辙演化机理。

与分析连续介质的FEM不同,DEM可广泛应用

于研究不连续材料的力学性能^[5]。基于牛顿第二定律,DEM把非连续材料离散成若干颗粒,通过设置颗粒之间不同的接触关系,表征该材料的本构关系,进而研究其力学特性。在沥青混合料的细观力学响应研究中,DEM可以更好地描述各颗粒之间的接触特性和运动趋势,可用于构建沥青混合料细观结构模型,进而研究其受力、变形及损伤行为^[6]。Wang等^[7]采用离散元方法建立三维全球颗粒的沥青混合料细观结构模型,利用静荷载等效方法模拟车辙过程,并通过室内车辙试验验证了该模型的正确性,研究了沥青混合料的永久变形响应;Nian等^[8]建立了沥青混合料的离散元模型,研究其低温抗裂性能,得出集料与沥青砂浆的接触断裂是其开裂的主要原因;Xue等^[9]基于三维虚拟车轮跟踪试验的沥青混合料永久变形细观力学响应研究,从细观离散力学的角度很好地解释了车辙变形机理;Zhang等^[10]通过改变车轮荷载、加载频率和试验环境,进行了不同试验条件下的汉堡车轮跟踪试验,探讨了沥青混合料在水分、超载和加载频率耦合作用下的永久变形特性;彭勇等^[11]考虑利用离散元法模拟沥青混合料剪切疲劳试验,采用等效荷载加载方式控制载荷应力范围,得出集料接触点数量和总接触长度对沥青混合料剪切疲劳寿命影响显著的结论;Wang等^[12]基于DEM的沥青混合料细观蠕变机理,证明离散元模型有效模拟了动态蠕变试验。以上研究表明DEM可以很好地模拟沥青混合料的细观力学行为,但是对于车辙试验中轮胎反复碾压的模拟多采用静载荷等效的方法,难以准确描述实际车辙过程中复杂的胎路接触关系,导致研究混合料的损伤行为可能存在一定误差。

虽然现有文献对利用DEM模拟沥青混合料的力学特性已取得丰硕成果,但针对高速公路路面胶粉沥青混合料的车辙细观力学性能方面的研究较

少。目前,张飞等^[13]为解决热拌胶粉改性沥青混合料在施工过程中释放大量有毒、有害气体的问题,采用温拌技术来改善这一难题,发现温拌后胶粉改性沥青混合料的低温性能也能有所改善;叶长建等^[14]为提高沥青路面的使用性能,通过在改性沥青里添加胶粉,不仅提高了高温时的复数模量,还减小了天然沥青对低温性能的不利影响;孙泽强等^[15]为推进绿色公路建设,以SBS/胶粉复合改性沥青混合料作为研究对象,发现其既可提高沥青路面使用性能又可降低胶粉掺量,成为橡胶沥青路面发展的重要方向。添加胶粉既可以改善沥青混合料的性能又可以处理多余废弃橡胶轮胎、减少对环境的污染,因而,胶粉沥青混合料广泛应用于高速公路铺装结构中。综上所述,有必要基于细观力学方法和室内车辙试验研究胶粉沥青混合料的高温抗疲劳性能,建立胶粉沥青混合料细观模型,探究车辙形成的宏、细观机理。

本文首先计算胎路接触力,然后施加于沥青混合料细观结构模型上,从细观力学角度研究了高速公路胶粉沥青混合料的车辙演化过程。针对添加胶粉的沥青混合料ARHM-20进行沥青蠕变试验,获取沥青Burger's模型细观参数;构建细观胎路接触模型,计算胎路接触力;采用随机集料生成技术能更准确地描述集料的实际形态,建立沥青混合料的三维

车辙试件模型,施加胎路接触力,模拟实际车辙加载过程,并进行室内车辙试验,验证了模型的可靠性。采用验证过的细观模型研究高温下沥青混合料的车辙演化过程,揭示从集料运动到形成永久变形的细观力学机理。通过研究对比有无添加胶粉的改性沥青混合料的细观力学行为,分析胶粉对沥青混合料抗疲劳损伤性能的影响,为胶粉沥青混合料的实际应用推广提供一定的理论依据。

1 室内车辙试验

1.1 试件制备

为了探究胶粉沥青混合料的细观力学行为特性,建立三维离散元模型进行细观分析。为获取离散元建模所需的细观参数,根据沥青混合料宏观参数与细观参数之间的转换关系,进行所需的相关室内试验。本文依据某公路选用的40%掺量胶粉改性沥青进行施工建设,故也采用了同种设计配方的沥青混合料来进行试验,该沥青混合料设计成分主要由40%掺量胶粉改性沥青和玄武岩石料组成,通过马歇尔生产试验,将搅拌温度控制在180~185℃,设计出粗集料最大公称粒径为20mm的密级配沥青混合料ARHM-20,其空隙率为4.0%,最佳油石比为5.0%,沥青混合料的集料级配如表1所示,制备了3组相同混合料的试件进行室内车辙试验。

表1 ARHM-20沥青混合料的级配组成

Table 1 Gradation composition of ARHM-20 asphalt mixture

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100.0	100.0	88.0	76.0	59.0	35.0	27.0	21.0	17.0	13.0	10.0	8.0
级配下限	100.0	90.0	77.0	64.0	47.0	25.0	18.0	14.0	10.0	7.0	5.0	4.0
实际级配	100.0	94.5	84.3	71.9	53.6	30.0	23.0	16.8	10.8	7.9	6.0	5.6

1.2 室内试验

为得到胶粉沥青内部的细观力学参数,进行胶粉改性沥青蠕变试验,获取不同温度下的柔度曲线,试验装置如图1所示。蠕变柔量 $J(t)$ 和Burger's模型的宏观参数的关系如下:

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

式中: $\epsilon(t)$ 为 t 时刻的应变; σ_0 为施加的恒定应力; E_1 和 η_1 分别为Burger's模型Kelvin截面的弹性模量和黏度; E_2 和 η_2 是Burgers模型的Maxwell截面中的弹



图1 蠕变试验装置

Figure 1 Creep test device

性模量和黏度; t 为加载时间。

通过式(1)拟合不同温度下的蠕变柔度曲线确

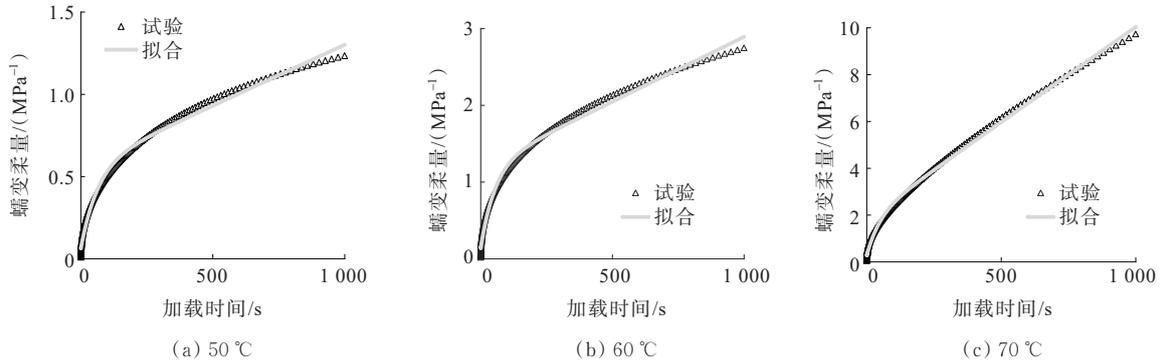


图2 不同温度试验和模拟的柔度拟合曲线

Figure 2 Flexibility fitting by tests and simulations at different temperatures

表2 不同温度下Burger's模型参数

Table 2 Parameters of Burger's model at different temperatures

温度/ °C	E_1 / MPa	η_1 / (MPa·s)	E_2 / MPa	η_2 / (MPa·s)	ν
50	11.43	1 658.38	1.75	185.43	0.5
60	4.75	732.84	0.813	81.51	0.5
70	2.71	130.62	0.54	45.96	0.5

注: ν 为沥青混合料的泊松比。

通过级配配比制备3组 ARHM-20 混合料车辙试件, 尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。试件进行室内车轮跟踪试验(图3), 检验 ARHM-20 沥青混合料的抗疲劳破坏能力。室内车辙试验采用车辙仪使试件保持 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温, 以 0.7 MPa 荷载压力、 $42\text{ 次}/\text{min}$ 碾压速度, 加载 1 h 来模拟实际车轮碾压过程, 以此测出该温度下的动稳定度和车辙深度。沥青混合料的动稳定度取 45 min 和 60 min 时的永久变形量来计算, 如式(2)所示。

$$D_s = \frac{42(t_{60} - t_{45})}{d_{60} - d_{45}} = \frac{42 \times 15}{d_{60} - d_{45}} \quad (2)$$

式中: D_s 为混合料试件的动稳定度; t_{60} 、 t_{45} 分别为进



图3 车轮跟踪试验仪

Figure 3 Wheel tracking tester

行 60 min 、 45 min 试验时的时间; d_{60} 、 d_{45} 分别为试件在 60 min 、 45 min 时所产生的永久变形量。

2 含胶粉沥青混合料的细观力学模型

2.1 三维离散元模型建立

为了简化在离散元 PFC 软件中的建模, 通常把沥青混合料的组成简化成由粗集料、沥青以及空隙组成, 并将粒径大于 2.36 mm 的石料颗粒看作是粗集料, 粒径小于 2.36 mm 的看成沥青部分。Xue 等^[9]的研究表明: 为了兼顾计算效率和模型的准确性, 发现将粒径小于 2.36 mm 的组成成分如胶粉、纤维、沥青等颗粒粒径都定为 1.00 mm 时, 试验测量结果与 DEM 预测值吻合良好。因此, 为了提高计算效率, 本文选择将沥青模型设为粒径为 1.00 mm 的球体。

为了更加真实地表征粗集料的三维空间形态, 采用随机集料生成技术。首先利用 Solidworks 软件绘制多种集料三维轮廓, 将其保存为 STL 格式; 导入到 PFC 中, 填充不规则的 clump 团块来生成粗集料如图 4(a) 所示; 通过填充, 表征不同集料的表面粗糙程度, 使之更加接近真实集料形态, 如图 4(b) 所示。

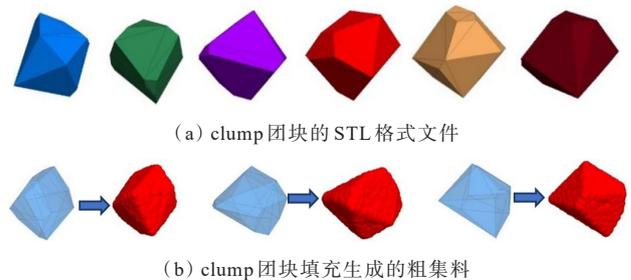


图4 模型中 clump 团块的制作流程

Figure 4 Production process of clump blocks in model

在制作室内车辙试验采用的模具时,由于其几乎不存在变形的特性,采用了 wall 命令来生成 300 mm×300 mm×50 mm 的刚体;编写 fish 代码,按照配合比来投放粗集料、沥青和空隙,随后进行模型内应力的预平衡,删除悬浮颗粒,并清除颗粒单元的初始接触应力和速度。

2.2 赋予模型接触属性和参数

PFC 主要依靠各单元之间的细观本构力学模型来实现对混合料三维结构的模拟,本文创建的模型内部主要由黏弹性的沥青和线弹性的集料组成,所以本文采用的接触模型主要有两种:粗集料之间的线性接触,粗集料和沥青以及沥青之间的 Burger's 接触模型,如图 5、6 所示。基于他人的研究和分析^[16],粗集料之间的线性刚度接触弹性模量取 55.5 GPa,泊松比取 0.5。为获取沥青的 Burger's 参数,根据沥青蠕变试验确定的 Burger's 模型宏观参数,通过以下公式计算得到沥青的细观参数^[9]:

$$\begin{cases} C_{m_m} = 2\eta_1 R \\ K_{m_m} = 2E_1 R \\ C_{k_n} = 2\eta_2 R \\ K_{k_n} = 2E_2 R \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{m_t} = \frac{\eta_1}{(1+\nu)} R \\ K_{m_t} = \frac{E_1}{(1+\nu)} R \\ C_{k_s} = \frac{\eta_2}{(1+\nu)} R \\ K_{k_s} = \frac{E_2}{(1+\nu)} R \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{m_m} 和 K_{m_m} 分别为 Kelvin 单元的法向黏度和刚度; C_{k_n} 和 K_{k_n} 分别为 Maxwell 单元的法向黏度和刚度; C_{m_t} 和 K_{m_t} 分别为 Kelvin 单元的切向黏度和刚度; C_{k_s} 和 K_{k_s} 分别为 Maxwell 单元的法切向黏度和刚度; R 为沥青颗粒的半径,本文取 0.5 mm。

2.3 虚拟车辙试验

由于沥青颗粒的粒径太小,在三维模型中生成个数过多,导致计算效率大大降低,可采取其中一段 300.00 mm×21.84 mm×50.00 mm 车辙试件模型来进行加载模拟,如图 7 所示。在模拟中,先让轮胎在地面上滚动,提取轮胎与地面的接触力(图 8),随后

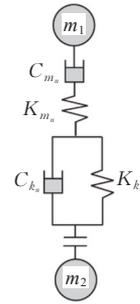


图5 Burger's 法向本构模型

Figure 5 Burger's normal constitutive model

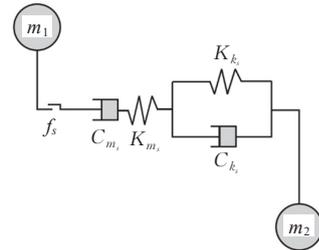


图6 Burger's 切向本构模型

Figure 6 Burger's tangential constitutive model

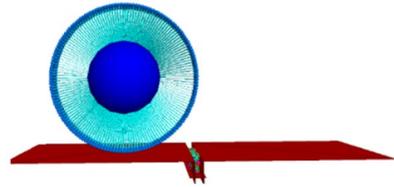


图7 沥青混合料模型图

Figure 7 Asphalt mixture model

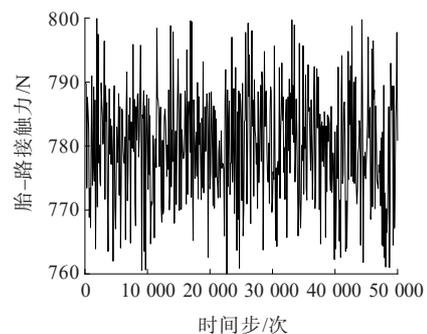


图8 轮胎与地面接触力

Figure 8 Contact force between tire and ground

放置一块加载板将接触力附在其上来代替轮胎施力(图 9)。受制于计算机的计算效率,可以采用时温等效原理对计算时间进行缩减,根据陈俊等^[17]的研究,在对模拟结果影响较小的范围内,通过将 Burger's 模型中的黏性系数 η 缩小 100 倍,可以使计算时间也缩小 100 倍。

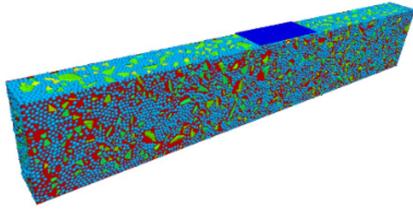


图9 胎路接触力加载示意图

Figure 9 Tire-ground contact force loading

3 高温车辙细观力学行为演化

3.1 细观模型验证

通过表2列出的Burger's参数,对50℃、60℃和70℃时的车辙试验进行模拟,图10为室内车辙试验测试的变形与数值计算变形结果对比,图11为室内车辙试验和数值计算的动稳定度结果对比。60℃和70℃时动稳定度计算结果要比试验测试结果分别小7.7%和6.9%,分析主要原因可能是在试件建模时,为提高计算效率,将沥青和细砂浆统一采用粒径为1.00mm的球形颗粒来代替,比实际颗粒粒径总体偏大,导致空隙变大,加载初期接触数量减少,抗车辙性能降低。但随着时间的累积,沥青混合料逐渐密实,最终模拟结果与试验结果相差不大。

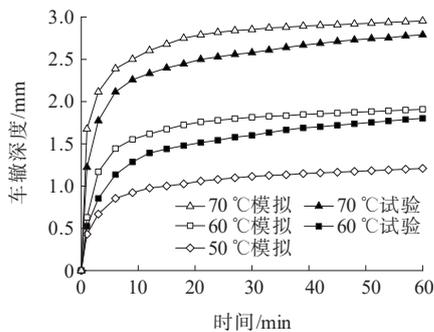


图10 试验和模拟车辙结果

Figure 10 Rutting results by tests and simulations

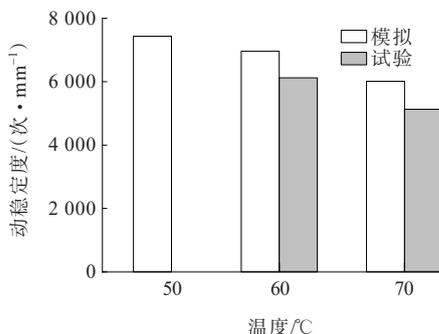


图11 试验和模拟动稳定度结果

Figure 11 Test and simulation dynamic stability

由图10可以看出:温度越高,车辙越深,车辙初期增长速率越大。分析原因可能是高温会使沥青的黏度降低,使得骨架支撑强度减弱,同时也降低了沥青混合料的刚度,使其抵抗变形性能下降。根据Xue等^[9]的研究,在数值计算结果和试验结果吻合良好的情况下,仿真模型具有良好的可靠性,本文试验与数值计算的车辙和动稳定度结果相近,证明了该离散元模型可用于模拟沥青混合料的疲劳损伤演化过程。

通过上述仿真与室内的车辙试验结果对比可以看出:本文采用的建模方式生成的沥青混合料试件模型,具有和实物高度相近的性能表现,可采用此方法来建立沥青铺装层模型,探究铺装层在不同工况下的细观力学情况。依据上述方式,建立了某施工时设计的ARHM-13的沥青铺装层模型,并进行车辙试验模拟,结果如图12所示,可见车辙变化趋势合理,该模型具有较好的可靠性。

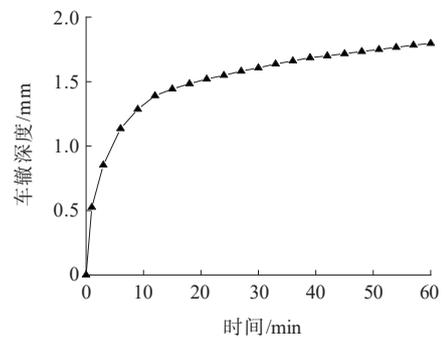


图12 ARHM-13混合料车辙模拟结果

Figure 12 Simulation results of ARHM-13 mixture rutting

3.2 粗集料运动特性

在垂向荷载作用下,粗骨料会产生平移和旋转运动。根据模拟结果,可以得到在不同温度下的粗集料运动特性,以此来分析沥青混合料的细观力学特性。模型的永久变形结果如图13所示,图14是其粗集料的垂向运动趋势图,从图13、14可以看出:承载区域的粗集料运动方向总体向下和向外45°。载荷两侧的粗集料则沿水平方向移动。图15为粗集料在不同温度各时刻各方向的平移距离,从结果统计中可以看出:模型在加载过程中,在纵向和侧向位移很小,垂向位移很大,表明车辙变形是由混合料的致密化和侧向流动形成的。

图16是不同时刻沥青混合料中粗骨料的平均旋转角。可以看出:粗集料的旋转角随时间呈上升趋势

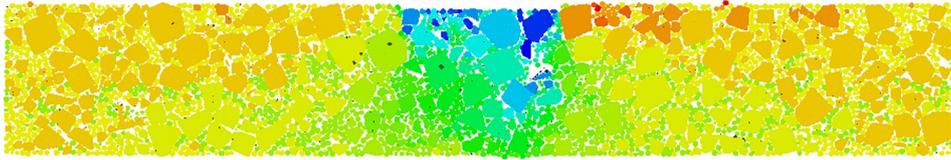


图13 模型的变形剖视图

Figure 13 Deformation sectional view of the model

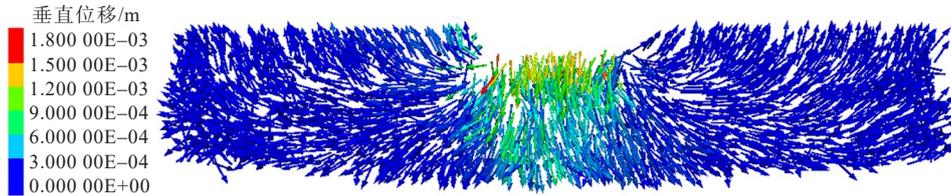


图14 粗集料的垂向运动趋势

Figure 14 Vertical movement trend of coarse aggregate

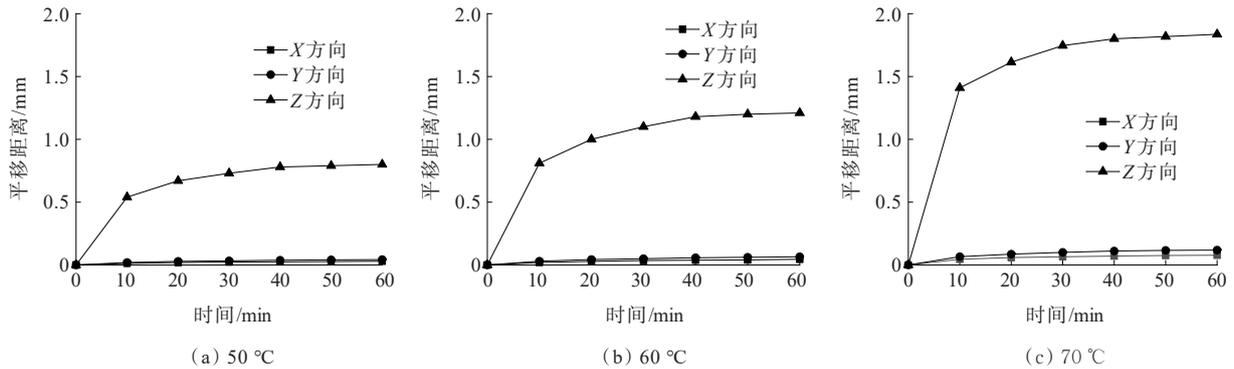


图15 不同温度时粗集料在各方向的平移距离

Figure 15 Translation distance of coarse aggregate in various directions at different temperatures

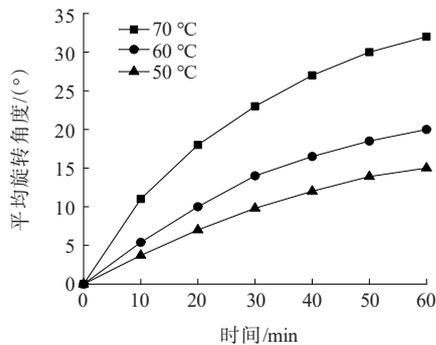


图16 粗集料在各时刻的旋转角度

Figure 16 Rotation angle of coarse aggregate at various times

势。分析原因可能是,在加载初期,颗粒之间空隙较大,接触也未能全部激活,导致整体模型较松散。随着加载的持续,粗集料逐渐旋转使模型趋于密实,骨架效应增大,抗疲劳损伤性能提高。沥青材料作为一种黏弹性材料,温度越高其黏性越低,降低了集料与沥青之间的黏结力,对粗集料的约束性减小。因

此,70 °C 粗集料的旋转角也就越大,沥青混合料的抗疲劳损伤性能降低。

通过式(5)计算不同温度下粗集料平移角,结果如图17所示。综合60 °C和70 °C的结果可以看出:在XY平面的平移角 α 主要集中在0°~40°,XZ平面平移角 β 主要集中在40°~90°,YZ平面平移角 γ 主要集中在60°~90°。大部分粗集料的平移角 β 和 γ 都接近90°,该结果表明:粗集料沿垂向平移距离要远大于纵向和侧向平移距离,同时,70 °C时的各平面平移角都要稍大于60 °C时的,这也是温度升高使得沥青混合料黏性降低所致。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left| \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right| \\ \beta = \arctan \left| \frac{z_1 - z_0}{x_1 - x_0} \right| \\ \gamma = \arctan \left| \frac{z_1 - z_0}{y_1 - y_0} \right| \end{cases} \quad (5)$$

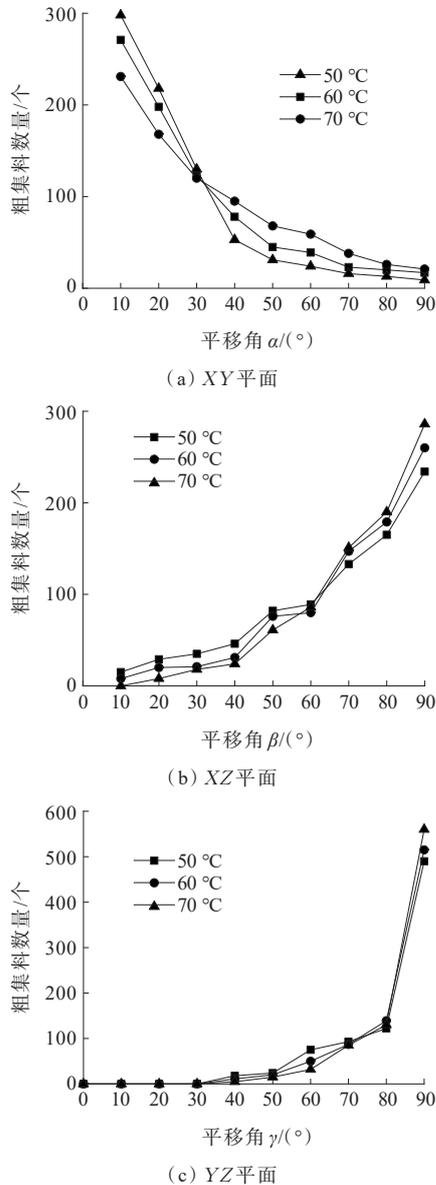


图 17 不同温度下各平面粗集料的平移角

Figure 17 Translation angle of coarse aggregate at various temperatures and planes

3.3 胶粉对沥青混合料作用分析

胶粉沥青是一款新型优质改性沥青,其通过添加的胶粉与沥青中包含的树脂、烃类等多种有机物发生一系列物理和化学反应,可以使胶粉变得湿润膨胀,增大其黏性系数,提高沥青软化点,黏度和针入度会随着胶粉掺量的增大而增大^[18],使得沥青混合料具有更高强度的黏韧性以及弹性,提高了沥青混合料的路用性能。

为探究添加胶粉对沥青混合料抗疲劳损伤性能的改善情况,建立了不加胶粉同种配置的改性沥青混合料 SMA-20 试件模型,进行相同工况的车辙试验模拟,从细观角度入手,通过分析沥青接触力的变化以及粗集料的运动情况,来研究胶粉对沥青混合料抗疲劳损伤性能的影响。图 18 为沥青混合料内部力链受力状态,深色力链表示受拉,浅色力链表示受压,从图 18 可以看出沥青单元所受力链基本为拉应力。

两种混合料中沥青产生的接触力见图 19、20。从图 19、20 可以看出:胶粉改性沥青接触力最大值为 0.379 6 N,而普通改性沥青接触力最大值为 0.283 2 N,胶粉的加入使得沥青混合料承载的接触力增大,从而使沥青混合料内部凝聚力增加,具有更好的抗开裂性能。

图 21、22 是两种沥青混合料内部粗集料的运动情况。从图 21、22 可以看出:胶粉沥青混合料中粗集料的整体运动趋势要小于改性沥青混合料的,并且胶粉沥青混合料粗集料的最大位移为 1.623 9 mm,改性沥青混合料粗集料的最大位移为 2.130 0 mm,胶粉的加入使得沥青混合料的软化点提高,高温流动性降低,

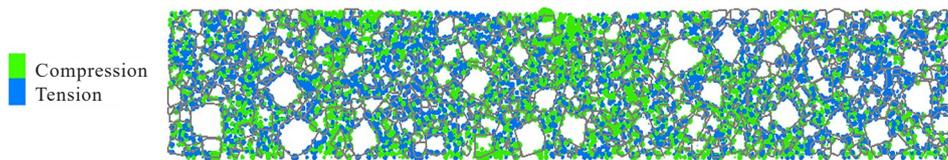


图 18 沥青单元力链受力状态

Figure 18 Stress state of asphalt unit force chain

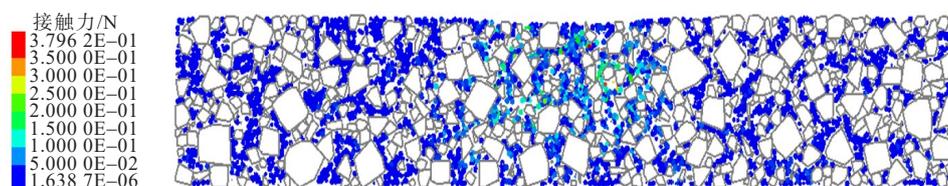


图 19 胶粉改性沥青接触力

Figure 19 Contact force of rubber powder modified asphalt

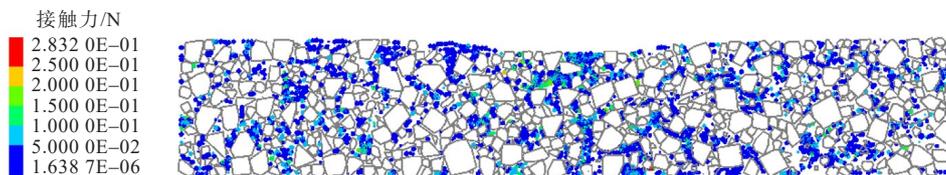


图20 普通改性沥青接触力

Figure 20 Contact force of ordinary modified asphalt

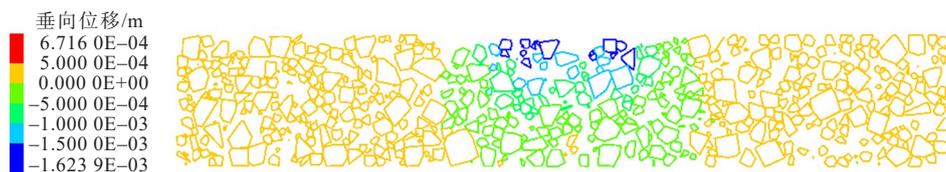


图21 胶粉沥青混合料内粗集料运动情况

Figure 21 Movement of coarse aggregate in rubber powder asphalt mixture

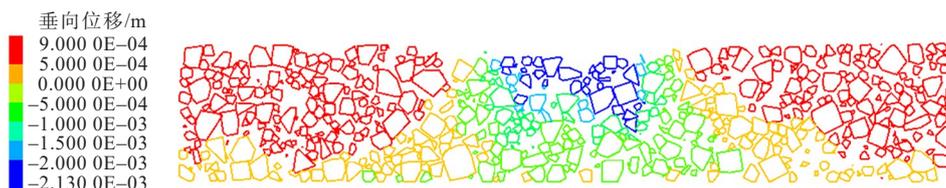


图22 改性沥青混合料内粗集料运动情况

Figure 22 Movement of coarse aggregate in modified asphalt mixture

从而使得粗集料位移减小,胶粉沥青混合料的抗疲劳损伤性能要优于未添加胶粉的改性沥青混合料。

综上所述,胶粉的添加可以使沥青混合料整体性能提升,增大了沥青的黏度,使其黏附性更好,可以使沥青更多黏附在粗集料上,增强了整体骨架的强度、热稳定性,从而提高了沥青混合料的抗疲劳损伤性能,同时大大提升了沥青路面的减振降噪效果,延长了道路使用寿命。

4 结论

本文采用随机集料生成技术,构建 ARHM-20 沥青混合料三维细观结构模型,施加胎路接触力,模拟车轮碾压,研究高温下混合料内部从集料运动到形成宏观永久变形的损伤演化过程,得出以下结论:

(1) 采用随机集料生成技术,可更真实地描述粗集料的空间形态,构建沥青混合料三维细观结构模型,进行沥青蠕变试验并推导宏观细观转换公式,最终获取沥青混合料的细观建模参数。室内车辙试验结果和计算结果吻合良好,证明了该离散元模型可用于模拟沥青混合料的疲劳损伤演化过程。

(2) 车辙加载过程中,加载区域的粗集料运动方

向主要为总体向下和向外 45° ,加载区域两侧的粗集料则沿水平方向移动,证明车辙变形是由混合料的致密化和侧向流动形成的。

(3) 与改性沥青混合料 SMA-20 相比,胶粉沥青混合料 ARHM-20 中沥青接触力增大,粗集料运动趋势减小,抵抗疲劳损伤能力显著增强。同未添加胶粉的改性沥青混合料的细观力学行为对比发现,添加胶粉可以增强整体骨架强度,使得粗集料运动减弱,提高其热稳定性,说明添加胶粉可以提高混合料的高温抗疲劳损伤性能。

参考文献:

References:

- [1] KALYANKAR R, UDDIN N. Simulating the effects of surface roughness on reinforced concrete T beam bridge under single and multiple vehicles[J]. Advances in Acoustics and Vibration, 2016, 2016: 3594148.
- [2] 李沛洪,任贵政,巫伟军.非均质沥青混合料劈裂试验应力分布规律研究[J].公路, 2017, 62(6): 247-251.
LI Peihong, REN Guizheng, WU Weijun. Study on stress distribution law of heterogeneous asphalt mixture splitting

- test[J].Highway,2017,62(6):247-251.
- [3] TONG J S,MA T,SHEN K R, et al.A criterion of asphalt pavement rutting based on the thermal-visco-elastic-plastic model[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(4):1134-1144.
- [4] WANG L B,KANG X,JIANG P W.Vibration analysis of a multi-span continuous bridge subject to complex traffic loading and vehicle dynamic interaction[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2016,20(1):323-332.
- [5] ZHANG X, CHEN E L, GAO P Y, et al. Microdynamic simulations of crack evolution in asphalt mixtures under three-point bending loads[J]. Archive of Applied Mechanics,2021,91(11):4485-4497.
- [6] 叶向前.基于离散元方法的薄层罩面沥青混合料力学特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- YE Xiangqian. Study on mechanical properties of thin overlay asphalt mixture based on discrete element method [D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2021.
- [7] WANG H,ZHOU Z H,HUANG W L,et al.Investigation of asphalt mixture permanent deformation based on three-dimensional discrete element method[J].Construction and Building Materials,2021,272:121808.
- [8] NIAN T F,GE J G,LI P,et al.Improved discrete element numerical simulation and experiment on low-temperature anti-cracking performance of asphalt mixture based on PFC2D[J].Construction and Building Materials,2021,283:122792.
- [9] 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.
- [10] ZHANG K, XIE W, ZHAO Y L. Permanent deformation characteristic of asphalt mixture under coupling effect of moisture, overload and loading frequency[J]. Construction and Building Materials,2021,272:121985.
- [11] 彭勇,章秀芳,郭泽宇,等.离散元法分析集料接触特性对沥青混合料剪切疲劳寿命的影响[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(1):178-187.
- PENG Yong,ZHANG Xiufang,GUO Zeyu, et al.Influence of aggregate contact characteristics on shear fatigue life of asphalt mixtures using discrete element method[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023,53(1):178-187.
- [12] WANG H,HUANG W L,CHENG J J, et al.Mesosopic creep mechanism of asphalt mixture based on discrete element method[J]. Construction and Building Materials, 2021,272:121932.
- [13] 张飞,王岚,邢永明.温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].中外公路,2022,42(3):174-179.
- ZHANG Fei, WANG Lan, XING Yongming. Low temperature performance of modified asphalt mixtures with warm mix rubber powder[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(3):174-179.
- [14] 叶长建,陆少毅,黄秋山,等.废胶粉/天然沥青复合改性沥青流变性能与改性机理研究[J].中外公路,2022,42(3): 219-224.
- YE Changjian, LU Shaoyi, HUANG Qiushan, et al. Study on rheological properties and modification mechanism of crumb rubber/natural asphalt composite modified asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 219-224.
- [15] 孙泽强,周晓蕾,宋亮,等.SBS/胶粉复合改性沥青混合料研究进展[J].中外公路,2021,41(6):239-244.
- SUN Zeqiang,ZHOU Xiaolei,SONG Liang,et al.Research progress of SBS/crumb rubber composite modified asphalt mixture[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41 (6):239-244.
- [16] ZHANG X, CHEN E L, LI N P, et al. Micromechanical analysis of the rutting evolution of asphalt pavement under temperature - stress coupling based on the discrete element method[J]. Construction and Building Materials, 2022,325:126800.
- [17] 陈俊,张东,黄晓明.离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- CHEN Jun,ZHANG Dong,HUANG Xiaoming.Application of discrete element particle flow software (PFC) in road engineering[M].Beijing:China Communications Press Co., Ltd.,2016.
- [18] 马庆伟,郭忠印,李文博,等.不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J].中外公路,2022,42(3):225-230.
- MA Qingwei, GUO Zhongyin, LI Wenbo, et al. Analysis on the influence of different factors on the high temperature performance of composite rubber asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(3):225-230.