倪显阳，王开拓，徐硕昌，等. 基于纳米压痕的玄武岩纤维沥青混凝土微观力学性能研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(9)：257-272. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.020

NI Xianyang，WANG Kaituo，XU Shuochang，et al. Research on the microscopic mechanical properties of basalt fiber asphalt concrete based on nanoindentation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(9)：257-272. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.020

基于纳米压痕的玄武岩纤维沥青混凝土微观力学性能研究

倪显阳[1,2]，王开拓[1,2]，徐硕昌[3]，王银涛[1,2]，韩瑞泽[1,2]，任致娴[1,2]

(1. 青海民族大学 土木与交通工程学院，青海 西宁 810007；2. 青海省高原能源与环境工程重点实验室，青海 西宁 810007；3. 青海大学 土木水利学院，青海 西宁 810016)

摘 要：【目的】为了探究玄武岩纤维沥青混凝土(BFAC)的微观力学性能，【方法】结合纳米压痕试验与有限元数值模拟，深入研究 BFAC 各组成相的力学响应。基于 Abaqus 软件构建包含沥青基体、骨料、骨料-沥青过渡界面与纤维的四相三维模型，采用静力隐式算法模拟压痕过程，获取各相在荷载-位移响应、模量、硬度及蠕变行为的演化规律。【结果】研究结果表明：BFAC 各相的力学性能差异显著，试验测得沥青基体、骨料、纤维及过渡界面的杨氏模量分别为 1.73 GPa、76.69 GPa、120.60 GPa 和 34.39 GPa。数值模拟与试验曲线吻合度较高，杨氏模量误差小于 5 %，验证了所建立模型在 BFAC 微观力学行为响应与分析中的有效性和准确性。【结论】BFAC 中沥青基体模量与硬度最低，塑性变形与蠕变响应最为显著，骨料与纤维则表现出高模量、高硬度及优异的抗变形能力，蠕变位移均小于 70 nm，过渡界面的性能介于骨料和沥青基体之间。场分析表明，压痕点处的位移场、应力场及应变场均呈现出压头下方高、远场低的分布特征，位移、应力及应变等值线呈类椭圆形向内部扩展，且随深度增加其量值逐渐衰减。此外，还揭示了压头几何形状对压入响应的影响机制。相较于玻氏压头，球形压头因接触面积小，其加载曲线斜率小，在最大荷载下压入深度比玻氏压头增加约 12%~28%。研究结果可为水工沥青混凝土材料的结构设计与性能优化提供参考。

关键词：玄武岩纤维沥青混凝土；纳米压痕；数值模拟；微观力学性能；影响因素；杨氏模量；过渡界面

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.020　　开放科学(资源服务)标志码(OSID)：

中图分类号：TV441　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)09-0257-16

听语音 聊科研 与作者互动

Research on the microscopic mechanical properties of basalt fiber asphalt concrete based on nanoindentation

NI Xianyang[1,2], WANG Kaituo[1,2], XU Shuochang[3], WANG Yintao[1,2], HAN Ruize[1,2], REN Zhixian[1,2]

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Qinghai Minzu University, Xining 810007, Qinghai, China;
2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Energy and Environmental Engineering, Xining 810007, Qinghai, China;

收稿日期：2025-09-02；**修回日期**：2025-12-04；**录用日期**：2025-12-23；**网络出版日期**：2026-03-09

基金项目：国家自然科学基金项目(52379127)；那河大坝心墙玄武岩纤维沥青混凝土断裂性能研究项目(QHNH202005)

作者简介：倪显阳(1998—)，男，硕士研究生，主要从事沥青混凝土力学性能研究。E-mail：nxy729704038@163.com

通信作者：王开拓(1987—)，男，副教授，硕士研究生导师，博士，主要从事水工材料多尺度性能研究。E-mail：wangkaituo_917@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

3. School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: [Objective] To investigate the micromechanical properties of basalt fiber asphalt concrete (BFAC), [Methods] a nanoindentation tests with finite element numerical simulations was conducted to thoroughly examine the mechanical responses of the constituent phases of BFAC. A four-phase three-dimensional model comprising the asphalt matrix, aggregate, aggregate-asphalt transition interface, and fiber was constructed using Abaqus software. The static implicit algorithm was employed to simulate the indentation process, thereby capturing the evolution patterns of load-displacement response, modulus, hardness, and creep behavior for each phase. [Results] The findings reveal significant variations in the mechanical properties of the BFAC phases. The Young's moduli of the asphalt matrix, aggregate, fiber, and transition interface were measured at 1.73 GPa, 76.69 GPa, 120.60 GPa, and 34.39 GPa, respectively. The numerical simulations exhibited a high degree of concordance with the experimental curves, with Young's modulus errors below 5%, thereby validating the efficacy and accuracy of the model in analyzing the micromechanical behavior of BFAC. [Conclusion] The asphalt matrix in BFAC demonstrated the lowest modulus and hardness, with the most pronounced plastic deformation and creep response. In contrast, the aggregate and fiber exhibited high modulus, high hardness, and superior deformation resistance, with creep displacements all below 70 nm. The transition interface's performance was intermediate between the aggregate and asphalt matrix. Field analysis indicated that the displacement, stress, and strain fields at the indentation point exhibited a distribution characteristic of high values beneath the indenter and low values in the far field. The contours of displacement, stress, and strain expanded elliptically inward, with their magnitudes gradually attenuating with increasing depth. Additionally, the study elucidated the influence mechanism of indenter geometry on the indentation response. Compared to the Berkovich indenter, the spherical indenter, due to its smaller contact area, with a smaller slope in the loading curve. increased the indentation depth by approximately 12% to 28% at maximum load. These findings provide valuable insights for the structural design and performance optimization of hydraulic asphalt concrete materials.

Keywords: basalt fiber asphalt concrete; nano-indentation; numerical simulation; micro-mechanical properties; influencing factor; Young's moduli; transition interface

0 引 言

沥青混凝土是一种力学性能优异、施工便捷和环境适应性强的多相复合材料[1]，在水利工程[2-3]、道路工程[4-5]和桥梁工程[6]中应用广泛。特别是因其优异的防水性能，在大坝心墙、防渗墙和面板等柔性防渗结构中被大量采用[7-9]。因此，研究其力学性能对工程构筑物的安全性与服役性能具有重要的理论意义和工程价值。玄武岩纤维具有高强度、耐高温、耐腐蚀以及绿色环保等性能，逐渐被应用于沥青混凝土的改性，从而提升沥青混凝土的抗变形能力[10]、抗裂性[11]及温度适应性[12]等。当前，针对水工沥青混凝土力学性能的研究主要依赖于宏观试验方法，如单轴压缩、劈裂抗拉、蠕变及弯曲试验等[13-15]。这些试验能够有效获取材料在特定荷载条件下的宏观力学响应指标(如模量、硬度、蠕变行为)，为工程设计与安全评价提供了核心数据。然而，传统宏观试验将沥青混凝土视为均质连续各向同性材料，其测试结果反映的是骨料、沥青胶浆及界面过渡区(ITZ)等多相介质协同作用的综合效应，无法揭示各组成相在荷载下的真实力学行为及其相互作用机制，而对包括纤维、沥青基体、骨料及界面过渡区在内的多相间的微观力学表现缺乏相应的研究。为了更好的理解水工沥青混凝土的性能演化机制，须进行其微观尺度下的研究。

微观力学为从根本上认识和设计混凝土的力学性能提供了重要途径[16]，纳米压痕技术作为一种先进的微/纳米尺度力学表征手段，早期主要是运用于均质材料的力学性能测试，但随着纳米压痕技术的发展，现已逐渐应用于混凝土等复杂多相材料领域的微观力学性能测试，能够在微米级别的试块上对材料的特定区域进行原位力学测试，精确获取各相的弹性模量、硬度、断裂性能等关键力学参数[17-18]。在试验研究方面，关于沥青混凝土的改性研究中，BARBHUIYA 等[19]采用纳米压痕技术研究了掺入熟石灰的沥青混凝土与普通沥青混凝土在不同相上的微观力学性能差异，发现了熟石灰的掺入使得沥青胶泥相具有更好的抗变形能力。ABD 等[20]利用纳米压痕技术提出了一种新的评价温性添加剂对集料、ITZ 和胶泥纳米力学性能影响的方法。沥青的老化直接影响着沥青混凝土的使用寿命，YAO 等[21]采用纳米压痕

技术表征沥青混合料样品中沥青胶泥模量的垂直变化，描述了不同龄期沥青混合料样品的老化梯度。不同级配的沥青混合料，界面组成和结构特征不同，其力学特性也有显著差异，YU 等[22]对三种不同级配的沥青混合料，采用纳米压痕研究其之间的性能差异。郭乃胜等[23]采用纳米压痕试验研究了沥青混合料的界面过渡区力学性能，发现沥青混合料过渡区的断裂韧度越大，沥青混合料的抗开裂性能越好。在数值模拟方面，随着计算机技术的迅速发展，一些学者开始探索利用有限元方法来模拟纳米压痕试验，李敏等[24]采用 Abaqus 建立单相三维模型进行纳米压痕的数值模拟，对比试验结果表明可以通过使用有限元技术来成功模拟材料的微/纳米压痕测试的载荷-位移响应。段茜等[25]建立单晶铝的均质有限元模型来模拟纳米压痕试验，分析模拟过程中晶体内应力等力学性能。GAUTHAM 等[26]建立的水泥基单相有限元模型得到的力学性能(硬度和模量)与试验值较吻合，表明所建立的模型可以可靠地用于评价材料的力学性能。KHAN 等[27]建立了二维轴对称有限元模型，研究了老化和未老化条件下沥青混凝土非骨料相纳米压痕在循环荷载幅值下的力学响应。上述研究充分表明，纳米压痕技术和其数值模拟方法已成为微/纳米尺度力学性能表征的可靠且高效的重要手段，为深入理解材料微观结构性能提供了重要技术支撑。

综合而言，尽管纳米压痕技术及其数值模拟方法已展现出较好的应用，但在玄武岩纤维沥青混凝土的研究中仍存在不足。微观研究不足：现有研究多聚焦 BFAC 宏观力学特性(如抗压强度、低温抗裂性等)，虽有部分纳米压痕应用研究，但多局限于单一相(如沥青胶泥)或双相(骨料、胶泥)的性能测试，缺乏利用纳米压痕技术对 BFAC 中纤维、沥青基体、骨料及界面过渡区等多相力学性能的多相测试与对比分析。模型维度简化：多数数值模拟局限于二维或单相三维模型，未能真实构建包含所有关键组分(沥青基体、骨料、界面、纤维)的三维微观结构，难以真实反映各相空间分布特征及界面作用，限制了其对实际材料力学响应的准确反应。压头影响因素：压头几何形状是纳米压痕测试的核心要素，现有研究缺乏对 BFAC 采用不同压头的对比研究，无法为后续沥青混凝土微观测试的方案优化提供参考。

基于以上分析，将纳米压痕技术与数值模拟相结合，应用于玄武岩纤维沥青混凝土(BFAC)微观力学性能的探究存在不足，本研究结合 BFAC 的纳米压痕物理试验和有限元三维四相数值模型，研究 BFAC 各相的荷载-位移曲线演化规律，分析其硬度、杨氏模量、蠕变等微观下的力学性能差异，探究纳米压痕过程中位移场、应力场、应变场的分布规律与变形机制，揭示几何压头形状对纳米压痕试验的影响机理。以期深入理解玄武岩纤维沥青混凝土的微观力学机制，为 BFAC 的材料设计与工程应用提供理论与试验依据。

1 纳米压痕试验与数值建模

1.1 试验材料与方法

玄武岩纤维沥青混凝土其构成主要由纤维、骨料、沥青基质及骨料-沥青间的过渡界面组成。本次试验制作的沥青混凝土试块所用的沥青、集料等成分和配合比与文献[28]中所采用的一致，矿物集料由破碎的玄武岩粗骨料、细骨料、填料和纤维组成，如表 1 所列。沥青为克拉玛依 90 号，其成分如表 2 所列，沥青混合料的油石比为 6.9 %。玄武岩纤维的长度为 9 mm，纤维的性能指标如表 3 所列，纤维掺量为沥青混合料质量的 3 ‰。将搅拌后的沥青混合料倒入相应的模具中进行振动压实，测得密度为 2.6 g/cm^3，待试样凝固冷却后，用切割工具把沥青混凝土试块切割成 10 mm×10 mm×5 mm 的小块用于纳米压痕试验。

表 1 沥青混凝土矿物集料成分

Table 1 Composition of mineral aggregate for asphalt concrete

组 分	粗骨料	细骨料	填 料	纤 维
粒径/mm	2.36~19	0.075~2.36	<0.075	0.007~0.015
表观密度/g·cm^{-3}	2.934	2.931	2.698	2.640

表 2 石油沥青各组分质量分数

Table 2 Mass fractions of each component in petroleum asphalt

组分/%	饱和分	芳香分	胶 质	沥青质
含 量	5~20	20~50	15~30	5~25

表 3 玄武岩纤维性能指标

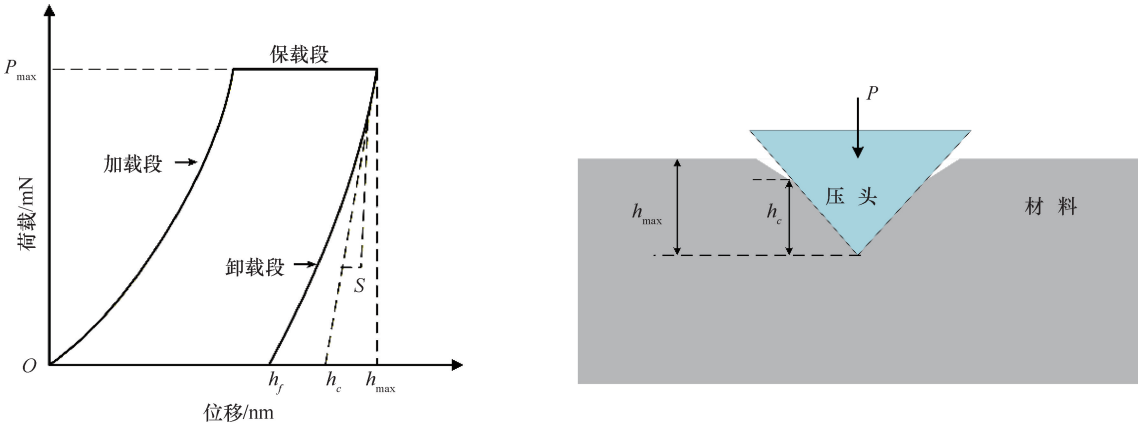
Table 3 Performance indicators of basalt fiber

性能指标	熔点/℃	使用温度/℃	导热系数/W·(m·K)$^{-1}$	密度/g·cm^{-3}	单丝直径/μm	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
数 值	1 450~1 500	-269~650	0.03~0.39	2.63~2.65	8~15	500~4 800	2.5~3.5

表 4　玻氏压头参数

Table 4　Berkovich indenter parameters

特征参数	半开角 θ/(°)	截距系数 ε	有效锥角 α/(°)	几何修正系数 β	杨氏模量/GPa	泊松比
数　值	65.27	0.75	70.3	1.034	1 141	0.07



(a) 荷载-位移曲线　　(b) 纳米压痕示意

图 1　纳米压痕基本原理

Fig. 1　Basic principle of nanoindentation

1.2　纳米压痕试验

1.2.1　基本原理

纳米压痕试验整个过程可以分为加载、保载、卸载三个阶段。基本原理是纳米压痕仪在预先设定的荷载或位移下，将具有几何形状的压头逐渐压入试块，实时监测压头在试块中的穿透情况，最后通过压头尖端的响应获得荷载-位移曲线，以此来分析材料的力学行为，其原理如图 1 所示，本次试验采用 Berkovich 压头(简称玻氏压头)，几何形状为三棱锥。压头参数如表 4 所列。

利用 Oliver-Pharr 方法[29]，压头与试块间的接触刚度 S 公式为

$$S = \left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}h}\right)_{h_{\max}} \tag{1}$$

式中，P 为荷载(mN)；h 为位移。

压头与试件表面的压痕模量 E_r 和硬度值 H 公式为

$$E_r = \frac{S}{2\beta}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_c}} \tag{2}$$

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \tag{3}$$

式中，E_r 为压头与试件表面的压痕模量；β 为压头几何校正系数；A_c 为压头与试样表面接触面的投影面积。

投影面积 A_c 与接触深度 h_c 的函数，其公式为

$$A_c = 3\sqrt{3}h_c^2\tan^2\theta \tag{4}$$

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon\frac{P_{\max}}{S} + h_{\max} \tag{5}$$

式中，θ 为压头半开角；$h_{\max}$ 为最大压入深度；ε 为压头截距系数。

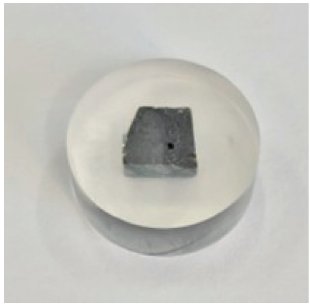
弹性模量的计算公式为

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \tag{6}$$

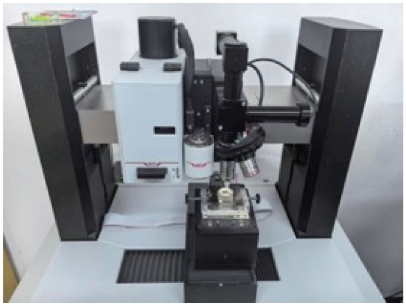
式中，E_s 和 ν_s 分别为试件的模量和泊松比；E_i 和 ν_i 分别为压头的模量和泊松比。

1.2.2　试验过程

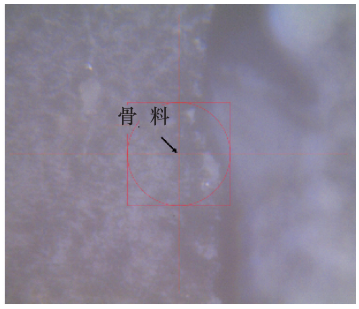
进行纳米压痕试验前需要对试样表面进行前处理以保证测试的精度，图 2(a)为沥青混凝土纳米压痕试块，首先将切割后的小试件使用环氧树脂对其进行镶嵌固定，然后采用梯度化砂纸(150、300、600、1 200、2 000)进行逐步打磨，接着使用含有 5、3、1 μm 金刚石颗粒的抛光机对样品进行精抛光，最终，用超声波清洗待测试样的表面区域并观察试样表面无明显划痕，光泽均匀即可。试验过程中为了使卸载曲线不受沥青黏性响应的影响，需要控制卸载速率以排除粘性材料的响应，或者控制保载阶段的时间以使蠕变响应消除。其中过渡界面的形成主要是混凝土在搅拌和凝结的过程中，骨料表面的吸附、沥青裹覆状态、水化作用等因素从而形成的微米级厚度的致密区域。以往的研究中，由于集料的尺寸和形状存在差



(a) 纳米压痕试块



(b) 纳米压痕仪



(c) 压痕点

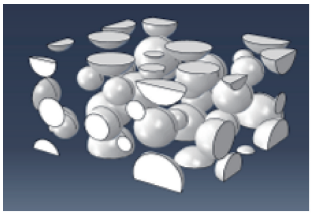
图 2　纳米压痕试验

Fig. 2　Nanoindentation test

异，集料-沥青的界面区厚度略有不同，但主要集中分布在 5~12 μm 范围内[30-31]。试验采用的仪器是安东帕纳米压痕测试仪(NHT)，如图 2(b)所示，该仪器的载荷范围涵盖小载荷(0.1 mN)至大载荷(500 mN)，载荷分辨率 20 nN，最大压痕深度 200 μm，位移分辨率 0.01 nm。本次压痕试验采用载荷控制法，通过设置最大荷载进行试验，荷载以 0.01 mN/s 的速率加载至 3 mN，并在 3 mN 下停留 200 s，最后以 0.01 mN/s 的速率开始卸载至 0，完成整个试验过程。压痕点的位置可通过仪器的高精度定位，在测试区域内精准打点，如图 2(c)展示的是压头定位在骨料上进行打点的图像。

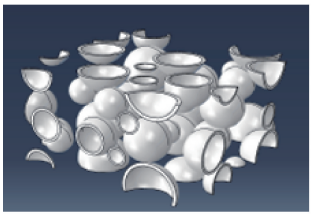
1.3　数值模型构建

基于 Abaqus 软件建立了与试验试样尺寸相应的沥青混凝土三维模型，该模型表征了沥青基体、骨料、纤维及骨料-沥青间过渡界面四组分的空间分布特征。骨料采用球形几何模型以模拟粒径分布，纤维为圆柱体形态以匹配掺量，界面相采用骨料表面包裹的方式构建，结构模型如图 3 所示，然后将各组分模型装配成一个整体部件，各组分之间建立绑定约束。

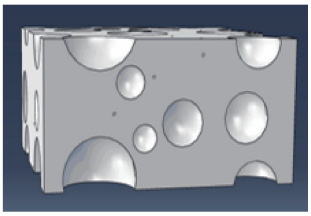


(a) 骨 料

(b) 纤 维



(c) 沥青基质



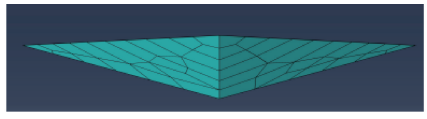
(d) 过渡界面

图 3　有限元各相模型

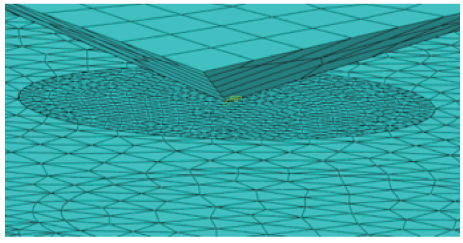
Fig. 3　Finite element model of each phase

考虑到试验保载阶段的蠕变过程，在 Abaqus 中采用黏性静力学分析步，根据所需选择输出位移、力、应力和应变等结果。接触类型设置为法向接触和切向接触。边界条件中，试样底边采用固定约束(X、Y、Z 方向位移与转动均为 0)，压头设定为刚体，与试样表面的接触类型为表面-表面接触，法向行为采用“硬接触”，切向行为采用库仑摩擦模型。

模型因内部结构复杂整体采用四面体单元网格，压头下方区域进行局部加密，远离压头区域的单元尺寸无需加密，以此确保压头下方区域的计算精度，满足求解的收敛要求，网格划分如图 4 所示。材料属性的弹性模量、泊松比和屈服强度等参数可通过物理试验获得，模型采用弹塑性本构模型的 Von Mises 屈服准则，初始参数设定以纳米压痕试验测得的各相模量与硬度作为初始参考。迭代优化以试验荷载-位移曲线为目标，在有限元模型中不断调整其弹塑性参数(如屈服强度、应变值)，直至模拟曲线与试验曲线实现较好的吻合。分析步设置为加载-保载-卸载三个阶段，加载方式采用荷载控制，最大荷载设置为 3 mN，加载段时间 300 s，保载段在荷载 3 mN 下维持 200 s，卸载段时间 300 s。



(a) 压头网格



(b) 局部加密

图 4　网格划分

Fig. 4　Mesh division

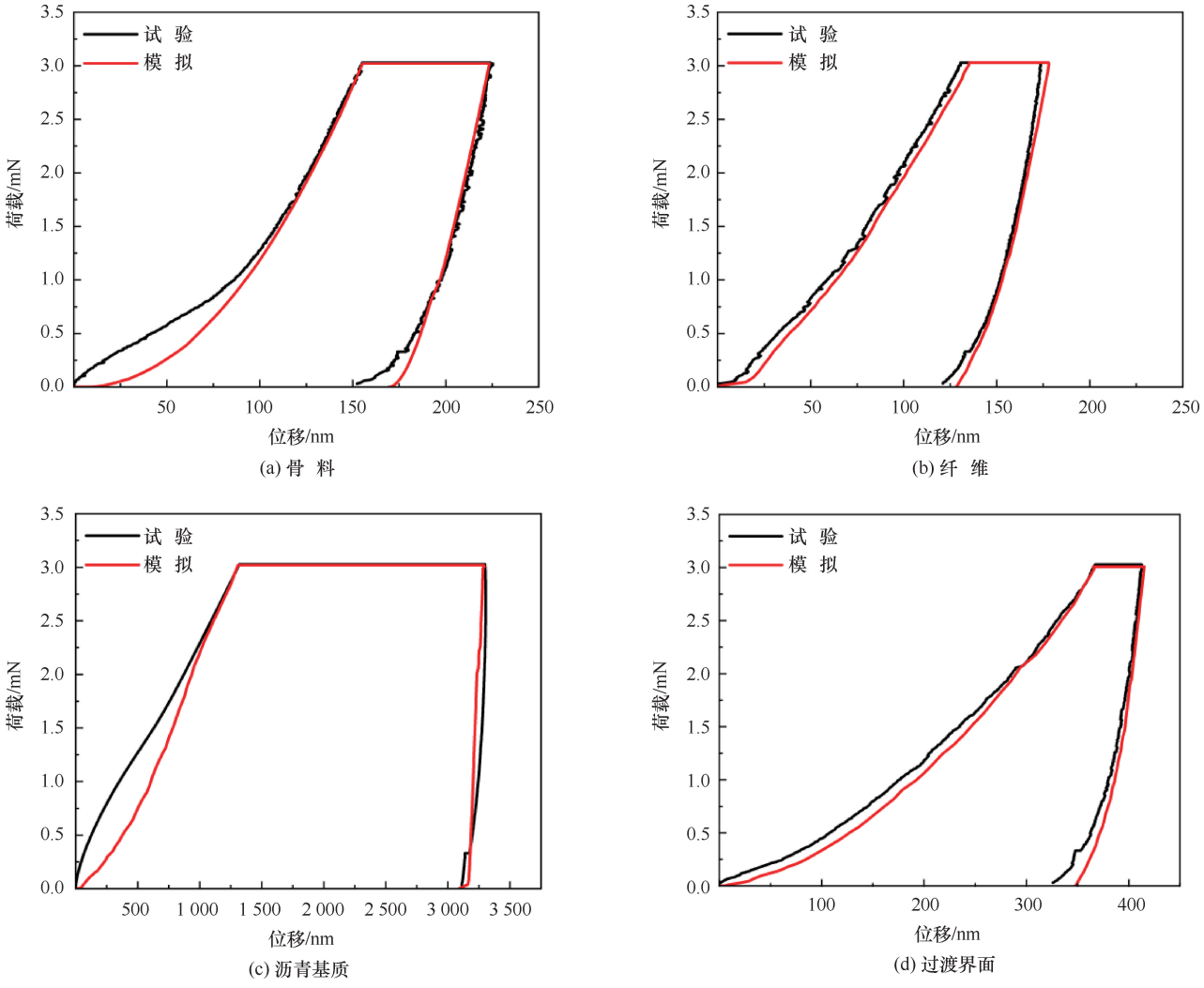


图 5　荷载–位移曲线对比

Fig. 5　Comparison of load-displacement curves

2　试验与模拟结果分析

2.1　荷载–位移曲线分析

根据 BFAC 的纳米压痕物理试验与有限元模拟分别得到骨料、纤维、沥青基质和过渡界面的荷载–位移曲线如图 5 所示。

根据图 5 可知，不同相上压痕点的荷载–位移曲线均呈现出了清晰的加载、保载、卸载过程，在加载阶段，各相在产生弹性变形的同时，也会产生塑性变形，当由加载段进入保载段时，在恒定荷载下，压入深度持续增加，进入卸载段后，随着载荷的逐渐减小，弹性变形部分将逐渐恢复，塑性变形被保留。此外，由于各相内部微观结构的不同，导致力学行为分化明显，如骨料与纤维的加/卸载段荷载有所波动，骨料与沥青的曲线在前期加载时的凹凸度大小的差别。

根据图 5 所示荷载–位移演化规律可知，骨料的加载阶段位移随荷载呈非线性增长，前期压头与表面初始接触，变形斜率平缓，后期斜率陡增表明弹塑性变形开始发展，加载段的最大位移为 155 nm，保载阶段蠕变响应较小，位移增长了 68 nm，反映出骨料内部结构较硬、变形较稳定，卸载阶段时荷载逐渐下降且荷载–位移曲线有所波动，原因是骨料内部为非均质结构，最终压痕深度 150 nm，残余变形占比小体现骨料较好的弹性恢复能力。纤维的加载曲线前期存在小幅波动源于纤维表面微观结构不均匀，但位移整体仍随荷载非线性增长，保载阶段荷载平稳，蠕变程度低，说明纤维变形以弹性为主，卸载时弹性变形恢复充分，反映纤维良好的弹性性能。沥青基质加载阶段的最大位移达到了 1 320 nm，曲线的斜率较大，体现沥青基质的黏弹性变形特征，保载阶段沥青基质表现出较大的蠕变特性其位移值达到 1 979 nm，卸载

阶段曲线几乎直线下降，弹性恢复占比小、残余变形显著压痕深度大，主要归因于沥青基质的高黏性，卸载后塑性变形难以恢复。过渡界面加载阶段荷载-位移曲线的斜率介于骨料与沥青基质之间，反映界面力学性能的过渡性，保载阶段因骨料与沥青的协同作用位移增长缓慢，卸载阶段曲线波动较明显因界面区骨料形状结构不均匀，骨料-沥青黏结性较差。曲线下降斜率慢于沥青基质，弹性恢复与残余变形处于骨料与沥青基质中间，体现界面弱过渡的变形机制。综上可知，骨料、纤维以弹性变形为主，内部不均匀性大，而沥青基质塑性突出，残余变形大，过渡界面力学性能介于两者之间，变形机制复杂。

沥青混凝土的微观力学性能，本质是其内部多相材料各自力学特性的协同作用。采用 Oliver-Pharr 方法，结合荷载-位移曲线计算出试验和模拟两种情况下各相的杨氏模量与硬度值，对比结果如表 5 所列。

表 5　各相的杨氏模量与硬度值对比

Table 5　Comparison of Young's modulus and hardness values for each phase

相	杨氏模量/GPa		硬度/GPa	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
骨　料	76.69	74.25	2.69	2.57
纤　维	120.60	118.13	4.27	3.91
沥青基质	1.73	1.81	0.01	0.01
过渡界面	34.39	35.08	0.77	0.81

根据表 5 可知，沥青基质的杨氏模量和硬度值最低，抗变形能力差，易发生塑性变形。骨料和纤维的模量值和硬度值较高，具有更好的抗塑性变形能力，抗压性能好，可更高效分散应力。过渡界面的力学性能介于沥青基质和骨料之间，它在沥青混凝土中既承担应力又传递应力，此处易引发界面脱黏、开裂等情况。

结合表 5 和图 5 的模拟结果与试验结果的对比来看，两者的结果吻合较好，模拟与试验的载荷-位移曲线趋势一致，其主要三个阶段基本相同，验证了所建立数值模型的准确性与可行性。模拟结果的荷载-位移曲线较试验结果更加光滑，这是因为在建模时各相都使用了完全均质材料，内部没有缺陷。后文将进一步研究保载时材料的蠕变响应，开展加载、保载、卸载阶段位移、应力、应变在材料内部的位移场、应力场、应变场分析。

2.2　蠕变变形分析

由于沥青混凝土的黏弹性特征，仅对纳米压痕试验曲线卸载段进行杨氏模量和硬度分析，不足以全面表征的各相间的差异。而进入保载阶段后，材料将发生显著的蠕变变形，表现为压痕深度的持续增加。为了定量表征各相材料的蠕变行为，从而更好地理解其蠕变变形响应与时间的依赖，得到保载阶段的位移-时间曲线如图 6 所示。

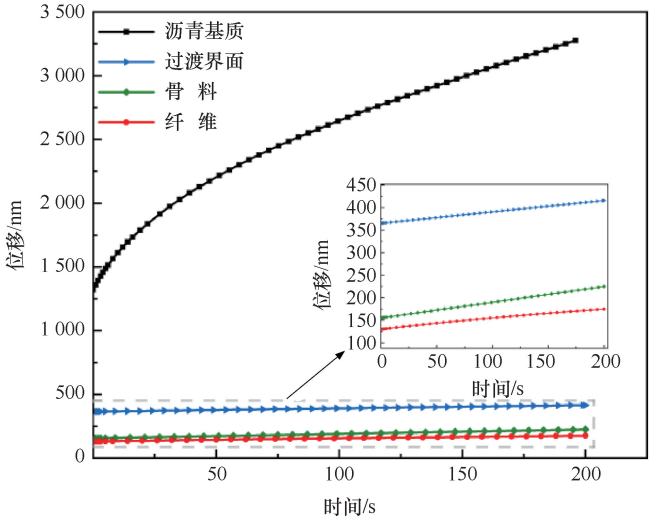


图 6　蠕变阶段时间位移曲线

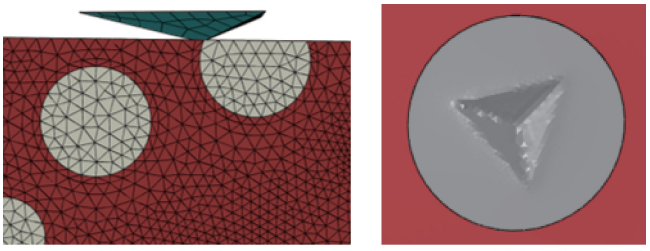
Fig. 6　Time-displacement curve in the creep stage

根据图 6 可知，沥青基质在 200 s 的保载时间内表现出最大的蠕变变形，其蠕变曲线斜率先增大后减小。这一特征表明沥青基体具有较高的初始蠕变速率，且其变形行为中黏性流动占主导地位。骨料与沥青纤维的蠕变曲线几乎呈水平状态，位移增量较小，斜率最低且迅速趋于稳定，表明二者具有较强的抗蠕变变形的能力，时间依赖性较弱。这是由于骨料与纤维本身具有高模量、低孔隙率和稳定的结构，在多相材料中主要起骨架支撑与应力传递作用，有效抑制了整体结构的长期变形。过渡界面的蠕变位移显著低于沥青基体，但明显高于骨料和纤维，其蠕变性能介于基体与增强相之间，蠕变曲线在初始阶段位移增长较快，随后逐渐减缓。这表明过渡界面在荷载初期具有一定的蠕变敏感性，但其蠕变抗力随时间发展有所增强。这种蠕变行为主要源于过渡界面复杂的结构组成，其内部常存在微孔隙缺陷，骨料的几何形貌(如棱角性)产生的局部应力集中效应，以及沥青与骨料间黏结强度的变化，都影响着该区域的抗变形能力。

2.3　位移场分析

位移场分析能够有效刻画纳米压痕过程中材料的微观变形响应，其演化规律贯穿加载、保载、卸载全周期。恒定加载速率下压头逐渐压入试样表面，压头与材料的接触经历了从点接触到面接触的动态过程，

图 7 为玻氏压头在骨料上残留的压痕形貌，该压痕为特征鲜明的三棱锥状凹痕，符合玻氏压头产生的压痕形状。塑性变形区域向材料内部和侧向扩展，最终在材料表面形成凹痕，压痕表面由三个相交的倾斜平面构成，相交于压痕最深点。



(a) 玻氏压头　(b) 压痕形貌

图 7　玻氏压头与压痕

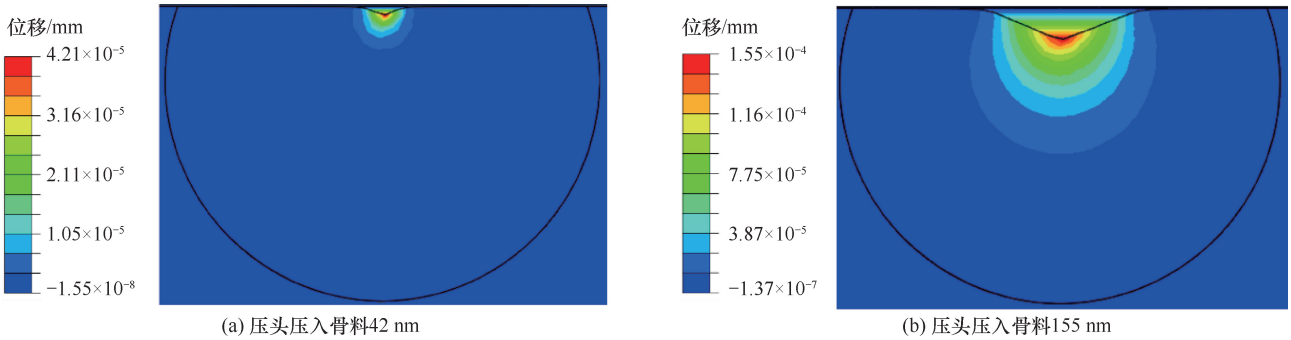
Fig. 7　Berkovich indenter and indentation diagram

通过 Abaqus 场输出的数据，对骨料、沥青基质、纤维、界面的位移演化特征进行对比分析后发现，尽管由于各相材料属性(如弹性模量、硬度等)的差异，导致其在加载、保载、卸载各阶段的位移数值大小呈现显著差异，但其位移场的演化模式与分布规律表现出较高的一致性。骨料相作为沥青混凝土的骨架支撑，其位移特征影响着材料的整体承载能力与变形协调性。压痕作用下，骨料相的抗变形能力会限制其他相的过度位移，是反映材料抵抗变形的关键载体。

为避免内容重复与篇幅冗长以具有代表性的骨料相为例，详细分析压头作用下材料的位移场演化规律。骨料相上压痕点在加载、保载及卸载阶段位移场的变化情况如图 8、图 9 所示。

根据图 8 可知，骨料内部的位移场呈现出典型的弹塑性材料响应特征，随着压头向骨料内部压入深度的逐步增加，骨料内部的位移场先从接触区域开始快速扩展，且压入作用对骨料内部的影响区域也随之同步增大，直观反映出载荷向骨料内部的传递效应。位移梯度表现为压头下方高、远场低的分布规律。当压入深度从 42 nm 增至 155 nm 时，位移场的影响范围从局部接触区向骨料内部快速延伸，随着深度的增加，位移的增加速率在逐渐减小，离压头较远处的最小位移值约为 10 nm，位移场仍呈现类椭圆形扩展，影响范围显著扩大。

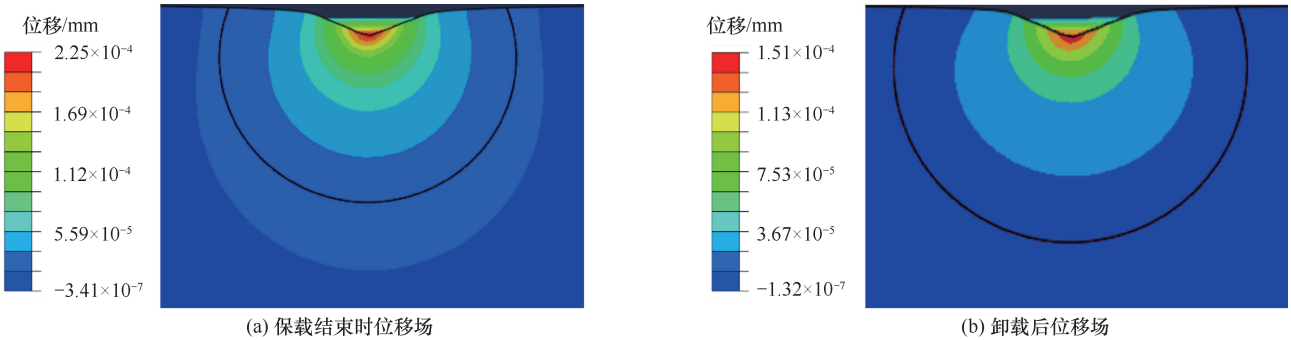
根据图 9(a)可知，进入 200 s 的保载期后，骨料呈现出与时间相关的蠕变特性。保载过程中，压头位移从 155 nm 持续增长至 225 nm，位移增幅为 70 nm，增幅较小表明骨料对于蠕变的响应较小，此时位移场仍呈现类椭圆形扩展，影响范围扩大，随着深度的增



(a) 压头压入骨料42 nm　(b) 压头压入骨料155 nm

图 8　加载段位移场

Fig. 8　Displacement field of loading section



(a) 保载结束时位移场　(b) 卸载后位移场

图 9　保载与卸载段位移场

Fig. 9　Displacement fields of load holding and unloading sections

加，位移的增加速率在逐渐减小。值得注意的是，骨料本身结构较硬，自身蠕变响应较弱，位移场的扩展更多源于骨料内部组分非均质性的传递效应。卸载过程中，压头将荷载逐渐释放直至为零，骨料内部位移场呈现弹性恢复与塑性残留的双变形阶段，最终残余位移稳定在 150 nm，如图 9(b)所示，较保载结束时的 225 nm 减少了 65 nm。原因是卸载时弹性应变能逐渐释放弹性变形恢复，而塑性应变无法恢复，导致位移场残留，残余位移的大小与分布直接反映材料的塑性损伤程度。

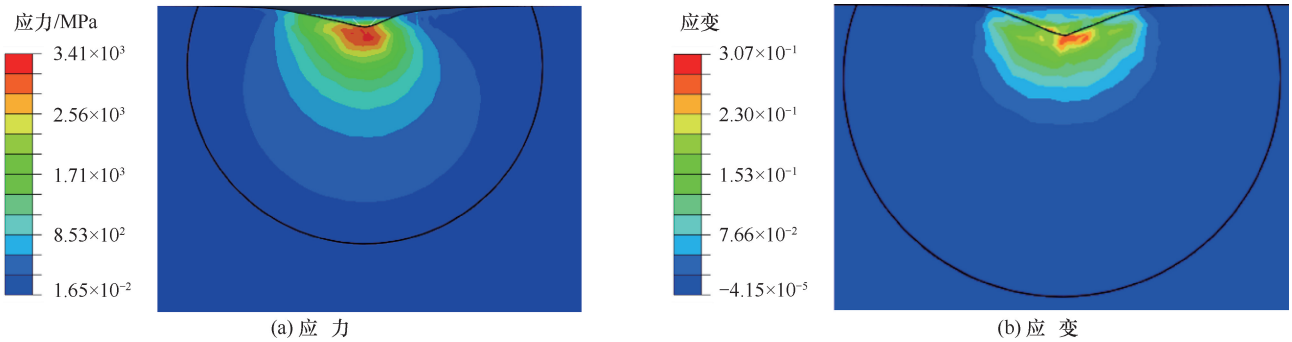
2.4 应力应变场分析

应力与应变云图可直观揭示材料在压头作用下的微观变形规律。物理试验通常只能测量荷载-位移曲线和最终的表面压痕轮廓，无法直接看到压头下方材料内部的应力和应变状态，而数值模拟可以较好地展示压头下材料的应力与变形随荷载的变化规律。在纳米压痕模拟过程中，应力场和应变场的空间分布模式与演化规律在不同相之间表现出较好的相似性。因此，仍然以骨料相的应力、应变场为例进行重点分析。根据数值模拟结果，得到骨料相在加载段内的应力与应变演化规律如图 10 所示。

根据图 10(a)模拟结果来看，当加载段荷载达到 3 mN 时，骨料内部竖直方向的应力场在压头正下方区域呈现显著的压应力集中效应，压头下方区域附近应力达到最大值为 3.4 GPa。应力等值线类似于椭圆形状在骨料内部开展，压头与材料的应力通过骨料内部之间相互作用传递，应力值随深度增加逐渐衰减。由图 10(b)可知，3 mN 荷载时骨料内部对应的应变场的最大应变在压头的正下方，压头尖端正下方的应变集中区与应力集中区空间重合较高，最大主应变为 0.3，验证了加载时塑性变形的发生，应变等值线同样呈类椭圆形扩展，且应变梯度随深度发生衰减，压头产生的塑性变形主要集中在压头下方附近范围内，远离压头的区域仍以弹性变形为主。

保载阶段作为纳米压痕试验的重要环节，其力学响应直接反映材料的蠕变特征。图 11 展示了 3 mN 荷载保载结束时骨料内部的应力与应变场分布。

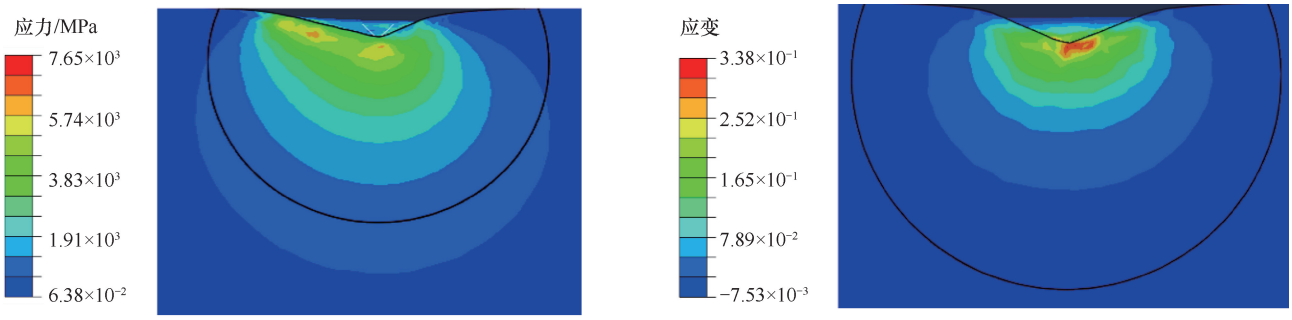
根据图 11 与加载段的应力、应变对比可揭示由蠕变主导的微观力学演化规律，蠕变结束时，压头正下方形成的应力集中区最大应力值达到 7.6 GPa，较加载段峰值应力提高约 4.2 GPa。特别值得注意的是该区域的应力水平主要集中在 3.2～5.1 GPa 左右，已超过加载段的应力水平，这一现象源于蠕变过程的应力重分布，保载时材料的黏弹性变形使弹性应变



(a) 应 力　　(b) 应 变

图 10　加载段 3 mN 荷载时内部应力和应变场

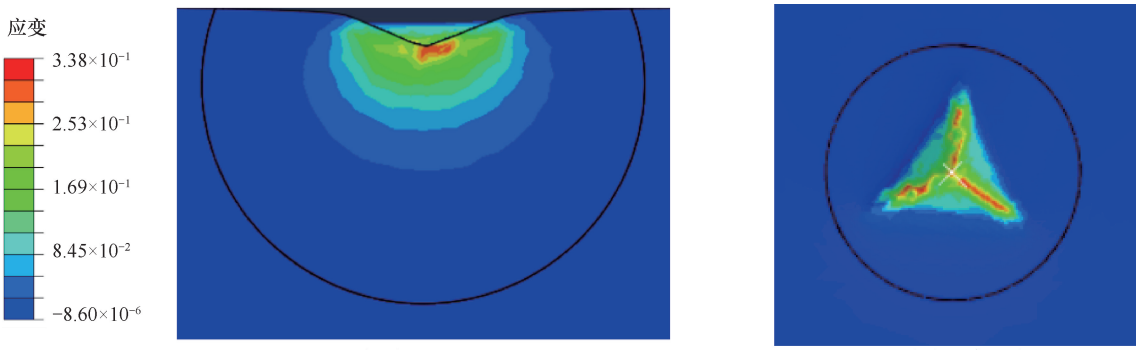
Fig. 10　Internal and strain field under loading section 3 mN



(a) 应 力　　(b) 应 变

图 11　保载结束时内部应力和应变场

Fig. 11　Internal stress and strain fields at the end of load holding



(a) 应　变　　(b) 应变压痕形貌

图 12　卸载后应变场

Fig. 12　Strain diagram after unloading

能逐渐向塑性应变转化。与应力场对应的图 11(b)应变场结果显示，蠕变阶段的应变演化呈现集中区扩展、梯度衰减放缓的特征，且较高程度的与应力场的空间分布匹配，从应变集中区形态来看，压头正下方的应变集中区分布范围较加载段显著扩大，这一变化主要源于蠕变的时间累积效应，持续存在的应力集中不断推动材料发生塑性变形。从应变分布规律来看，最大应变同样在压头的正下方，应变随深度的衰减趋势与加载段一致，但保载阶段的应变梯度更平缓。应力场和应变场，均呈现出应力值与应变值随压入深度的增加而逐步减小，且在距离试样表面最远处降至最小值。

卸载过程是纳米压痕试验的关键环节，其力学响应的核心是弹性应变的可恢复与塑性应变的永久变形。图 12 展示了荷载完全卸载后骨料内部的塑性应变场分布。

根据图 12(a)骨料内部的塑性应变场分布可知，骨料内部的塑性应变呈现压头正下方集中、向深部梯度衰减的典型规律，最大塑性主应变仍在压头正下方区域，这与加载、保载段的应变集中区空间重合，直观反映压头与材料的接触面是塑性变形的核心区，图 12(b)可以看出应变主要集中在压痕材料与压头接触的边缘区域，即压头与材料接触边界附近的剪切带应变区的轮廓呈现三角形压痕特征。对于沥青基复合材料，骨料的塑性应变残留直接影响结构的长期服役性能如应变累积、疲劳开裂等，通过塑性应变场的模拟，优化骨料级配、沥青改性等方式，可实现较高抗变形的性能目标。

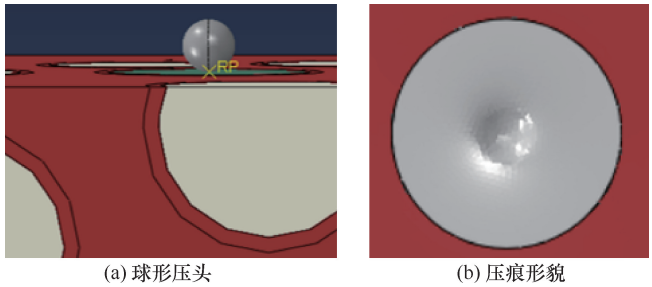
根据以上分析可知，位移场的影响范围、梯度变化，应力场的集中区域与扩展方向，应变场的局部变形程度与最终分布，都可为沥青混凝土的结构设计提供参考指标。

3　压头几何形状对纳米压痕影响分析

压头几何形状是纳米压痕测试材料力学响应的关键因素，它通过改变接触面积、应力分布、微观变形等因素，从而影响压痕测试的结果[32]。研究压头形状对纳米压痕模拟结果的影响，本质是改变几何参数研究对力学响应及微观机制的影响，揭示不同压头对材料在微观尺度下的尺寸效应与变形规律。

3.1　压痕形状对比

在纳米压痕有限元模拟中，保持模型参数如试样材料属性、网格划分、边界条件及加载条件等一致的前提下，建立的球形压头进行纳米压痕模拟，分析其几何特征差异对材料的力学响应的影响。球形压头的直径 $R=5$ μm，压头几何校正系数($\beta=1$)，投影面积 $A=\pi(Rh-h^2)$，图 13 是球形压头及其产生的压痕形状，图 14 是玻氏压头与球形压头压痕形状对比。

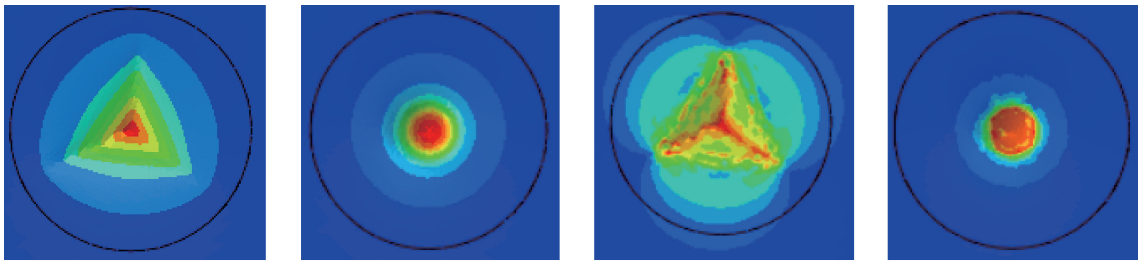


(a) 球形压头　　(b) 压痕形貌

图 13　球形压头与压痕

Fig. 13　Spherical indenter and indentation

根据图 13 可看出球形压头与材料的接触后最终形成的压痕形貌清晰展现了球形几何与材料弹塑性响应的协同作用，该压痕呈现出边缘圆滑、轮廓对称的球状凹痕特征，凹痕顶部为平滑的弧形曲面，凹痕边缘无明显棱角或开裂，这与玻氏压头的棱状压痕及棱角处集中的特征形成鲜明对比。



(a) 玻氏压头位移压痕　(b) 球形压头位移压痕　(c) 玻氏压头应力压痕　(d) 球形压头应力压痕

图 14　压痕形状俯视图

Fig. 14　Top view of the indentation shape

根据图 14 可知，玻氏位移压痕呈三角形分层，中心红色位移最大，向外以三角形轮廓扩散，玻氏压头的棱状几何特征使位移集中在三个接触侧棱边及压头底部尖端处，形成类似三角形位移场。球形位移压痕，位移高值区呈圆形分层，中心红色位移最大，向外以同心圆形式向外扩散，球形压头的各向同性几何特征，使位移随半径均匀分布，形成对称的圆形位移场。玻氏应力压痕应力分布呈三角形集中带，沿三角形的三条棱分布，玻氏压头的尖端处导致应力集中效应，棱边处应力小于中心处，形成三角状应力场。球形应力压痕应力高值区呈圆形集中带，向外以同心圆形式向外扩散，球形压头的接触应力随半径对称分布，形成均匀的圆形应力场。这种差异直接源于压头的几何形状对接触面积不同的作用。

3.2　球形压头对荷载-位移曲线的影响

将球形压头模拟得到的骨料、纤维、沥青基质和过渡界面的荷载-位移曲线与玻氏压头对比如图 15 所示。

根据图 15 所示的荷载-位移曲线进行对比分析可知，两种压头在加载、保载及卸载阶段均表现出显著差异。在加载过程中，球形压头的位移值始终大于玻氏压头，其荷载-位移曲线呈现平缓增长趋势，且达到峰值荷载时的位移值更大。这种差异主要源于两种压头的几何特征差异，玻氏压头具有较大的表面积，其接触面积随压入深度的增加而迅速增大，导致相同压入深度下接触面积显著大于球形压头，而球形压头因其较小的几何尺寸，接触面积增长较小，在相同荷载条件下产生的压痕深度更大。保载阶段的蠕变响应与变形累积位移随时间持续增加，但玻氏压头比球形压头产生位移增幅小，这是由于其尖锐几何形状导致的应力集中效应，使塑性变形主要局限于压头尖端和侧棱处附近的局部区域，从而有效抑制了材料的蠕变行为。相较而言，球形压头的球面接触特征促使应力向试样内部传递，形成较大范围的塑性变形区，导致位移随时间持续增加的蠕变现象更为显著。卸载阶段的位移同样分为弹性恢复与塑性残留，球形压头弹性恢复快，加载阶段的弹性应变能集中，卸载时快速释放，且塑性变形区小，故弹性恢复比例高。玻氏压头卸载曲线斜率大弹性恢复慢，残余位移大塑性变形区较广，塑性残留更显著。

3.3　球形压头对应力场和应变场的影响

球形压头的表面是各向同性的曲面任意方向曲率半径相同，因此对试样的加载具有轴对称性，直接决定了应力、应变场的分布特征。骨料、沥青基质、纤维、过渡界面四相在球形压头作用下，其基本的分布模式与演化趋势依然相似，主要变化的是物理场(应力、应变)的大小。因此，为了更好的衔接上文，以骨料相进行对比分析。图 16、图 17 是球形压头在加载、保载阶段骨料相应力场与应变场的分布情况。

根据图 16、图 17 与图 10、图 11 对比可知，球形压头应力场分布规律为应力范围呈同心圆状集中分布，中心区域应力最大，向下沿环形区域逐层递减。保载与加载段的应力分布形状大致相同仅数值差异，源于压入深度的不同，但均体现出轴对称性。与应力场相对应的应变场的分布规律为最大主应变高值区同样呈同心圆状，中心应变最大，外环形衰减，与应力场形态高度吻合。应变的对称分布，也反映了球形压头加载下应变是应力的响应，球形压头的对称应力场直接导致轴对称应变场。

保载结束后荷载开始逐渐减小至零，卸载后应变场如图 18 所示，中心区域因塑性变形不可逆，仍保留压缩主应变且是应变高值区。

根据图 17，与图 12 对比可知，在卸载后球形压头的应变场分析中，压头下方呈现显著的应变集中，最大主应变约 0.47，并随距离深度逐渐衰减，整体对称性良好，验证了球形压头的均匀加载特性。卸载

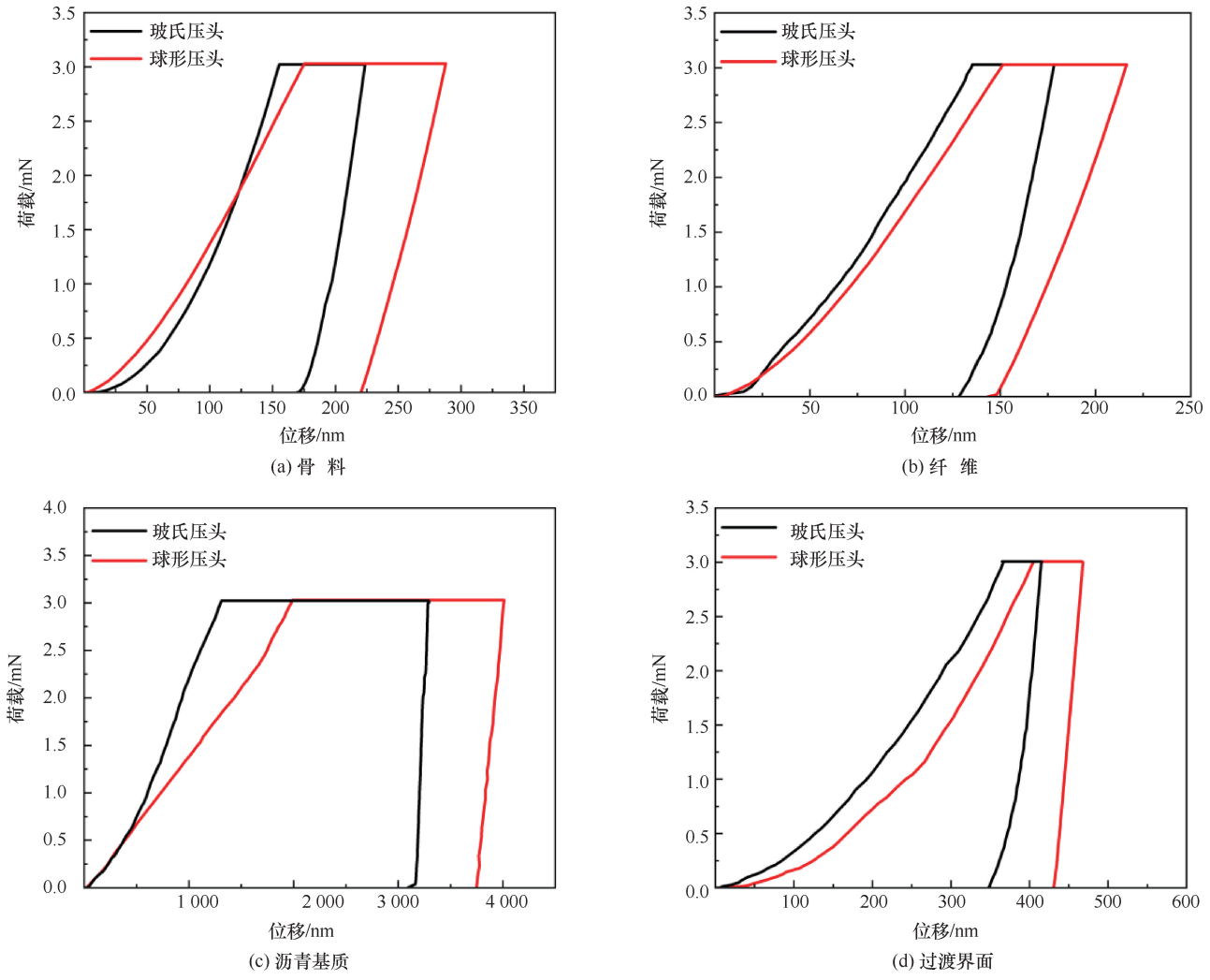


图 15　不同压头形状下的荷载–位移曲线

Fig. 15　Load-displacement curves under different head shapes

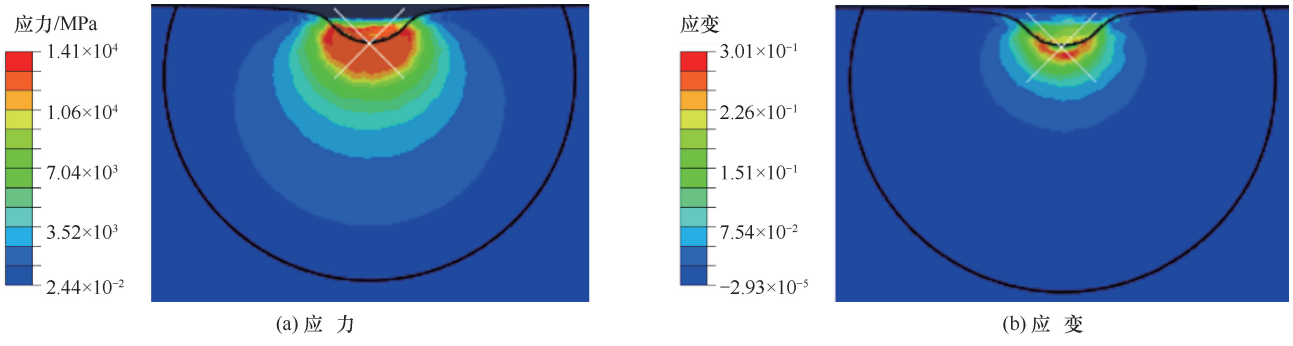
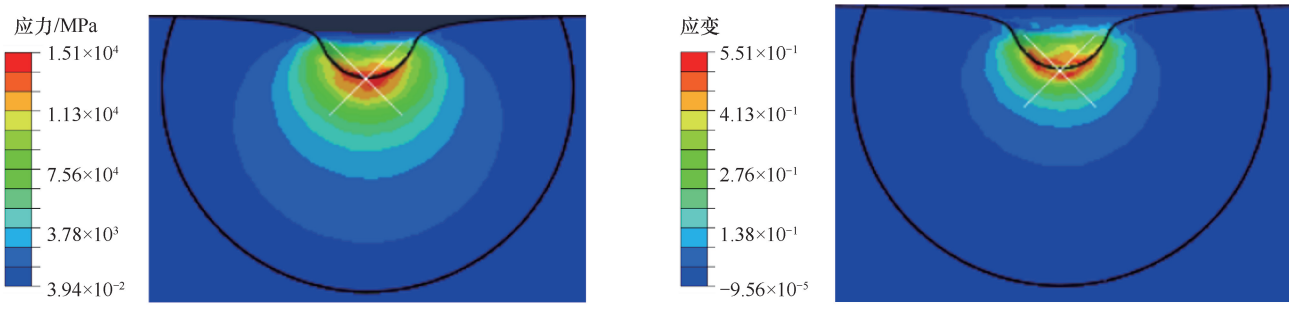


图 16　球形压头加载时应力与应变场

Fig. 16　Stress and strain fields of spherical indenter during loading

后材料存在不可逆的塑性变形，弹性恢复仅部分抵消了加载阶段的应变积累。这一结果揭示残余应变可能引发后续循环载荷下的疲劳裂纹萌生。

与非对称玻氏压头对比，球形压头的独特性在于球形压头为对称接触应力和应变场呈现径向均匀分布，具有对称性。与玻氏压头相同的是中心区域接触区下方应力和应变最大，主要原因为荷载集中效应，但随深度的增加其应力应变值均随之减小。这种场分布特征，为球形压头用于测试材料微观力学性能如硬度、弹性模量等提供了参考。



(a) 应　力　　(b) 应　变

图 17　球形压头保载时应力与应变场

Fig. 17　Stress and strain fields of spherical indenter under load holding

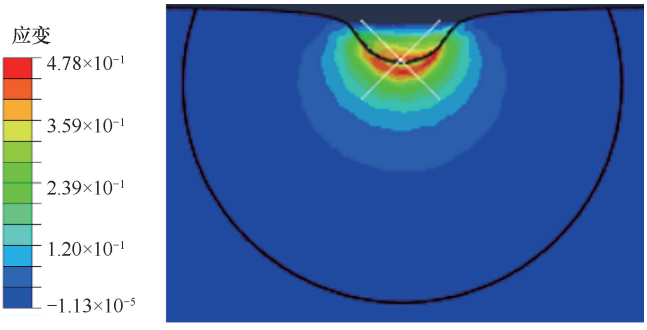


图 18　球形压头卸载后应变场

Fig. 18　Strain field of the spherical indenter after unloading

4　结果讨论

4.1　纳米压痕对沥青混凝土多相性能的表征

传统宏观水工沥青混凝土试验(如抗压强度试验、劈裂试验、车辙试验等)以材料整体力学响应为核心，可获取沥青混凝土(BFAC)的宏观模量、抗裂性、变形抗力等性能指标[33-35]。本研究通过纳米压痕试验与数值模拟，清晰地揭示了 BFAC 中沥青基质、骨料、纤维及过渡界面四相的微观力学差异与协同机制。试验与模拟结果均表明(见图 5、表 5)，各相力学行为分化显著，沥青基质表现出最低的模量与硬度，其保载阶段蠕变位移高达 1 979 nm，卸载后残余变形显著，荷载作用下沥青分子链段易发生滑移与重排，体现了其以黏性流动为主导的塑性变形[36]，这也反映了 BFAC 宏观黏弹塑性的微观根源。玄武岩骨料(76.69 GPa)与纤维(120.6 GPa)呈高模量、高硬度特征，保载阶段蠕变增量较小(见图 6)，卸载后弹性恢复充分，在混凝土中主要承担荷载作用与骨架支撑功能，有效抑制整体塑性变形[37-38]。过渡界面的模量(34.39 GPa)与蠕变行为介于沥青基质与骨料之间，在 BFAC 的力学行为中扮演着至关重要的角色，既缓冲模量突变、缓解应力集中，又因相对薄弱易成为微裂纹萌生区，其力学性能与骨料形貌、沥青黏结性密切相关，优化界面性能是提升 BFAC 整体韧性与耐久性的关键。

4.2　三维多相模型的建立与验证

本研究建立的四相三维有限元模型，成功复现了纳米压痕试验中各相的荷载-位移响应(见图 5)。基于模型深入揭示了压痕过程中材料内部的场演化规律。位移场分析(见图 8、图 9)表明，压痕的影响区域从接触点向材料内部逐渐扩展，位移梯度表现为压头下方高、远场低的分布特征。应力-应变场的集中与传递机理：加载阶段压头下方形成应力集中区，塑性应变区与之高度重合(见图 10、图 16)。在保载阶段因材料的黏性响应引发应力重分布，峰值应力进一步增大(见图 11、图 17)，同时应变集中区范围扩展，揭示蠕变变形累积机制(见图 11、图 17)。卸载后的残余塑性应变场则直观表征了不可逆损伤的核心区域(见图 12、图 18)。这种变形规律在不同相中较为相似，但数值因各相材料刚度而异。相较于现有简化模型[26-27,39]，本研究通过微观建模，明确了场分布特征规律，为优化材料结构(如改善界面黏结、调整骨料级配)提供了量化依据。

4.3　压头几何形状对纳米压痕响应的影响机制

以往沥青混凝土的纳米压痕研究中均未考虑对比不同压头的测试适用性[19,23,30]。不同压头由于其接触面积不同，影响着纳米压痕的测试结果。本研究通过对比两种压头对 BFAC 的测试影响，揭示在多相材料中压头形状的影响机制。接触力学机制：玻氏压头具有较大的表面积和尖锐的几何特征，接触面积随压入深度逐渐增大，相同荷载下压入深度小、加载曲线斜率高(见图 15)。而球形压头接触面积小增长缓慢，在相同荷载下的加载曲线平缓，压入深度大。场分布特征：几何形状的差异直接决定了应力应变场的分布

模式。玻氏压头的几何形状导致了非对称的位移、应力、应变分布，其高梯度区域主要集中在压头尖端及棱边附近。这种特性与骨料、纤维等的高刚性、低变形特征适配，尖锐压头可快速形成稳定接触，应力集中效应能精准捕捉硬质相的弹性响应。而球形压头产生了对称的、同心圆状的应力、应变场(见图 16、17)，其分布较为均匀。该特征更适配沥青基体的黏弹性与高蠕变特性，圆滑接触面可减少对基体的局部剪切破坏，更大的压入深度能充分激发其粘性流动与蠕变响应。对于 BFAC 这类多相材料，选择不同的压头会得到不同的力学参数解读，为对沥青混凝土材料的微观测试优化测试方案提供了重要信息。

5 结 论

通过玄武岩纤维沥青混凝土(BFAC)的纳米压痕试验与有限元三维数值模拟，研究了沥青基质、骨料、纤维、骨料-沥青间过渡界面的微观力学性能，揭示了压痕过程中位移场、应力场、应变场的演化规律，并分析了压头几何形状对试验结果的影响，主要研究结论如下。

(1)BFAC 中沥青基质、骨料、过渡界面和纤维上的力学性能呈现显著差异，沥青基质模量与硬度最低(1.73 GPa，0.01 GPa)，保载阶段蠕变位移达 1 979 nm，蠕变发展最快，主导材料的黏性变形。过渡界面性能介于骨料和沥青基质之间，是较为薄弱的相，此处易引发界面脱黏或开裂。骨料与纤维具有较高模量(分别为 76.69 GPa 和 120.6 GPa)，蠕变增量不足沥青基体的 5 %，蠕变增量曲线斜率小，具有较强的抗塑性变形能力，承担骨架增强作用。

(2)阐明了纳米压痕下应力集中与演化规律，数值模拟发现位移场、应力场和应变场的影响区域从接触点向材料内部逐渐扩展，均呈现压头下方高、远场低的梯度分布。应变场的主应变与应力场的应力集中区空间高度重合，也印证了加载过程中塑性变形的发生。玻氏压痕荷载下骨料相的峰值应力在加载阶段达到 3.4 GPa，而在保载阶段因应力重分布进一步增至 7.6 GPa，揭示了蠕变过程中的应力强化效应。同时，所建立的四相三维模型模拟结果与试验数据验证了模型的可靠性。

(3)压头几何形状对纳米压痕响应具有显著影响。在 3 mN 峰值荷载下，球形压头因接触面积小，在各相上产生的压入深度均比玻氏压头大，其加载曲线斜率也较玻氏压头小，基体相上两种压头的最大位移差约 14 %。场分布上，与玻氏压头不同的是球形压头呈现对称的径向均匀分布，但二者的共性之处在于中心接触区下方均存在最大的应力和应变，且随深度的增加其量值均呈递减趋势。

参考文献(References)：

[1] 蒋应军，苏洪建，李明杰，等. 振动成型设计下 AC-16 沥青混合料的耐久性能[J]. 吉林大学学报(工学版)，2024，54(10)：2849-2858.
JIANG Yingjun，SU Hongjian，LI Mingjie，et al. Durability of AC-16 asphalt mixture under vibration molding design[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2024，54(10)：2849-2858.

[2] 李闯，宋志强，王飞，等. 基于双模量动态本构模型的沥青混凝土心墙坝心墙响应特性研究[J]. 水利学报，2025，56(6)：747-758.
LI Chuang，SONG Zhiqiang，WANG Fei，et al. Research on the response characteristics of the core wall of asphalt concrete dam based on the dual-modulus dynamic constitutive model [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2025，56(6)：747-758.

[3] 寇佳亮，任玉婷，李豹，等. 碳纤维水工沥青混凝土力学性能试验研究[J]. 水力发电学报，2025，44(8)：44-56.
KOU Jialiang，REN Yuting，LI Bao，et al. Experimental study on the mechanical properties of carbon fiber hydraulic asphalt concrete[J]. Journalof Hydropower Engineering，2025，44(8)：44-56.

[4] IWAŃSKI M M，CHOMICZ-KOWALSK A，MACIEJEWSKI K. Resistance to moisture-induced damage of half-warm-mix asphalt concrete with foamed bitumen[J]. Materials，2020，13(3)：654.

[5] 董素芬，宋泽轩，张文辉，等. 热诱导自愈合沥青混凝土研究综述：一种可持续路面材料[J]. 材料导报，2024，38(22)：15-26.
DONG Sufen，SONG Zexuan，ZHANG Wenhui，et al. A Review on thermally induced self-healing asphalt concrete：A sustainable pavement material[J]. Materials Reports，2024，38(22)：15-26.

[6] 刘秀，刘梓宇，刘天硕，等. 中国寒区低掺纤维高黏高弹沥青混凝土桥面铺装路用性能[J]. 科学技术与工程，2025，25(19)：8252-8258.
LIU Xiu，LIU Ziyu，LIU Tianshuo，et al. Road performance of low-fiber high-viscosity and high-elasticity asphalt concrete bridge deck pavementin cold Regions of China[J]. Science Technology and Engineering，2020，25(19)：8252-8258.

[7] 闫小虎，李海峰，李大宏，等. 严寒地区酸性骨料水工沥青混凝土性能研究[J]. 长江科学院院报，2026，43(3)：185-191.
YAN Xiaohu，LI Haifeng，LI Dahong，et al. Study on the performance of acidic aggregate water-borne asphalt concrete in severe cold regions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2026，43(3)：185-191.

[8] 王樱畯，赵琳，雷显阳，等. 抽水蓄能电站高沥青混凝土面板堆石坝设计[J]. 人民长江，2022，53(1)：148-153.

WANG Yingjun, ZHAO Lin, LEI Xianyang, et al. Design of high asphalt concrete face rockfill dam for pumped storage power station [J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 148-153.

[9] WEN L F, LI Y L, CHAI J R. Plastic-damage analysis of concrete cutoff wall for a concrete face rockfill dam[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2020, 173(2): 153-168.

[10] MOROVA N. Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 175-180.

[11] ZHANG Y, ZHANG Y, LI B, et al. Evaluation of cracking resistance of SMA-13 hot recycling asphalt mixtures reinforced by basalt fiber [J]. Materials, 2024, 17(8): 1762.

[12] 方伟，李洋，贺晶晶，等. 水工沥青混凝土裂缝愈合特性研究[J]. 水利与建筑工程学报，2024，22(4)：35-41.
FANG Wei, LI Yang, HE Jingjing, et al., Study on crack healing characteristics of hydraulic asphalt concrete [J]. Journal of Water Conservancy and Construction Engineering, 2024, 22(4): 35-41

[13] OMODING N, CUNNINGHAM L S, LANE-SERFF G F. Influence of basalt micro-fibres on the abrasion resistance of concrete in hydraulic structures[J]. Materials and Structures, 2021, 54(2): 65.

[14] 董俊杰，邬燕，张伟，等. 玄武岩纤维对高 RAP 掺量热再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 化工新型材料，2024，52(S2)：289-293.
DONG Junjie, WU Yan, ZHANG Wei, et al. The effect of basalt fiber on the road performance of hot-recycled asphalt mixtures with high RAP content[J]. Chemical New Materials, 2024, 52(S2): 289-293.

[15] 杨程程，刘朝晖，柳力，等. 玄武岩纤维增强沥青混合料弯拉性能多参数敏感性分析[J]. 公路交通科技，2020，37(11)：1-7.
YANG Chengcheng, LIU Zhaohui, LIU Li, et al. Multi-parameter sensitivity analysis of flexural and tensile properties of basalt fiber reinforced asphalt mixture [J]. Highway and Traffic Science and Technology, 2020, 37(11): 1-7.

[16] 胡传林，李宗津，王发洲. 混凝土微观力学基础研究进展及应用展望[J]. 工程力学，2021，38(4)：1-7.
HU Chuanlin, LI Zongjin, WANG Fazhou. Advances in basic research and application prospects of micromechanics of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 1-7.

[17] KOSSOVICH E L, BORODICH F M, BULL S J, et al. Substrate effects and evaluation of elastic moduli of components of inhomogeneous films by nanoindentation[J]. Thin SolidFilms, 2016, 619: 112-119.

[18] FAISAL H, TAREFDER R, WELDEGIORGIS M. Nanoindentation characterization of moisture damage in different phases of asphalt concrete[J]. Advancesin Civil Engineering Materials, 2015, 4(1): 31-46.

[19] BARBHUIYA S, CARACCIOLO B. Characterisation of asphalt concrete using nanoindentation[J]. Materials, 2017, 10(7): 823.

[20] ABD D M, AL-KHALID H, AKHTAR R. An investigation into the impact of warm mix asphalt additives on asphalt mixture phases through a nano-mechanical approach[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 296-306.

[21] YAO Z H, LU G L, YANG J, et al. Nanoindentation characterization of aging gradient of mastic in asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 187-195.

[22] YU Y H, XU G, WANG T L, et al. Analysis of nanoindentation test results of asphalt mixture with different gradations [J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7992.

[23] 郭乃胜，刘祥源，王志臣，等. 基于纳米压痕试验的沥青混合料 ITZ 识别及力学性能[J]. 建筑材料学报，2024，27(9)：816-823.
GUO Naisheng, LIU Xiangyuan, WANG Zhichen, et al. ITZ identification and mechanical properties of asphalt mixture based on nanoindentation test[J]. Journal of Building Materials, 24, 27(9): 816-823.

[24] 李敏，梁乃刚，张泰华，等. 纳米压痕过程的三维有限元数值试验研究[J]. 力学学报，2003，35(3)：257-264.
LI Min, LIANG Naigang, ZHANG Taihua, et al. Three-dimensional finite element numerical experimental study on nanoindentation process[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(3): 257-264.

[25] 段茜，吴亚丽. 不同晶面单晶铝纳米压痕测试及有限元模拟[J]. 人工晶体学报，2015，44(12)：3467-3472.
DUAN Qian, WU Yali. Testing and finite element simulation of single crystal aluminum nanoindentation on different crystal planes [J]. Journal of Artificial Crystals, 2015, 44(12): 3467-3472.

[26] GAUTHAM S, SINDU B S, SASMAL S. Evaluation of the phase properties of hydrating cement composite using simulated nanoindentation technique[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2017, 25(7): 075012.

[27] KHAN Z H, FAISAL H, TAREFDER R A. Evaluation of nanomechanical properties of nonaggregate phase of asphalt concrete using finite-elementmethod [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(12): 04018331.

[28] 龙安雄. 水工玄武岩纤维沥青混凝土力学性能研究[D]. 西宁：青海大学，2023.
LONG Anxiong. Research on Mechanical Properties of Basalt Fiber Asphalt Concrete for Hydraulic Engineering[D]. Xining: Qinghai University, 2023.

[29] OLIVE W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of materials research, 1992, 7(6): 1564-1583.

[30] ZHU X X, YUAN Y, LI L H, et al. Identification of interfacial transition zone in asphalt concrete based on nano-scale metrology techniques[J]. Materials & Design, 2017, 129: 91-102.

[31] CHU Z Y, GUO N S, WANG Z C, et al. Identification and mechanical properties of asphalt mastic-aggregate interface transition zone (ITZ) based on nanoindentation and AFM[J]. Construction and Building Materials, 2025, 461: 139898.

[32] 黄科臻，赵思伟，张建伟，等. 压头形状对高分子材料压痕和刮擦行为影响的实验研究[J]. 实验力学，2021，36(3)：334-339.
HUANG Kezhen, ZHAO Siwei, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on the influence of indenter shape on indentation and scratch behavior of polymer materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(3): 334-339.

[33] 张垚，颜子超，康爱红，等. 高寒大温差条件下玄武岩纤维沥青混合料低温性能研究[J]. 实验技术与管理，2024，41(5)：92-98.
ZHANG Yao, YAN Zichao, KANG Aihong, et al. Study on the low-temperature performance of basalt fiber asphalt mixtures under high cold and large temperature difference conditions[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(5): 92-98.

[34] 姚华彦，王旭洋，扈惠敏，等. 玄武岩纤维增强沥青混合料的抗裂性能[J]. 公路，2024，69(6)：285-292.
YAO Huayan, WANG Xuyang, HU Huimin, et al. Crack resistance of basalt fiber reinforced asphalt mixtures[J]. Highway, 2024, 69(6): 285-292.

[35] LI Z N, SHEN A Q, WANG H, et al. Effect of basalt fiber on the low-temperature performance of an asphalt mixture in a heavily frozen area[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119080.

[36] 曾国伟，杨新华，白凡，等. 沥青砂粘弹塑蠕变损伤本构模型实验研究[J]. 工程力学，2013，30(4)：249-253.
ZENG Guowei, YANG Xinhua, BAI Fan, et al. Experimental study on the viscoelastic creep damage constitutive model of asphalt sand [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 249-253.

[37] DEÁK T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison [J]. Textile Research Journal, 2009, 79 (7): 645-651.

[38] YILMAZ A. Engineering properties of basalt aggregates in terms of use in granular layers of flexible pavements [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01182.

[39] HANICHET A, ASROUN A. Modelling the viscoelastic behavior of asphalt concrete at the nanoscale [J]. Journal of Materials and Engineering Structures, 2022, 9(1): 61-74.

（责任编辑　李贶家）