DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.002
文章编号:1671-2579(2025)05-0019-08

基于离散元法的沥青混合料疲劳性能细观仿真研究

茅荃[1],郑俊秋[1],马辉[2*],王敏[3]
(1.江苏交通控股有限公司,江苏 南京 210005;2.江苏高速公路工程养护技术有限公司,江苏 南京 211100;
3.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024)

摘要:沥青路面在长期服役过程中容易发生疲劳开裂,从而引发次生病害并降低结构耐久性。为深入研究沥青混合料的疲劳损伤行为,该文基于离散元法构建了半圆弯曲(SCB)细观模型,模拟了SMA-13、SUP-20与SUP-25共3种江苏省高速公路典型沥青混合料在不同应力比条件下的疲劳断裂行为。从疲劳寿命、裂缝扩展及剩余强度等方面分析了沥青混合料疲劳损伤机理与演化规律。结果表明:3种混合料均呈现典型的三阶段疲劳损伤特征,且应力比升高会显著缩短疲劳寿命并加速裂缝发展;SMA-13依托骨架密实性与改性沥青砂浆展现出优异的抗疲劳性能,SUP-20次之,而SUP-25因骨架约束不足及砂浆韧性较低表现最差。同时,不同混合料的裂缝扩展路径与剩余强度衰减规律差异显著,进一步揭示了骨架结构与沥青砂浆性能对疲劳损伤机理的关键作用。

关键词:沥青混合料;离散元法;疲劳寿命;裂缝扩展;剩余强度
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Mesoscopic Simulation Study on Fatigue Performance of Asphalt Mixture Based on Discrete Element Method

MAO Quan[1], ZHENG Junqiu[1], MA Hui[2*], WANG Min[3]
(1. Jiangsu Communications Holding Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210005, China; 2. Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211100, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Asphalt pavement is prone to fatigue cracking during long-term service, which can lead to secondary diseases and weaken the structural durability. For in-depth revelation of the fatigue damage behavior of asphalt mixtures, in this paper, a semi-circular bending (SCB) mesoscopic model was established based on the discrete element method. The fatigue fracture behavior of three typical asphalt mixtures in Jiangsu Province's expressways, including SMA-13, SUP-20, and SUP-25, was simulated under different stress ratio conditions. The fatigue damage mechanism and evolution law of asphalt mixtures were analyzed from the aspects of fatigue life, crack propagation, and residual strength. The results show that all three mixtures exhibit typical three-stage fatigue damage characteristics, and the increase of stress ratio will significantly shorten the fatigue life and accelerate the crack development. SMA-13 shows excellent fatigue resistance due to its dense skeleton and modified asphalt mortar, followed by SUP-20, while SUP-25 performs the worst due to insufficient skeleton constraint and low mortar toughness. Meanwhile, the crack propagation paths and residual strength attenuation laws of different mixtures are significantly different, further revealing the key role of skeleton structure and asphalt mortar performance in the fatigue damage mechanism.

Keywords: asphalt mixture; discrete element method; fatigue life; crack propagation; residual strength

收稿日期:2025-09-20 **修回日期:**2025-10-06
基金项目:江苏交通控股有限公司科研项目(编号:2021JKY01-2)
作者简介:茅荃,男,硕士,研究员级高级工程师.E-mail:13952038445@139.com
***通信作者:**马辉,男,博士,高级工程师.E-mail:mahui060511113@163.com

0 引言

沥青路面是现代交通基础设施的重要组成部分，因其优良的行车舒适性、较低的噪声以及便于养护修补等优点，被广泛应用在中国各等级公路建设中[1-2]。然而，在日益增长的交通荷载与行车频率的反复作用下，疲劳开裂已经成为长期服役沥青路面的主要病害形式之一。该病害不仅严重削弱路面结构的承载能力，而且加速引发松散脱空、龟裂坑槽、层间不良等更为严重的结构性破坏[3-4]。因此，深入分析沥青混合料的疲劳性能，揭示其损伤劣化机理，对提升路面长期服役性能与耐久性至关重要。

近年来，国内外学者围绕沥青混合料的疲劳性能开展了广泛研究。在宏观层面，四点弯曲梁、半圆弯曲(SCB)等室内试验被广泛用于获取疲劳寿命、模量衰减等关键性能指标，对于揭示材料宏观疲劳行为具有重要价值[5-7]。然而，传统试验方法在揭示损伤机理方面存在固有限制，试验周期长、成本高，且难以连续捕捉裂纹从萌生到扩展的全过程；同时，试件制备与加载条件的细微差异易导致试验结果离散性较大，限制了对损伤演化内在规律的深入研究[8-9]。

相较而言，数值模拟方法能够有效规避试验条件与人为因素的干扰，为疲劳研究提供了新的途径。该方法允许同一数值试件在不同工况下反复加载，从而在保持材料一致性的前提下系统开展对比分析，并能显著降低结果的离散性。在常用的数值方法中，有限元方法可较好地描述整体应力-应变响应，并结合连续损伤力学模型进行寿命预测，但其将沥青混合料视为均质连续介质，难以反映颗粒骨架效应和裂缝的非连续扩展特征。相比之下，离散元方法能够从颗粒层面模拟混合料的细观结构与损伤演化，直观再现裂缝的萌生、扩展与贯通过程[10-11]。然而，当前研究对象多集中于单一类型的沥青混合料，对于不同典型沥青混合料在疲劳性能上的差异及其内在机理，尚缺乏系统性的对比分析。

因此，本文采用离散元法建立SMA-13、SUP-20、SUP-25沥青混合料模型，模拟中温条件下SCB疲劳断裂试验，旨在从疲劳寿命、裂缝路径以及剩余强度等方面分析其疲劳性能的损伤演化规律。研究结果可为沥青混合料配合比优化以及路面结构的长期性能预测提供科学依据。

1 半圆弯曲试验模型

1.1 几何模型

本文参照江苏高速公路典型路面结构形式，选择SMA-13、SUP-20以及SUP-25共3种沥青混合料开展疲劳性能研究。其中，SBS改性沥青SMA-13沥青混合料，油石比为6.0%，空隙率为4.0%；SBS改性沥青SUP-20沥青混合料，油石比为4.3%，空隙率为4.0%；70#普通沥青SUP-25沥青混合料，油石比为4.0%，空隙率为5.0%。

由于材料配合比为质量比，在离散元模型构建中，需要将其换算为体积比，按照各组分材料体积比例进行粗集料颗粒投放[12]。沥青混合料各组分体积比如表1所示。

表1 沥青混合料各组分体积比[12]

Table 1 Volume ratio of each component in asphalt mixtures[12]

公称最大粒径/mm	SMA-13混合料		SUP-20混合料		SUP-25混合料	
	重量通过率/%	体积占比/%	重量通过率/%	体积占比/%	重量通过率/%	体积占比/%
31.5					100.0	3.88
26.5			100.0	1.82	95.4	15.53
19			97.9	25.90	77.0	16.54
16	100.0	8.34				
13.2	90.0	33.35	68.0	15.93	57.4	5.23
9.5	50.0	23.34	49.6	13.68	51.2	15.19
4.75	22.0	5.00	33.8	5.02	33.2	8.61
2.36	16.0	1.67	28.0	7.10	23.0	5.57
1.18	14.0	1.67	19.8	5.02	16.4	4.64
0.6	12.0	1.67	14.0	4.07	10.9	3.21
0.3	10.0	0.83	9.3	1.21	7.1	1.27
0.15	9.0	0.83	7.9	1.39	5.6	0.68
0.075	8.0	6.67	6.3	5.46	4.8	4.03
沥青胶浆		12.63		9.40		10.62
空隙		4.00		4.00		5.00

利用离散元PFC自编程算法，依据粗集料粒径以及体积比例，随机抽取粗集料刚性簇模型并随机填充到尺寸为200 mm×200 mm×100 mm的空间域中。为兼顾模型计算效率与精度，将粒径小于4.75 mm的细集料与沥青胶浆共同定义为均质的沥青砂浆。为消除边界位置刚性簇投放误差的影响，距离x方向边界20 mm范围内、距离y方向边界20 mm范围内以及距离z方向边界25 mm范围内的刚性簇，不参

与细观模型构建。基于六方紧密规则排布结构，通过自编程算法将尺寸为160 mm×160 mm×50 mm空间内的刚性簇转换为由半径为0.5 mm球组成的柔性簇模型，并生成沥青砂浆与空隙。通过内置颗粒删除功能剪裁出半径为75 mm、厚度为50 mm的半圆形试件模型，沿厚度方向随机剪裁出多个厚度为单层球的三维试件模型，通过内置算法将三维试件模型转化为二维模型，并预设切口建立二维SCB试验模型。建模过程如图1所示。

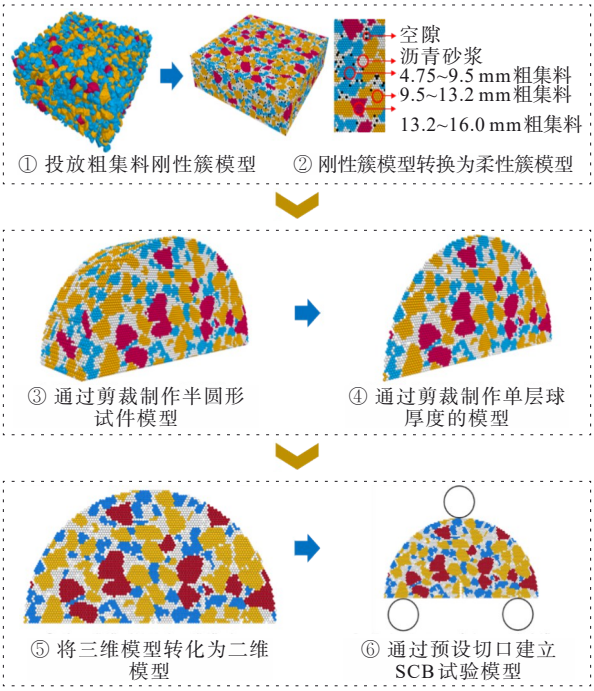


图1　SCB模型制作过程（以SMA-13沥青混合料为例）

Figure 1　SCB model manufacturing process（taking SMA-13 asphalt mixture as an example）

1.2　力学模型

线性平行黏结模型是离散元PFC中常用的细观接触本构模型之一，能够较好地模拟岩土材料、混凝土等颗粒材料的宏观力学特性和裂纹演化过程[13]。该模型通过在颗粒接触界面上引入具有有限面积的黏结区域，使得颗粒间不仅能够传递法向力与切向力，还能够承受弯矩与扭矩。在黏结完整时，颗粒间表现为近似刚性连接；一旦局部应力超出黏结强度阈值，黏结便失效，接触关系退化为普通摩擦作用。

本文构建的细观模型涵盖3种典型沥青混合料，即SMA-13、SUP-20和SUP-25，以粗集料与沥青砂浆作为基本组分。在接触关系定义方面，模型区分了4种主要接触：集料内部、沥青砂浆内部、不同集料之间以及集料与沥青砂浆之间的界面[14]。针对这些接触，模型分别设置了3组接触参数，即接触有效模量、拉伸强度与黏结强度，用以表征不同材料组分之间的力学特性及破坏行为。

1.3　模型验证

在25 ℃条件下对3种沥青混合料开展SCB断裂试验，加载速率为50 mm/min，测得试验峰值荷载与峰值位移，以试验结果为依据，通过试错法对模型的细观参数进行标定。如图2所示，经峰值荷载与峰值位移对比可知，3种沥青混合料的模拟值与实测值较为接近，表明所标定的细观参数能够准确反映3种沥青混合料的力学性能及其断裂行为。线性平行黏结模型的细观参数见表2。

2　疲劳损伤行为模拟

2.1　应力腐蚀模型

为实现对沥青混合料疲劳损伤过程的细观模拟，本文引入应力腐蚀模型，通过离散元法开展疲劳试验模拟。该方法通过利用与应力状态相关的强度衰减机制，等效模拟材料在重复荷载作用下的疲劳损伤行为[15]。

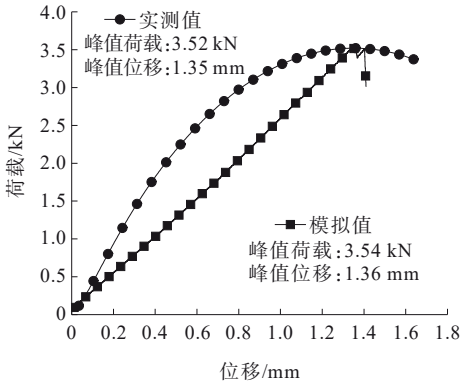
在线性平行黏结模型的框架下，沥青混合料的疲劳损伤被表征为局部应力驱动的细观接触失效逐步累积过程。在此基础上，当颗粒间接触的拉应力超过疲劳损伤阈值σ_0时，细观接触的黏结半径随之衰减直至失效[16]，其腐蚀速率与当前应力水平呈指数型相关，即：

$$\frac{\mathrm{d}\overline{D}}{\mathrm{d}t}=-\alpha_1\exp\left(\alpha_2\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \tag{1}$$

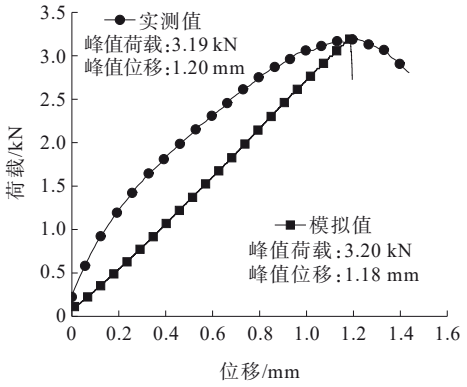
式中：$\overline{D}$为接触黏结直径；α_1为基准腐蚀系数；α_2为应力敏感性参数；σ为颗粒间接触的法向应力；σ_0为颗粒间接触的初始抗拉强度。

方程(1)反映了应力水平越高，材料损伤速率越快的物理特性。

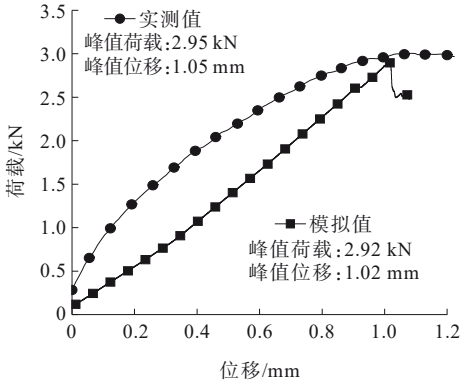
在模拟疲劳行为过程中，应力腐蚀模型通过周期性遍历更新所有接触的应力状态，以驱动细观损伤的逐步演化。对于法向应力超过疲劳阈值且满足腐蚀条件的接触，通过削减其黏结半径来模拟接触性能的渐进退化。接触力与弯矩亦按照缩减比例进行调整，从而反映局部刚度与承载能力的削弱[17-18]。随着时间的推移，退化效应持续叠加并加剧应力集中，最终当接触强度降至极低水平并且颗粒间距超过断裂阈值时，接触被判定为失效，从而推动裂缝在细观结构中的扩展。



(a) SMA-13沥青混合料



(b) SUP-20沥青混合料



(c) SUP-25沥青混合料

图2 荷载-位移曲线对比结果

Figure 2 Comparison of load-displacement curves

2.2 虚拟疲劳试验设计

虚拟SCB疲劳试验采用无间歇的半正弦应力控制循环加载模式,循环峰值荷载由SCB断裂试验峰值强度和应力比确定。为保证加载过程的稳定性,将最小荷载设置为0.1 kN。同时,兼顾模型计算效率与研究目标,试验采用100 Hz加载频率,即单次加载循环时间为0.01 s。时间步设置采用自动模式,使得平台根据计算稳定性动态匹配最优步长。本文对SMA-13、SUP-20与SUP-25共3种沥青混合料,选取0.5、0.6、0.7共3个应力比开展虚拟疲劳试验,对比3种典型沥青混合料在不同应力比条件下的疲劳性能演化规律。试验工况如表3所示。

表2 沥青混合料细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of asphalt mixtures

混合料类型	接触分组	有效模量/Pa	拉伸强度/Pa	黏结强度/Pa
SMA-13	集料内部	2.50E+08	5.50E+06	1.10E+07
	集料-砂浆	1.91E+06	1.55E+05	3.10E+05
	砂浆内部	2.12E+06	1.72E+05	3.44E+05
SUP-20	集料内部	2.50E+08	5.50E+06	1.10E+07
	集料-砂浆	2.04E+06	9.72E+04	1.94E+05
	砂浆内部	2.27E+06	1.08E+05	2.16E+05
SUP-25	集料内部	2.50E+08	5.50E+06	1.10E+07
	集料-砂浆	3.51E+06	1.45E+05	2.90E+05
	砂浆内部	3.90E+06	1.61E+05	3.22E+05

表3 虚拟疲劳试验工况

Table 3 Virtual fatigue test conditions

混合料类型	断裂峰值荷载/N	应力比	循环峰值荷载/N
SMA-13	3 541	0.5	1 770.5
		0.6	2 124.6
		0.7	2 478.7
SUP-20	3 203	0.5	1 601.5
		0.6	1 921.8
		0.7	2 242.1
SUP-25	2 916	0.5	1 458.0
		0.6	1 749.6
		0.7	2 041.2

3 细观疲劳性能分析

3.1 循环-位移曲线

通过提取不同应力比条件下的循环-位移曲线(图3),分析3种混合料的疲劳性能演化规律。

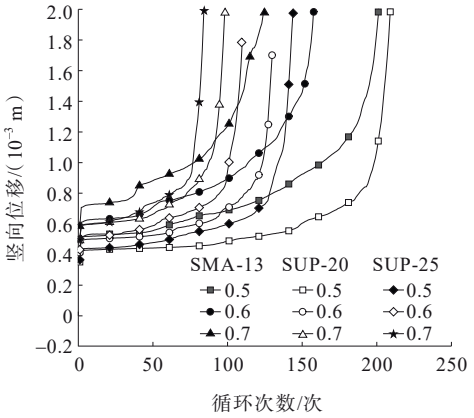


图3 竖向位移变化曲线

Figure 3 Curve of vertical displacement variation

由图3可知：① 随着循环次数的增加，所有混合料均表现出典型的疲劳损伤三阶段演化规律：初始变形阶段（阶段Ⅰ）、累积损伤阶段（阶段Ⅱ）、加速破坏阶段（阶段Ⅲ）。其中，将阶段Ⅱ与阶段Ⅲ之间拐点对应的循环加载次数作为疲劳寿命判定标准；② 3种沥青混合料均表现出显著的应力水平依赖性，随着应力比的升高，其疲劳寿命均呈下降趋势，但衰减幅度存在差异。总体来看，SMA-13在各应力水平下均表现出更长的疲劳寿命，体现出优良的抗疲劳性能；SUP-20次之；SUP-25的寿命相对较短，且会随应力水平升高而显著缩短，表明其对应力水平变化更为敏感。在0.5应力比条件下，SMA-13与SUP-20疲劳寿命基本相当，显著高于SUP-25。然而，在高应力比条件下，SMA-13的相对优势更加突出，显示其在高荷载环境下具有更强的抗疲劳能力[19]；③ 在相同应力比条件下，SMA-13的竖向位移累积量最大，SUP-20次之，SUP-25最小。这一现象与材料的组成和结构特性直接相关。SMA-13的粗集料形成稳定的骨架结构，沥青砂浆富含纤维与改性沥青，使其具有优异的黏弹性和变形能力。这种结构特性使其能够通过较大的塑性变形来耗散能量，从而延缓疲劳损伤的发展[20-21]。相比之下，SUP-20和SUP-25的力学性能更加依赖于沥青砂浆。SUP-25采用基质沥青且用量较低，导致其变形能力较差。SUP-20虽然也采用改性沥青，但骨架能力不足且油石比较低，砂浆性能介于SMA-13和SUP-25之间。

3.2　裂缝演化规律

图4为3种沥青混合料在0.5、0.6、0.7应力比条件下的裂缝数量演化规律。

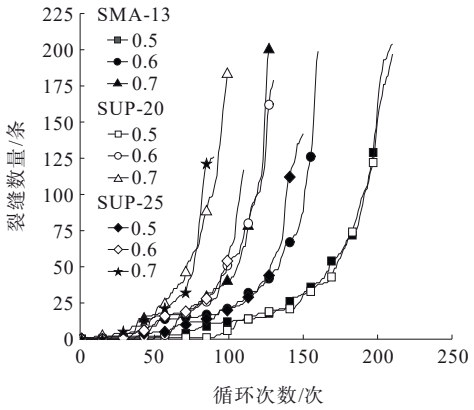


图4　裂缝数量变化曲线

Figure 4　Curve of variation in number of cracks

由图4可知：随着循环次数的增加，裂缝数量均呈现出典型的两阶段特征：裂缝发展缓慢，累积速率较低（阶段1）；裂缝数量迅速增加并最终导致试件失效（阶段2）。其中，阶段1在疲劳寿命中占据主要比例，其持续时间直接反映了材料抵抗疲劳的能力。

应力比是影响裂缝数量演化最重要的因素之一，随着应力比的提高，裂缝数量在阶段1对应的循环次数显著减少，且增长速率明显加快。这主要是因为高应力比意味着沥青混合料承受的荷载更高，每次加载引起的应变更大，从而导致损伤累积更快。在细观层面上，更高的应力比更容易导致集料颗粒间的沥青砂浆产生微裂纹，并加速微裂缝的累积和扩展，形成宏观裂缝[22]。

在相同应力比条件下，不同类型沥青混合料的裂缝演化过程呈现出显著差异。整体而言，SMA-13在各应力比水平下均表现出最优的抗裂性能，即达到相同裂缝数量所需的循环次数明显高于其他类型混合料。这是由于SMA-13为骨架密实型结构，粗集料之间形成稳定的嵌挤骨架体系，能够直接分担与传递外荷载，从而有效降低沥青砂浆的受力水平。同时，SMA-13使用改性SBS沥青作为胶结材料，并配合高矿粉、高纤维和较大沥青用量形成高黏聚性的沥青玛蹄脂，不仅显著提高了混合料的整体力学性能，还赋予其更优异的弹性恢复能力与韧性，使其在反复荷载作用下难以产生明显的塑性变形。相比之下，SUP-20和SUP-25的粗集料颗粒之间接触有限，应力更多依赖于沥青砂浆传递，因而整体抗裂性能低于SMA-13[23]。其中，SUP-25采用基质沥青，其弹性恢复和抗疲劳性能远不及改性SBS沥青，导致裂缝萌生与扩展更为迅速，最终表现出最低的疲劳寿命。

3.3　裂缝扩展路径

图5展示了3种沥青混合料的疲劳裂缝扩展特征。由图5可以看出：SMA-13裂缝倾向于绕过强度较高的粗集料，沿界面呈锯齿状发展，并伴随多条支缝，宏观扩展速率相对较慢；SUP-20裂缝形态介于SMA-13与SUP-25之间，路径既表现出一定曲折性，又保持较强方向性，整体呈现沿界面较规则地扩展；SUP-25裂缝则多在沥青砂浆中连续贯通，仅在局部受粗集料阻碍时发生偏折，且在偏折后趋于平直。

裂缝路径的差异主要由混合料级配及骨架结构决定。SMA-13粗集料含量高且嵌挤紧密，裂缝扩展过程中受到显著阻滞，被迫沿胶浆界面绕行并分叉，路径曲折延长，能量耗散较大，从而表现出较强的抗疲劳性能；SUP-20骨架与胶浆分布均衡，裂缝既呈

现曲折性，又保持一定方向性，其扩展特征介于两者之间；SUP-25虽含大粒径粗集料，但骨架约束有限、胶浆连续性不足，裂缝更易沿直线快速贯通，仅在局部发生偏折，能量耗散有限，疲劳性能相对较低。

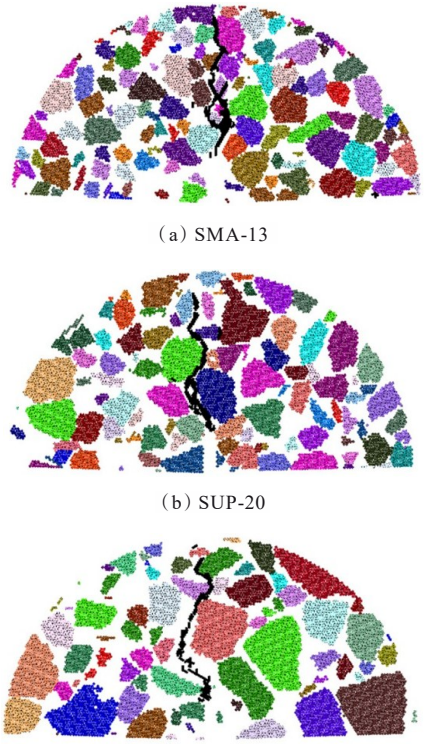


图5 裂缝扩展路径

Figure 5 Crack propagation path

3.4 剩余强度

在反复荷载作用下，沥青混合料的力学性能会逐步衰退，其宏观表现之一是强度随循环次数的增加而降低。与疲劳寿命终点相比，剩余强度的变化过程能够更灵敏地捕捉到材料性能的渐进型损伤特征，从而更直观地揭示不同阶段材料力学性能的劣化程度。因此，本文利用数值模拟方法将同一仿真试件反复应用于不同测试试验的优势，对比分析3种沥青混合料在不同应力比条件下剩余强度的变化特征。

图6展示了3种沥青混合料在不同应力比条件下，随疲劳阶段(n/N)演化剩余强度的变化规律。整体来看，三者的强度均随疲劳阶段的推进逐渐衰减，且应力比越低，衰减速率越快，表明低水平荷载下结构在疲劳过程中的累积损伤更为显著，承载能力下降更迅速[24]。然而，不同混合料之间仍表现出明显差异，体现了骨架特性与沥青砂浆性能对疲劳性能的重要作用。其中，SMA-13在所有应力比条件下均表现出较高的剩余强度，说明其能够维持较长的承载时间。SUP-20的剩余强度表现居中。相比之下，SUP-25在全部应力比下均显示出最低的残余强度水平，说明其疲劳损伤更容易累积并导致强度快速丧失。3种混合料在剩余强度衰减规律上的差异，源于骨架密实性与砂浆性能的共同作用：骨架稳固、砂浆延展性高的材料能够有效耗散能量，从而延缓强度退化；而骨架悬浮、砂浆韧性低的材料则在疲劳阶段快速丧失承载能力。

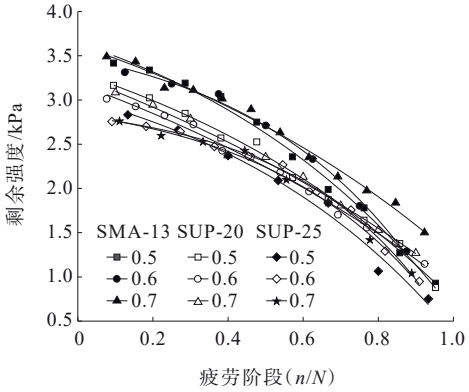


图6 剩余强度衰减规律

Figure 6 Law of residual strength attenuation

在疲劳损伤过程中，随着重复荷载次数的增加，材料内部损伤不断累积，表现出疲劳循环荷载与第n次循环荷载后的剩余强度之比，即真实应力比S_n不断增加，当材料剩余强度低于循环荷载峰值时，试件将发生破坏[22]。真实应力比S_n的计算公式为：

$$S_n = P_0 R / P_n \tag{2}$$

式中：S_n为第n次荷载循环后的真实应力比；R为初始应力比；P_0为初始强度；P_n为剩余强度。

根据图7中真实应力比S_n随疲劳阶段(n/N)的变化关系，可以清晰地看出剩余强度的衰减规律。随着疲劳进程的发展，S_n呈非线性上升，表明结构损伤持续累积。在疲劳阶段前期，损伤发展较为缓慢，强度衰减平稳；进入后期后，损伤加速扩展，S_n急剧增大，剩余强度迅速下降。不同初始应力比的影响较为显著，应力比越低，前期同一疲劳阶段对应的S_n值越小，说明早期损伤越少，但后期发展更快，更早进入破坏状态。

4 结论

本文采用离散元法建立SCB疲劳试验模型，从

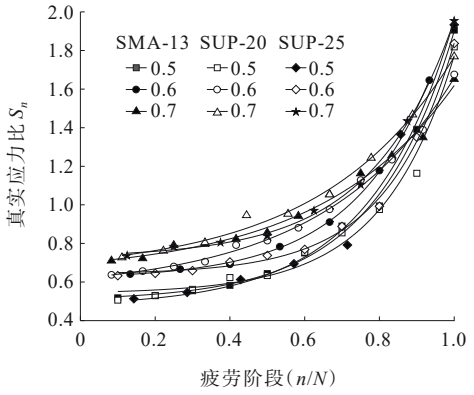


图7　真实应力比的演化规律

Figure 7　Evolution law of true stress ratio

细观尺度上分析3种沥青混合料在不同应力比条件下的疲劳性能。主要研究结论如下:

(1) 3种沥青混合料在循环加载下均呈现典型三阶段疲劳损伤特征,疲劳寿命随应力比升高而下降,但混合料间存在显著差异。SMA-13依托骨架密实性与改性沥青协同作用展现出优异的抗疲劳性能,SUP-20次之,而SUP-25因骨架约束不足及砂浆韧性低,疲劳寿命最短。

(2) 3种混合料裂缝演化呈"缓慢萌生-快速扩展"两阶段特征,第一阶段占疲劳寿命大部分,反映抗损伤能力。应力比升高显著缩短萌生期并加快裂缝增长速率,高荷载下损伤累积加速。SMA-13抗裂性能最优,SUP-20次之,SUP-25最弱。

(3) 裂缝扩展路径受级配与骨架结构显著影响。SMA-13骨架密实、粗集料嵌挤紧密,裂缝曲折分叉、能量耗散大;SUP-20呈界面扩展与曲折并存,性能居中;SUP-25骨架约束不足,裂缝沿砂浆直线贯通,能量耗散有限,疲劳性能最差。

(4) 3种混合料剩余强度随疲劳阶段推进逐渐衰减,低应力比下前期保持稳定衰减趋势,但是后期衰减更快,表明低荷载下更快发生材料破坏,但SMA-13骨架密实、砂浆韧性高仍表现出略高剩余强度,SUP-20次之,SUP-25略低。

参考文献:

References:

[1] 王旭东,杨光,钱振东,等.基于亿次加载试验的长寿命沥青路面性能演化规律及设计体系研究[J].中国公路学报,2024,37(12):197-209.
WANG Xudong, YANG Guang, QIAN Zhendong, et al. Performance evolution law and design system of long-life asphalt pavement based on one hundred million loading tests[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(12):197-209.

[2] 于新,陈晨,董夫强,等.长期服役状态下既有沥青路面结构延寿关键技术综述[J].中国公路学报,2024,37(12):161-181.
YU Xin, CHEN Chen, DONG Fuqiang, et al. Review on critical technologies for the service life extension of existing asphalt pavement structures under long-term service conditions[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(12):161-181.

[3] 罗要飞,赵兴晨,张苛,等 沥青路面路表开裂破坏源探析与影响因素研究 [J].公路,2024,69(9):1-8.
LUO Yaofei,ZHAO Xingchen,ZHANG Ke,et al.Research on damage source of cracking on the surface of asphalt pavement and its influence factor [J].Highway,2024,69(9):1-8.

[4] 朱俊清,尹逸群,马涛,等.半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述[J].交通运输工程学报,2025,25(3):12-32.
ZHU Junqing, YIN Yiqun, MA Tao, et al. Review of cause diagnosis of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2025,25(3):12-32.

[5] 冯卫东,营永明,龚华勇.沥青混合料弯曲疲劳性能演化规律的宏细观试验表征[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):2984-2994.
FENG Weidong,JIAN Yongming,GONG Huayong.Macro- and meso-scale experimental characterization of bending fatigue behavior evolution law for asphalt mixture[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(10):2984-2994.

[6] 黄卫东,钟皓白,李本亮,等.不同疲劳试验中改性沥青混合料疲劳性能对比[J].建筑材料学报,2019,22(1):149-153.
HUANG Weidong, ZHONG Haobai, LI Benliang, et al. Comparison of fatigue properties of modified asphalt mixture in different fatigue tests[J]. Journal of Building Materials,2019,22(1):149-153.

[7] 张永远,孟卫红,杨鑫,等.不同FRAP掺量的再生沥青混合料长期性能研究[J/OL].中外公路,1-11[2025-07-28]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250728.1652.003.
ZHANG Yongyuan, MENG Weihong, YANG Xin, et al. Investigation on long-term performance of recycled asphalt mixtures with various FRAP contents[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway,1-11[2025-07-28]. https://link. cnki. net/urlid/43.1363. U. 20250728. 1652.003.

[8] 曹毅,马士宾.热拌沥青混合料四点弯曲梁疲劳试验结果的不一致性及修正[J].材料导报,2016,30(12):129-133,144.
CAO Yi, MA Shibin. Inconsistency and correction of fatigue test results of four-point bending beam of hot mix asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2016, 30(12): 129-133,144.

[9] 李晨曦,孙立军,程怀磊.沥青混合料圆板弯曲疲劳试验

方法建立及混合料疲劳特性分析[J/OL].土木工程学报,1-13 [2025-02-18].https://link.cnki.net/urlid/11.2120.TU.20250218.1754.004.
LI Chenxi, SUN Lijun, CHENG Huailei. Development of circular-plate bending fatigue test method for asphalt mixtures and analysis of fatigue characteristics of mixtures [J/OL].China Civil Engineering Journal,1-13[2025-02-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.2120.TU.20250218.1754.004.

[10] 徐永江,王伟,谭忆秋.不同受力模式下的沥青混合料接触力链分布特征[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(7):1-10.
XU Yongjiang, WANG Wei, TAN Yiqiu. Contact force chain distribution characteristics of asphalt mixture under different stress modes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2024,56(7):1-10.

[11] 吴国雄,姜勇,张伟,等.粗集料分布形态对沥青混合料疲劳性能影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(4):80-86.
WU Guoxiong,JIANG Yong,ZHANG Wei,et al.Influence of coarse aggregate distribution morphology on the fatigue performance of asphalt mixtures[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2023,42(4):80-86.

[12] 马辉,任仲山,王敏.反射裂缝对沥青路面结构细观力学行为的影响研究[J/OL].中外公路,1-11[2025-09-28]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250928.1632.021.
MA Hui,REN Zhongshan,WANG Min.Study on influence of reflective cracks on meso-mechanical behavior of asphalt pavement structure[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-11 [2025-09-28]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250928.1632.021.

[13] 杨智慧,李珊花.基于PFC^{2D}的水泥土单轴压缩试验及细观数值模拟[J].中外公路,2023,43(1):189-193.
YANG Zhihui, LI Shanhua. Uniaxial shear test and mesoscopic numerical simulation of cemental soil based on PFC^{2D} method[J].Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(1):189-193.

[14] WANG M,YU X,CHEN C.Mechanical response analysis of asphalt pavement considering top-down crack based on FDM-DEM coupling simulation[J]. Journal of Road Engineering,2025,5(1):92-105.

[15] 张培,任青文.循环荷载下混凝土疲劳损伤累积分析的颗粒流黏结退化模型[J].工程力学,2021,38(增刊1):100-109.
ZHANG Pei, REN Qingwen. Particle bond-degradation model for cumulative damage analysis of concrete under cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(sup 1): 100-109.

[16] 刘振辉,陈雪琴,董侨,等.基于离散元的钢渣透水沥青混合料疲劳损伤数值仿真[J].江苏大学学报(自然科学版),2025,46(1):98-104.
LIU Zhenhui, CHEN Xueqin, DONG Qiao, et al. Fatigue damage numerical simulation of steel slag porous asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 98-104.

[17] CAO M H,YANG S Q,TIAN W L,et al.Three-dimensional discrete element simulation of the triaxial cyclic loading of sandstone based on a nonlinear parallel-bonded stress corrosion model[J].Computers and Geotechnics,2024,168: 106167.

[18] MOGHADDAM R H, GOLSHANI A. Fatigue behavior investigation of artificial rock under cyclic loading by using discrete element method[J]. Engineering Failure Analysis,2024,160:108105.

[19] 沈钱超,吴帮伟,沈燕,等.应力控制模式下沥青混合料疲劳损伤力学性能研究[J].吉林建筑大学学报,2020,37(1):38-44.
SHEN Qianchao, WU Bangwei, SHEN Yan, et al. Research on mechanical properties of asphalt mixture fatigue damage under stress control mode[J]. Journal of Jilin Jianzhu University,2020,37(1):38-44.

[20] 蒋应军,张文辉,张嘉伟,等.不同成型方法SMA-13混合料性能评价[J].公路交通科技,2023,40(10):35-42.
JIANG Yingjun, ZHANG Wenhui, ZHANG Jiawei, et al. Performance evaluation on SMA-13 mixture by different molding methods[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(10): 35-42.

[21] SADEGHIAN M,LATIFI NAMIN M,GOLI H.Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier[J].Construction and Building Materials,2019,226:818-826.

[22] 赵晓康.路面水稳碎石基层材料细观结构表征及疲劳劣化机制研究[D].南京:东南大学,2022.
ZHAO Xiaokang.Study on microstructure characterization and fatigue deterioration mechanism of pavement water-stabilized macadam base material[D]. Nanjing: Southeast University,2022.

[23] 倪秋萍,卢祎苗,肖鹏,等.玄武岩纤维对Sup-20沥青混合料性能影响研究[J].公路,2018,63(11):274-279.
NI Qiuping, LU Yimiao, XIAO Peng, et al. Study on the influence of basalt fiber on the performance of Sup-20 asphalt mixture[J].Highway,2018,63(11):274-279.

[24] 李友云,车翔宇,申艳梅,等.沥青混合料半圆弯曲试验疲劳剩余强度分析与预测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(6):74-83,123.
LI Youyun, CHE Xiangyu, SHEN Yanmei, et al. Analysis and prediction of fatigue residual strength of asphalt mixture in semi-circular bending tests[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2024,43(6):74-83,123.