

文章编号:1007-9629(2023)01-0085-06

# 沥青混合料复合小梁宏观与细观疲劳特性分析

崔亚楠<sup>1,2,\*</sup>, 张强<sup>1,2</sup>, 张翔<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区  
土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**为研究原路面加铺沥青混合料层后的整体疲劳性能,在模拟原路面的 AC-16 沥青混合料上加铺 SMA-13 沥青混合料制备复合小梁,对其进行弯曲试验,并使用数字图像相关(DIC)技术对复合小梁的不同层位进行细观分析.结果表明:复合小梁的疲劳寿命与试验温度、应力比、老化程度呈负相关关系;原路面为主要抵抗荷载的部分,加铺层则主要改善路面的功能性;复合小梁疲劳开裂过程可分为 3 个阶段,即损伤初始阶段、损伤发展阶段与损伤破坏阶段.

**关键词:**加铺路面;小梁弯曲试验;数字图像相关;宏-细观力学

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.012

## Analysis of Macroscopic and Mesoscopic Fatigue Characteristics of Asphalt Mixture Composite Small Beam

CUI Yanan<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In order to study the overall fatigue performance of the original pavement with asphalt mixture overlayer, composite small beams were prepared by adding SMA-13 asphalt mixture over AC-16 asphalt mixture simulating the original pavement. The bending experiments were conducted and the mesoscopic scale analysis of different layers of the composite small beams was carried out using the digital image correlation(DIC) technique. The results show that the fatigue life of composite small beams is negatively correlated with the experimental temperature, stress ratio, and degree of aging. The original pavement is the main part to resist the load, and the overlayer improve mainly the functionality of the pavement. The fatigue cracking process of composite small beams can be divided into three stages, which are the initial damage stage, the damage development stage, and the damage destruction stage.

**Key words:** overlay pavement; small beam bending experiment; digital image correlation (DIC); macroscopic and mesoscopic mechanics

随着中国经济的快速发展,道路交通日益重型化,交通量快速增长,路面损坏加速,目前道路工作的重点已经由新建转移到原有道路的养护与维修.采用沥青面层作为原有路面的加铺层是一种典型的道路补强方法<sup>[1-4]</sup>.

相比于原路面,路面加铺后的整体疲劳性能更

加难以预测.杜健欢等<sup>[5-7]</sup>研究了不同因素对含层间界面的复合小梁疲劳性能的影响,发现复合小梁的疲劳破坏更加复杂,不同的层间条件、温度、荷载水平平均会对复合小梁的疲劳寿命产生显著影响.

由于加铺层与原路面材料不同以及层间的存在,在车辆荷载的作用下,原路面和加铺层的

收稿日期:2021-11-08; 修订日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168063);自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220297, JY20220413)

第一作者(通讯作者):崔亚楠(1974—),女,内蒙古乌兰察布人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士. E-mail:nmgcuianan@163.com

力学响应与变形特征有所不同.与传统宏观测试方法相比,数字图像相关(DIC)技术可以准确观测试件表面每一点的位移及应变,从而进行细观层面的分析<sup>[8]</sup>.研究证明,采用DIC技术可以很好地从细观角度分析沥青混合料裂纹的萌生和发展<sup>[9-11]</sup>.

选择AC-16沥青混合料为下层材料,选择加铺层常用的SMA-13沥青混合料为上层材料,制备复合小梁,并对其进行弯曲破坏试验与弯曲疲劳试验,使用DIC技术对试件表面进行细观观测,以期在不同环境和不同荷载水平下的加铺层设计提供实践和理论借鉴.

## 1 试验

### 1.1 原材料

采用AC-16沥青混合料为下层材料模拟原路面,SMA-13沥青混合料为上层材料模拟加铺层,制备复合小梁;AC-16为盘锦90#基质沥青,SMA-13及层间黏层油为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)掺量为4.5%(以基质沥青质量计)的SBS改性沥青,其技术指标如表1所示,合成级配如表2所示;集料为玄武岩碎石;矿粉为石灰石矿粉;SMA-13沥青混合料中掺入玄武岩纤维,掺量为0.5%(以基质沥青质量计),其性能指标如表3所示.

表1 基质沥青和SBS改性沥青技术指标

Table 1 Technical specifications of base asphalt and SBS modified asphalt

Asphalt	Penetration(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	Penetration index	Ductility(5 °C, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	Softening point/°C
Base asphalt	85.6	-0.08	9.8	48.3
SBS modified asphalt	61.4	0.05	42.1	67.6

表2 沥青混合料合成级配

Table 2 Synthesis gradation of asphalt mixture

Sieve size/mm	Passing ratio(by mass)/%		Sieve size/mm	Passing ratio(by mass)/%	
	AC-16	SMA-13		AC-16	SMA-13
19	100.0	100.0	1.18	21.2	16.5
16	98.4	100.0	0.6	13.5	13.3
13.2	90.6	96.6	0.3	9.2	11.7
9.5	77.8	68.1	0.15	6.5	10.5
4.75	57.8	29.6	0.075	5.0	10.0
2.36	31.0	22.7			

表3 玄武岩纤维性能指标

Table 3 Properties of basalt fiber

Length/mm	Diameter/ $\mu\text{m}$	Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Fracture strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Fracture elongation/%
5.8	2.373	3.36	18.0	81.5	10.54

### 1.2 试验方案

将AC-16沥青混合料拌和好后置入尺寸为300 mm×300 mm×50 mm的单层车辙板模具中碾压成型,冷却脱模后进行相应的老化处理.然后,将单层车辙板置入尺寸为300 mm×300 mm×100 mm的双层车辙板模具中,在其上表面均匀涂抹SBS改性沥青黏层油,黏层油用量为0.65 kg/m<sup>2</sup>.最后,在黏层油上加铺厚度为50 mm的SMA-13沥青混合料碾压成型,待其冷却脱模后即得到尺寸为300 mm×300 mm×100 mm的双层车辙板.

将双层车辙板切割成尺寸为250 mm×40 mm×40 mm的复合小梁试件.对其进行弯曲破坏试验和弯曲疲劳试验,并用DIC技术同步观察复合小梁的

应变场,分析其开裂特性.基于内蒙古地区10~20 °C范围内的沥青面层基准疲劳等效温度<sup>[12]</sup>,将试验温度选择为10、15、20 °C.复合小梁弯曲破坏试验采用控制位移加载,加载速率为50 mm/min,以获得破坏时的峰值荷载.原路面加铺沥青层后通常更接近厚沥青层,与控制应力加载模式的室内疲劳试验更接近,故弯曲疲劳试验采用控制应力加载,加载频率为10 Hz,所加循环荷载与弯曲破坏时峰值荷载的应力比分别取0.2、0.3、0.4、0.5.沥青路面在使用过程中因外界环境的影响会产生一定程度的老化<sup>[13]</sup>,为了更好地模拟真实情况,根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对沥青混合料进行长期老化处理,老化程度分为未老化(origin)、下层材料进行长期

老化(age1)以及下层材料进行长期老化后复合小梁整体再进行长期老化(age2)3种情况.弯曲破坏试验和弯曲疲劳试验时的DIC数据采集频率分别为10、1 Hz.

## 2 宏观试验结果与分析

### 2.1 复合小梁弯曲破坏试验

对未做老化处理的复合小梁进行弯曲破坏试验以获得其峰值荷载,同一温度条件下的复合小梁弯曲疲劳试验中所施加的循环荷载为峰值荷载的20%~50%,结果列于表4,其中 $P$ 为峰值荷载, $C$ 为循环荷载, $C/P$ 为应力比.

表4 复合小梁弯曲破坏试验中的峰值荷载及弯曲疲劳试验中的循环荷载

Table 4 Peak loads of bending failure tests and cyclic loads applied in the bending fatigue tests of composite small beams

Temperature/°C	$P$ /kN	$C$ /kN	$C/P$
10	1.411	0.28	0.2
		0.42	0.3
		0.57	0.4
		0.70	0.5
15	0.923	0.19	0.2
		0.28	0.3
		0.37	0.4
		0.46	0.5
20	0.795	0.16	0.2
		0.24	0.3
		0.32	0.4
		0.40	0.5

### 2.2 复合小梁弯曲疲劳试验

对不同试验温度、应力比和老化程度条件下的复合小梁进行三点弯曲疲劳试验,结果如图1所示.由图1可见:试验温度、应力比与老化程度和复合小梁的疲劳寿命呈负相关关系;复合小梁在试验温度从10 °C提高到20 °C的过程中,疲劳寿命均降低60%以上,这是因为在10~20 °C这一典型的疲劳开裂温

度范围内,温度上升导致沥青混合料刚度下降,从而削弱了其抗疲劳开裂的能力,降低了其疲劳寿命<sup>[14]</sup>;未经过老化处理的复合小梁在不同试验温度和应力比下均表现出最好的抗疲劳性能,下层材料经过长期老化处理的复合小梁的抗疲劳性能优于整体再经过长期老化处理的复合小梁,这是因为在老化过程中,沥青中产生的大量羰基化合物使其变硬,因而沥青及沥青混凝土的延展性变差,更易发生疲劳破坏<sup>[15-16]</sup>;在应力比从0.2增加到0.5的过程中,各种试验条件下的复合小梁疲劳寿命衰减率均达到80%以上,这是因为随着应力比的增大,每次循环加载后复合小梁的累积损伤增多,缩短了其疲劳寿命;不同试验温度、不同老化方式对疲劳寿命的影响程度随应力比的增大而减小.

## 3 DIC试验结果与分析

DIC技术是近20 a来广泛应用的一种新型非接触式应变测量技术,与传统的位移和应变测量方法相比,DIC技术可以对试件表面的目标区域进行细观尺度的观测,并可对所获取的数字图像进行后期处理和分析.由于加载过程中沥青混合料的应变值更能反映其开裂特性,因此选择其在加载过程中的应变特征云图及应变值进行细观分析.由于复合小梁存在层间且上、下层沥青混合料的材料组成不同,在荷载作用下,上、下层材料的力学响应和变形特征有所不同,为从细观尺度上分析两者的差异,选用未做老化处理的复合小梁试件,散斑点计算区域选择上、下层材料离层间远1 mm、长40 mm、宽5 mm的矩形区域,分别代表加铺层底部与原路面顶部,计算区域示意图见图2.

### 3.1 复合小梁弯曲破坏细观分析

复合小梁弯曲破坏试验与DIC测试同步进行,通过对比分析宏观尺度下的荷载-位移曲线( $P-\Delta$ )和细观尺度下的水平应变-时间( $\epsilon_x-t$ )曲线,可以从宏观与细观相结合的角度得到沥青混合料复合小梁的开裂特性,结果如图3所示.

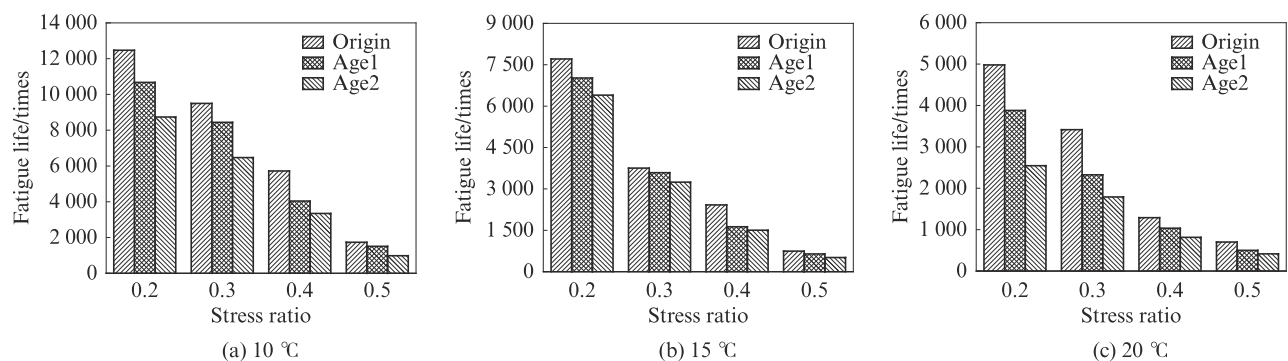


图1 不同试验温度、应力比和老化程度条件下复合小梁的疲劳寿命

Fig. 1 Fatigue lives of composite small beams under various temperatures, stress ratios and degrees of aging

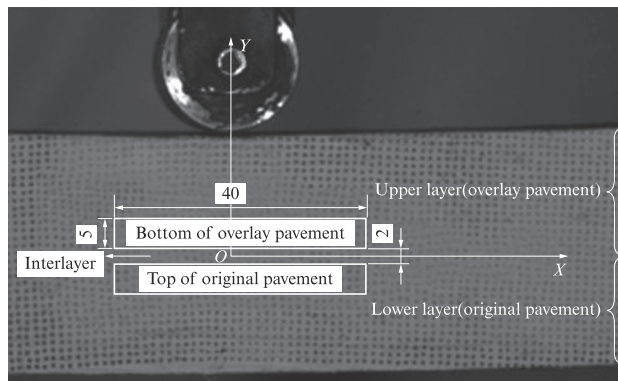
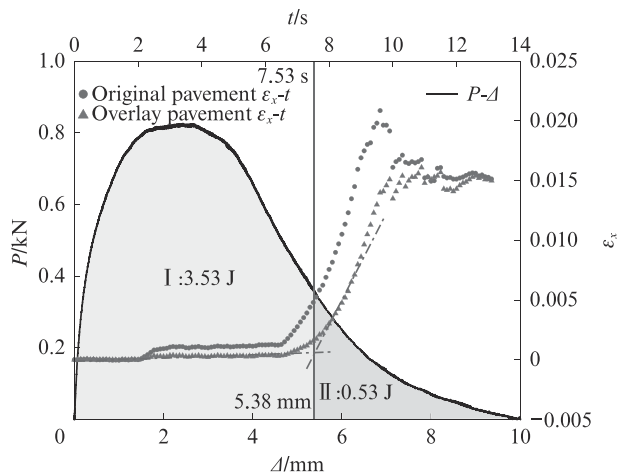


图2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation area(size: mm)

由图3可见:开始加载后,施加于复合小梁上的荷载水平迅速增加并达到峰值,随后缓慢下降;当加载到7.53 s(竖向位移为5.38 mm)时,加铺层底部的 $\epsilon_x-t$ 曲线开始突变,水平应变快速增加,此时下层材料中的裂纹尖端穿过层间进入上层材料;以7.53 s为分界点,将 $P-\Delta$ 曲线分为区域I与区域II两部分,分别主要由下层材料(原路面)和上层材料(加铺层)抵抗荷载,其复合小梁的断裂功分别为3.53、0.53 J,占总断裂功的87%和13%;通过分析断裂功水平可见,下

图3 复合小梁的 $P-\Delta$ 曲线和 $\epsilon_x-t$ 曲线Fig. 3  $P-\Delta$  and  $\epsilon_x-t$  curves of composite small beams

层材料为主要的抵抗荷载部分,加铺层主要起到恢复路面功能的作用,对路面承载能力的提升十分有限。

根据图3所示的 $P-\Delta$ 曲线及 $\epsilon_x-t$ 曲线,选择初始阶段(0.20 s)、峰值荷载阶段(3.72 s)、加铺层底水平应变突变阶段(7.53 s)和整体破坏阶段(13.00 s)的水平应变特征云图进行分析,结果如图4所示。

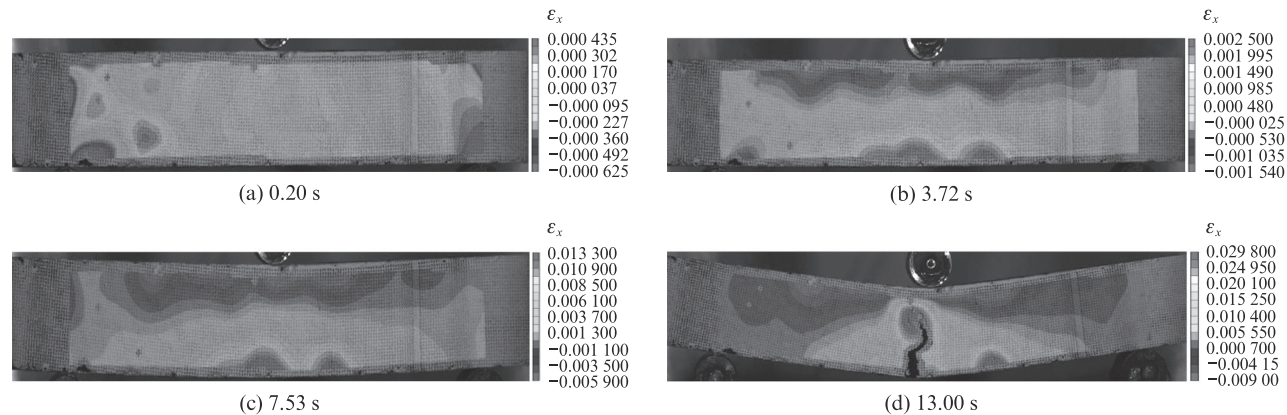


图4 复合小梁弯曲破坏水平应变特征云图

Fig. 4 Characteristic cloud diagrams of bending failure horizontal strain of composite small beams

由图4可见:加载初期(0.20 s)复合小梁的水平应变很小,并且分布不均匀,跨中没有出现应变集中区域;当荷载达到峰值时(3.72 s),此时应变集中区域位于复合小梁梁底,复合小梁达到承载极限,若进一步施加竖向位移则梁底将出现裂纹,荷载水平减小;随着裂纹的发展,水平应变集中区域由下向上扩展,水平应变由小变大;当裂纹尖端穿过层间进入加铺层材料时,加铺层底部的水平应变曲线迎来拐点,此时的复合小梁水平应变特征云图如图4(c)所示,加铺层底部的水平应变明显增加,且复合小梁挠度明显,最后达到图4(d)所示的整体破坏阶段。

### 3.2 复合小梁弯曲疲劳微观分析

复合小梁的弯曲疲劳开裂过程与普通小梁相似,大致可分为3个阶段,即损伤初始阶段、损伤发展阶段和损伤破坏阶段,选择每个阶段具有代表性的水平应变特征云图进行分析,结果如图5所示。

由图5可见:在加载前期的损伤初始阶段,试件内部存在集料重新排列与空隙的变化,试件表面的水平应变杂乱无章;继续加载,试件内部变化趋于平稳,水平应变集中于梁底并不断累积,试件进入如图5(b)所示的损伤发展阶段;随着损伤的持续进行,微观损伤裂纹发展为宏观裂缝,试件进入如图5(c)所

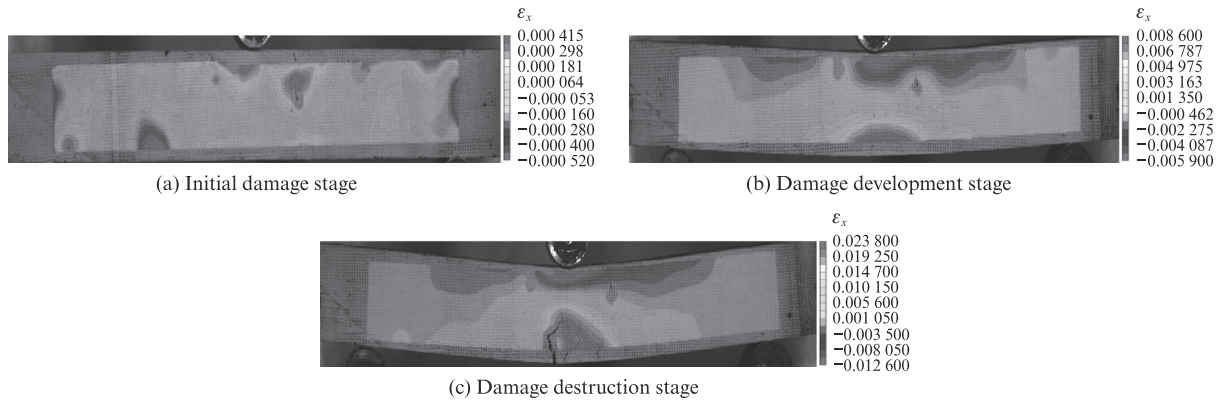


图5 复合小梁弯曲疲劳水平应变特征云图

Fig. 5 Characteristic cloud diagrams of bending fatigue horizontal strain of composite small beams

示的失稳破坏阶段。

选择应变波动量作为损伤因子<sup>[17]</sup>,可定量分析上、下层材料在循环荷载作用下的损伤情况.损伤因子的计算公式见式(1)和式(2).

$$D(\epsilon_x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon^i - \bar{\epsilon})^2} \quad (1)$$

$$D' = \frac{D(\epsilon_x)}{D_{\max}} \quad (2)$$

式中: $D'$ 为损伤因子; $\epsilon^i$ 为区域内第*i*点的水平应变; $\bar{\epsilon}$ 为区域内水平应变的平均值; $n$ 为数据点个数; $D(\epsilon_x)$ 为应变波动量; $D_{\max}$ 为 $D(\epsilon_x)$ 的最大值.

图6为复合小梁上、下层材料在循环加载过程中的水平应变演化特征.由图6可见:循环加载次数0~100、0~136次时分别为下层材料和上层材料的损伤初始阶段,此时水平应变迅速变化,下层材料受拉,水平应变为正,上层材料受压,水平应变为负;随着循环加载次数至9 200、10 389次时,下层材料和上层材料的水平应变经过第1阶段的剧烈变化后进入第2阶段的平稳累积阶段,即损伤发展阶段,当循环加载次数为3 470次时,上层材料的水平应变开始由负值

变为正值,完成了从受压到受拉的转变,这是因为随着复合小梁损伤程度的加深,水平受拉的应变集中区域逐渐上移,加铺层底部由受压区变为受拉区;当循环加载次数超过9 200、10 389次时,微裂纹经过第2阶段的累积已经发展为宏观裂缝,裂缝由下层材料顶部向上发展,穿过层间,进入上层材料,原路面与加铺层先后进入第3阶段,即损伤破坏阶段.

图7为复合小梁上、下层材料在循环加载过程中的损伤因子演化特征.由图7可见:损伤因子随加载次数的演化曲线与图6相似,也呈3阶段变化;循环加载次数0~46次时为第1阶段,此时试件在荷载的作用下发生变形,由于内部存在集料重排与空隙的变化,水平应变波动较大,损伤因子迅速增加,与图5(a)所示的水平应变特征云图表现一致;随后混合料内部结构趋于稳定,试件进入第2阶段,即损伤发展阶段,此时损伤因子平稳增长,且上层材料的损伤因子比下层材料高,这与图6中该阶段加铺层底部水平应变由负到正、发生由压到拉的转变、各点的应变离散性变大相关;循环加载9 118次后,下层材料出现宏观裂缝,且随着应变的增加迅速增长,损伤因子快速增加并超

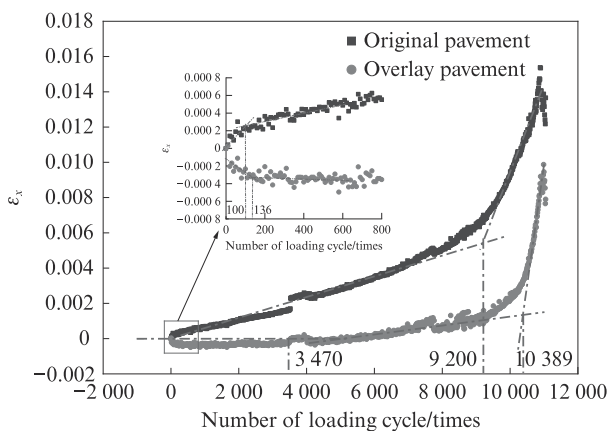


图6 水平应变演化特征

Fig. 6 Evolution characteristics of horizontal strain

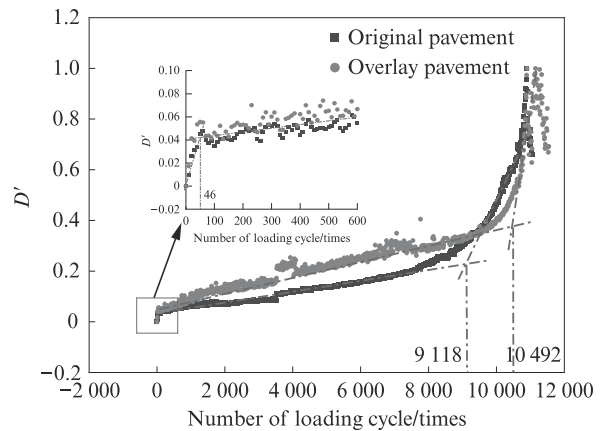


图7 损伤因子演化特征

Fig. 7 Evolution characteristics of damage factor

过上层材料,早于加铺层进入第3阶段,即损伤破坏阶段;再次加载,至10 492次后,宏观裂缝从下层发展到上层,上层损伤因子陡增,进入损伤破坏阶段。

## 4 结论

(1)在原路面上加铺沥青混合料,制备复合小梁,结合弯曲疲劳试验,发现温度与应力比是影响其疲劳寿命的主要因素。

(2)通过断裂功定量分析原路面与加铺层的差异,发现原路面为主要抵抗荷载的部分,加铺层则主要起到恢复路面功能的作用。

(3)沥青混合料复合小梁的疲劳开裂过程大致可分为3个阶段,即损伤初始阶段、损伤发展阶段与损伤破坏阶段。

(4)原路面的损伤发展阶段为抵抗疲劳荷载的主要阶段,当原路面由损伤发展阶段进入损伤破坏阶段时,复合小梁整体开始加速破坏。

## 参考文献:

- [1] 王朝辉. 沥青路面加铺技术研究[D]. 西安:长安大学, 2008.  
WANG Chaohui. Study on the overlay technique of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [2] OSHONE M, DAVE E V, SIAS J E. Asphalt mix fracture energy based reflective cracking performance criteria for overlay mix selection and design for pavements in cold climates [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211:1025-1033.
- [3] YILDIRIM Y, SAYGILI G. Pavement smoothness of asphalt concrete overlays [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(1):73-78.
- [4] LING J M, WEI F L, GAO J H, et al. New test method for measuring reflective cracking in hot-mix asphalt overlay pavements [J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(6):327-336.
- [5] 杜健欢, 艾长发, 黄超, 等. 界面水对沥青复合小梁疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技, 2019, 36(3):49-54.  
DU Jianhuan, AI Changfa, HUANG Chao, et al. Influence of interfacial water on fatigue performance of composite asphalt beam [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3):49-54. (in Chinese)
- [6] 杜健欢, 黄超, 邵珠涛, 等. 含层间界面的复合小梁疲劳性能影响因素的交互作用[J]. 公路, 2017, 62(7):1-7.  
DU Jianhuan, HUANG Chao, SHAO Zhutao, et al. Study of influential factors on fatigue performance of composite asphalt mixture beams with bonded interface[J]. Highway, 2017, 62(7):1-7. (in Chinese)
- [7] 艾长发, 成猛, 杨涛, 等. 含层间界面的沥青混合料复合小梁弯曲疲劳试验[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12):27-31, 38.  
AI Changfa, CHENG Meng, YANG Tao, et al. Flexural fatigue test on beams of asphalt mixture involving inter-surface[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12):27-31, 38. (in Chinese)
- [8] 闫景晨, 李瀚翔. 盐冻融和重复荷载作用下沥青混凝土开裂的细观分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):774-780.  
YAN Jingchen, LI Hanxiang. Mesoscopic analysis on cracking of asphalt concrete under repeated load and salt freeze-thaw action [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):774-780. (in Chinese)
- [9] LI C, WANG L, WANG X X. Crack and crack growth behavior analysis of asphalt mixtures based on the digital speckle correlation method[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147:227-238.
- [10] JIANG J W, NI F J, WU F, et al. Evaluation of the healing potential of asphalt mixtures based on a modified semi-circular bending test[J]. Construction and Building Materials, 2019, 196:284-294.
- [11] HILL B, BUTTLAR W G. Evaluation of the low temperature properties of asphalt mixtures using a digital image correlation approach[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 45(6):1904-1919.
- [12] 谈至明, 叶新华. 沥青面层的疲劳等效温度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2):197-202.  
TAN Zhiming, YU Xinhua. Fatigue equivalent temperature for asphalt pavements [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2):197-202. (in Chinese)
- [13] 中国公路学报编辑部. 中国路面工程学术研究成果综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):1-66.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research·2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10):1-66. (in Chinese)
- [14] A-KHATEEB G G, GHUZLAN K A. The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59:254-261.
- [15] ABU AL-RUB R K, DARABI M K, KIM S M, et al. Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging-susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41:439-454.
- [16] 崔世超, 王岚. 紫外老化对温拌胶粉改性沥青砂浆开裂特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):285-293.  
CUI Shichao, WANG Lan. Effect of ultraviolet aging on cracking characteristics of warm mix crumb rubber modified asphalt mortar [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):285-293. (in Chinese)
- [17] 牛冬瑜, 谢希望, 牛艳辉, 等. 粗集料接触参数对沥青混合料损伤演化的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):201-209.  
NIU Dongyu, XIE Xiwang, NIU Yanhui, et al. Influence of contact parameters of coarse aggregate on damage evolution of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10):201-209. (in Chinese)