



考虑加载次序影响的沥青非线性疲劳损伤累积研究

房辰泽 冷真 郭乃胜 李辉 蒋继望 陆国阳 王昊鹏

INVESTIGATING NONLINEAR FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF ASPHALT BINDERS CONSIDERING LOADING SEQUENCE EFFECT

FANG Chen-ze, LENG Zhen, GUO Nai-sheng, LI Hui, JIANG Ji-wang, LU Guo-yang, WANG Hao-peng 在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0392

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于劲度模量分析的橡胶沥青混合料疲劳寿命研究

RESEARCH ON FATIGUE LIFE OF RUBBER ASPHALT MIXTURE BASED ON STIFFNESS MODULUS 工程力学. 2020, 37(4): 196–204 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000–4750.2019.05.0274

含多处损伤宽板螺接搭接件疲劳寿命研究

STUDY ON FATIGUE LIFE OF WIDE BOLTED LAP JOINT WITH MULTIPLE SITE DAMAGE 工程力学. 2017, 34(6): 217–225 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000–4750.2015.12.1027

TA17合金薄片材料毫小试样疲劳性能研究

STUDY ON FATIGUE PROPERTIES OF TA17 ALLOY SLICE BY MILLIMETER-SIZED SPECIMEN 工程力学. 2018, 35(11): 206-215 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0607

基于统计能量理论的飞行器壁板高频声振疲劳寿命预报及参数设计

SEA–BASED FATIGUE LIFE ESTIMATION ALGORITHM AND PARAMETERS DESIGN FOR VEHICLE–PLATES EXCITED BY HIGH FREQUENCY FLUCTUATIONS

工程力学. 2019, 36(9): 230-236,256 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.08.0432

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

PARTICLE BOND-DEGRADATION MODEL FOR CUMULATIVE DAMAGE ANALYSIS OF CONCRETE UNDER CYCLIC LOADING 工程力学. 2021, 38(S): 100-109 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.S018

高温后高强混凝土受压疲劳性能研究

RESEARCH ON THE COMPRESSIVE FATIGUE PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE AFTER HIGH TEMPERATURE 工程力学. 2018, 35(8): 201–207,229 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000–4750.2017.04.0316





扫码关注微信公众号,获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2024)05-0068-09

考虑加载次序影响的沥青非线性疲劳损伤累积研究

房辰泽1.2,冷 真2,郭乃胜1,李 辉2,蒋继望2,陆国阳2,王昊鹏3

(1. 大连海事大学交通运输工程学院,辽宁,大连116026; 2. 香港理工大学土木及环境工程学系,香港,九龙 999077;3. 诺丁汉大学诺丁汉交通工程中心,英国,诺丁汉 NG7 2RD)

摘 要:变幅加载下沥青的疲劳损伤累积具有明显的非线性特征,传统的 Miner's 线性疲劳损伤累积准则无法 表征不同变幅加载次序下沥青的非线性疲劳损伤累积 (NLFDA)。该研究旨在建立考虑加载次序影响的 NLFDA 模型,准确表征加载次序对沥青疲劳损伤累积的影响。通过开展应力控制的沥青恒幅加载疲劳试验,采用耗散 伪应变能 (DPSE) 表征沥青疲劳损伤,分析恒幅加载下沥青的疲劳损伤累积规律;采用低-高和高-低两种加载次 序,开展应力控制的沥青变幅加载疲劳试验,分析变幅加载下沥青的疲劳损伤累积规律;基于损伤等效准则, 建立考虑加载次序影响的 NLFDA 模型,分析加载次序对疲劳损伤累积的影响。结果表明:应力控制模式下的 沥青疲劳损伤,呈先缓慢后急剧的非线性增加演化趋势;恒幅加载下沥青疲劳损伤服从 Miner's 准则发生线性 累积,且累积寿命分数等于 1;变幅加载下沥青疲劳损伤不服从 Miner's 准则而发生非线性累积。低-高和高-低 变幅加载次序下,沥青累积疲劳寿命随一级寿命分数的增大而分别增加和减小,累积寿命分数分别大于 1 和小 于 1;建立的 NLFDA 模型可克服 Miner's 准则缺陷,并较为准确地表征加载次序对沥青疲劳损伤累积的影响。 关键词:道路工程;沥青材料;非线性疲劳损伤累积;加载次序;耗散伪应变能;疲劳寿命 中图分类号:U411.1 文献标志码:A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0392

INVESTIGATING NONLINEAR FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF ASPHALT BINDERS CONSIDERING LOADING SEQUENCE EFFECT

FANG Chen-ze^{1,2}, LENG Zhen², GUO Nai-sheng¹, LI Hui², JIANG Ji-wang², LU Guo-yang², WANG Hao-peng³

Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;
 Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong 999077, China;
 Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK)

Abstract: The fatigue damage accumulation of asphalt materials under variable amplitude loading exhibits an obvious nonlinear characteristic. The traditional Miner's linear fatigue damage accumulation rule fails to characterize the nonlinear fatigue damage accumulation (NLFDA) of the asphalt binders under different variable amplitude loading sequences. This study aims to develop an NLFDA model considering the loading sequence effect for accurately characterizing the effect of different loading sequences on the fatigue damage accumulation of asphalt binders. The fatigue damage of asphalt binders was characterized using dissipated pseudo strain energy (DPSE), and the fatigue damage accumulation laws of the asphalt binders under constant amplitude loading were analyzed by carrying out the stress-controlled constant amplitude fatigue tests of asphalt binders. The fatigue

收稿日期: 2022-05-04; 修改日期: 2022-08-18

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52108421);国家自然科学基金项目(51308084);辽宁省自然科学基金项目(2018010659-301).

通信作者: 郭乃胜(1978-), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士, 博导, 主要从事道路工程研究(E-mail: naishengguo@126.com).

作者简介: 房辰泽 (1994-), 男, 河南新乡人, 博士生, 主要从事道路工程研究 (E-mail: fangchenze@126.com);

冷 真 (1978-), 男, 江苏武进人, 副教授, 博士, 博导, 主要从道路工程研究 (E-mail: zhen.leng@polyu.edu.hk);

李 辉 (1994-), 男, 江西九江人, 博士, 主要从事道路工程研究 (E-mail: huili94@zju.edu.cn);

蒋继望 (1992-), 男, 江苏洪泽人, 博士, 主要从事道路工程研究 (E-mail: jiwang.jiang@polyu.edu.hk);

陆国阳 (1991-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事道路工程研究 (E-mail: guoyang.lu@polyu.edu.hk); 王昊鹏 (1991-), 男, 江苏淮安人, 研究员, 博士, 主要从事道路工程研究 (E-mail: haopeng.wang@nottingham.ac.uk).

damage accumulation laws of the asphalt binders under variable amplitude loading were analyzed by carrying out the stress-controlled variable amplitude fatigue tests of asphalt binders under the loading sequences of low-high and high-low. The NLFDA model considering the loading sequence effect was developed using the damage equivalent criterion to investigate the effect of loading sequence on the fatigue damage accumulation. This study concludes that the fatigue damage of the asphalt binders under stress-controlled model exhibits an nonlinear evolution trend, which increase slowly initially and then increase sharply. The fatigue damage of asphalt binders under constant amplitude loading accumulates linearly obeying the Miner's rule, and the cumulative fatigue life fractions are equal to one. The fatigue damage of asphalt binders under variable amplitude loading does not obey the Miner's rule and accumulates nonlinearly. The accumulative fatigue life of asphalt binders under the variable amplitude loading sequences of low-high and high-low increases and decreases with the increasing first life fraction, respectively. The corresponding cumulative fatigue life fractions are greater than one and less than one, respectively. The developed NLFDA model can address the defects of Miner's rule and can effectively characterize the effect of variable amplitude loading sequence on the fatigue damage accumulation of the asphalt binders.

Key words: road engineering; asphalt binder; nonlinear fatigue damage accumulation; loading sequence; dissipated pseudo strain energy; fatigue life

沥青路面的疲劳破坏是道路病害的主要形式 之一,准确揭示路面材料的疲劳损伤累积规律, 对提升路面的使用性能及延长路面疲劳寿命有着 重要的科学意义^[1-3]。通常,研究学者通过将不同 的车辆荷载转化为等幅循环荷载,依据 Miner's 线 性损伤累积准则设计路面结构。Miner's 准则认 为,轴载谱中不同荷载幅值的排序对疲劳损伤累 积结果无影响,即疲劳损伤累积不依赖于加载次 序,且服从线性累积准则^[4]。然而,由于车辆的类 型、轴重、轴载等因素存在差异,导致路面结构 受到变幅荷载的循环作用。研究表明:不同荷载 幅值的重新排序会导致疲劳寿命发生变化,这种 现象成为加载次序效应,加载次序效应为导致疲 劳损伤发生非线性累积的重要诱因^[5]。

研究学者通过设计经典的变幅疲劳试验,研 究了加载次序对金属的疲劳损伤累积影响。MARCO 和 STARKEY^[6] 首次提出了非线性疲劳损伤累积理 论,之后,MANSON 和 HALFORD^[7] 将其应用于 金属裂纹长度演化研究,并建立了反映加载次序 的损伤模型。YE 和 WANG^[8] 从材料韧性衰减的角 度研究了金属材料的疲劳损伤,采用损伤等效准 则建立了非线性损伤累积模型。MESMACQUE等^[9] 通过采用损伤应力增量和极限应力定义损伤指 数,揭示了加载次序对疲劳损伤累积规律的影 响。KWOFIE 和 RAHBAR^[10] 通过引入疲劳驱动应 力表征了材料的疲劳损伤特性,之后,ZUO等^[11] 建立了基于驱动应力-荷载循环曲线的非线性损伤 模型。上述有关非线性损伤累积的研究主要集中 在金属领域,然而,对于在道路工程领域被广泛 采用的沥青材料,却鲜有相关报道。

研究学者通过室内试验,对变幅加载下沥青 混合料的疲劳损伤开展了初步研究。吴志勇[12]和 王凤维等[13] 通过开展变幅加载的四点弯曲疲劳试 验,分析了加载次序对沥青混合料劲度模量衰减 规律的影响。蒋继望等[14]开发变幅加载蠕变试 验,研究了加载次序对沥青混合料永久变形的影 响。上述研究表明加载次序会影响沥青混合料的 疲劳损伤,但其无法准确表征非线性疲劳损伤累 积过程对加载次序的依赖性。由于传统的 Miner's 线性损伤累积准则忽略了加载次序对损伤累积过 程中的重要影响,导致预测的疲劳性能存在理论 误差[15]。沥青混合料是由沥青、集料、空隙组成 的复合材料,沥青混合料结构内的沥青胶结料黏 聚疲劳破坏,是沥青混合料发生疲劳破坏的重要 诱因。同时,相关多尺度研究[4]表明,沥青与沥 青混合料材料性能存在较好的相关性,基于该相 关性建立相应力学模型,可实现由沥青到沥青混 合料的跨尺度材料性能预测。故建立沥青的非线 性损伤累积模型,能够克服 Miner's 准则缺陷,表 征加载次序对沥青疲劳损伤累积的影响,且对研 究沥青混合料的非线性疲劳损伤累积,具有一定 参考意义。因此,本研究以沥青材料为例,通过 开展变幅加载疲劳试验,建立考虑加载次序影响 的非线性损伤累积模型,分析疲劳损伤对加载次 序的依赖性。

1 材料与试验方法

本研究的试验均选择动态剪切流变仪 (DSR) 作为加载设备,选择的试验温度和频率分别为 20 ℃ 和 10 Hz^[16-18]。平行试验的次数为 3 次,试验结 果取平均值。

1.1 材料及试样制备

选用基质和 SBS 改性沥青作为试验材料,其 基本技术指标如表 1 所示。沥青试样为圆柱体形 状,其直径与平行板直径 8 mm 一致,试样垂直高 度为 2 mm。成型试样步骤为:1)使用剪刀剪取 3 g 左右的沥青放入勺子,启动电炉将其加热至液态 倒入的试模,之后将其放入冰箱冷却 10 min; 2)取出试样放置于下部平行板,启动修边间隙程 序使上部平行板下行移动至满足修边间隙 2050 µm; 3)使用加热刮刀紧贴平行板,将超出平行板的多 余沥青进行刮除;4)启动目标间隙程序使上部和 下部平行板间距满足目标间隙 2000 µm,并对试样 保温 10 min。

表 1 沥青技术指标 Table 1 Technical properties of asphalt binders

| | | | _ |
|--------------|--------------------------------|---------|------|
| 指标 | 试验条件 | SBS改性沥青 | 基质沥青 |
| 针入度/(0.1 mm) | 25 °C | 57.0 | 69 |
| 软化点/(℃) | — | 55.8 | 51 |
| 延度/cm | $5 \ ^{\circ}$ C, $5 \ cm/min$ | 33.4 | _ |
| 延度/cm | 15 °C, 5 cm/min | _ | 155 |

1.2 试验方法

1.2.1 线性振幅扫描试验

通过开展线性振幅扫描试验,确定无损阶段 和损伤阶段临界点对应的非线性黏弹性临界应力 $\sigma_{c}^{[16-18]}$ 。图 1(a) 为加载示意图,应变幅值范围选 用 0.001~0.3。根据剪切应变 ε、剪切模量 G*、相 位角 δ 的结果,得到如图1(b)所示的G^{*}和 δ 变化 曲线。图例中 VA 表示基质沥青, SBS 表示 SBS 改性沥青。由图 1(b) 可知,初期的应变幅值小于 非线性线性黏弹性临界应变 ε_{c} ,沥青试样处于无 损状态,期间 G^* 和 δ 保持线性稳定状态。之后, 随着应变幅值逐渐增大并超过 ε_{c} ,沥青试样出现 损伤,导致 G*快速衰减,δ先增大后减小。通过 分析 G^* 随 lg ε 变化曲线的曲率,确定 G^* 线性稳定 和快速衰减两个阶段的交点,分别取交点处的应 变幅值和应力幅值作为 ε_c 和 $\sigma_c^{[16-18]}$ 。如表2所 示,基质沥青和 SBS 改性沥青的 σ_{c} 结果分别为 90 kPa 和 105 kPa。



表 2 线性振幅扫描试验的非线性黏弹性临界应力 (σ_c) 结果 Table 2 Nonlinear viscoelastic critical stress (σ_c) of linear amplitude sweep test

| 沥青类别 | 非线性黏弹性临界应力 σ_{c} /kPa | 标准差 | 变异系数/(%) |
|---------|------------------------------|-----|----------|
| 基质沥青 | 90 | 5 | 5.556 |
| SBS改性沥青 | 105 | 3 | 2.857 |

1.2.2 恒幅加载疲劳试验

图 2(a) 为恒幅疲劳试验的加载示意图,应力幅 值分别选取低应力幅值 $\sigma_{\rm l}$ 和高应力幅值 $\sigma_{\rm h}$ 。依据 文献 [19],选取试验耗时适中的 $\sigma_{\rm l}$ 和 $\sigma_{\rm h}$,如表 3 所示。SBS 改性沥青对应的 $\sigma_{\rm l}$ 和 $\sigma_{\rm h}$ 分别为 200 kPa 和 240 kPa,基质改性沥青对应的 $\sigma_{\rm l}$ 和 $\sigma_{\rm h}$ 分别为 100 kPa 和 150 kPa。

试验步骤为: 1) 进行应力幅值和加载时间分 别为 σ_c 和 100 s 的无损恒幅疲劳试验,获取无损 阶段的无损剪切模量; 2) 在 300 s 的恢复期结束 后,进行应力幅值分别为 σ_1 和 σ_h 的有损恒幅疲劳 试验。 G^* 衰减曲线如图 2(b) 所示, G^* 随着损伤的 累积逐渐衰减至 0 Pa。

采用式 (1) 和式 (2) 计算耗散能相对变化率 RDEC, RDEC 曲线如图 3 所示,取 RDEC 曲线第 二个拐点处的循环记为疲劳寿命 N_f^[15]。由表 3 可 知,同种沥青材料的 N_f随应力幅值的增加而减 小,这是因为高应力幅值产生的能量耗散较大, 导致损伤快速演化至失效阈值。

$$W_i = \pi \tau_i \gamma_i \sin \delta_i \tag{1}$$

式中: W_i 为第i个循环的耗散能; τ_i 为第i个循环



表 3 恒幅加载疲劳试验的疲劳寿命结果 Table 3 Fatigue life of constant amplitude fatigue test

| 沥青类别 | 应力幅值 | 疲劳寿命 | 标准差 | 变异系数/(%) |
|---------|---------------------------------|--------|------|----------|
| 基质沥青 | $\sigma_{\rm l}$ (100 kPa) | 84 300 | 1000 | 1.186 |
| | $\sigma_{\rm h}(150~{\rm kPa})$ | 22 000 | 800 | 3.636 |
| SBS改性沥青 | $\sigma_{\rm l}(200~{\rm kPa})$ | 57 200 | 1100 | 1.923 |
| | $\sigma_{\rm h}(240~{\rm kPa})$ | 25 400 | 900 | 3.543 |



的剪切应力幅值; γ_i 为第*i*个循环的剪切应变幅 值;δ_i为第*i*个循环的相位角。

$$RDEC = \frac{|W_n - W_m|}{W_m(n-m)}$$
(2)

式中: *m* 和 *n* 分别为循环次数; *W_m* 和 *W_n* 分别为 第 *m* 和 *n* 个循环的耗散能。

1.2.3 变幅加载疲劳试验

通过开展变幅加载疲劳试验,确定变幅加载

下沥青的疲劳寿命。图 4 为两种加载次序对应的 加载示意图。试验步骤为:1)进行100 s 的无损恒 幅疲劳试验获取无损剪切模量;2)在300 s 的恢复 期结束后,采用一级应力幅值 σ_1 对同一试样进行 N_1 次加载, N_1/N_{f1} 分别取0.0、0.2、0.4、0.6、1.0; 3)采用二级应力幅值 σ_2 加载 N_2 次至疲劳破坏, 记录累积疲劳寿命 (N_1+N_2) 结果。表4为变幅加载 疲劳试验的疲劳寿命结果。 N_{f1} 和 N_{f2} 分别为幅值 σ_1 和 σ_2 对应的恒幅加载疲劳寿命。低-高 $(\sigma_1-\sigma_h)$ 加载次序的 σ_1 和 σ_2 分别为 σ_1 和 σ_h ,高-低 $\sigma_h-\sigma_1$ 加载次序的 σ_1 和 σ_2 分别为 σ_h 和 σ_1 。将 N_1/N_{f1} 、 N_2/N_{f2} 、 $N_1/N_{f1}+N_2/N_{f2}$ 分别定义为一级寿命分数、 二级寿命分数、累积寿命分数。



Fig. 4 Loading schematics of variable amplitude fatigue tests

2 恒幅加载下的沥青疲劳损伤累积 研究

2.1 基于耗散伪应变能的沥青疲劳损伤表征

循环剪切荷载作用下的沥青试样由未开裂沥 青和开裂沥青组成。如图 5 所示,实线圆柱表示 未开裂沥青,实线和虚线组成的圆环表示开裂沥 青。开裂沥青在循环剪切荷载作用下由边缘向中 心逐渐扩展^[16-18]。

沥青试样结构在 *t* 时刻、*r* 半径处的剪切应力 τ(*t*,*r*) 和剪切应变 γ(*t*,*r*) 分别如式 (3) 和式 (4) 所示:

$$\tau(t,r) = \tau_0(t_0,r)\sin(\omega t)$$
(3)

$$\gamma(t,r) = \gamma_0(t_0,r)\sin(\omega t - \delta) \tag{4}$$

式中: $\tau_0(t_0, r)$ 和 $\gamma_0(t_0, r)$ 分别为 $\tau(t, r)$ 和 $\gamma(t, r)$ 的响应幅值; t_0 为初始时刻; δ 为相位角。

由于沥青材料的黏弹滞后特性,使得循环荷载作用下沥青的卸载和加载路径不重叠,导致能量发生耗散^[20-22]。总耗散能由黏弹性耗散能

| | 0 | | | - | |
|---------|---|------------------|-------------|------|----------|
| 沥青类别 | 加载次序 | $N_1/N_{\rm fl}$ | $N_1 + N_2$ | 标准差 | 变异系数/(%) |
| 基质沥青 | $\sigma_{ m l}$ - $\sigma_{ m h}$ | 0.0 | 22 000 | 800 | 3.636 |
| | | 0.2 | 35 290 | 950 | 2.692 |
| | | 0.4 | 53 450 | 1100 | 2.058 |
| | | 0.6 | 67 600 | 1400 | 2.071 |
| | | 1.0 | 84 300 | 1000 | 1.186 |
| | | 0.0 | 25 400 | 900 | 3.543 |
| | | 0.2 | 35 460 | 1290 | 3.638 |
| SBS改性沥青 | $\sigma_{ m l}$ - $\sigma_{ m h}$ | 0.4 | 41 130 | 1600 | 3.890 |
| | | 0.6 | 49 140 | 1400 | 2.849 |
| | | 1.0 | 57 200 | 1100 | 1.923 |
| | $\sigma_{ m h}$ - $\sigma_{ m l}$ | 0.0 | 84 300 | 1000 | 1.186 |
| | | 0.2 | 65 500 | 1500 | 2.290 |
| 基质沥青 | | 0.4 | 47 200 | 1900 | 4.025 |
| | | 0.6 | 42 800 | 1600 | 3.738 |
| | | 1.0 | 22 000 | 800 | 3.636 |
| SBS改性沥青 | $\sigma_{	extsf{h}} \sigma_{	extsf{l}}$ | 0.0 | 57 200 | 1100 | 1.923 |
| | | 0.2 | 43 000 | 950 | 2.209 |
| | | 0.4 | 36 400 | 1460 | 4.011 |
| | | 0.6 | 33 800 | 1620 | 4.793 |
| | | 1.0 | 25 400 | 900 | 3.543 |

表 4 变幅加载疲劳试验的疲劳寿命结果 Table 4 Fatigue life of variable amplitude fatigue test



DVSE 和 DPSE 两部分组成。其中, DVSE 对疲劳 损伤无贡献,疲劳损伤主要由 DPSE 产生^[16-18]。 为了剥离 DVSE 对疲劳的影响,采用如式 (5) 所示 的 Schapery 提出的弹性-黏弹性对应原理,得到剪 切伪应变 γ_{R} :

$$\gamma_{\rm R} = \frac{1}{G_{\rm R}} \int_0^t G(t - \psi) \frac{\mathrm{d}\gamma(\psi)}{\mathrm{d}\psi} \mathrm{d}\psi = \frac{\tau_{VE}(t)}{G_{\rm R}} \tag{5}$$

式中: ψ 为时间变量; $G_{\rm R}$ 为参考模量; $\gamma(t)$ 为剪 切应变; τ_{VE} 为黏弹性剪切应力。

采用式 (6) 确定单个循环内的 DPSE 密度:

DPSE
$$(t_0, r) = \int_{t_0}^{t_0 + 2R/W} \tau(t_0, r) \gamma_R(t_0, r) dt$$
 (6)

式中, DPSE(t_0 , r) 和 $\gamma_{R}(t_0, r)$ 分别为单个循环内 t_0

时刻、r半径处的耗散伪应变能密度和伪应变。

采用式 (7) 确定整个试样体积内累积的耗散伪 应变能 DPSE_c:

$$DPSE_{c} = \sum_{t=0}^{t_{N}} \iiint_{V} \left[\int_{t_{0}}^{t_{0}+2\pi/\omega} \tau(t_{0},r) d\gamma_{R}(t,r) \right] dV \quad (7)$$

式中: t_N为加载结束时刻; V为试样体积。

由于沥青的疲劳裂纹主要由 DPSE 的累积引起,因此采用第 N 个与第 N_f 个循环的 DPSE_c 比值 定义损伤变量,如式 (8) 所示:

$$D(N) = \frac{\text{DPSE}_{c, N}}{\text{DPSE}_{c, N_{f}}}$$
(8)

式中: *D*为损伤; DPSE_{c, N}和 DPSE_{c, N}f 分别为第 *N*个与第 *N*_f个循环的 DPSE_c。

根据式 (8) 可得到沥青的疲劳损伤曲线,如 图 6 所示,疲劳损伤呈先缓慢累积后急剧增加的 两阶段演化趋势。这是因为:起初的疲劳裂纹以 较慢的速率由边缘向中心逐渐扩展。之后,疲劳 裂纹不断快速扩展,导致未开裂沥青和开裂沥青 的体积分别快速地减小和增加。





2.2 恒幅加载下的沥青疲劳损伤累积分析

绘制恒幅加载下沥青的疲劳损伤累积路径示 意图,如图7所示。由图7可知,沥青在恒幅加 载下疲劳损伤累积路径可以描述为:*Oa*为恒幅荷 载作用*N*₁次的损伤累积路径,之后恒幅荷载作用 *N*₂次至疲劳失效的损伤累积路径为*ab*,则恒幅加 载下的损伤累积路径为*Oa-ab*。

由于恒幅加载过程中的荷载幅值保持不变,则完成 N₁ 次和 N₂ 次加载应力幅值对应的疲劳寿 命均为 N_f。相应地,将 N₁/N_f、N₂/N_f、N₁/N_f+N₂/N_f 分别定义为恒幅加载下的一级寿命分数、二级寿 命分数、累积寿命分数。恒幅加载下的寿命分数 结果如图 8 所示。由图 8 可知:随着一级寿命分数由 0 线性增加至 1,基质沥青和 SBS 改性沥青的二级寿命分数由 1 线性减小至 0。上述分析表明:恒幅加载下的沥青累积寿命分数不依赖于 N_1 和 N_2 ,且始终保持为 1 不变,这与 Miner's 线性损伤累积准则 $(N_1/N_f + N_2/N_f = 1) - \mathfrak{Y}^{[6-8]}$ 。







图 8 恒幅加载下的二级寿命分数

Fig. 8 Second life fractions under constant amplitude loading

3 考虑加载次序影响的沥青非线性 疲劳损伤累积研究

3.1 变幅加载下的沥青累积疲劳寿命分析

若不同加载次序下的沥青累积疲劳寿命相同,则表明沥青疲劳损伤不受加载次序影响,即 在变幅加载下发生线性累积。若不同加载次序下 的沥青累积疲劳寿命不同,则表明沥青疲劳损伤 依赖于加载次序,即在变幅加载下发生非线性累 积^[9-11,23]。沥青在不同加载次序下的累积疲劳寿 命结果如图 9 所示。如表 3 所示,SBS 改性沥青 对应的 $\sigma_{l}(200 \text{ kPa})$ 和 $\sigma_{h}(240 \text{ kPa})$,分别大于基 质改性沥青对应的 $\sigma_{l}(100 \text{ kPa})$ 和 $\sigma_{h}(150 \text{ kPa})$, 这导致图 9 中 SBS 改性沥青整体的疲劳寿命,低于基质沥青整体的疲劳寿命。



由图 9 可知,随着 $N_{\rm I}/N_{\rm fl}$ 的增大, $\sigma_{\rm I}$ - $\sigma_{\rm h}$ 和 $\sigma_{\rm h}$ - $\sigma_{\rm l}$ 加载次序下的累积疲劳寿命分别逐渐地增大和减小。这是因为:沥青的疲劳寿命与应力幅值负相关,对于 $\sigma_{\rm I}$ - $\sigma_{\rm h}$ 加载次序, $N_{\rm I}/N_{\rm fl}$ 愈大,代表低幅值应力的作用时间愈长,导致累积疲劳寿命愈大;同理, $\sigma_{\rm h}$ - $\sigma_{\rm I}$ 加载次序下的累积疲劳寿命随 $N_{\rm I}/N_{\rm fl}$ 的增大而减小。上述分析表明:不同的加载次序会对沥青累积疲劳寿命产生显著影响,沥青疲劳损伤在变幅加载下发生非线性累积。因此,应建立考虑加载次序影响的非线性损伤累积 NLFDA 模型,以表征疲劳损伤累积对加载次序的依赖性。

3.2 变幅加载下的沥青疲劳损伤累积分析

变幅加载下沥青的寿命分数结果如图 10 所示。由图 10(a) 和图 10(b) 可知:随着一级寿命分数由 0 增加至 1,二级寿命分数由 1 非线性减小 至 0。图 10(a) 和图 10(b) 中的虚线代表 Miner's 线性损伤累积准则, Miner's 准则虚线上的二级寿命

分数点代表累积寿命分数等于 1,虚线上侧和下侧 的数据点分别代表累积寿命分数大于 1 和小于 1。 由图 10(a) 和图 10(b) 可知: σ₁-σ_h和 σ_h-σ₁加载次 序的二级寿命分数点分别位于 Miner's准则虚线的 上侧和下侧,则两种次序的累积寿命分数大于 1 和小于 1,这与图 10(c) 和图 10(d) 统计的累积寿 命分数结果一致。上述分析表明:变幅加载下的 沥青疲劳损伤不服从 Miner's 线性损伤累积准则, 而发生非线性累积^[6-8]。

绘制变幅加载下沥青的疲劳损伤累积路径示 意图,如图 11 所示,以此分析变幅加载下疲劳损 伤发生非线性累积的原因。图中曲线 OAC 和 OA'BC 分别为 σ_1 和 σ_h 作用下的恒幅疲劳损伤累积路径。 σι-σь加载次序下的损伤累积路径可以描述为: OA为 σ_1 作用 N_1 次的损伤累积路径,基于损伤等 效原则, σ_1 作用至 A 点产生的损伤等效为 σ_h 作用 至 A'点产生的损伤,之后的损伤累积路径为 A'B和BC,则该模式下的损伤累积路径为OA-A'B-BC。损伤等效过程导致 OA 和 A'B 在水平方向上 存在 A'A 个单位的重合, A'A 对应的寿命分数为 $\Delta N/N_{\rm f}$,则累积疲劳寿命分数等于 1+ $\Delta N/N_{\rm f}$,即大 于1。同理, $\sigma_{\rm h}$ - $\sigma_{\rm l}$ 加载次序下的损伤累积路径为 OA'-AC, 损伤等效过程导致, 损伤累积路径水平 方向上缺失了 A'A 个单位,则累积疲劳寿命分数 等于 1-ΔN/N_f, 即小于 1^[24]。

3.3 考虑加载次序影响的非线性疲劳损伤累积模型

CHABOCHE 等^[25] 通过不可逆的热力学理论 基础,建立了的具有物理解释的连续损伤力学模 型,研究表明,该模型能够准确地描述黏弹性材 料的损伤行为^[23],因此,选择该模型推导建立沥 青的 NLFDA模型。在 DSR 施加的振荡应力加载 下,CHABOCHE模型具有如下形式:

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}N} = \left[1 - (1-D)^{1+\beta}\right]^{\alpha} \left[\frac{\sigma}{M(1-D)}\right]^{\beta} \tag{9}$$

式中: β和 M 为与温度相关的模型参数; α 为依赖于温度和荷载幅值的模型参数; σ 为应力幅值。

由式 (9) 可得:

$$dD = [1 - (1 - D)^{1+\beta}]^{\alpha} \left[\frac{\sigma}{M(1 - D)} \right]^{\beta} dN$$
(10)

通过在 *D*∈[0,1] 与 *N*∈[0,*N*_f] 区间内对式 (10) 积分,得到疲劳寿命,如式 (11) 所示:

$$N_{\rm f} = \frac{1}{(1+\beta)(1-\alpha)} \left(\frac{\sigma}{M}\right)^{-\beta} \tag{11}$$

通过在 *D*∈[0,1) 与 *N*∈[0,*N*_f) 区间内对式 (10) 积分,得到:







图 11 变幅加载下的疲劳损伤累积路径示意图

Fig. 11 Schematic diagram of fatigue damage accumulation under variable amplitude loading

$$N = \frac{1}{(1+\beta)(1-\alpha)} \left[\frac{\sigma}{M_0} \right]^{-\beta} [1-(1-D)^{1+\beta}]^{1-\alpha}$$
(12)

式 (12) 除以式 (11),得到含有寿命分数 N/N_f的损伤变量 D^[23, 25-26]:

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_{\rm f}}\right)^{1/(1-\alpha)}\right]^{1/(1+\beta)}$$
(13)

恒幅加载下的沥青疲劳损伤演化速率与荷载 水平正相关,如式 (14) 所示, D可由荷载水平 σ 与寿命分数描述^[8-10]:

$$D = f(\sigma, N/N_{\rm f}) \tag{14}$$

基于损伤等效准则, σ_1 作用 N_1 次产生的损伤,可以等效为 σ_2 作用 N'_2 次产生的损伤^[23, 25 - 26]。则沥青在 σ_1 和 σ_2 下两级加载的损伤累积过程,等效为 σ_2 作用 N'_2+N_2 次的损伤累积过程,如式(15)所示:

$$D = f(\sigma_1, N_1/N_{f1}) + f(\sigma_2, N/N_{f2}) = f(\sigma_2, (N'_2 + N)/N_{f2})$$
(15)

式中: N₂为损伤等效循环,且满足N₂+N₂=N_{f2}。 将式(13)代入式(15),得到:

$$\int (13)^{1/(1-\alpha_1)} \frac{1}{1/(1-\alpha_1)} \frac{1}{1/(1-\beta)}$$

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N_1}{N_{f1}}\right)\right] = 1 - \left[1 - \left(\frac{N'_2}{N_{f2}}\right)^{1/(1-\alpha_2)}\right]^{1/(1+\beta)}$$
(16)

式中: α_1 和 α_2 分别为 σ_1 和 σ_2 对应的单级加载模型参数。

令 γ=(1-α₂)/(1-α₁),根据式 (16),则可得到考 虑加载次序影响的 NLFDA 模型,如式 (17) 所示:

$$\frac{N_2}{N_{f2}} = 1 - \left(\frac{N_1}{N_{f1}}\right)^{\gamma}$$
(17)

式中,γ为加载次序效应参数。

因为β是与温度相关的模型参数,α同时依赖 于温度和荷载幅值,由于试验温度保持不变,因 此,可以选用γ表征加载次序对材料疲劳损伤累 积的影响^[23,25-26]。当γ=1时,该模型退化为 Miner's 线性损伤累积模型,表示加载次序不影响疲劳损伤累积。

采用式(17) 拟合疲劳寿命分数结果,由图 10(a)~ 图 10(b)和表 5 可知,该模型可以较为准确地表征 沥青的 NLFDA 特性。 σ_{1} - σ_{h} 加载次序下的 γ 大于 1,损伤累积模型为"凸函数",表明加载次序效 应降低了疲劳损伤累积速率,则该次序下的二级 寿命分数点分布于 Miner's 准则 (γ =1) 虚线的上 侧,即累积寿命分数大于 1。 σ_{h} - σ_{1} 加载次序下的 γ 小于 1,损伤累积模型为"凹函数",表明加载 次序效应增加了疲劳损伤累积速率,则二级寿命 分数点分布于 Miner's 准则虚线的下侧,即累积寿 命分数小于 1^[23,25-27]。

表 5 NLFDA 模型匹配结果 Table 5 Matching results of the NLFDA model

| 沥青类型 | 加载模式 | 加载次序效应参数γ | 可决系数R ² |
|---------|-------------------------------------|-----------|--------------------|
| 基质沥青 | $\sigma_{ m l}$ - $\sigma_{ m h}$ | 3.776 | 0.993 |
| | $\sigma_{\rm h}$ - $\sigma_{\rm l}$ | 0.550 | 0.991 |
| SBS改性沥青 | $\sigma_{ m l}$ - $\sigma_{ m h}$ | 1.575 | 0.984 |
| | $\sigma_{ m h}$ - $\sigma_{ m l}$ | 0.566 | 0.992 |

值得注意的是,本研究基于两级变幅加载试 验建立的 NLFDA 模型,对研究其他加载工况的疲 劳损伤有一定借鉴意义。但实际沥青路面行车荷 载的幅值变化是随机的,应制定随机变幅加载下 的试验方案,为更加全面深刻地表征疲劳损伤的 非线性累积过程提供理论依据。

4 结论

通过开展恒幅和变幅加载疲劳试验,建立沥 青的 NLFDA 模型,分析了加载次序对沥青疲劳损 伤累积的影响。

(1)应力控制模式下,耗散伪应变能表征的沥 青疲劳损伤呈先缓慢后急剧的非线性增加演化趋势;

(2) 在恒幅加载下沥青疲劳损伤服从传统的 Miner's 线性疲劳损伤累积准则,且累积寿命分数 等于 1;

(3) 在变幅加载下沥青疲劳损伤发生非线性累积。σ₁-σ_h和 σ_h-σ₁变幅加载次序下,沥青累积寿
 命分数分别大于1和小于1;

(4) 建立的 NLFDA 模型,可克服 Miner's 准则无法表征疲劳损伤对加载次序依赖性的缺陷,并较为准确地表征不同加载次序对沥青疲劳损伤 累积的影响。

参考文献:

- FANG C Z, GUO N S, YOU Z P, et al. Investigating fatigue life prediction of rubber asphalt mixture based on damage evolution using residual strain analysis approach [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119476.
- [2] 房辰泽, 郭乃胜, 孙雅珍, 等. 基于劲度模量分析的橡胶 沥青混合料疲劳寿命研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 196-204.
 FANG Chenze, GUO Naisheng, SUN Yazhen, et al. Research on fatigue life of rubber asphalt mixture based on stiffness modulus [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 196-204. (in Chinese)
- [3] 房辰泽, 郭乃胜, 尤占平, 等. 基于能量耗散历史的沥青 混合料疲劳损伤特性研究[J]. 东南大学学报 (自然科学 版), 2021, 51(6): 1018-1024.
 FANG Chenze, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Fatigue damage characteristics for asphalt mixture based on energy dissipation history [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 1018-1024. (in Chinese)
- 1018 1024. (in Chinese)
 [4] 蒋继望. 多尺度视角下沥青混合料疲劳性能及细观结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
 JIANG Jiwang. Investigation of the fatigue property and internal structure of asphalt mixtures based on multiscale methods [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [5] XU S, ZHU S P, HAO Y Z, et al. Critical plane-based multiaxial fatigue life prediction of turbine disk alloys by refining normal stress sensitivity [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2018, 53(8): 719 – 729.
- [6] MARCO S M, STARKEY W L. A concept of fatigue damage [J]. Transactions of the ASME, 1954, 76(4): 627-632.
- [7] MANSON S S, HALFORD G R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage [R]. NASA Technical Memorandum 81517, Cleveland: Lewis Research Center, 1980: 49.
- [8] YE D Y, WANG Z L. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(8): 679-687.
- [9] MESMACQUE G, GARCIA S, AMROUCHE A, et al. Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(4): 461 – 467.
- [10] KWOFIE S, RAHBAR N. A fatigue driving stress approach to damage and life prediction under variable amplitude loading [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(3): 393 – 404.
- [11] ZUO F J, HUANG H Z, ZHU S P, et al. Fatigue life prediction under variable amplitude loading using a nonlinear damage accumulation model [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2015, 24(5): 767 – 784.
- [12] 吴志勇. 基于多级等幅荷载下的沥青混合料损伤累积和 沥青面层疲劳损伤破坏研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
 WU Zhiyong. Research on cumulative fatigue damage of asphalt mixture and asphalt layer based on multi-level amplitude loading [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] 王凤维, 解松芳. 多级等幅荷载下沥青路面疲劳破坏研究[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 267-272, 293.
 WANG Fengwei, XIE Songfang. Research on multive fatigue damage of asphalt pavement based on multi-level amplitude loading [J]. Highway Engineering, 2017, 42(5):

267 - 272, 293. (in Chinese)

- [14] JIANG J W, NI F J, GAO L, et al. Developing an optional multiple repeated load test to evaluate permanent deformation of asphalt mixtures based on axle load spectrum [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 254 – 263.
- [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(Suppl 1): 100-109. (in Chinese)
- [16] LI H, LUÓ X, ZHANG Y Q. Stochastic fatigue damage in viscoelastic materials using probabilistic pseudo Jintegral Paris' law [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 245: 107566.
- [17] LI H, LUO X, ZHANG Y Q. A kinetics-based model of fatigue crack growth rate in bituminous material [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 148: 106185.
- [18] 李辉, 罗雪, 张裕卿. 基于耗散伪应变能的沥青疲劳动 力学表征[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 115-124. LI Hui, LUO Xue, ZHANG Yuqing. Pseudo energybased kinetic characterization of fatigue in asphalt binders [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 115-124. (in Chinese)
- [19] SHI C G, CAI X, WANG T L, et al. Energy-based characterization of the fatigue crack density evolution of asphalt binders through controlled-stress fatigue testing [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 124275.
- [20] 孙雅珍, 房辰泽, 王金昌, 等. 基于耗散能相对变化率平 稳值的橡胶沥青混合料疲劳寿命预测方法[J]. 建筑材 料学报, 2019, 22(1): 108-112. SUN Yazhen, FANG Chenze, WANG Jinchang, et al. Method of fatigue life prediction for rubber asphalt mixture based on plateau value of dissipated energy ratio [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 108-112. (in Chinese)
- [21] SUN Y Z, FANG C Z, WANG J C, et al. Energy-based approach to predict fatigue life of asphalt mixture using three-point bending fatigue test [J]. Materials, 2018, 11(9): 1696.
- [22] SUN Y Z, FANG C Z, WANG J C, et al. Method of fatigue-life prediction for an asphalt mixture based on the plateau value of permanent deformation ratio [J]. Materials, 2018, 11(5): 722.
- [23] 关宏信. 沥青混合料粘弹性疲劳损伤模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
 GUAN Hongxin. A research on viscoelastic fatigue damage model of asphalt mixture [D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [24] ZHU S P, YUE P, CORREIA J, et al. Strain energy-based fatigue life prediction under variable amplitude loadings [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 66(2): 151-160.
- [25] CHABOCHE J L, LESNE P M. A non-linear continuous fatigue damage model [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 1988, 11(1): 1 – 17.
- [26] DATTOMA V, GIANCANE S, NOBILE R, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new nonlinear continuum damage mechanics model [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 89 – 95.
- [27] ZHU S P, LIU Y H, LIU Q, et al. Strain energy gradientbased LCF life prediction of turbine discs using critical distance concept [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 113: 33 – 42.