

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.002

# 基于耗散能的老化沥青疲劳寿命预估模型分析

朱洪洲<sup>1</sup>, 范世平<sup>2</sup>, 卢章天<sup>3</sup>, 袁海<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;  
3. 广西交通规划勘察设计研究院有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 为了研究老化沥青疲劳性能, 以70#基质沥青和SBS改性沥青作为研究对象, 以累积耗散能为评价指标, 研究了老化对沥青疲劳寿命的影响, 建立了老化沥青疲劳寿命预估方程, 分析了应力控制和应变控制加载模式下疲劳寿命预估方程的适用性。首先将70#基质沥青和SBS改性沥青进行旋转薄膜烘箱加热试验(RTFOT), 使沥青发生老化, 然后采用动态剪切流变仪在应力控制和应变控制加载模式下对不同老化程度的沥青进行时间扫描试验, 通过耗散能随加载次数变化关系确定沥青疲劳寿命。基于累积耗散能建立应力加载控制模式下沥青疲劳寿命预估方程, 并采用预估方程计算应变控制加载模式下的累积耗散能, 检验预估方程的适用性。结果表明: 累积耗散能随着荷载作用次数增加呈线性积累, 当累积超过沥青疲劳破坏阈值时, 发生疲劳破坏; 经RTFOT老化后的70#基质沥青和SBS改性沥青疲劳寿命与累积耗散能具有较好的双对数线性关系( $R > 0.8$ ); 当采用应力加载模式下获得的沥青疲劳寿命预估模型分析应变控制加载模式下沥青疲劳性能时, 70#基质沥青和SBS改性沥青累积耗散能计算值与实测值之间的误差大多在10%以内, 可认为基于累积耗散能建立的沥青疲劳寿命预估方程不受加载模式的影响。

**关键词:** 道路工程; 疲劳寿命; 动态剪切流变仪; 沥青; 耗散能

中图分类号: U416.217; U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)09-0008-06

## Analysis on Fatigue Life Predicted Model of Aged Asphalt Based on Dissipation Energy

ZHU Hong-zhou<sup>1</sup>, FAN Shi-ping<sup>2</sup>, LU Zhang-tian<sup>3</sup>, YUAN Hai<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guizhou Guiyang 550081;

3. The corporation of Guangxi Transportation Planning Survey & Design Institute, Nanning, Guangxi 530029)

**Abstract:** In order to study the fatigue performance of aged asphalt, taking base asphalt No. 70 and SBS modified asphalt as the research objects, and using the cumulative dissipation energy as the evaluation index, the influence of aging on fatigue life of asphalt is analysed, the prediction equation for fatigue life of aged asphalt is established, and the applicability of the prediction equation in stress control loading mode and strain control loading mode is analyzed respectively. First, the rolling thin film oven test (RTFOT) on base asphalt No. 70 and SBS modified asphalt is carried out for asphalt aging. Then, DSR is used to conduct the time-sweep test on the asphalt with different aging degrees in different loading modes. The fatigue life of the asphalt is obtained by the relationship between dissipation energy and loading times. The prediction equation for fatigue life of asphalt in stress control loading mode is established based on cumulative dissipation energy, and this prediction equation is used to calculate the cumulative dissipation energy in strain control loading mode to verify the applicability. The result indicates that (1) the cumulative dissipation energy increases

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808189); 重庆交通大学研究生科研创新项目(20160123)

作者简介: 朱洪洲(1976-), 男, 山东莱州人, 博士, 教授. (zhuhongzhouchina@cqjtu.edu.cn)

linearly with the increase of the loading times, and the asphalt is destroyed when the cumulative dissipation energy exceeds the asphalt fatigue failure threshold; (2) the fatigue lives of RTFOT aged base asphalt No. 70 and SBS modified asphalt have good double logarithmic linear relationship ( $R > 80\%$ ) with cumulative dissipation energy; (3) when using the fatigue life prediction model obtained in stress control loading mode to analyze the asphalt fatigue performance in the strain control loading mode, the error between the calculated and the measured values of the cumulative dissipation energy of both base asphalt No. 70 and SBS modified asphalt are less than 10%, so it can be considered that the asphalt fatigue life prediction equation based on cumulative dissipation energy is not affected by the loading mode.

**Key words:** road engineering; fatigue life; dynamic shear rheometer (DSR); asphalt; dissipation energy

## 0 引言

疲劳开裂已经成为沥青路面最主要破坏形式之一, 是沥青路面结构设计和建成养护中不可忽视的问题。沥青路面疲劳开裂主要由沥青混合料内部沥青胶浆产生疲劳损伤所致, 沥青的疲劳特性与沥青混合料的疲劳性能密切相关<sup>[1-3]</sup>。因此分析沥青疲劳特性是研究沥青混合料疲劳性能的基础。对沥青疲劳性能的研究, 目前尚未形成统一的研究方法和评价指标。文献[4]中提到采用动态剪切流变仪(DSR)的时间扫描试验, 通过应力或应变控制加载过程中复数剪切模量、相位角等的衰减表征沥青疲劳性能。孙艳娜等<sup>[5]</sup>对多种沥青进行 DSR 加载试验, 通过不同指标分析沥青疲劳寿命, 建议采用 50% 初始复数剪切模量对应的加载次数评价沥青混合料疲劳寿命。单丽岩<sup>[6]</sup>等采用 DSR 在不同控制模式下对沥青进行加载试验, 提出了沥青疲劳累积损伤的转换方程。此外, 沥青材料在实际应用中必然伴随沥青老化, 沥青的抗老化性能是影响沥青路面长期使用的主要因素<sup>[7-8]</sup>, 沥青老化后的疲劳性能也是亟待探讨的。

不同加载模式下, 沥青疲劳性能研究方法和评价指标不同, 但无论应力还是应变加载模式, 沥青疲劳破坏过程中均伴有能量耗散, 耗散能理论从能量角度出发, 可以形象地阐述沥青疲劳破坏的发展。Hopman<sup>[9]</sup>在应变加载模式下, 提出了能量比 (energy ratio,  $ER$ ) 来确定疲劳寿命, 这一参数被 Rowe<sup>[10]</sup>改进后用来评价沥青在应变控制和应力控制加载模式下的疲劳寿命, 但  $ER$  很难用数学的方法准确确定。文献[11]将这一参数改进为累积耗散能比 (dissipation energy ratio,  $DER$ ), 用来评价沥青在应变和应力加载模式下的疲劳寿命。Bonnetti<sup>[12]</sup>等基于  $DER$  的概念, 提出  $N_{p20}$  这一指标来评价沥青的疲劳寿命。国内很多研究人员均用  $DER$  评价沥青材料

的疲劳性能<sup>[13-15]</sup>。此外, 文献[16-18]中基于耗散能的改变量, 对耗散能比值进行了改进, 提出了耗散能比 (ratio of dissipation energy change,  $RDEC$ ) 评价指标, 并发现其与  $N_{150}$  具有很好的相关性。现有研究表明采用耗散能变化可以较好地表征沥青疲劳破坏过程, 但基于耗散能建立的老化沥青疲劳寿命预估方程在不同加载模式下的适用性还有待商榷, 鉴于此, 本研究在应力控制和应变控制加载模式下对经延时 RTFOT 试验老化的 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青进行 DSR Time-sweep 试验, 通过耗散能变化确定沥青疲劳寿命, 建立在应力控制模式下基于耗散能的疲劳寿命预估方程, 采用该方程计算应变控制加载模式下所获得疲劳寿命对应的耗散能, 对比计算值与实测值产生的误差, 分析基于耗散能获得的疲劳方程的适用性, 以期建立沥青混合料疲劳寿命预估模型提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

采用中石化 70# 道路石油沥青和壳牌 SBS 改性沥青, 沥青常规指标测试结果如表 1、表 2 所示, 均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 要求。

表 1 70# 沥青的基本指标

Tab. 1 Basic properties of base asphalt No. 70

| 参数                               | 测量值  | 规范要求        | 试验方法  |
|----------------------------------|------|-------------|-------|
| 针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm) | 68   | 60 ~ 80     | T0604 |
| 针入度指数                            | -0.8 | -1.5 ~ +1.0 |       |
| 软化点/°C                           | 49   | ≥43         | T0606 |
| 延度 (15 °C)/cm                    | >100 | ≥100        | T0605 |
| RTFOT 质量损失/%                     | 0.2  | ≤ ±0.8      | T0610 |
| 163 °C, 残留针入度比/%                 | 64   | ≥61         | T0604 |
| 85 min 残留延度 (15 °C)/cm           | 35   | ≥15         | T0605 |

表2 SBS改性沥青的基本指标

Tab.2 Basic properties of SBS modified asphalt

| 参数                               | 测量值 | 规范要求    | 试验方法  |
|----------------------------------|-----|---------|-------|
| 针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm) | 57  | 40 ~ 60 | T0604 |
| 针入度指数                            | 1.3 | >0      |       |
| 软化点/°C                           | 73  | ≥60     | T0606 |
| 延度 (5 °C)/cm                     | 39  | ≥20     | T0605 |
| RTFOT 质量损失/%                     | 0.1 | ≤±1.0   | T0610 |
| 163 °C, 残留针入度比/%                 | 81  | ≥65     | T0604 |
| 85 min 残留延度 (15 °C)/cm           | 18  | ≥15     | T0605 |

## 1.2 试验方案

旋转薄膜烘箱加热试验 (RTFOT) 能模拟沥青路面短期老化过程, 可以较为精确地控制试验条件, 是评价沥青老化特性的常用方法<sup>[19]</sup>。因此, 本研究采用延时 RTFOT 试验对 70<sup>#</sup>基质沥青和 SBS 改性沥青进行老化。加载设备采用美国 TA 公司研发的动态剪切流变仪 (DSR, AR1500EX), 平行板夹具直径为 8 mm、间距 2 mm, 试验方案和参数如表 3 所示。

表3 试验方案

Tab.3 Test scheme

| 沥青种类                 | RTFOT<br>(163 °C)/min | 应力/MPa           | 应变/%      | 频率/<br>Hz | 温度/<br>°C |
|----------------------|-----------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| 70 <sup>#</sup> 基质沥青 | 0, 85, 255            | 0.05, 0.10, 0.15 | 5, 8, 10  | 10        | 30        |
| SBS 改性沥青             | 0, 85, 255            | 0.10, 0.15, 0.20 | 8, 10, 12 |           |           |

## 1.3 疲劳分析方法

研究沥青疲劳损伤累积, 通常采用 Miner 线性疲劳损伤准则<sup>[18]</sup>, 该准则假定沥青材料在疲劳试验过程中损伤累积为线性累积, 即试件在某一给定循环荷载作用下, 其产生的损伤与荷载循环次数呈线性累积关系, 当损伤累积达到损伤阈值 (损伤破坏临界值) 时, 试件发生破坏。该准则认为一个荷载循环所引起的损伤为  $1/N_i$  ( $N_i$  为该等幅荷载下试件破坏所需承受的荷载最大循环次数), 某一荷载周期内重复作用  $n_i$  次的累积损伤 ( $D_i$ ) 计算如式 (1)<sup>[18]</sup> 所示:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

在整个加载周期内 (总周期次数为  $m$ ), 当损伤累积之和 ( $D$ ) 达到某一临界值 (通常取为 1), 即满足式 (2)<sup>[18]</sup> 时, 即认为沥青发生疲劳破坏。

$$D = \sum_{i=1}^m D_i \geq 1 \quad (2)$$

沥青在疲劳加载过程中, 单位荷载周期内耗散

能变化率和加载过程中累积耗散能比计算公式如式 (3) ~ (6)<sup>[11,16]</sup> 所示。

$$w_i = \pi \varepsilon \sigma \sin \delta = \pi \varepsilon^2 G^* \sin \delta \quad (3)$$

$$DR = \frac{w_i - w_{i-1}}{w_{i-1}} \quad (4)$$

$$ADE = \sum_{i=1}^{i=n} w_i \quad (5)$$

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} w_i}{w_n} \quad (6)$$

式中,  $w_n$ ,  $w_i$  和  $w_{i-1}$  分别为第  $n$  次、 $i$  次和  $i-1$  次荷载周期内耗散能量;  $\varepsilon$  为第  $i$  次荷载周期内应变;  $\sigma$  为第  $i$  次荷载周期内应力;  $\delta$  为相位角;  $G^*$  为复数剪切模量;  $DR$  为单位荷载周期内耗散能变化率;  $ADE$  为前  $n$  次荷载周期内累积耗散能;  $DER$  为累积耗散能比, 表示前  $n$  次荷载周期内累积耗散能与第  $n$  次荷载周期内耗散能之比。

## 2 应力加载试验结果分析

### 2.1 基于耗散能的疲劳寿命

根据试验结果计算 70<sup>#</sup>基质沥青和 SBS 改性沥青耗散能变化率 ( $DR$ ) 和累积耗散能 ( $ADE$ ) 随荷载作用次数 ( $N$ ) 的变化关系。各应力条件下所获得的  $DR-N$  曲线和  $ADE-N$  曲线变化趋势相同, 以应力为 0.10 MPa 试验结果为例, 如图 1、图 2 所示。

由图 1 可以看出, 通过  $DR-N$  曲线可将 70<sup>#</sup>基质沥青和 SBS 改性沥青的疲劳加载过程分为 3 个阶段, 荷载刚开始作用时, 沥青试样对荷载比较敏感,  $DR$  值有一定变化, 该阶段为荷载适应阶段; 随着荷载作用次数增加, 沥青试样对荷载敏感性降低, 沥青未发生疲劳损伤或损伤小到可以忽略, 单位周期内耗散能变化趋于稳定,  $DR$  值趋于 0, 该过程是沥青内部损伤不断累积过程; 当损伤累积到一定值时, 沥青发生加速破坏, 单位荷载作用周期内耗散能显著增大,  $DR$  值激增,  $DR-N$  曲线出现显著拐点, 这是沥青加速破坏阶段。根据  $DR-N$  曲线, 将曲线激增点对应的荷载作用次数作为沥青疲劳寿命, 用  $N_{DR}$  表示。

由图 2 可知, 70<sup>#</sup>基质沥青和 SBS 改性沥青累积耗散能变化趋势相同, 均符合 Miner 线性疲劳损伤准则。累积耗散能随荷载周期近似成线性增长, 当达到沥青疲劳损伤阈值后, 累积耗散能显著增加, 偏离线性增长范围, 沥青发生破坏。

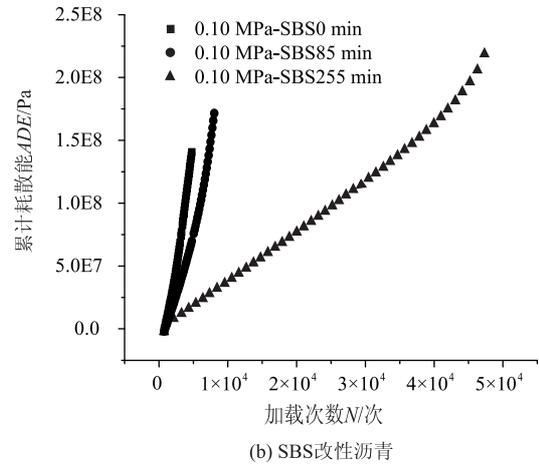
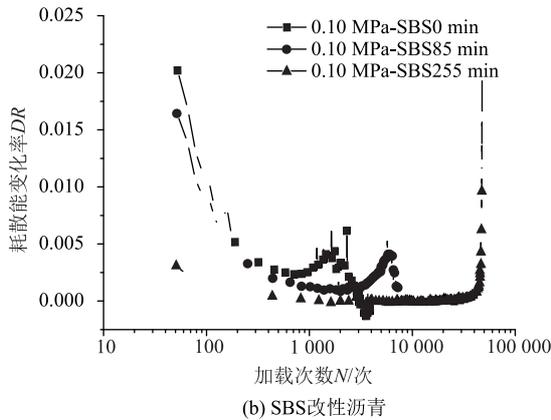
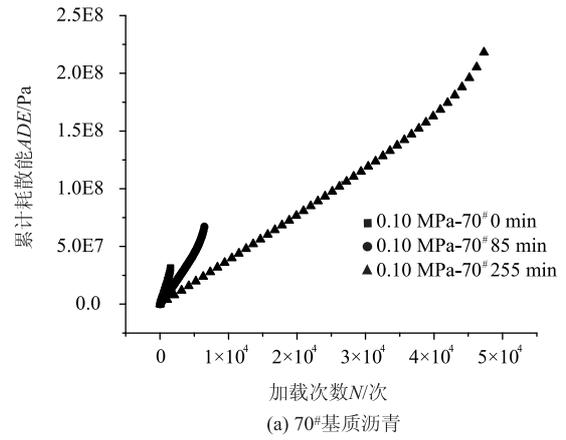
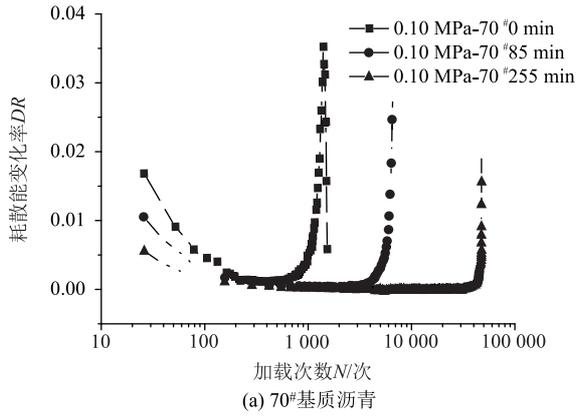


图1 0.10 MPa 下沥青 DR-N 曲线

Fig.1 DR-N curves of asphalt under 0.10 MPa

图2 0.10 MPa 下沥青 ADE-N 曲线

Fig.2 ADE-N curves of asphalt under 0.10 MPa

## 2.2 基于耗散能的疲劳寿命预估方程

沥青属于典型的黏弹性材料, 且对温度敏感性较强, 高温时具有较好塑性, 文献 [18] 对沥青疲劳试验过程中能量耗散进行了研究, 给出了达到疲劳破坏时总的累积能耗与疲劳寿命的关系式, 如式 (7)<sup>[18]</sup> 所示。认为当重复荷载作用过程中能耗累积到一定程度时, 材料发生疲劳破裂, 并将这一判据称为能耗饱和判据, 并认为疲劳寿命与能耗在双对数坐标中具有较好的线性关系, 如式 (8)<sup>[18]</sup> 所示。

$$W_f = A (N_f)^Z, \quad (7)$$

$$\lg W_f = \lg A + Z \times \lg N_f, \quad (8)$$

式中,  $N_f$  为疲劳寿命;  $W_f$  为累积耗散能;  $A$ ,  $Z$  为试验确定的系数。

根据应力控制模式下的试验结果, 图3表示不同70#基质沥青和SBS改性沥青疲劳寿命与所对应的累积耗散能在双对数坐标中的关系。

从图3可以看出, 考虑老化的沥青疲劳寿命与累积能耗之间表现出良好的双对数线性关系, 疲劳寿命拟合方程为:

$$70\# \text{ 基质沥青: } \lg W_f = 5.9547 + 0.4603 \lg N_f,$$

$$R^2 = 0.8639; \quad (9)$$

$$\text{SBS 改性沥青: } \lg W_f = 6.4536 + 0.3747 \lg N_f,$$

$$R^2 = 0.8095. \quad (10)$$

## 3 应变加载试验结果分析

应变控制加载模式是指在加载过程中保持应变不变, 沥青试样在重复剪切作用下复数剪切模量不断降低, 因此加载过程中应力逐渐下降。当复数剪切模量下降到初始模量的20%时停止加载, 分析加载过程中耗散能变化, 确定沥青疲劳寿命和累积耗散能。

### 3.1 SBS 改性沥青试验结果分析

对于SBS改性沥青, 试验中发现DR-N分布比较分散, 没有显著的变化趋势, 如图4所示。因此试图通过DR-N分布确定SBS改性沥青疲劳寿命是比较困难的。但累积耗散能比(DER)随荷载作用次数的增加而增加, 变化趋势显著, 如图5所示。

在荷载作用初期, DER-N曲线近似直线  $DER = N$ , 沥青内部尚未发生损伤或损伤很小, 可以忽略;

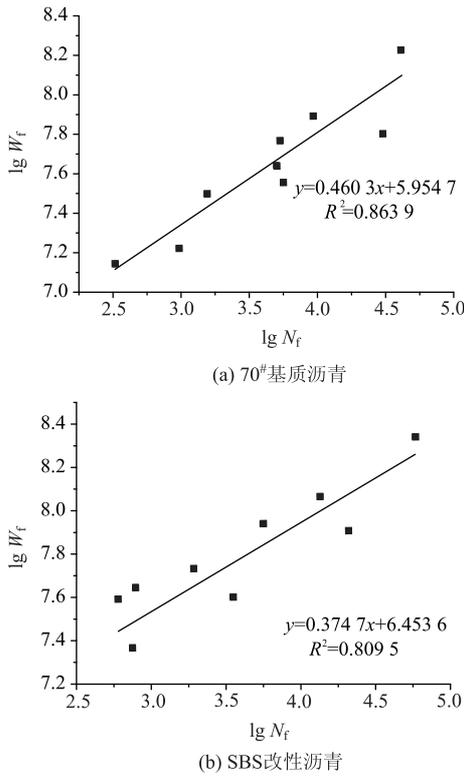


图3 应力模式下沥青疲劳寿命预估模型

Fig. 3 Prediction model of asphalt fatigue life in stress mode

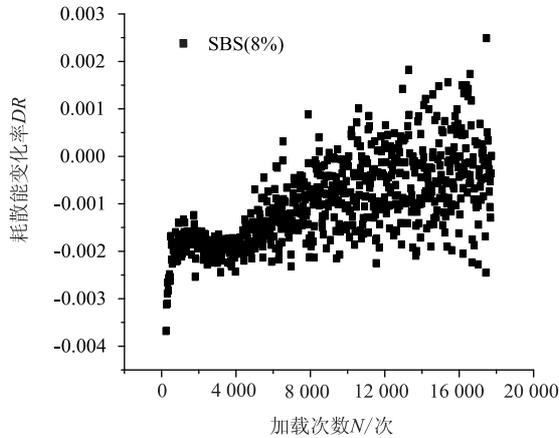


图4 应变模式下SBS改性沥青DR-N分布

Fig. 4 DR-N distribution of SBS modified asphalt in strain mode

而后随着荷载作用次数的增加, DER 值增大, DER-N 曲线逐渐偏离 DER = N 直线, 沥青内部发生损伤并不断扩展直至完全破坏。本研究借鉴现有研究中<sup>[5,10]</sup>采用 DER-N 曲线偏离 DER = N 直线 20% 时对应的加载次数作为沥青疲劳寿命, 用  $N_{20}$  表示, 并确定其对应的累积耗散能实测值。通过式 (10) 和式 (11) 计算  $N_{20}$  对应的累积耗散能计算值和误差因子, 如表 4 所示。

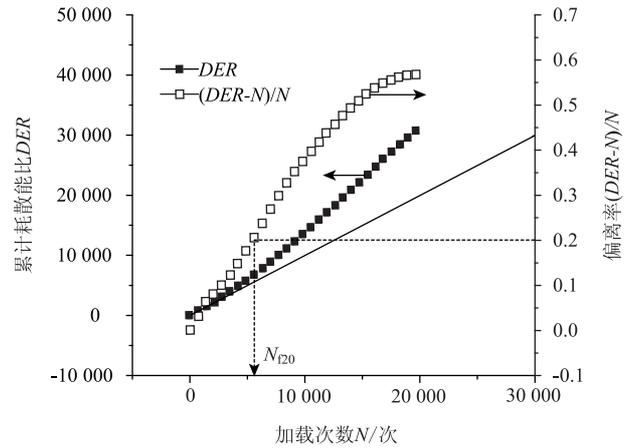


图5 应变模式下SBS改性沥青DER-N曲线

Fig. 5 DER-N curves of SBS modified asphalt in strain mode

$$K = \frac{|W_{f-Theory} - W_{f-Test}|}{W_{f-Test}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中, K 为误差因子;  $W_{f-Theory}$ 、 $W_{f-Test}$  分别为累积耗散能计算值、实测值。试验计算结果如表 4 所示,  $N_{IDR}$  为 DR-N 曲线确定应变控制模式下沥青疲劳寿命。

表4 SBS改性沥青累积耗散能计算值与实测值

Tab. 4 Calculated and the measured values of cumulative dissipation energy of SBS modifies asphalt

| 沥青-应变          | $N_{IDR}/次$ | $W_{f-Theory}/Pa$ | $W_{f-Test}/Pa$ | K/%  |
|----------------|-------------|-------------------|-----------------|------|
| SBS0 min-8%    | 10 595      | 91 580 989        | 83 592 080      | 9.6  |
| SBS85 min-8%   | 6 091       | 74 425 681        | 79 818 770      | 6.8  |
| SBS255 min-8%  | 3 413       | 59 905 427        | 51 281 333      | 16.8 |
| SBS0 min-10%   | 6 062       | 74 292 708        | 79 431 137      | 6.5  |
| SBS85 min-10%  | 4 334       | 65 515 231        | 60 413 588      | 8.4  |
| SBS255 min-10% | 2 677       | 54 694 020        | 43 932 005      | 24.5 |
| SBS0 min-12%   | 4 995       | 69 094 145        | 70 316 182      | 1.7  |
| SBS85 min-12%  | 2 437       | 52 802 534        | 55 330 578      | 4.6  |
| SBS255 min-12% | 1 259       | 41 226 801        | 40 720 031      | 1.2  |

由表 4 可见, 误差因子  $K < 10.0\%$  (除个别为 16.8%, 24.5% 外, 这可能是由于试验操作不当以及沥青老化时间过长所致), 即在应变控制模式下, 采用应力模式建立的疲劳预估方程计算获得的累积耗散能与实测值之间的误差较小, 而通常情况下沥青疲劳损伤过程中累积耗散能数值较大 (本研究中为  $10^8$  数量级), 因此可认为 SBS 改性沥青基于累积耗散能建立的疲劳寿命预估方程与荷载加载模式无关。

### 3.2 70#基质沥青试验结果分析

对于 70# 基质沥青, 应变控制加载模式下获得的 DR-N 曲线与应力控制加载模式下获得的 DR-N 曲线变化趋势相同, 曲线存在一个转折点, 通过 DR-N 曲线确定应变控制模式下沥青疲劳寿命 ( $N_{IDR}$ ), 并采用式 (9) 和式 (11) 计算该疲劳寿命对应的累积耗散能值 (用  $W_{f-Theory}$  表示) 与误差因子, 如表 5 所示。

表5 70<sup>#</sup>基质沥青累积耗散能计算值与实测值

Tab. 5 Calculated and the measured values of cumulative dissipation energy of base asphalt No. 70

| 沥青-应变                       | $N_{IDR}/次$ | $W_{f-Theory}/Pa$ | $W_{f-Test}/Pa$ | $K/\%$ |
|-----------------------------|-------------|-------------------|-----------------|--------|
| 70 <sup>#</sup> min-5%      | 3 946       | 40 739 069        | 40 814 685      | 0.2    |
| 70 <sup>#</sup> 85 min-5%   | 4 410       | 42 878 056        | 43 948 407      | 2.4    |
| 70 <sup>#</sup> 255 min-5%  | 4 585       | 43 653 040        | 46 445 362      | 6.0    |
| 70 <sup>#</sup> 0 min-8%    | 1 532       | 26 355 703        | 26 180 205      | 0.7    |
| 70 <sup>#</sup> 85 min-8%   | 1 747       | 27 998 027        | 28 488 302      | 1.7    |
| 70 <sup>#</sup> 255 min-8%  | 2 301       | 31 782 658        | 34 468 471      | 7.8    |
| 70 <sup>#</sup> 0 min-10%   | 699         | 18 365 927        | 19 893 194      | 7.7    |
| 70 <sup>#</sup> 85 min-10%  | 795         | 19 486 731        | 20 204 062      | 3.6    |
| 70 <sup>#</sup> 255 min-10% | 1 226       | 23 786 589        | 21 839 447      | 8.9    |

由表5可知, 误差因子  $K < 10.0\%$ , 表明采用70<sup>#</sup>基质沥青在应力加载模式下获得的疲劳寿命预估方程分析应变加载模式下的疲劳寿命时, 计算值与实测值之间产生的误差较小, 因此可认为70<sup>#</sup>基质沥青基于累积耗散能建立的疲劳寿命预估方程与荷载加载模式无关。

#### 4 结论

(1) 沥青在疲劳加载过程中, 损伤累积符合Miner线性损伤累积准则, 累积耗散能变化随加载次数呈线性增长, 增长到疲劳破坏阈值时, 沥青发生疲劳破坏。

(2) 应力控制模式下考虑老化的沥青疲劳寿命与耗散能在双对数坐标系中表现出良好线性关系 ( $R > 0.8$ ), 70<sup>#</sup>基质沥青疲劳寿命与耗散能在双对数坐标中建立的疲劳寿命预估方程为:  $\lg W_f = 5.9547 + 0.4603 \lg N_f$ ,  $R^2 = 0.8639$ ; SBS改性沥青对应的双对数预估方程为:  $\lg W_f = 6.4536 + 0.3747 \lg N_f$ ,  $R^2 = 0.8095$ 。

(3) 当采用应力加载模式下获得的疲劳寿命预估方程计算应变加载模式获得疲劳寿命对应的累积耗散能时, 70<sup>#</sup>基质沥青和SBS改性沥青累积耗散能计算值与实测值误差大多在10%以内, 因此可认为基于耗散能建立的沥青疲劳寿命预估方程与试验加载模式无关。

(4) 本研究只研究了同种沥青在不同加载模式下基于耗散能建立的疲劳寿命预估方程的适用性, 并未考虑该预估方程针对不同沥青的适用性, 在今后的研究中应加以重视。

#### 参考文献:

#### References:

[1] LIAO M C, CHEN J S, TSOU K W. Fatigue Characteristics of Bitumen-filler Mastics and Asphalt

Mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 24 (7): 916-923.

- [2] 李佳, 张肖宁. 沥青混合料中胶浆疲劳破坏与变形分析 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (35): 9585-9590.  
LI Jia, ZHANG Xiao-ming. Fatigue Damage and Deformation of Binder Separated from Asphalt Concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12 (35): 9585-9590.
- [3] KIM Y R, LITTLE D, SONG I. Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation [J]. Transportation Research Road, 2003, 1832: 1-8.
- [4] BAHIA H U, HANSON D I, ZENG M, et al. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design: NCHRP Report 459 [R]. Washington, D. C.: National Academy Press, 2001.
- [5] 孙艳娜, 李立寒, 汪于凯. 沥青疲劳性能评价指标 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49 (6): 1102-1107.  
SUN Yan-na, LI Li-han, WANG Yu-kai. Evaluation Parameter Research of Asphalt Binder Fatigue [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49 (6): 1102-1107.
- [6] 单丽岩, 谭忆秋, 许亚男, 等. 应力、应变控制模式下沥青疲劳损伤演化规律 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (1): 16-21, 74.  
SHAN Li-yan, TAN Yi-qiu, XU Ya-nan, et al. Fatigue Damage Evolution Rules of Asphalt under Controlled-stress and Controlled-strain Modes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (1): 16-21, 74.
- [7] 赵永利, 顾凡, 黄晓明. 基于FTIR的SBS改性老化特性分析 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14 (5): 620-623.  
ZHAO Yong-li, GU Fan, HUANG Xiao-ming. Analysis on SBS Modified Asphalt Aging Characterization Based on Fourier Transform Infrared Spectroscopy [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14 (5): 620-623.
- [8] 廖公云, 黄晓明, 巴桑顿珠. 适应西藏高原环境的沥青抗紫外线老化试验研究 [J]. 东南大学学报: 英文版, 2008, 24 (4): 503-507.  
LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming, BA SANG Dun-zhu. Anti-ultraviolet Aging Tests of Asphalts Adapting to Environment in Tibetan Plateau of China [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2008, 24 (4): 503-507.
- [9] HOPMAN P C, KUNST P A J C, PRONK A C. A Renewed Interpretation Method for Fatigue Measurement, Verification of Miner's Rule [C] // Fourth Eurobitume Symposium. Madrid: [s. n.], 1989: 557-561.

(下转第30页)