文章编号:1005-0523(2017)01-0046-06

# 试样厚度对沥青疲劳性能影响研究

韩伟鹏,杨 涛,吴建涛,刘 泉

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用动态剪切流变仪(DSR),在应力加载模式下对不同厚度的沥青试样进行时间扫描试验。采用 $N_{f50}$、$N_{p20}$ 和 $N_{fm}$ 三种疲劳评价指标对沥青的疲劳寿命进行评价和对比分析,比较不同试样厚度条件下沥青的疲劳寿命,为选择沥青疲劳破坏的评价指标提供依据。结果表明:当沥青试样厚度不同时,由不同的沥青疲劳评价指标所得到的疲劳寿命存在一致性排序,即 $N_{p20}<N_{f50}<N_{fm}$;其中 $N_{f50}$ 对沥青疲劳性能随试样厚度变化的区分度最大,可以作为评价和分析沥青试样厚度对其疲劳性能的评价指标;当沥青试样厚度为 500 μm 时,沥青的疲劳寿命最长。

关键词:沥青疲劳;耗散能;试样厚度

中图分类号:U414 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.008

疲劳开裂是沥青路面主要破坏形式之一。疲劳开裂是指在重复荷载作用下沥青混合料疲劳损伤不断累积从而形成宏观裂缝的过程[1-2]。研究发现沥青混合料的疲劳裂缝最先产生于沥青胶浆内部或沥青与集料表面,说明沥青对沥青混合料的疲劳性能有着非常重要的影响,因此研究沥青的疲劳性能具有重要意义[3-5]。

美国战略公路研究计划(SHRP)引入动态剪切流变仪用于测定沥青胶结料的疲劳性能,并将疲劳因子 $G^*\cdot\sin\delta$ 列入 Superpave 沥青技术规范[6];然而,近年来随着研究的逐渐深入,$G^*\cdot\sin\delta$ 作为沥青疲劳评价指标受到诸多质疑,如其与混合料之间缺乏足够的相关性,试验假定与路面实际情况相差较大等[7]。鉴于 $G^*\cdot\sin\delta$ 的不足,美国 NCHRP9-10 项目组采用动态剪切流变仪(DSR)对沥青进行时间扫描试验即重复剪切试验,通过测试复数剪切模量、相位角等指标随剪切次数的变化,来分析沥青的疲劳性能。在此基础上形成了 $N_{f50}$ 以及基于耗散能理论的累积耗散能比($DER$)、耗散能变化率($RDEC$)等多种评价沥青疲劳性能的评价指标,但各有优缺点,在评价沥青疲劳性能时均存在一定的局限性[8]。在以往沥青疲劳性能的影响因素研究中,主要是研究试验温度、应力水平和加载频率对沥青疲劳的影响,并没有考虑沥青试样厚度对沥青疲劳性能的影响,已有研究发现沥青试样厚度对沥青的各项力学性能均有显著影响[9];因此研究沥青试样厚度对沥青疲劳性能的影响有其必要性。

针对以上问题,本文对不同试样厚度的沥青进行应力控制的时间扫描试验,采用不同的疲劳破坏评价指标进行评价和对比分析,并比较各评价指标的区分度,得到更适合评价沥青试样厚度影响条件下沥青疲劳性能的评价指标,并以此分析不同试样厚度沥青的疲劳性能。

## 1 材料及试验方法

### 1.1 材料

本试验采用 70 号基质沥青,其基本指标测试结果见表 1。

收稿日期:2016-07-02
基金项目:国家自然科学基金项目(51108157);中央高校基本科研业务费专项资金(2015B17214)
作者简介:韩伟鹏(1992—),男,硕士研究生,研究方向为路面材料。
通讯作者:吴建涛(1981—),男,副教授,博士,研究方向为沥青材料力学及路用性能。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　沥青材料基本指标
Tab.1　The basic performance of asphalt

| 实验项目 | 单位 | 检测结果 |
|---|---|---|
| 针入度，25 ℃，100 g，5 s | 0.1 mm | 70.6 |
| 延度，5 cm/min，15 ℃ | cm | >100 |
| 软化点（环球法） | ℃ | 47.6 |

### 1.2　试验方法

本试验采用动态剪切流变仪（DSR）的时间扫描（Time Sweep）试验。采用直径为 8 mm 的平行板，试验温度为 25 ℃，试验频率为 10 Hz（相当于速度为 60 km/h 的汽车对路面的作用）。应力控制模式下对试样厚度分别为 2 000，1 000，500，100 μm 和 50 μm 的沥青进行连续加载的时间扫描试验，通过改变动态剪切流变仪试验中的试验间距，实现对沥青试样厚度的控制，研究沥青试样厚度对其疲劳性能的影响。

对不同试样厚度的沥青进行应力扫描试验，其应力与模量的关系如图 1 所示。SHRP 研究认为模量 $G^*$ 的降低值不超过最大模量的 5%，则认为沥青处于线性粘弹性范围，不同试样厚度的沥青线性粘弹性范围如图 2 所示。由图 2 可知，沥青试样厚度对其线性粘弹性范围有一定的影响，随着沥青试样厚度的增加，其线性粘弹性范围逐渐减小。在应用时间扫描试验测试沥青的疲劳性能时，应力水平对疲劳性能有重要影响，应力水平过大，疲劳寿命较短；应力水平过小，则试验周期较长，综合分析沥青的应力扫描曲线，应力水平应采用 60 kPa。

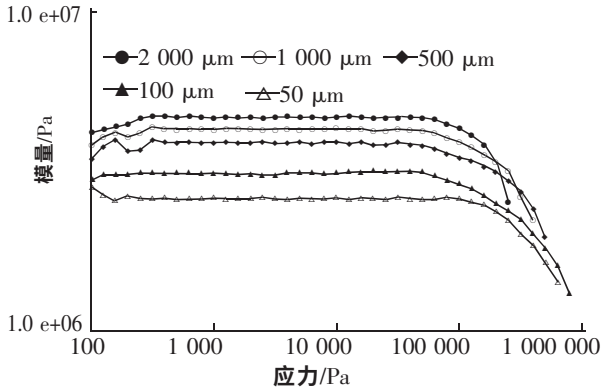



图 1　应力扫描结果
Fig.1　Stress sweep result

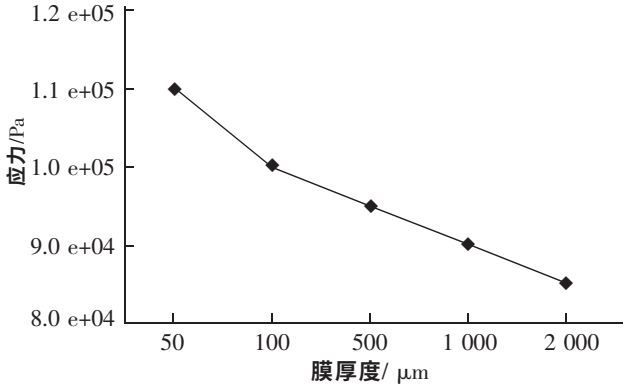



图 2　线性粘弹性范围结果
Fig.2　Linear viscoelasticity region result

## 2　试验结果及分析

### 2.1　沥青疲劳寿命分析方法

基于动态剪切流变仪的时间扫描试验，形成了多种评价沥青疲劳性能的指标，如 $N_{f50}$ 以及基于耗散能理论的累计耗散能比（$DER$）、耗散能变化率（$RDEC$）等[10]。在应用以上评价指标评价沥青疲劳性能时，各指标均存在一定的局限性，目前国内外还没有建立统一的疲劳评价指标。

#### 2.1.1　复数剪切模量（$G^*$）

以初始复数剪切模量降低至 50%时的荷载作用次数作为沥青的疲劳寿命 $N_{f50}$ [11]，该评价指标定义简单，评价直观，获取方便，是目前广泛使用的沥青疲劳评价指标。尽管如此，$N_{f50}$ 因为缺少一定的理论支撑而受到争议，不能反映沥青疲劳过程中的损伤积累。而且在采用 $N_{f50}$ 作为评价指标评价沥青的疲劳寿命时，还受温度、加载频率和应力水平等试验条件的影响，$N_{f50}$ 只能作为评价沥青疲劳的经验性指标来评价沥青的疲劳性能。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1.2 累计耗散能比($DER$)

利用基于耗散能理论的沥青疲劳评价方法可以很好的表征沥青疲劳破坏过程中损伤累积的过程。耗散能及累积耗散能比计算公式为:

$$DE_i=\pi\varepsilon_i\sigma_i\sin\delta_i \tag{1}$$

$$DER=\frac{\sum_{i=0}^{n}DE_i}{DE_n} \tag{2}$$

式中:$i$ 为荷载作用次数;$\sigma_i$ 为第 $i$ 次加载时的应力;$\varepsilon_i$ 为第 $i$ 次加载时的应变;$\delta_i$ 为第 $i$ 次加载时的相位角,$DE_n$ 为第 $n$ 次加载的耗散能。

应力控制模式下,以 $DER$ 作为疲劳评价指标评价沥青的疲劳性能时,$DER$ 与荷载作用次数的关系曲线存在明显的反弯点。将曲线偏离斜率为 1 的直线 20%时所对应的荷载作用次数作为疲劳寿命 $N_{p20}$,如图 3 所示。研究表明 $N_{p20}$ 评价沥青的疲劳寿命不受试验条件的影响。但将偏移量 20%作为疲劳判定指标缺少一定的理论支撑,它与混合料疲劳特性的相关性也缺乏相关数据,因此基于 $DER$ 定义疲劳寿命也存在一定的局限性。

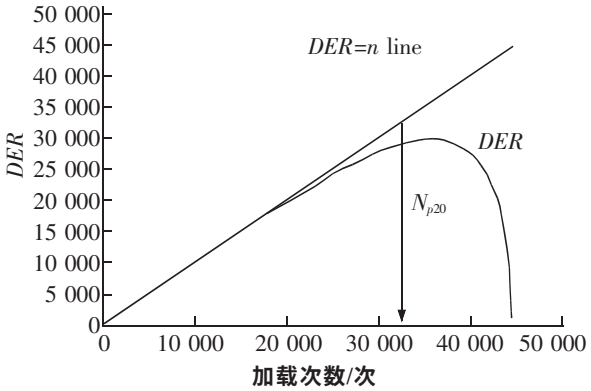



图 3 累计耗散能比曲线

Fig.3 The DER plot

2.1.3 耗散能变化率($RDEC$)

耗散能变化率 $RDEC$ 是根据耗散能变化的速率来评价沥青的疲劳性能,将 $RDEC$ 曲线转折点对应的荷载作用次数作为疲劳寿命 $N_{fm}$,其计算公式为

$$RDEC_a=\frac{DE_a-DE_b}{DE_a(b-a)} \tag{3}$$

式中:$RDEC_a$ 表示在第 $a$ 次加载中的耗散能变化率;$DE_a$ 表示在第 $a$ 次加载中的耗散能;$DE_b$ 表示在第 $b$ 次加载中的耗散能;$a$ 和 $b$ 分别表示加载次数。

研究表明沥青的疲劳破坏是由损伤累积造成的,可以通过耗散能的变化很好的反映沥青疲劳开裂的变化过程,也就是说沥青材料的疲劳损伤是由于耗散能变化引起的。基于损伤和耗散能的变化,将耗散能变化率作为沥青疲劳评价指标可以很好地反映沥青由于损伤累积而产生疲劳开裂的过程。

**2.2 试验结果分析**

2.2.1 沥青试样厚度影响分析

不同试样厚度条件下,沥青复数剪切模量随加载次数变化如图 4 所示。由图 4 可知,沥青试样厚度越大,其初始复数剪切模量也越大,这与以往的研究发现是一致的[12];随着荷载作用次数的增加,沥青的复数剪切模量逐渐降低,但不同试样厚度的沥青复数剪切模量下降速率相差较大,导致最后沥青的疲劳寿命不同。沥青的疲劳寿命与试样厚度并不是简单的线性关系,从 2 000 μm 到 500 μm,试样厚度降低,复数剪切模量下降速率减慢,沥青的疲劳寿命随试样厚度降低而增加;从 500 μm 到 50 μm,试样厚度降低,复数剪切模量下降速率加快,沥青的疲劳寿命随膜厚度降低而降低,当沥青试样厚度为 500 μm 时,沥青的疲劳寿命最长。

不同试样厚度条件下,沥青累计耗散能比随加载次数变化如图 5 所示。由图 5 可知,荷载作用初期,损伤可以忽略不计,能量损失主要以粘弹性流动形式体现,所以曲线几乎是斜率为 1 的直线;当裂缝产生时,有更多的能量以耗散能的形式损失,曲线开始偏离直线;随着裂缝的逐渐扩展,累积耗散能比迅速变化,最后发生疲劳破坏。可以看出当沥青试样厚度为 500 μm 时,其曲线最晚偏离直线,说明其裂缝产生的时间最晚,累计耗散能比最大,发生疲劳破坏时对应的加载次数也最大,疲劳寿命也最长。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

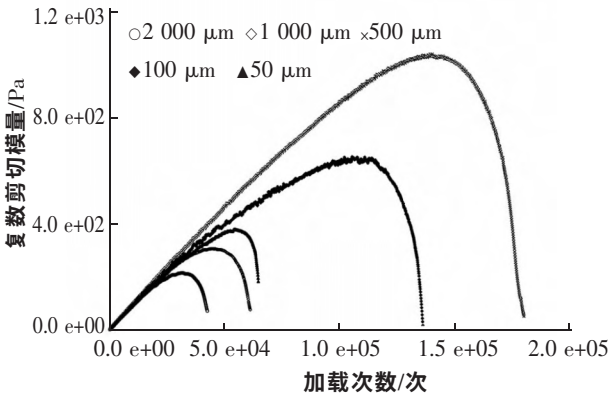



图 4　复数剪切模量随加载次数变化图

Fig.4　Relationship between the number of cycles and modulus

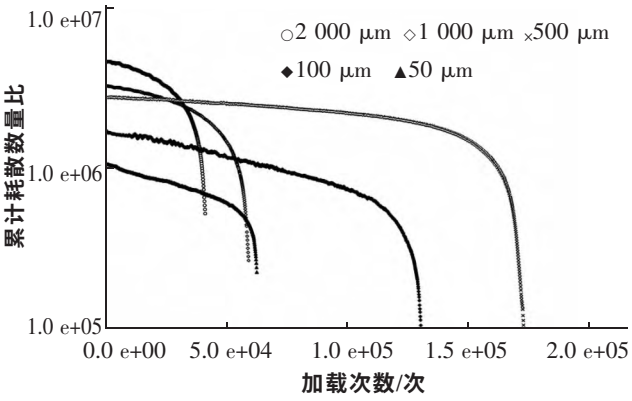



图 5　累计耗散能比随加载次数变化图

Fig.5　Relationship between the number of cycles and *DER*

不同试样厚度条件下，沥青耗散能变化率随加载次数变化如图 6 所示。由图 6 可知，在荷载作用初期，耗散能变化很小，*RDEC* 接近于零；随着裂缝逐渐扩展，耗散能越来越大，*RDEC* 也迅速增大，直至发生疲劳破坏，其原理与 *DER* 相似。可以看出不同试样厚度条件下的耗散能变化率不同，当试样厚度为 2 000 μm时，其平台期（*RDEC* 接近于零）最短，耗散能变化率迅速增加，沥青最先发生疲劳破坏；当试样厚度为 500 μm 时，其平台期最长，沥青发生疲劳破坏的时间最晚，对应的加载次数也最多，疲劳寿命最长。各评价指标评价不同试样厚度的疲劳寿命见表 2，不同试样厚度下各评价指标的疲劳寿命见图 5。

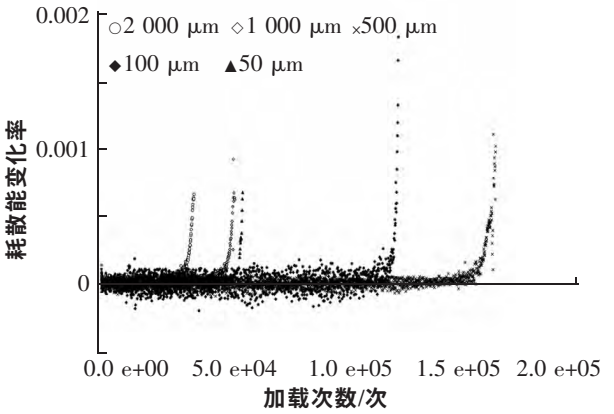



图 6　耗散能变化率随加载次数变化图

Fig.6　Relationship between the number of cycles and *RDEC*

表 2　沥青疲劳寿命

Tab.2　Asphalt fatigue life

| 试样厚度/μm | 疲劳寿命/次 | | |
|---|---|---|---|
| | $N_{f50}$ | $N_{p20}$ | $N_{fm}$ |
| 2 000 | 32 505 | 27 904 | 35 104 |
| 1 000 | 46 805 | 36 605 | 52 804 |
| 500 | 152 000 | 125 700 | 164 400 |
| 100 | 87 104 | 81 405 | 103 200 |
| 50 | 49 704 | 43 305 | 54 404 |

由表 2 可知，在应力控制加载模式下，不同评价指标对应的沥青疲劳寿命存在一致性排序，即 $N_{p20}<N_{f50}<N_{fm}$。这与 3 个沥青疲劳评价指标所对应的微裂缝所处阶段的力学性质相吻合，这 3 个指标均表示宏观裂缝形成时的疲劳寿命。导致这 3 种评价指标评价沥青疲劳寿命不同的主要原因是 3 种疲劳寿命对应的损伤进程不同，$N_{fm}$ 和 $N_{f50}$ 可认为是处于沥青产生宏观裂缝并开始加速扩张阶段，试样即将出现失稳性安全破坏的状态，而 $N_{p20}$ 为微裂缝发展汇集形成宏观裂缝的转折阶段，试件即将进入加速疲劳破坏的状态。

由图 7 可知，从 2 000 μm 到 500 μm，随着试样厚度的降低，沥青疲劳寿命逐渐增加；从 500 μm 到 50 μm，随着试样厚度的降低，沥青疲劳寿命逐渐降低，当沥青试样厚度为 500 μm 时，沥青的疲劳寿命最长。并且采用不同评价指标评价的疲劳寿命均具有相同的规律，即应用 3 种评价指标评价的疲劳寿命时，均是沥青试样厚度为 500 μm 时其疲劳寿命最长，沥青的疲劳寿命与试样厚度并不是简单的线性关系。SHRP 提出通过动态剪切流变仪（*DSR*）评价沥青的疲劳性能，并建议采用 2 000 μm 作为试验条件，但是沥青混合

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

料中实际裹附在集料表面的沥青膜厚度只有十至几十微米级别，2 000 μm 试样厚度得到的疲劳性能与实际沥青膜的疲劳性能存在较大差异，说明 SHRP 提出的沥青疲劳性能评价指标存在一定的问题，应该多分析薄膜条件下沥青的疲劳性能。

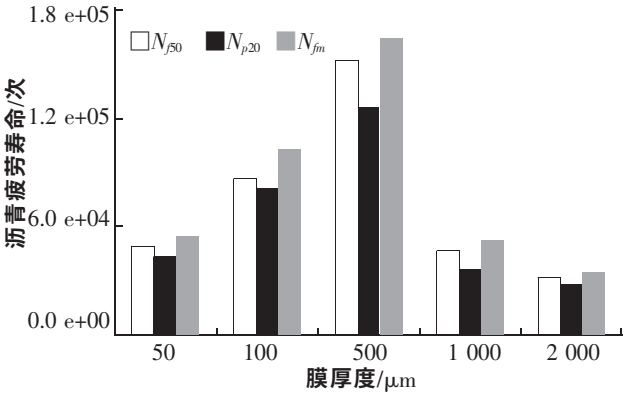



图 7 不同试样厚度各评价指标的沥青疲劳寿命

Fig.7 Fatigue life with different specimen thickness using different indexes

### 2.2.2 区分度分析

为了进一步选择在不同试样厚度条件下沥青疲劳寿命的疲劳评价指标，现对 3 种评价指标下的沥青疲劳寿命进行区分度的对比分析。区分度是指标对评价对象间的区分能力的一种数量表征，区分度越大，说明该指标提供的有用信息越多，各对象在该指标上的数值有明显差异，能够显著体现评价结果的差异程度[13]。首先对表中 5 种试样厚度沥青的 3 种评价指标对应的疲劳寿命矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行无量纲化，得到标准化矩阵 $\boldsymbol{Y}$。指定各评价指标的权重 $\omega_j$ 统一为 0.3，则区分度 $D_j$ 为

$$D_j=(\max_{i=1} y_{ij}-\min_{i=1} y_{ij})\times\omega_j \tag{4}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 32\ 505 & 27\ 904 & 35\ 104 \\ 46\ 805 & 36\ 605 & 52\ 804 \\ 152\ 000 & 125\ 700 & 164\ 400 \\ 87\ 104 & 81\ 405 & 103\ 200 \\ 49\ 704 & 43\ 305 & 54\ 404 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} 0.088\ 3 & 0.088\ 6 & 0.085\ 6 \\ 0.127\ 4 & 0.116\ 5 & 0.127\ 4 \\ 0.412\ 9 & 0.399\ 2 & 0.401\ 1 \\ 0.236\ 6 & 0.258\ 5 & 0.266\ 8 \\ 0.135\ 0 & 0.137\ 5 & 0.137\ 2 \end{bmatrix}$$

各指标的区分度具体值见表 3。

由表 3 可知，当沥青试样厚度作为区分条件时，$N_{f50}$ 这种评价指标的疲劳寿命区分度明显比 $N_{p20}$、$N_{fm}$ 大，$N_{p20}$ 和 $N_{fm}$ 的区分度相差不是特别明显，说明 $N_{f50}$ 可以较好的区分不同试样厚度条件下沥青的疲劳性能，因此，在分析试样厚度对沥青疲劳性能的影响时，可以采用 $N_{f50}$ 作为沥青疲劳的评价指标。

表 3 各评价指标的区分度

Tab.3 Distinction degree using different indexes

| 指标 | $N_{f50}$ | $N_{p20}$ | $N_{fm}$ |
|---|---|---|---|
| 区分度 | 0.097 | 0.093 | 0.094 |

## 3 结论

本文通过对基质沥青进行不同试样厚度条件下动态剪切流变仪的时间扫描试验，研究了沥青试样厚度对沥青疲劳性能的影响，并分析了沥青疲劳寿命的评价指标，主要得出以下结论：

1）沥青试样厚度为 500 μm 时，沥青的疲劳寿命最长，沥青疲劳寿命与试样厚度并不是简单的线性关系，SHRP 研究采用 2 000 μm 作为试验条件存在一定的问题，应该多分析薄膜条件下的疲劳寿命。

2）在应力控制模式下，同一试样厚度的沥青的不同疲劳评价指标对应的疲劳寿命存在一致性排序，即 $N_{p20}<N_{f50}<N_{fm}$；其中 $N_{f50}$ 对沥青疲劳性能随试样厚度变化的区分度最大，可以采用 $N_{f50}$ 作为分析沥青试样厚度对其疲劳性能的评价指标。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

**参考文献：**

[1] BOUSSAD N，DES CROIX P，DONY A. Prediction of mix modulus and fatigue law from binder rheological properties[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists，1996，65：40–72.

[2] 林添坂，孙大权，曹林辉. 不同加载模式下对沥青疲劳寿命的研究[J]. 石油沥青，2015，29(1)：12–15.

[3] 徐骁龙，叶奋，宋卿卿，等. 沥青疲劳评价指标试验研究[J]. 华东交通大学学报，2014(2)：14–19.

[4] Shen S，Chiu H M，Huang H. Characterization of fatigue and healing in asphalt binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2010，22(9)：846–852.

[5] 吴建涛，钟纯耀，韩伟鹏. 抽提回收技术用于评价沥青老化程度的合理性研究[J]. 中外公路，2013(6)：226–229.

[6] 袁美俊，纪小平，邢钦玉，等. 车辆动荷载下沥青路面力学响应分析[J]. 华东交通大学学报，2009，26(6)：21–25.

[7] 孙大权，林添坂，曹林辉. 基于动态剪切流变试验的沥青疲劳寿命分析方法[J]. 建筑材料学报，2015(2)：346–350.

[8] 单丽岩，谭忆秋，李晓琳. 沥青疲劳特性的研究[J]. 武汉理工大学学报：交通科学与工程版，2011，35(1)：190–193.

[9] ZHAI H，BAHIA H，ERICKSON S. Effect of film thickness on rheological behavior of asphalt binders [J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2000(1728)：7–14.

[10] 施正银，刘聪慧，李双霞，等. 沥青胶浆疲劳特性研究[J]. 国外建材科技，2009，29(6)：82–85.

[11] 刘伟民，黄晓明. 基于耗散能原理的沥青混合料疲劳特性分析[J]. 河南科技大学学报：自然科学版，2006，27(2)：23–25.

[12] 陈华鑫，袁迎捷，张争奇，等. 动态剪切流变仪试验影响因素研究[J]. 中南公路工程，2005(2)：142–145.

[13] 张天云，杨瑞成，陈奎. 基于区分度定量分析工程材料评价指标[J]. 材料科学与工艺，2009，17(4)：512–515.

# Influence of Specimen Thickness on Fatigue Properties of Asphalt

Han Weipeng，Yang Tao，Wu Jiantao，Liu Quan

(College of Civil and Transportation Engineering，Hohai University，Nanjing 210098，China)

**Abstract**：The dynamic shear rheometer(DSR) was adopted to evaluate the fatigue performance of asphalt with different specimen thickness under the stress controlled mode time sweep (Time Sweep). The fatigue characteristics were evaluated and compared by three indexes ($N_{f50}$, $N_{p20}$ and $N_{fm}$). In order to provide reference for the fatigue failure indexes of asphalt, the fatigue test of asphalt with different specimen thickness was conducted. The results show that the fatigue life of asphalt with different specimen thickness evaluated by different indexes has a consistent order，namely $N_{p20}<N_{f50}<N_{fm}$. $N_{f50}$ has the highest distinction with different asphalt specimen thickness and $N_{f50}$ is recommended as an evaluated and compared fatigue index of asphalt. When the asphalt specimen thickness is 500 μm, the asphalt has the maximum fatigue life.

**Key words**：asphalt fatigue; dissipated energy; asphalt specimen thickness

（责任编辑　姜红贵）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net