

文章编号:1005-0523(2014)02-0014-06

沥青疲劳评价指标试验研究

徐骁龙¹, 叶 奋^{2,1}, 宋卿卿², 黄 运¹

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 疲劳破坏是沥青路面重要的破坏类型, 而沥青是影响路面沥青混合料疲劳性能的关键因素。沥青疲劳评价指标尚未有统一的标准, 为对沥青的疲劳破坏判定提供指标参考。借助DSR进行了不同控制模式和荷载水平下沥青的疲劳试验, 并对不同的沥青疲劳评价指标进行了评价和对比分析。研究表明: N_{p20} 对应于微裂纹的形成, 不适用于作为沥青的疲劳破坏标准; N_f 对应于宏观裂缝的形成, 适合作为沥青疲劳破坏的评价指标; $N_{50\%G^*}$ 与 N_f 相关性较高, 可以作为一个简单且合理的沥青疲劳评价指标。

关键词: 沥青; 疲劳破坏发展过程; 疲劳评价指标; 控制模式; 耗散能

中图分类号: U414

文献标志码: A

沥青路面在高等级公路建设中得到广泛使用^[1], 而重复交通荷载导致的疲劳破坏是沥青路面主要破坏形式之一。美国NCHRP9-10项目组认为影响沥青混合料疲劳特性的主要因素与影响沥青疲劳损伤的因素相关性较大^[1], 因此对沥青疲劳特性的研究是解决路面疲劳损坏问题的重要切入点。

美国战略公路研究计划(SHRP)采用疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 作为沥青胶浆疲劳性能的评价指标, 并引入Superpave规范^[3]。然而, 近年来 $G^* \sin \delta$ 受到了诸多质疑, 如其与混合料寿命之间缺乏相关性, 试验假定与路面实际情况相差较大^[4]。鉴于 $G^* \sin \delta$ 的不足, 美国NCHRP9-10项目组采用DSR对沥青进行时间扫描试验, 在重复剪切荷载作用下测得沥青的疲劳损伤情况。

在不同的加载模式下, 沥青的疲劳破坏发展过程均可以通过两个转折点分为3个阶段: 第一个阶段称为无损伤或微损伤阶段, 这个阶段中应力应变基本保持线性关系直至荷载作用次数达到 N_1 ; 第二个阶段是微裂纹萌生阶段, 这个阶段中材料对于荷载的响应逐渐改变直至荷载作用次数达到 N_2 , 此时宏观裂缝形成, 且在此阶段里, 沥青的复数模量衰减速度逐渐加快, 每次荷载作用会产生更大的损伤; 第三阶段是裂缝扩展阶段, 应力控制模式下此阶段材料的响应改变加速并迅速破坏, 应变控制模式下此阶段材料的响应则逐渐平缓。

在应力控制和应变控制条件下, 沥青的疲劳损伤呈现出不同的发展过程, 在不同的控制模式下如何确定疲劳破坏标准是目前沥青疲劳研究的难点所在。一种可靠的疲劳破坏标准应该是独立于加载模式的, 即无论在何种加载模式下, 这种标准所体现的破坏水平应该是一致的。

针对以上问题, 本文对沥青分别进行不同应力水平和应变水平下的疲劳试验, 采用不同的疲劳破坏评价指标进行评价和对比分析, 为沥青的疲劳破坏判定提供指标参考。

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168044)

作者简介: 徐骁龙(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为道路材料; 叶奋(1970—), 男, 教授, 博士, 研究方向为道路材料。

1 原材料及试验方法

试验材料选用壳牌70号基质沥青,采用DSR对沥青施加重复荷载。试验温度为25℃,加载频率为10 Hz,应力控制模式下采用100,150,200 kPa三个应力水平,应变控制模式下采用2%,4%,6%三个应变水平。

2 试验结果及分析

试验可获得整个沥青疲劳过程中的复数模量、相位角、应力或应变的变化情况,采用50% G^* 、耗散能变化率、累计耗散能比和简化能量比对沥青疲劳寿命进行评价,并分析各指标的适用性。

2.1 复数模量降低到初始模量50%时的荷载作用次数

复数模量 G^* 表征了材料重复剪切变形时的总阻力^[5],以沥青复数模量降低到初始模量50%时所对应的荷载次数作为疲劳寿命 $N_{50\%G^*}$,是目前最为简明和广泛使用的沥青疲劳评价指标。图1为100 kPa应力控制和2%应变控制下的沥青复数模量变化曲线。

从图1可以看出,在应力控制模式下,模量初期衰减比较缓慢,当荷载作用到一定次数后,模量迅速衰减至试件破坏。应变控制模式下,模量初期衰减逐渐加速,至一定荷载作用次数后,衰减速度减慢,由于应变控制模式下所施加的应力不断减小,所以试件不会出现明显的破坏现象。

NCHRP9-10项目组研究表明^[2],在相同的试验条件下,沥青和沥青混合料采用50% G^* 定义的疲劳寿命有着较好的相关性,相关系数介于0.66~0.9。但是这个指标在不同控制模式的加载过程中,不能反映出材料对于输入能量是如何响应的,且不同的加载模式下其响应机制是明显不同的。因此,50% G^* 这种疲劳定义是较为随意的,没有从材料破坏机理的角度进行分析^[6],不能反映材料处于何种破坏水平。

2.2 累计耗散能量比(DER)

对沥青的加载过程中,耗散能为每次加载过程中应力—应变曲线所包围的面积,其计算公式为

$$\omega_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta_i \quad (1)$$

式中: i 为荷载作用次数; σ_i 为第 i 次加载时的应力(MPa); ε_i 为第 i 次加载时的应变; δ_i 为第 i 次加载时的相位角。

累计耗散能量比 DER_n 的定义如下

$$DER_n = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\omega_n} \quad (2)$$

式中: ω_n 为第 n 次加载消耗的耗散能(N·m)。

在沥青疲劳试验的初始阶段,材料的损伤可以忽略不计,每个加载循环的耗散能 ω_i 近似于一个常数,即 $DER-n$ 的关系可表达为斜率为1的直线;随着荷载作用次数的增加,材料中萌生了微裂纹,裂纹的萌生和扩展消耗了能量, ω_n 和 DER 不再是常数, $DER-n$ 曲线逐渐偏离 $K=1$ 的直线^[7]。图2(a)和图2(b)分别为100 kPa应力控制和2%应变控制下 DER —荷载作用次数曲线。

如图2所示,从曲线的末端做切线,与 $K=1$ 的直线相交,交点对应的荷载作用次数即为沥青的疲劳寿命 N_p ,Pronk^[8]认为该点即为沥青疲劳破坏过程中的裂纹萌生阶段向扩展阶段的转折点 N_2 。Bonnetti^[9]将 N_{p20} 作为沥青疲劳的评价指标,即将 DER —荷载作用次数曲线偏离 $K=1$ 的直线20%时所对应的荷载作用次数作

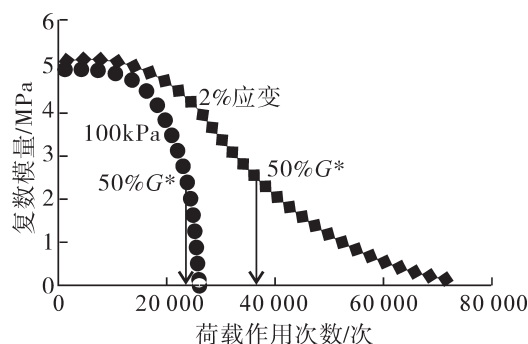


图1 沥青复数模量—荷载作用次数曲线

Fig. 1 Complex modulus versus load cycles of asphalt

为疲劳寿命^[10]。

应力控制模式下, DER —荷载作用次数曲线存在明显的反弯点, 从曲线末端做切线较为容易及唯一, 因此疲劳寿命 N_p 较容易定义; 而在应变控制模式下, 曲线没有明显的反弯点, 从曲线末端做出的切线受试验停止时的荷载作用次数影响较大, N_p 的定义则困难得多。其实, 不论 N_p 还是 N_{p20} 都没能合理地阐述清楚为何该点为裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段的转折点, 也没能说明清楚此时材料处于何种损伤状态, 因此基于 DER 定义疲劳寿命是不合理的。

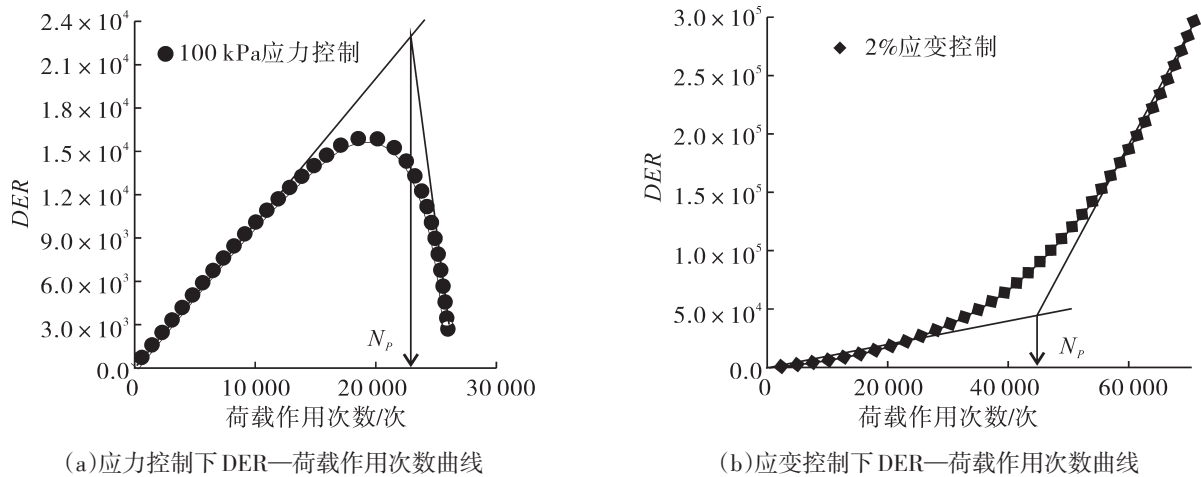


图2 DER —荷载作用次数曲线

Fig. 2 DER versus load cycles

2.3 耗散能变化率(DR)

耗散能变化率 DR 是除 DER 外另一个基于耗散能的疲劳评价指标, 它是根据耗散能改变的速率来判定沥青在疲劳试验过程中所处的阶段, 将达到某个变化点时对应的荷载作用次数作为疲劳寿命 N_f , 其计算公式为

$$DR_a = \frac{\omega_a - \omega_b}{\omega_a(b - a)} \quad (3)$$

式中: a, b 为荷载作用次数; ω_a, ω_b 为荷载作用次数分别为 a, b 时的耗散能 ($N \cdot m$)。

研究者^[9,11-12]认为疲劳损伤及其积累是始于当耗散能开始随着荷载作用而逐渐改变的时候, 换言之, 是耗散能的变化而不是耗散能本身导致材料损伤的。因此, 基于损伤和耗散能的变化, 将 DR 作为沥青疲劳评价指标是较为合理的。

图3为100 kPa应力控制下 DR —荷载作用次数曲线, 荷载作用初期, DR 基本保持不变直至 N_i , 这个阶段为材料疲劳破坏发展的第一阶段——无损伤阶段; 在 N_i 处, 微裂纹形成, 开始进入第二阶段, 微裂纹逐渐萌生发展, 每次加载的耗散能逐渐变大, DR 稳定增大, 直至 N_f 处宏观裂缝形成; N_f 即为 DR 定义的疲劳破坏点^[13], 记其荷载作用次数为 N_f ; 材料疲劳发展进入第三阶段, 由于宏观裂缝形成, 疲劳破坏加速发展, 每次加载的耗散能迅速增加, DR 则随之迅速增大直至试件破坏。

应变控制模式下, 多数研究者^[14-15]均认为 DR 值非

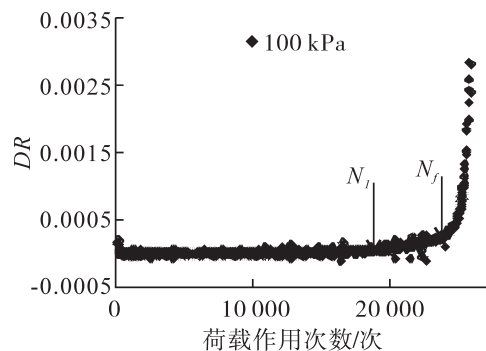


图3 应力控制下的 DR —荷载作用次数曲线

Fig. 3 DR versus load cycles under stress controlled mode

常离散,不能找出 DR 变化的任何趋势。本文在数据处理过程中,发现在不同应变控制大小下 DR —荷载作用次数曲线是有明显趋势和转折点的。通常研究者均是以 DSR 所采集的数据中相邻的值来计算 DR ,然而由于在应变控制中, DSR 实质是通过施加应力,并根据应变反馈不断调整应力大小来实现应变控制的,因此每次加载的应变大小会有微小差别,所以以相邻数据计算得到的 DR 是不会有明显规律趋势的。本文在计算应变控制情况下的 DR 时将公式调整为如下

$$DR_a = \frac{\omega_{a-m} - \omega_{a+m}}{\omega_{a-m} \cdot 2m} \quad (4)$$

式中: a 为荷载作用次数; ω_{a-m} , ω_{a+m} 为荷载作用次数分别为 $a-m$, $a+m$ 时的耗散能($N \cdot m$)。

图4为2%应变控制模式下的 DR —荷载作用次数曲线,曲线存在最低点,即耗散能减小速率存在最快的点,此时材料中宏观裂缝形成,定义此点为疲劳破坏点 N_f 。材料疲劳破坏后,由于应变控制下施加的应力逐渐减小,所以耗散能减小速率随着加载次数的增加逐渐放缓。

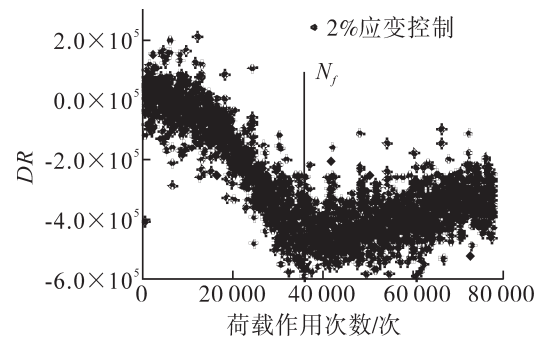


图4 应变控制模式下的 DR —荷载作用次数曲线

Fig. 4 DR versus load cycles under stain controlled mode

2.4 不同疲劳评价指标对比分析

表1为不同疲劳评价指标对应的沥青疲劳寿命,可知不同的评价指标所得的疲劳寿命不尽相同。

表1 基于不同疲劳评价指标的沥青疲劳寿命

Tab.1 Fatigue life based on different fatigue evaluation criteria of asphalt

控制条件	疲劳寿命/次			
	$N_{50\%G^*}$	N_p	N_{p20}	N_f
100 kpa	23 650	23 100	20 020	23 380
150 kpa	9 210	9 140	7 940	9 180
200 kpa	3 580	3 380	3 140	3 430
2%	3 5810	42 900	26 290	33 950
4%	8 510	13 800	5 680	7 880
6%	2 990	5 810	2 410	2 520

应变控制模式下基于 DER 所得的疲劳寿命较其他各指标相比明显偏大,这是因为 N_p 的取值与 DER —荷载作用次数曲线的末端加载次数影响较大,而应变控制模式下试验后期应力逐渐减小,尽管试件已经破坏,但不会有明显的结束特征,致使曲线平稳的向后延伸。因此,应变控制模式下所得的 N_p 没有比较意义,故不在此对其进行讨论分析。

应力控制模式下,各指标所得疲劳寿命排序为: $N_{50\%G^*} \approx N_p \approx N_f > N_{p20}$,应变控制模式下各指标所得疲劳寿命排序为: $N_{50\%G^*} > N_f > N_{p20}$ 。

由表1可知,在应力控制模式下 $N_{50\%G^*}$, N_p 和 N_f 基本相等,表明这3个指标均位于疲劳破坏发展的第二阶段和第三阶段转折点 N_2 处,代表着宏观裂缝的形成。由于控制应力持续不变,之后裂缝将迅速扩展,材料也很快破坏。 N_{p20} 小于其他指标所得疲劳寿命,为疲劳破坏发展的第一转折点,表明其将材料微裂纹的形成作为疲劳破坏点。

在应变控制模式下, N_{p20} 位于材料疲劳破坏发展的前期,同应力控制模式下一样位于材料微裂纹的形成时期。与应力控制模式下相同, $N_{50\%G^*}$ 和 N_f 相差不大,两者均处于耗散能减小速度最快位置,之后耗散能的减小速度将逐渐趋于平缓。此点为疲劳破坏发展的第二阶段和第三阶段的转折点 N_2 ,此时材料中宏观

裂缝形成,但由于在应变控制模式下,所施加的应力缓慢减小,因此材料不会快速的呈现出破坏状态,其复数模量和耗散能均是缓慢稳定的减小。

上述疲劳指标可分为 N_1 和 N_2 两类,工程实践中一般将 N_2 点作为疲劳破坏点,而非 N_1 。因为在 N_1 处,材料中虽然已产生微裂纹,但材料仍然具有足够的抗力承受荷载。 N_2 处材料中宏观裂缝形成,应力控制模式下 N_2 后材料将迅速破坏,应变控制模式下 N_2 后材料虽然已经破坏,但由于应变软化试验不会出现明显的结束特征,此时材料的抗力已明显不足,因此将 N_2 作为疲劳破坏点是合理的。

从图5可知, $N_{50\%G^*}$ 和 N_f 两者相关性较好,所得的沥青疲劳寿命在不同控制模式下基本相等,均代表着第二转折点 N_2 。虽然 $N_{50\%G^*}$ 显得随意,且不是从材料的破坏水平和损伤积累上进行的定义,但由于其与 N_f 有着良好的相关性,且容易判断和计算,因此可以将其作为一个简单且有效的指标与 N_f 一起作为判断沥青疲劳破坏的标准。

3 结论

对沥青在不同控制模式和荷载水平下进行疲劳试验,采用不同疲劳评价指标进行了分析,得出以下结论:

1) 将沥青疲劳破坏发展过程分为三阶段两转折点,第一转折点为微裂纹萌生点,第二转折点为宏观裂缝形成点,并将其作为材料疲劳破坏点;不同控制模式下的第三阶段发展过程不同,应力控制模式下材料迅速破坏,应变控制模式下材料响应逐渐趋于平缓。

2) 应力控制模式下, $N_{50\%G^*}$, N_p , N_f 基本相等,均位于疲劳破坏发展过程的第二转折点处,适用于作为沥青疲劳破坏的评价指标;而 N_{p20} 则位于第一转折点处,为微裂纹形成点,材料尚有足够的抗力,不适合作为疲劳破坏评价指标。

3) 应变控制模式下, N_{p20} 位于疲劳破坏发展第一转折点处,适于用来定义微裂纹的形成;发现 DR —荷载作用次数曲线存在转折点 N_f , N_f 略大于 $N_{50\%G^*}$,两者均位于第二转折点处,适用于作为沥青疲劳破坏的评价指标。

4) $N_{50\%G^*}$ 与 N_f 基在不同控制模式和荷载水平下基本相等,相关性较好。 $N_{50\%G^*}$ 位于第二转折点处,代表着微裂纹向宏观裂缝扩展的转折点,由于 $N_{50\%G^*}$ 容易进行判断和定义,可以作为一个简单且有效的沥青疲劳评价指标。

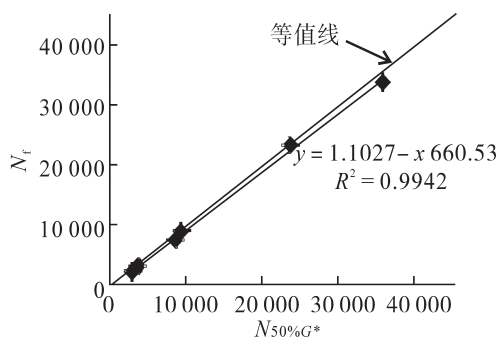


图5 N_f 和 $N_{50\%G^*}$ 关系图

Fig. 5 The comparison of N_f and $N_{50\%G^*}$

参考文献:

- [1] 王坤,陈景雅,王谦,等.DAT于SA温拌排水沥青混合料路用性能对比[J].华东交通大学学报,2013(3):65-70.
- [2] BAHIA H U, HANSON D I, ZHENG M.Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design, NCHRP Report459 [R]. Transportation Research Board, 2001:64-65.
- [3] 李智慧,谭忆秋. 沥青胶结料疲劳性能研究现状分析[J]. 石油沥青, 2008(5):59-62.
- [4] 袁燕,张肖宁,陈育书. 改性沥青胶浆的疲劳评价研究现状[J]. 中外公路, 2005(4):163-166.
- [5] 吕天华,章毅. 布敦岩沥青改性沥青高温动态流变性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2010(4):13-17, 21.
- [6] 郁锦刚,刘伟民,黄晓明. 基于黏弹性理论的沥青混合料劈裂疲劳模型研究[J]. 上海公路, 2009(4):60-64, 14.

- [7] 孟勇军,张肖宁. 基于累计耗散能量比的改性沥青疲劳性能[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2012(2):99-103.
- [8] PRONK A C. Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase[C]. The Road and Hydraulic Engineering Division (DWW), Netherlands, P-DWW-95-001, 1995.
- [9] BONNETTI K S, NAM K, BAHIA H U. Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders [J]. Transportation Research Board, 2002: 1810, 33-43.
- [10] 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(1):190-193.
- [11] ROWE G M. Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test [J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 1993(62):344-384.
- [12] SHEN S H, LU X. Energy based Laboratory fatigue failure criteria for asphalt materials [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011,29(3):1-8.
- [13] GHUZLAN K A, CARPENTER S. Energy-derived, Damage-based failure criterion for fatigue testing [J]. Transportation Research Board, 2000: 1732, 133-141.
- [14] 单丽岩. 基于粘弹特性的沥青疲劳一流变机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:98-99.
- [15] 白琦峰,钱振东,赵延庆. 基于流变学的沥青抗疲劳性能评价方法[J]. 北京工业大学学报,2012(10):1536-1542.

Experimental Study on the Asphalt Fatigue Evaluation Criterion

Xu Xiaolong¹, Ye Fen^{2,1}, Song Qingqing², Huang Yun¹

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Fatigue damage is an important damage type of asphalt pavement, and asphalt is the key factor influencing the pavement fatigue performance of asphalt mixture. In order to provide reference for the fatigue failure of asphalt, with the help of DSR, the fatigue test of asphalt is conducted under different control modes and load levels, and different asphalt fatigue evaluation criteria are evaluated and compared. The results show that N_{p20} corresponds to the formation of microcrack, unsuitable for the fatigue failure criterion of asphalt, while N_f corresponds to the formation of macrocrack, which is suitable for the fatigue failure criterion of asphalt and $N_{50\%G^*}$ is found to have a strong correlation with N_f , which can be used as a simple but reasonable fatigue criterion.

Key words: asphalt; development process of fatigue failure; fatigue evaluation criterion; control mode; dissipated energy