

基于流变学的沥青抗疲劳性能评价方法

白琦峰¹, 钱振东¹, 赵延庆²

(1. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 2. 大连理工大学 交通运输学院, 大连 116024)

摘要: 进行了 8 种沥青材料的动态剪切流变试验和“时间-扫描”试验以及对应的沥青混合料疲劳试验, 研究适于评价沥青疲劳性能的试验方法和指标. 分析表明, 与动态剪切试验相比, “时间-扫描”试验适于沥青(不包括如橡胶沥青等采用较大粒径改性剂的改性沥青)疲劳性能的评价; 并提出了将“简化耗散能”用于“时间-扫描”试验数据分析和沥青疲劳性能评价的指标.

关键词: 道路工程; 沥青疲劳性能评价方法; 时间-扫描试验; 流变学

中图分类号: U 415

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)10-1536-07

Asphalt Fatigue Resistance Evaluation Method Based on the Rheology

BAI Qi-feng¹, QIAN Zhen-dong¹, ZHAO Yan-qing²

(1. School of Transportation Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Transportation Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Asphalt anti-fatigue performance evaluation method and index were studied, based on dynamic shear test and time-sweep test of 8 kinds of asphalt and fatigue test of mixture by these asphalt. Compared with dynamic shear test, time-sweep test is suitable for asphalt fatigue performance evaluation. But time-sweep test is not suitable for performance evaluation of modified asphalt which uses large particle size modifiers, such as asphalt rubber. Reduced dissipated energy ratio was recommended as the index to analyze data of time-sweep test and to evaluate asphalt fatigue resistance.

Key words: highway engineering; asphalt fatigue resistance evaluation method; time-sweeping test; rheology

0 引言

疲劳破坏是沥青路面重要的破坏类型之一, 多数国家的路面设计方法都将疲劳作为路面结构的重要设计指标. 研究表明^[1], 沥青是影响路面沥青混合料抗疲劳性能最为关键的因素.

如何评价沥青的抗疲劳性能是一个难题. 材料的抗疲劳性能通常采用小梁试件的重复加载弯拉试验进行直接评价, 该方法对于沥青这种在常温下难以保持规则梁体形状的材料是无法实施的, 因此, 对于沥青的抗疲劳性能评价一度缺少可靠的方法. 直

至 20 世纪 90 年代, 研究人员开始将流变学和损伤理论用于沥青疲劳性能的评价, 取得了不小的进展, 典型的是美国 NCHRP 9-10 项目中提出的沥青动态剪切流变仪 (dynamic shear rheometer, 简称 DSR), 基于动态剪切流变试验的沥青疲劳评价指标包括动态剪切流变试验疲劳因子、“时间-扫描”试验重复剪切疲劳作用下复合模量降低到 50% 初始模量时的荷载作用次数、耗散能变化率等. 研究表明^[1], 这些参数反映疲劳性能的可靠性参差不齐且影响因素复杂, 通过对不同类型沥青的动态剪切流变试验、“时间-扫描”试验以及沥青混合料的疲劳试验对比,

收稿日期: 2011-09-15.

基金项目: 交通运输部西部交通科技资助项目(200831800099).

作者简介: 白琦峰(1977—), 男, 工程师, 主要从事路面技术等方面的研究, E-mail: chevenby@163.com.

分析用于评价沥青疲劳性能的合理指标。

1 研究方案

1) 沥青动态剪切流变试验和“时间-扫描”试验

动态剪切流变试验和“时间-扫描”试验都采用动态剪切流变仪进行, 沥青试样为直径 8 mm 厚 2 mm 的圆形试验样品。以一定的加载频率(速率), 通过扭矩施加正弦振荡负载, 得到加载过程中的复数模量、相位角等试件黏弹性参数。

2 种试验的主要差异在于动态剪切流变试验通过 10 个周期加载确定试样的复合模量(G^*)和相位角(δ), 而“时间-扫描”试验则循环施加动态剪切作用, 直至试件剪切破坏, 得到每次加载循环的 G^* 和 δ 等参数。

在 2 种试验中, 综合动态剪切流变试验、沥青“时间-扫描”试验及沥青混合料疲劳试验的试验温度采用 20 °C; 为尽量反映工程实际中老化的影响, 试验采用老化后的沥青样品, 根据试验 AASHTO T315-04 规程, 对于 PAV 老化后的样品, 动态剪切流变试验采用的剪应力为 50 kPa, 加载速率采用 10 rad/s; “时间-扫描”试验中, 加载频率采用 10 Hz, 根据文献[1], 加载应变采用 0.02。

试验样品包括 70 号和 90 号道路石油沥青以及采用这 2 种基质沥青改性的 SBS 改性沥青和 SBR 改性沥青(改性剂掺量为 4%), 为增加覆盖面, 还包

括基质沥青采用 70 号沥青的橡胶改性沥青(改性剂分别采用 20 目和 40 目货车轮胎橡胶粉, 掺量为 18%), 共计 8 种沥青, 限于篇幅, 具体技术指标不再列出。

2) 沥青混合料疲劳试验

沥青混合料疲劳试验采用四点小梁试验, 试件尺寸为 380 mm × 50 mm × 65 mm (长 × 宽 × 高), 以 10 Hz 施加正弦荷载, 控制应变方式, 根据常用的混合料疲劳试验应变水平, 控制应变采用 2×10^{-4} , 试验温度采用 20 °C, 试验装置见图 1 所示。

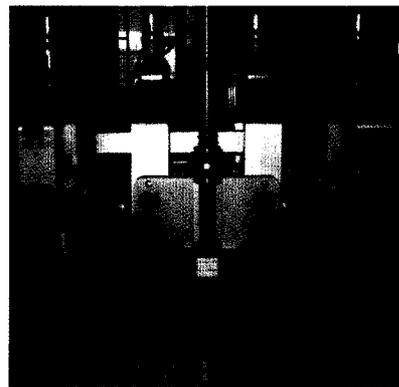


图 1 沥青混合料四点梁疲劳试验

Fig. 1 Four point bending fatigue test of asphalt mix

沥青混合料试验采用 AC13 型沥青混合料, 以上 8 种沥青的混合料的级配、沥青用量相同。混合料级配及主要的参数见表 1 和表 2。

表 1 疲劳试验沥青混合料 AC-13 的级配组成

Table 1 Mix formula of AC-13 used in fatigue test

混合料类型	筛孔/mm									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100.0	96.2	75.4	48.3	32.4	21.2	17.4	13.7	12.1	6.1

表 2 疲劳试验沥青混合料 AC-13 马歇尔试验结果

Table 2 Marshall test result of AC-13 mix used in fatigue test

指标	油石比/ %	毛体积相 对密度	最大理论 相对密度	空隙率/ %	稳定度/ kN	流值/ 0.1 mm	矿料间隙 率/%	饱和度/ %
试验结果	5.0	2.490	2.612	4.7	14.27	32.2	14.9	68.8

2 沥青胶结料的流变学试验

2.1 动态剪切流变试验

动态剪切试验可得到沥青 G^* 和 δ , $G^* \sin\delta$ 为损失剪切模量, $G^* \sin\delta$ 越大则加载过程中试件的能量

损失越快, 研究认为^[2], 损失的能量与试件在加载过程中的疲劳损伤有直接联系; $G^* \sin\delta$ 越小则疲劳损伤发展越慢, 疲劳性能越好, $G^* \sin\delta$ 又称为沥青胶结料的疲劳因子。试验结果见表 3 所示。

表3 不同沥青的动态剪切流变试验结果

Table 3 Results of DSR test of deferent kinds of asphalt

种类	试件个数	G^* /MPa	δ	$G^* \sin\delta$ /MPa	变异系数/%
70号石油沥青	3	2.442	66.1	2.233	7.6
90号石油沥青	3	1.544	69.3	1.444	8.8
SBS改性沥青(70)	3	1.227	67.2	1.131	5.3
SBS改性沥青(90)	3	1.129	69.7	1.059	5.4
SBR改性沥青(70)	3	1.208	58.6	1.031	3.9
SBR改性沥青(90)	3	0.766	61.4	0.672	10.9
橡胶沥青(20目)	3	2.907 1	52.8	2.316	15.6
橡胶沥青(40目)	3	1.680 9	55.4	1.384	17.9

注:括号内为改性沥青所有基质沥青的标号或者橡胶沥青所用胶粉细度.

2.2 沥青“时间-扫描”试验结果

通过“时间-扫描”试验中不同指标分析沥青的疲劳性能.

1) 模量衰减指标

疲劳寿命通常定义为试件模量衰减到初始模量50%时对应的荷载作用次数,简称为 N_{50} (次),该指标是经验性的指标,与试件实际疲劳破坏状态之间的关系不够明确^[2].

2) 耗散能指标

“时间-扫描”试验循环加载过程中,耗散能的表达式为

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta \quad (1)$$

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 i 次加载时的应变; δ 为疲劳试验的相位角.

耗散能指标是分析疲劳试验的另一思路^[2-5],以疲劳试验过程中的能量耗散与疲劳损伤的转换为基本理论支撑.一些研究中采用耗散能变化率(D)判断疲劳破坏的状态,耗散能变化率的表达式为

$$D = \frac{W_i - W_{i+1}}{W_i} \quad (2)$$

研究表明^[2],耗散能变化率对应力控制模式有效,但对应变控制模式,由于耗散能变化率数据十分离散,难以找到确定疲劳破坏的反弯点,该指标无效,本研究也得到了类似的现象,以90号沥青为例,试验得到的耗散能变化率与加载次数关系如图2所示.

Rowe等^[6]在研究沥青混合料的疲劳性能时,提出了简化能量耗散率(reduced dissipated energy ratio,简称RDR)的概念.

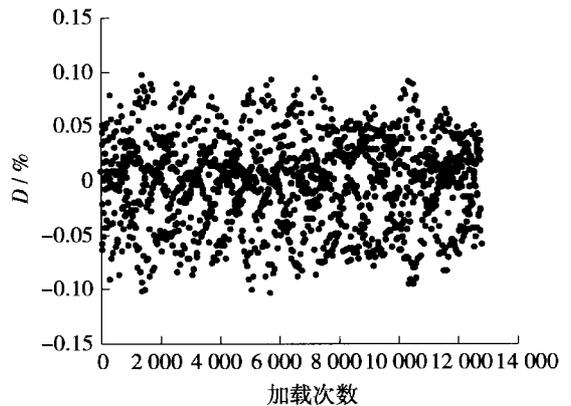


图2 耗散能变化率与加载次数关系

Fig.2 Relation of cycles VS dissipated energy ratio

$$R = i \cdot G_i^* \quad (3)$$

式中: R 为简化能量耗散率,GPa; i 为荷载作用次数; G_i^* 为第 i 次作用时的复数模量值,GPa.

混合料疲劳试验过程中,试件的破坏可以分为4个阶段^[7]:内部热量积累→微裂缝形成→裂缝出现→试件破坏,定位裂缝出现为疲劳破坏的标准,此时,简化能量耗散率与荷载作用次数的关系曲线出现峰值.作者尝试将这一原理用于沥青混合料疲劳分析的指标,用于沥青“时间-扫描”试验分析.图3以70号道路石油沥青的“时间-扫描”试验为例,汇出了其加载次数与简化能量耗散率的关系图,可见二者曲线峰值明显,能清晰地定义疲劳寿命.以下便于表述,将以简化耗散能方式得到的疲劳寿命称为 N_R (次).

8种沥青材料“时间-扫描”试验疲劳寿命见表4所示.

对于前6种沥青,“时间-扫描”试验中3个试

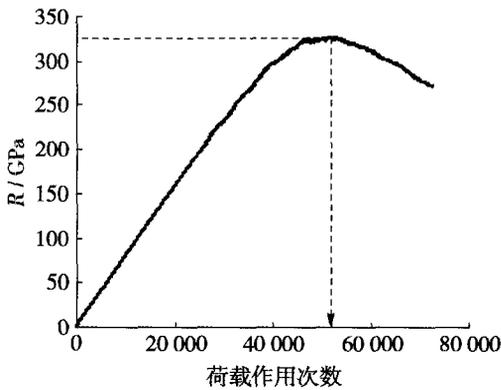


图 3 荷载作用次数与简化能量耗散率

Fig.3 Relation of cycles and reduced dissipated energy ratio

件的变异系数整体都在 20% 以下, 而对于橡胶沥

表 4 不同沥青“时间-扫描”试验确定的疲劳寿命

Table 4 Fatigue life of deferent kinds of asphalt with time-sweep test

沥青种类	试件个数	N_{50} 试验		N_R 试验	
		N_{50} /次	变异系数/%	N_R /次	变异系数/%
70 号石油沥青	3	72 427	5.7	54 411	2.9
90 号石油沥青	3	115 882	16.3	108 278	16.6
SBS 改性沥青(70)	3	235 759	15.2	189 228	14.3
SBS 改性沥青(90)	3	259 334	11.9	193 013	12.1
SBR 改性沥青(70)	3	190 964	12.6	141 921	12.9
SBR 改性沥青(90)	3	207 467	6.9	140 899	8.3
橡胶沥青(20 目)	3	147 849	35.2	408 525	33.5
橡胶沥青(40 目)	3	470 316	39.6	335 218	32.6

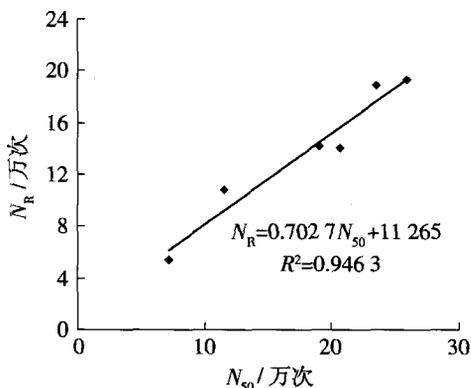


图 4 沥青“时间-扫描”试验疲劳寿命 N_{50} 与 N_R 的相关关系

Fig.4 Relation of N_{50} and N_R in asphalt time-sweep test

3 沥青混合料的疲劳试验

沥青混合料疲劳试验的分析思路与沥青的时间

青, 试验的变异系数明显大于其他沥青类型, 表 3 中动态剪切流变试验也表现出类似的规律. 40 目和 20 目橡胶粉最大的粒径分别为 1.18 mm 和 0.6 mm, 根据动态剪切流变试验的试验规程, 改性剂的最大粒径不得大于 0.25 mm, 本次试验进一步验证了对于橡胶沥青此类改性剂粒径较大的改性沥青, 不适于以“时间-扫描”试验评价性能. 为此, 后续的试验及分析中剔除了橡胶沥青的相关数据.

按照模量衰减 50% 确定的疲劳寿命(简称 N_{50}) 与按照简化能量耗散率指标得到的疲劳寿命(简称 N_R) 关系如图 4 所示, 可见二者具有较高的关联性, 相关系数达到 0.90, 而大部分试件在模量衰减达到 50% 之前已经开始出现了疲劳破坏, 说明采用模量指标 N_{50} 在一定程度上可能会高估沥青的疲劳性能.

扫描试验相近, 仍采用模量指标和简化耗散能指标, 试验结果如表 5 所示, 由于沥青混合料疲劳试验误差较大, 为提高试验结果的代表性, 试验过程中如果每组试验的变异系数大于 30%, 则剔除差别较大的试件, 增加试件, 直至变异系数满足要求. 按 2 种指标分析得到的疲劳寿命关系曲线如图 5 所示, 二者相关系数较高, 但整体而言, 按照模量指标确定的疲劳寿命小于按照耗散能指标确定的疲劳寿命, 表明按前者评价可能会低估混合料的抗疲劳能力.

4 沥青与沥青混合料疲劳性能指标对比

4.1 沥青动态剪切流变试验与“时间-扫描”试验结果对比

沥青动态剪切流变试验疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 与“时间-扫描”试验沥青分别由模量指标和简化耗散能指标确定的疲劳寿命 (N_{50} 和 N_R) 的关系如图 6 所示. 可见, 沥青动态剪切流变试验疲劳因子与“时间-

表5 不同沥青类型混合料的疲劳寿命
Table 5 Fatigue life of mixture with deferent kinds of asphalt

沥青种类	试件个数	N_{50} 试验		N_R 试验	
		N_{50} /次	变异系数/%	N_R /次	变异系数/%
70号石油沥青	3	43 167	22.8	56 701	23.3
90号石油沥青	3	141 000	29.6	176 503	28.4
SBS改性沥青(70)	3	160 500	25.9	199 668	27.1
SBS改性沥青(90)	3	192 600	10.2	223 628	14.6
SBR改性沥青(70)	3	112 350	29.3	143 761	25.8
SBR改性沥青(90)	3	144 450	17.0	165 485	18.5

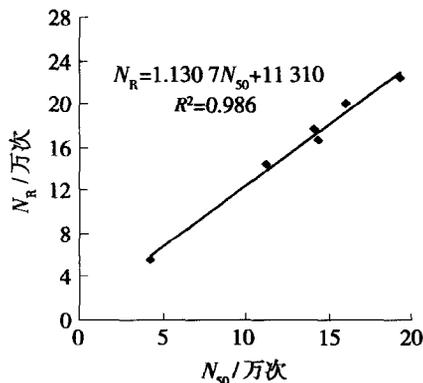
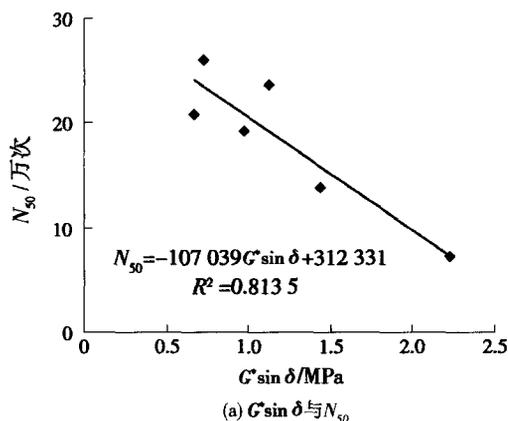


图5 沥青混合料疲劳试验疲劳寿命 N_{50} 与 N_R 的相关关系

Fig. 5 Relation of N_{50} and N_R in mixture fatigue test

扫描”疲劳寿命之间存在一定的相关性,整体趋势表明,沥青在动态剪切流变试验中的疲劳因子越小,则时间-扫描试验中的疲劳寿命就越长,一定程度上表明以耗散能($G^* \sin \delta$ 为加载中耗散的能量)的角度分析沥青的抗疲劳性能是可行的,但动态剪切流



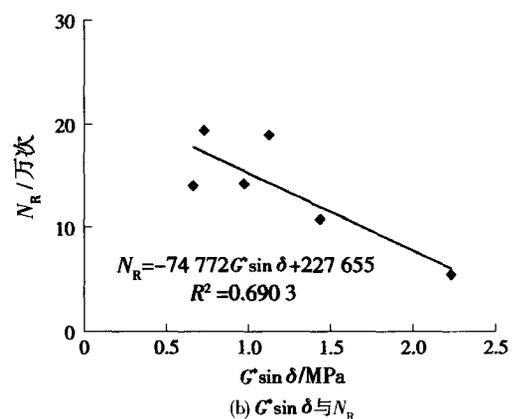
(a) $G^* \sin \delta$ 与 N_{50}

变试验 10 次加载中所获取的试件耗散能信息,难以全面反映沥青经历几万、乃至几十万次疲劳荷载作用过程中的材料状态^[8],因此,二者仍有相当的差异,例如对于 SBR(90)改性沥青和 SBS(90)改性沥青,二者反映出的疲劳性能对比是相反的。

4.2 沥青疲劳性能指标与沥青混合料疲劳寿命的相关分析

沥青疲劳性能与混合料疲劳寿命的相关关系见图7,沥青动态剪切流变试验疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 与沥青疲劳寿命相关性最低,相关系数 R^2 只有 0.6 左右,远低于沥青“时间-扫描”试验指标,说明与动态剪切流变试验相比,“时间-扫描”试验更能反映沥青材料的疲劳性能。

可从以下 2 个方面理解:首先从试验过程来看,动态剪切流变试验以在试样处于线黏弹性状态下加载 10 次获取疲劳因子^[9-10],此时试样处于线黏弹性状态,尚未进入疲劳损失累计阶段,而“时间-扫描”试验中,试件经历“疲劳损失累计-微裂缝产生-疲劳破坏”的整个过程,其涵盖沥青疲劳过程更多



(b) $G^* \sin \delta$ 与 N_R

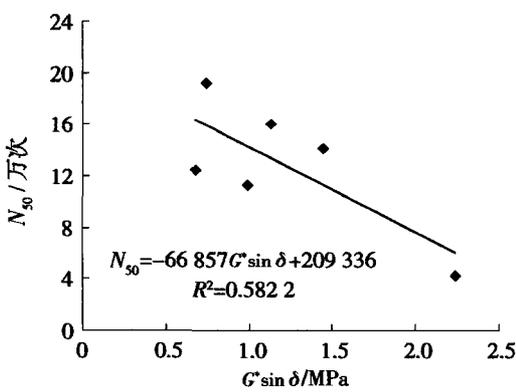
图6 沥青动态剪切流变试验疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 与“时间-扫描”试验疲劳寿命的相关关系

Fig. 6 Relation of $G^* \sin \delta$ of DSR test and fatigue life of time-sweep test

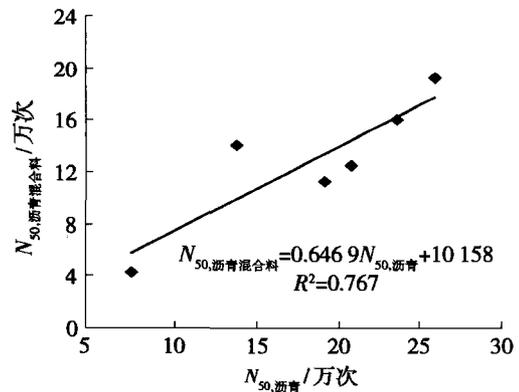
的信息,因而更能准确地反映沥青疲劳状态. 另外,从评价指标来看,动态剪切流变试验疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 反映的是 1 次加载过程中试样的耗散能量,耗散能转化为试验过程中的热量及损伤累计、机械振动等, $G^* \sin \delta$ 越大,则循环加载中疲劳损伤的积累越迅速,但由于沥青类型不同,疲劳损伤到裂缝出现过程中所需要吸收的总的能量是不同的,一些沥青试验虽然疲劳损伤积累较快,但由于其“强度”较高,疲劳破坏耗散的能量较多,仍然可能表现出较好的疲劳寿命,尤其是对于改性沥青,由于改性剂对沥青疲劳破坏状态的发展有显著的影响,采用单次加载的能量耗散分析材料总的疲劳寿命误差会更大,

以表 4 和表 5 中的 SBS 改性沥青和 SBR 改性沥青为例,SBS 改性的 70 号沥青和 90 号沥青的疲劳因子比 SBR 改性的 70 号沥青和 90 号沥青要大,按照疲劳因子的定义,前者混合料的疲劳寿命应小于后者,但测试结果却相反.

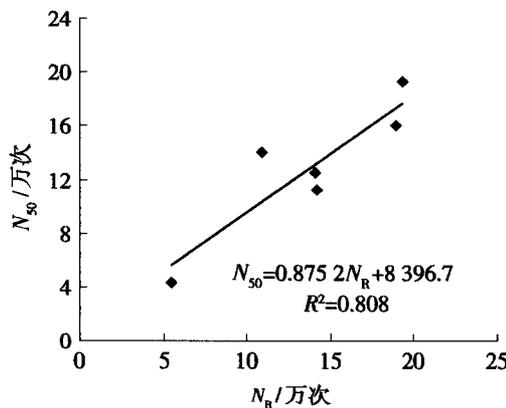
同时,由图 7(b) 和图 7(c) 可知,对于沥青“时间-扫描”试验, N_{50} 与沥青混合料疲劳寿命的相关系数要低于 N_R 与沥青混合料疲劳寿命的相关系数. N_{50} 是经验指标,与试样的疲劳破坏缺乏联系,而 N_R 更能反映试样疲劳破坏过程中由微裂缝产生到裂缝出现的一般过程和规律,因而能更加准确地反映沥青的疲劳性能^[11].



(a) 沥青疲劳因子与混合料疲劳寿命



(b) 沥青疲劳寿命与混合料疲劳寿命



(c) 沥青疲劳寿命与混合料疲劳寿命

图 7 沥青疲劳性能指标与沥青混合料疲劳寿命的对比关系

Fig. 7 Relation of asphalt fatigue resistance parameters and mix fatigue life

5 结论

1) 由于试验模式难以全面反映沥青的疲劳破坏过程,且试验指标与疲劳寿命间缺少足够的理论联系,因此用沥青动态剪切流变试验的疲劳因子评价沥青疲劳性能存在精度不足的情况,尤其对于改

性沥青,其评价效果更差;

2) 沥青动态剪切“时间-扫描”试验反映沥青疲劳破坏的全过程,更适于评价沥青疲劳性能,但不适于橡胶沥青等改性剂粒径较大的改性沥青;

3) 将原用于沥青混合料疲劳试验分析的简化耗散能用于沥青“时间-扫描”试验分析,表明该指

标可行,且以该指标确定的疲劳寿命,比以模量衰减至初始模量的50%时的荷载作用次数确定疲劳寿命更为合理.

参考文献:

- [1] BAHIA H U, HANSON D I, ZENG M. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2001: 49-50.
- [2] 张婧娜, 朱希岭, 张肖宁. 沥青混合料的疲劳损伤研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(5): 106-112.
ZHANG Jing-na, ZHU Xi-ling, ZHANG Xiao-ning. Research on fatigue damage of bituminous mixtures [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(5): 106-112. (in Chinese)
- [3] 朱宏洲, 黄晓明. 一种新的沥青混合料疲劳性能评价方法[J]. 公路交通科技, 2005(2): 4-6.
ZHU Hong-zhou, HUANG Xiao-ming. Fatigue model of asphalt mixtures based on damage theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005(2): 4-6. (in Chinese)
- [4] SHEN Shi-hui, SAMUAL H C. Application of dissipated energy concept in fatigue endurance limit testing [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2005.
- [5] GHUZLAN K A, CARPENTER S H. Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing [C] // 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: Transportation Research Board, 2000: 141-149.
- [6] ROWE G M, BOELDIN M G. Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixture [C] // 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona, Spain; Norwegian Asphalt Contractors Association, 2000: 136-139.
- [7] PRONK A C. Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase [R]. Delft, Netherlands: Road and Hydraulic Engineering Division, Public Works and Water Management of the Netherlands, 1995: 96-100.
- [8] CARPENTER S H, JANSEN M. Fatigue behavior under new aircraft loading conditions. aircraft/pavement technology [C] // Proceedings of Airfield Pavement Conference. New York; American Society of Civil Engineers, 1997: 259-277.
- [9] BAHIA H U, ZHAI H, KOSE S, et al. Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999(68): 1-34.
- [10] ZENG M, BAHIA H U, ZHAI H, et al. Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001(70): 85-90.
- [11] BAHIA H U, ZENG M, NAM K. Consideration of strain at failure and strength in prediction of pavement thermal cracking [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2000(69): 497-501.

(责任编辑 郑筱梅)