

浇注式沥青混凝土疲劳寿命的能量法

张 华^{1,2}, 钱觉时¹, 吴文军², 张 锋², 郝增恒²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆 400060)

摘 要:根据应变控制模式下的4点弯曲疲劳试验方法,用能量法研究了浇注式沥青混合料抗疲劳性能。通过多个应变水平下的疲劳试验,得出浇注式沥青混凝土的疲劳寿命与累积耗散能在双对数坐标下的线性关系。并回归出了浇注式沥青混合料在不同应变水平下疲劳寿命预测方程。用Maxwell模型分析了浇注式沥青混合料疲劳破坏与能量耗散的关系,并将滞后回线和滞后角引入到浇注式沥青混合料疲劳性能研究中,得出滞后角大的混合料有更好的抗疲劳性能。

关键词:浇注式沥青混合料;能量法;累积耗散能;疲劳特性;Maxwell模型;滞后角

中图分类号:TU528.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)04-0135-06

Fatigue Life Analysis of Gussasphalt Concrete Based on Energy Method

ZHANG Hua^{1,2}, QIAN Jue-shi¹, WU Wen-jun², ZHANG Feng², HAO Zeng-heng²

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Zhixiang Paving Technology Engineering Co., Ltd. Chongqing 400060, P. R. China)

Abstract: The fatigue resistance of Gussasphalt mixture was analyzed with energy method after four-point flexural fatigue test under multiple strain levels. Through the fatigue test under multiple strain levels, the linear relationship was obtained between fatigue life and cumulative dissipated energy in log-log plot. And the equation for fatigue life prediction under different strain levels was also regressed. Besides, the relation between fatigue damage and dissipated energy of Gussasphalt mixture was analyzed with Maxwell model. And with the conceptions of hysteresis loop and phase angle, it is found that the mixture with bigger phase angle has better fatigue resistance.

Key words: Gussasphalt mixture; energy method; cumulative dissipated energy; fatigue property; Maxwell model; phase angle.

浇注式沥青混凝土(Gussasphalt 简称为GA)是按照施工工艺分类标准确定的一种沥青混凝土,结构上属于悬浮密级配。它的特点是在施工温度(220~240℃)条件下,沥青混合料呈流淌状态,一般不需要碾压,只需用简单的摊铺整平机具即可完成施工,并能达到规定的密实度和平整度。浇注式沥青混凝土本身具有拌和温度高、矿粉含量高、沥青含

量高以及拌和时间长等特点^[1]。它与热压沥青混凝土不同的是其空隙率很小,而且内部空隙不连续,由于整体性强,层内不存在水损害、老化等病害^[2]。目前已在安徽安庆大桥、山东胜利黄河大桥、重庆菜园坝大桥和重庆朝天门大桥等近20座钢桥面铺装中得到应用。

在国外浇注式沥青混凝土一般具有15~20 a

收稿日期:2009-12-21

基金项目:西部交通建设科技项目(2002-318-000-30)

作者简介:张华(1973-),男,博士,主要从事路桥工程研究,(E-mail)a13983192599@163.com。

钱觉时(联系人),男,教授,博士生导师,主要从事建筑材料研究,(E-mail)qianjueshi@163.com。

的使用寿命,由于中国使用条件的特殊性,在应用中并未充分发挥出优异的疲劳性能。疲劳性能不足不仅危及到行车的安全,还影响钢桥面板的使用寿命,同时还严重影响浇注式沥青混凝土作为一种优良的桥面铺装材料在国内的推广应用^[3]。所以深入研究浇注式沥青混凝土疲劳性能有重要的学术价值和意义。人们认识和研究疲劳已经有百多年的历史了。在疲劳问题提出的同时,人们就已注意到了疲劳过程中能量耗散现象。沥青混合料的疲劳破坏是材料在荷载重复作用下产生不可恢复的强度衰减累积所引起的一种现象,近年来,能耗法广泛用于处理沥青混合料的疲劳响应问题。根据 Van Dijk 等人的研究,沥青混合料的疲劳强度主要取决于损、耗模量和应力应变循环过程中的能耗^[4]。这一方法的主要特点是疲劳试验中的总能耗和循环荷载的重复作用次数之间存在着某一特定关系。1987 年 Shell 路面设计手册引入能耗的概念,作为预测沥青混合料疲劳寿命的方法^[5]。SHRP 研究人员也采用能量法研究沥青混合料的疲劳相应问题^[6]。因此,能量法已是分析沥青混合料疲劳特性的有效方法之一,用能量法分析研究浇注式沥青混合料疲劳特性。

1 耗散能理论在预测沥青混合料疲劳寿命中的运用

疲劳是指材料在循环变化的应力或应变作用下的一个力学过程。在交变应力或交变应变的循环作用下,材料因塑性变形周而复始的耗散能量^[7-8]。加载过程中应力—应变曲线与卸载过程的应力—应变曲线形成收尾相接的一个迟滞回环,通常称为滞后环线。由于沥青混合料的粘弹性,在四点小梁弯曲疲劳试验中,当试件承受一个重复呈正弦变化的应力 $\sigma \sin \omega t$ 或应变 $\xi \sin \omega t$,则它会以同样的频率 ω 产生一个相位角为 φ 的 $\xi \sin(\omega t + \varphi)$ 应变或 $\sigma \sin(\omega t + \varphi)$ 应力响应。 φ 是相位角,也叫滞后角或耗散角。这个过程可以用图 1 表示。

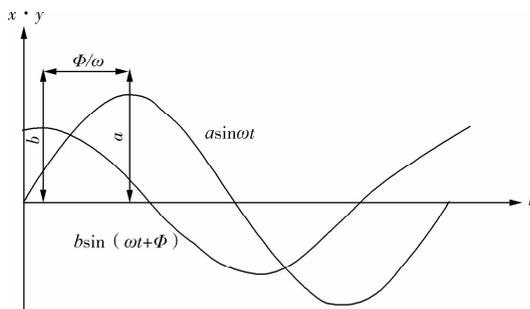


图 1 应力和应变相应曲线

在一个周期内消去时间参数 ω 后,可以得到应力应变的滞后回路方程,即:

$$\frac{x^2}{\sigma^2} + \frac{y^2}{\xi^2} - \frac{2 \cos \varphi}{\sigma \xi} x y = \sin^2 \varphi \quad (1)$$

由于沥青混合料是一种典型的粘弹性材料,单个应力或应变周期消耗的能量可以通过应力应变的滞后回路的面积来决定。在整个疲劳寿命过程中各个循环的能量损耗累积即为累积耗散能,累积耗散能是所有滞后回路的面积之和^[9],即

$$W_f = \sum_{i=1}^{N_f} W_i = \sum_{i=1}^{N_f} \pi \sigma_i \xi_i \sin \varphi_i \quad (2)$$

式中 W_f 为达到疲劳破坏时的累积能耗; W_i 为第 i 次荷载时的能耗; σ_i 、 ξ_i 分别为第 i 次荷载产生的应力和应变幅值; φ_i 为第 i 次荷载重复作用次数。

试验研究表明,不同应力或应变水平下沥青混合料的疲劳寿命 N_f 和达到疲劳破坏时的总的累积能耗 W_f 可以表达为

$$W_f = A N_f^z \quad (3)$$

在同一应力或应变水平下沥青混合料的疲劳寿命 N_f 和达到疲劳破坏时的累积能耗 W_f 也可以表达为

$$W_f = A' N_f^{z'} \quad (4)$$

由于常规的疲劳试验,只能是控制应力或控制应变的,因此,为了建立相应的疲劳方程, Van Dijk 引入了一个能量比系数 $\Psi = \frac{N_f W_0}{W_f}$ 。

由初始能耗 W_0 、总的累积能耗 $N_f W_0$ 和 W_f 及其相应的能量比系数 Ψ ,可以预测疲劳寿命 N_f ,其公式为:

$$N_f = \left(\frac{A \Psi}{W_0} \right)^{\frac{1}{1-z}} \quad (5)$$

式中, A 、 z 、 A' 、 z' 为试验确定的系数。

2 疲劳试验方案

2.1 疲劳试验模式

采用应变控制模式下 4 点弯曲疲劳试验,具体试验参数为试验温度:15℃;加载波形:Haversine(偏正弦波);加载频率:10 Hz;试件尺寸:385 mm×65 mm×50 mm。试验中,当试件劲度模量降低到初始劲度模量的 50% 时,认为试件达到疲劳破坏。

2.2 胶结料和级配

选择了有代表性的 3 种改性沥青,分别为中国常用于拌和浇注式沥青混合料的 SBS 改性沥青、德国 Pmb25 改性沥青和智翔公司研发用于拌和浇注式混合料的聚合物改性沥青(ZX-asphalt)。性能指标见表 1。

表 1 改性沥青性能指标

技术指标	PmB25	改性 sk70	ZX-asphalt
针入度(25℃,0.1 mm)	21.1	34.4	28.0
软化点(℃)	74.5	89	92
延度(10℃,cm)	15.6	35.7	46
旋转粘度(cp,135℃)	2 397.5	42 25.9	4 462.5

级配选择了 GA-10,因为 GA-10 内部空隙率不足 1%,且分布相对较均匀,所得到的试验结果

表 2 浇注式沥青混凝土设计级配

孔径/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配	100	99.2	72.5	53.5	45.9	37.1	31.0	29.1	26.8
级配范围	100	80~100	63~80	48~63	38~52	32~46	27~40	24~36	20~30

表 3 浇注式沥青混凝土的能耗参数

浇注式胶结料种类	应变水平	循环加载次数	W_0 /MPa	$W_f = \sum_{i=100}^{N_f} W_i$ /MPa
Sk 改性沥青	700	1255 270	8.036	6 176.043
	900	615 710	8.138	4 388.316
	1 100	328 740	8.421	1 736.560
	1 300	53 600	15.830	495.371
ZX-asphalt 改性沥青	700	1 513 560	7.554	6 666.221
	900	783 470	8.483	4 433.367
	1 100	694 490	8.596	3 784.074
	1 300	437 860	9.381	2 679.470
Pmb25 改性沥青	700	173 860	11.273	1 231.107
	900	116 790	11.830	897.631
	1 100	71 240	12.736	508.752
	1 300	63 270	13.865	586.431

将表 3 中的试验结果按 4 式进行回归得到浇注式沥青混合料在同一应变水下的疲劳寿命 N_f 和达到疲劳破坏时的总的累积能耗 W_f 相对应的回归系

相对比较稳定,有利于试验结果的评价,见表 2。

3 疲劳试验结果与分析

3.1 试验结果

为保证试验数据的可靠性和统计分析需要,每一应变水平下的平行试验次数均进行 4 次,即 3 种浇注式沥青混合料共进行了 48 次 4 点弯曲疲劳试验,结果见表 3。

数见表 4。

初始能耗: W_0 ; 累积耗散能: W_f ;

表 4 不同应变水平和同一应变水下浇注式沥青混合料的累积耗散能 W_f 与循环加载作用次数 N_f 的回归结果

胶结料类型	应变水平	$W_f = AN_f^Z$			$W_f = A'N_f^{Z'}$		
		A	Z	R^2	A'	Z'	R^2
Sk 改性沥青	700	0.059 0	0.876 0	0.977 2	0.000 3	1.181 1	0.995 1
	900				0.005 4	1.120 9	0.998 1
	1 100				0.001 6	1.109 1	0.997 2
	1 300				0.006 6	1.125 4	0.991 7
ZX-asphalt 改性沥青	700	0.195 1	0.935 0	0.980 3	0.001 3	1.157 3	0.996 0
	900				0.000 4	1.194 3	0.997 0
	1100				0.005 5	1.132 6	0.994 3
	1300				0.000 6	1.175 9	0.996 0

续表 4

胶结料类型	应变水平	$W_f = AN_f^Z$			$W_f = A'N_f^{Z'}$		
		A	Z	R ²	A'	Z'	R ²
Pmb25 改性沥青	700	0.049 5	0.878 4	0.938 8	0.002 1	1.100 3	0.991 0
	900				0.001 3	1.149 6	0.997 2
	1 100				0.001 6	1.134 4	0.994 8
	1 300				0.002 5	1.114 9	0.995 4

图 2-4 是浇注式沥青混合料在双对数坐标下, 不同应变水平下累积耗散能 W_f 与荷载作用次数 N_f 的关系。

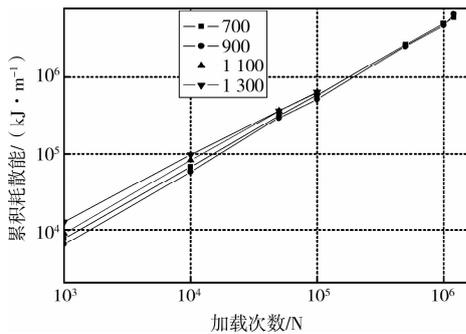


图 2 Sk 浇注式沥青混合料 W_f-N_f 关系曲线

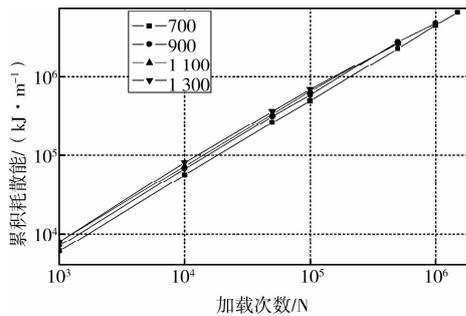


图 3 ZX-asphalt 浇注式沥青混合料 W_f-N_f 关系曲线

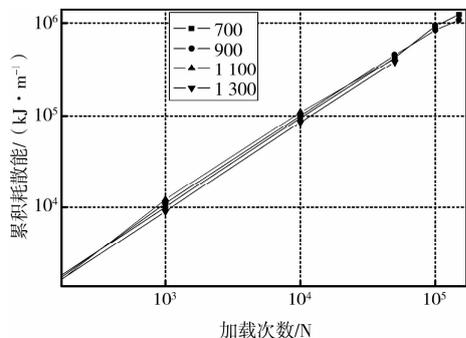


图 4 Pmb25 浇注式沥青混合料 W_f-N_f 关系曲线

沥青混合料的疲劳破坏是一个能量耗散的过程, 累积耗散能的大小直接反映混合料的疲劳寿命。由表 2-3 和图 2-4 表明:

1) 由表 4 知, 不同应变水平下浇注式沥青混凝土的疲劳寿命 N_f 和达到疲劳破坏时的累积耗散能

W_f 回归得到的相关系数相对较低, 而同一应变水平下回归相关系数非常高, 均在 0.99 以上, 这说明回归模型非常理想, 能够很好地表征浇注式沥青混合料累积耗散能与循环加载作用次数的关系。回归系数 A 和 A' 变化比较大, 说明回归系数 A 和 A' 与应变水平有关。系数 Z 和 Z' 均接近于 1, 可以认为与应变水平无关。

2) 浇注式沥青混合料的累积耗散能在双对数坐标下与加载循环次数呈现良好的线性关系;

3) Sk 改性沥青和 ZX-asphalt 改性沥青成型的浇注式沥青混合料循环加载次数分别达到了 120 和 150 万次; Pmb25 改性沥青成型的浇注式沥青混合料的疲劳寿命在不同应变水平下都比较差, 循环加载次数与前两种改性沥青成型的浇注式混合料的疲劳寿命甚至相差一个数量级。对试验结果分析知, 使用聚合物改性沥青可望提高抗疲劳强度;

4) 浇注式沥青混合料在较低应变水平下初始耗散的能量较少, 应变水平愈大, 则初始耗散的能量也愈大。由图 2-4 明显可以看出, 在低应变水平下累积的耗散能要比高应变水平下的多, 耗散能量原理表明累积的耗散能越多其抗疲劳性能则越好。

3.2 粘弹性能对浇注式沥青混合料疲劳性能的影响

粘弹性材料的疲劳破坏实际上是一个能量平衡的过程^[10]。在破坏过程中, 外力所做功一部分被作为弹性应变能储存, 一部分伴随流动变形作为热能被耗散。当弹性应变能累积到一定程度并超过材料的容许极限时, 材料将发生破坏^[11-12]。

试验表明, 麦克斯韦(Maxwell)模型^[13](见图 5)可以较好的反应沥青混合料的破坏模式与能量平衡的关系。

以一定的应变速度 ϵ 拉伸 Maxwell 元件, 记时刻 $t = t_0$ 时固定应变为常数, $\epsilon = \epsilon_0$, 此时元件内的应力记为^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1(t) &= \tau \epsilon (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) & (t \leq t_0) \\ \sigma_2(t) &= \tau \epsilon^2 (e^{-(t-t_0)} - e^{-\frac{t}{\tau}}) & (t \geq t_0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

输入给元件的总能量为:

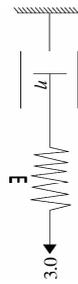


图 5 麦克斯维尔模型

$$\left. \begin{aligned} W_1(t) &= \int_0^t \sigma_1(u) \varepsilon(u) du = \\ &\eta^2 (t + \tau e^{-\frac{t}{\tau}} - \tau), t \leq t_0 \\ W_2(t) &= \int_0^t \sigma_2(u) \varepsilon(u) du = \\ &\eta^2 (t_0 + \tau e^{-\frac{t_0}{\tau}} - \tau) = \text{const}, t \geq t_0 \end{aligned} \right\} (7)$$

在这一元件中,损耗的能量仅与粘度有关,并可由下式计算得到:

$$W_D(t) = \int_0^t \sigma(t) \varepsilon_d(t) dt = \frac{1}{\eta} \int_0^t \sigma^2(t) dt \quad (8)$$

将 6 式代入上式,得到:

$$\left. \begin{aligned} W_D(t) &= \eta^2 [t + \tau(2 - \\ &0.5e^{-\frac{t}{\tau}})e^{-\frac{t}{\tau}} - 1.5\tau], t \leq t_0 \\ W_D(t) &= \eta^2 (t_0 + \tau e^{-\frac{t_0}{\tau}} - \tau - 0.5\tau e^{-2\frac{t-t_0}{\tau}} + \\ &\tau e^{-\frac{2t-t_0}{\tau}} - 0.5\tau e^{-\frac{2t}{\tau}}), t \geq t_0 \end{aligned} \right\} (9)$$

因此,损耗能量与输入的总能量之比 $R_r(t) =$

$\frac{W_D(t)}{W(t)}$ 为:

$$\left. \begin{aligned} R_r(t) &= 1 - \\ &\frac{(0.5 + 0.5e^{-2t_0/\tau} - e^{-t_0/\tau})e^{-2t/\tau}}{t/\tau + e^{-t/\tau} - 1}, t \geq t_0 \\ R_r(t) &= 1 - \\ &\frac{0.5e^{-2t/\tau} - e^{-t/\tau} + 0.5}{t/\tau + e^{-t/\tau} - 1}, t \leq t_0 \end{aligned} \right\} (10)$$

表 5 不同应变水平下的 GA-10、SMA-10 和 AC-10 的滞后角、累积耗散能和疲劳寿命

混合料类型	应变水平	循环加载次数	初始滞后角	破坏时滞后角	$W_f = \sum_{i=1}^{N_f} W_i / \text{MPa}$
GA-10 混合料	700	1 255 270	39.2	47.6	6 176.043
	900	615 710	41.6	44.5	4 388.316
	1 100	328 740	34.0	41.6	1 736.560
	1 300	53 600	31.5	37.8	495.371
SMA-10 混合料	700	177 460	32.5	40.1	577.931
	900	117 620	31.6	39.6	408.375
	1 100	55 940	31.2	37.8	171.595
	1300	45 220	26.7	33.9	144.822

由式 10 知,我们定义的能量损耗比仅与 2 个时间比 τ/t_0 和 τ/t 有关。当 t_0 一定时,能量损耗随着时间的增加而增加。如果假定材料在 $t = t_0$ 时破坏,即能量损耗仅与 t_0 和 τ 的比值有关。当 $t \leq t_0$ 时,材料呈弹性破坏;当 $t \geq t_0$ 时,输入的能量几乎都耗散与流动变形,材料呈粘性破坏。

从上面分析中可以看出,粘弹性对沥青混合料疲劳寿命有极其重要的影响,正是由于粘弹性的存在,疲劳试验中才会有迟滞现象发生,从而产生迟滞回线和滞后角。迟滞回线是描述材料循环加载特性的重要手段,它所包围的面积(见图 6)代表材料循环应变时消耗的能量,也表示材料抵抗循环变形的能力。滞后角是反映沥青混合料粘弹比大小的参数,滞后角越大,混合料越倾向于粘性,反之则越倾向于弹性。表 5 是 3 种沥青混合料在不同应变水平下的滞后角、累积耗散能和疲劳寿命。

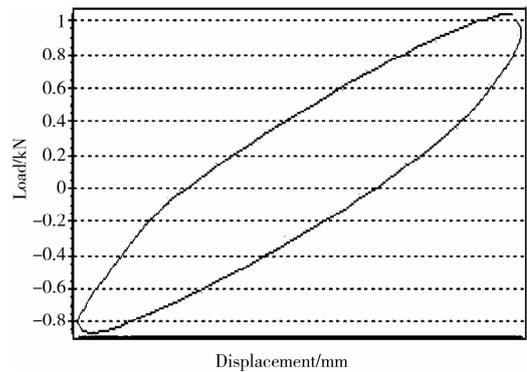


图 6 应力应变滞后回路

由表 5 可知,沥青混合料的滞后角愈大,则在循环加载中产生的累积滞后耗散能较多,可以认为,滞后耗散能越多则疲劳寿命越长。对于悬浮式结构的浇注式沥青混合料,沥青和矿粉是其各种荷载应力的承担主体,因浇注式沥青混合料的胶结料和矿粉含量很高,所以浇注式沥青混合料有非常好的韧性

续 5

混合料类型	应变水平	循环加载次数	初始滞后角	破坏时滞后角	$W_f = \sum_{i=100}^{N_f} W_i / \text{MPa}$
AC-10 混合料	300	74 850	27.3	33.6	219.715
	400	57 690	25.3	31.8	139.541
	500	10 830	26.7	34.1	48.951
	600	6 800	24.7	33.1	24.120

(自愈能力强)和较大的滞后角,从能量损耗的角度来看,滞后角度越大,则单次累积的塑性应变耗散能也越大,以致循环加载中累积滞后耗散能也越多,所以浇注式沥青混合料在应用中呈现出了优异的疲劳特性。

4 结语

通过应变控制模式下的小梁 4 点弯曲疲劳试验,结合能量法对用于钢桥面铺装的浇注式沥青混合料的疲劳特性进行了深入研究。通过多个应变水平下的疲劳试验,得出浇注式沥青混合料的疲劳寿命与累积耗散能在双对数坐标下存在良好的线性关系,使用聚合物改性沥青可以有效地提高抗浇注式沥青混合料的抗疲劳强度,在 700 微应变下加载次数均达到了百万次。浇注式沥青混合料在低应变水平下累积的耗散能要比高应变水平下的多。用 Maxwell 模型,将表征粘弹性特征的滞后回线和滞后角引入到浇注式沥青混合料疲劳性能研究中,得出混合料的滞后角愈大则疲劳寿命愈好。

参考文献:

- [1] 吴文军,张华,钱觉时. 浇注式沥青混凝土应用现状综述[J]. 公路交通技术,2009,6(3):59-62.
WU WEN-JUN, ZHANG HUA, QIAN JUE-SHI. Summarization of the research and application status of gussasphalt concrete[J]. Technology of Highway and Transport,2009,6(3):59-62.
- [2] 郝增恒,张肖宁,盛兴跃. 超热老化条件下改性沥青老化机理[J]. 建筑材料学报,2009,12(4):466-470.
HAO ZENG-HENG, ZHANG XIAO-NING, SHENG XING-YUE. Aging Mechanism of Modified Asphalt under Epithermal Conditions[J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):466-470.
- [3] 吴文军. 浇注式沥青混凝土疲劳特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [4] VAN DIJK, W. etal. The fatigue of bitumen and bituminous mixes[C]//3rdInternational conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London,

1972.

- [5] CASTRO M, SANCHEZ J A. Estimation of asphalt concrete fatigue curves-a damage theory approach[J]. Construction and Building Materials,2008,22(6):1232-1238.
- [6] 刘振清,洪锦祥,黄卫. 用能量法分析钢桥面沥青混合料铺装体系疲劳特性[J]. 公路交通科技,2005,22(9):94-97.
LIU ZHEN-QING, HONG JIN-XIANG, HUANG WEI. Energy approach to fatigue characteristic of steel bridges deck asphalt mixture surfacing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2005,22(9):94-97.
- [7] YE L. On fatigue damage accumulation and material degradation in composite materials[J]. Compos. Sci. and Technol,1989,(36):339-350.
- [8] FERRY J. Viscoelastic properties of polymer[M]. Wiley, New York, 1980:50-74.
- [9] 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,2006,27(2):23-25.
LIU WEI-MIN, HUANG XIAO-MING. Research on the fatigue life of asphalt concrete based on dissipated energy[J]. Journal of Henan University of Science and Technology,2006,27(2):23-25.
- [10] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [11] HYUN JONG LEE, Y RICHARD KIM, SEUNG WOO LEE. Fatigue life prediction of asphalt mixes using viscoelastic material properties [C]//Paper Prepared for Presentation at the 2003 Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2002.
- [12] Christensen R M. Viscoelastic properties of heterogeneous media[J]. J. Mech. Phys. Solids,1969,17:23-41.
- [13] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

(编辑 胡玲)