

文章编号: 0451-0712(2005)02-0116-03

中图分类号: U414.75

文献标识码: A

沥青混合料的温度疲劳损伤效应模拟研究

吕松涛, 田小革, 郑健龙

(长沙理工大学 长沙市 410076)

摘 要: 加载频率对沥青混合料的疲劳寿命影响较大, 根据低加载频率的疲劳试验来模拟材料的温度疲劳, 运用耗散能相关理论来分析沥青混合料的温度疲劳损伤, 并进行损伤力学的分析。

关键词: 沥青混合料; 耗散能; 低频; 疲劳损伤

沥青路面的疲劳破坏是路面工程中常见的一种病害, 近几十年来得到了国内外的广泛重视。它包括交通荷载作用下的疲劳和温度周期性作用下的疲劳。温度疲劳的加载频率比荷载疲劳的加载频率小得多, 温度疲劳的特点是周期长、频率低, 这是温度疲劳与荷载疲劳的一个明显不同的地方。目前大多研究的是材料的荷载疲劳特性, 其加载频率都比较高(0.1~10 Hz 等), 而对于低频疲劳的研究很少, 只有一些概念性的说明。已有文献表明低加载频率对材料的疲劳寿命影响较大, 对于沥青混合料而言, 其影响可能更显著, 因为在低频条件下, 其流变性表现得更加充分, 裂纹、裂缝的发生、发展有了充分的时间, 使材料的损伤表现得更加明显, 损伤的速率比较快, 在低频条件下其疲劳寿命要比高频的小^[1], 所以很有必要研究沥青混合料的温度疲劳特性。

Van Dijk 指出对于确定的沥青混合料, 无论是应力控制还是应变控制的疲劳, 疲劳寿命与相应的累计耗散能之间存在着唯一的对应关系^[2], 在疲劳的过程中损伤随着疲劳次数的增加而逐渐增加, 耗散能塑性应变也随着疲劳次数的增加而逐渐增加, 所以损伤、耗散能与塑性应变三者之间必然会有某种联系, 本文主要从损伤角度来分析沥青混合料的疲劳特性, 从而找出三者之间的关系。

1 沥青混合料的疲劳试验简介

1.1 试验仪器及材料

该试验仪器采用 MTS810 材料测试系统进行, 试件采用 50 mm×50 mm×240 mm 的梁式试件, 级

配采用《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97) 推荐的 AC16 I 级配范围的中值, 沥青用量根据马歇尔实验结果确定为 4.5%, 空隙率为 4%。

1.2 试验方法

该疲劳试验采用应力控制的直接拉伸疲劳试验方法, 荷载采用连续半正负荷载, 分别测定在不同温度下疲劳过程中的应力、应变及疲劳寿命, 试验温度分别为 10℃、5℃、0℃、-5℃、-10℃、-15℃、-20℃、-25℃, 加载频率为 0.001 Hz。本文只举例分析在某一温度下的疲劳损伤规律。

2 疲劳能耗及疲劳损伤分析

2.1 疲劳能耗分析^[3]

粘弹性材料的疲劳破坏过程是一个能量耗散的过程, 外力对材料所做的功可转化成如下形式的能量: (1) 作为弹性应变能被贮存; (2) 作为流动被消耗; (3) 裂纹发生、发展产生新表面时转化为表面能。

因为应变滞后于应力, 当沥青混合料受一个重复的正弦应力 $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ 作用时, 应变会以同样的频率 ω 产生一个 $\epsilon(t) = \epsilon_0 [\sin(\omega t + \varphi)]$ 的应变响应, φ 即为应变滞后于应力的相位角, 也叫耗散角。设定, $x = \sigma_0 \sin(\omega t)$, $y = \epsilon_0 [\sin(\omega t + \varphi)]$, 则经过一定的数学上的变换, 可求得应变滞后于应力的滞后回路方程如下:

$$\begin{aligned} & (x - \frac{\sigma_0}{2})^2 / (\frac{\sigma_0}{2})^2 + (y - \frac{\epsilon_0}{2})^2 / (\frac{\epsilon_0}{2})^2 - \frac{8 \cos \varphi}{\sigma_0 \epsilon_0} \\ & (x - \frac{\sigma_0}{2})(y - \frac{\epsilon_0}{2}) = \sin^2 \varphi \end{aligned} \tag{1}$$

该方程即为一个应力周期内应力、应变的滞后回路方程。

对于疲劳试验,在 MTS810 计算机中每个应力周期的应力、应变值都有记录,数据采集的时间间隔可根据具体的试验要求进行设定。应力应变曲线的示意图如图 1 所示。

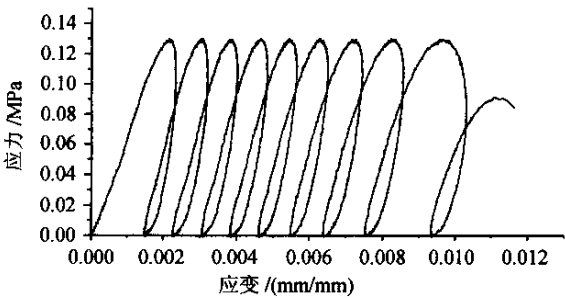


图 1 应力应变变化曲线

从图 1 可明显看出试验起始阶段,可认为是疲劳破坏过程的迁移阶段,由于存在迁移弹性变形及部分粘性变形,此时滞后环面积较大,滞后能较多。随着重复荷载作用次数的增加,滞后能逐渐变小并很快趋于稳定,进入疲劳破坏的稳定阶段。这一阶段的作用时间随应力水平及混合料类型不同而有很大差异。随着荷载作用次数的继续增加,沥青混合料疲劳由稳定阶段经破坏点向加速阶段扩展,滞后能随之增大,直至试件最后断裂。对于大多数试件来说,稳定阶段的滞后能占有相当大的比例,也就是说,滞后能在疲劳过程中很快趋于稳定,这个阶段也是疲劳损伤分析的重点。

每一个应力周期滞后回线的面积代表了该周期所消耗的能量。每个应力周期滞后回线的面积可采用下式求得:

$$\omega_i = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma(t)\epsilon(t)dt$$

(2)

在整个疲劳过程中,累计耗散能是所有滞后回路面积的总和,即达到破坏时的总能耗 W_F 为:

$$W_F = \sum_{i=1}^{N_F} \omega_i$$

(3)

式中: N_F 为达到破坏时的荷载重复作用次数,即通常所说的疲劳寿命; W_F 为达到破坏时的总耗散能,即累计耗散能。

W_F 为应力应变曲线中应力、应变曲线所围成的曲线的面积, W_F 的计算可由 Origin 软件中的求积分的功能求得

2.2 疲劳损伤分析

诸多文献指出,可用耗散能进行沥青混合料的疲劳分析,在疲劳的过程中损伤、耗散能、塑性应变都随着疲劳次数的增加而逐渐增加,直至破坏。所以损伤、耗散能、塑性应变三者之间必然会有某种联系,本文提出用分计耗散能来表示沥青混合料的疲劳损伤,即:

$$D_n = \frac{W_n}{W_F}$$

(4)

式中: D_n 表示荷载作用到第 n 次时的损伤; W_n 表示荷载作用到第 n 次时的耗散能,即分计耗散能 $W_n = \sum_{i=1}^n \omega_i$; W_F 为达到破坏时的总耗散能,即累计耗散能。

3 试验结果分析整理

3.1 试验结果

表 1 列出试件在 -15°C 条件下的试验结果。

表 1 沥青混合料的加载次数、对应的分计耗散能及损伤

加载次数 N	分计耗散能 W_n/kPa	损伤 D_n	加载次数 N	分计耗散能 W_n/kPa	损伤 D_n
1	0.145	0.102 11	6	0.728	0.512 68
2	0.256	0.180 28	7	0.866	0.609 86
3	0.368	0.259 15	8	1.03	0.725 35
4	0.483	0.340 14	9	1.27	0.894 37
5	0.602	0.423 94	10*	1.42	1

注:当第 10 次加载为半个循环时试件破坏,因此 $W_F=1.42\text{ kPa}$ 。

试验时损伤与加载次数的变化曲线如图 2 所示。试验时塑性应变 ϵ_p 随加载次数的变化如图 3 所示。

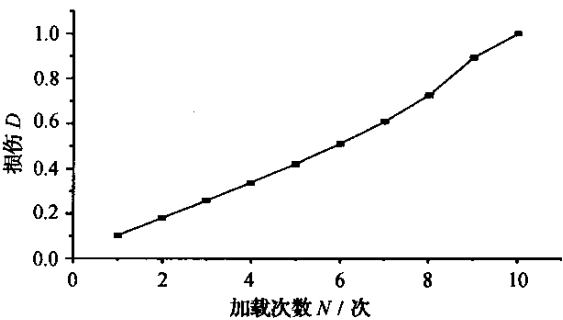


图 2 损伤随加载次数的变化曲线

由图 2 和图 3 可看出损伤、塑性应变在加载的初始循环阶段随加载次数的增大而稳定增加,表现出较好的线性变化关系,在试件即将破坏的前几个循环内,损伤、塑性应变的增长幅度迅速增大,直至试

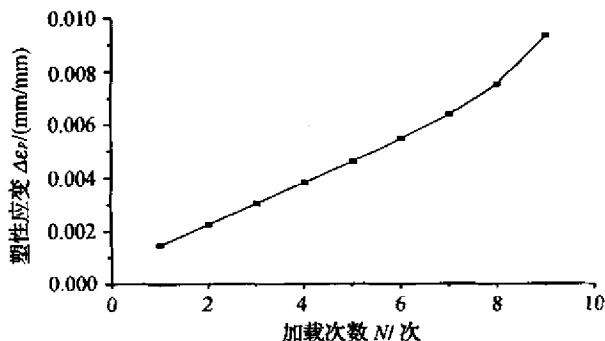


图3 塑性应变随加载次数的变化曲线

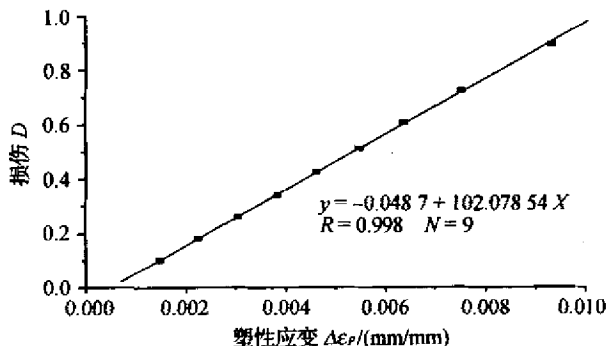


图4 损伤与塑性应变关系曲线

件破坏,粘弹性力学中曾指出材料的疲劳破坏分3个阶段即迁移阶段、稳定阶段、加速阶段^[3],该试验结果很好地证明了这一结论。

3.2 对试验结果的分析

在低频疲劳情况下(疲劳寿命低于 5×10^4 次),塑性变形变得很重要。此时可将每一载荷循环中的损伤表示为塑性应变 $\Delta\epsilon_p$ 的幂指数函数形式,即:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = f(\Delta\epsilon_p) = \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{C_1}\right)^{y_1} \quad (5)$$

积分上式,并利用 $N=0$ 时 $D=0$ 和 $N=N_F$ 时 $D=1$ 的条件,得出从损伤力学导出的疲劳寿命的Coffin—Manson关系式:

$$N_F = \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{C_1}\right)^{-y_1} \quad (6)$$

式中: C_1 、 y_1 分别是与温度相关的材料参数^[4]。

用分计耗散能表示的损伤与塑性应变变化关系曲线如图4所示。

由图4可明显地看出用分计耗散能表示的损伤与塑性应变之间有很好的线性关系,相关系数为0.998,说明式(5)可以很好地用来分析沥青混合料的疲劳损伤,从而也说明了可以用分计耗散能来表征沥青混合料的损伤,为今后的疲劳损伤分析提供

了一个可行的分析方法。

4 结论

(1) 分析了用低加载频率模拟沥青混合料的温度疲劳规律,提出了用分计耗散能表征沥青混合料的疲劳损伤,进一步说明了粘弹性材料疲劳的本质是荷载循环过程中耗散能的增加。

(2) 用分计耗散能表示的损伤与塑性应变变化关系是很好的线性关系,说明了式(5)的可行性,可据此进行分析沥青混合料的疲劳损伤。

参考文献:

- [1] 田小革,等. 沥青混合料的低频疲劳效应研究[J]. 力学与实践, 2002.
- [2] Van D W. Pratical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes[R]. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Phoenix, Arizona, 1975.
- [3] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1995.
- [4] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.

Simulation Research on Thermal Fatigue Damage to Bituminous Mixture

LU Song-tao, TIAN xiao-ge, ZHENG jian-long

(Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The loading frequency has a remarkable influence on bituminous mixture fatigue life. It is based on the low loading frequency that the thermal fatigue of the material is simulated, the dissipated energy theory is used to analyze the thermal fatigue of bituminous mixture, and the analysis of damage mechanics on.

Key words: bituminous mixture; dissipated energy; low frequency; fatigue damage