

# 沥青混合料拉伸疲劳试验下疲劳损伤特性研究\*

周晓青<sup>1</sup>, 李宇峙<sup>2</sup>, 应荣华<sup>2</sup>, 邵腊庚<sup>2</sup>, 孙立军<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 长沙理工大学 道路工程交通部重点实验室, 长沙 410076)

**摘要:**利用 MTS810 型电液伺服试验系统对沥青混凝土小梁试件在低温下进行了常应变的等应变率加载模式的拉伸疲劳试验。试验时按三角波形加载, 并考虑了不同拉伸应变水平。由试验结果得到了不同应变水平下的沥青混合料峰值拉伸应力值并计算了每个循环内的耗散能。由疲劳试验结果结合能量原理提出了一种考虑拉伸应变水平的疲劳损伤模型。

**关键词:**沥青混合料; 拉伸疲劳试验; 能量原理; 损伤模型

**中图分类号:**U416.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)05-0047-05

## Research on the Fatigue and Damage Characteristics of Asphalt Mixture Based on Uni-axial Fatigue Tension Testing at Low Temperature

ZHOU Xiao-qing<sup>1</sup>, LI Yu-zhi<sup>2</sup>, YING Rong-hua<sup>2</sup>, SHAO La-geng<sup>2</sup>, SUN Li-jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Communications, Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410076, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, using MTS810 electro-hydraulic servo testing system, the tensile strain fatigue tests on asphalt concrete beams with constant rate at  $-5^{\circ}\text{C}$  have been performed. The wave profile of loading is triangle. Different strain levels are employed. From the test results the peak values and dissipation energy of each loop are calculated. A fatigue damage model with tensile strain level is obtained from the tests results in combination with energy theory.

**Keywords:** asphalt concrete; tensile fatigue tests; energy theory; damage model

沥青混合料是高等级道路路面的主要建筑材料多年来的研究表明其是一种复杂的热流变材料,其变形与受力状态、温度及加载速率等多种因素有关。工程实际使用过程中,沥青路面要承受外界荷载(行车荷载与温度荷载)的多次重复作用,这需要了解沥青混合料的疲劳特性。目前沥青混凝土路面最主要损坏状态之一就是疲劳开裂<sup>[1]</sup>,由于沥青混合料的热流变性,低温下沥青混合料更易于产生疲劳裂缝。各国道路研究者都希望通过室内疲劳试验建立沥青混合料的疲劳模型。国内外道路工程界常采用的疲劳试验有三点加载弯曲疲劳试验、悬臂梁疲劳试验、梯形梁试件二点加载以及棱柱体梁试件四点加载等<sup>[2]</sup>。SHAP 计划 A003-A 项目就采用沥青混合料梁四点加载疲劳试验<sup>[3]</sup>。Nelson H. Gibson 等也通过无约束压缩实验研究了沥青混合料的损伤特性<sup>[4]</sup>。而上述试验,只研究了沥青混合料的压缩特性或小梁试件在弯矩的作用下底部的受拉状态,较少通过直接拉伸疲劳试验研究沥青混合料在受拉状态下的疲劳特性。而 Pell 等认为:最大拉应变是沥青混合料出现疲劳裂缝的决定性因素<sup>[5]</sup>。

现有的沥青混合料疲劳模型主要有两大类:疲劳应变类与能耗类。疲劳应变类是最常用的一种描

\* 收稿日期:2005-06-20

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(50325825),湖南省自然科学基金资助项目(01JJY2148)

作者简介:周晓青(1979-),男,湖南衡阳人,博士生,主要从事路面性能分析与评价研究。

述沥青混合料疲劳特性的模型,大多以应变或应力作为控制参数,通过不同重复应变(或应力)水平级位时的疲劳寿命建立疲劳模型<sup>[2]</sup>。现有的沥青路面设计方法如 AI 法、Shell 法以及 AASHTO2002 沥青路面设计法等均采用这一类模型。这类模型从本质上来说只是针对具体问题的一种规律性公式,在某些条件下是适用的,但其物理意义并不明确<sup>[6]</sup>。故各设计法所建立的疲劳方程差异较大。从能量角度分析,疲劳损伤过程实际上是一个不可逆的能耗过程,所以利用疲劳过程中每一循环所消耗的塑性应变能(称为循环滞回能)作为状态参量定义损伤函数获得的损伤模型具有明确的物理意义,这一类模型也就是能耗类模型。

利用 MTS810 型电液伺服试验系统对沥青混合料小梁试件在低温下(-5℃)进行了常应变的等应变率加载模式的疲劳试验。试验时按三角波形加载,并采用了不同拉伸应变水平。由疲劳试验结果结合能量原理提出了一种考虑拉伸应变水平的疲劳损伤模型,可通过该模型能预测不同拉伸应变水平下沥青混合料的疲劳寿命。

## 1 试验研究

### 1.1 试验材料

本次试验中所采用的沥青为广州路翔沥青公司提供的 SBS 改性沥青(基质沥青为重交 AH-70);集料采用湖南长沙浏阳孔溪洞石灰岩,其力学指标见表 1;矿粉为石灰石矿粉;级配采用《公路沥青路面设计规范》(JTJ014-97)所推荐的 AC-13 级配范围的中值,具体级配见表 2。通过马歇尔方法确定油石比为 5.3。

表 1 石灰岩力学指标及粘附性试验结果

试验项目	压碎值/%	磨耗值/%	粘附性
试验结果	23.8	21.5	4 级

表 2 级配组成表

级配类型	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	97.5	79	58	44.5	32.5	24	17	12	6

### 1.2 试件成型

考虑压实方法时着眼于压实方法与现场实际状况的吻合程度,通过对各种现有压实方法的对比表明,轮碾压实法对现场状况的模拟性较好,因此本研究对沥青混合料采用轮碾压实成型,然后利用岩石切割机切割成小梁试件,试件尺寸为:45 mm×45 mm×250 mm。为了消除因试件制作带来的误差,对试件进行了再加工,使试件满足端部水平要求。共成型 18 根小梁试件。

### 1.3 加载模式

进行单轴循环拉伸试验时,按应变控制模式进行控制,对 0.3%、0.40% 与 0.45% 的拉伸应变水平按三角波形加载,试验温度为 -5℃,加载速率为  $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$  1/s,疲劳破坏标准为强度下降到初始强度的 50%。为了消除试件偏心的影响,在正式加载之前,进行了小应力水平的预压过程,并在其后有一段恢复期。

### 1.4 试验系统

采用 MTS810 型电液伺服试验系统进行试验研究,其加载设备荷载范围为 ±10 000 kN,通过计算机对整个试验过程进行自动控制。另外有 MTS 配套的温控系统——Tenny 环境箱,温控精度为 ±0.2℃。

### 1.5 数据采集与处理

试验结果全部由与 MTS 加载系统配套的计算机系统采集得到,每隔 0.1 s 采集一次数据(位移与拉力及时间)。数据是通过电信号进行传输,由于阻抗和漂移的影响,往往会使采集到的数据在真值左右出现波动,故对所采集到的数据进行了滤波处理。采用 Origin 6.0 的滤波器(FFT)对所采集的数据进行了处理,得到近似真实光滑曲线。

### 1.6 试验结果

将试验时采集到不同应变水平下循环作用次数与每个循环内的峰值应力值列出如表 3,并绘图如图 1 所示。

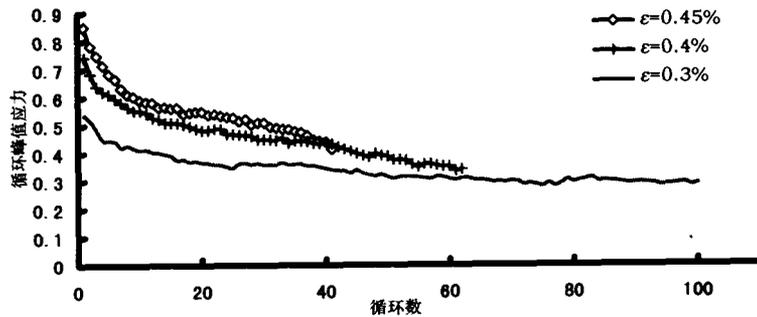


图1 循环峰值应力随循环数的变化曲线(-5℃)

表3 不同应力水平下循环作用次数(N/次)与峰值应力值(σ/MPa)

N	ε=0.45%	ε=0.40%	ε=0.30%	N	ε=0.45%	ε=0.40%	ε=0.30%
1	0.849 436	0.742 233	0.537 132	51		0.374 934	0.308 957
2	0.782 722	0.683 18	0.514 968	52		0.376 592	0.314 457
3	0.747 754	0.638 945	0.484 275	53		0.372 714	0.314 6
4	0.713 803	0.620 811	0.448 063	54		0.357 982	0.313 007
5	0.683 216	0.611 116	0.445 427	55		0.349 028	0.311 56
6	0.665 341	0.595 133	0.443 551	56		0.358 097	0.308 282
7	0.632 731	0.581 143	0.421 518	57		0.360 315	0.307 51
8	0.611 219	0.564 473	0.428 678	58		0.354 206	0.314 9
9	0.604 059	0.553 073	0.418 975	59		0.351 521	0.312 03
10	0.590 715	0.553 14	0.412 147	60		0.351 133	0.306 406
11	0.584 702	0.544 572	0.414 825	61		0.335 129	0.303 157
12	0.581 056	0.526 581	0.403 847	62		0.340 928	0.308 821
13	0.564 174	0.521 798	0.402 161	63			0.309 201
14	0.565 246	0.509 876	0.396 73	64			0.300 65
15	0.560 519	0.509 756	0.392 273	65			0.300 382
16	0.563 066	0.508 375	0.374 811	66			0.299 027
17	0.539 702	0.503 738	0.378 687	67			0.294 347
18	0.545 747	0.496 175	0.369 268	68			0.295 861
19	0.548 934	0.488 247	0.372 285	69			0.294 053
20	0.548 928	0.481 312	0.366 807	70			0.299 119
21	0.537 393	0.482 359	0.365 600	71			0.296 372
22	0.539 075	0.486 142	0.358 838	72			0.285 738
23	0.533 06	0.486 037	0.357 601	73			0.290 729
24	0.528 874	0.467 965	0.351 759	74			0.285 143
25	0.527 189	0.468 249	0.346 471	75			0.278 952
26	0.514 581	0.464 456	0.361 596	76			0.289 319
27	0.520 612	0.463 611	0.363 794	77			0.279 795
28	0.502 79	0.460 949	0.359 517	78			0.289 674
29	0.509 043	0.448 414	0.362 817	79			0.303 35
30	0.508 526	0.449 747	0.358 379	80			0.294 535
31	0.493 238	0.448 127	0.359 348	81			0.300 622
32	0.490 565	0.446 427	0.358 192	82			0.305 592
33	0.484 78	0.453 731	0.364 832	83			0.309 381
34	0.484 385	0.434 413	0.358 247	84			0.297 553
35	0.476 751	0.443 156	0.359 284	85			0.298 467
36	0.473 74	0.442 317	0.360 796	86			0.296 965
37	0.462 259	0.441 753	0.354 388	87			0.294 84
38	0.446 493	0.434 064	0.355 342	88			0.292 24
39	0.442 384	0.433 397	0.349 690	89			0.288 463
40	0.439 329	0.438 695	0.344 182	90			0.291 665
41	0.413 02	0.432 457	0.339 396	91			0.292 98
42		0.422 623	0.336 631	92			0.290 962
43		0.413 662	0.334 15	93			0.289 615
44		0.406 477	0.326 955	94			0.283 925
45		0.397 787	0.336 611	95			0.284 995
46		0.390 965	0.326 461	96			0.285 873
47		0.384 564	0.320 529	97			0.288 832
48		0.397 301	0.317 653	98			0.290 886
49		0.390 501	0.322 239	99			0.282 701
50		0.387 691	0.313 996	100			0.288 189

图1为单轴循环加载试验时,不同应变控制下的峰值应力随循环数的变化曲线,从图中可见随着应变水平的增加,其峰值应力也增加,而且不同应变水平下其疲劳寿命也随之变化。对于应变取0.30%时,到了作用后一阶段,其曲线的斜率趋向于零,类似一条直线,也就是说循环荷载次数对其峰值应力影响不大。

## 2 单轴循环拉伸下的疲劳损伤模型的建立

沥青路面在长期使用过程中,要承受外界荷载的多次反复作用,研究沥青混合料的疲劳特性有实际意义。现有的疲劳损伤模型主要有 Lemaitre 模型、Chaboche 模型与 Wang 模型等<sup>[7]</sup>。从本质上来说,以上各种模型只是针对具体问题的一种规律性公式,在某些条件下是适用的,但其物理意义并不明确。疲劳损伤过程实际上是一个不可逆的能耗过程,所以利用损伤过程中每一循环所消耗的塑性应变能(称为循环滞回能)作为状态参量定义损伤函数获得的损伤模型具有明确的物理意义。每一个应变周期所耗散的能量可以通过应力应变曲线滞后回路的面积确定。每个应力周期消耗的能量为该周期滞后回线的面积,即:

$$\Delta W_i = \int_0^T \sigma(t) \varepsilon(t) dt \quad (1)$$

式中: $\Delta W_i$  为每个循环周期下的耗散能; $T$  为循环周期; $\sigma(t)$  为时间  $t$  时的应力; $\varepsilon(t)$  为时间  $t$  时的应变。

在整个疲劳寿命过程事,累积耗散能是所有滞后能面积的和,即:

$$W_F = \sum_1^{N_F} \Delta W_i \quad (2)$$

式中: $N_F$  为疲劳寿命; $W_F$  为达到疲劳破坏时的总能耗。

在以前的能量模型中,大都以循环滞回能作为状态参量,其损伤的演化表现为循环滞回能的累积,常假定每一循环的滞回能为常数。通过编制积分计算程序,可计算出每一个循环圈内的滞回能。本试验计算结果表明,不同应变水平下的循环滞回能  $\Delta W_i$  随循环数  $N_i$  的变化而变化(如图2所示)而且在某一固定应变率时与最大拉伸应变有关。可假设其方程为:

$$\Delta W_i = a N_i^b \varepsilon^c \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  为材料参数; $N_i$  为循环数; $\varepsilon$  为位伸应变水平,即最大拉伸应变。

将上式化为对数形式,则可得二元一次多项式,经多元函数回归可得以下方程:

$$\Delta W_i = 0.095 N_i^{-0.16891} \varepsilon^{0.97686} \quad (4)$$

$N = 203$ , 相关系数  $R^2 = 0.8857$

回归后方程曲线见图2。

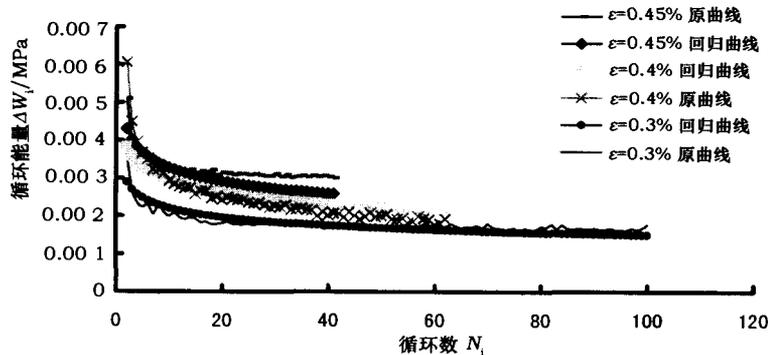


图2 循环能量与循环数图

从图2可见,室内疲劳试验结果与分析所得曲线吻合较好。

大量的研究表明,不同应变水平下沥青混合料疲劳失效时吸收的总能量与寿命的关系满足以下关系式:

$$W_F = a_f N_F^{b_f} \tag{5}$$

式中:  $W_F$  为总能量;  $N_F$  为疲劳寿命;  $a_f$  称为疲劳系数;  $b_f$  称为疲劳指数。

对本次试验中几种不同拉伸应变率下的疲劳寿命及其累积耗散能如表 4 所示。

表 4 沥青混合料单轴拉伸疲劳寿命与累积耗散能

拉伸应变率/%	温度/℃	疲劳寿命/次	累积耗散能/MPa
0.45	-5	41	0.013 824
0.4	-5	62	0.016 098
0.3	-5	100	0.018 387

通过对以上数据进行回归,可得式(6):

$$W_F = 0.004 3 N_F^{0.318} \quad N = 3, R^2 = 0.993 5 \tag{6}$$

从能量的观点出发可定义某一循环造成的损伤等于该循环的滞回能与累积耗散能之比,即:

$$D_i = \Delta W_i / W_F \tag{7}$$

式中:  $D_i$  为循环次数  $i$  时所造成的损伤值,也即循环  $i$  中的损伤增量。

则  $N$  次循环后的累积损伤为:

$$D_N = \int D_i dN \tag{8}$$

式中:  $D_N$  为循环次数  $N$  时的损伤值。

将式(6)与式(7)代入式(8),可得:

$$D_N = \frac{a \varepsilon^c N^{b+1}}{a_f (1+b) N_F^{b_f}} = \frac{26.583 e^{0.977 N^{-0.831}}}{N_F^{0.318}} \tag{9}$$

上式即为沥青混合料单轴拉伸试验下考虑应变水平和循环次数得出的疲劳损伤函数  $D$  的能量表达式。当  $N=0$  时,有  $D_0=0$ ;当  $N=N_F$  时,将应变水平代入,可得到与应变水平有关的损伤值。将本次试验结果代入,可见其损伤值约为 1,说明推导公式的合理性。同时,由式(9)也可用于预测不同应变水平下的疲劳寿命。

### 3 结论

1) 通过沥青混合料单轴拉伸疲劳试验绘制不同应变水平下峰值应力随循环次数的变化曲线,可见随着应变水平的增加,其峰值应力也增加,而且不同应变水平下其疲劳寿命也随之变化。

2) 计算分析各循环内的耗散能,发现耗散能受应变水平及循环次数影响,而并非常数,通过多元函数回归法建立了耗散能计算公式,由于考虑了应变水平及循环次数的影响,所建立的公式计算结果与实验实测结果相关性较好。

3) 结合沥青混合料的循环拉伸试验结果,从能量的角度考虑了沥青混合料的疲劳损伤特性,并建立了一种与拉伸应变水平相关的疲劳损伤模型,通过该模型能预测不同拉伸应变水平下沥青混合料的疲劳寿命。

### 参考文献:

[1] 张登良. 沥青与沥青混合料[M]. 北京:人民交通出版社,1993.

[2] 同济大学,中交公路规划设计院,交通部公路科学研究所. 沥青路面设计指标体系[R]. 2003.

[3] SHAP Designation: M-009. Standard method of test for determining the fatigue life of compacted bituminous mixtures subjected to repeated flexural bending[R]. NCHRP. 1995.

[4] Nelson H. Gibson, Charles W. Schwartz, Richard A. Schapery, Matthew W. Witzczak. Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression[A]. In Transportation Research Record, TRB, National Research Council[C]. Washington D. C., 2003.

[5] Pell, P. S., Brown, S. F. The Characteristic of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures. Proceeding[A]. 3<sup>rd</sup> International Conference on Structure Design of Asphalt Pavements[C]. Vol. 1, London, 1972:326-342.

[6] 蔡四维,蔡敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京:人民交通出版社,1999.

[7] 余天庆. 损伤理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.