

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.10.001

用真实应力比表征的老化沥青混合料疲劳性能

吕松涛

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了弥补现行沥青路面设计规范在利用传统疲劳方程进行疲劳设计时的不足, 通过对沥青混合料进行不同程度的长期老化试验模拟了路面实际的老化程度。通过不同加载速率下的沥青混合料强度试验, 揭示了强度随加载速率的变化规律。基于不同加载速率下的强度值, 得到了与疲劳加载速率对应的疲劳真实应力比, 建立了基于名义应力比和真实应力比的沥青混合料疲劳方程。基于名义应力比的疲劳方程曲线后延后与横坐标的交点远大于1, 不具有后延性, 而基于真实应力比的疲劳方程曲线可以后延到疲劳寿命为1的强度破坏点, 统一了强度破坏与疲劳破坏的内在联系。建立了基于真实应力比的老化沥青混合料疲劳方程, 疲劳方程曲线均通过(1, 1)点。研究结果可为沥青路面设计时考虑老化效应的影响和抗拉强度结构系数的正确计算提供理论方法和依据。

关键词: 道路工程; 疲劳性能; 老化试验; 强度试验; 沥青混合料; 应力比

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)10-0001-06

Fatigue Performance of Aged Asphalt Mixture Characterized By Real Stress Ratio

LÜ Songtao

(School of Communication and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: In order to make up for the fatigue design shortage of asphalt pavement design specification in using traditional fatigue equation, the actual aging degree of asphalt pavement was simulated by different long term aging degree tests of asphalt mixture. The regularity of strength varying with loading rate was revealed through strength tests of asphalt mixture in different loading rates. Based on the strength values in different loading rates, the real stress ratios corresponding to the fatigue loading rates were obtained. The asphalt mixture fatigue equations based on nominal and real stress ratios were created. The intersection of fatigue curve characterized by nominal stress ratio and abscissa axis is much larger than 1, it cannot be extended; while the fatigue curve characterized by real stress ratio can be extended to the strength failure point, which the fatigue life is 1, it unified the inner relationship between strength and fatigue failures. The fatigue equation of aged asphalt mixtures based on real stress ratio was established, all the fatigue curves passed through the point of (1, 1). The results could provide the theoretical method and foundation for asphalt pavement design considering the aging effect and for the calculation of structure coefficient of tensile strength correctly.

Key words: road engineering; fatigue performance; aging test; strength test; asphalt mixture; stress ratio

0 引言

沥青路面达到疲劳破坏时路面结构已经经历了

一定时期的短期与长期老化, 沥青混合料的疲劳性能是沥青混合料在不同老化程度下性能的反应, 评价其疲劳性能应在不同的老化程度下分别进行试验

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51038002); 教育部博士点基金项目(20114316120001); 湖南省自然科学基金项目(10JJ4034)

作者简介: 吕松涛(1979-), 男, 河南郑州人, 博士。(lsts@126.com)

和理论研究,从而真实地反映材料的疲劳性能。而目前的多数试验都没有充分考虑沥青混合料的不同老化程度,均用未老化的沥青混合料来进行疲劳试验分析,这样就会和实际的路面疲劳性能有较大差别。为了减少这种差别,较真实地反映实际路面的疲劳性能,很有必要进行考虑老化效应的沥青混合料疲劳特性研究。

SHRP 提出的沥青混合料老化试验方法,即松散混合料在 135℃、4 h 强制通风条件下烘箱加热(短期老化 STOA)和成型的试件在 85℃、5 d 强制通风条件下的延时烘箱加热(长期老化 LTOA)是室内模拟沥青混合料在施工期和使用期老化的有效方法^[1-4]。由于沥青混合料的老化试验和疲劳试验都要耗费大量的时间和费用,在沥青混合料疲劳性能研究方面大都未考虑老化因素的影响。

到目前为止,世界各国在沥青路面设计中均未准确考虑沥青混合料的老化问题,在沥青路面疲劳寿命的研究中也就不能准确考虑沥青混合料老化的影响。可以说,对不同老化程度下沥青混合料的疲劳性能进行研究,将为正确确定沥青混合料的设计参数、设计方法,防止沥青路面的早期破坏,提高沥青路面的路用性能,延长沥青路面的使用寿命起到积极的作用。

现行沥青路面设计规范在抗拉强度结构系数计算时采用现象学的方法来进行分析,即考虑荷载输入(应力水平)与材料或结构力学(疲劳寿命)之间的相应关系,但在使用 $S-N$ 疲劳方程方面的一个主要不足是:规范将疲劳方程后延到 $N_f=1$,也就是 1 次加载使沥青混合料发生破坏,认为此时根据疲劳方程计算得到的强度就是其极限抗拉强度,并由此来计算抗拉强度结构系数,这缺乏足够的论据和试验验证。疲劳方程是将疲劳试验结果经过回归分析后得出的,它有一定的试验条件和适用范围。例如 PELL 指出他的双对数直线关系式的适用范围为 $N_f=10^4\sim10^8$,超出这一范围,便不一定存在此关系,而是否可以外延,需要通过试验进行验证^[5-6],通常范围外与范围内的关系曲线呈折线状。在低循环疲劳情况下的疲劳曲线并不呈现出明显线性关系,而是向下弯向上凸的,由此将疲劳方程后延到 $N_f=1$ 得到的极限抗拉强度值是不合适的^[7]。

问题出现的主要原因是:确定沥青混合料室内疲劳试验应力比的大小时,其强度参考值是由恒定加载速率下的标准强度试验确定的。沥青混合料是一种典型的粘弹性材料,其刚度指标与强度指标均

受到加载速度与温度的显著影响^[8-11],由于标准强度试验加载速率远小于疲劳试验 1/2 循环内的加载速率(与应力水平和加载频率有关),这样就会和疲劳加载速率对应的强度值有较大差别。定义基于由标准强度试验得到的应力比为名义应力比,定义由与疲劳加载速率对应的强度值确定的应力比为真实应力比,即传统疲劳试验分析时采用的应力比为名义应力比而非真实应力比,因此将基于名义应力比建立的疲劳方程后延到 $N_f=1$ 所得到的强度值并非其极限抗拉强度值,由此来计算抗拉强度结构系数就不合适。

国内外在研究沥青混合料的疲劳特性时都很少考虑加载速度对强度的影响,而强度是确定疲劳应力比的基础,其结果必将导致疲劳方程的失真,使其无法反映应力比 $\sigma/s=1$ 时 $N_f=1$ 的强度特性,这是因为在进行沥青混合料的强度试验时,其加载速度较慢,而进行疲劳试验时加载速度较快,其真实强度远高于标准强度试验所得到的名义强度^[12-18]。

因此,通过分析加载速度对沥青混合料强度的影响,揭示强度随加载速率的变化规律,建立基于真实应力比的老化沥青混合料疲劳方程。研究结论可使沥青路面抗拉强度结构系数的计算更加科学。

1 试验简介

本文选用细粒式沥青混合料 AC-13C 作为研究对象,胶结料采用 SBS 改性沥青,集料采用玄武岩,经沥青混合料配合比设计,确定的最佳油石比为 5.3%。

SHRP 提出的长期老化(LTOA)试验方法是延时烘箱加热法,但其试验条件是固定的,即烘箱温度为 85℃,老化时间为 5 d,模拟的是实际路面 6~9 a 的老化程度。这个试验条件对疲劳试验是不合适的,因为疲劳破坏不一定都在路面使用 6~9 a 内发生,有可能在路面使用初期发生,也有可能路面使用后期发生。因此,本文在不同老化程度的确定时将选取未老化 0 d、以及老化时间分别为 1、3、5、7 d 的 5 个不同老化程度,以期能够较真实地模拟路面疲劳破坏时的实际不同老化状态。

沥青混合料强度及疲劳试验采用从美国进口的 MTS-810 (Material Test System-810) 材料试验系统进行。首先将沥青混合料拌和碾压成型为 30 cm×30 cm×5 cm 的板状试件,然后将其切割成 25 cm×5 cm×5 cm 的小梁试件备用。试验采用 MTS-810 材料试验系统进行,每个应力周期的力、位移值都由

数据采集系统进行自动采集,通过适当的计算可求出对应的应力、应变值,数据采集系统的时间间隔可根据具体的试验条件要求进行设定;强度和疲劳试验加载方式均采用直接拉伸方式进行,试验温度为 15 ℃,试验前试件在环境箱保温 24 h,保证试件内外温度一致。

2 沥青混合料强度的速度特性

下面以未老化沥青混合料的强度及疲劳试验结果为例进行分析,不同老化程度的试验结果采用相同的分析方法进行。

首先进行标准的直接拉伸强度试验,加载速率为 5 mm/min,做 3 次平行试验,取其平均值为 1.963 MPa,试验结果见表 1。

表 1 标准的直接抗拉强度试验结果

Tab. 1 Result of standard direct tensile strength test

试验编号	抗拉强度 S_t /MPa	平均值 /MPa	标准偏差	变异系数
1	2.101			
2	1.894	1.963	0.120	0.061
3	1.894			

然后选择 0.003 7 ~ 37 MPa/s 的 14 种不同加载速率进行直接拉伸强度试验,所得试验结果见表 2。

表 2 不同加载速率下的直接拉伸强度试验结果

Tab. 2 Result of direct tensile strength test in different loading rates

序号	加载速率 / (MPa · s ⁻¹)	试件 面积 /mm ²	破坏 荷载 /N	强度 /MPa
1	0.003 7	2 695.7	2 276	0.844
2	0.037	2 688.2	3 749	1.395
3	0.37	2 727.2	5 453	2.000
4	1.85	2 662.8	7 548	2.835
5	3.70	2 676.6	7 910	2.955
6	7.40	2 799.6	10 757	3.842
7	10.80	2 778.3	11 892	4.280
8	13.72	2 915.4	13 888	4.589
9	17.77	2 813.1	13 027	4.695
10	21.00	2 869.8	13 550	4.722
11	24.80	2 818.7	13 927	4.941
12	29.60	2 703.0	13 969	5.168
13	33.30	2 625.1	13 119	4.998
14	37.00	2 703.1	14 129	5.227

从表 2 中的试验结果不难发现,加载速度对沥青混合料的强度影响非常显著,在试验加载范围内,

强度最大值是最小值的 6 倍多。

在进行沥青混合料疲劳试验时,通常选择 10 Hz 的加载频率,在 1 MPa 的应力水平下进行疲劳试验,其加载过程中速度为 20 MPa/s。由表 2 根据标准强度试验结果 1.963 MPa 可反算出其对应的加载速度仅相当于 0.35 MPa/s,二者加载速度相差 $20/0.35 = 57$ 倍;由表 6 可计算出加载速度 20 MPa/s 所对应的强度为 4.689 MPa,二者强度有 $4.689/1.963 = 2.389$ 倍的差异,可见疲劳试验所采用的应力比是不真实的,疲劳方程中的应力比只是名义应力比。

将表 2 中的不同加载速率下的强度绘图 (图 1)。

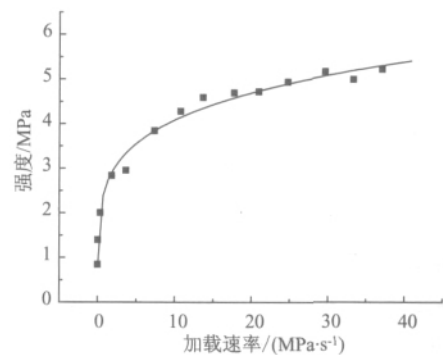


图 1 15 ℃条件下 AC-13C 直接拉伸强度随加载速率变化曲线

Fig. 1 Direct tensile strength vs. loading rate of AC-13C at 15 °C

定义不同加载速率下的强度为动载强度 S_{dz} ,将加载速率与强度进行非线性拟合,可得二者的回归关系为:

$$S_{dz} = 2.583v^{0.2}, R^2 = 0.984. \quad (1)$$

由拟合结果可知,加载速率对沥青混合料强度有显著影响,二者呈幂函数规律变化,定义与疲劳试验加载速率对应的强度值为疲劳动载强度。

3 以真实应力比表征的沥青混合料的疲劳特性

定义的名义应力比用 t_m 表示,定义的真实应力比用 t_s 表示。

确定名义应力比时须首先进行固定加载速率下的沥青混合料标准静载强度试验,由表 5 得到的准静载强度 $S_t = 1.963$ MPa。

疲劳试验时名义应力比 t_m 取 0.3、0.4、0.5、0.6 和 0.7,加载频率为 1、10、20 和 50 Hz,疲劳荷载采用连续半正矢荷载,波形见图 2。

根据疲劳试验时的加载频率 f (周期为 T) 和应力水平 σ 可以求出对应的加载速率 v :

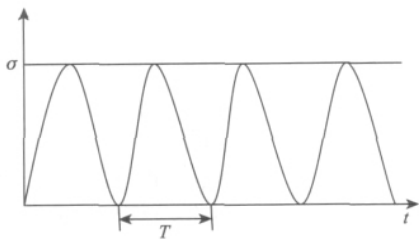


图2 疲劳试验时施加的荷载波形
Fig.2 Loading wave of fatigue test

$$v = \frac{\sigma}{T/2} = 2f\sigma。$$
 (2)

再由式(1)可以求出对应的疲劳动载强度值 S_{dz} 。

因此,真实应力比 t_s 可表示为:

$$t_s = \sigma / S_{dz}，$$
 (3)

式中,σ为疲劳试验时施加的应力水平; S_{dz} 为与加载频率和应力水平相对应的加载速率下的疲劳动载强度。

在温度15℃条件下对AC-13C沥青混合料进行小梁直接拉伸疲劳试验,不同加载频率和不同应力水平下的疲劳试验结果汇总见表3。

表3 不同加载频率和名义应力比下的真实应力比及疲劳寿命汇总

Tab.3 Summary of real stress ratios and fatigue lives in different loading frequencies and nominal stress ratios

加载频率 f/Hz	名义应力比 t_m	应力水平	加载速率	动载强度	真实应力比 t_s	疲劳寿命 N_f /times	
		σ / MPa	V / (MPa·s ⁻¹)	S_{dz} / MPa		试件1	试件2
1	0.4	0.78	1.57	2.814	0.28	1 518	1 330
	0.5	0.98	1.96	2.943	0.33	510	541
	0.6	1.18	2.35	3.053	0.39	250	280
	0.7	1.37	2.74	3.149	0.44	163	112
10	0.3	0.59	11.76	4.219	0.14	30 820	35 231
	0.4	0.78	15.68	4.471	0.18	22 313	18 887
	0.5	0.98	19.60	4.676	0.21	7 883	5 807
	0.6	1.18	23.52	4.850	0.24	3 058	3 478
	0.7	1.37	27.44	5.003	0.27	1 712	1 388
20	0.3	0.59	23.52	4.850	0.12	117 293	106 538
	0.4	0.78	31.36	5.139	0.15	37 717	28 197
	0.5	0.98	39.20	5.375	0.18	9 627	8 234
	0.6	1.18	47.04	5.575	0.21	5 027	7 375
	0.7	1.37	54.88	5.751	0.24	3 036	4 066
50	0.3	0.59	58.80	5.831	0.10	198 472	132 897
	0.4	0.78	78.40	6.178	0.13	56 327	49 754
	0.5	0.98	98.00	6.462	0.15	16 231	19 430
	0.6	1.18	117.60	6.703	0.18	9 863	8 853
	0.7	1.37	137.20	6.914	0.20	3 763	4 084

将表3中的疲劳试验结果利用统一方程形式 $N_f = k(1/t)^n$ 进行回归分析,分别得到不同加载频率下以名义应力比和真实应力比表示的疲劳回归曲线,见图3和图4。

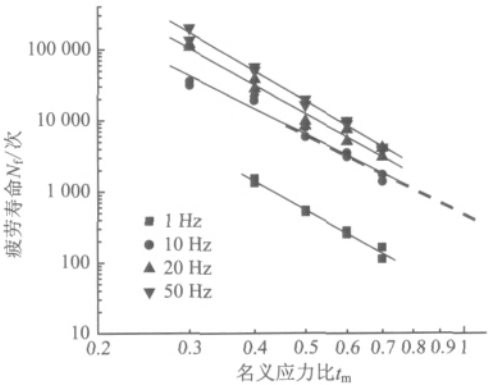


图3 基于名义应力比的疲劳方程曲线

Fig.3 Fatigue curves based on nominal stress ratio

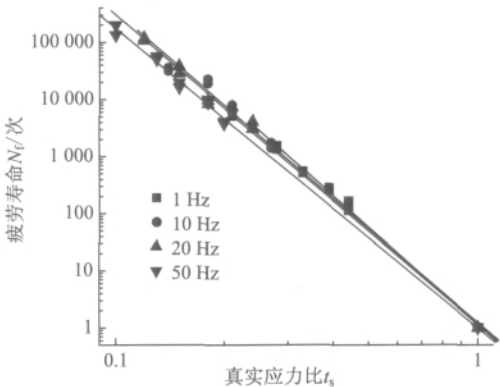


图4 基于真实应力比的疲劳方程曲线

Fig.4 Fatigue curves based on real stress ratio

基于名义和真实应力比的疲劳方程回归参数汇总见表4。

表4 名义和真实应力比疲劳方程参数拟合结果表

Tab.4 Fitting result of fatigue equation parameters based on nominal and real stress ratios

加载频率 <i>f</i> /Hz		1	10	20	50
名义应力比 <i>t_m</i>	<i>k</i>	29.819	537.030	620.869	926.830
	<i>n</i>	4.245	3.550	4.305	4.333
	<i>R</i> ²	0.998	0.974	0.991	0.999
真实应力比 <i>t_s</i>	<i>k</i> '	1.046	1.192	1.021	1.028
	<i>n</i> '	5.734	5.427	5.514	5.236
	<i>R</i> ²	0.999	0.994	0.999	0.999

由图4和表4可以看出:基于真实应力比的疲劳曲线过(1,1)点,则疲劳方程参数 k' 应为1,回归结果中除10 Hz外,各疲劳回归方程的 k' 都比较接近1,只有10 Hz的 k' 偏大,可能是由其对应的真实应力比0.14时的疲劳试验结果误差所致。基于真

实应力比的疲劳方程可以后延到 $N_f = 1$, $N_f = 1$ 对应的即是疲劳寿命为 1 次的强度破坏特征, 因此基于真实应力比的疲劳方程揭示了强度破坏和疲劳破坏的内在联系。

由图 3 和图 4 可以发现, 无论是真实应力比表示的疲劳方程还是名义应力比表示的疲劳方程在双对数坐标下均为直线方程。但以真实应力比表示的疲劳方程的斜率大, 其与横坐标的交点接近于应力比为 1 的坐标位置, 即疲劳方程同时反映了沥青混合料的强度破坏特征; 而以名义应力比表示的疲劳方程与横坐标的交点远比应力比 1 要大, 显然这不符合实际。可见以真实应力比表示的疲劳方程远比以名义应力比表示的疲劳方程准确, 而且试验结果可向两端延拓, 直至与坐标轴相交; 而以名义应力比表示的疲劳方程如向两端延拓却会导致较大的偏差, 而且延拓的范围越大, 其偏差也越大。

同时, 基于真实应力比不同频率的各疲劳回归方程的 n' 差别不大, 因此可将不同频率下的疲劳试验结果利用真实应力比这一纽带进行归一化, 回归成 1 条曲线, 见图 5。

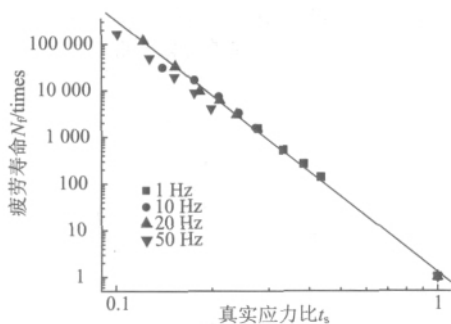


图 5 归一化的不同频率下基于真实应力比的疲劳曲线

Fig. 5 Unified fatigue curves in different loading frequencies based on real stress ratio

由图 5 可知, 基于真实应力比不同频率的疲劳曲线可以回归为 1 条直线, 说明不同加载频率和不同加载速度对疲劳特性的影响是等价的。

因此, 基于真实应力比建立的不同频率下沥青混合料归一化疲劳方程为:

$$N_f = \left(\frac{1}{t_s} \right)^{n'} = \left(\frac{S_{dz}}{\sigma} \right)^{n'} = \left(\frac{S_{dz}}{\sigma} \right)^{5.426}, R^2 = 0.993. \quad (4)$$

4 基于真实应力比的不同老化程度沥青混合料疲劳曲线

采用与前面相同的分析方法, 对不同老化程度 1、3、5、7 d 的沥青混合料疲劳试验结果进行分析, 结果见图 6。

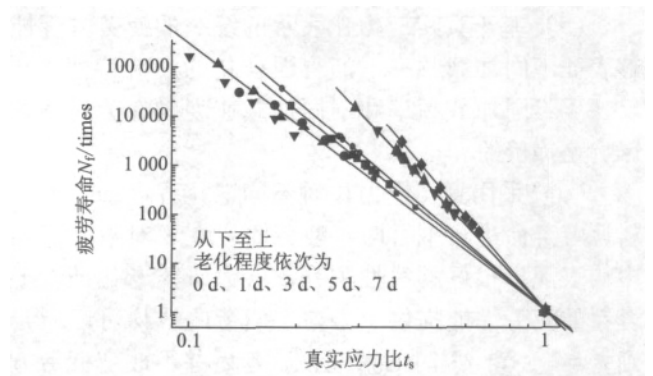


图 6 不同老化程度沥青混合料疲劳曲线汇总

Fig. 6 Summary of fatigue curves of asphalt mixture at different aging degrees

从图 6 可以看出, 采用实际应力水平对不同老化程度沥青混合料的疲劳寿命进行拟合时, 疲劳曲线在双对数坐标系中均表现出很好的线性关系, 并且疲劳曲线均可以后延到 $t' = 1$ 、 $N_f = 1$ 的情况, 后延后并不改变疲劳方程在双对数坐标系中的线性关系。

从前面的分析计算过程可以看出, 基于真实应力比建立的老化沥青混合料疲劳方程能够后延到 1 次强度破坏点, 据此进行抗拉强度结构系数计算符合其定义, 是合适的也是合理的, 研究结果在一定程度上弥补了我国现行沥青路面设计规范的不足。

5 结语

(1) 加载速率对沥青混合料强度有显著的影响, 在一定加载速率范围内, 强度随加载速率的增大而增大, 二者呈幂函数规律变化。

(2) 根据强度随加载速率的变化规律, 提出了真实应力比的概念及其确定方法和以真实应力比构建疲劳方程的新方法。

(3) 无论是以真实应力表示的疲劳方程还是以名义应力表示的疲劳方程在双对数坐标下均为直线方程。采用真实应力比建立的疲劳方程曲线可后延到疲劳寿命为 1 的强度破坏点, 疲劳方程同时反映了沥青混合料的强度破坏特征, 揭示了强度破坏和疲劳破坏的内在联系; 而以名义应力表示的疲劳方程与横坐标的交点远比应力比 1 要大, 显然这不符合实际。

(4) 以真实应力比表示的疲劳方程远比以名义应力表示的疲劳方程准确, 而且试验结果可向两端延拓, 直至与坐标轴相交; 而以名义应力比表示的疲劳方程如向两端延拓却会导致较大的偏差, 而且延拓的范围越大, 其偏差也越大。

(5) 基于真实应力比表示的统一的疲劳方程能够表征不同加载频率下沥青混合料的疲劳特性,它反映了不同加载频率和不同加载速度对疲劳特性的影响是等价的。

(6) 采用真实应力比对不同老化程度沥青混合料疲劳寿命进行拟合时,疲劳曲线在双对数坐标系中均表现出很好的线性关系,这为研究老化沥青混合料的疲劳性能提供了方便。疲劳曲线均可以后延到 $t' = 1$ 、 $N_f = 1$ 时的情况,后延后并不改变疲劳方程在双对数坐标系中的线性关系,这为沥青路面设计时考虑老化效应的影响和抗拉强度结构系数的正确计算提供了理论方法和依据。

参考文献:

References:

- [1] BELL C A, ABWAHAB Y, CRISTI M E, et al. Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures [R]. Corvallis: Strategic Highway Research Program-A-383, Nation Research Council, 1994.
- [2] BELL C A, FELLIN M A, WIEDER A. Field Validation of Laboratory Aging Procedures for Asphalt Aggregate Mixture [J]. Asphalt Paving Technology, 1994, 63 (3): 45-80.
- [3] 虞将苗, 邹桂莲, 胡学斌, 等. 沥青混合料老化模拟试验方法与验证研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (10): 14-17.
YU Jiangmiao, ZOU Guilian, HU Xuebin, et al. Asphalt-aggregate Mixtures Aging Simulation Test Study Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (10): 14-17.
- [4] BROWN S F, SCHOLZ T V. Development of Laboratory Protocols for the Ageing of Asphalt Mixtures [C] //2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona: European Asphalt Pavement Association, 2000: 83-90.
- [5] 姚祖康. 对我国沥青路面现行设计指标的评述 [J]. 公路, 2003 (2): 43-49.
YAO Zukang. A Review on Design Criteria of Asphalt Pavements [J]. Highway, 2003 (2): 43-49.
- [6] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50—2006, Specification for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [7] 陈立杰, 江铁强, 谢里阳. 低循环疲劳寿命预测的幂指数模型 [J]. 机械强度, 2006, 28 (5): 761-765.
CHEN Lijie, JIANG Tieqiang, XIE Liyang. Low Cycle Fatigue Life Prediction Method Based on Power-exponent Function Model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28 (5): 761-765.
- [8] KIM J, WEST R C. Application of the Viscoelastic Continuum Damage Model to the Indirect Tension Test at a Single Temperature [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 36 (4): 496-505.
- [9] YOU Zhanping, ADHIKARI S, KUTAY M E. Dynamic Modulus Simulation of the Asphalt Concrete Using the X-ray Computed Tomography Images [J]. Materials and Structures, 2009, 42 (5): 617-630.
- [10] GONZALEZ J M, MIQUEL C J, OLLER S, et al. A Viscoplastic Creep Model with Strain Rate Variables for Asphalt Mixtures-numerical Simulation [J]. Computational Materials Science, 2007, 38 (4): 543-560.
- [11] LUNDSTROM R, ISACSSON U, EKBLAD J. Investigations of Stiffness and Fatigue Properties of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38 (24): 4941-4949.
- [12] 郑健龙, 吕松涛. 沥青混合料非线性疲劳损伤模型 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (5): 21-28.
ZHENG Jianlong, LÜ Songtao. Nonlinear Fatigue Damage Model for Asphalt Mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (5): 21-28.
- [13] 平树江, 申爱琴, 李鹏. 长寿命路面沥青混合料疲劳极限研究 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (1): 34-38.
PING Shuijiang, SHEN Aiqin, LI Peng. Study of Fatigue Limit of Asphalt Mixture for Perpetual Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (1): 34-38.
- [14] 张志祥, 吴建浩. 再生沥青混合料疲劳性能试验研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 31-35.
ZHANG Zhixiang, WU Jianhao. Experimental Research on Fatigue Characteristics of RAP Mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (2): 31-35.
- [15] SEO Y, KIM R Y. Using Acoustic Emission to Monitor Fatigue Damage and Healing in Asphalt Concrete [J]. Journal of Civil Engineering, 2008, 12 (4): 237-243.
- [16] ABO-QUDAIS S, SHATNAWI I. Prediction of Bituminous Mixture Fatigue Life Based on Accumulated Strain [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (6): 1370-1376.
- [17] SHU Xiang, HUANG Baoshan, VUKOSAVLJEVIC D. Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (7): 1323-1330.
- [18] CASTRO M, SA'NCHEZ J A. Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves: A Damage Theory Approach [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (6): 1232-1238.