

文章编号:1671-8879(2017)04-0098-07

排水沥青混合料疲劳损伤耗散能变化比

黎 晓^{1,2}, 梁乃兴², 白洪涛¹, 程志豪¹, 赵小洁³

(1. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041;
2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 3. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051)

摘 要:为了给排水沥青路面的长期性能评价提供一定的研究基础,开展了高黏排水沥青混合料疲劳性能研究。在不同应变水平下对 2 种不同集料类型的高黏改性排水沥青混合料进行了四点弯曲小梁疲劳试验,采用劲度模量衰减以及能量法针对材料疲劳损伤过程进行分析;采用每一加载循环内材料耗散能变化比曲线跃变点进行材料疲劳损伤失效判定,并建立了包含耗散能变化比稳定值、材料组成体积参数等多因素在内的材料疲劳寿命预估模型。研究表明:应变控制模式下达达到疲劳破坏标准时,高黏改性排水沥青混合料的劲度模量衰减仍处于平稳发展阶段,以此作为该材料疲劳失效判据并不恰当;传统累积耗散能与疲劳寿命存在良好的相关性,但低应变水平下稍有离散,且无法反映损伤过程的能量变化情况;而耗散能变化比曲线能够较为清晰地反映出材料在疲劳重复加载中的三阶段损伤过程,耗散能变化比稳定阶段表明整个损伤过程能量转化中材料自身损伤所需能量存在一固定比例,耗散能变化比稳定值表征了材料稳定的抵抗疲劳损伤的能力,并与材料疲劳寿命具有良好的幂函数关系,所建立的疲劳寿命预估模型能反映出材料疲劳损伤的本质;材料寿命预估模型拟合结果具有较高的拟合优度。

关键词:道路工程;排水沥青混合料;应变控制;耗散能变化比;稳定值;失效判定

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Variation ratio of dissipated energy of fatigue failure for porous asphalt mixture

LI Xiao^{1,2}, LIANG Nai-xing², BAI Hong-tao¹, CHENG Zhi-hao¹, ZHAO Xiao-jie³

(1. National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650041, Yunnan, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: In order to provide the research basis for evaluation of long term performance of porous asphalt pavement, this paper studied the fatigue performance of porous asphalt mixtures with high viscosity modifier. Two kinds of aggregate types for porous asphalt mixture with high viscosity modifier were studied through four-point bending trabecula fatigue test under different strain levels, and the process of fatigue failure of mixture was analyzed based on the attenuation of stiffness modulus and dissipated energy method. The curve jump point of dissipated energy variation ratio at each cycle stage was employed to make the failure criterion for mixtures, and the fatigue life predication model was established, which including the parameters of the plateau value

收稿日期:2017-02-25

基金项目:云南省科技创新强省国际科技合作专项项目(2009AC009);云南省交通运输厅科技项目(云交科教 2014[231]-(二))

作者简介:黎 晓(1982-),男,重庆市人,云南省交通规划设计研究院工程师,重庆交通大学工学博士,E-mail:prettylousy@163.com。

(PV) of variation ratio of dissipated energy and volume parameter of mixtures. The results show that the attenuation status of stiffness modulus of porous asphalt mixtures with high viscosity modifier still stays at stable stage when it failures under strain control mode, is inapplicable as the criterion for fatigue failure of this material. There is a good relativity between traditional accumulated dissipated energy and fatigue life shows a little dispersion, it can not demonstrate the energy variation in the damage process at low strain level. However, the variation curve of dissipated energy can clearly reflect the damage process of the three stages during repeated loading fatigue. The variation ratio of dissipated energy at stable stage reveals that the energy needed by the damage of material itself during energy transformation has a fixed ratio in the whole damage process. The plateau value of variation ratio PV demonstrates the capacity of materials against the fatigue failure, and has a good relation of power function with fatigue life. The established fatigue life prediction model can reflect the nature of fatigue failure of materials and its fitting result has a higher correlation coefficient. 3 tabs, 6 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; porous asphalt mixture; strain control; variation ratio of dissipated energy; plateau value; failure criterion

0 引言

长期以来疲劳损伤是沥青路面性能的主要研究方向,但由于沥青混合料是一种黏弹性材料,其力学行为较复杂,目前大多数研究关注的是通过现象学方法获取材料寿命预估模型这一途径。室内试验通常采用的疲劳失效判定标准并没有十分明确的依据,因此对于模型是否与材料失效破坏的判据相符合也没有太多的深入分析^[1-3]。

除采用传统的现象学方法外,耗散能方法也逐渐成为沥青混合料破坏分析的主要手段之一。Van Dijk等最早揭示了疲劳损伤中材料累积耗散能与疲劳寿命的相关性,并提出累积耗散能与疲劳寿命间存在“唯一”关系^[4-5];Tayebali等采用四点弯曲方法进行了不同加载模式和温度条件下的疲劳试验,结果表明,累积耗散能与疲劳寿命关系受加载模式和温度的影响^[6];严恒等的研究结果也表明累积耗散能受加载模式影响,与温度和频率无关^[7-10]。为了对材料疲劳破坏中的损伤累积过程进行研究,Rowe等在前人研究的基础上提出采用能量比参数项(其中考虑了初始耗散能与累积耗散能比值)来判定不同加载模式下材料疲劳损伤过程中细微开裂的形成阶段,该方法在应力控制模式下效果较好,能清晰地凸显出材料微观裂纹萌发以及宏观裂纹发育的阶段性的,但在应变控制模式下却很难有明显的阶段区分,因此存在局限性^[11-12];Pronk也提出采用能量比指标进行材料疲劳过程中能量变化规律分析,但仍得到不同试验条件下的耗散能-疲劳寿命曲线,意味着分析时仍采用总耗

散能对材料产生损伤的假设^[13]。

上述研究大部分是建立在总耗散能产生疲劳损伤的基础上,没有涉及损伤过程的评价。而且均针对普通沥青混合料性能,没有涉及高黏改性沥青混合料,对于当前道路领域中出现越来越多的沥青路面新型材料是否适用还有待验证。

为此,本文基于损伤过程评价指标的高黏改性排水沥青混合料疲劳性能,对2种不同集料类型的排水沥青混合料进行不同应变水平下四点弯曲小梁疲劳试验,利用重复荷载作用下耗散能变化比参数对材料疲劳损伤过程进行分析,研究能合理描述材料疲劳损伤过程的失效判据,并在此基础上建立相应的材料疲劳寿命预估模型。

1 排水沥青混合料四点弯曲小梁疲劳试验

1.1 排水沥青混合料设计

试验对象为PA-13排水沥青混合料,根据采用的集料类型不同,分为HM(石灰岩集料)和XM(玄武岩集料)2类。高黏改性排水沥青混合料通过壳牌70#沥青添加某种高黏改性剂后在高速剪切仪中制备得到(高黏改性剂与沥青掺配比为12:88),填料选用本地石灰岩矿粉,经试验验证各材料性能均满足相关设计规范要求,混合料设计级配见下页表1^[14]。通过排水沥青混合料析漏及飞散试验结果确定出材料最佳沥青用量分别为4.8%(HM)、6.1%(XM),混合料设计空隙率为20%。

1.2 试验方案及试验条件

试验采用石灰岩、玄武岩2种不同集料成型的排水沥青混合料试件,首先采用COOPER公司生

表 1 排水沥青混合料级配组成

Tab. 1 Gradation composition of porous asphalt mixtures

类型	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
PA-13 (XM)	100	92	65	30	12	9	7	7	7	6
PA-13 (HM)	100	97	72	13	11	10	8	6	6	5

产的 CRT-RCENLD-Ⅲ 大型轮碾压实仪完成原始试件(长、宽、高分别为 500、180、50 mm)制备,碾压时的车轮轮迹覆盖路径按照欧洲标准 EN 12697-33—2007^[15],并实时调整压实次数和压实功,控制试件空隙率在要求的 20%±1% 范围内,之后将原始试件切割成(380±5) mm×(63±5) mm×(50±5) mm 的标准四点弯曲小梁试件;试验前所有试件均在温控箱内标准试验温度(15℃)下保温 4 h。

材料疲劳试验采用 COOPER 公司生产的 CRT-SA4PT-BB 独立式四点弯曲小梁疲劳试验仪完成,试验装置如图 1 所示。该仪器配备的数据采集系统能自动采集传感器及位移计的电测信号,测量范围为 1 μm~3 mm。试验采用应变控制模式加载,加载波形为半正矢波形荷载,加载频率为 10 Hz。根据初拟 1 000×10⁻⁶ 应变水平下的试验结果,确定试验应变水平为 800×10⁻⁶、400×10⁻⁶,每个应变水平下进行 3 或 4 次平行试验。试验中选定 15℃ 作为标准试验温度。

试验开始后在目标应变水平下预加载 100 个循环,计算第 100 个加载循环的试件劲度模量为初始



图 1 四点弯曲疲劳试验装置及温控箱

Fig. 1 Four-point bending fatigue test system and temperature control box

劲度模量。上述过程由计算机控制系统自动控制加载、读取力传感器和位移传感器数值,并按一定时间间隔自动记录试验数据,数据记录按 1($N<500$)、100($N<1\,000$)、500 次($N>10\,000$)荷载循环进行采集, N 为作用次数。实时记录的试验数据包括:加载次数、应力值、应变值、劲度模量、模量衰减百分比、相位角、耗散能等参数。

2 试验结果分析

2.1 劲度模量衰减

试验过程中记录了每个试件在不同应变水平作用下的劲度模量衰减及耗散能变化情况,见表 2。根据采集的数据可以得到 2 种排水沥青混合料在不同应变水平下的劲度模量 S 、累积耗散能 W_{Nf} 衰

表 2 排水沥青混合料四点弯曲疲劳试验结果

Tab. 2 Results of four-point bending fatigue test of porous asphalt mixtures

集料类型	应变水平/10 ⁻⁶	编号	初始劲度模量 S_0 /MPa	初始应力/kPa	初始耗散能 W_0 / (MJ·m ⁻³)	累积耗散能 W_{Nf} / (MJ·m ⁻³)	作用次数 N	耗散能稳定 变化比 PV
玄武岩	800	XM-1	1 071.5	852.80	2.88×10^{-4}	2.734 3	13 871	8.34×10^{-5}
		XM-2	1 701.5	1 365.50	4.18×10^{-4}	1.528 7	5 156	8.71×10^{-5}
		XM-3	1 149.7	922.40	3.08×10^{-4}	3.374 7	16 265	7.98×10^{-5}
		XM-1-2	934.4	751.20	2.57×10^{-4}	2.558 4	15 000	8.15×10^{-5}
	400	XM-4	1 671.5	666.32	7.95×10^{-5}	1.500 4	21 000	3.51×10^{-5}
		XM-5	1 644.9	654.65	8.81×10^{-5}	16.125 1	246 928	1.40×10^{-5}
		XM-4-2	1 158.6	461.80	6.64×10^{-5}	3.908 1	65 000	2.43×10^{-5}
石灰岩	800	HM-1	1 289.4	1 037.90	3.89×10^{-4}	1.246 3	4 979	1.29×10^{-4}
		HM-2	1 297.4	1 039.80	3.49×10^{-4}	1.966 1	8 505	9.00×10^{-5}
		HM-3	1 544.1	1 241.90	4.47×10^{-4}	1.331 3	4 359	1.30×10^{-4}
		HM-2-2	1 315.1	1 054.80	3.30×10^{-4}	1.650 1	7 200	1.00×10^{-4}
	400	HM-4	1 881.6	750.57	1.09×10^{-4}	6.816 7	87 001	9.50×10^{-6}
		HM-5	1 099.2	437.93	6.70×10^{-5}	14.215 8	292 500	1.41×10^{-5}
		H-4-2	1 468.4	587.43	8.84×10^{-5}	5.520 4	89 711	1.52×10^{-5}

减等参数与作用次数 N 的关系。图 2 所示为采用玄武岩集料的混合料在 800×10^{-6} 应变水平下的劲度模量衰减曲线。

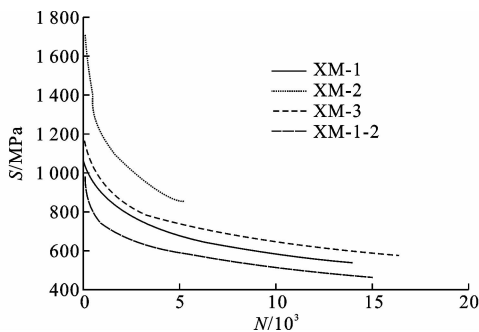


图 2 PA-13(XM)排水沥青混合料在 800×10^{-6} 应变水平下的劲度模量衰减曲线

Fig. 2 Stiffness modulus attenuation curves of PA-13 (XM) porous asphalt mixtures under strain level of 800×10^{-6}

由图 2 可以看出,劲度模量衰减至 50% 时尚处于斜率稳定变化阶段,说明材料仍存在一定强度。在试件没有明显破坏的相同试验条件下,材料产生相同应变所需的总能量是相同的,单纯以劲度模量衰减来判定过于笼统,并不能很好地反映试验中沥青混合料的疲劳损伤过程。

2.2 排水沥青混合料疲劳损伤过程耗散能分析

不同条件下排水沥青混合料耗散能或累积耗散能与作用次数均存在以下关系

$$W_{Nf} = AN^z \quad (1)$$

式中: A 、 z 为回归参数。

分析试验数据得到排水沥青混合料在循环荷载作用下的累积耗散能同疲劳寿命间的关系,如图 3 所示。由图 3 可以看出,在不同的单一试验条件下,二者均存在很好的幂函数关系。在高应变水平下,这一函数关系受集料类型影响较小,石灰岩(XM)与玄武岩(HM)混合料的试验数据在双对数坐标中几乎可以拟合为同一线性关系;在低应变水平下,受集料类型影响更大。不同材料的累积耗散能与疲劳寿命的相关性仍存在一定程度的离散。

尽管累积耗散能与疲劳寿命关系曲线呈现较好的相关性,但累积耗散能这一指标考虑的是排水沥青混合料在整个损伤破坏过程中的所有能量转化,一定意义上其仍然是一个现象性参数,无法区分出疲劳损伤耗散和排水沥青混合料本身黏弹性耗散等更为细化的能量转化。也有研究成果表明,式(1)中的回归参数是随加载频率和试验温度而改变的^[16]。目前基于耗散能方法的分析大多是以累积耗散能指标为基础,意味着首先假设全部耗散能对排水沥青

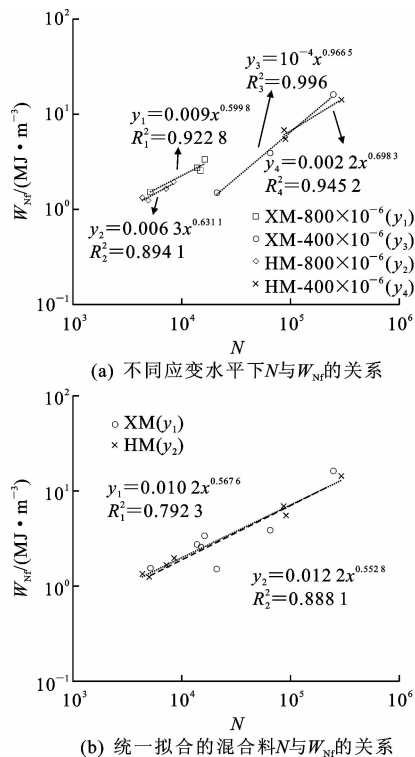


图 3 排水沥青混合料累积耗散能与疲劳寿命的关系

Fig. 3 Relationships between cumulative dissipated energy and fatigue life of porous asphalt mixtures

混合料产生损伤。但实际施加循环荷载时,外力作用下排水沥青混合料内部耗散的能量被转换成多个部分,包括弹性应变能、热量、裂缝发生发展时产生的表面能以及混合料损伤消耗部分,这也是造成总耗散能与疲劳寿命的关系依赖于试验条件的主要原因^[17]。

在早期的耗散能理论研究中提出在单一循环作用下耗散能曲线包括 2 个部分^[12]

$$W_{Nf} = W_{\eta} + W_{\epsilon} \quad (2)$$

式中: W_{η} 为以热能或机械功消耗的能量; W_{ϵ} 为参与材料损伤破坏的耗散能量,其值远小于前者。

排水沥青混合料在疲劳过程中表现出的主要是黏弹性行为,因此可视 W_{η} 为一固定值^[18]。

在上述理论基础上,Ghuzlan 等提出采用耗散能变化比 R_w 来消除加载过程中温度升高以及机械功消耗部分的影响,耗散能变化比定义为^[19]

$$R_w = \frac{|W_j - W_i|}{W_i(j-i)} \quad (3)$$

式中: W_i 、 W_j 分别为第 i 、 j 次加载周期的耗散能(MJ/m^3)。

从式(3)看,耗散能变化比 R_w 表征了某一可变步长内对试件造成损伤的耗散能 ΔW_{ϵ} 占前一周耗散能的比例。下页图 4 为由试验记录数据计算获

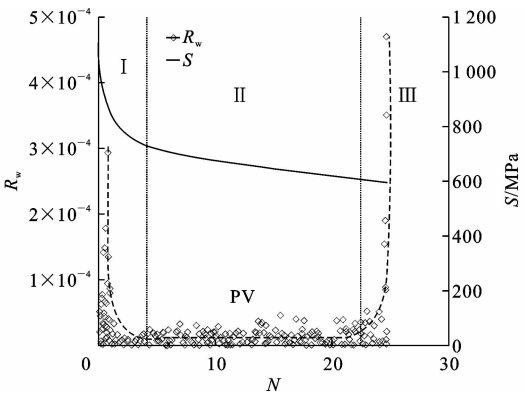


图4 耗散能变化比 R_w 曲线和劲度模量 S 曲线(XM-5, 400×10^{-6})

Fig. 4 Variation ratio curve of dissipated energy and stiffness modulus curve (XM-5, 400×10^{-6})

得的疲劳损伤过程中排水沥青混合料耗散能变化比曲线和劲度模量曲线的对比(试件编号 XM-5)。由图 4 可以看出,劲度模量曲线没有明显地衰减突变,但耗散能变化比与作用次数的关系分为明显的 3 个阶段。

在阶段 I 中, R_w 随作用次数迅速减小;在阶段 II 中, R_w 在相当长的时间内基本保持稳定变化趋势;到了阶段 III, R_w 随加载次数迅速增长,表明导致试件损伤的耗散能比例迅速增大,对试件产生破坏。

在阶段 II 中稳定的耗散能变化比为耗散能变化比稳定值(plateau value, PV),表征了每一加载周期耗散能对于试件损伤始终保持着固定比例的能量转化,其代表的是试件稳定的抵抗疲劳损伤的能力,是可以在设计中应用的表征材料疲劳性状的指标^[20-21]。

从试验结果来看,耗散能变化稳定阶段往往处于试验加载中间阶段,本文中该阶段内数据记录 j, i 间隔设定为 100, j, i 取决于仪器采样频率,因此可将式(1)代入式(3),若 N_f 为材料疲劳寿命,则可推导出 PV 值的数值表达式为

$$I_{PV} \frac{i \approx N_f \frac{1 - (1 + 100/N_f)^{-z}}{100}}{100} \quad (4)$$

式中: I_{PV} 为 PV 的计算参数。

基于上述理论对试验结果进行分析,所得到的结果见表 2 和图 5。图 5 为 PV 值与材料疲劳寿命的关系。在双对数坐标下,二者同样具有很好的线性相关性。对于应变控制模式下的非破坏性疲劳寿命测试,采用耗散能变化比稳定值 PV 作为寿命预估参数具有明确的物理意义。

2.3 材料疲劳损伤预估模型

上节试验数据表明,应变控制模式下材料疲劳

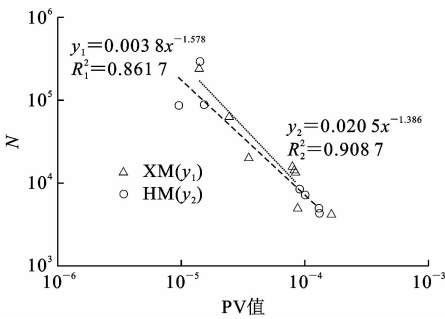


图5 耗散能变化比稳定值 PV 与作用次数 N 的关系
Fig. 5 Relationship between plateau value of variation ratio of dissipated energy and action number

过程中的耗散能变化比参数更能反映出排水沥青混合料在疲劳损伤过程中的阶段性衰变情况。而根据 Shen 等的研究结果,沥青混合料耗散能变化与沥青体积含量、集料级配参数(最大公称粒径、关键筛孔通过率)、试验加载条件(应力、应变、总耗散能)等密切相关^[22]。

根据试验结果中耗散能变化比以及材料体积指标等多个参数与材料疲劳寿命的相关性,提出包含耗散能变化比稳定值 PV、累积耗散能 W_{Nf} 以及材料组成参数等多因素在内的材料疲劳损伤模型为

$$\begin{cases} N_f = A' I_{PV}^{z'} \\ I_{PV} = a S_0^b V \epsilon_0^c N_f^d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $V = V_v / (V_v + V_b)$, 为混合料组成体积参数, V_v 为材料空隙率, V_b 为沥青体积含量; ϵ_0 为初始应变水平; A', z', a, b, c, d, e 均为回归系数。

由试验结果可获得 2 种排水沥青混合料 PV 与 N_f 的关系式,两者存在良好的幂函数关系

$$\begin{aligned} N_{f_{XM}} &= 0.0038 I_{PV}^{-1.578} \quad R^2 = 0.8617 \\ N_{f_{HM}} &= 0.0205 I_{PV}^{-1.386} \quad R^2 = 0.9087 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $N_{f_{XM}}$ 为玄武岩集料的疲劳寿命; $N_{f_{HM}}$ 为石灰岩集料的疲劳寿命。

上述拟合结果的数据拟合程度均较好,判定系数 R^2 都在 0.85 以上。

下页表 3 为材料疲劳寿命预估模型拟合结果,结果显示, SSE 与 SST 比值均很小,计算结果具有较高的拟合优度。因此,采用耗散能变化比预估材料疲劳寿命考虑了其损伤过程的阶段性变化,比单纯采用累积耗散能参数更接近其破坏本质,更为准确。

下页图 6 为材料疲劳寿命测定值与预估模型计算值之间的对比。由图 6 可知,疲劳寿命数据点均分布在等值线附近,试验测定值与模型预估值有较

好的一致性。

表 3 排水沥青混合料疲劳寿命预估模型拟合结果
Tab.3 Fitting results of fatigue life prediction model for porous asphalt mixtures

集料 类型	回归参数					T
	a	b	c	d	e	
玄武岩	1.15×10^{-7}	0.04	8.78	1.33	-0.42	1.45×10^{-3}
石灰岩	2.98×10^{-7}	-0.88	-30.49	1.01	-0.94	2.00×10^{-3}

注：T 为残差平方和 SSE 与总偏差平方和 SST 的比值。

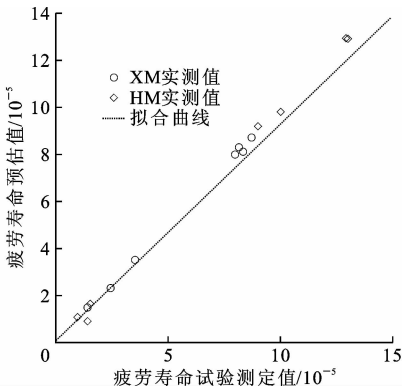


图 6 疲劳寿命预估与试验测定值对比
Fig.6 Comparison of fatigue life between predicted values and test values

3 结 语

(1)应变控制模式下,PA-13 排水沥青混合料劲度模量衰减至 50%后仍具有较高的强度来抵抗疲劳损伤破坏,以劲度模量衰减量做为衡量该混合料破坏的标准并不恰当。

(2)试验结果中累积耗散能与疲劳寿命存在较好的幂函数关系,高应变水平下这一函数关系受混合料类型影响较小,但低应变水平下,数据结果离散程度更大;累积耗散能指标仍是一个现象学参数,无法区分出疲劳损伤耗散和混合料本身黏弹性耗散等更为细化的能量转化。

(3)排水沥青混合料在疲劳损伤过程中的耗散能变化比具有比劲度模量和累积耗散能更为清晰的区分度,采用稳定阶段内耗散能变化比值表征疲劳损伤失效阶段的界定是合理的,其代表了混合料稳定的抵抗疲劳破坏的能力。

(4)建立的排水沥青混合料疲劳预估模型包含了耗散能变化比稳定值,更贴近于混合料疲劳损伤的本质,计算结果具有较高的拟合优度,研究结果可为其他沥青混合料的疲劳性能研究提供参考。

(5)下一步可以针对不同加载模式、更多级配以及不同试验条件下排水沥青混合料的疲劳损伤进行

研究。

参考文献:
References:

[1] 张争奇,张 苛,李志宏,等. 环氧沥青混凝土增柔增韧改性技术[J]. 长安大学学报:自然科学版,2015,35(1):1-7.
ZHANG Zheng-qi, ZHANG Ke, LI Zhi-hong, et al. Technique research on flexibility and toughness modification for epoxy asphalt concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(1):1-7.

[2] 黎 晓,梁乃兴. 间接拉伸试验条件下沥青混合料的疲劳行为[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(6):1161-1165.
LI Xiao, LIANG Nai-xing. Fatigue performance of asphalt mixes in indirect tensile test [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Science, 2013, 32(6):1161-1165.

[3] 董瑞琨,郑 茂,黄卫东,等. 考虑自愈补偿的多种沥青混合料疲劳性能比较[J]. 中国公路学报,2015,28(5):87-92.
DONG Rui-kun, ZHENG Mao, HUANG Wei-dong, et al. Fatigue performance comparison of various kinds of asphalt mixtures with self-healing compensation considered [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5):87-92.

[4] VAN DIJK W, VISSER W. Energy approach to fatigue for pavement design[C]//AAPT. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. San Antonio: AAPT, 1977:1-40.

[5] VAN DIJK W. Practical fatigue characterization of bituminous mixes[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1975, 44:38-72.

[6] TAYEBALI A A, ROWE G M, SOUSA J B. Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1992, 61:333-360.

[7] 严 恒,朱洪洲,唐伯明,等. AC-13 沥青混合料疲劳能耗模型分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(4):559-562.
YAN Heng, ZHU Hong-zhou, TANG Bo-ming, et al. Study on fatigue-dissipated energy model of AC-13 asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Science, 2010, 29(4):559-562.

[8] 陈伟强. 基于耗散能量的沥青混合料疲劳破坏机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
CHEN Wei-qiang. Research on fatigue failure mecha-

- nism of asphalt mixture based on dissipated energy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [9] 季 节, 许 鹰, 索 智, 等. 基于耗散能法分析热拌及温拌再生 SMA 沥青混合料的疲劳特性[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(12): 1837-1843.
JI Jie, XU Ying, SUO Zhi, et al. Evaluation on fatigue properties of hot and warm recycled SMA mixture based on energy dissipation method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(12): 1837-1843.
- [10] 田小革, 郑健龙, 许志鸿, 等. 低加载频率下沥青混合料的疲劳效应[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 19-21.
TIAN Xiao-ge, ZHENG Jian-long, XU Zhi-hong, et al. Fatigue response of asphalt concrete at low loading frequency [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 19-21.
- [11] ROWE G M. Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1993, 62: 344-384.
- [12] 黎 晓, 梁乃兴. 应力控制模式下沥青混合料劈裂疲劳试验研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 276-280.
LI Xiao, LIANG Nai-xing. Indirect tensile test of asphalt concrete under stress control [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(5): 276-280.
- [13] PRONK A C. Comparison of 2 and 4 point fatigue tests and healing in 4 point dynamic bending test based on the dissipated energy concept [C]//International Society for Asphalt Pavement. Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements. Anoka: International Society for Asphalt Pavement, 1997: 987-994.
- [14] CJJ/T 190—2012, 透水沥青路面技术规程[S].
CJJ/T 190—2012, Technical specification for permeable asphalt pavement[S].
- [15] EN 12697-33—2007, European standard bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 33: Specimen prepared by slab compactor[S].
- [16] 田健君, 黄卫东. 基于耗散能评价沥青混合料的疲劳性能[J]. 中外公路, 2013, 33(4): 291-295.
TIAN Jian-jun, HUANG Wei-dong. Fatigue performance evaluation of asphalt mixes based on dissipated energy [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(4): 291-295.
- [17] 张婧娜, 谭忆秋, 张肖宁. 应用能量原理预测沥青混合料的疲劳破坏[J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 11-17.
ZHANG Jing-na, TAN Yi-qiu, ZHANG Xiao-ning. Predicting fatigue failure of bituminous mixtures using energy dissipation [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(4): 11-17.
- [18] 苑苗苗, 张肖宁, 陈伟强, 等. 沥青混合料疲劳失效判据探讨及验证[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 96-101.
YUAN Miao-miao, ZHANG Xiao-ning, CHEN Wei-qiang, et al. Investigation and verification of fatigue failure criterion of asphalt mixtures [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 96-101.
- [19] GHUZLAN K A, CARPENTER S H. Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing [J]. Transportation Research Record, 2000 (1723): 141-149.
- [20] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
YAO Zu-kang. Structural design of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [21] 吴志勇, 张肖宁, 游 宏, 等. 基于应变控制的沥青混合料疲劳寿命预测[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 139-144.
WU Zhi-yong, ZHANG Xiao-ning, YOU Hong, et al. Prediction of fatigue life of asphalt mixture based on strain control [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(2): 139-144.
- [22] SHEN S H, CARPENTER S H. Dissipated energy concepts for HMA performance: Fatigue and healing [D]. Urbana: University of Illinois at Urbana, 2006.