

基于永久变形试验的沥青混合料损伤分析

张久鹏¹, 李彦伟², 裴建中¹, 王秉纲¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051)

摘要: 为分析沥青混合料的损伤特性, 进行了两种沥青混合料的重复荷载永久变形试验, 采用 Kachanov 损伤律推导了沥青混合料的损伤演化方程, 并根据试验结果确定了损伤参数。结果表明, 耦合损伤的力学模型较好地描述了沥青混合料三阶段的变形特性。在荷载作用下, 沥青混合料损伤单调增加, 而接近破坏时损伤会急速发展; 在较高的应力和温度条件下, 损伤值较大, 且损伤发展较快。荷载作用次数达到流动数时, 2 种沥青混合料的损伤值基本介于 0.14~0.15 之间, 表明在永久变形的迁移期和稳定期同样存在损伤, 只是损伤值较小, 并且可以近似看成线性损伤, 但将其忽略是不合理的。

关键词: 沥青混合料; 损伤; 永久变形; 重复加载试验

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Damage Characteristic of Asphalt Mixture by Permanent Deformation Test

ZHANG Jiupeng¹, LI Yanwei², PEI Jianzhong¹, WANG Binggang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Transportation Bureau of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to analyze the damage characteristic of asphalt mixture, repeated loading permanent deformation tests of two asphalt mixtures are conducted, and the damage parameters are obtained based on the test results and damage evolution equation deduced from the Kachanov damage law. It is indicated that the mechanical model coupled with damage can well describe the whole three-phase permanent deformation of asphalt mixture under repeated loading. The damage of asphalt mixture monotonously increases with loading cycles, and the damage increases rapidly at the moment when asphalt mixture is close to failure. The value is

bigger at higher temperature and stress, and also it increases faster. When loading cycles reaches the flow number, the damage values of two asphalt mixtures are 0.14~0.15. It shows that damage also exists in the migratory and stationary phases and is approximately linear though its value is small. But, it is unreasonable to ignore the damage in these two phases.

Key words: asphalt mixture; damage; permanent deformation; repeated loading test

沥青混合料是道路工程中最重要路用材料之一, 具有显著的粘弹性特征^[1]。在重复荷载作用下, 沥青混合料的永久变形可分为迁移期、稳定期和破坏期 3 个阶段: 迁移期, 变形迅速增大, 但应变速率随时间增加逐渐减小; 稳定期, 应变稳定增长, 但应变速率基本保持不变; 破坏期, 应变、应变速率随时间增加迅速增大直至破坏^[2]。许多研究者从不同方面研究沥青混合料的永久变形特性, 建立了诸多粘弹性模型。比如, 徐世法对 Burgers 模型中串联的粘性元件进行了非线性修正, 采用“四单元五参数”模型较好地解析迁移期的变形特性^[3]。然而沥青混合料在刚成型时就呈现为一种有孔洞、微裂纹弥散的结构状态, 外部荷载或环境因素又使原有缺陷扩展^[4]。在以往沥青混合料粘弹性的研究中, 常常忽略损伤因素, 导致现有模型大多无法描述破坏阶段。针对沥青混合料三阶段的永久变形特性, 一些研究者认为不同阶段的损伤具有不同的规律: 在第一阶段, 损伤增长率随时间衰减; 在第二阶段, 损伤增长率为常量, 以适应等速变形; 而在第三阶段, 损伤增长率又随时间增大^[5]。这样不得不使用分段函数的形式来描述不同阶段的变形特性, 只是为了使理论曲线与试验曲线吻合而缺乏物理依据, 虽然能够描述但

收稿日期: 2011-08-15

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110205120002); 霍英东青年教师基金(131075); 交通运输部科技项目(2011319812020); 教育部长江学者与创新团队发展计划(IRT1050)

第一作者: 张久鹏(1983—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路面结构和材料。E-mail: zhjiupeng@163.com

却不能解析试验现象。

为此,本文进行了不同沥青混合料在不同温度和应力条件下的重复加载试验,全面、准确地描述沥青混合料的永久变形特性,建立沥青混合料的损伤演化方程,进而研究沥青混合料在不同应力、温度条件下的损伤发展规律,为以后研究提供理论基础。

1 沥青混合料重复加载永久变形试验

1.1 试件制备

本文研究选取了 AC-13 和 AC-20 两种密级配沥青混合料,其级配组成见表 1。采用石灰岩集料、矿粉和 70# 基质沥青,经旋转压实确定 AC-13、AC-20 最佳沥青用量分别为 4.8%,4.5%。首先采用 SGC (Superpave gyratory compacter) 旋转压实仪成型直径 150 mm,高 165 mm 的试件,再通过钻芯和切割获得直径 100 mm,高 150 mm 的试件。每种沥青

混合料分别制备 18 个试件。

1.2 试验结果与分析

采用 UTM-100 (universal testing machine) 试验机进行重复加载试验,测定不同荷载作用次数下沥青混合料的永久变形,再换算得到永久应变。为消除环箍效应,在试件与压头和底座之间垫置双层乳胶膜,乳胶膜之间涂抹润滑脂。采用半正矢波间歇荷载,应力峰值分别为 0.7,0.8 和 1.0 MPa,试验温度分别为 40,50 和 60 °C。Bouldin 等^[6]认为荷载间歇时间接近加载时间的 10 倍,沥青混合料的延迟粘弹性变形可以得到充分恢复。因此,设定半正矢波加载时间为 0.1 s,荷载间歇时间为 0.9 s。两种沥青混合料的试验结果如图 1—2,图中“40-0.7-1”表示试验温度为 40 °C、应力峰值为 0.7 MPa、1# 试件,其他类同。以 AC-20 沥青混合料为例,给出了 40 °C 下试件永久应变速率与荷载作用次数的关系,如图 3 所示。

表 1 沥青混合料的级配

Tab.1 Gradations of asphalt mixtures

混合料类型	各筛孔(mm)的通过百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	100	100	100	92.7	77.4	46.6	32.1	21.0	14.6	8.2	6.4	5.4
AC-20	100	100	95.0	85.0	75.0	64.0	43.0	29.0	18.0	12.0	10.0	6.5	5.0

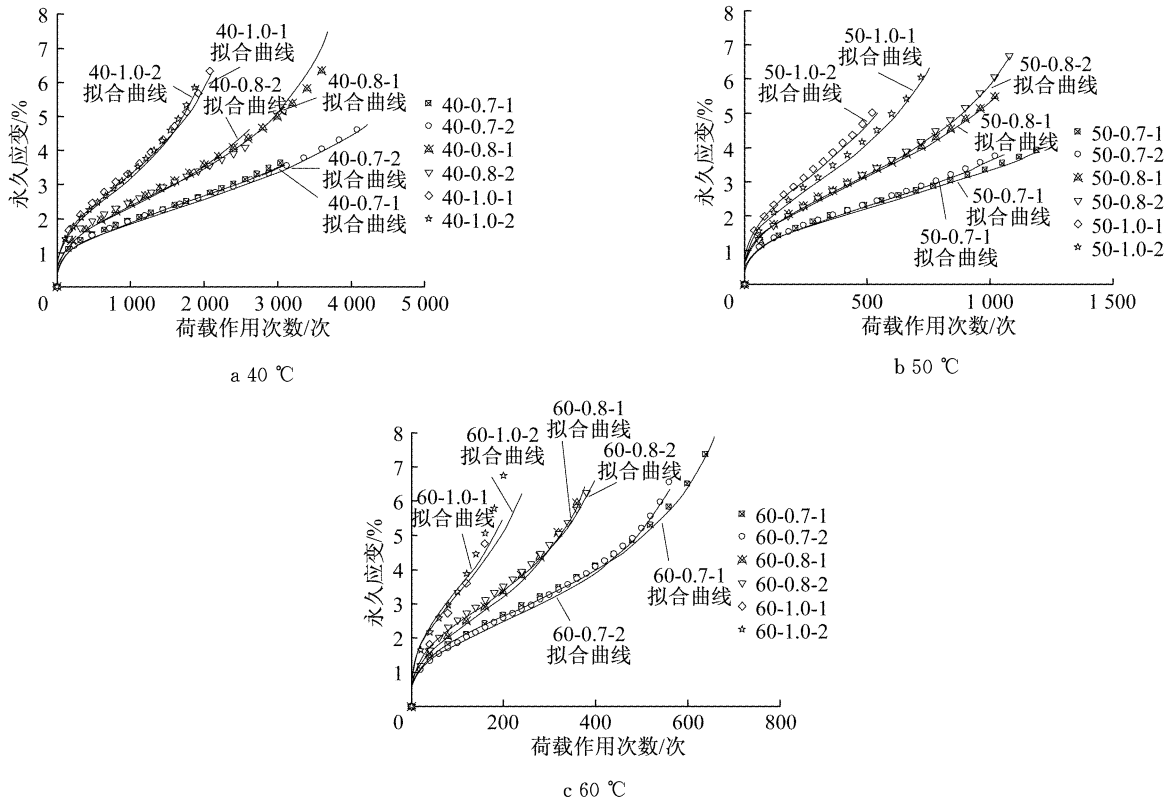


图 1 AC-13 沥青混合料的永久应变

Fig.1 Permanent strain of AC-13 asphalt mixture

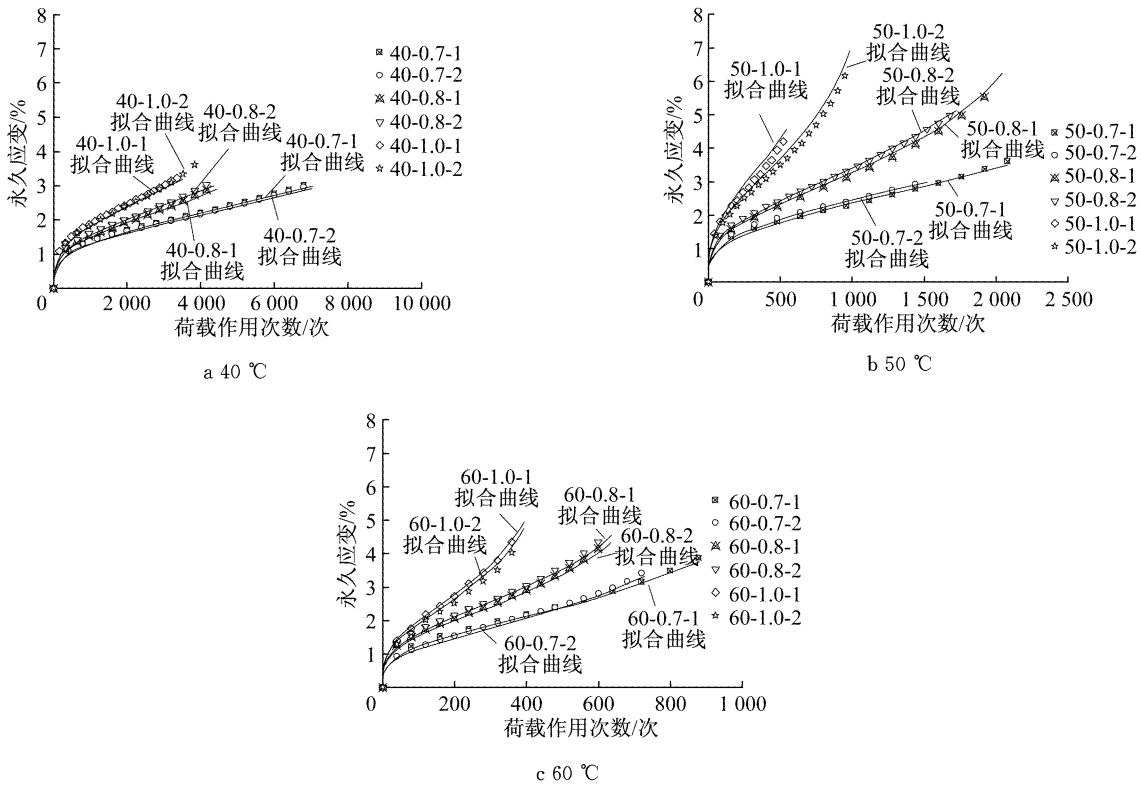


图 2 AC-20 沥青混合料的永久应变

Fig.2 Permanent strain of AC-20 asphalt mixture

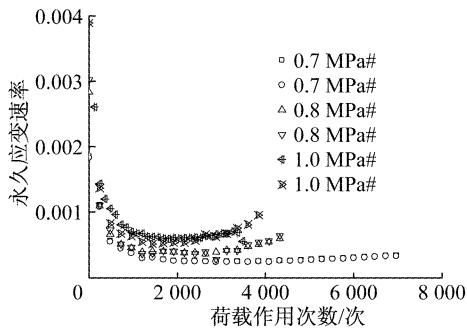


图 3 40 °C 下 AC-20 的永久应变速率

Fig.3 Permanent strains rate of AC-20 at 40 °C

可以看出,两种沥青混合料的永久变形都呈现出三阶段特性,尤其在重载和高温条件下,沥青混合料很快就进入了破坏阶段.此时,Burgers 模型、“四单元五参数”模型以及广义 Kelvin 模型等都无法描述.针对三阶段的永久变形特性,一些研究认为有必要考虑损伤的影响,认为在沥青混合料永久变形的不同阶段,具有不同的损伤规律.这样,不得不使用分段函数的形式来描述不同阶段的损伤特性,只是为了使理论曲线与试验曲线吻合而缺乏物理依据,虽然能够描述但却不能解析试验现象.而且在应力不变的条件下,损伤一旦发生则不可能衰减或停止,损伤随时间单调增加,除非其他的条件或因素发生了变化.

2 沥青混合料损伤特性分析

2.1 损伤演化方程及参数确定

损伤过程中,外荷载作用下材料承受的有效应力可以记为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_c}{1-D} \tag{1}$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为有效应力; σ_c 为 Cauchy 应力,或者称为名义应力; D 为损伤因子, $0 \leq D \leq 1$.

采用损伤力学研究沥青混合料的力学特性,需要选择合适的损伤变量.对于单轴压缩应力状态,Kachanov 采用 Norton 律公式得到 Kachanov 蠕变损伤律^[7]:

$$\dot{D} = C\bar{\sigma}^v(1-D)^{-\nu} \tag{2}$$

式中: C, ν 为依赖于温度的材料常数.

$$t_R = [C(\nu+1)\bar{\sigma}^\nu]^{-1} \tag{3}$$

式中: t_R 为临界破坏荷载时间.

由式(1)–(2)可得损伤演化规律为

$$D = 1 - (1 - t/t_R)^{1/(\nu+1)} \tag{4}$$

从本质上讲,重复荷载作用下损伤也应该是时间的连续函数,但一般关心各加载周期末损伤的演化规律,即损伤随着循环荷载作用次数 N 的变化规

律,因此假定每个加载周期内损伤恒定,到了该周期末损伤再发生突变,即

$$D = 1 - (1 - N/N_R)^\kappa \quad (5)$$

式中: N_R 为临界破坏荷载作用次数, $N=1,2,3,\dots$

2.2 损伤参数确定

根据式(5)可以分析沥青混合料永久变形过程中的损伤特性,但是在重复荷载试验中无法准确界定破坏状态,难以直接通过试验确定破坏时的累计荷载作用次数.本文运用粘弹性力学和损伤力学理论,建立考虑损伤的沥青混合料永久变形力学模型,再根据上述重复荷载试验结果进行回归分析获取损伤参数.

若不考虑损伤,重复荷载作用下沥青混合料永久变形可表述为^[8]

$$\epsilon_p = \alpha \sigma^\beta N^\lambda \quad (6)$$

式中: ϵ_p 为不考虑损伤的永久应变; σ 为荷载应力; N 为荷载作用次数; α, β, λ 为回归参数.

Lemaitre 等效应力原理认为受损材料的变形行为可以通过有效应力来体现,任何受损材料的本构关系与无损时的形式相同,只要将其中的 Cauchy 应力替换为有效应力即可^[7].因此,把式(5)代入式(1),再代入式(6),即可得到考虑损伤的永久应变表达式:

$$\epsilon_{Dp} = \alpha \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^\beta N^\lambda = \frac{\alpha \sigma^\beta N^\lambda}{(1-N/N_R)^\beta} \quad (7)$$

式中, ϵ_{Dp} 为考虑损伤的永久应变.采用 Origin 软件自定义函数进行非线性回归分析,拟合时设定指数 κ 为 0.5^[4],设定指数 λ 为 0.3^[8].为方便拟合,模型简化为

$$\epsilon_{Dp} = \frac{P_1 \sigma_0^{P_2} N^{0.3}}{(1-N/P_3)^{0.5P_2}} \quad (8)$$

式中: P_1, P_2, P_3 为拟合参数; σ_0 为荷载应力峰值.

经多次拟合,不同类型沥青混合料在不同应力、温度条件下的拟合参数见表 2—3,拟合曲线见图 1—2.可以看出,拟合曲线与实测曲线吻合很好,说明该模型能够反映沥青混合料三阶段的变形过程.

2.3 损伤发展规律分析

将表 2—3 中两种沥青混合料在不同温度和应力条件系的拟合参数取平均,经反演计算后代入式(5),再绘制损伤—荷载作用次数($D-N$)曲线,如图 4—5 所示.将两种沥青混合料在 40 °C,0.7 MPa 下损伤演化规律也进行了比较,如图 6 所示.

可以看出,两种沥青混合料的损伤演化规律大致相同:在荷载作用初期即产生损伤,并且随着荷载作用次数单调增加;在较高的应力和温度条件下,损

表 2 AC-13 沥青混合料的拟合参数

Tab.2 Regression parameters of AC-13 asphalt mixture

温度 /°C	应力 /MPa	编号	拟合参数			R ² /%
			P ₁	P ₂	P ₃	
40	0.7	1#	0.361 9	1.430	5 696	94.5
		2#	0.360 1	1.421	6 141	93.5
	0.8	1#	0.356 7	1.420	4 402	93.0
		2#	0.348 0	1.426	3 950	93.3
	1.0	1#	0.360 0	1.421	2 923	93.6
		2#	0.360 0	1.424	2 588	92.8
50	0.7	1#	0.506 8	1.429	2 135	92.9
		2#	0.493 9	1.421	1 767	93.8
	0.8	1#	0.523 1	1.428	1 586	92.9
		2#	0.512 7	1.428	1 418	94.0
	1.0	1#	0.501 0	1.427	955	94.1
		2#	0.459 2	1.430	1 046	93.5
60	0.7	1#	0.772 6	1.421	796	94.5
		2#	0.710 9	1.422	705	93.5
	0.8	1#	0.688 3	1.425	480	94.4
		2#	0.746 1	1.421	527	93.0
	1.0	1#	0.714 3	1.424	335	93.2
		2#	0.699 9	1.428	363	93.5

表 3 AC-20 沥青混合料的拟合参数

Tab.3 Regression parameters of AC-20 asphalt mixture

温度 /°C	应力 /MPa	编号	拟合参数			R ² /%
			P ₁	P ₂	P ₃	
40	0.7	1#	0.264 5	1.423	16 712	92.6
		2#	0.259 1	1.421	16 699	94.1
	0.8	1#	0.240 0	1.422	9 980	93.6
		2#	0.253 0	1.425	10 138	93.6
	1.0	1#	0.216 8	1.427	8 944	94.1
		2#	0.218 9	1.421	7 840	94.1
50	0.7	1#	0.438 8	1.429	4 736	92.7
		2#	0.459 5	1.425	5 011	94.1
	0.8	1#	0.452 4	1.427	2 798	93.1
		2#	0.473 2	1.429	2 828	93.9
	1.0	1#	0.473 2	1.427	1 011	93.1
		2#	0.450 1	1.429	1 338	94.0
60	0.7	1#	0.495 8	1.429	1 391	93.2
		2#	0.458 0	1.422	1 133	93.8
	0.8	1#	0.523 5	1.428	963	93.3
		2#	0.497 6	1.428	962	93.3
	1.0	1#	0.503 1	1.421	564	93.3
		2#	0.505 5	1.428	564	92.6

伤较大、发展较快,导致沥青混合料在较短的时间内进入破坏阶段;接近破坏时,损伤急速发展.在同等条件下,AC-20 沥青混合料的损伤值较小,且损伤发展也较慢.

根据沥青混合料三阶段永久变形特性,定义流变数 F_N 为破坏阶段起始时所对应的荷载作用次数,即为永久应变率降至最低时的荷载作用次数.依此定义,本文求解式(8)的二阶导数,得到永久应变加速度 $\ddot{\epsilon}_{Dp}$,再令 $\ddot{\epsilon}_{Dp} = 0$,则该方程的解即为流动数.带

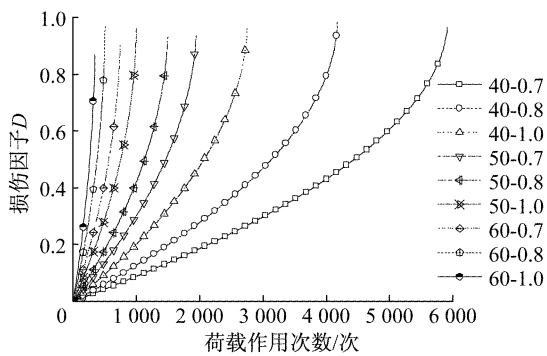


图 4 AC-13 损伤演化规律
Fig.4 Damage evolution of AC-13

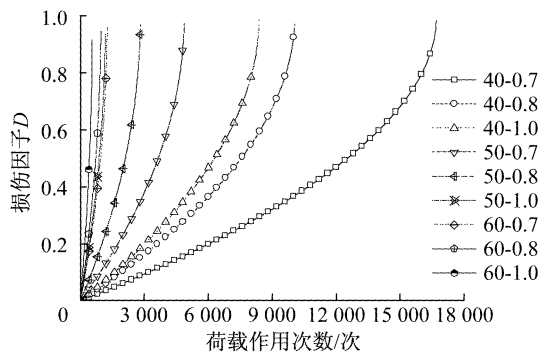


图 5 AC-20 损伤演化规律
Fig.5 Damage evolution of AC-20

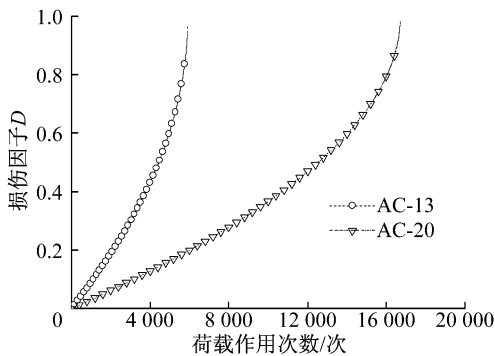


图 6 40 °C, 0.7 MPa 下两种沥青混合料损伤演化规律
Fig.6 Damage evolution of two asphalt mixtures at 40 °C and 0.7 MPa

入拟合参数的平均值,即可得到 2 种沥青混合料的流动数 F_N ,见表 4. 计算不同沥青混合料对应于流动数时的损伤值,结果见表 5.

可以看出,在对应于流动数的荷载作用次数下,不同沥青混合料的损伤基本一致,介于 0.14~0.15 之间. 荷载作用次数达到流动数之前,损伤较小,并且可以近似看成线性损伤,但将其忽略是不合理的;荷载作用次数达到流动数之后,损伤值较大,呈非线性快速发展趋势.

表 4 不同温度和应力条件下的流动数

Tab.4 Flow number of asphalt mixture at different temperatures and stresses

混合料类型	温度 /°C	应力峰值/MPa		
		0.7	0.8	1.0
AC-13	40	1 585	1 118	738
	50	522	402	268
	60	201	135	94
AC-20	40	4 473	2 693	1 742
	50	1 305	753	315
	60	338	258	151

表 5 对应于流动数时的损伤值

Tab.5 Damage value at the loading cycle corresponding to flow number

混合料类型	温度 /°C	应力峰值/MPa		
		0.7	0.8	1.0
AC-13	40	0.144 3	0.144 3	0.144 3
	50	0.144 2	0.144 2	0.144 4
	60	0.144 3	0.144 5	0.145 2
AC-20	40	0.144 3	0.144 3	0.139 8
	50	0.144 3	0.144 2	0.144 5
	60	0.144 3	0.144 5	0.144 3

3 结论

(1) 沥青混合料重复加载永久变形试验结果表明,在较低的应力和温度下,沥青混合料只呈现出第一和第二阶段,或者需要较长的荷载作用时间才能进入破坏阶段;在较高的应力和温度条件下,沥青混合料很快就进入了破坏阶段.

(2) 运用粘弹性力学和损伤力学理论,推导了沥青混合料的损伤演化方程,建立了耦合损伤的永久变形力学模型;根据重复荷载永久变形试验结果进行回归分析,获取了不同温度和应力条件下沥青混合料的损伤参数.

(3) 分析了沥青混合料的损伤演化规律,结果表明在荷载作用初期即产生损伤,而且随着荷载作用次数单调增加;在较高的应力和温度条件下,损伤较大,且发展较快,导致沥青混合料在较短的时间内进入破坏阶段;接近破坏时,损伤则会急速发展.

(4) 根据流动数 F_N 的定义和耦合损伤的永久变形力学模型,计算了 2 种沥青混合料的流动数和对应于流动数时的损伤值,结果表明对应于流动数时不同沥青混合料的损伤基本一致,介于 0.14~0.15 之间;荷载作用次数达到流动数之前,损伤较小,并且可以近似看成线性损伤,但将其忽略是不合理的;荷载作用次数达到流动数之后,损伤值较大,呈非线性快速发展趋势.