

冷拌冷铺乳化沥青混合料在不同应变组合下的疲劳性能研究

任小遇¹, 郭倩芸¹, 梁恒健¹, 姜维², 徐世法³

(1. 北京建筑大学北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 北京市交通委员会房山公路分局, 北京 102488; 3. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要 目的 研究在单级应变与双级应变组合的不同加载方式下冷拌冷铺乳化沥青混合料劲度模量及疲劳寿命的变化规律, 为冷拌冷铺乳化沥青混合料的抗疲劳性能研究提供借鉴。方法 综合考虑车辆荷载的大小, 选定 A (200×10^{-6})、B (400×10^{-6})、C (600×10^{-6}) 三个应变水平, 以单级应变为试验对照组, 以 A-B 和 C-A 为双级应变组合, 对冷拌冷铺乳化沥青混合料分别进行单级及双级应变下的四点弯曲疲劳试验, 由此对比分析混合料疲劳寿命与劲度模量随应变变量及应变组合不同而变化的规律。结果 在单级应变作用下, 试件劲度模量先急剧下降, 然后缓慢衰减, 且应变越大劲度模量衰减越快; 在应变水平由低到高的双级应变 A-B 组合作用下, 由 A 应变转入 B 应变加载后, 劲度模量瞬间增大了 35%, 之后先急剧降低再进入平缓阶段, 且疲劳寿命在 A、B 单级应变加载之间; 而在应变水平在由高到低的 C-A 加载组合中, 由 C 应变转入 A 应变加载后, 劲度模量瞬时衰减 11%, 之后先急剧降低再进入平缓阶段, 且疲劳寿命要长于在应变中值水平 B 单级应变加载下的。结论 从低应变到高应变的加载过程中, 恢复了试件的劲度模量, 延缓了沥青混合料的破坏过程, 进行 A-B 应变加载模式的试件疲劳寿命要多于由 C-A 应变的加载模式。

关键词 乳化沥青混合料; 四点弯曲疲劳试验; 组合应变; 疲劳性能评价

中图分类号 TU528.42; U414

文献标志码 A

Study on Fatigue Performance of Cold Mix Emulsified Asphalt Mixture under Different Strain Combination

REN Xiaoyu¹, GUO Qianyun¹, LIANG Hengjian¹, JIANG Wei², XU Shifa³

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing, China, 100044; 2. Fangshan Highway Branch of Beijing

收稿日期: 2022-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978034); 北京市自然科学基金与北京市教委联合基金项目(KZ202110016020); 北京建筑大学博士研究生科研能力提升项目(DG2021012)

作者简介: 任小遇(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事道路材料方面研究。

Municipal Commission of Transportation, Beijing, China, 102488; 3. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing, China, 100044)

Abstract: In this paper, the variation of stiffness modulus and fatigue life of cold-mixed emulsified asphalt mixture under different loading modes were compared and studied, which include single-stage strain and the two-stage strain combination. It can provide reference for the study of fatigue resistance of cold-mix emulsified asphalt mixture. Comprehensively, considering the weight of vehicle load, three strain levels of A (200×10^{-6}), B (400×10^{-6}) and C (600×10^{-6}) were selected from low to high. The single-stage strain was used as the experimental control group, and A-B and C-A were used as the two-stage strain combinations. The four-point bending fatigue tests of cold-mixed emulsified asphalt mixture under single-stage and two-stage strains were carried out, respectively. Thus, the variation laws of fatigue life and stiffness modulus of mixture with different strain and strain combinations were compared and analyzed. The results show that, under the action of single-stage strain, the stiffness modulus of the specimen decreased sharply at first and then attenuated slowly. Besides, the greater the strain was, the faster the stiffness modulus decreased. Under the combined action of the two-stage strain A-B with the strain level from low to high, the stiffness modulus increased by 35% immediately after the strain was transferred from A strain to B strain loading, and then decreased sharply. Afterwards, the stiffness modulus entered the gentle stage. Moreover, the fatigue life under the combined loading of two-stage strain A-B is between the single-stage strain loadings of A and B. When the strain level is changed from C strain to A strain in the C-A loading combination from high to low, the stiffness modulus decreases by 11% instantaneously, then decreased sharply, and finally entered the gentle stage. Moreover, the fatigue life of the two-stage strain combination C-A loading was longer than that of the single-stage strain loading at the strain median level B. During the loading process from low strain to high strain, the stiffness modulus of the specimen was restored, and the failure process of the asphalt mixture was delayed. The fatigue life of the specimen under A-B loading mode was longer than that under C-A loading mode.

Key words: emulsified asphalt mixture; four-point bending fatigue test; combined strain; fatigue performance evaluation

沥青路面所受到的车辆荷载是时刻变化的,随机变化的荷载也对沥青路面的疲劳性能产生了显著影响,当前国内外学者针对热拌沥青混合料在应变组合下的疲劳性能进行了一些研究。华南理工大学吴志勇等^[1-3]研究了 AC-13 型热拌沥青混合料在多级荷载作用下的疲劳寿命,提出并建立了与加载次序相关的疲劳寿命预测方程,其预测结果比以往的模型更为准确;孙兆辉等^[4-6]通过小梁弯曲试验,研究了 3 种应力水平下 7 种沥

青路面中、下面层混合料的抗疲劳性能,建立了不同级配的威布尔疲劳寿命预测方程;黄卫东等^[7-10]采用四点弯曲疲劳试验研究热拌沥青混合料的疲劳寿命,通过变化加载频率、荷载和损伤程度分析对沥青混合料的后期自愈合效果的影响,发现改变加载频率时间、荷载对沥青混合料的后期愈合具有正面作用;当前对热拌沥青混合料在应变组合作用下的疲劳性能已经有了较为系统的研究。

冷拌冷铺乳化沥青混合料具有常温拌

合、节能减排的特点,近年来已成为业内研究的热点。徐世法等^[11]开发了乳化型冷拌冷铺沥青混合料超薄磨耗层,并将其用于内蒙古准兴重载高速公路;李思童等^[12]对冷拌冷铺乳化沥青混合料的长期路用性能进行了研究。目前对于冷拌冷铺乳化沥青混合料的研究主要集中在强度形成机理、性能评价等方面^[13-17],但对于冷拌冷铺乳化沥青混合料应变组合下的疲劳性能研究较少。

基于此,笔者分别对冷拌冷铺乳化沥青混合料进行单级应变和双级应变组合下的疲劳试验,并将两种不同应变加载模式下测得的混合料疲劳性能进行对比,分析其劲度模量与疲劳寿命的变化规律以及应变组合对冷

拌冷铺乳化沥青混合料的疲劳性能的影响。研究表明:应变组合对冷拌冷铺乳化沥青混合料的疲劳性能有显著的影响,低-高应变加载模式的试件疲劳寿命要多于由高-低应变的加载模式。

1 原材料及混合料配合比设计

1.1 乳化沥青

笔者选用自主研发的冷拌冷铺专用阳离子慢裂慢凝 SBS 改性乳化沥青(YH-1301 线型 SBS 改性剂,用量为沥青质量的 3.5%),其具有破乳速率可控、稳定性好且对集料的裹附能力强等特点,相关技术指标见表 1。

表 1 乳化沥青技术指标
Table 1 The technical index of emulsified asphalt

项目	沥青质量 分数/%	筛上剩 余量/%	恩格拉 粘度/°E	与矿料粘附 性、裹覆试验	残留物针入度 (25℃)/ 0.1 mm	残留物 软化点/ ℃	残留物延 度(15℃)/ cm	储存稳定 性(1d)/ %	储存稳定 性(5 d)/ %
技术要求	60~65	<0.3	3~15	通过	40~90	≥60	≥30	≤1	≤5
试验结果	62.3	0.021	5.1	通过	67.4	62.2	48.5	0.18	1.32

1.2 集料性能指标

本试验粗集料采用石灰岩,细集料选用机制砂,外加剂采用 P·O 42.5 水泥,其技术指标满足规范要求^[18]。

1.3 级配

本试验采用 AC-13 合成级配,级配曲线如图 1 所示。

1.4 配合比设计

参照马歇尔试验方法进行配合比设计,以乳化沥青用量 8.0% 为中值,按照 0.5% 增减乳化沥青用量,养生后测定试件的力学和体积指标,结果如图 2 所示。根据混合料的拌和状态、力学与体积指标的技术要求综合确定冷拌冷铺乳化沥青混合料最佳外掺水量为 2.0%、最佳乳化沥青用量为 8.0%、最佳

水泥掺量为 1.0%。

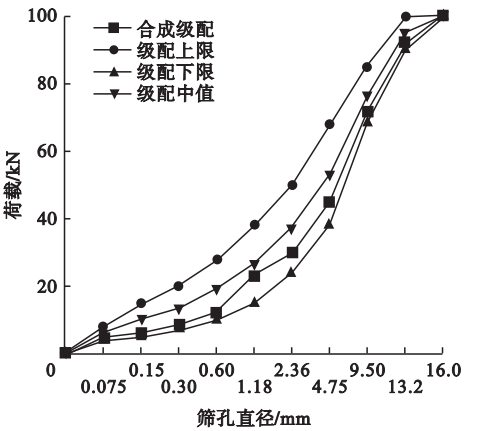


图 1 乳化沥青混合料级配曲线
Fig. 1 The mixture gradation curve of emulsified asphalt

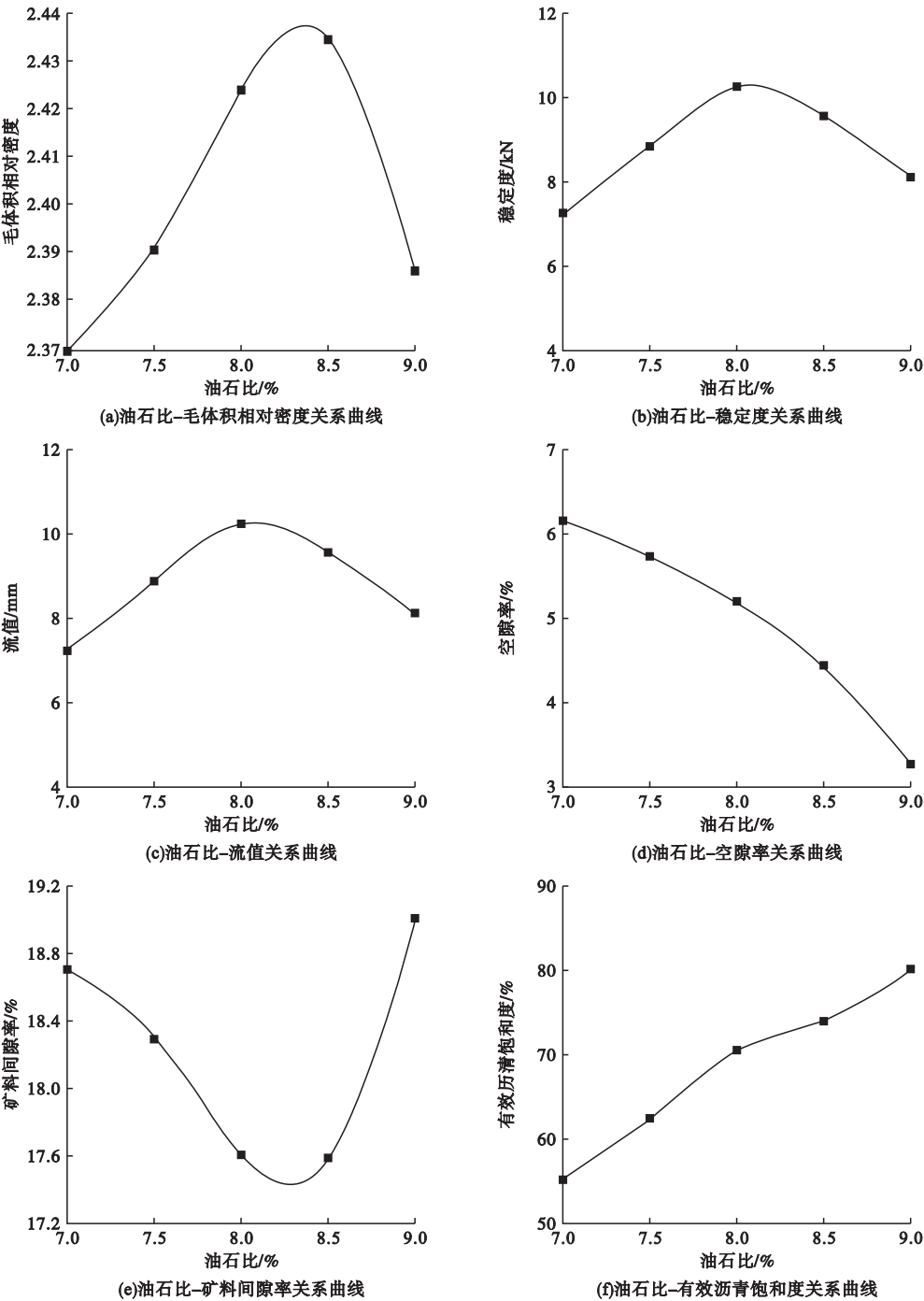


图2 乳化沥青混合料力学与体积指标

Fig.2 The mechanical and volume index of emulsified asphalt mixture

1.5 混合料的成型及养生

混合料的拌和:首先,按照设计级配准备所需的集料和水泥;其次,在拌和锅内将集料干拌45 s,加入水泥后再拌和45 s;然后,加入外加水拌和60 s;最后,加入乳化沥青拌和

45 s,即为乳化沥青混合料。

成型及养生:按照马歇尔击实法成型试件,双面击实50次。将试件室内静置12 h后放进90℃烘箱中养生24 h,取出后立即双面击实25次,室温静置12小时后即可测试。

对成型和养生后的乳化沥青混合料进行性能测试,试验结果如表 2 所示,其指标达到热拌改性沥青混合料技术要求。

表 2 乳化沥青混合料试验结果

Table 2 The test results of emulsified asphalt mixture

项目	稳定 度/kN	残留稳 定度/%	冻融劈 裂强度 比/% (次·mm ⁻¹)	动稳 定度/ 变/10 ⁻⁶	破坏应 变/10 ⁻⁶
技术要求	≥8.0	≥85	≥80	≥2 800	≥2 500
试验值	13.4	91.5	88.9	8 732	2 764

2 试验方案及结果分析

2.1 试验参数和试验方案

综合车辆荷载的大小,选定 A (200 × 10⁻⁶)、B (400 × 10⁻⁶)、C (600 × 10⁻⁶) 三个应变水平,以单级应变为试验对照组,以 A-B 和 C-A 为双级应变组合,对冷拌冷铺乳化沥青混合料分别进行单级和双级应变下的四点弯曲疲劳试验,由此对比分析混合料疲劳寿命与劲度模量随应变变量及应变组合不同而变化的规律。

疲劳试验终止条件:单级加载时,试件劲度模量衰减至初始的 50% 或疲劳寿命达到 100 万次时试验停止;两级加载时,第一阶段加载次数是第一级应变单独加载时疲劳寿命的一半(大于 100 万次按照 100 万次计算),第二阶段加载至试件劲度模量衰减为突变后的 50% 时试验停止,此时所对应的循环荷载作用次数即为疲劳寿命。

2.2 单级应变作用下乳化沥青混合料疲劳性能结果分析

2.2.1 劲度模量随应变作用次数的变化规律

在 A、B 和 C 三个应变水平下进行单级加载试验,劲度模量的变化如图 3 ~ 图 5 所示。

通过对 A、B 和 C 单级应变下的劲度模量随荷载循环次数的变化规律分析,发现单级应变作用下劲度模量的变化分为急剧下降阶段和缓慢衰减阶段。初始劲度模量均为

4 000 MPa 以上,当加载应变水平越大时,劲度模量曲线的第一阶段斜率越大,衰减速率越快。

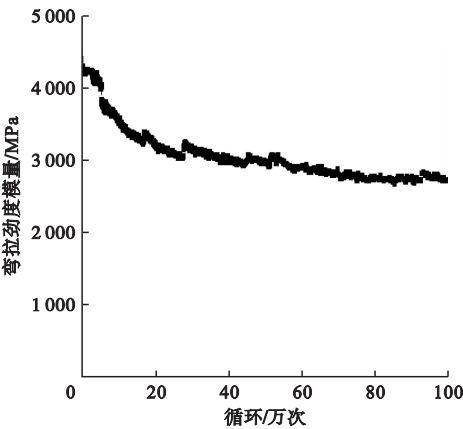


图 3 单级应变 A 加载下的劲度模量变化

Fig. 3 The stiffness modulus of single stage load A

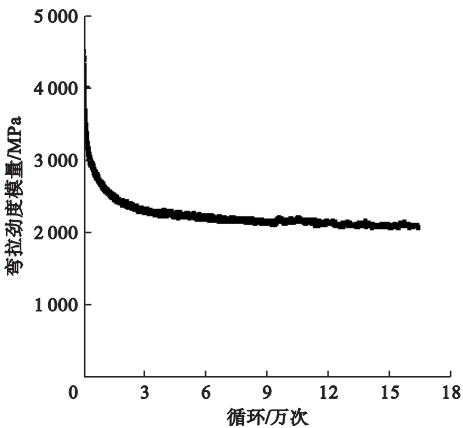


图 4 单级应变 B 加载下的劲度模量变化

Fig. 4 The stiffness modulus of single stage load B

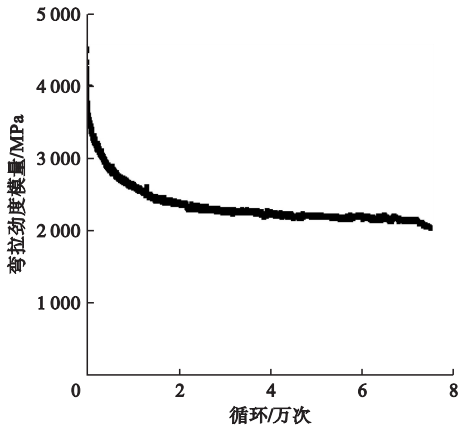


图 5 单级应变 C 加载下的劲度模量变化

Fig. 5 The stiffness modulus of single stage load C

2.2.2 单级应变加载的疲劳寿命

试件在 A、B 和 C 三种应变水平单级加载后得到的疲劳寿命如表 3 所示。

表 3 三种应变水平下的疲劳寿命

Table 3 The fatigue life at three strain levels			
应变水平	试件编号	疲劳寿命/万次	疲劳寿命均值/万次
A	1-1	>100	>100
	1-2	>100	
	1-3	>100	
	1-4	>100	
B	2-1	15.72	16.88
	2-2	18.43	
	2-3	21.05	
	2-4	16.49	
C	3-1	8.10	7.46
	3-2	6.82	
	3-3	7.68	
	3-4	7.25	

由表 3 可知,B 和 C 应变作用下冷拌冷铺乳化沥青混合料的疲劳寿命分别为 16.88 万次和 7.46 万次,在 A 应变作用下其疲劳寿命达到 100 万次以上,且试件未完全破坏失效。发现在单级应变作用条件下,冷拌冷铺乳化沥青混合料的疲劳寿命随应变水平的增加出现递减的趋势,A 应变作用时试件的疲劳寿命最长。

2.3 两级应变组合下乳化沥青混合料疲劳性能结果分析

2.3.1 劲度模量随应变作用次数的变化规律

为了体现路面受到的车辆荷载大小时刻变化,采用 A-B 和 C-A 两种应变组合模式,探究不同应变组合对试件疲劳寿命的影响,具体参数见表 4。两级应变组合下试件的劲度模量变化见图 6 和图 7。

表 4 两级应变的加载形式

Table 4 The loading form of two-stage strain				
应变组合	第一阶段		第二阶段	
	应变水平	加载次数均值/万次	应变水平	加载次数均值/万次
A-B	A	50	B	14.84
C-A	C	3.73	A	52.68

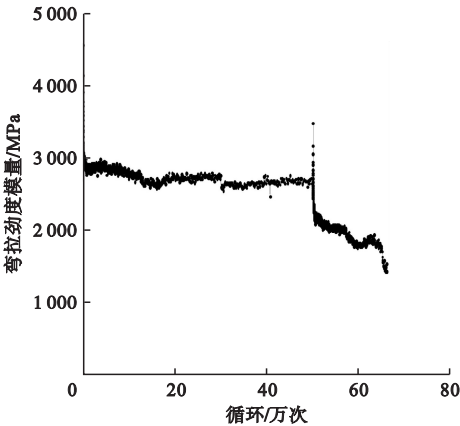


图 6 A-B 加载模式下的劲度模量变化
Fig. 6 The stiffness modulus variation at A-B loading mode

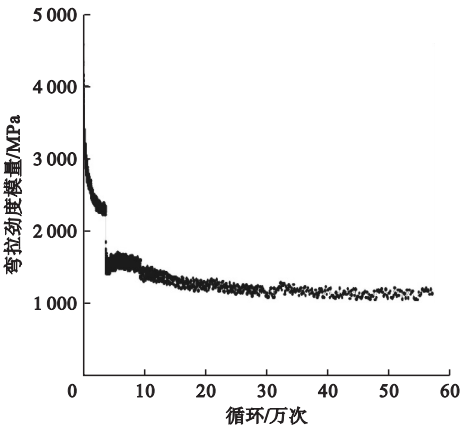


图 7 C-A 加载模式下的劲度模量变化
Fig. 7 The stiffness modulus variation at C-A loading mode

由图可知,两种不同组合加载模式下的劲度模量变化规律明显不同。分析图 6 可知,在 A-B 应变组合加载时,劲度模量在第一加载阶段 A 应变作用下与单一应变单独加载时的变化趋势相同,当进行第二阶段 B 应变加载时,劲度模量从第一阶段末的 2 800 MPa 瞬间突变到 3 800 MPa,由 A-B 应变转换时乳化沥青混合料劲度模量瞬间增大了 35%,之后急剧降低至 2 300 MPa 趋于稳定,在 B 单级应变加载时同样是到达 2 300 MPa 左右后趋于稳定。分析图 7 可知,在 C-A 两级加载时,劲度模量在第一加载阶段 C 应变作用下与单一应变单独加载时变

化趋势相同,当进入第二级 A 应变加载时,劲度模量由 2 200 MPa 突变到 1 950 MPa,其衰减率为 11%,之后急剧降低到 1 400 MPa 后进入平缓阶段直至试验结束。当加载模式由低应变向高应变转换时,试件劲度模量瞬

间增大,加载模式由低应变向高应变转换时,试件劲度模量明显衰减。

2.3.2 两级应变加载的疲劳寿命

两级应变加载下的疲劳寿命如表 5 所示。

表 5 两级加载下试件的疲劳寿命

Table 5 The fatigue life of specimen under two-stage loading

应变组合	第一阶段		第二阶段		两级加载疲劳寿命/ 万次
	应变 水平	加载次数均值/ 万次	应变 水平	加载次数均值/ 万次	
A-B	A	50	B	14.84	64.84
C-A	C	3.73	A	52.68	56.41

由表 5 可知,作用次序的不同导致试件的疲劳寿命有所差异。A-B 两级应变加载时的疲劳寿命为 64.84 万次,其疲劳寿命在 A、B 单级加载疲劳寿命之间;先经过 A 低水平应变加载 50 万次后,在 B 中水平应变下经 14.84 万次加载后结束,为 B 单级应变加载疲劳寿命的 88%,由此看出 A 低水平应变对乳化沥青的疲劳寿命影响较小;C-A 两级应变加载的疲劳寿命要多于平均应变水平 B 单级应变加载时的疲劳寿命。应变加载次序对于沥青混合料的疲劳寿命也具有明显影响,由于加载模式由低应变向高应变转换时,试件劲度模量增大,加载模式由高应变向低应变转换时,试件劲度模量降低,所以进行低-高应变加载模式的试件疲劳寿命要多于由高-低应变的加载模式。

3 结 论

(1)在单级应变作用下,试件劲度模量先急剧下降,然后缓慢衰减,且应变越大劲度模量衰减越快。

(2)采用 A-B 两级加载时,试件在由 A 应变水平转入 B 应变水平加载时,劲度模量瞬间增大了 35%,之后急剧降至 2 300 MPa 趋于平缓。采用 C-A 两级加载时,试件在由 C 应变水平转入 A 应变水平加载后,劲度模量瞬间由 2 200 MPa 突降至 1 950 MPa,衰减

率为 11%,之后迅速降低到 1 400 MPa 后趋于稳定。分析发现,当应变水平与加载次序变化时,冷拌冷铺乳化沥青混合料疲劳损伤发展规律存在明显差异。

(3)采用 A-B 两级加载时,试件的疲劳寿命介于单级加载之间,第二阶段的疲劳寿命约为 14.84 万次,是 B 单级应变加载时的 88%。C-A 两级应变加载的疲劳寿命大于平均应变水平 B 单级应变的疲劳寿命。可见应变组合对冷拌冷铺乳化沥青混合料的疲劳性能有显著的影响,低-高应变加载模式的试件疲劳寿命要多于由高-低应变的加载模式。

参考文献

[1] 吴志勇. 基于多级等幅荷载下的沥青混合料损伤累积和沥青面层疲劳损伤破坏研究 [D]. 广州:华南理工大学,2014.
(WU Zhiyong. Research on cumulative fatigue damage of asphalt mixture and asphalt layer based on multi-level amplitude loading [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2014.)

[2] 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 Miaomiao, ZHANG Xiaoning, CHEN Weiqiang, et al. Investigation and verification of fatigue failure criterion of asphalt mixtures [J]. South China university of technology (natural science), 2013,41(4):96-101.)

[3] 聂文. MA 类沥青混合料疲劳性能评价方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

- (NIE Wen. Study on fatigue performance evaluation method of MA class asphalt mixture [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [4] 孙兆辉, 杨国峰, 于保阳, 等. 中、下面层沥青混合料疲劳性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 1093-1098.
(SUN Zhaohui, YANG Guofeng, YU Baoyang, et al. Study on the fatigue performance of asphalt mixtures for interface layer and underlying surface [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(6): 1093-1098.)
- [5] 朱洪洲, 高爽, 唐伯明. 沥青混合料常应变小梁弯曲疲劳试验[J]. 华中科技大学学报, 2009, 29(2): 5-8.
(ZHU Hongzhou, GAO Shuang, TANG Boming. Fatigue properties of asphalt mixtures by controlled-strain testing [J]. Journal of huazhong university of science and technology, 2009, 26(2): 5-8.)
- [6] 艾长发, 成猛, 杨涛, 等. 含层间界面的沥青混合料复合小梁弯曲疲劳试验[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12): 27-31.
(AI Changfa, CHENG Meng, YANG Tao, et al. Flexural fatigue test on beams of asphalt mixture involving inter-surface [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2011, 28(12): 27-31.)
- [7] 黄卫东, 李本亮, 黄明. 沥青混合料自愈合特性四点弯曲疲劳试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 572-577.
(HUANG Weidong, LI Benliang, HUANG Ming. Evaluation of self-healing of asphalt mixture through four-point bending fatigue test [J]. Journal of building materials, 2015, 18(4): 572-577.)
- [8] 虞将苗, 张肖宁. 沥青混合料四点弯曲疲劳试验方法及夹具改进[J]. 公路, 2011(3): 132-136.
(YU Jiangmiao, ZHANG Xiaoning. Test method of four-point bending fatigue for asphalt mixtures and modification of test frame [J]. Highway, 2011(3): 132-136.)
- [9] 许志鸿, 李淑明, 高英, 等. 沥青混合料疲劳性能研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 20-24.
(XU Zhihong, LI Shuming, GAO Ying, et al. Research on fatigue characteristic [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2001, 1(1): 20-24.)
- [10] 王明刚, 孙静. 再生沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 270-274.
(WANG Minggang, SUN Jing. Study on road performance of recycled asphalt mixture [J]. Journal of China & foreign highway, 2019, 39(1): 270-274.)
- [11] 徐世法, 黄玉颖, 蔡硕果, 等. 冷拌冷铺沥青混合料技术进展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(2): 34-36.
(XU Shifa, HUANG Yuying, CAI Shuoguo, et al. Progress of technologies for cold mix asphalt [J]. Road machinery & construction mechanization, 2018, 35(2): 34-36.)
- [12] 李思童. 冷拌冷铺沥青混合料长期路用性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
(LI Sitong. Evaluation on long-term performance of cold mixed asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)
- [13] MOGHADAS N F, FLAKIE J A, MOHAMMADI M A. Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures [J]. Construction and building materials, 2010, 24(7): 1158-1165.
- [14] 杨彦海, 杨野, 曲泰霖, 等. 基于正交设计的乳化沥青冷再生下面层力学特性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 288-297.
(YANG Yanhai, YANG Ye, QU Tailin, et al. Mechanical behavior analysis of cold recycling emulsified asphalt used as bituminous concrete subsurface based on orthogonal designing [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(2): 288-297.)
- [15] ORUC S, CELIK F, AKPINAR M V. Effect of cement on emulsified asphalt mixtures [J]. Journal of materials engineering and performance, 2007, 16(5): 578-583.
- [16] XIAO Jingjing, JIANG Wei, YE Wanli, et al. Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture [J]. Construction and building materials, 2019, 220(30): 577-586.
- [17] 逯艳华, 武泽锋. 水泥-乳化沥青混凝土的路用性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 285-293.
(LU Yanhua, WU Zefeng. Research on road performance of cement-emulsified asphalt concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 285-293.)
- [18] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
(Institute of Highway Science, Ministry of Communications. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2005.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)