

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.08.001

疲劳荷载对水泥乳化沥青纤维复合材料 黏弹行为的影响及机理分析

曹睿明, 陈小兵, 陈先华
(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了研究疲劳荷载作用下, 水泥乳化沥青纤维复合材料的黏弹行为, 采用动态剪切流变仪 (DSR), 以耗散能和累计耗散能为主要评价指标, 研究了 A/C (沥青比), 玄武岩纤维掺量和应力水平等因素对试件黏弹行为的影响规律, 得到黏弹性能最佳时的复合材料配比, 并通过扫描电镜测试从微观角度分析了纤维对复合材料黏弹行为的作用机理。结果显示: 耗散能随疲劳荷载的变化规律可分为快速增长期、缓慢增长期和急速增长期 3 个阶段。 A/C 越大, 胶浆中的柔性成分比例越多, 复合材料的耗散能和累计耗散能越大; 增大应力水平, 会使复合材料的耗散能曲线急剧上升, 试件的破坏速度加快; 玄武岩纤维的掺入能明显改善水泥乳化沥青胶浆的疲劳寿命和黏弹行为, 延缓试件的破坏速度, 当纤维掺量为 2% 时, 疲劳寿命和累计耗散能达到最大值, 复合材料的黏弹性能最佳; 微观分析表明, 玄武岩纤维能很好地分散在水泥乳化沥青基体中, 形成触角状结构, 起到了良好的吸附和加筋作用, 改变了水泥乳化沥青胶浆的黏弹行为, 延长了复合材料的使用寿命。

关键词: 道路工程; 黏弹行为; 疲劳荷载; 水泥乳化沥青胶浆; 微观机理

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2020) 08-0001-06

Analysis on Influence of Fatigue Load on Viscoelastic Behavior of Cement Emulsified Asphalt Fiber Composite and Mechanism

CAO Rui-ming, CHEN Xiao-bing, CHEN Xian-hua
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to study the viscoelastic behavior of cement emulsified asphalt fiber composite under fatigue loading, taking dissipation energy and cumulative dissipation energy as the main evaluation indicators, the A/C (asphalt-cement ratio), the influences of basalt fiber content and the stress level on the viscoelastic behavior of the sample are studied by using dynamic shear rheometer (DSR). The ratio of composite for the best viscoelastic performance is obtained, the mechanism of the fiber's effect on the viscoelastic behavior of the composite is analyzed from a microscopic perspective by SEM. The result shows that (1) The change of dissipative energy with fatigue load can be divided into 3 stages: fast growing stage, slow growing stage and very fast growing stage, the larger the A/C , the larger the proportion of flexible component in the mortar, and the larger the dissipation energy and cumulative dissipation energy in the composite. (2) Increasing the stress level will lead to a sharp rise of the dissipation energy curve of the composite and a faster failure rate of the sample. (3) The addition of basalt fiber can obviously improve the fatigue life and the viscoelastic behavior of cement emulsified asphalt mortar and can delay the failure speed of the sample. When the fiber content is 2%, the fatigue life and the cumulative dissipation energy reach the maximum value, and the composite has

收稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778136)

作者简介: 曹睿明 (1979-), 男, 江苏南京人, 硕士. (76184792@qq.com)

the best viscoelastic properties. The microcosmic analysis shows that the basalt fiber can be well dispersed in the matrix of cement emulsified asphalt to form the tentacle-like structure structure, which plays a good role of adsorption and reinforcement, thus the viscoelastic behavior of cement emulsified asphalt mortar is changed, and the service life of the composite is prolonged.

Key words: road engineering; viscoelastic behavior; fatigue load; cement emulsified asphalt mortar; micromechanism

0 引言

水泥乳化沥青复合胶浆是由水泥和乳化沥青复合而成的胶结材料，主要用于高速铁路板式无砟轨道 CA 砂浆的胶结料^[1-4]，在道路工程中水泥乳化沥青复合胶浆与适宜级配的集料一起经过冷拌、冷铺和碾压之后形成的水泥乳化沥青混凝土，可以作为道路铺面材料使用^[5-8]。水泥和乳化沥青结合时，水泥遇水发生水化硬化，乳化沥青失水破乳出现凝结，共同促进了材料基体强度的增长，同时也发挥了水泥高强度和沥青易变形的优势，极大地扩展了复合材料的服役范围^[9-11]。实际使用时，荷载作用下，水泥乳化沥青复合胶浆受到疲劳荷载的重复作用，性能会逐渐劣化直至破坏。水泥乳化沥青复合胶浆中沥青作为典型的黏弹性材^[12-13]，在荷载作用下会出现应力应变的滞后，造成材料整体力学响应状态的变化。为了增强水泥乳化沥青复合胶浆的性能，本研究将玄武岩纤维作为增强相掺入水泥乳化沥青复合胶浆中制备得到了水泥乳化沥青纤维复合材料，并研究了疲劳荷载作用下，复合材料的黏弹行为，为促进水泥乳化沥青复合胶浆的纤维增强研究提供理论指导。

1 试验

1.1 原材料

乳化沥青采用自制的阳离子乳化沥青，其蒸发残留物的主要技术指标如表 1 所示；水泥采用 P. O. 42.5R 普通硅酸盐水泥，其主要化学成分如表 2 所示；纤维选用盐城市某工程材料有限公司生产的短切玄武岩纤维，外观呈灰白色絮状，单纤直径约 5 μm，长度 3~6 mm，密度为 2.815 g/cm³；增稠剂和消泡剂分别选用聚氨酯类增稠剂和有机硅消泡剂。

表 1 乳化沥青蒸发残留物基本性质

Tab. 1 Basic properties of emulsified asphalt evaporation residue				
固含量/ %	针入度 (100 g, 25 ℃, 5 s) (0.1 mm)	残留延度比 (25 ℃)/%	溶解度	破乳速度
62.5	86	80	99.8	慢裂

表 2 水泥的化学组成
Tab. 2 Chemical composition of cement

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃
含量/%	23.16	5.03	63.37	1.06	2.03	5.05

1.2 水泥乳化沥青纤维复合材料制备

首先按不同 A/C 称取一定质量的乳化沥青倒入拌和锅中，并加入一定质量的消泡剂，以 60 r/min 的速度搅拌 60 s 使材料充分混合直至均匀；然后称取一定质量的玄武岩纤维倒入拌和锅并继续搅拌 180 s，使纤维均匀分散在乳化沥青中；再将对应比例的水泥、减水剂和增稠剂倒入拌和锅，以 60 r/min 的速度搅拌 60 s，以 120 r/min 的速度快速搅拌 180 s，再以 60 r/min 的速度搅拌 60 s；最后将混合物倒入 60 mm×15 mm×4 mm 的试模中，放置 3 d 后拆模，将拆模后的试件放入标准养护室养护 60 d 后，进行蠕变试验。

1.3 试验方法

采用动态剪切流变仪（DSR）测试水泥乳化沥青纤维复合材料的黏弹行为，测试循环荷载作用下，复合材料复数模量和相位角的变化规律。其中加载模式采用应力控制模式，试验温度为 25 ℃，加载频率为 10 Hz。并根据不同 A/C 情况下复合材料的强度差异，选用合适的应力水平。

将循环荷载施加于黏弹性材料时，应力和应变的响应会存在一个初始的相位差^[14-16]，如图 1 所示。此时绘制应力-应变曲线发现曲线呈闭合环状，在黏弹性理论中将应力应变环称为滞后环线，如图 2 所示。

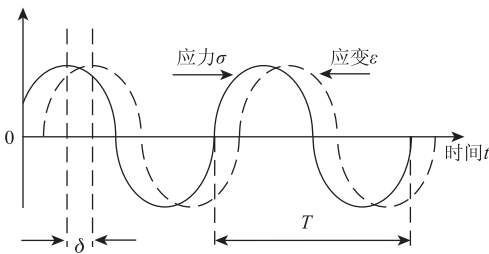


图 1 应力应变响应

Fig. 1 Stress and strain responses

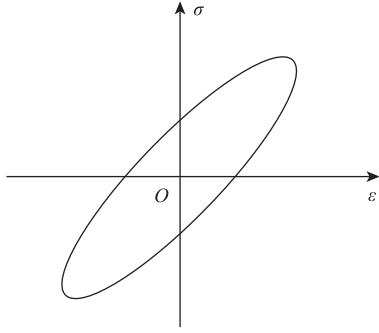


图 2 滞后环线

Fig. 2 Hysteresis loop

滞后环所包含的面积称为一个循环加载过程中产生的耗散能, 分别由式 (1) 和式 (2) 可以计算得到一个循环加载后的耗散能和前 n 个循环的累计耗散能^[17-18]。

$$w_i = \pi \sigma \varepsilon \sin \delta = \pi \frac{\sigma^2}{G^*} \sin \delta = \pi \varepsilon^2 G^* \sin \delta, \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n w_i, \quad (2)$$

式中, w_i 为第 i 个循环的耗散能; σ 为应力值; ε 为应变振幅; δ 为相位角; G^* 为复数模量值。

2 试验结果及分析

2.1 水泥乳化沥青胶浆黏弹行为

配置不同 A/C 的水泥乳化沥青胶浆, 测定在不同应力水平时, 胶浆试件的耗散能随疲劳荷载作用次数的变化规律, 并计算破坏时的累计耗散能, 研究水泥乳化沥青胶浆的黏弹行为, 试验结果如图 3 和表 3 所示。

从图 3 可以看出, 各配比下水泥乳化沥青胶浆的耗散能随疲劳荷载的变化规律可分为: 快速增长期, 缓慢增长期和急速增长期 3 个阶段。在快速增长期, 随着加载次数的增多, 耗散能迅速增大; 直至加载次数达到一定值后, 进入缓慢增长期, 耗散能的增长速率逐渐放缓, 应力水平越小, 此阶段的耗散能变化速率越慢, 持续时间越长; 当加载次数达到一定值后, 进入急速增长期, 耗散能随着加载次数的增多急速增长, 直至试件完全破坏。之所以出现这种现象, 是因为水泥乳化沥青胶浆中, 沥青为黏弹性材料, 硬化后的水泥为刚性材料, 在荷载作用初期, 沥青会有一段流变区, 在流变期内应力应变滞后圈对应的面积相等, 因此沥青部分的耗散能是一定的, 没有损伤产生, 而水泥在荷载作用下

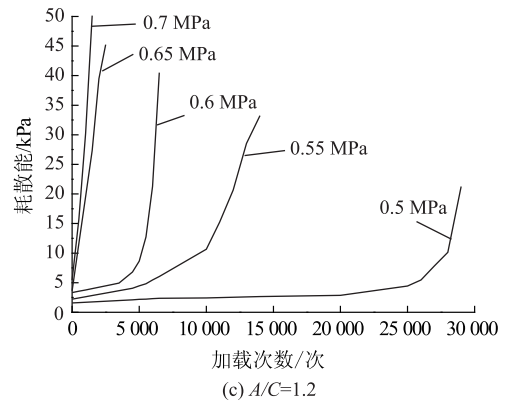
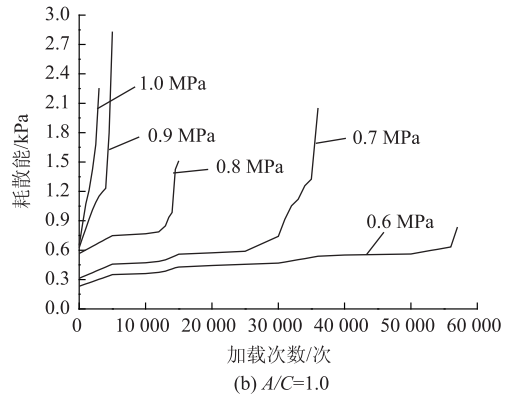
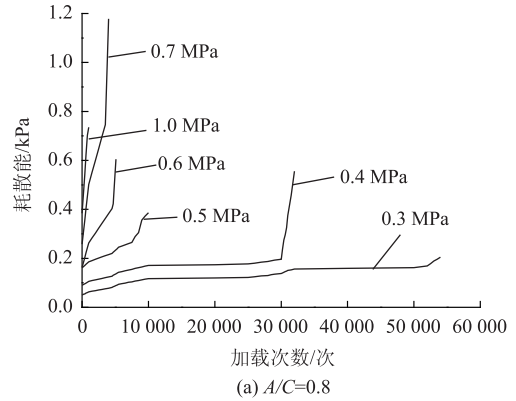


图 3 疲劳荷载对水泥乳化沥青胶浆耗散能的影响

Fig. 3 Influence of fatigue load on dissipation energy of cement emulsified asphalt mortar

表 3 疲劳荷载对水泥乳化沥青胶浆累计耗散能的影响
Tab. 3 Influence of fatigue load on cumulative dissipation energy of cement emulsified asphalt mortar

$A/C = 0.8$		$A/C = 1.0$		$A/C = 1.2$	
应力/ MPa	累计耗散 能/kPa	应力/ MPa	累计耗散 能/kPa	应力/ MPa	累计耗散 能/kPa
0.3	3.124	0.6	50.975	0.50	104.125
0.4	2.420	0.7	42.885	0.55	69.465
0.5	1.488	0.8	22.174	0.60	44.462
0.6	1.217	0.9	8.491	0.65	32.612
0.7	0.866	1.0	4.765	0.70	25.615

无法发生相应的缓冲形变,应力无法得到释放,水泥部分的损伤从加载开始就产生了,因此快速增长期主要是因为水泥部分的损伤造成的。进入缓慢增长期后,水泥部分的损伤接近完成,沥青部分的损伤逐渐开始,而具有黏弹属性的沥青在荷载作用下产生形变,使部分应力得到释放,因此损伤速率较慢;进入急速增长期后,沥青部分出现了大面积损伤,随着加载次数的增多,损伤急速发展,试件很快达到破坏状态。

从表3可以看出, A/C 一定时,随着应力的增大,水泥乳化沥青破坏时对应的累计耗散能逐渐减小,说明疲劳荷载越大,试件内部出现裂缝越早,且裂缝的扩展速度越快,因此累计耗散能越小。当应力一定时,随着 A/C 的增大,水泥乳化沥青胶浆

破坏时的累计耗散能逐渐增大。解释其原因主要为,当 A/C 较小时,水泥乳化沥青胶浆中弹性成分逐渐较多,黏性成分较少,随着 A/C 的增大,胶浆中黏弹性比例发生变化,导致储存模量增大,而损耗模量减小,疲劳荷载对试件所做的功大部分被完全消耗,得不到储存,因此每个循环加载时所产生的耗散能逐渐增大,胶浆破坏时对应的累计耗散能逐渐增大。

2.2 水泥乳化沥青纤维复合材料黏弹行为

控制 $A/C = 1.0$ 不变,在水泥乳化沥青胶浆中掺加不同掺量的玄武岩纤维(0%, 1%, 2%, 3% 和 4%),测定不同应力水平时,试件耗散能和累计耗散能随纤维掺量的变化规律,研究水泥乳化沥青纤维复合材料的黏弹行为,试验结果如图4和表4所示。

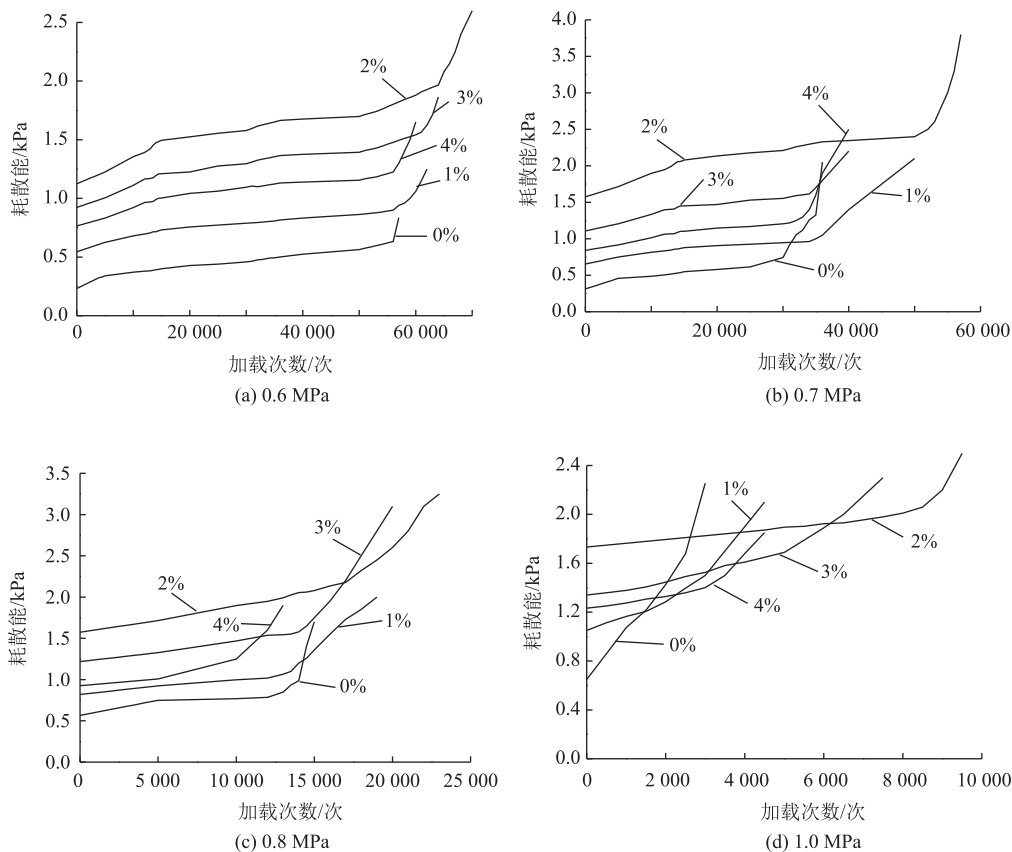


图4 疲劳荷载对水泥乳化沥青复合材料耗散能的影响

Fig. 4 Influence of fatigue load on dissipation energy of cement emulsified asphalt composite

从图4可以看出,玄武岩纤维的掺入使水泥乳化沥青胶浆破坏时对应的疲劳荷载作用次数增多,且随着纤维掺量的增多,试件破坏时对应的加载次数呈现先增大后减小的变化规律,当纤维掺量为2%时,试件破坏时对应的加载次数最大。掺入玄武岩纤维后,试件耗散能曲线变缓,且应力水平越大,这一现象越明显,表明纤维的加入能延缓水泥乳化

沥青的破坏速率。

从表4可以看出,当应力水平一定时,随着玄武岩纤维掺量的增多,水泥乳化沥青纤维复合材料破坏时的累计耗散能呈现先增大后减小的变化规律,当纤维掺量为2%时,累计耗散能有最大值。这是因为,当玄武岩纤维掺量小于2%时,纤维在水泥乳化沥青胶浆中起到加筋作用,荷载作用下纤维得到拉

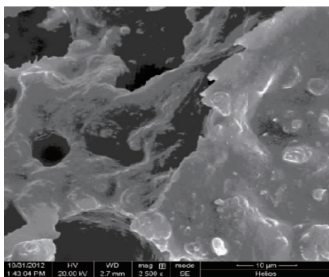
表 4 疲劳荷载对水泥乳化沥青复合材料累计耗散能的影响
Tab. 4 Influence of fatigue load on cumulative dissipation energy of cement emulsified asphalt composite

纤维掺量/%	不同疲劳荷载 (MPa) 下的累计耗散能/kPa			
	0.6	0.7	0.8	1.0
0	50.975	42.885	22.174	4.765
1	31.883	25.841	24.726	14.414
2	80.488	77.585	52.983	36.421
3	54.923	39.243	37.626	24.451
4	40.799	31.861	15.260	14.180

伸, 荷载对试件做的功被纤维的受力变形所消耗, 此时增大纤维掺量使试件储存的能量逐渐减小, 因此累计耗散能逐渐增大。而当玄武岩纤维掺量大于 2% 时, 纤维在水泥乳化沥青胶浆中的分散均匀性变差, 此时增大纤维掺量造成部分纤维出现结团现象, 成为水泥乳化沥青中的应力集中点, 在荷载作用下容易出现尖端裂缝, 因此在疲劳荷载作用下更容易出现破坏, 对应的疲劳荷载作用次数减少, 累计耗散能随之减小。

2.3 微观机理分析

为了分析玄武岩纤维对水泥乳化沥青胶浆黏弹行为的作用机理, 利用扫描电镜分别测试 $A/C = 1.0$ 时, 添加纤维前后 (纤维掺量为 2%) 水泥乳化沥青胶浆的微观形貌, 试验结果如图 5 所示。



(a) 未掺加纤维



(b) 掺入 2% 纤维

图 5 水泥乳化沥青纤维复合材料扫描电镜微观结构图

Fig. 5 SEM microstructure of cement emulsified asphalt fiber composite

从图 5 可以看出, 未掺加纤维时, 水泥乳化沥青胶浆固化体系的微观结构中, 沥青与水泥的水化产物相互包裹, 形成良好的有机无机复合材料结合

体。在胶浆中掺入 2% 的玄武岩纤维后, 纤维在复合基体中的分散性良好, 玄武岩纤维良好的吸附能力, 使沥青黏附于纤维表面形成触角状结构, 在纤维的相交交联中起到嵌锁作用, 增强了材料间的黏附性和整体性, 因此使复合材料的黏弹行为发生改变。另外, 玄武岩纤维具有加筋作用, 纤维杂乱均匀地分散在水泥乳化沥青胶浆中, 相互搭接形成稳定的空间网络结构, 当疲劳荷载作用时, 胶浆基体将应力传至纤维形成的网络结构中, 空间网络结构受力变形使应力得到释放, 因此改变了水泥乳化沥青胶浆的黏弹行为。

3 结论

(1) 随着疲劳荷载作用次数的增多, 水泥乳化沥青胶浆的耗散能呈现快速增长期, 缓慢增长期和急速增长期 3 个阶段的变化规律; 应力水平越大, 水泥乳化沥青破坏的累计耗散越小; 随着 A/C 的增大, 水泥乳化沥青胶浆破坏时的累计耗散能逐渐增大。

(2) 玄武岩纤维的掺入提高了水泥乳化沥青胶浆的疲劳寿命, 降低了耗散能曲线的变化速率; 随着纤维掺量的增多, 疲劳寿命和累计耗散能呈现先增大后减小的变化规律, 当纤维掺量为 2% 时, 疲劳寿命和累计耗散能都出现最大值。

(3) $A/C = 1.0$ 的水泥乳化沥青胶浆的微观结构具有良好的均匀性, 玄武岩纤维能良好地分散在胶浆基体中; 纤维对沥青起到吸附作用, 且纤维间相互搭接形成稳定的空间网络结构, 改变了受力时水泥乳化沥青胶浆的黏弹行为。

参考文献:

References:

- [1] 徐健, 陈志华, 王凯, 等. 板式无碴轨道垫层 CA 砂浆研究与进展 [J]. 华东交通大学学报, 2009, 26 (4): 58-62.
XU Jian, CHENG Zhi-hua, WANG Kai, et al. Research and Progress on CA Mortar of Ballastless Slab Track Cushion [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26 (4): 58-62.
- [2] 胡曙光, 王涛, 王发洲, 等. CA 砂浆抗冻性能的影响因素研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30 (8): 30-33.
HU Shu-guang, WANG Tao, WANG Fa-zhou, et al. Influence Factors on Freezing and Thawing Durability of Cement Asphalt Mortar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30 (8): 30-33.
- [3] 王平, 李悦, 谢铠泽, 等. CRTS I 型 CA 砂浆动态压缩试验及本构关系研究 [J]. 铁道工程学报, 2014 (5): 35-40, 58.

- WANG Ping, LI Yue, XIE Kai-ze, et al. Research on the Dynamic Compressive Test of China Railway Track System (CRTS) I Type CA Mortar and Its Constitutive Relationship [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014 (5): 35–40, 58.
- [4] 李悦, 谢冰, 胡曙光, 等. 荷载形式对 CRTS II 型 CA 砂浆疲劳剩余强度的影响 [J]. 土木工程学报, 2010, 43 (增 2): 358–362.
- LI Yue, XIE Bing, HU Shu-guang, et al. The Influences of Figure Load Types on the Residual Strength of CRTS II CA Mortar [J]. Journal of Civil Engineering, 2010, 43 (S2): 358–362.
- [5] 秦先涛, 祝斯月, 程英伟, 等. 纤维水泥乳化沥青混凝土的增强效应及微观机理 [J]. 公路, 2017 (12): 234–240.
- QIN Xian-tao, ZHU Si-yue, CHENG Ying-wei, et al. Reinforcing Effect and Microscopic Mechanism of Fiber-reinforced Cement Emulsified Asphalt Mixture [J]. Highway, 2017 (12): 234–240.
- [6] 王学信, 沙爱民, 胡立群, 等. 水泥乳化沥青混凝土的力学性能研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 57–60.
- WANG Xue-xin, SHA Ai-min, HU Li-qun, et al. Research on Mechanics Performance of Cement Emulsified Asphalt Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 57–60.
- [7] 杜少文, 王振军. 水泥改善乳化沥青混合料的使用性能 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12 (1): 71–75.
- DU Shao-wen, WANG Zhen-jun. Performance of Cement Modified Asphalt Emulsion Mixture [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12 (1): 71–75.
- [8] 秦先涛, 祝斯月, 豆怀兵, 等. 水泥乳化沥青复合材料粘弹性能的依时性研究 [J]. 材料导报, 2014, 28 (8): 121–125.
- QIN Xian-tao, ZHU Si-yue, DOU Huai-bing, et al. Time-dependent Properties of the Viscoelasticity of Cement-emulsified Asphalt Composites [J]. Materials Review, 2014, 28 (8): 121–125.
- [9] 谢友军, 傅强, 龙广成, 等. 基于 SHPB 试验的高速铁路 CRTS II 型 CA 砂浆动态性能 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44 (7): 672–679.
- XIE You-jun, FU Qiang, LONG Guang-cheng, et al. Dynamic Mechanical Properties of CRTS II type CA Mortar for High-speed Railway Based on SHPB Test [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, 44 (7): 672–679.
- [10] 王涛. CA 砂浆力学性能与体积对温度的稳定性 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16 (1): 127–130.
- WANG Tao. Temperature Stability of Mechanical Properties and Volume of CA Mortar [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16 (1): 127–130.
- [11] 豆怀兵, 陈拴发, 祝斯月, 等. 高粘改性沥青胶浆粘弹性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36 (4): 53–57.
- DOU Huai-bing, CHEN Shuan-fa, ZHU Si-yue, et al. Research on Viscoelastic Property of High Viscosity Modified Asphalt Mortar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36 (4): 53–57.
- [12] 陈华鑫, 李宁利, 张争奇, 等. 沥青材料的感温性分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26 (1): 8–11.
- CHEN Hua-xin, LI Ning-li, ZHANG Zheng-qi, et al. Temperature Susceptibility Analysis of Asphalt Binders [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26 (1): 8–11.
- [13] 于斌. 纤维沥青胶浆流变特性及纤维沥青混合料路用性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- YU Bin. Study on Rheological Characteristics of Fiber Asphalt Slurry and Road Performance of Fiber Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [14] 田青, 张苗, 蔡基伟, 等. CA 砂浆弹性模量与抗压强度的定量关系 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2020, 50 (1): 94–99.
- TIAN Qing, ZHANG Miao, CAI Ji-wei, et al. The Quantitative Relationship between Elastic Modulus and Compressive Strength of CA Mortar [J]. Journal of Henan University: Natural Science Edition, 2020, 50 (1): 94–99.
- [15] 朱华胜, 曾晓辉, 刘海川, 等. 水泥乳化沥青砂浆静态力学性能与组成的关系 [J]. 硅酸盐学报, 2020, 3 (2): 49–55.
- ZHU Hua-sheng, ZENG Xiao-hui, LIU Hai-chuan, et al. Relationship between Static Mechanical Properties and Composition of Cement and Emulsified Asphalt Mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 3 (2): 49–55.
- [16] 包洵. 乳化沥青用量对超早强 CAEM 性能影响研究 [J]. 公路, 2019 (3): 246–250.
- BAO Xun. Study on Effect of Emulsified Asphalt Dosage on Ultra-early Strength CAEM Performance [J]. Highway, 2019 (3): 246–250.
- [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, 2 (5): 285–293.
- LU Yan-hua, WU Ze-feng. Research on Road Performance of Cement-emulsified Asphalt Concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2019, 2 (5): 285–293.
- [18] 田青, 张苗, 吴计旭, 等. 水泥乳化沥青砂浆弹性极限的试验研究 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2020, 50 (3): 341–346.
- TIAN Qing, ZHANG Miao, WU Ji-xu, et al. Experimental Study on Elastic Limit of Cement Emulsified Asphalt Mortar [J]. Journal of Henan University: Natural Science Edition, 2020, 50 (3): 341–346.