

水泥乳化沥青复合胶凝材料动态力学性能

秦先涛¹, 陈拴发^{2,3}, 祝斯月², 李 鑫¹, 豆怀兵²

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710061; 3. 长安大学交通铺面材料教育部工程研究中心, 西安 710061)

摘要: 研究了不同水泥含量 (C/A 为 0.8、1.0 和 1.2) 的水泥乳化沥青复合胶凝材料 (CECM) 7d 龄期的动态力学性能。采用动态剪切流变仪, 对不同复合材料分别在 40℃~80℃、0.0159Hz~15.9Hz 环境下进行温度扫描试验和频率扫描试验, 获得了不同温度和频率下复数模量和相位角的变化规律, 以及不同温度时的疲劳性能指标。基于时-温等效原理建立了 50℃ 时不同复合材料的相位角主曲线。结果表明: 随着温度的升高, 复数模量显著减小, 相位角线性增加, 粘性特征增强。与矿粉相比, 水泥的加入明显地改变了复合材料的粘弹性比例。CECM 在相对低频区域具有较好的抗变形能力, 且 C/A 越大, 抗变形能力越强, 但疲劳性能指标随之降低。相位角主曲线表明在广泛的荷载频率范围内 CECM 仍具有优异的动态力学性能。研究结果为水泥乳化沥青复合胶凝材料设计和优化提供了参考。

关键词: 道路工程; 水泥乳化沥青复合胶凝材料; 动态力学性能; 复数模量; 相位角; 主曲线

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0250-05

Dynamic mechanical properties of cement-emulsified asphalt composite materials

QIN Xiantao¹, CHEN Shuanfa^{2,3}, ZHU Siyue², LI Xin¹, DOU Huaibing²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties of cement emulsified asphalt composite materials (CECM) with varied cement content at the age of 7 days were researched. The change of complex modulus and phase angle with temperature (40℃~80℃) and frequency (0.0159Hz~15.9Hz), as well as the index of fatigue property were obtained through temperature sweep test and frequency sweep test by dynamic shear rheometer. Master curves of phase angles with frequency at 50℃ were established based on frequency-temperature equivalence principle. The results indicated that the complex modulus decreased obviously and phase angles increased linearly with the increase of temperature, and the viscosity characteristic significantly enhanced. Meanwhile, compared with mineral powder, cement has obvious effect on the viscoelastic proportion of the composite materials. And CECM has better resistance to deformation in relative lower frequency. The bigger the C/A, the better the deformation resistance and the worse the fatigue property. The master curves of phase angles proved that CECM has good dynamic mechanical property in extensive frequency range. The research results provides reference for the design and optimization of CECM.

Key words: road engineering; cement emulsified asphalt composite materials; dynamic mechanical property; complex modulus; phase angle; master curve

水泥乳化沥青胶凝材料是一种由无机水硬性胶凝材料水泥和有机黏结性高分子材料乳化沥青组成的复合胶凝材料^[1]。该复合材料由于同时具备水泥和沥青两种胶凝材料的优良特性而在公路工程铺面材料中得到了越来越多的研究和应用^[2-3]。杜少文^[4]研究了水泥掺量对乳化沥青混合料稳定性、抗压强度、高温稳定性、水稳性和低温抗裂性能等的影响。Seref Oruc 等人^[5]研究了如何提高乳化沥青混合料的力学性能以及水泥对乳化沥青混合料的影响。王振军等人^[6]研究了普通波特兰水泥对乳化沥青混合料性能的影响及其机理。Bocci 等人^[7]分析了养护条件、温度和湿度对水泥-乳化沥青混合料 (CBTM) 力学行为的影响。Hassan 等人^[8]对比研

究了水泥以及其它掺合料对提高冷拌沥青混合料力学性能的影响。可以看出, 以上研究的重点均在水泥乳化沥青混合料的力学性能以及路用性能等方面, 却忽略了对复合胶凝材料本身材料特性的研究。究其原因是因为水泥乳化沥青复合胶凝材料从其材料组成到性能表现等诸多方面都具有特殊性, 现有的沥青或水泥试验方法均不适用于研究水泥乳化沥青复合材料。因此, 针对水泥乳化沥青复合材料具有典型黏弹性能的特点, 采用合适的方法研究水泥乳化沥青复合材料在行车荷载环境中的实际力学响应, 对推动该复合材料的发展具有重要意义。在前期研究的基础之上^[9-10], 本文制备了 C/A 为 0.8、1.0 和 1.2 的水泥乳化沥青复合胶凝材料,

采用动态剪切流变仪得到了三种复合材料的复数模量和相位角的温度谱图和频率谱图. 并基于时-温等效原理获得了水泥乳化沥青复合胶凝材料的相位角主曲线, 实现对水泥乳化沥青复合胶凝材料动态力学性能在广泛荷载频率范围内的完全描述.

1 原材料与试样制备

1.1 原材料

试验采用自制的慢裂快凝型 SBS 改性阳离子乳化沥青 (A), 其主要技术性能见表 1.

表 1 乳化沥青基本技术指标
Tab.1 Basic indexes of emulsified asphalt

试验项目	结果	技术标准
沥青标准粘度, 25℃ / S	25	12~60
1d 储存稳定性 / %	0.1	≥1
筛上剩余量 / %	0.02	≥0.1
蒸发残留物		
含量 / %	61	≤60
针入度(25℃,100g,5s)/ 0.1mm	75	40~100
软化点/ ℃	60	≤53
延度 (25℃,5cm/min) / cm	132	≤120
延度 (5℃,5cm/min) / cm	32	≤20
溶解度/ %	99.5	≤97.5

试验采用冀东水泥厂生产的 P.O. 42.5 普通硅酸盐水泥 (C), 其基本物理和力学性能见表 2. 矿粉采用磨细的石灰石粉, 密度为 2.797 g/cm³.

表 2 普通硅酸盐水泥的物理、力学指标
Tab.2 Physical and mechanical properties of ordinary portland cement

物理性质	结果
密度 /g·cm ⁻³	3.102
比表面积 /m ² ·kg ⁻¹	380
力学性质	
7 d 抗压强度/ MPa	20.9
28 d 抗压强度/ MPa	48.8

1.2 试样制备

根据前期研究结果, 当水泥质量与乳化沥青固含量为 1:1 左右时复合胶凝材料具有较优异的综合力学性能表现. 因此本文按照表 3 所示的质量配比制备试样, 其中, C1~C3 为三种水泥质量与乳化沥青固含量为 1:1 左右的复合胶凝材料; C0 为纯乳化沥青试样, C4 为矿粉质量与乳化沥青固含量为 1:1 的材料, C0 和 C4 均作为对照组. 试样制备过程如下: 首先, 按比例称量乳化沥青和水泥 (矿粉) 备用. 然后, 将水泥 (矿粉) 缓慢加入到乳化沥青中并慢速搅拌; 待水泥全部加入到乳化沥青后, 再高速搅拌 3 min, 最后倒入硅胶模具内成型即成. 将

制备完成的试样置于室温条件下 (23±2℃) 养护至 7 d 龄期后用于测试. 试验采用 Bohlin Gemini II 型动态剪切流变仪对不同 C/A 的水泥乳化沥青复合材料进行温度扫描试验和频率扫描试验, 并对扩展频率范围内的相位角主曲线进行分析.

表 3 不同水泥乳化沥青复合胶凝材料各组分的质量配比
Tab.3 Mix proportion of different CEACM

No.	C0	C1	C2	C3	C4
C/A*	0	0.8	1.0	1.2	1.0

注: *C/A 指水泥与乳化沥青中沥青固含量的质量比.

2 试验结果与讨论

2.1 温度扫描试验

温度扫描试验采用应力控制模式, 温度扫描范围为 40℃~80℃, 荷载频率为 1.59Hz. 温度扫描试验结果如图 1 和图 2 所示. 从图中可以看出, 一方面, 与纯乳化沥青相比, 无论是矿粉还是水泥的加入都对复合材料的动态力学性能有着明显的影响. 在 40℃时, 三种水泥乳化沥青复合胶凝材料以及掺矿粉的乳化沥青胶浆的复数模量是纯乳化沥青复数模量的 2~3 倍. 这说明水泥在复合材料体系中起到了复合加强的作用, 相比而言, 矿粉在体系中的作用比较有限, 主要体现为吸附作用和填充作用. 因此掺矿粉的乳化沥青胶浆 C4 的复数模量要明显小于相同掺量的水泥乳化沥青复合材料 C2, 甚至小于水泥掺量更低的复合材料 C1. 另一方面, 水泥乳化沥青复合胶凝材料同样具有着显著的温度敏感性. 随着温度的升高, 水泥乳化沥青复合材料的复数模量呈显著降低的趋势, 当温度达到 80℃时, 三种水泥乳化沥青复合材料 C1、C2 和 C3 的复数模量分别为 2 451 Pa、3 014 Pa 和 3 277 Pa, 而 C4 的复数模量为 1 670 Pa, 纯乳化沥青的复数模量仅为 640Pa. 这是因为当温度升高时, 由于沥青的软化使其在已形成一定强度的水泥水化产物之间起到了润滑作用, 从而使得复数模量表现为下降.

此外, 从图 2 可以看出, 三种水泥乳化沥青复合材料的相位角随着温度的升高几乎呈线性增加. 而 C0 和 C4 的相位角在 40℃到 50℃之间有微小幅度的降低, 然后随着温度的升高, 相位角迅速增加. 而且 C0 和 C4 相位角-温度变化曲线近乎相同, 只是掺矿粉后乳化沥青胶浆的相位角整体变大了. 这种对比进一步佐证了矿粉在乳化沥青胶浆中的作用更多的是填充效应, 对材料的粘弹性比例本质改善较小, 而水泥加入到乳化沥青后则较为明显地改变了复合材料的粘弹性能.

对沥青材料而言, 60°C 时的车辙因子 ($G^*/\sin\delta$) 是表征高温性能优异的关键性指标. C0~C4 五种材料的 60°C 车辙因子分别为 4 678 Pa、14 572 Pa、17 048 Pa、17 136 Pa 和 12 010 Pa. 从这个指标来看, 三种水泥乳化沥青复合胶凝材料的高温抗变形能力均远远优于纯乳化沥青.

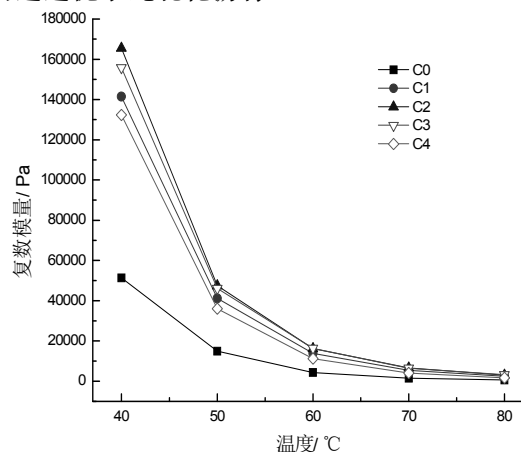


图1 复数模量的温度扫描试验结果

Fig.1 Change of complex modulus with temperature

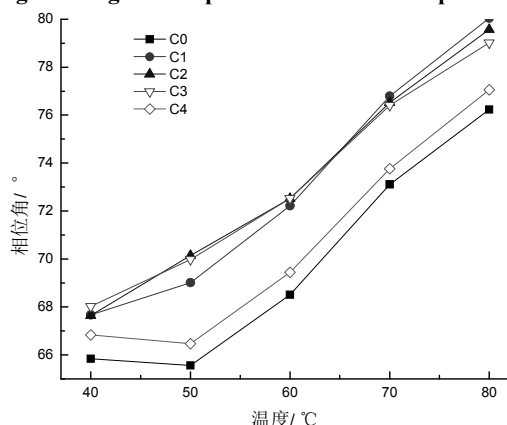


图2 相位角的温度扫描试验结果

Fig.2 Change of phase angle with temperature

2.2 频率扫描试验

频率扫描范围为 0.015 9~15.9 Hz, 且频率变化选择对数增加方式, 试验温度为 80°C . 从图 3 可以看出, 所有材料的复数模量均随着荷载频率的增加而显著增加. 在最初的低频阶段, C4 的复数模量在 C1、C2 之上, 这是因为由于矿粉的吸油性使得掺矿粉的乳化沥青胶浆具有很强的抗变形能力, 从而表现为 C4 的复数模量大于 C1 和 C2. 而后随着荷载频率的增大, C4 的复数模量变得小于 C1、C2. 而且, 当荷载频率大于 1 Hz 之后, 三种水泥乳化沥青复合胶凝材料以及掺矿粉的乳化沥青胶浆的复数模量均增长迅速.

结合图 4 可以看出复合材料的相位角随荷载频率变化趋势不尽相同. 纯乳化沥青 C0 的相位角-频

率呈显著地线性降低趋势, 而这种粘弹性表现十分不利于沥青的抗变形能力以及疲劳性能. 即在低频区域 (等效于高温状态) 沥青材料的粘性特征明显 (相位角较大), 容易产生永久变形; 反之在高频区域 (等效于低温状态) 沥青材料又不具备足够的粘性 (相位角较小), 不利于外加的能量因流变而消散, 从而容易产生疲劳开裂. 相比而言, 当水泥或矿粉加入到乳化沥青中后, 相位角-频率曲线的变化趋势有着非常明显的变化, 三种水泥乳化沥青复合胶凝材料以及掺矿粉的乳化沥青胶浆的相位角随荷载频率的增加均为先增大后减小. 所不同的是, C/A 越大, 则复合胶凝材料在低频区域的相位角就越小, 而且掺矿粉的乳化沥青胶浆在低频区域的相位角最小. 分析其原因, 在 C1~C3 三种材料中, 水泥掺量比重越大, 材料在低频时的抵抗变形能力及变形恢复能力就越强, 即弹性特征就越大, 表现为相位角较小. 而掺矿粉的乳化沥青胶浆之所以在低频区域的相位角最小, 甚至比水泥掺量更大的复合胶凝材料 C3 的相位角还小, 主要是得益于矿粉超强的吸油能力, 这使得掺矿粉的乳化沥青胶浆在低频 (即高温) 状态下具有很高的抗变形能力. 但是, 从图 4 中相位角-频率曲线的后半段可以看出, 在高频 (即低温) 情况下, 掺矿粉的乳化沥青胶浆的相位角最低, 这显然不利于材料在中低温下的疲劳性能. 反观三种水泥乳化沥青复合胶凝材料, 在高频区域, 其相位角均大于乳化沥青, 说明三种复合胶凝材料在较高的荷载频率作用下具有更明显的粘性特征, 从而抑制疲劳开裂的发生, 表现出良好的高频动态力学特性. 尤其是复合胶凝材料 C3, 在荷载频率变化过程中具备最优的粘弹性能表现.

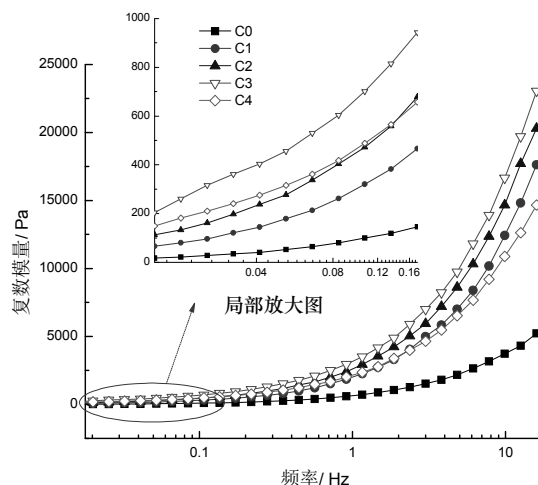


图3 复数模量的频率扫描试验结果

Fig.3 Change of complex modulus with frequency

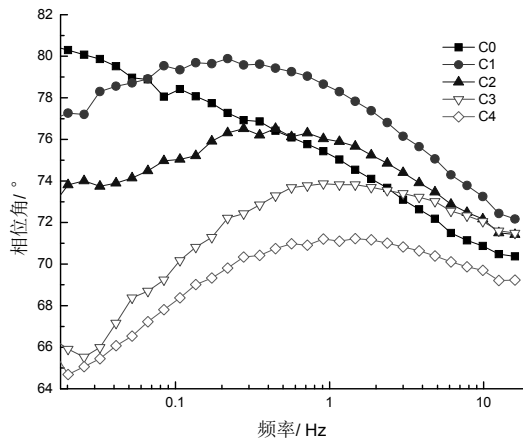


图 4 相位角的频率扫描试验结果
Fig.4 Change of phase angle with frequency

2.3 疲劳性能

取温度扫描试验中获得的不同温度时各种材料的疲劳因子 $G^* \cdot \sin \delta$ 和损失正切值 $\tan \delta$ 见表 4。

从表 4 可以看出,所有材料的疲劳因子均随着温度的升高而减小,而且在水泥或矿粉加入至乳化

沥青后,材料的疲劳因子有着数量级的增长,这是由于水泥的加入使得材料由柔性特征向半柔性特征甚至刚性特征转变,从而导致了疲劳性能的衰减。但疲劳因子并没有随 C/A 的增大而增大,相反 C3 的疲劳因子在很大温度范围内小于 C2。

参数 $\tan \delta$ 为损失正切值,表示复数剪切劲度模量中粘性成分与弹性成分的比例^[11]。从表 4 中的数据可以看出,三种 CECM 以及掺矿粉的乳化沥青胶浆的损失正切值-温度变化曲线与乳化沥青类似,均随温度的降低而降低。在中温范围内,较多的粘性成分有利于抵抗疲劳破坏;而在高温范围内,较多的弹性成分有利于抵抗变形。进一步比较三种 CECM 可以发现,40℃时, C3 的损失正切值最大,即粘性成分最多;80℃时, C3 的损失正切值最小,即弹性比例最多。

表 4 不同温度时各种材料的疲劳因子和损失正切值

Tab.4 Test results of $G^* \cdot \sin \delta$ and $\tan \delta$ at different temperatures

		$G^* \cdot \sin \delta / \text{Pa}$					$\tan \delta$				
		40℃	50℃	60℃	70℃	80℃	40℃	50℃	60℃	70℃	80℃
编 号	C0	46 832	13 566	4 051	1 428	622	2.23	2.20	2.54	3.29	4.08
	C1	130 800	38 410	13 212	5 238	2 412	2.43	2.61	3.12	4.26	5.70
	C2	153 060	44 630	15 508	6 380	2 964	2.43	2.77	3.18	4.17	5.44
	C3	144 480	43 308	15 590	6 292	3 217	2.48	2.74	3.18	4.13	5.15
	C4	121 640	33 044	10 530	3 964	1 628	2.34	2.42	2.67	3.43	4.35

2.4 基于时-温等效原理的相位角主曲线

水泥乳化沥青复合材料虽然避免了热拌沥青混合料所需的高温加热、拌合及运输摊铺过程,但其在使用过程中温度范围仍可以从夏季的 60℃以上跨越到冬季寒冷地区的-30℃以下。同时,路面材料还要承受 10^{-2} s 量级的瞬时车轮荷载。因此,获得路面材料在广泛温度及荷载频率范围内的粘弹性能有着重要的现实意义。但是,目前即使使用最先进的试验仪器也无法获得在如此大温度或荷载范围内的粘弹特征。为了达到这一目的,通常采用时-温等效原理通过换算得到材料的主曲线。本文分别对不同复合胶凝材料在 35℃、50℃、65℃和 80℃进行频率扫描试验,然后选择 50℃为基准温度,其它温度下的相位角-频率曲线沿水平轴向基准温度的相位角-频率曲线靠拢并使相互交错部分重叠,从而得到不同复合胶凝材料在 50℃时的相位角主曲线,见图 5。

由图 5 可以看出,与乳化沥青相比,三种水泥乳化沥青复合胶凝材料以及掺矿粉的乳化沥青胶浆的相位角主曲线变化趋势有着较明显的区别。具

体来说,乳化沥青的相位角主曲线在广泛荷载频率范围内处于一直下降的趋势,而 C1~C4 等四种材料的相位角主曲线在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ Hz 的低荷载频率区域经历了一个先上升后下降的凸曲线变化过程,且 C/A 越大,复合材料在低频区域的相位角越小。这充分说明在水泥乳化沥青复合胶凝材料中两种水泥和乳化沥青在各自形成强度后复合材料的粘弹性比例发生了较大的改变,其中水泥的水化产物形成了良好的骨架,从而使得在低频荷载的作用下复合材料具有更为明显的弹性特征,有利于变形最大程度地恢复。在 $10^{-2} \sim 10$ Hz 的中频区域,三种 CECM 以及 C4 的相位角由小于乳化沥青而逐渐发展为大于乳化沥青。这是因为随着荷载频率的增加,变形后的恢复时间越来越短,而水泥在复合材料中引起的粘性特征开始逐渐凸显,因此相位角变的大于乳化沥青。而当荷载频率进一步增加时,变形后的恢复时间进一步压缩而变得十分短暂,所有材料的累计形变越来越大,而 CECM 及掺矿粉的乳化沥青胶浆的总变形量与乳化沥青相比要小得多,即弹性特征更为明显,因此从图中可以看出,在高频阶段三

种 CECM 以及 C4 的相位角下降速率突然加快且明显小于 C0。

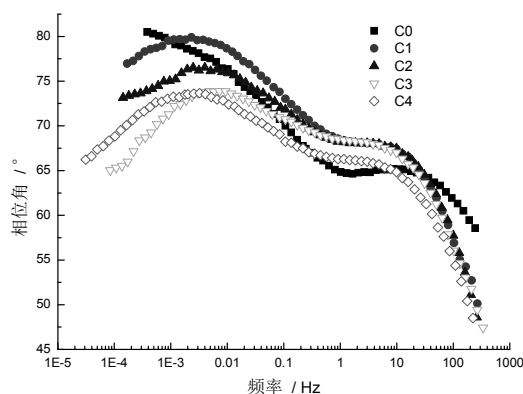


图5 50℃时不同复合材料的相位角主曲线

Fig.5 Master curves of different CEACM at 50℃

另一方面,从图5还可以看出,三种CECM及C4的主曲线频幅均宽于乳化沥青,这反映出水泥乳化沥青复合胶凝材料的相位角对荷载频率的敏感性降低了。而且C/A越大,相位角的主曲线频幅越宽。此外,与三种CECM的相位角主曲线相比,C4的相位角主曲线在低频区域更宽,但在高频区域却略窄,这证明了矿粉在掺入到乳化沥青中后,由于其吸油稳定作用对低频(高温)抗变形能力提高很大,而对高频(低温)时的疲劳性能无提升作用。

3 结论

(1) 与乳化沥青类似,水泥乳化沥青复合胶凝材料亦具有显著的温度敏感性。随着温度的升高,三种CECM的复数模量显著减小,相位角线性增大,粘性特征增强。

(2) 水泥的加入显著改变了复合材料的粘弹性比例。C/A越大,复合材料在低频(高温)区域内的抗变形能力越强。且水泥乳化沥青复合胶凝材料C2和C3的相位角在高频区相近,但CA3具有更优的低频区域粘弹性能。

(3) 由于复数模量数量级的增加导致水泥乳化沥青复合胶凝材料的疲劳因子明显增加。但三种CECM的疲劳因子和损失正切值与C/A的大小无一致对应关系,无法直接确定出最优的C/A。

(4) 相位角主曲线表明三种CECM的相位角主曲线频幅更宽,即水泥乳化沥青复合材料的相位角对荷载频率的敏感性更低;且C/A越大,相位角的主曲线频幅越宽。

参考文献 References

- [1] 刘永亮,孔祥明,阎培渝.水泥-沥青胶凝材料动态力学行为的初步研究[J].工程力学,2011,28(7): 53-58.
LIU Yongliang, KONG Xiangming, YAN Peiyu.

Investigation on dynamical mechanical behaviors of cement-asphalt binders[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 53-58.

- [2] 王振军,沙爱民,肖晶晶,等.水泥对乳化沥青混合料微观结构的改善机理[J].武汉理工大学学报,2009,31(5): 16-19.
WANG Zhenjun, SHA Aimin, XIAO Jingjing, et al. Improvement mechanism of ordinary Portland cement on micro-structure of emulsified asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(5): 16-19.
- [3] 王振军,杜少文,肖晶晶,等.水泥乳化沥青混合料性能的影响因素[J].建筑材料学报,2011,14(4): 497-501.
WANG Zhenjun, DU Shaowen, XIAO Jingjing, et al. Influence factors on properties of cement asphalt emulsion mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 497-501.
- [4] 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 Shaowen, WANG Zhenjun. Performance of cement modified asphalt emulsion mixture[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1): 71-75.
- [5] SEREF Oruc, FAZIL Celik, AKPINAR M Vefa. Effect of cement on emulsified asphalt mixtures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(5): 578-583.
- [6] WANG Zhenjun, WANG Rui. Influences and mechanisms of ordinary portland cement on properties of asphalt emulsion composites[J]. Advanced Materials Research, 2011, 160-162: 235-240.
- [7] BOCCI M, GRILLI A, CARDONE F, et al. A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 773-778.
- [8] HASSAN Al Nageim, SHAKIR Fali Al-Busaltan, WILLIAM Atherton, et al. A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26: 743-748.
- [9] QIN Xiantao, ZHU Siyue, CHEN Shuanfa, et al. Comparative study on the deformation behaviors of cement emulsified asphalt mortars[J]. Materials and Structures, 2014, 10.1617/s11527-014-0394-4.
- [10] 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 Xiantao, ZHU Siyue, DOU Huaibing, et al. Time-dependent properties of the viscoelasticity of cement-emulsified asphalt composites[J]. Materials Review, 2014, 28(8): 121-125.
- [11] 祝斯月,陈拴发,秦先涛,等.透水性沥青路面高粘改性沥青动态力学性能[J].武汉理工大学学报,2012,34(12): 52-56.
ZHU Siyue, CHEN Shuanfa, QIN Xiantao, et al. Dynamic mechanical properties of high viscosity modified asphalt of previous asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(12): 52-56.

(本文编辑 吴海西)