

CRTS II 型 CA 砂浆的阻尼性能

王金凤¹, 欧阳剑², 赵九野², 谭忆秋², 李云良²

(1. 中海油气开发利用公司, 北京 100029; 2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要:以能量耗散系数为材料阻尼性能的评价指标,运用循环加载试验研究 CA 砂浆的能量耗散系数随加载应力、加载频率和试验温度的变化规律,结合 CA 砂浆的阻尼特性,提出 CA 砂浆阻尼的评价方法。结果表明:CA 砂浆的能量耗散系数不随应力的变化出现明显变化,大致保持在 13% ~ 15%;随着加载频率的增加,CA 砂浆能量耗散系数先快速降低、后变化趋缓;随着温度的增大,能量耗散系数在低频加载下增加较大,在高频加载下增加较小。

关键词:CA 砂浆; 阻尼性能; 能量耗散系数; 评价方法

中图分类号:U 214.01 **文献标志码:**A

Damping capacity of type CRTS-II cement asphalt (CA) mortar

WANG Jin-feng¹, OUYANG Jian², ZHAO Jiu-ye², TAN Yi-qiu², LI Yun-liang²

(1. China Offshore Oil & Gas Development & Utilization Company, Beijing 100029, China;

2. School of Transportation Science and Engineering in Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to study damping characteristics of cement asphalt mortar (CA mortar), by taking energy dissipation coefficient as the evaluation index of material's damping capacity, the variation laws of energy dissipation coefficient of CA mortar with loading stress, loading frequency, and test temperature were studied through cycle loading test. An evaluation method for the damping capacity of CA mortar was proposed considering the damping characteristics of CA motor. The results show that the energy dissipation coefficient of CA mortar is relatively stable with the change of loading stress, varying from 13% to 15%. With the increase of loading frequency, the energy dissipation coefficient of CA mortar declines sharply before achieving steady state. With the increase of test temperature, the energy dissipation coefficient of CA mortar increases a lot at low loading frequency but increases a little at high loading frequency.

Key words: CA mortar; damping capacity; energy dissipation coefficient; evaluation method

板式无砟轨道是当今高速铁路无砟轨道的主要结构形式^[1-2]之一,CA 砂浆弹性结构垫层为高速行车荷载作用提供优良的降噪、减振及耗散损伤力等性能,确保板式轨道高速行驶的安全性和舒适性,在板式无砟轨道中起着重要的作用。研究^[3-4]表明,CA 砂浆垫层阻尼的增大,可以降低系统竖向振动响应和轨道板的振动,延长板式轨道使用寿命。目前对于 CA 砂浆的研究主要集中在配合比设计、力学性能指标的检测、施工性能研究、水泥乳化沥青相互机理及微观结构特征上^[5-7]。一般认为,由于沥青的存在,CA 砂浆具有一定的减振性能。CA 砂浆在

中国高速铁路弹性垫层的服役过程中,既要经受炎热地区夏季 40 ℃ 以上的高温环境,又要抵御寒冷地区冬季 -20 ℃ 以下的低温环境。同时,CA 砂浆既要经受在 300 km/h 的高速列车行车过程中带来的高频瞬时荷载冲击,在转弯或车站等加减速路段还要求能承受较低频率甚至静止的荷载。对于含有较多沥青的复合材料,CA 砂浆的减振能力在一定程度上会受到温度和加载频率的影响。为此,笔者通过循环加载试验开展不同加载频率和试验温度下 CRTS II 型 CA 砂浆阻尼特性的研究,同时结合 CRTS II 型 CA 砂浆的阻尼特性,提出 CA 砂浆阻尼的评价方

法。

1 原材料与配合比

(1) 原材料: P. O42.5 水泥; CA 砂浆用的阴离子慢裂型乳化沥青, 固含量为 60%; 两种级配的河砂, 粒径分别为 0.15 ~ 0.3 mm, 0.3 ~ 0.6 mm, 在配比中按 4 : 6 复配; 自来水; 消泡剂; 聚羧酸减水剂; 发气铝粉, 最大粒径为 80 μm 。

(2) 试验配比。试验过程中 CA 砂浆主要组成材料的配比为 $m(A) : m(C) : m(S) = 0.22 : 1.0 : 1.6$, 其中, A 表示乳化沥青中净沥青含量, C 表示水泥, S 表示砂, 水灰比为 0.4, 该 CA 砂浆扩展度为 295 mm, 流动度为 93 s, 弹性模量为 9 100 MPa, 28 d 抗压强度为 17.2 MPa, 28 d 抗折强度为 6.2 MPa, 可满足我国 CRTS II 型无砟轨道对 CA 砂浆的技术要求。

2 试验方法

2.1 阻尼的测量

材料的阻尼是指在动态应力作用下材料内摩擦引起的能量耗散, 可由材料的能量耗散系数表征。固体材料在简谐振动时的应力循环中, 应变总是落后于应力, 形成的应力-应变的滞回曲线面积等于单位体积材料内散失的能量, 如图 1 所示。则有

$$\psi = E'' / (2\pi E') = A_1 / (2\pi S_{(ODE+OAF_0)}) \quad (1)$$

式中, E'' 、 E' 分别为耗散能与弹性能; A_1 为应力应变滞回曲线面积, MPa; $S_{(ODE+OAF_0)}$ 为三角形 ODE、OAF₀ 的面积, MPa; ψ 为能量耗散系数。

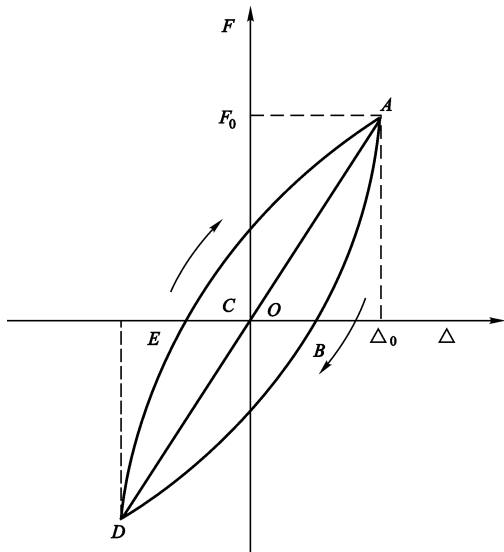


图 1 应力应变滞回曲线

Fig. 1 Hysteretic loop of stress and strain

根据能量耗散系数的计算式, 用动载试验机对 CA 砂浆进行试验。机器采用伺服控制, 最大加载力为 100 kN, 位移测量精度为 0.001 mm, 能很好地满足 CA 砂浆试验的精度要求。对试件进行正弦波荷载控制式的循环加载试验, 单轴压缩加载方式, 用静动载试验机上自带的引伸计和力传感器分别测量加载过程中试件所受到的荷载和变形。将试验测定的各个循环的力与变形数据作图, 即得到相应的力与变形滞回曲线。计算每一个滞回曲线的面积与滞回曲线对应的三角形面积比值, 即为 CA 砂浆材料的能量耗散系数。计算滞回曲线面积的方法为: 将滞回曲线按采样的点分割成很多微小的梯形进行面积求和, 近似得到滞回曲线的面积。试验中固定每个周期采集 200 个点的数据, 数值积分求和的精度能达到要求。由于加载为单轴压缩循环加载方式, 制得的试件两个测试面必须保持平整且平行, 为此, 制件时采用水泥砂浆的 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 立方体标准模具, 保证试件两个测试面的平整性和平行性, 同时还可以避免采用切割或者磨平等处理方式对试件内部造成伤害而增大材料的内耗。在测量时, 为减小测试面与测试仪器之间的摩擦阻力的影响, 测试时试件的两个受压面都进行涂油处理。另外, 为了确保试件两受压面的平行性, 在进行循环加载时, 对试件进行预压。

2.2 测量的稳定性

对在循环加载中 CA 砂浆的能量耗散系数试验值的稳定性进行研究, 考察 CA 砂浆能量耗散系数随加载次数的变化规律和随加载频率的变化规律, 结果见图 2 和图 3。其中, 图 2 中加载应力为 1 ~ 6 MPa, 1 500 次循环加载, 频率为 10 Hz。按照式 (1) 所测得的 CA 砂浆能量耗散系数会随加载周次上下波动, 但是这种波动随加载次数没有上升或者下降趋势; 图 3 中加载应力为 1 ~ 6 MPa, 100 次循环加载, 可以看出, CA 砂浆在 1、5 和 10 Hz 的加载频率下的能量耗散系数并无明显区别, 但 CA 砂浆的能量耗散系数试验值随循环加载次数的波动性, 随加载频率的增加而增大。为抵消 CA 砂浆能量耗散系数在测量时的波动, 保证各频率下所测得的 CA 砂浆的能量耗散系数具有真实性, 试验中取加载 100 次, 每次循环计算出的能量耗散系数的平均值作为 CA 砂浆一次测量的能量耗散系数; 当对比不同配方的 CA 砂浆的能量耗散系数时, 为了减小计算得到的 CA 砂浆的能量耗散系数波动性, 采用的加载频率为 1 Hz。

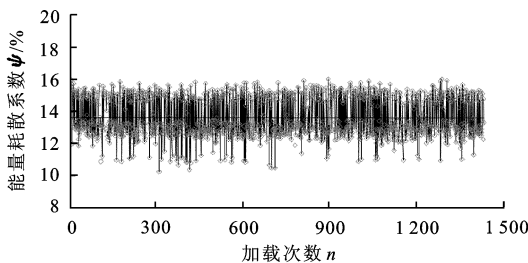


图 2 CA 砂浆能量耗散系数随加载次数的变化

Fig.2 Influence of loading times on energy dissipation coefficient of CA mortar

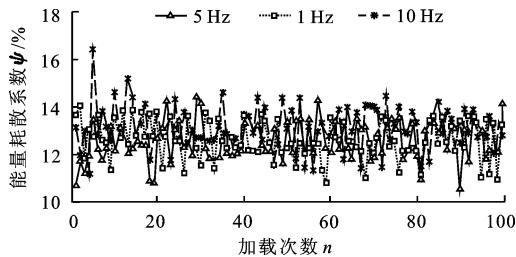


图 3 CA 砂浆能量耗散系数在不同加载频率下随加载次数的变化

Fig.3 Influence of loading times on energy dissipation coefficient of CA mortar under different loading frequency

3 CA 砂浆能量耗散系数的影响因素

3.1 加载应力幅

CA 砂浆的抗压强度在 17.2 MPa, 试验时在小于抗压强度的情况下, 对试件先后采用不同的加载应力幅, 得到 CA 砂浆能量耗散系数与加载应力幅的关系(图 4, 频率为 10 Hz)。由于循环加载时是压缩加载, 循环加载中试件所受的最小压应力为 1 MPa。

从图 4 看出, CA 砂浆能量耗散几乎不随加载应力幅的变化而变化, 保持在 13% ~ 15%。这是由于试验中所加载的应力幅均在 CA 砂浆极限抗压强度的 70% 以下, 在这种应力幅下进行几百次循环的加载, 并未使 CA 砂浆的内部裂纹出现扩展, 未给 CA 砂浆材料内部造成损伤, 因而 CA 砂浆的能量耗散系数未发生变化。换句话说, CA 砂浆能量耗散不随加载应力幅变化而变化, 说明不同应力作用下 CA 砂浆的内部裂纹和缺陷保持一致, 在 70% 的极限荷载下并未使 CA 砂浆力学性能开始屈服。图 5 是不同加载力下的荷载与位移的滞回曲线, 从曲线也可以看出, 随着加载力的增大, 峰谷值点对应的荷载与位移的割线斜率并没有发生明显变化, CA 砂浆的刚度并未随着荷载的增大出现退化。高速铁路运营中, 车辆荷载对 CA 砂浆层的作用均远低于 CA 砂浆

的极限荷载, 因而运营中 CA 砂浆的减振性能不会随车重的增加出现明显变化。由于 CA 砂浆能量耗散系数与加载应力幅关系不大, 以下的试验均采用 1 ~ 6 MPa 的应力循环加载。

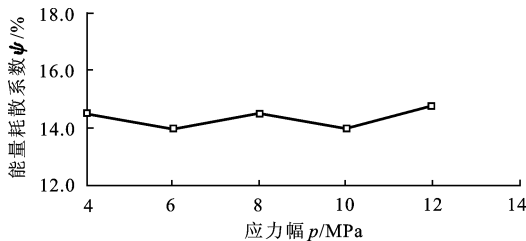


图 4 CA 砂浆能量耗散系数与加载应力幅的关系

Fig.4 Relation between energy dissipation coefficient of CA mortar and loading stress

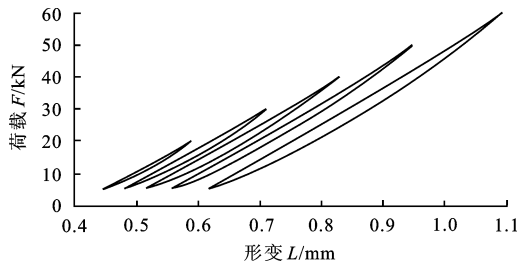


图 5 不同荷载下 CA 砂浆的滞回曲线

Fig.5 Hysteretic loop of CA mortar under different loading force

3.2 加载频率

CA 砂浆中包含一定的沥青相, CA 砂浆的减振耗能主要是黏弹性材料的耗能性能, 减振性能势必受到沥青性质的影响, 即具有一定的黏弹性, CA 砂浆材料的阻尼特性会受到加载频率与加载温度的影响。但是 CA 砂浆材料中又含有大量的水泥水化产物, 其性质必然不同于沥青与常用的沥青混合料的性质, 这使得 CA 砂浆的减振性能变得较为复杂。为研究 CA 砂浆在不同温度环境和不同行车速度下减振性能的变化, 考察 CA 砂浆的在不同加载频率和温度下的能量耗散系数。试验条件为: 加载频率 0.1、0.5、1、5、10、20 Hz; 加载温度 -20、0、20、40 ℃。不同温度下 CA 砂浆的能量耗散系数随加载频率变化规律如图 6 所示。

从图 6 看出, 在 -20 ~ 40 ℃, 加载频率在 0.1 Hz 时, CA 砂浆材料具有较大的能量耗散系数; 随着加载频率的增加 (0.1 ~ 1 Hz), CA 砂浆能量耗散系数大幅度下降; 频率为 1 ~ 20 Hz 时, CA 砂浆的能量耗散系数无明显变化。这是因为 CA 砂浆材料在低频条件或静载下 (1 Hz 以下) 表现出一定的黏弹性, 加载频率对能量耗散系数影响很大; 而当加载频率超过 1 Hz 后, CA 砂浆的力学行为主要以弹塑性为主。

同时,进行动态试验时,频率较低时有较好的控制精度,结合 CA 砂浆的能量耗散系数随加载频率的变化情况,计算不同配方的 CA 砂浆的能量耗散系数时,加载频率定为 1 Hz。

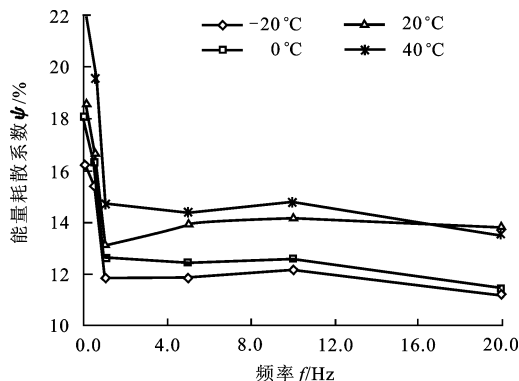


图 6 CA 砂浆能量耗散系数与加载频率的关系

Fig. 6 Relation between energy dissipation coefficient of CA mortar and loading frequency

3.3 温度

绘制不同频率下 CA 砂浆的能量耗散系数随温度的变化规律,可对列车在温度环境变化时行车舒适性和稳定性做出参考分析,结果见图 7。可以看出,在加载频率为 0.1 ~ 20 Hz 下,温度为 -20 ~ 40 °C, CA 砂浆能量耗散系数随温度的升高均有一定的增大。因此,沥青的性质对 CA 砂浆能量耗散系数有较大影响。温度越高,CA 砂浆中沥青相越软,从而 CA 砂浆的耗散能力越强。另外,CA 砂浆的能量耗散系数在低频下比高频下随温度的变化大,这说明沥青的性

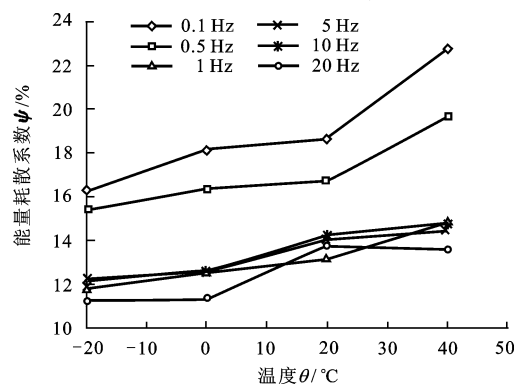


图 7 CA 砂浆能量耗散系数与温度的关系

Fig. 7 Relation between energy dissipation coefficient of CA mortar and test temperature

质对 CA 砂浆的低频性能影响较大。列车运行时对轨道的冲击频率主要集中在 10 ~ 30 Hz, CA 砂浆在较高频率下较为稳定的能量耗散系数对列车的振动平稳性有利。相比沥青及沥青混合料的能量耗散特性, CA 砂浆的能量耗散系数随温度的变化,并未出现成

倍的变化原因在于,CA 砂浆中沥青的用量较小,沥青并未能包裹水泥水化产物,CA 胶浆并未形成连续的沥青膜。从 CA 砂浆微观结构(图 8)可以明显看到有规则形貌的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体(位置 1)、针刺状的 CSH 晶体(位置 2)及已经比较密实的 CSH 凝胶(位置 3),并未发现沥青的成膜结构。

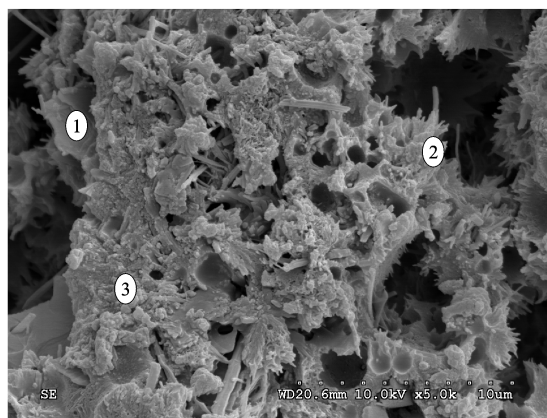


图 8 CA 砂浆微观结构

Fig. 8 Microstructure of CA mortar

4 结 论

(1) CA 砂浆的能量耗散系数在一定的应力范围内不随加载应力的变化而变化,即在一定应力范围内 CA 砂浆有稳定的减振性能。

(2) 由于沥青具有温度和加载频率的敏感性, CA 砂浆能量耗散系数受温度和加载频率的影响。CA 砂浆能量耗散系数随加载频率的增大先快速降低后变化趋于平缓,拐点频率为 1 Hz;随着温度的升高,CA 砂浆能量耗散系数在低频加载下增大较大,在高频加载下增大较小。

(3) 能量耗散系数代表了材料的阻尼,根据 CA 砂浆能量耗散系数随频率的变化特性,可以采用 1 Hz 的循环加载试验测量和评价 CA 砂浆的阻尼。

参考文献:

- [1] DONALD P. Slab track test and demonstration for shared freight and high-speed passenger service[J]. US Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2008(7):RR08-11.
- [2] 金守华,陈秀方,杨军. 板式无砟轨道用 CA 砂浆的关键技术[J]. 中国铁道科学,2006,27(2):20-25.
JIN Shou-hua, CHEN Xiu-fang, YANG Jun. Key technologies of CA mortar for slab track[J]. China Railway Science, 2006,27(2):20-25.

- 186.
- [20] WATANABE Y, IKOMA T, SUETSUGU Y, et al. The densification of zeolite/apatite composites using a pulse electric current sintering method: a long-term assurance material for the disposal of radioactive waste[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(4/5): 481-486.
- [21] CHANDRASEKHAR S, PRAMADA P N. Kaolin-based zeolite Y, a precursor for cordierite ceramics[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 27(3/4): 187-198.
- [22] MISIRLI Z, ERKALFA H, ÖZKAN O T. Effect of B_2O_3 addition on the sintering of $\alpha-Al_2O_3$ [J]. *Ceramics International*, 1996, 22(1): 33-37.
- [23] 刘于昌, 黄晓巍. 液相烧结氧化铝陶瓷及其烧结动力学分析[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(6): 647-651.
LIU Yu-chang, HUANG Xiao-wei. Liquid-phase-sintering of alumina ceramics and sintering kinetic analysis [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 34(6): 647-651.
- [24] 史国普, 王志, 侯宪钦, 等. 低温烧结氧化铝陶瓷的动力学研究[J]. *硅酸盐通报*, 2007, 26(6): 1112-1116.
SHI Guo-pu, WANG Zhi, HOU Xian-qin, et al. Kinetics study on low temperature sintered alumina ceramics [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 26(6): 1112-1116.
- [25] 黄晓巍. 液相烧结氧化铝陶瓷的致密化机制[J]. *材料导报*, 2005, 19(4): 393-404.
HUANG Xiao-wei. Mechanism of densification for alumina ceramic prepared by liquid phase sintering [J]. *Materials Review*, 2005, 19(4): 393-404.
- [26] XUE L A, CHEN I W. Low-temperature sintering of alumina with liquid-forming additive[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1991, 74(8): 2011-2013.
- [27] 顾皓, 吕珺, 黄丽芳, 等. $MgO-MnO_2-TiO_2-SiO_2$ 烧结助剂中 SiO_2 的量对低温烧结氧化铝陶瓷材料性能的影响[J]. *硅酸盐通报* 2009, 28(3): 479-483, 490.
GU Hao, LÜ Jun, HUANG Li-fang, et al. The effect of SiO_2 amount in $MgO-MnO_2-TiO_2-SiO_2$ on properties of alumina ceramic sintered by low-temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(3): 479-483, 490.
- [28] 李丽霞, 贾茹. *硅酸盐物理化学* [M]. 天津: 天津大学出版社, 2010.

(编辑 刘为清)

(上接第 168 页)

- [3] 翟婉明, 韩卫军, 蔡成标, 等. 高速铁路板式轨道动力特性研究[J]. *铁道学报*, 1999, 21(6): 65-69.
ZHAI Wan-ming, HAN Wei-jun, CAI Cheng-biao, et al. Dynamic properties of high speed railway slab tracks[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1999, 21(6): 65-69.
- [4] 张斌, 雷晓燕. 基于车辆-轨道单元的无砟轨道动力特性有限元分析[J]. *铁道学报*, 2011, 33(7): 78-85.
ZHANG Bin, LEI Xiao-yan. Analysis on dynamic behavior of ballastless track based on vehicle and track elements with finite element method[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(7): 78-85.
- [5] 王强, 阎培渝, 阿茹罕. 高强型水泥沥青砂浆抗压强度影响因素分析[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(5): 519-523.
WANG Qiang, YAN Pei-yu, A Ru-han. Research on factors influencing compressive strength of high strength cement asphalt (CA) mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(5): 519-523.
- [6] 王发洲, 刘志超, 胡曙光, 等. 掺沥青乳液水泥体系的凝结时间对 CA 砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(2): 162-166.
WANG Fa-zhou, LIU Zhi-chao, HU Shu-guang, et al. Influence of setting process of cement system in the presence of asphalt emulsion on the properties of CA mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(2): 162-166.
- [7] 谭忆秋, 欧阳剑, 王金凤, 等. CA 砂浆强度影响因素及强度机理研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(10): 80-83.
TAN Yi-qiu, OUYANG Jian, WANG Jin-feng, et al. Factors influencing strength of cement asphalt mortar and strength mechanism [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(10): 80-83.
- [8] 谭忆秋, 欧阳剑, 王金凤, 等. 高强型 CA 砂浆力学性能影响因素及力学机理研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(7): 122-125.
TAN Yi-qiu, OUYANG Jian, WANG Jin-feng, et al. Research on factors influencing mechanics properties of high strength cement asphalt (CA) mortar and mechanics mechanism [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(7): 122-125.
- [9] NADIA P, JACQUES M, MICHEL P. Hydration mechanisms, microstructure and mechanical properties of mortars prepared with mixed binder cement slurry-asphalt emulsion [J]. *ASCE*, 2003, 15(1): 54-59.

(编辑 刘为清)