基于 SHPB 试验的高速铁路 CRTS II 型 CA 砂浆动态性能

谢友均*, 傅强*, 龙广成, 宋昊

中南大学土木工程学院, 长沙 410075

* E-mail: xiejy@csu.edu.cn; fuqiangzn2011@163.com

收稿日期: 2014-03-26; 接受日期: 2014-05-12

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB036201)和国家自然科学基金(批准号: 51278498, 50978257)资助项目

摘要 采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验研究了高速铁路 CRTS II 型水泥乳化沥青砂浆(CA 砂浆)的动态力学性能, 并建立了 CRTS II 型 CA 砂浆的动态本构关系模型. 结果表明: 随着应变率的增大, CRTS II 型 CA 砂浆峰值强度逐渐增加, 但增加速率随应变率的增大而减小, 当应变率从 44.17 增加至 54.79 s^{-1} 和从 54.79 增加至 108.47 s^{-1} 时, 峰值强度分别增加了初始峰值强度的 52.28% 和 7.5% , 弹性模量随应变率的变化规律性较差; 应变率越大, 破坏时的贯通裂纹越多, 碎裂程度越大; CRTS II 型 CA 砂浆的比能量吸收随着应变率的增大而增大. 所建立的动态本构模型拟合曲线与试验曲线具有较好的一致性.

关键词

CA 砂浆

应变率

峰值强度

弹性模量

比能量吸收

动态本构模型

1 引言

水泥乳化沥青砂浆(Cement and Asphalt Mortar, CA 砂浆)是高速铁路板式无砟轨道的充填层材料, 由水泥、乳化沥青、细骨料、水和外加剂经机械搅拌形成的一种有机-无机复合材料, 在工程中主要起着承力、传力、减振和几何调整等作用, 对高速铁路列车运行的安全性、舒适性及轨道结构的耐久性都具有重要影响, 分 CRTS I 型 CA 砂浆和 CRTS II 型 CA 砂浆^[1-5].

由于在列车运行过程中, CA 砂浆的力学性能与荷载的作用时间及频率密切相关, CA 砂浆充填层处于动态加载过程, 文献[6]和[7]的研究结果表明: CA 砂浆的抗压强度与弹性模量随应变率的增大而增大,

且 CA 砂浆力学性能的应变率效应大于同等条件下混凝土力学性能的应变率效应; 文献[8]研究了不同沥青含量的 CA 砂浆力学性能的应变率效应, 沥青含量越低, CA 砂浆的速率影响因子越小.

应变率是表征材料快速变形的一种度量, 应变率按大小可大致归纳为: 低应变率($10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)、中等应变率($10^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$)、高应变率($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)和超高应变率(大于 10^4 s^{-1}). 以往对 CA 砂浆力学性能的应变率效应的研究大多针对 CRTS I 型 CA 砂浆, 且均属于低应变率范围, 由于 CRTS II 型 CA 砂浆与板式轨道的轨道板与底座板均具有粘结力, 在实际工程中, CRTS II 型 CA 砂浆的动态加载过程更明显, 且 CA 砂浆与轨道板发生离缝或损伤时, 其实际加载的应变率范围远高于理论计算的理想状态. 因此, 针对

引用格式: 谢友均, 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. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 672-680
Xie Y J, Fu Q, Long G C, et al. Dynamic mechanical properties of CRTS II type CA mortar for high-speed railway based on SHPB test (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 672-680, doi: 10.1360/N092014-00083

上述工程实际, 探讨 CRTS II 型 CA 砂浆的动态力学性能, 对于掌握我国高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道结构服役行为具有重要意义.

基于上述, 本文采用可实现应变率在 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 内的动态加载的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验装置^[9-11], 研究了 CRTS II 型 CA 砂浆(以下简称 CA 砂浆)在中等应变率范围内的力学性能, 分析 CA 砂浆的动态峰值强度、弹性模量及比能量吸收随应变率变化的内部机理, 并建立相应的本构模型, 以为 CA 砂浆的力学性能预测及高速铁路结构设计与数值模拟等提供技术支持.

2 试验

2.1 原材料

干粉料为安徽中铁生产的 CRTS II 型 CA 砂浆专用干粉料, 水泥含量为 36%, 24 h 体积膨胀率为 1.25%, 1 d 抗压强度为 13.15 MPa; 阴离子乳化沥青, 固含量为 60%, 物理性能见表 1; 拌合水为干净自来水. CA 砂浆中沥青与水泥的质量比为 0.3, 经测试, 新拌 CA 砂浆的各项性能均满足《客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》的规定.

2.2 CA 砂浆试件制备

CA 砂浆搅拌时, 首先将乳化沥青、水倒入搅拌锅内慢搅 1 min, 搅拌过程中加入适量消泡剂以消除气泡, 将干粉料慢慢加入搅拌锅内, 投料时间不超过 30 s, 投料结束后, 继续慢搅 1 min, 然后快速搅拌 2 min, 最后慢搅 30 s, 消除砂浆内的较大气泡. 按照客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件的规定测试新拌砂浆的流动度、扩展度和含气量. 最后, 将砂浆灌入 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的砂浆试模中, 24 h 后拆模, 放入标准温、湿度的养护箱中养护至 60 d 龄期后进行动态力学试验.

试验前, 为保证试验精度, 首先采用双端面自动磨平机将 CA 砂浆试件的上、下表面磨平, 以保证试

件上、下表面的平行, 打磨后的试件如图 1 所示. 最后, 采用 SHPB 试验装置进行 CA 砂浆的动态力学试验, 试验温度为 $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

2.3 SHPB 试验方法简介

1) 试验系统

试验采用 $\Phi 50 \text{ mm}$ 杆径 SHPB 试验装置, 如图 2 所示, 主要由发射腔、冲头、入射杆、透射杆、能量吸收杆和数据采集系统组成. 测试系统为 CS-10 型超动态应变仪, 具有校准和自动平衡功能; 加载应力波为半正弦应力波, 延长了入射波上升沿的升时, 可实现试件内的应力均匀的要求, 入射波、透射波和反射波波形如图 3 所示.

由测试系统获得的入射应变信号 $\varepsilon_i(t)$, 反射应变信号 $\varepsilon_r(t)$ 及透射应变信号 $\varepsilon_t(t)$, 可由下式计算出 CA 砂浆试件的应力、应变及应变率:

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E_0}{2A_s} \varepsilon_i(t), \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -2 \frac{c_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_i(t) dt, \quad (2)$$

$$\theta(t) = -2 \frac{c_0}{l_s} \varepsilon_r(t), \quad (3)$$

式中, $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$, $\theta(t)$ 分别为 CA 砂浆的应力、应变及应变率; A_0 , E_0 分别为压杆的横截面积与弹性模量; A_s , l_s 分别为 CA 砂浆试件的横截面积与长度; c_0 为压杆中

图 1 CA 砂浆试件

表 1 乳化沥青的物理性能

固含量 (%)	恩氏黏度 (25°C)	1.18 mm 筛上筛余 量(%)	储存稳定性(25°C)(%)		蒸发残留物针入度 (25°C)(0.1 mm)	蒸发残留物延度 (25°C)(cm)
			1 d	5 d		
60	5.8	0.005	0.35	1.86	81	104

图2 (网络版彩图)SHPB 试验装置

图3 入射波、反射波及透射波

的纵波波速^[12,13].

本文采用 SHPB 试验研究了 7 个应变率(即 $\theta_1=44.17 \text{ s}^{-1}$, $\theta_2=54.79 \text{ s}^{-1}$, $\theta_3=77.10 \text{ s}^{-1}$, $\theta_4=92.43 \text{ s}^{-1}$, $\theta_5=99.68 \text{ s}^{-1}$, $\theta_6=104.93 \text{ s}^{-1}$, $\theta_7=108.47 \text{ s}^{-1}$)条件下的 CA 砂浆的动态力学特性.

2) 试验方法有效性分析

SHPB 试验技术已在岩石、混凝土等准脆性材料的动态力学试验研究中得到广泛应用,在泡沫、橡胶等软材料的研究中也有部分应用^[14,15],由于 CA 砂浆的动态力学性能缺乏系统研究,因此, SHPB 试验技术在 CA 砂浆的力学性能研究中还未得到应用,为此,需对 SHPB 试验技术应用于 CA 砂浆动态力学性能研究的有效性进行分析.

SHPB 试验技术的一维应力波需满足 $\lambda > 5d$ ^[16], λ 为入射应力脉冲宽度, d 为压杆直径, $d=0.05 \text{ m}$, 其中

$$\lambda = c_0 \tau_0, \quad (4)$$

式中, τ_0 为应力脉冲的传播时间, 取为 $400 \text{ s}^{[17]}$; c_0 为纵波波速, 为 5400 m s^{-1} .

所以,

$$\lambda = c_0 \tau_0 = 5400 \times 0.0004 = 2.16 > 5d = 0.25 \quad (5)$$

压杆中的应力波满足一维应力波条件.

由于在较高应变率作用下,岩石、混凝土等准脆性材料的破坏应变极小,只有千分之几,破坏时试件中的应力可能远未达到均匀状态^[18],但 CA 砂浆是一种典型的黏弹性材料,破坏应变远大于准脆性材料,因此, SHPB 试验技术应用于 CA 砂浆的力学性能研究应具有较好的有效性.

一般在试件破坏前,应力脉冲在试件中来回反射两次以上,试件内部便会达到应力均匀状态,脉冲来回反射一次的时间为 $2l_s/c_s$, 本文中 $l_s=0.05 \text{ m}$, c_s 为试件中脉冲的传播速度,可由下式计算得到^[19]

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho_s} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (6)$$

式中, E , ν 分别为 CA 砂浆的弹性模量与泊松比,根据《客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》的规定^[20], 本文取 $E=10000 \text{ MPa}$, 泊松比可取为 0.3, ρ_s 为 CA 砂浆的密度, 取为 1900 kg m^{-3} .

通过计算得到 $c_s=2964.70 \text{ m s}^{-1}$, 所以 $2l_s/c_s=33.73 \text{ s}$, 而由图 2 可知,入射波上升沿的升时可达 280 s, 在此时间内,应力脉冲在 CA 砂浆试件中已来回反射数次, 足够达到应力均匀状态.

3 试验结果及分析

3.1 动态应力-应变曲线的震荡特性

试验得到的 CA 砂浆的动态应力-应变曲线如图 4 所示.

CA 砂浆在中等应变率加载条件下的应力-应变曲线并不像在静态加载条件下的应力-应变曲线光滑,而是呈现一定的震荡特性. 在较高应变率作用下, CA 砂浆中的微裂纹产生和扩展的速度极快,微裂纹主要源于沥青-水泥水化产物、沥青-细骨料、细骨料-水泥水化产物等多种界面及水泥石中由水分散失留下的微孔隙,由于 CRTS II 型 CA 砂浆的沥青含量较少,乳化沥青破乳形成的沥青膜结构分散在 CA 砂浆试件内部,具体成膜过程如图 5 所示,当源于水泥石内部或水泥水化产物-细骨料界面的微裂纹扩展到沥青膜结构时,受到沥青膜结构的阻碍作用,微裂纹的扩展被终止,可导致流动应力的不断震荡^[21].

图 4 CA 砂浆的动态应力-应变关系

(a) $\theta_1 \sim \theta_4$; (b) $\theta_5 \sim \theta_7$

图 5 CA 砂浆的成膜过程

3.2 动态应力-应变关系

从图 4 中可以看出, 随着应变率的增大, CA 砂浆的动态峰值强度逐渐增大. 动态强度增长因子 (*DIF*) 为冲击荷载作用下材料的峰值强度与准静态峰值强度的比值, 表示材料的动态峰值强度随应变率的变化程度, 即

$$DIF = \frac{\sigma_d}{\sigma_s}, \quad (7)$$

式中, σ_d 为冲击荷载作用下的峰值强度; σ_s 为准静态条件下的峰值强度, 以常规加载速率 ($1 \text{ mm min}^{-1} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 作为 CA 砂浆的准静态加载条件, 笔者根据实验得到 $\sigma_s = 19.78 \text{ MPa}$.

CA 砂浆的动态强度增长因子 *DIF* 与应变率对数 $\lg \theta$ 的关系如图 6 所示.

CA 砂浆的峰值强度随应变率的增大整体上呈增大趋势, 但增大速率逐渐减小, 当应变率从 44.17 增加至 54.79 s^{-1} 时, 峰值强度增大了 52.28% , 而应变率从 54.79 增加至 108.47 s^{-1} 时, 峰值强度增大了 7.5% , 增加速率迅速减小. 由 Griffith 的材料破坏理论可知, CA 砂浆的破坏源于内部微裂纹的扩展直至相互贯通, 当应变率较高时, 由于裂纹的产生要比扩展需要的能量多, 因此, CA 砂浆中产生大量的微裂纹, 由于在

图 6 CA 砂浆的动态增长因子 *DIF* 与应变率对数 $\lg \theta$ 的关系

较高应变率条件下, 荷载作用的时间极短, 微裂纹来不及扩展, 根据功能原理, CA 砂浆只能通过增加应力的方式来抵消或耗散外部能量, 所以, 应变率越高, 峰值强度越大; 另一方面, 在较高应变率条件下, CA 砂浆的侧向变形由于惯性作用而受到限制, CA 砂浆由一维应力状态向一维应变状态转化, 由于试件中间部位的侧向变形受到限制, 使 CA 砂浆近似处于围压状态, 应变率越大, 围压作用越大, 峰值强度就越大^[22,23]. 但应变率越高, CA 砂浆的峰值强度并不直线增加, CA 砂浆的破坏主要由内部微裂纹的产生及扩展所致, 在低应变率条件下, CA 砂浆呈一定的劈裂破坏模式, 碎裂程度较小, 而在高应变率条件下, 则呈粉碎状态, 内部产生较多的微裂纹, 如图 7 所示,

图 7 (网络版彩图)CA 砂浆的破裂方式
(a) 应变率为 44.17 s^{-1} ; (b) 应变率为 108.47 s^{-1}

微裂纹的产生与扩展是耗散能量的主要方式, 峰值强度的增加起辅助作用, 同时, 一维应变状态下围压的限制作用并不会无限增大, 当 CA 砂浆内产生的微裂纹增多时, 其向外扩展的范围也会迅速增大, 逐渐降低侧向变形的惯性作用, 导致随应变率的增大, CA 砂浆峰值强度的增大速率逐渐减小。

CA 砂浆的动态强度增长因子 DIF 与应变率对数 $\lg\theta$ 的关系可用下式进行拟合:

$$DIF = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 2.1492 \lg \theta - 1.12, \quad R=0.8070, \quad (8)$$

式中, R 为拟合结果与试验结果的相关系数。

峰值强度与弹性模量是评价材料力学性能的主要指标, 目前, 国内外还没有计算材料在冲击荷载作用下弹性模量的标准方法, CA 砂浆在破坏前的应力-应变曲线存在一定程度的非线性, 且随着应力的增加而加剧, 本文以动态峰值强度的 30% 与原点之间的割线模量作为 CA 砂浆的动态弹性模量, 其变化规律如图 8 所示。

CA 砂浆的动态弹性模量随应变率的变化规律不明显, 离散性较大, 这可能是由于在应力-应变曲线的初始阶段, 试件中的应力均匀性较差, 由应力波的波动效应所致, 但从图 8 可以看出, 在 $44.17 \sim 108.47 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内, CA 砂浆的动态弹性模量基本稳

图 8 CA 砂浆的动态弹性模量与应变率的关系

定在 $30 \sim 250 \text{ GPa}$ 的范围内, 是准静态条件下弹性模量的 3~25 倍. 通过冲击荷载作用下与准静态加载条件下 CA 砂浆力学指标的对比可以体现 CA 砂浆的应变率敏感性—应变率强化效应。

3.3 比能量吸收

比能量吸收主要表征 CA 砂浆在冲击荷载作用下的能耗性能, 即单位体积的 CA 砂浆试件吸收能量的大小, 可用下式计算:

$$W = W_i - (W_r + W_t), \quad (9)$$

$$W_i = \frac{A_0 c_0}{E_0 A_s l_s} \int_0^t \sigma_i^2(t) dt, \quad (10)$$

$$W_r = \frac{A_0 c_0}{E_0 A_s l_s} \int_0^t \sigma_r^2(t) dt, \quad (11)$$

$$W_t = \frac{A_0 c_0}{E_0 A_s l_s} \int_0^t \sigma_t^2(t) dt, \quad (12)$$

式中, W 为 CA 砂浆的比能量吸收; W_i , W_r , W_t 分别为入射波、反射波和透射波所携带的能量; $\sigma_i(t)$, $\sigma_r(t)$, $\sigma_t(t)$ 分别为入射波应力、反射波应力和透射波应力^[24,25]。

CA 砂浆的比能量吸收如图 9 所示. CA 砂浆的比能量吸收在初始阶段变化不大, 随着荷载作用时间的延长, 比能量吸收迅速增大, 应变率越大, 增加速率越快, 达到一定程度后, 稳定在某一值左右基本不变. 比能量吸收的最大值随应变率的变化规律如图 10 所示, 拟合公式如下:

$$W = 0.1061 \exp(0.0217\theta), \quad R=0.9456. \quad (13)$$

CA 砂浆的比能量吸收随着应变率的增大呈指数函数增大, CA 砂浆从外界吸收的能量主要用于内部微裂纹的产生、扩展及破裂面的相互摩擦, 由 3.2 的分析可知, 应变率越高, CA 砂浆的碎裂程度越大, 产

图 9 CA 砂浆的比能量吸收
(a) $\theta_1 \sim \theta_4$; (b) $\theta_5 \sim \theta_7$

图 10 比能量吸收的最大值与应变率的关系

生的微裂纹越多, 此过程需要的能量也就越多, 宏观表现为 CA 砂浆的比能量吸收越大。

4 动态本构模型

4.1 本构模型的建立

根据 Lemaitre 的应变等价性假说, 即名义应力作用在损伤材料上产生的应变与有效应力作用在无损材料上产生的应变相等, 可由下式体现^[26]:

$$\sigma = E\varepsilon(1-D), \quad (14)$$

式中, D 为损伤变量, 变化范围为 0~1。

根据统计损伤理论, 假设 CA 砂浆由无数个细小微元组成, 微元破坏前服从线弹性规律, 破坏后不再

具有承载能力, CA 砂浆中的损伤为各向等效发展, 且由破坏微元的数目占总微元数目的比例表示, 微元发生损伤时的应变服从 Weibull 分布, 通过计算可得损伤变量^[27]:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{m}\right)^n\right], \quad (15)$$

式中, m, n 为 Weibull 分布的相关参数。

将上式代入(14)式, 可得 CA 砂浆的统计损伤本构模型为

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{m}\right)^n\right]. \quad (16)$$

4.2 本构模型参数的计算与验证

由 CA 砂浆的动态应力-应变关系可知, 在峰值强度(σ_d, ε_d)处, 应满足 $d\sigma_d/d\varepsilon_d = 0$, 即

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_d}{m}\right)^n\right] \left[1 - n\left(\frac{\varepsilon_d}{m}\right)^{n-1}\right] = 0. \quad (17)$$

因为 $E \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_d}{m}\right)^n\right] \neq 0$, 所以 $1 - n\left(\frac{\varepsilon_d}{m}\right)^{n-1} = 0$, 于是可得

$$m = \frac{\varepsilon_d}{\left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{n}}}. \quad (18)$$

将(18)代入(16)式可得

$$n = \frac{1}{\ln \frac{E\varepsilon_d}{\sigma_d}}. \quad (19)$$

计算得到的 CA 砂浆本构模型的相关参数及本构模型的拟合结果与试验结果的相关系数 R 列于表 2, 拟合曲线与试验结果的对比见图 11。

表 2 本构模型相关参数

序号	参数		
	m	n	R
θ_1	0.000294	0.408571	0.8684
θ_2	0.00009253	0.345311	0.9192
θ_3	0.005476	0.940323	0.9393
θ_4	0.000599	0.460704	0.9567
θ_5	0.000984	0.494758	0.9565
θ_6	0.0000242	0.278747	0.9180
θ_7	0.005539	0.935898	0.9883

图 11 本构模型拟合结果与试验结果的对比
(a)~(g) $\theta_1 \sim \theta_7$

由表 2 和图 11 可知, 拟合结果与试验结果的相关系数较高, 只有应变率为 θ_1 的拟合结果与试验结果的相关系数低于 0.9, 其余均在 0.9 以上, 拟合结果与试验结果在峰值强度前的一致性较高, 峰值强度的拟合结果与试验结果最大相差仅 5.67%, 由于峰值强度前的应力-应变关系是体现 CA 砂浆动态力学性能的主要部分, 因此, 本文建立的本构模型能够有效的预测 CA 砂浆在冲击荷载作用下的动态力学性能。

5 结论

采用 SHPB 试验技术研究了高速铁路 CRTS II 型 CA 砂浆的动态力学性能, 建立了相应的本构模型, 主要得到以下结论。

1) SHPB 试验技术应用于 CRTS II 型 CA 砂浆动态力学性能的研究能够有效满足压杆中的一维应力波理论和试件中的应力均匀状态, 保证了试验结果的有效、可靠。

2) CA 砂浆的峰值强度随着应变率的增大而增大, 但增加速率逐渐减小; 动态弹性模量的变化规律不明显, 离散型较强, 但在研究的应变率范围内基本稳定在 30~250 GPa, 是准静态条件下弹性模量的 3~25 倍; CA 砂浆的比能量吸收随着应变率的增大而增大。

3) 根据统计损伤理论建立的本构模型的拟合结果与试验结果的相关性较好, 特别是针对峰值强度前的应力-应变阶段, 两者的一致性较高, 本构模型能够有效预测 CA 砂浆在冲击荷载作用下的动态力学性能。

参考文献

- 1 杨进波, 阎培渝, 孔祥明, 等. 水泥沥青胶凝材料的硬化机理研究. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 959–964
- 2 傅强, 郑克仁, 谢友均, 等. 水泥乳化沥青砂浆孔体积的分形特征. 硅酸盐学报, 2013, 41: 1551–1557
- 3 Harada Y, Tottori S, Itai N, et al. Development of cement asphalt mortar for slab tracks in cold climate. Q Rep RTRI, 1983, 22: 62–67
- 4 Harada Y. Development of ultrarapid-hardening cement-asphalt mortar for grouted-ballast track structure. Q Rep RTRI, 1976, 15: 6–11
- 5 Kazuyosi O, Yosio I. Compressive strength of the CA mortar and its temperature-susceptibility. Mem Faculty Technol, 1976, 10: 1–13
- 6 王发洲, 刘志超, 胡曙光. 加载速率对 CA 砂浆抗压强度的影响. 北京工业大学学报, 2008, 34: 59–65
- 7 谢友均, 曾晓辉, 邓德华, 等. 铁路无砟轨道水泥乳化沥青砂浆力学性能. 建筑材料学报, 2010, 13: 483–486
- 8 孔祥明, 刘永亮, 阎培渝. 加载速率对水泥沥青砂浆力学性能的影响. 建筑材料学报, 2010, 13: 187–192
- 9 Zhao H. A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading. Cement Concrete Comp, 1998, 20: 293–299
- 10 Zhao H. Analysis of High Strain Rate Dynamic Tests on Concrete. In: The 5th International Symposium on Cement and Concrete. Shanghai: Tongji University Press, 2002. 583–589
- 11 Lok T S, Asce M, Li X B, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate. J Mater Civil Eng, 2002, 14: 262–269
- 12 王斌, 李夕兵, 尹士兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29: 1003–1009
- 13 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能. 复合材料学报, 2008, 25: 135–142
- 14 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计. 爆炸与冲击, 2002, 22: 15–19
- 15 刘飞, 赵凯, 王肖钧, 等. 软材料和松散材料 SHPB 冲击压缩实验方法研究. 实验力学, 2007, 22: 20–26
- 16 江伏. 应用 SHPB 试验对橡胶粉混凝土动力性能的研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2007. 15–17
- 17 刘孝敏, 胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性. 爆炸与冲击, 2000, 20: 110–114
- 18 孟益平, 胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题. 实验力学, 2003, 18: 108–112
- 19 金解放. 静载荷与循环冲击组合作用下岩石动态力学特性研究. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 2012. 87–88
- 20 谢永江, 郑新国, 江成, 等. 客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件. 北京: 中国铁道出版社, 2008
- 21 陈柏生, 胡时胜, 马芹永, 等. 冻土动态力学性能的实验研究. 力学学报, 2005, 37: 724–728
- 22 曾梦澜, 彭珊, 黄海龙. 纤维沥青混凝土动力性能试验研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37: 1–6
- 23 许金余, 李为民, 黄小明, 等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态本构模型. 工程力学, 2010, 27: 111–116
- 24 刘石, 许金余, 刘军忠, 等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30: 1864–1871
- 25 夏昌敬, 谢和平, 鞠杨. 孔隙岩石的 SHPB 试验研究. 岩石力学与工程学报, 2006, 25: 896–900
- 26 曹文贵, 李翔, 刘峰. 裂隙化岩体应变软化损伤本构模型探讨. 岩石力学与工程学报, 2007, 26: 2488–2494
- 27 傅强, 谢友均, 郑克仁, 等. 水泥乳化沥青砂浆统计损伤本构模型. 西南交通大学学报, 2014, 49: 65–72

Dynamic mechanical properties of CRTS II type CA mortar for high-speed railway based on SHPB test

XIE YouJun, FU Qiang, LONG GuangCheng & SONG Hao

School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Dynamic mechanical properties of CRTS II type cement and asphalt mortar (CA mortar) for high-speed railway was studied by split Hopkinson pressure bar (SHPB), and the corresponding dynamic constitutive model was established in present paper. The experimental results show that the peak strength of CA mortar increases gradually with the increasing of strain-rate. However, the increasing rate of peak strength of CA mortar decreases with the further increasing of strain-rate. The increasing rate of peak strength is 52.28% for the strain-rate ranging from 44.17 s^{-1} to 54.79 s^{-1} and 7.5% for the strain-rate from 54.79 s^{-1} up to 108.47 s^{-1} , respectively. The dynamic Young's modulus of CA mortar increases by 3~25 times of initial value in this investigated strain-rate. The larger the strain rate is, the more serious the cracking is when CA mortar specimen damaged. The specific energy absorption of CA mortar increases with the increase of strain rate. The fitting curves of the established dynamic constitutive model agree well the experimental curves.

CA mortar, strain-rate, peak strength, young's modulus, specific energy absorption, dynamic constitutive model

doi: 10.1360/N092014-00083