

加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究

许金余^{1, 2}, 刘石¹

(1. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 利用 $\phi 100$ mm 分离式 Hopkinson 压杆装置, 对经历不同高温后的大理岩进行不同加载速率下的冲击压缩试验, 研究了峰值应力、峰值应变、弹性模量等与加载速率的关系。试验结果表明, 高温后大理岩的峰值应力、峰值应变均表现出显著的加载速率强化效应, 随加载速率的提高而近似线性增加, 但 800℃ 之后, 峰值应力的加载速率强化效应明显减弱, 而峰值应变的加载速率强化效应明显加强; 高温后大理岩弹性模量的加载速率相关性并不明显, 随着温度的升高, 弹性模量逐渐减小, 到 1000℃ 高温时, 随着加载速率的增加, 弹性模量基本保持不变。结合岩石材料的微观结构特征、能量吸收以及受力状态等对岩石动态力学性能的加载速率强化效应机理进行了探讨。

关键词: 岩石力学; 高温; 冲击压缩; 加载速率; 动态力学性能

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)05 - 0879 - 05

作者简介: 许金余(1963 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程和防护工程方面的研究。E-mail: ls_stone@126.com。

Effect of impact velocity on dynamic mechanical behaviors of marble after high temperatures

XU Jin-yu^{1, 2}, LIU Shi¹

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The tests on marble after different temperatures under dynamic loading at different impact velocities are carried out by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus 100 mm in diameter. The influences of impact velocity on the peak stress, peak strain and elastic modulus are studied. The test results show that the peak stress and peak strain after the same temperature increase linearly with the increasing impact velocity. When the temperature is above 800℃, the peak stress increases slightly and the peak strain increases obviously with the increase of impact velocity. However, the elastic modulus has no obvious impact velocity effect. The elastic modulus gradually declines with the increase of temperature. When the temperature reaches 1000℃, the elastic modulus nearly does not change with the variation of impact velocity. Considering the microstructure characteristics and the energy absorbency of marble, the effect of impact velocity on the dynamic mechanical characteristics is analyzed.

Key words: rock mechanics; high temperature; impact compression; impact velocity; dynamic mechanical behaviors

0 引 言

在民用领域中, 地下岩体工程多处于复杂多变的温度环境之中, 根据量测, 地层的温度随着深度增加而升高, 一般温度梯度为 $\alpha = 3^\circ\text{C}/100\text{ m}^{[1]}$, 有些地区如断层附近或导热率高的异常局部地区, 地温梯度有时高达 $20^\circ\text{C}/100\text{ m}$, 岩体在超出常规温度环境下表现出的力学、变形性质与普通环境条件下具有很大差别^[2]。同时, 在国防领域中, 地下工程作为国家安全的重要物质基础, 为了提高其生存能力, 世界各国都把地下工程建在岩体深部, 但其在人为开挖及建设的过程中, 不可避免地要经受高温及动力扰动的作用。因此, 综

上所述, 探索高温作用后岩石材料的动力学特性是十分必要的, 且对于工程应用有重要参考价值。

许锡昌^[3]以弹性模量为研究对象, 提出了热损伤的概念, 给出了热损伤本构方程的一般表达式, 并在 Lemaitre 损伤模型的基础上, 推导了一维 TM 耦合脆性损伤本构方程和损伤能量释放率的表达式, 定性讨论了荷载和温度影响下损伤面时的演化规律。谌伦建等^[4]研究了煤层顶板砂岩在高温作用下的力学特

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078350)

收稿日期: 2012 - 05 - 14

性及砂岩中有机物在高温下的分解和析出对裂隙形成与发展具有的影响。左建平^[5]通过岛津 SEM 全数字液压高温疲劳试验系统, 实时观察不同温度下北山花岗岩的热开裂过程, 获得北山花岗岩的热开裂临界温度为 68℃~88℃, 在较低温度时, 北山花岗岩热开裂以沿颗粒热开裂为主; 在较高温度时, 热开裂以穿颗粒热开裂及沿颗粒穿颗粒混合热开裂为主。秦本东等^[6]利用自行研制的高温岩石膨胀特性试验装置, 对石灰岩和砂岩试件 300℃~700℃ 高温过程中的膨胀特性进行试验研究。试验结果表明, 升温过程中, 石灰岩和砂岩的膨胀应力随温度的增加而增大, 且砂岩膨胀速率比石灰岩大, 刚到 700℃ 时砂岩膨胀应力是石灰岩的 2.45 倍。倪晓慧等^[7]通过单轴压缩试验和细观损伤特征量化试验, 对经历 20℃, 100℃, 300℃, 450℃, 600℃ 五种温度循环后的四川锦屏大理岩试样的宏观力学性质及相应的细观损伤特征进行了研究。李建林等^[8]通过三轴卸荷试验, 综合考虑回弹值和纵波波速与温度的关系, 对高温后砂岩的纵波波速和力学特性与温度的变化规律进行研究。

目前, 国内外相关学者大多从静力学角度出发对岩石的高温力学性能展开研究, 而对于不同高温作用后岩石动态力学特性的研究还较少见到报道。本文利用 $\phi 100$ mm 分离式 Hopkinson 压杆装置, 对经历不同高温作用后 (25℃~1000℃) 的大理岩进行冲击压缩试验, 研究了峰值应力、峰值应变及弹性模量与加载速率的关系。

1 高温后大理岩的 SHPB 试验

1.1 试验材料

试验用的大理岩取自陕西秦岭山区, 呈灰白色, 经国土资源部西安矿产资源监督检测中心检验鉴定, 主要成分为 90% 的白云石、3% 的方解石、3% 滑石和闪石、3% 的白云母、1% 的石英等。岩石试件采用 ZS-100 型立式取芯机、DQ-1 型岩石切割机和 SHM-200 型双端面磨石机进行钻取、切割、打磨。试件两端面进行研磨抛光, 以保证其平整度和光洁度。

1.2 试验设备及基本原理

$\phi 100$ mm SHPB 试验装置 (如图 1 所示), 主要由主体设备、能源系统、测试系统三大部分组成。主体设备包括发射装置、发射炮管、射弹、吸能装置、杆件及其调整支架、操纵台等; 能源系统包括空气压缩机、高压容器及管道; 测试系统包括弹速测试系统及动态应变测试系统。压杆材料为高强度合金, 直径为 100 mm, 入射杆长 4500 mm, 透射杆长 2500 mm, 打击杆长 500 mm, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.25~0.3, 密度为 7850 kg/m³。利用空气加压给打击

杆加速并使用灯距为 100 mm 激光测速仪测量打击杆撞击的速度。

SHPB 试验的基本原理是基于弹性杆中弹性应力波的传播理论, 它建立在两个基本假定的基础上, 即一维假定和应力均匀假定。一维假定认为应力波在弹性杆中传播时, 弹性杆中的每个横截面始终保持平面状态; 应力均匀假定认为应力波在试件中反复 2~3 个来回, 试件中的应力处处相等^[9]。根据应力均匀假定, 采用三波法^[10], 得到材料的动态应力应变关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= \frac{c}{l_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t), \\ \varepsilon(t) &= \frac{c}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt, \\ \sigma(t) &= \frac{A}{2A_s} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 E , C , A 分别为压杆的弹性模量、弹性波波速和横截面积; A_s , l_s 分别为试件的初始横截面积和初始长度; ε_i , ε_r , ε_t 分别为杆中的入射、反射、透射应变。

试验所采用的加热设备为 RX3-20-12 箱式电阻炉 (见图 2), 该设备可以自动控温、升温, 采用硅炭棒元件加热, 高性能纤维保温, 最高工作温度可达 1200℃, 能够保证试件从 25℃~1000℃ 温度范围内加温的稳定性、均匀性。



图 1 $\phi 100$ mm SHPB 设备

Fig. 1 Apparatus of SHPB 100 mm in diameter



图 2 RX3-20-12 箱式电阻炉

Fig. 2 RX3-20-12 box-type resistance furnace

1.3 试验技术

本文采用波形整形技术^[11-13], 可以延长入射脉冲的上升段, 让试件有足够的时间达到应力均匀; 还可以平滑波形, 消除应力波的高频振荡。波形整形器材料为厚度1 mm的T2圆形紫铜片, 直径分别为30, 33, 35, 40, 45 mm。该技术对入射波形有明显的改善效果, 可以将其上升段的升时延长1~2倍, 且呈现近似三角脉冲, 从而可以有效地消除应变率历程不稳定的影响, 满足近似恒应变率加载的需要, 较好地解决了恒应变率加载问题。试验中所采集的原始波形见图3。

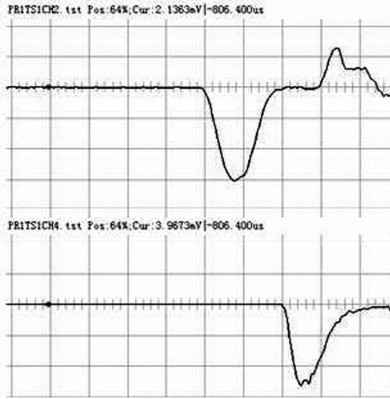


图 3 试验所采集到的原始波形

Fig. 3 Original waveforms from pulse shaped experiments

1.4 基本力学性能

根据国际岩石力学学会 (ISRM) 标准和中华人民共和国家标准 (GB/T 50266—99) 《工程岩体试验方法标准》, 采用液压伺服压力试验机对大理岩进行静态力学试验, 试验内容包括饱和和干燥两种状态下岩石的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度以及软化系数的测定。通过试件直径的两端, 沿轴线方向划两条相互平行的加载基线, 将两根垫条沿加载基线固定在试件两端。试验结果如表1所示。

表 1 岩石的基本力学参数

Table 1 Static mechanical properties of marble

岩石	密度 (kg·m ⁻³)	纵波波速均值 (m·s ⁻¹)	饱水单轴 抗压强度 /MPa	干燥单轴 抗压强度 /MPa	劈裂 抗拉强度 /MPa	软化 系数
大理岩	2600	5156	46.37	60.22	6.62	0.77

2 试验结果及分析

试验温度设置为25℃, 100℃, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃和1000℃共7个温度等级, 子弹冲击加载速率设计值分别为11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0 m/s。为了保证对试件加温均匀, 以10℃/min的速度升温, 达到预定温度后保持恒温3 h, 然后在炉膛中自然冷却至室温, 制成经历不同高温后的大理岩试件。

2.1 峰值应力与加载速率的关系

图4是不同高温作用后大理岩的峰值应力与加载

速率的关系曲线。将峰值应力与加载速率的关系进行拟合 (函数形式为 $\sigma_p = A + Bv$), 得到线性关系表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= -145.06 + 28.96v \quad (R = 0.991, T = 25^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= -62.38 + 22.58v \quad (R = 0.975, T = 100^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= 46.14 + 15.00v \quad (R = 0.969, T = 200^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= -48.55 + 20.49v \quad (R = 0.991, T = 400^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= -24.42 + 20.30v \quad (R = 0.992, T = 600^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= 131.65 + 5.13v \quad (R = 0.888, T = 800^\circ\text{C}), \\ \sigma_p &= 28.43 + 1.49v \quad (R = 0.997, T = 1000^\circ\text{C}). \end{aligned} \right\} (2)$$

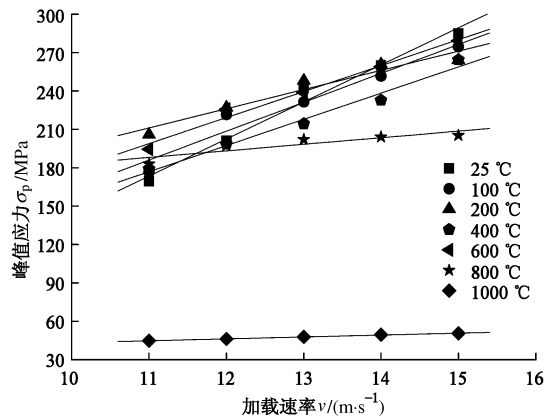


图 4 高温后大理岩的峰值应力与加载速率的关系

Fig. 4 Relationship between σ_p and v

可以看出, 高温后大理岩的峰值应力表现出显著的加载速率强化效应, 随加载速率的提高而近似线性增加。拟合公式中, 系数 B 表示峰值应力随加载速率的增加率, B 值越大, 说明加载速率强化效应越明显。随着温度的逐渐升高, 峰值应力随加载速率增加的速度逐渐减慢, 也就是增加的幅度越来越小, 到1000℃时, 增加率为1.49, 仅是25℃时的5.1%, 说明高温后的大理岩内部损伤已较为严重, 承载能力已基本丧失, 峰值应力的加载速率强化效应已不明显。

2.2 峰值应变与加载速率的关系

图5是不同高温作用后大理岩的峰值应变与加载速率的关系曲线。将峰值应变与加载速率的关系进行拟合 (函数形式为 $\epsilon_p = A + Bv$), 得到线性关系表达式为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_p &= -2.711 + 1.103v \quad (R = 0.953, T = 25^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= 5.204 + 0.468v \quad (R = 0.947, T = 100^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= -3.574 + 1.210v \quad (R = 0.976, T = 200^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= 6.211 + 0.531v \quad (R = 0.965, T = 400^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= 8.000 + 0.552v \quad (R = 0.630, T = 600^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= 14.997 + 0.947v \quad (R = 0.765, T = 800^\circ\text{C}), \\ \epsilon_p &= -29.840 + 5.202v \quad (R = 0.928, T = 1000^\circ\text{C}). \end{aligned} \right\} (3)$$

可以看出, 高温后大理岩的峰值应变也表现出显著的加载速率强化效应, 随加载速率的提高而近似线性增加。但与峰值应力的加载速率强化效应不同的是: 随着温度的逐渐升高, 峰值应变随加载速率增加的速度先减小后增大, 到 1000℃ 时, 增加率为 5.202, 是 25℃ 时的 4.7 倍。

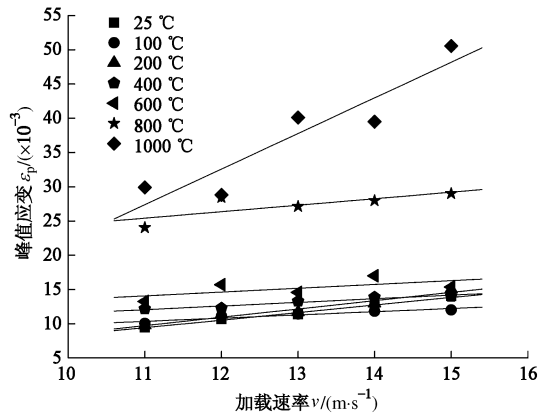


图 5 高温后大理岩的峰值应变与加载速率的关系

Fig. 5 Relationship between ε_p and v

2.3 弹性模量与加载速率的关系

本文采用弹性模量 E_c , 即应力 - 应变曲线上上升段上对应压缩强度为 40% 和 60% 的两点连线的斜率, 计算公式为

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4)$$

式中 下标 1 和 2 分别表示曲线上对应 $0.4\sigma_0$ 和 $0.6\sigma_0$ 的两点; σ 表示轴向应力; ε 为轴向应变。图 6 是高温后大理岩的弹性模量随加载速率变化的关系曲线。

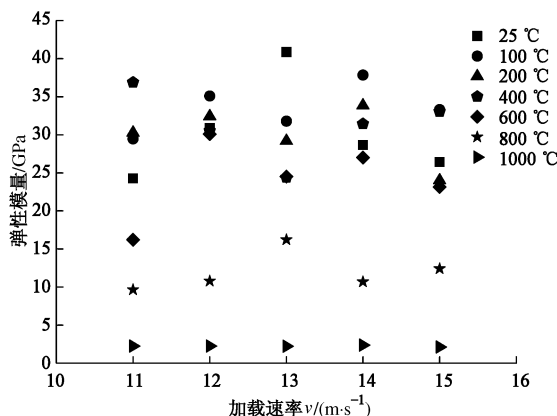


图 6 高温后大理岩的弹性模量与加载速率的关系

Fig. 6 Relationship between E_c and v

从图 6 中可以看到: 高温后大理岩弹性模量的加载速率相关性并不明显, 离散性较大, 25℃ 时, 弹性模量基本稳定在 25~40 GPa, 随着温度的升高, 弹性模量逐渐减小, 到 1000℃ 高温时, 弹性模量已经很低了, 在 15.0 m/s 的加载速率下, 仅为 2.12 GPa, 与 25℃

相比, 减小了 92%, 此时, 随着加载速率的增加, 弹性模量基本保持不变。

3 加载速率强化效应分析

从材料的微观结构特征、能量吸收以及受力状态等角度对岩石动态力学性能的加载速率强化效应机理进行分析: 一方面, 从材料的微观结构特征和能量吸收的角度分析, 文献[14]认为, 材料的破坏是由于裂纹的产生和扩展导致的, 加载速率越大, 产生的裂纹数目就越多, 因而需要的能量就越多; 又因为冲击荷载作用的时间极短, 材料没有足够的时间用于能量的累积, 根据冲量定理或功能原理, 它只有通过增加应力的办法来抵消外部冲量或能量, 因此, 材料的强度随加载速率的增加而增加。另一方面, 从试件的受力状态角度分析, 根据文献[15]对岩石类材料加载速率强化的分析, 加载速率强化效应可以看作材料由一维应力状态向一维应变状态转换过程中的力学响应, 当试件尺寸较大时, 试件内相当部位的受力状态已不能准确地说是一维应力了, 由于惯性作用, 试件侧向的应变受到限制, 并且加载速率越高, 这个限制作用就越大, 材料近似处于围压状态, 从而其强度随加载速率的增加而增加。

4 结论

(1) 高温后大理岩的峰值应力、峰值应变均表现出显著的加载速率强化效应。但 800℃ 之后, 峰值应力的加载速率强化效应明显减弱, 而峰值应变的加载速率强化效应明显加强。

(2) 高温后大理岩弹性模量的加载速率相关性并不明显, 25℃ 时, 弹性模量稳定在 25~40 GPa, 随着温度的升高, 弹性模量逐渐减小, 到 1000℃ 高温时, 15.0 m/s 的加载速率下, 仅为 2.12 GPa, 比室温时减小了 92%, 此时, 随着加载速率的增加, 弹性模量已基本不变。

(3) 从材料的微观结构特征、能量吸收以及受力状态等角度进行分析, 可以较好地解释岩石材料动态力学特性的加载速率强化效应。

参考文献:

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学研究进展[C]// 中国岩石力学与工程学会. 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文

- 集. 北京: 科学出版社, 2006: 49 - 62. (HE Man-chao, QIAN Qi-hu. Review of basic research on rock mechanics at great depth[C]// Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 9th Symposium on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 49 - 62. (in Chinese))
- [3] 许锡昌. 花岗岩热损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊2): 188 - 191. (XU Xi-chang. Study on the characteristics of thermal damage for granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 188 - 191. (in Chinese))
- [4] 谌伦建, 吴忠, 秦本东, 等. 煤层顶板砂岩在高温下的力学特性及破坏机理[J]. 重庆大学学报, 2005, **28**(5): 123 - 126. (CHEN Lun-jian, WU Zhong, QIN Ben-dong, et al. Mechanical characteristics and cracking mechanism of coal roof sandstone under high temperature[J]. Journal of Chongqing University, 2005, **28**(5): 123 - 126. (in Chinese))
- [5] 左建平, 周宏伟, 方园, 等. 甘肃北山地区深部花岗岩的热开裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1107 - 1115. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, FANG Yuan, et al. Experimental research on thermal cracking of deep granite in Beishan Region, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(6): 1107 - 1115. (in Chinese))
- [6] 秦本东, 罗运军, 门玉明, 等. 高温下石灰岩和砂岩膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 417 - 422. (QIN Ben-dong, LUO Yun-jun, MEN Yu-ming, et al. Experimental research on swelling properties of limestone and sandstone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 417 - 422. (in Chinese))
- [7] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同温度循环作用后大理岩微观损伤特征的定量研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(2): 248 - 254. (NI Xiao-hui, LI Xiao-jun, ZHU Zhen-de. Quantitative test on meso-damage characteristics of marble after different temperatures[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(2): 248 - 254. (in Chinese))
- [8] 李建林, 陈星, 党莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1587 - 1595. (LI Jian-lin, CHEN Xing, DANG Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(8): 1587 - 1595. (in Chinese))
- [9] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal American Ceramic Society, 1994, **77**(1): 263 - 267.
- [10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52 - 60. (WANG Li-li. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 52 - 60. (in Chinese))
- [11] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002, **42**(1): 93 - 106.
- [12] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3225 - 3229. (XU Jin-yu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(11): 3225 - 3229. (in Chinese))
- [13] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(9): 1864 - 1871. (LIU Shi, XU Jin-yu, LIU Jun-zhong, et al. SHPB test on sericite-quartz schist and sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(9): 1864 - 1871. (in Chinese))
- [14] 王道荣, 胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响[J]. 实验力学, 2002, **17**(1): 23 - 27. (WANG Dao-rong, HU Shi-sheng. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, **17**(1): 23 - 27. (in Chinese))
- [15] JANACH W. The rule of bulking in brittle failure under rapid compression[J]. International Journal of Rock Mechanical and Mining Science, 1976, **13**(6): 177 - 186.