

# SHPB 试验中花岗岩破坏程度与能量耗散关系分析

于水生<sup>1</sup>, 卢玉斌<sup>2</sup>, 朱万成<sup>1</sup>, 蔡勇<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 为了研究花岗岩的应变率效应及其能量耗散与破坏程度之间的关系, 利用分离式 Hopkinson 压杆装置 (SHPB) 对直径为 74 mm 的花岗岩试样进行了不同应变率下的单轴冲击压缩试验. 试验结果表明, 花岗岩动态压缩强度具有很明显的应变率效应; 随着应变率的增大, 单位体积耗散能增加, 且近似呈线性关系, 同时应变率也随着能量耗散率的增加而增大, 但它们之间表现为非线性关系; 花岗岩试样破坏程度与单位体积耗散能存在很好的一致关系, 基本一一对应, 而与应变率之间并不存在一一对应关系. 且试样破坏程度和应变率之间并不存在一一对应关系, 与强度随着应变率的增大而增大并不矛盾.

**关键词:** 岩石力学; SHPB 试验; 应变率效应; 能量耗散; 破坏程度

中图分类号: O 347 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)12-1733-05

## Analysis on Relationship Between Degree of Damage and Energy Dissipation of Granite in SHPB Tests

YU Shui-sheng<sup>1</sup>, LU Yu-bin<sup>2</sup>, ZHU Wan-cheng<sup>1</sup>, CAI Yong<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China. Corresponding author: LU Yu-bin, E-mail: yubinluzju@hotmail.com)

**Abstract:** A series of uniaxial compression tests under different strain rates on granite samples ( $\phi 74$  mm) were carried out using split Hopkinson pressure bars (SHPB), to study the strain-rate effect and the relationship between the degree of damage and energy dissipation of granite. The test results show that the dynamic compression strength of granite has obvious strain rate effect. The energy dissipation per unit volume increases with the increase of strain rate, showing an approximate linear relationship. At the same time, the strain rate also increases with the increase of energy dissipation rate, showing nonlinear relationship. The degree of damage of granite samples has good consistency with the energy dissipation per unit volume, generally with one to one correspondence, but does not have one to one correspondence with the strain rate. There is no contradiction between the degree of damage of granite samples having inconsistency with the strain rate and strength enhancement with the strain rate.

**Key words:** rock mechanics; SHPB (split Hopkinson pressure bars) test; strain rate effect; energy dissipation; degree of damage

岩石是自然界中各种矿物的集合体, 是天然地质作用的产物, 受地质构造的影响, 内部存在着微裂隙、粒间空隙等微结构面, 导致其物理力学特性通常表现为各向异性和非线性<sup>[1]</sup>. 而能量是物理反应的本质特征, 是物质发生破坏的内在因素,

贯穿于岩石变性破坏的整个过程中<sup>[2]</sup>. 迄今为止, 已有不少研究者从能量的观点出发研究岩石的变形破坏过程, 取得了大量有价值的成果. Li 等<sup>[3]</sup>利用 SHPB (split Hopkinson pressure bars) 技术分析了在高应变率下试样尺寸效应对红砂岩能

量耗散的影响,结果表明随着试样长径比的增大,能量耗散率降低. Hong 等<sup>[4]</sup>利用大直径 SHPB 装置分别对花岗岩、砂岩和石灰岩进行了不同应变率下的冲击试验,分析了岩石冲击过程中能量耗散特性. Liu 等<sup>[5]</sup>对煤岩进行了准静态和动态压缩试验,分析了煤岩的破坏模式、断裂强度和能量耗散. 纵观以上研究及其他研究者<sup>[6-8]</sup>对岩石类材料能量耗散的研究,可知其基本观点为:随着应变率的增加,岩石类材料的破坏程度逐渐严重. 岩石类材料破坏程度与应变率之间是一一对应关系吗? 破坏程度与能量耗散之间关系如何? 针对以上问题,本文利用 $\phi 75$  mm 的 SHPB 装置对花岗岩进行动态压缩试验,从能量耗散角度出发,研究在冲击作用下能量耗散分别与应变率和破坏程度之间的关系,主要探讨能量耗散与破坏程度之间的关系,从能量的角度描述岩石类材料的变形破坏程度特性,为实际工程中岩石类材料破碎过程中合理分配能量提供参考.

## 1 SHPB 试验中能量特性

在使用 SHPB 装置对花岗岩进行试验时,从开始加载到卸载过程中入射波、反射波和透射波所携带的能量可通过式(1)~式(3)求得:

$$W_I(t) = EAc \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt, \quad (1)$$

$$W_R(t) = EAc \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt, \quad (2)$$

$$W_T(t) = EAc \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt. \quad (3)$$

式中: $E, A, c$  分别为压杆材料弹性模量、横截面积、纵波波速; $\varepsilon_I, \varepsilon_R$  和  $\varepsilon_T$  分别为压杆上入射波、反射波和透射波的应变; $W_I(t), W_R(t)$  和  $W_T(t)$  分别为入射能量、反射能量和透射能量.

根据能量守恒原理,计算 SHPB 试验过程中试件总耗散能  $W_S(t)$ :

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t). \quad (4)$$

这部分在试件中耗散的能量主要用于岩石新断裂面的形成、裂纹的扩展以及微裂纹的增长,碎块动能  $W_K$  和其他耗散能,如热能、辐射能等,试验中热能基本可以忽略.

由于试件加工中存在误差,其尺寸也不尽相同,为比较耗散能相对大小,将总耗散能转化为单位体积耗散能  $W$ ,即试件总耗散能  $W_S$  与体积  $V_S$  的比值:

$$W = \frac{W_S}{V_S}. \quad (5)$$

SHPB 动态冲击下岩石试件能量耗散的强弱可以利用能量耗散率  $\eta$  来进行表征, $\eta$  为耗散能与入射能的比值,即

$$\eta = \frac{W_S}{W_I}. \quad (6)$$

## 2 花岗岩 SHPB 试验

试验材料来自于山东莱州某矿场,花岗岩的矿物成分分析表明,其主要成分为钠长石、钾长石、石英和沸石,密度为  $2\,597 \text{ kg/m}^3$ . 洪亮<sup>[9]</sup>的研究结果表明,岩石的破碎吸能不受试样尺寸的影响,试验在直径 75 mm 的 SHPB 装置(如图 1 所示)上进行,因此将花岗岩制成  $\phi 74 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$  的圆柱形试样. 试样两端在研磨机上研磨,以保证其平行度和平整度.

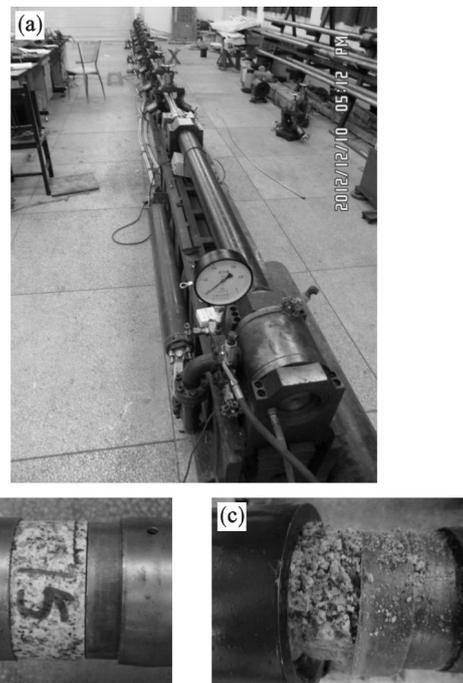


图 1 直径 75 mm SHPB 装置  
Fig. 1 The 75 mm diameter SHPB apparatus  
(a)一装置全图; (b)一冲击前; (c)一冲击后.

为了保证在试样中尽可能早地达到应力均匀、消除波幅振荡并修正入射脉冲的形状,使试样能以近似恒应变率变形,通过多组试验,最后得出以直径为 35 mm,厚度为 1 mm 的软橡胶(自行车内胎)作为脉冲整形器. SHPB 装置的子弹和压杆材料为高强度马氏体钢,直径均为 75 mm,子弹、入射杆和透射杆长度分别为 400, 6 000 和 3 500 mm. 试验时,在试样两端、入射杆和透射杆端面涂抹润滑剂以减少压杆与试样接触面间的摩擦效应,因此两者之间由摩擦力所消耗的能量可

以忽略不计.

### 3 试验结果与分析

动态压缩试验中通过调节 SHPB 装置中气阀的压力值,改变子弹的发射速度,控制试验冲击速率从而改变应变率大小. Cai 等<sup>[10]</sup>对花岗岩的研究结果表明,在应变率低于某一值时,横向惯性效应对试验结果影响较小. 试验所得应变率小于  $200 \text{ s}^{-1}$  ( $240.6, 280.05 \text{ s}^{-1}$  除外),因此,横向运动消耗的能量可忽略不计. 试验中入射波、反射波和透射波典型电压-时程曲线如图 2 所示.

根据 Zhang 等<sup>[6]</sup>关于岩石试样 SHPB 试验中的碎片动能研究结果可知:

$$\frac{W_k}{W_s} = \frac{0.69v + 0.22}{100} \quad (7)$$

式中  $v$  为子弹速度. 计算得到  $\frac{W_k}{W_s}$  值大部分在 10% 以内,说明试样的动能在耗散能中所占比例较小,绝大部分能量用于岩石试件的断裂破坏.

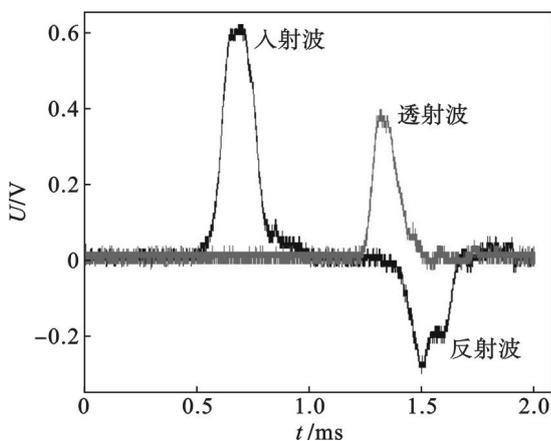


图 2 SHPB 试验中入射波、反射波和透射波的典型电压-时程曲线

Fig. 2 Typical voltage-time curves of incident, reflected and transmitted waves in SHPB test

图 3 为花岗岩在 SHPB 试验中的入射能、透射能和反射能的时程曲线. 从曲线中可以看出,随着时间的增加,入射能、透射能和反射能也相应地增加,达到某一值而趋于稳定. 入射波所携带的能量要大于反射波和透射波所携带的能量之和,这个差值就是冲击过程中花岗岩吸收的能量,并且透射波携带能量大于反射波携带能量,这说明有部分能量透过试件传递到了透射杆中.

#### 3.1 能量耗散与应变率的关系

图 4 为花岗岩试样单位体积耗散能与应变率的关系. 从图中可以看出,随着应变率的增大,单

位体积耗散能也相应地增大. 它们之间呈现为线性关系,可以用式(8)表示(拟合直线与数据吻合度  $R$  为 0.848):

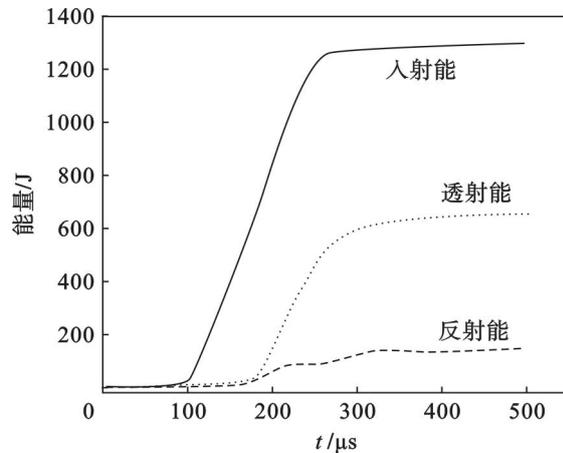


图 3 SHPB 试验中入射能、反射能和透射能的时程曲线  
Fig. 3 Time-history curves of incident, reflected and transmitted energy in SHPB test

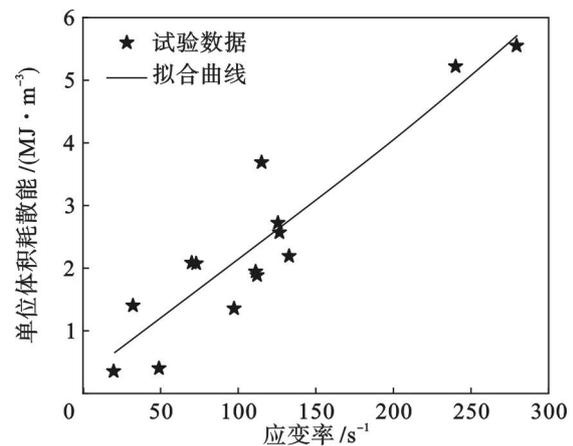


图 4 单位体积耗散能与应变率的关系

Fig. 4 The relationship between energy dissipation per unit volume and strain rate

$$W = 174.49\varepsilon + 19.52 \quad (8)$$

能量耗散率与应变率的关系如图 5 所示,可知应变率基本上随着能量耗散率的增加而增大. 它们之间表现为非线性关系,可以用式(9)表示(拟合曲线与数据吻合度  $R^2$  为 0.729):

$$\varepsilon = 12\,000\eta^3 - 8\,710\eta^2 + 2\,262.6\eta - 139.2 \quad (9)$$

#### 3.2 能量耗散与破坏程度的关系

图 6 为花岗岩破坏程度与单位体积耗散能及应变率的关系. 由图可见,花岗岩破坏程度基本随着单位体积耗散能的增大而增大,但并不随着应变率的增大而增大. 1-4 号试样的应变率为  $32.38 \text{ s}^{-1}$ , 小于 0-9, 0-3 号试样的应变率(分别为  $48.02 \text{ s}^{-1}, 97.05 \text{ s}^{-1}$ ), 其单位体积耗散能和破坏程度要大于 0-9, 0-3 号试样; 0-6 号试样的

应变率为  $68.46 \text{ s}^{-1}$  小于 0-5, 0-2 的 (应变率分别为  $100.06 \text{ s}^{-1}$ ,  $70.99 \text{ s}^{-1}$ ), 其单位体积耗散能和破坏程度要大于 0-5, 0-2 号试样; 1-3 号试样的应变率为  $116.09 \text{ s}^{-1}$  小于 2-3, 2-1 号的 (应变率分别为  $126.69 \text{ s}^{-1}$ ,  $124.4 \text{ s}^{-1}$ ), 同样其单位体积耗散能和破坏程度要大于 2-3, 2-1 号试样. 从图中可以看出, 花岗岩试样破坏程度与单位体积耗散能存在很好的一致关系, 当试样破坏成块体时, 单位体积耗散能较少, 当为留芯破碎时, 耗散能相应地增多, 特别是破坏程度为粗颗粒粉碎和完全粉末粉碎时, 单位体积耗散能将大幅增加. 这主要由于试样受到压杆系统撞击后, 试样获得的能量将以材料内部微裂纹生成和发展的形式释放, 因而微裂纹生成的数量和发展都与单位体积耗散能有关. 在单位体积耗散能很大时, 大量微裂纹的生成直接导致材料的粉碎性破坏; 单位体积耗散能很低时, 微裂纹的数量相对减少, 破坏颗

粒较大. 但试样破坏程度与应变率之间并不存在一一对应关系, 在低应变率下, 也会呈现粉碎性破坏, 而在高应变率下, 破裂成块体.

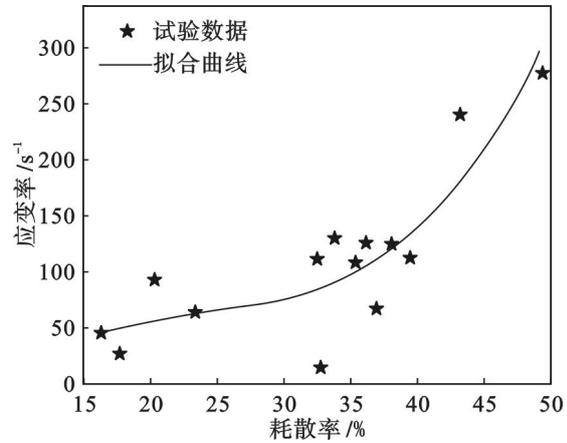


图 5 应变率与能量耗散率的关系  
Fig. 5 The relationship between strain rate and energy dissipation rate

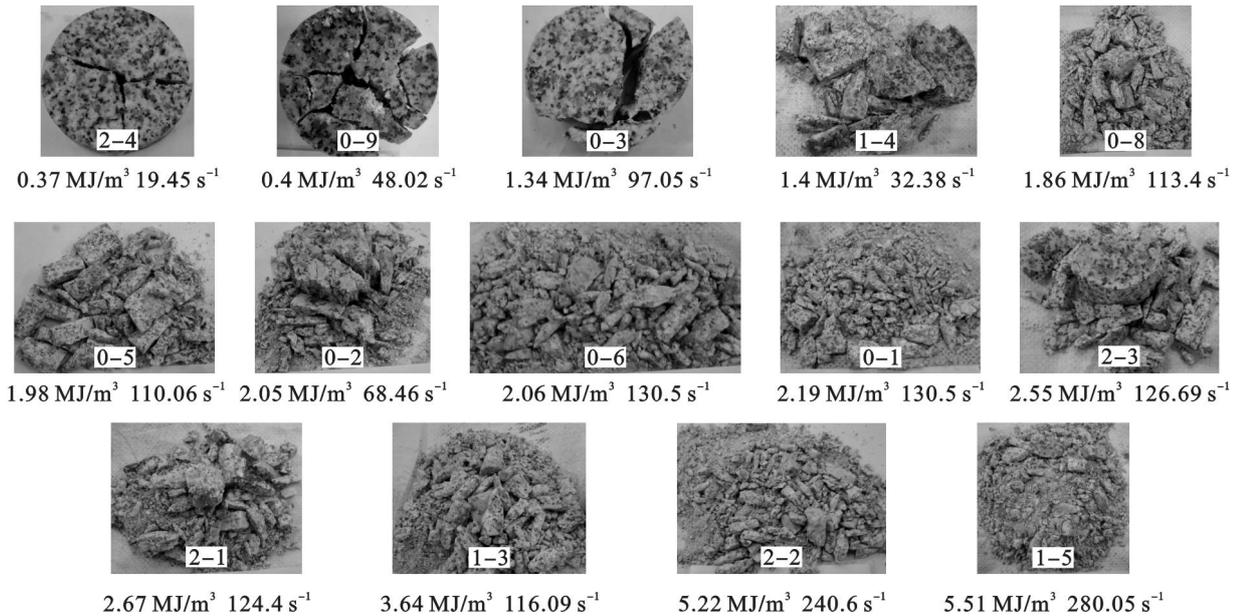


图 6 花岗岩破坏程度与单位体积耗散能和应变率关系

Fig. 6 The relationship between degree of damage and energy dissipation per unit volume or strain rate

图 7 为 1-4, 0-8, 0-5, 0-1 和 1-3 号花岗岩试样的应力应变曲线, 试样的应力应变曲线所包围的面积依次增加, 其单位耗散能也依次增加, 而从图 6 中可知, 试样破坏程度也相应地增大, 但是应变率却不依次增大. 由于能量是应力-应变曲线的积分, 与破坏时的应变和峰值后的应力-应变变化趋势等有关, 可知曲线所包围的面积随着单位耗散能的增加而增加, 从应力应变关系角度上分析了试件能量耗散. 而强度只是代表峰值应力, 与峰值后的应力-应变变化趋势等无

关, 因此, 试样破坏程度与应变率之间并不存在一一对应关系, 与强度随着应变率的增大而增大并不矛盾.

有研究者利用分形维数对岩石的破坏程度进行定量表征, 按质量-频率关系度量可以得到岩石冲击破碎度的分布方程, 进而求得块度的分形维数, 分形维数越大, 碎块越多且尺寸越小, 破碎程度越严重<sup>[11]</sup>. 由于试验方案考虑不周, 本文没有利用分形维数对花岗岩破坏程度进行定量表征.

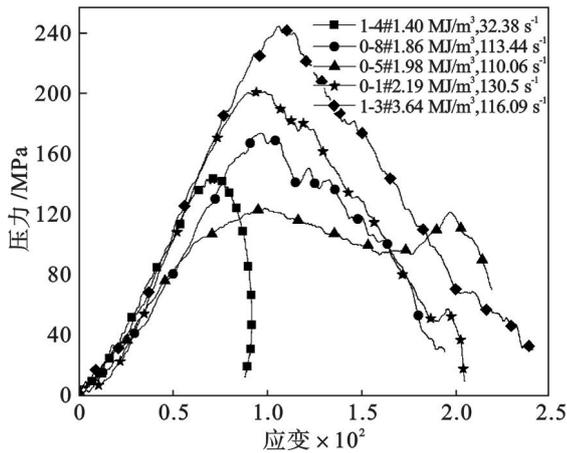


图 7 花岗岩试样应力 - 应变关系

Fig. 7 Stress-strain relationship of granite samples

## 4 结 论

1) 随着应变率的增大,单位体积耗散能相应地增大,它们之间表现为线性关系;同时应变率也随着能量耗散率的增大而增大,但它们之间表现为非线性关系。

2) 花岗岩试样破坏程度与单位体积耗散能存在很好的一致关系,基本一一对应。当试样破坏成块体时,单位体积耗散能相应较少,当为留芯破碎时,耗能相应地增多,特别是破坏程度为粗颗粒粉碎和完全粉末粉碎时,单位体积耗散能将大幅增加。但试样破坏程度与应变率之间并不存在一一对应关系,在低应变率下也会呈现粉碎性破坏,而在高应变率下破裂成块体。

3) 从应力应变关系角度分析了试件能量耗散。试样破坏程度和应变率之间并不存在对应关系,与强度随着应变率的增大而增大并不矛盾。

### 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,2002:63 - 71.  
(Cai Mei-feng, He Man-chao, Liu Dong-yan. Rock mechanics and engineering [ M ]. Beijing: Science Press, 2002 :63 - 71. )
- [ 2 ] 张忠虎,谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(2):26 - 31.  
(Zhang Zhong-hu, Xie He-ping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [ J ]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2008, 40 (2):26 - 31. )
- [ 3 ] Li M, Mao X B, Lu A H, et al. Effect of specimen size on energy dissipation characteristics of red sandstone under high strain rate [ J ]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24 :151 - 156.
- [ 4 ] Hong L, Zhou Z L, Yin T B, et al. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate [ J ]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16 (4) :677 - 682.
- [ 5 ] Liu X H, Dai F, Zhang R, et al. Static and dynamic uniaxial compression tests on coal rock considering the bedding directivity [ J ]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 (10) : 5933 - 5949.
- [ 6 ] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37 (5) : 745 - 762.
- [ 7 ] Nagahama H. Fractal scalings of rock fragmentation [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (1) :169 - 177.
- [ 8 ] Tsouthrelis C E, Exadaktylos G E. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression [ J ]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1993, 11 (2) :81 - 105.
- [ 9 ] 洪亮. 冲击载荷下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究 [ D ]. 长沙:中南大学,2008.  
(Hong Liang. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads [ D ]. Changsha: Central South University, 2008. )
- [ 10 ] Cai Y, Yu S S, Lu Y B. Experimental study on granite and the determination of its true strain-rate effect [ J ]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015, 12 (4) : 675 - 694.
- [ 11 ] 单晓云,李占金. 分形理论和岩石破碎的分形特征 [ J ]. 河北理工学院学报,2003,25(2):11 - 17.  
(Shan Xiao-yun, Li Zhan-jin. Fractal theory, characteristics and its application on rock fragmentation [ J ]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2003, 25 (2) :11 - 17. )