

文章编号: 1000-7598-(2007) 09-1833-08

高应变率条件下三峡工程花岗岩 动力特性的试验研究

李 刚^{1,2}, 陈正汉¹, 谢 云^{1,2}, 祝文化³

(1.后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 400041; 2.空军第五空防工程处, 南京 211100; 3. 武汉理工大学 土木工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 采取多种措施改进了分离式 Hopkinson 压杆试验技术, 用改进的设备对三峡坝址处的花岗岩进行了大量的动态单轴压缩试验和劈裂试验, 发现该岩石具有明显的应变率效应, 其动态压缩破坏呈 3 种形态: 边缘崩落、留心破坏、完全破坏; 探讨了相应的破坏机制; 分析了应变率对动态弹性模量和动态抗压强度的影响; 以 Hoek-Brown 破坏准则为基础建立了相应的动态破坏准则。

关 键 词: 岩石动力特性; 分离式 Hopkinson 压杆; 高应变率; 动态压缩试验; 动态劈裂试验; 动态破坏准则

中图分类号: TU 459

文献标识码: A

Test research on dynamic characteristics of Three Gorges granite under high strain rate

LI Gang^{1,2}, CHEN Zheng-han¹, XIE Yun^{1,2}, ZU Wen-hua³

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China;

2. No.5 Air Defense Engineering Department of PLA Air Force, Nanjing 211100, China; 3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The split Hopkinson pressure bar test equipment was improved through adopting multi-measures. A number of dynamic compression tests and dynamic split tests were conducted with the improved apparatus for the Three Gorges granite under high strain rate. It is found that strain rate effect is obvious and dynamic compression failure of the test samples can be divided into three patterns; i.e. edge fall apart, core no damage and completely failure. The failure mechanism of the rock is discussed; and the effects of strain rate on dynamic elastic modulus and dynamic compression strength are analyzed. Finally, a dynamic failure criterion of rock based on the Hoek-Brown failure criterion is proposed.

Key words: dynamic property of rock; split Hopkinson pressure bar; high strain rate; dynamic compression test; dynamic split tests; dynamic failure criterion

1 引 言

岩石的动力学特性是研究岩石爆破机制、应力波传播规律、防护工程与抗震工程设计的依据, 已受到学术界和工程界的广泛关注。我国岩石动力学的研究最早可以追溯到湖北大冶铁矿边坡稳定性研究中的爆破动力效应试验^[1]。近年来, 国内外学者对岩石的动力特性进行了大量的试验研究。信礼田、何翔等^[2]利用空气炮试验, 采用 Lagrange 分析方法得到了花岗岩、砂岩、石灰岩的动态本构关系。乔河^[3]利用平面波发生器爆炸试验装置, 并采用

Lagrange 分析对实测的应变波形进行了数值模拟, 得到了试验范围内花岗岩的数值本构关系曲线。李夕兵^[4]、楼为涛^[5]、席道瑛^[6]、吴德伦^[7]、于亚伦^[8]、单仁亮^[9]等人利用 SHPB 分别研究了各种岩石材料的动力特性与破坏准则。此外, 李海波^[10]采用 RDT-1000 型岩石高压动三轴试验系统对新加坡 Bukit Timah 岗岩进行了动态压缩试验, 建立了花岗岩材料的裂纹模型。朱瑞庚^[11]研究了加载速率在 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 花岗岩的抗压、抗拉、抗剪破坏特征, 得到了强度随加载速率变化的规律。动力特性要考虑应变率效应, 分离式 Hopkinson 压

杆 (SHPB) 技术被认为是测量固体材料在 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率下动态特性的最有效的方法, 本文应用该设备研究了三峡花岗岩的动力性状。

2 试验原理和方案

2.1 试件及试验装置

三峡坝址花岗岩是一种材质不均匀的多种矿物混合物, 含有斜长石、石英、黑云母等多种矿物, 矿物的最大粒径大于 5 mm 。为了保证试件的代表性, 得到宏观的力学性能, 试验采用了较大尺寸的

试件, 花岗岩试件由三峡工程地质勘查岩芯直接切割、打磨得到, 试件的尺寸为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。试验所用的霍普金森压杆 (SHPB) 为武汉理工大学的变截面杆。图 1 是变截面 SHPB 示意图, 压杆由高强度合金杆制成。压杆分为输入杆、输出杆和吸收杆三部分。吸收杆的端部用弹簧或活塞油缸吸收动量杆带走的无用动量。输入杆中的初始脉冲是由碰撞产生的, 压缩空气推动质量块或打击杆高速飞行, 与输入杆碰撞形成加载应力波。

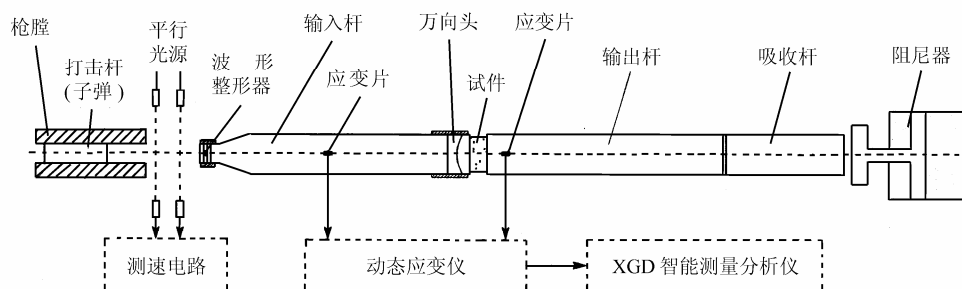


图 1 变截面 SHPB 装置示意图
Fig.1 SHPB apparatus diagram

2.2 试验原理

假设试件在撞击过程中保持一维平面应力状态, 通过应变片等可以记录输入杆和输出杆中应变随时间变化的曲线, 也就得到试件两端的应力、应变随时间变化的过程, 通过简单的程序计算, 可以反算试件材料的应力-应变关系曲线。假设 ε_1 , ε_R , ε_T 分别是输入杆中的入射波应变、输入杆中的反射波应变和输出杆中的透射波应变, 根据波传播理论和一维应力假设, 可以得到单轴压缩试件中的应力、应变、应变率分别为

$$\sigma_s = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_T \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_1 - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C_0}{l_0} \varepsilon_R \quad (3)$$

式中: σ_s 和 ε_s 分别为试件中的平均应力和平均应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; C_0 为弹性纵波波速; l_0 为试件的原始长度; E 为压杆的弹性模量; A 为压杆的截面积; A_s 为试件的截面积。

2.3 改进措施

三峡花岗岩属于脆性材料, 利用 SHPB 对其进行动力试验时必须对试验方法进行改进, 以满足 SHPB 试验的两个基本假设: 一维假定和均匀化假

定。在试验过程中应用了多种手段以提高试验的可靠准确性。

(1) 波形整形器技术

对于岩石、混凝土、陶瓷等脆性材料, 其破坏应变通常只有千分之几, 为了使应力脉冲在材料破坏前有足够的时间来回反射, 以便均匀试件内部的应力, 在输入杆的打击端粘贴了波形整形器 (如图 1 所示)。波形整形器的应用既可以较好地消除应力脉冲的波头过冲和波形震荡, 而且可以延长入射波的升时。

(2) 柔性介质减小波头震荡

胡金生等人^[12]提出在输入杆的撞击端缠绕柔性介质可以消除波头震荡, 减小弥散效应, 并采用多种柔性介质进行了试验。结果表明, 采用医用胶布作为柔性介质, 缠绕 1~4 层就可以显著地消除波头震荡。在本试验中也采纳了该措施。

(3) 万向头装置

对于岩石、混凝土类脆性材料, 试件两端与压杆端面之间接触紧密与否对试验结果的影响非常明显。为了消除因接触不紧密引起的误差, 保证试件端面受力均匀, 在试验前对试件端面进行了打磨处理, 表面平整度控制在 0.05 mm 以内, 同时在试验中采用了万向头装置 (如图 1 所示)。万向头是基于球形铰座原理设计的, 它由一段材质、直径与压

杆完全相同的圆柱构成,中间用一定曲率的球面截断,形成一个球形铰座。将试件放置在压杆与万向头之间,通过挤压压杆,万向头将随之微调,从而自动保证输入杆、试件、万向头、输出杆之间的所有接触平面紧密接触,冲击加载时受力均匀。

(4) 波头选取方法

脆性材料由于其破坏应变很小,采用传统的 SHPB 数据处理方法时,入射波和透射波波头的选取对应力-应变曲线的影响非常大。本文在进行波头选取时根据应变片的位置、压杆和材料的波速,通过波速法可以计算入射波波头和透射波波头的时间差、入射波波头和发射波波头的时间差。只要这两个时间差确定,应力-应变曲线和应变率曲线就不会发生畸变,从而消除了波头选取的人为误差。

2.4 试验方案

通过调整波形整形器的尺寸、触发压力和打击杆长度可以调节试验应变率,动态压缩试验的控制参数见表 1。表中的铜垫片为正方形,边长以 mm 计。

表 1 三峡花岗岩动态试验的控制参数
Table 1 Test parameters for Three Gorges granite

试验种类	铜垫片 (个数×边长)	触发压力 / MPa	打击杆长度 / mm	控制应变率 / s ⁻¹
动态单轴压缩	1×9 mm, 2×9 mm 1×7 mm, 2×7 mm	0.6, 0.4 0.45, 0.5	500, 600, 800	10~300

3 动态单轴压缩试验及其分析

3.1 动态压缩应力-应变曲线

图 2 是冲击试验得到的三峡花岗岩部分动态单轴压缩应力-应变曲线。根据这些试验曲线应力峰值后的形式可分为两类:(1)随着应力降低,应变增大;(2)随着应力降低,应变减小。其中第 2 种情形是由于卸载引起的。

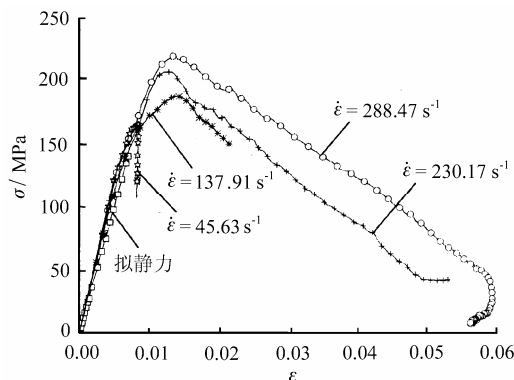


图 2 三峡花岗岩动态单轴压缩应力-应变曲线
Fig.2 Dynamic uniaxial compression stress-strain curves of Three Gorges granite

从图 2 可以看出,三峡花岗岩具有明显的应变率效应。随着应变率增加,材料的强度显著增长;但其初始弹性模量基本不随应变率发生改变,即花岗岩的初始弹性模量对应变率不敏感。

关于破坏强度随着应变率的提高而增加,目前尚没有比较完美的解释。有的学者认为,这是材料由一维的应力状态向一维的应变状态转换过程中的力学响应^[13-15]。在 SHPB 试验中,当试件尺寸比较大时,试件内相当部位的受力状态已不能准确地说是—维应力了,特别是在试件的中间部位。在动态加载下,尤其是在高应变率下,由于材料的惯性效应,侧向的应变受到限制,并且应变率越高,这个限制就越明显,这就表现出明显的应变率效应。

应变率效应并非仅仅由于应力状态的转变产生的。因为岩石破坏是由于其中微裂纹的产生和扩展导致的。而微裂纹的扩展需要一定的时间,高应变率加载状态不能提供足够的时间进行裂纹扩展,这样应力水平急速上升,产生更多的微裂纹,微裂纹越多,需要的能量就越多,同时在高应变率下,荷载作用时间很短,能量的增加只能够通过增加应力的方法达到,从而导致随着应变率的增加,强度随之增长,试件破碎得越彻底。

高应变率下三峡花岗岩的应力-应变曲线出现了明显的软化段,这与静力试验明显不同。笔者认为,这是因为裂纹的产生需要一定的时间所致。低应变率给裂纹提供了足够的生长时间,裂纹的失稳扩展导致了试件承载力的快速下降。在高应变率下,裂纹没有足够长的时间进行扩展,只能进行有限速率的扩展,并且扩展速度可能还小于加载速度,因此,试件在达到极限荷载后强度并不引起裂纹的失稳扩展而迅速脆化,形成比较明显的软化段。

3.2 不同应变率下材料的破坏型式

高应变率下材料的破坏型式有其特有的形式,图 3 是三峡花岗岩在不同应变率下的破坏照片。冲击荷载下花岗岩中裂纹发育也比较随机,破坏时产生了大量的岩屑,破坏吸收的能量较多,试样破坏比较彻底。随着应变率的增加,试样的破坏型式依次为边缘崩落、留心破坏、完全破坏。试样的破坏经历了一个由外到内的发展过程,这是由于试件端部的摩擦效应以及高应变率下材料的径向惯性效应造成的。尽管试验中在试件的端部涂抹了凡士林进行润滑,减小端面摩擦力,但即使在静力试验中都不能认为这种方法可以完全消除端部摩擦,因此,静力试验中对试样的长径比作了具体要求,一般选长径比为 2 的试样进行压缩试验。SHPB 冲击加载中,出于对应力均匀性的考虑,长径比一般要求为

0.5, 远小于 2。同时冲击加载时荷载比拟静力时的荷载要高许多, 因此, 端面的摩擦效应比拟静力时要大。加载过程中试件中部材料受侧向材料的约束, 试件的破坏也就首先是外缘崩落。同时由于高应变率试验中试样的径向惯性效应的影响, 试样中半径

越大处, 质点的径向速度越大, 这样在试件中形成了一个由试样中心向边缘传播的应力波, 这个应力波在试样的边缘发生反射, 引起边缘的崩落, 与层裂类似, 应力波再次回到边缘时, 新形成的边缘再次崩落, 这也就造成了试样由外向内的破坏。

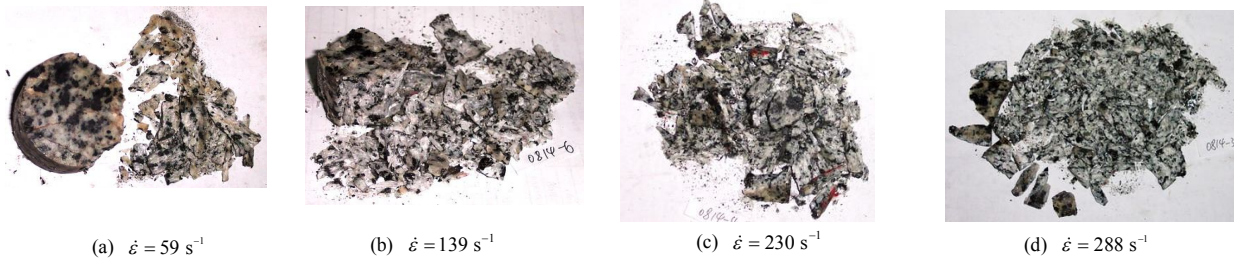


图 3 不同应变率下三峡花岗岩的破坏照片

Fig.3 Failure pictures of Three Gorges granite under various strain rates

3.3 动态弹性模量 E_d 和动态抗压强度 σ_d

根据 SHPB 试验所得的动态压缩应力-应变曲线, 可以得到材料的动态弹性模量 E_d 以及动态单轴抗压强度 σ_{cd} (或用 f_c 表示)。图 4 和图 5 分别是试验得到的 E_d 和 f_c 随 $\dot{\epsilon}$ 的变化图, 图 5 中的 f_{cs} 为静态单轴抗压强度, C 和 P 均为材料参数。

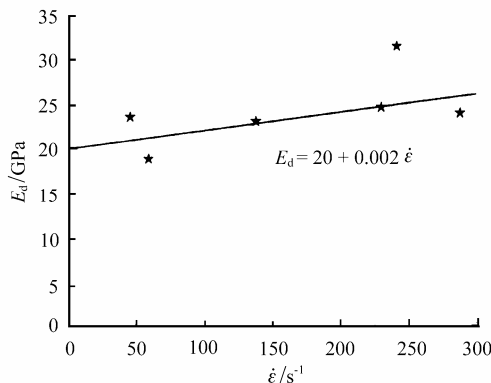


图 4 三峡花岗岩动弹性模量随应变率的变化关系图

Fig.4 Dynamic elastic modulus of Three Gorges granite vs. strain rate

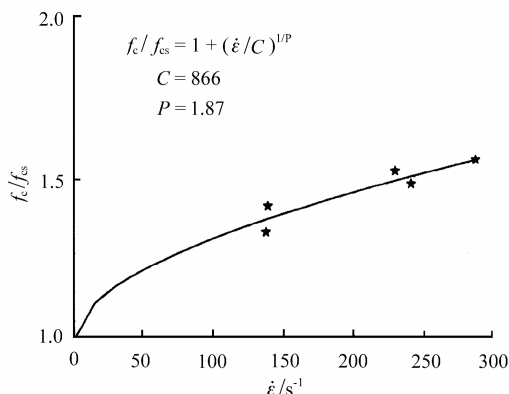


图 5 三峡花岗岩动抗压强度增强因子与应变率的关系图

Fig.5 Compressive strength increasing factor of Three Gorges granite vs. strain rate

从图 4 可知, 随应变率的增加, 动态弹性模量略有增加, 基本维持在 23 GPa 附近。欧洲国际混凝土委员会 (CEB) 建议采用下式对混凝土材料的动态弹性模量进行修正^[16]:

$$\frac{E_d}{E_s} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.26} \quad (4)$$

式中: E_s 为静态弹性模量; $\dot{\epsilon}_d$ 为动态应变率, 参考应变率 $\dot{\epsilon}_s = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这表明动态弹性模量与应变率在双对数坐标系中呈线性关系。本次试验中高应变率主要集中在 $10 \sim 300 \text{ s}^{-1}$ 之间, 应变率的量级变化不大, 因此, 不宜采用式 (4) 进行拟合, 这里采用线性方程进行拟合如下:

$$E_d = a + b\dot{\epsilon} \quad (5)$$

式中: a , b 均为材料参数。对于三峡花岗岩, $a = 20 \text{ GPa}$, $b = 0.002 \text{ GPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

应变率对材料动态抗压强度的影响一般常用动强度增强因子 DIF 来表示, 其定义为动力单轴抗压强度 σ_{cd} (即 f_c) 和静力单轴抗压强度 σ_{cs} (或用 f_{cs}) 的比值。

CEB 建议采用下式描述混凝土抗压强度随应变率的增强规律^[16]:

$$\left. \begin{aligned} DIF &= \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha}, & \dot{\epsilon}_d \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ DIF &= \gamma (\dot{\epsilon}_d)^{\frac{1}{3}}, & \dot{\epsilon}_d > 30 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\gamma = 10^{6.156\alpha - 2.0}$, $\alpha = (5 + 9\sigma_{cs}/\sigma_0)^{-1}$, $\dot{\epsilon}_s = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$ 。式 (6) 表明, 抗压强度

与应变率在双对数坐标中呈分段线性。

汤天锡^[17]在 1990 年报导了他对水泥砂浆和混凝土动态试验的结果, 提出混凝土的动态强度与其应变率存在如下关系:

$$DIF = A + B \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (7)$$

式中: A , B 均为材料参数; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变。

此外, 还有一种用来描述动强度增强因子随应变率变化的表达式^[18]:

$$DIF = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}} \quad (8)$$

式中: C 和 P 均为材料常数。大量试验表明, 在半对数坐标中 DIF 随应变率的增长分为两个不同的增长阶段, 在应变率较低时增长缓慢, 但应变率超过临界点, DIF 对数应变率快速增长。显然, 式 (7) 不能很好地反映全应变率范围内强度的上述增长规律, DIF 随应变率的变化规律拟用分段线性或式 (7) 描述较好。本文采用式 (8) 来描述三峡花岗岩的动强度增强因子 DIF 随应变率的变化规律, 其中 $C = 866$, $P = 1.87$ 。

4 动态单轴劈裂试验及其分析

4.1 试验原理和数据处理方法

目前岩石、混凝土材料的动态力学试验主要集中在材料的冲击压缩方面, 材料的冲击拉伸试验的数据十分有限, 造成这一情况的主要原因在于岩石、混凝土类脆性材料的拉伸试验比较困难。混凝土类材料的抗拉强度通常是采用劈裂试验得到, 目前用于动态劈裂试验的试验设备多为中等应变率的材料试验机 (如 INSTRON 电液伺服试验机), 得到的材料拉伸应变率很少超过 5 s^{-1} 。

20 世纪 90 年代开始, 一些研究者尝试用 SHPB 设备进行了混凝土和岩石材料的动态劈裂试验研究。Ross 等人^[19,20]采用 SHPB 对混凝土材料进行了冲击拉伸试验, Ross 和 Tedesoc^[21]采用直接拉伸和劈裂两种试验方法对混凝土材料进行了动态拉伸试验, 得到了材料的动态拉伸强度提高因子随应变率的变化公式。Gomez^[22]对岩石和混凝土材料进行了光弹试验, 探讨了采用 SHPB 装置研究材料动态劈裂强度的合理性。Ross 和 Tedesoc^[21]得到混凝土材料的动态拉伸强度提高因子达 3.64, 其试验的应变率范围为 $1.7 \sim 7.7 \text{ s}^{-1}$ 。文献[23]采用 LS-DYNA 对动态劈裂试验进行了数值模拟, 验证了其可行性, 但其数值试验得到的应变率仅为 2 s^{-1} 。苏碧军和王启智^[24]用平台巴西圆盘试样研究了岩石的动态拉伸

特性。

本文采用 SHPB 装置对三峡花岗岩进行了劈裂拉伸试验, 试件在 SHPB 压杆间的安置参见图 6, 劈裂试验得到的典型波形见图 7。

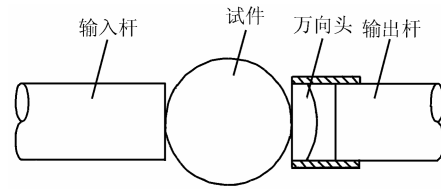


图6 动态劈裂试验的试样安置示意图
Fig.6 Dynamic split test diagram

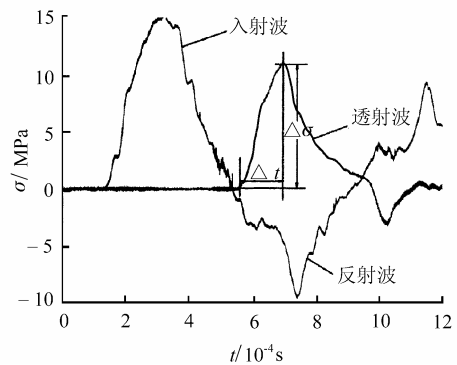


图7 劈裂试验得到的典型波形
Fig.7 Typical wave pattern of split test

由巴西圆盘的静力弹性分析可以得到材料的拉伸强度为

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi dt} \quad (9)$$

式中: $P_{\max}$ 为试件所受的径向压力峰值, d 为试件直径; t 为试件厚度。在 SHPB 试验中, 荷载 $P_{\max}$ 被认为是透射杆杆端的荷载峰值:

$$P_{\max} = EA\varepsilon_{t\max} \quad (10)$$

式中: E 为压杆的弹性模量; A 为压杆的截面积; $\varepsilon_{t\max}$ 为透射杆应变片采集的应变峰值。

结合式 (9) 和式 (10) 可以计算出材料的动态拉伸强度:

$$\sigma_{td} = \frac{2EA\varepsilon_{t\max}}{\pi dt} \quad (11)$$

设透射波应力的升时 Δt 对应的荷载增量为 $\Delta\sigma$, 若假定岩石的拉伸模量近似等于其压缩模量, 则劈裂试验中材料的拉伸应变率为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{E_s \Delta t} \quad (12)$$

可见试验中拉伸应变率的提高可以通过增大荷载、减小升时的方法获得。由前面的动态压缩试验可知, 混凝土材料的动态弹性模量随应变率的增加而增加, 如式 (4) 所示, 将式 (4) 代入式 (12)

中可得:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{(a+b\dot{\varepsilon})\Delta t} \quad (13)$$

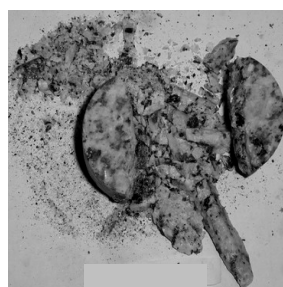
材料的拉伸应变率可以通过迭代求解式(13)求得。一般二、三次迭代就可得到较准确的拉伸应变率。

4.2 不同应变率下材料的破坏形式

图8是不同冲击荷载下动态劈裂试验得到的典型破坏结果。从图可以看出,用SHPB试验装置进行动态劈裂试验的试验结果与静态劈裂的类似。加载点处的材料可能出现压溃,试验破裂面出现掉渣(如图8(a)),高速冲击时,试件的破坏范围更广,有大块的材料脱落(如图8(b))。



(a) 拉伸应变率 $\dot{\varepsilon} = 18 \text{ s}^{-1}$



(b) 拉伸应变率 $40 \dot{\varepsilon} = 40 \text{ s}^{-1}$

图8 不同拉伸应变率下三峡花岗岩的动态劈裂破坏照片
Fig.8 Failure pictures of Three Gorges granite under various strain rates for dynamic split test

为了对加载点的压溃现象进行合理解释,绘制了图9。

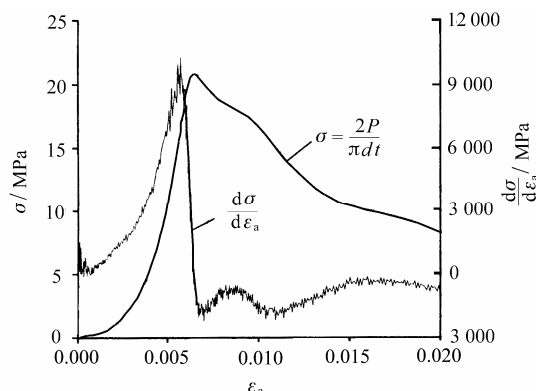


图9 三峡花岗岩劈裂试验轴向应力-轴应变曲线
Fig.9 Axial stress-strain curve of Three Gorges granite for dynamic split test

图中 P 为 SHPB 输出杆杆端荷载; d , t 分别为试件的直径与厚度。对于纯圆盘的岩石试样,峰值时的轴向应变也仅为 0.005 左右,此时的加载历时仅为 0.07ms,远小于苏碧军^[24]通过 INSTRON1342 型电液伺服机进行动态劈裂混凝土试样得到的起裂时间 30 ms,裂纹几乎是在瞬时产生的,加载点压溃对动劈裂强度影响很小。

4.3 动态抗拉强度 σ_{td}

对试验所得的动态抗拉强度仍采用与动态抗压强度类似的方法进行分析。动态抗拉强度增强因子 DIF_t 定义为动态抗拉强度 f_t 和静态抗拉强度 f_{ts} 的比值。动态抗拉强度提高因子 DIF_t 随应变率的变化关系参见图 10,可以看出在试验数据范围内 DIF_t 随应变率基本呈线性变化。为了与动态抗压强度增长因子保持一致,这里仍然用式(7)描述 DIF_t 的变化规律。对于三峡花岗岩的 DIF_t , 参数分别为 $C = 46.89$, $P = 1$ 。

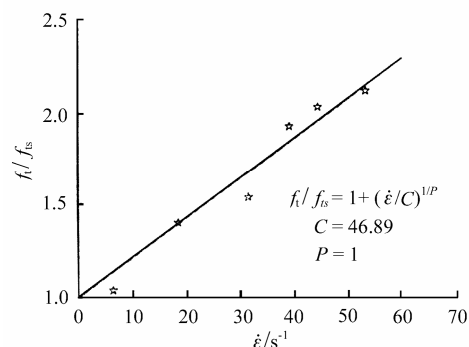


图10 三峡花岗岩动态抗拉强度增长因子与应变率关系
Fig.10 Dynamic tensile strength increasing factor of Three Gorges granite vs. strain rate

5 考虑应变率响应的岩石破坏准则

分析应变率对静态强度准则正各参数的影响,再将考虑应变率效应的各个参量代入静态破坏准则,就可得到材料的动态破坏准则。例如,在静态条件下, Hoek-Brown 破坏准则表达为

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} = 0 \quad (14)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力; σ_c 为材料的单轴抗压强度; m , s 均为材料参数,由岩石类型而定。对于完整的岩石材料 $s = 1$ 。这一条件中既考虑了岩体质量数据,又考虑了与围压有关的岩石强度,因而比摩尔-库仑条件更适用于岩石材料。

当采用应力不变量表述时,式(14)可写为

$$F = m \frac{I_1}{3s\sigma_c} + 4 \frac{J_2}{s\sigma_c^2} \cos^2 \theta_\sigma + m \frac{\sqrt{J_2}}{s\sigma_c} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma}{\sqrt{3}} \right) - 1 = 0 \quad (15)$$

式中: I_1 和 J_2 分别为应力第一不变量和偏应力第二不变量; θ_σ 为应力罗德角。

对于完整性较好的取芯试样, 取 $s=1$, 从式 (14) 可得岩石的单轴抗拉强度 f_t 和单轴抗压强度 f_c (等于 σ_c) 的关系为

$$f_t = \frac{m - \sqrt{m^2 + 4}}{2} \sigma_c \approx -\frac{1}{m} \sigma_c \quad (16)$$

由此可得材料的拉压强度比为

$$\frac{f_c}{f_t} \approx -m \quad (17)$$

岩石的动态试验表明, 其抗拉强度的增长比抗压强度的增长快, 因此, 反映材料拉压比的参数 m 也随着应变率变化而发生变化。将动态单轴抗压强度和动态劈裂抗拉强度代入 Hoek-Brown 准则, 就可得到三维动态 Hoek-Brown 破坏准则:

$$F = m_d \frac{I_1}{3\sigma_{cd}} + 4 \frac{J_2}{\sigma_{cd}^2} \cos^2 \theta_\sigma + m_d \frac{\sqrt{J_2}}{\sigma_{cd}} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma}{\sqrt{3}} \right) - 1 = 0 \quad (18)$$

$$\text{其中: } \sigma_{cd} = \sigma_{cs} \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C_c} \right)^{\frac{1}{P_c}} \quad (19)$$

$$m_d = -\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_{cs}} \frac{\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C_t} \right)^{\frac{1}{P_t}}}{\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C_c} \right)^{\frac{1}{P_c}}} = m_s \frac{\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C_t} \right)^{\frac{1}{P_t}}}{\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C_c} \right)^{\frac{1}{P_c}}} \quad (20)$$

式 (19)、式 (20) 中下标 t 代表拉伸, c 代表压缩。其中 C_c , P_c , C_t , P_t 分别为动态压缩和动态拉得到的强度提高参数; σ_{cs} , σ_{ts} 分别为静态单轴压缩强度和劈裂拉伸强度。

6 结 论

采用 SHPB 试验装置对三峡花岗岩进行了冲击压缩和冲击劈裂试验, 首次得到了拉伸应变率高达 60 s^{-1} 的动态抗拉强度; 通过对两类试验的试验现象进行了细致分析, 得到了弹性模量、单轴抗压强度、劈裂拉伸强度随应变率变化的规律。本文主要成果归纳如下:

(1) 采取多种措施 (波形整形器技术、柔性介质减小波头震荡、万向头装置及波头选取方法) 改进了分离式 Hopkinson 压杆试验技术, 提高了试验结果的可靠性。

(2) 三峡花岗岩的动态压缩破坏呈 3 种形态: 边缘崩落、留心破坏、完全破坏; 试样的破坏经历了一个由外到内的发展过程, 其原因在于试件端部的摩擦效应以及高应变率下材料的径向惯性效应。

(3) 三峡花岗岩具有明显的应变率效应。随着应变率增加, 材料的强度显著增长, 用指数关系拟合较好, 但其初始弹性模量对应变率不敏感。

(4) 高应变率动力劈裂试验中加载点的压溃对试验结果影响很小, 因此, 动力试验中可直接使用纯圆盘试样, 而不需要进行特别加工。

(5) 在劈裂试验数据整理时提出, 用动态压缩模量进行应变率迭代的方法进行修正。

(6) 以 Hoek-Brown 准则为基础, 建立了考虑应变率效应的岩石动态破坏准则。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 大冶铁矿边坡稳定性研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1966.
- [2] 信礼田, 何翔, 苏敏. 强冲击载荷下岩石的力学性质[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 61-68.
XIN Li-tian, HE Xiang, SU Min. The mechanical properties of rocks under strong impact loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (6): 61-68.
- [3] 乔河. 爆炸作用下岩石动态本构关系试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 1997.
- [4] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学研究内容及其应用 [J]. 西部探矿工程, 1996, 8(6): 1-2.
LI Xi-bin, GU De-sheng. Research and application of rock impulsion dynamics [J]. West-China Exploration Engineering, 1996, 8(6): 1-2.
- [5] 楼为涛. 干燥和水饱和的花岗岩的动态断裂特性[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 53-57.
LOU Wei-tao. Dynamic fracture characteristics of dry and saturated Granite.[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(3): 53-57.
- [6] 席道瑛, 郑永来, 张涛. 大理石和砂岩动态本构的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15 (3): 259-266.
XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai, ZHANG Tao. The experimental research on dynamical constitutive laws of marble and shale [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(3): 259-266.
- [7] 吴德伦, 叶晓明, 张平. 围压 SHPB 试验理论与应用

- [A]. 第三届全国岩石动力学学术会议论文选集, [C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992, 85—94.
- WU De-lun, YE Xiao-ming, ZHANG Ping. Theory and application of SHPB test with lateral pressure[A]. Proceedings of 3rd Chinese Conference on Rock Dynamics[J]. **Wuhan Survey Technology University Press**, 1992, 85—94.
- [8] 于亚伦, 金科学. 高应变率下的矿岩特性研究[J]. 爆炸与冲击. 1990, 10(3): 266—271.
- YU Ya-lun, JIN Ke-xue. Research on characteristics of mine rock under high strain rate [J]. **Explosion and Shock Waves** 1990, 10(3): 266—271.
- [9] Renliang Shan, Yusheng Jiang, Baoqiang Li. Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the Split Hopkinson Pressure Bar technique.[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37: 983—992
- [10] 李海波, 赵坚, 李俊如. 花岗岩动态压缩力学特性的实验以及理论研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20 (4): 474—477.
- LI Hai-po, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Test and theoretical research on dynamical compression characteristics of granite[J]. **Journal of Liaoning Engineering Technology University**, 2001, 20 (4): 474—477.
- [11] 朱瑞庚. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 1—8.
- ZHU Rui-geng. Failure criterion of granite under various loading rates[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1984, 4(1): 1—8.
- [12] 胡金生. 纤维混凝土遮弹层抗接触爆炸试验与数值模拟研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2003.
- [13] Brace W F, Jones A H. Comparison of uniaxial deformation in shock and static loading of three rocks. [J]. **Geophysics Research**, 1971, 76(20) 4 913—4 921.
- [14] Janach W. The role of bulking in brittle Failure of rocks under rapid compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1976, 13(6): 177—186.
- [15] Zielinski A J. Concrete Structures Under Impact Loading Rate Effect[D]. Delft: Delft University of Technology, 1984.
- [16] 陈磊, 李媛, 陈太林, 等. 混凝土动态力学性能分析[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(1): 39—41.
- CHEN Lei, LI Yuan, CHEN Tai-lin, et al. Analysis of dynamical properties of concrete[J]. **Development of Construction Technique**, 2004, 31(1): 39—41.
- [17] Tang T X, Malvern L E, Jenkins D A. Rate Effects in Uniaxial Dynamic Compression of Concrete[J]. **Engineering Mechanics**. 1992, 118(1): 108—124.
- [18] LS-DYNA Theoretical manual[M]. [s.l.]: Livermore software Technology Corporation, 1998.
- [19] Ross C A. Split Hopkinson Pressure Bar Tests[M]. Florida: ESL-TR-88-82 HQ AF Engineering and Services Center, 1989.
- [20] Ross C A, Thompson P Y, Tedesoc J W. Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression[J]. **ACI Mater**, 1989, 86: 475—481.
- [21] Ross C A, Tedesoc J W, Kuennen S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. **ACI Mater**, 1995, 92(1): 37—47.
- [22] Gomez J T, Shukla A, Sharma A. Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2001, 36: 37—49.
- [23] 马宏伟, 张立军, 闫晓鹏, 等. 混凝土动态劈裂拉伸试验的数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2003, 16(4): 349—354.
- MA Hong-wei, ZHANG Li-jun, YAN Xiao-peng, et al. Numerical simulation on the dynamic splitting tensile test of concrete[J]. **Journal of (Natural Science and Engineering Edition)**, 2003, 16(4): 349—354.
- [24] 苏碧军, 王启智. 平台巴西圆盘试样岩石动态拉伸特性的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(1): 22—25.
- SU Bi-jun, WANG Qi-zhi. An experiment study on rock tensile strength with flattened Brazilian disc specimen under dynamic loading[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2004, 21(1): 22—25.