

DOI: 10.11779/CJGE201606016

# 中高应变率下花岗岩动力特性三轴试验研究

卢志堂<sup>1</sup>, 王志亮<sup>\*1, 2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 利用改进的霍普金森压杆对不同围压、不同应变率下的岩样进行了试验研究, 分析了其中高应变率下的冲击响应特征与破坏模式。基于试验结果发现在围压一定情况下, 岩石的动态抗压强度和峰值应变随应变率的增大而增大, 其中抗压强度随应变率呈对数增长; 弹性模量对围压和应变率不敏感, 且应变率越大岩石破碎现象越严重。其次, 在应变率相近情况下, 花岗岩的动态抗压强度随围压呈增大趋势, 其破坏模式由低围压下的轴向劈裂转向高围压下的压剪破坏; 高围压下花岗岩应力-应变曲线出现屈服平台, 具有明显的脆-延性转化特征。最后, 检验了莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则的适用性, 指出此花岗岩更符合莫尔-库仑准则, 其动态强度增大主要由黏聚力的应变率效应引起。  
**关键词:** 黑云母花岗岩; 围压; 应变率; 破坏模式; 动态破坏准则

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1087-08

**作者简介:** 卢志堂(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土动力学方面研究; E-mail: zhitang\_lu@163.com。

## Triaxial tests on dynamic properties of granite under intermediate and high strain rates

LU Zhi-tang<sup>1</sup>, WANG Zhi-liang<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Experimental studies on the granite specimens under different confining pressures and strain rates are conducted using the improved split Hopkinson pressure bar (SHPB), and the impact response and failure mode of the rock subjected to intermediate and high strain rates are analyzed. Based on the test data, it is revealed that the dynamic compression strength and the peak strain of the granite increase with the increasing strain rate under the same confining pressure, and there is a logarithmic relationship between the dynamic strength and the strain rate. The elastic modulus of the granite is insensitive to the confining pressure and strain rate. The larger the strain rate is, the more serious the rock breakage is. Then, it is found that the compression strength of the granite increases with the increase of the confining pressure when the strain rate is identical. The failure mode of such granite takes on a change from the axial splitting at lower confining pressure to the compression/shear failure under high confining pressure. The stress-strain curve of the rock has a yield platform, being an apparent brittle-ductile transformation characteristic. Finally, the applicability of the famous Mohr-Coulomb criterion and the Hoek-Brown criterion to the biotite granite is further examined. It indicates that the granite can be well described by the Mohr-Coulomb criterion. The increase of dynamic strength of the granite is primarily due to the rate effect of cohesion.

**Key words:** biotite granite; confining pressure; strain rate; failure mode; dynamic failure criterion

## 0 引言

随着深部岩体工程建设不断增多, 人们开始认识到深部岩体表现出与浅部非常不同的力学特性, 因此深部岩体力学已成为当代岩石力学与工程的热点与重点研究方向之一<sup>[1-3]</sup>。在深部工程问题中, 岩体处于“三高一扰动”的复杂地质力学环境, 岩爆、矿震等所对应的中应变率工程问题时有发生; 此外, 工程爆破开挖也涉及到动荷载作用下的岩石动态力特性<sup>[3]</sup>。上述动荷载作用时, 岩石一般承受中等应变率( $10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon}$

$< 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) 和高应变率( $\dot{\epsilon} > 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) 作用<sup>[4-5]</sup>, 目前针对岩石的常规静态三轴试验力学特性研究较多, 而岩石材料中高应变率下三轴冲击力学性质的研究相对较少。更重要的是, 在动荷载作用下, 岩石表现出与低应变率( $\dot{\epsilon} < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) 加载条件下不同的性质, 如强

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379147, 51579062, 51174145);

教育部博士点专项资金项目(20120072110024)

收稿日期: 2015-06-01

\*通讯作者

度增大,破坏模式改变等。因此,开展中高应变率与围压作用下岩石动态力学性能研究,这对地下岩体工程的建设等领域均有重要意义。

与岩石静态试验相比,岩石动态试验对测试仪器要求更高,涉及的试验参数和物理变量更多,相关的试验研究仍然相对较少。国外对岩石动态抗压性质的试验研究起步较早,如Brace等<sup>[6]</sup>早在1968年就对花岗岩、辉绿岩等6种岩石分别进行了不同应变率的动三轴压缩试验,发现岩石材料的抗压强度都随着应变率的增加明显提高。在国内,相关的试验研究也得到了开展,吴绵拔等<sup>[7]</sup>对花岗岩和煌斑岩进行中等应变率下的单轴压缩试验,发现随应变率的增加,岩样的抗压强度和变形模量显著提高,而泊松比对应变率依赖性不大;李海波等<sup>[8]</sup>通过动三轴试验,发现花岗岩的抗压强度随应变率的增加有较明显的增加趋势,而弹性模量和泊松比随应变率的增加没有明显的变化趋势。同时,基于分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置的动态冲击试验大量出现<sup>[9]</sup>。Christenson等<sup>[10]</sup>于1972年首次利用三轴SHPB对岩石进行了围压下的冲击试验。从20世纪80年代开始,北京科技大学、重庆大学及中南大学相继研制了加围压的SHPB装置,并进行了一些相关的岩石动态试验研究<sup>[11-18]</sup>;于亚伦<sup>[11]</sup>利用三轴SHPB装置研究了大理岩、石英磁铁矿与混合花岗岩的动载特性,发现石英磁铁矿和混合花岗岩的破坏强度与围压符合莫尔-库仑准则;叶洲元等<sup>[13]</sup>对细砂岩进行了三维动静组合加载试验,发现围压不变时,细砂岩动静组合强度、弹性模量随轴向静压增大先升高后降低;宫凤强等<sup>[14-15]</sup>对均质砂岩进行不同围压与不同应变率下三轴冲击压缩试验,发现岩石的动态压缩强度随应变率的提高而提高,岩石的动态压缩强度与弹性模量会随着围压的增大而增大;应变率较低时岩石内部形成压剪破裂面但整体不失稳,应变率很大时岩石破碎形成锥形块体形式;

吕晓聪、许金余等<sup>[17-18]</sup>研究发现,在围压状态下,砂岩具有明显的脆性-延性转化特征,其应力-应变曲线出现明显的屈服平台,呈近似的弹塑性特征;围压能明显阻止试件产生剪切失稳,砂岩的动态杨氏模量与围压和应变率之间没有稳定的变化规律。

本文采用带围压装置的改进SHPB,对陕西华山地区的粗颗粒黑云母花岗岩进行了0~20 MPa围压与中高应变率( $50\text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 200\text{ s}^{-1}$ )下的冲击压缩试验,分析花岗岩抗压强度与应变率、围压间的关系,探讨了不同围压和应变率下花岗岩的应力-应变曲线的变化特性。并采用高速摄影仪记录下岩石的冲击破坏过程,观察了单轴冲击时岩样中裂纹的激活与扩展,同时对花岗岩的冲击破坏模式进行了对比分析。最后,对莫尔-库仑准则和霍克-布朗准则评估此类黑云母花岗岩的适用性进行了检验。

## 1 测试设备与岩样准备

### 1.1 试验仪器

试验在中南大学SHPB冲击设备(图1)上完成,该设备通过在岩样安装处架设围压加载装置,可以施加垂直于冲击载荷方向的围压。其中围压装置主要由油缸、隔油橡胶套、液压油进出口、支座等组成(图2);轴压系统主要由液压油缸、轴向活塞、液压油进出口、排气口及手动油压泵组成。手动泵通过油进出口与油缸相连,加压过程和卸压过程均由手动泵控制。围压装置主要由油缸、隔油橡胶套、液压油进出口、支座等组成。入射杆和透射杆直径均为 $\Phi 50\text{ mm}$ ,试验中采用线性化的“纺锤型”冲头产生恒应变率的半正弦应力波进行加载<sup>[15]</sup>。使用1.0 MHz超动态应变采集仪记录入射波、反射波和透射波的动态应变信号。其中单轴冲击时,采用最高拍照频率可达675000次/s的高速摄影仪记录岩样中裂缝产生与扩展过程,有关试验系统的详细资料参阅文献[12]。

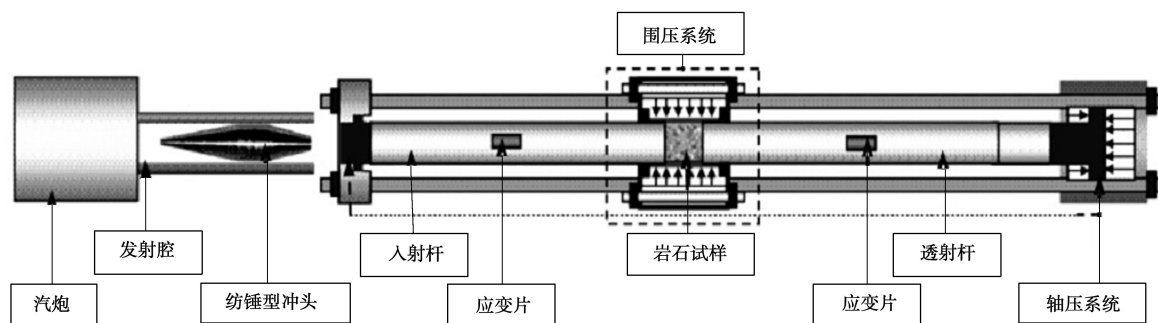


图1 三轴 SHPB 试验设备示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Schematic of SHPB with triaxial equipment

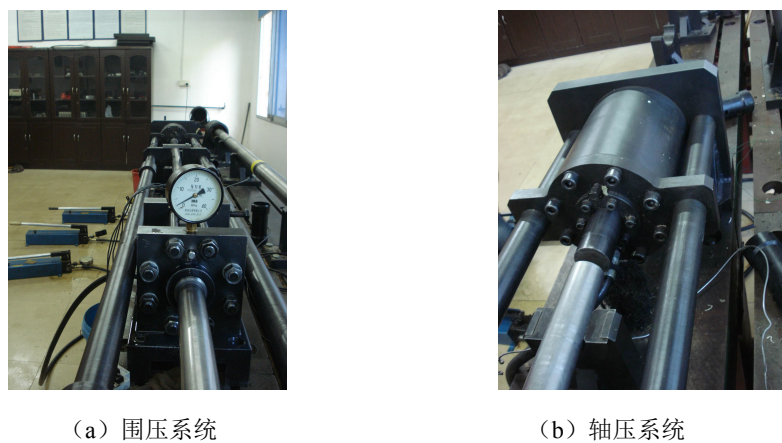


图 2 三轴 SHPB 加载系统

Fig. 2 Loading system of SHPB with triaxial equipment

1.2 试样准备

试验所用花岗岩呈灰白色, 具有块状构造, 经西安地质矿产研究所试验测试中心检验, 其矿物成分有微斜长石 (40%)、斜长石 (25%)、石英 (20%) 和黑云母 (8%) 等, 为黑云母花岗岩。将花岗岩试样打磨成直径比杆径略小的圆柱形, 其尺寸为  $\Phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ , 并对岩样两端打磨, 保证不平行度小于  $0.02\text{ mm}$ , 试样主要物理力学参数见表 1。

表 1 岩样力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock specimen			
密度	吸水率	常规单轴抗压强度	弯曲强度
$/(kg \cdot m^{-3})$	$\text{}/\%$	$\text{}/MPa$	$\text{}/MPa$
2616	0.57	138	8.5

结合三轴 SHPB 试验设备测试范围, 设定围压为 0, 2.5, 5, 10, 20 MPa 五种情况下, 进行不同应变率下的冲击试验, 每级围压下准备 8 个岩样, 共需 40 个试样, 获得岩石冲击强度及其所对应的应力 - 应变曲线, 以考察不同围压条件下岩石变形特点与动载强度的应变率效应。

2 试验数据处理与分析

2.1 应变率与围压效应探究

将试验数据进行处理后, 得出试件的动抗压强度  $\sigma_{id}$  与轴向应变率  $\dot{\epsilon}$  等参数, 其中应变率范围为  $50 \sim 200\text{ s}^{-1}$ , 表 2 列出了试验数据。为便于了解抗压强度与应变率的关系, 将表 2 数据绘图展示, 见图 3。图 3 同时给出了采用对数函数 ( $y = a \ln x + b$ ) 拟合的曲线, 各曲线参数见表 3 所示。由于文中拟合时点数多大于 8 个, 同时岩石存在一定个体差异, 采用常见的对数函数来拟合试验数据, 整体趋势上还是能反映应变率对强度的提高作用。由图 3 可看出, 对同一级围压, 随应变率不断提高, 花岗岩动抗压强度表现出增大的趋势; 对

比不同围压下的动抗压强度的变化, 发现花岗岩动强度随围压的增大而增大。另外, 随着围压的增加, 岩样破坏的应变率范围也有所变大。例如单轴冲击时, 应变率集中在  $50 \sim 100\text{ s}^{-1}$  之间, 而围压  $\sigma_3 = 10\text{ MPa}$  时, 应变率范围基本在  $100 \sim 200\text{ s}^{-1}$  之间, 这说明由于较高围压下侧向约束变大, 需要较大应变率加载才能使岩样破坏。

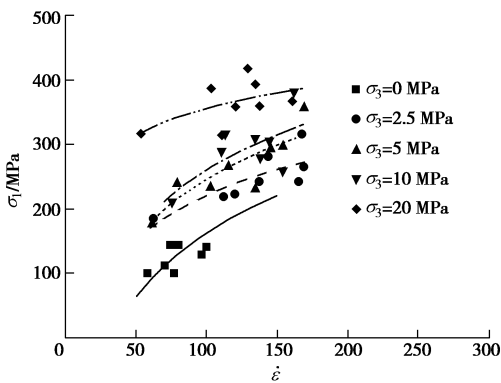


图 3 不同围压下抗压强度 - 应变率关系

Fig. 3 Relationship between compressive strength and strain rate under different confining pressures

通过拟合分析可以看出, 相同围压下随着应变率的增大, 花岗岩的动强度都有提高。其中, 单轴应变率效应最明显, 而围压为 20 MPa 时, 应变率效应最弱。由图 3 可以看出, 当围压变大时, 测得的岩石动强度也有增大的趋势, 但是增大的幅度各不相同。

为考察围压以及应变率对岩石力学性质的影响, 图 4 给出两组代表性的应力 - 应变曲线。整体上来看, 随着应变率提高, 不仅峰值应力 (抗压强度) 增大, 而且峰值应变也表现出增大的趋势, 如图 4 (a) 中当应变率由  $58\text{ s}^{-1}$  增大到  $133\text{ s}^{-1}$  时, 峰值应变由 0.0043 增大到 0.0101; 图 4 (b) 中应变率由  $59\text{ s}^{-1}$  增大到  $168\text{ s}^{-1}$  后, 峰值应变由 0.0051 增大到 0.0151。根据图 4 (a) 还可看

表 2 不同围压下试验结果

Table 2 Test results under different confining pressures

$\sigma_3$ /MPa	$\dot{\varepsilon}$ /s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ld}$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\dot{\varepsilon}$ /s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ld}$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\dot{\varepsilon}$ /s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ld}$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\dot{\varepsilon}$ /s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ld}$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\dot{\varepsilon}$ /s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ld}$ /MPa
0	58	101	2.5	62	186	5	59	180	10	75	210	20	53	316
	70	113		112	219		78	242		110	288		103	387
	74	144		120	223		102	236		113	316		110	314
	77	101		137	243		115	267		134	309		120	358
	79	144		143	281		134	233		138	278		128	417
	96	131		165	243		145	297		144	304		126	391
	9	141		167	316		153	299		154	258		137	359
	133	235		169	265		168	359		162	380		160	367

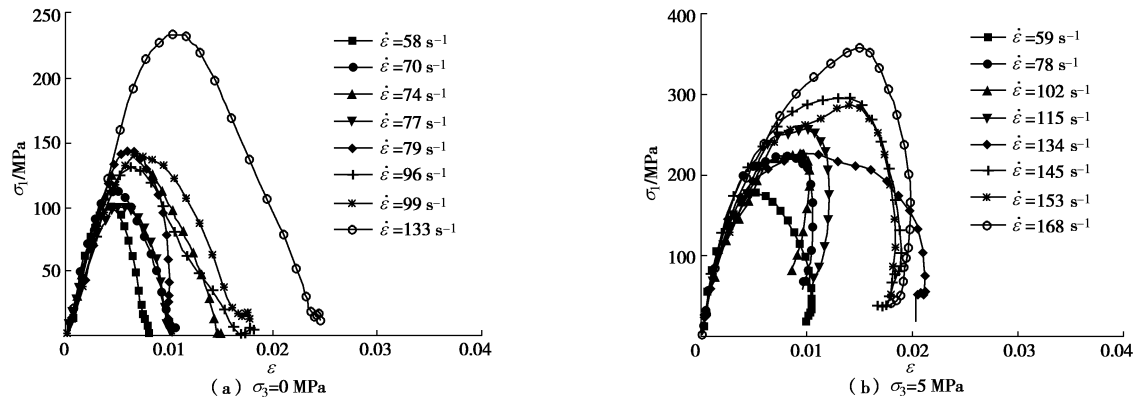


图 4 不同应变率下应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different strain rates

表 3 不同工况的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of different cases

$\sigma_3$ /MPa	$a/(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	$b/\text{MPa}$	相关系数
0	120.9	-398.4	0.72
2.5	79.6	-133.8	0.71
5.0	130.6	-354.1	0.73
10.0	134.1	-355.5	0.46
20.0	58.8	86.0	0.31

出, 单轴冲击时应力 - 应变曲线在峰后随着应变的增加, 应力不断降低, 而图 4 (b) 中部分岩样在变形后期仍然具有一定弹性恢复特征 (如  $\dot{\varepsilon}=102 \text{ s}^{-1}$  和  $115 \text{ s}^{-1}$ ), 使得峰值后的应力 - 应变曲线出现往回弯折现象。

为对比分析围压对此花岗岩的冲击破坏效应, 图 5 给出围压不同而应变率相近的应力 - 应变曲线。首先整体上来看, 随着围压增大抗压强度表现出增大的趋势, 且回弹也越明显, 这表明围压可以有效抑制岩样的破坏, 提高岩样的承载力。其次, 岩样在 10~20 MPa 的围压作用下, 应力 - 应变曲线峰值附近出现了一个屈服平台, 这表明高围压作用下, 岩石破坏表现出从脆性破坏向延性破坏转化的特点。图 6 给出不同围压和应变率下岩石的弹性模量变化, 从中可以看出各级围压下随应变率的提高, 岩石弹性模量变化不大, 大致处于 30 GPa 上下。尽管图 5 中显示围压增大时, 各应力 - 应变曲线对应的弹性模量分别为 30.6, 30.6, 31.2, 32.1, 32.4 GPa, 有一定的增大趋势, 但从图 6

整体上来看, 弹性模量对应变率与围压的敏感性不强。

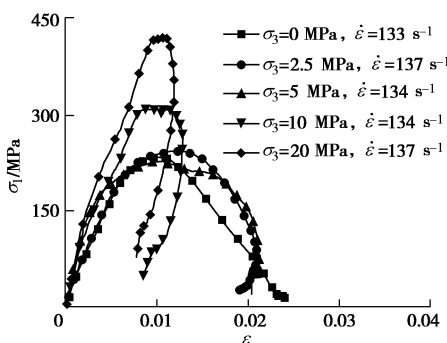


图 5 不同围压下的应力 - 应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves under different confining pressures

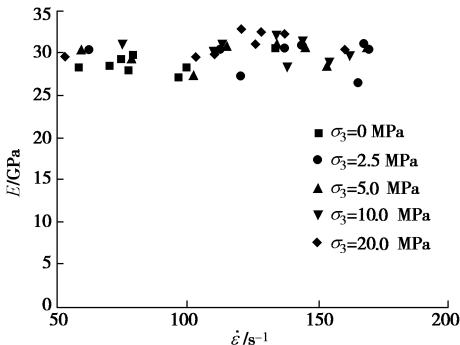


图 6 不同围压下弹性模量 - 应变率关系

Fig. 6 Relationship between elastic modulus and strain rates under different confining pressures

2.2 岩石破坏模式分析

(1) 单轴加载裂缝扩展



了解岩样在冲击荷载下裂缝形成和发展过程有助于弄清楚岩石动态破坏模式。岩样受冲击的破坏过程非常短暂, 因此想要观察岩样的破坏过程只能借助高速摄影仪。试验中将高速摄影仪对准试样侧面, 设置拍照的时间间隔为  $10\ \mu\text{s}$  进行连续拍照, 根据所拍照片就可以观察岩样中的裂缝产生与扩展过程。定义形成肉眼可见的裂缝为起始时刻(即  $0\ \mu\text{s}$ ), 图 7 给出了岩样受单轴冲击后裂缝生成与扩展的过程高速摄影, 试样左右两侧分别为透射杆和入射杆。应变率为  $58\ \text{s}^{-1}$  时, 根据图 7 (a) 岩样侧面有 1 条裂缝  $C_{1-1}$  产生, 经过  $500\ \mu\text{s}$  后, 裂缝  $C_{1-1}$  张开位移变大(图 7 (b)); 经过  $1\ 000\ \mu\text{s}$  后, 裂缝到达岩样的顶面和底面(图 7(c)), 随时间增长到  $1\ 300\ \mu\text{s}$ , 裂缝进一步张开, 但该侧面未见新生裂缝。应变率提高到  $99\ \text{s}^{-1}$  时, 根据图 7 (e)、(f), 可见  $50\ \mu\text{s}$  内岩样侧面先后出现两条裂缝  $C_{7-1}$  和  $C_{7-2}$ ,  $80\ \mu\text{s}$  后两裂缝到达岩样顶面和底面(图 7 (g)), 此后直到  $1\ 200\ \mu\text{s}$  (图 7 (h)) 没有新裂缝产生。当应变率为  $133\ \text{s}^{-1}$  时, 岩样裂缝生成与扩展过

程见图 7 (i) ~ (l) 所示, 第 1 条裂缝  $C_{8-1}$  产生  $40\ \mu\text{s}$  之后, 第 2 条裂缝  $C_{8-2}$  马上生成(图 7 (j)),  $110\ \mu\text{s}$  后第 3 条裂缝  $C_{8-3}$  出现(见图 7 (k)), 此后到  $270\ \mu\text{s}$  (图 7 (l)) 这段时间内, 未见有新裂缝产生。从以上 3 个岩样侧面照片可以看出, 随着应变率提高, 岩样中激活的裂纹数目增多, 破碎程度加剧。而且, 岩石裂纹的扩展速度也随之加快, 如应变率  $133\ \text{s}^{-1}$  情况下,  $270\ \mu\text{s}$  内裂纹就完成了激活与发展。从图 7 中还可看出, 裂缝扩展的方向与轴向基本一致, 这也印证了无围压下岩样轴向劈裂破坏的特征。

## (2) 冲击破坏模式

图 8 是在相同围压、不同应变率下岩石冲击破坏模式图, 当应变率偏低时, 岩石会碎裂成几块(图 8 (a)), 随着应变率的提高, 岩石碎块逐渐增多, 破碎程度加大。该组岩石主要沿着加载方向(轴向)产生破裂面, 为典型的轴向劈裂破坏。图 8 (b) 给出围压为  $20\ \text{MPa}$  时岩样破坏照片, 可见随应变率增大, 该组岩样破坏程度也在加大, 但由于围压的侧限作用,

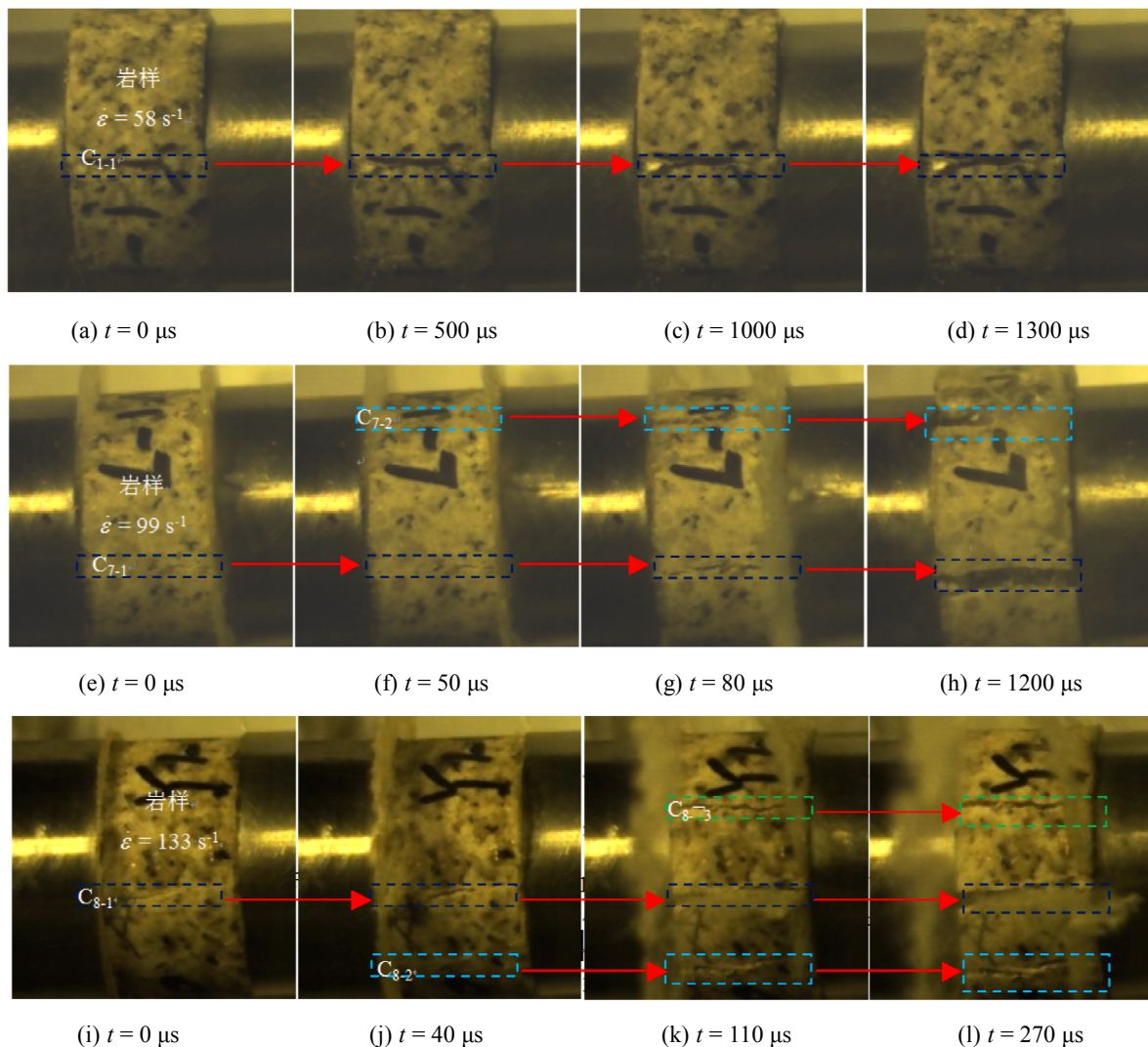


图 7 单轴冲击岩样破裂过程

Fig. 7 Fracture process of rock specimens under uniaxial impact

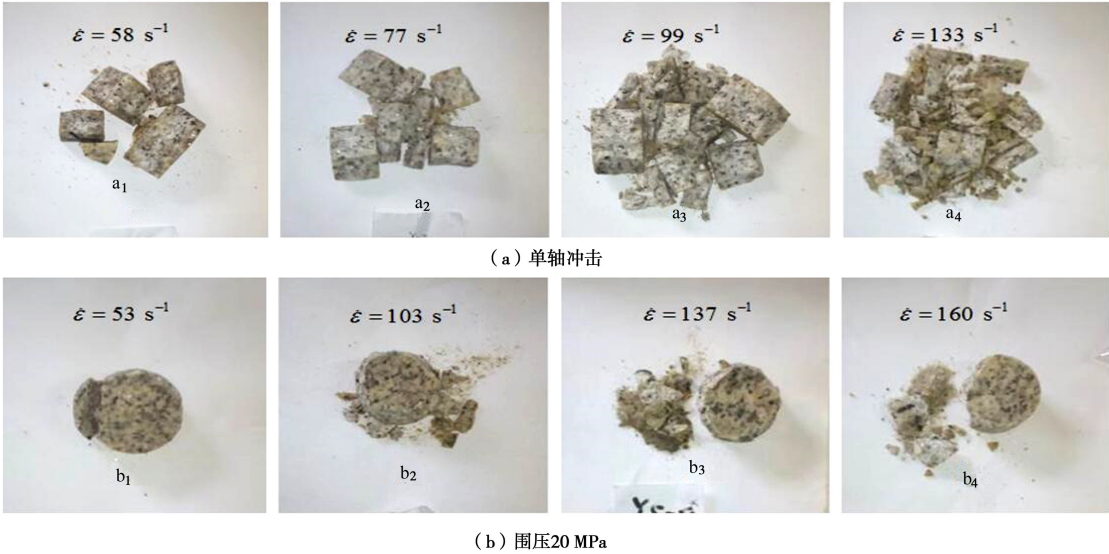


图 8 不同应变率下岩样的破坏模式

Fig. 8 Failure modes of rock specimens under different strain rates

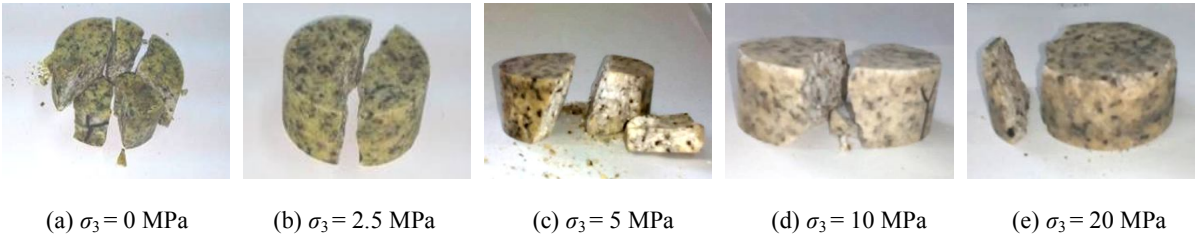


图 9 不同围压下花岗岩破坏模式

Fig. 9 Failure modes of granite under different confining pressures

表 4 破坏准则拟合参数

Table 4 Fitting parameters of failure criteria

$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	莫尔-库仑准则参数			霍克-布朗准则参数		
	$c_d / \text{MPa}$	$\varphi_d / (^\circ)$	相关系数	$\sigma_c / \text{MPa}$	$m$	相关系数
90	28.7	53.0	0.94	164.9	24	0.95
120	37.3	51.1	0.94	207.5	19	0.96
150	44.7	49.4	0.93	239.7	16	0.95

仅在冲击面形成较多裂纹，岩样局部剥落而整体不会发生大的破坏，岩样的破坏程度相比单轴冲击大幅降低，反映出围压对岩石变形的抑制作用。对比图 8 中应变率相近的两对岩样（a<sub>1</sub> 和 b<sub>1</sub>，a<sub>4</sub> 和 b<sub>3</sub>），可明显看出。

图 9 是不同围压下花岗岩破坏情况的侧视图，可以看出，围压为 0，2.5 MPa 时，岩样破裂面与轴向基本一致，破坏模式为轴向劈裂破坏；当围压为 5~20 MPa 时，岩样的破裂面与轴向成一定夹角，其破坏模式转变为压剪破坏。这说明高围压下，花岗岩的破坏模式由低围压的轴向劈裂破坏转为压剪破坏。

### 2.3 破坏准则适用性比较

为探讨围压对花岗岩冲击强度的影响，选取图 3 中拟合曲线上应变率  $\dot{\epsilon} = 90, 120, 150 \text{ s}^{-1}$  的点进行分析。分析围压和强度关系时，尝试将广泛用于岩石类材料静力状态的强度准则（即莫尔-库仑准则和霍克-

布朗准则）进行拟合分析，两准则的表达式分别为

$$\sigma_{1d} = [2c_d \cos \varphi_d + \sigma_3 (1 + \sin \varphi_d)] / (1 - \sin \varphi_d), \quad (1)$$
$$\sigma_{1d} = \sigma_3 + \sigma_c (m \sigma_3 / \sigma_c + 1)^{0.5}. \quad (2)$$

式中  $\sigma_{1d}$  为轴向动应力； $\sigma_c$  为单轴抗压强度； $m$  为材料参数； $c_d$  和  $\varphi_d$  分别为动黏聚力和动内摩擦角。拟合参数由表 4 给出，图 10 给出了相应的拟合曲线。由图 10 (a) 与表 4 可看出，当应变率由  $90 \text{ s}^{-1}$  增大到  $150 \text{ s}^{-1}$  时，内摩擦角  $\varphi_d$  由  $53.0^\circ$  减小到  $49.4^\circ$ ，降低了 6.8%，而黏聚力  $c_d$  则由 28.7 MPa 增大到 44.7 MPa，提高了 55.7%。这表明黑云母花岗岩的动内摩擦角对应变率变化的敏感性较低，即随应变率提高变化较小，而黏聚力受应变率的影响则非常明显，随应变率提高大幅度增加。因此，采用动态莫尔-库仑准则分析时，应变率效应集中体现在对黏聚力的影响。根据图 10 (b)、表 4 可知，采用霍克-布朗准则得出的单轴抗压强度随应变率提高明显增大，而材料参数  $m$  随应变率提高而

明显减小。对于相同岩石来说,  $m$  变化如此大幅度是不合理的, 这表明中高应变率下霍克-布朗准则适用性降低。表4显示采用莫尔-库仑准则拟合得到的相关系数均在0.9以上, 相关性很好, 说明莫尔-库仑准则对评估岩石的动态强度仍具有较高的适用性。

根据表4中动黏聚力和动内摩擦角随应变率变化情况, 采用对数函数与一次函数分别拟合分析后, 得出两者随应变率的变化曲线:

$$c_d = 28.9 \ln \dot{\epsilon} - 100.7 \quad (3)$$

$$\varphi_d = -0.07 \dot{\epsilon} + 59.2 \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1), 就可得出此类黑云母花岗岩动态载荷下的破坏准则表达式。

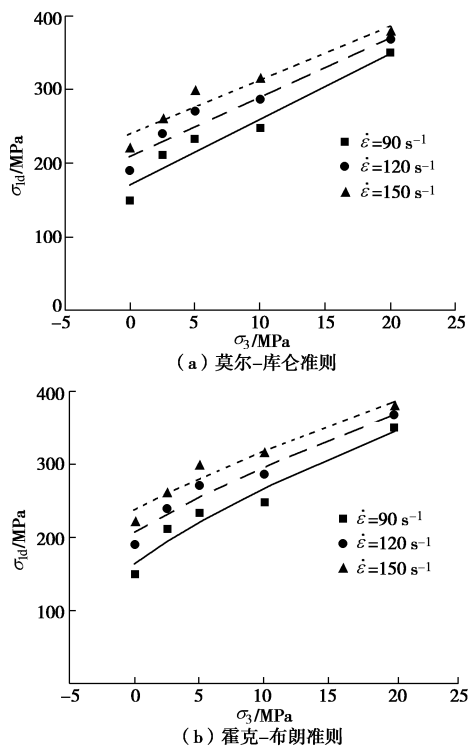


图10 不同应变率下强度-围压曲线

Fig. 10 Curves of strength and confining pressure under different strain rates

### 3 结 论

本文采用改进的SHPB和高速摄像机对黑云母花岗岩进行了冲击压缩试验, 在分析围压对花岗岩冲击变形和强度影响的基础上, 重点讨论了冲击过程中岩石强度的应变率效应、岩石破坏模式和强度准则, 得出以下3点结论。

(1) 随着应变率和围压的提高, 岩石抗压强度均有增大趋势, 其中抗压强度与应变率呈对数关系增大。在较高围压作用下, 花岗岩应力-应变曲线可见屈服平台、显现脆性到延性的转化特征。围压与应变率变化时, 弹性模量变化不明显。

(2) 围压相同而应变率增大时, 花岗岩的峰值应变增大, 同时其破裂程度加重; 当围压增大而加载应变率相近时, 岩石破坏程度明显减弱。在0和2.5 MPa下, 花岗岩破坏模式为轴向劈裂, 而围压大于5 MPa时, 以压剪破坏为主。

(3) 莫尔-库仑准则可用于评估中高应变率载荷下花岗岩的力学行为, 其中加载应变率效应主要体现在岩石的黏聚力随着应变率增大而大幅增大, 而内摩擦角随应变率增减只有较小变化, 即其应变率效应不甚明显。

致 谢: 本文试验是在中南大学资源与安全工程学院动力学实验室内完成, 感谢测试期间给予的指导和帮助。

### 参考文献:

- [1] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学研究进展[C]// 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]// Proceedings of the 9<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 49 - 62. (in Chinese))
- [2] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1278 - 1284. (QIAN Qi-hu, LI Shu-chen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1278 - 1284. (in Chinese))
- [3] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881 - 1886. (HUANG Li-xing, CHEN Yi-bai. Rock dynamics in China: past, present and future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1881 - 1886. (in Chinese))
- [4] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 865 - 874. (LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 865 - 874. (in Chinese))
- [5] 梁昌玉, 李 晓, 马超锋. 中等应变率加载条件下岩石的变形和力学特性研究进展及展望[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 88 - 95. (LIANG Chang-yu, LI Xiao, MA Chao-feng. Progress and prospects of research on deformation and mechanical properties of rock at intermediate strain rates[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(1): 88 - 95. (in Chinese))

- Chinese))
- [6] BRACE W F, MARTIN R J. A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1968, **5**(5): 415 - 426.
- [7] 吴绵拔, 刘远惠. 中等应变速率对岩石力学特性的影响[J]. *岩土力学*, 1980(1): 51 - 58. (WU Mian-ba, LIU Yuan-hui. The effect of intermediate strain rates on mechanical properties of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1980(1): 51 - 58. (in Chinese))
- [8] 李海波, 赵 坚, 李俊如, 等. 三轴情况下花岗岩动态力学特性的试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2004, **24**(5): 470 - 474. (LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Triaxial compression tests of a granite[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, **24**(5): 470 - 474. (in Chinese))
- [9] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994. (LI Xi-bing, GU De-sheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [10] CHRISTENSEN R J, SWANSON S R, BROWN W S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure [J]. *Experimental Mechanics*, 1972, **12**(11): 508 - 513.
- [11] 于亚伦. 用三轴 SHPB 装置研究岩石的动载特性 [J]. *岩土工程学报*, 1992, **14**(3): 76 - 79. (YU Ya-lun. The research of rock dynamic load properties by triaxial SHPB device[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, **14**(3): 76 - 79. (in Chinese))
- [12] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, **45**( 5) : 739-748.
- [13] 叶洲元, 李夕兵, 周子龙, 等. 三轴压缩岩石动静组合强度及变形特征的研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(7): 1981 - 1986. (YE Zhou-yuan, LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, et al. Static-dynamic coupling strength and deformation characteristics of rock under triaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(7): 1981 - 1986. (in Chinese))
- [14] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(6): 1179 - 1190. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(6): 1179 - 1190. (in Chinese))
- [15] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三轴 SHPB 加载下砂岩力学特性及破坏模式试验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, **31**(8): 29 - 32. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Tests for sandstone mechanical properties and failure model under triaxial SHPB loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, **31**(8): 29 - 32. (in Chinese))
- [16] 金解放, 李夕兵, 钟海兵, 等. 三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(7): 1358 - 1372. (JIN Jie-fang, LI Xi-bing, ZHONG Hai-bing, et al. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three dimensional coupled static-cyclic impact loadings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(7): 1358 - 1372. (in Chinese))
- [17] 许金余, 吕晓聪, 张 军, 等. 围压条件下岩石循环冲击损伤的能量特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 2): 4159 - 4165. (XU Jin-yu, LÜ Xiao-cong, ZHANG Jun, et al. Research on energy properties of rock cyclical impact damage under confining pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S2): 4159 - 4165. (in Chinese))
- [18] 吕晓聪, 许金余, 赵德辉, 等. 冲击荷载循环作用下砂岩动态力学性能的围压效应研究[J]. *工程力学*, 2011, **28**(1): 138 - 144. (LÜ Xiao-cong, XU Jin-yu, ZHAO De-hui, et al. Research on confining pressure effect of sandstone dynamic mechanical performance under the cyclic impact loadings[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28**(1): 138 - 144. (in Chinese))