

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2013.06.007

冲击荷载作用下岩石的变形与破坏试验分析

郭连军^{1,2}, 杨跃辉¹, 华悦含²

(1. 辽宁科技大学 土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 采用直径为 50 mm 的分离式霍普金森压杆试验设备, 研究花岗岩样在不同冲击气体压力下的力学性能, 并分析其变形过程和破坏形态。结果表明: 应变历程曲线在一定的时间阶段后表现出明显不同, 平均应变率与冲击气体压力间有某种拟合关系; 岩石的应力与应变曲线可以划分成四个阶段, 并且冲击气压存在一个使得岩石的破碎效果明显的合理值; 其破坏形式大都以沿轴向方向的劈裂破坏为主, 但是如果在较高的冲击气压作用下, 则呈现压碎破坏形式。

关键词: 岩石; SHPB 试验设备; 应变; 破坏

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)06-0031-04

Test and Analysis on Distortion and Damage of Rock under Impact Loading

GUO Lian-jun^{1,2}, YANG Yue-hui¹, HUA Yue-han²

(1. College of Civil Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114051, China;

2. College of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: A 50 mm diameter split Hopkinson pressure bar apparatus is applied to research the mechanical properties of the granite under different gas pressure and its distortion process and damage form. The results indicate that there is a certain fitting relationship between the average strain rate and impact pressure, and after a certain time period, the time history curves of strain show significant different; the rock's stress and strain curves can be divided into four stages, and the impact pressure has a reasonable value that will make an obvious impact on the broken rock; the damage forms of fracturing present an axial cleaving mode as the major and crushing mode under the high impact pressure.

Keywords: rock; SHPB apparatus; strain; damage

0 引言

伴随着我国大量基础设施和冶金矿山的修建, 岩石动力学在众多工程领域所扮演的角色越来越重要, 在隧道施工、矿山开采等实际工程当中, 大多数岩体都会不同程度的受到动态载荷的作用, 比如时常受到爆炸及其振动、开挖扰动、地震荷载等因素的影响。研究这些工程问题都会牵涉到冲击荷载作用下的岩石动力学性能^[1], 这给岩石力学带来新的发展机遇, 同时也提出了许多严峻挑战^[2-3], 作为研究的关键问题, 冲击荷载的作用下, 岩石的应变与破坏已经受到学术界与工程界的广泛关注^[4-5]。近年来取得一系列的研究成果^[6-11], 本文结合这些研

究成果, 利用 SHPB 试验, 针对采自鞍钢矿业公司大孤山铁矿现场的花岗岩进行单轴冲击压缩试验研究, 通过该试验来分析处于冲击荷载作用下岩石的应变与破坏, 以期研究结果能对矿山的生产实践提供帮助。

1 SHPB 试验

1.1 试验装置

本文的试验设备采用分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar), 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、杆件及调整支架、操纵台等; 能源系统包括: 空气压缩机、

收稿日期: 2013-07-03

修稿日期: 2013-08-07

基金项目: 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助 (LR2011006)

作者简介: 郭连军 (1963—), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 教授, 主要从事爆破工程和岩土工程方面的研究与教学工作。

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。压杆直径为 50 mm,入射杆长

1 800 mm,透射杆 1 800 mm,射弹长 500 mm,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 750 kg/m³。

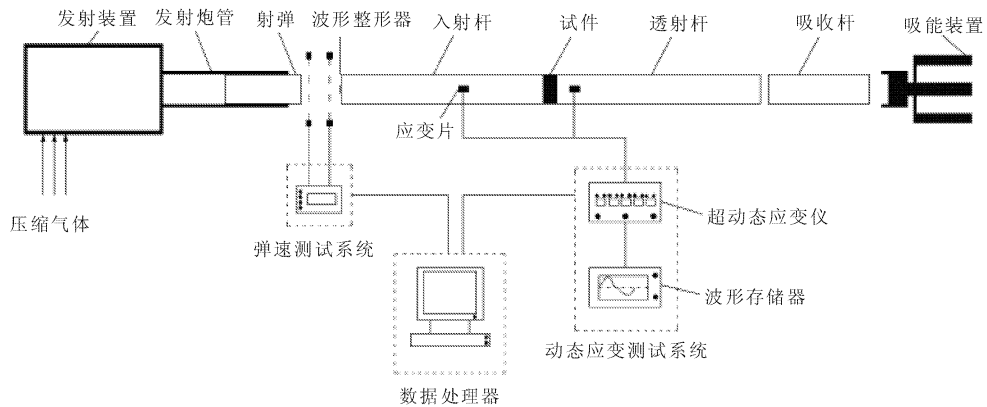


图 1 Φ50 mm SHPB 试验装置

1.2 试验材料

本次试验所用的岩样为采自鞍钢矿业公司大孤山铁矿的花岗岩,为了符合 SHPB 试验当中应力均匀性条件,有效减小惯性效应对试验结果的影响,更好的体现岩石动态力学性能,选取岩石试样最佳尺寸为 50 mm×25 mm,其常规静力学实验力学指标如下表 1。

表 1 花岗岩试件物理力学参数

密度 /(g·cm ⁻³)	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比 μ
2.565	68.200	41.860	0.225

1.3 试验方法及结果

采用 Φ50 mm SHPB 试验装置,对花岗岩在 5 组不同的冲击气体压力下进行试验,实验记录如表 2。

表 2 花岗岩试件 SHPB 冲击试验数据记录

冲击气压 /MPa	试件 编号	平均应变 率/s ⁻¹	平均应变率 均值/s ⁻¹	破坏 形态
0.1	NO.1-1	98.9441		
	NO.1-2	108.5635	104.2783	大块
	NO.1-3	105.3274		
0.2	NO.2-1	160.5969		
	NO.2-2	149.8933	154.579	大块
	NO.2-3	153.2467		
0.3	NO.3-1	259.5403		
	NO.3-2	256.4304	257.4479	小块
	NO.3-3	256.3729		
0.4	NO.4-1	355.5075		
	NO.4-2	334.8889	343.5443	粉碎
	NO.4-3	340.2365		
0.5	NO.5-1	424.3217		
	NO.5-2	420.6548	420.8051	粉碎
	NO.5-3	417.4389		

2 试验分析

2.1 岩石的应变特性

利用不同的冲击气体压力对花岗岩试样进行试验,得到应变的时间历程曲线如图 2 所示,图 2 显示花岗岩试样在冲击压缩试验中,伴随着冲击气体压力的逐渐增大,试件的应变也在不断增加,并且增加的幅度也随之变大,表现出强烈的相关性。出现这种状况,可以归结为在冲击气压较低时,只有那种需要较小的能量便能使得岩石破坏的裂纹开始扩展,此时起作用的细观裂纹数目少,岩石破碎块度比较大,达到破碎的临界应力值较低,也就是抗压强度低。冲击气压升高,更多的细观裂纹参与岩石的破

碎过程,从而使得岩石的破碎块度更小,岩石材料达到破碎临界应力值更高,也就是高应变率下岩石材料的抗压强度随之增大。曲线 NO.1~NO.3 与 NO.4~NO.5 在 130 μs 后有明显的差异,具体而言,就是曲线 NO.1~NO.3 的应变随时间改变量在单位时间内相差不大,而曲线 NO.4~NO.5 的应变随时间改变量在单位时间内相差悬殊,之所以会出现这种状况是因为在同一时间区间内,在较高的冲击气压下,岩石的应变区间显著增大,而在较低的冲击气压下,岩石的应变区间相对来说变化不太明显。归纳起来,也就是在冲击气体压力比较小时,应变率的取值

范围变化区间比较小,曲线相对来说平缓;伴随着冲击气体压力逐渐变大时,应变率的取值范围变化区间变大,曲线相对来说变得陡峭起来。

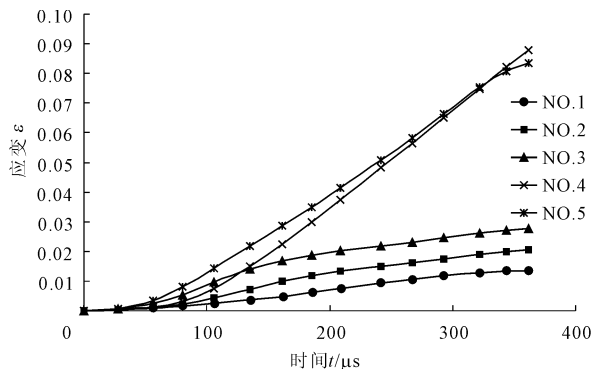


图 2 应变时间历程曲线

试验当中,其它条件保持不变,只改变冲击气体的压力,研究其对试件应变率的影响,拟合出 5 种光滑曲线方程,列于表 3。

表 3 花岗岩试件平均应变率—冲击压力拟合曲线方程

曲线类型	曲线方程	相关系数 R^2
线性函数	$\dot{\epsilon} = 822.0200F + 9.5252$	0.9900
多项式函数	$\dot{\epsilon} = 265.3400F^2 + 662.8100F + 28.0990$	0.9914
对数函数	$\dot{\epsilon} = 196.3900\ln(F) + 520.3000$	0.9129
幂函数	$\dot{\epsilon} = 755.0300F^{0.8944}$	0.9750
指数函数	$\dot{\epsilon} = 77.2100e^{3.5904F}$	0.9725

对比相关系数,花岗岩试件的平均应变率 $\dot{\epsilon}$ 和冲击气体压力 F 间为多项式关系,具有很强的相关性,其表达式为:

$$\dot{\epsilon} = 265.3400F^2 + 662.8100F + 28.099 \quad (R^2 = 0.9914)$$

在冲击荷载作用下,花岗岩的应力—应变曲线如图 3 所示,可以大致划分成四个阶段,第一阶段为初始压密阶段,岩石材料本身固有的裂纹、孔洞、孔隙及其他微观缺陷的逐渐压密与闭合,应力与应变曲线呈下凹状态。第二阶段为稳定变形阶段,在这一阶段,应力与应变之间呈现为正比例关系,服从胡克定律,弹性模量基本保持不变。第三阶段为非线性弹性阶段,应力与应变曲线表现为非线性变形,曲线逐渐偏离直线而上凸,斜率逐渐减小,试件内部损伤加剧,微裂纹加速扩展,材料整体发生相对滑移或者剪切。第四阶段为破坏阶段,试样内部发生损伤,逐渐屈服破坏,应力与应变曲线偏离直线。试件内的应力达到其能够承受的极限能力,形成了宏观的破裂面,导致试样承载能力下降。

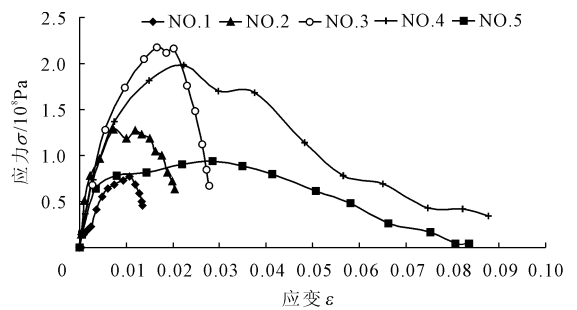


图 3 应力—应变曲线

由图 3 可见,花岗岩的起始加载应力—应变曲线比较重合,其初始的弹性模量基本不随应变率的增加而发生显著的变化,即花岗岩的初始弹性模量对应变率不敏感,但是各曲线在过了峰值点之后,则表现出明显的差异性。NO.1 ~ NO.3 曲线在峰后随着变形的持续增加,应力不断降低,曲线有一定的反弹趋势,说明试样在变形的后期仍有部分的抵抗能力;NO.4 曲线起始阶段按照 NO.3 曲线的发展趋势变化,但是在后期应变的变化量很明显;NO.5 曲线则与上述的所有曲线有显著的差别,应力的改变幅值相差不大,应变的变动范围尤为明显。上述现象表明岩石冲击气压存在一个使得岩石的破碎效果明显的合理值,就本试验而言,该值在 0.3 MPa ~ 0.4 MPa 之间,更加偏重于略大于 0.3 MPa,而在过大的冲击气压下,岩石试样内部的细观裂纹在短时间内来不及拓展,已经发生了试样破坏,表现出来的就是试样的应力与应变发展不协调。

2.2 花岗岩的破坏

试验当中,利用美国 AOS 公司型号为 S-Motion 的高速摄影机记录岩石试件在 0.3 MPa 冲击气体压力作用下的实际破坏过程。从图 4 中可以看出花岗岩试件夹持在入射杆与透射杆之间,在起始阶段可以观察到岩石的裂纹首先出现侧面,其次随着时间的推移,在岩石试件的轴向方向出现许多的劈裂面,直到最后形成无数碎片掉落或者飞溅出去。其破坏形式大都以沿轴向方向的拉伸劈裂破坏为主。因为在单轴压缩条件下,岩样应处于单一的受力状态,试件的侧面为自由面,压缩波经反射后形成拉伸波,对于岩石来说,抗拉强度远远低于抗压强度,易导致拉伸破坏。但是如果在较高的冲击气压作用下,由于破碎程度严重,呈现压碎破坏形式。

在该次针对花岗岩的冲击试验当中,以 5 组不同强度的气体压力条件下做冲击试验,收集不同情况下的岩石碎块如图 5 所示。从图 5 中可以看出,

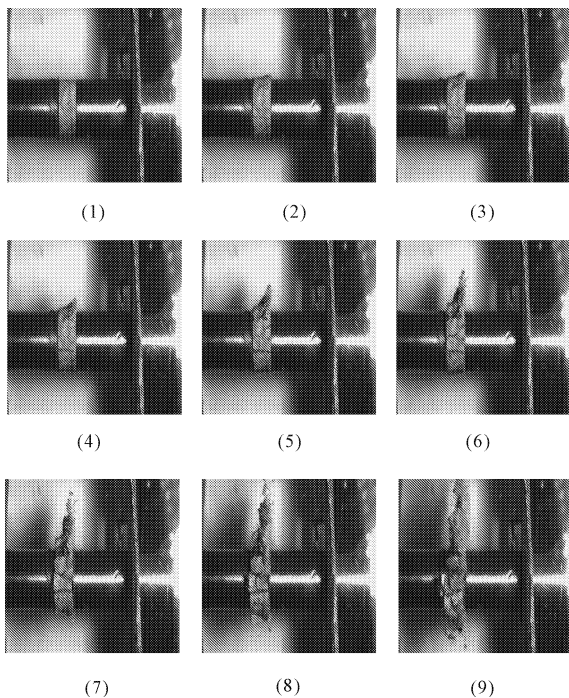


图 4 岩石破坏过程

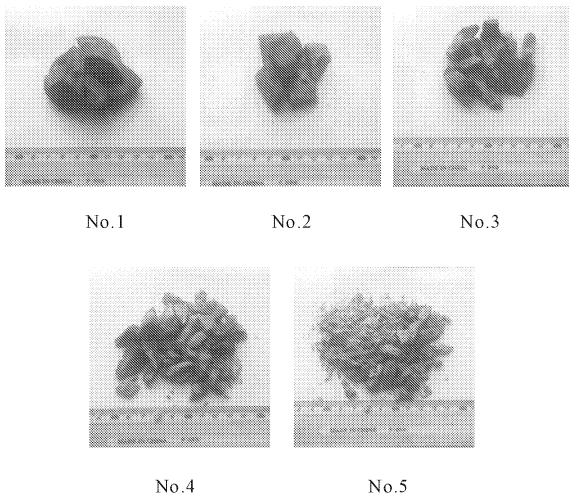


图 5 不同冲击气压作用下的颗粒图

冲击气体压力在 0.1 MPa、0.2 MPa 时,花岗岩试件当中产生了平行于轴向方向的裂纹,试验结束后,收集的岩石块体是大的碎块;冲击气体压力在 0.3 MPa 时,收集到的花岗岩试件是小的碎块及碎屑;冲击气体压力在 0.4 MPa、0.5 MPa 时,收集到的花岗岩试件是数量居多的碎屑以及少量的碎块。产生这种差异的原因,从微观方面解释是在冲击荷载的作用下,花岗岩能够在毫秒甚至是微秒的时间段以内积聚大量的能量,并且岩石裂隙的破坏进展速度小于加载速度,这就促使岩石在冲击荷载的作用下,本身固有的裂隙与缺陷以及新生成的裂隙与缺陷向不同的方向不同的层次发展,其它条件基本相同的情

况下,冲击压力越大,这种激发原有裂隙与缺陷,并且生成新的裂隙与缺陷的效果愈明显。

3 结 论

本文利用 SHPB 试验设备,对 5 种冲击气体压力下的花岗岩试件进行动态压缩试验,在此基础上对试验结果进行了分析,得出如下结论:

(1) 花岗岩试件的平均应变率与冲击的气体压力具有相关性,二者之间是多项式的拟合关系可能性更大,在试验当中,平均应变率由 104.2783 s^{-1} 增加至 420.8051 s^{-1} ;但在冲击气压增大的条件下,应变随时间的增加幅度有显著差别。

(2) 冲击荷载作用下,岩石的应力与应变曲线同静态荷载作用下的相同,也可以划分成四个阶段:初始压缩阶段、稳定变形阶段、非线性弹性阶段与破坏阶段。此外,花岗岩的初始加载应力应变曲线比较重合,但是各曲线在过了峰值点之后,则表现出明显的差异性,该种现象表明岩石的冲击气压存在一个使得岩石的破碎效果明显的合理值,就本试验而言,该值在 0.3 MPa ~ 0.4 MPa 之间,更加偏重于略大于 0.3 MPa。

(3) 岩石材料本身的复杂性,同时加上实验设备的局限性,这就使得岩石的破坏形式往往是以组合的模式出现,冲击的气体压力越大,破坏越严重。从高速摄像机拍摄的图片可以看出,试验当中花岗岩的破坏形式是沿轴向方向的拉伸劈裂破坏。

在 SHPB 试验的基础上,分析了冲击荷载的作用下花岗岩的变形与破坏,得出的结论可以为工程实践提供参考意见,但是对于在冲击荷载作用下的应力与应变和破坏的关系还要深入研究,相关的参数还需要更多的实验数据支持。

参考文献:

- [1] 戴 俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:1-2.
- [2] 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.
- [3] 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[C]//香山第 175 次科学会议. 北京,2001,北京:中国环境科学出版社,2002:179-192.
- [4] 李 刚,陈正汉,谢 云,等. 高应变率条件下三峡工程花岗岩动力特性的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1833-1840.

(下转第 49 页)