

单轴冲击下填充泥体花岗岩力学特性试验

袁康¹, 万文^{1*}, 赵延林¹, 成江²

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:基于 SHPB 装置加载进行了花岗岩试样中空或含泥的单轴冲击试验,通过分析在近同应变率下不同内孔径,填充不同含水率泥浆花岗岩的强度变化和动态力学性能,来研究花岗岩夹泥状态下抗冲击荷载能力变化规律、受力特性.采用霍普金森杆装置进行花岗岩试件动态冲击试验,结果表明:花岗岩峰值应力随内孔径的增大而减小,开口孔径和峰值应力呈负相关关系,孔径越小,初始动态弹性模量越大,应力应变曲线切线斜率大;泥浆含水率越大,峰值应力越大,且会逐渐出现曲线峰后塑性现象.

关键词:花岗岩;泥浆;冲击荷载;应力;应变;应力波

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)02-0029-06

Experimental Study on Mud Filling Body under the Uniaxial Impact Granite Mechanical Properties

Yuan Kang¹, Wan Wen¹, Zhao Yanlin¹, Cheng Jiang²

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of the rock impact dynamics, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Civil engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the SHPB device, the granite hollow or mud-bearing uniaxial impact test is carried out by impinging and loading the granite. Through analyzing the intensity variation and dynamic mechanical properties of granite with different internal pore sizes under parallel strain rates and filled by different moisture content mud, the paper intends to research the variation law of resistance to impact load and dynamic mechanical characteristics of the granite with the condition of intercalated gouge. The dynamic impact test of granite using the Hopkinson bar device, and the results show that the peak stress of the granite decreases with the increase of the pore size, and the pore size and the peak stress are negatively correlated. The smaller the pore size is, the larger the dynamic elastic modulus and the tangent of stress-strain curve slope are. The higher the moisture content of the mud, the higher the peak stress, and it will gradually appear the post peak plasticity curve phenomenon.

Keywords: granite; mud; impact loading; stress; strain; stress wave

自 Attewell^[1,2]用冲击试验来研究岩石动态力学特性以来,国内外学者又对水饱和岩石的动态力学特性研究做了大量工作,留下了宝贵的经验^[3],但研究仅局限于水饱和岩石情况,对于泥浆填充入岩石内还甚少涉及,实际中大型边坡和地下洞室的重大工程往往是泥浆作用岩石居多,这就涉及到含泥浆岩石动态破坏规律的研究工作.现代工程的发展给岩石动力学性质的研究提出了更高的要求,另一面,岩石动力学性质的研究成果为工程实例提供了强大技术支持,为更准确描述动载荷下岩石的破坏规律创造了条件.岩石空心,夹泥岩石的力学性质表现比完整下的复杂很多,因而对试验测试方法与测试系统提出了高要求.近些年来,大量国内外学者将霍布金森压杆技术应用在复杂岩石动力学的性质研究中,其中单仁亮^[4]对不同冲击载荷下岩石的全称本构特性进行了研究,取得了大量研究成果.在早期,以 L.米勒为代表,提出野

外大块试件的动力学试验结果可以表示岩体力学性质;K.E.胡克等,提出试块的实验室结果,有的可以表征岩体力学性质,而有的就不能表征出,或只能表征出岩体部分的力学性质.实际情况中,这一设想的实现途径还不具体,部分人对于这两种观点又持怀疑态度.笔者认为观点对各向同性岩体的分析是有效果的,对各向异性岩体还需考虑岩体的复杂地质构造特点和工程实际应用特点,如此才能给出具有工程参考价值的岩体力学性质.

以往研究采取的大都是对完整岩块施加冲击荷载,研究动载荷作用下试件的应力应变变化规律,但是将泥浆灌入岩块试件,从而导致岩块受力不均匀.故本文尝试在圆柱体花岗岩试件内部灌入泥浆,通过冲击荷载致试件破坏来研究泥浆填充入试件内部,在动载荷下,花岗岩应力应变曲线的变化规律,峰值应力变化规律.相比采用实心完整试件试验,本试件试验更具实用意义,这对揭示泥土环境下工程岩体灾害发生机制和防治是很有参考价值的.

1 试验准备

1.1 岩石试件的制备

试验所采用花岗岩完整性和均匀性良好,岩块试件经过切割打磨成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 圆柱体试件,端面平整度控制在 0.02 mm 以内,符合实验仪器要求.在圆柱体岩块通过钻孔取芯,将圆柱体试件中心钻不同内径圆孔,为满足试验要求,内径分别为 $5, 10, 15, 20 \text{ mm}$.图 1 为实心试件与钻心试件直观图.



图 1 花岗岩试样直观图

1.2 泥浆制取配比与灌入试件

试验所选用土样为南方广泛存在的粘性土,将土体压实翻捣后晒干,按《土工试验方法标准》(GBT50123-1999)进行液塑限测定实验,取一定量风干粘性土铺展在橡胶板上碾碎,取代表性土样 200 g ,接着过 0.5 mm 筛后用调土皿加入一定纯水将土样调制均匀膏状,浸润过夜.通过液塑限联合测定仪测定粘性土液塑限,可得到粘性土液限含水率为 38.66% ,塑限含水率为 19.81% .并根据试验测得的粘性土液塑限配置 $10\%, 20\%, 30\%, 40\%$ 含水率的泥浆,将配制不同含水率的泥浆分别灌入岩石试件.而灌入试件泥浆若无法保证内孔充实性,空隙将对应力波传播产生极大影响,所以需将试件充填后经振捣台进行均匀振捣,如此反复,至振捣密实泥浆充分填满至试样内孔被泥浆密实填满,将端面多余泥渍清理干净,保证端面平整.在振捣过程中,为保证填充泥浆含水率的准确性,将试件底端用胶带密封,确保振捣时水分不会洒出.表 1 为 3 组对比试样的基本物理参数.

表 1 花岗岩试样基本物理参数

试件编号	mm		
	内径	外径	高
1-1	4.92	48.28	50.25
1-2	10.09	48.47	50.71
1-3	14.76	48.26	50.21
1-4	19.85	48.33	50.70
2-1	5.01	48.28	50.79
2-2	10.18	48.29	50.34
2-3	14.49	48.40	50.03
2-4	19.77	48.38	50.58
3-1	14.93	48.71	50.21
3-2	14.83	48.39	50.17
3-3	14.98	48.32	50.04
3-4	14.40	48.70	50.36

1.3 试验原理

在氮气压力下,冲头会以一定速度与输入杆对心碰撞,一维应力波在弹性杆中传播无畸变,即弹性应力波在输入杆中以波速 $C_e = \sqrt{E_e/\rho_e}$ 向前传播, E_e 为入射能量, ρ_e 为弹性杆阻抗,经历 L_e/C_e 的时间 (L_e 为输入杆长度),脉冲传播至杆件和岩样的交界面 A_1 处,杆件与岩样波阻抗不同,波在界面处发生反射和透射,透射波随即到达岩样与输出杆交界面 A_2 ,同时也发生透反射^[5].经过反复多次透反射,岩样和两端面的应力应变达到基本一致,通过 YOKOGAWA-DL850 瞬态波形存储器将入射、反射和透射波 $\sigma_1(t)$, $\sigma_R(t)$, $\sigma_T(t)$ 记录下来,可获得岩样 $\sigma - \varepsilon - \dot{\varepsilon}$ 关系.

根据界面 A_1 上的速度与应力连续条件,有

$$V_{SI} = V_I + V_R; \tag{1}$$

$$\sigma_{SI}A_s = (\sigma_I - \sigma_R)A_e; \tag{2}$$

$$\sigma = \rho CV. \tag{3}$$

试样动态力学参数计算公式为

$$\sigma(t) = \frac{A_e}{2A_s}(\sigma_I(t) - \sigma_R(t) + \sigma_T(t)); \tag{4}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} \int_0^t [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] dt; \tag{5}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) - \sigma_T(t)]. \tag{6}$$

式中: V_{SI} 为界面 A_1 的波速; V_I 为入射波速; V_R 为反射波速; σ_{SI} 为界面 A_1 应力; $\sigma_I(t)$, $\sigma_R(t)$, $\sigma_T(t)$ 分别为弹性杆上所测得的 t 时刻入射应力、反射应力、透射应力; $\rho_e C_e$ 为弹性杆波阻抗; A_e , A_s 分别为弹性杆和试样截面积; $\sigma(t)$ 为 t 时刻应力; $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻试样应变; $\dot{\varepsilon}(t)$ 为 t 时刻试样应变率; L_s 为试样长度; σ 为应力; ρC 为波阻抗; V 为波速.

试样受到冲击时,应力波在试样与弹性杆交界面上发生透反射,如图 2 所示.

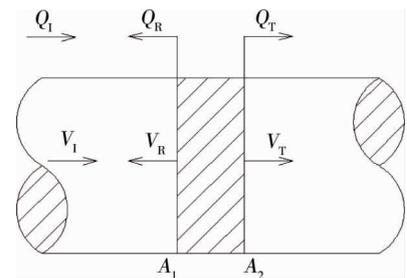


图 2 应力波在试样与弹性杆交界面上作用

2 试验过程

2.1 试验设备

冲击荷载下岩石动态力学特性研究试验在湖南科技大学岩石冲击动力学试验室的霍布金森压杆装置平台上进行,如图 3 所示.霍布金森压杆测试系统由动力源、弹性压力杆、支撑架、超动态应变仪等构成.设备本质上是一种可用于冲击时的脉冲波形的弹性杆,弹性杆材质采用 40Cr 合金钢,加载应力的半正弦波通过圆锥形冲头冲击实现.

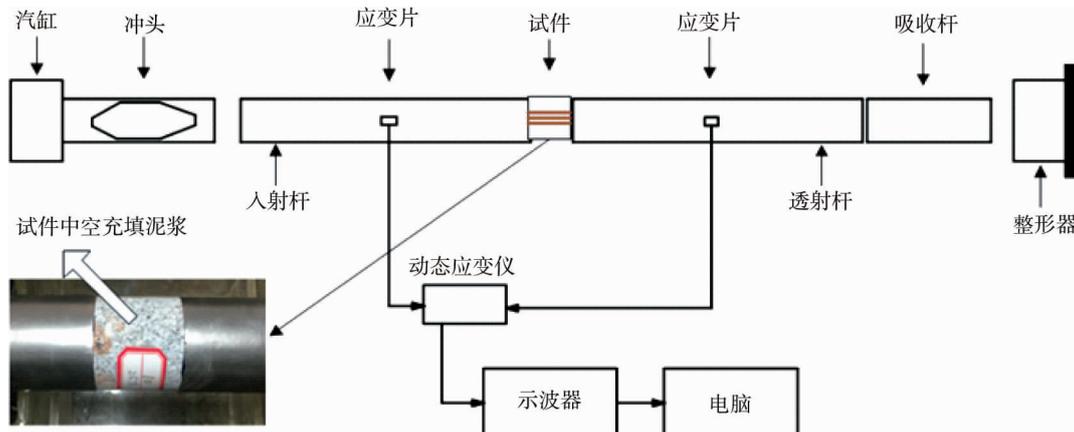


图 3 SHPB 装置结构

2.2 试验步骤及方法

试样直径与弹性杆尺寸一致,需对准透射杆安放,用入射杆对心夹紧试块.由于弹性杆与试样端面处的横向运动是不同的,为削弱端面效应,可在两端交界面涂上黄油.压缩氮气,纺锥形结构冲头径向冲击入射杆,由超动态应变仪记录波形,步骤如下:

- 1) 准备试样;
- 2) 粘贴应变片,检查仪器设备是否正常;
- 3) 关闭组合阀,打开氮气瓶开关,分别打开内阀外阀调节气压平衡;
- 4) 将试件两端涂抹黄油放入两个压杆之间,确保对齐接触,根据试验设计,直接加载所需压力水平;
- 5) 将冲头推进发射腔一定位置;
- 6) 调节应变仪,准备采集数据,准备就绪;
- 7) 启动冲头发射,冲击输入杆,数据采集系统采集信号并存盘;
- 8) 保存数据;
- 9) 数据分析与处理;
- 10) 试验完毕,关闭所有仪器,拧紧气罐开关.

在试验中,为尽可能控制冲击强度保持一致性,保证每次冲击强度相同,入射能近同.每次冲击时将冲头推入发射腔位置需为同一位置,并标记该位置,且控制气泵气压恒定.

3 试验结果分析

3.1 单轴动载荷下岩石的应力应变曲线变化特性

应力-应变曲线是非常重要的用来描述材料的力学特性的图形,我们通过应力-应变曲线来分析不同内径和填充不同含水率泥浆状态下花岗岩的峰值强度变化和曲线走势变化规律.在相同冲击强度下,不同内孔径花岗岩试件的应力峰值和应力应变关系表现出不同的特性. Attewell 和 Rinehart 等早期研究表明:岩石的动态强度随着加载率的增加而增加^[1].但一般认为,增加加载的应变率或者是改变试样的形状,并不会改变岩石应力-应变曲线的基本模型^[6-8],在控制每组对比试件的应变率近同情况下,有3组对比数据图.图4为不同内孔径下中空不填充泥体花岗岩试件的应力-应变曲线,图5是将含水率为30%的泥浆填充到不同孔径的花岗岩试件内部的花岗岩应力-应变曲线,图6是内孔径为10 mm 填充不同含水率的泥浆的花岗岩应力-应变曲线.

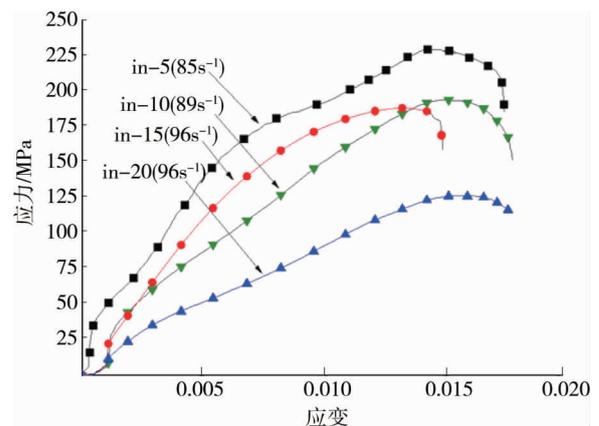


图4 中空不同内孔径花岗岩应力-应变曲线

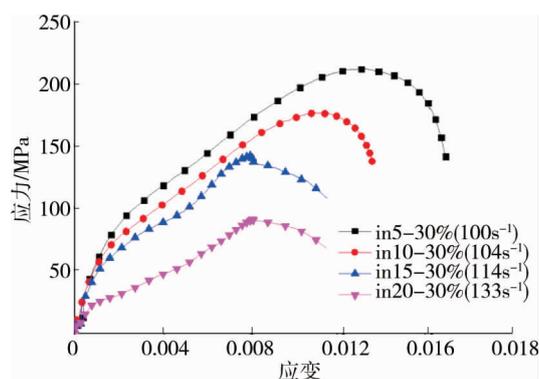


图5 填充30%含水率泥浆花岗岩应力-应变曲线

由图4可知,在弹性阶段或破坏前,应力-应变曲线初始段上升趋势相同,因为仅有内孔径的大小带来的影响,但相比较在内孔径较小时,应力应变曲线前段斜率明显大于内孔径较大试件,说明其动弹模量更大,随着应变的增加,直到峰值应力之前应力-应变曲线的上升斜率又减小了,这是4条应力-应变曲线所共有的特征.当达到应力最高值后花岗岩进入塑性状态,且相对有较短一段时间处于这个状态,此时应力波传播速度远远大于裂缝发展的速度,也就没有裂缝发育的机会,只能有新的裂纹产生^[9,10].在应力应变曲线峰后阶段,出现了应力卸载现象,应变几乎不增长,应力迅速跌落,从图4可知,4条曲线都出现了应力回弹或应力回弹趋势.

如图5所示,在控制不同孔径的试样且泥浆含水率相同的情况下,孔径5 mm和孔径10 mm的曲线峰后阶段出现了峰后塑性.对比图4,分析填充泥浆后在花岗岩达到峰值应力时,泥浆增强了试件塑性使得应力卸载速度减慢.孔径15 mm和孔径20 mm并没有严格按照填充泥浆后出现峰后塑性,但总体趋势是填充泥浆后峰后应力卸载速度变慢.

如图6所示,当泥浆含水率为10%的试样出现了峰后应力回弹,但随着泥浆含水率的增加这种现象逐渐消失,甚至曲线有峰后塑性变化趋势,且在相同内孔径下随着含水率的增加,岩样峰值应力增加.这与图5中大孔径试样内径填充更多泥浆后的曲线峰后塑性现象相呼应.于是,分析试样内径越大填充更多泥土或更高含水率的泥土能使花岗岩应力峰后抗动荷载能力增强.同时,应力峰值也随着泥浆含水率的增大而增大,表明泥浆的含水率对试样强度影响显著.

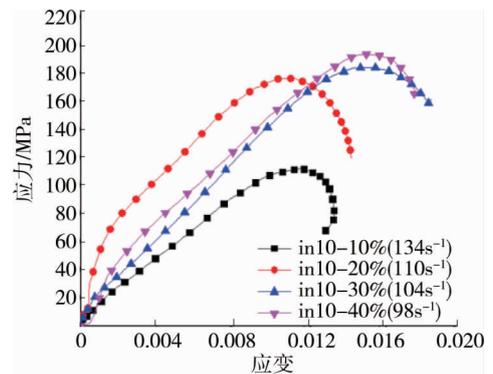


图6 10 mm内孔径填充不同含水率花岗岩应力-应变曲线

3.2 峰值应力与内孔径关系

不同内孔径对应的峰值应力是不同的,结果如表2所示.表2数据体现出峰值应力规律性下降,随着内孔径的增大,花岗岩试件的峰值应力是逐步下降的.由于岩石内部空洞,受轴向冲击荷载时,中间部分不能承担应力作用,外径岩体承担外部荷载,且孔径的增大,横向环形截面积越小,所能承担的外部荷载随着减小,对比曲线,当内孔径增大到20 mm时峰值应力几乎仅为实心试件的一半.

表2 不同内孔径对峰值应力的影响

内孔径/mm	峰值应力/MPa	占实心试件峰值应力百分比/%
0	235	100
5	228	97
10	193	82
15	188	80
20	126	53

由表2以及上述分析可知,不同内孔径对试件应力应变曲线的影响可归纳为:在应力应变曲线初始阶段,试件的内孔径越小,它的初始动态模量越大,应力应变曲线切线斜率大,试件的塑性更强.且当内孔径增加到20 mm时,试件的初始动态模量减小非常明显.当试件的内径较小时,与实心试件相比,对其峰值应力的影响不大.但随着内孔径的逐渐增大,应力峰值降低明显,说明内孔径的增大对试件强度影响很大.在曲线后段部分,内孔径5 mm试件有应力卸载现象,即应变增加很少,而应力却瞬间下降很多,且随着孔径增大,曲线应力卸载现象慢慢消失.

3.3 在填充不同含水率泥浆试样峰值应力变化规律

不同泥浆含水率对内孔径为10 mm试件峰值应力的影响如图6所示.

如图6,考虑以内径10 mm为例讨论泥浆的不同含水率和峰值应力的关系.可以明显看出总体趋势为随着泥浆含水率的增加,花岗岩试件的峰值应力递增,且当泥浆的含水率达到40%时,其应力峰值为200 MPa,与空心试件的应力峰值193 MPa相差无几.

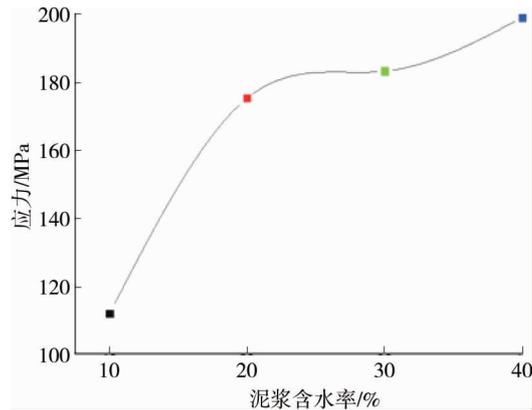


图6 峰值应力随泥浆含水率升高走势

4 结论

1) 在对花岗岩单轴冲击过程中,应力-应变曲线平稳未出现跌荡,试验过程平稳顺利,故试验数据是可靠的,所以用霍布金森杆装置进行对不同内孔径和填充不同含水率泥浆花岗岩试样的动态力学特性研究是合理的试验方法。

2) 不同内孔径岩样的全程应力-应变曲线都会经历压密阶段、弹性阶段、塑性变形阶段.发现内孔径对花岗岩峰值强度影响较大,表现出内孔径越大峰值应力越小的规律性特征。

3) 相同内孔径岩样填充不同含水率泥浆,表现出随着含水率的增加,花岗岩峰值应力增加,逐渐出现曲线峰后塑性现象.分析岩样填充更多泥土或高含水率的泥土使得花岗岩在峰后抗动荷载能力得到增强。

4) 在控制试样内孔径同为 10 mm 时,填充不同含水率泥浆.表现出随着含水率的增加,花岗岩峰值应力增加,且当泥浆含水率达到 40% 时峰值应力近达到实心试件峰值应力。

参考文献:

- [1] Attewell P B. Response of rocks to high velocity impact. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 1962, 71: 705-724.
- [2] Rinehart J S. Dynamic fracture strengths of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1967, 4: 395-430.
- [3] 王斌,李夕兵.单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J].爆炸与冲击,2012,32(4):423-431.
- [4] 单仁亮,陈石林,李宝强.花岗岩单轴冲击全程本构特性的试验研究[J].爆炸与冲击,2000,20(1):32-37.
- [5] 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.
- [6] Kumar A. The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite[J]. Geophysics, 2012, 33(3): 501-510.
- [7] Hakailehto K O. The behavior of rock under impulse loads - A study using the Hopkinson spilt bar method [J]. Acta Polytechnica Scandinavica, 1969, 81: 1-61.
- [8] Bieniawski Z T. Mechanism of brittle fracture of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1967, 4: 395-430.
- [9] 李夕兵,胡柳青,龚声武.冲击荷载作用下裂纹动态响应的数值模拟[J].爆炸与冲击,2006,26(3):214-221.
- [10] 金解放,李夕兵,常军然,等.循环冲击作用下岩石应力应变曲线及应力波特性[J].爆炸与冲击,2013,33(6):613-619.