

## 饱和花岗岩水-力耦合力学特性试验研究

朱其志<sup>1,2</sup>,徐云霞<sup>1,2\*</sup>,季晶晶<sup>3</sup>,闵中泽<sup>4</sup>,张璿<sup>1,2</sup>,余健<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3. 南京海泽房地产开发有限公司,江苏 南京 210012;  
4. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510507)

**摘要:** 采用全应力多场耦合三轴试验仪,对饱和花岗岩开展了不同加载速率、不同围压、不同孔压下的水-力耦合三轴压缩排水试验,分别给出了饱和花岗岩在不同加载速率、不同有效围压下的应力-应变曲线,分析了峰值强度、峰值应变、弹性模量随加载速率以及有效围压的变化规律。研究表明:(1)在不同有效围压和加载速率的条件下,岩样的应力应变曲线均经历了非线性压密、弹性、屈服、峰后四个阶段。偏压加载初期非线性压密阶段比较明显,而随着围压的升高非线性阶段逐渐消失;由于花岗岩的致密性较高,因而曲线的弹性阶段较长且相对平滑;在屈服和峰后阶段,岩石呈现出明显的脆-延性转化的过程。(2)饱和花岗岩的峰值强度随着加载速率的增加而增大;且当有效围压相同时,岩石的峰值强度大致相等,抵抗外界荷载的能力大致相同。(3)缓慢加载条件下饱和花岗岩的峰值应变表现出加载速率强化效应,但强化效果是有限的;且在有效围压相同条件下,随着围压和孔压的同步增长,峰值应变也呈增长的趋势。(4)弹性模量随着加载速率的增加呈二次多项式增长,但随着围压和孔压的同步增长而逐渐降低。

**关键词:** 饱和花岗岩;水-力耦合;有效围压;加载速率;力学特性

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Experimental Research on Mechanical Properties of Saturated Granite under Hydro-mechanical Coupling

ZHU Qizhi<sup>1,2</sup>, XU Yunxia<sup>1,2\*</sup>, JI Jingjing<sup>3</sup>, MIN Zhongze<sup>4</sup>, ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, YU Jian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Nanjing Haize Real Estate Development Co., Ltd, Nanjing 210012, China;  
4. Guangdong Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510507, China)

**Abstract:** Using full stress and multi-field coupling triaxial apparatus, the hydro-mechanical coupling triaxial compression drainage tests were carried out on saturated granite with different loading rates, confining pressures and pore pressures. The stress-strain curves of saturated granite under different loading rates and effective confining pressures were provided respectively, and the variation rules of peak strength, peak strain and elastic modulus were studied under the very loading rates and effective confining pressures. The results show that: (1) under the effect of different effective confining pressures and loading rates, stress-strain curves of saturated granite exhibit the nonlinear compaction, elasticity, yield and failure stages. At the initial stage of deviating stresses loading, the nonlinear compaction stage is relatively obvious, but with the increase of confining pressure, the nonlinear compaction stage gradually

收稿日期:2020-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51679068);国家重点研发计划项目(2017YFC1501100);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019B03814)

作者简介:朱其志(1979-),男,江苏泗洪人,博士,教授,博士生导师,从事多尺度多场耦合岩石本构理论、细观损伤力学、扩展有限元法、网格法、相场法等数值方法的研究。

\* 通讯作者:徐云霞(1996-),女,江苏盐城人,硕士研究生,从事岩石力学与岩土工程方面的研究。

disappears. Due to the high density of granite, the linear elastic stage of the curve is long and relatively smooth. In the yield and failure stages, the rock shows obvious brittle-ductile transformation process. (2) The peak strength of saturated granite increases with the increase of loading rate, and when the effective confining pressure is constant, the peak strength is approximately equal, and the resistance to external load is roughly the same. (3) Under the condition of slow loading, the loading rate has obvious strengthening effect on the peak strain of saturated granite, while the strengthening effect is limited. When the effective confining pressure is constant, with the synchronous increase of confining pressure and pore pressure, the peak strain presents an increasing trend. (4) Elastic modulus and loading rate show a quadratic polynomial growth relationship. However, with the synchronous increase of confining pressure and pore pressure, the elastic modulus presents a decreasing trend.

**Key words:** saturated granite; hydro-mechanical coupling; effective confining pressures; loading rate; mechanical properties

岩石由于受到高应力、地下水运动、人工开挖扰动等多种因素的影响,处在水、热、化学作用下的多场耦合环境中<sup>[1]</sup>。岩石的水-力耦合作用作为岩体多场耦合研究的一个重要组成部分,有助于深入了解复杂岩体多场耦合作用机理,从更高层次揭示岩石力学作用本质<sup>[2-4]</sup>。而在实际工程应用中,外界施工、荷载、构造挤压等常会诱发岩石荷载速率的变化,对岩石的强度、变形、微裂纹的生长与扩展产生重要的影响<sup>[5-7]</sup>,因此研究加载速率对岩石力学特性的影响也是重要的研究课题之一。国内外学者在岩石的水-力耦合行为以及加载速率效应方面做了大量的试验研究,并取得了一系列成果<sup>[8-12]</sup>。对于已有的研究成果而言,大多数学者仅仅考虑了水-力耦合或加载速率<sup>[13-14]</sup>,或是将加载速率与温度、裂隙等因素进行结合,分析其对岩石力学特性的影响<sup>[15-16]</sup>。然而可以预见的是,在水-力耦合作用下加载速率也必然会对岩石的力学效应产生不同的作用效果,因此开展岩石水-力耦合作用下不同加载速率试验具有重要的意义。

本文以甘肃北山花岗岩为研究对象,利用全应力多场耦合三轴试验仪,开展了排水条件下不同围压、不同孔压、不同加载速率的常规三轴压缩缓慢加载试验,获取了相应的应力应变曲线,探究了不同围压、不同孔压以及不同加载速率对岩石强度、变形及破坏情况的影响。

## 1 试验准备

### 1.1 试验仪器

本次试验采用的仪器为法国 TOP 公司研制的多场耦合三轴试验仪,该试验系统加卸载过程已

实现了全自动化。试验系统主要包括三轴压力室、加压系统及恒定稳压装置,可以通过超声波、水压以及气压系统进行控制,加压系统中的三个高压泵能够控制偏压、围压、水压的稳定加载以及压力的自动补偿,可以实现常规三轴压缩试验、流变试验、渗透试验以及温度-流体-力学-化学等多场耦合试验,适用范围广,测量精度高。该试验仪设计的最大围压为 150 MPa,最大孔压为 150 MPa,最大偏压为 400 MPa,如图 1 所示。

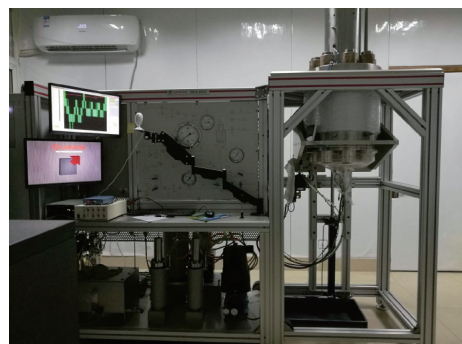


图 1 全应力多场耦合三轴试验仪

Fig.1 Full stress and multi-field coupling triaxial apparatus

### 1.2 试样制备

图 2 所示为本文试验所选用的花岗岩,采自甘肃北山基地地面以下 400~450 m,均取自同一个岩块。试样均匀性较好,岩性完整,是一种典型的准脆性材料。岩石表面为灰白色,颗粒细致,无明显节理,主要矿物成分为石英、钾长石和酸性斜长石。现场采集岩样利用实验室钻机,采用切割机将岩芯进行切割,并加工成 50 mm×100 mm 的标准圆柱样,实际加工后的试样直径范围(50±2) mm,高度范围(100±2) mm。观察试样表面无明显裂隙,均质性良好,平均密度为 2.72 g/cm<sup>3</sup>。



图2 花岗岩试样  
Fig.2 Granite sample

### 1.3 试验方案

为了研究花岗岩在不同围压、不同孔隙水压力以及不同加载速率作用下的力学特性,本试验围压选取 10、15、20、25、30、35、40 MPa,孔压选取 0、5、10 MPa,即有效围压为 10、20、30 MPa。具体试验方案见表 1。

表 1 饱和花岗岩三轴压缩试验方案  
Tab.1 Triaxial compression test scheme of saturated granite

试样编号	围压 /MPa	孔压 /MPa	有效围压 /MPa	加载速 / $(\text{MPa} \cdot \text{min}^{-1})$
SY1	10	0	10	0.1
SY2	20	0	20	0.1
SY3	30	0	30	0.1
SY4	20	10	10	0.04
SY5	20	10	10	0.1
SY6	20	10	10	0.2
SY7	20	10	10	0.5
SY8	30	10	20	0.1
SY9	40	10	30	0.1
SY10	15	5	10	0.1
SY11	25	5	20	0.1
SY12	35	5	30	0.1

采用 1.2 节中的方法对花岗岩进行制样,为了充分了解岩石在水-力耦合状态下的力学特性,在试验前先对花岗岩进行饱水试验。根据《GBT 50266-2013 工程岩体试验方法标准》中关于真空抽气法饱和试样的方法,在试验前首先将试样放入真空桶中,利用真空泵对组合体试样进行 4 h 以上的干抽,干抽结束后打开真空桶进气阀,吸入适量的蒸馏水,直至水面没过组合体试样的上表面 1 cm 左右关闭进气阀,再开启真空泵对组合体试样进行 4 h 以上的湿抽,直至无气泡溢出为止。湿抽结束后再将试样放在真空桶内对组合体进行 4 h 以上的浸泡,使组合体试样处于充分饱水状态。

试样安装完成后如图 3 所示。

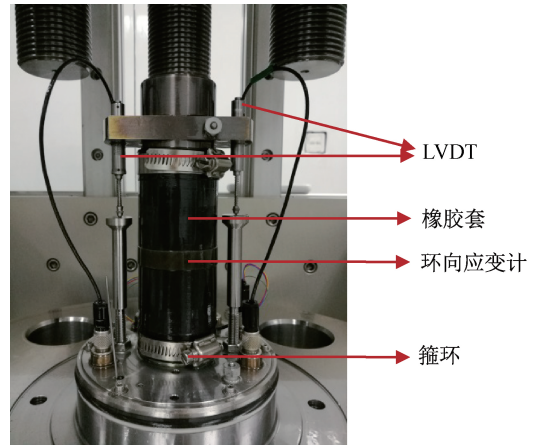


图3 试样安装示意图  
Fig.3 Installation of sample diagram

## 2 试验结果及分析

根据 1.3 节的试验方案对试样开展水-力耦合三轴压缩排水试验,根据试验结果得到了花岗岩分别在不同围压、不同孔压、不同加载速率下的峰值强度、峰值应变、弹性模量等主要岩石力学参数,具体结果见表 2。

### 2.1 应力-应变曲线特征分析

#### 2.1.1 相同有效围压(相同围压、相同孔压)、不同加载速率应力-应变曲线

花岗岩在水-力耦合三轴压缩排水试验过程中,受到围压、孔压以及偏压加载速率的影响,由于有效围压可用围压与孔压的差值进行表示,即花岗岩受到有效围压和偏压加载速率两种因素的影响。本文首先研究花岗岩试样 SY4—SY7 在有效围压相同的作用下,偏压加载速率对其力学特性的影响,通过对试验数据的处理,绘制出相同围压、相同孔压、不同偏压加载速率的花岗岩试样应力应变曲线,如图 4 所示。

由图 4 可见:相同围压、相同孔压、不同加载速率应力应变曲线依次经历了非线性压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和峰后阶段。随着偏应力的增加岩样的变形发展较快,岩石内部的微裂纹及孔隙开始逐渐被压密闭合,所以非线性压密阶段曲线呈上凹型。而饱和花岗岩的压密阶段较短,这是由于水充满了岩石的初始孔隙和微裂纹,且液态水受压不易产生变形,所以水压的存在抑制了微裂纹和节理面的闭合。此外,随着加载速率的增加应力应变曲线逐渐向上移动,表明在相同围

表2 饱和花岗岩水-力耦合三轴压缩试验主要力学参数

Tab.2 Main mechanical parameters of triaxial compression test of saturated granite under hydro-mechanical coupling

试样 编号	围压 /MPa	孔压 /MPa	有效围 压/MPa	偏压加载速率 /(MPa·min <sup>-1</sup> )	峰值强度 /MPa	最大主应 力/MPa	峰值应 变/‰	弹性模量 /GPa
SY1	10	0	10	0.1	258.511	268.511	6.383	54.124
SY2	20	0	20	0.1	331.892	351.892	7.935	55.749
SY3	30	0	30	0.1	423.761	453.761	9.622	57.500
SY4	20	10	10	0.04	247.617	267.617	6.765	52.875
SY5	20	10	10	0.1	256.690	276.690	7.356	53.756
SY6	20	10	10	0.2	280.835	300.835	7.507	53.994
SY7	20	10	10	0.5	307.906	327.906	7.560	54.683
SY8	30	10	20	0.1	356.737	386.737	8.600	55.491
SY9	40	10	30	0.1	427.995	467.995	10.230	57.195
SY10	15	5	10	0.1	256.135	271.135	6.951	53.811
SY11	25	5	20	0.1	340.046	365.046	8.414	55.535
SY12	35	5	30	0.1	424.802	459.802	10.026	57.398

注:其中有效围压为围压与孔压之差,最大主应力为围压与峰值强度之和,峰值应变为峰值强度对应的应变,弹性模量即偏应力-轴向应变曲线弹性阶段的直线段斜率。

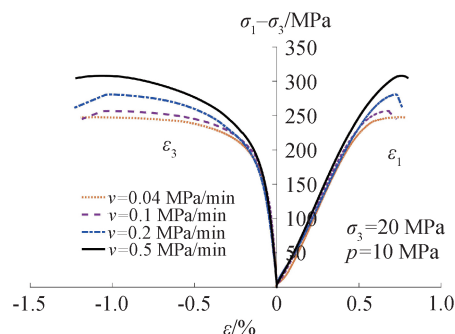


图4 相同围压、相同孔压、不同加载速率应力-应变曲线  
Fig.4 Stress-strain curves under the same confining pressure, the same pore pressure and different loading rates

压相同孔压的条件下,花岗岩的峰值强度随着加载速率的增加而增大。可以解释为:当偏应力加载速率相对较高时,使得花岗岩试样内部更加致密,密度增加,使其承载能力增加;当偏压加载速率相对较低时,微裂纹充分扩展,导致岩样的累积损伤程度越来越大。因此,加载速率较小的峰值强度低于加载速率较大的峰值强度。

### 2.1.2 不同有效围压(不同围压、相同孔压)、相同加载速率应力-应变曲线

在偏压加载速率相同的条件下,研究不同有效围压对花岗岩试样的力学特性影响。本文开展了控制孔压相同、围压不同的水-力耦合三轴压缩排水试验,孔压分别为0 MPa(试样编号SY1—SY3)、5 MPa(试样编号SY10—SY12)、10 MPa(试样编号SY5、SY8、SY9),应力-应变曲线如图5所示。

由图5可知:不同有效围压、相同加载速率应力应变曲线依次经历了非线性压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和峰后阶段。在偏压加载初期,由初始微裂纹和孔隙逐渐闭合引起的非线性段比较明显,而随着围压的升高非线性压密阶段逐渐消失,因为在较高的围压条件下,大部分初始微裂纹和孔隙在围压的施加过程中已经基本闭合。随着初始孔隙和微裂纹压密之后,岩石进入线弹性阶段,由于花岗岩的致密性较高,不易发生变形,因而应力-应变曲线弹性阶段较长且相对平滑。随着偏压的继续增加,曲线进入屈服和峰后阶段,孔压作用于试样结构内部,孔隙水压力对试样内部裂纹的劈裂作用逐步明显,促进了裂纹的扩展,岩石呈现出明显的脆-延性转化的过程。例如在40 MPa高围压下,相应的曲线呈现明显的凸型屈服状态,说明高围压能够有效保护岩石的直接劈裂破坏。

对于应变而言,在孔压相同的条件下,轴向峰值应变呈现出随着围压的升高不断增加的规律,可以解释为:当围压较大、孔隙水压力相对较小时,孔隙水压力的作用得以削弱,而施加的轴向应力和围压对喉道的压缩作用明显,使得岩样的孔隙率减小,喉道变窄。

## 2.2 峰值强度与加载速率、有效围压的关系

### 2.2.1 峰值强度与加载速率

本文选取在围压20 MPa、孔压10 MPa条件下,研究偏应力的加载速率与峰值强度的变化规律。图6所示为不同加载速率的对数形式与峰值

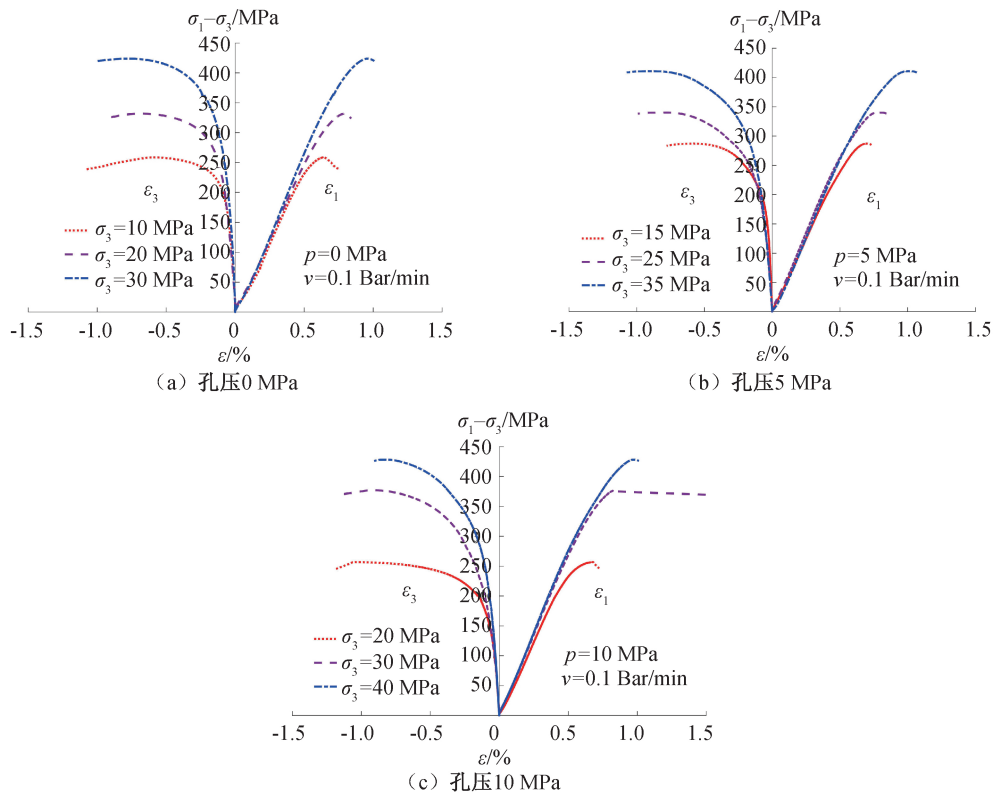


图 5 相同孔压相同加载速率不同围压应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves under the same pore pressure, the same loading rate and different confining pressures

强度的关系曲线,以及相应的拟合关系式。由图可知,饱和花岗岩的峰值强度随着加载速率对数的增加呈二次多项式增加,表明加载速率对饱和花岗岩的峰值强度有较为密切的影响,拟合系数  $R^2$  达到 0.987 7,拟合效果较好。加载速率为 0.04、0.1、0.2、0.5 MPa/min 对应的峰值强度分别为 247.617、256.690、280.835、307.906 MPa,较上一级增加比例分别为 3.7%、9.4%、9.6%,增长比例逐渐增大,即表明偏压加载速率的增大对于饱和花岗岩的强度具有明显的强化效果,与本文 2.1.1 节中的分析一致。

### 2.2.2 峰值强度与有效围压

图 7 所示为在相同加载速率 0.1 MPa/min 下,有效围压对峰值强度影响的关系曲线。由图可知,在相同有效围压条件下,岩石的峰值强度大致相等。该现象可以解释为:在围压和孔隙水压力的共同作用下,岩石内部裂纹逐渐扩展、演化,围压的增加使得岩石内部孔隙压密,从而提高了岩石的承载力,但由于水对岩石的软化作用,降低了岩石的摩擦力,从而与围压提供的承载力相抵消。因此,饱和花岗岩在有效围压相等的情况下,抵抗外界荷载的能力大致相同。其次,当孔压相同时,

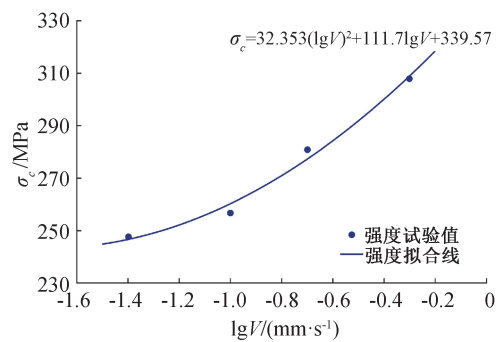


图 6 峰值强度  $\sigma_c$  和加载速率对数  $\lg V$  对应的关系

Fig.6 Relation between the peak strength and the logarithm of loading rates

岩石的峰值强度随着有效围压的增加而不断增大,即峰值强度与施加的围压呈正相关关系,表明在孔压一定时,围压能够强化岩石的强度。

### 2.3 峰值应变与加载速率、有效围压的关系

#### 2.3.1 峰值应变与加载速率

图 8 所示为加载速率的对数形式与峰值应变的关系曲线,曲线拟合为二次多项式,拟合系数  $R^2$  为 0.994 8。由图可知,在缓慢加载条件下饱和花岗岩的峰值应变表现出加载速率强化效应,即峰

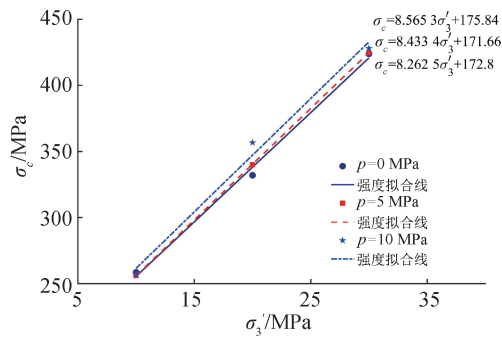


图7 峰值强度  $\sigma_c$  和有效围压  $\sigma'_3$  对应的关系  
Fig.7 Relation between the peak strength and the effective confining pressure

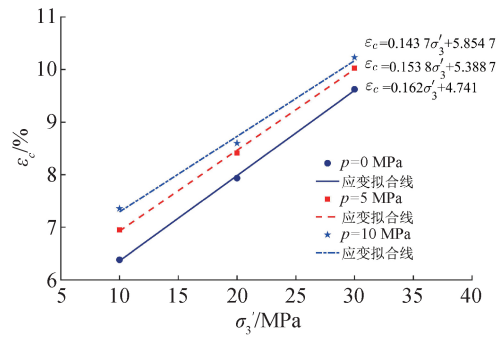


图9 峰值应变  $\varepsilon_c$  和有效围压  $\sigma'_3$  对应的关系  
Fig.9 Relation between the peak strain and the effective confining pressure

值应变随加载速率的增加而增大。其次,四个加载速率所对应的峰值应变分别为 6.765‰、7.356‰、7.507‰、7.560‰,分别较上一级增加比例为 8.7%、2.1%、0.7%,增长比例逐渐减小,即加载速率对于峰值应变的强化效果是有限的。

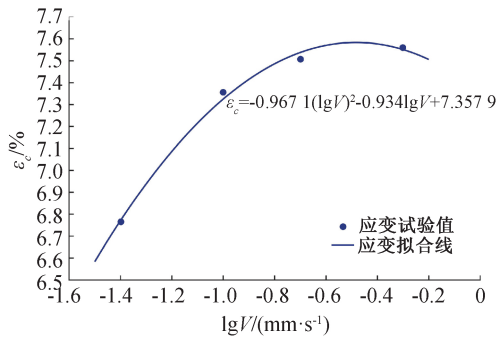


图8 峰值应变  $\varepsilon_c$  和加载速率  $\lg V$  对应的关系  
Fig.8 Relation between the peak strain and the logarithm of loading rates

映岩体弹性变形的指标。图10为在围压20 MPa、孔压10 MPa条件下,饱和花岗岩弹性模量  $E$  随偏压加载速率的对数形式的变化曲线。从图中看出,在围压和孔压相同条件下,弹性模量随着加载速率的增加呈二次多项式增长。

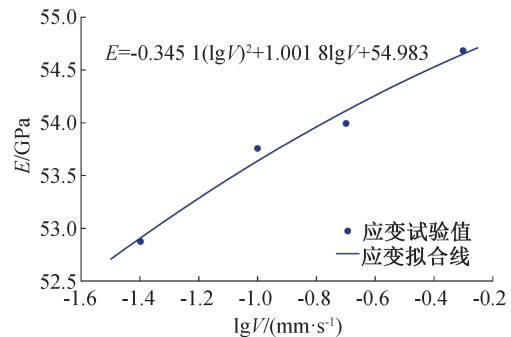


图10 弹性模量  $E$  和加载速率对数  $\lg V$  对应的关系  
Fig.10 Relation between the elastic modulus ( $E$ ) and the logarithm of loading rates ( $\lg V$ )

### 2.3.2 峰值应变与有效围压

由图9可知:在相同有效围压条件下,随着围压和孔压的同步增长,其峰值应变也呈增长的趋势。以有效围压10 MPa为例,孔压0、5、10 MPa所对应的峰值应变分别为6.383‰、6.951‰、7.356‰。但随着有效围压的继续增加,不同围压、不同孔压对应的峰值应变之间的差值逐渐缩小。其次,在相同孔压条件下,峰值应变随着有效围压的增加而不断增加。以孔压10 MPa为例进行分析,围压20、30、40 MPa(即有效围压分别为10、20、30 MPa)下对应试样的峰值轴向应变分别为7.356‰、8.600‰、10.230‰。可以得出:当孔压相同时,峰值应变与围压呈线性增长关系。

## 2.4 弹性模量与加载速率、有效围压的关系

### 2.4.1 弹性模量与加载速率

弹性模量是岩石材料的重要力学参数,是反

### 2.4.2 弹性模量与有效围压

图11所示为饱和花岗岩在缓慢加载速率0.1 MPa/min条件下弹性模量与有效围压的关系。从图中可以看出,在相同有效围压条件下,试样的弹性模量随着围压和孔压的同步增长而呈降低趋势。由于孔压越大越容易降低岩石矿物成分之间的胶结程度,更容易被挤压变形,因此孔压越大,岩石的压缩变形量越大,从而导致岩样的弹性模量越小。且当孔压相同时,花岗岩的弹性模量随着有效围压的增大而增大,也可表示为弹性模量和围压呈线性增长关系,这再次验证了围压对岩石材料有强化效果的结论。

## 3 结论

1) 相同有效围压不同加载速率、不同有效围压相同加载速率的应力应变曲线均依次经历了非

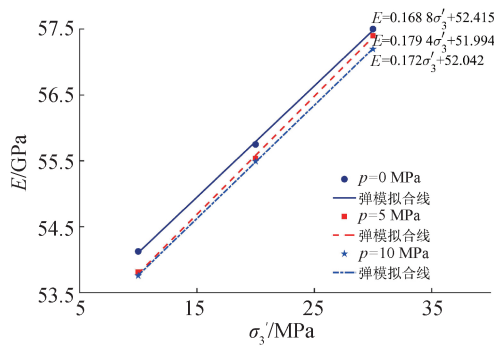


图 11 弹性模量  $E$  和有效围压  $\sigma'_3$  对应的关系

Fig.11 Relationship between the elastic modulus ( $E$ ) and the effective confining pressures ( $\sigma'_3$ )

线性压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和峰后阶段。在相同加载速率条件下,偏压加载初期由初始微裂纹和孔隙逐渐闭合引起的非线性段比较明显,而随着围压的升高非线性压密阶段逐渐消失;由于花岗岩的致密性较高,不易发生变形,因而曲线的弹性阶段较长且相对平滑;在屈服和峰后阶段,孔隙水压力对于试样内部裂纹的劈裂作用逐渐明显,岩石呈现出明显的脆—延性转化的过程。

2)在围压和孔压均相同条件下,饱和花岗岩的峰值强度随着加载速率的增加而增大,加载速率为 0.04、0.1、0.2、0.5 MPa/min 对应的峰值强度分别为 247.617、256.690、280.835、307.906 MPa。当有效围压相同时,岩石的峰值强度大致相等,抵抗外界荷载的能力大致相同;而岩石的峰值强度与外界施加的围压呈正相关关系,即围压能够强化岩石的强度。

3)缓慢加载条件下饱和花岗岩的峰值应变表现出加载速率强化效应,加载速率为 0.04、0.1、0.2、0.5 MPa/min 所对应的峰值应变分别为 6.765‰、7.356‰、7.507‰、7.560‰,表明加载速率对于峰值应变的强化效果是有限的。在相同有效围压条件下,随着围压和孔压的同步增长,峰值应变也呈增长的趋势;而当孔压一定时,峰值应变与围压呈线性增长关系。

4)弹性模量随着加载速率的增加呈二次多项式增长。在相同有效围压条件下,试样的弹性模量随着围压和孔压的同步增长而呈降低趋势;当孔压相同时,花岗岩的弹性模量随着围压的增大而增大,这再次验证了围压对岩石材料有强化效果的结论。

## 参考文献:

- [1] 贾春兰,朱凯.复合温度条件下石灰岩多场耦合裂隙渗透侵蚀试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(7):1307-1312.
- [2] 赵延林,付成成,汪亦显,等.全应力—应变过程中裂隙灰岩的水-力耦合特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3763-3773.
- [3] 陈子全,李天斌,陈国庆,等.水力耦合作用下的砂岩声发射特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2815-2822.
- [4] 彭俊,荣冠,周创兵,等.水压影响岩石渐进破裂过程的试验研究[J].岩土力学,2013,34(4):941-946+954.
- [5] 杨仕教,曾晟,王和龙.加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J].岩土工程学报,2005(7):786-788.
- [6] 陈琳,徐小丽,徐银花.温度与加载速率对岩石力学性质的影响[J].广西大学学报:自然科学版,2016,41(1):170-177.
- [7] 邓华锋,王晨玺杰,李建林,等.加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制[J].岩土力学,2018,39(S1):79-88.
- [8] 张树光,刘佳琦,陈培培,等.辽西花岗岩水—岩耦合力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(03):520-527.
- [9] 李佳伟,徐进,王璐,等.砂板岩岩体力学特性的水岩耦合试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(3):599-604.
- [10] WASANTHA P L P, RANJITH P G, ZHAO J, et al. Strain Rate Effect on the Mechanical Behaviour of Sandstones with Different Grain Sizes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 1-13.
- [11] 徐小丽,高峰,张志镇,等.实时高温下加载速率对花岗岩力学特性影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(8):2184-2192.
- [12] 张连英,茅献彪.高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J].岩土力学,2010,31(11):3511-3515.
- [13] 许江,杨红伟,彭守建,等.孔隙水压力-围压作用下砂岩力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1618-1623.
- [14] 尹小涛,葛修润,李春光,等.加载速率对岩石材料力学行为的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2610-2615.
- [15] 吴明静,平琦,张号.高温状态下加载速率对砂岩动态力学特性影响的实验研究[J].科学技术与工程,2018,18(24):281-287.
- [16] 罗可,招国栋,曾佳君,等.加载速率影响的含裂隙类岩石材料破断试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1833-1842.

(责任编辑 王利君)