

岩石力学性质的应变率效应试验

陈乐求^{1,2}, 陈俊桦², 张家生²

(1. 湖南理工学院, 土木建筑工程学院, 湖南岳阳 414006; 2. 中南大学, 土木工程学院, 湖南长沙 410075)

[摘要]以玄武岩为试样,开展了中低应变率下的岩石单轴抗压试验。本次研究分析应变率对岩石抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数的影响,分别提出了岩石抗压强度、弹性模量、泊松比等参数与应变率之间的拟合关系式。以峰值应力对应的应变和峰值后的软化模量为脆性评价指标,分析加载应变率对岩石脆性的影响。研究表明:(1)岩石抗压强度、弹性模量均随应变率的增加而增加。(2)岩石泊松比随应变率增加而减小。(3)随着应变率增加,峰值应力对应的应变增大,峰值后的应变软化程度减小,岩石脆性减弱。(4)应变率对岩石抗压强度影响较大,对弹性模量和泊松比的影响较小。(5)曲线拟合效果良好,提出的拟合关系式合理。

[关键词] 岩石力学 应变率 单轴抗压强度 弹性模量 泊松比

[中图分类号] TU45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2017)05-07

Chen Le-qi, Chen Jun-hua, Zhang Jia-sheng. Test of effects of strain rate on mechanical properties of rock[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(5):1025-1031.

1 引言

固体材料一般会表现出黏性。外荷载作用下,加载速率越大,或者内部构成越复杂,固体的粘滞性或者非瞬态响应越显著。固体的力学性能本质上是与应变速率相关的。岩石为多矿物组成的集合体,内部结构较复杂,是应用范围较广的固体材料。关于应变率对岩石力学性质影响的研究一直是地下开挖与防护、水利水电、矿山和爆破等工程领域的研究热点。研究方法主要为室内试验,包括岩石动三轴试验(吴绵拔等, 1980; 鞠庆海等, 1993; 林英松等, 1998; 马春德等, 2004; 李夕兵等, 2006; 纪文栋等, 2011; 苏承东等, 2013)、霍普金森杆试验(于亚伦等, 1990; 李刚等, 2007; 周子龙等, 2009; 王斌等, 2010; 宫凤强等, 2012; 唐礼忠等, 2014)、轻气炮试验(梁昌玉等, 2012)等。其中,岩石动三轴试验、霍普金森杆试验和轻气炮试验的加载应变率范围一般为: $10^{-5} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$, $10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, $10^2 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。岩石动三轴试验为中低应变率试验,属于准静态加载,研究可以针对弹性波传播、地震波作用($10^{-3} \sim 10^1 \text{ s}^{-2}$)等课题(梁昌玉等, 2012;)。霍普

金森杆试验和轻气炮试验为高应变率加载试验,属于动态加载,一般针对爆炸、冲击等课题的研究(都浩等, 2010; 梁昌玉等, 2012; 宫凤强等, 2012; 陈俊桦等, 2016)。为方便总结应变率影响规律,这些试验通常为常应变率加载试验。通常加载应变率越高,所需试验条件越高,也就越难保证是常应变率加载。因此,岩石动三轴试验仍然是最常用的研究方法。

玄武岩属岩浆岩,在我国分布较广。不少工程项目在玄武岩区开展,如金沙江流域的溪洛渡、白鹤滩水电站等(陈俊桦等, 2016)。研究玄武岩力学性质的应变率效应具有一定的工程应用价值。目前相关研究主要是针对应变率对岩石抗压强度、弹性模量等的影响(吴绵拔等, 1980; 林英松等, 1998; 苏承东等, 2013),很少研究考虑应变率对脆性和泊松比等的影响。而脆性是岩石的重要特征。此外,建立应变率相关的岩石本构关系除了需了解应变率对抗压强度、弹性模量等的影响,还需要知道对泊松比的影响,因为泊松比与侧向变形密切相关。为此,以玄武岩为试样,本文利用岩石动三轴仪进行中低应变率下的岩石单轴抗压试验,研究应变率对抗压强

[收稿日期] 2017-05-09; **[修改日期]** 2017-09-03; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51308210)资助。

[第一作者] 陈乐求(1981年-),男,2010年毕业于中南大学,获博士学位,副教授,主要从事岩土工程、路基工程的研究工作。E-mail: 365148895@qq.com。

度、弹性模量、泊松比等力学参数以及脆性的影响,以期成果为考虑应变率的岩石本构模型研究、实际工程应用等提供参考。

2 试验方案

试验所取岩石来自云南永善县,为二叠系上统峨眉山玄武岩,黑灰色、斑状-致密状,未风化-微风化,空隙不甚发育。岩样的平均密度为 2800 kg/cm^3 。试样为圆柱体,直径为 50 mm ,高为 100 mm 。

试验为不同应变率下的单轴抗压应力-应变试验。采用位移控制模式,以一定的应变率在轴向进行加载。轴向加载应变率水平为 $\dot{\varepsilon}_a = 1.3 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-4}, 8 \times 10^{-4}, 2 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 应变率对岩石力学特征参数的影响

典型的单轴抗压应力-应变曲线见图 1。从图 1 看出,不同应变率的岩石应力与应变关系曲线有共同特点:应力-应变关系可以近似分为三个阶段:线性段、非线性段和应力跌落段(或者应变软化段)。

岩石为多矿物的颗粒集合体,矿物颗粒界面以及界面间的裂纹和孔隙等均为缺陷。当外荷载较小时,岩石内部缺陷不发生变化,岩石可以近似看作均质材料,应力-应变关系为线弹性。当外荷载增大到一定程度时,首先在薄弱的缺陷部位发生变化。对于本文中的致密玄武岩,缺陷主要类型为裂纹,因而首先是在内部原有裂纹的尖端发生微裂纹扩展,局部的微裂纹萌生、扩展、乃至汇聚成核。这一过程为微裂纹稳定扩展阶段,微裂纹扩展引起应变能的释放,应变能释放率较为稳定。应变能的释放以应力释放或者应力降低的方式进行,因此,此时应力-应变递增关系逐渐偏离线性。当微裂纹汇聚成宏观裂纹时,宏观裂纹成为岩石最薄弱的结构面,岩石原有结构被极大破坏,此时岩石内部宏观裂纹发展处于不稳定阶段;相比微裂纹,宏观裂纹的扩展需要释放更多的应变力能,于是应变能释放率不断增大。为满足应变能的大幅度释放,在变形仍然在增长的同时,应力必须不断下跌。即峰值后应力-应变关系为下降曲线,该阶段属于应力跌落段或者应变软化段。

(1) 应变率对抗压强度的影响

不同加载应变率下的岩石抗压强度见图 2。从图 2 看出,随着加载应变率增加,岩石抗压强度不断

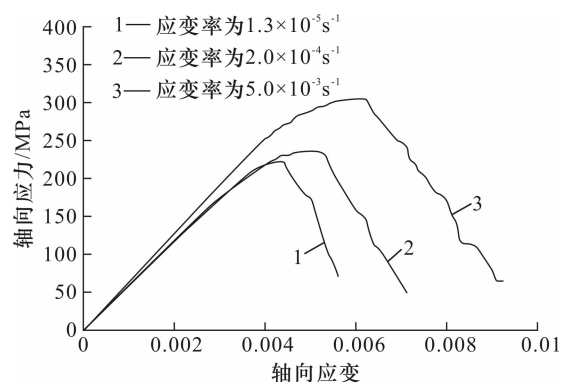


图 1 不同应变率下的单轴抗压应力-应变关系曲线

Fig. 1 Relation curves of axial stress and axial strain under different strain rates

增加。当加载应变率从 $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 抗压强度从 222.6 MPa 增加到 305.4 MPa , 增幅 37.1% 。因此,应变率对岩石抗压强度的影响较显著。

岩石内部裂纹扩展速率与变形速率相关。通常应变率越大,微裂纹扩展速率也增大。但是微裂纹扩展速率总是有限的。因此,高应变率下,短时间内微裂纹往往来不及扩展和增加,滞后于变形。结合前面的分析可知,微裂纹的扩展和增加相对迟缓意味着应力释放或者应变能释放率也相对变得缓慢。由于只有当释放的应变能达到一定临界值时,岩石应力才达到峰值,因此,在应变能释放率相对变得缓慢的情况下,需要不断提高应力直至应变能释放到临界值、岩石发生破坏。即:较高的应变率对应较高的应力强度,岩石的强度对应变率有较强的依赖性。

岩石内部所有微裂纹扩展和增加的滞后性的综合影响在宏观上表现为岩石试样整体变形的粘滞性,即岩石响应为非瞬态响应。动力作用下通常可以将岩土材料的本构关系看作粘弹性关系(毕冉等, 2016)。如果将岩石看作弹粘性材料,那么岩石的非瞬态响应可由弹性引起的瞬态响应和粘性引起的非瞬态响应组成。

假设岩石的强度由瞬态强度和非瞬态强度组成:

$$Y = Y_0 + Y' \quad (1)$$

其中,

$$Y'/Y_0 = m_Y (\dot{\varepsilon}_a)^{n_Y} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, Y 为岩石抗压强度, MPa ; Y_0 为岩石瞬态响应强度, MPa ; Y' 为由粘滞性导致的非瞬态响应强度, MPa 。 m_Y 和 n_Y 为拟合参数。

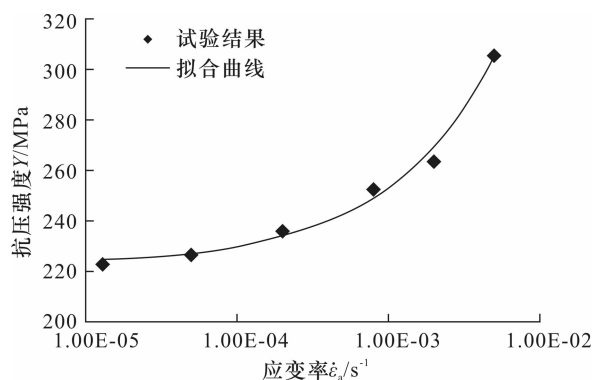


图2 抗压强度与应变率的关系

Fig.2 Relation between the compressive stress strength and strain rate

利用式(1)~(2)对图2中数据进行拟合,拟合结果见图2。拟合结果为: $Y_0 = 222.2 \text{ MPa}$, $m_Y = 9.43$ 和 $n_Y = 0.61$ 。拟合曲线的相关系数为 0.98, 拟合效果良好,这表明本文提出的式(1)和(2)是合理的。

根据式(1)~(2)以及拟合结果可知,应变率越大,岩石非瞬态响应强度占的比重越大。当应变率趋近 0 时,即完全静力加载,岩石强度只由瞬态响应部分确定。此时岩石可以看作完全弹性材料。

(2) 应变率对弹性模量的影响

图3为不同应变率作用下的弹性模量变化曲线。从图3看出,随着加载应变率增加,岩石弹性模量不断增加。当加载应变率从 $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,弹性模量从 58.0 GPa 增加到 63.6 GPa,增幅 9.7%。因此,应变率对岩石弹性模量有影响,但这种影响不如对抗压强度的显著。究其原因在于空隙这种类型的缺陷比裂纹更能影响岩石的弹性模量。通常空隙率越大,弹性模量会显著提高。这是因为高空隙率的岩石(缺陷主要为孔隙)在加载过程中容易发生坍塌,岩石介质逐渐被压实,弹性模量逐渐增大。加载速率越大,压实效应越显著。而由前文分析可知,本文试样内部缺陷类型主要是裂纹,试样致密性好。

同上,假设不同加载应变率下的岩石弹性模量由瞬态响应和非瞬态响应组成:

$$E = E_0 + E' \quad (3)$$

其中,

$$E'/E_0 = m_E (\dot{\epsilon})^{n_E} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, E 为岩石弹性模量, GPa; E_0 为弹性模量的瞬态响应部分, GPa; E' 为弹性模量由粘

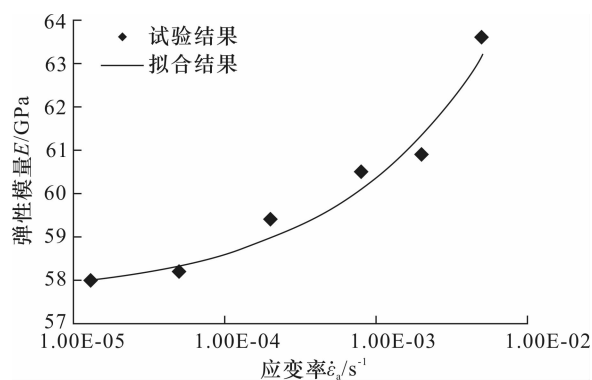


图3 弹性模量和应变率的关系

Fig.3 Relation between the elastic modulus and strain rate

滞性导致的非瞬态响应部分, GPa。 m_E 和 n_E 为拟合参数。

利用式(3)~(4)对图3中数据进行拟合,拟合结果见图3。拟合结果为: $E_0 = 57.6 \text{ GPa}$, $m_E = 1.00$ 和 $n_E = 0.44$ 。拟合曲线的相关系数为 0.97, 拟合效果良好,这表明本文提出的式(3)和式(4)同样是合理的。

根据式(3)~(4)以及拟合结果可知,应变率越大,岩石非瞬态响应弹性模量所占的比重越大。当应变率趋近 0 时,即完全静力加载时,与抗压强度一样,岩石弹性模量只由瞬态响应部分确定。

(3) 应变率对泊松比的影响

泊松比与应变率之间的关系见图4。从图4看出,随着加载应变率增加,岩石泊松比不断减小。当加载应变率从 $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,泊松比从 0.221 减小到 0.193,减幅 12.3%。因此,应变率对岩石泊松比有影响,但这种影响同样不如对抗压强度的显著。

岩石的粘滞性除了影响轴向变形外还影响侧向变形。当试样在轴向以一定应变率发生变形时,其侧向变形在短时间内往往来不及开展。而单轴加载下,泊松比刚好是侧向变形与轴向变形之比的绝对值。因此,考虑粘滞性影响时,相比弹性材料,粘弹性材料的泊松比应该减小。和弹性模量一样,影响泊松比的主要缺陷类型是空隙而不是裂纹,而本文玄武岩试样的主要缺陷为裂纹,因此,应变率对试样泊松比的影响较小。

由以上分析可知,如果同样将泊松比看作弹性瞬态部分和粘性非瞬态部分组成,那么有下式成立:

$$\mu = \mu_0 - \mu' \quad (5)$$

其中,

$$\mu'/\mu_0 = m_\mu (\dot{\varepsilon}_a)^{n_\mu} \quad (6)$$

式(5)~(6)中, μ 为岩石的泊松比; μ_0 为泊松比的瞬态响应部分; μ' 为泊松比由粘滞性导致的非瞬态响应部分。 m_μ 和 n_μ 为拟合参数。

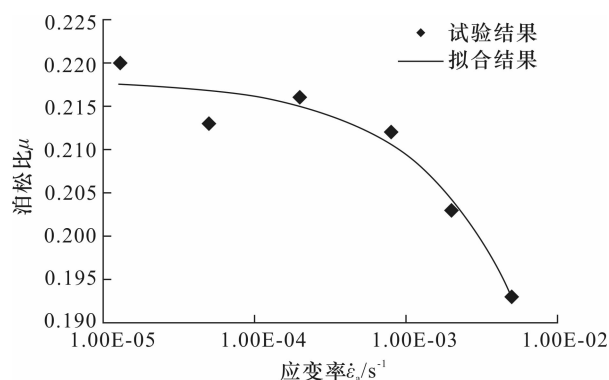


图4 泊松比与应变率之间的关系

Fig. 4 Relation between the Poisson's rate and strain rate

利用式(5)~(6)对图4中数据进行拟合,拟合结果见图4。拟合结果为: $\mu_0 = 0.218$, $m_\mu = 3.78$ 和 $n_\mu = 0.66$ 。拟合曲线的相关系数为 0.95,拟合效果良好,这表明,本文提出的式(5)和(6)也是合理的。

总体看,对于本文试验,应变率对抗压强度的影响较大,对弹性模量和泊松比的影响较小。相对动载试验,通常静载试验较容易实现,因此,从方便应用的角度出发,不同应变率下的弹性模量和泊松比可近似用静载试验的结果替代。

3.2 应变率对岩石脆性的影响

脆性是岩石的重要性质。评价岩石脆性的方法有很多,包括弹性应变法、岩石矿物学法和弹性参数法等(郭旭光等, 2015)。通常达到应力峰值时的应变越小,岩石的脆性越显著;应力峰值后应力下跌越大或者应变软化程度越大,岩石的脆性越显著。反之,则延性越显著。(苏承东等, 2013; 陈乐求等, 2017)。本文将峰值应力对应的应变和峰值后软(弱)化模量可以作为评价岩石脆性的指标。

(1) 峰值应力对应的应变与应变率

图5为峰值应力对应的应变 ε_Y 和应变率 $\dot{\varepsilon}_a$ 的关系曲线。从图5看出,随着 $\dot{\varepsilon}_a$ 增加, ε_Y 不断增加。即随着应变率增加,岩石的延性增加。

(2) 应变率与软化模量

根据苏承东等(2013)的研究成果,对峰值后的

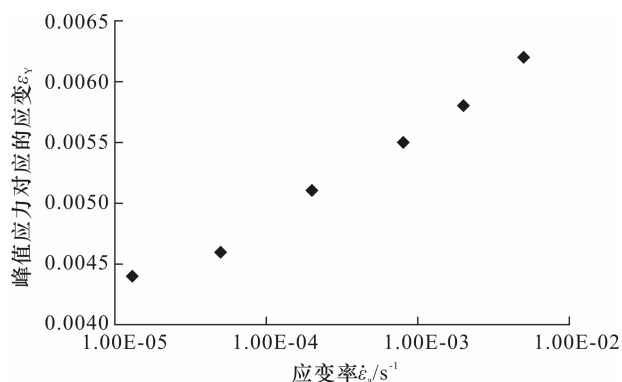


图5 峰值应力对应的应变和应变率之间的关系

Fig. 5 Relation between the strain corresponding to the peak stress and the strain rate

软化曲线可取近似直线段的斜率作为软化模量,以此衡量应变软化程度。从图2看出,本文试验中峰值应力后的曲线均与直线段相似。为方便分析,假设应力峰值后的软(弱)化模量计算如下:

$$\eta = \frac{Y - Y_f}{\varepsilon_f - \varepsilon_Y} \quad (7)$$

式中: η 为应变软化模量, GPa, η 越大,应力峰值后的曲线越陡,应变软化程度越显著,即应力峰值后的破坏越显脆性。当 $\eta \rightarrow \infty$, 岩石发生完全脆性破坏。 Y_f 和 ε_f 分别为试验中岩石加载终止时的应力和应变。

图6为不同应变率作用下的应变软化模量变化曲线。从图6看出,随着 $\dot{\varepsilon}_a$ 增加, η 不断减小。随着应变率增加,岩石应变软化程度降低。通常加载应变率越高,岩石破碎块度越小。对于岩石试样来说,应变率越高,单位体积的微裂纹数量多,这也意味着应力峰值后产生的宏观破裂裂纹数量会越多,也越容易产生交错的宏观裂纹。根据苏承东等

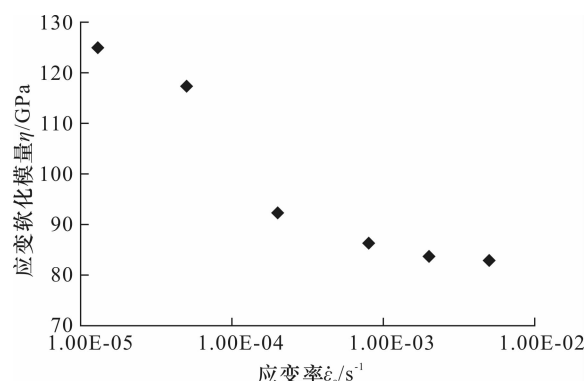


图6 应变软化模量与应变率之间的关系

Fig. 6 Relation between the strain corresponding to the softening modulus and the strain rate

(2013)的研究成果,随着加载应变率增加,岩石内部的破裂面形式由单一宏观结构面向多个宏观结构面交错分布转变。相对单一宏观破裂面,多个宏观破裂面交错使得变形阻力增加,从而延缓峰值点后的应力跌落或者降低应变软化程度。

综合以上对 ε_y 和 η 的分析可知,随着加载应变率增加,岩石延性增强,或者脆性减弱。

4 结论

本文以玄武岩为试样,开展了中低应变率下的岩石单轴抗压试验。总结加载应变率对岩石抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数的影响规律,探讨了影响机理,在此基础上提出了应变率与抗压强度等参数之间的关系式。以峰值应力对应的应变和峰值后的软化模量这两个指标评价岩石脆性程度,通过定量分析应变率对这两个指标的影响去评价岩石脆性的应变率效应。得到以下主要结论:

(1) 加载应变率越大,岩石抗压强度越大,弹性模量越大,泊松比越小。随着加载应变率增大,岩石脆性减弱。

(2) 加载应变率对岩石抗压强度的影响较大,对弹性模量和泊松比的影响较小。

(3) 提出的应变率与抗压强度、弹性模量等参数之间的关系式具备一定的物理意义。根据这些关系式进行曲线拟合,效果良好。研究成果可为考虑应变率影响的岩石本构模型研究等提供参考。

[References]

Bi Ran, Tang Xiao, Liu Bao-jian. 2016. Three - dimensional response analysis of a shield - shaped subway tunnel[J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 712 - 717 (in Chinese with English abstract)

Chen Jun-hua, Li Xing-pin, Zhang Jia-sheng. 2016. Study on blasting parameters of protective layer excavation of rock bench based on blasting - induced damage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(1): 98 - 108 (in Chinese with English abstract)

Chen Jun-hua, Zhang Jia-sheng, Li Xing-pin. 2016. Model of rock blasting - induced damage and its application based on the integrity of rockmass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(5): 857 - 866 (in Chinese with English abstract)

Chen Jun-hua, Zhang Jia-sheng, Li Xing-pin. 2016. Study of presplitting blasting parameters and its application based on rock blasting - induced damage theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37(5): 1441 - 1450 (in Chinese with English abstract)

Chen Jun-hua, Zhang Jia-sheng, Li Xin-ping. 2016. Rock blasting - induced damage zone under blasting excavation in a large underground chamber [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(11): 3808 - 3817 (in Chinese with English abstract)

stract)

Chen Le-qiu, Zhang Jia-sheng, Chen Junhua, Chen Ji-guang. 2017. Influences of initial damage on mechanics of brittle rock under compressed stress [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(2): 484 - 490 (in Chinese with English abstract)

Du Hao, Deng Peng, Du Rong-qiang. 2010. Numerical analysis dynamic of response of reinforced concrete beam under blasting load [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 29(6): 50 - 54 (in Chinese with English abstract)

Gong Feng-qiang, Li Xi-bin, Liu Xi-ling. 2012. Tests for sandstone mechanical properties and failure model under triaxial SHPB loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 31(8): 29 - 32 (in Chinese with English abstract)

Guo Xu-guang, Niu Zhi-jie, Wang Zhen-lin, Feng You-lun, Zhou Ke-quan, Zhu Yong-cai. 2015. Application of rock brittleness prediction to exploration of tight oil in the Jimusaer depression, Junggar Basin [J]. *Geology and Exploration*, 51(3): 592 - 598 (in Chinese with English abstract)

Ji Wen-dong, Yang Chun-he, Yao Yuan-feng, Kong Jun-feng. 2011. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(12): 2507 - 2513 (in Chinese with English abstract)

Ju Qing-hai, Wu Mian-ba. 1993. Experimental studies of dynamic characteristic of rocks under triaxial compression [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3): 73 - 80 (in Chinese with English abstract)

Li Gang, Chen Zhenghan, Xie Yun, Zhu Wen-hua. 2007. Test research on dynamic characteristics of Three Gorges granite under high strain rate [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28(9): 1833 - 1840 (in Chinese with English abstract)

Li Xi-bin, Zuo Yu-jun, Ma Chun-de. 2006. Constitutive model of rock under coupled static - dynamic loading with intermediate strain rate [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(5): 865 - 874 (in Chinese with English abstract)

Liang Chang-yu, Li Xiao, Li Shou-ding, He Jian-ming, Ma Chao-feng. 2012. Study of strain rates threshold value between static loading and quasi - dynamic loading of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(6): 1156 - 1161 (in Chinese with English abstract)

Lin Ying-song, Ge Hong-kui, Wang Shun-chang. 1998. Testing study of dynamic and static elastic parameters of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 17(2): 216 - 222 (in Chinese with English abstract)

Ma Chun-de, Li Xi-bing, Shi Yan-ping. 2004. A new test method to achieve the dynamic rock failure with medium strain rate by low - cycle - index fatigue loading [J]. *Mining Research and Development*, 24(1): 11 - 13 (in Chinese with English abstract)

Su Cheng-dong, Li Huai-zhen, Zhang Sheng, Gou Pan-feng. 2013. Ex-

- perimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(5): 943–950 (in Chinese with English abstract)
- Tang Li-zhong, Shu Ji-bu, Wu Jian-li, Li Xi-bin, Wang Ling-hui. 2014. Dynamic characteristics of skarn under the combined action of high static stress and frequency dynamic disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 36(8): 993–999 (in Chinese with English abstract)
- Wang Bin, Li Xi-bing, Yin Tu-bing, Ma Chun-de, Yin Zhiqiang, Li Zhiguo. 2010. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(5): 1003–1009 (in Chinese with English abstract)
- Wu Mian-ba, Liu Yuan-hui. 1980. The effect of intermediate strain rates on mechanical properties of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1(1): 51–58 (in Chinese with English abstract)
- Yu Ya-lun, Jin Ke-xue. 1990. Research on characteristics of mine rock under high strain rate [J]. Explosion and Shock Waves, 10(3): 266–271 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Zi-long, Li Xi-bing, Yan Xiao-ming. 2009. Loading condition for specimen deformation at constant strain rate in SHPB test of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(12): 2445–2453 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 毕冉, 唐晓, 刘保健. 2016. 盾构地铁隧道区间在地震作用下的三维动力时程响应分析[J]. 地质与勘探, 52(4): 712–717
- 陈俊桦, 李新平, 张家生. 2016. 基于爆破损伤的岩台保护层开挖爆破参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 35(1): 98–108
- 陈俊桦, 张家生, 李新平. 2016. 大型地下洞室开挖爆破破坏影响范围[J]. 中南大学学报(自然科学版), 47(11): 3808–3817
- 陈俊桦, 张家生, 李新平. 2016. 基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用[J]. 岩土力学, 37(5): 1441–1450
- 陈俊桦, 张家生, 李新平. 2016. 考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型及应用[J]. 岩土工程学报, 38(5): 857–866
- 陈乐求, 张家生, 陈俊桦, 陈积光. 2017. 初始损伤对脆性岩石抗压力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 48(2): 484–490
- 都浩, 邓芃, 杜荣强. 2010. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁动力响应的数值分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 29(6): 50–54
- 官凤强, 李夕兵, 刘希灵. 2012. 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, 31(8): 29–32
- 郭旭光, 牛志杰, 王振林, 冯右伦, 周柯全, 朱永才. 2015. 岩石脆性预测在吉木萨尔凹陷致密油勘探中的应用[J]. 地质与勘探, 51(3): 592–598
- 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 孔君凤. 2011. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 30(12): 2507–2513
- 鞠庆海, 吴绵拔. 1993. 岩石材料三轴压缩动力特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 15(3): 73–80
- 李刚, 陈正汉, 谢云, 祝文化. 2007. 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, 28(9): 1833–1840
- 李夕兵, 左宇军, 马春德. 2006. 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, 25(5): 865–874
- 梁昌玉, 李 晓, 李守定, 赫建明, 马超锋. 2012. 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 31(6): 1156–1161
- 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 1998. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 17(2): 216–222
- 马春德, 李夕兵, 史雁平. 2004. 用低周疲劳加载实现中等应变率下岩石动态破坏的新方法[J]. 矿业研究与开发, 24(1): 11–13
- 苏承东, 李怀珍, 张 盛, 勾攀峰. 2013. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 32(5): 943–950
- 唐礼忠, 舒计步, 武建力, 李夕兵, 汪令辉. 2014. 高静应力和频繁动力扰动共同作用下砂卡岩动力学特性[J]. 北京科技大学学报, 36(8): 993–999
- 王 斌, 李夕兵, 尹士兵, 马春德, 殷志强, 李志国. 2010. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 29(5): 1003–1009
- 吴绵拔, 刘远惠. 1980. 中等应变速率对岩石力学特性的影响[J]. 岩土力学, 1(1): 51–58
- 于亚伦, 金科学. 1990. 高应变率下的矿岩特性研究[J]. 爆炸与冲击, 10(3): 266–271
- 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 2009. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件[J]. 岩石力学与工程学报, 28(12): 2445–2453

Test of Effects of Strain Rate on Mechanical Properties of Rock

CHEN Le-qiu^{1,2}, CHEN Jun-hua², ZHANG Jia-sheng²

(1. Department of Construction & Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414006;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075)

Abstract: Uniaxial compressive tests of basalt were carried out under low-medium strain rate loading. The effects of strain rate on mechanical parameters, including compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio, were analyzed based on the test results, and the fitting relationships between those mechanical parameters and strain rate were proposed respectively. The strain corresponding to the peak stress and the softening modulus were used as the two indexes for evaluating the brittleness of rock. The results obtained by the tests show that as follows: (1) Both the uniaxial compressive

strength and the elastic modulus increase with the strain rate. (2) The Poisson's rate decreases with the strain rate. (3) With the increase of strain rate, the strain corresponding to the peak stress increases, while the rock mechanical properties of strain softening and brittleness become weak. (4) The influences of the strain rate on the uniaxial compressive strength are great, while the influences on both the elastic modulus and the Poisson's rate are small. (5) The results of curve fitting are good, and the proposed relationships for fitting curves are reasonable.

Key words: rock mechanics, strain rate, uniaxial compressive strength, elastic modulus, Poisson's rate

