轴向拉伸情况下岩石的动态力学特性试验研究

刘世奇[1, 2]，李海波[1]，李俊如[1]
(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所，湖北 武汉 430071；2. 湖南省水利厅洞工局，湖南 长沙 410007)

摘 要：通过在自行研制的加载系统上对花岗岩在应变速率 $10^{-5}s^{-1}$～$10^{-1}s^{-1}$ 范围内进行了动态直接单轴拉伸试验，并辅以巴西劈裂实验，系统、全面地研究了花岗岩在不同应变速率影响下的强度及变形特性。结果表明：岩石的抗拉强度随着应变速率的增加而增加；岩石的弹性模量也随着应变速率的增加而增加，但增加幅度小于抗拉强度的增加幅度；另外岩石的临界拉伸应变与应变速率也呈正相关性，但岩石的泊松比与应变速率的率相关性不是特别明显，表现得较为离散。并根据已有研究成果初步讨论了岩石在轴向拉伸情况的动态力学特性机理。

关键词：动态轴向拉伸；岩石；力学特性
中图分类号：TU458 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1904－04

作者简介：刘世奇(1980－)，男，博士研究生。E-mail: liunet0944@sina.com.cn。

Mechanical properties of rock material under dynamic uniaxial tension

LIU Shi-qi[1, 2]，LI Hai-bo[1]，LI Jun-ru[1]
(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Dongting Lake Water Recourese Bureau, Hunan Government, Changsha 410007, China)

Abstract: Dynamic direct tensile tests and Brazilian tests of granite were carried out by use of the loading system developed by the authors, with the axial strain rate ranging from 10^{-5} to 10^{-1} s^{-1}. Dynamic strength and deformation properties were studied systematically. It was indicated that the tensile strength of rock material increased with the increasing strain rate. The Young's modulus of the rock also increased with the increasing strain rate, but the increasing rate was less than that of tensile strength. And it was the same for the critical tensile strain. However, the Poisson's ratio was discrete. In addition, the mechanism of the strain rate effect of the rock material was primarily analyzed.

Key words: dynamic uniaxial tension; rock material; mechanical property

0 引 言

岩石在动荷载作用下的力学特性是研究爆炸以及地震载荷在岩石结构中传播与衰减规律的关键性问题。通常情况下，岩石的动态力学特性（拉伸、压缩、剪切）不同于静载条件下，其动态强度和变形都会随着加载速率的不同而发生变化。实际工程中，岩石材料的抗拉强度远低于抗压强度，基岩结构的破坏区域的大小以及破坏程度在很大程度上取决于岩石材料的拉伸力学特性，因而研究拉伸荷载作用下特别是动态拉伸条件下岩石的力学特性具有重要的理论和现实意义，是工程界迫切需要解决的关键问题。但由于岩石破坏的复杂性以及试验条件的限制，目前对于岩石在动态拉伸荷载作用下的力学响应及试验研究都还很不充分，因此，对于岩石材料在动态拉伸荷载作用下力学特性的研究已受到重视。

岩石拉伸试验表明，岩石材料的抗拉强度一般随着加载速率的增加而增加，表现出明显的率相关性。例如，文献[1]的研究结果表明玄武岩在较高加载速率下的抗拉强度比在其低加载速率下的值增加 17%，石灰岩增加 44%；文献[2]通过实验指出当加载速率增加四个数量级时，石灰岩的抗拉强度增加 53%；文献[3]的实验结果表明，当应变速率在 10^{-6}～10^{0} s^{-1} 围内每增加一个数量级时，花岗岩的抗拉强度大约增加 10%。

通过在本所自行研制的动载加载系统对岩石材料（花岗岩）在应变速率为 10^{-5}～10^{-1} s^{-1} 范围内进行动态直接单轴拉伸试验，并辅以巴西劈裂实验，系统、全面地研究了花岗岩在不同应变速率影响下的强度及变形特性，并且给出了强度、弹性模量以及临界应变的随应变速率变化的关系曲线，分析了泊松比与应变速率的关系。最后讨论分析了岩石动态拉伸力学特性

基金项目：国家自然科学基金重点资助项目（50439030）；国家重点基础发展规划资助项目 (2002CB412705)
收稿日期：2006－11－06

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与应变速率率相关的原因。

1　实验设备及试样制备

1.1　实验系统

图 1 为本文采用的 10T 动载实验系统，该系统为气液联动动态加载实验系统，主要用于进行岩石类脆性材料的抗拉、抗剪以及断裂韧度实验，该实验系统的详细介绍见文献[4]，实验系统的应变速率范围为 10^{-6}～10^{1} s^{-1}，轴向最大动荷载为 100 kN。

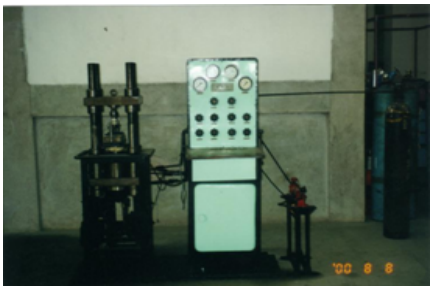


图 1　10T 动载试验机系统

Fig. 1 10T Dynamic testing machine

图 2 为本课题自行设计的直接拉伸加载装置示意图。加载装置采用粘结在岩样两端的拉头施加拉力（拉力由拉压转换装置实现），拉头与岩样之间选用 RDT-10000 超强胶粘结，此胶拉伸强度可达 20 MPa，高于绝大多数岩石的抗拉强度。拉头小巧，整套夹具小而轻，满足动力试验要求。实验中，将长方体岩样 1 用高强胶粘结在试件上下拉头 2-1、2-2 上，上下拉头 2-1、2-2 各装上下拉轴 3-1、3-2，并按十字形布置，可以起到万向的接头作用，使得岩样受拉时受力均匀。上下拉轴 3-1、3-2 放入交叉相扣的拉压转换器 4 端头槽中，可在动载机上进行动态直接拉伸加载。

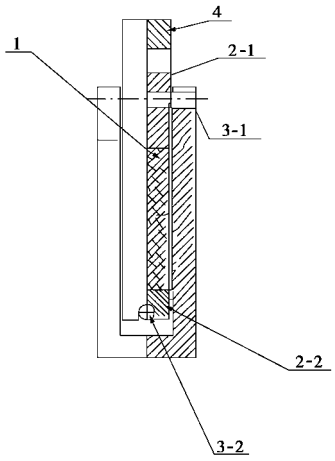


图 2　加载系统示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the loading system

1.2　试件制备

实验所采用的花岗岩取自岭澳核电站二期核岛基岩，试样尺寸为 80 mm ×20 mm ×20 mm，为了避免试件的断裂部位出现在试样与接头的粘连部位，把接头加工成一凹槽，试样头部可以嵌入 5 mm，试件与接头之间的连接采 RDT-10000 超强胶粘结，如图 3 所示。



图 3　试样

Fig. 3 Samples

巴西劈裂圆盘试样采自同一花岗岩，所以具有较高的对比性。圆盘直径 50 mm，厚度 25 mm。

实验中，通过轴向加压系统对试样施加动荷载，通过粘贴在试样上的应变片测量试件的轴向和横向变形，通过加载压头上的压力传感器量测作用在试样上的动荷载，轴向和横向的变形数据是有与主控电脑相连的传感器采集得到的。

2　试验结果及分析

考虑到地震荷载作用下岩石的应变速率范围以及本动载试验机的加载能力，本次试验设了 10^{-5}，10^{-4}，10^{-3}，10^{-2}，10^{-1} s^{-1} 五种应变速率。图 4 是拉伸破坏后的试件，结果表明，通过在接头部位设置凹槽较为有效地克服了以往试件在端部开裂或破坏的弊端。

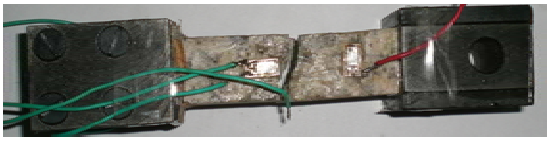


图 4　典型破坏试件

Fig. 4 Typical failure of samples

2.1　应变速率对岩石拉伸强度的影响

岩石材料的抗拉伸强度与加载速率密切相关，本文用应变速率来表征加载的快慢，定义应变速率为拉伸应变对时间导数，为了简单起见，计算应变速率时采用近似公式

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_t}{T} \quad , \tag{1}$$

式中，ε_t 为试件破坏时的峰值处应变，T 为试件拉伸破坏时间，即从加载到破坏所需的时间。表 1 是不同应变速率下的花岗岩直接拉伸强度。

定义岩石的动态拉伸强度增长因数抗拉强度比为动荷载下的强度与静载下的强度的比值，在本试验中，拟定最低应变速率 10^{-5} s^{-1} 为静态。图 5 是抗拉强度比与应变速率的关系图。从表 1 和图 5 可以看出，由直接拉伸和间接劈裂实验得到的花岗岩的抗拉强度都随

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

着应变速率的增加呈明显的增加的趋势，这与现有的研究规律一致。并且由两种方法得到的抗拉强度比基本一致，说明本拉伸系统得到数据是可信的。当应变速率从 10^{-5} s^{-1} 增加到 10^{-1} s^{-1} 时，由直接拉伸得到的花岗岩抗拉强度提高了 61%，平均应变速率每增加一个数量级，强度提高了 15%，这一点与文献[3]中提出应变速率每增加一个数量级，强度提高约 10%的结论有所出入。另外，由直接拉伸得到的数据较间接劈裂法分散，这说明本拉伸系统稳定性还有待改进。

表 1 不同应变速率下的花岗岩直接拉伸强度

Table 1 The tensile strength of granite under different strain rate

编号	花岗岩抗拉强度/MPa				
	$10^{-5}s^{-1}$	$10^{-4}s^{-1}$	$10^{-3}s^{-1}$	$10^{-2}s^{-1}$	$10^{-1}s^{-1}$
1		6.88			
2	6.41	7.34	8.28	8.46	9.46
3	6.82	8.03	7.85	9.69	11.56
4	5.77	7.45	9.46	9.11	9.80
平均值	6.40	7.40	8.5	9.1	10.3

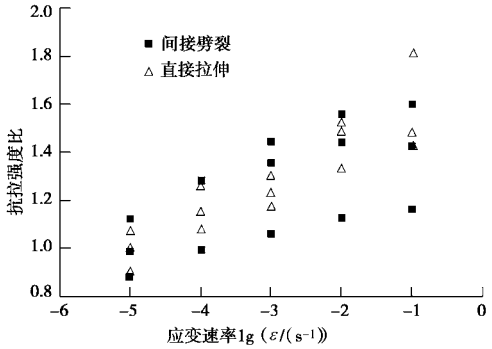


图 5 岩石抗拉强度随应变速率变化关系曲线

Fig.5 Variation of tensile strength with strain rates

2.2 应变速率对岩石变形特性的影响

试样的变形是通过贴在试样表面的应变片测得，由轴向和横向应变片测得的轴向应变 ε_1 及横向应变 ε_2 可以得到试样的体应变 ε_V，即

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad 。 \tag{2}$$

图 6 是代表性的应力－应变曲线

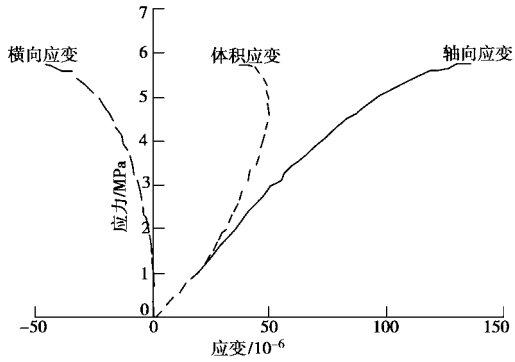


图 6 典型试样的应力应变曲线

Fig. 6 Typical stress and strain curves for samples

一般来讲，作用于岩石的拉应力在达到其抗拉强度的 40%～60%前可认为岩石处于弹性阶段。现有研究[4]表明当拉伸应力低于某临界应力时，材料没有损伤发生也没有微裂纹的扩展。所有的微裂纹只是经历弹性变形。试验中也发现在达到 50%强度以前，应力－应变关系接近线性。由此并根据文[5]试样的弹性模量以及泊松比按如下方法确定：

$$E = \frac{\text{50\%破坏应力对应的轴向应力}}{\text{50\%破坏应力对应的轴向应变}} \quad , \tag{3}$$

$$\nu = \frac{\text{50\%破坏应力对应的轴向应变}}{\text{50\%破坏应力对应的横向应变}} \quad 。 \tag{4}$$

定义拉伸弹性模量比为动态拉伸下的弹性模量与拟静态弹性模量（应变率为 10^{-5} s^{-1} 时的弹性模量）之比。图 7 是岩石弹性模量随应变速率变化关系曲线图。试验结果表明：随着应变速率的增加,岩石的弹性模量也相应地有所增加，当应变率为 10^{-4}，10^{-3}，10^{-2} 和 10^{-1} s^{-1} 时，花岗岩的弹性模量相对于应变率为 10^{-5} s^{-1} 时的弹性模量分别增加了 3%，7%，10%，14%，这一点与岩石的抗拉强度随着应变速率的增加而增加的规律相同，但是弹性模量随着应变速率增加的幅度小于强度随应变速率增加的幅度，这一规律与岩石在单轴压缩下所表现出的规律一致。

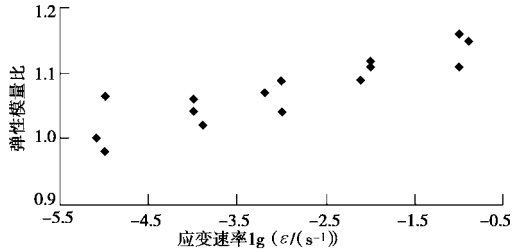


图 7 岩石弹性模量随应变速率变化关系曲线

Fig. 7 Variation of Young's modulus with strain rates

岩石的泊松比离散度较大，其变化规律在以往的研究中尚不多见。对本次实验的结果分析发现，泊松比变化范围为 0.18～0.28，从最小二乘法回归的直线来看，随着应变速率的增加，泊松比略有增加的趋势，但并不显著，可以用常数来表达。

材料破坏时峰值应力对应的应变即临界应变是反映材料破坏时所能承受的最大变形，对实际工程应用有着较为重要的意义。试验研究表明：随着应变速率的提高，花岗岩峰值应力处拉伸应变有明显的增加。当应变速率为 10^{-5} s^{-1}，花岗岩临界拉伸应变为 120×10^{-6}，而当应变速率为 10^{-1} s^{-1} 时，其值为 170×10^{-6}，增幅为 40%。图 8 是临界应变随应变速率的变化关系曲线，其中临界应变比的定义同弹性模量比。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

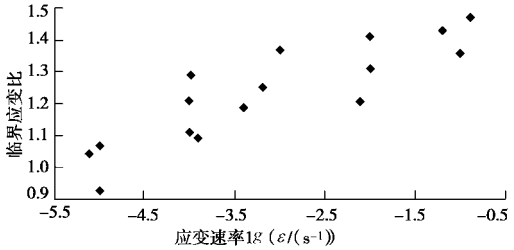


图 8 岩石临界应变随应变速率变化关系曲线

Fig. 8 Variation of critical tensile strain with strain rates

3 结论与讨论

通过自行设计的拉伸装置对花岗岩进行了动态直接单轴拉伸试验，并辅巴西劈裂实验予以对比。结果表明，岩石的抗拉强度随着应变速率的增加而增加，岩石的弹性模量也随着应变速率的增加而增加，但增加幅度小于抗拉强度的增加幅度，另外岩石的临界拉伸应变与应变速率也呈现出较明显的正相关性，但岩石的泊松比与应变速率的率相关性不是特别明显，表现的较为离散。

基于岩石动态力学特性实验研究，国内外研究人员致力于揭示岩石材料的动态力学特性机理作了大量的工作。例如 Sang Ho Cho 和 Yuji Ogata[6]认为高应变速率导致了区域内大量裂纹的出现，释放其周围微裂纹尖端的应力集中程度，干预了微裂纹之间细观尺度结构面的形成，使得整个区域在没有较大结构面情况下承受的应力可以有所提高，最终导致岩石的抗拉强度增大；Grady 和 Kipp[7]认为在静载荷作用下，岩石材料内部的最大或最危险的裂纹控制着破坏的发生，但是在动载荷作用下，单独的一个裂纹已经不足以驱使材料内部破坏的发生，需要有其他的裂纹参与，导致了岩石材料抗拉强度的升高。另外文献[8]通过 SEM（scanning electronic microscopy）观察结果表明，随着应变速率的增加，更多的裂纹参与扩展与聚合。可以说岩石内部弥散分布的微裂纹是导致岩石材料动态力学特性与应变速率存在率相关性的根本原因。对于在 2.1 节中出现的抗拉强度随应变速率增长幅度较已有研究结果[8]偏大的原因也可以由此解释，本文试验选取花岗岩的强度较文献[3]中花岗岩的强度低，也就意味着本文选取的花岗岩风化程度较高，存在的初始裂纹较多，因此表现出来的率相关性更强。

目前研究还主要集中在压缩下岩石动态力学特性研究，虽然岩石的动态力学特性存在拉压相似性[10]，但是真正弄清楚岩石材料在拉伸情况下的动态力学特性还有很多工作要做，本文仅仅从试验方面进行了一些初探，为进一步研究岩石材料在拉伸情况下的动态力学特性提供一些尝试。

参考文献：

[1] ZHAO J, LI H B, ZHAO Y H. Dynamic strength tests of the Bukit Timah granite[R]. Singapore: Nanyang Technological University, 1998.

[2] 吴绵拔, 刘远惠. 龙门石灰岩动力特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**: 415－429. (WU M B, LIU Y H. Experimental study on dynamic properties of the Longman limestone[J]. Chinese J Rock Mech Engng, 1996, **15**: 415－429. (in Chinese)).

[3] ZHAO J, LI H B. Experimental determination of dynamic tensile properties of granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, **37**: 861－866.

[4] FENG Xi-qiao, YU Shou-wen. Micromechanical modeling of tensileresponse of elastic-brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, **32**(22): 3359－3372.

[5] BROWN E T. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods — Rock characterization testing and monitoring[S]. New York: Published for the Commission on Testing Methods International Society for Rock Mechanics, 1981.

[6] CHO Sang Ho, OGATA Yuji, Katsuhiko, et al. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(5): 763－777.

[7] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. Int J Rock Mach & Min Sci, 1980, **17**: 140－154.

[8] 李海波, 王建伟, 李俊如, 等. 单轴压缩下软岩的动态力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(1): 1－4. (LI H B, WANG J W, LI J R. Mechanical properties of soft rock under dynamic uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(1): 1－4. (in Chinese))

[9] 陶率初, 夏才初, 何之民. 花岗岩拉伸全过程变形特性的试验研究[J]. 同济大学学报, 1997, **25**(1): 34－38. (TAO L C, XIA C C, HE Z M. Experimental studies on the total course stress-strain curves of granite specimens under tensile condition[J]. Journal of Tongji University, 1997, **25**(1): 34－38. (in Chinese))

[10] 金丰年. 岩石拉压特征的相似性[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(2): 31－33. (JIN F N, Comparison of tensile and compressive behaviors of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2): 31－33. (In Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net