第 23 卷 第 1 期
2008 年 2 月

实 验 力 学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 23 No. 1
Feb. 2008

文章编号:1001-4888(2008)01-0089-07

岩石变形演化诱致灾变破坏过程的同步实验观测*

郝圣旺[1,2], 孙 菊[3]

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院,秦皇岛 06004; 2. 中国科学院 力学研究所,非线性力学国家重点实验室,北京 100080; 3. 燕山大学 信息科学与工程学院,秦皇岛 066004)

摘要: 将试样变形场演化特征与试样的宏观载荷位移曲线的演化特征结合起来研究是揭示非均匀脆性介质变形演化诱致灾变破坏的一个重要途径。本文发展了一套实验系统,通过对试样表面变形场的演化、宏观载荷和位移信号的同步观测,对单轴加载下岩石试样变形演化和灾变破坏的过程进行了实验研究。揭示了试样变形场由加载初期的随机涨落到灾变破坏前出现明显的变形局部化的演化特征现象,试样最终在变形局部化区内形成宏观破裂面。

关键词: 同步观测; 局部化; 灾变破坏; 岩石

中图分类号: O34 **文献标识码**: A

0 引言

非均匀脆性介质破坏的基本模式是演化诱致灾变,即在加载过程中介质内发生细观尺度(介于微观与宏观之间的尺度,主要取决于材料的微结构尺度)微损伤的萌生、扩展和互相连接的过程,当微损伤累积达到某个临界条件时,将触发突发性灾变,导致大尺度或整体性的灾变性破坏[1-4]。在多数情况下,损伤演化诱致灾变破坏是由损伤局部化的发展所触发的[4-7]。灾变性破坏通常发生在载荷-位移曲线越过载荷极大值以后的应力软化段[8]。但灾变破坏的临界条件对材料内部细观尺度的无序非均匀性十分敏感[2-4],初始平均性质大体相同的样本其灾变点可呈现很大的分散性,或称为宏观不确定性[4,9],尤其重要的是在灾变破坏之前会出现变形和损伤局部化[4-7,10],这些意味着不可能仅仅基于宏观平均性质表征灾变破坏[4,10-12],这正是灾变破坏预测的基本困难所在。研究损伤演化、特别是变形和损伤局部化与灾变破坏的关系[11],不仅是重要的科学问题,而且可能为灾变破坏预测提供线索。

在实验上观测样本内部微损伤的演化过程是十分困难的。声发射定位测量[13]可以给出微损伤演化空间分布的直观图象,但损伤累积触发灾变破坏的条件主要取决于微损伤的集体效应,特别是其定量的宏观空间分布,这是声发射定位测量难以提供的。试样表面应变场的演化在一定程度上反映了微损伤集体效应的空间分布,可能为刻画损伤演化和损伤局部化、以及捕捉灾变破坏前兆提供重要信息。

基于以上考虑,我们搭建了一套对宏观载荷-位移曲线和在这个过程中发生的变形场演化过程进行同步的观测的实验系统。白光散斑相关方法[14-18](DSCM)是一种被广泛应用的较成熟的测量试样变形的方法,本文同样应用该方法测量试样的表面变形场。我们利用这个系统对岩石试样进行单轴压缩实验,并通过数据处理给出了表面应变场的演化过程、表面应变场局部化的发展、以及局部化与灾变破坏的关联。结果表明,这个实验系统可以作为一种研究变形和损伤与灾变破坏的有效的实验平台。

* 收稿日期: 2007-07-10; 修订日期: 2007-12-02
基金项目: 国家自然科学基金(批准号:10472118)
通讯作者: 郝圣旺(1975-),男,博士,燕山大学建筑工程与力学学院讲师,主要从事非均匀介质灾变破坏的研究。E-mail: hsw@lnm.imech.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 同步观测实验系统的实现

在本文的实验观测系统中,我们采用如下的办法实现宏观载荷 - 位移信号和表面变形场信号的同步采集(如图 1 所示)。

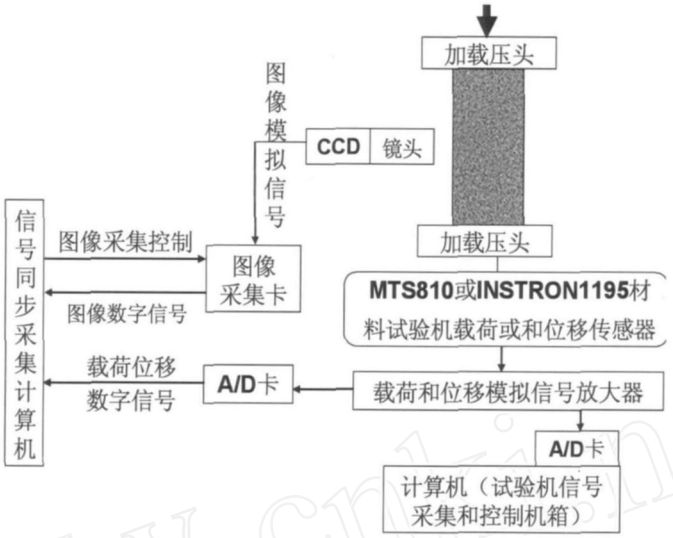

图 1 信号同步采集系统总体框图

Fig. 1 Program of data synchronous capture

具体方法为:

1) 利用 MTS810 或 INSTRON1195 材料试验机对岩石试样进行单轴压缩,通过载荷和位移传感器测量试样加载过程中的宏观载荷和位移(机器行走的位移或试样平均变形)信号。

2) 将试验机上位移和力传感器测量的载荷和位移(机器行走的位移或试样平均变形)信号传送到信号变送器将信号放大。

3) 将放大后的宏观载荷和位移(机器行走的位移或试样平均变形)模拟信号,传送到一台进行宏观载荷 - 位移信号和试样表面散斑场同步采集的计算机。该计算机上装有采集载荷 - 位移信号的 A/D 采集卡和进行散斑图片采集的图像采集卡。其中 A/D 卡为凌华科技股份有限公司生产的 DAQ-2214 (16 通道)数据采集卡。

4) 通过载荷和位移(机器行走的位移或试样平均变形)信号触发图像采集卡进行图像采集。在实验中,图像信息和载荷位移信号不断地通过数据线向同步采集计算机传输,在这个过程中,计算机不断地读取载荷和位移信号。当载荷和位移信号达到要求的阈值时,触发图像采集卡进行图像采集,实验中采集位移和载荷信号所用的 A/D 卡的采集速度较快,为 106 个采样点/秒,触发图像采集的误差应不大于两个采样点之间的时间间隔(微秒),而图像采集的速度为 24 帧/秒,所以,载荷和位移信号和图像信号的最大同步误差不超过 1/25 秒。

5) 采集时,采用散斑图片信号和载荷 - 位移信号同步采集。采样过程中,将图像文件名和宏观载荷 - 位移数据点的序号均取为该采集步的编号,并记录此时的时间。

通过上面的方法,可以将试样表面散斑信号与试样宏观载荷 - 位移曲线的信号进行同步采集,再通过散斑相关分析软件计算试样的变形场序列,从而实现了试样表面变形场与其宏观载荷 - 位移曲线的同步分析。

2 试验装置和测量过程

本文的试验是在中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室进行的。在试验中,岩石试样的尺寸为 $20(L)\times18(W)\times40(H)\,mm^3$。分别在 MTS810 材料试验机和 INSTRON1195 材料试验机上进行。在 MTS810 材料试验机上进行的压缩试验的加载速率为 0.02mm/min;在 INSTRON1195 材料

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验机上进行的压缩试验的加载速率为 0.05mm/ min。两种实验机加载下,试验装置的实物图如图 2 (MTS810 材料试验机) 和图 3(IMSTRON1195 材料试验机)。

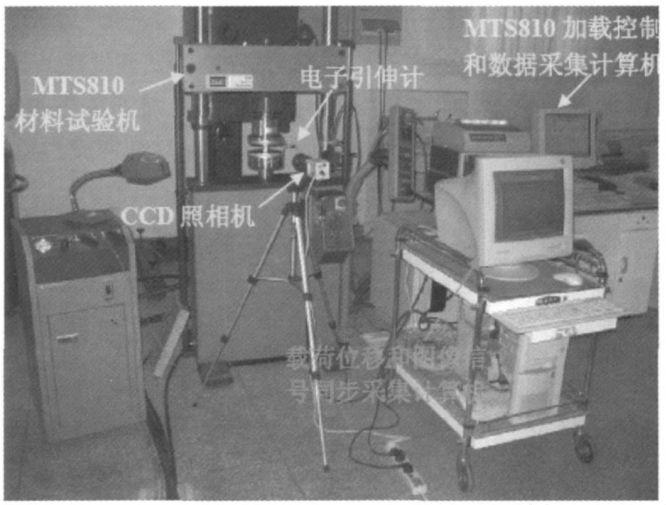

图 2　MTS810 材料试验机加载下的信号同步观测试验装置

Fig. 2　Testing setup for information synchronous observation (MTS 810 Testing Machine)

图 3　Instron1195 材料试验机加载下的信号同步观测试验装置

Fig. 3　Testing setup for information synchronous observation (Instron1195 Testing Machine)

3　实验结果及分析

3.1　单轴压缩试样的载荷 - 位移曲线

这里以一个花岗岩试样的试验作为典型事例 (其他试样有着类似的特征) ,介绍其变形场演化局部化并诱致最后灾变破坏的演化过程。该试样是在 MTS810 材料试验机上进行 ,其加载驱动端在下面。即试验机上面压头不动 ,通过下端的压头向上移动对试样进行单轴压缩加载。

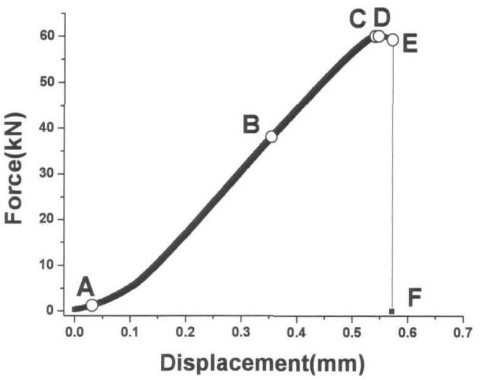

图 4　单轴加载下花岗岩试样 1 的载荷 - 位移曲线

Fig. 4　Load-displacement curve of granite sample 1

图 4 示出了这个试样的载荷 - 位移曲线 ,其横坐标的位移值是加载过程中试验机输出的压头位移值。可以看出试样经过刚开始的压实阶段 ,随后是一段准线弹性阶段 ,最后再经过一段非弹性段到最大载荷点 ,之后载荷 - 位移曲线进一步演化到 E 点发生突然的灾变破坏 ,载荷 - 位移曲线发生突跳到 F 点。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 4 中曲线上 A, B, C, D, E, F 各点表示的是下文各位移场和应变场斑图在试样宏观载荷 - 位移曲线上的对应位置。

3.2 横向位移场演化特征

岩石、混凝土类脆性材料的压缩强度一般要比其剪切强度高,尤其要比其拉伸强度高得多。在这类材料的单轴压缩试验中,其纵向受压,从而会产生横向拉伸位移。对其最终的灾变破坏来说,其横向变形(垂直于加载方向)往往比纵向变形(加载方向)更加重要,破坏对横向变形更加敏感。本文将着重分析其横向位移场的演化与其最后灾变破坏的关联。

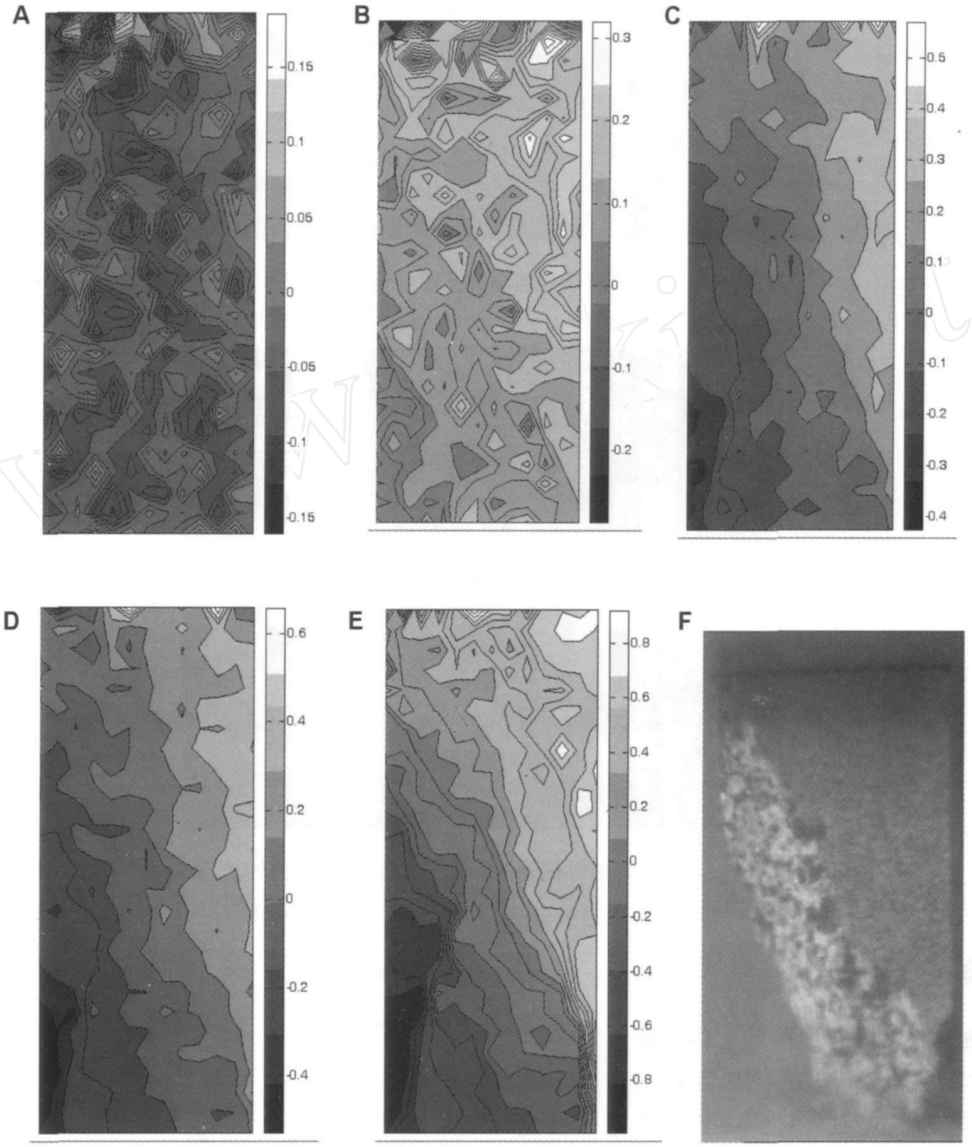

图 5 试样横向位移场演化特征。图中色标表示横向位移值,黑线为横向位移等值线
子图 A,B,C,D,E 为载荷位移曲线(图 4)上对应点的横向位移场斑图,E 为灾变前的最后一张横向位移场斑图。F 为该试样的破坏面实物图。

Fig. 5 Transverse displacement field of granite sample 1

图 5 给出了载荷 - 位移曲线上各代表性时刻的横向位移场斑图。图中的色标表示横向位移值,黑色曲线为横向位移场等值线。可以看出,在加载的初期(图 5A),横向位移场表现为随机分布,同时存在着随机涨落。随着载荷的增加,变形逐渐演化,其横向位移场由开始的随机分布逐渐趋向规整(图 5B,C)。随着变形的进一步发展,等值线倾向于平行破坏面的方向(图 5D,E),并且的破坏面附近等值线较密集(图 5E,F)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据横向位移场的这个演化特点,我们就可以对具有单一破坏面破坏方式的破裂面方向和位置进行预测。这个特点对于我们考察局部化区的发展及诱发灾变破坏过程,以及对灾变破坏进行预报有着很重要的价值。

3.3　第一主应变场的演化特征

图 6 给出了各代表时刻试样表面第一主应变场斑图。图中的色标代表着各位置应变值的大小,黑线为第一主应变等值线。第一主应变的计算方法为:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \tag{1}$$

ε_x, ε_y 和 γ_{xy} 分别为根据散斑相关方法求得的位移场求出的 x, y 方向正应变和剪应变。

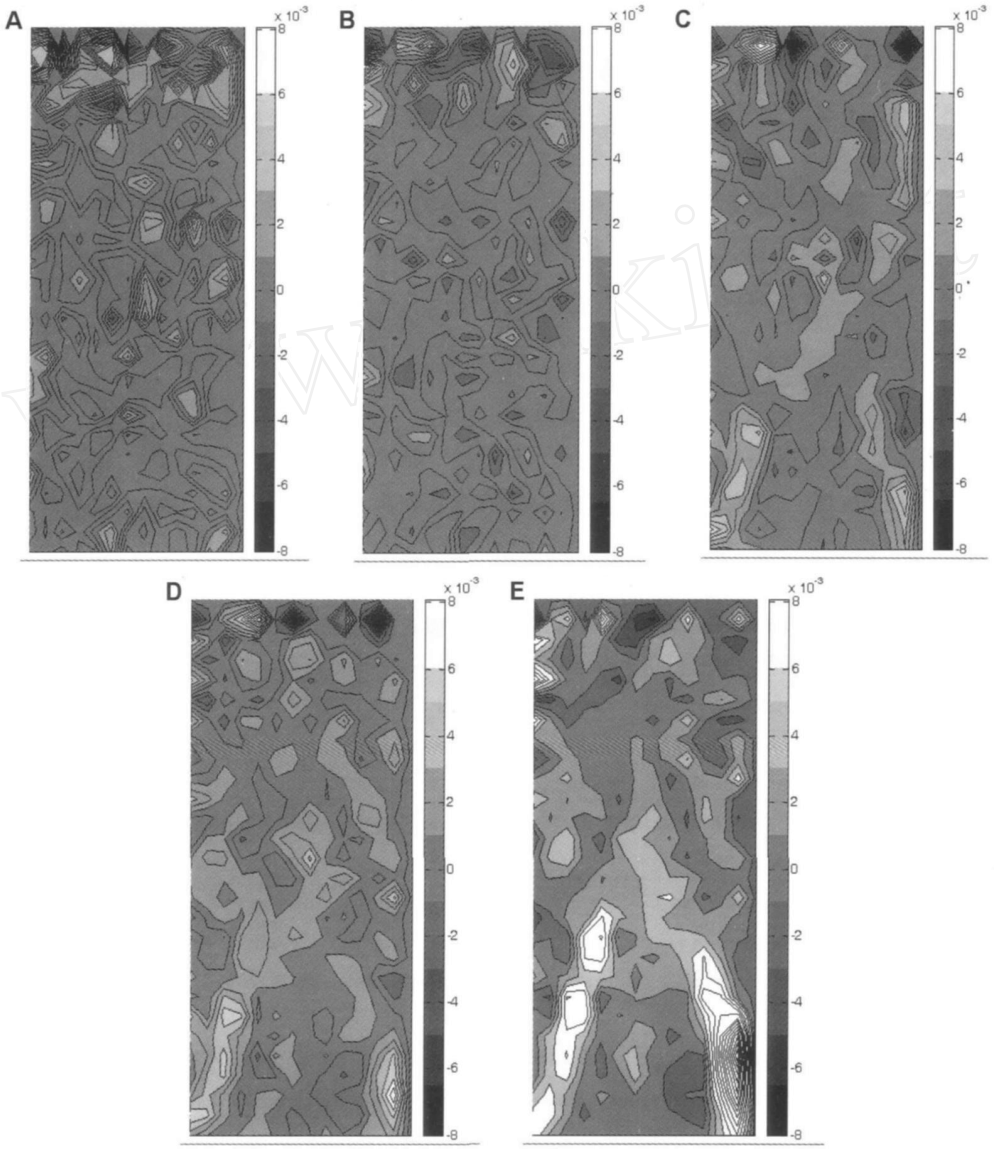

图 6　花岗岩试样 1 的第一主应变演化斑图和破坏方式。图中的色标代表相应位置应变值的大小,黑线为应变等值线。A,B,C,D,E 为载荷 - 位移曲线(图 4)上对应点的主应变斑图,其中 E 为灾变前的最后一张应变斑图。

Fig. 6　Evolution of the primary stress field and rupture shape of granite sample 1

可以看出,在加载的开始阶段(如图 6A,B),试样的应变场涨落是随机的。随着加载的继续,应变场不断演化发展,到最大载荷点附近时(图 6C),试样出现了局部化现象,形成了高应变聚集的局部化区。随后,随着变形和损伤的发展,局部化程度进一步加剧(图 6D,E),直到最后发生突然的宏观灾变

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

破坏,并且破坏面发生在高应变局部化区(图 5F)。

从图 6 中可以看出,在试样破坏之前存在着两个高应变区,最后的灾变破坏发生在其中的一个高应变区域。根据我们对变形演化局部化及局部化区的演化发展的更进一步的详细分析[11],形成最终宏观破裂面的高应变区即位于试样的变形局部化区。

4 结论

本文通过自行搭建的白光散斑同步测量系统,对单轴加载下岩石试样的表面位移场和载荷 - 位移曲线进行了同步观测,并对试样表面变形场的演化特征进行了分析。

实验揭示了试样变形场由加载初期的随机涨落到变形局部化的演化特征,试样最终在一个局部化区内形成灾变破坏。单轴压缩加载下的大理岩和花岗岩试样,在加载初期,其位移场和变形场呈随机涨落分布。随着变形的进一步发展,位移场等值线开始变得规整。在灾变破坏前出现明显的变形局部化现象,位移场等值线会偏向平行于最后宏观破裂面方向。

上述结果表明,这个试验平台为研究变形局部化区尺度与试样灾变破坏点应变的关系,研究损伤和变形局部化诱致灾变破坏的过程提供了切实可行的基础。

致谢: 感谢国家自然科学基金委的资助(项目编号:10472118)。感谢中国科学院力学研究所白以龙研究员和北京大学夏蒙棼教授的指导。本文采用的散斑相关分析软件是由中国科技大学力学与机械工程系编写的,感谢中国科技大学力学与机械工程系张青川老师和缪泓老师的帮助。

参考文献:

[1] Donald L Turcotte, William I Newman, Robert Shcherbakov. Micro and macroscopic models of rock fracture[J]. Geophys. J. Int, 2003, 152: 718 - 728.

[2] 夏蒙棼, 韩闻生, 柯孚久, 白以龙. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致灾变(Ⅰ)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1 - 38 (Xia Mengfen, Han Wensheng, Ke Fujiu, Bai Yilong. Statistical meso-scoplc damage mechanlcs and damage evolution induced catastrophe (Ⅰ). Advances in Mechanics, 1995, 25(1): 1 - 38 (in Chinese))

[3] 夏蒙棼, 韩闻生, 柯孚久, 白以龙. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致灾变(Ⅱ)[J]. 力学进展, 1995, 25(2): 145 - 173 (Xia Mengfen, Han Wensheng, Ke Fujiu, Bai Yilong. Statistical meso-scoplc damage mechanlcs and damage evolution induced catastrophe (Ⅱ). Advances in Mechanics, 1995, 25(2): 145 - 173 (in Chinese))

[4] Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, Ke F J. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. Applied Mechanics Reviews, 2005, 58: 372 - 388.

[5] Li H L, Bai Y L, Xia M F, et al. Damage localization as a possible precursor of earthquake rupture[J]. Pure Appl. Geophys, 2000, 157: 1929 - 1943.

[6] Satoh T, Shivakumar K, Nishizawa O, Kusunose K. Precursory localization and development of microfractures along the ultimate fracture plane in amphibolite under triaxial creep[J]. Geophys. Res. Lett, 1996, 23: 865 - 868.

[7] Wong T F, Baud P, Klein E. Localized failure modes in a compactant porous rock[J]. Geophys. Res. Lett, 2001, 28(13): 2521 - 2524.

[8] Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1970, 7(5): 561 - 575.

[9] Xia M F, Ke F J, Bai J, Bai Y L. Threshold diversity and trans-scales sensitivity in a finite nonlinear evolution model of materials failure[J]. Physics Letters A, 1997, 236: 60 - 64.

[10] Bazant Z P. Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4): 518 - 535.

[11] Hao S W, Wang H Y, Xia M F, et al. Relationship between strain localization and catastrophic rupture[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48: 41 - 49.

[12] Ohnaka M. Rupture in the laboratory[J]. Science, 2004, 303(19): 1788 - 1789.

[13] lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350: 39 - 42.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14] Jiang Z Y, Zhang Q C, Jiang H F, et al. Spatial characteristics of the Portevin-Le Chatelier deformation bands in Al-4 at %Cu polycrystals[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2005, 403: 154 - 164.

[15] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195 - 203 (Wang Huaiwen Kang Yilan Xie Heping. Advance in digital speckle correlation method and its application. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195 - 203 (in Chinese))

[16] Jin G C, Wu Z, Bao N K, et al. Digital speckle correlation method with compensation technique for strain field measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 39: 457 - 464.

[17] 潘一山, 杨小彬. 岩石变形局部化的白光数字散斑相关方法研究[J]. 实验力学, 2001, 16(2): 220 - 225 (Pan Yishan, Yang Xiaobin. A study on the deformation localization of rocks by white light digital speckle correlation method. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(2): 220 - 225 (in Chinese))

[18] Pan B, Xie H M, Guo Z P, et al. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky digital differentiator in digital image correlation[J]. Optical Engineering, 2007, 46(3): 033601-1 - 033601-10.

The Synchronous Observations on Deformation Localization Induced Catastrophic Rupture of Rock

HAO Sheng-Wang[1,2], SUN Ju[3]

(1. The School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. The School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The combined study on the evolution of deformation field pattern and force-displacement curve is a key way to capture the intrinsic mechanism of deformation evolution induced catastrophic rupture. In present paper, a system for the synchronous observation of load, displacement and deformation field is set up. The observations on the evolution of surface deformation field and the catastrophic rupture of a rock under uniaxial compression are carried out. It is found that the evolution of surface deformation field displays two phases: at the early stage, the deformation field keeps nearly uniform with weak fluctuations increasing slowly; but at the stage prior to catastrophic rupture, an obvious localization develops and the ultimate macro-fracture forms in the localized zone.

Keywords: synchronous observations; localization; catastrophic rupture; rock

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net