

文章编号: 1001-4888(2015)06-0791-06

巴西圆盘泥岩试件裂纹扩展及应变演化实验研究^{*}

赵娜^{1,2}, 王来贵², 习彦会²

(1. 辽宁工程技术大学 矿业技术学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了研究准静态加载条件下岩石试件巴西劈裂裂纹扩展规律, 采用 MTS 试验机进行准静态加载, 同时用高速摄像机记录裂纹扩展过程。采用白光数字散斑处理软件对摄像机记录的照片进行处理, 得到试件裂纹扩展过程中应变场的演化情况。通过实验和分析可以看出, 由于端部效应及加载方式的原因, 因此裂纹起裂点在底部加载部位; 泥岩试件表面裂纹的平均扩展速度为 252m/s; 岩石的非均质性即内部微缺陷、微裂纹使得泥岩试样的开裂并不是沿着中心直径方向, 而是偏离一定的角度, 初始偏离角度约为 17°。裂纹扩展过程可以划分为三个阶段: 泥岩试件宏观变形阶段(宏观无裂纹)、宏观裂纹稳定扩展阶段、宏观裂纹动态张裂阶段。同时, 在裂纹扩展过程中, 表面第一主应变场、水平位移场等变化明显, 在开裂部位第一主应变最大。通过对圆盘泥岩试件裂纹扩展实验研究, 可为研究岩石破裂及其演化规律提供依据。

关键词: 裂纹扩展; 扩展速度; 应变场; 演化

中图分类号: TD315

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-054

0 引言

岩石裂纹扩展及其演化过程一直是岩石力学界研究的热点问题, 研究方法主要包括数值计算、实验观测及理论分析三个方面。在实验观测方面, 所用观测方法主要包括声发射法^[1,2]、数字摄像法^[3,4]、CT断层扫描法^[5-8]等。岩石是一种准脆性材料, 抗压不抗拉, 岩石的抗拉强度约为抗压强度的十分之一, 甚至更小。由于岩石中含有很多的微裂纹和微缺陷, 在微裂纹端部形成应力集中, 产生拉裂纹并逐渐贯通, 最终导致岩石试件发生拉破坏, 因此拉破坏是导致岩石发生破坏的根本原因。目前, 对于岩石拉破坏实验主要有两种: 直接拉伸实验和间接拉伸实验。对于直接拉伸实验, 由于试件的加工比较困难使用较少, 主要采用间接拉伸实验, 即以压代拉。巴西劈裂实验是大家广泛认同和采用的岩石拉破坏实验。论文以此为基础, 采用数字摄像观测方法研究准静态加载条件下泥岩试件巴西劈裂裂纹的扩展规律。

巴西劈裂实验主要是用于测定岩石的抗拉强度、拉伸模量等, 如文献[9]对岩石劈裂强度的尺寸效应进行了研究, 结果表明巴西劈裂强度存在很大的尺寸效应; 文献[10]对干燥及饱水岩石的劈裂强度进行了研究; 文献[11]基于颗粒流对巴西劈裂裂纹扩展及抗拉强度进行了研究; 文献[12]用巴西劈裂实验确定岩石的弹性模量、拉伸强度以及断裂韧性。而对于岩石裂纹扩展过程的研究, 主要是动态裂纹的扩展即利用 SHPB 实验系统进行动态劈裂实验^[13,14], 对于准静态加载下裂纹扩展规律研究的较少。

本文对 MTS 试验机准静态加载下高速摄影机拍摄的巴西劈裂裂纹扩展过程进行了研究, 并采用白光数字散斑处理软件进行处理, 得到开裂各时刻的应变场, 分析了裂纹扩展规律以及应变场的演化

^{*} 收稿日期: 2015-04-12; 修回日期: 2015-05-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51304108); 国家自然科学基金面上项目(51274110); 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目(U1361211)

通讯作者: 赵娜(1979—), 讲师, 博士研究生, 主要从事岩体力学及岩层控制方面研究。Email: zhaona24@163.com

情况。

1 实验系统及方法

实验试件为泥岩圆盘试样,直径为 63mm,厚度为 12mm;试验机为 MTS810 刚性试验机,试验机加载速率为 0.01mm/s,同时用高速摄影机记录试样破坏瞬时的照片。高速摄影机为 Photron Fastcam SA1.1,采样频率为 20000 帧/s。高速摄像机与计算机相连,实时保存开裂各个瞬时的照片。加载—控制—记录的整体实验系统如图 1。

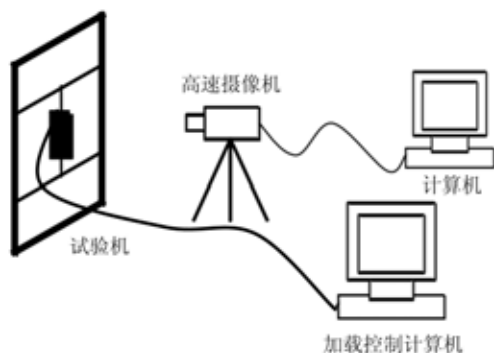


图 1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

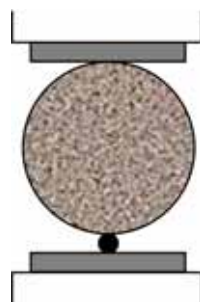


图 2 试样加载方式示意图

Fig. 2 Sketch map of the sample loading mode

试样加载方式如图 2 所示。上部为平台加载,底部为点荷载加载。在实验过程中,保持 MTS 试验机上部固定不动,底部采用液压逐渐升高的方式进行加载。

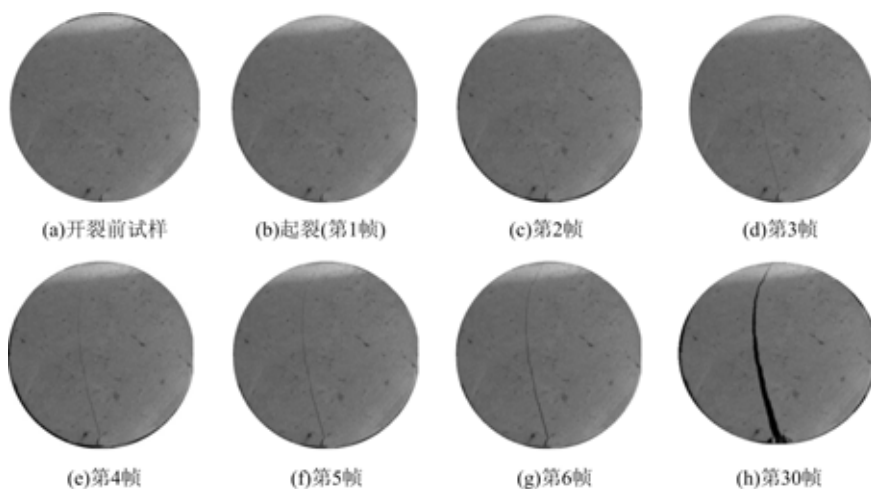


图 3 泥岩试件裂纹扩展过程

Fig. 3 The crack propagation process of the mudstone sample

2 泥岩试件裂纹扩展过程分析

2.1 裂纹起裂点分析

关于巴西劈裂实验,基于均匀假设下的理论起裂点应该位于圆盘试件的圆心点且裂纹位于圆盘中间,但是由于岩石的不均匀性以及加载位置的端部应力集中,实际上岩石的破坏是岩石内部微裂纹、微缺陷进一步破坏演化,从无序到有序的自组织过程^[15]。实验中宏观裂纹的起裂点位于圆盘泥岩试件的底部,这主要是与实验的加载方式有关。本次实验采用顶部平盘加载、底部点荷载的加载方式使得底部局部应力集中明显,首先发生开裂。

2.2 圆盘泥岩试件裂纹扩展过程分析

在此实验中圆盘泥岩试件裂纹扩展大致分为三个阶段:

第一阶段: 泥岩试件变形累计阶段(宏观无裂纹), 图3中开裂前试样至第1帧开裂时, 泥岩试件直径向压缩, 水平径向伸长, 在此阶段变形累积, 宏观裂纹并未形成, 此时试件的变形包括塑性压密变形、岩石颗粒材料弹性变形、内部微裂纹扩展—贯通产生的塑性变形。这时宏观裂纹并未形成, 数码摄像机没有拍摄到表面裂纹。

第二阶段: 宏观裂纹稳定扩展阶段, 从图3中的第1帧开始, 观测到宏观裂纹形成, 并扩展、延伸, 到第5帧时宏观裂纹上下贯通。在第一阶段, 内部微裂纹扩展、贯通, 在圆盘试件应力集中最明显部位首先形成宏观裂纹, 继续加载, 在宏观裂纹的尖端形成新的应力集中, 诱使裂纹进一步贯通、延展, 如此往复, 直至试件上下贯通。在此阶段裂纹仅为扩展、延伸, 当外力随时撤除后, 裂纹扩展即停止, 因此称为宏观裂纹稳定扩展阶段。

将第二阶段各帧宏观裂纹的扩展, 在同一图形标示, 见图4。从图中可以看出, 裂纹在底部点荷载位置起裂, 但是并未沿加载方向开裂, 而是与加载方向有一个夹角, 约为 17° , 裂纹长度约为17mm。第2、3帧长度与第1帧近似, 但是均有角度的偏离, 从第4帧开始向加载方向偏转, 第5帧裂纹最终贯通, 位置为圆盘顶部加载部位。此圆盘泥岩试件巴西圆盘的劈裂并不是沿中心开裂扩展, 原因是由岩石的非均匀性所致, 岩石内部的微缺陷、微裂纹使得裂纹的开裂方向发生偏转, 但是由于加载的端部效应使得起裂点及贯通点与加载位置基本保持一致。

第三阶段: 宏观裂纹动态张裂阶段, 从图3第6帧开始, 圆盘泥岩试件宏观裂纹已经贯通, 但是试件仍然具有一定的承载能力, 此时继续加载, 主要产生的为宏观裂纹的动态张裂, 在此阶段将外力撤除, 宏观裂纹的张开仍然继续, 因此称为宏观裂纹非稳定破裂阶段。

2.3 裂纹扩展速度分析

裂纹扩展速度是衡量裂纹扩展、延伸快慢的主要指标, 其大小受岩石试件本身、实验条件的影响。岩石的组成成分、微裂纹的发育情况、试件的尺寸及径厚比都会使得对裂纹的扩展速度产生影响, 同时实验条件(主要是加载方式和加载速率)也会对裂纹扩展速度产生影响。在本次实验中, 第一阶段宏观无裂纹认为宏观裂纹没有形成, 扩展速度为0; 在第二阶段宏观裂纹稳定扩展阶段, 每一帧裂纹的长度和方向均发生变化, 因此试件各帧的速度大小和方向严格意义上来说并不相同, 但是由于试件尺寸小、扩展速度快, 所以只考虑平均扩展速度; 第三个阶段主要是宏观裂纹的动态张裂。

表面裂纹从起裂至上下贯通用时为:

$$t = (1/P) \times n = (1/20000) \times 5 = 250 \mu\text{s}$$

式中, P 为高速摄像机采样频率; n 为巴西劈裂从起裂到上下贯通高速摄像机所记录的帧数。

试样表面裂纹平均扩展速度为:

$$v = D/t = 0.063\text{m}/250 \times 10^{-6}\text{s} = 252\text{m/s}$$

式中, D 为试样的直径; t 为裂纹从起裂至上下贯通所用时间。

影响裂纹扩展速度的因素主要有: 加载速率、岩石组成成分、微裂纹的发育情况、试件的尺寸及高径比。

3 圆盘泥岩试件变形场演化规律

将劈裂过程中通过高速摄像机记录的开裂各个时刻的照片, 通过白光数字散斑处理软件, 在试件表面自动提取散斑点进行处理, 得到开裂各帧圆盘表面的变形场并分析其演化规律。

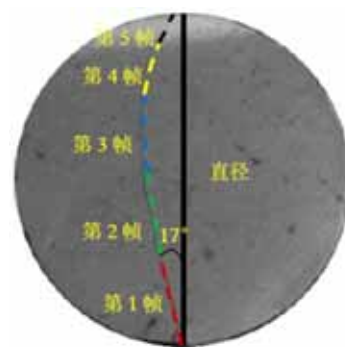


图4 裂纹扩展过程示意图

Fig. 4 Sketch map of the crack propagation

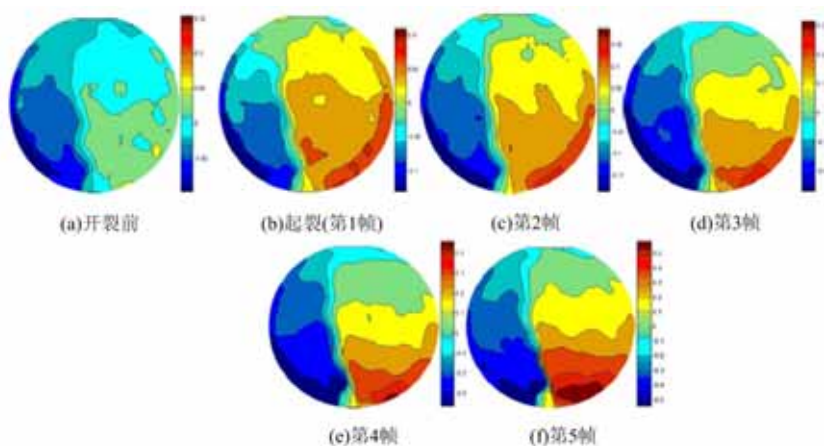


图 5 裂纹扩展过程表面水平位移场演化

Fig. 5 The horizontal displacement field evolution of the crack propagation on the sample surface

3.1 劈裂过程水平位移场演化规律

从图 5 中可以看出,第一张图片开裂前表面宏观裂纹并未形成,但是位移场底部已经破坏,左侧位移为负值,右侧位移为正值,裂纹已经基本形成。随着宏观裂纹的逐渐演化,各点位移逐渐变大,在第 5 帧宏观裂纹上下贯通后,位移场一分为二,左侧位移为负值,右侧位移为正值,且在底部位移最大,到第 5 帧时,圆盘试件已经破坏。之后进入 2.2 节所述破裂的宏观裂纹动态张裂阶段。

3.2 劈裂过程第一主应变场演化规律

在任何应变状态下,至少可以找到三个相互垂直的方向,在该方向仅有正应变而切应变为零。具有该性质的方向,称为应变主轴或应变主方向,该方向的应变称为主应变。三个主应变按照从大到小的顺序依次排列即为第一主应变、第二主应变、第三主应变。第一主应变最大,在此实验中圆盘在垂直方向受压,等效于在水平方向受拉,且认为其在水平方向只有拉应力无剪应力,因此对于应变只有正应变而无切应变,水平方向为主应变方向,且规定拉为正,压为负,因此第一主应变场即为圆盘表面各点的第一主应变值的大小。第一主应变大的部位即为首先发生拉破坏的区域。

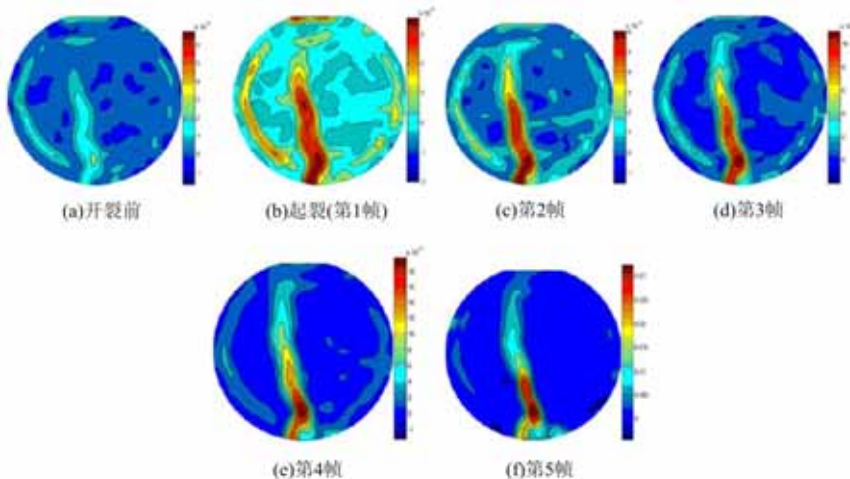


图 6 裂纹扩展过程表面第一主应变场演化

Fig. 6 The first principal strain field evolution of the crack propagation on the sample surface

从图 6 中可以看出,在表面形成宏观裂纹之前,岩石表面即将开裂部位,第一主应变已经较大,如图 6(a)所示,同时在与加载方向垂直的圆盘的两个端点附近,也有明显的第一主应变,即发生拉破坏部位。随着载荷的施加,裂纹的扩展,应变从无序向有序发展,在裂纹开裂部位第一主应变最大。同时,随着裂纹的扩展,岩石表面第一主应变的梯度变化明显增大,在裂纹开裂之前,如图 6(a)应变的最大和最小值之差较小,随着裂纹扩展(图 6(b)~(f))第一主应变梯度明显增大,宏观裂纹形成后第一主应变的最大

和最小值之差约为 0.03。

4 结论

通过高速摄像机记录了准静态加载条件下巴西圆盘的劈裂破坏过程,并采用白光数字散斑软件进行处理,得到了劈裂过程中圆盘表面应变场的演化规律。

(1) 在平台和点荷载联合加载的情况下,巴西圆盘劈裂在点荷载处首先起裂,表面裂纹的平均扩展速度约为 252m/s。

(2) 岩石内部微缺陷、微裂隙的存在,使得巴西圆盘的劈裂并未沿中间开裂,起裂时与加载方向的夹角约为 17° ,之后裂纹扩展,贯通的结束点位于平台加载的中心部位。

(3) 裂纹的扩展过程可以划分为三个阶段:泥岩试件变形累计阶段(宏观无裂纹)、宏观裂纹稳定扩展阶段、宏观裂纹动态张裂阶段。

(4) 在裂纹扩展过程中,表面第一主应变场变化明显,在开裂部位第一主应变最大。同时,随着裂纹的扩展,第一主应变梯度变化明显。

参考文献:

- [1] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫等.基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):944—950(ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruipu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):944—950(in Chinese))
- [2] 赵兴东,唐春安,李元辉等.花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3673—3678(ZHAO Xingdong, TANG Chun'an, LI Yuanhui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2):3673—3678(in Chinese))
- [3] 刘冬梅,蔡美峰,周玉斌等.岩石裂纹扩展过程的动态监测研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):467—472(LIU Dongmei, CAI Meifeng, ZHOU Yubin, et al. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3):467—472(in Chinese))
- [4] 代树红,马胜利,潘一山.数字图像相关法测定岩石 I-II 复合型裂纹应力强度因子[J].岩土工程学报,2013,35(7):1362—1368(DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan. Evaluation of mixed-mode I-II stress intensity factors of rock utilizing digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7):1362—1368(in Chinese))
- [5] 仵彦卿,曹广祝,王殿武.基于 X-射线 CT 方法的岩石小裂纹扩展过程分析[J].应用力学学报,2005,22(3):484—490(WU Yanqing, CAO Guangzhu, WANG Dianwu. Microfracturing processes of rock by real time observation of X-ray CT[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(3):484—490(in Chinese))
- [6] 葛修润,任建喜.岩石细观损伤扩展规律的 CT 实时试验[J].中国科学(E 辑),2000,4:104—111(GE Xiurun, REN Jianxi. Real time CT test of rock meso damage propagation law[J]. Science in China (Series E), 2000, 4:104—111(in Chinese))
- [7] 仵彦卿,丁卫华.单轴条件下砂岩三维破裂过程的 CT 观测[J].工程地质学报,2002,10(1):93—97(WU Yanqing, DING Weihua. X-Ray CT observation on three-dimensional fracturing process of sandstone specimen under uniaxial condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1):93—97(in Chinese))
- [8] 仵彦卿,丁卫华,蒲毅彬等.压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J].自然科学进展,2000,10(9):830—835(WU Yanqing, DING Weihua, PU Yibin, et al. Compression of CT dynamic observation of rock density damage increment condition[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9):830—835(in Chinese))
- [9] 徐燕飞,赵伏军,王国举等.不同岩石巴西劈裂强度的尺寸效应[J].矿业工程研究,2012,27(4):7—12(XU Yanfei, ZHAO Fujun, WANG Guoju, et al. Size effect of brazilian splitting strength of different rocks[J]. Mineral Engineering Research, 2012, 27(4):7—12(in Chinese))
- [10] 尤明庆,陈向雷,苏承东.干燥及饱水岩石圆盘和圆环的巴西劈裂强度[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):464—472(YOU Mingqing, CHEN Xianglei, SU Chengdong. Brazilian splitting strengths of discs and rings of

- rocks in dry and saturated conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3):464—472(in Chinese))
- [11] 孟京京, 曹平, 张科 等. 基于颗粒流的平台圆盘巴西劈裂和岩石抗拉强度[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6):2449—2454 (MENG Jingjing, CAO Ping, ZHANG Ke, et al. Brazil split test of flattened disk and rock tensile strength using particle flow code[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6):2449—2454(in Chinese))
- [12] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第二部分:实验结果[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):199—204 (WANG Qizhi, WU Lizhou. Determination of elastic modulus of brittle rock, tensile strength and fracture toughness of second parts — disc specimen; the result of the experiment platform in Brazil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):199—204(in Chinese))
- [13] 薛奕忠, 刘涛, 唐礼忠 等. SHPB 动态巴西劈裂裂纹起裂及扩展研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3):97—101 (XUE Yizhong, LIU Tao, TANG Lizhong, et al. Study of SHPB dynamic split crack initiation and propagation, 2013, 35(3):97—101(in Chinese))
- [14] 宋小林, 王启智, 谢和平. 确定动态劈裂裂纹起裂和扩展特性的简便方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(1):63—68 (SONG Xiaolin, WANG Qizhi, XIE Heping. A simple method for determining crack initiation and propagation in the dynamic splitting test[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(1):63—68(in Chinese))
- [15] 梁正召, 唐春安, 唐世斌 等. 岩石损伤破坏过程中分形与逾渗演化特征[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9):1386—1391 (LIANG Zhengzhao, TANG Chunan, TANG Shibin, et al. Characteristics of fractal and percolation of rocks subjected to uniaxial compression during their failure process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9):1386—1391(in Chinese))

Experiment Study of Crack Propagation and Strain Evolution of Brazil Disc Mudstone Specimen

ZHAO Na^{1,2}, WANG Lai-gui², XI Yan-hui²

(1. College of Mine Technical, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the crack propagation regulation of rock specimen Brazil splitting under the condition of quasistatic loading, MTS testing machine and high-speed camera were used for quasistatic loading and recording crack propagation process, respectively. Digital speckle correlation method (DSCM) processing software was used to deal with the recorded photos, the strain field evolution during specimen's crack propagation process was obtained. It can be seen from analysis of experimental results that the cracks initiate at the bottom loading position of specimen due to the end effect and loading ways; the crack average propagation velocity on mudstone specimen surface is 252 m/s; the cracking of mudstone specimen is not along the center diameter direction, but deviates a certain angle due to rock heterogeneity, such as internal micro defects and micro cracks. The initial deviation angle is about 17°. Crack propagation process can be divided into three stages: mudstone specimen macro deformation stage (no macro cracks); macro crack stable growth stage and macro crack dynamic rifting stage. At the same time, during crack propagation process, the first principal strain field and the horizontal displacement field on the surface change obviously, the first principal strain is maximum at the cracking position. Above experimental results can provide an evidence for further study of rock cracking and evolution.

Keywords: crack propagation; propagation velocity; deformation field; evolution