

文章编号: 1001-4888(2018)04-0627-07

基于数字图像相关方法的 鲁灰花岗岩断裂特性研究^{*}

吕琪, 高经武, 武晋文, 王学怀

(中北大学 理学院, 山西太原 030051)

摘要: 采用单边直裂纹三点弯曲梁(SC3PB)对鲁灰花岗岩 I 型裂纹的断裂特性进行了实验研究, 得到其断裂韧度为 $0.9 \sim 1.4 \text{ MN/m}^{1.5}$ 。基于数字图像相关方法(DIC)分析了峰值载荷前试件断裂位移场及应变场的演化过程, 根据位移场的不连续性给出过程区的扩展轨迹, 由应变场得到了高应变区域的变化规律。当局部水平位移梯度发生剧烈变化时, 鲁灰花岗岩 I 型断裂进入过程区; 且以水平方向应变达到 $0.11\% \sim 0.20\%$ 时作为进入过程区的门槛值; 并进一步给出了过程区尖端沿竖直方向的扩展速率与过程区长度呈三次多项式递增关系。

关键词: 鲁灰花岗岩; SC3PB; 断裂韧度; 数字图像; 过程区

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-235

0 引言

岩石是自然界中广泛存在的材料之一, 其失稳破坏现象是岩石断裂力学的核心内容, 而岩石断裂韧度 K_{IC} 的测定对于定量评价岩体工程的安全及稳定性有着重要的意义^[1]。

国际岩石力学学会提出了 V 型切槽短圆棒试样(SR)、V 型切槽三点弯曲圆梁试样(CB)、V 形切槽巴西圆盘试样(CCNBD)、单边直裂纹三点弯曲梁试样(SC3PB)四种最常用的测定岩石断裂韧度的方法。其中, SC3PB 方法由于实验设备简单、试件加工容易、操作便捷等优点而被广泛应用于测量岩石材料的断裂韧性, 该方法由美国材料与测试协会(ASTM)于 1984 年提出, 并给出了建议几何尺寸及计算方法。岩石的断裂破坏为脆性破坏, 从裂纹的萌生到完全破坏是一个比较快的过程, 肉眼不易察觉。为了研究裂纹的断裂过程及演化规律, 实验的观测方法从扫描电镜^[2,3]、CT 摄像^[4]、二维数字散斑相关方法(DSCM)^[5]、二维数字图像相关技术(DIC)^[6]、声发射定位技术^[7]发展到现在的三维数字图像相关技术(3D-DIC)^[8,9]。DIC 技术在岩石力学实验中对环境要求低, 测量过程中自动化程度高, 操作简单, 可实现无接触测量, 可以得到全场位移和应变分布, 且测量精度较高, 可实现动画描述岩石断裂的整个变化过程^[10]。代树红^[1]等采用数字散斑相关方法对岩石的 I 型应力强度因子、裂尖位置以及裂纹扩展长度进行了计算。纪维伟^[11]等采用数字散斑相关方法对两类岩石的过程区长度, 裂纹口张开位移进行了界定。但现有的文献中对过程区尖端扩展速率的计算研究还很少。

本文基于数字图像相关技术(DIC), 采用 SC3PB 方法计算鲁灰花岗岩断裂韧度, 研究鲁灰花岗岩试件破坏过程中的位移和应变演化规律, 分析过程区尖端扩展速率的变化规律。

^{*} 收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51504220)

通讯作者: 武晋文(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高温岩石力学和水力压裂方面的研究。Email: wujinwen1982@163.com

1 实验概况

1.1 试样描述

实验所用岩样为鲁灰花岗岩,呈灰白色,颗粒细小,纹理致密,该岩样的密度为 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$,单轴抗压强度为 130.52MPa ,单轴抗拉强度为 17.90MPa [12]。试样尺寸加工为 $25\text{mm} \times 40\text{mm} \times 180\text{mm}$,支点跨度 S 为 160mm ,裂纹宽度为 1mm 左右,裂纹深度 a 为 15mm 左右,如图 1 所示。预制裂纹的加工使用直径为 1mm 的金刚砂线锯条,裂纹深度用试件两侧切口深度的平均值表示。

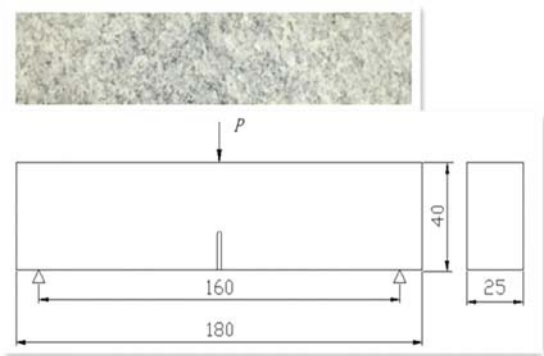


图 1 试样制备及规格(单位:mm)

Fig. 1 Specimen preparation and specification(unit: mm)



图 2 测试系统

Fig. 2 Measurement system

1.2 实验设备

实验设备包括万能试验机和数字散斑测试系统(图 2),散斑测试系统由两部相机(镜头焦距为 40mm ,分辨率为 $2448 \times 2050\text{pixel}$,物面分辨率为 $0.02195\text{mm}/\text{pixel}$,位移精度为 0.01pixel ,实际位移精度为 0.0002195mm)、标定设备、照明设备、ARAMIS 测量头、支座及三维数字图像分析软件组成。该系统采用非接触、全场应变测量方式。

1.3 实验步骤

第一步试样制备并制做人工散斑:在加工好的试样上先喷一层白色底漆,再喷黑色漆形成散斑;第二步标定散斑测试设备:采用与试样大小相协调的标定板,并对相机的焦距、光圈以及照明设备的位置进行调整;第三步放置试样,试样跨距为 160mm ,试样与试验机压头保持垂直,施加预压力 50N ;第四步加载并采集图像:加载速率为 $0.05\text{mm}/\text{min}$,图像采集频率为 3Hz ;第五步用软件对采集到的图像进行计算分析。

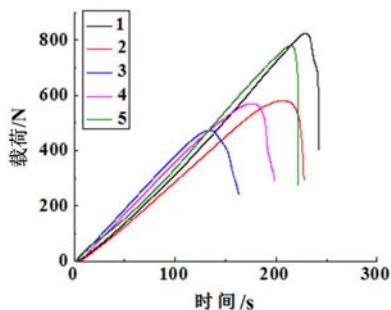


图 3 各试件的时间—载荷曲线图

Fig. 3 Time load curve of each specimen



图 4 断裂形态

Fig. 4 Fracture morphology

2 实验结果及分析

实验共 5 个鲁灰花岗岩试件,载荷—时间曲线如图 3 所示,破坏时的峰值载荷 ($P_{\max}$) 最大值为

824.4N,最小值为 471.55N,在达到峰值载荷时出现脆断。试样破坏形态如图 4 所示,当加载过程中达到峰值载荷后,裂纹没有贯通试样,破坏后断口凹凸不平,裂纹面为不规则曲面,此为断裂过程中裂纹沿着矿物颗粒边界扩展所致。

2.1 鲁灰花岗岩断裂韧度

岩石的断裂韧性表征了岩石材料抵抗裂纹扩展断裂的能力,在一定的温度和加载速率条件下,断裂韧度可视为材料的常数。采用美国材料实验协会 ASTM^[13] 公式(见下式(1))计算断裂韧度,得到鲁灰花岗岩的断裂韧度见表 1,鲁灰花岗岩的断裂韧度在 0.9~1.4MN/m^{1.5}之间,与国际岩石力学学会给出的花岗岩断裂韧度范围(0.65~2.80MN/m^{1.5})^[14]一致。

$$K_{IC} = \frac{P_{max} S}{bh^{3/2}} [2.9(\frac{a}{h})^{1/2} - 4.6(\frac{a}{h})^{3/2} + 21.8(\frac{a}{h})^{5/2} - 37.6(\frac{a}{h})^{7/2} + 38.7(\frac{a}{h})^{9/2}] \quad (1)$$

式中, P_{max} 为峰值载荷, N; S 为有效跨距, mm; b 为有效宽度, mm; h 为有效高度, mm; a 为有效裂纹长度, mm; K_{IC} 为岩石断裂韧度, MN/m^{1.5}。

表 1 断裂韧度统计表

Tab.1 Statistical table of fracture toughness

试样编号	高度 h /mm	厚度 b /mm	裂纹深度 a /mm	峰值载荷 P_{max} /N	断裂韧度 K_{IC} /(MN/m ^{1.5})
1	37.98	21.20	11.82	824.4	1.32
2	38.68	18.80	12.30	580.18	1.04
3	38.68	19.00	15.25	471.55	1.02
4	38.70	18.44	11.05	569.27	0.95
5	37.46	20.90	11.10	780.60	1.22

2.2 鲁灰花岗岩断裂过程的位移场、应变场

采用表 1 中 5 号试样作为分析对象,实验过程中拍摄范围为 55mm×45mm,取一块小区域作为分析区域(19.5986mm×21.1805mm)如图 5(a),得到试件断裂过程中位移和应变的演化规律。从水平方向位移云图(图 5(c)~(e))可知,随着载荷的增加,在预制裂纹尖端附近区域水平方向的位移梯度逐渐增大,表现为云图中水平方向过渡区域(图中黑色框所围区域)越来越高且越来越窄,位移的不连续性越来越明显,应力集中程度越来越大。载荷增加的过程中,试件产生微裂纹,由于载荷并未达到峰值,试件在产生微裂纹以后,仍能传递载荷。当载荷达到 100% P_{max} 时,微裂纹贯通形成宏观裂纹,直至完全断裂。从主应变云图(图 5(f)~(h))可知,试样载荷达到 85% P_{max} 时,在预制裂纹前沿已经出现明显的高应变区域,当载荷达到 95% P_{max} 时,在预制裂纹前沿的高应变区域向上扩展。随着载荷增加,高应变区域高度及宽度均逐渐增加。高应变区域(红色区域)呈现半梭形,载荷达到 100% P_{max} 时,高应变区域达到试样宏观破坏的临界状态。

3 鲁灰花岗岩过程区扩展规律

在含裂纹或切口的岩石中,微裂纹的演化区域主要分布在原宏观裂纹(或切口)的端部附近高应变区,这个区域被称为过程区^[15]。图 5 所示半梭形高应变区域即为鲁灰花岗岩的 I 型裂纹的过程区,该区域内微裂纹萌生发生较大塑性变形,是预制裂纹前沿的非线性区域。图 6 为所选研究区域内截面分布图(共选取 8 个截面),截面 0.0mm 为预制裂纹尖端处,以 2mm 作为间隔距离依次划分其他 7 个截面。图 7 为各截面在不同载荷下的水平方向位移梯度变化规律,从图中可看出截面在不同载荷水平下的位移梯度,随着载荷增大,同一截面的位移梯度越来越大,各截面在预制裂纹尖端部位(约 $-5 < x < -2$)依次出现剧烈的梯度变化,并进入过程区^[16],随着过程区扩展的轨迹变化,局部位移梯度变化的范围会发生平移,如图 7(b),载荷达到 100% P_{max} 时,过程区向右偏移到约 $-4.5 < x < -1.5$ 。当预制裂纹尖端局部水平方向位移梯度达到某个临界值时进入过程区,此临界值为判定是否进入过程区的门槛值。

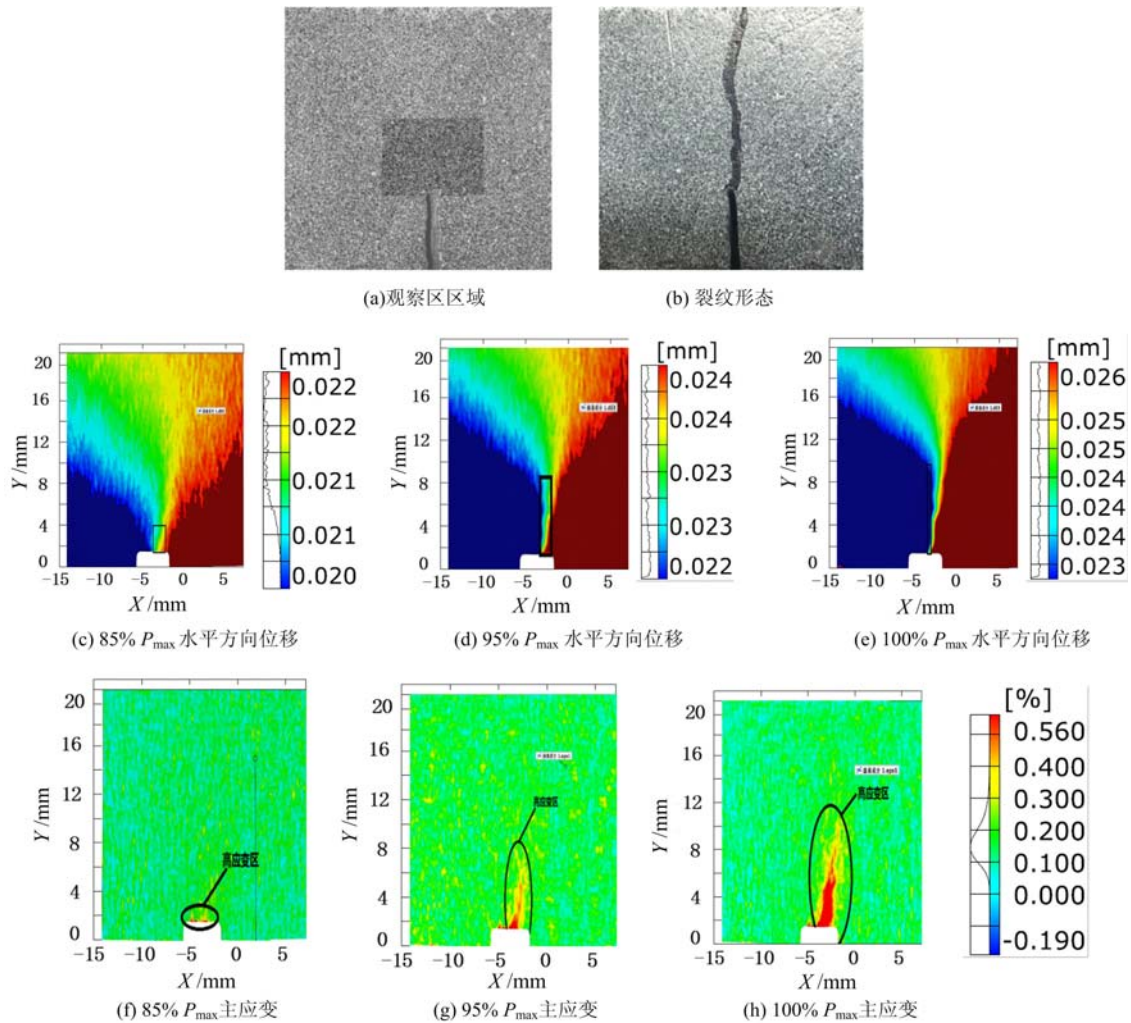


图 5 断裂过程位移场和主应变场云图

Fig. 5 Displacement field and main strain field during the fracture process

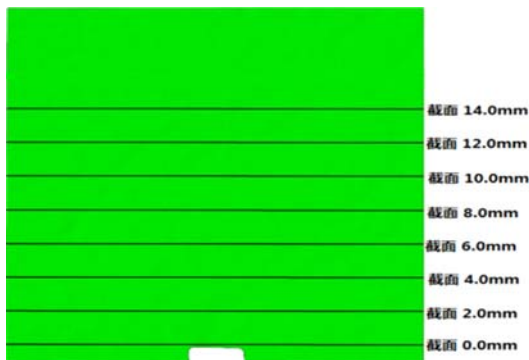


图 6 截面分布

Fig. 6 Section distribution

3.1 门槛值的确定

由图 7 可知,随着载荷增大,在预制裂纹尖端局部产生高位移梯度区域,该区域即为过程区。在图 6 中截面 0.0mm 上预制裂纹尖端处取一点,可计算该点在不同加载时刻的水平方向应变。图 8 为 5 个实验样品所取研究点在峰值载荷前水平方向应变随加载时间的变化规律,应变随加载时间逐渐增大,应变值在 $80\% P_{max}$ 附近出现拐点,拐点前应变线性增加(表现为弹性响应),拐点以后应变率快速增大(表现为塑性变形),表明载荷达到 $80\% P_{max}$ 时该点进入过程区,文献[16]指出砂岩的预制裂纹尖端在载荷 $80\% P_{max} \sim 90\% P_{max}$ 时已经进入过程区。载荷水平为 $80\% P_{max}$ 时,各试样预制裂纹尖端(0.0mm 截面)的水平方向应变值为 $0.11\% \sim 0.20\%$ 。

由图 7(a)可知,试样载荷水平为 $80\% P_{max}$ 时,截面 0.0mm 的局部 ($-5 < x < -2$) 水平位移梯度发生明显变化(出现高应变区),且该处的位移差值为 0.004mm,估算此部分的平均位移梯度为 0.004/3 (即 0.0013)。表 2 为 5 个试样载荷为 $80\% P_{max}$ 时在预制裂纹尖端截面 0.0mm 位移梯度局部变化处的横坐标范围、位移差值、平均位移梯度以及水平方向应变值,平均位移梯度为 0.0012~0.002。

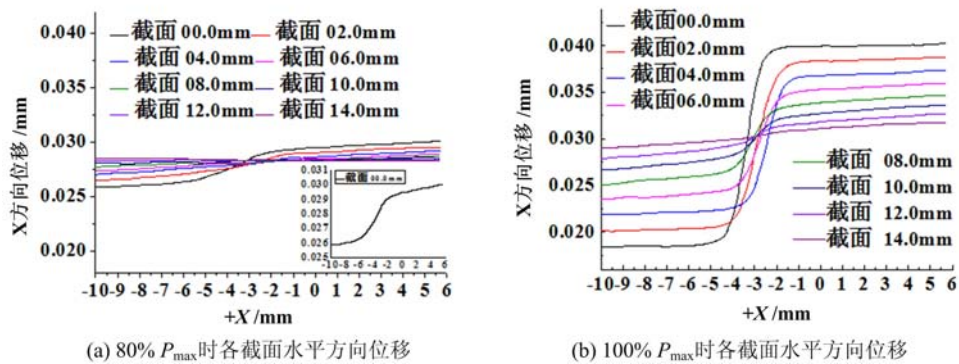


图 7 各截面水平方向位移
Fig. 7 Horizontal displacement of each cross section

按照弹性理论,图 8 中 5 个试样 0.0mm 截面上所取点的水平方向应变,与图 7(a)中对应的该点水平方向位移梯度 $\partial u/\partial x$ 有同样的力学意义。实验结果表明,各试样预制裂纹尖端进入过程区的临界应变为 0.11%~0.20%,估算的预制裂纹尖端 0.0mm 截面进入过程区的水平方向平均位移梯度为 0.0012~0.002,应变临界值和估算的平均位移梯度临界值基本一致。应变反映一点的微观状态,估算的平均位移梯度为某一线段上的宏观统计表现,两者可从不同角度反映进入过程区的临界状态。因此,水平方向应变达到 0.11%~0.20%可作为鲁灰花岗岩进入过程区的门槛值,裂纹尖端截面的平均位移梯度也可以作为是否进入过程区的判断标准。

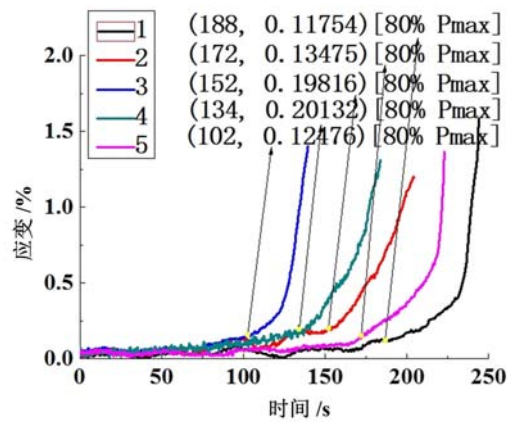


图 8 选取研究点的水平方向应变
Fig. 8 Select the research point of the horizontal strain

表 2 各试样临界参数
Tab. 2 The critical parameters of each sample

试样编号	位移差/mm	横坐标范围/mm	平均位移梯度	水平方向应变值/%
1	0.004	3.3	0.0012	0.11754
2	0.005	2.6	0.0019	0.19816
3	0.005	3.5	0.0014	0.12476
4	0.006	3.0	0.0020	0.20132
5	0.004	3.0	0.0013	0.13475

3.2 峰值载荷前过程区扩展速率

根据图 8 可以确定各试样的拐点载荷水平以及进入过程区的水平方向应变(裂纹尖端水平方向位移梯度)临界参数(见表 2)。试样所选研究区域内的各截面水平方向应变(位移梯度)达到门槛值时,说明该截面已经进入过程区。同时,根据载荷与时间的对应关系,可以得到过程区尖端扩展到各个截面的时间,用截面间的距离除以时间间隔,可以得到过程区尖端在竖直方向由一个截面扩展到另一个截面的平均扩展速率。

图 9 为过程区尖端扩展速率与截面位置的关系,过程区尖端到达的截面位置即过程区在竖直方向的长度,过程区尖端扩展速率随着过程区在竖直方向长度的增大而增大。图 9 中试样 1 和试样 5 过程区尖端扩展到截面 12mm 处时到达峰值载荷。

表 3 曲线拟合结果
Tab. 3 Curve fitting result

试件	指数模拟公式	相关度 R^2	多项式模拟公式	相关度 R^2
1	$y=0.0523e^{0.3004x}$	0.9583	$y=0.0078x^3-0.1483x^2+0.9135x-1.3463$	0.9636
2	$y=0.0274e^{0.2814x}$	0.9750	$y=0.0017x^3-0.0274x^2+0.1665x-0.2118$	0.9777
3	$y=0.0664e^{0.1704x}$	0.8017	$y=0.0032x^3-0.0619x^2+0.3634x-0.4360$	0.9299
4	$y=0.0563e^{0.1928x}$	0.5972	$y=0.0042x^3-0.0739x^2+0.3651x-0.3191$	0.9632
5	$y=0.0385e^{0.3361x}$	0.8554	$y=0.0070x^3-0.0908x^2+0.3356x-0.1753$	0.9989

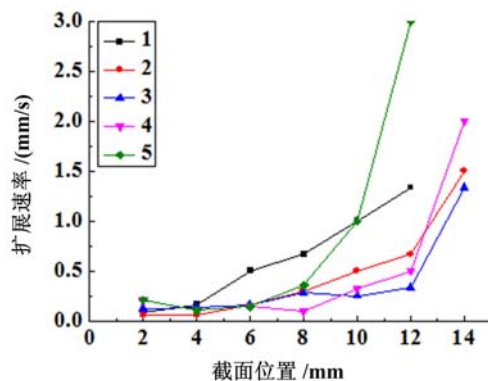


图 9 过程区尖端扩展速率与截面位置的关系

Fig. 9 The relation between process area expansion rate and section position

反映过程区的扩展过程,峰值载荷前鲁灰花岗岩断裂过程区尖端扩展速率与过程区在竖直方向的长度呈三次多项式关系。

参考文献:

- [1] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 数字散斑相关方法测定岩石 I 型应力强度因子[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12):2501-2507 (DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan, et al. The digital speckle correlation method for determination of rock type stress intensity factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12):2501-2507 (in Chinese))
- [2] Zhao Y, Huang J, Wang R. Real-time SEM observations of the microfracturing process in rock during a compression test[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(6):643-652.
- [3] Kranz R L. Crack growth and development during creep of Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(1):23-35.
- [4] 任建喜. 三轴压缩岩石细观损伤扩展特性 CT 实时检测[J]. 实验力学, 2001, 16(4):387-395 (REN Jianxi. Real-time CT monitoring for the meso-damage propagation characteristics of rock under triaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4):387-395 (in Chinese))
- [5] 马少鹏, 潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学, 2002, 17(1):10-16 (MA Shaopeng, PAN Yishan. Study on the white light DSCM method for deformation measurement of rock material [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1):10-16 (in Chinese))
- [6] Peter W H. Digital imaging technique in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427-431.
- [7] 吕森鹏, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 脆性岩石破坏实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s1):2772-2777 (LV Shempeng, CHEN Weizhong, JIA Shanpo, et al. Experimental study on failure of brittle rock[J]. Journal of

对图 9 中的曲线进行指数拟合与多项式拟合,得出拟合趋势线的公式及其相关度,见表 3。从表中可知多项式拟合的相关度更好,说明峰值载荷前鲁灰花岗岩断裂过程区尖端的扩展速率与过程区在竖直方向的长度呈现三次多项式关系。

4 结论

(1) 通过三点弯曲实验得到鲁灰花岗岩的断裂韧性 K_{IC} 为 $0.9 \sim 1.4 \text{ MN/m}^{1.5}$ 。

(2) 三点弯曲实验中,鲁灰花岗岩载荷达到 $80\% P_{\max}$ 时预制裂纹尖端进入过程区,进入过程区的水平方向应变门槛值为 $0.11\% \sim 0.20\%$ 。

(3) 加载过程中的位移云图以及主应变云图

- Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(s1):2772—2777 (in Chinese))
- [8] Kahn-Jetter Z L, Chu T C. Three-dimensional displacement measurements using digital image correlation and photogrammetric analysis[J]. Experimental Mechanics, 1990, 30(1):10—16.
- [9] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(2):123—132.
- [10] 马永尚, 陈卫忠, 杨典森, 等. 基于三维数字图像相关技术的脆性岩石破坏实验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):117—123 (MA Yongshang, CHEN Weizhong, YANG Dianshen, et al. Experimental study on brittle rock failure based on 3D digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1):117—123 (in Chinese))
- [11] 纪维伟, 潘鹏志, 苗书婷, 等. 基于数字图像相关法两类岩石断裂特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8):2299—2305 (JI Weiwei, PAN Pengzhi, MIAO Shuting, et al. Fracture characteristics of two types of rocks based on digital image correlation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8):2299—2305 (in Chinese))
- [12] 邵保平, 赵阳升. 600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5):892—898 (XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental study on mechanical properties of granite at high temperature in 600 degrees centigrade after cooling in water[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5):892—898 (in Chinese))
- [13] Brown W F J, Srawley J E. Plane strain crack toughness testing of high-strength metallic materials[M]. American Society for Testing and Materials, 1966.
- [14] 尹祥础. 建议采用的岩石断裂韧性测定方法[J]. 世界地震译丛, 1989, 20(6):74—85 (YIN Xiangchu. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock[J]. World Earthquake Series, 1989, 20(6):74—85 (in Chinese))
- [15] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学[M]. 科学出版社, 2015 (LI Shiyu, HE Taiming, YIN Xiangchu. Rock fracture mechanics [M]. Science Press, 2015 (in Chinese))
- [16] Lin Q, Labuz J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 60(8):235—245.

Study of fracture characteristics of Lu-grey granite based on digital image correlation method

LV Qi, GAO Jing-wu, WU Jin-wen, WANG Xue-huai

(College of Science, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: Fracture characteristics of mode I crack of Lu-grey granite was experimentally studied by single-sided straight crack three-point bending beam (SC3PB), and its fracture toughness was $0.9 \sim 1.4 \text{ MN/m}^{1.5}$. Based on the digital image correlation (DIC) method, the evolution of the displacement field and strain fields of specimen before peak load were analyzed. According to the discontinuity of displacement field, the extended trajectory of process zone was given and the variation pattern of high strain region was obtained from the strain field. When the local horizontal displacement gradient changes drastically, the type I fracture of the Lu-grey granite enters the process zone. When the strain in the horizontal direction reaches $0.11\% \sim 0.20\%$, it is used as the threshold value of entering the process zone. Furthermore, the expansion rate of the tip of the process zone in the vertical direction and the length of the process zone are given a cubic polynomial increment relationship.

Keywords: Lu-grey granite; SC3PB; fracture toughness; digital image; process zone