

文章编号: 1001-4888(2020)02-287-13

砂岩方梁断裂过程区范围的实验确定方法^{*}

乔洋¹, 张盛^{1, 2}, 刘少伟¹, 王猛¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454001; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南焦作 454001)

摘要: 裂纹前端的断裂过程区是引起岩石非线性断裂及尺寸效应的主要原因。利用数字图像相关技术对砂岩开展了三点弯曲梁实验, 获得观测区域高精度的全场位移和应变数据, 根据断裂韧带区域水平位移和水平应变的分布特征, 结合裂尖岩石颗粒变化的微观分析, 提出采用裂纹尖端水平位移波动性和水平应变突变性所得到的波动系数和水平应变突变值, 确定断裂过程区形状和临界尺寸的方法。结果表明: 砂岩断裂过程区的形状为不规则的狭长带状区域, 断裂过程区的临界长度为 11~13mm, 临界宽度为 1.58~2.36mm。断裂过程区区域内形变在趋向裂尖时呈指数增加, 但其单位区域内的形变增量呈波动状态。该方法能够更加准确判断岩石断裂过程区的范围, 有助于分析岩石的非线性断裂特性。

关键词: 断裂过程区; 数字图像相关法; 水平位移波动性; 水平应变突变性; 三点弯曲梁

中图分类号: TU452

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-124

0 引言

断裂过程区通常是指材料在受载过程中宏观裂纹前端出现微裂纹萌生和扩展, 进而产生的不可逆的塑形变形区域。该区域的岩石颗粒表面会发生接触摩擦和集料互锁等现象^[1]。一般地, 断裂过程区的长度被认为是外荷载达到峰值前整个塑性区域的临界长度, 即亚临界扩展长度^[2]。对于准脆性材料, 如岩石、混凝土材料, 断裂过程区完全发育后的尺寸和试样的结构尺寸处在同一量级。当断裂过程区完全发育后, 计算断裂韧度和其他断裂参数会存在明显的尺寸效应。而且由于断裂过程区的“桥联”作用会导致试样的结构承载力比计算值偏大, 荷载位移曲线也出现非线性行为^[3]。断裂过程区的存在, 导致传统的线弹性断裂力学理论不能完全适用于岩石等准脆性材料, 理论研究成果不能有效地指导现场工程实践, 因此, 研究岩石断裂过程区的范围有助于深入理解岩石的破坏形式和确定断裂参数。

1976 年 Hillerborg^[4]等在经典弹塑性力学 Dugdale-Barenblatt^[5,6]模型的启发下, 提出著名的能反映应变软化效应的虚拟裂缝模型(Fictitious Crack Model, FCM), 引入“断裂过程区”(Fracture Process Zone, FPZ)的概念后, 很多学者对断裂过程区的临界长度进行了大量研究。在理论研究方面, 卿龙邦^[1,7]等以虚拟裂纹模型为基础, 对断裂过程区的长度进行了理论计算, 探究了初始缝长、颗粒等对断裂过程区长度的影响, 并且说明了断裂过程区内位移和粘聚力为非线性分布。胡若邻^[8]等应用裂缝尖端应力场 Westergaard 解和 Muskhelishvili 解, 根据幂指数描述的应变软化模型, 给出了考虑应力松弛影响的 FPZ 总长度及等效 FPZ 长度的解析表达式。TCD 理论^[9]为最新有关计算断裂过程区长度的理论, 基于断裂韧度和抗拉强度两个参数能够计算得到断裂过程区的长度。在实验研究方面, 主要有三种确定断裂过程区临界尺寸的方法, 即声发射法、数字图像法、X 射线法。Fakhimi^[10,11]等通过声发射确

^{*} 收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51674101, 51704098); 河南省重点实验室开放基金(S201605)

通讯作者: 张盛(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山岩石力学方面的教学与研究工作。Email: zsroy2002@163.com

定了岩石断裂过程区的长度和宽度,发现其长度和宽度随着试样尺寸的增加而增加,并利用离散元数值模拟软件采用拉伸软化接触键模型,模拟了不同尺寸试样断裂过程区的长度和宽度。Lin^[12,13]等通过数字图像技术得到试样的全场位移数据,并依据断裂过程区的变形特征确定试样断裂过程区的长度,同时测得了复合应力状态下断裂过程区的长度。Vesely^[14]等以断裂过程区的变形和力学特性为基础,设计程序计算模拟不同加载时期断裂过程区的范围。纪维伟^[15]等运用 Lin 确定断裂过程区的实验方法,通过试样表面的数字图像采集及相关计算,获得岩石破裂过程各个阶段的高精度全场变形特征,通过对变形场进行分析,确定了两类岩石破坏时断裂过程区长度及裂缝口张开位移。彭剑文^[16]等采用数字图像技术获得试样变形的数据,确定了断裂过程区的长度,并结合 Bažant 的相关理论,研究了断裂过程区的尺寸效应。Vavro^[17]等通过 X 射线技术,实时观测了短棒试样内的断裂过程区随着加载过程进行的发育演变规律。Willetta^[18]等运用 CT 技术,通过用硫酸钡溶液对三点弯曲梁进行浸染显影,准确地观测到断裂过程区的三维立体图像,并测量了过程区相应的尺寸参数。

综上所述,研究者对于确定断裂过程区的临界尺寸做了大量研究,但多数研究仍处在理论简化分析和数值模拟阶段,与实际情况有较大差别,比如没有考虑建立岩石颗粒和胶结物联接的本构模型,以及微裂纹的形成和联通的机制和条件。虽然有研究者对断裂过程区进行了实验研究,但并不充分,尤其没有提出如何量化地准确确定断裂过程区范围的方法,更没有对包含断裂过程区的整个断裂韧带区域的大范围变形数据进行深入分析。鉴于此,本文以砂岩试样三点弯曲梁为研究对象,通过数字图像相关技术获得试样在加载破裂全过程中表面观测区域的位移和应变数据,分析裂纹尖端附近大范围变形场,确定了断裂过程区的形状和临界尺寸。

1 数字图像相关方法简介

数字图像相关技术于 20 世纪 80 年代产生,它是一种基于光测力学的非接触、高精度的特性并结合现代数字图像处理方法的实验观测技术。该方法通过选取能够准确描述变形子区内部真实变形的形函数,基于图像子区的匹配算法来获得精确的位移结果,以位移数据为基础来计算其他形变参数^[19]。为进一步提高测量精度,邵新星^[20]等通过对分析 DIC 方法中反向组合高斯-牛顿算法的理论误差,提出新的理论误差公式,证明了反向组合高斯-牛顿算法能够有效提高计算速度和测量精度。数字图像相关测试技术不但在静态力学实验方面广泛应用,而且在霍普金森杆加载实验中扮演重要角色,能够实时记录试件受动态冲击作用的高速变形情况^[21]。

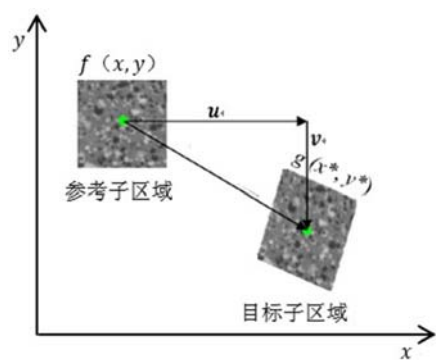


图 1 数字图像相关方法原理示意图

Fig. 1 Principle of digital image correlation

采用数字图像相关法获得试样表面位移数据时,需要在实验过程中获得试件变形前后的一系列散斑图像。实验完成后,利用相关计算软件提取出变形前和任意一张变形后的散斑图像,分析这两幅图像并计算试件表面的位移数据。通常将变形前的数字散斑图像称为参考图像,变形后的数字散斑图像称为目标图像。假设参考图像中某像素点的位置坐标为 (x, y) ,变形后该点的位置移至 (x^*, y^*) ,如图 1 所示,这两点的关系用水平位置分量 $u(x, y)$ 与垂直位移分量 $v(x, y)$ 表示,见式(1)。

$$\begin{aligned} x^* &= x + u(x, y) \\ y^* &= y + v(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{\sum f(x, y) \cdot \sum g(x^*, y^*)}{\sqrt{\sum f_z^2(x, y) \cdot \sum g_z^2(x^*, y^*)}} \quad (2)$$

如图 1,在参考图像中围绕 (x, y) 选取尺寸为 n 像素长度的正方形区域为参考子区域,在变形后的图像中围绕 (x^*, y^*) 选取同样大小的区域作为目标子区域。设表征变形前后图像的形函数分别为 $f(x, y)$ 、 $g(x^*, y^*)$,则目标子区域和参考子区域具有一定的相关性,可用相关系数 S 表达,如式(2)所

示。

基于图像子区的匹配算法找到一个以 (x^*, y^*) 为中心的目标子区域,使得 S 取最小值,那么就可认为点 (x, y) 变形后移动到了 (x^*, y^*) ,两点间的坐标差即点 (x, y) 的位移^[3],以位移数据为基础可以计算得到试件表面的应变数据。

尽管数字图像技术目前只能获得试样表面的变形数据,但 Mihashi 等用三维声发射技术发现沿主裂缝周围微裂缝的产生是随机的,说明微裂缝在试件表面与内部出现的概率是等同的^[22]。这从侧面反映了试样表面的变形和内部变形相差不大。

2 三点弯曲梁实验

实验采用带中心预制裂纹的砂岩三点弯曲梁试样,其加载方式如图 2 所示。图 2 中,FPZ 是试样受载过程中在预制裂纹尖端产生的不可逆的塑形变形区域,而断裂韧带区指预制裂纹尖端至加载点之间一定宽度范围的区域,即宏观裂纹扩展经过的区域。试样的尺寸参数均符合国际岩石力学协会 (ISRM)的制样标准。试样具体设计尺寸参数为长度 $L=300\text{mm}$,高度 $H=70\text{mm}$,厚度 $B=30\text{mm}$,裂缝长度为 26.25mm ,实际加工试样的具体尺寸参数如表 1 所示。三点弯曲梁试样的加载跨度 $S=280\text{mm}$ 。

在加工预制裂纹时,为了减少损伤,避免人工加工裂缝造成的误差,采用线切割机制作裂纹,线切割机如图 3 所示。采用直径 0.2mm 的金刚丝加工的裂纹宽度为 0.3mm 。试样的其他尺寸如表 1 所示,所给出的尺寸皆为试样不同部位多次测试结果的平均值。

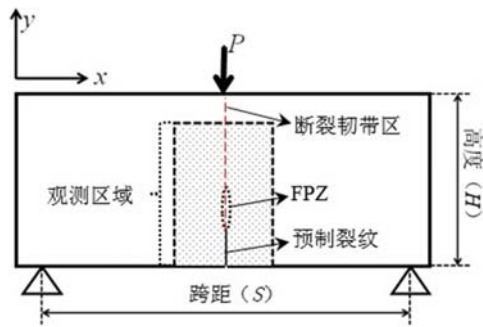


图 2 三点弯曲梁加载示意图
Fig. 2 Loading schematic diagram of three-point bending test

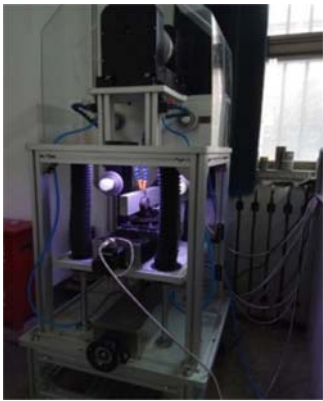


图 3 线切割机
Fig. 3 Linear cutting machine

表 1 试样参数
Tab. 1 Dimensions of specimens

试样编号	CN-1	CN-2	CN-3	CN-4
长度 L/mm	300.25	299.90	300.22	300.18
高度 H/mm	69.00	69.20	69.80	70.00
厚度 B/mm	30.73	29.87	30.32	30.50
缝长 α/mm	26.50	25.80	27.50	26.20

表中的 CN 代表 center notch,中心切槽。

砂岩试样的实物图如图 4(a)所示。制作散斑时,先用水彩粉在试样的观测区域表面制作一层白色的底膜,水彩和白漆相比具有不粘连、反光较弱的特点,有利于提高照片的质量。待底膜晾干,用印刷板沾上油墨后,按压至白色底膜处,然后换不同方向继续按压,直至散斑点区域占据整个底膜区域的 50% 左右。做成的散斑图纯黑色区域和纯白色区域各占观测区域的 50%,具有高对比性,尽量少出现灰色

区域。散斑图要具有非重复性、各项同性,在拍摄时纯黑色斑点占 5 至 10 个像素为宜,本文实验中制成的散斑图如图 4(b)所示。

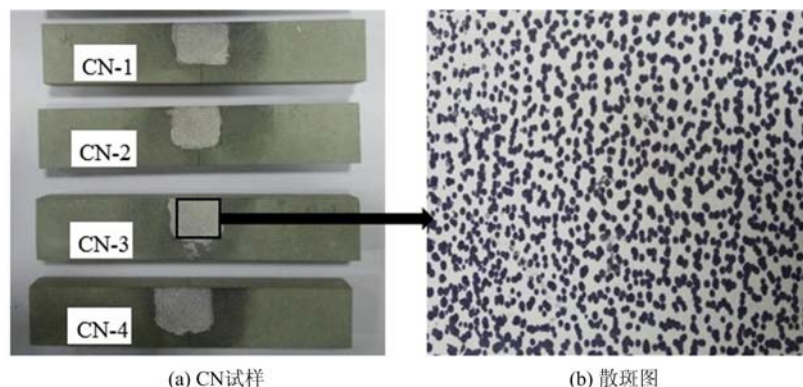


图 4 试样及散斑图

Fig. 4 Sample and speckle pattern

采用高速摄影装置进行图像采集,有效像素为 2048×2048 ,配置 100mm 定焦镜头,图像采集速率为试样中心挠度每变化 0.001mm 采集一张,相机两侧摆放 LED 白光源。实验加载系统为 RMT-150B。为稳定地控制试样加载的全过程,采用竖直位移传感器测量梁的中间挠度作为伺服反馈信号,其控制速率为 0.0002mm/s。试样加载如图 5 所示,图 5(a)为高速摄影装置的布置,图 5(b)为试样与支撑装置。

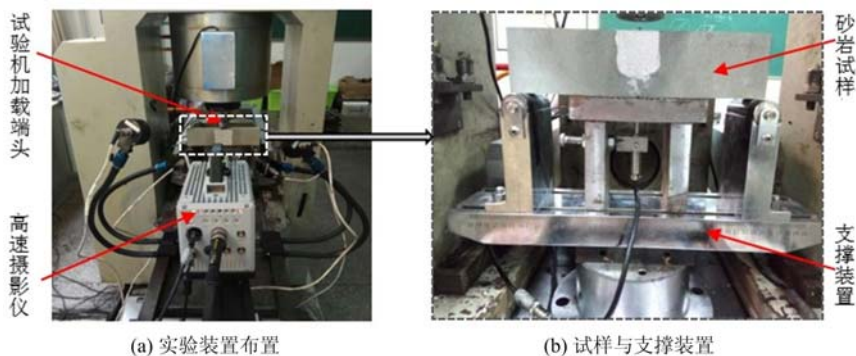


图 5 试样加载图

Fig. 5 Loading photos of sample

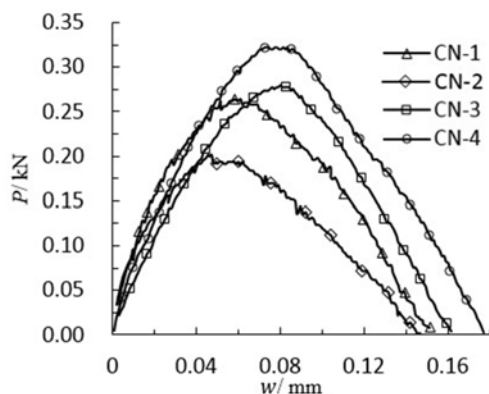


图 6 荷载—中心挠度曲线图

Fig. 6 Load-central deflection curves

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

3.1.1 试样的荷载—挠度曲线

不同试样的荷载—挠度 ($P-w$) 曲线如图 6 所示。由图 6 知,四个试样的曲线发展趋势大致相同,荷载和挠度在峰前和峰后近似成对称关系,说明试样裂纹是渐进缓慢扩展,这与试样的材料以及构型有一定的关系。峰值前后,荷载曲线出现明显的非线性行为,间接证明了断裂过程区的存在。在整个试样被加载的过程中,通过整个数字图像系统,能够观测到试样的塑性区域从预制裂纹尖端不断沿着韧带发展,加载完成后,试样并没有完全发生断裂。另

外,试样的峰值荷载最大为 0.32kN,最小为 0.194kN,存在一定的离散性,这与砂岩的非均质性以及加工试样的预制裂纹的长度误差有关。

3.1.2 裂尖观测区域的水平位移和水平应变的等高线云图

将实验照片用 VIC-2D 软件处理,得到裂尖观测区域(观测区域为正方形)的水平位移等高线云图和水平应变等高线云图。软件自动为观测区域建立坐标,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,如图 7 所示。在软件处理散斑照片时,充分考虑照片质量和数据精度后,设置子区域的大小(subset)和计算步距(step)。子区域的大小与数据的精度有密切关系,软件在计算像素点的位移量时,以此时子区域作为参考和未加载的同一子区域相匹配,从而得到相关点,通过计算相关点移动量来得到位移量。因此,子局域的设置尽量大一些可以匹配得到更多的相关点,以提高计算精度。在本次数据处理时子区域的设置为 27 个像素点。计算步距和数据密度有密切关系,计算步距即为软件间隔多少像素点计算 1 个数据点。在本文数据处理时,设置的计算步距为 4 个像素点。在水平位移等高线云图上,同一条等高线上具有相同的水平位移值。由于相邻等高线水平位移差值是相同的,等高线的疏密程度反映了水平位移变化的剧烈程度,同时也反映了试样的变形程度。从图 7 可以看出,预制裂纹尖端等高线较密集,等高线以预制裂纹尖端为中心点向四周发散,因此,预制裂纹尖端附近变形较大。通过水平应变等高线云图可以更直观观测试样表面的变形情况。水平应变等高线云图与水平位移等高线云图类似,同一条等高线上具有相同的水平应变值,相邻等高线水平应变差值是相同的,如图 8 所示。

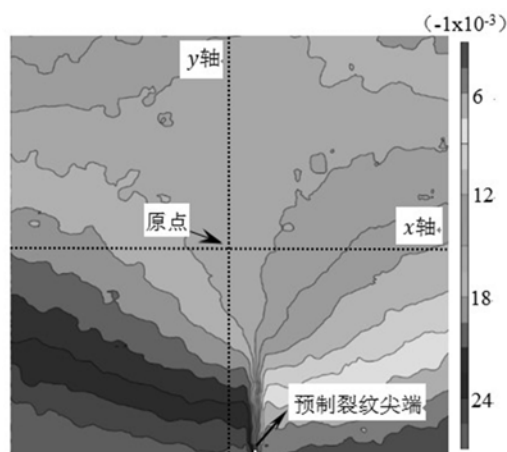


图 7 水平位移的等高线云图

Fig. 7 Horizontal displacement contour cloud

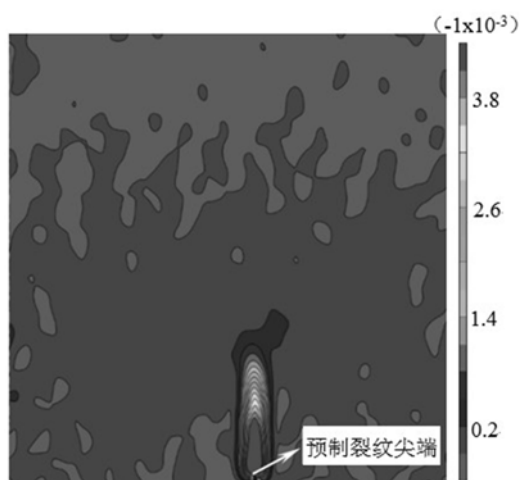


图 8 水平应变等高线云图

Fig. 8 Horizontal strain contour cloud

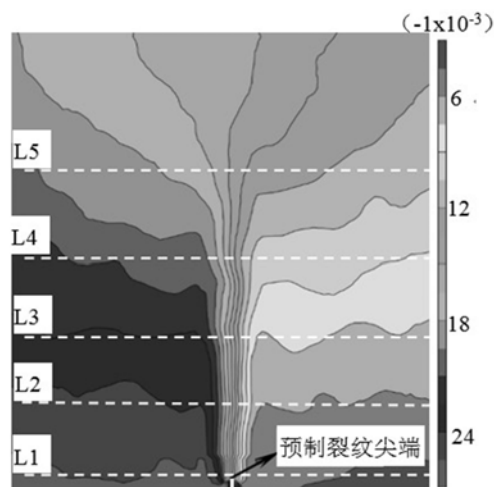


图 9 采样线分布图

Fig. 9 Sampling line distribution

3.2 断裂过程区的确定方法

3.2.1 临界宽度

通过数字图像相关方法匹配变形前的图像和峰值时的图像,可以得到峰值时试件观测区域表面的水平位移场及水平应变场。以 CN-2 试样为例,分析其变形特征。在水平位移云图上,靠近预制裂纹尖端做水平采样线 L1,竖直向上每隔 3.5mm 做一条水平采样线,共 5 条采样线,如图 9 所示。提取采样线的水平位移值,绘制水平位移值沿着水平方向的分布曲线,横轴 x 为数据点在观测区域的 x 坐标值,纵轴 u 为水平位移值,如图 10 所示。

从图 10 可以看出,采样线 L1~L4 的水平位移分布曲线存在两个明显的突变点,不同采样线突变

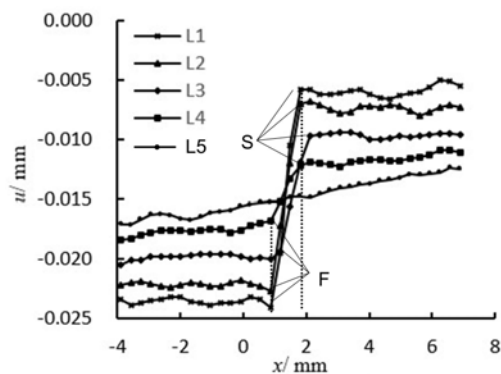


图 10 采样线位移分布曲线图

Fig. 10 Displacement distribution curve of sampling line

绘制分布曲线,观察分析曲线的变化趋势,确定水平位移的突变点的位置,确定断裂过程区的宽度方向上的边界,进一步可以计算出在采样线位置的断裂过程区的宽度值,如表 2 所示。试样 CN-2 断裂过程区的宽度范围值为 0.95~1.58mm,显然断裂过程区宽度存在差异,这与断裂过程区不同位置所受到的应力值不同有密切关系,而且岩石的非均质性进一步导致断裂过程区不同位置宽度值的差异。断裂过程区的临界宽度如表 3 所示。

表 2 突变点所在位置及断裂过程区宽度

Tab. 2 The location of the mutation point and width of FPZ

采样线编号	L1	L2	L3	L4
突变点 1/mm	0.85	0.85	0.85	0.54
突变点 2/mm	1.80	1.80	2.12	2.12
FPZ 宽度/mm	0.95	0.95	1.27	1.58

表 3 断裂过程区尺寸

Tab. 3 Size of Fracture process zone

试样编号	CN-1	CN-2	CN-3	CN-4
FPZ 临界长度/mm	13.16	12.20	11.20	12.34
FPZ 临界宽度/mm	2.26	1.58	2.13	2.36

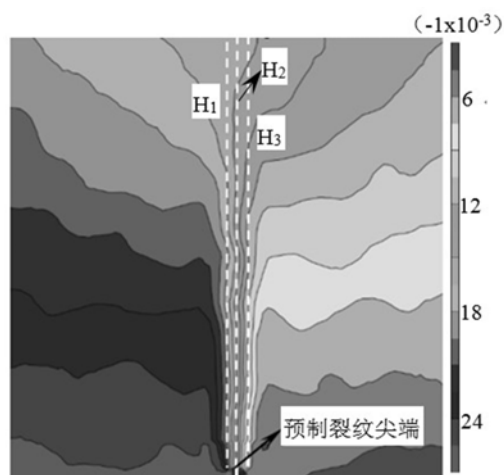
3.2.2 临界长度

同样以 CN-2 试样为例,确定其过程区临界长度。在水平位移等高线云图上取三条长度为 40mm 的竖直采样线,分别位于预制裂纹中心线的延长线上(H_2)及在 H_2 左右 0.4mm 位置(H_1 、 H_3)如图 11 所示。由 3.2.1 节可知三条采样线基本均匀分布在断裂过程区宽度边界以内,保证了所获数据的全面性和准确性,可以更好地反映实验现象。

用三条采样线的水平位移值相加得到的数据绘制水平位移分布图,纵轴 y 为数据点在观测区域的 y 坐标值,横轴 u 为水平位移值,如图 12。由图 12 知,AB 段曲线波动起伏较大,说明此区域的各相邻点水平位移值差异较大。BC 段水平位移曲线的波动性明显减弱,曲线比较平缓。在靠近加载点的位

点“F”大致位于 $x=1\text{mm}$ 处,突变点“S”大致位于 $x=2\text{mm}$ 处。两个突变点之外水平位移值趋于稳定,而两个突变点之间水平位移值显著增加,呈现非连续变化,有关学者将其定义为位移跳跃^[13]。由此可知两个突变点之间的区域存在较大的塑性变形导致位移变化比较剧烈。根据断裂过程区变形特征,可以确定这两个突变点所在的位置即为断裂过程区的宽度边界。采样线突变点所在位置如表 2 所示。根据对过程区临界长度的分析可知采样线 L5 在断裂过程区以外的线弹性区,所以此采样线上所在位置的位移整体变化比较平稳。

综上所述,通过提取水平采样线上水平位移值

图 11 采样线分布图(H_1 、 H_2 、 H_3)Fig. 11 Sampling line distribution(H_1 、 H_2 、 H_3)

置 CD 段的曲线波动性有加强的趋势。结合岩石的变形特征分析出现这一现象的原因因为在加载过程中预制裂纹尖端附近区域出现塑性变形,产生了大量微裂纹和岩石颗粒错动。为了证实上述论断,采用 AxioScope. A1 显微镜放大 50 倍观测预制裂纹尖端附近的岩石颗粒,在图 13 中岩石颗粒清晰可见,微裂纹已标出。加载过程中矿物颗粒之间会出现微裂纹。微裂纹沿晶分布,使得岩石颗粒与胶结物部分脱离,导致颗粒受力不均,出现岩石颗粒变形不均匀和错动的现象,同时颗粒和胶结物的变形也存在较大差异,进而导致 AB 段所在区域的水平位移值分布不均匀,出现曲线剧烈波动的现象。BC 段所在的区域处于线弹性阶段,岩石变形比较均匀,未出现大范围的塑性变形,所以此段的水平位移曲线波动性较弱。而 CD 段靠近加载端,由于此部分区域受压且存在应力集中,使得此部分区域进入塑性状态,则出现水平位移波动重新增强现象。综上所述,水平位移波动性比较剧烈的区域的长度为断裂过程区临界长度,且波动性由强到弱的过渡点为断裂过程区的顶点。

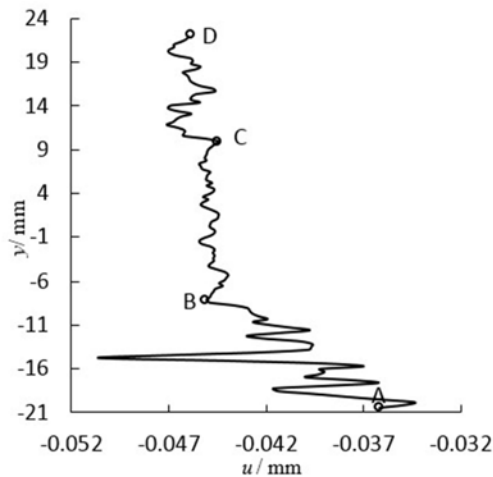


图 12 断裂韧带水平位移分布曲线图

Fig. 12 Ligament horizontal displacement distribution curve

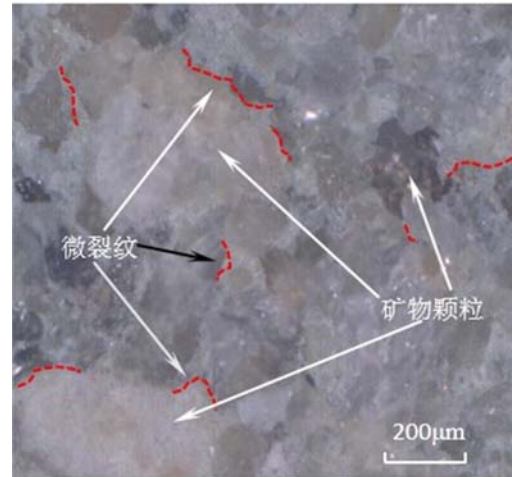


图 13 矿物颗粒图

Fig. 13 Mineral grain

为准确描述水平位移值分布的差异性,定量确定临界长度,从断裂韧带区域竖直坐标为 -8.68 mm 处开始每五个数据点做一个方差,此方差值命名为波动系数 λ ,见式(3)。绘制波动系数分布曲线,如图 14,横轴 x 为数据点在观测区域的 y 坐标,纵轴 λ 为波动系数。观察曲线的变化趋势,发现在 $-8.68\sim-8.09\text{ mm}$ 区间内的波动系数数值较小且变化不大,说明此区域相邻点水平位移值的差值较小,整体变形较均匀。在 $-20.13\sim-8.09\text{ mm}$ 区间内的波动系数数值逐渐增大且变化较为剧烈,说明此区域相邻点水平位移值差异较大且变化极不均匀,符合上述由水平位移垂直分布曲线所推断的整个断裂韧带区域的水平位移以及变形情况。所以,确定断裂过程区的上边界位于 -8.09 mm ,此处的波动系数值为 3.06×10^{-8} ,预制裂纹尖端位于 -20.13 mm ,故临界长度为 12.04 mm 。

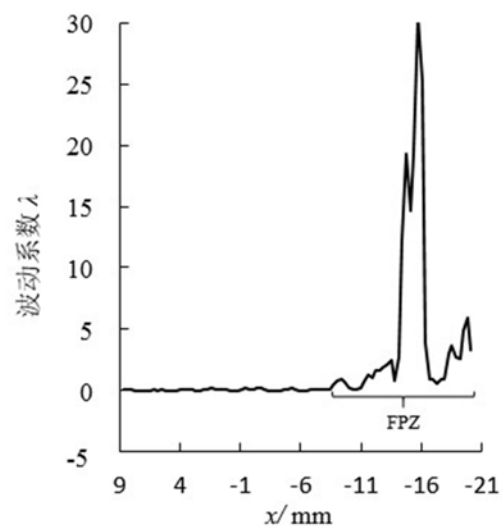


图 14 波动系数分布曲线

Fig. 14 Fluctuation coefficient distribution curve

$$\lambda_i = \sum_{n=i-2}^{i+2} (U_n - \bar{U})^2 \quad (3)$$

式中, $\bar{U}$ 为连续五个水平位移值的平均值; n 表示水平位移数据点的序列值。

上文依据水平位移的波动性确定了断裂过程区的临界长度, 根据数字图像获取水平位移值的原理, 水平位移值反映了观测区域各个点的水平移动量。确定断裂过程区的临界尺寸不能仅仅只依靠内部点水平位移差异特征, 还需要断裂韧带区域整体应变的变化趋势来进一步确定断裂过程区的临界长度。以水平应变等高线云图为基础, 且为了采样线所在位置应变数据能够准确全面描述裂尖韧带区域变形情况, 故在 H_1 、 H_2 、 H_3 取样线所在的位置做 H_4 、 H_5 、 H_6 三条取样线, 长度为 30mm, 如图 15 所示。将三条采样线的水平应变相加后取均值, 绘制水平应变垂直分布曲线, 横轴 x 为数据点在观测区域的 y 坐标, 纵轴 ϵ 为水平应变值, 如图 16 所示。相对于水平位移, 水平应变的波动性较弱, 究其原因可能与位移和应变的属性有关, 水平位移值是数据点位置的变化, 而应变值反映的是小范围区域的形变值。换句话说, 如果区域的数据点变化相同的位移量, 那么其应变值为零, 因为软件在计算应变值时会忽略刚性位移。且实验中所用 VIC-2D 软件并不得到每一个“点”的应变值, 软件间隔一定距离算一个“点”, 间隔内的“点”用插值法得到应变值。

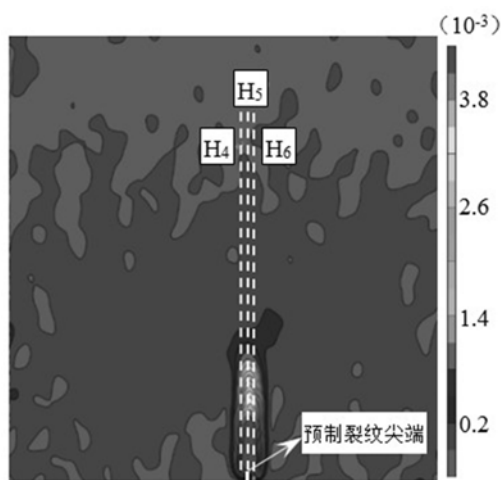


图 15 采样线分布图(H_4 、 H_5 、 H_6)

Fig. 15 Sampling line distribution(H_4 、 H_5 、 H_6)

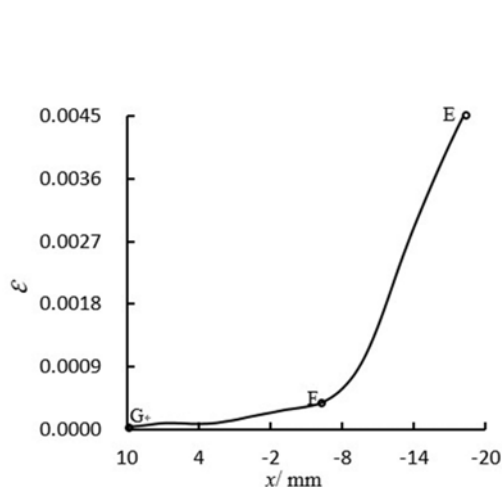


图 16 断裂韧带水平应变分布图

Fig. 16 Ligament horizontal strain distribution

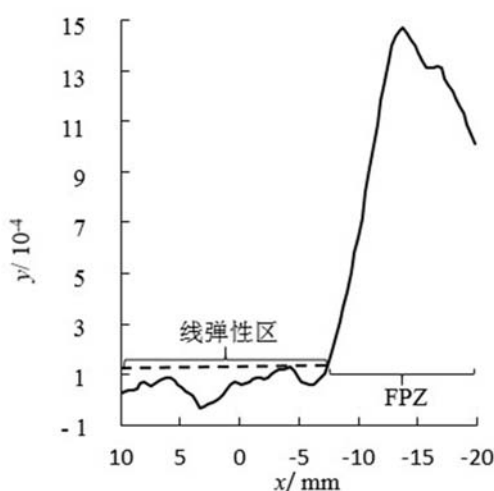


图 17 水平应变导数曲线图

Fig. 17 Horizontal strain derivative curve

由图 16 知, 断裂韧带上的应变值在沿着靠近预制裂纹尖端的方向上逐渐增大, 且在断裂韧带上存在一个突变点 F, 即应变值为 0.4×10^{-4} 处, 此点之后即 FE 段水平应变值增速明显加快, 从原来线性增加突变为指数增加。图 17 可以进一步印证此趋势, 即 FE 段水平应变的导数值明显比 FG 段的大, 且导数值也呈指数增加的趋势, 而 FG 段导数值基本维持在较低数值水平。结合韧带区域的拉应力分布情况以及上述对水平位移的分析得知, 由于预制裂纹尖端附近有明显塑性变形, 导致在靠近断裂过程区时水平应变急速增大, 可以认为此突变点为断裂过程区的顶点, 而 FG 段则为线弹性区域, 应变缓慢增加且应变值较小。通过 Origin 软件对水平应变分布曲线求导, 绘制导数曲线, 横轴 x 为数据点在观测区域的 y 坐标值, 纵轴 y 为导数值。如图 17

所示, 确定断裂过程区的顶点位于 -7.78mm 处, 通过水平应变确定的临界长度为 12.35mm 。

综上所述, 通过点的水平位移值的波动性和整体水平应变的突变性, 并结合断裂过程区的变形特征

确定了断裂过程区的顶点以及断裂韧带区域的弹塑性分布情况,虽然分别从位移和应变两个角度确定断裂过程区的临界长度有 0.34mm 的差异,但与断裂过程区的长度大小相比几乎可以忽略。本文取两种方法的平均值作为测试试样断裂过程区的临界长度。有关文献[2,12]表示断裂过程区在加载峰值时,刚好完全发育,所以断裂过程区的临界长度为 12.20mm。通过此方法确定的其他试样的断裂过程区的长度如表 3 所示。

3.2.3 断裂过程区的形状

运用 3.2.2 节的方法确定了断裂过程区长度方向的顶点,基于顶点的位置坐标确定断裂过程区的临界长度。同时,运用 3.2.1 节的方法确定断裂过程区的宽度方向的边界点,为更加准确地描绘断裂过程区的形态,在原来的基础上增加了 8 组宽度上的突变点。通过上述数据绘制断裂过程区范围的边界线,如图 18,横轴 x 为数据点在观测区域的 x 坐标,纵轴 y 为数据点在观测区域的 y 坐标。由图 18 知,断裂过程区的边界并不规则,主要是由于断裂过程区会沿着岩石强度弱面扩展,而强度弱面恰恰是岩石颗粒的胶结面,所以岩石颗粒的不规则分布导致断裂过程区边界的不规则。这导致断裂过程区整个水平上的宽度值不完全一致。断裂过程区顶端相对于整体出现偏移,这是因为断裂过程区在孕育扩展过程中遇到强度相对较高的岩石颗粒晶体,而应力值不足以形成穿晶断裂,但晶体周围的基质强度较低,断裂过程区扩展时会绕开晶体,在晶体周围的基质扩展造成的。

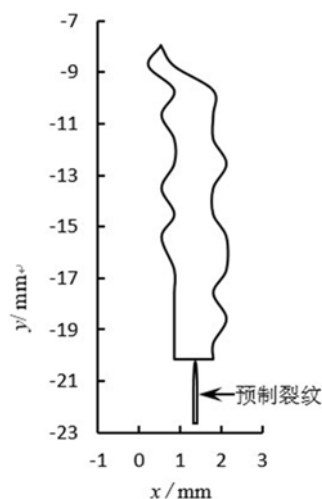


图 18 FPZ 形态

Fig. 18 Form of FPZ

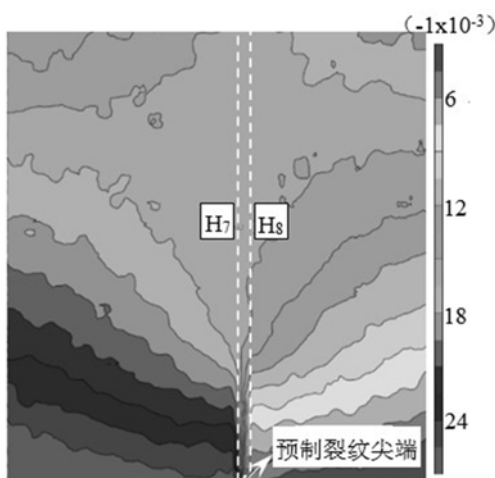


图 19 采样线分布图(H_7 、 H_8)

Fig. 19 Sampling line distribution(H_7 、 H_8)

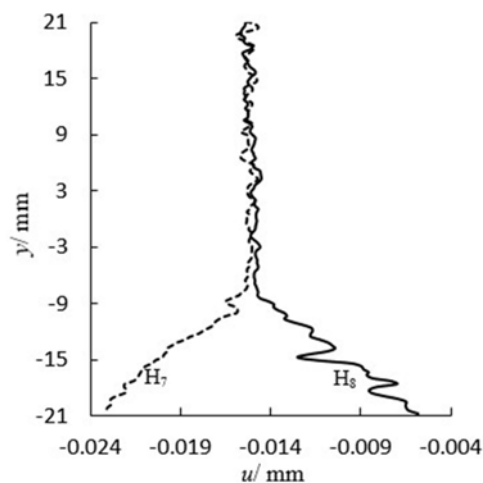


图 20 采样线水平位移分布图

Fig. 20 Horizontal displacement distribution in sampling line

3.3 断裂过程区内部变形特征

现以 CN-2 试样为例,分析断裂过程区内部的变形特征。在距预制裂纹中心线左右 0.8mm 位置做采样线如图 19 所示。绘制所提取采样线的水平位移分布曲线图如图 20 所示,横轴 u 为水平位移值,纵轴 y 为数据点在观测的 y 坐标,如图 20。由图 20 知,远离预制裂纹尖端区域点的水平位移值的分布较均匀且差值较小,主要由于试样在此区域所受的拉应力较小。在接近预制裂纹尖端的区域,发现两条采样线位移的差值越来越大,显然是此区域存在塑性变形的缘故。

为准确描述两条采样线水平位移的差值,将采样线 H_7 的水平位移值减去采样线 H_8 的水平位移值得到张开位移,绘制张开位移的分布曲线,纵轴 u 为张开位移,横轴 x 为数据点在观测区域的 y 坐标,

如图 21 所示。张开位移是虚拟裂纹理论中的重要物理量,反映粘聚力的大小以及表征岩石的开裂与否。根据虚拟裂纹理论以及各种软化曲线模型,张开位移为零且开始显著增大的位置为断裂过程区的上边界。由于采样线之间会有一定数值的弹性应变,导致断裂过程区顶点的张开位移不可能为零,但可以通过确定张开位移值显著增大的位置即突变点作为断裂过程区的顶点。采用 Origin 软件对张开位移曲线进行一次求导,绘制导数曲线,横轴 x 为数据点在观测区域的 y 坐标,纵轴 y 为张开位移的导数值,如图 22。

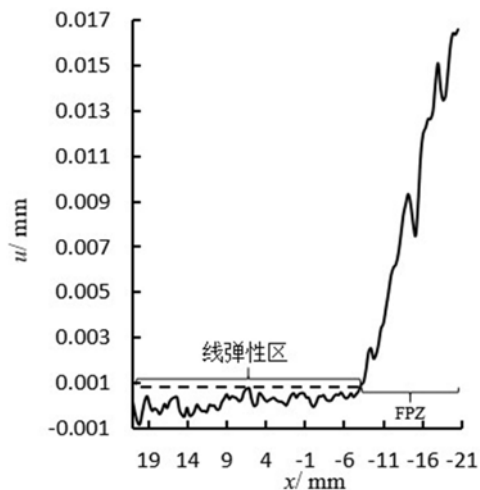


图 21 张开位移分布曲线图

Fig. 21 Opening displacement distribution curve

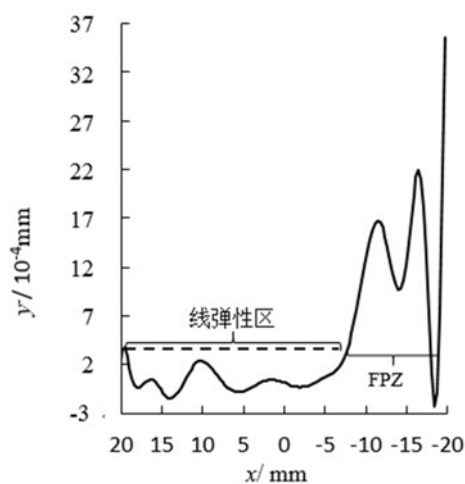


图 22 张开位移导数曲线图

Fig. 22 Opening displacement derivative curve

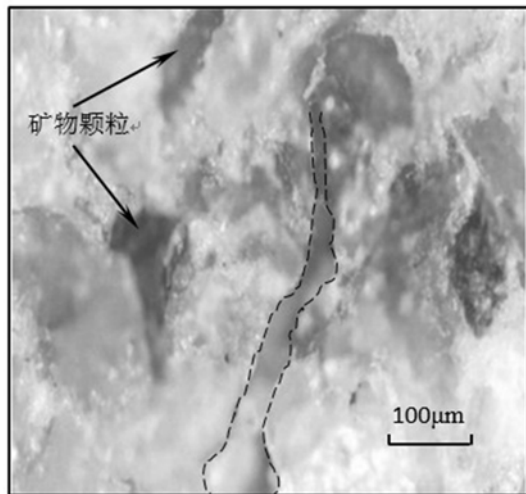


图 23 裂纹形态图

Fig. 23 Flaw form

由图 21 知,张开位移值在线弹性区域整体变化不大,但在断裂过程区的顶点处张开位移值及其增速开始明显增加。断裂过程区顶点区域沿韧带靠近裂纹尖端方向的张开位移呈指数增加趋势,在个别区域出现小范围波动,且张开位移的增加速度明显高于线弹性区域,但在断裂过程区靠近预制裂纹裂尖处单位长度的形变增量出现波动,说明即使在断裂过程区内部其形变特征也有差别,在顶点区域“桥联”广泛存在,可以使形变有规律地增加,而在尾部由于形变较大,“桥联”开始无序消失,形变的增加量出现波动。图 22 进一步印证了上述现象,断裂过程区区域内张开位移整体的导数值明显大于线弹性区域内导数值,且断裂过程区的导数值也有明显的波动趋势,这从侧面反映了断裂过程区区域内变形

较剧烈,也佐证了用波动系数法确定断裂过程区尺寸的正确性。通过 AxioScope. A1 显微镜放大 100 倍观测宏观裂纹形态如图 23 所示,发现裂纹的开度逐渐增加,在局部出现突然缩小和增大的现象,宏观裂纹形态和张开位移的变化趋势类似,这是因为断裂过程区作为宏观裂纹的先导,两者形态变化特征具有相似性。

4 讨论

采用砂岩试样结合数字相关法得到的断裂过程区的长度为 11~13mm,为试样高度的 1/6 左右,接近预制裂纹长度的 1/2,可能会导致在计算相关断裂参数时出现明显的尺寸效应现象,且不适合用线弹

性断裂力学的等效裂纹长度方法研究此类断裂问题。但断裂过程区控制能量的注入与耗散,对外表现为荷载曲线的非线性行为、试样的增韧现象、微裂纹的萌生、扩展、贯通,所以从能量角度出发的J积分法未尝不是一个好的选择。

另外,本文得到了峰值时刻砂岩方梁试样预制裂尖的张开位移分布情况,在裂纹尖端的张开位移为 $17\mu\text{m}$,但Jenq和Shah^[12,3]根据双参数断裂模型由计算公式得出的值为 $0\mu\text{m}$ 。两者有很大出入。首先两位研究者是以脆性材料作为研究对象,脆性材料的突出特点是变形较小,能量的释放比较集中剧烈,但本实验选取的研究材料有较强的韧性,其加载曲线也可证明这点,峰后曲线在普通的试验机上可以得到峰值前后荷载曲线的非线性行为。另外,两位研究者的计算公式中也没有体现断裂过程区的影响,本实验中断裂过程区的尺寸和试样尺寸是在同一个数量级,所以有必要进一步研究修正计算公式,以使得其有更广泛的应用范围。

断裂过程区的形态受多重因素影响,首先需要解决的问题是断裂过程区在何时完全发育。有关学者^[12,13,15,16]认为断裂过程区在峰值荷载时完全发育,也有学者^[3,17,24]认为当单位变形所需要的荷载减小时断裂过程区完全发育,此时一般都在峰后。其实解决分歧的关键在于统一定义断裂过程区完全发育的概念。对于断裂过程区完全发育的空间和时间属性确定非常关键,笔者认为,断裂过程区充分发育,本质上是颗粒间的桥联作用消失,现象上可以认为微裂纹的密度和开度达到极限值。虽然有关文献证明了微裂缝在试件表面与内部出现的概率是等同的^[22],但试件内部的变形和表面的变形仍是有差异的,所以仅仅研究断裂过程区的表面结构不能完全揭示其所有的特征。此外,受岩石类型、加载方式、温度等环境因素影响,裂缝扩展速率可能超出所采用的监测手段能够检测出的速率,动态扩展微裂纹的精确观测对设备仪器有极高的要求,今后仍需要对断裂过程区有更加深入的理论和实验研究。

5 结论

(1) 在砂岩三点弯曲试样达到峰值荷载时,断裂过程区区域内已经萌生大量微裂纹,岩石颗粒出现错动,导致断裂过程区区域内水平位移分布不均匀,沿宽度方向剧烈变化,而区域外水平位移未见显著增长,据此可以确定断裂过程区宽度方向上的边界。

(2) 沿韧带竖直方向的断裂过程区区域内水平位移值与线弹性区域相比出现剧烈波动,两区域的临界点在波动系数为 3.06×10^{-8} 处。此临界点可视为断裂过程区的上边界。当试样受载达到峰值荷载时,断裂过程区内各点的水平应变显著增加。通过分析韧带竖直方向上水平应变值变化趋势,可进一步佐证断裂过程区上边界的位置。依据上述现象能够确定断裂过程区的临界长度和断裂过程区形态,本实验获得的砂岩试样的断裂过程区形态近似“子弹头”形状。

(3) 断裂过程区内的张开位移和水平应变反映了断裂过程区沿韧带靠近裂纹尖端方向的变形呈指数增加趋势,在接近裂纹尖端时其单位区域的形变增量呈波动状态。水平应变值和张开位移值在断裂过程区明显增大,越是靠近断裂过程区下边界增速越快。断裂过程区作为宏观裂纹的先导,其整体形态和内部变形特征与宏观裂纹具有相似性。

参考文献:

- [1] 卿龙邦,李庆斌,管俊峰,等. 基于虚拟裂缝模型的混凝土断裂过程区研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9):112—116, 132 (QING Longbang, LI Qingbin, GUAN Junfeng, et al. Study of concrete fracture process zone based on fictitious crack model[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9):112—116, 132 (in Chinese))
- [2] 鞠杨,刘彩平,谢和平. 混凝土断裂及亚临界扩展的细观机制[J]. 工程力学, 2003, 20(5):1—9 (JU Yang, LIU Caiping, XIE Heping. The mesomechanism of fracture process and subcritical crack growth in concrete[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5):1—9 (in Chinese))
- [3] 黄才政. 基于数字图像相关方法的混凝土断裂过程区力学特性研究[D]. 重庆交通大学, 2016 (HUANG Caizheng. Research on mechanical properties of concrete fracture process zone based on digital Image correlation method[D]. Chongqing Jiaotong University, 2016 (in Chinese))
- [4] Hillerborg A, Mod  r M, Petersson P-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of

- fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6):773—781.
- [5] Barenblatt G. the mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1962, 7(2):55—129.
- [6] Dugdale D. Yielding of steel sheets containing slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2):100—104.
- [7] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰. 混凝土断裂过程区长度计算方法研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(4):197—201 (QING Longbang, LI Qingbin, GUAN Junfeng. Study of concrete fracture process zone based on fictitious crack model [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4):197—201 (in Chinese))
- [8] 胡若邻, 黄培彦, 郑顺朝. 混凝土断裂过程区尺寸的理论推导[J]. *工程力学*, 2010, 27(6):127—132 (HU Ruolin, HUANG Peiyan, ZHENG Shunchao. Theoretical derivation of the size of fracture process zone of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(6):127—132 (in Chinese))
- [9] Justo J, Castro J, Cicero S, et al. Notch effect on the fracture of several rocks: application of the theory of critical distances[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 12:251—258.
- [10] Fakhimi A, Tarokh A. Process zone and size effect in fracture testing of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 47:59—80.
- [11] Fakhimi A, Tarokh A. Scaling of the fracture process zone in rock[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 204:109—204.
- [12] Lin Q, Biolzil, Labuz J F. Opening and mixed-mode fracture initiation in a quasi-brittle material[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 139:177—187.
- [13] Lin Q, Yuan H, Biolzil T, et al. Opening and mixed mode fracture processes in a quasi-brittle material via digital imaging[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 131:176—193.
- [14] Vesely V, Frantik P. An application for the fracture characterisation of quasi-brittle materials taking into account fracture process zone influence[J]. *Advances in Engineering Software*, 2013, 67:59—80.
- [15] 纪维伟, 潘鹏志, 苗书婷, 等. 基于数字图像相关法的两类岩石断裂特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 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]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 37(8):2299—2305 (in Chinese))
- [16] 彭剑文, 李长洪, 苗胜军. 砂岩 I 型断裂的尺寸效应试验研究[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(10):1477—1484 (PENG Jianwen, LI Changhong, MIAO Shengjun. Experimental investigation for effect of size on sandstone mode I fracture[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(10):1477—1484 (in Chinese))
- [17] Vavro L, Soucek K, Kytýr D, et al. Visualization of the evolution of the fracture process zone in sandstone by transmission computed radiography [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 191:689—696.
- [18] Willetta T, Josey D, Lu R, et al. The micro-damage process zone during transverse cortical bone fracture: no ears at crack growth initiation[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 74:371—382.
- [19] 王博, 俞立平, 潘兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. *实验力学*, 2016, 31(3):291—298 (WANG Bo, YU Liping, PAN Bing. On the error analysis of matched and overmatched shape function in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3):291—298 (in Chinese))
- [20] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):305—325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):305—325 (in Chinese))
- [21] 范亚夫, 魏延鹏, 薛跃军, 等. 数字图像相关测试技术在霍普金森杆加载实验中的应用[J]. *实验力学*, 2015, 30(5):590—598 (FAN Yafu, WEI Yanpeng, XUE Yuejun, et al. On the application of digital image correlation testing technology in Hopkinson bar loading[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(5):590—598 (in Chinese))
- [22] Mihashi H, Nomura N, Niiseki S. Influence of aggregate size on fracture process zone of concrete detected with dimensional acoustic emission technique[J]. *Cement and Concrete Research*, 1991, 21:737—744.
- [23] Jenq Y, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111(10):1227—1241.

- [24] 荣华. 混凝土裂缝扩展过程中断裂过程区的特性研究[D]. 大连理工大学, 2012 (RONG Hua. Research on mechanical properties of concrete fracture process zone[D]. Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese))

Experimental determination method of fracture process zone of sandstone using square beam sample

QIAO Yang¹, ZHANG Sheng^{1,2}, LIU Shao-wei¹, WANG Meng¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Henan 454001, Jiaozuo, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Henan 454001, Jiaozuo, China)

Abstract: The fracture process zone around crack front is the main cause of non-linear fracture and size effect of rock. In this paper, three-point bending test was carried out for beams made of sandstones, and high-precision full-field displacement and strain data are obtained by using the digital image correlation technology. According to horizontal displacement and strain distributions in the fractured ligament region as well as the microscopic change of the fractured rock particles, a method to determine the shape and critical dimension of the fracture process zone is proposed based on the fluctuation of horizontal displacement and the mutation of horizontal strain at the crack tip. The results showed that the shape of the fracture process zone is irregular and narrow striped zone with the critical length of 11~13mm and the critical width of 1.58~2.36mm. The deformation in the fracture process increases exponentially as it approaches the crack tip, but the deformation increment in the unit area reveals fluctuation. This method can more accurately determine the extent of the rock fracture process zone and help to analyze the nonlinear fracture characteristics of rocks.

Keywords: fracture process zone; digital image correlation method; volatility of horizontal displacement; transmutation of horizontal strain; three-point bending beam