

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.08.023

基于数字图像相关法的两类岩石断裂特征研究

纪维伟, 潘鹏志, 苗书婷, 苏方声, 杜梦萍

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 岩石破坏时的临界断裂特征, 如过程区长度, 裂缝口张开位移是运用断裂力学解决岩石断裂问题的关键所在。传统测量方法, 如应变片、直线位移传感器无法获得岩石破坏时的全场变形, 因此, 也无法准确地获得上述断裂特征。数字图像相关法是一种光学的变形测量方法, 其通过试样表面的数字图像采集及相关计算, 能够获得岩石破裂过程各个阶段的高精度全场变形特征。利用该试验手段, 对两类岩石, 即相对较硬的大理岩和相对较软的黄砂岩开展了一系列半圆盘三点弯曲断裂试验并获得了岩石断裂时的临界变形场, 对变形场进行分析, 从而确定了两类岩石破坏时临界特征、过程区长度及裂缝口张开位移。结果表明, 大理岩的断裂过程区长度明显小于黄砂岩的断裂过程区长度, 峰值时黄砂岩 COD 的值均大于相同裂纹长度的大理岩, 而较软岩的力学行为更容易受边界效应的影响。上述研究有助于进一步了解不同类型岩石的断裂发展过程并采用相应的方法来解决岩石断裂问题。

关键词: 岩石; 临界断裂特征; 过程区长度; 裂缝口张开位移; 数字图像相关法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 08 - 2299 - 07

Fracture characteristics of two types of rocks based on digital image correlation

Ji Wei-wei, Pan Peng-zhi, Miao Shu-ting, Su Fang-sheng, Du Meng-ping

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The critical fracture characteristics of rock, such as the length of process zone and crack mouth opening displacement(COD), are the fundamentals to solve the fracture problems of rock by using fracture mechanics. Traditional measure methods, such as strain gauge and LVDT, etc., cannot obtain the full-field displacement of rock specimen. In that case, it's difficult to achieve the above mentioned critical fracture characteristic of rock. Digital image correlation (DIC) method is a optical measure method which can obtain the accurate full-field displacement of the specimen by comparing the original image and deformed image. A series of three-point bending tests is performed on the semi-circular rock specimens(relatedly hard marble and relatedly soft yellow sandstone), and the DIC method is used to measure the full-field displacements of the specimens. The obtained displacements are further analyzed, and the critical fracture characteristics of the specimens including the length of process zone and the crack mouth opening displacement are revealed. It is shown that the length of process zone in marble is obviously shorter than that in yellow sandstone, while the values of COD of yellow sandstone are higher than the ones of the marble with same crack length, which demonstrates that the soft yellow sandstone is prone to be affected by boundary effect. Those researches can help us to further understand the fracture process of rock, and to solve rock engineering problem using fracture mechanics.

Keywords: rock; critical fracture characteristic; length of process zone; crack mouth opening displacement; digital image correlation

1 引 言

随着岩石工程复杂程度的不断增加, 研究者对于岩石断裂问题的认知也越发迫切。断裂力学作为一门研究材料断裂全过程的学科, 在岩石工程领域

得到了广泛的关注。岩石作为一种非完全弹性材料, 其断裂过程能量发生耗散, 从而在岩石中产生不可逆的塑性区域, 形成岩石断裂的过程区, 因此, 不能简单地运用线弹性断裂力学的方法来研究岩石的断裂过程, 需要充分考虑过程区对岩石断裂的影响。

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51322906, No. 41272349)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51322906, 41272349).

第一作者简介: 纪维伟, 男, 1988 年生, 硕士, 主要从事岩石断裂力学研究。E-mail: weiwei@hotmail.com

通讯作者: 潘鹏志, 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 主要从事深部岩体连续-非连续变形破坏机理与模拟方法研究。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn

当岩石过程区较小时,可以将岩石的过程区与原生/预制裂纹的总长作为等效裂纹长度来研究岩石的断裂过程。当岩石过程区较大时,可运用弹塑性断裂力学的方法来研究岩石的断裂过程。此时,临界裂缝口张开位移作为一个有效的断裂判据起到了极其重要的作用。综上所述,岩石的两个断裂特征——过程区长度与临界裂缝口张开位移是运用断裂力学解决岩石断裂问题的关键所在。

Cedolin 等^[1]采用云纹干涉技术对混凝土的过程区开展了研究,以应对对过程区范围进行了区分从而得到了过程区的大小。Labuz 等^[2]采用光学显微镜对花岗岩的过程区范围进行了观测,并讨论了通过等效裂纹长度计算裂纹长度的不足。Labuz 等^[3]采用超声波技术对含双预制裂纹的花岗岩试样的弹性与非弹性区域进行区分,从而确定了过程区的大小。Nolen-Hoeksema 等^[4]采用光学显微镜观察大理岩断裂的过程,并描绘了其断裂过程裂纹形式的发展,认为岩石发生连续断裂前的裂纹网络区域为岩石的过程区。Maji 等^[5]通过声发射技术观测了混凝土直接拉伸试验下过程区的范围。Wang 等^[6]运用激光散斑干涉技术测量了 3 种岩石的过程区大小及裂缝尖端张开位移。其试验结果表明,当微小裂纹产生时,由于位移的不连续云纹图像也将产生跳跃,因此,可以通过峰值时云纹图像来判断过程区的大小。Moore 等^[7]通过计算机图像处理技术研究了花岗岩的裂纹密度,研究结果表明,微裂纹密度在过程区显著增加,剪切过程区的裂纹密度大于受压区的裂纹密度。Zietlow 等^[8]通过声发射技术检测了三点弯曲试验下 4 种不同岩石的微裂纹发展,试验结果表明,过程区大小与试样的尺寸无关,与矿物颗粒的大小有关。过程区的大小与矿物颗粒的尺寸呈线性比例增加。Ostuka 等^[9]运用声发射技术与 X 射线检测技术联合监测了混凝土拉伸试验,试验结果表明,断裂过程区内试件数的能量占到总能量的 95%,声发射检测的结果与 X 射线检测的结果较为吻合。Patzak 等^[10]运用扩展有限元方法研究了准脆性材料的过程区范围。Haggerty 等^[11]运用高精度电子光斑云纹干涉技术研究了砂岩的裂缝口展开位移。代树红等^[12]通过数字散斑法测定了三点弯曲试验中岩石的 I 型应力强度因子、裂尖位置及裂纹扩展长度。Lin 等^[13-14]采用数字图像相关法研究了带预制裂纹的三点弯曲梁的过程区尺寸及最大裂缝口张开位移。

前人在岩石的断裂特征方面做了很多相关的工作,但对于不同类型,例如硬岩和较软岩^[15]断裂特

征的差异方面研究较少,而这方面的研究又是建立岩石断裂模型的关键所在,非常必要。

岩石的破裂过程涉及从弹性到屈服,以及屈服发展到一定程度之后的断裂阶段,采用常规的测量方法来测量岩石的形变,如应变片、长度引伸计(LVDT),只能测得试样的单点变形,无法获得试样的全场变形,也无法通过全场的变形信息来判断岩石的过程区范围及裂缝口张开大小。需要采用一种能对岩石破裂过程全场变形信息的连续观测方法,才能抓住岩石破裂过程的各个阶段特征。

近些年来发展起来的数字图像相关法是一种先进光学测量手段^[12-13],通过变形前、后试件表面灰度值的相关计算能够得到试件表面的全场位移信息,并利用这些信息来获取岩石的断裂特征。

为此,本文以两类岩石,即相对较硬的大理岩和相对较软的黄砂岩为主要研究对象,开展了一系列半圆盘的三点弯曲试验。通过数字图像的获取及相关计算获得不同类型岩石加载破裂全过程试样表面的变形特征,并分析和讨论两类岩石的过程区和临界张开位移等断裂特征的差异性。

2 数字图像相关方法简介

数字图像相关法是一种基于数字图像技术的非接触、高精度的全场观测技术。主要包括数字图像采集系统及数字图像相关计算软件。

数字图像采集系统如图 1 所示,包含高清数码摄像机、稳定的光源、计算机及试验加载系统。首先,根据预先设置的试验加载速率调节数码摄像机的采集频率。其次,加载过程中,需要确保光源的稳定,从而使获得的图像具有稳定的灰度值。摄像机将对喷涂过人工散斑的试样进行数码图像的采集。最终,数字图像通过数据传输存储在计算机中。在这个过程中,数字图像的采集速率与试验加载速率均由计算机进行设置与调节。

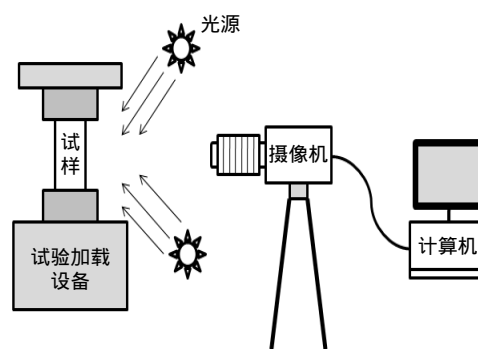


图 1 数字图像采集系统

Fig.1 Image acquisition system

数字图像相关计算的基本假设是图像的灰度值在变形前、后保持一致，其具体步骤如图 2 所示。首先需要在数码图像上选取一个兴趣区域，这是由于采集的数字图像往往存在一些不必要关注的区域，为了减小不必要的计算量，因此，需要在图像上确定一个兴趣区域；其次需要在兴趣区内选取一个子集，由于单个像素点不具备匹配特征，难以进行匹配，因此，需要选取一个子集作为匹配的单位进行相关计算。为了提高计算精度和加快收敛速度，在匹配过程中相关软件可以先通过正交相关法计算出位移的初值，其相关计算公式为

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{refi}, \tilde{y}_{refi}) - f_m)(g(\tilde{x}_{curi}, \tilde{y}_{curi}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{refi}, \tilde{y}_{refi}) - f_m)^2 \sum_{(i,j) \in S} (g(\tilde{x}_{curi}, \tilde{y}_{curi}) - g_m)^2}} \quad (1)$$

式中： f 、 g 为变形前、后图像在 (x, y) 处的灰度值； f_m 、 g_m 为变形前、后图像在其所在子集内的平均灰度值。初值计算完毕后，通过计算非线性优化算子的最小值对初值进一步修正，从而得到子集内的精确位移值，非线性优化算子的计算公式为

$$C_{LS} = \left[\frac{f(\tilde{x}_{refi}, \tilde{y}_{refi}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{refi}, \tilde{y}_{refi}) - f_m)^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{curi}, \tilde{y}_{curi}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} (g(\tilde{x}_{curi}, \tilde{y}_{curi}) - g_m)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

不断重复上述步骤，直至得到兴趣区内所有子集的位移，即可得到兴趣区内的水平与竖直位移场。

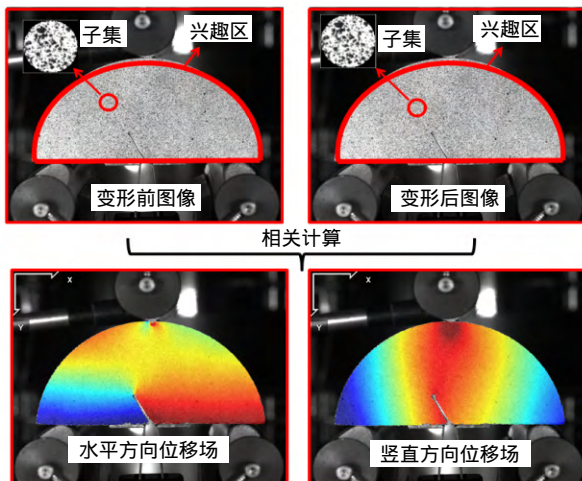


图 2 数字图像相关的计算步骤
Fig.2 Calculation procedures of digital image correlation

3 半圆盘三点弯曲试验

3.1 试验方案

试验所用岩样为大理岩及黄砂岩，其中，大理岩取自四川省凉山彝族自治州的锦屏 II 级水电站，属白山组大理岩，是典型的硬岩，该岩样密度为 2.78 g/cm^3 ，单轴抗压强度为 $110 \sim 160 \text{ MPa}$ ，其主要矿物成分为：白云石 (91.0%)、方解石 (8.6%) 及云母 (0.4%)。黄砂岩取自云南昆明，相对大理岩来说较软，其密度为 2.29 g/cm^3 ，单轴抗压强度为 $70 \sim 100 \text{ MPa}$ ，主要矿物成分为：石英 (66.7%)、长石 (25.7%)、方解石 (3.4%) 及黏土矿物 (4.2%)。

试样被制作为带中心预制裂纹的半圆盘，采用如图 3 所示的三点弯曲的加载方式，预制裂纹长度 a 分别为半径 R 的 30%、40%、50%，加载跨度 $2S$ 为直径的 0.8 倍，试件厚度均为 18 mm ，其他具体尺寸如表 1 所示，试样的各项指标均符合 ISRM 的标准。

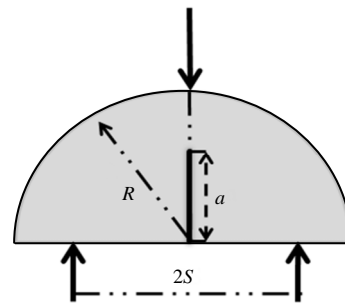


图 3 半圆盘三点弯曲

Fig.3 Three-points bending of semi-circular specimen

表 1 试样尺寸
Table 1 Dimensions of specimens

岩石类型	编号	a / mm	R / mm	a/R	s / mm
大理岩	M-1	15.75	48.50	0.32	38.80
	M-2	15.37	48.59	0.32	38.87
	M-3	18.84	47.42	0.40	37.90
	M-4	18.87	47.38	0.40	37.90
	M-5	23.68	47.46	0.50	38.00
	M-6	23.43	46.90	0.50	37.50
黄砂岩	S-1	13.72	46.01	0.30	36.80
	S-2	13.98	45.92	0.30	36.70
	S-3	18.55	46.04	0.40	36.80
	S-4	18.13	45.30	0.40	36.20
	S-5	23.16	46.34	0.50	37.10
	S-6	23.48	46.08	0.51	36.90

试样制作完成后，先用喷漆罐在试样表面制作一层白色的底膜，然后再喷上黑色的散斑点，观测试样表面的人工散斑是否达到试验的标准，若无法

达到，则重复上述步骤，交替喷涂黑、白漆，直至试样表面制作出优质的人工散斑。

图像采集装置为有效像素为 3 376×2 704 的 CCD 数码摄像机，配置 35 mm 定焦镜头，图像采集速率为 5 张/s，相机两侧摆放 LED 白光源。试验加载系统为 MTS815。同时，为了稳定地控制试样加载的全过程，采用 COD 位移测量计（见图 4）测量预制裂缝口的张开位移作为伺服反馈信号，其控制速率为 0.000 2 mm/s。

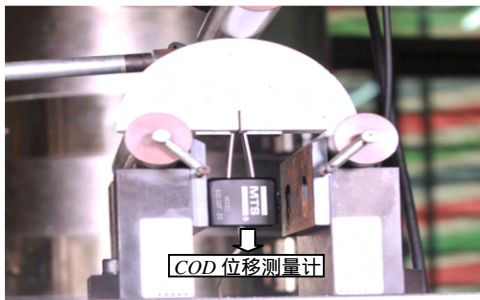


图 4 COD 位移测量计
Fig.4 The COD gauge

3.2 试验结果及分析

3.2.1 断裂破坏过程的力-COD 曲线

试验得到的力-COD 曲线如图 5 所示。

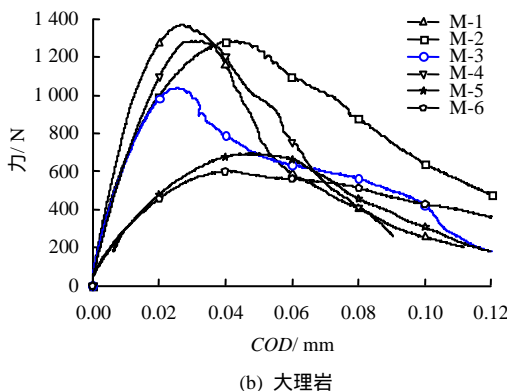
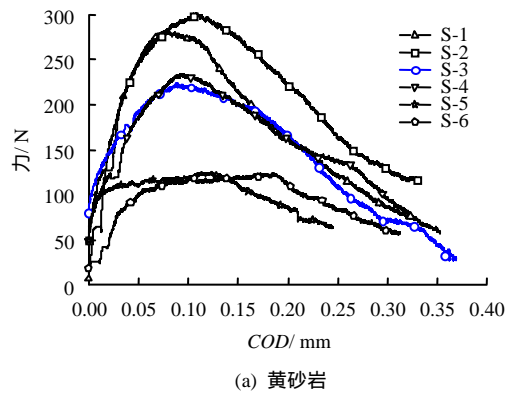


图 5 力-COD 曲线
Fig.5 The Force-COD curves

预制裂纹长度一致时，大理岩的峰值载荷明显高于黄砂岩的峰值载荷。例如黄砂岩 S-6 与大理岩 M-6，其预制裂缝长度均为试样高度的 1/2，S-6 的峰值载荷为 123 N，M-6 的峰值载荷为 604 N。峰值时，相同预制裂纹长度的砂岩其 COD 值远大于大理岩，例如 S-6 峰值时的 COD 值为 0.184 mm，M-6 的 COD 值为 0.040 mm。上述特征均反映了岩石本身的属性，即反映了大理岩较硬，黄砂岩较软这一属性。

此外，不论是大理岩还是黄砂岩，随着预制裂纹长度的增加，岩样的峰值载荷降低，刚度降低，塑性流动增强。

3.2.2 断裂过程区长度

通过数字图像相关方法匹配变形前的图像及峰值时的图像得到峰值时试件表面的水平位移场及竖直位移场。现以试样 M-1 为例，分析其变形特征。如图 6(a)所示，水平位移场中上部存在明显的中性轴，中性轴上方部分试样受压，中性轴下方的部分试样受拉。水平位移场沿着预制裂纹的延长线呈明显的对称性。为了进一步说明问题，在预制裂纹尖端一个小区域内设置一个观察窗，观察窗内的水平位移场如图 6(b)所示。水平位移场的等高线在预制裂纹前端交汇为一点，根据文献[14]所述，该点即为过程区的尖端，从该点到预制裂纹尖端处的长度即为试样的过程区长度。图 6(c)为观察窗内的竖直

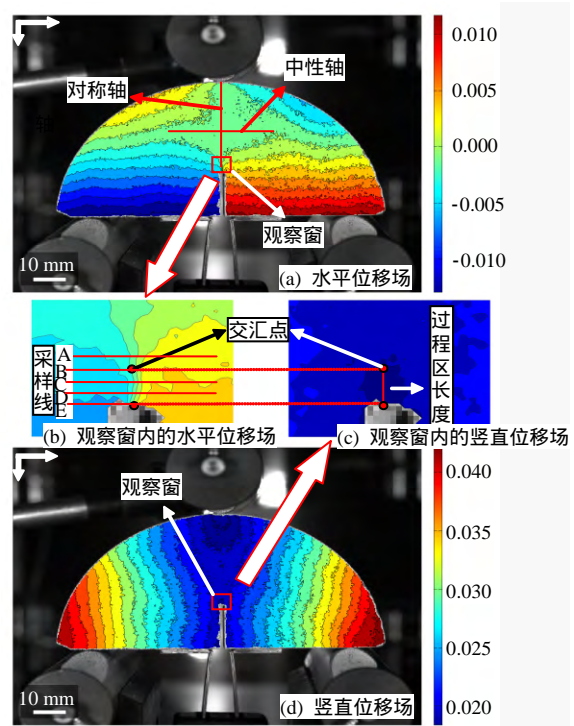


图 6 M-1 试样表面的位移场
Fig.6 The displacement on the surface of sample M-1

位移，将交汇点以里的范围对应到图 6(c)上，可以观察到该范围内的竖直位移与其范围外的位移有所不同，即其不在一个等高线内。

在交汇点内外共取 5 条长度为 8.8 mm 的直线作为采样线，采样线的间距为 0.732 mm。如图 6(b)所示，A 线为交汇点外的线，B 线为穿过交汇点的直线，C、D 线为交汇点以内的采样线，E 为靠近预制裂纹尖端的直线。如图 7 所示，将采样线上所有点的水平位移取出，以对称轴与采样线的交点 O 点为原点建立局部坐标系 (X_1, Y_1) ，横轴为取样点距离 O 点的实际距离，竖轴为该点处水平位移。

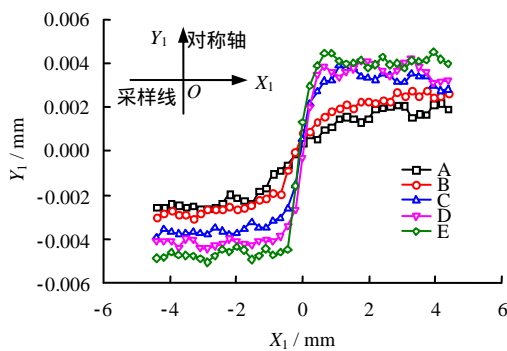


图 7 峰值时刻采样线上的水平位移分布

Fig.7 Horizontal displacement in the sample line at peak time

从图 7 可以看出，距离交汇点尖端越远，取样线上的水平位移差值越大，跳跃性越大，其表现出的位移非连续性越明显，如 D、E 线。当取样线逐步靠近交汇点时，其差值不断减小，跳跃性不断减小，非连续变化程度也不断减小，如 C 线。当取样线经过交汇点时，其水平位移差值近似连续变化，跳跃十分微小，如 B 线所示。A 线是位于交汇点以外的取样线，A 线无明显的位移跳跃，位移变化连续。从图上可知，A 线与 B 线近似重合。到达峰值时，B 线以内的区域在水平位移上表现出明显的非连续，同时由于力处于峰值处并未下降，表明此时裂纹尚能传递应力（由于黏聚力的存在），根据断裂力学理论，位移非连续与应力的传递特性是判定过程区的两个重要标志。因此，可以认为此时 B 线以内的区域是岩石破坏的过程区，以 B 线所在交汇点作为过程区的尖端是可行的，它是水平位移连续与非连续的分界，具有明显的区分性。

综上所述，将峰值时水平位移等高线的交汇点定义为断裂过程区的尖端，预制裂纹端点到等交汇点的距离定义为断裂过程区长度，国内外有些学者也采用该方法定义断裂过程区^[13-14]。各试样的过程区长度如表 2 所示。

表 2 试样的断裂过程区长度

Table 2 The fracture process zone length of specimens

岩石类型	编号	过程区长度 / mm	岩石类型	编号	过程区长度 / mm
大理岩	M-1	2.196	黄砂岩	S-1	6.013
	M-2	1.795		S-2	6.448
	M-3	1.438		S-3	5.462
	M-4	1.054		S-4	6.656
	M-5	1.384		S-5	9.275
	M-6	1.005		S-6	8.818

从表可以看出，大理岩过程区长度在 1~2 mm 范围内变化，其长度值较为稳定，不随预制裂纹长度的变化而发生变化，因此，笔者认为通过数字图像相关方法得到大理岩的过程区长度为 1~2 mm，可以近似地认为其长度为一固定值。当预制裂纹为半径的 30%、40% 时 (S-1、S-2、S-3、S-4)，黄砂岩的过程区长度在 5.5~6.5 mm 范围内浮动，同样的可以近似地认为其长度是一固定值。长度在上述范围内的微小波动，一方面来源于岩石不均质性；另一方面来源于测量系统的系统误差。当预制裂纹达到半径的 50% 时，其过程区长度出现急剧增长，达到 9 mm 左右。

现通过中性轴的位置来分析上述现象产生的原因。如图 8 所示，在试样 M-1 过程区外分别设立 3 条长度为 8.8 mm 的取样线，取样线 B 的位置大约在中性轴位置，A 线位于 B 线下方 3 mm 处，C 线位于 B 线上方 3 mm 处，所有取样线均关于对称轴对称，以取样线与对称轴的交点作为原点建立局部坐标系 (X_2, Y_2) ，横坐标 X_2 为取样点至坐标原点的距离，竖轴为该点处的水平位移。从图 8 可以看出，A 线中部试样受拉，C 线中部试样受压，B 线上既不受拉也不受压。因此，B 线所在位置为试样的中

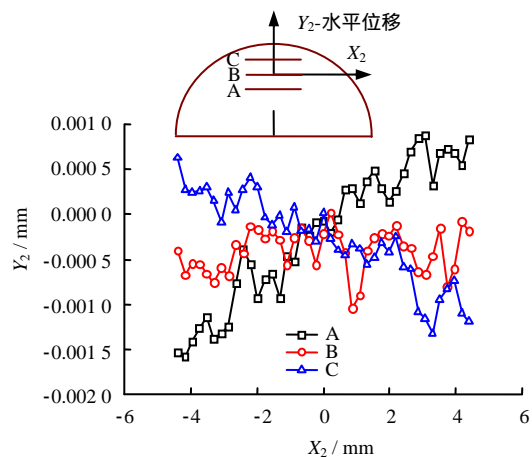


图 8 采样线上的水平位移分布

Fig.8 Horizontal displacement in the sample line

性轴,中性轴上部受压,下部受拉。中性轴的位置能够很好地反映试样的整体受力情况,现将各个试样的中性轴距试样弧顶处(上边界)的距离 h 进行测量,绘出曲线。

如图9所示,虽然,M-5、M-6试样与S-5、S-6试样的预制裂纹长度一致,但由于砂岩的刚度远小于大理岩,其在受压过程产生的挠曲远大于大理岩。因此,试样S-5,S-6的中性轴向上移动较大, h 值较小,约为6 mm,与过程区长度大致相同。此时,由于试样的中性轴离弧顶处较近,其过程区将受到边界效应的影响,进一步产生应力集中,塑性区域发生扩大,故此时测得的塑性区长度并不能够反映岩石断裂的本身属性,是二次应力集中的结果。综上所述,笔者认为,该黄砂岩的断裂过程区长度真实值为5.5~6.5 mm。

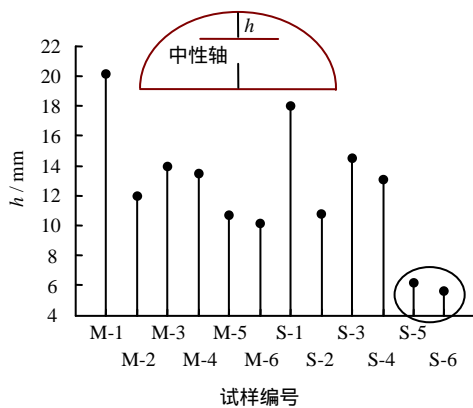


图9 试样的中性轴距离上边界的距离
Fig.9 Distance between neutral axis and upper boundary

3.2.3 临界裂纹张开位移

临界裂纹张开位移是另外一个重要的指标,通过COD位移计测量的张开位移为预制裂缝口处的平均张开位移,并不能反映岩石破坏时的局部特性。现通过峰值时得到的水平位移场来计算这一值。考虑到岩石实际产生的裂纹并不是数学意义上的裂纹,在距离过程区很近的位置(± 1 mm)设立两条取样线来研究岩石的裂缝口张开位移,取样线长度与过程区长度一致。以试样S-1为例,如图10所示,取样线之间的水平位移差值即为张开位移值,过程区底部(预制裂纹尖端处)张开位移即为临界张开位移。各个试样的临界张开位移如表3所示。从表中可以看出,大理岩的临界张开位移为0.01~0.02 mm,黄砂岩的临界张开位移为0.03~0.05 mm。黄砂岩的临界张开位移明显大于大理岩的临界张开位移,这个结果与通过COD位移测量计得到的趋势是相

一致的,如图5所示,峰值时黄砂岩COD的值均大于相同裂纹长度的大理岩。另一方面,不论是大理岩还是黄砂岩,其临界张开位移与裂纹长度之间并不存在依赖性,根据断裂力学相关理论可以将其看做岩石本身的一个属性,并作为弹塑性断裂准则来判断岩石是否起裂。

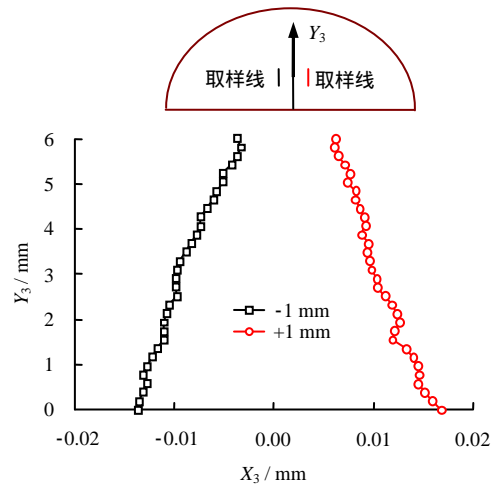


图10 试样S-1的张开位移
Fig.10 Opening displacement of specimen S-1

表3 试样的临界张开位移

Table 3 Critical opening displacement of specimens

岩石类型	编号	临界张开位移 / mm	岩石类型	编号	临界张开位移 / mm
	M-1	0.011		S-1	0.031
	M-2	0.013		S-2	0.053
大理岩	M-3	0.013	黄砂岩	S-3	0.035
	M-4	0.014		S-4	0.035
	M-5	0.019		S-5	0.042
	M-6	0.021		S-6	0.050

4 讨 论

试验结果表明,黄砂岩的过程区约5.5~6.5 mm,大理岩的断裂过程区约为1~2 mm。显然,黄砂岩的断裂过程区较大,大约是试样高度的1/8,已经远大于试样微观晶粒尺寸,因此,不宜采用等效裂纹长度的方法来研究其断裂过程,宜采用弹塑性断裂力学的方法进行研究,例如采用临界张开位移作为其断裂判据。另一方面,大理岩的断裂过程区长度虽远小于黄砂岩的断裂过程区长度,但是否能够直接采用等效裂纹长度的方法进行研究还有待进一步验证,需要结合岩石微观晶粒尺寸的测量进行确定。若过程区尺寸小于或近似于其微观晶粒尺寸,则可以采用等效裂纹长度的方法进行研究;否则,宜采用弹塑性断裂力学的方法进行研究。

5 结 论

(1) 不论是黄砂岩还是大理岩, 岩石的峰值强度随着预制裂纹的增加而减少。随着裂纹长度的增加, 岩石的刚度降低, 塑性流动增加。

(2) 峰值时, 水平位移场等高线的交汇点可以认为是岩石断过程区的尖端, 因为在交汇点以内水平方向的位移具有明显的不连续现象, 而交汇点以外水平方向的位移保持连续。

(3) 硬岩和较软岩的断裂过程区和裂纹临界张开位移差别较大, 例如大理岩的断裂过程区长度为 1 ~ 2 mm, 裂纹临界张开位移为 0.01 ~ 0.02 mm, 而黄砂岩的断裂过程区长度为 5.5 ~ 6.5 mm, 裂纹临界张开位移为 0.03 ~ 0.05 mm。试验结果为选择合适的理论研究岩石破裂过程提供依据。

(4) 由于断裂过程区较大, 较软岩的力学行为更易受边界条件的影响, 例如, 黄砂岩试样 S-5、S-6 塑性区长度发生突变, 可以认为是边界效应引起的。

参 考 文 献

- [1] CEDOLIN L, DEI POLI S, IORI I. Experimental determination of the fracture process zone in concrete[J]. **Cement and Concrete Research**, 1983, 13: 557 - 567.
- [2] LABUZ J, SHAH S, DOWDING C. Experimental analysis of crack propagation in granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(2): 85 - 98.
- [3] LABUZ J, SHAH S, DOWDING C. The fracture process zone in granite: evidence and effect[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1987, 24(4): 235 - 46.
- [4] NOLEN-HOEKSEMA R, GORDON R. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1987, 24(2): 135 - 144.
- [5] MAJI A, SHAH S. Process zone and acoustic-emission measurements in concrete[J]. **Experimental Mechanics**, 1988, 28: 27 - 33.
- [6] WANG CHENGYONG, LIU PEIDE, HU RONGSHENG, et al. Study of the fracture process zone in rock by laser speckle interferometry[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1990, 27(1): 65 - 69.
- [7] MOORE D, LOCKNER D. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite[J]. **Journal of Structural Geology**, 1995, 17: 95 - 114.
- [8] ZIETLOW W K, LABUZ J. Measurement of the intrinsic process zone in rock using acoustic emission[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35: 291 - 9.
- [9] OTSUKA K, DATE H. Fracture process zone in concrete tension specimen[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2000, 65: 111 - 131.
- [10] PATZÁK B, JIRÁSEK M. Process zone resolution by extended finite elements[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2003, 70: 957 - 77.
- [11] HAGGERTY M, LIN Q, LABUZ J. Observing deformation and fracture of rock with speckle patterns[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43: 417 - 26.
- [12] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 数字散斑相关方法测定岩石型应力强度因子[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(12): 2501 - 2507.
DAI Shu-hong, MA Sheng-li, PAN Yi-shan, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of rock utilizing digital speckle correlation method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(12): 2501 - 2507.
- [13] LIN Q, BIOLZI L, LABUZ J F. Opening and mixed-mode fracture initiation in a quasi-brittle material[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2012, 139: 177 - 187.
- [14] LIN Q, YUAN H, BIOLZI L, et al. Opening and mixed mode fracture processes in a quasi-brittle material via digital imaging[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2014, 131: 176 - 193.
- [15] 长江水利委员会长江科学院. GB50218 - 2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Chongjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. GB50218 - 2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.