

DOI: 10.11779/CJGE201707008

基于数字图像与数值计算的节理岩体锚固效应研究

种照辉¹, 李学华¹, 鲁竞争¹, 张骥², 梁顺¹

(1. 中国矿业大学矿业工程学院深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国工程物理研究院北京计算科学研究中心, 北京 100084)

摘要: 为了研究锚杆对裂隙岩体的加固作用, 通过自主研发的数字图像相关(DIC)试验技术和离散元(DEM)数值计算方法, 对预置裂隙岩体试样锚固前后进行测试。从细观层次量化分析了加载过程中两类岩体(未锚固和锚固岩体)裂隙的起裂、扩展等特征, 对比了数字图像测量的位移场, 应变场和裂隙张开度(COD)以及数值计算得到的裂隙发育数量, 区域分布和扩展方向。结果表明: 基于DIC测量软件, 可精确进行岩体非接触的无损测量, 并且能够监测出岩体锚固这种内部隐蔽的过程; 加固岩体的锚杆与裂隙交叉位置出现应变集中成核现象, 定量地说明了岩体加固对裂隙的抑制作用; 同时还得出岩体加固可以改变裂隙扩展类型和主裂隙发育方向。

关键词: 数字图像; 离散裂隙网络; 裂隙扩展; 应变场; 裂隙张开度

中图分类号: TD32 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1225-09

作者简介: 种照辉(1990-), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 从事矿山岩体力学等方面的工作。E-mail: chongzhaoxui2003@126.com。

Anchorage behaviour of specimens containing a single fissure based on digital image correlation and numerical method

CHONG Zhao-hui¹, LI Xue-hua¹, LU Jing-zheng¹, ZHANG Ji², LIANG Shun¹

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. China Academy of Engineering Physics, Beijing Computational Science Research Center, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the reinforcement effects of specimens containing a single fissure, a digital image correlation (DIC) method and a discrete element method (DEM) which can be written in house are employed to compare the results of unreinforced and reinforced specimens. The crack initiation and propagation in two types of specimens (unreinforced and reinforced specimens) are quantitatively analyzed at the mesoscopic level. The displacement fields, strain fields and crack open displacements (COD) obtained by DIC and the crack number, distribution and propagation orientation obtained by DEM are compared. The results show that the DIC method can be used to conduct non-contact nondestructive measurements of rock mass precisely and monitor the internal hidden process like anchorage behavior. The reinforcement effects of specimens are illustrated in quantity since the concentration of strain nucleation is acquired at the cross of rock bolt and pre-fissure. The reinforcement can change the type of cracks and the orientation of the main fracture.

Key words: digital image correlation; discrete fracture network; crack propagation; strain field; crack open displacement

0 引言

锚杆(索)作为最有效, 最经济的主动加固控制裂隙岩体方法, 应用十分普遍, 并且取得了良好的效益^[1], 但是锚杆(索)对节理岩体裂隙扩展的控制是一种较为隐蔽过程^[2], 并且岩石的破坏往往在内部开始起裂至逐步贯通, 多条裂隙联合导致岩石最终失效, 裂隙扩展会严重影响岩石的强度和稳定性, 因此, 研究锚固效应对裂隙岩体的控制作用具有重要的意义。

大量的物理试验和数值计算对不同几何尺寸的裂隙岩体进行了研究^[3-5], 较为典型的成果有: 文献[6]

通过单轴压缩试验总结出了不同种类裂隙岩体的破裂模式; 文献[7]得出多条裂隙与两条裂隙情况下岩石的破坏模式很相近; 文献[8]探究了张开裂隙和闭合裂隙岩体的应力, 峰值以及破坏类型等参数, 发现两种类型裂隙的结果几乎相同, 差异只与裂隙的几何尺寸有关。通过对以前成果的总结, 发现对岩体锚固如何控

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474208); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 国家建设高水平大学公派研究生项目(201606420013); 中国博士后科学基金项目(2015M581893)

收稿日期: 2016-04-11

制裂隙以及锚固前后的微观裂隙类型的研究很少。

最近几年发展起来的数字图像相关方法 (digital image correlation, DIC) 是一种新型测量方法, 与传统的应变仪等仪器相比, 该方法主要优点是可以进行试样不接触的无损检测, 并可以得到整个计算区域的位移和应变, 适应能力强^[9]。国内外已经有诸多学者应用此法进行了包括岩石的各类材料位移场和应变场的测试, 例如花岗岩^[10], 红砂岩^[11], 岩石相似材料^[12], 陶瓷^[13], 金属^[14], 环氧树脂胶^[15], 玻璃聚酯^[16]等。

本文基于类岩材料, 以 DIC 方法作为试验监测手段, 应用自主开发的数字图像相关处理软件^[17], 对两类岩体研究区域的位移场和应变场进行分析, 并对岩体加载过程中 COD 进行对比研究, 此外, 为了分析裂隙的类型和发育方向, 采用二次开发的离散裂隙网络 (DFN) 模块对两类岩体的裂隙扩展过程进行数值仿真, 结合物理试验, 对比分析未锚固岩体和锚固岩体的区别, 得到锚杆加固裂隙岩体的细观力学机制。

1 试验步骤

1.1 数字图像相关 (DIC) 方法

DIC 方法是记录图像加载过程中的信息来识别岩体表面位移以及应变的非接触测量方法, 根据文献^[18]最初理论方法, 针对正态分布 (针对散斑质量较差的情况) 和均匀分布 (针对散斑质量较好的情况) 两种情况给出具体的分析, 证明算法收敛的正确性和计算速度的合理性, 之后进行自主编程。该方法的基础是根据岩石材料表面的图像斑点, 识别需计算区域的特定子集^[19], 从而得出岩体的位移和应变。岩石材料加载前后的图像关系见图 1。

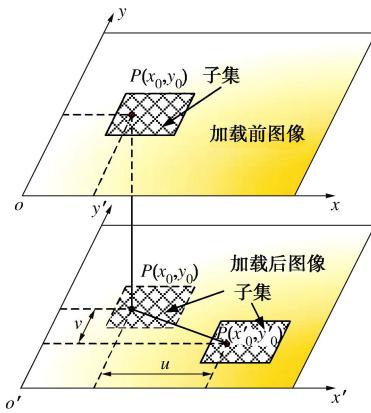


图 1 数字图像相关方法基本原理

Fig. 1 Principle of DIC method

假设点 P 在试样监测表面的子集中变形前后的函数分别为 $f_i(x, y)$ 和 $g_i(x', y')$, 变形量为 $d(u, v)$, 加载变形前后图像的关系为

$$g_i(x', y') = f_i(x, y) + d(u, v) \quad , \quad (1)$$

$$x' = x + u \quad , \quad (2)$$

$$y' = y + v \quad . \quad (3)$$

为了对比点 P 变形前后的相似度, 一般建立起图像的相关性系数, 通过相关系数最大值测量全局范围的位移和应变, 尽管该方法理论上可行, 但是存在着两个缺陷^[20]: ①位于岩石边界的点, 进行计算时, 一般都包括除岩石以外的背景像素点, 这样计算出的形变是错误的; ②对于岩体表面不连续的介质点, 通过数字图像相关方法计算出的形变存在着较大的误差。因此, 本文在进行区域选择时, 只选取岩石中关注的区域 (ROI, 如图 2)。

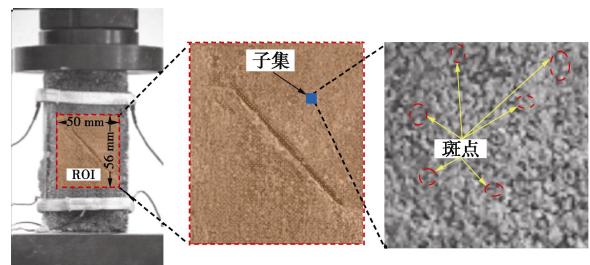


图 2 数字图像相关方法试样测量区域

Fig. 2 Measurement area of specimen by DIC

由于存在上述两个缺陷, 而且在数字图像相关方法实际应用中, 加载前后的图像亮度很有可能发生变化, 因此, 必须对加载前后的图像设定一个相关准则, 来调节各种亮度的变化^[19], 基于此考虑, 建立了零均值相关准则 (ZNCC), 零均值标准化方差准则 (ZNCCD) 和系数方差准则 (PSSD_{ab})。

零均值相关准则 (ZNCC) 的公式为

$$C_{\text{ZNCC}} = \frac{\sum \bar{f}_i(x, y) \cdot \bar{g}_i(x', y')}{\sqrt{\sum \bar{f}_i(x, y)^2 \cdot \sum \bar{g}_i(x', y')^2}} \quad , \quad (4)$$

式中, $\bar{f}_i = f_i - \bar{f}$, $\bar{g}_i = g_i - \bar{g}$, \bar{f} 为加载前图像的平均值函数, \bar{g} 为加载后图像的平均值函数。

能消除尺寸效应和修正亮度的零均值标准化方差准则 (ZNCCD) 的公式为

$$C_{\text{ZNCCD}} = \sum \left(\frac{\bar{f}_i(x, y)}{\sqrt{\sum \bar{f}_i(x, y)^2}} - \frac{\bar{g}_i(x', y')}{\sqrt{\sum \bar{g}_i(x', y')^2}} \right)^2.$$

衍生的系数方差准则 (PSSD_{ab}) 的公式为

$$C_{\text{PSSD}_{ab}} = \sum (af_i(x, y) + b - g_i(x', y'))^2,$$

式中, 目标子集的亮度变化系数 a 和强度变化抵消系数 b 根据标准规范确定^[20]。

本文中的数字图像相关方法使用迭代最小平方值 (ILS) 算法, 通过迭代方法计算 C_{ZNCC} 的峰值位置,

确定某一图像子集中的位移矢量变化。因此, 关注区域(ROI)的位移变化即可确定, 通过对位移微分即可求得ROI中的应变等参数。

1.2 试样制作及试验

(1) 试样制作

锚固节理岩体几何尺寸及主视图和左视图见图3, 本文采用的高强度河沙石膏的类岩石材料制作试件, 河沙: 石膏: 碳酸钙: 水=3.0: 1.0: 0.7: 0.43, 没有预置裂隙且不进行锚固的完整试样试验参数见表1。

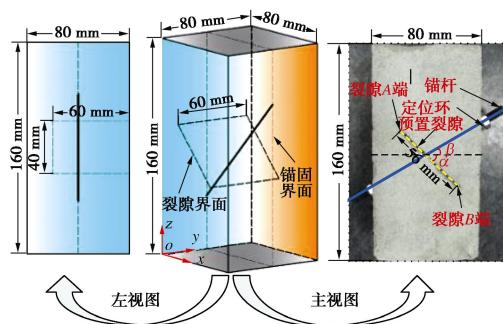


图3 试样尺寸图

Fig. 3 Sketches of specimen

表1 完整试样的试验参数

Table 1 Experimental parameters of intact specimen

试样尺寸 /mm×mm×mm	应力峰值 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
80×80×160	23.97	4.25	0.21~0.24

对于锚杆材料的选择, 一些研究者应用玻璃纤维棒(GFRP)和细铁丝作为支护材料。然而, 这些材料不具有抗剪作用, 为了使锚杆相似材料具有抗剪性能, 本文确定聚甲醛棒(POMB)作为锚杆材料, POMB的力学参数见表2。

表2 试验中聚甲醛棒力学参数

Table 2 Mechanical behaviour of POMB used in specimens

测量参数	测量数据
拉伸强度/MPa	50~60.8
剪切强度/MPa	35~48
杨氏模量/MPa	200~260
弯曲模量/MPa	170~210
延伸率/%	>24

为了研究锚杆材料对裂隙岩体的影响, 本试验设计的裂隙角 $\alpha=45^\circ$, 裂隙的长度和深度保持不变, 锚固分为无锚和锚固角 $\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 五种。具体尺寸及标注见图3。裂隙通过3 mm厚、120 mm长和56 mm宽的云母片在制作试样时提前预置。制作完成待晾干的试样见图4。待试样晾干后, 在试样表面进行喷涂黑白两种颜色散斑颗粒处理。

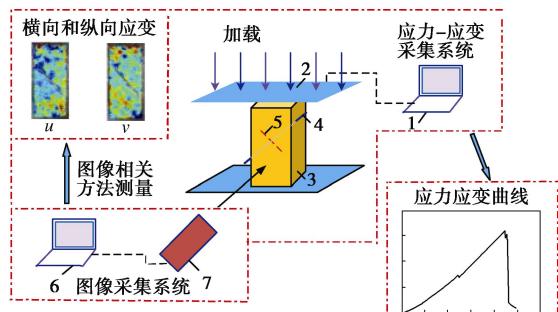


图4 试样制作完成待晾干图

Fig. 4 Airing process of physical specimens

(2) 试验过程

本试验采用的数字图像相关方法设备示意见图5, 试验设备由应力应变采集系统, 图像采集系统和软件分析系统组成。应力应变采集系统采用的是CMTS5305伺服试验机, 采用位移加载控制, 加载速率为0.2 mm/min; 图像采集系统采用高分辨率单反摄像机进行无间隔采集; 软件分析系统通过数字图像相关分析计算程序测试系统进行分析, 求得不同时期的位移场, 应变场以及应变增量等参数。



1、应力应变采集系统; 2、加载系统; 3、锚固试样; 4、锚杆; 5、锚固试样裂隙; 6、图像采集控制系统; 7、数字摄像机

图5 数字图像相关方法设备示意图

Fig. 5 Schematic diagram of equipment for DIC

1.3 裂隙张开度(COD)计算方法

通过DIC方法得到的岩体表面的位移场和应变场, 可以识别岩体表面裂隙的起裂和传播特征, 本文采用COD来定量揭示未锚固岩体和锚固岩体的裂隙演化规律。如图6所示, 以裂隙A端为原点, 建立直角坐标系, 在*i*=0 mm附近可以观测出, 裂隙左右出现跳跃, 致使出现严重的非连续位移, 称之为COD。

2 试验结果分析

本文以预置裂隙角为 45° 的未锚固试样和锚固角度为 45° 两种类岩体为例, 分别进行应变场的和裂

隙张开度分析。

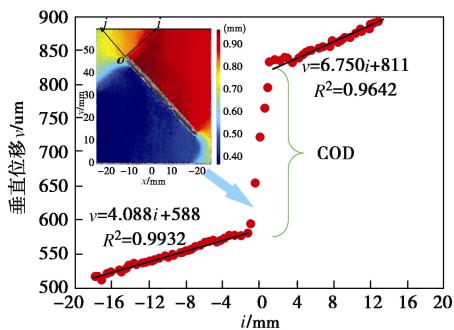


图 6 裂隙张开度计算图

Fig. 6 COD obtained by displacement fields

(1) 应变场分析

试验加载过程的应力 - 应变曲线见图 7, 根据试验中加载曲线的特点和试验全过程中采集的散斑图像, 分别在两种曲线上选取了 6 个典型时刻进行标记, 图 8,9 给出的不同时刻的未锚固和锚固裂隙岩体垂直应变场的演化图像。

为了准确的对比两种类型的岩体试样在加载过程中的裂隙的起裂、扩展和联合的演化过程, 将两种应力 - 应变曲线划分为 4 个阶段(见图 7 中 I, II, III 和 IV), 根据图 7~9 表明, 在加载第 I 阶段, 岩体是否锚固对应力应变 - 曲线几乎没有影响, 由于类岩体内初始的空洞裂隙在压力作用下闭合, 两种应力 - 应变曲线呈现凹函数的现象, $a-1$ 和 $b-1$ 的 ROI 应变图像没有出现集中现象, 应变几乎平均分布在两种岩体的整个图像中。

随着载荷继续增加, 进入第 II 阶段, 应变的集中现象基本出现在两种岩体的尖端位置(如图 8a-2 的 AA 区域和图 9b-2 的 BB 区域)。如果不通过数字图像相关方法进行计算, 仅通过图片则不能观察到裂隙的产生, 但是试件表面整体并没有出现明显的新生裂隙, 由此说明当载荷达到岩体应力峰值的 50% 左右时, 裂隙对应力 - 应变曲线的整体分布情况没有太大的影响。当载荷增加到 $a-3$ 和 $b-3$ 时, 应变场的局部发生很大变化, 应变增长率也迅速增加, 最大应变 AA 和 BB 处由最初的裂隙尖端迅速向边界传播, 同时, 岩体的另外一端(如图 9b-3 的 DD 区域)出现应变集中现象。在此阶段, 由于锚杆锚固在岩体内部, 通过直接观察并不能观测出锚杆的锚固效应, 但是通过数字图像相关方法则可以形象地展示。在锚固岩体与裂隙交叉的位置上部($b-2CC$ 区域), 锚杆为抑制裂隙的滑移, 出现了应变集中的成核现象, 产生了抵抗载荷的应变成核区域, 从而使得在同等条件下, 锚固岩体的应力大于未锚固岩体的峰值应力。

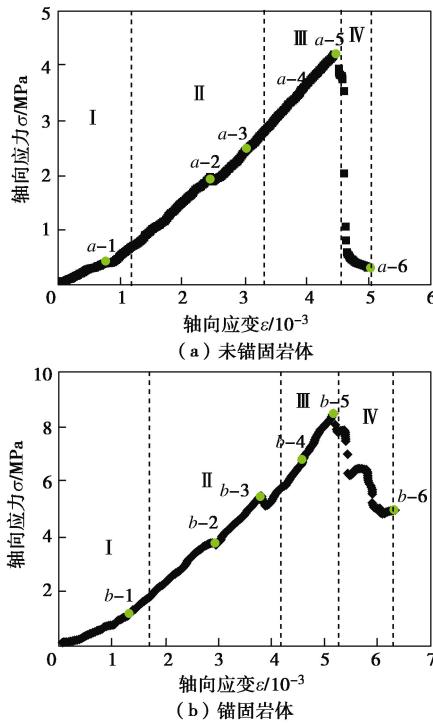


图 7 轴向应力 - 应变加载曲线

Fig. 7 Axial stress-strain curves

当裂隙发展到一定程度后(第 III 阶段), 已发育的裂隙传播速度较为缓慢, 说明岩体试样整体应力重新分布, 形成一定的有效抗力, 使得试样能够继续承载。但是在图 8a-4 的 EE 和 FF 区域, 出现了新的裂隙起裂点, 此时岩体内部储存应变能, 为下一步岩体试样损伤断裂储存能量。当到达两种岩体的应力峰值时(见图 8a-5 未锚固岩体 4.25 MPa、 $b-5$ 锚固岩体 8.52 MPa), 锚固岩体的承载能力远高于未锚固的岩体, 应变能不断释放。在锚固岩体中, 锚杆与裂隙交叉位置应变集中局部带成核现象扩展达到了峰值。

在第 IV 加载阶段, 随着载荷不断增加, 应变集中局部化带增加不明显(见图 8a-6 和图 9b-6)。此时, 无论岩体是否锚固, 既定的抗力均已无法继续承载, 所施加在岩体的载荷不断降低, 出现塑性软化阶段, 岩体试样在很短时间内, 出现整体性破坏, 载荷亦出现陡降的现象。

值得注意的是, 通过数字图像相关方法计算出的应变场, 不仅能观察到岩体裂隙的起裂、传播和联合的全过程, 更重要的是, 能将锚固岩体的抵抗裂隙滑移的应变成核现象形象地计算出来, 将岩体试样的锚固行为定量地呈现出来。

(2) 裂隙张开度 (COD) 分析

为了定量说明锚杆对岩体的作用, 根据 1.3 节设定的 COD 计算方法分别对两种岩体进行分析。见图 10, 坐标系的设定与图 6 中的情况一致, 横坐标为沿 y 轴方向与裂隙尖端的垂直距离, 纵坐标为图 7 中 6

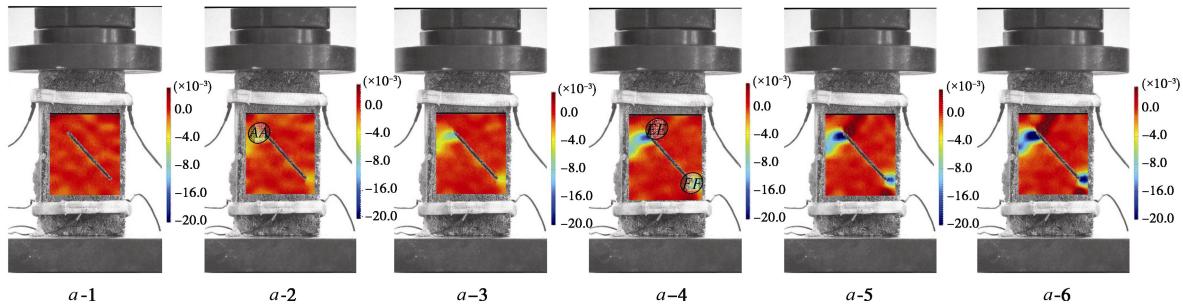


图8 未锚固裂隙岩体 ROI 垂直应变分布图

Fig. 8 Distribution of vertical strain fields in ROI of unreinforced specimens

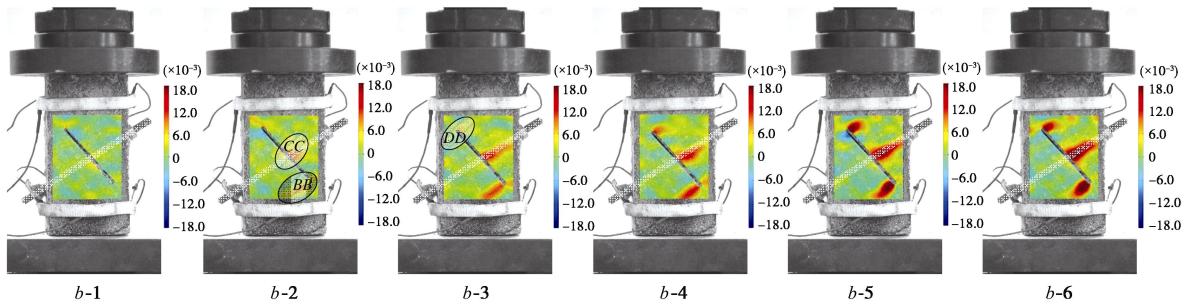


图9 锚固裂隙岩体 ROI 垂直应变分布图

Fig. 9 Distribution of vertical strain fields in ROI of reinforced specimens

个典型加载时刻的 COD。

无论岩体是否锚固, 岩体的 COD 在不同时刻都呈现出直线函数的变化, 所拟合的函数见图 10, 拟合度都在 98%以上。

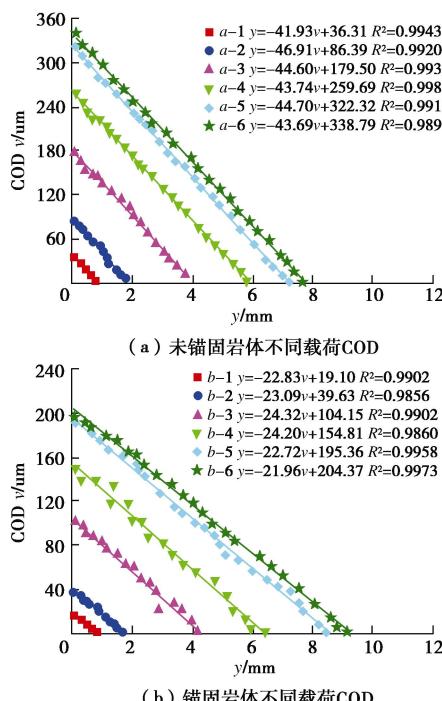


图10 两种岩体 COD 的计算结果

Fig. 10 Calculated results of COD of two specimens

当载荷达到应力峰值的 50%以前, 两种岩体的 COD 相差不大, 随着载荷继续增加, 锚固岩体在不同加载时刻远远大于未锚固岩体的斜率, 由此可以说明, 当载荷超过裂隙起裂的阈值时, 未锚固岩体裂隙开始起裂和传播; 在锚固岩体加载的开始阶段, 由于载荷较小, 岩体自身有一定承载能力, 锚杆未能发挥锚固作用, 当载荷达到裂隙起裂的阈值和传播的阈值时, 由于锚杆的锚固作用, 不但抑制了裂隙左右的岩体滑移, 同样有效减少了裂隙的起裂程度和传播速度, 提高了裂隙岩体的承载能力。在两种岩体应力峰值时刻, 锚固岩体的应力峰值提高 3~4 MPa 以上, 锚固岩体在裂隙尖端抑制 COD 达到 130 μm 以上, 在峰后阶段, 两种岩体都迅速失效, 失去了承载能力, COD 与峰值时刻相差较小。

3 数值计算

为了进一步判断锚固前后宏观和细观裂隙的种类, 本研究采用离散元软件 PFC 进行数值计算, 根据离散元拉破坏和剪破坏的准则^[21], 二次开发离散裂隙网络 (DFN) 程序, 实现拉破坏和剪破坏的判断, 并进行微观裂隙随时间步变化的计数、定位和方向的统计, 反映出裂纹扩展的状态。

3.1 建模与计算

为确认数值仿真和物理试验结果一致性, 本文采

用的数值计算几何尺寸为 ($W \times H = 80 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$)，预置裂隙的长度和角度均与物理试验相同。虽然在软件手册中给出了刚度、内聚力以及内摩擦角等参数的计算公式，但是目前还没有固定的理论来校正用于仿真的微观参数（例如：试样的峰值强度，弹性模量以及失效模式）。因此，为了确定本研究中模型的微观参数，通过建立试错法建立宏观力学行为和微观参数之间的关系，校正过程如下，首先根据表 1 进行完整试样的参数校正，其次根据裂隙试样进行裂隙参数试样的校正。校正后的微观参数见表 3、4，图 11 为数值计算示意图。

表 3 校正后完整试样的微观参数

Table 3 Micro-parameters used for intact specimen after calibration

微观参数	数值
颗粒的杨氏模量/GPa	3.52
平行黏结的杨氏模量/GPa	3.52
颗粒法向刚度与剪切刚度的比值	1.0
平行黏结法向刚度与剪切刚度的比值	1.0
摩擦系数	0.45
平行黏结半径乘数	1.0
平行黏结平均拉伸强度/MPa	15.2
平行黏结平均内聚力/MPa	10.5

表 4 校正后裂隙部分的微观参数

Table 4 Micro-parameters used for fissure after calibration

微观参数	数值
裂隙颗粒的摩擦系数	0.1
裂隙颗粒法向刚度/(N·m ⁻¹)	6.8×10^4
裂隙颗粒剪切刚度/(N·m ⁻¹)	3.2×10^4
裂隙颗粒法向黏结强度/MPa	0
裂隙颗粒切向黏结强度/MPa	0

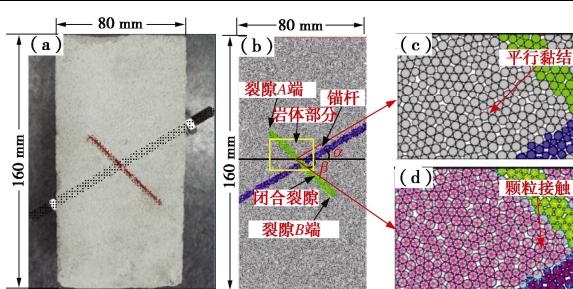


图 11 数值计算示意图

Fig. 11 Sketch of numerical model

颗粒之间采用的是平行黏结模型，由于这种模型的微观破裂会导致宏观参数（剪切模量和弹性模量等）的降低，在数值计算中，更类似于煤岩体的模拟。预置裂隙目前使用的方法分为张开裂隙和闭合裂隙^[8]，

本文采用的是闭合方式作为预置裂隙。

此外，为模拟单轴压缩过程，模拟上下边界各设置一个墙体，模型下边界保持固定不变，上边界的加载速率设定为 0.2 m/s，根据文献[22]证明，此加载速率对裂隙扩展几乎无影响。

3.2 数值计算分析

图 12、13 分别是两种岩体加载到峰后应力 35% 时裂隙发育的数目，由图 12、13 可知：①未锚固岩体的微观剪切裂隙数目远远大于拉伸裂隙，而锚固岩体的微观拉伸裂隙和剪切裂隙产生时间和数量相差不大；②未锚固岩体的裂隙产生时间远远早于锚固岩体，尤其是微观剪切裂隙，由此说明，未锚固岩体更易受到剪切破坏，且一直持续到整个岩体完全失效。

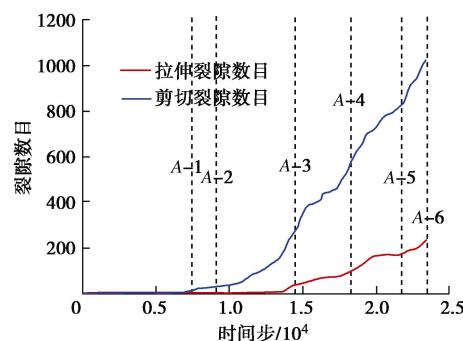


图 12 未锚固岩体不同种类裂隙数量

Fig. 12 Number of different cracks of unreinforced specimens

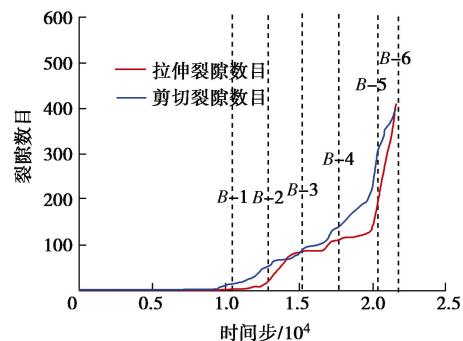


图 13 锚固岩体不同种类裂隙数量

Fig. 13 Number of different cracks of reinforced specimens

图 14、15 是试样在单轴压缩下的裂隙扩展过程，图中标识与图 12、13 中相对应，红色代表拉伸裂隙，蓝色代表剪切裂隙，绿色为预置裂隙，紫色为锚杆，由图 14 可知，未锚固岩体起裂时（应力峰值 57%，点 A-1）仅有剪切裂隙，随后裂隙向左右边界发展，直到达到峰值的 78%（点 A-3），拉伸裂隙才开始发育，随后裂隙继续向左右边界呈指数形式增加，完全失效时（点 A-6），试样整体呈现沿着裂隙滑移错动的剪切破坏。

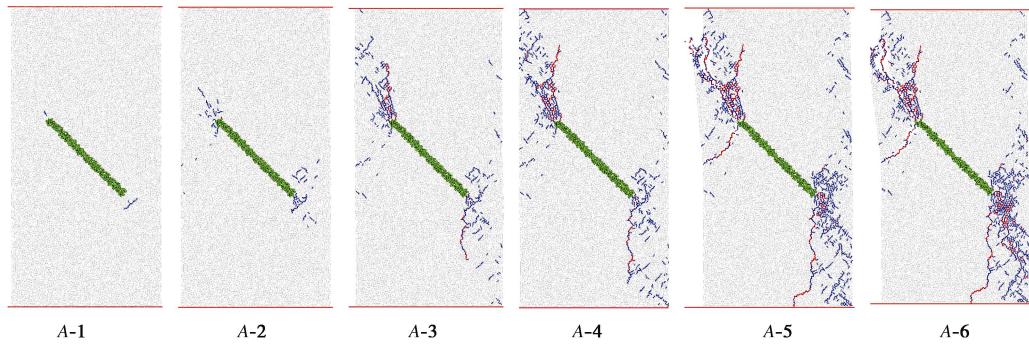


图 14 未锚固岩体裂纹扩展过程

Fig. 14 Crack propagation process of unreinforced specimens

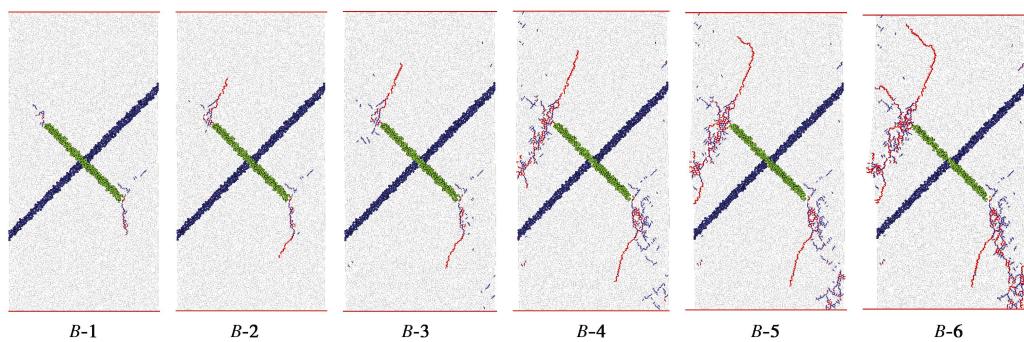


图 15 锚固岩体裂纹扩展过程

Fig. 15 Crack propagation process of reinforced specimens

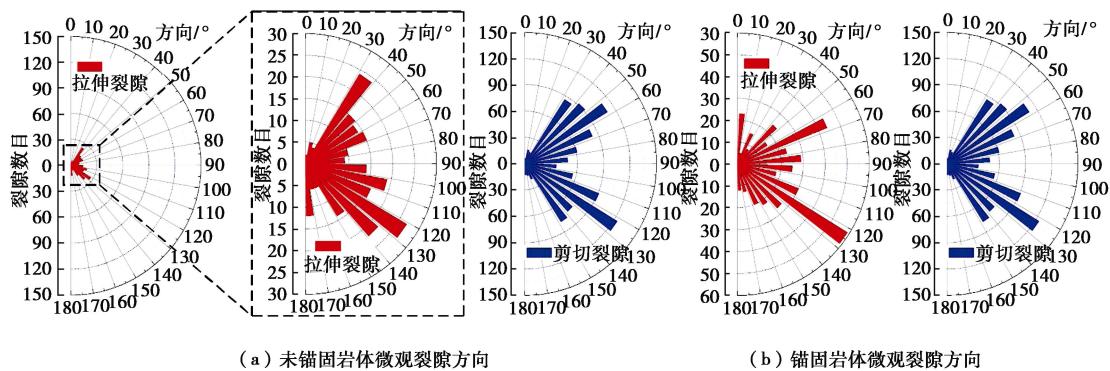


图 16 两种岩体微观裂隙方向

Fig. 16 Micro-crack orientation of two specimens

通过图 15 可知, 裂隙在起裂时(应力峰值 61%, 点 B-1)就同时存在拉伸和剪切两种裂隙, 随着载荷继续增加, 裂隙向上下边界发育, 在达到应力峰值的 84% 时(点 B-3), 预置裂隙上端形成另外一条以拉伸破坏为主的翼裂隙, 且向试样左侧发育, 完全失效时(点 B-5), 试样呈现以拉伸和剪切并存的混合破坏, 其中, 拉伸裂隙控制着主要裂纹的扩展方向, 剪切裂隙是在主要裂隙的基础上分支产生的。

图 16 是两种岩体在完全失效时, 微观裂隙的方向, 以图 3 中 x 轴正向为 0° 基准线, 由 16(a) 可知, 未锚固岩体的拉伸裂隙很少, 而且分布几乎相同, 各

个方向的拉伸裂隙数目局部超过 30, 而剪切裂隙的方向以 90° 为对称轴, 裂隙左右呈现对称形态, 尤其以 50° ~ 60°, 120° ~ 130° 裂隙最多, 与文献[23]中所计算的裂隙最发育时方向角一致。由 16(b) 可知, 锚固岩体的拉伸裂隙和剪切裂隙在数目和方向都大致相同, 而且也呈现对称分布。

4 结果对比讨论

本文以 45° 预置裂隙的类岩材料为例, 进行锚固前后的对比分析, 通过 DIC 方法处理和 DEM 计算, 从应力场, 应变场, 裂隙张开度, 裂隙扩展数目, 分

布区域和扩展方向进行了对比分析, 图 17, 18 中展示了不同方法测试裂隙岩体锚固前后的破坏形态图。

通过物理试验和数值计算的结果, 可以观测破坏形态基本一致。然而值得注意的一点, 就裂隙扩展的时间阶段而言, 通过物理试验 DIC 方法得到的裂隙起裂和迅速扩展(指数形式)的阈值比数值计算在一定程度上要小, 但是整体趋势以及应力峰值大致相同的, 数值计算对岩石力学特性真实仿真有待于进一步的修正和完善, 鉴于物理试验是基于 DIC 的精细测量, 相对而言比较真实可信, 可为后续的离散元数值计算的方法改进提供较好的参考。

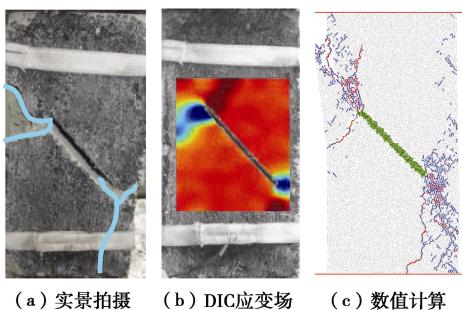


图 17 未锚固试样破坏形态对比分析

Fig. 17 Comparison of failure modes of unreinforced specimens

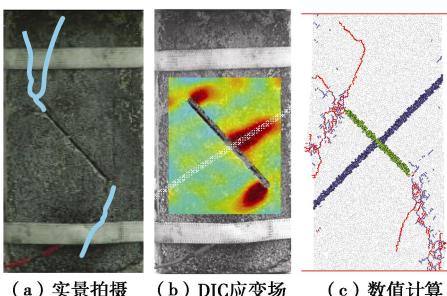


图 18 锚固试样破坏形态对比分析

Fig. 18 Comparison of failure modes of reinforced specimens

除此之外, 锚固角 α 变化对于裂隙岩体强度的提高也不尽相同, 在 $\alpha < 60^\circ$ 时, 强度提高较大。但锚固岩体均以剪混合破坏为主, 这是在所有锚固试样中所观察到的。

5 结 论

本文基于数字图像相关(DIC)方法和离散元数值计算(DEM)研究了含有预置裂隙岩体的锚固效应, 通过单轴压缩下, 对两种岩体应力场, 应变场, 裂隙张开度, 裂隙扩展数目, 分布区域和扩展方向的对比分析, 得出以下结论:

(1) 采用自主研发的基于 DIC 测量程序, 对试验过程中进行了非接触的无损监测, 可精确到微米级

对裂隙的起裂和扩展趋势进行观测, 更重要的是形象直观地展现了 DIC 方法对锚固这种内部隐蔽过程的监测。为今后类似于锚固这种隐蔽性质岩石力学试验的监测提供了良好的途径。

(2) 通过 DIC 方法监测的位移场和应变场, COD 等参数, 观测到锚固岩体的锚杆与裂隙角交叉位置出现应变集中成核现象, 说明了锚固不仅对裂隙岩体的应力有一定的提高, 而且还形象地展示了锚杆对裂隙的抑制作用。

(3) 对于预置裂隙为 45° 的试样, 通过数值计算分析了裂隙扩展类型, 发现未锚固岩体从剪切破坏为主过渡到锚固岩体拉剪混合破坏为主, 显示锚固行为可以改变裂隙破坏类型和主要裂隙的发育方向。

参 考 文 献:

- [1] 王金华. 我国煤巷锚杆支护技术的新发展[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 113 - 118. (WANG Jin-hua. New development of rock bolting technology for coal roadway in China[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 113 - 118. (in Chinese))
- [2] NEMCIK J, MA S, AZIZ N, et al. Numerical modelling of failure propagation in fully grouted rock bolts subjected to tensile load[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 293 - 300.
- [3] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 120 - 124. (LI Ying-ping, WANG Yuan-han, CHEN Long-zhu, et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 120 - 124. (in Chinese))
- [4] 梁正召, 李连崇, 唐世斌, 等. 岩石三维表面裂纹扩展机理数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1615 - 1622. (LIANG Zhen-zhao, LI Lian-chong, TANG Shi-bin, et al. 3D numerical simulation of growth of surface crack of rock specimens[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1615 - 1622. (in Chinese))
- [5] WANG C, XU J, ZHAO X, et al. Fractal characteristics and its application in electromagnetic radiation signals during fracturing of coal or rock[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 255 - 258.
- [6] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147 - 164.
- [7] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a

- rock-model material in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(2): 229 - 241.
- [8] PARK C H, BOBET A. Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, **77**(14): 2727 - 2748.
- [9] 李元海, 林志斌, 靖洪文, 等. 含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **34**(6): 1061 - 1068. (LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, JING Hong-wen, et al. High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **34**(6): 1061 - 1068. (in Chinese))
- [10] MA S, ZHAO Y. Geo-DSCM system and its application to deformation measurement of rock mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(3): 411 - 412.
- [11] 朱珍德, 张勇, 陈卫忠. 应用数字图像分析法评价红砂岩渐进损伤破坏特性[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 203 - 208. (ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, CHEN Wei-zhong. Analysis of gradual damage breakage properties of red sandstone with digital image technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 203 - 208. (in Chinese))
- [12] ZHAO C, MATSUDA H, MORITA C, et al. Study on failure characteristic of rock-like materials with an open hole under uniaxial compression[J]. Strain, 2011, **47**(5): 405 - 413.
- [13] HUANG J Y, LU L, FAN D, et al. Heterogeneity in deformation of granular ceramics under dynamic loading[J]. Scripta Materialia, 2016, **111**: 114 - 118.
- [14] SCRIVENS W A, LUO Y, SUTTON M A, et al. Development of patterns for digital image correlation measurements at reduced length scales[J]. Experimental Mechanics, 2007, **47**(1): 63 - 77.
- [15] WANG H, XIE H, WU L, et al. Study on the effect of DIC deformation sensor on mechanical property of substrate[J]. Measurement, 2014, **49**: 283 - 288.
- [16] SCALICI T, FIORE V, ORLANDO G, et al. A DIC-based study of flexural behaviour of roving/mat/roving pultruded composites[J]. Composite Structures, 2015, **131**: 82 - 89.
- [17] 种照辉, 李学华, 姚强岭, 等. 基于图像识别和声发射定位锚固岩体裂隙扩展的分析方法:中国, CN201510409666.7[P]. 2015-10-07. (CHONG Zhao-hui, LI Xue-hua, YAO Qiang-ling, et al. An new method for fracture propagation of reinforced rock mass based on digital image correlation and acoustic emission. China, CN201510409666.7[P]. 2015-10-07. (in Chinese))
- [18] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, **14**(11): 1270.
- [19] PAN B, XIE H, WANG Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. Optics Express, 2008, **16**(10): 7037 - 7048.
- [20] PAN B. Recent progress in digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2011, **51**(7): 1223 - 1235.
- [21] GAO F Q, STEAD D. The application of a modified Voronoi logic to brittle fracture modelling at the laboratory and field scale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **68**: 1 - 14.
- [22] ZHANG X P, WONG L N Y. Choosing a proper loading rate for bonded-particle model of intact rock[J]. International Journal of Fracture, 2014, **189**(2): 163 - 179.
- [23] CHONG W L, HAQUE A, GAMAGE R P, et al. Modelling of intact and jointed mudstone samples under uniaxial and triaxial compression[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, **6**(5): 1639 - 1646.