

DOI: 10.11779/CJGE201505022

数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究

赵 程^{1, 2}, 鲍 冲¹, 松田 浩³, 赵春风^{1, 2}, 田加深¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点试验室, 上海 200092;
3. 长崎大学构造工学研究科, 日本 长崎 852-8521)

摘要: 含倾斜裂纹的岩石在单轴压缩下, 会发生翼裂纹扩展并逐步损伤破坏。对含预制裂纹的类岩石脆性试件进行单轴压缩试验, 采用两台高分辨率相机连续捕捉图像, 经过数字图像相关技术(DIC)处理, 得到了试件的全局应变场演化过程图, 试验结果表明: 当荷载达到一定阶段, 裂纹端部观察到了明显的微破裂区, 其形状为绕裂纹尖端逆时针转动 82° 的椭圆; 荷载增大到最大荷载的 85.6%时, 微破裂聚集成核, 端部开始形成宏观翼裂纹, 裂纹的扩展过程就是高应变区不断蔓延的过程, 也是微破裂不断发育、成核的过程; 次生微破裂区以及反翼微破裂区发育缓慢, 且形成过程中也受到了拉伸应力作用, 翼裂纹是试件的主要破坏模式。最后基于线弹性断裂力学, 比较了裂纹尖端周围应力和应变的变化规律, 给出了采用应变方法分析裂纹起裂扩展的理论依据, 并且验证了 DIC 系统试验结果的可靠性。

关键词: 岩石; 裂纹; 数字图像相关技术; 单轴压缩; 扩展; 应变场

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0944-08

作者简介: 赵 程 (1982-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zhaocheng@tongji.edu.cn。

Application of digital image correlation method in experimental research on crack propagation of brittle rock

ZHAO Cheng^{1,2}, BAO Chong¹, Matsuda Hiroshi³, ZHAO Chun-feng^{1,2}, TIAN Jia-shen¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Structural Engineering, Nagasaki University, Nagasaki, 852-8521 Japan)

Abstract: Under uniaxial compression, wing crack initiates and propagates in the flawed rock, and the damage evolves. The uniaxial compression tests are carried out on rock-like brittle specimens, each containing a single flaw. Two high-resolution camera are used to capture images to get the global strain fields of the specimens using digital image correlation (DIC) technology. Micro-crack zone is observed obviously at the flaw tip, whose shape is an ellipse with an inclination of 82° with flaw. When the load increases to 85.6% of the maximum load, the micro-crack nucleates, and the macro wing crack initiates at the flaw tip. The cracking propagation is a process of micro-crack development and nucleation, as well as a process of high-strain area spreading. The development of the secondary micro-crack zone and the anti-wing micro-crack zone is very slow. Meanwhile, they are affected by the tensile stress. Therefore, the wing crack is the main crack pattern. Furthermore, the change of stress and strain around the tip is compared based on LEFM. It proves more effective to use the strain approach to investigate crack initiation and propagation. And the reliability of DIC system is verified through theoretical analysis.

Key words: rock; crack; digital image correlation; uniaxial compression; propagation; strain field

0 引言

岩石是一种非常重要的土木工程材料, 但由于其结构的特殊性, 在风化演变过程及人为作用下, 在其内部或表面会产生大量的裂纹和缺陷, 而岩石的破坏往往是内部这些裂纹缺陷逐步发展贯通, 最后导致岩石断裂破坏的损伤演化过程。岩石内部裂纹的发展变化会严重影响岩石的强度和稳定性。因此, 岩石裂纹扩展机理的研究具有重要的理论价值和实践意义。

20 世纪初人们便开始了对脆性材料裂纹扩展的研究, Griffith^[1]从能量平衡的原理出发, 建立了 Griffith 强度理论, 并一举奠定了断裂力学的基石, Orowan^[2]于 1949 年考虑塑性变形对 Griffith 强度理论进行了修正和发展。此后 Clintock^[3]、Fairburst 等^[4]、Hoek 等^[5]、

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202193); 教育部博士点基金项目 (20110072120011)

收稿日期: 2014-08-30

Brace 等^[6]也从理论和试验方面对岩石裂纹扩展进行了研究, 但由于研究条件的限制, 对于岩石裂纹扩展机理的研究一直进展缓慢。近年来, 随着试验手段特别是对裂纹扩展测试手段的改进, 人们对于岩石裂纹扩展机理的研究逐渐转变到从细观甚至微观方面去探究裂纹的发展变化过程。Nolen-Hoeksema 等^[7]采用光学显微镜对受压大理岩斜裂纹尖端的扩展破坏模式进行了观测, 发现了裂纹的扩展是非对称性的, 并指出穿透裂纹在试件表面的扩展能够很好地反映试件内部的状况。Wong^[8]、黄明利等^[9]、吴立新等^[10]、倪晓慧等^[11]采用 SEM 技术(扫描电子显微镜技术)对岩石材料在压缩作用下裂纹扩展变形规律进行了研究, 得到许多重要的研究成果。葛修润等^[12-14]、李术才等^[15]采用目前较为先进的 CT 实时扫描技术, 对岩石裂纹扩展规律进行了大量试验研究, 对岩石裂纹扩展演化过程进行了详细的描述。刘冬梅等^[16]采用实时全息干涉法、高分辨率数字摄像机与计算机图像处理系统相链接的三位一体化测量系统, 对单轴受压砂岩、花岗岩和压剪受荷砂岩试样裂纹扩展与变形破坏过程进行了连续动态观测, 对岩石损伤演化过程进行了详细的描述。另外刘东燕等^[17]、李庶林等^[18]在刚性试验机上, 对单轴受压岩石破坏全过程进行声发射试验, 得到了岩石裂纹扩展的声发射特征, 从而揭示了含裂纹岩石破坏机理。虽然前人在岩石裂隙扩展变化方面做了大量的工作, 但仅仅是定性地去描述岩石裂纹的发展变化规律, 没有能定量地去进行更深入的研究, 不能全面地掌握岩石的损伤变化规律。

本文基于前人研究的基础上, 采用一种具有自主开发知识产权的测试技术 DIC 方法(digital image correlation)对含有预制裂纹的类岩石脆性材料在单轴压缩作用下的裂纹扩展过程进行了宏细观多尺度研究, 并结合相关测试图像, 得到了较为清晰的材料裂纹破裂以及损伤演化路径, 对研究脆性材料的损伤演化提供了有效技术手段。

1 试验研究

1.1 数字图像相关方法及分析软件开发

数字图像相关方法(DIC)又称数字散斑相关方法, 是一种利用物体表面随机分布的斑点来给出变形场的非接触变形测量方法。该方法最初是在 20 世纪 80 年代初由日本学者 Yamaguchi^[19]和美国学者 Ranson 等^[20]同时独立提出的。方钦志等^[21]、芮嘉白等^[22]、王冬梅等^[23]指出, 数字图像相关分析方法的基本思想是比较变形前后的物体图像, 识别其中的特定子区, 进而获得物体的变形和应变。为了量化表征特定子区,

假设物体变形前后两个数字图像的灰度特征值函数分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$, 它能够定量表征图像上任一点的明暗程度。又设物体位移场函数为 $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$, 则图像上任一点变形前的坐标 (x, y) 与变形后坐标 (x', y') 的关系为

$$\begin{cases} x' = x + u(x, y), \\ y' = y + v(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

为了评价变形前与后两个图像子区的相似程度, 可将变形前后的数字图像根据坐标定义为两个二维样本空间, 由统计学原理可知, 同样大小的两个子区关于灰度值的相关系数 C 为

$$C = \frac{\sum [f_1(x, y) - f_{1m}] \cdot [f_2(x', y') - f_{2m}]}{\sqrt{\sum [f_1(x, y) - f_{1m}]^2} \sqrt{\sum [f_2(x', y') - f_{2m}]^2}}. \quad (2)$$

式中 $f_1(x, y)$ 与 $f_2(x, y)$ 分别为变形前后图像子区的灰度分布函数; f_{1m} 与 f_{2m} 分别为变形前后图像子区的灰度平均值。当 $C=1$ 时, 两个子区完全相关; $C=0$ 时, 两个子区不相关。对变形前图像子区内的各点取不同的位移 u' , v' 进行相关匹配试算。一般情况下当 C 取最大值时, 所算子区即为目标子区, 试算位移即为真实位移。通过试算不同子区, 便可以获得物体全局位移场。根据全局位移场就可以通过柯西方程来计算全局应变场。这就是数字图像技术获得物体位移场和应变场的基本原理。

一些学者将数字图像技术应用到了岩石裂纹扩展研究当中, 但纵观其成果, 可以发现其试验精度及试验效果并不是十分理想, 尤其是在出现裂纹等非连续变形时尤为明显, 表现为未能精确定量描述裂纹周围高应变场变化趋势, 未能将造成测量误差的镜头畸变、非平面变形等因素剔除。因此本文采用了自主开发的

“基于 DIC 技术全局应变光学非接触动态量测分析软件 v1.30”对试验图像结果进行分析, 该软件不仅提高相应试验分析的精度, 而且后处理功能实现了分析结果的可视化。

本软件编程时, 如图 1 所示, 先在变形前图像中以待测点 O 为中心取一图像子区, 一般可取 $(10 \sim 40) \times (10 \sim 40)$ 像素区域, 定义灰度函数以及相关函数, 通过对平面灰度矩阵进行插值, 运用改进的牛顿-拉普斯迭代, 算出选定子区的亚像素位移, 将测量精度提高到亚像素级别。然后从已知点周围选取子区, 利用连续性提高相关匹配运算效率, 从而就可以得到整个测量区域的位移场。

此外, 为了提高测量精度该软件做了以下创新与优化。为了防止计算出多个目标子区, 程序可以自动扩大子区区域, 比较扩大后区域的匹配性, 从而获得最优解。考虑到噪声点的存在, 在计算变形时, 对位

移场进行了平面或者曲面拟合。为消除测试镜头的光学畸变, 先用测试镜头拍摄等距网格, 然后通过软件计算出了矫正参数。考虑到岩石受压时会出现体积膨胀及平面外弯曲, 为防止上述现象产生的面外位移对面内位移的计算精度产生影响, 本软件运用三维数字图像技术代替传统的二维数字图像技术。通过两台高分辨率数码相机的共同记录, 试件的三维变形一目了然。而在试验结果分析阶段, 只取试件平面内部分用于研究岩石裂纹扩展状态。所开发的数字图像测试分析软件, 包括位移分析模块、应变分析模块和应变、位移叠加模块, 能根据不同时刻采集到的变形图像可以分别计算出位移场、增量位移场、应变场和应变的变化率。

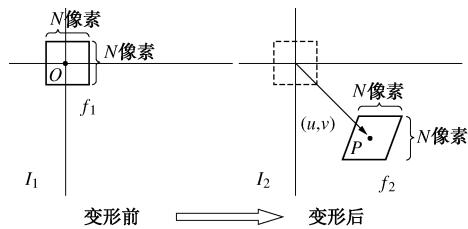


图 1 相关匹配示意图

Fig. 1 Sketch of correlation match

1.2 试验材料及试验过程介绍

(1) 试验材料

试验采用的材料是一种高强度速凝石膏, 石膏、水和缓凝剂的配比采用 $1:0.2:0.005$ 。此种材料具有强度高, 拉压比大的优点, 其参数为: 标准圆柱体试样抗压强度 s_c 为 47.4 MPa, 抗拉强度 s_t 为 2.5 MPa, E_s 为 28700 MPa, ν 为 0.23, 其与岩石的物理力学性质十分接近, 且能与前人试验结果进行比较。试验试样尺寸为 $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 受试验手段制约, 采用试件表面裂纹的精细化量测来表征内部裂纹的扩展形态, 因此试件厚度不能太厚, 否则裂纹在试件内部将三维扩展, 表面裂纹扩展模式将不具有代表性。另一方面试件又不能太薄, 否则会引起平面外弯曲, 产生试验误差。因此在综合考虑上述因素的情况下, 做了大量试验, 根据预备试验的破坏形态最终选取试样厚度为 10 mm。这个厚度既能保证二维裂纹状态又不至于产生较大弯曲和面外变形, 而长宽分别定为 $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。试件成型前, 在中部固定光滑铝片以预制张开型裂纹。裂纹位置居中, 以减少边界效应的影响。待试件制作成型后, 经洗净会在其表面先喷涂白色涂料, 待其干透后再随机喷涂黑色涂料, 以形成随机的散斑。喷洒的过程要尽可能均匀, 且黑白颗粒等量随机, 这样在图像处理中才能产生很好的识别效果。

(2) 试验设备及过程

试验设备(图 2), 分为加载系统、观测系统和分析系统。加载系统采用伺服控制的 300 kN 万能材料试验机, 为了降低边界条件的影响, 加载前在试件上下表面涂抹适量黄油并嵌入加载板。试验采用位移控制, 以 0.02 mm/s 的加载速率进行单轴压缩。观测系统包含两盏 LED 灯和两套拍摄装置。LED 灯为试验提供了稳定的光源, 以配合拍摄装置来捕捉加载过程中的实时图像。拍摄系统分为两套, 能分别从宏观角度捕捉物体的变化形态。试件与相机的相对位置关系见图 3。相机的快门速度为 $1/1000 \text{ s}$, 拍摄频率为 60 张/ s , 能够有效捕捉开裂瞬间。分析系统采用的是自主开发的分析软件。由拍摄系统获得的加载全过程的数字图像传入计算机的分析系统进行处理便可以得到全局位移应变场演化过程图。

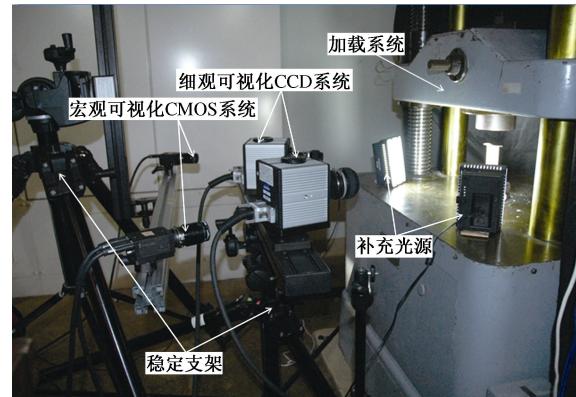


图 2 3-D 数字图像相关方法试验设备

Fig. 2 Test equipment of 3-D DIC system

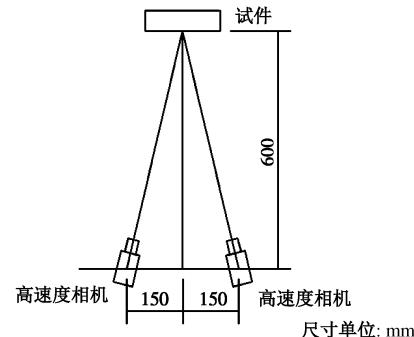


图 3 试件与相机相对位置示意图

Fig. 3 Relative positions between cameras and specimen

2 试验结果分析

试验所用的试件及预设裂纹尺寸如图 4 所示。单裂纹试件共有 5 组, 预制裂纹倾角分别为 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 运用数字图像相关方法对整个试验过程的全局应变场演化进行量化分析。图 5 给出了不同裂纹倾角试样破坏时的主应变云图, 可以看出裂纹周围均形成了高应变区, 高应变区最终贯通了整个试样, 且贯通形式基本相同, 为翼裂纹破坏形式。

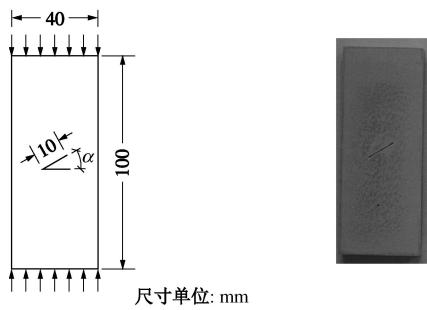


图 4 试件及裂纹尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of specimen and crack size

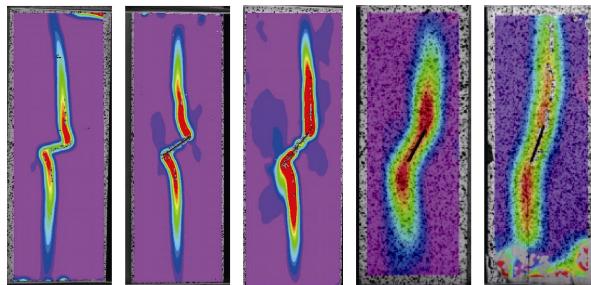


图 5 不同裂纹倾角试样破坏时主应变云图

Fig. 5 Cloud diagrams of different pre-crack inclination specimens

选取其中具有代表性的 30° 裂纹倾角试件进行分析, 以研究单裂纹扩展过程中的共性。图 6 给出了 30° 裂纹倾角试件裂纹扩展过程中具有标志性的 4 个主应变云图状态。试件加载过程的应力应变曲线如图 7 所示, a , b , c , d 四点分别对应图 6 中的 4 个主应变云图。其中 a 点对应加载过程中应力集中状态, b 点对应裂纹起裂状态, c 点对应裂纹扩展状态, d 点对应裂纹贯通、试件破坏状态。结合主应变云图和应力应变曲线, 从 4 个阶段对试验结果进行分析。

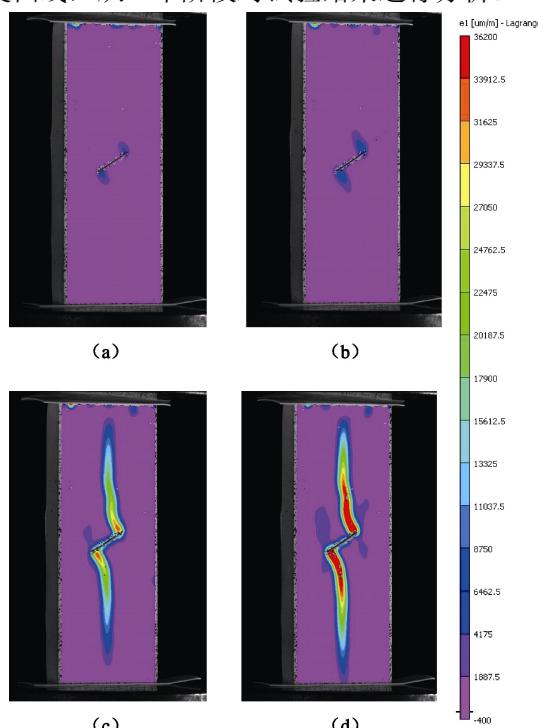


图 6 裂纹发展过程主应变云图

Fig. 6 Cloud diagram of principal strain during crack growth

(1) 在进行压缩试验之前, 试件及初始裂纹周围没有任何初始应力应变。试验刚开始, 应力应变曲线较平缓, 此时试件端部的不平整在荷载作用下逐渐压密。此后应力应变基本成线性关系, 试件处于弹性压缩阶段。随着施加荷载逐渐增大, 由状态 (a) 云图可以看出初始裂纹两个端部首先出现高应变区域并逐渐贯通整个初始裂纹区域, 这说明了应力首先集中于裂纹尖端。由于所用材料为脆性, 且拉伸强度仅为 2.5 MPa, 采用第二强度理论即最大伸长线应变理论, 可求得临界线应变 $\varepsilon_{lim} = \sigma / E = 87 \times 10^{-6}$ 。而云图中应力集中区域的拉伸主应变值为 1887.5×10^{-6} , 超过了临界线应变, 认为该区域形成了微破裂, 即部分点已经破碎形成微小裂纹, 但微裂纹的范围及密度不大, 尚未成核导致宏观裂纹。因此此时只能观察到微破裂区, 但试件尚未开裂。微破裂区的形状为椭圆形, 其长轴与裂纹端部相连, 与初始裂纹夹角约为 82° 。

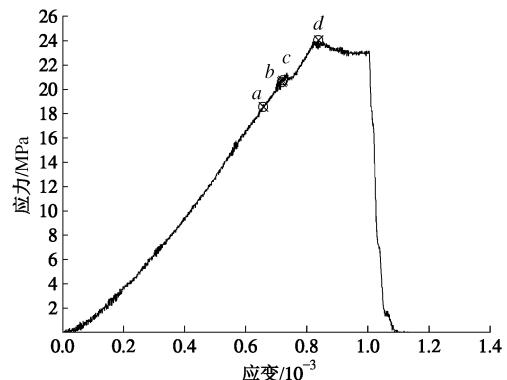


图 7 加载过程应力应变曲线

Fig. 7 Loading stress-strain curve

(2) 随着荷载继续增加, b 状态与 a 相比, 微破裂区逐渐增大, 且裂纹尖端出现更高的拉伸应变区域, 其值为 4175×10^{-6} , 这说明微破裂区不仅范围在增大, 且微裂纹密度也在趋于饱和, 处于起裂临界状态。此时应力约为最大破坏应力的 85.6%, 应力应变曲线中出现了类似屈服台阶的短暂波动。

(3) c 状态裂纹两端已发生了明显翼裂纹扩展, 但它与 b 状态仅间隔 0.1 s, 这说明新生裂纹扩展速度很快, b 状态可认为是起裂状态。翼裂纹属于拉伸裂纹, 一旦开裂后会互相偏离, 形成较大的裂缝, 因此在 c 状态云图中高应变区域中部的应变值特别大, 可达 29337.5×10^{-6} 。微破裂区在新生裂纹尖端继续发育, 虽然初始裂纹和新生裂纹周围也会产生高应变, 但是量值很小, 裂纹进一步扩展决定于微破裂范围与密度最大的位置即新生裂纹尖端。观察微破裂区的扩展路径发现它逐渐弯曲, 并不断向最大压应力方向靠近。此时裂纹还处于稳定扩展阶段, 也就是说试件停止加

载, 裂纹也停止延伸, 故 c 点以后应力应变关系还是呈现上升趋势。

(4) 随着荷载的继续增大, 微破裂范围和密度继续增加, 翼裂纹逐渐往试件上下两端呈近似直线发展, 方向与加载方向一致。达到状态 d 时裂纹出现非稳定扩展, 翼裂纹最终贯通整个试件。此时压应力达到峰值, 应力应变曲线出现拐点并迅速下落, 试件产生宏观破坏, 试验至此结束。观察主应变云图可以看出, 预制裂纹尖端出现了不同于翼裂纹的微破裂区, 图 8 给出了其对应的剪应变云图, 结合两者可认为在与翼裂纹相反方向及比翼裂纹扩展角度小的方向出现的高主应变区是次生微破裂区及反翼微破裂区。次生裂纹和反翼裂纹都是由于裂纹尖端聚集的剪应力起裂的, 但由主应变云图中高主应变区域可以看出它们在起裂前也受到拉伸应力的作用。从总体上来说, 剪力在整个扩展过程中影响很小, 单轴压缩下裂纹的扩展过程主要是翼裂纹扩展模式, 这与前人研究相一致。为比较数字图像分析技术与宏观裂纹开展情况的吻合性, 图 9 (a) 给出了试件最终破坏形态, 图 9 (b) 给出了裂纹的宏观扩展曲线及其与主应变云图的叠加图, 两者契合度较高, 这有效证明了数字图像分析系统的精确性以及最大拉应变强度理论的适用性。

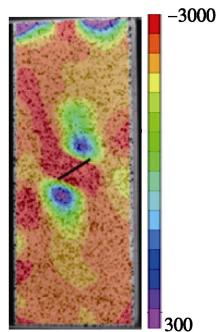


图 8 d 状态对应的试件剪应变云图

Fig. 8 Cloud diagram of shearing strain corresponding to d

从上述分析可以看出, 裂纹起裂、扩展、贯通过程与细观主应变场和切应变场演化过程具有很好的一致性, 裂纹的发展过程是高应变区不断蔓延的过程, 也是微破裂不断出现、发育以及集中成核形成宏观裂纹的过程。

3 理论分析

由于岩石材料的脆性特征, 众多学者应用线弹性断裂力学, 对受压岩石的破裂特性进行分析, 取得了较多成果。其中王水林等^[24]根据线弹性断裂力学, 计算应力强度因子, 用数值流形方法模拟了裂纹的扩展

过程。目前脆性断裂理论可分为两类: 应力参数法和能量观点法^[25], 两者的判定条件可以相互转化。本文采用由应力参数法过渡而来的应变方法, 分析模型如图 10 (a) 所示, 裂纹尖端坐标系放大图如图 10 (b) 所示。初始裂纹为端部宽度无穷小的 Griffith 裂纹, 且为张开型斜裂纹, 单轴压缩下可不考虑初始裂纹面的摩擦作用, 为 I 、 II 型复合裂纹。根据线弹性断裂力学, 裂纹尖端附近的应力场为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right], \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]. \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_x 为 x 方向的正应力; σ_y 为 y 方向的正应力; τ_{xy} 为切应力; r 为研究点 P 距尖端距离; θ 为 OP 与 x 轴正方向夹角, 各变量正方向如图 10 (b) 所示, K_I, K_{II} 分别为 I, II 型裂纹尖端附近的应力强度因子。

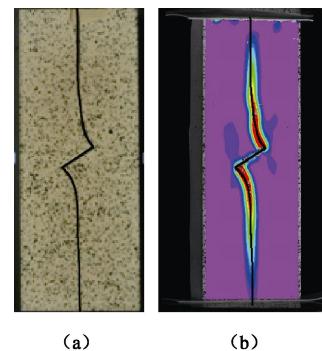


图 9 宏观裂纹形态与主应变云图

Fig. 9 Shape of macro crack and diagram of principal strain

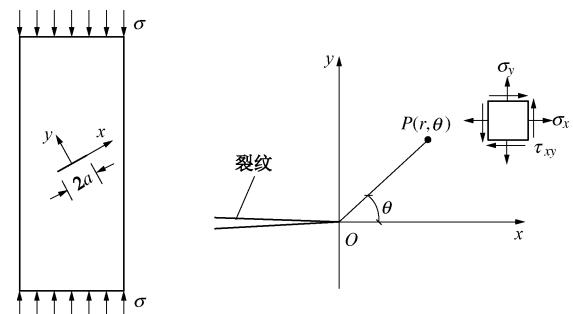


图 10 理论分析模型

Fig. 10 Theoretical analysis model

忽略边界效应影响, 其应力强度因子为

$$\begin{cases} K_I = -\sigma \sqrt{\pi a} \cos^2 \alpha, \\ K_{II} = -\sigma \sqrt{\pi a} \sin \alpha \cos \alpha, \end{cases} \quad (4)$$

则裂纹尖端附近的最大主应力场、最大切应力场为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{\sqrt{0.25K_1^2 \sin^2 \theta + 0.5K_1 K_{II} \sin 2\theta - 0.75K_{II}^2 \sin^2 \theta + K_{II}^2}}{\sqrt{2\pi r}} + \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left(K_1 \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right), \\ \tau_{max} = \frac{\sqrt{0.25K_1^2 \sin^2 \theta + 0.5K_1 K_{II} \sin 2\theta - 0.75K_{II}^2 \sin^2 \theta + K_{II}^2}}{G\sqrt{2\pi r}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

结合胡克定律, 裂纹尖端附近任意点 $P(r, \theta)$ 的最大主应变及最大切应变变为

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{(1+\nu)\sqrt{0.25K_1^2 \sin^2 \theta + 0.5K_1 K_{II} \sin 2\theta - 0.75K_{II}^2 \sin^2 \theta + K_{II}^2}}{E\sqrt{2\pi r}} + \\ \frac{(1-\nu)}{E\sqrt{2\pi r}} \left(K_1 \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right), \\ \gamma_{max} = \frac{\sqrt{0.25K_1^2 \sin^2 \theta + 0.5K_1 K_{II} \sin 2\theta - 0.75K_{II}^2 \sin^2 \theta + K_{II}^2}}{G\sqrt{2\pi r}}. \end{array} \right. \quad (6)$$

式中 σ_1 为最大主应力, ε_1 为最大主应变, 拉为正; τ_{max} 为最大切应力, γ_{max} 为最大切应变, 本文忽略其正负性; ν 为材料泊松比。

裂纹尖端应力应变场具有奇异性。实际上, 过大应力、应变会使得裂纹尖端附近先发育出微破裂, 造成应力松弛。已有研究把这类逐渐演化的微破裂区域称为过程区也叫微破裂区^[26]。新生裂纹的形成过程就是微破裂的萌生、发育、集结成核, 然后与宏观裂纹归并的过程, 微破裂区的大小以及微破裂密度可以表征岩石的损伤。

为了验证试验分析部分所采用的应变方法的合理性, 下面对裂纹尖端的应力场和应变场进行了比较。根据式(5)、(6), 图 11 给出了绕裂纹尖端圆周的最大主应变与最大主应力的变化趋势。为了便于比较, 图中横坐标为与裂纹尖端夹角 θ , 竖坐标为无量纲化的应力、应变值大小。从图 11 中可以看出, 当夹角 θ 从 -180° 变化到 180° 时, 两者除细微差别外, 变化趋势基本相同: -120° , 72° 夹角出现的两个波峰, 为翼裂纹和反翼裂纹最常开裂的区域; 在接近 180° 时, 虽然两者还在继续增大, 但理论分析基于 Griffith 裂纹, 本试验裂纹尖端存在一定弧度, 这使得裂纹仍在波峰处开裂。比较应力、应变两者的细微差别可以发现: 拉伸主应变涵盖的角度范围比拉伸主应力涵盖的角度范围大。Silva 等^[27]研究发现, 部分受压区域会出现拉伸裂纹, 应力方法无法解释这一现象。结合理论分析, 应变方法正好能够解释应力受压区的拉伸裂纹, 因为此处存在拉伸应变。由此, 通过观察全局应变场的定量演化过程来研究裂纹的扩展机理更具合理性。正是基于此, 试验结果分析部分采用应变方法对试验结果进行了分析。

下面进一步定量分析裂纹尖端微破裂区, 研究 DIC 云图的准确性。由于第二强度理论基于最大伸长线应变, 介于此得到了如下微破裂判断准则:

$$\varepsilon_1 \geq \frac{\sigma_{lim}}{E}, \quad (7)$$

当某点主应变值超过容许值, 该点就发生微破裂。根据式(6), 图 12 给出了屈服强度为 σ_s 下裂纹尖端的理论微破裂区示意图。为表征规律, 对极坐标系中的长度去量纲化, 采用曲线 $r(\sigma_s/K_1)^2$ 表示破裂区形状。从图 12 中可以看出, 除了裂纹上表面附近区域, 理论微破裂区形状与图 6 状态 a 高应变区形状一致, 这说明了理论结果与试验结果的一致性。随着外荷载增加, 微破裂区域逐渐增大, 微破裂密度增加, 当微破裂密度达到临界状态、破裂连续时就会产生宏观裂纹, 裂纹起裂。此时复合应力强度因子 K_{I+II} 达到断裂韧性 K_{IC} , 其与微破裂区大小以及密度存在相关性。对于翼裂纹起裂夹角的判断, 结合应变方法提出了下列准则:

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \theta} = 0 \text{ 且 } \theta \geq 0. \quad (8)$$

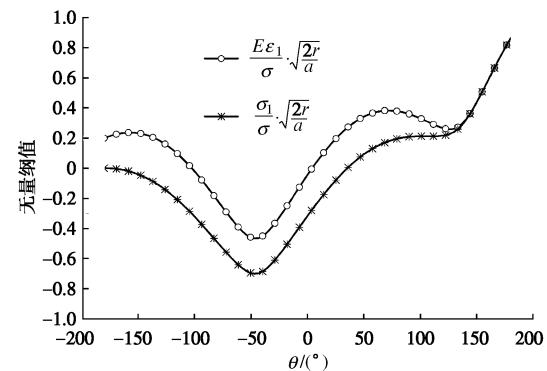


图 11 最大主应力与主应变变化

Fig. 11 Changes of max. principal stress and principal strain

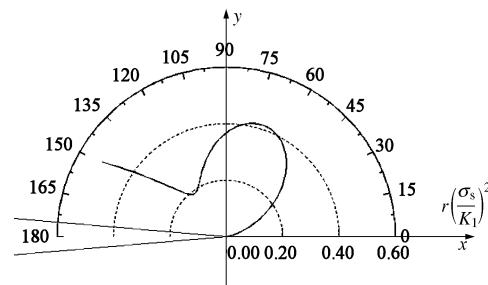


图 12 裂纹尖端理论微破裂区

Fig. 12 Theoretical process zone of crack tip

对于本试验后期及复杂应力条件下出现剪切裂纹。图 13 给出了绕裂纹尖端的 τ_{max} 和 τ_{xy} 的变化趋势, 两者差异不大: 曲线出现的两个最大值波峰, 为次生裂纹及反翼裂纹最常开裂区域。比较两者, 发现 τ_{xy} 的最值位置与试验现象最为接近, 故试验结果分析部分采用 τ_{xy} 对后期出现的剪应力集中现象进行了解释。由于切应力和切应变成线性关系, 故剪切裂纹采用应

力方法和应变方法分析是一致的,因此可以沿用次生裂纹和反翼裂纹的应力破裂准则。

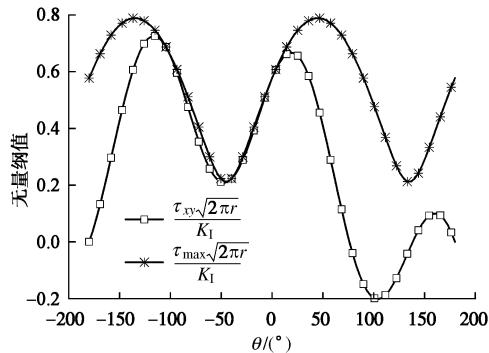


图 13 最大切应力与 x, y 方向切应力变化

Fig. 13 Changes of τ_{\max} and τ_{xy}

从理论角度,得出了应变方法分析裂纹扩展及判断拉伸、剪切裂纹的可行性与准确性,表明了 DIC 系统的可靠性与精确性。在高应变下,脆性材料裂纹尖端会产生微破裂区,随着微破裂聚集成核,裂纹起裂、产生新宏观裂纹,新裂纹尖端又继续发育出微破裂区,微破裂如此蔓延推进,这便是裂纹损伤的一般演化方式。数字图像相关技术能有效捕捉微破裂的蔓延过程,将其应用到岩石裂纹扩展研究中,对于含裂纹体损伤演化的研究是一个非常重要的突破。

4 结论与建议

本文通过基于数字图像技术的试验研究和基于断裂力学的理论研究,对单轴压缩试件内斜裂纹的扩展和损伤特性用应变方式进行了分析,得到以下 4 点结论。

(1) 把数字图像相关方法与常规加载试验相结合,开发了 DIC 测量系统,得到了脆性材料裂纹扩展过程的全局应变场,经过试验结果与理论分析比较,验证了该测量方法与自主开发测试系统的准确性与合理性,能够建立起细观力学表现与宏观力学响应的联系。

(2) 当荷载达到一定阶段,主应变云图中试件裂纹端部出现明显的微破裂区,其形状为绕尖端逆时针转动 82° 的椭圆,这与理论分析的微破裂区相近。荷载增大到最大荷载的 85.6% 时,微破裂聚集成核,端部开始形成宏观翼裂纹。随荷载增加,微破裂继续发育蔓延然后成核,这就是岩石损伤破坏的过程。

(3) 次生裂纹和反翼裂纹虽然由剪应力所引起,但从主应变云图中观察到了次生微破裂区以及反翼微破裂区,说明它们在形成过程中也受到了拉伸应力作用。整个过程剪应力作用不大,翼裂纹仍是试件的主要破坏模式。

(4) 最后基于线弹性断裂力学,比较了尖端周

围应力和应变的变化规律,得出了通过应变方法研究裂纹扩展、微破裂区演化以及判断拉伸裂纹、剪切裂纹的合理性,基于应变的系统和全面的断裂准则的建立还需要更多研究。

参考文献:

- [1] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Royal Society of London Philosophical Transactions Series A, 1921, **221**: 163 – 198.
- [2] OROWAN E. Fracture and strength of solids[J]. Reports on Progress in Physics, 1949, **12**: 185 – 232.
- [3] MC CLINTOCK F A, WALSH J B. Friction growth cracks in rocks under pressure[C]// Fourth US Nat Congr AI Mech, 1961: 1015 – 1021.
- [4] FAIRBURST C, COOK N G W. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface[C]// Proc First Congress International Society for Rocks Mechanics, 1966: 687 – 692.
- [5] HOEK E, BIENIAWSKI Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1965, **1**(3): 137 – 155.
- [6] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, **68**(12): 3709 – 3713.
- [7] NOLEN-HOEKSEMA R C, GORDON R B. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract Pergamon, 1987, **24**(4): 135 – 144.
- [8] WONG T F. Micromechanics of faulting in Westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract Pergamon, 1982, **19**(2): 49 – 64.
- [9] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石单轴压缩下破坏失稳过程 SEM 即时研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, **20**(4): 426 – 429. (HUANG Ming-li, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Real-time SEM study on rock failure instability under uniaxial compression[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1999, **20**(4): 426 – 429. (in Chinese))
- [10] 吴立新, 王金庄, 孟顺利. 煤岩损伤扩展规律的即时压缩 SEM 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(1): 9 – 15. (WU Li-xin, WANG Jin-zhuang, MENG Shun-li. Real-time load SEM study on coal fracture developing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(1): 9 – 15. (in Chinese))

- 15. (in Chinese))
- [11] 倪晓慧, 朱珍德, 武沂泉. 基于 SEM 的大理岩单轴受压全过程细观损伤量化研究[J]. 金属矿山, 2009, 9: 29 - 32. (NI Xiao-hui, ZHU Zhen-de, WU Yi-quan. SEM-based investigation on the quantification of meso-damage of marble under uniaxial compression[J]. Metal Mine, 2009, 9: 29 - 32. (in Chinese))
- [12] 葛修润, 任见喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. A real-in-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502. (in Chinese))
- [13] 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, 30(2): 104 - 111. (GE Xiu-run, REN Jian-xi. Real-time CT test of meso-damage propagation law of rock[J]. Science in China(Series E), 2000, 30(2): 104 - 111. (in Chinese))
- [14] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191 - 195. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 191 - 195. (in Chinese))
- [15] 李术才, 李廷春, 王 刚, 等. 单轴压缩作用下内置裂隙扩展的 CT 扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 484 - 492. (LI Shu-cai, LI Ting-chun, WANG Gang, et al. CT real-time scanning tests on rock specimens with artificial initial crack under uniaxial conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 484 - 492. (in Chinese))
- [16] 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 Dong-mei, CAI Mei-feng, ZHOU Yu-bin. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 467 - 472. (in Chinese))
- [17] 刘东燕, 朱可善, 胡本雄. 含裂隙岩石受压破坏的声发射特性研究[J]. 地下空间, 1998, 18(4): 210 - 216. (LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan, HU Ben-xiong. A study on acoustic emission characters of failure of fissured rock on compression[J]. Underground Space, 1998, 18(4): 210 - 215. (in Chinese))
- [18] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499 - 2503. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499 - 2503. (in Chinese))
- [19] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gage[J]. Journal of Physics E:Scientific Instruments, 1981, 14: 1270 - 1273.
- [20] RANSON W F, PETERS W H. Digital image techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427 - 431.
- [21] 方钦志, 李慧敏, 欧阳小东, 等. 图像相关法在高分子材料拉伸性能研究中的应用[J]. 试验力学, 2006, 21(4): 459 - 466. (FANG Qin-zhi, LI Hui-min OUYANG Xiao-dong, et al. The application of DIC method in the investigation of polymer tensile behaviors[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4): 459 - 466. (in Chinese))
- [22] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, 26(5): 599 - 607. (RUI Jia-bai, JIN guan-chang, XU Bing-ye. A new digital speckle correlation method and its application[J]. ACTA Mechanica sinica, 1994, 26(5): 599 - 607. (in Chinese))
- [23] 王冬梅, 方如华, 计宏伟, 等. 用数字图像相关法研究改性高分子材料的断裂行为[J]. 同济大学学报, 1999, 27(3): 278 - 281. (WANG Dong-mei, FANG Ru-hua, JI Hong-wei, et al. Studies on fracture behaviors of the modified high polymer by using digital image correlation method[J]. Journal of Tongji university, 1999, 27(3): 278 - 281. (in Chinese))
- [24] 王水林, 葛修润, 章 光. 受压状态下裂纹扩展的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 671 - 675. (WANG Shui-lin, GE Xiu-run, ZHANG Guang. Numerical analysis of crack propagation under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 671 - 675. (in Chinese))
- [25] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010. (LI Shi-yu, HE Tai-min, YIN Xiang-chu. An introduction of fracture mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. (in Chinese))
- [26] RUEHLE M, CLAUSSEN N, HEUER A H. Transformation and microcrack toughening as complementary processes in ZrO_2 - toughened Al_2O_3 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1986, 69(3): 195 - 197.
- [27] GONÇALVES DA SILVA B, EINSTEIN H H. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in rocks[J]. International Journal of Fracture, 2013, 182(2): 167 - 18.