

岩石三维表面裂纹扩展机理数值模拟研究

梁正召^{1,2}, 李连崇¹, 唐世斌¹, 张永彬¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 昆士兰大学土木工程学院, 澳大利亚 布里斯班 QLD 4072)

摘要: 岩石破坏的本质原因是由于内部裂隙的萌生、扩展与贯通过程。从三维的角度出发, 采用细观损伤数值模拟方法, 模拟单轴压缩下含预制三维表面裂纹的岩石试样的破坏过程。数值模拟得到了表面裂隙内部扩展、贯通过程, 动态再现翼型裂纹、壳体裂纹的形态, 探讨三维裂纹内部的受力机制, 推测可能发生的断裂类型, 进一步探讨三维裂纹扩展规律。研究结果表明: ①反翼型裂纹并不一定萌生于预制裂纹端部, 是由于翼型裂纹扩展后应力释放后的拉应力引起; ②壳体裂纹的萌生与扩展阶段是由III型加载断裂主导, 而翼型裂纹扩展至一定长度之后停滞不前; ③除了反翼型裂纹之外, 还新发现了一种由壳体裂纹萌生出的次生裂纹, 这种裂纹的扩展引起试样整体失稳崩溃; ④岩石III型加载(反平面剪切)难以获得III型断裂破坏, 壳体裂纹是由于III型加载下的拉应力引起, 实际上属于I型与II型复合裂纹; ⑤非均匀性对岩石表面裂纹扩展影响很大, 相对均匀岩石中难以出现曲线翼型裂纹或反翼裂纹。研究结果对于岩石三维裂隙扩展机理的物理力学实验与理论分析都具有参考意义。

关键词: III型断裂; 表面裂纹; 裂纹扩展; 壳体裂纹; 翼型裂纹

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)10-1615-08

作者简介: 梁正召(1977-), 男, 博士, 2005年于东北大学获博士学位, 现为大连理工大学副教授, 主要从事岩石力学与工程的失稳破坏数值模拟及大规模并行计算方面的研究工作。E-mail: z.z.liang@163.com。

3D numerical simulation of growth of surface crack of rock specimens

LIANG Zheng-zhao^{1,2}, LI Lian-chong¹, TANG Shi-bin¹, ZHANG Yong-bin¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Civil Engineering, Queensland University, Brisbane QLD 4072, Australia)

Abstract: Rock failure results from the process of internal crack initiation, propagation and coalescence intrinsically. A 3D numerical model based on the microscopic damage mechanics is employed to simulate the failure process of numerical rock specimens containing a pre-existing surface flaw subjected to uniaxial compression. The initiation, propagation and coalescence of wing cracks, shell cracks, anti-wing cracks and the secondary crack of shell cracks are reproduced in three-dimensional manner. Numerical results are obtained as follows: (1) anti-wing cracks are induced by the tensile stress after the stress release resulting from the propagation of wing cracks; (2) the shell cracks are predominated by III-type loading, and the wing cracks stop when they propagate ahead for a certain distance; (3) the secondary cracks of the shell cracks lead to the collapse of the whole specimen; (4) III-type fracture could not be obtained by III-type loading in rocks, and the shell cracks are induced by tensile stress in III-type loading; (5) due to the heterogeneities in rocks, it is difficult to find curved wing cracks and anti-wing cracks. The numerical results will be a good supplement of experimental investigation of surface flaw. The numerical code is proved to be a satisfactory tool to investigate the rock fracture in three-dimensional manner.

Key words: III-type fracture; surface crack; crack growth; shell crack; wing crack

0 引言

岩石破坏过程是由于岩石内部裂纹的萌生、扩展与贯通的累积损伤与断裂过程。研究岩石裂纹的扩展与贯通机理, 对于研究岩石破坏具有重要意义。在岩体力学中, 裂隙岩体内部裂隙的产状、走向以及分布通常决定着岩体变形与强度。裂隙岩体的失稳破坏与

这些裂隙的张开、扩展以及贯通密切相关^[1-2]。在地球物理中, 利用岩石等材料进行断层扩展实验是研究断层形成演化过程的重要手段之一, 从力学上阐述断层

基金项目: 国家自然科学基金项目(50804006, 51079017); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-09-0258); 全国优秀博士论文专项基金项目(200860)

收稿日期: 2010-07-12

形成机制及相互作用关系始终是构造地质学中富有挑战性的理论问题^[3-6]。

在大多数以前的研究中，常常将这些岩体裂纹简化成平面问题（穿透裂纹）加以解决，即将岩体中的裂纹看成是穿透整个岩体的，采用二维模型进行研究取得一系列的成果^[7-11]。地球物理科学中，断层被抽象为一条二维均匀连续介质中的穿型裂纹，在施加外力后产生的张、剪各种新裂纹，并用这些新裂纹描述各种断层形态，来解释浅层地震的孕育机理。

然而，裂纹的形成和演化均发生在三维空间中，很多三维问题无法简化为二维问题，无法向完全三维问题推广。近年来，一些研究者尝试把 I, II 和 III 型裂纹扩展模式联合起来，描述裂纹的三维扩展形态^[1, 9-10]。事实上，断裂力学研究的是裂纹扩展条件，破裂一旦发生，原生裂纹的形态已经被彻底改变，需要重新设定初始条件^[12]。裂纹扩展后的形态及其附近的应力条件和加载条件已经与理想条件相去甚远，超出了断裂力学所能描述的范围。理论分析表明，目前仅仅利用断裂力学方法建立解释有关三维裂纹（断层）扩展全过程的理论模型是非常困难的^[12, 14]。

在三维裂纹中，表面裂纹相对最简单也是最受关注的三维裂纹。国内外许多学者针对岩石类准脆性材料中的三维裂纹展开研究^[12-21]。Dyskin 研究了单轴与双轴压缩下的三维表面裂纹的开裂形状与手里机理，认为表面裂纹中的花瓣裂纹是典型的 III 型断裂^[17]。Wong 等开展了大量的三维裂纹的扩展实验^[13, 19]。他们利用多种岩石、有机玻璃、树脂等相似材料制作含有预制三维表面裂纹的试样，系统研究了裂纹走向（与主压应力的夹角）变化和裂纹深度变化对裂纹扩展形态的影响等问题，并发现了一种新的裂纹——反翼型裂纹，并且新生的反翼裂纹的起裂位置并不在预制裂隙的端部，认为这很可能是裂纹三维扩展的一种特有现象^[13]。

由于岩石的不透明性给内置三维裂纹的扩展研究带来了极大困难。为了便于观测，许多学者采用玻璃、树脂等透明均匀特性的相似材料来模拟三维裂纹的扩展机理。然而，由于岩石内部非均匀性的存在，三维裂纹的扩展机理与模式与均匀材料相差甚远。为了观测内部裂纹扩展问题，很多学者不得不尝试 CT 技术、声发射技术或者红外热像技术来观测分析内部微裂隙的扩展过程^[12-13]。由于观测精度以及数据处理系统影响，这些观测结果只能在一定程度上解释三维裂纹的扩展现象。由于在壳体裂纹与反翼裂纹扩展后期，由于岩石破碎较为严重，在物理实验中难以观测到试样如何崩溃失稳的。反翼型裂纹是非均匀材料中的一种

特殊现象，在均匀材料中是否存在反翼型裂纹，这些都存在疑问。

目前，有关采用数值计算方法来模拟非均匀性岩石中的三维裂纹扩展过程的文献尚未见到。本文基于细观损伤数值分析软件，模拟岩石三维表面裂纹扩展整个过程，不仅获得两端翼型裂纹的扩展过程，还获得了裂纹内部壳体裂纹、反翼型裂纹的萌生、扩展、相互作用与贯通过程及其应力场演化，希望研究结果能为理论分析与物理实验提供补充与参考。

1 数值计算模型

程序中采用全量加载，当单元在达到破坏准则以前保持弹性状态，在卸载或者重新加载过程中力学性质保持不变。一旦单元应力满足破坏准则，则强度等力学参数弱化。采用强度比较高但是弹性模量很低的软单元来模拟裂纹，单元损伤和破坏具有不可逆的特性，并且破坏单元不具备抗拉能力，但是具备一定的抗挤压能力。通过引入非均匀性来考虑裂纹的非规则扩展路径问题。这样就可以方便的处理裂纹的萌生、扩展和演化问题。篇幅所限，其它详细原理可以参考文献[20, 21]。

为了研究剪切与拉伸两种不同的断裂模式，单元破坏分为拉伸破坏和剪切破坏两种不同的模式。这里采用莫尔-库仑强度准则和最大拉伸应力准则来考虑两种不同模式。为了研究非均匀性的影响，在本文的模型中，假定细观尺度的单元力学性质服从某种既定的统计分布，沿用连续介质力学方法描述其力学行为，通过弹性模量和强度等力学性质的弱化来体现宏观上的非线性。

2 三维表面裂纹扩展过程模拟

为了对比模拟均匀程度对裂纹扩展的影响，分别模拟了两个不同均匀程度的岩石试样，其均值度系数 m 分别为 5.0 与 50.0。岩石试样强度与弹性模量服从 Weibull 分布，细观单元平均单轴抗压强度为 100 MPa，平均弹性模量为 20 GPa。加载方式为单轴压缩，三维表面裂纹为半椭圆形，裂纹厚度为 1 mm，长轴位于 xoy 面上，短轴垂直于 xoy 面，椭圆长轴与 x 轴、 y 轴呈 45° 角。试样几何尺寸为 $H=90$ mm, $D=30$ mm, $W=50$ mm。网格划分为 $180 \times 60 \times 100 = 108$ 万单元。采用单轴加载方式，试样下端轴向固定，上端施加位移荷载，初始加载量为 0.02 mm/步。当出现一定量声发射（微破坏）之后，每步加载增量调整为 0.002 mm。

2.1 裂纹起裂

在加载初期并没有声发射出现, 此时试样基本是弹性变形阶段。对于相对不均匀的试样 ($m=5.0$) 中, 由于非均匀性的影响, 从第三步开始试样中出现零散的声发射, 但是数量很少几乎可以忽略, 初期的这些破坏并没有影响裂纹周围应力场分布。当随着加载的进行, 与二维裂纹应力集中在裂纹尖端不同, 拉伸应力开始集中在椭圆形裂纹的所有内边缘, 压应力在裂纹面附近释放。当加载到第 21 步时, 应力达到峰值荷载的 45.7%, 最大压缩应变接近 0.1%, 裂纹边缘出现起裂现象(图 2(a)、图 3(a))。从图 4 的声发射曲线图上也可以看到, 从第 21 步开始, 声发射数急剧升高, 表面裂纹扩展速度加快。在长轴两端的裂尖处, 起裂裂纹并不沿着最大主应力方向向前扩展, 而是垂直于预制裂纹方向。从内部裂纹扩展图像上看, 预制裂纹边缘出现了起裂, 新生裂纹面起裂方向与预制裂纹垂直且与最大主应力方向平行(图 3(a))。由于这种裂纹沿着预制裂纹边缘扩展, 将预制裂纹包围起来, 也有称之为包裹体。如果是整个内置的椭圆形裂纹, 将出现椭圆柱体结构裂纹, 这里称之为壳体裂纹(Shell Crack)。实际上这种裂纹可看作是翼型裂纹在预制裂纹内部边缘的扩展部分, 因此也有学者还是称之为翼裂纹。这种裂纹在很多物理实验中都得到验证^[12-14, 17-19]。在相对均匀的岩石试样 ($m=50.0$) 中, 裂纹起裂时间延迟, 其它起裂情形与 $m=5.0$ 试样类似。

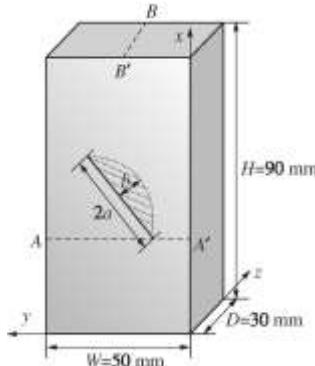


图 1 预制裂纹试样示意图

Fig. 1 Numerical specimen containing a pre-existing flaw

2.2 裂纹扩展过程

随着加载继续进行, 两个试样中的翼型裂纹与壳体裂纹继续扩展。拉应力继续在裂纹尖端出现, 但随着裂纹扩展, 裂纹两边应力逐渐释放。壳体裂纹继续沿着最大主应力方向扩展, 在预制裂纹上下表面边缘呈现对称性扩展(图 3(b))。

在 $m=5.0$ 的岩样中, 翼型裂纹扩展到一定距离之后, 裂纹扩展方向逐渐偏离原来扩展方向, 沿着最大主应力方向扩展(图 2(b))。显然, 壳体裂纹与翼型裂纹是两种裂纹, 扩展机理并不相同。在第 49 步时,

荷载达到 33.4 MPa(峰值荷载的 91.5%), 壳体裂纹与翼型裂纹停滞不前, 但在试样表面出现了另外一种裂纹, 这就是香港理工大学 Wong 等发现的反翼裂纹。这种裂纹并不在裂纹尖端萌生, 而且通常与翼型裂纹相反方向扩展。从图 2(c) 中也可以看到, 反翼裂纹并不一定对称出现在两侧。左边反翼裂纹向上向下扩展, 向下扩展与预制裂纹裂尖连接, 且与翼型裂纹贯通。右边出现的反翼型裂纹距离裂纹尖端较远, 向前扩展并没有与翼型裂纹连接贯通。从应力图上看, 反翼型裂纹萌生之前, 内部壳型裂纹与翼型裂纹扩展导致在预制裂纹上下两盘距离较远区域出现了对称的拉应力集中区域(图 2(b)、图 3(b)), 而反翼裂纹扩展导致该区应力释放(图 2(c)、图 3(c))。郭彦双等认为这种裂纹可能属于压剪裂纹^[13], 但数值模拟发现该区拉应力集中很明显, 从后面的声发射分布(图 7)也可以获得验证, 此时仍然可能是拉伸破坏。

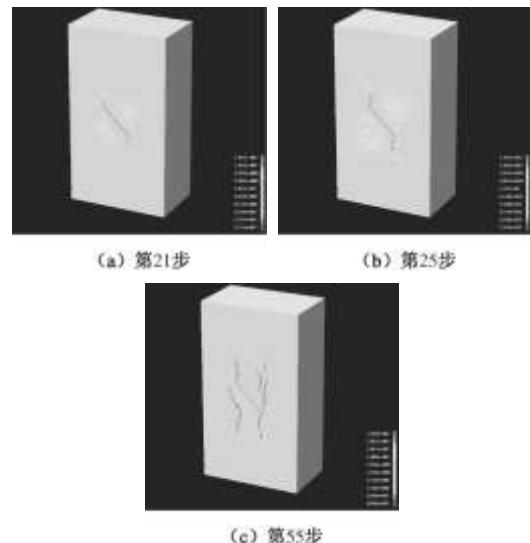
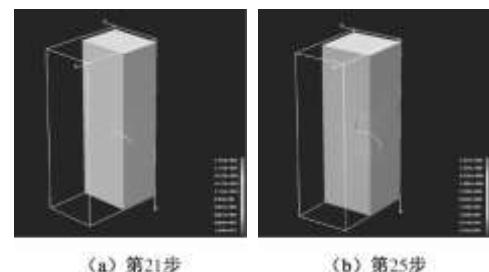


图 2 试样 ($m=5.0$) 表面裂纹扩展过程

Fig. 2 Propagation of pre-existing flaw in numerical specimen
($m=5.0$)



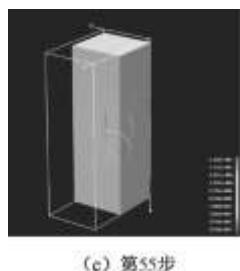
图 3 试样 ($m=5.0$) 内部裂纹扩展过程 ($B-B'$ 剖面)

Fig. 3 Propagation of internal crack in numerical specimen
($m=0.5$) (Section $B-B'$)

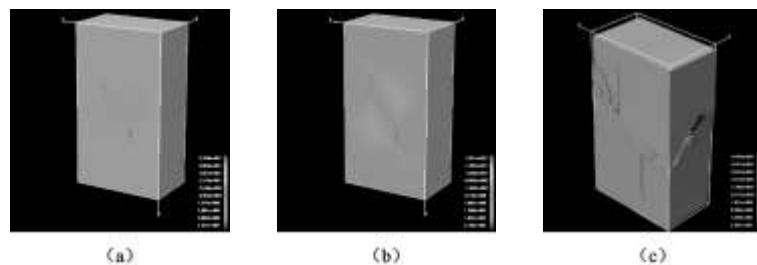
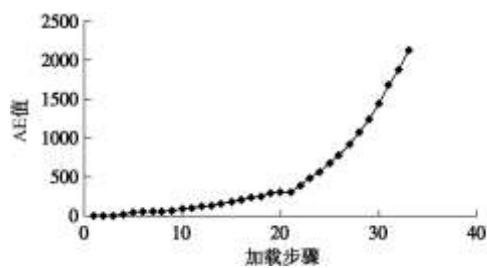
图 5 试样 ($m=50.0$) 表面裂纹扩展过程

Fig. 5 Propagation of surface flaw in numerical specimen ($m=50.0$)

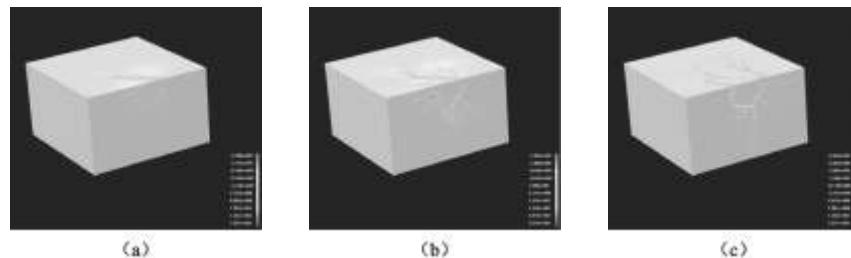
图 6 试样 ($m=5.0$) 内部壳体裂纹扩展过程 ($A-A'$ 剖面)

Fig. 6 Propagation process of cross section $A-A'$ of specimen ($m=5.0$)

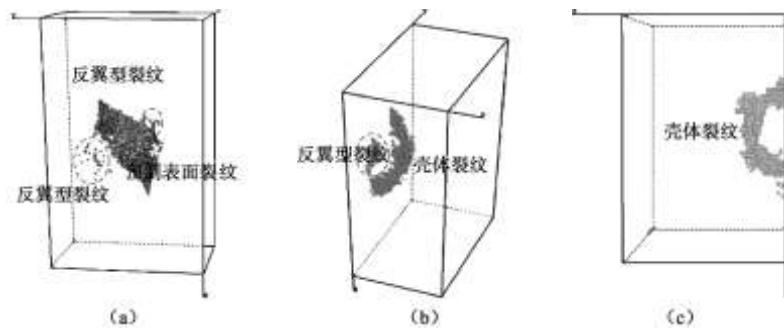
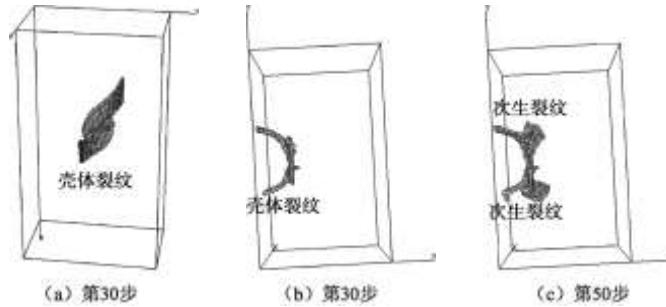
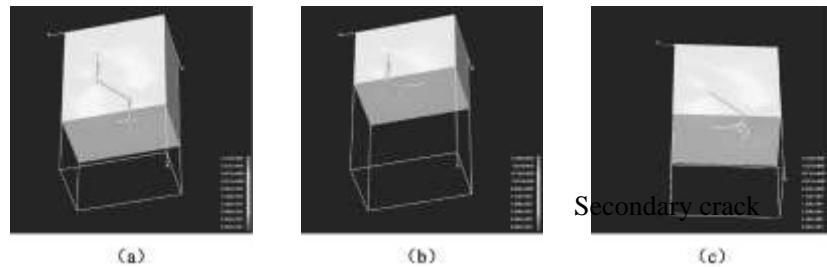
图 7 岩石试样($m=5.0$)内部三维声发射分布 (第 53 步)

Fig. 7 AE distribution inside specimen ($m=5.0$)

图 4 前 33 步声发射释放曲线

Fig. 4 AE rate during first loading stage

在 $m=50.0$ 的岩样中，并没有发现弯曲型翼型裂纹，翼型裂纹直接沿着最大拉伸应力方向扩展，这是与非均匀岩石中翼型裂纹扩展最大不同之处。此外，在相对非均匀的岩石试样 ($m=5.0$) 中，翼型裂纹与壳体裂纹扩展长度较短，在近似预制裂纹长度的一半的时候停滞不前，此时出现了反翼型裂纹（图 2 (c)、(d)）；而在相对均匀岩石 ($m=5.0$) 中这两种裂纹扩展很远，裂纹相对光滑，扩展长度远远超过了预制裂纹长度，并没有发现明显的反翼型裂纹（图 5 (a)、(b)）。但是从主应变场来看，在预制裂纹尖端沿水平方向出现了高压缩应变区与拉伸应变区（图 5 (c)），

图 8 试样($m=50.0$)内部三维声发射分布Fig. 8 AE distribution inside specimen ($m=50.0$)图 9 岩石试样 ($m=50.0$) 中的壳体裂纹次生裂纹空间分布 (第 56 步)Fig. 9 Secondary cracks of shell cracks of different cross sections in specimen ($m=50.0$)

说明该区可能已经进入塑性状态, 由于较高应力的存在, 裂纹很难出现。但无论从扩展形式还是受力状态看, 这与非均匀岩石中的反翼型裂纹属于不同的裂纹。Wong 等在树脂类材料中模拟不同角度的表面裂纹开裂情况, 也没有发现反翼型裂纹, 他们认为这是非均匀材料特有的一种裂纹^[19]。

为了更清晰看清内部裂纹扩展情况, 沿着图 1 中 A-A'剖面切开试样 ($m=5.0$), 观察壳体裂纹扩展情况。壳体裂纹在预制裂纹边缘开始扩展, 直到在剖面上形成圆柱壳体的过程见图 6。由于壳体裂纹扩展长度有限, 特别是在翼型裂纹下方, 由于压应力较大, 导致裂纹扩展距离较短, 但是表面出现的反翼型裂纹与壳体裂纹相连接贯通。从岩石内部不同角度声发射空间分布来看, 在预制裂纹的上下出现了对称的壳体裂纹的声发射 (图 7 (a)), 在左边翼型裂纹下面区域和右边翼型裂纹的上面区域, 壳体裂纹扩展距离最短。从正面观察 (XOY 面), 声发射在空间上呈现出两个条带状的集聚区, 这就是预制裂纹上下表面扩展出的壳体裂纹与翼型裂纹, 中间的空区则是预制裂纹的位置, 而左下与右上部分出现的声发射集聚区, 则是发翼型裂纹产生的位置 (图 7 (a))。从另外一个角度也能看到反翼型裂纹的空间分布与壳体裂纹、翼型裂纹明显分布于不同区域 (图 7 (b))。如果从上面俯视 (YOZ 面), 壳体裂纹、翼型裂纹呈现出环状 (图 7 (c)), 结合图 7 (a) 可以看出声发射在空间上为壳体结构。在接近均值的岩石中, 由于裂纹较为光滑, 声发射分布集中于开裂位置, 正面观测到的环带状 (图 8 (a)) 与俯视所观测到的半圆形 (图 8 (b)) 更为清楚。

2.3 试样失稳崩溃

由于壳体裂纹与翼型裂纹并不能扩展至试样边界, 最后导致岩石整体失稳崩溃的不是经常关注的翼型裂纹与壳体裂纹, 而是反翼型裂纹与壳体裂纹的次生裂纹。反翼型裂纹与壳体裂纹贯通后, 在试样表面很容易形成剪切破坏。数值模拟发现, 在试样内部出现了一种新的裂纹——壳体裂纹的次生裂纹。这种裂纹垂直于壳体裂纹面产生, 向试样背面扩展 (见图 7 (c))。这类裂纹扩展穿透试样, 不仅诱发反翼型裂纹继续扩展, 而且导致整体剪切面的形成, 是试样整体失稳的直接因素。在试样 ($m=50.0$) 完全崩溃前, 将其沿加载方向 (X 方向) 切开不同位置, 观测内部这种次生裂纹的空间分布情况 (图 9)。各个不同切面上的次生裂纹处于不同位置, 可以推测这种多条次生裂纹在空间上都沿着壳体裂纹呈发散状分布。图 9 (a) 与图 9 (b) 是第 30 步加载后的声发射分布, 只有壳体裂纹, 没有发现这种次生裂纹, 而在第 50 步, 可以明显看到两侧衍生出的次生裂纹。这种裂纹在试验中还没有被观测到, 应该引起重视。图 10 显示的是试样 ($m=5.0$) 加载过程中的应力 - 应变全过程曲线。从这个曲线上看, 试样表现出很强的脆性破坏特征, 在达到峰值之前很难捕捉到破坏前兆信息。从图 11 的声发射曲线来看, 预制裂纹的起裂、反翼型裂纹的形成阶段都会引起声发射的上升, 而在峰值之后声发射数目急剧下降。即使含有预制裂纹, 由于岩石具有典型的脆性破坏特征, 通过声发射或者应力 - 应变曲线很难对其突然失稳进行预测。

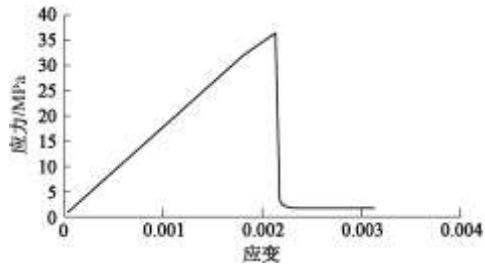
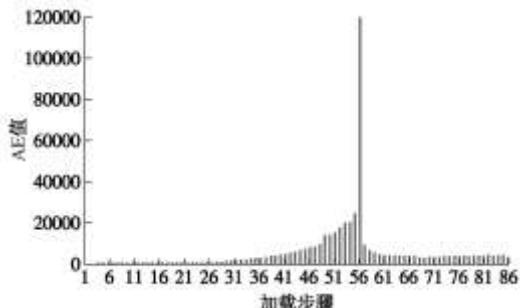
图 10 含预制裂纹试样应力 - 应变曲线($m=5.0$)Fig. 10 Complete stress-strain curves of specimen containing pre-existing surface flaw ($m=5.0$)

图 11 加载过程中声发射曲线

Fig. 11 AE rate during axial loading

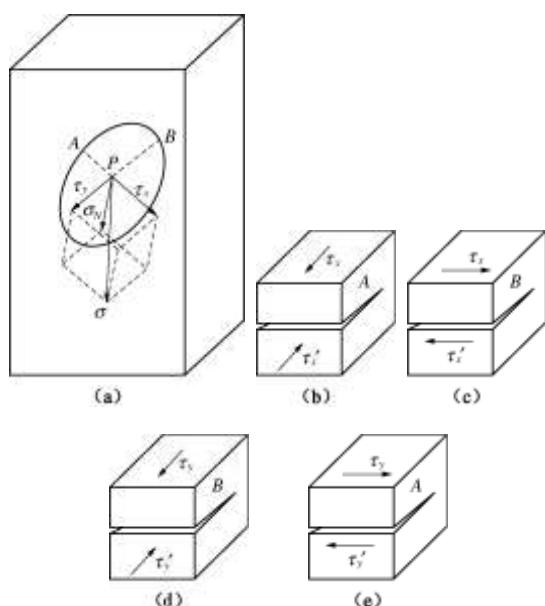


图 12 三维裂纹受力断裂分析

Fig. 12 Analysis of fracture of surface flaw

3 讨 论

3.1 III型加载断裂问题

在二维穿透裂纹中不存在III类加载或III类断裂，这是表面裂纹与二维裂纹的一个主要区别。典型的内置三维裂纹受力模型如上图 12 所示，图中的椭圆形可以看作是预制裂纹的上下表面。假设在裂纹上表面一定距离某一点 P 受到垂直应力 σ 的作用，在 P 点建立局部坐标系， σ 可以进行分解为 3 个分力：垂直于裂

纹面的 σ_N ，沿着裂纹面互相垂直的两个应力 τ_x 与 τ_y 。

这 3 个分力对椭圆形裂纹边缘上不同位置的作用机制并不相同。这里选取两个典型的点来说明。 A 点位长轴尖端， B 点位于短轴尖端。 τ_x 对 A 点来说，是典型的 II 类剪切力（图 12 (b)），而对 B 点来说正好是 III 类加载（反平面剪切）（图 12 (c)）。类似的， τ_y 对 A 点来说，是典型的反平面剪切（图 12 (e)），而对 B 点来说是 II 类剪切力（图 12 (d)）。可能由于上面正应力的存在，II 类剪切很难发生，数值模拟中也没有出现沿着表面裂纹方向扩展的裂纹。在反平面剪切力作用下，将产生与预制裂纹相互垂直的拉伸裂纹，而不是平行于裂纹面的 III 型裂纹，这也是壳体裂纹产生与扩展的主要原因。通常认为壳体裂纹属于 III 型裂纹^[17, 23]，许多学者展开了此类研究，同样发现针对岩石的 III 型加载并不能获得 III 型裂纹。由于岩石属于典型的准脆性材料，抗剪强度远大于抗拉强度，在裂纹尖端产生的拉应力很容易导致 III 型裂纹的产生^[22]。实际上，也有学者对是否存在 III 型断裂表示怀疑。从细观角度来看，准脆性材料都是发生拉伸破坏，剪切破坏或许是一种宏观上的破坏形式。通过抑制拉伸应力刻意获得这种断裂形式还值得商榷。

3.2 翼型裂纹扩展弯曲问题

三维裂纹与二维裂纹另外一个重要的区别就是预制裂纹很难扩展至试样两端^[17]。在二维穿透裂纹中，翼型裂纹最终沿着加载方向扩展直至试样两端。Dyskin 等认为是翼型裂纹扩展中的弯曲引起的。数值模拟中发现，翼型裂纹在扩展过程中都会发生朝向两侧的弯曲现象（图 5, 6），这种侧向拐折导致翼型裂纹偏离最大主应力方向。试样最终发生突然崩溃，并不是像二维裂纹一样劈开成两半。除了表面翼型裂纹拐折之外，主要原因还有壳体裂纹及其次生裂纹的内部扩展也有关系。鉴于此，国外有学者提出采用双向加载方式去研究这种裂纹扩展弯曲问题^[24]。

3.3 反翼裂纹萌生的位置

反翼裂纹并不萌生于预制裂隙的端部，这也可能是裂纹三维扩展的一种特有现象。在二维裂纹中反翼裂纹都出现在预制裂纹端部。与二维条件不同，由于内部壳体裂纹扩展导致试样表面的裂纹尖端应力发生变化，反翼型裂纹可能在距离裂纹尖端一定距离出现。

4 结 论

通过采用细观损伤数值模型，模拟了含典型表面裂纹的非均匀性岩石单轴压缩下的破坏过程，结合应力场、声发射、破坏图像与受力机理，分析各类裂纹

的产生机理, 数值模拟的结果很多在物理实验中可以得到验证。总结如下:

(1) 数值模拟获得了翼型裂纹、反翼型裂纹、壳体裂纹的萌生、扩展以及试样整体崩溃过程。数值模拟中还新发现了一种垂直于壳体裂纹产生的次生裂纹, 这种裂纹穿透试样背面, 最终导致试样整体崩溃。

(2) 反翼型裂纹是由于翼型裂纹扩展后应力释放后的压剪引起, 而壳体裂纹的萌生与扩展阶段是由 III型加载断裂主导。

(3) 非均匀性对裂纹扩展影响很大, 采用玻璃、树脂类均匀材料难以代替岩石进行物理实验研究。模拟结果表明, 相对均匀岩石中难以出现曲线翼型裂纹和反翼裂纹。

本文仅以倾角为 45° 的表面裂纹展开单轴压缩下的模拟实验, 一些新的发现需要在物理实验中去进一步对比探讨。由于三维裂纹的扩展过程与预制裂纹的方向、裂纹厚度、裂纹的埋深, 还有岩石的非均匀性、加载方式都密切相关, 需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. 固体力学学报, 1998, **19**(4): 355 - 360. (ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism—study on propagation of echelon pattern cracks[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998, **19**(4): 355 - 360. (in Chinese)).
- [2] RAMSAY J G. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [3] 马瑾, 张渤海, 袁淑荣. 断层闭锁区附近应变场演化的初步探讨[J]. 地震地质, 1979, **1**(3): 47 - 55. (MA Jin, ZHANG Bo-tao, YUAN Shu-rong. Preliminary study on the evolution of strain field near locked region of a fault[J]. Seismology and Geology, 1979, **1**(3): 47 - 55. (in Chinese))
- [4] 马瑾. 断层交汇区附近的变形特点与声发射特点[J]. 地震学报, 1983, **5**(2): 69 - 80. (MA Jin. Model experimental study on behavior of deformation and acoustic emission near the intersections of faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 1983, **5**(2): 69 - 80. (in Chinese)).
- [5] 刘力强, 马瑾, 吴秀泉. 雁列式断层变形与失稳过程的实验研究[J]. 地震学报, 1986, **8**(4): 393 - 403. (LIU Li-qiang, MA Jin, WU Xiu-quan. An experimental study on the process of deformation and instability for en-echelon faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, **8**(4): 393 - 403. (in Chinese))
- [6] 马胜利, 邓志辉, 马文涛, 等. 雁列式断层变形过程中物理场演化的实验研究(一) [J]. 地震地质, 1995, **17**(4): 327 - 335. (MA Sheng-li, DENG Zhi-hui, MA Wen-tao, et al. Experimental study on evolution of physical field during deformation of en-echelon faults(1)[J]. Seismology and Geology, 1995, **17**(4): 327 - 335. (in Chinese))
- [7] SHEN B. The mechanism of fracture coalescence in compression experimental study and numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, **51**(1): 73 - 85.
- [8] ROBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 863 - 888.
- [9] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part I: experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(9): 909 - 924.
- [10] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 岩石裂隙扩展的试验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(1): 18 - 23. (CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(1): 18 - 23. (in Chinese))
- [11] 刘东燕, 朱可善. 岩石压剪断裂的模型试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1994, **16**(1): 56 - 62. (LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan. An experimental study on cement mortar specimens with a central slits under uniaxial compression[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1994, **16**(1): 56 - 62. (in Chinese))
- [12] LIU Li-qiang, LIU Pei-xun, WONG Hon-chu, et al. Experimental investigation of three-dimensional propagation process from surface fault[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, **51**(10): 1426 - 1435.
- [13] 郭彦双, 黄凯珠, 朱维申, 等. 辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(3): 525 - 531. (GUO Yan-shuang, WONG H C, ZHU Wei-sheng, et al. Study on fracture pattern of open surface-flaw in gabbro[J]. Chin J Rock Mech Eng, 2007, **26**(3): 525 - 531. (in Chinese))
- [14] 滕春凯, 尹祥础, 李世愚, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的实验研究[J]. 地球物理学报, 1987, **30**(4): 371 - 378. (TENG Chun-kai, YIN Xiang-chu, LI Shi-yu, et al. An experimental investigation on 3D fractures of non-penetrating

- crack in plane samples[J]. *Acta Geophys Sin*, 1987, **30**(4): 371 - 378. (in Chinese))
- [15] 尹祥础, 李世愚, 李红, 等. 闭合裂纹面间相互作用的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1988, **31**(3): 307 - 314. (YIN Xiang-chu, LI Shi-yu, LI Hong, et al. Experimental study of interaction between two flanks of closed crack[J]. *Acta Geophys Sin*, 1988, **31**(3): 307 - 314. (in Chinese))
- [17] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2003, **70**(15): 2115 - 2136
- [18] SAHOURYEH E, DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Crack growth under biaxial compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2002, **69**(18): 2187 - 2198.
- [19] WONG R H C, LAW C M, CHAU K T, et al. Crack propagation from 3-D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, **41**(3): 360 - 366.
- [20] 梁正召, 杨天鸿, 唐春安, 等. 非均匀性岩石破坏过程的三维损伤软化模型与数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(12): 1147 - 1152. (LIANG Zheng-zhao, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Three-dimensional damage soften model for failure process of heterogeneous rocks and associated numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(12): 1147 - 1152. (in Chinese))
- [21] 梁正召, 唐春安, 唐世斌, 等. 三维裂纹扩展的模拟试验[C]// 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 345 - 351. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, TANG Shin-bin, et al. Numerical simulation of three-dimensional crack propagation[C]// The Ninth National Academic Conference of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 345 - 351. (in Chinese))
- [22] 谢海峰, 饶秋华, 王志. 反平面剪切(III型)加载下脆性岩石的断口分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(9): 1832 - 1839. (XIE Hai-feng, RAO Qiu-hua, WANG Zhi. Fracture morphology analysis of brittle rock under anti-plane shear (mode III) loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(9): 1832 - 1839. (in Chinese))
- [23] ADAMS M, SINES G. Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression[J]. *Tectonophysics*, 1978, **49**: 97 - 118.
- [24] SAHOURYEH E, DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Crack growth under biaxial compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2002, **69**(18): 2187 - 2198.

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
- 封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
- 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
- 后插 1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
- 后插 2 台州市建元工程勘察仪器有限公司
- 后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司
- 后插 4 常州金土木工程仪器有限公司