

文章编号: 1001-4888(2024)04-0518-11

含不同倾角单裂隙岩石 单轴压缩破裂演化过程分析*

赵娜, 卫帅, 王来贵, 孟利新

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为探究裂隙倾角对裂隙岩体破裂演化过程的影响, 本文对不同裂隙倾角岩体进行单轴压缩试验, 采用数字散斑和声发射方法作为观测手段, 探究含不同裂隙倾角岩体的破裂演化过程, 分析了不同单裂隙岩体表面及其内部裂纹的演化规律。结果表明: 裂隙岩体的变形破坏过程与完整岩体相似, 表现为原始裂隙压密、弹性变形、塑性变形及破坏 4 个阶段; 随着裂隙倾角的增大, 应力的峰值即抗压强度呈现先减小后增大的趋势。当岩体表面裂纹处于稳定扩展阶段时, 裂纹首先沿着预制裂隙端部起裂, 然后裂纹扩展、贯通, 形成宏观裂纹, 直至宏观裂纹发展至非稳定扩展阶段; 当裂隙倾角为 0° 时, 岩体表现出较明显的张拉破坏, 当裂隙倾角为 30° 、 45° 和 60° 时, 岩石呈现出以剪切为主的组合破坏, 当裂隙倾角为 90° 时, 岩体发生张拉破坏。通过声发射观测结果, 观测了单裂隙岩体内部裂纹的演化过程, 在声发射初始期, 岩体内部存在大量孔隙, 随着应力的增加, 原生孔隙逐渐被压密, 所收集到的振铃计数较少; 随着变形的增加, 岩体进入弹性变形阶段, 岩石内部产生微裂纹, 振铃计数与初始期相比变多且趋于稳定状态; 当进入塑性变形阶段即裂纹稳定扩展阶段, 裂纹在岩体表面沿预制裂隙起裂并不断发育, 直到裂纹贯通, 岩体形成宏观破裂到达破坏阶段。随着裂隙倾角的改变, 内部裂纹扩展情况产生差异, 导致单裂隙岩体塑性变形阶段来临时间呈现先减小后增加的趋势。

关键词: 单裂隙; 裂纹演化; 数字散斑; 声发射; 单轴压缩

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-249

0 引言

自然界的岩体经过长期的地质作用使得岩体表面及内部存在着大量不同倾角、不同尺寸的裂隙, 形成不同结构形式的裂隙岩体。裂隙的存在会改变岩体的力学性能, 当岩体内部裂隙扩展贯通形成宏观破坏面后, 会影响整个岩体工程的稳定性。因此, 研究裂隙岩体的裂纹扩展规律, 对岩体工程灾害的预防和防治具有深远的意义。对此, 国内外一些学者进行了大量的研究。杨圣奇等^[1-2]通过单轴压缩试验, 探究了含裂隙倾角对砂岩试件强度和变形行为的影响。LI 等^[3]采用单轴压缩试验探究了含裂隙大理石试件的裂纹扩展情况, 结果表明含预制裂隙的试件与完整试件相比, 其抗压强度、弹性模量以及破坏时的应变都有所降低。NOLEN-HOEKSEMA 等^[4]对含预制裂隙的真实岩石进行单轴压缩试验, 发现预制裂隙端点会产生新的裂纹, 并且随着纵向应力的增加不断扩展, 扩展的裂纹不是轴对称形式。除

* 收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1503101); 辽宁省重点科技创新基地联合开放基金项目(2020-KF-13-06); 辽宁省教育厅基础研究项目(LJ2020JCL013)

通信作者: 赵娜(1979-), 女, 博士, 副教授。从事岩体力学及岩层控制方面研究。Email: zhaona24@163.com

了利用单轴压缩试验以外,王辉等^[5]对含裂隙试件开展巴西圆盘试件的劈裂试验,得出了层理与预制裂隙共同作用下岩样的断裂特性和破坏机制。WONG 等^[6]对含预制裂隙的试件进行劈裂试验,并且利用数值模拟软件探究了裂隙倾角、裂隙长度裂纹的起裂过程及其破坏形式。蒋明镜等^[7]利用 DEM 对 Lac du Bonnet 预制单裂隙的花岗岩进行单轴压缩数值模拟,观察单轴压缩过程中单裂隙岩体裂纹扩展所展现的应力特征,模拟结果表明,裂隙倾角较小时,侧向应力都处于拉压状态;由于裂隙左右两端压应变的集中造成裂隙上下面拉应变的产生,从而形成了裂隙周围特殊的应力分布;当裂隙角度较大时,应力集中现象已不明显。此外,邵冬亮等^[8]利用类岩石材料研究不同裂纹的破裂过程,并且借助声发射技术观察了试件在受压破坏下裂纹的萌生、起裂、扩展和破裂全过程特征。赵程等^[9-12]对含裂隙脆性岩石试件进行单轴压缩试验,探究试件在压缩过程中整体应变演化过程并且利用数字成像技术进行监测,从而得到了加载过程中试件裂纹扩展路径及其应力分布特征。朱昌星等^[13]对透明类岩石进行单轴压缩试验,并结合 PFC 进行数值模拟,探究了岩石变形破坏模式及内部裂纹扩展过程。

上述研究主要从岩石破裂宏观角度进行开展,对于含裂隙岩体裂纹扩展全过程分析较少。因此,本文对含不同倾角裂隙砂岩试件进行单轴压缩试验,利用数字散斑和声发射设备观测裂隙岩体表面和内部裂纹扩展演化规律,所得结果可为含裂隙岩体工程的长期稳定性分析及复杂裂隙岩体的力学行为研究提供参考。

1 单轴压缩含单裂隙岩体破裂演化试验

1.1 试件制备及方案

考虑到实际工程中岩体所处地质环境较复杂,以及裂隙岩体存在的普遍性,本文试验采取预制裂隙岩体,探究不同裂隙倾角的单裂隙岩体对岩体强度特性的影响,裂隙模型如图 1 所示,图中 α 为裂隙与水平方向的夹角, h 为裂隙的长度, F 为施加的轴向应力。

选取来自天然岩层的红砂岩,按照试验规范要求切割、打磨,形成 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的基岩试件,将制作好的基岩试件通过线切割机进行定位、钻孔以及线切割,最终制作成含裂隙岩体试件如图 2 所示。

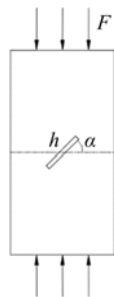


图 1 含裂隙岩体单轴压缩模型

Fig. 1 Uniaxial compression modeling of a fissure-bearing rock body



图 2 含裂隙岩体试件

Fig. 2 Fissure-bearing rock specimen

在不影响试验的前提下,未考虑宽度因素影响。对不同倾角和长度的单裂隙岩体试样进行单轴压缩试验,立方体试样的尺寸均为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$,每组 3 个,共 5 组,试验方案见表 1。表中组名, Q 代表裂隙倾角,数字代表裂隙的角度,如 $Q0$ 表示岩石裂隙倾角为 0° 。

1.2 试验系统

整个试验由 3 部分组成,分别是加载系统、声发射系统以及数字散斑图像采集系统,如图 3 所示。加载系统采用 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验仪,位移加载速率为 0.006mm/s 。

表1 试验方案
Tab.1 Test plan

组名	裂隙角度 $\alpha/(\circ)$	裂隙长度 h/mm	数量
Q0	0	20	3
Q30	30	20	3
Q45	45	20	3
Q60	60	20	3
Q60	90	20	3



图3 试验系统

Fig.3 Experimental system

声发射系统主要由计算机、高频传感器及前置放大器等设备组成。声发射探头型号为 RS-2A, 频率为 50kHz~400kHz。为了减少外部噪声产生的影响, 声发射阈值和前置放大器分别设置为 45dB 和 40dB。有外力作用时, 岩石内部产生裂纹或变形, 其内部应变能以弹性波的形式释放。声发射系统将单轴压缩条件下裂隙岩体变形破坏过程中弹性波变化情况转化为事件数 A、能量、振铃计数及幅值等参数。试验选定散斑面为试件的正面, 将 5 个声发射探头置于试样左右两侧及后侧, 探头位置如图 4 所示。

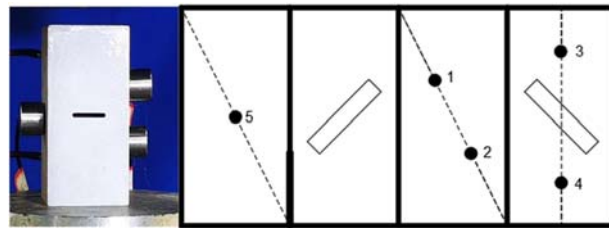


图4 探头分布图

Fig.4 Probe distribution map

数字散斑图像采集系统由软件和硬件 2 部分组成, 主要用来记录试件表面的散斑图像。硬件系统主要包括计算机、CCD 相机、照明设备。白光光源主要照射在试样表面, 保证图像的灰度不变; 利用 CCD (Basler) 相机设定的图像采集速度为每秒 15 帧, 图像分辨率为 4872ppi \times 3248ppi, 拍摄范围为 50mm \times 100mm。在试件表面进行人工制斑, 首先在试件表面喷涂白漆作为底色, 然后表面随机喷涂黑色斑点。系统通过匹配物体表面变形前后散斑图像中同一几何点的位置, 对试件数据进行处理和分析, 得到试件的应变场和位移场等有关信息。

2 不同倾角裂隙岩体变形破坏特性分析

根据试验结果, 统计含不同倾角裂隙岩体在单轴压缩荷载全过程的物理力学参数见表 2。含不同裂隙倾角岩体应力-应变曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 不同裂隙倾角岩体的应力-应变曲线均包括压密阶段(I)、弹性阶段(II)、塑性变形阶段(III)及破坏阶段(IV), 但由于裂隙倾角不同, 不同裂隙倾角岩体在应力-应变曲线各个阶段内表现出不同的特征^[14]。

(1) 在压密阶段(I), 岩石内部存有天然孔隙, 在应力逐渐加大的过程中, 内部孔隙被逐渐压实。该阶段应力-应变曲线呈现上凹形, 曲线的斜率随着应变的增加而增大。应变一定时, 裂隙倾角不同, 其压密速率也各不相同, 速率大小依次为 $30^\circ > 90^\circ > 60^\circ > 45^\circ > 0^\circ$ 。

(2) 在弹性阶段(II), 岩石发生了弹性变形, 并且内部裂纹开始萌生, 应力-应变曲线可以用一条直线来代替, 其斜率即割线模量。岩体割线模量受裂隙角影响, 当裂隙倾角为 0° 时, 割线模量为

1.405GPa；当裂隙倾角为 30° 时，割线模量为 1.376GPa；当裂隙倾角为 45° 时，割线模量为 1.397GPa；当裂隙倾角为 60° 时，割线模量为 1.419GPa，当裂隙倾角为 90° 时，割线模量为 2.295GPa。

(3) 在塑性变形阶段 (III)，岩石发生塑性变形，裂纹发生扩展、贯通，应力的峰值即抗压强度。当裂隙倾角为 0° 时，抗压强度为 24.32MPa；当裂隙倾角为 30° 时，抗压强度为 23.05MPa；当裂隙倾角为 45° 时，抗压强度为 26.1MPa；当裂隙倾角为 60° 时，抗压强度为 28.104MPa；当裂隙倾角为 90° 时，抗压强度为 34.908MPa。

(4) 在破坏阶段 (IV)，岩石表面及内部产生裂纹，宏观破裂，应力瞬间滑落，展现出脆性破坏特征，没有明显的屈服阶段，各个倾角裂隙岩石趋势基本相同。

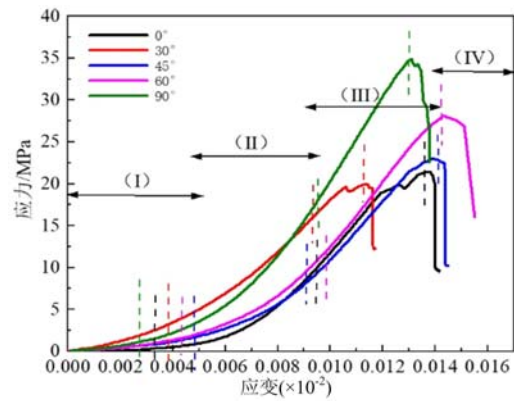


图 5 不同裂隙倾角岩体的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of rock masses with different fracture inclinations

表 2 不同裂隙倾角岩体单轴压缩试验结果

Tab. 2 Uniaxial compression experimental results of rock mass with different fracture inclination angles

标号	密度 (g · cm ⁻³)	均值	割线模量 /GPa	均值	峰值应变 /%	均值	抗压强度 /MPa	均值
Q0-1	2.381		1.375		1.363		21.432	
Q0-2	2.411	2.385	1.398	1.397	1.368	1.378	21.465	22.159
Q0-3	2.363		1.418		1.402		23.580	
Q30-1	2.391		1.382		1.133		19.570	
Q30-2	2.384	2.373	1.273	1.369	1.136	1.135	18.760	19.429
Q30-3	2.343		1.451		1.135		19.956	
Q45-1	2.382		1.372		1.390		22.856	
Q45-2	2.402	2.379	1.371	1.376	1.392	1.390	21.086	22.317
Q45-3	2.353		1.385		1.387		23.008	
Q60-1	2.412		1.396		1.419		27.689	
Q60-2	2.383	2.382	1.419	1.419	1.438	1.453	28.104	28.178
Q60-3	2.352		1.442		1.502		28.741	
Q90-1	2.381		2.289		1.312		34.908	
Q90-2	2.371	2.378	2.299	2.295	1.246	1.304	35.012	34.884
Q90-3	2.383		2.297		1.354		34.732	

图 6 给出了不同裂隙倾角下，试件抗压强度、弹性模量随裂隙倾角变化的曲线。裂隙倾角为 30° 时，单轴抗压强度最小，抗压强度随裂隙倾角的增加呈现先减小后增大的趋势。根据摩尔库仑定律，当试样的裂隙倾角大于内摩擦角时，岩石表面的剪切力就会超过摩擦力，从而导致岩石试样的强度下降；当裂隙倾角小于岩石试样的内摩擦角时，试件的摩擦力就会超过剪切力，从而使试样的强度得到提高。裂隙倾角为 30° 时，单裂隙岩体受载过程中，其结构面受预制裂隙倾角影响产生较大滑移，导致其抗压强度出现明显降低；当裂隙倾角为 90° 时，在试件端部，由于摩擦效应的影响抑制试件沿节理面发生滑动，导致其抗压强度出现明显增大^[15]。割线模量随裂隙倾角的变化趋势与抗压强度大致相同。当裂隙倾角

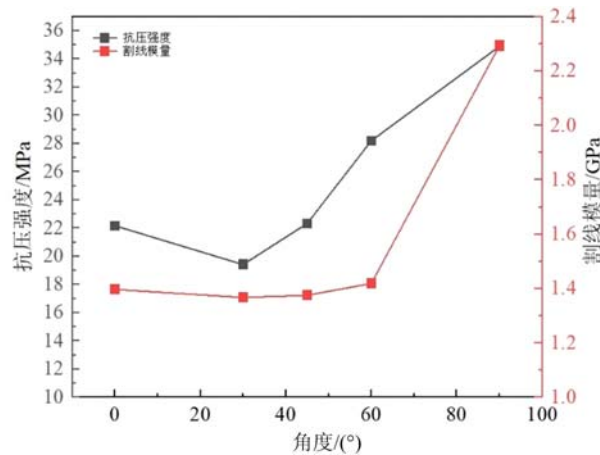


图6 含不同裂隙倾角单裂隙岩石的抗压强度及弹性模量

Fig. 6 Compressive strength and elastic modulus of single-fractured rock with different crack angles

小于 60° 时,割线模量变化不大;大于 60° 时,割线模量有明显的变化趋势。整体而言,预制裂隙的存在极大减弱了岩石的强度,且随着裂隙倾角的不同,岩石受力模式发生改变,进而导致裂隙岩石发生不同程度的破坏。

3 不同倾角单裂隙岩体表面裂纹扩展过程分析

单轴压缩载荷下含不同倾角裂隙岩石表面裂纹的萌生、扩展主要发生在如图5所示的塑性变形阶段(Ⅲ)及破坏阶段(Ⅳ)两个阶段,扩展过程如图7所示,由于裂隙岩石试样单轴压缩破坏较快,且不同倾角下的岩石破裂时间也不相同,本文结果未对相同时刻下裂纹扩展数目等进行统计,只是对裂纹起裂位置、扩展方向及最终的破裂形态进行了分析。

岩石在载荷作用下,在预制裂隙的尖端会产生翼裂纹和次生裂纹。翼裂纹也叫主裂纹或一级裂纹,是由于裂隙尖端受到拉伸作用而产生的,之后沿最大主应力方向进行稳定扩展。次生裂纹属于剪切裂纹,也是从预制裂隙的尖端萌生的,并且开始的时候也是稳定扩展的^[16]。

由图7可以看出,当裂隙倾角为 0° 时,裂纹最先由预制裂隙中间位置产生向上和向下扩展的两条新生裂纹,随着应力的不断增加,预制裂隙两端开始出现次生裂纹①和②,并且裂纹③也随之扩展延长,最后裂纹①、②、③扩展至岩样端部,通过裂纹最终扩展情况发现,破坏模式呈现为Y形;当裂隙倾角为 30° 时,预置裂隙上下两端开始产生两条翼裂纹,随着应力的加大,预制裂隙两端开始出现新生次生裂纹①和②,最终翼裂纹扩展延长了一段距离,次生裂纹扩展贯通至岩样端部,通过观察,破坏模式呈现为X形;当裂隙倾角为 45° 时,预制裂隙下端产生了裂纹①并不断扩展延长,随后反向延长,与裂隙端部形成裂纹②,随着应力的增加,裂纹①和②扩展至岩样端部且裂隙上端形成新的裂纹③,最终裂纹③扩展贯通至岩样端部,新生裂纹④也向岩样端部方向扩展,破坏模式呈现为X形;当裂隙倾角为 60° 时,翼裂纹①和②最先在预制裂隙两端起裂并不断扩展延伸,最终扩展至岩石端部且与预制裂隙形成贯通,次生裂纹③也在这一过程中生成,破坏模式呈现为X形;当裂隙倾角为 90° 时,预制裂隙下端出现新生裂纹①并贯通扩展出现裂纹②、裂纹③,最终裂纹②和裂纹③扩展贯通至岩样端部,破坏模式呈现为H形。通过对不同倾角单裂隙岩体裂纹扩展的分析可知,裂纹起裂过程大致与应力-应变曲线的塑性变形阶段(Ⅲ)及破坏阶段(Ⅳ)相对应。当岩体表面裂纹处于稳定扩展阶段时,裂纹首先沿着预制裂隙端部起裂,然后裂纹一直扩展,最终形成贯通,直至表面裂纹发展至非稳定扩展阶段,最终形成裂隙岩体宏观破坏。

综合对比不同倾角下裂纹的扩展过程可以看出,裂隙倾角对裂纹的起裂位置、扩展方向及最终的破裂模式都有一定的影响。当裂隙倾角为 0° 时,裂纹从裂隙中间位置萌生;随着裂隙倾角的增加,裂纹起裂位置由之前的裂隙中间变为裂隙端部。当裂隙倾角为 30° 和 60° 时,裂纹的起裂位置在裂隙的两端;当裂隙倾角为 45° 和 90° 时,裂纹的起裂位置为裂隙一端;对于裂纹最终的破裂模式,当裂隙倾角为 0° 时,破裂模式为Y形;随着裂隙倾角的增加,当裂隙倾角为 30° 、 45° 和 60° 时,破裂模式为X形;直至裂隙

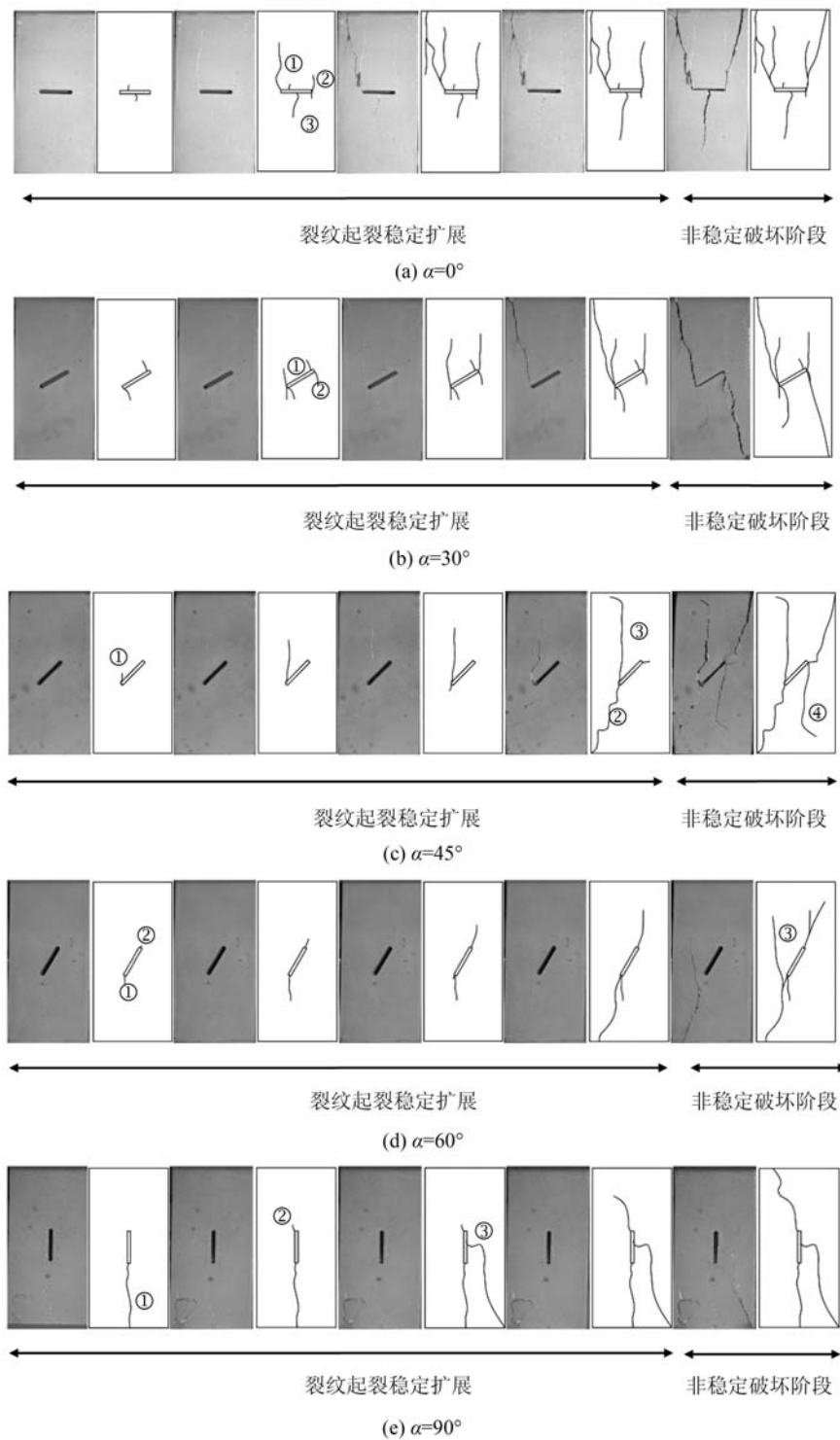


图 7 不同裂隙倾角状态下的裂纹扩展过程

Fig. 7 Crack propagation process under different crack dip angles

倾角为 90°时, 裂纹最终破裂模式为 H 形。

4 基于 DSCM 数字散斑技术的单裂隙岩体应变演化分析

通过数字散斑技术对不同裂隙倾角岩石试件单轴压缩试验过程中, 表面裂纹起裂稳定扩展和非稳定破坏阶段图像进行处理, 对其 X 方向位移变化进行分析, 得到不同裂隙倾角岩石表面应变演化云图如图 8 所示。

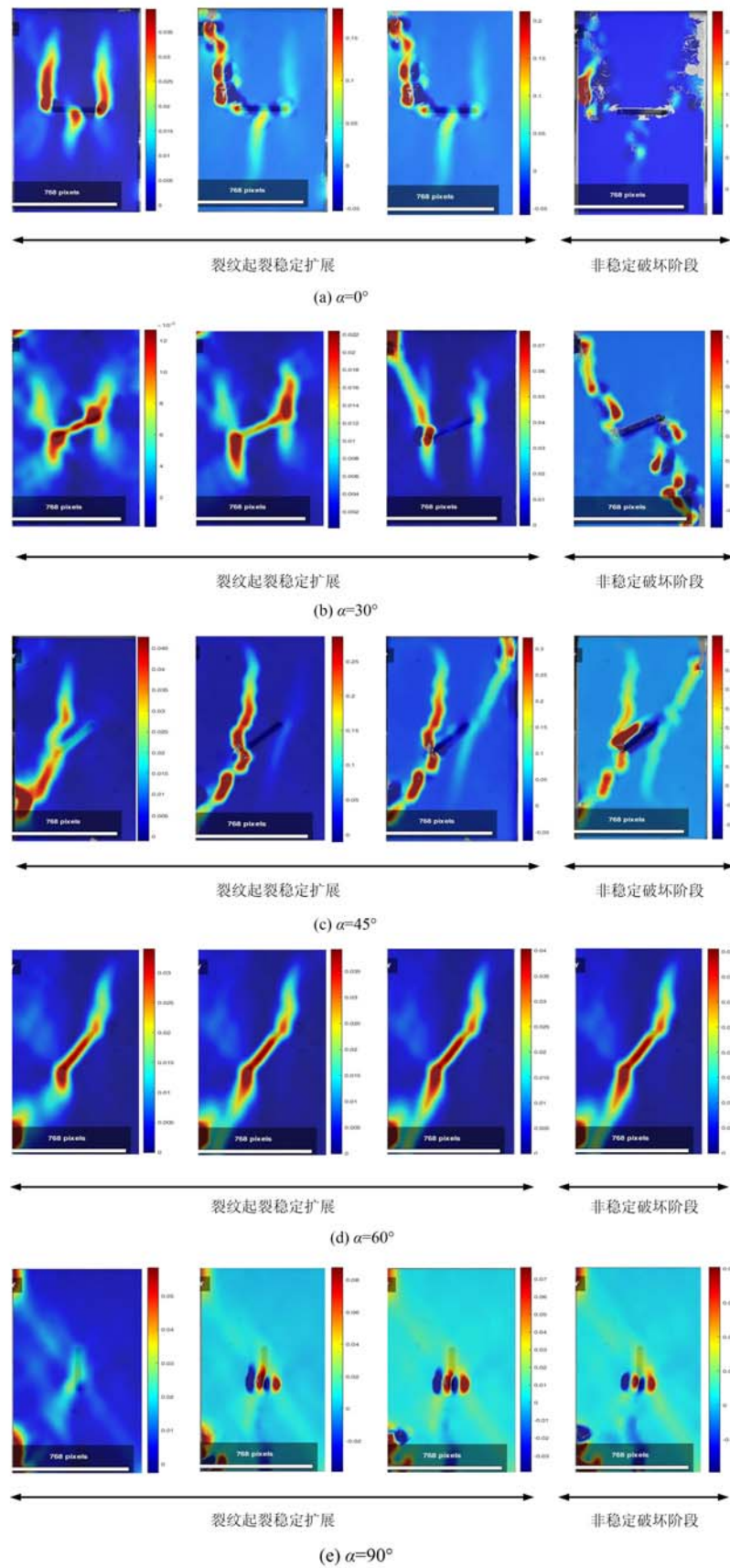


图 8 不同倾角裂隙岩石应变演化云图

Fig. 8 Cloud chart of strain evolution of fractured rocks with different angles

由应变演化云图(图8)可见,单裂隙岩石都是在裂隙端部起裂,然后向试件上下两端扩展,最后试件失去承载能力。当裂隙倾角为 0° 时,新生裂纹由预制裂隙中间位置及两端发生起裂、扩展,表现为拉裂纹,最终随着应力的不断增加,裂纹扩展与岩样端部形成贯通破坏;当裂隙倾角为 30° 时,预制裂隙上下两端较早开始产生翼裂纹,随着应力的加大,预制裂隙两端开始出现新生次生裂纹,结构面应变明显,且出现明显滑移,最终次生裂纹扩展贯通至试样端部形成剪切破坏;当裂隙倾角为 45° 时,预制裂隙下端产生了裂纹并不断扩展延长,随着应力的增加,裂纹迅速扩展贯通,岩体表面出现明显的断裂带;当裂隙倾角为 60° 时,翼裂纹首先出现在预制裂隙的两端,然后不断向四周蔓延扩展,最终扩展至岩石端部且与预制裂隙形成剪切贯通破裂;当裂隙倾角为 90° 时,应变与其他倾角岩石相比较低,节理面未产生滑移,最终在试件中部发生张拉破坏。

通过不同倾角岩体对应的应变演化云图可以看出,裂隙倾角为 0° 时,岩石呈张拉破坏;裂隙倾角为 30° 、 45° 和 60° 时,岩石以剪切破坏为主;裂隙倾角为 90° 时,岩石试件中部发生张拉破坏。

5 不同倾角裂隙岩体声发射信号演化规律

单轴压缩过程中,利用声发射技术对试件内部裂纹的扩展情况进行监测。图9为岩样加载过程中应力、振铃计数、累计振铃计数随时间的变化关系曲线,对应曲线如箭头所示。

从图9可以看出,单裂隙岩体振铃计数可大致分为3个阶段,即初始期、平静期、爆发期。在声发射初始期,岩体内部存在大量孔隙,随着应力的增加,原生孔隙逐渐被压密,所收集到的振铃计数较少;随着变形的增加,岩体进入弹性变形阶段,岩石内部产生微裂纹,振铃计数与初始期相比变多且趋于稳定状态;当进入塑性变形阶段即裂纹稳定扩展阶段,裂纹在岩体表面沿预制裂隙起裂并不断发育,直到裂纹贯通,岩体形成宏观破裂到达破坏阶段,声发射活动事件频发,振铃计数突然增多,并且最大计数出现在峰值强度附近。整体规律与应力-应变曲线规律一致。

以裂隙倾角为 45° 的岩样来进行分析:在时间效应和抗压强度的双重影响下,岩样的声发射特征曲线和应力-应变曲线均表现出非线性特征。随着时间的延长,岩体开始处于压密阶段,内部微裂纹发生损伤破坏,对应振铃计数开始出现并缓慢增加,当岩体处于弹性阶段时,岩体达到相对稳定的阶段,声发射时间趋于平稳状态;随着应力的增加,岩体出现第一个声发射事件的突增,当岩体达到抗压强度值时,声发射振铃计数随着岩体的贯通破裂出现第二次剧烈振铃计数突增的情况,声发射事件率突增代表了岩体内部损伤加大,岩体内部裂纹扩展加剧,表明岩体即将发生失稳破坏或已经发生破坏。

不同倾角的单裂隙岩体声发射过程大致相同,但是预制裂隙倾角的存在也对其产生了一定的影响。当裂隙倾角为 0° 时,声发射爆发期来临时间最早,发生在110s附近;裂隙倾角为 30° 时,声发射爆发期发生在105s附近;裂隙倾角为 45° 和 60° 时,爆发期发生在120s附近;裂隙倾角为 90° 时,声发射爆发期来临时间最晚,发生在130s附近。爆发来临时间随裂隙倾角的增加,呈先提前后滞后趋势。结合声发射与应力曲线(图9)也可以看出,不同倾角单裂隙岩体塑性变形阶段起始应力变化趋势与其大致相同。

结合不同裂隙倾角岩石破坏特性与声发射演化规律可以看出,对于含单裂隙的岩体而言,倾角 $\alpha=30^\circ$ 时,岩体力学特性削弱明显。不仅抗压强度明显低于其他角度,而且其表面裂纹萌生时间也会有明显提前。

6 结论

通过岩体单轴压缩试验,分别采用数字散斑和声发射系统对裂隙岩体变形破坏过程和岩体最终破坏形态进行采集,得出了岩石变形破坏全相关规律。

(1) 随着应力的增加,不同倾角裂隙岩体的应力-应变曲线仍符合非线性(压密)、弹性、塑性变形及破坏4个阶段。受裂隙倾角的影响,岩体的抗压强度明显不同。含裂隙岩体抗压强度出现先减小后增大的趋势,裂隙角度为 30° 时,岩体抗压强度最小。割线模量在裂隙倾角为 0° 到 60° 之间时,变化不明显,直至裂隙倾角达到 90° 时,抗压强度最高。

(2) 通过对不同倾角单裂隙岩体裂纹扩展的分析得出,裂纹起裂过程大致与应力-应变曲线的塑性

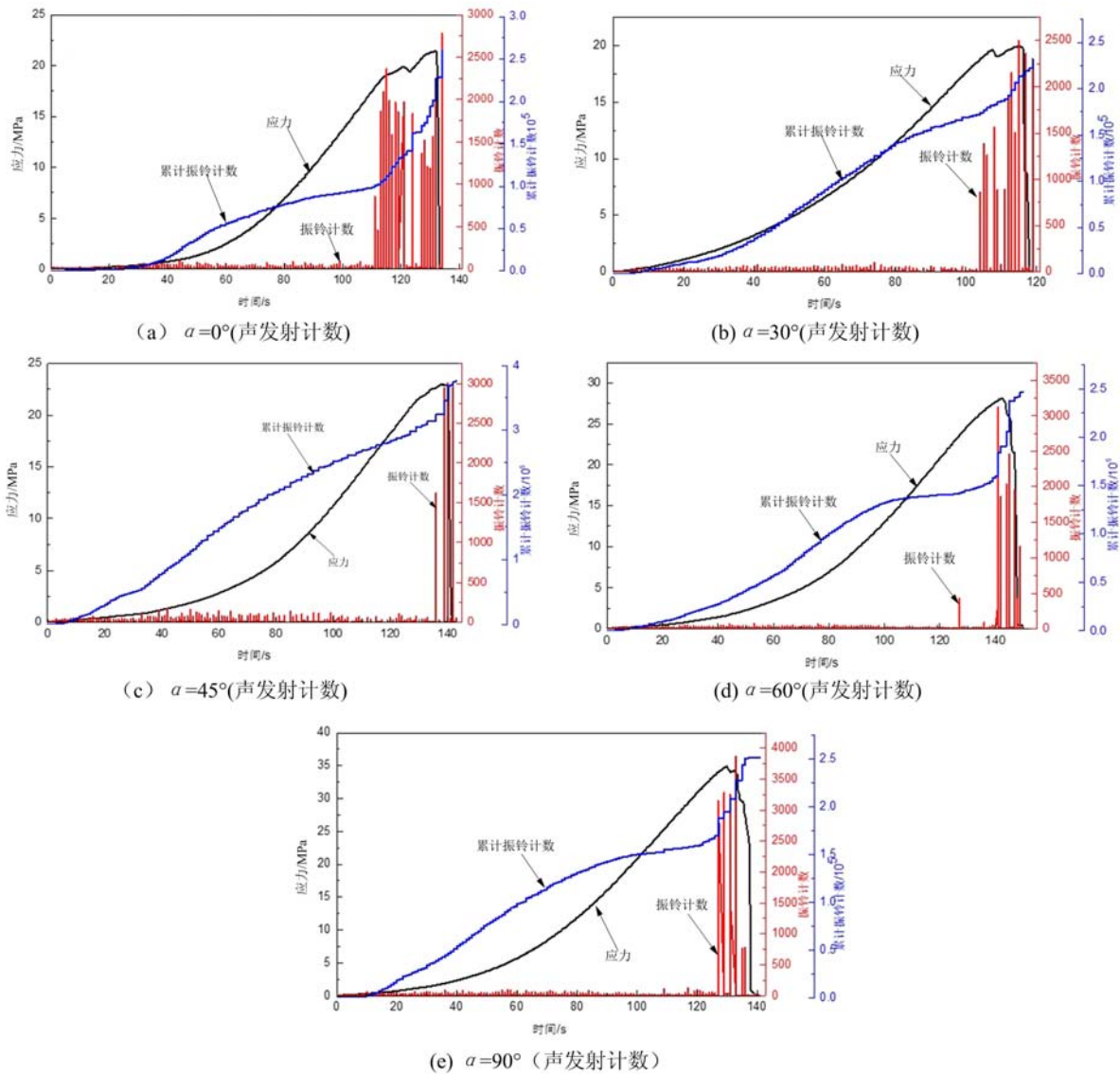


图9 应力-累计振铃计数-时间关系曲线

Fig. 9 Stress-cumulative ringing count-time relationship curve

变形阶段(Ⅲ)及破坏阶段(Ⅳ)相对应。当裂纹处于稳定扩展阶段时,裂纹顺着最先起裂的裂纹一直扩展,直至形成贯通;伴随着裂纹的贯通,不同倾角单裂隙岩体形成宏观破坏并伴随着非稳定裂纹扩展。

(3) 从微观和宏观角度相结合可以看出,岩体在受载荷压缩的过程中,裂纹起裂、扩展和贯通破坏均发生在预制裂隙尖端区域。当裂隙倾角为 0°时,岩体表现出较明显的张拉破坏;当裂隙倾角为 30°、45°和 60°时,岩石呈现出以剪切为主的组合破坏;当裂隙倾角为 90°时,岩体发生张拉破坏。

(4) 通过声发射观测结果,展现了单裂隙岩体内部裂纹的演化过程。在声发射初始期,岩体内部存在大量孔隙,随着应力的增加,原生孔隙逐渐被压密,所收集到的振铃计数较少;随着变形的增加,岩体进入弹性变形阶段,岩石内部产生微裂纹,振铃计数与初始期相比变多且趋于稳定状态;当进入塑性变形阶段即裂纹稳定扩展阶段,裂纹在岩体表面沿预制裂隙起裂并不断发育,直到裂纹贯通,岩体形成宏观破裂到达破坏阶段。

(5) 通过单轴压缩试验与声发射可以看出,对于含单裂隙的岩体而言,裂隙倾角为 30°时,岩体力学特性削弱明显。不仅抗压强度低于其他裂隙倾角岩体,而且其表面裂纹萌生时间也会有明显的提前。

参考文献:

[1] 杨圣奇,刘相如,李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31

- (增刊2):3539—3546 (YANG Shengqi, LIU Xiangru, LI Yushou. Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl. 2): 3539—3546 (in Chinese))
- [2] YANG S Q, JING H W, XU T. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(5):2059—2073.
- [3] LI Y P, CHEN L Z, WANG Y H. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9/10):2505—2516.
- [4] 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 & Geomechanics Abstracts, 1987, 24(2):135—144.
- [5] 王辉, 李勇, 曹树刚, 等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5):912—926 (WANG Hui, LI Yong, CAO Shugang, et al. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5):912—926 (in Chinese))
- [6] WONG H C, LIN P, TANG C A. Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(1):142—159.
- [7] 蒋明镜, 张宁, 申志福, 等. 含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(11):3293—3300, 3314 (JIANG Mingjing, ZHANG Ning, SHEN Zhifu, et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11):3293—3300, 3314 (in Chinese))
- [8] 邵冬亮, 李术才, 李明田, 等. 单轴压缩条件下不同裂纹制作方式的裂纹破坏分析及其声发射特征研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(3):131—136 (SHAO Dongliang, LI Shucui, LI Mingtian, et al. Study of failure analysis and the acoustic emission signature of 3-D crack from different origins under uniaxial compression[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(3):131—136 (in Chinese))
- [9] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4):763—769 (ZHAO Cheng, TIAN Jiashen, MATSUDA Hiroshi, et al. Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4):763—769 (in Chinese))
- [10] 赵程, 鲍冲, 松田浩, 等. 数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5):944—951 (ZHAO Cheng, BAO Chong, MATSUDA Hiroshi, et al. Application of digital image correlation method in experimental research on crack propagation of brittle rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5):944—951 (in Chinese))
- [11] 赵程, 鲍冲, 田加深, 等. 基于应变局部化的双裂纹岩样贯通模式及强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2309—2318 (ZHAO Cheng, BAO Chong, TIAN Jiashen, et al. Experimental study of coalescence mode of cracks and strength of rock with double flaws based on strain localization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2309—2318 (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, 47:405—413.
- [13] 朱昌星, 安烨明, 李伟东. 单轴压缩下透明类岩石损伤演化特征研究[J]. 实验力学, 2022, 37(5):701—710 (ZHU Changxing, AN Yeming, LI Weidong. Research on damage evolution characteristics of transparent rock under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):701—710 (in Chinese))
- [14] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3):361—380.
- [15] 汪杰, 李杨, 宋卫东, 等. 不同倾角节理岩体损伤演化特征分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(8):143—150 (WANG Jie, LI Yang, SONG Weidong, et al. Analysis of damage evolution characteristics of jointed rock mass with different joint dip angles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(8):143—150 (in Chinese))

- [16] 潘鹏志, 丁梧秀, 冯夏庭, 等. 预制裂纹几何与材料属性对岩石裂纹扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(9):1882—1889 (PAN Pengzhi, DING Wuxiu, FENG Xiating, et al. Research on influence of pre-existing crack geometrical and material properties on crack propagation in rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(9):1882—1889 (in Chinese))

Analysis of fracture evolution process of single fractured rock mass based on uniaxial compression

ZHAO Na, WEI Shuai, WANG Laigui, MENG Lixin

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to investigate the influences of fissure inclination on the rupture evolution process of fissured rock body, this paper carried out uniaxial compression experiments on rock bodies with different fissure inclinations. The digital scattering and acoustic emission methods were adopted as the observation means to investigate the rupture evolution process of rock bodies containing different fissure inclinations. And the evolution law of the surface of the different single-fissure rock bodies and their internal cracks were analyzed as well. The results show that the deformation and destruction process of the fractured rock body is similar to that of the intact rock body, which is manifested in four stages: original fracture compaction, elastic deformation, plastic deformation and destruction; with the increase of fracture inclination, the peak stress, i. e., the compressive strength, shows a tendency of decreasing first and then increasing. When the cracks on the surface of the rock body are in the stable expansion stage, the cracks firstly start cracking along the end of the prefabricated cracks, and then the cracks expand, penetrate, and form macroscopic cracks until the macroscopic cracks develop to the unstable expansion stage. When the inclination angle of the cracks is 0° , the rock body shows a more obvious tensile damage. The rocks show a combination of shear-dominated damage when the inclination angles of the cracks are 30° , 45° , and 60° . The rock body shows a combination of shear-dominated damage when the inclination angle of the cracks is 90° , and the rock body undergoes elastic deformation. When the fissure inclination angle is 90° , the rock body undergoes tensile damage. Through the acoustic emission observation, the evolution of cracks inside the single-fracture rock body is observed. In the initial period of acoustic emission, there are a large number of pores inside the rock body. With the increase of stress, the primary pores are gradually compressed and dense, and the collected ringer counts are relatively small. With the increase of deformation, the rock body enters into the stage of elastic deformation, and the rock body produces micro-cracks inside the rock body, the ringer counts become more and tend to be stabilized compared with the initial period. When it enters into the stage of plastic deformation, i. e., cracks, the rock body enters into the stage of plastic deformation, i. e., cracks. When entering the plastic deformation stage, i. e., the stable crack expansion stage, the cracks start to crack along the prefabricated fissures on the surface of the rock body and continue to develop until the cracks penetrate through, and the rock body forms a macroscopic rupture and reaches the destruction stage. With the change of crack inclination angle, the internal crack extension situation produces differences, resulting in the plastic deformation stage of single-fracture rock body coming time shows a tendency of decreasing and then increasing.

Keywords: single fissure; crack evolution; digital speckle; acoustic emission; uniaxial compression