

DOI: 10.11779/CJGE201803023

# 不同尺寸裂隙岩石损伤破坏特性光弹性试验研究

谢 環, 李树忱\*, 晏 勤, 李景龙, 赵世森

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 25006)

**摘要:**为了充分认识试件尺寸与裂隙倾角对裂隙岩石损伤破坏的影响,开展了不同试件尺寸、不同裂隙倾角的光弹性单轴压缩试验。利用反射式光弹仪直观形象地记录试件损伤破坏全过程的彩色条纹变化,基于光学-应力定律计算得到裂隙岩石损伤破坏过程中试件表面的全场应力应变,分析岩石裂隙扩展失稳的尺寸效应及裂隙倾角对岩石强度及破坏模式的影响,研究裂隙岩石损伤—扩展—破坏的力学机制。试验结果表明:裂隙岩石单轴压缩的应力应变曲线可分为弹性阶段,塑性阶段,峰后软化阶段,残余阶段不明显;裂隙岩石峰前阶段的弹性模量随着试件高宽比的增加而增大,随着裂隙倾角的增加而减小;单轴抗压强度随着高宽比的增加呈减小趋势;峰后的软化阶段受试件尺寸与裂隙倾角的共同影响,裂隙倾角与高宽比越大,岩石的破坏越具有突然性,即脆性越明显;岩石损失破坏时最大应变与应力分布在预制裂纹中心,损伤首先从预制裂纹处发生。随着加载的不断进行,最大应变与应力的位置转变为裂纹的两端,逐渐向平行于轴向加载方向发展直至试件端部。岩石损失破坏时,最大应变与应力分布在预制裂纹中心,损伤首先从预制裂纹处发生。随着加载的不断进行,最大应变与应力的位置转变到裂纹的两端,裂纹逐渐向平行于轴向加载方向发展直至试件端部。

**关键词:**裂隙岩石;光弹性;尺寸效应;损伤破坏

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)03-0568-08

作者简介: 谢 環(1990-),女,博士研究生,主要从事岩石破坏机理以及数值计算方面的研究工作。E-mail: xiecansdu@163.com。

## Photoelastic experiments on failure characteristics of fractured rock with different sizes

XIE Can, LI Shu-chen, YAN Qin, LI Jing-long, ZHAO Shi-seng

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In order to fully study the effect of specimen size and crack dip angle on the failure mechanism of fractured rock, uniaxial compression tests on rocks with different specimen sizes and crack dip angles are performed. The whole stress and strain of specimen surface is calculated based on the optical-stress law. The effect of sizes and crack dip angles on rock strength and failure modes is analyzed, and the extension mechanism of fissures in the fractured rock is studied. The test results show that the uniaxial compression stress-strain curve of fractured rock can be divided into the elastic stage, plastic stage and post-peak softening stage, however, the residual stage is not obvious. The elastic modulus of fractured rock during pre-peak stage increases with the increase of height-width ratio of specimens and decreases with the increase of crack dip angles. The uniaxial compressive strength decreases with the increase of height-width ratio of specimens. The post-peak softening characteristics of fractured rock are influenced by crack dip angles and specimen sizes. The greater the crack dip angle and height-width ratio, the more sudden the failure, the more obvious the brittleness. The maximum strain and stress distribution is in the center of the pre-crack, and damage firstly occurs in the pre-crack. With the increase of stress level, the position of the maximum strain and stress propagates to the ends of the crack and extends to the direction of crack parallel to the axial load. The results may provide a theoretical basis for the establishment of constitutive model for fractured rock and the stability analysis of joint rock mass.

**Key words:** fractured rock; photoelasticity; size effect; damage and fracture

## 0 引言

在含裂隙岩体的隧道、边坡等工程中,岩体裂隙在施工扰动的影响下易扩展贯通从而导致岩体失稳破

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51379113);国家重点研发计划专项项目(2016YFC0600803)

收稿日期:2017-03-06

\*通讯作者(E-mail: shuchenli@sdu.edu.cn)

坏, 进一步造成塌方、大变形等工程灾害<sup>[1-2]</sup>。因此, 开展裂隙岩石裂纹扩展机制、变形破坏规律研究具有重大的工程意义和理论价值。

近年来, 许多学者都对裂隙岩石的力学特性开展过研究。Dyskin 等<sup>[3-4]</sup>、Lee 等<sup>[5]</sup>进行了单、双裂隙的常规单轴压缩裂隙扩展研究, 分析了单、双裂隙的扩展形式。蒲成志等<sup>[6]</sup>通过开展裂隙岩石加载试验, 探索了单轴加载条件下裂隙密度等对岩石材料破坏强度的影响规律, 建立了应变软化模型并利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟了其破坏形式。Manouchehrian 等<sup>[7]</sup>则应用 PFC<sup>2D</sup> 开展了双轴压缩数值模拟试验, 分析了侧向压力对单裂隙岩样裂纹起裂—扩展—贯通过程的影响。黄彦华等<sup>[8]</sup>开展了砂岩相似材料的准三轴压缩试验, 分析研究了双裂隙类砂岩材料的强度特性及破坏失稳模式。陈新等<sup>[9]</sup>制作了含一组张开裂隙的类岩石试件, 通过单轴压缩试验, 系统地分析了节理产状与连通率对岩体峰值强度及试件破坏过程的影响。杨洁等<sup>[10]</sup>、刘欣宇等<sup>[11]</sup>则开展了裂隙岩石的节理面剪切试验, 分析研究了裂隙形状、尺寸与岩石弹性模量、黏聚力、内摩擦角的关系。袁小青等<sup>[12]</sup>、孙熙震等<sup>[13]</sup>、柴红保等<sup>[14]</sup>研究了三维裂纹的传播规律与贯通机制及损失演化模型, 指出裂纹深度影响裂隙岩石的破坏模式, 不同的裂纹深度其破坏模式不同。目前针对裂隙岩石的研究更多的是针对裂隙的形状、大小、位置等对岩石破裂过程的影响, 并未考虑裂隙岩石本身的尺寸效应, 现有考虑岩石自身尺寸效应的研究多局限于完整岩石<sup>[15-18]</sup>, 且前人所采用的室内试验研究方法只能获取岩样某点的应力应变, 无法获得岩样表面的全场应力-应变结果。

因此, 本文为了全面深入地研究试件尺寸与裂隙倾角对裂隙岩石损伤破坏机理的影响, 基于光弹性贴片法, 利用反射式光弹仪, 开展含不同倾角裂隙的多尺寸岩石变形破坏单轴压缩试验。在不断加载的过程中, 光弹性贴片会产生不同的彩色条纹带, 通过彩色条纹带的变化呈现裂隙岩石试件损伤破坏的渐进过程。基于光学-应力定律计算得到试件表面全场应力应变, 结合微机控制电液伺服万能试验机测得的应力应变结果, 共同分析裂隙岩石试件尺寸与裂隙倾角对裂隙岩石强度及破坏模式的影响, 研究了裂隙岩石损伤破坏演化特性, 为解决裂隙岩石工程问题提供理论基础。

## 1 试验设计

光弹性贴片法是利用光学双折射原理研究力学问题的一种试验方法。首先将光弹性材料制作的厚度为 1~3 mm 的贴片黏贴到试件表面, 当试件受力变形时,

表面的光弹性贴片随着试件共同受力变形。然后通过分析贴片的光学变化得到试件表面的全场应力应变。此方法已成功应用于航空航天、医学、建筑等多个行业的力学试验研究<sup>[19-21]</sup>。

### 1.1 试验准备

本试验制作了砂岩的相似试件, 根据相似原理试件采用#425 普通硅酸盐水泥、砂子、水、减水剂按照 1:2.6:0.38:0.02 的比例进行配比<sup>[22]</sup>。按照以上比例配制的标准圆柱体完整试样与砂岩的相似度满足相似要求, 其物理力学参数如表 1 所示。采用厚度为 0.25 mm 的硬纸片编织的方格网来制作裂隙(如图 1 所示), 振荡前插入, 裂隙倾角分别为 30°, 45°, 60°, 岩样尺寸如表 2 所示<sup>[23]</sup>。

表 1 试样和砂岩的物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of specimen and sandstone

介质	试件密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	单轴抗压强度 /MPa	单轴抗拉强度 /MPa	压缩弹性模 /GPa	泊松比
模型	2.24	42.3	5.7	6.75	0.21
砂岩	2.20~2.71	20~170	4~25	4~68	0.1~0.3

为了对比分析, 试验还制作了每一尺寸下的完整岩样, 因此根据不同尺寸及裂隙倾角岩样共分为 28 组, 每组 3 个, 总计 84 个试件。岩样制作过程为: 按比例配置材料—搅拌机搅拌均匀—将均匀的混合料倒入模具中—振动去泡—养护 24 h 拆模—标准养护 28 d。养护后的岩样如图 2 所示。为方便试验结果的处理, 将试件进行编号, 例如 “A-1.0-30°” 第一个字母表示岩样 A (尺寸 5 cm×5 cm×5 cm), 第二个数值表示高宽比为 1.0, 第 3 个表示预制裂隙倾角为 30°。



图 1 预制裂隙

Fig. 1 Pre-cracked fissures

光弹性贴片采用 Vishay precision group 生产的 PS-A 贴片 (如图 3 所示), 贴片厚度为 3.2 mm, 贴片

弹性模量  $E_c=2.482 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.38$ , 应变条纹值  $f_e=710 \times 10^{-6} \text{ cm/条}$ 。根据裂隙岩石试件尺寸, 将已有贴片切割为合适尺寸后黏贴于岩样表面, 黏结剂选用 Vishay precision group 生产的配套黏结剂, 如图 3 所示。

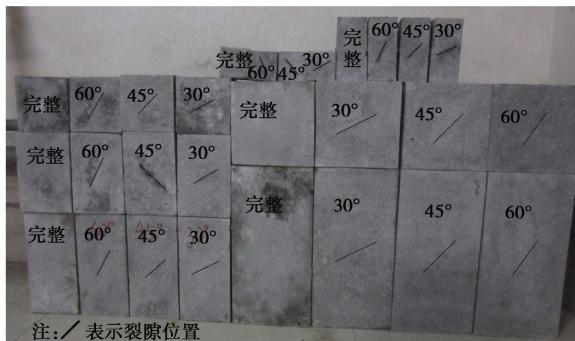


图 2 试验制作的岩样

Fig. 2 Model of rocks samples

表 2 岩样尺寸参数

Table 2 Sizes of rock samples

尺寸 /cm	岩样 A	岩样 B	岩样 C	岩样 D	岩样 E	岩样 F	岩样 G
长	5	5	10	10	10	15	15
宽	5	5	10	10	10	15	15
高	5	10	10	15	20	15	30

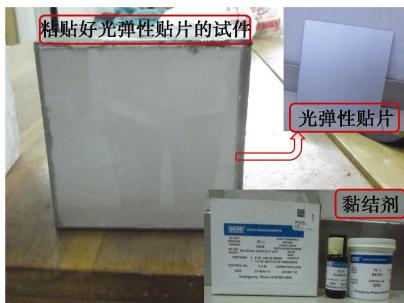


图 3 光弹性贴片及黏结剂

Fig. 3 Photoelastic coating and adhesive plaste

## 1.2 试验过程

试验加载系统采用 WAW-1000C 微机控制电液伺服万能试验机, 光弹仪采用 Vishay precision group 生产 Photostress plus system 反射式光弹仪, 试验过程如下:

(1) 将试件放置于试验机下承压板上, 使试件中心对齐下承压板的中心。然后缓缓下降压力试验机的上承压板, 使上承压板与岩石试件上表面有轻微接触。

(2) 架立反射式光弹仪, 调整镜头高度、角度等, 并测试其可靠性。

(3) 启动试验机, 采用速率为 5 mm/min 的位移控制方式加载负荷至 1 kN, 而后更改加载速率为 0.5

mm/min 进行加载, 整个试验过程利用数码相机在光弹仪后面记录加载过程中的条纹图像, 同时计算机自动采集记录应力 - 应变全过程, 整体试验系统如图 4 所示。

本试验对每个倾角裂隙与岩石尺寸试件系列, 进行了完全相同试验条件的重复试验, 每个系列重复 3 次, 选取平均值作为该角度和尺寸试件的代表试验结果。



图 4 光弹性试验系统

Fig. 4 Photoelastic experiment system

## 2 试验结果分析

### 2.1 裂隙岩石强度及变形特性

图 5 为试验岩样的应力 - 应变曲线, 由图中可以看出: 裂隙试件与完整试件的应力应变曲线可分为弹性阶段, 塑性阶段, 峰后软化阶段。以图 5 (b) 中的岩样 B 为例, 其应力应变曲线分为直线 OA 段、曲线 AB 段、曲线 BD 段。OA 段为岩样的弹性阶段, A 点为屈服点; AB 段为峰前塑性阶段, B 点为峰值点; BD 段为峰后软化阶段, D 点为岩样破坏失稳点。根据能量守恒定律及应变能密度理论, 岩样在弹性阶段无损伤, 损伤从屈服点开始, 因此定义 A 点为试件开始损伤点。观察曲线 BD, 发现峰后软化阶段中出现了斜率突变点, 即 C 点, 在 C 点之前曲线下降速率较小, C 点之后曲线下降速率突然增大, 同时结合文献[22, 24]的研究结论, 认为 C 点为岩样裂纹宏观贯通点。分析图 5 曲线可知: 在一定裂隙倾角下, 裂隙试件峰值强度与其所对应的应变均随着试件高宽比的增加而减小, 而其峰前曲线上升斜率与峰后曲线下降斜率均随着高宽比的增加而增加, 说明随着试件高宽比的增加, 裂隙试件的单轴抗压能力减小, 但峰前弹性模量呈现增加趋势, 并且在达到峰值强度后的破坏更具有突然性, 即试件的峰后脆性增强。

图 6 为一定高宽比条件下, 裂隙岩样与完整岩样的峰值强度。从图中可以看出, 单轴压缩条件下, 完

整岩样的峰值强度最大, 裂隙倾角减弱了岩石试件的抗压能力, 且倾角越大裂隙岩石的抗压能力越大。这是因为倾角较小时, 岩样的峰值强度主要由裂隙剪切面的摩擦力提供, 而裂隙倾角较大时, 岩样的强度主要依赖岩石本身强度, 裂隙倾角弱化了岩石的整体强度。

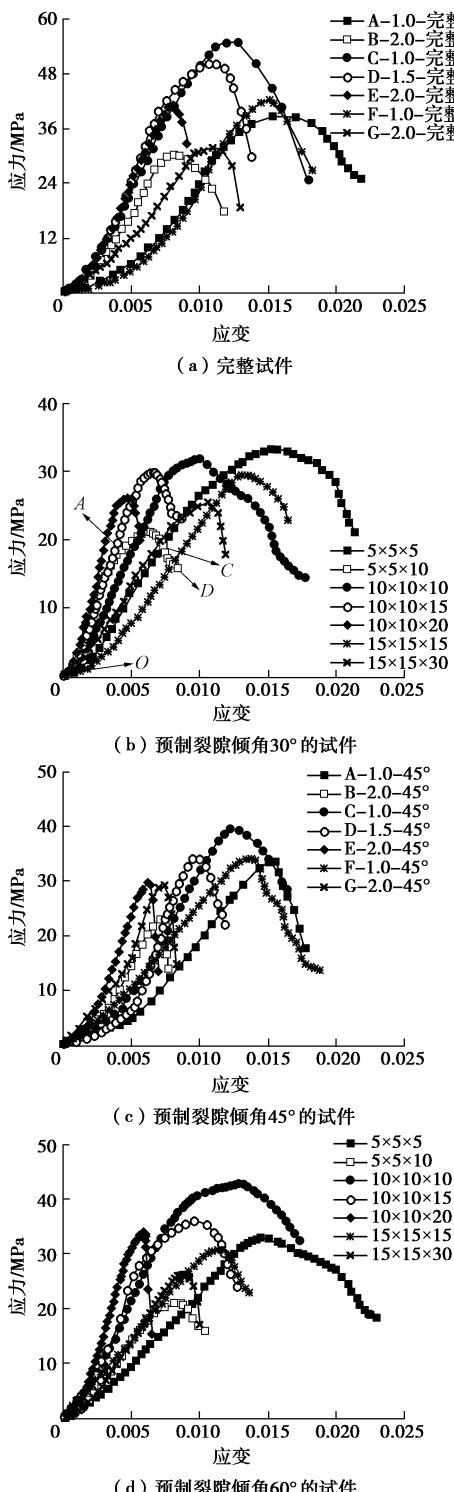


图5 不同岩样的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain relationship curves of rock samples

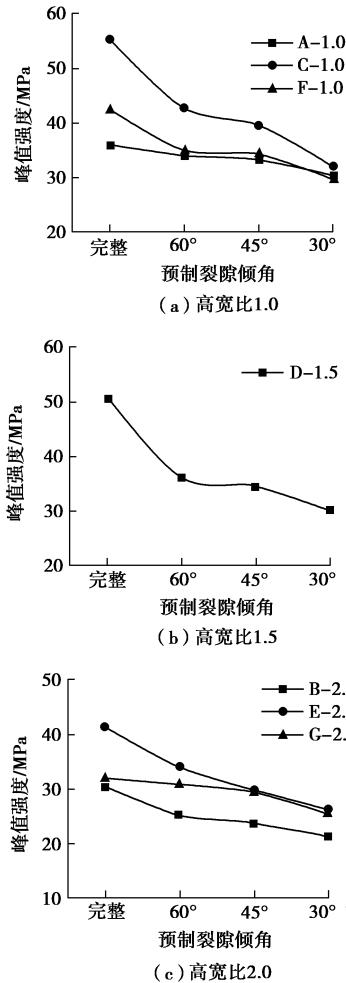


图6 一定高宽比条件下不同倾角裂隙岩样的峰值强度曲线

Fig. 6 Curves of peak intensity of fractured rock with different depth-width ratios

## 2.2 裂隙岩石裂纹扩展过程

由于篇幅有限, 本文以裂隙倾角为30° 岩样B(尺寸为5 cm×5 cm×10 cm)的光弹性试验结果分析裂隙岩石裂纹损伤—扩展—贯通—失稳过程。由应力 - 光性定律得到岩样裂隙开始损伤扩展时的条纹级数与岩样破坏时的条纹级数<sup>[25]</sup> :

$$N_{\max} = \frac{2(1+\nu_u)h_c}{\left[1 + \frac{h_c E_c (1+\nu_u)}{h_u E_u (1+\nu_c)}\right] f_\varepsilon} \nu_u \varepsilon \quad . \quad (1)$$

式中  $h_c$ 、 $E_c$ 、 $\nu_c$  分别为光弹性贴片的厚度、弹性模量、泊松比;  $h_u$ 、 $E_u$ 、 $\nu_u$  分别为岩样的高度、弹性模量、泊松比, 根据试验  $E_u = 5.12$  GPa,  $\nu_u = 0.18$ ;  $f_\varepsilon$  为光弹性贴片的材料应变条纹值。

当  $\varepsilon$  为应力 - 应变曲线 A 点所对应的应变时得到裂隙开始损伤扩展时的条纹级数为

$$N_{\max 1} = \frac{2(1+\nu_u)h_c}{\left[1 + \frac{h_c E_c (1+\nu_u)}{h_u E_u (1+\nu_c)}\right] f_\varepsilon} \nu_u \varepsilon_A =$$

$$\begin{aligned} & \frac{2 \times (1 + 0.18) \times 0.32 \times 0.18}{\left[ 1 + \frac{0.32 \times 2.482(1 + 0.18)}{5 \times 5.12(1 + 0.38)} \right] \times 7.10 \times 10^{-4}} \times 0.00413 \\ & = 0.776 \quad . \end{aligned} \quad (2)$$

当  $\varepsilon$  为应力 - 应变曲线  $C$  点所对应的应变时得到试件裂隙贯通时的条纹级数为

$$\begin{aligned} N_{\max 2} &= \frac{2(1 + \nu_u)h_c}{\left[ 1 + \frac{h_c E_c(1 + \nu_u)}{h_u E_u(1 + \nu_c)} \right] f_\varepsilon} \nu_u \varepsilon_C = \\ & \frac{2 \times (1 + 0.18) \times 0.32 \times 0.18}{\left[ 1 + \frac{0.32 \times 2.482(1 + 0.18)}{5 \times 5.12(1 + 0.38)} \right] \times 7.10 \times 10^{-4}} \times 0.00729 \\ & = 1.37 \quad . \end{aligned} \quad (3)$$

由光弹性仪彩色序列知<sup>[25]</sup>, 当彩色条纹级数  $N_{\max 1} = 0.776$  时, 其所对应的颜色介于白色 ( $N=0.45$ ) 和橙黄色 ( $N=0.79$ ) 之间; 当彩色条纹级数  $N_{\max 2} = 1.37$  时, 其所对应的颜色介于蓝绿色 ( $N=1.2$ ) 和绿黄色 ( $N=1.38$ ) 之间。因此, 当贴片上的颜色由白色变为橙黄色时, 裂隙开始损伤扩展, 当贴片上的颜色由蓝变为绿黄时, 试件裂隙贯通。当贴片上的颜色呈现出贴片原有的银色时, 试件完全破坏。试件裂纹损伤—

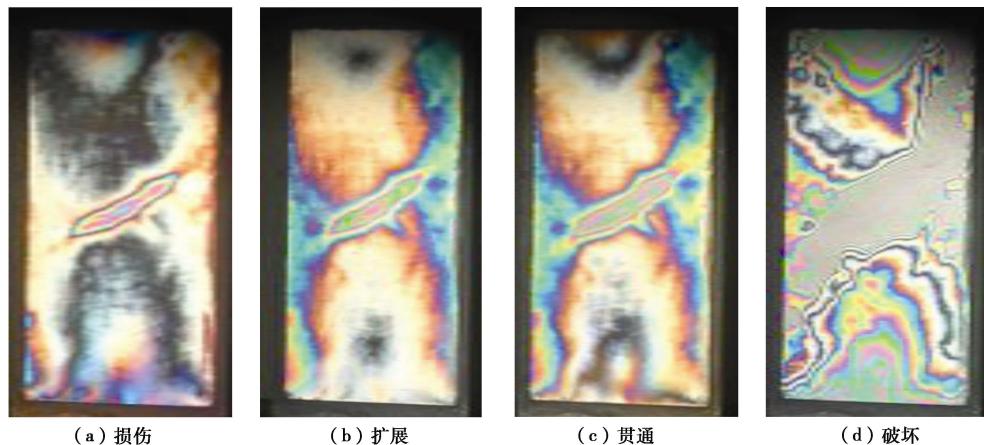


图 7 岩样裂隙扩展—贯通—破坏过程的光弹性显示

Fig. 7 Crack propagation-coalescence-failure process of rock samples shown in photoelastic coating

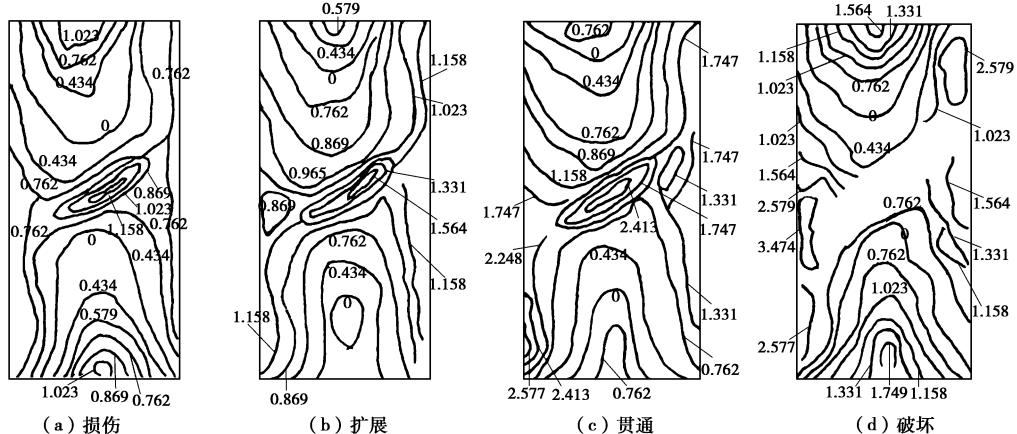


图 8 裂隙扩展破坏过程试件表面的主应变场/ $10^{-3}$

Fig. 8 Distribution of principal strain of sample surface in crack propagation-coalescence-failure process/ $10^{-3}$

扩展—破坏过程的光弹性显示如图 7 所示, 图中不同的颜色代表试件表面不同的应力应变, 即不同的损伤破坏程度, 图 7 (a) 对应应力应变曲线中的  $A$  点, 图 7 (c) 对应应力应变曲线中的  $C$  点, 图 7 (b) 为应力应变曲线  $AC$  之间损伤扩展的某一点, 图 7 (d) 为试件裂纹宏观贯通后迅速破坏的失稳状态。

当光弹性贴片黏结在试件表面时, 试件的表面应力应变即通过胶黏剂传递给贴片, 忽略贴片厚度的影响, 由光学 - 应力定律得<sup>[25]</sup>

$$\varepsilon_{u1} - \varepsilon_{u2} = \frac{1}{C_1} (\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2}) = \left[ 1 + \frac{h_c E_c(1 + \nu_u)}{h_u E_u(1 + \nu_c)} \right] \frac{Nf_\varepsilon}{2h_c} \quad . \quad (4)$$

单轴压缩条件下:

$$\varepsilon_1 = \left[ 1 + \frac{h_c E_c(1 + \nu_u)}{h_u E_u(1 + \nu_c)} \right] \frac{Nf_\varepsilon}{2h_c(1 + \nu_u)} \quad , \quad (5)$$

$$\sigma_1 = E_u \varepsilon_1 = \left[ 1 + \frac{h_c E_c(1 + \nu_u)}{h_u E_u(1 + \nu_c)} \right] \frac{E_u Nf_\varepsilon}{2h_c(1 + \nu_u)} \quad . \quad (6)$$

由此计算得到单轴压缩条件下岩样裂隙扩展破坏过程中的主应变差与主应力差变化示意图, 如图 8, 9 所示。

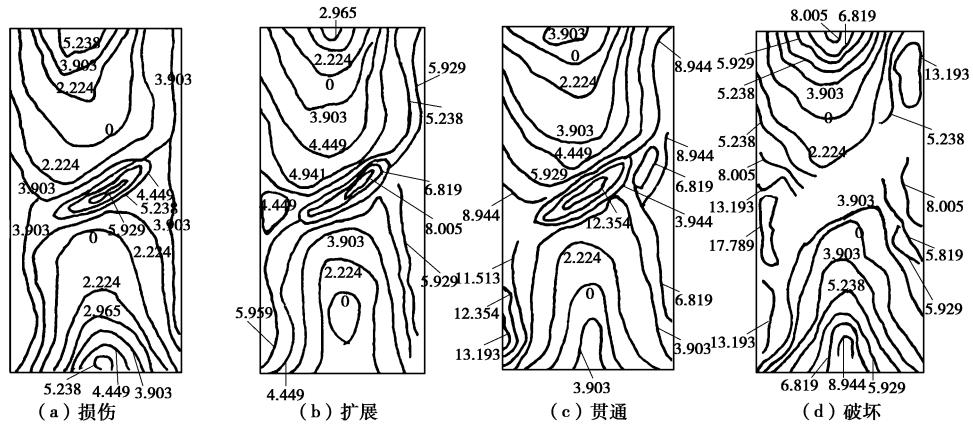


图 9 裂隙扩展破坏过程试件表面的主应力场

Fig. 9 Distribution of principal stress of sample surface in crack propagation-coalescence-failure process

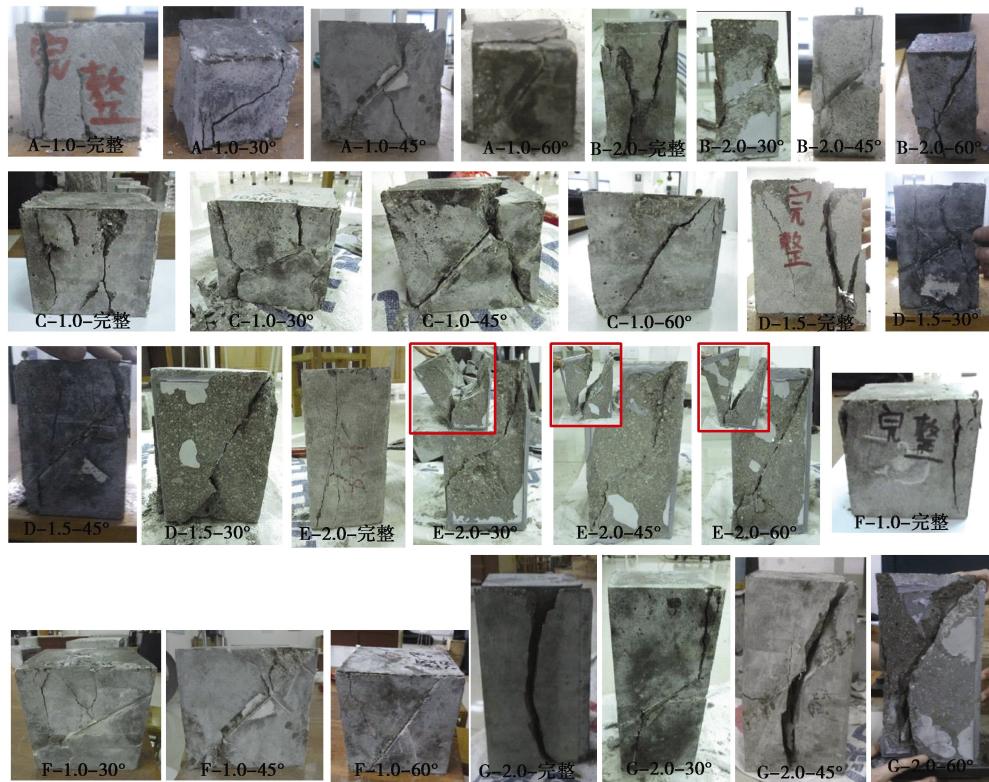


图 10 不同岩样的破坏模式

Fig. 10 Failure modes of rock samples

从图 8, 9 的“损伤”、“扩展”中可以看出最大应变与应力分布在预制裂纹中心, 损伤首先从预制裂纹处发生, 随着加载的不断进行, 最大应变与应力的位置转变为裂纹的两端, 裂纹进入扩展阶段, 在此过程中裂纹逐渐向平行于轴向加载方向发展。对于“(b) 扩展”图中试件端部应力出现的减小现象是因为裂纹损伤开始扩展时应力重分布引起的。图“贯通”中裂隙中心及两端应变与应力继续增加, 裂隙向试件上下两端延伸到试件端部, 裂纹贯通。图“破坏”中裂隙贯通方向的应力应变迅速增加, 以裂隙为中心出现宏观断裂, 同时试件两端的应变值显著增加, 试块端部

出现破坏, 预制裂隙中心带光弹性显示失效, 试件失稳破坏。

### 2.3 不同尺寸与裂隙倾角的岩石失稳形态

试验岩样单轴压缩条件下的最终破坏模式如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 不同尺寸的完整试件均呈现劈裂破坏, 高宽比越大劈裂特征越明显。高宽比小于为 1.0 或 1.5 时, 完整岩石试件轴向出现多条劈裂线, 试件表面及边缘被压裂剥落。裂隙试件的尺寸与裂隙倾角共同影响裂纹贯通破坏模式: 倾角越大, 高宽比对破坏模式的影响呈减小趋势。裂隙倾角为 30°, 45° 时, 随着高宽比的增大劈裂作用越显著; 裂隙倾

角为  $60^\circ$  时, 试件的最终破坏模式基本不受高宽比影响, 均发生沿预制裂隙面的剪切破坏。当高宽比一定时, 随着裂隙倾角的增加破坏模式由劈裂变为剪切破坏。裂隙倾角为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  的试件为劈裂和剪切破坏混合模式; 裂隙倾角为  $60^\circ$  的试件主要沿预制裂隙面破坏, 试件破碎为两块, 在已破坏的试件中能清晰地看到破坏面摩擦的痕迹, 此时岩石强度主要为裂隙面强度。

### 3 结 论

通过开展不同试件尺寸与裂隙倾角的光弹性试验, 分析研究了压缩条件下岩石裂隙损伤扩展破坏特性, 得到以下 4 点主要结论。

(1) 裂隙岩石单轴压缩的应力 - 应变曲线的变化形状与完整岩石相似, 均分为 3 个阶段, 分别为弹塑性变形阶段、软化阶段、残余阶段。但裂隙岩石应力应变曲线峰后软化阶段的斜率比完整岩石试件的大, 且出现了斜率变化明显的转折点, 此时岩石裂隙贯通。

(2) 试件尺寸影响裂隙岩石的强度, 随着试件高宽比的增加, 裂隙岩石的峰前弹性模量呈现增加趋势, 但单轴抗压强度减小。在一定倾角范围内, 裂隙岩石试件的峰值强度随着裂隙倾角的减小而减小, 裂隙岩石试件峰后曲线下降速度随着裂隙倾角与高宽比的增加而增大, 即岩石的破坏随着裂隙倾角与高宽比的增加越来越突然, 脆性越来越显著。

(3) 利用光弹性贴片直观形象地观察到裂隙岩石破坏失稳的全过程, 基于光学 - 应力定律得到裂隙岩石损伤破坏过程中试件表面的全场应力应变, 分析了裂隙岩石损伤贯通失稳的全场应力应变演化过程。

(4) 裂隙倾角与试件尺寸共同决定了岩石的破坏模式, 裂隙倾角为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  的试件为劈裂和剪切破坏混合模式; 裂隙倾角为  $60^\circ$  的试件主要为剪切滑移破坏。高宽比对裂隙岩石破坏模式的影响较复杂, 裂隙倾角为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  时, 随着高宽比的增大劈裂作用越显著, 裂隙倾角为  $60^\circ$  时, 其最终破坏模式基本不受高宽比影响。

### 参 考 文 献:

- [1] 周磊, 朱哲明, 刘邦. 隧道周边不同位置径向裂纹对隧道围岩稳定性影响规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1230 - 1237. (ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang. Influence of radial cracks on stability of surrounding rocks at different locations around tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1230 - 1237. (in Chinese))
- [2] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 695 - 706. (CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 695 - 706. (in Chinese))
- [3] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N, USTINOV K B. A 3-D model of wing crack growth and interaction[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63(1): 81 - 110.
- [4] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(15): 2115 - 2136.
- [5] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979 - 999.
- [6] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661 - 3666. (PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661 - 3666. (in Chinese))
- [7] MANOUCHEHRIAN A, SHARIFZADEH M, MARJI M F, et al. A bonded particle model for analysis of the flaw orientation effect on crack propagation mechanism in brittle materials under compression[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(1): 40 - 52.
- [8] 黄彦华, 杨圣奇. 断续裂隙类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 28(7): 1212 - 1220. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Experimental study on mechanical behavior of rock-like materials containing pre-existing intermittent fissures under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 28(7): 1212 - 1220. (in Chinese))
- [9] 陈新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781 - 789. (CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, LI De-jian. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 781 - 789. (in Chinese))
- [10] 杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 884 - 894. (YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 884 - 894. (in Chinese))
- [11] 刘 欣, 刘爱华, 李夕兵. 充填柱状节理类岩石材料的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 3(4): 772 - 777. (LIU Xin, LIU Ai-hua, LI Xi-bing. Experimental study of columnar jointed sandstone-like material with preset filling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 3(4): 772 - 777. (in Chinese))
- [12] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 非贯通裂隙岩体三维复合损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 91 - 99. (YUAN Xiao-qing, LIU Hong-yan, LIU Jing-ping. 3-D constitutive model for rock masses with non-persistent joints based on compound damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 91 - 99. (in Chinese))
- [13] 孙熙震, 李杨杨, 江 宁, 等. 类岩石材料三维裂纹传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 965 - 972, 980. (SUN Xi-zhen, LI Yang-yang, JIANG Ning, et al. Experimental study of 3D crack propagation characteristics in rock-like materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 965 - 972, 980. (in Chinese))
- [14] 柴红保, 曹 平, 赵延林, 等. 裂隙岩体损伤演化本构模型的实现及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1047 - 1053. (CHAI Hong-bao, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Implementation and application of constitutive model for damage evolution of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1047 - 1053. (in Chinese))
- [15] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112 - 118. (YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112 - 118. (in Chinese))
- [16] 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 981 - 990. (WANG Qing-yuan, ZHU Wan-cheng, LIU Hong-lei, et al. Size effect of long-term strength of sandstone under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 981 - 990. (in Chinese))
- [17] 靖洪文, 苏海健, 杨大林, 等. 损伤岩样强度衰减规律及其尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 543 - 549. (JING Hong-wen, SU Hai-jian, YANG Da-lin, et al. Study of strength degradation law of damaged rock sample and its size effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 543 - 549. (in Chinese))
- [18] 梁昌玉, 李 晓, 吴树仁. 中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的能量特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3472 - 3480. (LIANG Chang-yu, LI Xiao, WU Shu-ren. Research on energy characteristics of size effect of granite under low/intermediate strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3472 - 3480. (in Chinese))
- [19] 董 伟, 何化南, 吴智敏, 等. 光弹贴片法研究混凝土 I - II 复合型裂缝扩展过程[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 41 - 48. (DONG Wei, HE Hua-nan, WU Zhi-min, et al. Experimental investigation on double-K fracture parameters for small size specimens in concrete[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 41 - 48. (in Chinese))
- [20] 范亚楠, 毛灵涛, 周 凯. 含预制裂纹岩石断裂的光弹性贴片法研究[C]// 北京: 北京力学会出版社, 2012. (FAN Ya-nan, MAO Ling-tao, ZHOU Kai. Photoelastic experimental investigation on fracture parameters in fissured rock[C]// Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics Press, 2012. (in Chinese))
- [21] NOWAK T P, JANKOWSKI L J, JASIENKO J. Application of photoelastic coating technique in tests of solid wooden beams reinforced with CFRP strips[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, 10(2): 53 - 66.
- [22] 平 洋. 峰后岩体宏细观破裂过程数值模拟方法及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. (PING Yang. Numerical simulation method of macro-mesoscopic failure process of post-peak rock mass and its application[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))
- [23] SINAIE S, HEIDARPOUR A, ZHAO X L. Effect of size on the response of cylindrical concrete samples under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84(6): 399 - 408.
- [24] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 59: 57 - 69.
- [25] 赞德曼 F, 雷德诺 S, 戴利 J W. 光弹性贴片法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978. (ZANDMAN F, REDNER S, DALY J W. The photo-elastic coating method[M]. Beijing: China Machine Press, 1978. (in Chinese))