

DOI: 10.11779/CJGE201607007

断续裂隙类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究

黄彦华¹, 杨圣奇^{1,2}, 鞠 杨¹, 周小平³, 高 峰²

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院,

江苏 徐州 221116; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 研究三向应力作用下裂隙对岩石力学特性的影响对于确保裂隙岩体工程稳定具有重要的实践意义。通过配制含两条不平行张开贯穿型裂隙类砂岩试样, 采用 MTS815.02 岩石力学伺服试验机进行不同围压下常规三轴压缩试验。基于试验结果, 详细分析了完整及断续不平行双裂隙类岩石材料的应力-应变曲线、强度和变形参数以及破裂模式。研究表明: ①断续裂隙岩样应力-应变曲线呈现多台阶式软化, 部分曲线出现双峰值现象; ②完整及断续裂隙岩样峰值强度、裂纹损伤阈值和峰值应变均随着围压的增大呈线性增大。完整岩样峰值强度对围压的敏感程度最高, 而断续裂隙岩样中由倾角 45°, 30° 和 60° 依次减小; ③断续裂隙岩样宏观破裂模式受裂隙倾角和围压的共同作用。当围压较小时, 破裂形态受裂隙倾角的影响较大; 当围压增大到一定程度后, 裂隙倾角的影响逐渐减弱, 围压的作用开始显现, 岩样最终呈剪切破坏模式。

关键词: 岩石力学; 不平行双裂隙; 强度特征; 破裂模式; 围压

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1212-09

作者简介: 黄彦华 (1989-), 男, 福建龙岩人, 博士研究生, 主要从事断续裂隙岩石力学特性及地下工程稳定控制方面的研究工作。E-mail: huangyh1219@163.com。

Experimental study on mechanical behavior of rock-like materials containing pre-existing intermittent fissures under triaxial compression

HUANG Yan-hua¹, YANG Sheng-qi^{1,2}, JU Yang¹, ZHOU Xiao-ping³, GAO Feng²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou

221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: It is of important practical significance for ensuring the stability of fractured rock engineering to investigate the influence of pre-existing fissures on the mechanical behavior of rock under three-dimensional stress. The rock-like material specimens containing two unparallel open penetrating fissures are fabricated in the laboratory. And then a series of conventional triaxial compressive tests on rock-like material specimens are carried out by using the MTS815.02 rock mechanics servo-controlled testing system. On the basis of experimental results, the stress-strain curves, strength and deformation parameters and failure modes are analyzed. The main conclusions are drawn as follows: (1) The stress-strain curves of pre-fissured specimens show multi-step softening, and some curves have two peak strengths; (2) The peak strength, crack damage threshold and peak axial strain of intact and pre-fissured specimens all increase linearly with the increase of confining pressure. The sensitivity to the confining pressure of intact specimen is the highest, and the sensitivity of pre-fissured specimens decreases from fissure angle 45° to 30° and then to 60°; (3) The failure modes of pre-fissured specimens are determined by the fissure angle and confining pressure. When the confining pressure is smaller, it is mainly affected by the fissure angle. Whereas the confining pressure is higher, which is mainly influenced by the confining pressure, and the rock specimens exhibit a shear mode.

Key words: rock mechanics; two unparallel fissures; strength property; failure mode; confining pressure

0 引 言

在工程岩体中普遍含有各种尺度的节理裂隙, 节理裂隙对岩石的力学特性具有显著的影响, 岩石的失稳破坏也与这些节理裂隙具有密切的关系。因此, 研

究节理裂隙对岩石强度变形特性和破坏特征的影响具

基金项目: 江苏省杰出青年基金项目 (BK20150005); 国家自然科学基金面上项目 (41272344); 2014 江苏省双创团队项目

收稿日期: 2015-06-25

*通讯作者

有重要意义。人们对单轴压缩下含有不同裂隙密度、裂隙长度、裂隙倾角、岩桥长度和岩桥倾角等断续裂隙岩石进行了广泛的研究^[1-5], 这对于初步认识裂隙断续裂隙岩石力学特性和裂纹扩展机制有很大的帮助。

但是, 实际岩体往往处于三向应力状态下, 研究双轴及三轴作用下的裂纹贯通机制更为重要。为此, 黄凯珠等^[6]采用重晶石、沙和石膏等配制了类岩石材料, 并预制了 3 条平行裂隙进行了双轴压缩试验, 结果表明裂纹贯通模式受侧压和裂隙分布的影响。肖桃李等^[7]采用高强硅粉砂浆配制了大理岩模型材料, 进行了不同围压下单裂隙岩样常规三轴压缩试验, 并用断裂力学原理分析了单裂隙岩体沿结构面剪切破坏的影响因素。接着, 肖桃李等^[8]开展了双裂隙岩样在三轴压缩试验研究, 结果表明在三轴压缩下反向翼裂纹为主要的裂纹类型。Yang 等^[9]在大理岩中预制双裂隙进行了三轴压缩试验, 结果显示随着围压的增大岩样表现脆一延一塑性转化特征, 破裂模式也随着围压的变化而改变。杨圣奇等^[10]分析了断续裂隙大理岩三轴压缩下峰值强度、裂纹损伤阈值、长期内摩擦角和黏聚力与围压及裂隙倾角之间的关系。Liu 等^[11]对含有 3 条共面裂隙类岩石材料进行了真三轴试验, 试验结果表明在低围压作用下次生裂纹从原始预制裂隙尖端以较大的起裂角开始扩展, 而高围压下裂纹的扩展更容易以平行于轴向扩展。随着计算机技术的发展, 借助数值模拟方法也开展了大量的断续裂隙岩石裂纹起裂、扩展和贯通特征研究。Huang 等^[12]对含两条裂隙砂岩三轴试验结果采用 AUTODYN 进行了验证, 模拟结果表明裂纹一般从裂隙内尖端起裂并引起裂隙间直接剪切贯通。Wang 等^[13]采用 RFPA^{3D} 分析了岩样非均质性和裂隙参数对岩石强度及破坏特征的影响。Manouchehrian 等^[14]采用 PFC^{2D} 进行了含单裂隙岩样双轴压缩模拟, 模拟结果表明侧压会影响裂纹的起裂和贯通模式。方前程等^[15]对含共面双裂隙类岩石材料进行了双轴压缩模拟, 模拟结果表明在低围压下, 裂隙对破裂形态占主导地位, 而在高围压作用下, 围压的作用逐渐增大, 裂隙的作用减弱。黄彦华等^[16]采用 PFC^{2D} 对含非共面双裂隙红砂岩进行了不同侧压双轴压缩试验模拟, 分析了围压和岩桥倾角对裂隙岩石的力学行为的影响规律。

上述的研究仅涉及平行分布裂隙, 而实际工程中裂隙的分布往往是不平行的。Yang 等^[17]、Lee 等^[18]、Haeri^[19]和蒋明镜等^[20]对不平行双裂隙岩样单轴压缩进行了初步研究, 张社荣等^[21]对不平行双裂隙岩样进行了双轴压缩颗粒流模拟分析。然而, 对于含有不平行裂隙类岩石材料试样的三轴试验研究成果还未见报道。鉴于此, 本文首先配制一组类岩石材料并预制断

续不平行双裂隙, 采用 MTS815 岩石试验系统进行不同围压下常规三轴压缩试验, 基于试验结果分析围压和裂隙倾角对不平行双裂隙岩样强度及变形破坏特征的影响, 以期对含节理裂隙或断层的地下工程建设和运营提供参考。

1 试验材料及程序

1.1 试样制作及材料特性

基于一系列室内配比试验, 本文最终选用 C42.5 水泥: 石英砂: 水=1: 0.8: 0.35 配制砂岩类岩石材料。预制裂隙采用在浇筑混合模型材料前插入薄钢片, 在混合料完全凝固前拔出预埋钢片的方法。薄钢片的宽度为 12 mm, 厚度为 0.8 mm。本文制作的是贯穿型裂隙, 而且裂隙中不充填材料, 类岩石材料的详细制作流程可见文献[22]。对完整类岩石材料进行基本力学参数测试, 所得参数平均值与典型脆性砂岩^[23-24]的对比见表 1。

表 1 类岩石材料与典型脆性砂岩^[23-24]物理力学参数对比

Table 1 Comparison of mechanical properties of rock-like materials and typical brittle sandstone^[23-24]

类别	ρ /(g·cm ⁻³)	σ_c /MPa	E_c /GPa	ν	c /MPa	φ /(°)	σ_t /MPa
R	2.12	63.19	16.98	0.181	22.83	20.50	6.31
S	2.20~2.71	20~170	4~68	0.1~0.3	4~40	25~60	4~25

注: R 表示本文的类岩石材料, 其值为平均值, S 表示砂岩。

为研究裂隙试样的强度变形特征和裂纹扩展规律, 设计了含两条不平行分布裂隙方案, 如图 1 所示。裂隙①水平分布, 长度 $2a=12$ mm; 裂隙②倾斜分布, 长度 $2a=12$ mm, 裂隙②与水平方向的夹角 α , 分别为 30° 、 45° 和 60° ; 岩桥为裂隙①中部与裂隙②上尖端之间的连线, 长度 $2b=16$ mm, 倾角 $\beta=90^\circ$ 。

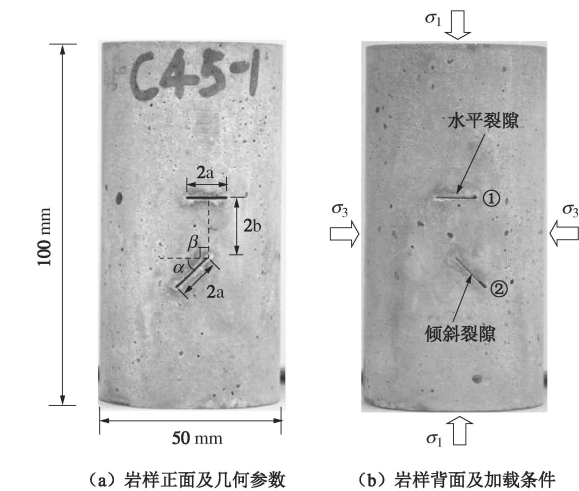


图 1 断续不平行双裂隙试样裂隙几何参数

Fig. 1 Geometrical parameters of pre-existing two unparallel fissures

1.2 试验设备及加载程序

完整及断续不平行双裂隙类岩石材料试样常规三轴压缩试验均是在中国矿业大学 MTS815.02 型电液伺服岩石力学试验系统上进行的。试验统一采用位移控制准静态加载方式,加载速率为 0.002 mm/s,围压分别为 5, 10, 15, 25 MPa。

2 力学响应分析

为了避免同组类岩石材料试样之间的差异所引起的离散性掩盖力学特性变化规律,本次试验首先评价了本文预制的类岩石材料之间的差异程度。在加工好的岩样中随机抽取两个完整岩样进行相同围压下常规三轴压缩试验。

图 2 给出了两个完整岩样在围压 25 MPa 作用下的应力-应变曲线。由图 2 可见,两条曲线之间的差异很小,具体表现为: I3 和 I5 两个岩样的最大轴向应力分别为 118.05, 115.17 MPa, 其平均值为 116.61 MPa, 离散度(定义为两个数值之差与平均值的百分比)为 2.50%; 峰值轴向应变分别为 12.625×10^{-3} 和 12.684×10^{-3} , 其平均值为 12.65×10^{-3} , 离散度为 0.55%; 弹性模量分别为 16.56, 16.08 GPa, 其平均值为 16.32 GPa, 离散度为 2.95%。由此可见,该类岩石材料具有较好的一致性,非均质性对岩样力学参数的影响较小,可用于后续相关试验研究。

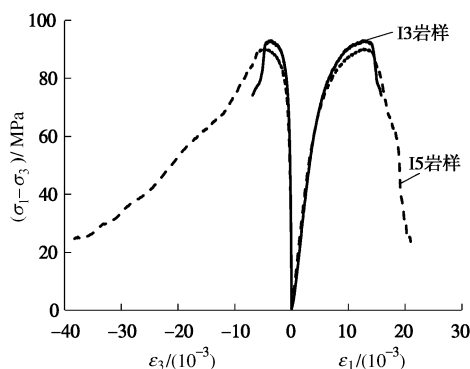


图 2 非均质性对类岩石材料应力-应变曲线的影响

Fig. 2 Effect of heterogeneity on stress-strain curves of rock-like materials

还注意到, I5 岩样残余强度很小,这可能是受到浸油的影响。由于围压较大,当岩样中出现宏观裂纹后,包裹岩样的塑料薄膜易发生破裂,液压油浸入岩样。侵入的液压油一方面起润滑作用,另一方面会减小破裂面的法向应力,从而造成残余强度降低^[25]。后文不再分析残余强度的变化规律。

2.1 应力-应变曲线

图 3 给出了不同围压下完整和断续裂隙岩样三轴压缩应力-应变曲线。如图 3 (a) 所示,对于完整岩样,由于内部微裂隙和孔隙的闭合,应力-应变曲线首先出现一段初始压密阶段。接着进入弹性变形阶段,在

该阶段应力随着应变的增大呈线性增大。之后,应变继续增大,而应力逐渐偏离直线段,进入屈服阶段。应力-应变曲线在峰值强度之后,呈应变软化状态。当应力降低至一定程度后,到达残余强度。而且随着围压的增大,完整岩样的峰值强度逐渐增大,屈服阶段也变得更加明显。与不同围压下完整干燥砂岩三轴应力-应变曲线^[26]比较可见,本文配制的类岩石材料在围压作用下的宏观力学响应特征与真实砂岩相似。

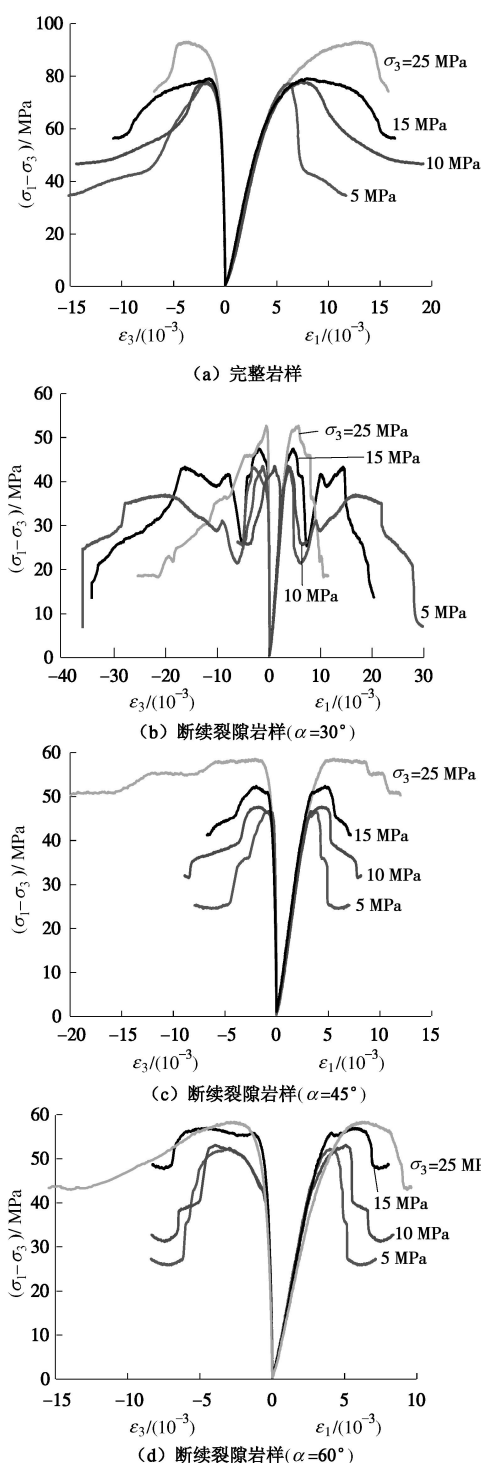


图 3 完整和断续裂隙岩样三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of intact and pre-fissured specimens under triaxial compression

如图 3 (b) ~ (d) 可见, 断续不平行双裂隙岩样三轴压缩下应力 - 应变曲线初始阶段和线弹性变形阶段的总体形态与完整岩样相似。受预制裂隙的影响, 断续不平行双裂隙岩样应力 - 应变曲线屈服阶段以及峰后阶段呈现与完整岩样曲线不同的特点。首先, 如图 3 (b) 所示, 当裂隙倾角为 30° 时, 应力 - 应变曲线在峰值强度附近以及峰后阶段呈现锯齿状。其次, 如图 3 (c) 所示, 当裂隙倾角为 45° 时, 在围压为 5, 10, 15 MPa 作用下断续不平行双裂隙岩样出现双峰值现象, 即应力出现小幅落后后应力继续增大至第二个峰值点, 而且随着围压的增大, 应力出现跌落的幅度逐渐减小, 到围压为 25 MPa 时, 应力在峰前未发生跌落, 这说明了围压有减缓应力跌落的作用, 这与断续双裂隙砂岩常规三轴压缩^[12]观察到的现象相同。再次, 如图 3 (d) 所示, 当裂隙倾角为 60° 时, 与裂隙倾角 45° 相同, 峰后阶段曲线也呈多次台阶式的应力跌落现象。

根据图 3 (a) ~ (d) 所示的应力 - 应变曲线可知, 完整岩样应力 - 应变曲线峰后呈平滑式应变软化, 而断续不平行双裂隙岩样应力 - 应变曲线在峰后阶段呈现锯齿状或者台阶式的应力跌落现象, 这与肖桃李等^[8]和 Huang 等^[12]试验结果相似。分析认为, 这主要是由两方面的原因造成, ①受到预制裂隙对裂纹的产生、扩展和贯通特征的影响, 即应力 - 应变曲线上应力的跌落与裂纹扩展行为相对应^[8]; ②本文配制的类岩石材料为脆性材料, 应力对裂纹的萌生和扩展非常敏感, 试样中一旦有裂纹的产生或扩展, 体现在应力上则对应会发生一次较显著的跌落。但是需要指出的是, 受试验条件的影响, 目前尚无法准确观察到在封闭环境中 (常规三轴压缩试验环境) 裂纹的扩展顺序, 还不能建立裂纹扩展过程与应力 - 应变曲线的对应关系。

2.2 强度特征

图 4 给出了完整和断续裂隙岩样三轴压缩强度与裂隙倾角及围压之间的关系曲线。

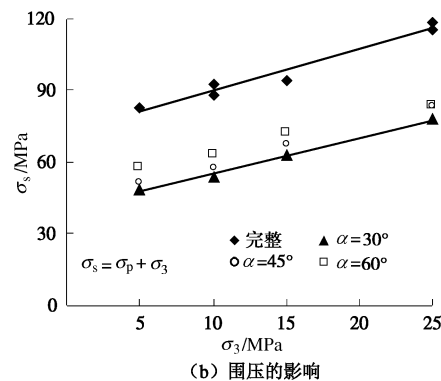
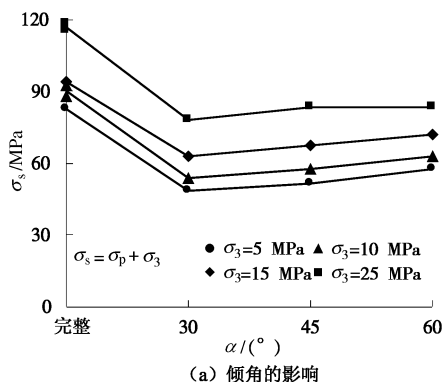


图 4 岩样三轴压缩强度与裂隙倾角、围压关系

Fig. 4 Relationships among triaxial compressive strength, fissure angle and confining pressure

首先, 由图 4 (a) 所示的三轴压缩强度与裂隙倾角关系曲线可见, 在相同围压作用下, 与完整岩样相比, 裂隙岩样的三轴压缩强度均大幅度减小, 这说明了预制裂隙对岩样有较大的初始损伤。然而, 在相同围压下, 随着裂隙倾角的增大, 这种降幅呈减缓趋势, 即随着裂隙倾角的增大, 裂隙岩样的三轴压缩强度逐渐增大, 意味着裂隙岩样强度与裂隙倾角密切相关。三轴压缩强度随裂隙倾角的变化趋势与同组断续裂隙类岩石材料单轴压缩强度变化规律^[22]相同。

其次, 由图 4 (b) 所示的三轴压缩强度与围压关系曲线可见, 当裂隙倾角相同时, 随着围压的增大, 完整和断续裂隙岩样的三轴压缩强度均增大, 可以用线性函数拟合, 拟合关系式为

$$\sigma_s = \begin{cases} 72.18 + 1.74\sigma_3 & (R^2=0.9669, \text{完整}) \\ 39.81 + 1.50\sigma_3 & (R^2=0.9947, \alpha=30^\circ) \\ 42.60 + 1.63\sigma_3 & (R^2=0.9962, \alpha=45^\circ) \\ 50.66 + 1.33\sigma_3 & (R^2=0.9927, \alpha=60^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

根据式 (1) 可见, 线性相关系数 R^2 均近似等于 1, 说明了完整及断续裂隙岩样三轴压缩强度均与围压呈良好的正线性相关。由拟合关系式的斜率可见, 完整及断续裂隙岩样对围压的敏感程度不同, 总体上表现为, 完整岩样三轴压缩强度对围压的敏感程度最高, 而断续裂隙岩样中由于裂隙倾角的不同, 其敏感程度也有所不同。倾角为 45° 岩样时围压敏感性较大, 倾角 30° 时次之, 而倾角 60° 时最小。

众所周知, Coulomb 准则是岩土工程中应用最广泛的强度理论之一。根据 Coulomb 准则可以求得黏聚力和内摩擦角。根据三轴压缩强度线性拟合关系式 (1), 求得完整和断续裂隙岩样黏聚力和内摩擦角, 如图 5 所示。由图 5 可见, 断续裂隙岩样的黏聚力和内摩擦角均小于完整岩样, 而且随着裂隙倾角的增大, 黏聚力先增大后减小, 而内摩擦角则呈增大趋势。需

要说明是, 图 5 中完整岩样黏聚力和内摩擦角与表 1 中有所不同, 是因为单轴抗压强度未参与回归计算导致的。

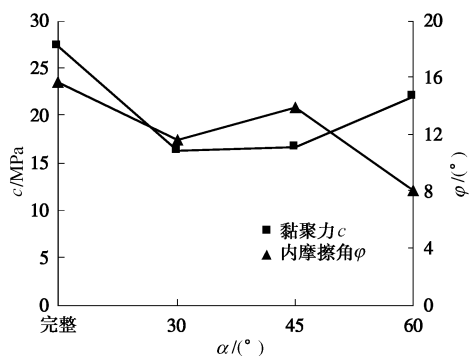


图 5 黏聚力及内摩擦角与裂隙倾角关系曲线

Fig. 5 Relationship among cohesion, internal friction angle and fissure angle

根据轴向应力 - 体积应变曲线, 可以得到裂纹损伤阈值 σ_{cd} 。其中, σ_{cd} 在体积应变曲线上体现为体积压缩的最大值。图 6 给出了完整和断续裂隙岩样裂纹损伤阈值与围压的关系。由图 6 可见, 裂纹损伤阈值与三轴压缩强度的变化趋势相同。断续裂隙岩样的裂纹损伤阈值小于完整岩样, 而且随着裂隙倾角的增大, 断续裂隙岩样的裂纹损伤阈值逐渐增大。完整及断续裂隙岩样的裂纹损伤阈值随着围压的增大而增大, 表现为正线性相关。

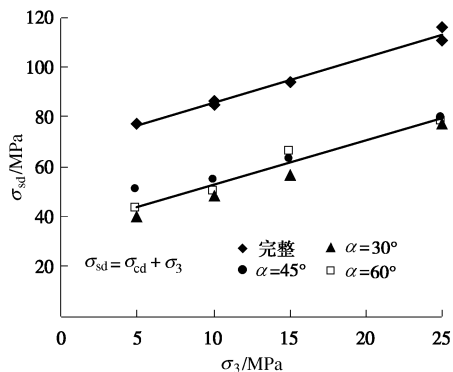


图 6 类岩石材料试样裂纹损伤阈值与围压的关系

Fig. 6 Relationship between crack damage threshold of rock-like material specimens and confining pressure

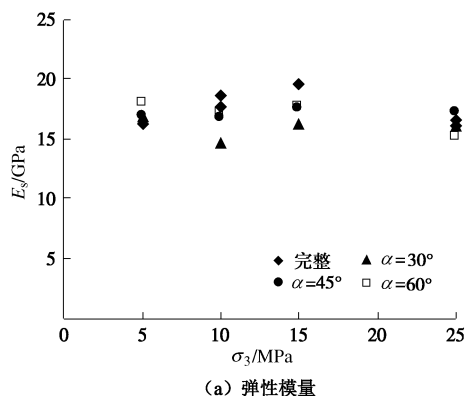
2.3 变形特征

图 7 给出了完整和断续裂隙岩样变形参数与围压、裂隙倾角之间的关系曲线。

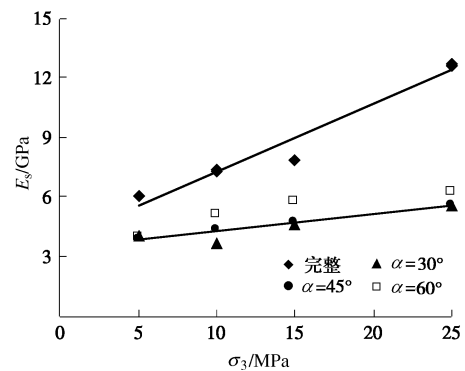
由图 7 (a) 可见, 从整体上看, 弹性模量受围压的影响并不明显。具体表现为在围压为 5~15 MPa 之间, 完整和断续裂隙岩样的弹性模量随着围压的增大有小幅增大趋势, 而当围压为 25 MPa 时, 部分弹性模量有减小的趋势, 这与肖桃李等^[7]和杨圣奇等^[25]

三轴试验部分结果相同。

如图 7 (b) 可见, 完整及断续裂隙岩样轴向峰值应变均随着围压的增大而增大, 而且均可以用线性关系曲线拟合。其中完整岩样在 25 MPa 围压时峰值强度突然增大, 这是因为高围压作用下, 完整岩样出现了一段明显的屈服阶段, 如图 3 (a) 所示。根据线性拟合曲线的斜率, 完整岩样轴向峰值应变对围压的敏感性大于裂隙岩样。



(a) 弹性模量



(b) 轴向峰值应变

图 7 变形参数与围压、裂隙倾角之间关系

Fig. 7 Relationship among deformation parameters, confining pressure and fissure angle

3 破坏特征分析

图 8 给出了完整岩样三轴压缩下最终破坏模式。首先, 由 I4 岩样的前后面的破裂形态可见, 岩样前后两面的破裂模式基本一致的, 这也从一定程度上说明了本文类岩石材料非均质性对试验结果的影响较小。考虑到本文预制的裂隙为贯穿型裂隙, 岩样前后两面的几何形态相同, 因此后续仅分析岩样正面的破裂模式。在 5 MPa 围压作用下, 岩样呈现为轴向拉伸和剪切共同破裂; 在 10 MPa 围压作用下, 岩样有两条剪切破裂面交汇, 形成了 Y 型破裂; 当围压为 15 MPa 时, 围压为 Y 型裂纹, 而 25 MPa 围压下呈 X 型破坏。另外, 随着围压的增大, 主破裂面与轴向之间的夹角有增大趋势, 与 Huang 等^[12]及 Wasantha 等^[26]进

行的真实完整砂岩三轴压缩试验结论一致。

图 9 给出了不同裂隙倾角断续裂隙岩样在不同围压作用下三轴压缩最终破裂模式。结合黄凯珠等^[6]、Yang 等^[17]和 Zhuang 等^[23]对裂纹类型的划分, 本次试验的裂纹主要可以分为翼裂纹、反向翼裂纹、次生裂纹和远场裂纹, 分别在图 9 (a) 中 C30-3 岩样上给予标示。

由图 9 (a) 可见, 在 5 MPa 围压作用下, C30-3 岩样中除远场裂纹外, 其他裂纹均在裂隙尖端萌生, 预制裂隙之间最终发生两次裂纹贯通, 表现为拉伸破坏为主, 局部剪切破坏。在 10 MPa 围压作用下, C30-2 的破裂模式与 C30-3 相差不大, 倾斜裂隙下尖端产生的反向翼裂纹均被裂纹阻隔而没有扩展至岩样边界。当围压增大至 15 MPa 时, C30-4 岩样中倾斜裂隙下尖端反向翼裂纹发展至岩样边界, 裂隙之间也是发生两次贯通, 而岩样整体上呈 Y 型剪切破坏。在围压为 25 MPa 时, C30-1 岩样同样发生两处裂纹贯通, 整体上表现为 Y 型剪切破坏模式。其中部分微裂纹难以直接观察, 对其进行了局部放大, 如图 9 (a) 中 C30-1 岩样局部放大图所示。

由图 9 (b) 可见, 在 5 MPa 围压作用下, C45-2

岩样中预制裂隙之间未发生贯通, 倾斜裂隙下尖端也未产生裂纹。在 10 MPa 围压作用下, C45-3 岩样发生一处裂纹贯通, 倾斜裂隙下尖端反向翼裂纹扩展至岩样边界。当围压增大至 15 MPa 和 25 MPa 时, C45-4 和 C45-1 岩样的破裂模式基本相同, 预制裂隙之间发生两次裂纹贯通, 倾斜裂隙下尖端反向翼裂纹扩展至岩样边界, 最终表现为显著的剪切破坏, 呈 Y 型破坏。

由图 9 (c) 可见, 在 5, 10 MPa 围压作用下, C60-2 岩样和 C60-3 岩样的破裂模式相近, 主要是水平裂隙尖端萌生的翼裂纹或次生裂纹的充分扩展导致岩样的破坏, 倾斜裂隙尖端未产生裂纹或扩展程度有限, 而且裂隙之间均没有发生贯通。当围压为 15 MPa 时, C60-4 岩样在水平裂隙左尖端和倾斜裂隙尖端之间发生两处贯通, 最终呈现为 Y 型破坏。当围压增大至 25 MPa, C60-5 岩样预制裂隙之间发生一次贯通, 倾斜裂隙下尖端反向翼裂纹和水平裂隙右尖端裂纹均发展至岩样边界, 最终呈现为 N 型破坏。由图 9 (c) 中 C60-4 岩样破裂面的局部放大图可见, 剪切破坏带断面呈明显的滑移现象, 断面上可以观察到摩擦粉末, 而在其下方的拉伸裂纹断面无摩擦痕迹。

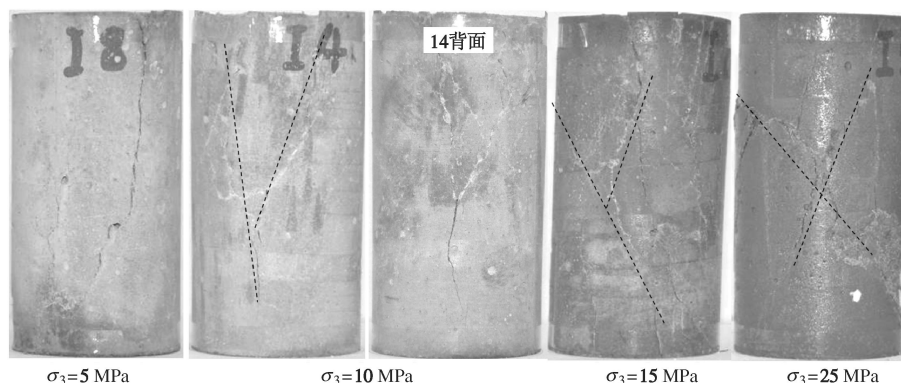
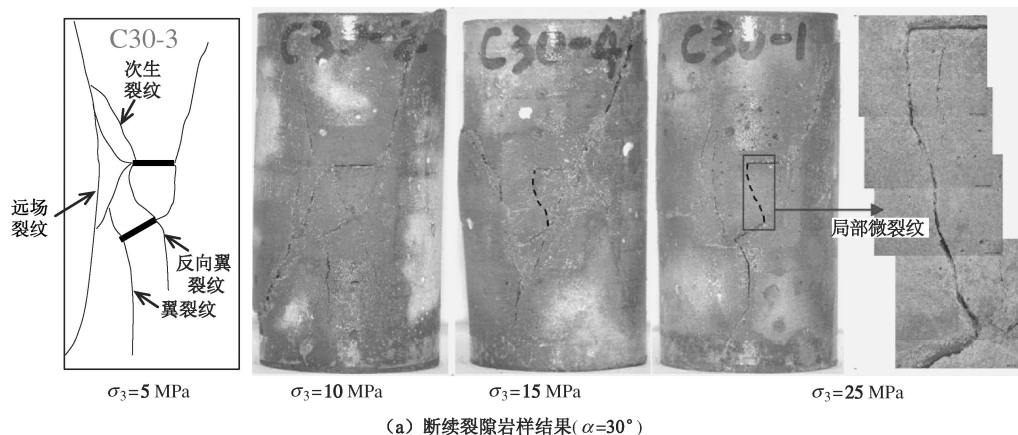


图 8 不同围压完整类岩石材料破裂模式

Fig. 8 Ultimate failure modes of intact rock-like material specimens under different confining pressures



(a) 断续裂隙岩样结果 ($\alpha=30^\circ$)

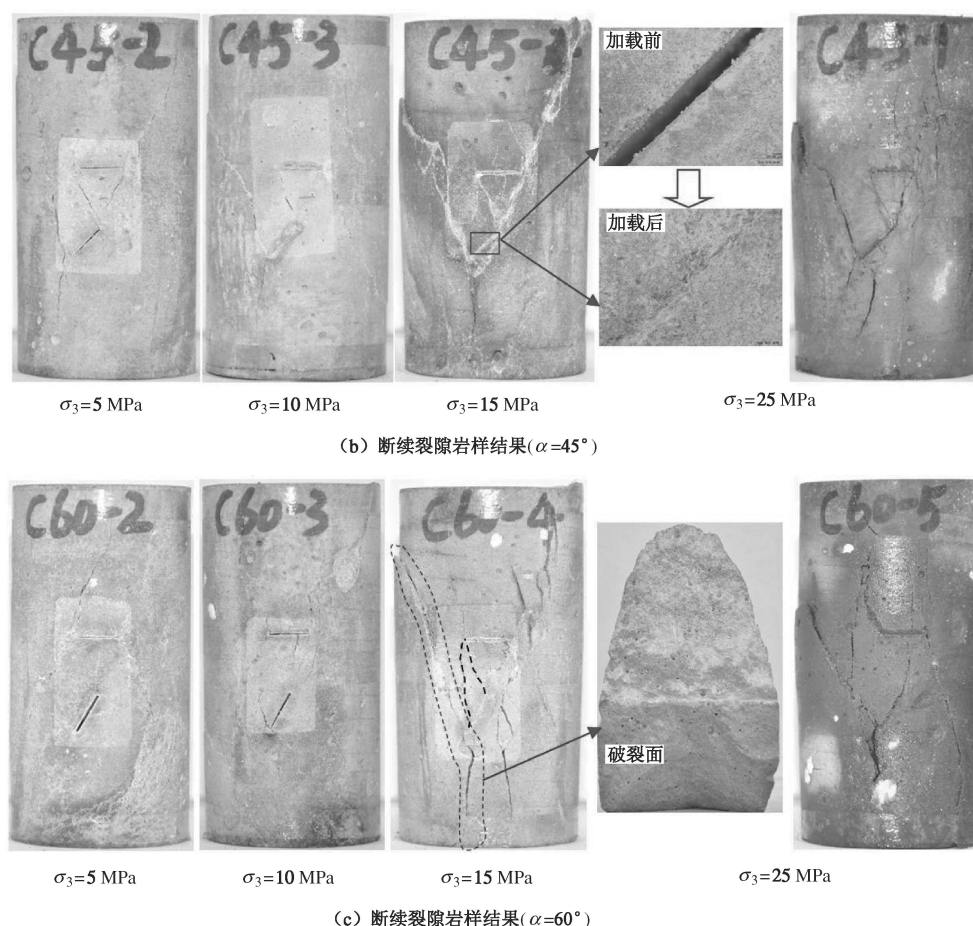


图9 不同围压下断续裂隙岩样破裂模式

Fig. 9 Ultimate failure modes of pre-fissured specimens under different confining pressures

另外, 预制裂隙的闭合程度也受到围压的影响。由图9可见, 在较低围压下, 部分预制裂隙在最终破裂时未发生闭合, 而在较高围压作用下, 绝大部分预制裂隙发生闭合, 而且裂隙的上下表面之间发生摩擦, 可以观察到粉末, 如图9(b)中C45-4岩样裂隙周围局部放大图所示。

总之, 断续裂隙岩样三轴压缩破裂模式受裂隙倾角和围压的共同影响。当围压较小时, 破裂形态受裂隙倾角的影响较大, 不同裂隙倾角岩样的破裂模式和裂纹贯通形态不同; 当围压增大到一定程度后, 裂隙倾角的影响逐渐减弱, 围压的作用开始显现, 主要为与裂隙尖端相连的剪切破裂带造成试样的最终破坏。

4 结 论

(1) 完整岩样应力-应变曲线峰后呈平滑式应变软化, 而断续裂隙岩样应力-应变曲线呈现多台阶式软化。部分裂隙岩样曲线出现双峰值现象, 而且首次峰值跌落幅度随围压的增大而减小。

(2) 完整及断续裂隙岩样的裂纹损伤阈值、峰值强度和峰值应变均随着围压的增大而呈线性增大。完整岩样峰值强度对围压的敏感程度最高, 倾角为45°

时围压敏感性较大, 倾角30°时次之, 倾角60°时最小。

(3) 断续裂隙岩样宏观破裂模式受裂隙倾角和围压的共同影响。当围压较小时, 破裂形态受裂隙倾角的影响较大; 当围压增大到一定程度后, 裂隙倾角的影响逐渐减弱, 围压的作用开始显现, 呈剪切破坏模式。

(4) 裂隙倾角和围压共同决定断续裂隙岩样裂纹贯通模式。倾角为30°时, 裂隙之间均发生两处贯通, 而倾角为45°和60°岩样表现为随着围压的增大, 由无贯通增加至一次或两次贯通。

最后需要指出的是, 本文进行了不同围压作用下断续裂隙类岩石材料三轴压缩试验, 讨论了预制裂隙和围压对含裂隙岩石强度变形特性和破裂模式的影响规律, 对于初步认识三向应力作用下含不平行裂隙岩石力学特性有一定帮助。但是, 由于真实材料存在显著的非均质性, 矿物颗粒、边界效应以及胶结程度不同的影响等因素难以在类岩石材料中真正体现^[9]。为了深入认识三向应力作用下含裂隙岩石力学特性, 后续还需要开展相应的真实断续裂隙岩石三轴试验研究。

参考文献:

- [1] 陈 新, 李东威, 王莉贤, 等. 单轴压缩下节理间距和倾角对岩体模拟试件强度和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2236 - 2245. (CHEN Xin, LI Dong-wei, WANG Li-xian, et al. Experimental study on effect of spacing and inclination angle of joints on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2236 - 2245. (in Chinese))
- [2] 刘红岩, 黄好诗, 李楷兵, 等. 预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1235 - 1241. (LIU Hong-yan, HUANG Yu-shi, LI Kai-bing, et al. Test study of strength and failure mode of pre-existing jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1235 - 1241. (in Chinese))
- [3] 张 平, 李 宁, 贺若兰, 等. 不同应变率下非贯通裂隙介质的力学特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 750 - 755. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan, et al. Mechanical properties of fractured media containing intermittent fractures at different strain rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6): 750 - 755. (in Chinese))
- [4] 席婧仪, 陈忠辉, 朱帝杰, 等. 岩石不等长裂纹应力强度因子及起裂规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 727 - 733. (XI Jing-yi, CHEN Zhong-hui, ZHU Di-jie, et al. Stress intensity factors and initiation of unequal collinear cracks in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 727 - 733. (in Chinese))
- [5] YIN P, WONG R H C, CHAU K T. Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **68**: 66 - 84.
- [6] 黄凯珠, 林 鹏, 唐春安, 等. 双轴加载下断续预置裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(6): 808 - 816. (WONG Robina H C, LIN Peng, TANG Chun-an, et al. Mechanism of crack coalescence of pre-existing flaws under biaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(6): 808 - 816. (in Chinese))
- [7] 肖桃李, 李新平, 贾善坡. 深部单裂隙岩体结构面效应的三轴试验研究与力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1666 - 1673. (XIAO Tao-li, LI Xin-ping, JIA Shan-po. Triaxial test research and mechanical analysis based on structure surface effect of deep rock mass with single fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1666 - 1673. (in Chinese))
- [8] 肖桃李, 李新平, 贾善坡. 两条断续贯通的预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1443. (XIAO Tao-li, LI Xin-ping, JIA Shan-po. Triaxial test research of failure characteristic with two pre-existing transfixion cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014. 1443. (in Chinese))
- [9] YANG S Q, JIANG Y Z, XU W Y, et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, **45**(17): 4796 - 4819.
- [10] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (in Chinese))
- [11] LIU J, ZHU Z, WANG B. The fracture characteristic of three collinear cracks under true triaxial compression[J]. The Scientific World Journal, 2014. DOI:org/10.1155/2014/459025.
- [12] HUANG D, GU D, YANG C, et al. Investigation on mechanical behaviors of sandstone with two preexisting flaws under triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, **49**(2): 375 - 399.
- [13] WANG S Y, SLOAN S W, SHENG D C, et al. Numerical study of failure behaviour of pre-cracked rock specimens under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, **51**(5): 1132 - 1148.
- [14] MANOUCHEHRAN 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.
- [15] 方前程, 周科平, 刘学服. 不同围压下断续节理岩体破坏机制的颗粒流分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(10): 3536 - 3543. (FANG Qian-cheng, ZHOU Ke-ping, LIU Xue-fu. Failure mechanism of discontinuous joint rock mass under different confining pressures based on particle flow code[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(10): 3536 - 3543. (in Chinese))

- [16] 黄彦华, 杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(8): 1644 - 1653. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(8): 1644 - 1653. (in Chinese))
- [17] YANG S Q, LIU X R, JING H W. Experimental investigation on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **63**: 82 - 92.
- [18] 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.
- [19] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **67**: 20 - 28.
- [20] 蒋明镜, 陈贺, 张宁, 等. 含双裂隙岩石裂纹演化机理的离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(11): 3259 - 3268. (JIANG Ming-jing, CHEN He, ZHANG Ning, et al. Distinct element numerical analysis of crack evolution in rocks containing pre-existing double flaw[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(11): 3259 - 3268. (in Chinese))
- [21] 张社荣, 孙博, 王超, 等. 双轴压缩试验下岩石裂纹扩展的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3083 - 3091. (ZHANG She-rong, SUN Bo, WANG Chao, et al. Discrete element analysis of crack propagation in rocks under biaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3083 - 3091. (in Chinese))
- [22] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L, et al. An experimental study on fracture mechanical behavior of rock-like materials containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Sinica, 2015, DOI: 10.1007/s10409-015-0489-3, in press.
- [23] ZHUANG X, CHUN J, ZHU H. A comparative study on unfilled and filled crack propagation for rock-like brittle material[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, **72**: 110 - 120.
- [24] 李树忱, 汪雷, 李术才, 等. 不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3391 - 3395. (LI Shu-chen, WANG Lei, LI Shu-cai, et al. Post-peak deformation and failure experimental study of rock-like specimens with different inclination angles persistent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3391 - 3395. (in Chinese))
- [25] 杨圣奇, 温森, 李良权. 不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1572 - 1587. (YANG Sheng-qi, WEN Sen, LI Liang-quan. Experimental study on deformation and strength properties of coarse marble with discontinuous pre-existing cracks under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1572 - 1587. (in Chinese))
- [26] WASANTHA P L P, RANJITH P G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, **178**: 91 - 101.