

# 断续预制裂隙脆性大理岩 变形破坏特性单轴压缩试验研究

杨圣奇<sup>1</sup>, 戴永浩<sup>2</sup>, 韩立军<sup>1</sup>, 贺永年<sup>1</sup>, 李玉寿<sup>1</sup>

(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 221008;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 采用岩石力学伺服试验机, 对断续预制裂隙脆性大理岩进行单轴压缩试验, 基于全程变形曲线的试验结果, 分析裂隙参数(岩桥倾角、裂隙间距、裂隙长度、裂隙数目与裂隙倾角)几何分布对大理岩变形破坏特征的影响规律。研究表明, 与完整大理岩相比, 断续预制裂隙大理岩变形呈现出局部化渐进破坏特征, 其峰值强度、弹性模量及峰值轴向应变均明显降低, 且降低幅度与预制裂隙参数分布形式密切相关; 但变形模量除裂隙间距 48 mm(降幅 24.8%)、含 119°岩桥倾角(降幅 23.7%)以及含 60°裂隙倾角(降幅 43.8%)的岩样以外, 其他含 2 条预制裂隙岩样的变形模量降幅均为 -3.8%~7.8%, 差异较小。裂隙长度越长、裂隙数目越多及裂隙倾角越大, 其峰值强度、弹性模量及峰值轴向应变也越低; 而岩桥倾角和裂隙间距与力学参数之间规律性不明显。岩样宏观贯通模式主要呈现出拉贯通、压贯通、剪贯通和混合贯通 4 种, 且与预制裂隙的几何分布密切相关。完整岩样呈典型的轴向劈裂拉贯通模式。含较短裂隙长度(16 mm)及较小裂隙倾角(30°)的岩样呈现出拉贯通模式; 而含较长裂隙长度(24 mm)和较大裂隙倾角(60°)的岩样呈现出拉剪混合贯通模式。裂隙间距越小以及裂隙数目越多, 岩样的贯通模式趋于复杂, 呈现出拉剪压混合贯通模式。

**关键词:** 岩石力学; 预制裂隙; 脆性大理岩; 变形; 强度; 贯通模式

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)12 - 2391 - 14

## UNIAXIAL COMPRESSION EXPERIMENTAL RESEARCH ON DEFORMATION AND FAILURE PROPERTIES OF BRITTLE MARBLE SPECIMEN WITH PRE-EXISTING FISSURES

YANG Shengqi<sup>1</sup>, DAI Yonghao<sup>2</sup>, HAN Lijun<sup>1</sup>, HE Yongnian<sup>1</sup>, LI Yushou<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Uniaxial compression experiments were carried out for brittle marble with pre-existing fissures by the rock mechanics servo-controlled testing system. Based on the experimental results of complete deformation curves, the effect of the geometric distribution of fissure parameters(bridge angle, fissure distance, fissure length, fissure number and fissure angle) on the deformation and failure properties of brittle marble were analyzed. Compared with the intact marble, the marble with pre-existing fissure takes on the localization deformation and asymptotic failure. The peak strength, elastic modulus and peak axial strain of marble with pre-existing fissure are all lower than that of intact marble, and the reduction extent is closely related to the distribution forms of

**收稿日期:** 2009 - 03 - 20; **修回日期:** 2009 - 04 - 01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50490273, 50709008)

**作者简介:** 杨圣奇(1978 -), 男, 博士, 2000年毕业于焦作工学院矿井建设专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: yangsqi@hotmail.com

pre-existing fissure. Expect for the marble sample with fissure distance equals 48 mm(the reduction amplitude of deformation modulus is 24.8%), the marble specimen with bridge angle equals  $120^\circ$ (23.7%) and the marble sample with fissure angle equals  $60^\circ$ (43.8%), the reduction amplitude of deformation modulus is in the range of  $-3.8\%$  to  $7.8\%$  for other marble samples with two pre-existing fissures, in which the difference is smaller. The longer the fissure length is, the more the fissure number is and the larger the fissure angle is; the lower the peak strength, the elastic modulus and peak axial strain are; however there are no distinct laws between the bridge angle, fissure distance and mechanical parameters of marble sample. The failure mode of marble specimen takes mainly on the four modes: tensile mode, compression mode, shear mode and mixed mode, which are closely related to the geometric distributions of pre-existing fissure. The intact marble sample takes on the typically axial splitting tensile mode. The rock samples with the shorter fissure length(16 mm) and the smaller fissure angle( $30^\circ$ ) take on the tensile mode, however the rock samples with the longer fissure length(24 mm) and the larger fissure angle( $60^\circ$ ) take on mixed mode(shear and tensile). The smaller the fissure distance is, and the more the fissure number is, the more complexed the coalescence mode of rock samples is, which takes on mixed mode(shear, tensile and compression).

**Key words:** rock mechanics; pre-existing fissures; brittle marble; deformation; strength; failure mode

## 1 引言

岩石作为自然界中一种复杂地质体,由于其生成条件及其形成后亿万年地质构造及大气风化作用,在岩石内部形成裂纹、节理、层理及弱面等众多类型的缺陷,它们直接影响岩石的物理力学特性。为了探究各种岩石工程(如坝基岩石工程、节理岩石高边坡工程、核废料处置岩石工程等)的失稳破坏机制,近几十年来, A. Bobet 等<sup>[1~17]</sup>对裂隙岩石力学特性进行了大量的试验、理论和数值研究。这些研究已充分表明,岩石内部裂隙的分布(如裂隙长度、裂隙倾角等)对材料强度、变形及破坏特性有着重要的影响。但前述研究多集中采用模型试验<sup>[4~12]</sup>或数值试验<sup>[13~17]</sup>来进行,较少分析真实裂隙岩石材料的变形特性及裂纹演化和扩展机制。

真实岩石材料通常被制成薄的平板岩样,来进行扫描电镜试验(SEM)分析。赵永红和梁晓峰<sup>[18]</sup>探讨了带预制割缝灰岩平板试件受单轴压缩时微裂纹的萌生、扩展和连通过程;黄明利等<sup>[19]</sup>通过在扫描电镜下进行单轴压缩加载,即时观察分析了岩石受力过程中微裂纹的萌生、扩展和贯通破坏的全过程;Y. H. Zhao<sup>[20]</sup>利用扫描电镜对大理岩试件中的裂纹发育过程进行了实时观测研究。这些平板岩样的尺寸仅为  $25\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。然而较少的试验是针对较大尺度预制裂隙岩样的研究。Y. Fujii 和 Y. Ishijima<sup>[21]</sup>对含一条张开裂隙的砂岩岩样(尺寸为  $110\text{ mm}\times 62\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ )进行了单轴压缩试验研究,

结果表明,试验在预制裂隙尖端产生主裂纹并逐渐向岩样自由端面扩展,而且主裂纹萌生的应力阈值与预制裂隙倾角之间没有明确的关系。然而上述对真实岩石材料内预制裂隙扩展的试验中,关于裂隙参数几何分布对变形特性的影响规律仍没有得到较好的分析,同时真实岩石材料中在单轴压缩下裂隙参数几何分布对破裂模式的影响也没有得到较好的理解。

大理岩作为一种典型的变质岩,是由石灰岩在高温、高压等外在环境下经变质而形成的岩石,其显著特点是:宏观上结构致密,但细观上黏结力很弱,塑性变形较大,且非均质性明显。有关大理岩在不同应力状态下的力学特征已经取得了很多研究成果<sup>[22~30]</sup>。杨圣奇等<sup>[24~30]</sup>对大理岩进行过声学特性测试、单轴压缩试验、常规三轴压缩试验,三轴流变试验等研究,但这些研究都局限于对外表宏观均质大理岩的力学特性进行了分析和探讨,而没有考虑真实岩石材料内部裂隙的作用,这主要是由于在真实岩石材料中裂隙预制一直是断续节理裂隙岩体试验研究中的难点<sup>[31, 32]</sup>,长期以来一直未能得到较好解决。李银平等<sup>[33]</sup>探讨了单轴压缩下预制裂隙大理岩的贯通机制;Y. P. Li 等<sup>[34]</sup>采用含预制裂隙大理岩块试件对单轴压缩载荷作用下的裂纹扩展及搭接进行试验,试验结果表明,含预制裂隙试件的临界失稳载荷、破坏时的应变及弹性模量都明显降低,原生裂纹的方位对产生何种裂隙有显著的影响,岩桥区尺寸对翼裂纹的萌生和扩展有显著的影响,使试件表现出完全不同的破坏方式。试验中观察到预制

裂隙尖端萌生的裂纹有张拉型的翼形裂纹、压剪型的二次裂纹和翼裂反向裂纹等多种形态。但对预制裂隙大理岩的变形(尤其是环向变形特征)、强度及破坏特征没有作出较好分析;杨圣奇等<sup>[35]</sup>探讨了不同围压下宏观断续预制裂隙粗晶大理岩的变形和强度特性,但仅局限于裂隙倾角的变化,而没有讨论其他几何参数(如岩桥倾角、裂隙间距、裂隙长度、裂隙数目等)的改变对粗晶大理岩力学特性的影响规律。而研究裂隙参数几何分布对断续预制裂隙岩石的变形及其强度破坏等特征的影响,无疑对于保障节理裂隙岩体工程的稳定性具有重要的理论价值和实践意义。

鉴于此,本文通过在真实大理岩材料中预制裂隙,从而制成断续预制裂隙岩样,然后采用伺服试验机对裂隙岩样进行单轴压缩试验,研究单轴压缩下断续预制裂隙大理岩的变形和破坏特性,分析裂隙参数几何分布对岩样变形和强度特性及破坏特性的影响规律,并为岩石工程设计和数值分析时断续节理裂隙岩体力学参数的选择提供参考依据。

## 2 试验概况

### 2.1 岩性特征和岩样制作

试验大理岩采自南京市某采石场,颜色为白色,致密块状构造,宏观均匀一致,矿物成分主要为方解石、白云石和菱镁矿,中粒变晶结构,粒径为 1.0~2.0 mm,平均密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>。结晶程度高,新鲜,硬度较大。为了避免各向异性对试验结果的影响,制备岩样时沿同方向加工岩样。同时,为保证试验结果的真实性与可比性,试验前对加工好的岩样外观进行仔细观察,确定没有明显的节理及裂纹等弱面,以确保试验岩样之间宏观上没有明显差异。岩样按照国际岩石力学学会(ISRM)的要求,加工成  $\phi 50$  mm×100 mm 的标准圆柱形岩样。

为了制作图 1 所示的预制裂隙岩样,其中裂隙长度为  $2a$ ,裂隙倾角为  $\alpha$  ( $\alpha$  为裂隙与  $\sigma_1$  方向所成的夹角),岩桥倾角为  $\beta$  ( $\beta$  为裂隙内部顶端连线与  $\sigma_3$  方向所成的夹角),裂隙间距为  $2b$  (裂隙①,②内部顶端之间的距离),采用高速电动切割机加工三维裂隙,切割轮片为 0.3 mm 厚的超薄金刚石锯片,制成的裂隙厚度为 0.3~0.5 mm,裂隙内充填一种软弱材料石膏。为了研究裂隙参数几何分布对其变形破坏特征的影响规律,设置了如下 5 种试验方案:

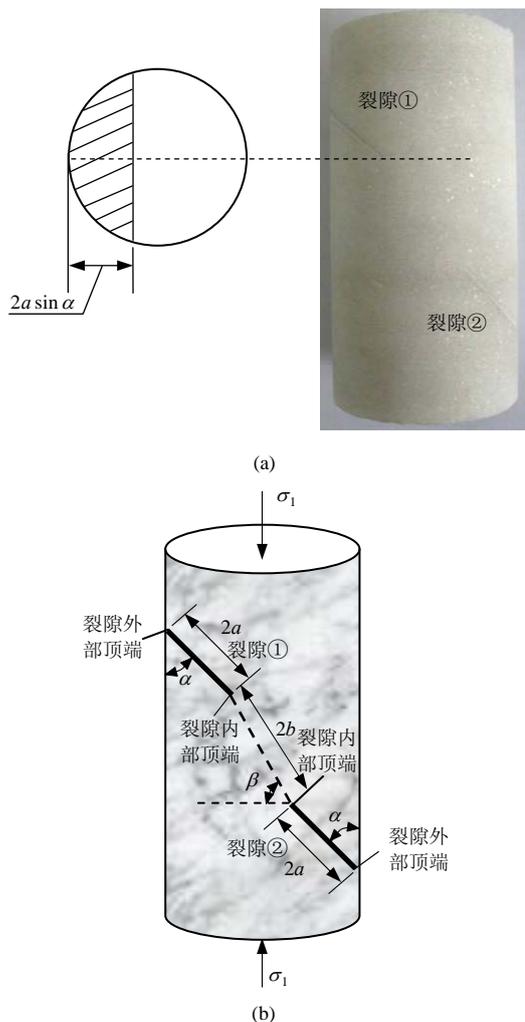


图 1 断续预制裂隙岩样的几何分布  
Fig.1 Geometry of marble specimen with pre-existing fissures

- (1) 改变岩桥倾角  $\beta$  ( $60^\circ \sim 120^\circ$ ): 裂隙长度  $2a = 24$  mm, 裂隙间距 33 mm, 裂隙倾角  $\alpha = 45^\circ$ ;
- (2) 改变裂隙长度  $2a$  (16~24 mm): 裂隙间距为 33 mm, 裂隙倾角  $\alpha = 45^\circ$ ;
- (3) 改变裂隙间距  $2b$  (20~48 mm): 裂隙长度  $2a = 24$  mm, 裂隙倾角  $\alpha = 45^\circ$ ;
- (4) 改变裂隙倾角  $\alpha$  ( $30^\circ \sim 60^\circ$ ): 裂隙长度  $2a = 24$  mm, 裂隙间距为 33 mm;
- (5) 改变裂隙数目  $N$  (2~4): 裂隙长度  $2a = 24$  mm, 裂隙间距为 33 mm, 裂隙倾角  $\alpha = 45^\circ$ 。

### 2.2 试验系统和加载过程

试验在 MTS815.03 伺服试验机上进行。该试验系统具有 3 套独立的闭环控制加载设备,可分别控制轴压、围压和孔隙压力,系统所能施加的最大轴向力为 2 700 kN,最大围压为 50 MPa。试验时,垂直方向采用 1 000 kN 压力传感器测试轴向载荷;而采用 5 mm 位移传感器测试岩样的轴向和环向变

形。其中，环向变形的测量采用的是链式环向位移传感器。试验程序如下：首先将岩样包裹好；其次在两端加上与岩样直径匹配的钢性垫块，以减小端面摩擦对试验结果的影响，同时调整好位移传感器；然后对岩样施加单轴压缩应力使之失去承载能力而破坏。试验全过程采用位移控制方式，加载速率为0.002 mm/s，数据采样间隔为1 s。

### 3 完整岩样试验结果及分析

单轴压缩试验是最简单的也是最先采用确定岩石强度与变形等力学参数的方法，单轴压缩的应力-应变全程曲线含有丰富的信息，它反映岩样在整个压缩全过程中的力学特征。为了研究预制裂隙对大理岩变形和破坏特性的影响，首先对无裂隙完整大理岩样进行了单轴压缩试验，以作为参考。无裂隙完整岩样的全程应力-应变曲线如图2所示，相关力学参数见表1。表中： $\sigma_c$ 为岩石的单轴抗压强度； $E_s$ ， $E_{50}$ 分别为岩石的平均模量(岩石轴向应力-轴向应变曲线近似直线部分的斜率)和变形模量(岩石50%轴向应力处与原点连线的斜率)； $\epsilon_{1c}$ ， $\epsilon_{3c}$ 分别为岩石峰值强度所对应的峰值轴向应变和

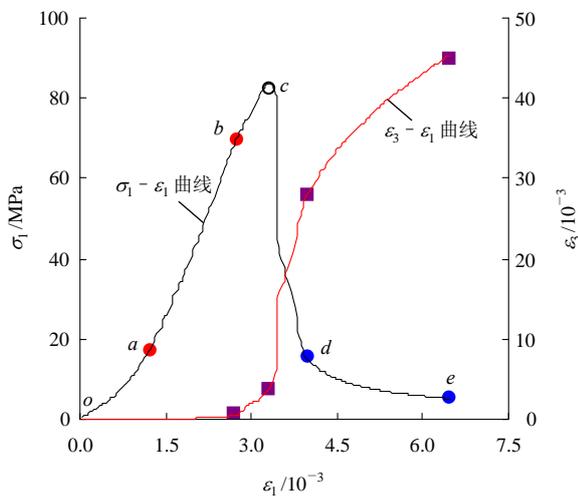


图2 无裂隙完整岩样的全程应力-应变曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves of intact rock specimens

表1 单轴压缩下无裂隙大理岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of marble specimens without pre-existing fissures in uniaxial compression

$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{50}$ /GPa	$\epsilon_{1c}$ /10 <sup>-3</sup>	$\epsilon_{3c}$ /10 <sup>-3</sup>
83.46	35.98	20.99	3.287	3.476

峰值环向应变，这里的峰值环向应变以向岩样外侧膨胀为正值。

由图2可见，完整大理岩样的全程应力-应变曲线可以划分为如下5个阶段：(1)裂隙压密阶段(*oa*)：表明该大理岩岩样存在着裂纹、孔隙、位错及节理等初始损伤，从而使得岩样应力-应变曲线成上凹型，与轴向应变相比，环向应变较小，该阶段内近乎为0( $\epsilon_3^a = 0.05 \times 10^{-3}$ )；(2)弹性变形阶段(*ab*)：轴向应力和轴向应变关系近似成线性关系，服从虎克定律，由于裂隙压密后之间的摩擦力抑制了微裂隙面之间的相互错动，从而使得变形近似为弹性；(3)变形局部化阶段(*bc*)：曲线的斜率逐渐变缓，裂隙由随机分布逐渐向宏观裂纹过渡，由于内部裂纹密集、扩展和汇合，岩样变形局部化过程中，裂隙面之间产生滑移，从而使得环向应变变化速率明显高于轴向应变；(4)应变软化阶段(*cd*)：岩石内部已形成宏观裂纹带，岩石承载骨架总体已经破坏，岩样主要依靠裂隙面之间的摩擦力来承载，而且内部能够承载的有效面积也随着裂纹扩展而逐渐减小，因而其承载能力越来越低，随着轴向应变的增加，环向应变迅速发生突变，增幅较大；(5)残余强度阶段(*de*)：该阶段内岩石仍能继续依靠内部材料之间的摩擦力来承载部分轴向应力，而且承载能力随着轴向变形增加仍呈降低趋势，这主要是由于岩样破裂面之间的摩擦因数随轴向变形增加逐渐降低所致，随着轴向应变的增加，环向应变曲线斜率逐渐变缓，且趋于以线性关系缓慢增加。

### 4 裂隙岩样试验结果及分析

#### 4.1 岩桥倾角对变形和强度特性的影响

图3给出了含不同岩桥倾角断续预制裂隙岩样全程曲线。表2给出了含不同岩桥倾角的断续预制裂隙大理岩力学参数。

从图3(a)不难看出，含有不同岩桥倾角的断续预制裂隙全程应力-应变曲线经历了裂隙压密、弹性变形、变形局部化、应变软化以及残余强度5个阶段。无裂隙完整岩样峰值应力附近变形近似为一个尖点，而含有不同岩桥倾角的断续预制裂隙岩样变形局部化阶段明显，峰值应力附近变形为渐变的过程(见图3(b))，造成这种现象的原因主要是由于对本文完整大理岩而言，材料内部强度差异不是很大，而断续预制裂隙的存在加大了岩石内部材料强

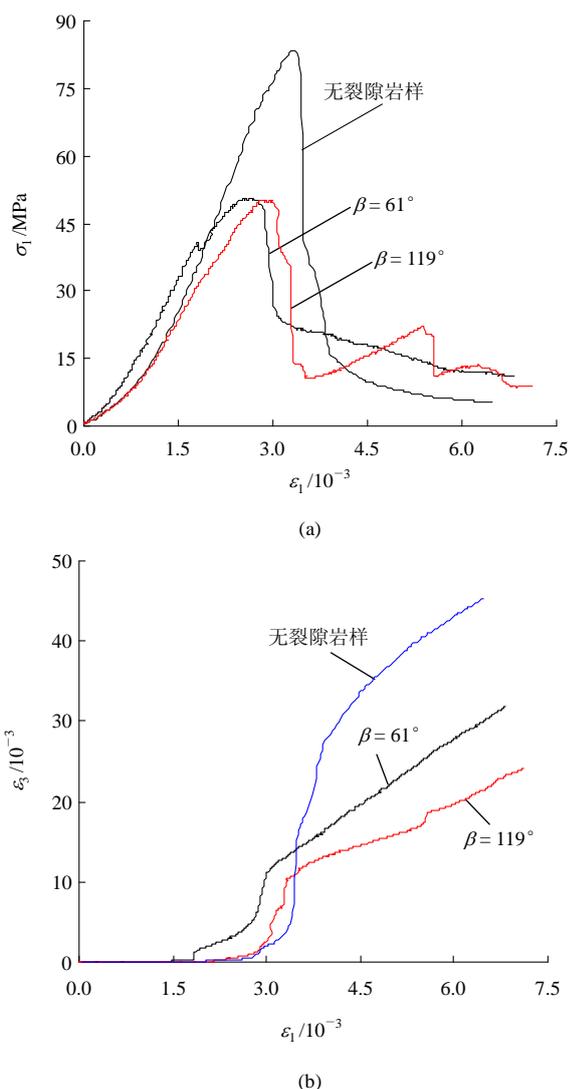


图 3 含不同岩桥倾角断续预制裂隙岩样全程曲线

Fig.3 Complete curves of marble specimens with pre-existing fissures of different bridge angles

表 2 含不同岩桥倾角的断续预制裂隙大理岩力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of marble specimens with pre-existing fissures of different bridge angles

$\beta(^{\circ})$	$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{50}$ /GPa	$\varepsilon_{1c}$ / $10^{-3}$	$\varepsilon_{3c}$ / $10^{-3}$
61	50.66	27.70	20.25	2.625	4.005
	(39.3)	(23.0)	(3.5)	(20.1)	(-15.2)
119	50.30	22.24	16.01	2.834	1.192
	(39.7)	(38.2)	(23.7)	(13.8)	(65.7)

注: ( ) 中的数据表示断续预制裂隙岩样与完整岩样相比的力学参数降幅(%); ( ) 中的负值表示与无裂隙完整岩样相比, 断续预制裂隙岩样力学参数没有降低, 而呈增加幅度; 下同。

度的差异性, 从而使得峰值应力附近的变形减缓。

从表 2 不难看出, 与表 1 完整大理岩的力学参数相比, 含不同岩桥倾角的断续预制裂隙大理岩强

度和变形参数均明显降低。含  $61^{\circ}$  和  $119^{\circ}$  岩桥倾角的 2 个岩样的峰值强度分别为 50.66 和 50.30 MPa, 与完整岩样峰值强度 83.46 MPa 相比, 分别降低了 39.3% 和 39.7%; 岩桥倾角变化对峰值强度影响较小, 差异仅为 0.4%。含  $60^{\circ}$  和  $120^{\circ}$  岩桥倾角的 2 个岩样的弹性模量分别为 27.70 和 22.24 GPa, 与完整岩样的弹性模量 35.98 GPa 相比, 分别降低了 23.0% 和 38.2%; 岩桥倾角变化对弹性模量的影响程度为 15.2%。但与完整岩样变形模量 20.99 GPa 相比, 含  $61^{\circ}$  岩桥倾角的岩样变形模量为 20.25 GPa, 两者之间差异不大, 降幅仅 3.5%; 而含  $119^{\circ}$  岩桥倾角的岩样变形模量为 16.01 GPa, 降幅较大, 为 23.7%。

#### 4.2 裂隙间距对变形和强度特性的影响

图 4 给出了含不同裂隙间距断续预制裂隙岩样

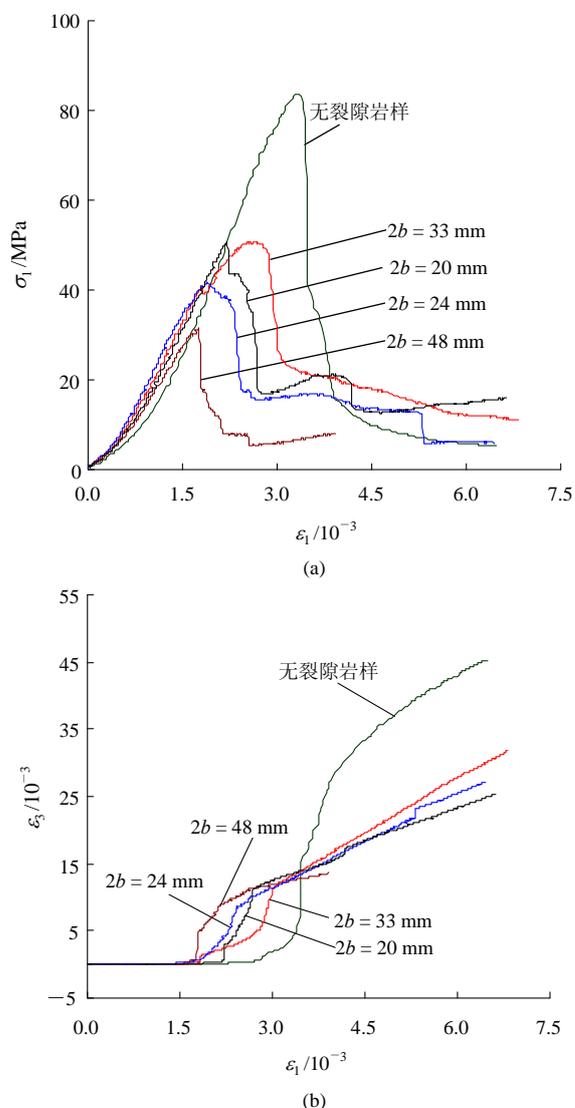


图 4 含不同裂隙间距断续预制裂隙岩样全程曲线  
Fig.4 Complete curves of marble specimens with pre-existing fissures and different fissure distances

全程曲线，表 3 给出了含不同裂隙间距的断续预制裂隙大理岩力学参数。

表 3 含不同裂隙间距的断续预制裂隙大理岩力学参数  
Table 3 Mechanical parameters of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure distances

裂隙间距 2b/mm	$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{50}$ /GPa	$\epsilon_{1c}$ / $10^{-3}$	$\epsilon_{3c}$ / $10^{-3}$
48	31.29 (62.5)	22.46 (37.6)	15.79 (24.8)	1.756 (46.6)	0.696 (80.0)
33	50.66 (39.3)	27.70 (23.0)	20.25 (3.5)	2.625 (20.1)	4.005 (-15.2)
24	41.47 (50.3)	27.70 (23.0)	20.71 (1.3)	1.886 (42.6)	0.970 (72.1)
20	50.17 (39.9)	28.02 (22.1)	19.35 (7.8)	2.204 (32.9)	0.565 (83.7)

由图 4(a)的轴向应力 - 轴向应变曲线可见，含不同裂隙间距的断续预制裂隙大理岩也经历了裂隙压密、弹性变形、变形局部化、应变软化以及残余强度 5 个阶段，很显然，与完整岩样相比，含不同裂隙间距的断续预制裂隙大理岩强度和变形参数均明显降低(见表 3)。而由图 4(b)的环向应变 - 轴向应变曲线可见，随着轴向变形的增加，在接近应力峰值时，完整岩样的环向变形迅速增加，岩样发生脆断；而断续预制裂隙大理岩的环向变形则呈现出局部化渐近破坏的特征。

从表 3 不难看出，裂隙间距为 48, 33, 24 和 20 mm 的 4 个岩样峰值强度分别为 31.29, 50.66, 41.47 和 50.17 MPa，比完整岩样的峰值强度 83.46 MPa 分别降低了 62.5%，39.3%，50.3%和 39.9%。很显然，裂隙间距与岩样峰值强度之间的关系不是很明确，并未表现为随裂隙间距的增大，岩样峰值强度趋于减小的现象，这是由于预制裂隙岩样贯通模式的差异所致。对弹性模量和变形模量而言，除裂隙间距为 48 mm 的岩样较小(弹性模量为 22.46 GPa，变形模量为 15.79 GPa)外，其他 3 个裂隙间距的弹性模量和变形模量差异却不大，分别在 28 和 20 GPa 左右。此外，裂隙间距对岩样峰值应变(轴向和环向)无明显的影响。

4.3 裂隙长度对变形和强度特性的影响

图 5 给出了含不同裂隙长度断续预制裂隙岩样全程曲线。表 4 给出了含不同裂隙长度的断续预制裂隙大理岩力学参数。

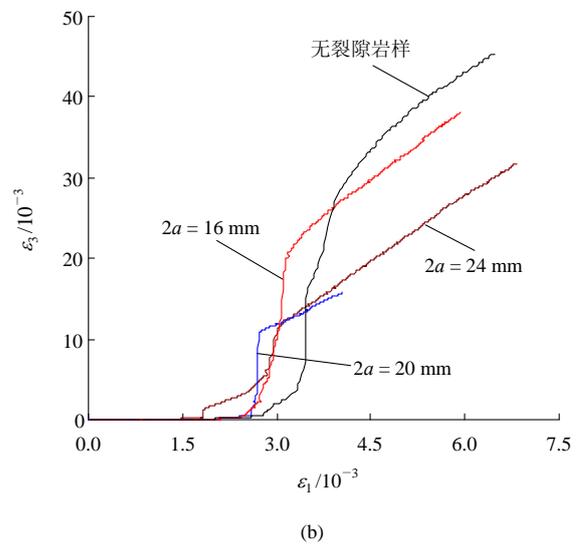
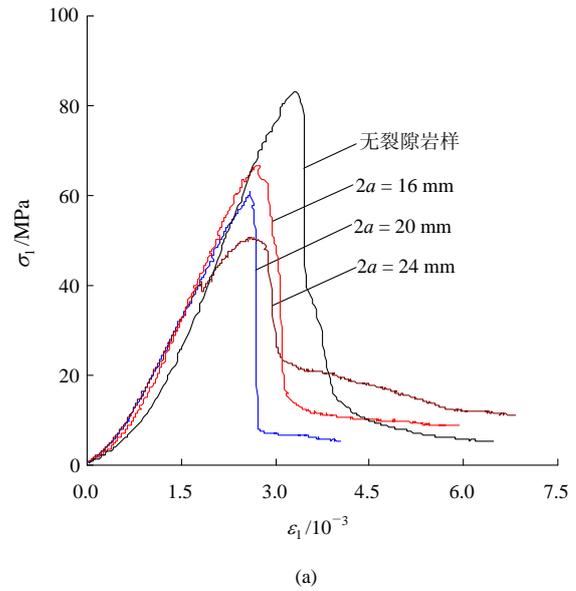


图 5 含不同裂隙长度断续预制裂隙岩样全程曲线  
Fig.5 Complete curves of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure lengths

表 4 含不同裂隙长度的断续预制裂隙大理岩力学参数  
Table 4 Mechanical parameters of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure lengths

裂隙长度 2a/mm	$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{50}$ /GPa	$\epsilon_{1c}$ / $10^{-3}$	$\epsilon_{3c}$ / $10^{-3}$
16	66.77 (20.0)	32.47 (9.8)	21.78 (-3.8)	2.751 (16.3)	2.313 (33.5)
20	60.84 (27.1)	27.56 (23.4)	21.47 (-2.3)	2.594 (21.1)	0.664 (80.9)
24	50.66 (39.3)	27.70 (23.0)	20.25 (3.5)	2.625 (20.1)	4.005 (-15.2)

由图 5(a)可见，含不同裂隙长度的断续预制裂

隙大理岩也经历了裂隙压密、弹性变形、变形局部化、应变软化以及残余强度 5 个阶段, 很显然, 与完整岩样相比, 含不同裂隙长度的断续预制裂隙大理岩峰值强度、弹性模量及峰值轴向应变均明显降低(见表 4)。由图 5(b)可见, 含不同裂隙长度的断续预制裂隙大理岩的环向变形也呈现出局部化渐近破坏的特征。

由表 4 可见, 裂隙长度为 16, 20 和 24 mm 的 3 个岩样峰值强度分别为 66.77, 60.84 和 50.66 MPa, 比完整岩样的峰值强度 83.46 MPa 分别降低了 20.0%, 27.1% 和 39.3%。很显然, 裂隙长度越长, 岩样峰值强度的弱化作用越明显, 即随着裂隙长度的增加, 岩样峰值强度呈减小趋势。裂隙长度为 16, 20 和 24 mm 的 3 个岩样弹性模量分别为 32.47, 27.56 和 27.70 GPa, 比完整岩样的弹性模量 35.98 GPa 分别降低了 9.8%, 23.4% 和 23.0%。很显然, 裂隙长度与岩样弹性模量之间的规律也不明显, 但裂隙长度越长, 岩样弹性模量的弱化作用越明显却是显而易见的。然而, 特别需要指出的是, 与完整岩样相比, 含 3 个不同裂隙长度的大理岩样变形模量降幅不明显, 差异均在 4% 以内, 变形模量与裂隙长度似乎无关。而且岩样峰值应变(轴向和环向)与裂隙长度之间无明显的规律性。

**4.4 裂隙数目对变形和强度特性的影响**

图 6 给出了含不同裂隙数目断续预制裂隙岩样全程曲线。表 5 给出了含不同裂隙数目的断续预制裂隙大理岩力学参数。

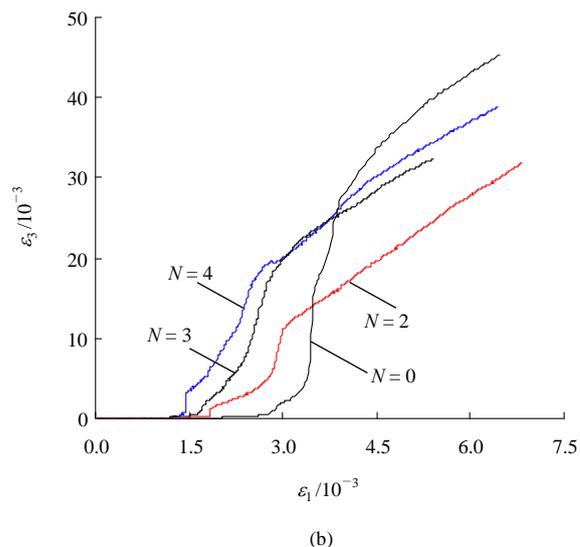
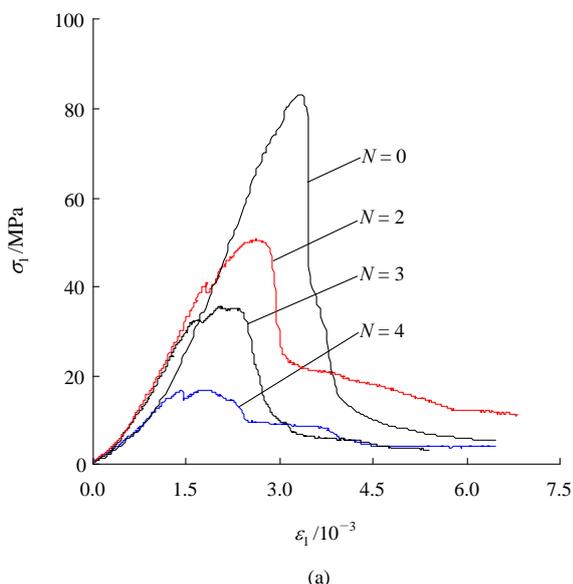


图 6 含不同裂隙数目断续预制裂隙岩样全程曲线  
Fig.6 Complete curves of marble specimens with pre-existing fissures and different fissure numbers

表 5 含不同裂隙数目的断续预制裂隙大理岩力学参数  
Table 5 Mechanical parameters of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure numbers

裂隙数目 N/条	$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{s0}$ /GPa	$\epsilon_{1c}$ / $10^{-3}$	$\epsilon_{3c}$ / $10^{-3}$
2	50.66 (39.3)	27.70 (23.0)	20.25 (3.5)	2.625 (20.1)	4.005 (-15.2)
3	35.39 (57.6)	24.61 (31.6)	17.75 (15.4)	2.066 (37.1)	4.042 (-16.3)
4	16.84 (79.8)	14.12 (60.8)	11.14 (46.9)	1.796 (45.4)	5.341 (-53.7)

由图 6(a)可见, 含不同裂隙数目的断续预制裂隙大理岩也经历了裂隙压密、弹性变形、变形局部化、应变软化以及残余强度 5 个阶段, 很显然, 与完整岩样相比, 含不同裂隙数目的断续预制裂隙大理岩峰值强度、弹性模量、变形模量以及峰值轴向应变均明显降低(见表 5)。与完整岩样相比, 含不同裂隙数目的断续预制裂隙大理岩在变形局部化阶段均出现了明显的应力跌落。随着裂隙数目的增多, 岩样的应变软化阶段越不明显, 变形越表现为局部化渐近破坏的特征(见图 6(b))。

由表 5 可见, 裂隙数目为 2, 3 和 4 的岩样峰值强度分别为 50.66, 35.39 和 16.84 MPa, 比完整岩样的峰值强度 83.46 MPa 分别降低了 39.3%, 57.6% 和 79.8%。很显然, 随着裂隙数目增多, 岩样峰值强度呈减小趋势。裂隙数目为 2, 3 和 4 的岩样弹性模量分别为 27.70, 24.61 和 14.12 GPa, 比完整岩样

的弹性模量 35.98 GPa 分别降低了 23%，31.6%和 60.8%；而裂隙数目为 2，3 和 4 的岩样变形模量分别为 20.25，17.75 和 11.14 GPa，比完整岩样的弹性模量 20.99 GPa 分别降低了 3.5%，15.4%和 46.9%。由此可见，随着裂隙数目的增多，岩样杨氏模量趋于减小。岩样峰值轴向应变与裂隙数目也具有明显的规律性，即岩样峰值轴向应变随着裂隙数目增多呈减小趋势，但岩样峰值环向应变与裂隙数目之间无明显的规律性。

**4.5 裂隙倾角对变形和强度特性的影响**

图 7 给出了含不同裂隙倾角断续预制裂隙岩样全程曲线。表 6 给出了含不同裂隙倾角的断续预制裂隙大理岩力学参数。

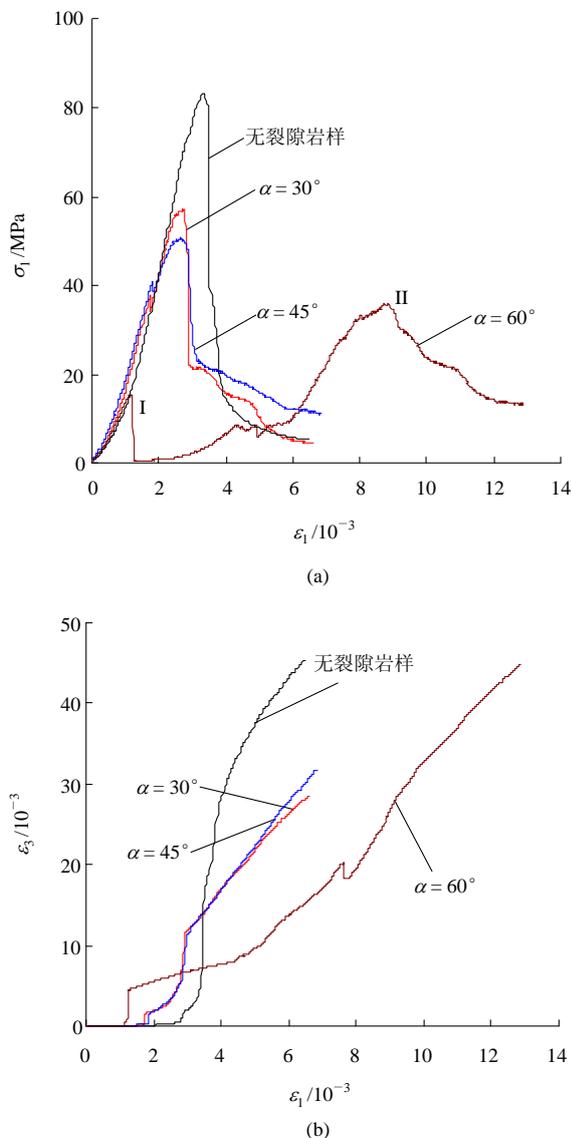


图 7 含不同裂隙倾角断续预制裂隙岩样全程曲线

Fig.7 Complete curves of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure angles

表 6 含不同裂隙倾角的断续预制裂隙大理岩力学参数  
Table 6 Mechanical parameters of marble specimens with pre-existing fissures of different fissure angles

裂隙 倾角 $\alpha/(\circ)$	$\sigma_c$ /MPa	$E_s$ /GPa	$E_{50}$ /GPa	$\epsilon_{1c}$ / $10^{-3}$	$\epsilon_{3c}$ / $10^{-3}$
30	57.08 (31.6)	30.06 (16.5)	20.04 (4.5)	2.710 (17.6)	4.656 (-33.9)
45	50.66 (39.3)	27.70 (23.0)	20.25 (3.5)	2.625 (20.1)	4.005 (-15.2)
60(I)	15.24 (81.7)	15.89 (55.8)	11.79 (43.8)	1.109 (66.3)	0.141 (95.9)
60(II)	35.88 (57.0)	12.76 (64.5)	2.71 (87.1)	8.737 (-165.8)	24.44 (-603.1)

注：(I)和(II)分别表示以图 7(a)中的 I 和 II 处应力 - 应变曲线计算得到的力学参数值。

由图 7(a)可见，含不同裂隙倾角的断续预制裂隙大理岩也经历了裂隙压密、弹性变形、变形局部化、应变软化以及残余强度 5 个阶段，很显然，与完整岩样相比，含不同裂隙倾角的断续预制裂隙大理岩峰值强度、弹性模量及峰值轴向应变均明显降低(见表 6)。其中  $\alpha = 60^\circ$  的大理岩在达到第 1 次极大值强度 15.24 MPa 之后，承载能力迅速降至 0，而后随着轴向变形的增加，岩样承载的轴向应力又开始缓慢逐渐上升，不过由于此时岩样内部承载结构已经出现明显损伤，因而再加载时岩样弹性模量 (12.76 GPa) 明显低于第 1 次加载时的弹性模量 15.89 GPa，但却可承受较高轴向应力(第 2 次峰值强度为 35.88 MPa)。造成这种现象的原因主要是由于裂纹演化过程的差异所致<sup>[32]</sup>。由图 7(b)可见，含不同裂隙倾角的断续预制裂隙大理岩的环向变形也呈现出局部化渐近破坏的特征。

由表 6 可见，裂隙倾角为  $30^\circ$ ， $45^\circ$  和  $60^\circ$  的岩样峰值强度分别为 57.08，50.66 和 35.88 MPa(以 II 处的最大值为准)，比完整岩样的峰值强度 83.46 MPa 分别降低了 31.6%，39.3%和 57.0%。很显然，随着裂隙倾角的增大，岩样峰值强度呈减小趋势。裂隙倾角为  $30^\circ$ ， $45^\circ$  和  $60^\circ$  的岩样弹性模量分别为 30.06，27.70 和 15.89 GPa(以 I 处的应力 - 应变曲线为准)，比完整岩样的弹性模量 35.98 GPa 分别降低了 16.5%、23.0%和 55.8%；而对变形模量而言，与完整岩样(变形模量为 20.99 GPa)相比，裂隙倾角为  $60^\circ$  的岩样降幅较大，约为 43.8%，但裂隙倾角为  $30^\circ$  和  $45^\circ$  的岩样变形模量降幅较低，仅分别为 4.5%和 3.5%。由此可见，随着裂隙倾角的增大，岩样弹

性模量趋于减小, 但变形模量缺乏明显规律。随着裂隙倾角的增大, 岩样峰值轴向应变与环向应变(以 I 处的峰值应变值为准)均呈减小趋势。

综上所述, 与完整大理岩相比, 断续预制裂隙大理岩变形呈现出局部化渐近破坏特征, 其峰值强度、弹性模量以及峰值轴向应变均明显降低, 且降低幅度与预制裂隙参数分布形式密切相关; 但变形模量除裂隙间距 48 mm(降幅 24.8%)、含 119°岩桥倾角(降幅 23.7%)以及含 60°裂隙倾角(降幅 43.8%)的岩样以外, 其他含 2 条预制裂隙岩样的变形模量降幅均为 -3.8%~7.8%, 差异较小, 可以表征断续预制双裂隙大理岩的变形特性。裂隙长度越长、裂隙数目越多以及裂隙倾角越大, 其峰值强度、弹性模量以及峰值轴向应变也越低; 而岩桥倾角及裂隙间距和力学参数之间规律性不明显。

断续预制裂隙岩样在受力后的变形可以归纳为如下 5 个阶段: (1) 裂隙压密阶段: 岩石材料内部存在的裂纹、孔隙、位错以及节理等初始损伤出现闭合; (2) 弹性变形阶段: 应力 - 应变曲线呈现为线性关系, 岩石材料内存在原有裂隙压密以及孔洞闭合等局部结构的调整; (3) 变形局部化阶段: 岩样中预制裂隙的尖端产生局部应力集中, 随着外载的增加, 裂纹出现萌生和扩展; (4) 应变软化阶段: 外载达到岩样的峰值强度, 主裂纹迅速扩展和贯通, 同时伴随着次生裂纹的萌生和扩展, 进而导致岩样的宏观破坏; (5) 残余强度阶段: 岩样依靠主生裂纹面之间的摩擦力来承载轴向应力。

最后需要特别指出的是, 由图 3~7 的环向应变 - 轴向应变全程曲线的残余强度阶段不难看出, 断续预制裂隙岩样的环向应变随轴向应变增加均大致以相同比例系数  $k(k=6.0)$  增加, 这主要是由于在该阶段岩石依靠残余摩擦力来承载残余轴向应力, 而同种岩石材料的残余内摩擦系数是材料本身所固有的力学特征, 与预制裂隙的几何分布关系不大。

## 5 裂隙岩样宏观贯通模式

单轴压缩下含不同几何分布的断续预制裂隙大理岩宏观贯通模式如图 8 所示<sup>[32]</sup>。从图 8(a)可以看出, 本文试验所用大理岩在单轴压缩下为轴向劈裂破坏形式, 具有较好的脆性特征, 呈现出典型的拉

伸破裂模式。

### 5.1 岩桥倾角对试样宏观贯通模式影响

岩桥倾角对试样宏观贯通模式影响如图 8(b), (c)所示。岩桥倾角为 61°的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹起始位置为预制裂隙内部顶端附近的拉伸应力集中区, 裂纹扩展区域为预制裂隙 ①和②之间, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c* 和一些次生裂纹; 而岩桥倾角为 119°的岩样最终的破坏呈现为拉压贯通模式, 裂纹起始位置为预制裂隙的内部顶端, 裂纹扩展区域为预制裂隙 ①和②之间, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *b* 和 *c* 然后裂纹 *a* 和一些次生裂纹。由此可见, 岩桥倾角在小于 90°时易发生拉剪贯通模式, 而在大于 90°时易发生拉压贯通模式。

### 5.2 裂隙间距对试样宏观贯通模式影响

裂隙间距对试样宏观贯通模式影响如图 8(b), (d)~(f)所示, 由图可见, 裂隙间距为 48 mm 的岩样最终的破坏主要呈现为剪贯通模式, 裂纹首先萌生于预制裂隙 ①的内部顶端, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 后裂纹 *b*, 裂纹贯通模式较为简单; 裂隙间距为 33 mm 的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹起始位置为预制裂隙内部顶端附近的拉伸应力集中区, 裂纹扩展区域为预制裂隙 ①和②之间, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c* 和一些次生裂纹; 裂隙间距为 24 mm 的岩样最终破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹首先萌生于预制裂隙 ①和②的内部顶端, 在预制裂隙 ①的内部顶端产生 2 条主裂纹(拉裂纹和剪裂纹), 而在预制裂隙 ②的内部顶端产生 1 条主生拉裂纹, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c*, 由于主生拉裂纹 *a* 的扩展和主生拉裂纹 *b* 的反向延伸, 2 条主裂纹出现汇合导致岩样的最终破坏; 而裂隙间距为 20 mm 的岩样最终的破坏呈现为拉剪压混合贯通模式, 裂纹也首先萌生于预制裂隙 ①和②的内部顶端, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c*, 同时伴随着一些次生裂纹(包括剪裂纹和压裂纹等)的产生和扩展。综上所述, 由这四种不同裂隙间距的岩样预制裂纹贯通模式不难看出, 整体而言, 裂隙间距越小, 试样的贯通模式越复杂, 呈现出拉剪压混合贯通模式。但需特别指出的是, 裂隙间距为 33 和 20 mm 的 2 个岩样在主生裂纹萌生和扩展的过程中, 出现了较多的次生裂纹, 从能



图 8 含不同几何分布的断续预制裂隙脆性大理岩单轴压缩破裂模式<sup>[32]</sup>

Fig.8 Uniaxial compression failure mode of brittle marble with pre-existing fissures of different geometric distributions<sup>[32]</sup>

量耗散的角度来看, 每条次生裂纹可以看作是消耗应变能的 1 个通道, 通道越多, 次生裂纹的累加长度越长, 则其上消耗的能量也越多, 从而使得所需要的外载应力也较高, 这就定性解释了图 4 的裂隙间距对岩样强度特性的影响规律。

### 5.3 裂隙长度对试样宏观贯通模式影响

裂隙长度对试样宏观贯通模式影响如图 8(b), (g), (h)所示。裂隙长度为 16 mm 的岩样最终的破坏呈现为拉贯通模式, 预制裂隙①和②之间没有出现裂纹扩展, 裂纹扩展顺序为裂纹 *a*, *b* 和 *c* 同时萌生和扩展, 3 条主生拉裂纹 *a*, *b* 和 *c* 均是沿外加载方向逐渐向端部扩展和延伸; 裂隙长度为 20 mm 的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹首先萌生于预制裂隙①和②的内部顶端, 裂纹扩展顺序为裂纹 *a* (剪裂纹)和 *b*(拉裂纹)同时产生, 在主生拉裂纹和剪裂纹产生和扩展的同时, 在预制裂隙①和②的下方也出现了 5~6 条次生拉裂纹; 而裂隙长度为 33 mm 的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹首先在预制裂隙内部顶端附近的拉伸应力集中区域萌生, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c* 和一些次生裂纹。综上所述, 随着裂隙长度的增加, 岩样贯通模式由拉贯通模式逐渐向拉剪贯通模式转变, 也就是说, 裂隙长度较短条件下, 岩样只发生拉贯通模式, 而不易发生剪贯通模式。

### 5.4 裂隙数目对试样宏观贯通模式影响

裂隙数目对试样宏观贯通模式影响如图 8(b), (i), (j)所示, 由图可见, 裂隙数目为 2 的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹首先在预制裂隙内部顶端附近的拉伸应力集中区域萌生, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c* 和一些次生裂纹; 裂隙数目为 3 的岩样最终的破坏为拉压贯通模式, 裂纹首先在预制裂隙①和②的内部顶端萌生, 随后裂纹 *a* 沿外加载方向朝下端部延伸和扩展, 而裂纹 *b* 沿外加载方向朝上端部延伸和扩展, 裂纹扩展区域为预制裂隙①④和②④之间, 而在预制裂隙①和②之间没有出现贯通, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c*, 其中裂纹 *c* 为压裂纹; 而裂隙数目为 4 的岩样最终的破坏亦为拉压混合贯通模式, 裂纹首先在预制裂隙①~④的内部顶端萌生, 裂纹扩展区域为预制裂隙①④, ②③以及②④之间, 而在预制裂隙①②, ③④以及①③之间没有出现任何贯

通, 裂纹扩展顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 而后裂纹 *c*, 其中在预制裂隙②和③之间的 *c* 为压裂纹。由此可见, 随着裂隙数目的增加, 裂纹贯通模式趋于复杂, 逐渐由拉剪过渡到拉压混合贯通模式。

### 5.5 裂隙倾角对试样宏观贯通模式影响

裂隙倾角对试样宏观贯通模式影响如图 8(b), (k), (l)所示, 由图可见, 裂隙倾角为 30°的岩样最终的破坏呈现为拉贯通模式, 裂纹首先萌生于预制裂隙①和②的内部顶端, 但预制裂隙①②之间没有出现任何贯通, 裂纹扩展顺序为裂纹 *a* 和 *b* 同时产生, 主生拉裂纹 *a* 和 *b* 萌生方向近似垂直于预制裂隙边界, 随后近似沿外加载方向逐渐向岩样端部延伸, 同时在预制裂隙①的上方也出现了 2 条次生裂纹; 裂纹倾角为 45°的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹起始位置为预制裂隙内部顶端附近的拉伸应力集中区, 裂纹扩展区域为预制裂隙①和②之间, 裂纹贯通顺序为先裂纹 *a* 和 *b* 随后裂纹 *c* 和一些次生裂纹; 而裂隙倾角为 60°的岩样最终的破坏呈现为拉剪贯通模式, 裂纹首先在预制裂隙①和②的内部顶端萌生, 裂纹扩展顺序为先裂纹 *a* 而后裂纹 *b* 和 *c* 同时扩展, 主裂纹在扩展过程中同时伴随着一些崩落的现象。由此可见, 裂隙倾角较小的情况下, 岩样仅呈现为拉贯通模式, 破坏模式比较简单, 不易发生剪贯通模式; 而在裂隙倾角较大的情况下, 岩样呈现为拉剪贯通模式, 破坏模式较为复杂。

综上所述, 断续预制裂隙脆性大理岩样宏观贯通模式主要呈现为拉贯通、剪贯通、压贯通以及混合贯通(拉剪、拉压和拉剪压)4 种模式。含两条预制裂隙的大理岩样中, 主生裂纹基本上均萌生于预制裂隙的内部顶端, 但预制裂隙①和②附近的裂纹扩展路径并不具有明显的对称性, 这主要是由于岩石是一种非均质材料, 晶粒和缺陷的分布是随机的, 在受到外载荷时, 各组成成份对力的传递速率以及自身的变形不同, 引起了在岩石内部应力场的不均匀分布, 产生局部应力集中, 导致预制裂隙内部顶端拉伸应力集中区域微裂纹的产生, 且扩展路径不具有明显对称性。而在含 3, 4 条预制裂隙的岩样中, 主生裂纹只在预制裂隙①④, ②③以及②④中贯通, 而在预制裂隙①②, ③④以及①③之间没有出现任何贯通。

## 6 结 论

(1) 断续预制裂隙大理岩的变形呈现出显著的局部化渐近破坏特征,其峰值强度、弹性模量以及峰值轴向应变均明显降低,且降低幅度与裂隙参数(岩桥倾角、裂隙间距、裂隙长度、裂隙数目以及裂隙倾角)几何分布形式密切相关。

(2) 与无裂隙完整大理岩相比,断续预制裂隙岩样变形模量除裂隙间距 48 mm(降幅 24.8%)、含 119°岩桥倾角(降幅 23.7%)以及含 60°裂隙倾角(降幅 43.8%)的岩样以外,其他含 2 条预制裂隙岩样的变形模量降幅均为-3.8%~7.8%,差异较小。

(3) 裂隙长度越长、裂隙数目越多以及裂隙倾角越大,其峰值强度、弹性模量以及峰值轴向应变也越低。而岩桥倾角以及裂隙间距与力学参数之间规律性不明显,这是由于预制裂隙岩样宏观贯通模式的差异所致。

(4) 裂隙参数对大理岩强度参数影响敏感性从大到小可作如下排列:裂隙数目>裂隙倾角>裂隙间距>裂隙长度>岩桥倾角;对变形参数( $E_s$ )影响较大的仍为裂隙倾角和裂隙数目,但裂隙间距、岩桥倾角与裂隙长度的影响差异不大,在 15%左右。裂隙参数对岩样峰值环向变形的影响无明显的规律。

(5) 断续预制裂隙岩样在残余强度阶段,其环向应变随轴向应变增加均大致以相同比例系数增加,这主要是由于该阶段岩石依靠残余摩擦力来承载轴向应力,而同种岩石材料残余内摩擦系数是材料本身固有力学特征,与宏观裂隙参数关系不大。

(6) 断续预制裂隙大理岩样宏观贯通模式主要呈现出拉贯通、压贯通、剪贯通和混合贯通 4 种模式,且与预制裂隙的几何分布密切相关。岩样产生剪贯通需要的应力水平明显低于拉贯通;压贯通只有在一定条件下才能产生。

(7) 完整大理岩样呈现出典型的轴向劈裂拉贯通模式。含较短裂隙长度及较小裂隙倾角的岩样呈现出拉贯通模式;而含较长裂隙长度和较大裂隙倾角的岩样呈现出拉剪混合贯通模式。裂隙间距越小以及裂隙数目越多,岩样的贯通模式趋于复杂,呈现出混合贯通模式。

最后需要说明的是,本文对单轴压缩下含不同几何分布的裂隙参数脆性大理岩的力学特性作了探索,所获得的试验现象和结果对断续节理岩石的变形、强度和破坏特性提出了有价值的认识,尤其是关于破裂模式的分析,对于理解脆性节理裂隙岩体的破坏机理具有一定的工程实践意义。但由于岩石试验量和一致性的局限性,相关试验结论仍需要基于单轴压缩下大量不同岩性断续预制裂隙岩石结果来进一步佐证,这方面的研究仍有待以后做深入探讨。而且本文研究只考虑了单轴压缩状态,工程岩体多处于三轴受压状态,因此今后需深入开展三轴压缩下含不同几何参数的断续预制裂隙岩样力学特性的试验研究工作<sup>[35]</sup>,力求为节理裂隙岩体强度及变形参数的确定和本构模型的建立提供更多的参考依据。

## 参考文献(References):

- [1] BOBET A. Fracture coalescence in rock materials: experimental observations and numerical predictions[Ph. D. Thesis][D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [2] ZHU W S, CHEN W Z, SHEN J. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks[J]. Acta Mech Solida Sinica, 1998, 19(4): 355 - 360.
- [3] VASARHELYI B, BOBET A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(2): 119 - 139.
- [4] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 229 - 241.
- [5] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863 - 888.
- [6] SHEN B. The mechanism of fracture coalescence in compression — experimental study and numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(1): 73 - 85.
- [7] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. The effect of neighbouring cracks on elliptical crack initiation and propagation in uniaxial and triaxial stress fields[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 59(2): 103 - 115.
- [8] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 210 - 1 217.(ZHANG

- Ping, LI Ning, HE Ruolan, et al. Mechanism of fracture coalescence between two pre-existing flaws under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 210 - 1 217.(in Chinese)
- [9] 李银平, 杨春和. 裂纹几何特征对压剪复合断裂的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 462 - 466.(LI Yinping, YANG Chunhe. Influence of geometric characteristics of pre-existing cracks on mixed mode fractures under compression-shear loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 462 - 466. (in Chinese))
- [10] WONG R H C, CHAU K T. The coalescence of frictional cracks and the shear zone formation in brittle solids under compressive stresses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 335.
- [11] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147 - 164.
- [12] 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(7): 909 - 924.
- [13] TANG C A, LIN P, WONG R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part II: numerical approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925 - 939.
- [14] 林 鹏, 黄凯珠, 王仁坤, 等. 不同角度单裂纹缺陷岩样的裂纹扩展与破坏行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 652 - 5 657.(LIN Peng, WONG R H C, WANG Renkun, et al. Crack growth mechanism and failure behavior of specimen containing single flaw with different angles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 652 - 5 657.(in Chinese))
- [15] 王元汉, 苗 雨, 李银平. 预制裂纹岩石压剪试验数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 113 - 3 116.(WANG Yuanhan, MIAO Yu, LI Yinping. Numerical simulation of the experimental on rock with preexisted cracks under compression and shearing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 113 - 3 116.(in Chinese))
- [16] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249 - 262.
- [17] TANG C A, KOU S Q. Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61(3/4): 311 - 324.
- [18] 赵永红, 梁晓峰. 灰岩平板试件变形破坏过程的试验观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 608 - 1 615.(ZHAO Yonghong, LIANG Xiaofeng. Testing study on crack development in limestone plate specimen under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 608 - 1 615.(in Chinese))
- [19] 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 Mingli, TANG Chun'an, ZHU Wancheng. 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))
- [20] ZHAO Y H. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3): 349 - 366.
- [21] FUJII Y, ISHIJIMA Y. Consideration of fracture growth from an inclined slit and inclined initial fracture at the surface of rock and mortar in compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 1 035 - 1 041.
- [22] 林卓英, 吴玉山, 关玲俐. 岩石在三轴压缩下脆 - 延性转化的研究[J]. 岩土力学, 1992, 13(2): 45 - 53.(LIN Zhuoying, WU Yushan, GUAN Lingli. Research on the brittle-ductile transition property of rocks under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(2): 45 - 53.(in Chinese))
- [23] 徐松林, 吴 文, 李 廷, 等. 三轴压缩大理岩局部化变形的试验研究及其分岔行为[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 296 - 301.(XU Songlin, WU Wen, LI Ting, et al. Experimental studies on localization and bifurcation behaviors of a marble under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 296 - 301. (in Chinese))
- [24] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 475 - 478.(YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 475 - 478.(in Chinese))
- [25] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研

- 究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136 - 142.(YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136 - 142.(in Chinese))
- [26] 杨圣奇, 张学民, 苏承东. 岩块声学特性的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2003, 22(6): 772 - 775.(YANG Shengqi, ZHANG Xuemin, SU Chengdong. Testing study on acoustic property of marble block[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2003, 22(6): 772 - 775.(in Chinese))
- [27] 杨圣奇, 徐卫亚, 韦立德, 等. 单轴压缩下岩石损伤统计本构模型与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 200 - 203.(YANG Shengqi, XU Weiya, WEI Lide, et al. Statistical constitutive model for rock damage under uniaxial compression and its experimental study[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2004, 32(2): 200 - 203.(in Chinese))
- [28] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 484 - 4 490.(YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on statistical damage constitutive model of rock considering scale effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 484 - 4 490.(in Chinese))
- [29] 苏承东, 杨圣奇. 循环加卸载下岩样变形与强度特征试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 667 - 671.(SU Chengdong YANG Shengqi. Experimental study on the deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2006, 34(6): 667 - 671.(in Chinese))
- [30] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 962 - 969.(YANG Shengqi, XU Weiya, XIE Shouyi, et al. Study on triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 962 - 969.(in Chinese))
- [31] 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 R H C, LIN Peng, TANG Chun'an, et al. Mechanisms 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))
- [32] YANG S Q, DAI Y H, HAN L J, et al. Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(12): 1 833 - 1 845.
- [33] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 120 - 124.(LI Yinping, WANG Yuanhan, CHEN Longzhu, et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 120 - 124.(in Chinese))
- [34] 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): 2 505 - 2 516.
- [35] 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): 1 572 - 1 587.(YANG Shengqi, WEN Sen, LI Liangquan. 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): 1 572 - 1 587.(in Chinese))

## 热烈祝贺本刊编委袁 亮、钟登华当选中国工程院院士

中国工程院 2009 年院士增选结果 12 月 2 日在京揭晓, 48 名杰出工程科技工作者当选为中国工程院院士。本刊编委袁亮(淮南矿业(集团)有限责任公司)、钟登华(天津大学)荣膺中国工程院院士, 在此表示诚挚的祝贺!