

不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究

杨圣奇, 刘相如

(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)

摘要: 基于在伺服试验机上获得的不同围压下断续预制裂隙大理岩体积应变-轴向应变全程曲线, 分析了围压对断续预制裂隙大理岩扩容特性的影响规律。结果表明, 完整和断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值随着围压的增加均近似呈线性增大, 而且裂纹损伤阈值对围压的敏感性低于峰值强度; 同等围压下, 粒径较小的中晶大理岩具有较高的裂纹损伤阈值; 完整或断续预制裂隙大理岩的长期内摩擦角均显著低于瞬时内摩擦角值, 但长期黏聚力的降低幅度与裂隙分布密切相关; 完整或断续预制裂隙大理岩的峰值强度越高, 相应的裂纹损伤阈值也越大, 且两者之间具有较好的线性关系。研究结论对于岩石工程设计和数值分析时断续节理裂隙岩体力学参数选取具有一定的参考价值。

关键词: 岩石力学; 预制裂隙; 大理岩; 扩容特性; 裂纹损伤阈值

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)12-2188-10

作者简介: 杨圣奇(1978-), 男, 江苏盐城人, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事岩石力学与工程方面的教学和研究工作。E-mail: yangsqi@hotmail.com

Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures

YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the obtained volumetric-axial strain curves of marble with pre-existing fissures under different confining pressures, the effect of confining pressures on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures is analyzed. The results show that the crack damage thresholds of intact and pre-cracked marble all increase linearly with the confining pressures, and that the sensibility of the crack damage thresholds to the confining pressures is lower than that to the peak strength. Under the same confining pressure, the medium marble with smaller grain sizes has higher crack damage threshold. The long-term internal friction angles of intact and pre-cracked marble are lower distinctly than the short-term, but the reducing extent of long-term cohesion is closely related to fissure geometry. The higher the peak strength of intact or pre-cracked marble, the larger the corresponding crack damage thresholds. The peak strength of intact and pre-cracked marble has a good linear relation with the crack damage thresholds. The conclusions are significant for the choice of mechanical parameters of rock mass with jointed fissures when carrying out engineering design and numerical simulation.

Key words: rock mechanics; pre-existing fissure; marble; dilatancy behavior; crack damage threshold

0 引言

大理岩作为一种典型的变质岩, 具有黏聚力很弱, 塑性变形较大以及非均质明显等特征, 因而其力学特性备受岩石力学研究者的重视, 目前已开展了较为系统的试验研究(如三轴压缩试验^[1-5]、流变力学试验^[6]等), 也取得了较多的研究成果。但是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分析和探讨, 而没有考虑真实岩石材料内裂隙的作用, 这主要是由于在真实岩石材料中预制裂隙较难实施的缘故^[7-9]。工程岩体似断非断, 似连非连, 呈现出断续结构特征,

因而研究不同围压下断续预制裂隙岩石的力学特性, 对于保障裂隙岩体工程的稳定与安全具有重要的理论价值和实践意义。

岩石扩容特性是指岩石在偏应力差作用下所引起的体积增大的现象, 开展岩石扩容特性的研究, 对于理解地壳构造、地震成因等地壳运动过程, 以及保障岩石工程的稳定性具有重要的意义^[10-15]。前人对岩石

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179189); 江苏省自然科学基金项目(BK2012568)

收稿日期: 2011-08-19

扩容特性已经进行了一些研究工作, 较有代表性的成果是: 陈宗基等^[11-12]、康文法^[13]采用自行研制的 8000 kN 多功能三轴仪, 对房山花岗岩、济南辉长岩等脆性岩石的扩容特性进行了系统试验研究, 分析了温度、温度、围压、孔隙压力以及时间等对脆性岩石扩容特性的影响规律, 提出了考虑扩容特性的岩石黏弹性本构方程, 并成功预测了地震发生和地壳隆起现象中与时间相关的扩容特性; Alejano 等^[14]建立了考虑岩石(体)扩容角的本构模型, 并将提出的本构模型成功应用于岩体工程实践中; Yuan 等^[15]基于前人所获得的不同围压下岩石扩容特性试验结果, 提出了一个岩石扩容指数的概念, 并建立了扩容指数和围压之间的经验理论模型。

然而以前对扩容特性的分析多局限于对完整岩石试样进行试验, 而对断续预制裂隙岩石扩容特性很少涉及, 有鉴于此, 本文基于不同围压下断续预制裂隙大理岩力学特性试验结果^[7], 重点分析围压以及裂隙分布对断续预制裂隙大理岩扩容特性的影响规律, 并力图揭示断续预制裂隙大理岩扩容特性和裂纹演化之间的联系。

1 岩性特征和试验概况

1.1 试验大理岩材料

为了研究含两条断续预制闭合裂隙岩石的扩容特性, 试验选取大理岩作为研究对象, 该大理岩颜色为白色, 俗名为汉白玉, 由碳酸盐矿物成分组成, 变晶结构, 硬度为 3.5~4.0, 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, 主要化学成分为 Ca 和 Mg, 密度约为 2704 kg/m^3 。用于本文扩容试验的为中晶和粗晶大理岩, 其细观结构如图 1 所示^[7]。中晶大理岩, 粒级相对不均, 晶粒尺寸为 1.0~4.0 mm, 平均为 1.5 mm 左右, 新鲜, 结晶程度较高; 而粗晶大理岩, 晶粒尺寸为 4.0~6.0 mm, 平均为 5.0 mm, 重结晶程度高, 较新鲜。



图 1 两种晶粒大理岩细观结构的对比

Fig. 1 Meso-structures for marble with various grains

1.2 预制裂隙岩样制备

采集的试验岩块经实验室钻石机, 采用水钻法钻孔取芯, 制备岩样。制备岩样时, 为了避免各向异性对试验结果的影响, 沿同方向加工试样。同时为保证试验结果的真实性和可比性, 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。所有试验岩样制成以后, 在自然状态下干燥 7 d 以上。

按照国际岩石力学学会 (ISRM) 试验规程^[16]的建议方法, 圆柱形试验岩样的长径比最好在 2.0~3.0 之间, 以最大可能减小端部摩擦效应对试验结果的影响。因此, 本文所有试验大理岩样的直径均为 50 mm, 长度均为 100 mm, 这样所有试验岩样的长径比均为 2.0, 可以确保试验岩样内部处于一种均匀应力状态。

裂隙岩样中裂隙分布形式如图 2, 3 所示^[7]。裂隙长度为 $2a$, 裂隙倾角 (裂隙与 σ_1 方向所成的夹角) 为 α , 岩桥倾角 (两条裂隙内部顶端连线与 σ_3 方向所成的夹角) 为 β , 和岩桥长度 (两条裂隙内部顶端之间的距离) 为 $2b$ 。为了简化研究, 本文将裂隙长度 $2a$ 和岩桥长度 $2b$ 分别固定在 24, 33 mm。

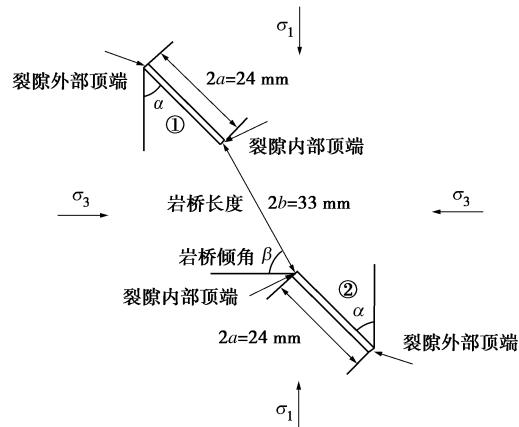


图 2 断续预制裂隙岩样中裂隙的分布参数

Fig. 2 Geometry of fissures in flawed sample

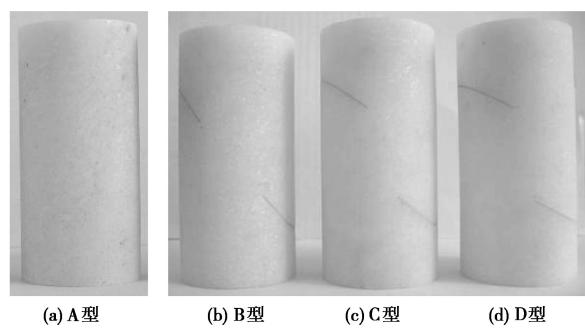


图 3 大理岩 4 种不同的裂隙分布

Fig. 3 Four types of geometries of fissures of marble

在加工好的完整岩样基础上, 采用高速电动切割机加工图 2, 3 所示的三维裂隙, 切割轮片为 0.3 mm 厚的超薄金刚石锯片, 加工好的裂隙厚度约为 0.3~0.5

mm。同时为了制作闭合裂隙，将石膏充填于岩样的三维裂隙中，这是由于石膏能被当作一种软弱材料^[17]。为了研究预制裂隙分布对不同围压下大理岩的强度和变形破坏等力学特性的影响规律，选择了 4 种不同的裂隙分布类型，如图 3 所示。其中 B 型的岩样 $\alpha=30^\circ$, $\beta=38^\circ$; C 型的岩样 $\alpha=45^\circ$, $\beta=61^\circ$; 而 D 型的岩样 $\alpha=60^\circ$, $\beta=75^\circ$ 。

1.3 试验程序

本文所有试验均是在中国矿业大学岩控中心的 MTS815.02 伺服控制试验机上进行的。试验程序如下：在施加轴向荷载之前，首先以 0.5 MPa/s 的速率对岩样施加至预定的围压，确保岩样处于均匀的静水压力状态下；然后以 0.002 mm/s 的加载速率对岩样施加轴向应力，直至岩样发生屈服破坏。本文试验研究中，轴向和环向分别采用 5 mm 的位移传感器，测试岩样的轴向和环向位移；采用 1000 kN 的力传感器，测试岩样的轴向荷载。在整个试验过程中，同步记录试验大理岩的轴向荷载、轴向变形和环向变形，而且在试样两端加上与岩样直径匹配的钢性垫块，以减小端面摩擦对长径比为 2.0 的圆柱形岩样试验结果的影响。

2 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性分析

图 4,5 分别给出了不同围压下断裂预制裂隙粗晶

和中晶大理岩体积应变 - 轴向应变的关系曲线。众所周知，根据岩石体积应变曲线，不同围压下脆性岩石（如花岗岩等）的全程应力应变曲线可以划分为如下 5 个阶段：裂隙闭合、弹性变形、裂纹产生和稳定裂纹扩展、裂纹损伤和失稳裂纹扩展、峰后破坏阶段^[18-20]。本文粗晶和中晶大理岩在不同围压下的扩容特性试验结果（图 4,5）也显示了类似的特性，典型的结果如图 6 所示。图 6 中体积应变由轴向应变与 2 倍侧向应变之和得到，这里的侧向应变以负值进行计算。对于断续预制裂隙大理岩在各个阶段的裂纹演化特征详述如下：

(1) 裂隙闭合阶段：断续预制裂隙大理岩在该阶段轴向应力 - 轴向应变曲线出现上凹，具有显著的初期非线性变形，这主要是由于随着轴向应力的逐渐增加，岩石内部存在的一些初始裂隙以及孔隙出现闭合的缘故。该阶段的特征显著依赖于试验围压。在单轴压缩和低围压时，大理岩的裂隙闭合阶段是比较显著的；但在高围压时，该阶段不是很显著，这主要是由于岩石中存在的初始裂隙在三向均匀静水压力加载下就已经出现了部分或完全闭合。当然，从某种程度上这种闭合程度除了与围压密切相关外，还与岩石材料自身的非均质性（如晶粒大小等）以及岩石中裂隙分布的形式存在一定关联。同等围压下，非均质性较高的岩石，其初期非线性变形也较显著。

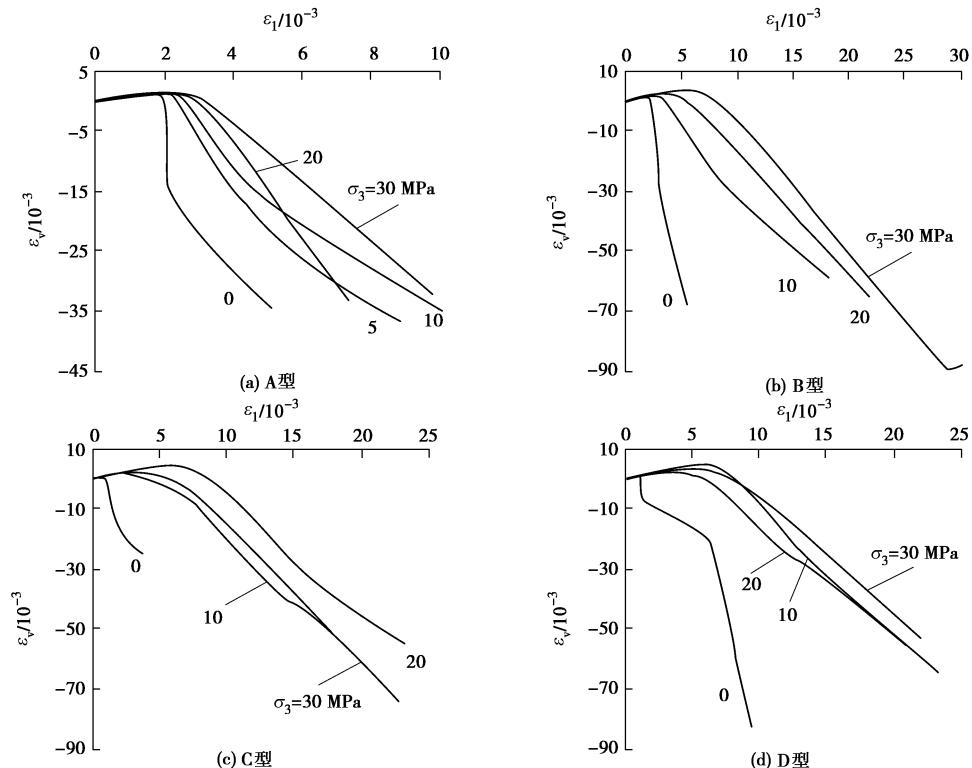


图 4 不同围压下断续预制裂隙粗晶大理岩体积应变 - 轴向应变全程曲线

Fig. 4 Complete volumetric-axial strain curves of pre-cracked coarse marble under different confining pressures

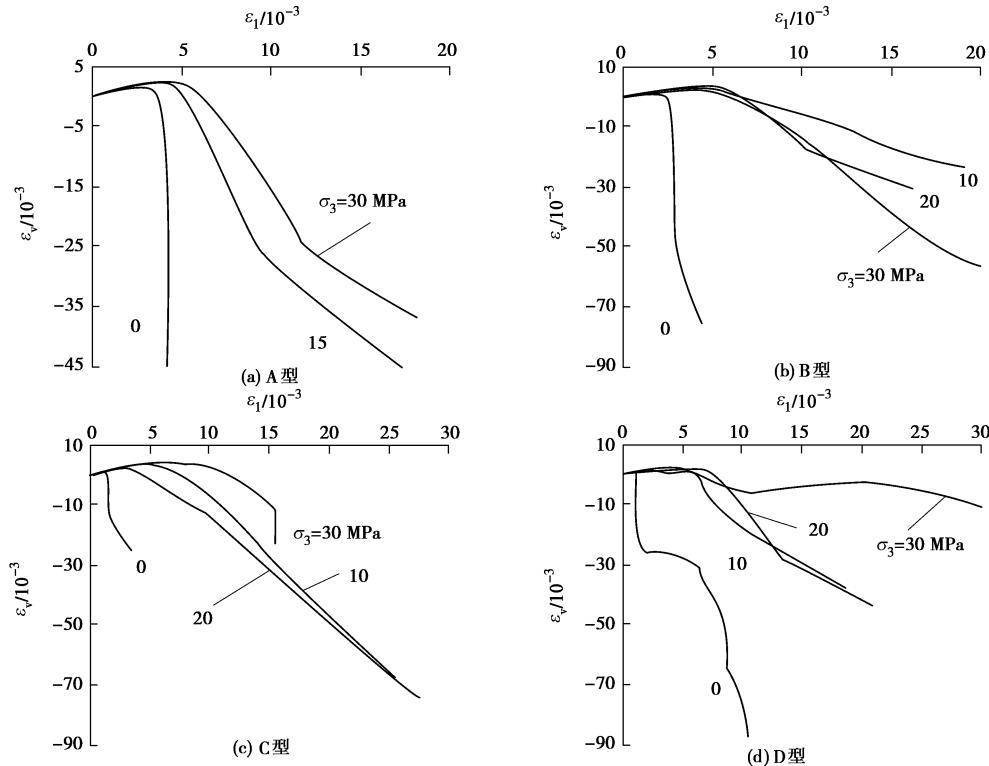


图 5 不同围压下断续预制裂隙中晶大理岩体积应变 - 轴向应变全程曲线

Fig. 5 Complete volumetric-axial strain curves of pre-cracked medium marble under different confining pressures

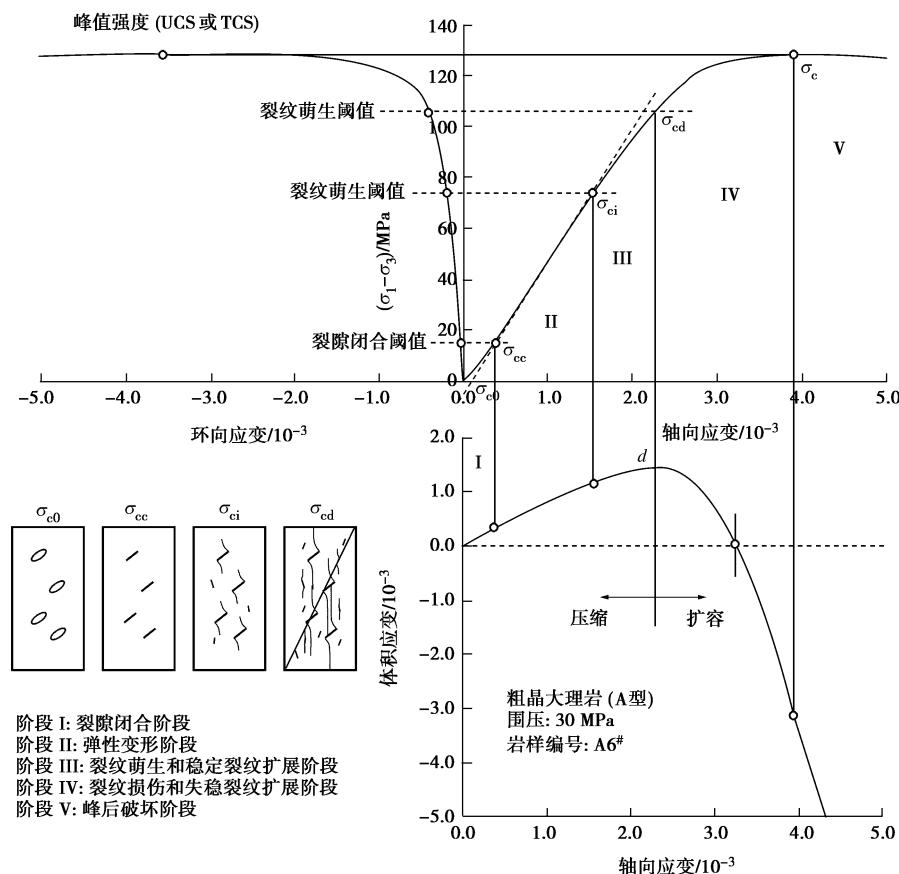


图 6 表征裂纹演化特征的大理岩典型轴向应力 - 轴向应变、轴向应力 - 环向应变以及体积应变 - 轴向应变曲线

Fig. 6 Typical axial stress-axial strain, axial stress-circumferential strain, and volumetric-axial strain of marble denoted crack evolution behavior

(2) 弹性变形阶段: 在岩石中的初始裂隙闭合以后, 随着轴向变形的增加, 轴向偏应力加载开始产生。从裂纹闭合阈值点开始弹性变形主载着该阶段的应力 - 应变曲线^[18-20]。在该阶段内虽然存在着一些不可逆的过程, 如裂纹的闭合或者张开, 但是大理岩的线性应力 - 应变特性几乎没有发生变化, 从图 6 的第 II 阶段能看出这一点。大理岩的轴向和侧向变形都是线性, 从而也导致体积变形的线性特征。

(3) 裂纹产生和稳定裂纹扩展阶段: 在过裂纹萌生阈值点之后, 断续预制裂隙岩石中已经闭合的原生裂纹和新生裂纹开始张开和扩展, 从而使得随着轴向偏应力的增加, 断续预制裂隙岩石的应力 - 应变曲线偏离弹性变形阶段。该阶段由于裂纹扩展是可以控制的, 通常被认为是裂纹稳定扩展区域^[18-20]。该阶段内, 岩石由压缩向膨胀转化也将开始发生, 该区域的最终点通常被称为裂纹损伤阈值 σ_{cd} 。

(4) 裂纹损伤和失稳裂纹扩展阶段: 在过裂纹损伤阈值之后, 随着轴向偏应力的增加, 轴向和侧向应变速率迅速增加。而且侧向应变的增加速率要高于轴向应变。随着轴向应变的增加, 断续预制裂隙岩石的体积应变开始朝着相反的方向增加, 即开始发生膨胀, 在不同的研究文献中, 这个转折点 d 经常采用不同的术语来描述, 如裂纹损伤阈值、损伤临界点或者压缩 - 膨胀边界等^[18-20]。无论怎样定义转折点 d , 这个转折点必定是由于断续预制裂隙岩石中裂纹的张开或者预制裂隙内部顶端裂纹的扩展等, 从而使得断续预制裂隙岩石发生了不可逆的损伤, 由此导致断续预制裂隙岩石的体积变形迅速增加。

(5) 峰后破坏阶段: 断续预制裂隙大理岩的宏观裂纹迅速产生和峰后变形特性表现为应变软化或应变硬化特征, 在本文中断续预制裂隙大理岩应变硬化和软化特征强烈依赖于围压、晶粒的大小以及裂隙分布形式。在峰后应力降低到残余强度阶段以后, 断续预制裂隙岩样将依靠破裂面以及晶粒之间的摩擦滑移来承载轴向应力。

根据图 4, 5 分别给出的不同围压下断续预制裂隙粗晶和中晶大理岩体积应变 - 轴向应变全程曲线, 可以发现对于完整岩样 (A型) 而言, 当岩样过 d 点 (图 6) 后, 在轴向应变相同的条件下, 围压越高, 岩样的扩容应变越小, 这表明围压能有效抑制岩样的扩容, 且围压越高的岩样扩容之前的轴向变形也愈大。而对断续预制裂隙岩样 (B~D型) 而言, 尽管整体而言, 所表现出的扩容特性类似于完整岩样, 但也有些裂隙岩样扩容特性差异较大, 如裂隙分布为 C型的粗晶大理岩以及裂隙分布为 B型的中晶大理岩, 这可能由于

断续预制裂隙岩样在不同围压下所表现出的裂纹扩展特征的差异所致。

表 1, 2 分别给出了断续预制裂隙粗晶和中晶大理岩的裂纹扩容特征, 其中 ε_{1cd} , ε_{3cd} 和 ε_{vd} 分别表示岩样达到裂纹损伤阈值 σ_{cd} 时所对应的轴向应变、侧向应变和体积应变, 本文将 ε_{1cd} , ε_{3cd} 和 ε_{vd} 分别定义为裂纹损伤轴向应变、裂纹损伤侧向应变和裂纹损伤体积应变。整体而言, 大理岩在围压作用下的裂纹损伤应变均显著高于单轴压缩下的裂纹损伤应变, 但对完整岩样而言, 随着围压的增加, 裂纹损伤应变也呈逐渐增加的趋势, 而对断续预制裂隙岩样而言, 虽然总体来说, 围压越高, 裂纹损伤应变也越大, 但并非呈显著的正线性关系, 这表明不同围压下裂隙岩样内的裂纹演化过程对裂纹损伤应变有不同程度的影响。

3 断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值与围压的关系

Coulomb 准则是岩土工程中应用最广泛的强度理论之一。Coulomb 准则, 即黏聚力 c 和内摩擦系数 $\mu = \tan \varphi$ (φ 为内摩擦角) 可用来解释岩石的强度特征。该准则在以最大主应力 σ_s , σ_3 表示时, 可写成 $\sigma_s = M + N\sigma_3$, 简记为 $Q(M, N)$, 表征一个给定岩样能够承载的最大轴向应力 σ_s 与围压 σ_3 成线性关系, 其中 M 和 N 分别为

$$M = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} , \quad (1)$$

$$N = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) , \quad (2)$$

式中, M 和 N 均为强度准则参数。

表 1 给出了基于线性的 Coulomb 准则的完整和裂隙大理岩峰值强度参数^[7]。

基于图 6 获得裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的方法, 确定出的不同围压下断续预制裂隙粗晶和中晶大理岩的 σ_{cd} 分别见表 2, 3 所示。Martin 等^[18]研究了法国 Lac du Granite (花岗岩) 的强度特征, 并定义失稳裂纹开始出现的应力即为裂纹损伤阈值 σ_{cd} , 并指出 σ_{cd} 可能就是岩石的长期强度。

依据表 2, 3 中给出的不同围压下完整大理岩裂纹损伤阈值, 可以作出完整大理岩裂纹损伤阈值与围压的关系, 如图 7 所示。很显然, 随着围压的增加, 完整大理岩裂纹损伤阈值也呈逐渐增加的趋势, 两者成显著的正线性关系, 且具有较高的线性回归相关系数。与表 1 中完整大理岩峰值强度对围压的敏感程度相比^[7], 同种晶粒大理岩裂纹损伤阈值对围压的敏感

表1 基于线性的 Coulomb 准则的完整和裂隙大理岩峰值强度参数^[7]Table 1 Peak strength parameters of intact and pre-cracked marble in accordance with linear Coulomb criterion^[7]

大理岩类型	裂隙分布	UCS/MPa	M/MPa	N	c/MPa	$\phi /(^{\circ})$	R
粗晶大理岩	A型	69.83	73.68	2.77	22.14	28.0	0.985
	B型	31.20	36.74	3.98	9.21	36.8	0.992
	C型	17.20	29.53	4.44	7.01	39.2	0.975
	D型	36.60	43.92	3.91	11.11	36.3	0.990
中晶大理岩	A型	119.3	120.33	3.60	31.71	34.4	0.990
	B型	75.01	66.43	4.94	14.94	41.6	0.980
	C型	23.83	36.51	6.36	7.24	46.7	0.985
	D型	39.87	58.18	5.20	12.76	42.6	0.954

表2 裂隙粗晶大理岩的裂纹扩容特征及其长期强度参数

Table 2 Crack dilatancy characteristics and long-term strength parameters of pre-cracked coarse marble

裂隙分布	σ_3/MPa	σ_{cd}/MPa	σ_p/MPa	$\varepsilon_{lcd}/10^{-3}$	$\varepsilon_{3cd}/10^{-3}$	$\varepsilon_{vcld}/10^{-3}$	c_d/MPa	$\varphi_d/(^{\circ})$	R
A型	0	66.54	76.2	1.766	0.271	1.225			
	0	64.59	70.9	1.761	0.281	1.199			
	5	80.13	89.6	1.914	0.195	1.524	23.00	22.1	
	10	87.52	101.4	2.046	0.290	1.465	(-3.9%)	(21.1%)	0.964
	20	81.14	107.4	1.963	0.207	1.548			
	30	108.96	128.0	2.353	0.454	1.445			
B型	0	27.84	31.2	1.850	0.162	1.525			
	10	59.44	72.2	2.446	0.244	1.958	10.30	27.4	
	20	69.61	101.6	3.636	0.336	2.963	(-11.8%)	(25.5%)	0.985
	30	81.57	120.7	5.297	0.699	3.898			
C型	0	13.58	17.2	0.852	0.120	0.612			
	10	38.32	80.4	2.260	0.161	1.938	5.78	28.6	
	20	73.06	102.3	5.799	0.617	4.565	(17.5%)	(27.0%)	0.949
	30	63.24	124.5	3.467	0.519	2.430			
D型	0	18.21	36.6	0.996	0.113	0.770			
	10	55.33	81.8	5.605	0.431	4.744	7.45	26.3	
	20	42.30	106.4	3.029	0.237	2.556	(32.9%)	(27.5%)	0.938
	30	75.69	125.3	4.931	0.906	3.120			

注: $\sigma_{sd} = \sigma_{cd} + \sigma_3$; $\sigma_s = \sigma_p + \sigma_3$, ()中的数据表示长期强度参数与表1中的峰值强度参数相比的降幅; 其中负值表示参数没有降低, 而是呈增加幅度; 下同。

性低于峰值强度。而且粒径较大的粗晶大理岩裂纹损伤阈值对围压的敏感性略低于中晶大理岩。

同样依据表2, 3中给出的不同围压下断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值, 可以作出断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值与围压的关系, 如图8, 9所示。很显然, 断续预制裂隙粗晶和中晶大理岩裂纹损伤阈值 σ_{cd} 随着围压的增加也近似呈正相关性, 而且裂纹损伤阈值对围压的敏感性也显著低于峰值强度。此外, 在单轴压缩下, 具有相同裂隙分布的大理岩峰值强度和裂纹损伤阈值差异不大, 但随着围压的增加, 断续预制裂隙大理岩峰值强度和裂纹损伤阈值的差异逐渐增大, 且差异程度与裂隙分布也存在着较大的关系。

同等围压下, 裂隙分布为D型的裂隙岩样, 其峰值强度和裂纹损伤阈值的差异最大, 而裂隙分布为B型的

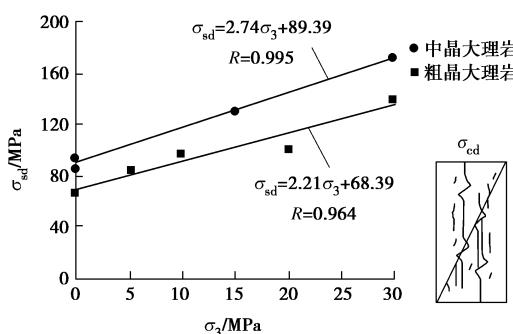


图7 完整大理岩(A型)裂纹损伤阈值与围压之间的关系

Fig. 7 Relation between crack damage threshold of intact marble (Type A) and the confining pressure

表 3 裂隙中晶大理岩的裂纹扩容特征及其长期强度参数

Table 3 Crack dilatancy characteristics and long-term strength parameters of pre-cracked msmedium marble

裂隙分布	σ_3/MPa	σ_{cd}/MPa	σ_p/MPa	$\varepsilon_{led}/10^{-3}$	$\varepsilon_{3cd}/10^{-3}$	$\varepsilon_{ved}/10^{-3}$	c_d/MPa	$\varphi_d/(^\circ)$	R
A型	0	93.6	131.9	2.546	0.448	1.651			
	0	85.1	114.0	2.653	0.392	1.869	27.00	27.7	0.995
	15	130.6	162.2	3.594	0.497	2.600	(14.9%)	(19.5%)	
	30	171.4	205.3	4.124	0.684	2.757			
B型	0	54.95	75.1	1.876	0.304	1.269			
	10	77.14	88.5	4.789	0.498	3.793	17.38	26.8	0.949
	20	125.14	153.8	4.281	0.516	3.249	(-16.3%)	(35.6%)	
	30	126.79	184.6	3.392	0.549	2.294			
C型	0	16.68	23.8	0.933	0.107	0.719			
	10	61.85	109.3	4.214	0.131	3.951	4.95	34.4	0.990
	20	83.01	143.3	2.617	0.316	1.986	(31.6%)	(26.3%)	
	30	129.62	191.2	6.099	0.872	4.354			
D型	0	18.58	39.9	1.017	0.064	0.890			
	10	41.81	118.7	1.818	0.069	1.681	4.51	27.9	0.980
	20	60.99	160.2	2.510	0.179	2.152	(64.7%)	(34.5%)	
	30	104.19	166.2	3.557	0.472	2.612			

裂隙岩样，其峰值强度和裂纹损伤阈值的差异最小。

基于图 7~9 中不同围压下断续预制裂隙大理岩裂纹损伤阈值和围压的关系，采用 Coulomb 准则，可以近似确定断续预制裂隙大理岩的长期强度参数，即长期黏聚力 c_d 和长期内摩擦角 φ_d （表 2, 3）。由表 1, 2 可见，对粗晶大理岩而言， c_d 值的范围为 5.78~23.0 MPa，而 φ_d 值的范围为 $22.1^\circ \sim 28.6^\circ$ ；而对中晶大理岩而言， c_d 值的范围为 4.51~27.00 MPa，而 φ_d 值的范围为 $26.8^\circ \sim 34.4^\circ$ ，这表明大理岩的 c_d 和 φ_d 显著依赖于岩样中的裂隙分布。对粗晶和中晶大理岩而言，裂隙岩样（B型、C型、D型）的 c_d 均显著低于完整岩样（A型）。但裂隙粗晶大理岩的 φ_d 值均高于完整粗晶大理岩，而对中晶大理岩而言，裂隙分布为 C型的裂隙岩样的 φ_d 值显著高于完整岩样，但裂隙分布为 B型或 D型的裂隙岩样的 φ_d 值与完整岩样近似等同，均约为 27° 。

与表 1 中所给出的完整和裂隙大理岩峰值强度参数相比，断续预制裂隙大理岩（A型、B型、C型、D型）的长期内摩擦角 φ_d 均显著低于表 2 中的瞬时内摩擦角 φ 值，降低幅度随着粒径和裂隙分布的不同而存在着差异。完整粗晶大理岩的 φ_d 约比相应的 φ 值低 21.1% ，而裂隙粗晶大理岩（B型、C型、D型）的 φ_d 约比相应的 φ 值低 $25.5\% \sim 27.5\%$ ，降幅与裂隙分布关系不大；完整中晶大理岩的 φ_d 约比相应的 φ 值低 19.5% ，而裂隙中晶大理岩（B型、C型、D型）的 φ_d 约比相应的 φ 值低 $26.3\% \sim 35.6\%$ ，降幅与裂隙分布相

关，其中裂隙分布为 B型或 D型的裂隙中晶大理岩的 φ_d （降幅约 35% ）显著高于裂隙分布为 C型的裂隙中晶大理岩（ 26.3% ）。

然而完整粗晶大理岩的长期黏聚力 c_d 值与表 1 中相应的瞬时黏聚力 c 值近乎等同，而完整中晶大理岩的 c_d 值比相应的 c 值低 14.9% 。裂隙分布为 C型或 D型的粗晶和中晶大理岩长期黏聚力 c_d 值均显著低于相应的瞬时黏聚力 c 值，降幅在 $17.5\% \sim 64.7\%$ ，且对同种晶粒大理岩而言，裂隙分布为 D型的岩样黏聚力降幅要高于裂隙分布为 C型的岩样。然而裂隙分布为 B型的粗晶和中晶大理岩 c_d 值却高于相应的 c 值，从理论上这是不可能的，因为长期强度参数一般均会低于瞬时强度参数，这可能是由于裂隙分布为 B型岩样出现了显著的拉伸破裂模式所致^[7]。而计算岩石的强度参数仍是采用基于压剪破坏的 Coulomb 准则来进行的，因此会出现这种情况。

4 断续预制裂隙大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系

图 10 给出了完整大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系，由图 10 可见，可以近似采用式(3)来表征完整大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系，即

$$\sigma_p = k_1 + k_2 \sigma_{cd} \quad (3)$$

对完整粗晶大理岩而言， $k_1 = -6.826 \text{ MPa}$ 和 $k_2 =$

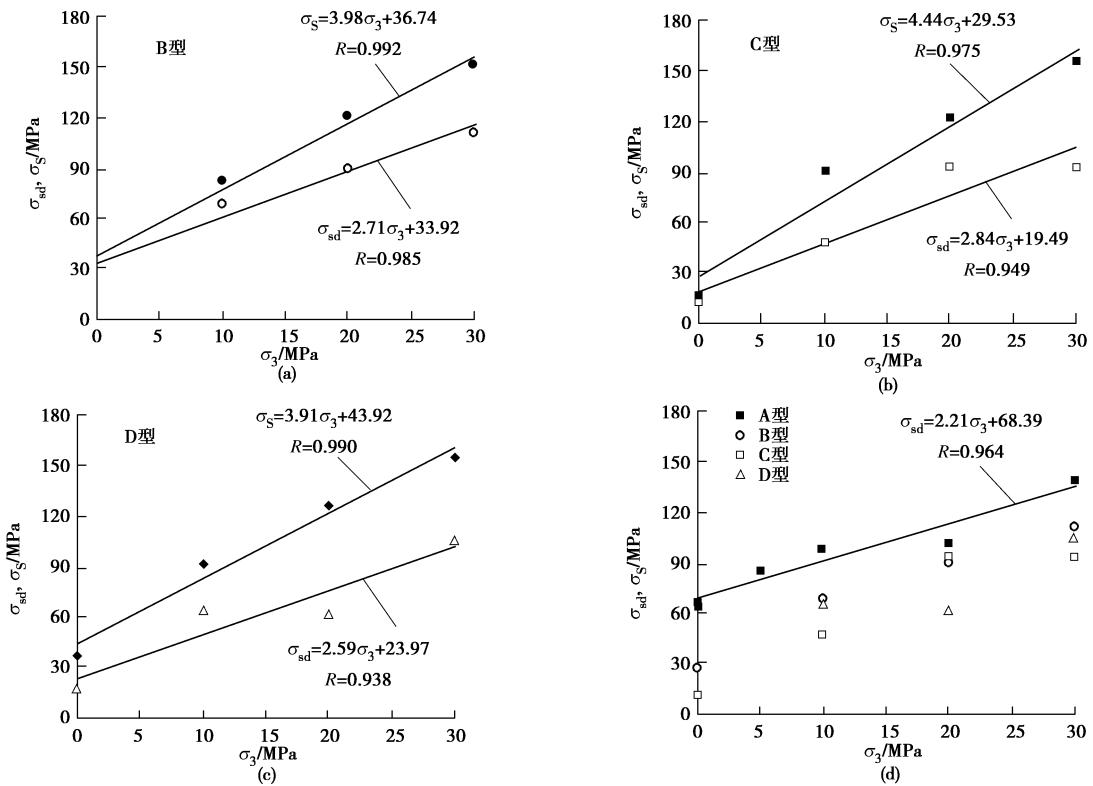


图 8 裂隙粗晶大理岩裂纹损伤阈值与围压之间的关系

Fig. 8 Relation between crack damage threshold of pre-cracked coarse marble and confining pressure

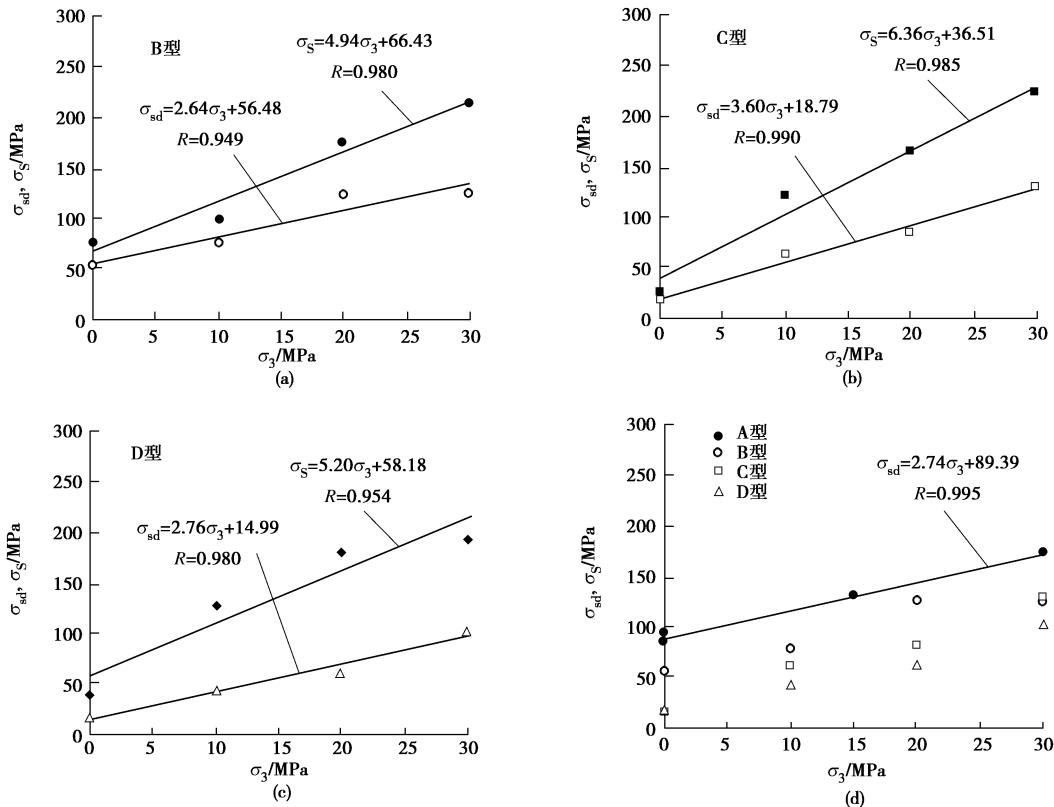


图 9 裂隙中晶大理岩裂纹损伤阈值与围压之间的关系

Fig. 9 Relation between crack damage threshold of pre-cracked medium marble and confining pressure

1.257, 线性回归相关系数 R 为 0.957; 而对完整中晶大理岩而言, $k_1=32.288 \text{ MPa}$ 和 $k_2=1.007$, 线性回归相关系数 R 高达 0.995, 这充分表明, 岩石的峰值强度

越高, 相应的裂纹损伤阈值也越大, 且两者之间具有较好的线性关系。而且完整粗晶大理岩峰值强度 σ_p 对裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的敏感性略高于完整中晶大理岩。

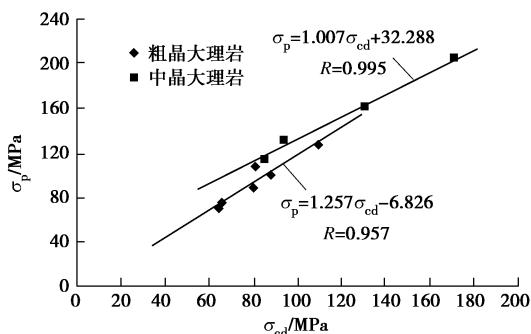


图 10 完整大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系

Fig. 10 Relation between peak strength σ_p and crack damage threshold σ_{cd} of intact marble

图 11 给出了断续预制裂隙大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系, 由图 11 可见, 断续预制裂隙大理岩 σ_p 和 σ_{cd} 之间的关系也可以近似用式(3)来表征。很显然, 式(3)中的回归系数 k_1 , k_2 与岩样中的裂隙分布以及粒径均密切相关。由图 11 不难看出, 同种晶粒的断续预制裂隙大理岩的回归系数 k_2 均略高于完整大理岩相应的数值。

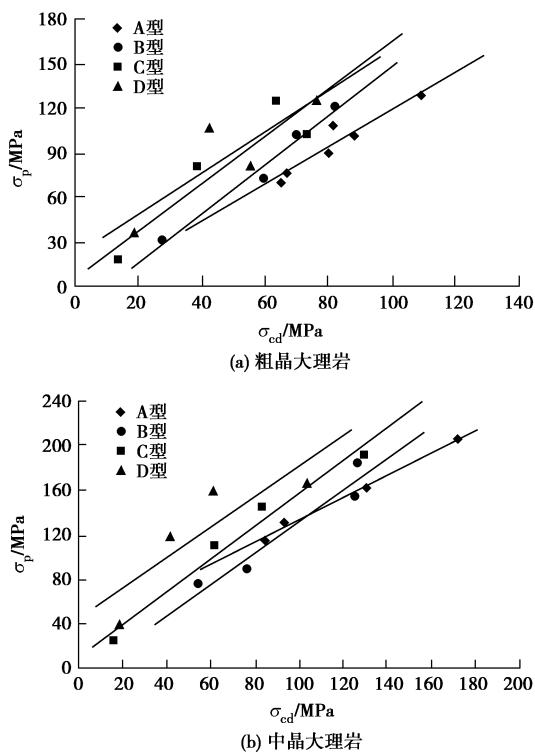


图 11 裂隙大理岩峰值强度 σ_p 与裂纹损伤阈值 σ_{cd} 的关系

Fig. 11 Relation between peak strength σ_p and crack damage threshold σ_{cd} of pre-cracked marble

5 结 论

(1) 利用不同围压下断续预制裂隙大理岩体积应变-轴向应变全程曲线, 获得了不同围压下断续预制裂隙大理岩的裂纹扩容特征以及长期黏聚力 c_d 和长期内摩擦角 φ_d 。完整和断续预制裂隙大理岩裂纹损伤

阈值 σ_{cd} 随着围压的增加均近似呈线性增大, 而且裂纹损伤阈值对围压的敏感性低于峰值强度。同等围压下, 粒径较小的中晶大理岩具有较高的裂纹损伤阈值。

(2) 大理岩的 c_d 和 φ_d 显著依赖于岩样中的裂隙分布, 对粗晶和中晶大理岩而言, 裂隙岩样的 c_d 均显著低于完整岩样, 但裂隙粗晶大理岩的 φ_d 值均高于完整粗晶大理岩; 而对中晶大理岩而言, 裂隙分布为 C 型的裂隙岩样的 φ_d 值显著高于完整岩样, 但裂隙分布为 B 型或 D 型的裂隙岩样的 φ_d 值与完整岩样近似等同, 均约为 27° 。

(3) 大理岩的长期内摩擦角 φ_d 均显著低于瞬时内摩擦角 φ 值, 降低幅度随着粒径和裂隙分布的不同而存在着差异, 然而完整粗晶大理岩的长期黏聚力 c_d 值与瞬时黏聚力 c 值近乎等同, 完整中晶大理岩的 c_d 值比相应的 c 值低 14.9%。

(4) 裂隙分布为 C 型或 D 型的粗晶和中晶大理岩长期黏聚力 c_d 值均显著低于相应的瞬时黏聚力 c 值, 降幅在 17.5%~64.7%, 但裂隙分布为 B 型的粗晶和中晶大理岩长期黏聚力 c_d 值却高于相应的瞬时黏聚力 c 值, 这可能是由于裂隙分布为 B 型岩样出现了显著的拉伸破裂模式所致。完整或断续预制裂隙大理岩的峰值强度越高, 相应的裂纹损伤阈值也越大, 且两者之间具有较好的线性关系。

参 考 文 献:

- [1] 杨圣奇. 裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (YANG Sheng-qi. Study on the mechanical behavior of fissured rock and time-dependent effect analysis[J]. Beijing: Sciences Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 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 Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. 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))
- [3] 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 Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136~142. (in Chinese))
- [4] 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 Song-lin, 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))
- [5] 徐松林, 吴文, 张奇华, 等. 大理岩有限变形分岔分析[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 42 - 46. (XU Song-lin, WU Wen, ZHANG Qi-hua, et al. Bifurcation analyses of finite/large deformation for a marble[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 42 - 46. (in Chinese))
- [6] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 962 - 969. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, XIE Shou-yi, et al. Studies 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))
- [7] 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.
- [8] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (in Chinese))
- [9] 杨圣奇, 渠涛, 韩立军, 等. 注浆锚固裂隙砂岩破裂模式和裂纹扩展特征[J]. 工程力学, 2010, **27**(12): 156 - 163. (YANG Sheng-qi, QU Tao, HAN Li-jun, et al. Failure mode and crack propagation of sandstone with pre-existing fissures under different anchorages by grouting[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(12): 156 - 163. (in Chinese))
- [10] 卢兴利, 刘泉声, 张伟, 等. 高应力软岩非弹性体积增加试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(7): 903 - 906. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, ZHANG Wei, et al. Test study of inelastic volume increase of soft rock in high stress[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(7): 903 - 906. (in Chinese))
- [11] 陈宗基, 石泽全, 于智海, 等. 用 8000 kN 多功能三轴仪测量脆性岩石的扩容、蠕变及松弛[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, **8**(2): 97 - 118. (TAN Tjong-kie, SHI Zhe-quan, YU Zhihai, et al. Dilatancy creep and relaxation of brittle rocks measured with the 8000 kN multipurpose triaxial apparatus [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989, **8**(2): 97-118.)
- [12] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, **2**(1): 11 - 21. (TAN Tjong-kie, KANG Wen-fa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, **2**(1): 11 - 21. (in Chinese))
- [13] 康文法. 湿度、围压、空隙水压力和时间对房山砂岩扩容、强度的效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, **9**(3): 184 - 194. (KANG Wen-fa. The effects of humidity, confining pressure, pore-water pressure and time on the dilatancy and strength of Fangshan sandstones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, **9**(3): 184 - 194. (in Chinese))
- [14] ALEJANO L R, ALONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, **42**(4): 481 - 507.
- [15] YUAN Shih-che, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(4): 679 - 686.
- [16] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress - strain curve for the intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(3): 279 - 289.
- [17] 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.
- [18] MARTIN D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet Granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 1994, **31**(6): 643 - 659.
- [19] EBERHARD 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.
- [20] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(1): 108 - 119.