

文章编号: 0253 - 9993(2005)01 - 0031 - 05

# 大理岩脆 - 延性转换的微观机理研究

朱珍德, 张 勇, 王春娟

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 为探讨高水压对大理岩变形、强度、脆 - 延转化特性及破坏断裂损伤劣化的影响, 取锦屏二级水电站引水隧洞大理岩分别进行高水压、高围压、低围压作用下全应力 - 应变过程三轴压缩对比试验, 对大理岩破坏断裂断口进行微观扫描电镜试验, 分析不同工况条件下大理岩断口微观形貌特征. 结果表明, 在低围压作用下莫尔强度包络线近似为线性, 在高围压作用下莫尔强度包络线为非线性. 高外水压力的存在抑制了岩石脆性向延性的发展, 降低了岩石的强度, 对软化区裂纹的扩展起到加剧作用. 通过微观数字图像实验分析可知, 高围压比低围压条件下大理岩断口裂纹长度小、密度大, 分布均匀. 给出了高水压、高围压作用下岩石破裂产生的微观损伤力学机理, 为进一步分析高围压、高内外水压条件下非圆形洞室围岩失稳破坏提供了可靠的理论依据.

**关键词:** 大理岩; 脆 - 延性转换; 微观机理; 全应力 - 应变过程

**中图分类号:** TU458.3 **文献标识码:** A

## Study on microcosmic mechanics for brittle-ductile transition of marble

ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, WANG Chun-juan

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to probe into the effects of high hydraulic pressure on the marble characters of strength, deformation, brittle-ductile transition and rupture, damage degradation, the triaxial compression contrastive tests of marble specimens, which were collected from surrounding rocks of diversion tunnel in Jinping waterpower station, were tested respectively under three different states of high hydraulic pressure and high and low confining pressure. Then the microtest (SEM) was carried out to study its microcosmic character of failure surface under three different pressure cases. The test results indicate that under low confining pressure Moore strength line is linear, whereas nonlinear under low confining pressure. The existing of high hydraulic pressure constrains the development of brittle-ductile transition, reduces the strength and also makes the effects strongly on the fission cracking in soften area. Based on the testing analysis of microcosmic digital image, there were smaller fissions, larger density and more distribution equality under high confining pressure than it under low. Microcosmic damage mechanics of rock cracking under high confining pressure and hydraulic pressure was given, and reliable theory basis was offered to analysis further on the failure and stability of the noncircular cave surrounding rock under high confining pressure and high hydraulic pressure.

**Key words:** marble; brittle-ductile transition; microcosmic mechanics; complete stress-strain process

岩石断口微观机理分析是一门研究岩石破坏断裂表面的科学. 在岩石力学领域中, 从微观方面研究岩

收稿日期: 2004 - 05 - 22

基金项目: 中国科学院武汉岩石力学研究所国家重点实验室开放基金资助项目 (2110306)

作者简介: 朱珍德 (1964 - ), 男, 河北盐山人, 教授. Tel: 025 - 83787226, E-mail: zhendezhu50918@sina.com

石的破坏规律, 将微观破坏形貌特征同岩石微观裂纹扩展至断裂破坏的力学机制联系起来进行尚未很好的开展. 近几年, 国内外学者已逐渐重视这方面的研究<sup>[1~3]</sup>, 通过岩石断口的微观分析, 研究其与形貌、显微组织的关系, 揭示岩石微结构的构成和缺陷形成, 为岩石损伤演化过程、细观力学研究提供实测依据, 最终建立岩石微观破坏机制和宏观断裂机理分析的桥梁, 其理论意义和实用价值都很深远.

岩石三轴压缩试验是测定岩石力学性质的基本试验方法, 研究成果较多. Von Karman 于 1911 年首次在普通试验机上得到了 Carrara 大理岩白云岩三轴压缩曲线<sup>[4-5]</sup>. 随着试验技术的发展, 文献 [6] 首次在刚性试验机上得到了 Tenness 大理岩的三轴全应力 - 应变过程压缩曲线, 随后文献 [7] 又得到多孔砂岩三轴脆 - 塑转换特性. 文献 [8] 研究了方解石, 得到颗粒尺寸对脆 - 延转换特性的影响. 实际上, 孔隙水压、渗透水压等对岩石力学性质的影响也是相当明显的<sup>[9-11]</sup>. 随岩石所受围压、孔隙水压的不同, 即岩石在不同应力条件下, 岩石微观裂纹扩展、贯通及宏观的强度变性特性必然存在差异, 而这方面的研究工作才刚刚起步.

锦屏二级水电站工程地处四川凉山雅砻江大河湾所包围的锦屏山区, 电站引水隧洞洞长 16~19 km, 洞径 11 m, 一般埋深 1 500~2 000 m, 最大埋深 2 500 m, 隧洞围岩岩性组合复杂, 主要以大理岩、砂岩为主, 节理断裂构造发育; 同时隧洞围岩处在高地应力、高水压力的复杂应力状态下, 所表现出的宏细观力学性质与常规应力状态下相比有显著的特点. 因此, 为了探析隧洞围岩的稳定性, 针对锦屏二级水电站引水隧洞围岩 (大理岩) 所受实际应力环境, 进行了不同高围压高水压条件下单轴、三轴压缩试验研究.

## 1 孔隙水压下的岩石三轴试验

### 1.1 试验原理及方法

高围压、高水压作用下全应力 - 应变过程三轴压缩试验在 MTS815.03 电液伺服控制刚性试验机上进行. 该试验系统配备轴压、围压和孔隙水压 3 套独立的闭环伺服控制系统.

试验时, 先施加一定的围压  $p_3$  ( $p_2 = p_3$ ), 同步施加均匀分布的孔隙水压  $p_3$  ( $p_3 = p_3$ ) 至预定值, 而后保持围压和孔隙水压恒定, 采用应变控制方式施加轴向压力, 应变速率为 2.5 mm/300 s, 可得岩石全程应力 - 应变过程曲线.

### 1.2 试样及试验方案

大理岩试样取自锦屏二级水电站地下引水隧洞围岩. 大理岩为三叠系第 2 层 ( $T_{2b}$ ), 此层岩石为致密块状结构, 均匀性好, 矿物成分主要为方解石. 试样按照国际岩石力学学会的建议方法和岩石力学试样规范, 加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体试样. 试验测得大理岩物理力学性质指标<sup>[12]</sup>: 风干密度为 2.797; 抗压强度  $R_c = 110.54$  MPa; 弹性模量  $E_s = 34.28$  GPa; 泊松比  $\mu = 0.191$ .

为探讨大理岩在孔隙水压作用下变形破坏特征, 设计了 3 种工况来实现: 取大理岩岩芯  $\phi 50$  mm  $\times$  100 mm 试件, 分别在围压 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60 MPa 作用下进行常规三轴压缩试验; 分别在围压  $p_3 = 11, 20, 30, 45, 60$  MPa 以及孔隙水压  $p_w = 10$  MPa 作用下进行全应力 - 应变过程三轴压缩试验; 高水压、高围压作用下大理岩全应力 - 应变过程变形强度特征.

取大理岩样按 1.2 设计的两种工况进行对比试验研究 (表 1, 图 1). 试验结果表明, 在孔隙水压力  $p_w = 10$  MPa 作用时, 峰值强度  $\sigma_{wc}$ 、峰值应变  $\epsilon_{wc}$  都比常规三轴 (相同围压  $p_2 = p_3$  条件下) 的峰值强度  $\sigma_c$ 、峰值应变  $\epsilon_c$  要小, 即  $\sigma_{wc}/\sigma_c < 1$ ,  $\epsilon_{wc}/\epsilon_c < 1$ . 在低围压 ( $p_3 < 20$  MPa) 情形下孔隙水压力的作用随之下降. 这说明孔隙水压的存在, 增加了大理岩的脆性, 使得峰值前的平均弹性模量提高. 由图 1 不难看出, 随着围压的增加, 大理岩峰后从应变软化特性转换为理想塑性.

当  $p_3 = 60$  MPa 时, 应力 - 应变曲线峰值后表现为理想塑性, 一般称此围压为脆 - 延转换点. 当  $p_3 < 60$  MPa 时, 应力 - 应变曲线有一峰值点 (峰值强度); 峰值点后, 应力 - 应变曲线在较大的应变范围内, 随着应变的增加轴向应力有较小的减少; 而后, 轴向应力在较小应变的情况下, 产生较大的应力下降; 最后, 轴向应力稳定在某一水平 (残余强度) 不变.

表 1 大理岩力学变形性质指标

Table 1 Mechanical deformation characteristic indexes of marble specimens

工况	$\sigma_3$ / MPa	$p_w$ / MPa	$\sigma_c$ / MPa	$\epsilon_c \times 10^{-3}$	工况	$\sigma_3$ / MPa	$p_w$ / MPa	$\sigma_c$ / MPa	$\epsilon_c \times 10^{-3}$
	5	0	165.971	10.951		11	10	151.236	9.126
	10	0	201.928	12.215		20	10	249.883	13.254
	20	0	309.108	17.624		30	10	295.433	16.378
	30	0	368.421	21.852		45	10	337.245	22.316
	45	0	411.382	27.654		60	10	400.108	25.497
	60	0	460.274	31.236					

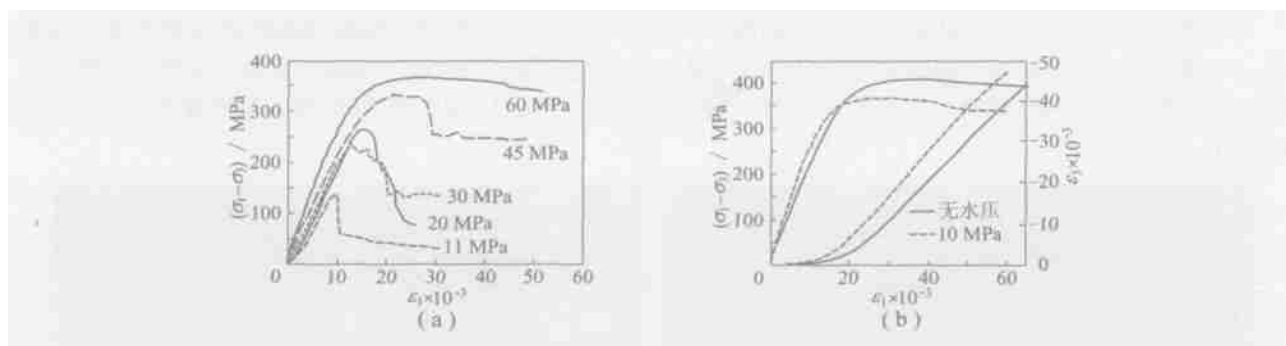


图 1 在  $p_w = 10$  MPa 和  $\sigma_3 = 60$  MPa 作用下大理岩三轴压缩全应力 - 应变曲线

Fig. 1 Complete stress-strain curves of marble under triaxial compression with 10 MPa and 60 MPa confining hydraulic pressure

(a)  $p_w = 10$  MPa; (b)  $\sigma_3 = 60$  MPa

由实验结果分析可知，在围压较小时， $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  关系可用线性描述；当围压范围较大时，在有或无施加水压两种试验条件下，二者关系均表现出明显的非线性，可用二次抛物线描述，即

$$\sigma_1 = a \sigma_3^2 + b \sigma_3 + c, \quad (1)$$

式中， $a$ ， $b$ ， $c$  分别为与岩石和实验条件有关的强度影响系数。

大理岩的强度拟合结果如图 2 所示，拟合参数见表 2。

从图 2 可以看出，10 MPa 孔隙水压下的  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  关系曲线位于无水压关系线下方，表明在相同围压下存在孔隙水压力时的岩石峰值强度要低于无水压时的强度值。在围压  $\sigma_3 = 20$  MPa 时，10 MPa 孔隙水压使得大理岩强度降低了 16.90%；在围压为  $\sigma_3 = 60$  MPa 时，与无水压条件相比，10 MPa 孔隙水压使大理岩强度降低了 5.45%。10 MPa 孔隙水压引起强度降低随围压的变化可表示为

$$\sigma_1 = A \exp(B \sigma_3), \quad (2)$$

式中， $A$ ， $B$  为与岩性、试验条件等有关的拟合参数。

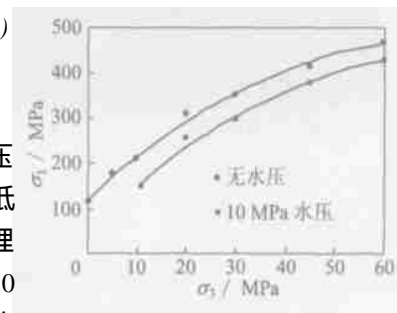


图 2  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  的关系

Fig. 2 The relationship between  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$

表 2 大理岩的强度拟合系数

Table 2 The fitting coefficients of marble compression strength

$p_w$ / MPa	$\sigma_3$ / MPa	$a$	$b$	$c$	相关系数 $R^2$
0	0 ~ 60	- 0.072	9.989	120.940	0.98
10	11 ~ 60	- 0.071	10.537	51.041	0.98

由式 (2)、图 3 表明，随围压的增大，孔隙水压引起强度降低的程度有所减小。在脆性岩石所受水压小于等于施加的围压条件下 ( $p_w = \sigma_3$ ) 容易发生水力劈裂现象。据式 (2) 可以推测，当  $p_w = \sigma_3$  时，水

压对岩石强度的影响最大；当  $p_w \ll \sigma_3$  时，孔隙水压的影响逐渐减小；当  $p_w/\sigma_3 = 0$  时，孔隙水压的影响可以忽略。孔隙水压降低强度的机理在于，在水压力作用下，水渗入岩石的孔隙之中，孔隙水压降低了岩石晶体间、颗粒间所承受的压力，即有效力，从而降低了岩石的强度。而孔隙水压的影响效果与岩石的孔隙密度、胶结状况及围压大小相关。孔隙比大的岩石透水性好，岩石试件端面施加的水压被传到所有孔隙，此时孔隙水压表现明显。相反，在试件破坏之前，孔隙小、胶结程度很高的岩石试件内部孔隙不一定是连通，内部孔隙水压力并不等于端面施加的水压力，而应力为  $p_w$ ，是与岩石孔隙率及孔隙连通情况有关的参数，其值介于 0~1 之间。

## 2 大理岩断口的微观特征分析

为确切地了解不同应力状态下（高、低围压，有、无水压）对大理岩裂纹开裂扩展及断裂破坏的影响，分别将上述工况试验断裂的岩样断口进行电镜扫描试验。从 200 余幅不同放大倍数下的断口显微照片中给出具有代表性的显微照片，选取  $\sigma_3 = 11, 60 \text{ MPa}$  及  $p_w = 0, 10 \text{ MPa}$  作用 4 种工况下具有代表性的 8 幅照片，如图 3 所示。

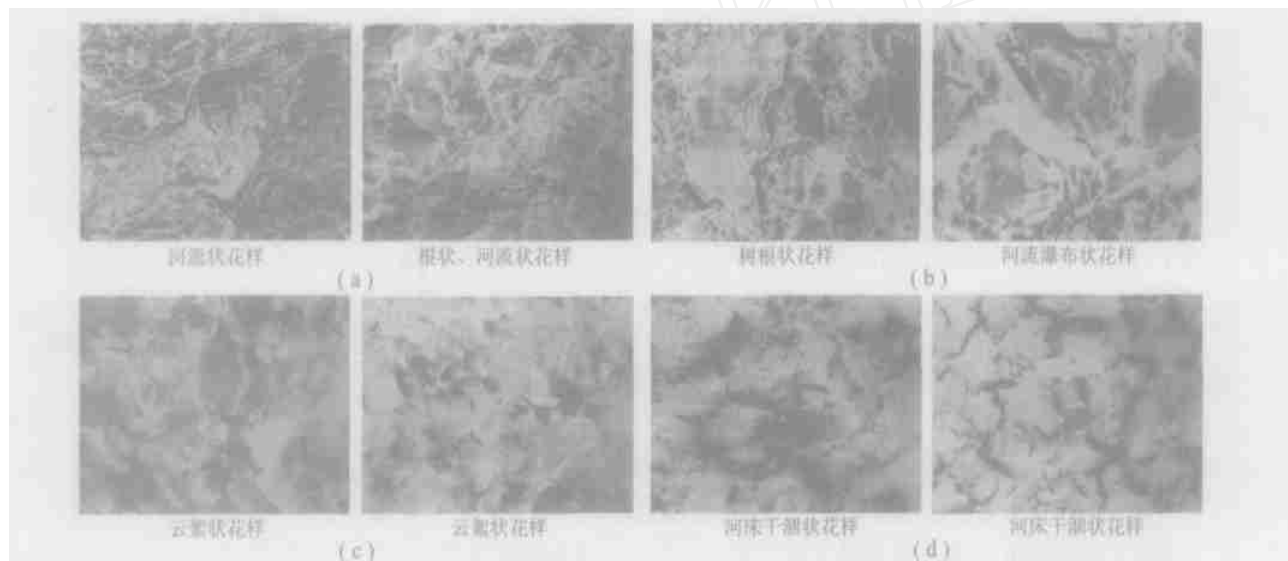


图 3 大理岩的微观断口裂纹

Fig. 3 Shaping sketch of marble microcosmic crackles

- (a) 在  $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 0$  作用下；(b) 在  $\sigma_3 = 11 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 10 \text{ MPa}$  作用下；  
(c) 在  $\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 0$  作用下；(d) 在  $\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 10 \text{ MPa}$  作用下

从图 3 (a), (b) 不难看出，在低围压  $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$  作用下，大理岩断口的形貌多为根状花样、河流状花样、鱼骨状花样，晶间断裂花样是脆性断裂。施加  $10 \text{ MPa}$  孔隙水压力较之无水压状况，断口裂纹张开度加大，裂纹长度增加，渗透水压对裂纹扩展，贯通起加剧作用，其结果与文献 [10] 相类似。从图 3 (c), (d) 可以明显发现，在高围压  $\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$  作用时，孔隙水压力  $p_w = 10 \text{ MPa}$  有无时断口微观裂纹形貌并无多大的影响。理想塑性体微观裂纹形貌基本上是“龟裂状”，即河床干涸状。

## 3 大理岩断口的微观断裂机理分析

从大量（200 多幅）大理岩断口微观形貌观察，可以得到脆性岩石的微观断裂形式，以及脆性岩石在高围压条件下由脆性转化为塑性的微观断裂状况。关于脆性岩石在低围压或孔隙水压作用下的脆性微观断裂机理见文献 [10]，本文主要探讨脆性岩石在高围压情况下转换为理想塑性体的微观断裂机理。由图 3 (c), (d) 电镜原位微观裂纹图像不难发现，脆性岩石转换为“塑性材料”其断口微裂纹产状也发生了变

化。“塑性岩石”断口微裂纹数量密集,并均匀分布,可认为是各向同性均质体。也可以这样分析,“塑性岩石”在裂纹尖端发生位错后,保持恒位移,在无位错区(DFZ)中将会形成一个不连续微观裂纹,在恒位移条件下,DFZ中的微裂纹很快钝化成空洞,如图3(a),(b)所示,随后在DFZ中又形成新的细微观裂纹并钝化成空洞,它的相互连接就会导致贯通;或者微裂纹首先从原裂纹顶端形核,保持恒位移,微裂纹钝化或缺口,新的微裂纹又从钝化了的裂纹顶端形核并钝化,将图3(d)右图经放大后得到图4,观察到细微观裂纹形核贯通之形状。

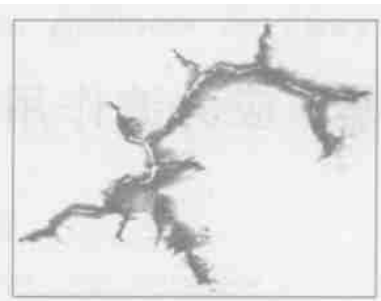


图4 细微观裂纹扩展

Fig.4 Developing sketch of microcosmic fracture

## 4 结 论

(1) 在有、无水压力作用下,围压取值范围较大时, $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 之间是非线性关系,可以用二次抛物线拟合;在低围压( $\sigma_3 - p_w$ 较小)或围压取值范围较小时, $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 可以用线性关系来描述。

(2) 在低围压( $\sigma_3 - p_w$ 较小)、有无水压( $p_w = 10 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 0$ )两种应力环境下,大理岩全应力-应变曲线形状相类似。在高围压 $\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$ 作用下,大理岩无水压峰后塑性流动变形比有水压 $p_w = 10 \text{ MPa}$ 作用时更加明显,但有( $p_w = 10 \text{ MPa}$ )无水压时大理岩由脆性向塑性转化(即脆-延转换点)影响不大;也就是说,在高围压情况下,水压对大理岩应力-应变曲线的影响不明显。

(3) 施加高孔隙水压对岩石内部裂纹扩展、贯通起到加剧作用,对围压起到遏制作用,从而降低了岩石的强度,但水压力对强度的降低程度随围压的增大有所减小;从微观扫描图像中不难看出:脆性断裂断口表面微裂纹具有明显的各向异性,而塑性断裂断口表面微裂纹细多而无序,且分布均匀,表现出各向同性的特征。

## 参考文献:

- [1] 卢应发,张梅英,葛修润.大理岩静态和循环荷载试件的电镜试验分析[J].岩土力学,1990,11(4):75~80.
- [2] 赵永红,黄杰藩,王仁.岩石微破裂发育的扫描电镜即时观测研究[J].岩石力学与工程学报,1992,11(3):284~294.
- [3] 刘小明,李焯芬.岩石断口微观机理分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,1997,16(6):509~513.
- [4] 李先炜.岩石断口分析[J].中国矿业大学学报,1993(1):15~21.
- [5] Mogi K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression[J]. J. Geophys. Res., 1971, 76: 1 255~1 269.
- [6] Wawersic W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1970, 7: 561~575.
- [7] Gwd T N, Rummel F. Effects of confining pressure on the fracture behavior of a porous rock[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstra., 1980, 17: 225~229.
- [8] Fredrich J T. Effects of grain size on brittle and semi-brittle strength: implications of micro-mechanical modeling of failure in compression[J]. J. Geophys. Res., 1990, 95: 907~920.
- [9] 朱珍德,刘立民.脆性岩石动态渗流特性试验研究[J].煤炭学报,2003,28(6):588~592.
- [10] 徐松林,吴文,王广印,等.大理岩等围压三轴压缩全过程研究:三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):763~767.
- [11] 朱珍德,胡定.裂隙水压力对裂隙岩体强度的影响[J].岩土力学,2000,21(1):64~68.
- [12] 锦屏二级水电站工程高地应力高外水压力条件下隧洞围岩稳定分析与岩石力学参数试验研究报告[D].南京:河海大学情报所,2003.47~66.