

大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究

尤明庆, 苏承东, 缙 勇

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454010)

摘要: 利用中晶和细晶两种大理岩的不同内径孔道大理岩试样, 在内孔压力为 0 时进行常规三轴压缩试验, 分析试样内非均匀应力分布对试样承载能力和变形特性的影响。孔道试样的变形特征在轴向变形较小时与完整试样大致相同; 在变形较大时孔壁附近材料因最小主应力较低而破坏, 承载能力逐步下降。以线弹性力学分析孔道试样的应力状态, 假设试样内材料同时达到承载极限, Coulomb 准则给出的试样强度是一个偏低的估计, 而不是偏高的估计。围压和轴向载荷在给定倾角剪切滑移面上的正压力和剪切力由整体力平衡确定, 与孔道存在与否没有关系, 孔道只是造成应力分布的不均匀, 使试样的承载面积减小, 引起围压对强度的贡献增加; 另一方面, 试样内部的破坏是逐步发生的, 达到峰值承载能力时试样由黏结力构成的承载能力随围压、孔径的增大而减小。这两种不同趋势的变化决定孔道试样的强度特征。孔道对试样变形破坏的影响随大理岩结构特征而不同。

关键词: 岩石力学; 孔道试样; 非均匀应力; 强度和变形; 尺寸效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)12 - 2420 - 10

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF HOLLOW CYLINDRICAL SPECIMENS OF MARBLES

YOU Mingqing, SU Chengdong, GOU Yong

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454010, China)

Abstract: A series of pseudo-triaxial compression tests on hollow specimens of marble with fine and medium crystals without considering inner pressure were carried out to study the effects of nonuniform stresses on the bearing capacity and deformation. There are no essential differences in the deformation behavior between solid and hollow specimens when the axial deformation is small. With the deformation increasing, failure in the hollow specimen starts from the hole wall for the minor principal stress; and the bearing capacity drops off. According to the stress state based on the analysis of linear elastic mechanics and the assumption of failure synchronization in the whole specimen, the strength provided by Coulomb criterion is a smaller estimated one. The strength property of hollow cylinder specimen is influenced by following factors. On the shear failure surface of specimen, normal force and shear force provided by confining pressure and axial load respectively are determined by the balance of the total forces and have no relation with hole. The hole just induces the nonuniform distribution of stresses. The bearing area becomes small for the hole; and the strength provided by confining pressure will increase. On the other hand, the failure in the specimen happens step by step; the bearing capacity of the whole specimen provided by cohesion or material strength will be less than that of the solid specimen, and decreases with confining pressure and inner diameter increasing. The experimental results provide a reference to understand the strength criteria, numerical calculation and failure of tunnel and well.

Key words: rock mechanics; hollow specimen; nonuniform stresses; strength and deformation; scale effect

收稿日期: 2007 - 06 - 13; **修回日期:** 2007 - 08 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572047)

作者简介: 尤明庆(1964 -), 男, 博士, 1984年毕业于复旦大学数学系力学专业, 现任教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: youmq@hpu.edu.cn

1 引言

岩石的变形承载特性与应力状态关系密切。应力较低时岩石呈脆性, 而应力增加到一定数值后将转化为延性。矿物结构是影响岩石力学特性的根本因素。大理岩具有明显的脆性延性转化特征, 转化应力较低, 且质地均匀, 因而对其研究^[1~4]较多。

薄壁圆筒试样在轴向压缩、扭转和径向围压作用下, 近似处于三向均匀应力状态, 用于研究中间主应力对岩石强度的影响, 如 D. H. Lee 等^[5~7]对多种砂岩、泥岩进行试验研究, 认为 Kim-Lade 准则可以较好地描述岩石的屈服面。利用厚壁圆筒的室内试验可以研究钻孔孔壁的稳定问题。试样内孔和外侧利用液压加载, 轴向利用油缸加载; 通过测量内壁的切向应变^[8]、内孔的体积变化^[9]或孔径变化^[10]等方法确定孔壁的屈服、破坏; 在室内试验的基础上进行相关的数值分析^[11, 12]。利用含孔道的圆柱试样还可以研究岩石的水压致裂、确定抗拉强度、地应力测定等问题, 与此相关的孔道尺度效应也有许多研究^[12~15]。此外, 厚壁圆筒在内外压作用下的屈服区域和强度特性可以利用各种强度准则进行分析, 但相关工作没有考虑轴向载荷的作用^[16~18]。

利用岩石试样承载均匀应力的常规三轴压缩试验可以确定岩石的强度、变形特性和相关参数^[19]。不过, 工程岩体都是处于非均匀应力状态, 如果以最弱承载断面达到承载极限作为构件的破坏, 这对于承受拉应力破坏的梁或许只是偏于保守, 但对于承受压应力破坏的立井、巷道等将产生定性的差别。以各种屈服准则为基础, 利用数值计算方法进行弹塑性分析, 已广泛应用于岩体工程设计^[20]。然而, 岩石屈服之后的承载变形特性极度复杂, 计算结果的可靠性需要试验结果的直接验证。就此而言, 实验室进行各种非均匀应力状态的试验, 具有相当的理论意义和应用价值。

缙 勇等^[21]利用不同内孔直径的中晶大理岩试样在内孔压力为 0 时进行不同围压下常规三轴压缩试验, 并以弹性力学求得应力分布, 应用 Coulomb 准则讨论了试样的强度。本文具体分析了非均匀应力分布对试样轴向承载能力、变形和破坏的影响, 给出了试样强度与围压和孔径的关系。试验用大理岩购于河南省南阳市南召县采石场, 主要矿物成分为方解石、白云石和菱镁矿, 白色, 均没有肉眼可见的明显缺陷, 整体质地均匀。试样外径为 48.7 mm, 内径为 5~15 mm, 长度为 100 mm 左右。

2 孔道试样的应力状态和承载能力

容易理解, 轴向压缩在圆柱试样内产生均匀应力, 与是否存在沿轴向的孔道没有关系。如果不考虑端部摩擦效应, 在线弹性状态下, 试样内部应力可以依据厚壁圆筒的平面问题进行分析。在外围压 P 、内部孔道压力为 0 时, 试样横断面内的应力分布^[22]为

$$\sigma_r = \frac{P}{1-\eta^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{1-\eta^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

式中: r_0 为孔道半径; η 为内外半径之比, $\eta = r_0/R$, R 为试样外半径。这里以压应力为正。显然, $\sigma_r < \sigma_\theta$ 。

当 $r = r_0$ 时, 试样孔道内壁应力为

$$\sigma_r = 0, \quad \sigma_\theta = \frac{2P}{1-\eta^2} \quad (3)$$

当 $r = R$ 时, 试样圆柱外侧面应力为

$$\sigma_r = P, \quad \sigma_\theta = \frac{1+\eta^2}{1-\eta^2} P \quad (4)$$

岩石试样的强度满足 Coulomb 强度准则, 中间主应力 σ_2 对强度没有影响, 即

$$\sigma_1 = Q + K\sigma_3 \quad (5)$$

式中: Q 和 K 均为 Coulomb 强度准则参数。假设孔道试样内部各点也满足式(5)所示的强度准则, 并且破坏断面的材料同时达到最大承载能力, 那么孔道试样的轴向承载极限为

$$\sigma_* = \frac{\int_{r_0}^R 2\pi r(Q + K\sigma_r) dr}{\pi(R^2 - r_0^2)} = Q + KPf(\eta) \quad (6)$$

式中: $f(\eta)$ 为与 η 近似成线性关系的函数(见图 1),

$$\text{且 } f(\eta) = \frac{1 - \eta^2 + \eta^2 \ln(\eta^2)}{(1 - \eta^2)^2}。$$

由于破坏断面的材料不可能同时达到最大承载能力, 似乎式(6)是孔道试样轴向承载能力的一个偏高估计, 且 $f(\eta) < 1$, 因而孔道试样的轴向承载能力将低于完整岩样。但实际情况并不完全如此, 这将在节 5 予以解释。

Coulomb 强度准则能否描述岩石三向应力状态的强度特性一直存在争论。含有中间主应力的强度准则在数值计算中也有所应用。下面仅讨论其中的一种。

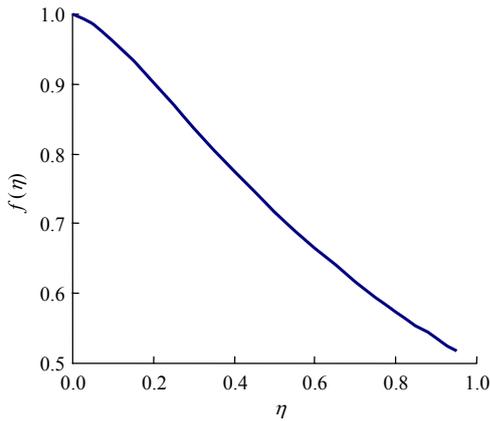


图 1 试样内孔尺寸与 $f(\eta)$ 的关系

Fig.1 Relation between inner diameter of hollow specimen and $f(\eta)$

利用俞茂宏^[23]双剪强度理论考虑中间主应力的影响,或者说利用线性插值修正 Coulomb 强度准则^[24],有

$$\sigma_1 = Q + K \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{b+1} \quad (\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_2^*) \quad (7)$$

$$\frac{b\sigma_2 + \sigma_1}{b+1} = Q + K\sigma_3 \quad (\sigma_2^* \leq \sigma_2 \leq \sigma_1) \quad (8)$$

从式(7), (8)可知,常规三轴压缩($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)和三轴伸长($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)的强度相同。式(7), (8)在 $\sigma_2 = \sigma_2^*$ 处连续,可以得到

$$\sigma_2^* = \frac{\sigma_1 + K\sigma_3}{1+K} \quad (9)$$

将式(7)或(8)代入式(9),可得到分界点:

$$\sigma_2^* = \frac{(1+b)(Q + K\sigma_3) + K\sigma_3}{1+b+K} \quad (10)$$

式(10)中参数 b 表示了中间主应力对强度的影响程度, $b = 0$ 时式(10)就是 Coulomb 准则, $b = 1$ 时式(10)为双剪强度理论,中间主应力的影响程度最大。为简单起见,本文仅讨论 $b = 1$ 。利用式(1), (2)进行实际计算可以知道,围压为 40 MPa 时,内径 10 mm 的试样在半径为 10.0~13.5 mm 时,强度属于式(8)的范围,主体部分属于式(7)的范围;而在低围压时式(8)的适用区域更小,如围压为 10 MPa 时式(8)完全不适用。为简单起见,在计算试样总的轴向承载能力时全部采用式(7),这样结果会稍微偏大,但相差在 0.5% 以内。于是试样内各点的单轴压缩强度为

$$\sigma_s = Q + K \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = Q + \frac{KP}{1-\eta^2} \quad (11)$$

式(11)表明,试样内各点单轴压缩强度与径向位置 r 无关,因而也就是整个试样的单轴压缩强

度。该值大于相同围压下完整试样的单轴压缩强度。

3 单轴压缩应力 - 应变曲线

试样产生屈服破坏之前内部承载均匀的单向压缩应力,其单轴压缩强度、杨氏模量与孔道没有明显关系。当然,孔道在试样内部形成了自由面,有助于局部破坏的产生,因而峰值强度可能随孔道尺寸增大而略有降低。含孔道试样单轴压缩仍以剪切滑移破坏为主,剪切面为平面,孔道没有先破坏的迹象。图 2 给出 4 种中晶大理岩孔道试样的单轴压缩应力 - 应变曲线,图 3 给出了所有试样的单轴压缩强度与孔径的关系。

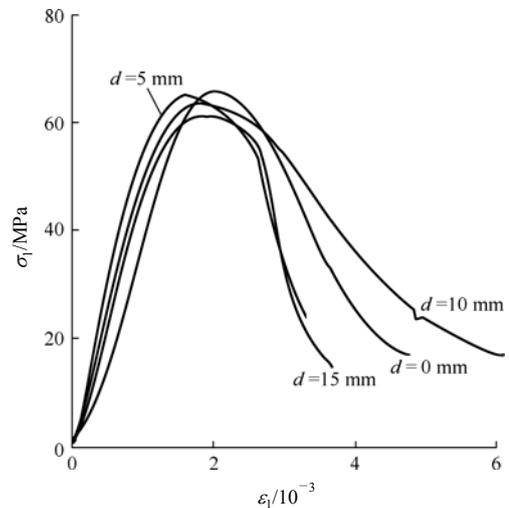


图 2 中晶大理岩孔道试样单轴压缩应力 - 应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of specimens with various inner holes under uniaxial compression

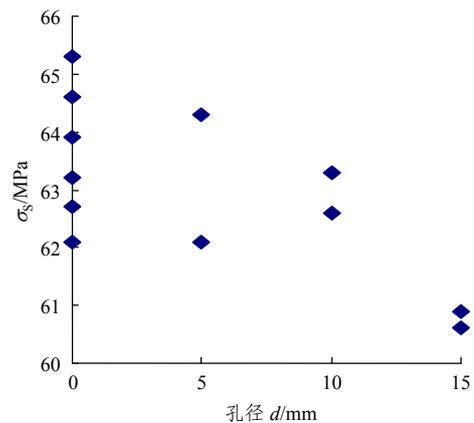


图 3 单轴压缩强度与孔径的关系
Fig.3 Relationship between uniaxial compression strengths of specimens and diameter of inner hole

需要说明的是,试样之间存在差异,孔道试样

增加了加工环节, 尤其是直径为 5 mm 的内孔需要从试样两端钻进, 可能引起更大的差异, 因而试验结果的离散性不可避免, 而同一岩块加工的试样数量有限, 难以进行大量的重复试验。不过, 试样单轴压缩强度确实存在随孔径增大而降低的趋势。

4 常规三轴压缩应力 - 应变曲线

作者使用的 RMT - 150B 型岩石力学试验机具有自平衡式三轴加载装置, 其三轴压缩缸的缸盖结构如图 4 所示。孔道 A 使缸盖压头的下腔连通大气, 而孔道 B 将压力为 P 的液压油引入其上腔。岩样截面积为 S , 试验机轴向载荷为 F , 则轴向应力为

$$\sigma_1 = [F + PS_H - P(S_C - S)] / S \quad (12)$$

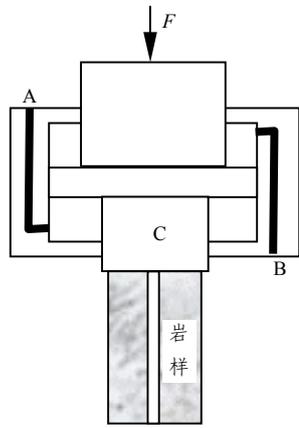


图 4 三轴压缩缸的缸盖结构图

Fig.4 Sketch of tank head for pseudo-triaxial compression

因上腔环形面积 S_H 正好等于压头 C 面积 S_C , 施加围压就是对岩样进行静水压力加载, 而试验机轴向加载的载荷 F 则对应于主应力差:

$$\sigma_1 - P = F / S \quad (13)$$

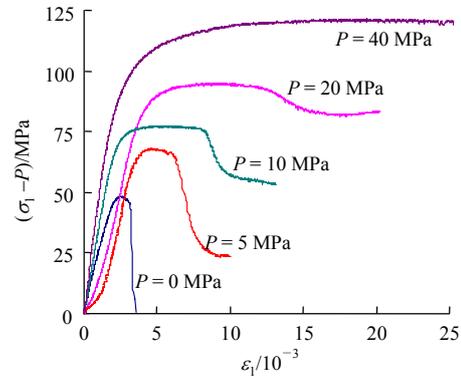
不过, 对于孔道试样, 试验机给出的轴向载荷 F 并不对应于试样承载的主应力差。这是因为试样虽然内部存在孔道, 但并不影响油压作用在压头上的压强和面积; 油压加载到试验机压头面积 πR^2 上的载荷, 由孔道试样截面 $\pi(R^2 - r_0^2)$ 所承受, 因而试样实际承载的轴向应力和主应力差^[25]分别为

$$\sigma_1 = \frac{F}{\pi(R^2 - r_0^2)} + \frac{R^2}{R^2 - r_0^2} P \quad (14)$$

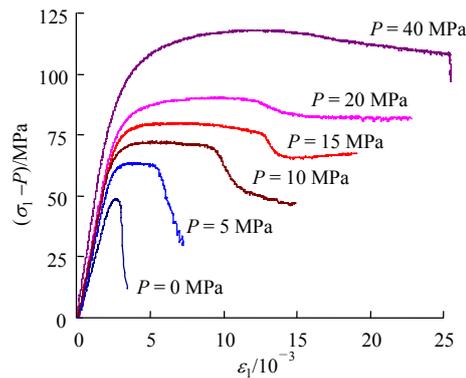
$$\sigma_1 - P = \frac{F}{\pi(R^2 - r_0^2)} + \frac{r_0^2}{\pi(R^2 - r_0^2)} P \quad (15)$$

对于孔径为 15 mm 的试样, 式(15)最后一项约为 $0.1P$, 不容忽视。

图 5 为细晶大理岩完整试样和孔径为 10 mm 试样常规三轴压缩主应力差 - 应变曲线。从图中可以看出, 试样的杨氏模量随围压增大而增大, 孔道试样尤其明显。在相同围压下, 孔道试样内的最小主应力低于完整试样, 有利于内部裂隙弱面的滑移, 因而杨氏模量也会略低, 通常可达到 10%。



(a) 完整试样

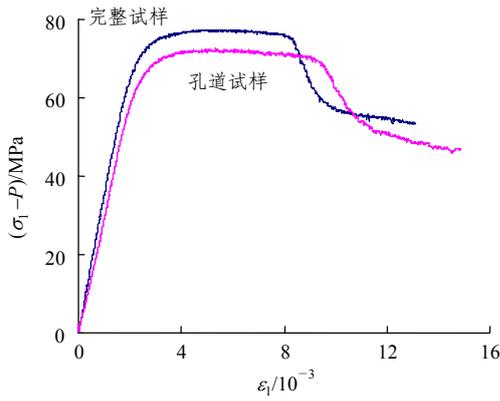


(b) 孔径 10 mm

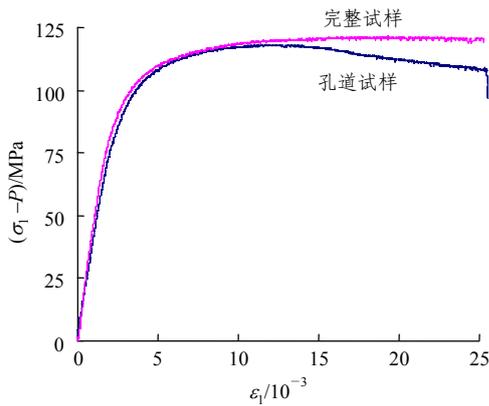
图 5 细晶大理岩试样常规三轴压缩主应力差 - 应变曲线
Fig.5 Difference of principal stress-strain curves of fine crystal marble samples under common triaxial compression

图 6 是围压为 10 和 40 MPa 下孔道试样和完整试样轴向压缩主应力差 - 应变曲线。从图中可以看出, 围压为 10 MPa 时, 两种试样都具有屈服平台, 其后是弱化阶段, 最后进入残余变形阶段。围压为 40 MPa 时, 在应变为 0.01 前, 孔道试样与完整试样的变形特性大致相同; 其后完整试样保持承载能力不变, 而孔道试样因孔道附近材料最小主应力较低, 不能进入延性阶段, 承载能力随着变形增大逐步降低。

孔径为 10 mm 的试样, 加载外围压为 40 MPa 时, 孔道内壁的切向应力为 83.2 MPa, 轴向应力为 41.6 MPa, 径向应力为 0。而细晶大理岩单轴压缩强度仅为 49 MPa, 即使考虑中间主应力的影响, 孔



(a) $P = 10 \text{ MPa}$



(b) $P = 40 \text{ MPa}$

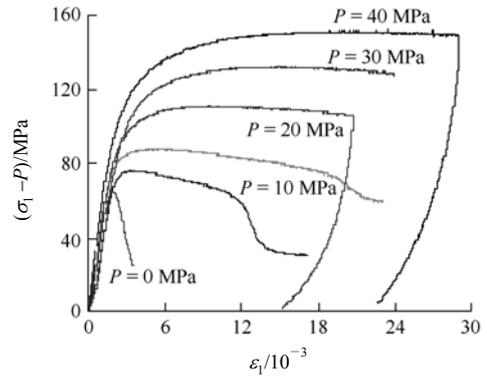
图 6 细晶大理岩孔道试样和完整试样的轴向压缩主应力差 - 应变曲线

Fig.6 Difference of principal stress-strain curves of hollow and solid marble specimens with fine crystal under axial compression

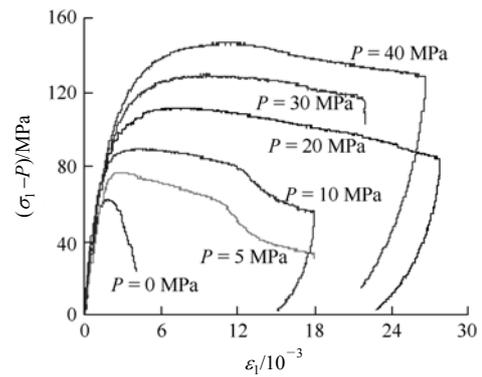
壁岩石也达到承载极限。但是岩石的屈服破坏需要相应的变形，在周围岩石尚处于弹性阶段的情况下，孔壁附近岩石不会得到很大变形，也就不会造成破坏区域的不断扩大，岩石需要达到一定的变形才能破坏。

图 7 为中晶大理岩完整试样和孔径为 10 mm 试样常规三轴压缩主应力差 - 应变曲线。从图中可以看出，其强度和杨氏模量都大于细晶大理岩的数值，且杨氏模量不随围压变化。另一个明显差别是，孔道试样在峰后不具有屈服平台，承载能力随变形的增加持续降低。这可以理解为，孔道内壁附近的最小主应力较低，不能进入延性变形阶段，在轴向变形作用下将丧失承载能力而破坏，且破坏断面逐渐扩大。

图 8 为两种大理岩的完整试样与孔径为 10 mm 试样在不同围压下的三轴压缩强度。为显示数据之间的差异，图中纵坐标为 $\sigma_s - 2.5P$ ，但实际回归强度准则时仍以 σ_s 与 P 进行计算，否则相关系数降



(a) 完整试样



(b) $d = 10 \text{ mm}$

图 7 中晶大理岩试样常规三轴压缩主应力差 - 应变曲线

Fig.7 Difference of principal stress-strain curves of marble specimens with medium crystal under common triaxial compression test

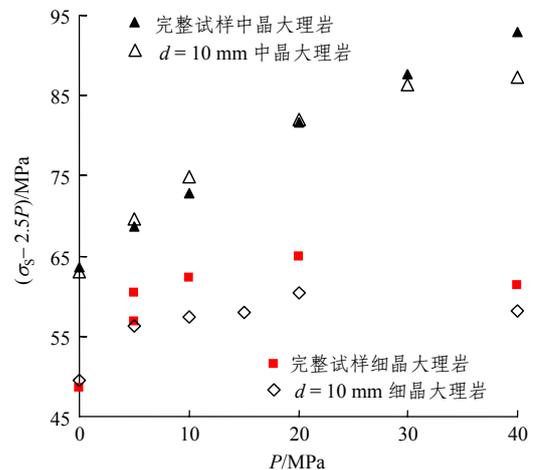


图 8 不同试样的强度与围压的关系

Fig.8 Relation between strengths of different specimens and confining pressures

低，而回归结果也会有所不同^[26]。

对细晶大理岩而言，孔道试样的强度整体低于完整试样，因而利用双剪强度准则得到的式(11)不能成立。所有完整试样强度的回归结果是 $\sigma_s = 56.2 + 2.72P$ ，相关系数为 0.993；围压为 40 MPa 时的强

度明显偏低, 如果回归时不予采用, 则围压影响系数增加到 3.21; 依据式(5)估算的孔道试样强度, 应该比完整岩样强度低 $0.3P$ 左右。这与图 8 的试验结果并不相同。

对中晶大理岩而言, 将完整岩样在不同围压下的三轴强度(不计单轴)进行线性回归得到

$$\sigma_s = 66.0 + 3.20P \quad (16)$$

上式相关系数 $R = 0.999$, 实际单轴压缩强度均低于回归参数 66.0 MPa, 这是岩石黏结摩擦的承载特性所决定的^[27]。利用回归参数可以确定岩石的内摩擦角为 31.6° , 黏聚力为 18.4 MPa。

依据双剪强度准则的式(11), 孔道试样的强度比完整试样高 $0.14P$ 。这显然不能成立, 不必讨论。而基于弹性分析的式(6), 孔径为 10 mm 试样的强度应该比完整试样强度低 $0.314P$ 。但在围压 20 MPa 内, 孔道试样强度都略高于完整试样, 即使围压为 40 MPa 时孔道试样强度仍较低, 但也仅低于完整试样 5.7 MPa, 而不是式(6)所预计的 12.6 MPa。这就是说, 基于应力状态的线弹性分析和试样内材料同时达到承载极限, Coulomb 强度准则给出的孔道强度是一个偏低的估计。

含孔道试样仍以剪切滑移破坏为主。单轴压缩时孔道对试样破坏没有影响, 而围压作用下压缩时孔道附近岩石成粉状破坏, 孔道的破坏是从试样中部向两端逐步发展的, 这与试样端部和加载压头之间的摩擦效应有关。但试样整体仍是剪切破坏, 且剪切破坏角度随围压增大而减小, 趋近 Coulomb 强度准则所预测的破裂角。这与作者^[3]的试验结果相同。

5 孔道对试样轴向承载能力的影响

用孔径为 0, 5, 10 和 15 mm 的中晶大理岩试样进行不同外围压的常规三轴压缩试验, 图 9 给出部分试样三轴压缩主应力差 - 应变曲线。从图 9 可以看出, 孔径对试样变形特性的影响在应变较小时不很显著。变形特征偏离完整试样的临界应变随孔径增大而减小, 但与围压关系不大。显然, 孔道附近的岩石在达到一定的变形之后将破坏失去承载能力, 从而使整个试样的承载能力降低。试样内材料并不是同时达到承载极限的。

岩石试样的承载能力由黏结和摩擦共同构成, 围压和轴向载荷在给定倾角剪切滑移面上的正压力和剪切力由整体力平衡确定, 与岩样是否有孔道无关, 孔道只是造成应力分布的不均匀; 围压和轴压

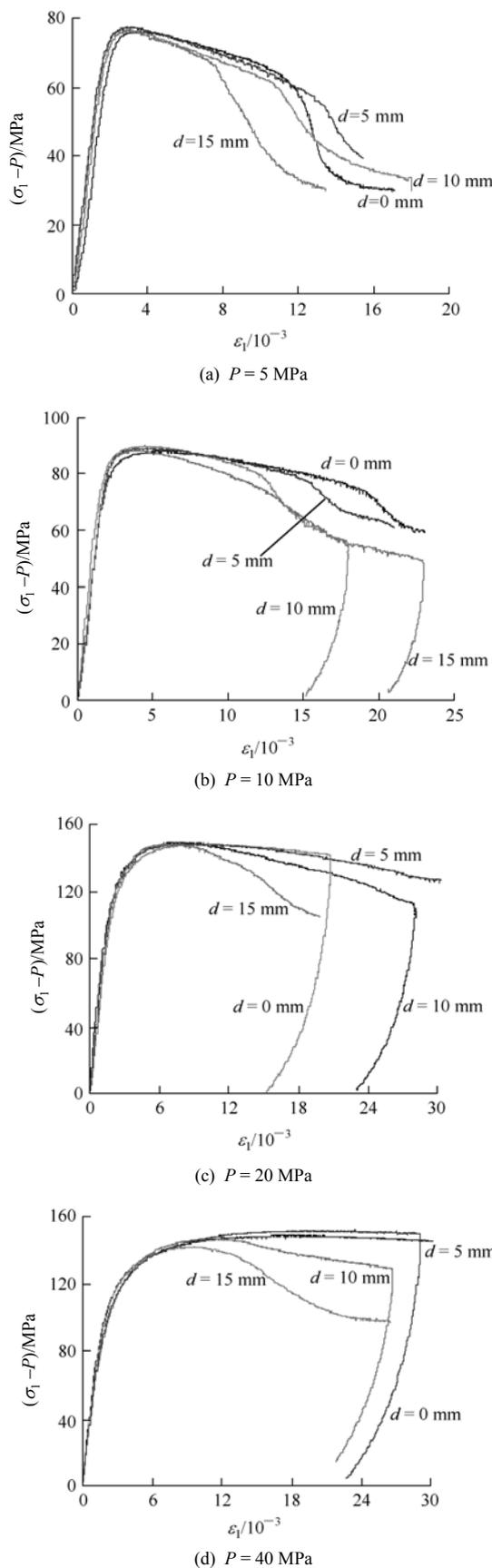


图 9 不同孔径中晶大理岩试样三轴压缩主应力差 - 应变曲线
Fig.9 Difference of principal stress-strain curves of hollow medium crystal marble specimens with various inner diameters under triaxial compression test

共同引起的滑移面上最大摩擦力不变，但试样的承载面积减小，围压对强度的贡献增加。因而孔道试样在围压压缩下的三轴强度可以写为

$$\sigma_s = Q(P, r_0) + \frac{R^2}{R^2 - r_0^2} KP = Q(P, r_0) + \frac{KP}{1 - \eta^2} \tag{17}$$

式中： $Q(P, r_0)$ 为试样达到峰值承载应力时由黏结力提供的轴向承载能力，相当于试样的平均材料强度，该值与围压和孔道半径有关。式(17)与双剪强度准则的式(11)形式相似，但含义完全不同。

图 10 给出了所有试样的强度，为显示强度之间的差异，纵坐标为 $\sigma_s - 2.5P$ 。又图中的单轴压缩数值是图 3 中强度的平均值，明显偏低，与整体变化规律不符。从图 10 可以看出，在围压 20 MPa 以内，孔径对试样的强度没有明显影响，在 20 MPa 时 4 种岩样的强度几乎完全相同，而围压大于 20 MPa 之后，岩样强度随孔径增大而显著减小。对此可以做如下解释：围压较高时，试样内最小主应力差异较大，材料不同时破坏对岩样强度的影响较大，而孔径引起的摩擦强度增加与围压呈线性关系。

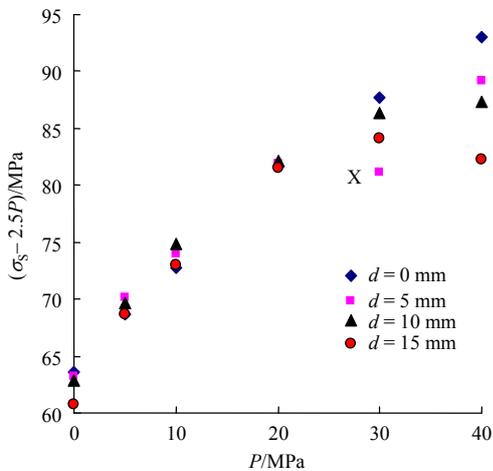


图 10 不同孔径中晶大理岩试样强度与围压的关系
Fig.10 Relation between strengths of medium crystal marble specimens with various inner diameters and confining pressure

试样的实际强度都大于线弹性计算公式(6)所预测的数值，部分试样的强度甚至略大于完整试样的强度。孔径为 15 mm 的试样在围压为 40 MPa 时，由式(6)预测其强度低于完整试样 21.3 MPa，而实际仅低 10.8 MPa；2 个孔径为 5 mm 的试样在围压为 5 和 10 MPa 时承受的轴向载荷也稍大于完整试样，这说明在低围压时孔径为 5 mm 的孔道对试

样强度的影响尚小于试样本身的离散性。

完整试样的强度与围压也不是完全的线性关系。围压为 40 MPa 时完整岩样的强度略有偏低，在回归 Coulomb 强度准则时不予采用，那么围压影响系数将从式(16)的 3.20 增加到 3.27。将试样的实际强度 σ_s 利用式(17)处理后得到的 $Q(P, r_0)$ 在图 11 中给出。除孔径为 5 mm 的试样在围压为 30 MPa 时的强度(图中 X)明显偏低外(估计与孔道加工质量有关)，大致可以确认， $Q(P, r_0)$ 随围压和孔径的增加而降低。当然，在低围压时较小孔径对试样强度的影响较小，其作用可能被试样离散性所掩盖。

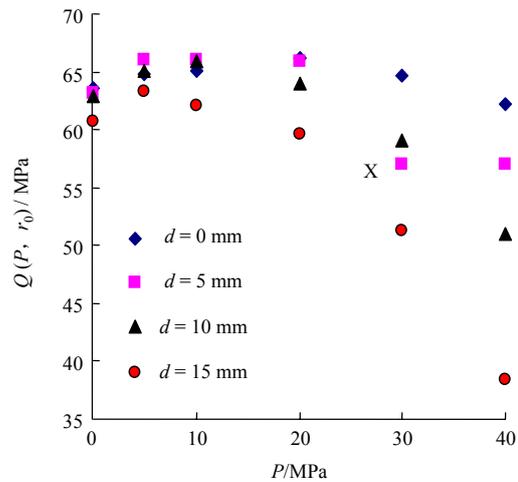


图 11 试样达到承载极限时材料强度与围压和孔径的关系
Fig.11 Relation among material strengths and inner diameters, confining pressure at limit bearing capacity

图 11 的数据可以用抛物线、三角函数等多种公式进行回归，如

$$Q(P, r_0) = Q_0 \{1 - [P / \beta(r_0)]^2\} \tag{18}$$

$$Q(P, r_0) = Q_0 \cos \left[\frac{\pi}{2} \frac{P}{\beta(r_0)} \right] \tag{19}$$

式中： Q_0 为材料常数，与围压和孔径无关； $\beta(r_0)$ 为试样承载极限完全由摩擦力实现时的围压数值，随孔径增大而减小。上述两个公式可以描述图 11 的试验数据，至于何种回归公式能够反映岩石的力学性质，还需要进行更大范围的试验才能确定。

需要说明的是，完整试样达到峰值承载能力时产生的塑性变形随着围压增高而增大，其材料强度也将逐步降低；或者说试样的极限承载力逐步偏离与围压的线性关系。这对于高强度的花岗岩、片麻岩也同样成立^[28]。

6 孔道对试样变形、破坏的影响

中晶大理岩完整试样和孔径为 10 和 15 mm 孔道试样的平均模量在图 12 给出。从图中可以看出，在单轴压缩和围压为 5 MPa 时平均模量稍低，但随围压变化并不显著，主要体现为数据之间的离散性。平均模量是指应力峰值前应力 - 应变曲线中近似直线部分的斜率。这表明其内部晶粒结合较好，缺少分布的滑移裂隙^[29]。当然试样的强度和杨氏模量也较高。

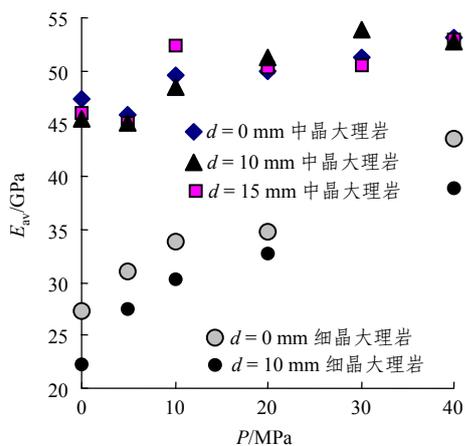


图 12 不同孔径大理岩试样平均模量与围压的关系

Fig.12 Relation between average moduli of specimens with various inner diameters and confining pressure

对于细晶大理岩而言，完整试样的杨氏模量随围压增大而增大(图 5(a))，表明材料内部存在大量的分布裂隙，在围压使裂隙的承载能力达到完整材料之后，杨氏模量将达到最大值^[29]。孔道使圆柱试样内由外围压引起的径向应力和周向应力不等，且随着径向位置而变化。周向应力 σ_θ 大于围压 P ；径向应力 σ_r 小于围压 P 。但试样内裂隙的主要滑移方向应该沿着径向，且孔道的存在增加了滑移的自由面，因而相同外围压下，孔道试样的杨氏模量较低。图 12 给出了细晶大理岩完整试样和孔径为 10 mm 试样的平均模量。

需要注意的是，以弹性力学分析孔道试样内应力状态时，已经默认了材料的弹性参数是常数。圆盘对径受压的巴西劈裂试验也是假定岩石的杨氏模量和泊松比与应力状态无关，而实际上岩石在压缩和拉伸时杨氏模量并不相同，对弹性分析结果需要进行修正^[30]。

对于细晶大理岩，在最初加载外围压 P 时，由

于图 4 所示的试验机加载压头结构，轴向应力稍大于 P ，是中间主应力；周向应力是最大主应力，径向应力是最小主应力。随着轴向压缩加载，试样内最大主应力由径向逐步转为轴向，但最小主应力始终为径向。径向应力从内向外增加，杨氏模量也就从内向外增加。这就是说，在施加外围压时，孔壁岩石承载的径向应力将小于式(3)给出的数值；轴向压缩时，孔壁材料与外侧材料的轴向变形相同，但实际承载的轴向应力较低。因而，尽管孔道附近的最小主应力较低，但最大主应力也较低。这降低了孔道对试样屈服破坏过程的影响。

细晶大理岩试样的屈服破坏过程受孔道的影响较小，也易于维持整体的完整。图 13 是细晶大理岩孔道试样在不同围压下压缩破坏后的照片。

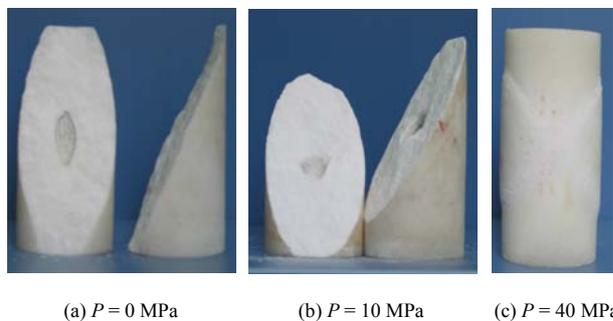
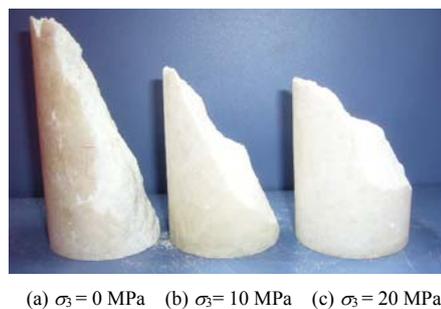


图 13 细晶大理岩孔道试样破坏照片

Fig.13 Failure photos of hollow marble specimens with fine crystal

中晶大理岩的杨氏模量与围压无关，试样内部的轴向应力均匀一致，而孔壁附近最小主应力较低，因而也更容易屈服破坏，承载能力降低更快。对比图 5 和 7 中两种大理岩试样的应力 - 应变曲线可知，其峰值附近的形状具有定性的差别。而中晶大理岩孔道试样的破坏特征也明显受到孔道的影响，中部出现了一个粉状破坏的区域(图 14)，剪切破坏的面积相应减小。



(a) $\sigma_3 = 0$ MPa (b) $\sigma_3 = 10$ MPa (c) $\sigma_3 = 20$ MPa

图 14 中晶大理岩孔道试样破坏照片

Fig.14 Failure photos of hollow marble specimens with medium crystal

对比图 13 和 14 可知, 对于开挖之后变形较大的巷道等, 采用刚度较小的支护构件可能有利于维持稳定。

7 结 论

(1) 孔道试样在围压作用下压缩时, 承载非均匀应力。围压 40 MPa 的静水压力加载, 孔壁达到承载极限, 但仍可以承载与完整试样相当的轴向应力。不能以最弱位置达到承载极限来计算试样的强度。

(2) 以线弹性力学分析孔道试样的应力状态, 假设试样内材料同时达到承载极限, Coulomb 强度准则给出的试样强度是一个偏低的估计。

(3) 围压和轴向载荷在剪切滑移面上的正压力和剪切力由整体力平衡确定, 与岩样内部孔道无关, 孔道只是造成应力分布的不均匀, 使试样的承载面积减小, 引起围压对强度的贡献增加。

(4) 试样破坏是逐步发生的, 达到峰值承载能力时由黏结力构成的承载能力, 或者说其材料强度随围压、孔径的增大而减小。试样内始终存在最小主应力较低的材料, 不能进入屈服强化阶段, 因而其峰后承载能力会随着变形增大而逐步降低。

(5) 细晶大理岩的杨氏模量随围压而增大, 因而孔道附近的最小主应力较低使得最大主应力也相应降低, 孔道对试样屈服破坏过程影响较小。

本文试验结果可以作为岩石强度理论分析和弹塑性数值计算的参考, 为理解巷道、立井等岩体结构的破坏提供了一种模式。

参考文献(References):

- [1] PATERSON M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble[J]. Geological Society of America Bulletin, 1958, 69(4): 465 - 476.
- [2] FREDRICH J T, EVANS B, WONG T F. Micromechanics of the brittle to plastic transition in Carrara marble[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B4): 4 129 - 4 145.
- [3] 尤明庆. 两种晶粒大理岩力学性质的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 91 - 96.(YOU Mingqing. Study on mechanical property of two marbles with different crystal sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 91 - 96.(in Chinese))
- [4] SCHUBNEL A, WALKER E, THOMPSON B D, et al. Transient creep, aseismic damage and slow failure in Carrara marble deformed across the brittle-ductile transition[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(17): L17301.
- [5] LEE D H, JUANG C H, CHEN J W, et al. Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(7): 857 - 870.
- [6] LEE D H, JUANG C H, LIN H M, et al. Mechanical behavior of Tien-liao mudstone in hollow cylinder tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 744 - 756.
- [7] LEE D H, JUANG C H, LIN H M. Yield surface of Mu-san sandstone by hollow cylinder tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(3): 205 - 216.
- [8] SANTARELLI F J, BROWN E T. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1989, 26(5): 401 - 413.
- [9] EWY R T, COOK N G W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—I. observations and analysis of deformations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(5): 387 - 407.
- [10] ADDIS M A, WU B. The role of the intermediate principal stress in wellbore stability studies: evidence from hollow cylinder tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 1 027 - 1 030.
- [11] CHEN X, TAN C P, HABERFIELD C M. Numerical evaluation of the deformation behavior of thick-walled hollow cylinders of shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 947 - 961.
- [12] ELKADI A S, VAN MIER J G M, SLUYS L J. Multiaxial failure of low-cohesive frictional materials: fracture behaviour and size dependency[J]. Philosophical Magazine, 2006, 86(21/22): 3 137 - 3 159.
- [13] ELKADI A S, VAN MIER J G M. Experimental investigation of size effect in concrete fracture under multiaxial compression[J]. International Journal of Fracture, 2006, 140(1 - 4): 55 - 71.
- [14] ENEVER J, WU B. Scale effects in hollow cylinder tests[C]// Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century(2001 ISRM and 2nd ARMS). Netherlands: A. A. Balkema, 2001: 209 - 212.
- [15] RINGSTAD C, BREVIK I, ADDIS M A, et al. Scale effects in hollow tests[C]// Proceedings of the 2nd International Workshop on Scale Effects in Rock Masses. Netherlands: A. A. Balkema, 1993: 75 - 80.
- [16] 徐栓强, 俞茂宏. 统一强度准则下厚壁圆筒的弹脆塑性承载能力分析[J]. 力学季刊, 2004, 25(4): 490 - 495.(XU Shuanqiang, YU Maohong. Elasto-brittle-plastic bearing capacity analysis for a thick walled cylinder under unified theory criterion[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004, 25(4): 490 - 495.(in Chinese))
- [17] 祝方才, 潘长良, 曹平. 基于各向异性损伤的厚壁圆筒应力分

- 布有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 838 - 842.(ZHU Fangcai, PAN Changliang, CAO Ping. Stresses analysis of surrounding rocks based on thick cylinder and anisotropic damage theory by finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 838 - 842.(in Chinese))
- [18] 李 铀, 李 锶, 白世伟. 理想弹塑性厚壁圆筒弹塑性应力场再研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 897 - 899.(LI You, LI Si, BAI Shiwei. Re-research on the stress field of perfect elastoplastic thick-wall tube[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 897 - 899.(in Chinese))
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264 - 2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264 - 2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [20] 周维垣, 杨 强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.(ZHOU Weiyuan, YANG Qiang. Numerical computational methods for rock mechanics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.(in Chinese))
- [21] 缙 勇, 苏承东, 秦莞臻. 含孔道大理岩圆柱试样的尺寸效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 302 - 305.(GOU Yong, SU Chengdong, QIN Guanzhen. Scale effects of marble hollow cylinder specimen[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(3): 302 - 305.(in Chinese))
- [22] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979: 89 - 94.(XU Zhilun. Elasticity mechanics(Vol. 1)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979: 89 - 94.(in Chinese))
- [23] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.(YU Maohong. Twin-shear theory and its applications[M]. Beijing: Science Press, 1998.(in Chinese))
- [24] 尤明庆. 岩石的强度准则和真三轴压缩试验结果的讨论[J]. 岩土力学, 2008(待刊).(YOU Mingqing. Discussion on the strength criterion of rock and experiment results under real triaxial stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(to be published).(in Chinese))
- [25] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.(YOU Mingqing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.(in Chinese))
- [26] 尤明庆. 试验结果的数学拟合与力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(待刊).(YOU Mingqing. Discussion on mathematical fitness and mechanical model of experimental results[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(to be published).(in Chinese))
- [27] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和 Coulomb 强度准则[J]. 地质力学学报, 2002, 8(2): 179 - 185.(YOU Mingqing. Destroy character and Coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(2): 179 - 185.(in Chinese))
- [28] SHIMADA M. Mechanics behavior of rocks under high pressure conditions[M]. Netherlands: A. A. Balkema, 2000.
- [29] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53 - 60.(YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53 - 60.(in Chinese))
- [30] SUNDARAM P N, CORRALES J M. Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1980, 17(2): 131 - 133.

本刊 2005~2006 年各项计量指标统计表

| 年份 | 总被引频次 | 影响因子 | 即年指标 | 他引率 | 基金论文比 | 地区数 | 海外论文比 | 学科影响指标 |
|------|-----------|------------|-------|------|-------|-----|-------|--------|
| 2005 | 2521(1)* | 0.693(2)* | 0.117 | 0.58 | 0.63 | 24 | 0.04 | 0.92 |
| 2006 | 3344(1)** | 0.794(2)** | 0.136 | 0.66 | 0.72 | 23 | 0.09 | 1.00 |

注: (1) 总被引频次: * 2005 年在全部 1 652 种期刊中列第 34 位; **2006 年在全部 1 723 种期刊中列第 28 位。

(2) 影响因子: * 2005 年在全部 1 652 种期刊中列第 234 位; **2006 年在全部 1 723 种期刊中列第 205 位。

摘自《2006 和 2007 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》