

大理岩破坏阶段 Biot 系数研究

胡大伟^{1,2}, 周 辉¹, 谢守益², 张 凯¹, 邵建富^{1,2}, 冯夏庭¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2.法国里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59655)

摘 要: 在流固耦合研究中经常采用有效应力原理, Biot 系数的确定为其中困难之一。为了研究含裂纹大理岩中 Biot 系数演化规律, 在三轴压缩塑性变形后期阶段的不同轴向变形条件下, 进行轴向压力加卸载循环; 并在轴向压力卸载末期对岩样施加孔隙水压力。通过记录试样的变形, 在 Shao 提出的 Biot 系数计算方法的基础上, 计算轴向和侧向 Biot 系数。得到了不同围压条件下轴向和侧向 Biot 系数随轴向变形的演化规律, 并对此进行了深入分析。结果表明: (1) Biot 系数表现为各向异性, 三轴压缩试验时, 试样中大部分裂纹沿最大正应力方向扩展, 是造成这种现象的直接原因; (2) 轴向和侧向 Biot 系数随着轴向变形的增大而增大, 轴向变形的增大引起岩样中裂纹扩展, 导致 Biot 系数增大; (3) 低围压条件下轴向和侧向 Biot 系数均比高围压条件下的值大, 这是由于破坏方式不同引起的。

关 键 词: Biot 系数; 塑性变形; 裂纹; 流固耦合**中图分类号:** TU 458**文献标识码:** A

Study of Biot's coefficients of marble during plastic deformation phase

HU Da-wei^{1,2}, ZHOU Hui¹, XIE Shou-yi², ZHANG Kai¹, SHAO Jian-fu^{1,2}, FENG Xia-ting¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China; 2. Laboratory of Mechanics of LILLE, UMR 8107 CNRS, EUDIL-USTL, Polytech-Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, France)

Abstract: The concept of effective stress is mostly used in hydro-mechanic coupling study, while it is difficult to determine the values of Biot's coefficients. A test system is developed to study the evolution of Biot's coefficients in cracked rock materials induced by deviatoric stress. In the plastic deformation phase of triaxial compression test, some loading-unloading cycles of axial stress were carried out at different levels of axial strains. After injection and squeeze water into/out of the specimen at the end of axial stress unloading process, the deformation is recorded during the loading-unloading cycle of pore pressure. The Biot's coefficients in axial and lateral directions are calculated based on the method proposed by Shao. The evolution of axial and lateral Biot's coefficients at different levels of axial strains is presented in a series of confining stresses; it is found that: 1) the property of Biot's coefficients is anisotropic, it is reasoned that the cracks in the specimen are grown along the direction of maximum normal stress; 2) the axial and lateral Biot's coefficients are increased when axial strain increases, the increasing of axial strain leads to the propagation of cracks, consequently causes the Biot's coefficients augment; 3) the values of axial and lateral Biot's coefficients under low confining stress are greater than the one under high confining stress, the reason is that the failure style is changed with confining stress.

Key words: Biot coefficient, plastic deformation, crack, hydro-mechanic coupling

1 引 言

大部分地质材料均处于饱和状态, 其中的孔隙、裂隙被一种或几种流相填充; 因此, 水-力耦合机制研究对许多结构和地下工程的稳定性分析尤为重要。根据试验观察, 对于大多数脆性岩石, 其中裂

纹萌生、扩展直至贯通引起各向异性损伤, 并导致材料最终破坏。这个损伤过程不仅会对材料的力学性质产生很大影响, 而且会显著改变渗流路径, 进而影响水-力耦合规律。

自从 Terzahi^[1]在土力学中提出有效应力原理, Biot^[2-3]在饱和多孔介质的本构机制方面进行的开

收稿日期: 2009-01-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目 (No. 50579091; 50539090), 国家自然科学基金项目资助 (No. 10772190)。

第一作者简介: 胡大伟, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩石细观力学、流固耦合试验和理论研究方面的工作。E-mail: hudawei@hotmail.com

创性基础研究以来,国内外许多学者^[4-8]在水-力耦合机制研究取得了一些进展。Coussy^[9]等对多孔介质弹性理论方面的研究及其应用进行了总结, Coussy^[10]饱和孔隙型多孔介质的非弹性行为方面进行了一些试探性的工作。在多孔介质弹性理论框架下,一般采用有效应力原理表示流体对固体的作用,它可以表达成下式:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha_{ij} p \quad (1)$$

式中: σ'_{ij} 为有效应力; σ_{ij} 为总应力; p 为孔隙水压力; α_{ij} 为 Biot 系数,即有效应力系数,它由材料的孔隙、裂隙结构确定。在材料各向同性的条件下, Biot 系数为各向同性的张量,可以表示成 $\alpha_{ij} = n\delta_{ij}$, $0 \leq n \leq 1$; 在材料各向异性的条件下, Biot 系数则为各向异性的张量。在脆性岩石的破坏过程中,其中裂纹萌生、扩展直至贯通,裂纹的密度和分布为各向异性,导致 Biot 系数表现为各向异性;并且不再为常数,其值随着裂纹的扩展而变化。

目前,已有很多关于中高孔隙岩石 Biot 系数方面的研究成果。但对于孔隙率较小、由裂纹构成主要渗流通道的脆性岩石,在 Biot 系数方面的研究工作并不多见。为了研究脆性岩石 Biot 系数的演化规律,本文着重对大理岩塑性变形后期阶段进行加卸载循环和孔隙水压加卸载试验;进而计算其轴向和侧向 Biot 系数,最后深入分析了 Biot 系数演化的物理机制。

2 试验系统和步骤

采用常规三轴试验机在塑性变形阶段进行 Biot 系数测试试验,存在以下困难:① 试验时不易精确控制围压和偏压;② 在施加水压的过程中,较难准确地获得试样的轴向和侧向变形。因此,作者设计了“温度-应力-渗流耦合的岩石力学试验系统”,下面将具体介绍。

2.1 试验系统介绍

采用由中国科学院武汉岩土力学研究所与法国里尔科技大学合作研制开发的“温度-应力-渗流耦合的岩石力学试验系统”进行试验研究。试验系统由围压、轴压和孔隙水压 3 套独立的加载部分组成。该系统具有以下功能和特点:① 高压(可达 100 MPa)和高轴压(可达 500 MPa)输出,可实现应变和应力加载控制方式,控制精度高,其误差为 ± 0.1 MPa;② 分别采用 LVDT 和环式位移传感器测量试样的轴向和侧向变形,具有灵敏性好、精度高等特点;③ 全自动控制和数据采集。试验系

统的围压室具体构造见图 1。

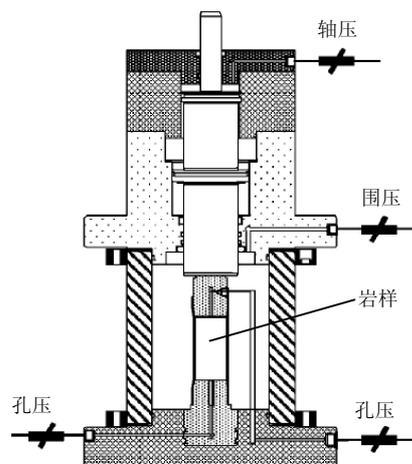


图 1 围压室示意图

Fig.1 Schematic plan of confining cell

2.2 试验步骤

试验所用试样取自锦屏二级水电站,为白山组大理岩 T_{2b},白色、粒状变晶结构,均匀性好。实验室^[11]中测定完整大理岩的固有渗透系数为 10^{-20} m²。为了测定完整大理岩的 Biot 系数,在进行静水压力加载时,发现试样的轴向和侧向变形基本相等,说明完整大理岩表现为各向同性。通过排水静水压力试验和部分排水静水压力试验(试验过程中,静水压力与孔隙水压力增量相等),测得完整大理岩的 Biot 系数为 0.21。

三轴压缩试验时,在弹性阶段和塑性变形初期阶段,对固有渗透系数和 Biot 系数进行测定,发现这两个值基本不发生变化。因此,本研究着重对大理岩塑性变形后期阶段进行试验,研究其轴向和侧向 Biot 系数随轴向变形的演化规律。具体试验步骤如下:

- (1) 施加围压至预定值,按轴向位移加载方式施加轴向压力直到塑性变形阶段;
- (2) 继续按轴向位移加载方式施加轴向压力,使轴向变形到达某一预定值,然后卸载轴向压力到设定值,并保持当前的应力状态;
- (3) 由 0 MPa 开始,施加孔隙水压力至预定值,然后卸载孔隙水压力至 0 MPa,记录孔隙水压力加卸载循环过程中的轴向和侧向变形 (ϵ_1 和 ϵ_3);
- (4) 重复步骤 (2) 和 (3);

在完成以上步骤后,可以记录到不同围压下,不同轴向变形水平阶段孔隙水压和试样的变形试验曲线。

3 试验现象和结果

下面，首先给出不同围压条件下的三轴压缩加卸载循环试验；然后给出了孔隙水压和试样的变形试验曲线。

3.1 三轴压缩加卸载循环

本研究中共包括 3 组围压，分别为 10、20、30 MPa。为了对大理岩的力学和变形性质有大概的了解，首先进行了三轴压缩试验，获得了全应力-应变曲线；然后，在曲线塑性变形后期阶段选取 3 个不同的轴向变形值（ a 、 b 和 c ），作为轴向压力加卸载循环试验的参考点，如图 2 所示。

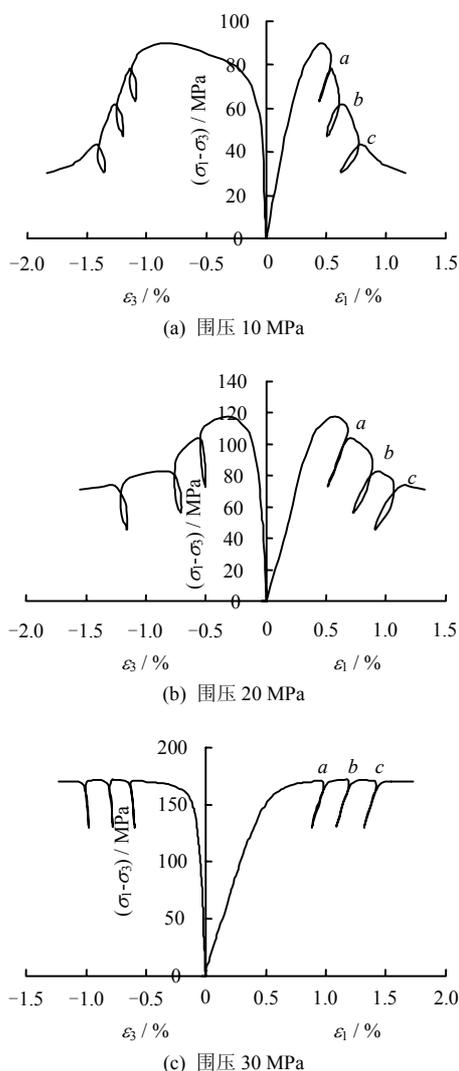


图 2 三轴压缩加卸载循环试验曲线
Fig.2 Strain-stress curve of triaxial unloading-loading tests

这里采用应力为岩样强度 1/2 时的应力与应变的比值，即 E_{50} ，来表示岩样的初始弹性模量 E_0 ；此时对应的泊松比表示初始泊松比 ν_0 。对于塑性变形阶段的轴向压力加卸载循环，根据 Mogi^[12]提出

的方法，可以计算 3 个不同轴向应变水平（ ϵ_{1a} ， ϵ_{1b} 和 ϵ_{1c} ）的轴向有效弹性模量 E_{e1} 和泊松比 ν_{31} 。根据以上试验结果，得到不同围压条件下大理岩三轴压缩试验的力学参数见表 1。

表 1 大理岩三轴压缩试验力学参数
Table 1 Mechanical parameters of marble under triaxial compression tests

ϵ_1	围压/MPa					
	10		20		30	
	E_{e1}	ν_{31}	E_{e1}	ν_{31}	E_{e1}	ν_{31}
ϵ_c	30 769	0.212	30 867	0.200	31 333	0.186
ϵ_{1a}	17 391	0.283	20 408	0.282	31 875	0.235
ϵ_{1b}	11 793	0.327	17 181	0.309	32 000	0.240
ϵ_{1c}	9 901	0.351	14 925	0.328	32 320	0.240

通过比较图 2 中的 3 组应力-应变曲线，可以观察到当围压增大时，岩样破坏方式由脆性向延性转化。Paterson^[13]对 Wombeyan 大理岩进行了大量研究后，指出大理岩由脆性向延性破坏转化的围压阈值在 30~100 MPa 之间。本试验中观察到，当围压较小时，岩样为脆性破坏，岩样中的裂纹主要沿轴向发展，并最终贯通；随着围压的增大，接近于由脆性向延性破坏转化的围压阈值时，岩样经常出现一对共轭的剪切裂纹；当围压超过由脆性向延性破坏转化的围压阈值时，岩样中将会出现一个包含很多微裂纹的塑性破坏区，见图 3。此外，表 1 中，围压为 30 MPa 时，岩样塑性变形阶段的有效弹性模量比初始弹性模量稍大，这是由于高围压使岩样中微裂纹压密造成的（Mogi^[12]，2005 年）。

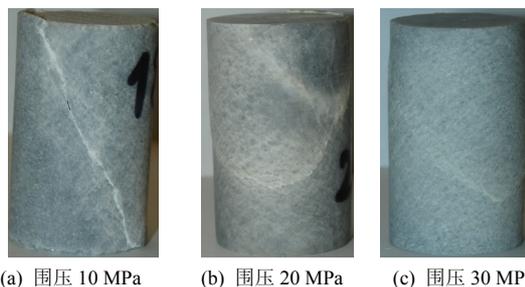


图 3 不同围压下破坏岩样照片
Fig.3 Photos of damaged specimen under different confining stress

3.2 Biot 系数测试试验

在三轴压缩试验塑性变形后期阶段，当轴向变形达到图 2 中 a 、 b 或 c 后，将轴向压力卸载到预定值，保持当前应力状态。待试样的变形稳定后，按照上面的试验步骤，缓慢施加孔隙水压力（注意保证孔隙水压力引起试样的变形在弹性范围内），然后

缓慢卸载孔隙水压力；记录试样在孔隙水压循环加载作用下的变形，从而计算 Biot 系数。Biot 系数测试试验共包括 3 组围压，分别为 10、20、30 MPa；每组围压下包括 3 种不同的轴向应变值。

下图将分别给出围压为 10、20、30 MPa，不同轴向变形条件下孔隙水压与轴向和侧向变形试验曲线。

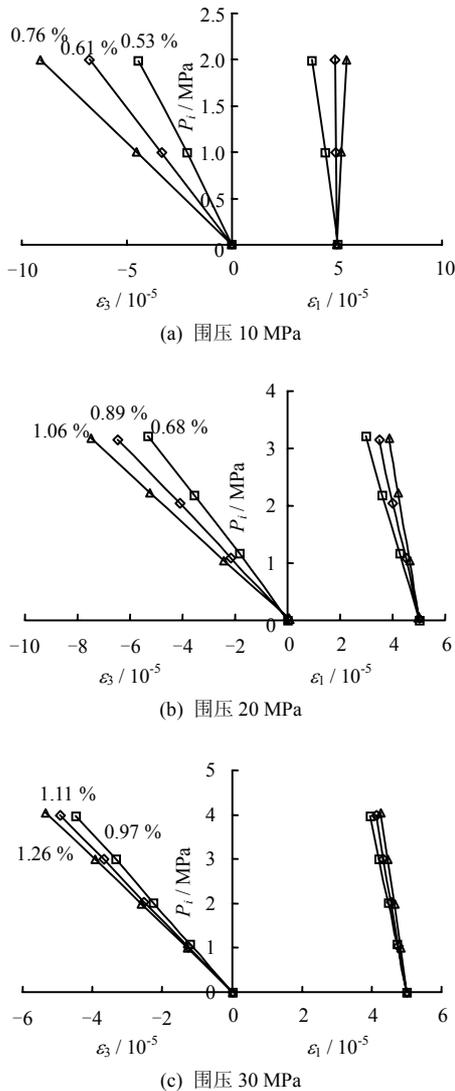


图 4 不同轴向变形下试样变形与孔隙水压试验曲线
Fig.4 Relationship between deformation and pore pressure under different axial strain

通过观察以上试验曲线，发现在 3 组不同围压条件下均具有以下相同的规律：

- (1) 试样变形的各向异性，孔隙水压力引起的侧向变形比轴向变形大；
- (2) 在孔隙水压力的作用下，当轴向变形水平较小时，轴向和侧向变形均表现为膨胀的趋势；随着轴向变形水平的增加，轴向膨胀变形的斜率逐渐增大，甚至转化为压缩变形，侧向膨胀变形的斜率

则逐渐减小。

试验中还发现，在低围压条件下，当轴向变形水平增大到一定程度，施加较大的孔隙水压后，试样轴向和侧向变形速率急剧增大；且整个过程中轴向压力不能保持稳定，最终可能引成试样失稳，失去承载能力。这种现象与工程中引水隧洞和煤矿突、涌水等事故相似，下面将分析其内在机制。

三轴压缩试验塑性变形阶段后期，试样中含有丰富的宏细观裂纹，且大部分沿最大正应力方向扩展。施加孔隙水压力后导致试样中有效应力场发生改变，引起试样产生变形。当孔隙水压较小时，试样发生弹性变形，即图 4 中观测到的情况；而当孔隙水压较大时，引起裂纹开度急剧增大，甚至裂纹面间发生滑移，导致试样发生新的损伤，引起试样破坏，这即是引水隧洞和煤矿突、涌水的内在机制。

4 试验分析

上面从现象上分析了试验结果，为了进一步的分析，引入了 Shao^[14]提出的 Biot 系数计算方法，进行了一些必要简化，计算了轴向和侧向 Biot 系数。在此基础上，深入研究了轴向和侧向 Biot 系数随轴向变形的演化规律，为预防工程中引水隧洞和煤矿突、涌水等事故提供了一些思路。

4.1 Biot 系数计算方法

这种方法采用传统的圆柱形试样，计算其在不同的损伤条件下的 Biot 系数。考虑在排水三轴条件下选择某个围压值和偏压值并保持；分级施加孔隙水压到预定值，然后分级卸载孔隙水压；最后，由卸载过程中试样变形和孔隙水压之间的关系来计算轴向和侧向 Biot 系数。在卸载孔隙水压过程中，试样不发生新的损伤，即为弹性卸载过程；因此，可以认为此过程中材料力学参数不发生变化。这种方法与常规三轴压缩试验中通过加卸载循环确定材料的弹性模量相似。

对于饱和多孔介质，其线性的增量型本构关系如下：

$$\Delta \tilde{\epsilon} = \mathbf{C}(\tilde{d}) : \Delta \tilde{\sigma} + \frac{1}{3} \eta(\tilde{d}) \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{d}) \Delta p \quad (2)$$

$$\Delta \zeta = \eta(\Delta p + \frac{1}{3} \tilde{\mathbf{B}} : \Delta \tilde{\sigma}) \quad (3)$$

式中： $\tilde{\epsilon}$ 为骨架的应变张量； $\mathbf{C}(\tilde{d})$ 为与材料损伤相关的 4 阶有效柔度张量； $\eta(\tilde{d})$ 为 Biot 模量的双重系数标量，它表示多孔介质储存流体的能力； ζ 为骨架单位体积内含水率的变化； $\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{d})$ 为 Skempton 系数张量。

针对本试验中的条件，在 Cheng^[15]提出的孔隙结构微观均质和各向同性的假设下，式 (2) 可以改写成：

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \\ \Delta \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/H_1 \\ 1/H_2 \\ 1/H_3 \end{pmatrix} \Delta p \quad (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{H_1} &= \frac{\alpha_{11}}{E_1} - \frac{\nu_{12}\alpha_{22}}{E_2} - \frac{\nu_{13}\alpha_{33}}{E_3} \\ \frac{1}{H_2} &= -\frac{\nu_{21}\alpha_{11}}{E_1} + \frac{\alpha_{22}}{E_2} - \frac{\nu_{23}\alpha_{33}}{E_3} \\ \frac{1}{H_3} &= -\frac{\nu_{31}\alpha_{11}}{E_1} - \frac{\nu_{32}\alpha_{22}}{E_2} + \frac{\alpha_{33}}{E_3} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： E_i 为 3 个主方向上与损伤相关的有效弹性模量， ν_{ij} 为 x_i 和 x_j 方向上与损伤相关的有效泊松比， H_i 可以由试验中记录的变形和孔隙水压关系曲线求取。这里，对于本研究中的圆柱形试样，定义 x_1 为轴向， x_2 和 x_3 为侧向，有： $\alpha_{22} = \alpha_{33}$ ， $E_2 = E_3$ ， $\nu_{12} = \nu_{13}$ ， $\nu_{21} = \nu_{31}$ ， $H_2 = H_3$ 。

此外，为了简化，这里假设 $E_2 = E_3 = E_1$ 。根据对称性原理，有 $\nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{12} = \nu_{13}$ 。

因此，式 (5) 可写成：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{H_1} &= \frac{1}{E_1} (\alpha_{11} - 2\nu_{31}\alpha_{33}) \\ \frac{1}{H_3} &= \frac{1}{E_1} (-\nu_{31}\alpha_{11} + \alpha_{33} - \nu_{31}\alpha_{33}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式 (6) 中两个等式联合求解，可得轴向和侧向 Biot 系数的表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{31}-2\nu_{31}^2} \left(\frac{1-\nu_{31}}{H_1} + \frac{2\nu_{31}}{H_3} \right) \\ \alpha_{33} &= \frac{E_1}{1-\nu_{31}-2\nu_{31}^2} \left(\frac{1}{H_3} + \frac{\nu_{31}}{H_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

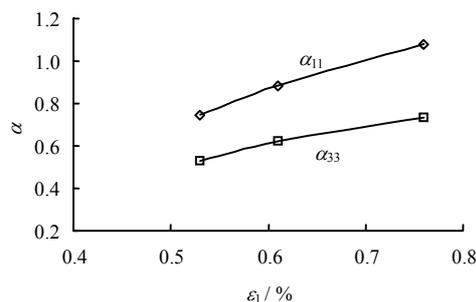
根据式 (7)，为了计算轴向和侧向 Biot 系数，必须先计算 H_1 、 H_3 、 E_1 和 ν_{31} 等力学参数。其中， H_1 和 H_3 可由图 4 中的变形和孔隙水压关系曲线及式 (4) 分别求取， E_1 和 ν_{31} 可从表 1 得到。计算结果见表 2。

4.2 结果分析

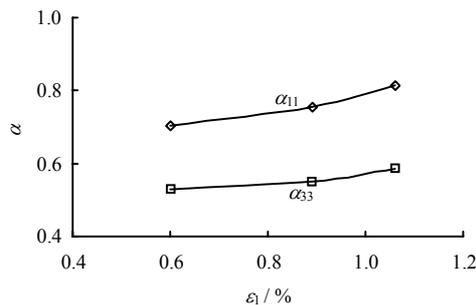
对表 2 中的试验结果进行分析，分别得到轴向和侧向 Biot 系数随轴向变形的演化规律，如图 5 所示。通过图 5，研究了这 3 组围压下 Biot 系数的演化规律，并分析了其物理机制。

表 2 Biot 系数测试试验结果
Table 2 Result of Biot coefficient test

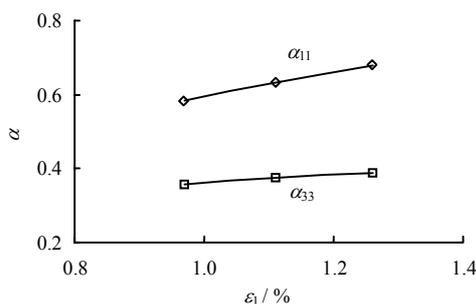
围压 / MPa	ε_1 / %	E_1 / MPa	ν_{31}	H_1 / MPa	H_3 / MPa	α_{11}	α_{33}
10	0.53	17 391	0.283	165 654	35 021	0.529	0.747
	0.61	11 793	0.327	375 000	25 014	0.623	0.886
	0.76	9 901	0.351	-408 855	20 312	0.735	1.081
20	0.68	20 408	0.282	175 860	44 152	0.529	0.705
	0.89	17 181	0.309	253 967	33 796	0.552	0.756
	1.06	14 925	0.328	269 040	30 680	0.585	0.813
30	0.97	31 875	0.235	200 756	55 876	0.358	0.585
	1.11	32 000	0.240	230 870	50 810	0.374	0.633
	1.26	32 320	0.240	252 253	47 553	0.389	0.678



(a) 围压 10 MPa



(b) 围压 20 MPa



(c) 围压 30 MPa

图 5 轴向和侧向 Biot 系数与轴向变形关系图
Fig.5 Relationship between axial strain and axial, lateral Biot coefficient

(1) Biot 系数各向异性。在这 3 组围压下，不同轴向应变水平下得到的轴向 Biot 系数 α_{11} 均小于侧向 Biot 系数 α_{33} ， α_{11} 与 α_{33} 的比值在 0.57~0.75 之间；并且，围压水平越低，各向异性越为明显。三轴压缩试验时，试样中大部分裂纹沿最大正应力

方向扩展,从而使 Biot 系数产生各向异性。

(2) 3 组围压条件下,随着轴向变形的增大, α_{11} 与 α_{33} 都有不同程度的增加。当围压为 10 MPa 时, α_{11} 与 α_{33} 分别增加了 39%和 45%;当围压为 20 MPa 时, α_{11} 与 α_{33} 分别增加了 11%和 16%;当围压为 30 MPa 时, α_{11} 与 α_{33} 分别增加了 9%和 16%。三轴压缩塑性变形阶段,随着轴向变形的继续增大,试样中的裂纹继续扩展,裂纹的密度和开度增大;因此,轴向和侧向 Biot 系数也随之增大。

(3) 低围压下的轴向和侧向 Biot 系数比高围压下的值大。其原因在于:三轴压缩试验时,随着围压的增加,试样破坏方式逐渐由脆性过渡为延性(见图 3);同时,由于围压对裂纹的约束作用,裂纹的密度和开度减小。

值得注意的是,在围压为 10 MPa 下,当轴向应变为 0.76%时,侧向 Biot 系数为 1.081。其值大于 1,从理论上讲这并不成立。经过分析认为,当轴向变形较大时,试样中的裂纹已完全贯通,形成宏观裂纹,已经超出了 Biot 系数计算方法的适用范围。

5 结 论

(1) Biot 系数表现为各向异性,三轴压缩试验时,试样中大部分裂纹沿最大正应力方向扩展,是引起这种现象的直接原因;

(2) Biot 系数随着轴向变形的增大而增大,轴向变形的增大,造成裂纹的密度和开度增大,Biot 系数随之。

(3) 低围压下的轴向和侧向 Biot 系数普遍比高围压条件下的值大,这是破坏方式不同和围压约束作用所引起的。

以上研究结果揭示了 Biot 系数与变形之间的关系,因此,在引水隧洞和煤矿突、涌水等事故预防工作中,必须将岩体的变形作为其中关键因素来考虑。

参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K V. Die Berechnung der durchlässigkeit-ziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen[J]. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math Naturwiss*, 1923, 132(2A): 105—126.
- [2] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Application Physics*, 1941, 12: 155—160.
- [3] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. *Journal of Application Physics*, 1955, 26: 182—185.
- [4] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(3): 26—31. ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing. Experimental study of the law of effective stress by methane pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(3): 26—31.
- [5] 沈珠江. 关于固结理论和有效应力的讨论[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(6): 118—119. SHEN Zhu-jiang. Experimental study of the law of effective stress by methane pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(6): 118—119.
- [6] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等. 多孔介质的双重有效应力[J]. *自然杂志*, 1999, 21(5): 288—292. LI Chuan-liang, KONG Xiang-yan, XU Xian-zhi, et al. Double effective stresses of porous media[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1999, 21(5): 288—292.
- [7] 谢守益, 徐卫亚, 贾赟, 等. 饱和多孔白垩岩的孔隙力学性质研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 804—810. XIE Shou-yi, XU Wei-ya, JIA Yun, et al. Study on poromechanic behaviours of saturated porous chalk[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 804—810.
- [8] 赵纪生, 陶夏新, 师黎静, 等. 饱和多孔介质材料的应变局部化萌生条件[J]. *岩土力学*, 2004, 25(5): 749—754. ZHAO Ji-sheng, TAO Xia-xin, SHI Li-jing, et al. Onset condition of strain localization in saturated porous media[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 749—754.
- [9] COUSSY O. *Mechanics of Porous Continua*[M]. New York: Wiley, 1991.
- [10] COUSSY O. *Poromechanics* [M]. New York: Wiley, 2004.
- [11] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(02): 236—243. CHENG Wen-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 2005—2009.
- [12] MOGI K. *Experimental Rock Mechanics*[M]. London: Taylor & Francis Group, 2005.
- [13] PATERSON M S, WONG Teng-fong. *Experimental rock deformation: the brittle field*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [14] SHAO J F. Poroelastic behaviour of brittle rock materials with anisotropic damage[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 30(1): 41—53.
- [15] CHENG A H D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 199—205.