

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.10.004

# 脆性岩石三轴压缩渐裂过程中的 渗透性演化规律研究

王 伟<sup>1,2</sup>, 李雪浩<sup>1,2</sup>, 胡大伟<sup>3</sup>, 曹亚军<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 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:** 岩石渐进破坏伴随着裂纹的开展发育, 岩石的渗透性演化与裂纹的开展规律有着密切的联系。运用三轴渗流伺服装置对凝灰岩进行了不同围压和渗压下的渗流-应力耦合试验, 分析了岩石在渐裂过程中不同裂纹开展阶段渗透率的演化规律。结果表明: 在裂纹的稳定扩展阶段, 渗透率的变化不明显, 起裂强度对应的渗透率可用于确定最小渗透率; 进入裂纹非稳定扩展阶段后, 渗透率出现明显增大, 增大过程可以分为两个阶段, 裂纹环向应变能较好地反映渗透率增大的两个阶段, 其拐点可用于确定起始渗透率的位置; 在峰后软化阶段, 渗透率出现下降并进入残余稳定阶段, 裂纹环向应变率可以反映渗透率的下降阶段, 并可用于确定峰值渗透率的位置。

**关 键 词:** 岩石渐进破裂; 裂纹扩展; 起裂强度; 损伤强度; 渗透率演化

**中图分类号:** TU 458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 10 - 2761 - 09

## Permeability evolution of brittle rock in progressive failure process under triaxial compression

WANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Xue-hao<sup>1,2</sup>, HU Da-wei<sup>3</sup>, CAO Ya-jun<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Rock progressive failure is usually accompanied by development of cracks. The propagation behaviour of rock cracks is closely related to the evolution of rock permeability. In order to investigate the permeability properties of rock during progressive failure, a series of hydro-mechanical triaxial coupling tests is carried out on tuff specimens under different confining pressures and seepage pressures using triaxial servo-controlled seepage equipment. Based on the experimental results, the following conclusions are drawn. At the stable crack growth stage, the permeability keeps low and stable and the permeability corresponding to crack initiation strength can be used to determine the minimum value of permeability. At the crack unsteady growth stage, the permeability increases significantly and the increase of permeability can be divided into two stages, which can be reflected by crack circumferential strain. The inflection point of crack circumferential strain curve is used to identify the initial permeability. At the softening stage after failure, the permeability decreases and enters into a residual stable stage, which can be reflected by crack circumferential strain rate. The circumferential strain rate can be used to determine the position of the peak of permeability.

**Keywords:** progressive failure of rocks; crack propagation; crack initiation strength; damage strength; permeability evolution

## 1 引 言

随着水利水电工程, 油气开采和地下工程的大

量建设, 岩体的渗流-应力耦合作用成为当前岩石力学领域研究的热点。近些年, 国内外学者通过岩石伺服渗透试验, 对岩石应力-应变过程中渗透规律的

收稿日期: 2015-02-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2011CB013504); 国家自然科学基金项目(No. 11672343, No. 51479193); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2016B20214, No. 2016B08014)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB013504), the National Natural Science Foundation of China (11672343, 51479193) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2016B20214, 2016B08014).

第一作者简介: 王伟, 男, 1978年生, 博士, 副教授, 主要从事多场耦合岩石力学方面的研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn

演化进行了广泛和深入地探讨。Wang 等<sup>[1]</sup>对沉积岩进行了全应力-应变过程中渗透率的测定,得出在峰值强度前渗透率会随着轴压的增加而增大,而在峰后软化阶段,渗透率显著下降。朱珍德等<sup>[2]</sup>对脆性岩石进行了不同围压下的全应力-应变渗流试验,发现岩石在破坏前后不同阶段渗流特性明显不同。姜振泉等<sup>[3]</sup>分别对典型的软岩和硬岩进行了伺服渗流试验,分析了在全应力-应变过程中两种不同岩石渗透性的变化差异。仵彦卿等<sup>[4]</sup>对砂岩渗流-应力耦合试验进行了 CT 扫描和实时观测,从细观尺度研究了砂岩的孔隙率与渗透性的关系,发现在微裂纹出现后渗透性增大,在宏观破坏出现后,渗透率达到最大值。韩国锋等<sup>[5]</sup>利用高风化的砂岩进行了伺服渗流试验,得出了在压缩带形成过程中渗流曲线和卸围压过程中渗透特性。俞缙等<sup>[6]</sup>进行了不同围压和渗压的岩石三轴伺服试验,发现根据围压的不同,渗透率变化曲线有增大、持平和减小 3 种趋势。根据以往的研究可以得出,岩石内部裂纹的闭合和开展以及新生裂纹的发育和贯通对岩石的渗透特性有着显著的影响。

对比以往的研究成果可以看出,在岩石破坏过程中,裂隙的开展发育对渗透性的变化有着至关重要的影响,但对裂隙发育各个阶段渗透率演化规律的研究并不多见,同时最小渗透率、起始渗透率以及峰值渗透率等特征点的确定并不明确。本文利用伺服三轴试验系统,进行了不同围压和渗压组合下的岩石全应力-应变过程渗透性演化试验,在试验基础上,分析了在岩石渐裂的各个阶段裂纹应变与渗透率的变化规律,并对渗透率变化特征点的位置进行了讨论。本文对岩石渗流-应力耦合效应的研究有一定促进作用,同时,对于水压影响岩石渐进破坏过程的研究也有一定的借鉴意义。

## 2 试验原理及方法

### 2.1 试验岩样和制备

试验用岩样为凝灰岩,取自安徽庐江马鞍山铁矿地 490~510 m 处基岩岩芯。岩石呈灰白色,块状构造,晶屑以中性斜长石、云母为主,含量约为 50%,含有少量的岩屑。原样取回后首先对原样岩石进行分类,去除杂质较多、有天然裂纹及风化的岩样,尽可能排除试样离散性对试验的影响。根据《工程岩体试验方法标准》<sup>[7]</sup>的标准,制备凝灰岩的标准柱状样,尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  (直径 $\times$ 高度)。

### 2.2 试验仪器

渗透试验在河海大学三轴渗流流变伺服系统上完成。该仪器可进行单轴、三轴压缩、渗透试验、流变试验及应力-渗流耦合试验,系统配备轴压、围压和孔隙水压等 3 套独立控制系统。最大围压为 60 MPa,最大轴向偏应力为 500 MPa,最大渗压为 50 MPa。轴向位移采用线性差分位移传感器(LVDT)量测,环向应变通过固定在试样中部的环向应变计量测。设备提供位移、应变、应力、泵流量 4 种加载方式。

该仪器对渗透率的测定为稳态法,即在岩样两端形成稳定的渗透压差,通过记录一定时间内渗流水的流入体积,根据达西定律可以计算出记录时间段内的渗透率,公式为<sup>[8]</sup>

$$k = \frac{\mu LV}{A \Delta P \Delta t} \quad (1)$$

式中: $k$ 为岩样的渗透率( $\text{m}^2$ ); $V$ 为 $\Delta t$ 时间段内渗流流体流入体积( $\text{m}^3$ ); $\mu$ 为水的动力粘滞系数,取 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (温度 $T=20$ ); $L$ 为岩石的高度( $\text{m}$ ); $\Delta t$ 为时间( $\text{s}$ ); $A$ 为岩样的横截面面积( $\text{m}^2$ ); $\Delta P$ 为岩样两端渗透压差( $\text{Pa}$ )。

### 2.3 试验方法

试验为饱水条件下的渗流试验,首先将制备好的岩样进行饱水,使用真空泵对天然岩样进行 4 h 的抽真空后,加入蒸馏水进行 8 h 的湿抽,并浸泡 4 h,保证岩样孔隙内充满水。浸泡完成后,对凝灰岩进行不同围压和渗压下的渗流-应力耦合试验,围压分别为 2、5、10 MPa,渗压为 1、4 MPa。为了防止流体从岩样与橡胶套之间渗漏,试验过程中保证渗压小于围压。试验采用应变控制的方法施加轴向压力,加载速率为 0.02 mm/min。

## 3 试验结果与分析

岩石渗透性与内部裂纹的发育和开展有着密切的联系<sup>[9]</sup>。接下来将在裂纹开展规律的基础上分析岩石在压缩破坏过程中的渗透性变化规律。

大量研究成果<sup>[10-12]</sup>表明,脆性岩石峰前应力-应变曲线一般可以分为 5 个阶段,如图 1 所示。阶段 I 为岩石内原生裂纹的压缩闭合阶段,该阶段取决于已有的裂纹密度和形态以及所处的应力条件,应力阈值为裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ ;阶段 II 为线弹性变形阶段,应力-应变曲线呈线性变化;阶段 III 为裂纹的稳定扩展阶段,进入该阶段的应力阈值为起裂强度 $\sigma_{ci}$ ,当轴向应力增大到岩石的起裂强度时,岩石内部出现新生微裂纹,并且微裂纹稳定扩展,若

保持荷载不变, 裂纹维持在当前状态不会继续扩展; 阶段 IV 为裂纹的非稳定扩展阶段, 进入该阶段的应力阈值为损伤强度  $\sigma_{cd}$  (又称为扩容应力), 此时岩石内部出现贯通的裂纹, 岩石体积开始膨胀, 出现体积扩容现象。随着轴向应力的进一步增大, 岩石达到承载极限即峰值强度  $\sigma_f$  而破坏, 表面出现宏观贯通裂纹, 此后岩石进入峰后应变软化阶段 V。

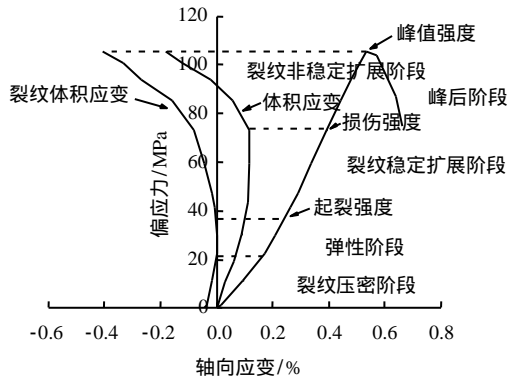


图 1 脆性岩石渐裂过程示意图

Fig.1 Sketch of progressive failure process of brittle rocks

起裂强度和损伤强度是划分岩石破坏过程的两个重要指标。国内外学者对这两个指标的确定提出了很多方法<sup>[13-15]</sup>, Martin<sup>[13]</sup>最早提出用裂纹应变模型来计算岩石的起裂强度, 其计算简单且物理意义明确。本文即采用裂纹应变模型来确定起裂强度和损伤强度。

对于岩石三轴压缩试样, 体积应变  $\epsilon_v$  可以表示为

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \tag{2}$$

式中:  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_3$  分别为岩石的轴向应变和侧向应变。

体积应变可以分解为两个部分: 一部分是由于加载过程中岩石内部裂纹闭合、萌生、张开以及贯通等不同状态引起的裂纹体积应变  $\epsilon_{cv}$ ; 另一部分是相同应力水平下的弹性体积应变  $\epsilon_{ev}$ 。从总的体积应变中减去弹性体积应变便可以得到裂纹体积应变, 计算公式为

$$\epsilon_{cv} = \epsilon_v - \frac{(1-2\nu)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{E} \tag{3}$$

式中:  $E$  和  $\nu$  分别为弹性阶段试验曲线求得的弹性模量和泊松比;  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为轴向应力和侧向应力。注意到, 这里为了简便, 假设其弹性模量和泊松比为常数。

如图 1 所示, 在压密阶段, 裂纹体积应变正向偏移, 表明裂纹压密; 在弹性变形阶段由于岩石体积应变等于弹性体积变形, 裂纹体积应变保持不变;

进入裂纹扩展阶段后, 裂纹体积应变向负向偏移并不断减小, 表示裂纹开始萌生扩展。弹性阶段与裂纹稳定扩展阶段之间的转折点所对应的轴向应力即为起裂强度  $\sigma_{ci}$ 。随着偏应力的施加, 岩石出现体积扩容, 体积应变曲线向负向偏移的拐点所对应的轴向应力即为损伤强度  $\sigma_{cd}$ 。

### 3.1 起裂强度和损伤强度与围压的关系

通过上述方法确定的起裂强度  $\sigma_{ci}$  和损伤强度  $\sigma_{cd}$  值见表 1。

表 1 凝灰岩渐进破坏指标

Table 1 Thresholds of progressive failure for tuff

围压 /MPa	渗压 /MPa	$\sigma_f$ /MPa	$\sigma_{ci}$ /MPa	$\sigma_{ci}/\sigma_f$ /%	$\sigma_{cd}$ /MPa	$\sigma_{cd}/\sigma_f$ /%
2	1	107.33	24.21	22.6	49.79	46.4
5	1	139.24	51.21	36.8	64.89	46.6
10	1	227.79	59.82	25.9	70.21	30.8
5	4	87.31	25.46	29.2	33.31	38.2
10	4	181.36	89.65	49.2	119.99	65.7

从表 1 可以得出, 起裂应力与峰值应力的比值在 0.22 ~ 0.50 之间, 与文献<sup>[16]</sup>对脆性岩石干燥情况下起裂强度的拟合结果 0.3 ~ 0.5 倍峰值强度接近。岩石损伤强度与峰值应力的比值在 0.30 ~ 0.66 之间, 低于一些学者<sup>[10, 13]</sup>试验得出的 0.70 ~ 0.85 的水平。这是由于应力在到达其起裂强度之前, 岩样中仅含有少量原生微裂纹且多为闭合状态, 其有效应力系数较小, 渗压对其力学行为影响较小; 然而, 应力超过起裂强度后, 新裂纹萌生并扩展, 其有效应力系数急剧增大, 渗压对其力学性质具有明显的弱化效应, 从而加快了裂纹的扩展速度<sup>[4, 17]</sup>, 使得稳定扩展阶段缩短。同时由于围压能有效地限制裂纹径向开展<sup>[18]</sup>, 随着围压的增大, 试样的起裂强度, 损伤强度和峰值强度都有增大的趋势。

### 3.2 渐进破坏不同阶段的渗透性演化规律

图 2 为在不同围压和渗透压下凝灰岩试样破坏全过程的偏应力、渗透率与应变关系曲线。

从图可以看出, 不同应力条件下凝灰岩的渗透率变化规律基本一致。在应力加载初始阶段, 岩石原生微裂隙随着压力的施加发生压密甚至闭合, 阻塞了渗流通道, 使得渗透率随之减小。在弹性阶段, 应力的施加使得岩样发生弹性变形, 原生裂隙进一步被压密使得渗透率继续降低。裂纹经过闭合和线弹性变形两个阶段后, 裂纹开度达到了最小, 岩石在起裂强度  $\sigma_{ci}$  时的渗透率基本降到最低, 此时渗透率即为最小渗透率。试样在进入裂纹稳定拓展阶段后, 渗透率并没有出现明显增加, 而是在最小渗透率附近保持平稳<sup>[3, 6, 8]</sup>, 说明裂纹的稳定扩展对渗透

性的影响并不明显。根据 Jaeger<sup>[19]</sup>和梁昌玉<sup>[20]</sup>等的研究成果，脆性岩石在应力水平处于起裂强度和损伤强度之间时，岩石反映非线性弹性材料的性质，在该阶段岩石的结构和性质不会发生明显的不可逆

变化，裂纹应变很小，裂隙开度没有明显扩展，渗透率变化并不明显。而当岩石进入裂纹非稳定拓展阶段后，裂纹之间搭接贯通，渗流通道打开，渗透率才开始出现较为明显的增大趋势。

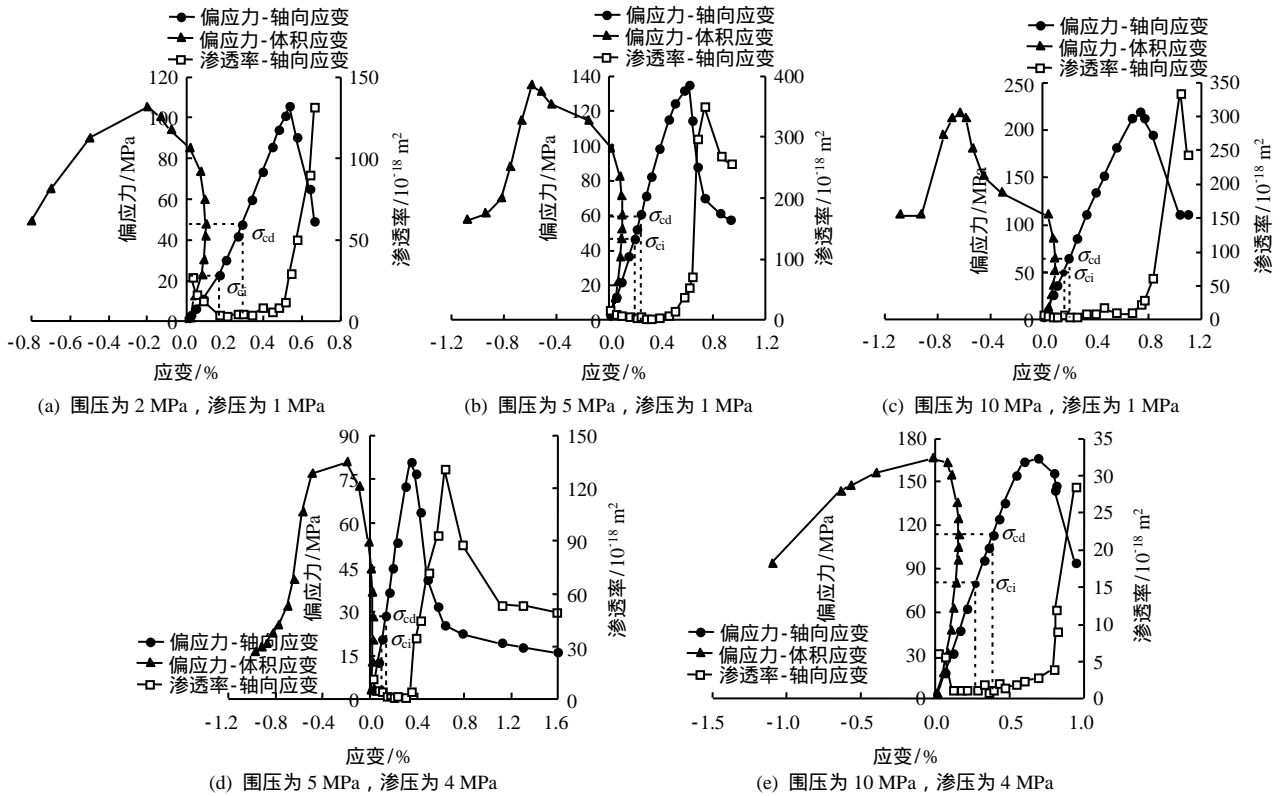


图2 不同围压和渗透压下试样偏应力、渗透率与应变的关系曲线

Fig.2 Relationships of deviatoric stress-permeability-strain under different confining pressures and seepage pressures

### 3.3 不同围压对渗透率的影响

图3为渗压1 MPa时，不同围压下偏应力和渗透率与轴向应变的关系曲线。

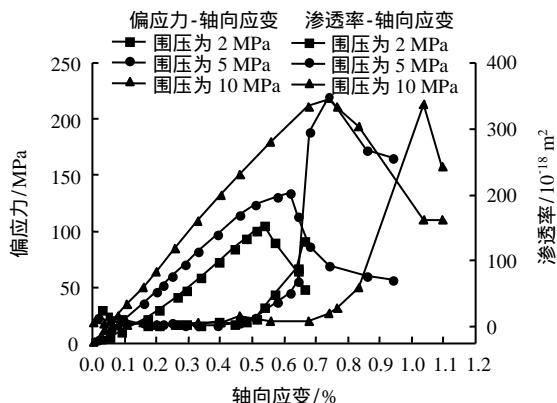


图3 渗压为1 MPa不同围压下偏应力、渗透率与轴向应变的关系曲线

Fig.3 Relationships of deviatoric stress-permeability-axial strain at different confining pressures under a seepage pressure of 1 MPa

从图可以看出，在初始压密阶段，试样内部孔隙、裂纹压密闭合，渗透率下降，轴向应变小于0.1%

时，围压2、5、10 MPa下，岩样的平均渗透率依次为  $18.61 \times 10^{-18}$ 、 $9.95 \times 10^{-18}$ 、 $4.41 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ，岩样的初始渗透率和压密段的渗透率平均值都呈下降趋势，表明随着围压的增大，岩石内部的原生孔隙、微裂隙压密闭合作用越明显，该阶段围压是影响岩样渗透率的主要因素；随着轴向应力的增大，岩样进入弹性阶段，渗透率下降但并不明显；进入裂纹稳定扩展阶段，岩样内部微裂纹没有发育贯通，渗透通道没有形成，渗透率保持在较低的水平，围压2、5、10 MPa下，该阶段岩样渗透率平均值分别为  $6.06 \times 10^{-18}$ 、 $4.04 \times 10^{-18}$ 、 $2.98 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ，围压对渗透率的增加仍起抑制作用。在当轴向应力达到损伤强度后，裂纹进入非稳定扩展阶段，在该阶段岩石内部逐渐形成以宏观贯通裂纹为主的优势渗流通道，渗透率急剧增大2~3个数量级并达到峰值渗透率，此时非稳定阶段渗透率的增大与围压关系不明显。

### 3.4 裂纹环向应变与渗透率的关系

当试样应力水平达到裂纹非稳定扩展阶段后，渗透率发生了明显的变化。考虑到环向应变能更加

敏感地反映渗透性的变化规律<sup>[21]</sup>，将研究裂纹环向应变与渗透率的关系。

利用上一节得到裂纹体积应变的方法，在实测的  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_3$  中减去相同应力条件下的弹性应变，可以得到裂纹轴向应变  $\epsilon_{c1}$  和裂纹环向应变  $\epsilon_{c3}$ ，计算公式为

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_1 - \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (4)$$

$$\epsilon_{c3} = \epsilon_3 - \frac{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (5)$$

图 4 为凝灰岩在不同围压和渗透压下的裂纹轴向应变、裂纹环向应变、渗透率与轴向应变的曲线。比较图 2、4 可以看出，岩石进入裂纹非稳定扩展阶段后，在其最初阶段渗透率保持平稳，随后渗透率开始增大，增加过程可以分为两个阶段，首先是渗透率的小幅增大，随后是在峰值点附近渗透率开始剧烈增加。

在三轴试验中，当轴向应力达到起裂强度时，岩石内部出现平行于最大主应力方向或与大主应力方向夹角很小的张拉裂纹<sup>[20, 22]</sup>，即近似轴向的细观裂纹。这些新生细观裂纹和原生微裂纹会随着偏应力的施加张拉扩展并且产生次生分叉裂纹。轴压达到损伤强度时，微裂纹出现张拉和剪切两种形式的连接，使得岩石内部裂纹交汇、搭接，出现贯通裂纹<sup>[22]</sup>，岩石体积出现扩容膨胀。岩石的体积膨胀主要是由于损伤发育和剪切滑移引起，在体积应变的表达式 (2) 中体现为环向应变的增大导致。由图 4 可知，在非稳定扩展阶段初期，裂纹环向应变和裂纹轴向应变都保持在很低的水平，裂纹并没有明显的扩展，岩石体积的扩容趋势并不明显，渗流通道没有显著增大，渗透率变化平稳。随着轴向应力的继续增大和渗压对裂隙的扩张作用，裂纹环向应变开始较为明显的增加，表明贯通裂纹张拉扩展，随着贯通裂纹的形成和扩展，裂纹变形占据岩样变形的的主要形式，而贯通裂纹也随之成为优势渗流通道，渗透率出现较为明显的增长趋势，如图 4 中的阶段 1。随着贯通裂纹的进一步发育，在峰值强度附近，岩石出现宏观贯通裂纹（见图 5），突然出现的宏观张拉裂纹和局部的剪切滑移使得裂纹环向应变剧烈增加，曲线斜率突然变陡，出现拐点，此时裂隙型渗透通道基本形成，拐点处的渗透率也随之出现了突变，达到起始渗透率<sup>[3]</sup>，随后渗透率一直增大到峰值，表现为渗透率增加 2~3 个数量级，如图 4 中的阶段 2。对比不同围压下的渗透率变化曲线可以看出，随着有效围压的增大，阶段 1 更加明显，

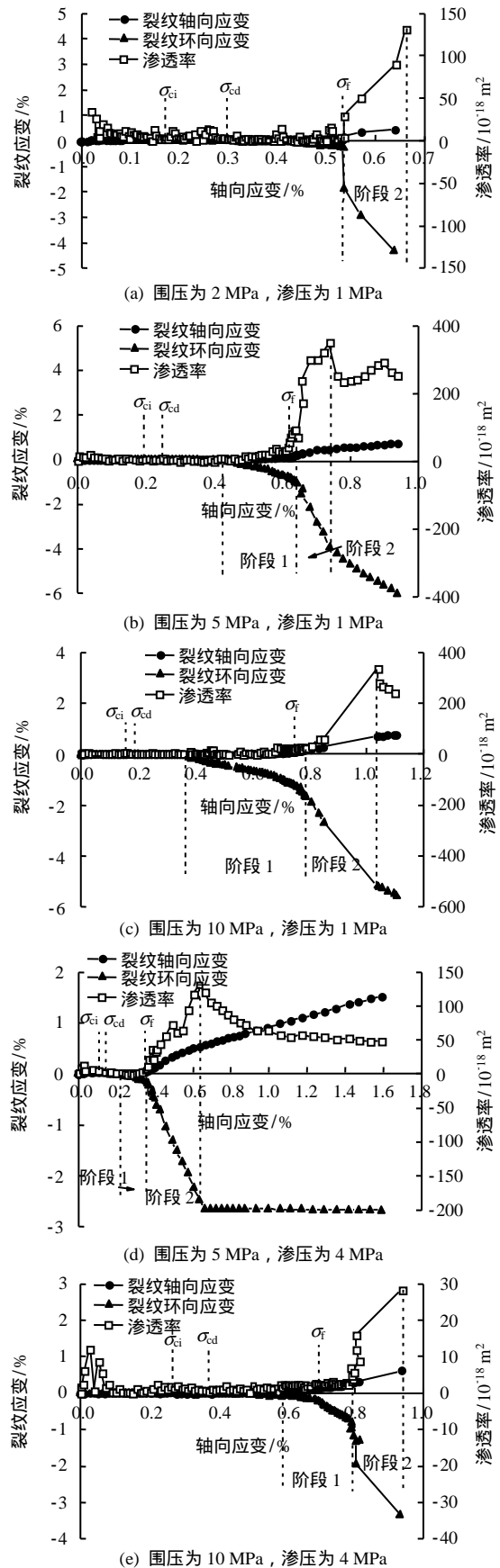


图 4 不同围压和渗透压下的裂纹应变、渗透率与轴向应变的曲线

Fig.4 Relationships of crack strain-permeability-axial strain of tuff specimens under different confining pressures and seepage pressures

这表明有效围压的增大，使得岩石由脆性逐渐转变为延性<sup>[23]</sup>，峰前塑性变形段变长，宏观贯通裂纹的出现相对不再突然。



围压为 10 MPa，渗压为 4 MPa

图 5 破坏岩样

Fig.5 Tuff specimen after failure

在岩石受荷过程中，微裂纹发育开展形成大量的渗流通道，使得岩石渗透率发生重大变化。从细观角度分析，此时脆性岩石的渗透性主要由微裂纹的密度、开度和连通性控制，而岩石多孔介质渗透性的变化相对来说很小。本文使用江涛<sup>[24]</sup>提出的细观模型对渗透率增大阶段的试验数据进行拟合，拟合函数如下：

$$\frac{k}{k_0} = \frac{R}{R_0} \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-\frac{4}{3}} \left( \frac{\beta}{\beta_0} \right)^3 \quad (6)$$

式中： $R$  为微裂纹贯通度，取值范围为 $[0,1]$ ； $R_0$  为初始状态下脆性岩石的贯通度，参考江涛<sup>[24]</sup>对脆性岩石的模拟结果取  $5 \times 10^{-5}$ ； $\beta$  为微裂纹等效开度，等于裂纹膨胀应变  $\epsilon_{cv}^+$ ，以拉为正，由于裂纹轴向应变始终为压缩，故  $\epsilon_{cv}^+ = \epsilon_{c2} + \epsilon_{c3}$ ，初始微裂纹等效开度  $\beta_0$  取  $3 \times 10^{-3}$ ； $k_0$  为初始状态下的渗透率，取  $4 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ； $d_0$  为初始状态下微裂纹密度，参考文献<sup>[24]</sup>取较低值  $1 \times 10^{-3}$ ，微裂纹密度  $d$  会随着裂纹膨胀应变的增大而增大，演化公式为

$$d = 1 - e^{-\frac{\epsilon_{cv}^+}{B}} \quad (7)$$

式中： $A$ 、 $B$  为拟合参数，可通过对试验得到的渗透率和裂纹膨胀应变的规律拟合确定。模型参数参考值见表 2。

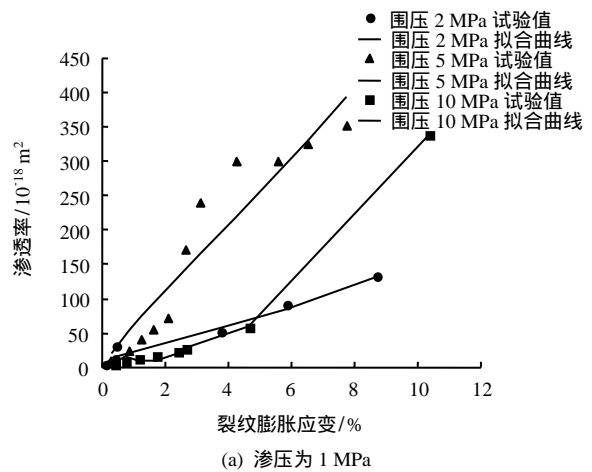
图 6 为不同围压和渗压下凝灰岩渗流率增大阶段的试验值与细观模型拟合曲线。从图中可以看出，试验值与拟合曲线吻合较好。细观模型综合考虑了微裂纹的密度和状态对渗透率变化的影响，能够较

好地模拟渗透率增大阶段。

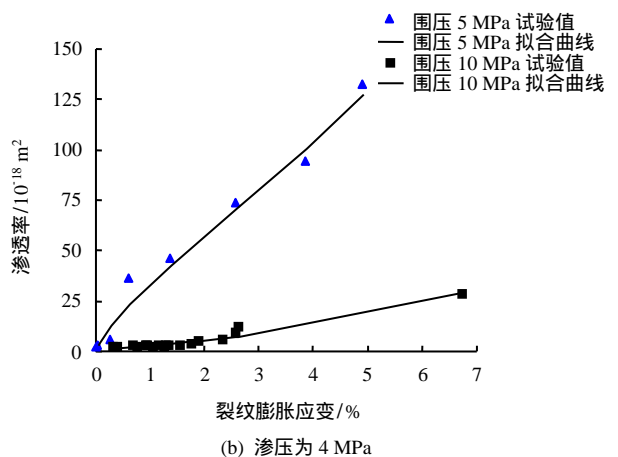
表 2 拟合参数值

Table 2 Fitting parameters of experimental data

围压/MPa	渗压/MPa	$R$	$A$	$B$
2	1	$2.87 \times 10^{-4}$	1.83	9.77
5	1	$3.18 \times 10^{-4}$	1.63	5.10
10	1	$9.81 \times 10^{-4}$	1.65	20.37
5	4	$5.31 \times 10^{-4}$	1.69	9.41
10	4	$2.37 \times 10^{-4}$	1.72	19.25



(a) 渗压为 1 MPa



(b) 渗压为 4 MPa

图 6 不同试验条件岩样渗透率与裂纹膨胀应变拟合结果  
Fig.6 Evolution of permeability with crack expansion strain for tuff specimen

由上述分析可知，岩石渐进破坏过程中的渗透性变化与内部裂纹的张拉扩展有着密切联系，裂纹环向应变能较好地反映由于裂隙开展引起的渗透率变化，并且可以通过裂纹环向应变曲线的转折点来确定起始渗透率的位置。

在图 4 中，岩石在峰后应变软化段出现渗透率下降甚至残余，而裂纹环向应变在该阶段仍在继续张拉扩展，不能很好地反映峰后渗透性的变化，所以应探讨裂纹环向应变率与渗透率的关系。



### 3.5 裂纹环向应变率与渗透率的关系

本试验设定仪器每 5 s 记录一个数据，通过上一节计算得到的裂纹环向应变可以计算出裂纹的环向应变率，图 7 为凝灰岩裂纹环向应变率与渗透率的关系。

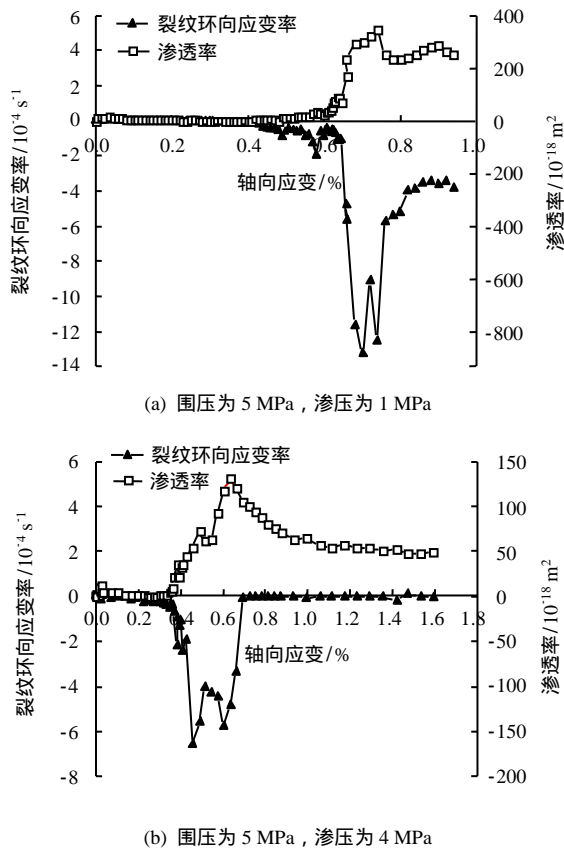


图 7 凝灰岩裂纹环向应变率、渗透率与轴向应变的关系  
Fig.7 Relationships of crack circumferential strain rate-permeability-axial strain of tuff specimens under different confining pressures and seepage pressures

从图 7 可以看出，裂纹的环向应变率能够较好地反映渗透率的下降甚至残余阶段。对本试验所用的岩样，当裂纹环向应变率大于  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时，渗透率开始明显增加，并且试样的渗透率峰值点与强度峰值点并不一一对应，前者出现于破坏软化阶段，并且往往是在裂纹应变率大幅变化的终点，表明渗透率达到峰值是裂纹经过一段高速非稳定扩展后的累积效应。在渗透率达到峰值后，裂纹的环向应变率趋于稳定，裂纹重新进入稳定阶段，同时由于试验是应变加载，试样在轴向进一步被压缩，岩石内部的渗流通道减小，从而渗透率减小并最终进入残余阶段，渗透率趋于稳定。综上可以看出，裂纹的环向应变率能较好地反映峰后渗透率的下降和残余现象，同时可以用于确定渗透率峰值点的位置。

## 4 结 论

(1) 在损伤强度之前尤其是初始压密阶段，岩样渗透率受围压影响明显，围压越大，渗透率越低；当轴向应力达到损伤强度后，岩样渗透率主要受内部裂纹的密度、开度和贯通程度等因素的影响。

(2) 凝灰岩在裂纹压密阶段和弹性变形阶段，裂纹通路被压密，渗透率下降。在裂纹稳定扩展阶段，裂纹开展不明显，渗透率保持在很低的水平，起裂强度所对应的渗透率可以作为最小渗透率。

(3) 凝灰岩进入裂纹非稳定扩展阶段后，渗透率在最初阶段保持不变，随着裂纹贯通发育，渗透率显著增大，渗透率的增大过程可以分为两个阶段，其中阶段 2 反映了宏观裂纹出现后的渗透性变化，较阶段 1 的增大趋势更为明显。

(4) 裂纹环向应变能较好地反映渗透率增加的两个阶段，两个阶段之间转折点对应的渗透率可以作为起始渗透率，通过细观模型拟合了渗透率的增大阶段，取得了较好地拟合效果，表明此时渗透率主要受裂纹发育程度的影响。

(5) 裂纹环向应变率能较好地反映峰后渗透率的变化规律，渗透率在岩石内部裂纹经过一段高速的非稳定扩展后达到峰值，并且随着裂纹环向应变率的稳定而逐渐下降并最终趋于稳定。裂纹环向应变率非稳定增大段的终点可确定渗透率峰值点。

## 参 考 文 献

- [1] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. *Engineering Geology*, 2002, 63(3-4): 291-300.
- [2] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力应变过程渗流特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 555-563.  
ZHU Zhen-de, ZHANG Ai-jun, XU Wei-ya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristic of brittle rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 555-563.
- [3] 姜振泉, 季梁军, 左如松, 等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(10): 1442-1446.  
JIANG Zhen-quan, JI Liang-jun, ZUO Ru-song, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servo-control condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1442-1446.
- [4] 仵彦卿, 曹广祝, 丁卫华. CT 尺度砂岩渗流与应力关

- 系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4204 - 4209.
- WU Yan-qing, CAO Guang-zhu, DING Wei-hua. Experimental study on relation between seepage and stress of sandstone in CT scale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 23(24): 4204 - 4209.
- [5] 韩国锋, 王恩志, 刘晓丽. 压缩带形成过程中渗透性变化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 991 - 997.
- HAN Guo-feng, WANG En-zhi, LIU Xiao-li. Experimental study of permeability change during compaction bands formation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 991 - 997.
- [6] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1204 - 1213.
- YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Triaxial experimental study of associated permeability-deformation of sandstone under hydro-mechanical coupling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(6): 1204 - 1213.
- [7] 中国电力企业联合会. GB/T50266-2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- China Electricity Council. GB/T50266-2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [8] 王小江, 荣冠, 周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2940 - 2947.
- WANG Xiao-jiang, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing. Permeability experimental study of gritstone in deformation and failure processes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp. 1): 2940 - 2947.
- [9] 谢兴华, 郑颖人, 张茂峰. 岩石变形与渗透性变化关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 2658 - 2661.
- XIE Xing-hua, ZHENG Ying-ren, ZHANG Mao-feng. Study of relationship between rock mass deformation and permeability evolvment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 2658 - 2661.
- [10] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1967, 4(4): 395 - 430.
- [11] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 643 - 659.
- [12] GOKTAN R M, YILMAZ N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting[J]. **The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, 2005, 105: 727 - 733.
- [13] MARTIN C D. The strength of massive Lac du bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1993.
- [14] EVERITT R A, LAJTAI E Z. The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnett granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 1277 - 1303.
- [15] 周辉, 孟凡震, 卢景景. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 914 - 925.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zheng, LU Jing-jing. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 914 - 925.
- [16] PELLI F, KAISER P K, MORGENSTERN N R. An interpretation of ground movements recorded during construction of the Donkin-Morien tunnel[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1991, 28: 239 - 254.
- [17] 彭俊, 荣冠, 周创兵. 水压影响岩石渐进破裂过程的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 942 - 954.
- PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing. Experimental study of effect of water pressure on progressive failure process of rocks under compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 942 - 954.
- [18] 朱泽奇, 盛谦, 冷先伦, 等. 三峡花岗岩起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2571 - 2575.
- ZHU Ze-qi, SHENG Qian, LENG Xian-lun, et al. Study on crack initiation mechanism of three gorges granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2571 - 2575.
- [19] JAEGER J C, COOK N G W. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 94 - 105.
- JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1981: 94 - 105.



- 剪性能优化试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1063 - 1067.
- LI Li-hua, XIAO Heng-lin, TANG Hui-ming, et al. Shear performance optimizing of tire shred-sand mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1063 - 1067.
- [14] MOHAMAD E T, LATIFI N, MARTO A, et al. Effects of relative density on shear strength characteristics of sand-tire chips mixture[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 18 (Bund D): 623 - 632.
- [15] SIGNES C H, FERNANDEZ P M, PERALLON E M, et al. Characterisation of an unbound granular mixture with waste tyre rubber for subballast layers[J]. **Materials and Structures**, 2015, 48(12): 3847 - 3861.
- [16] SELLAH H, TROUZINE H, HAMHAMI M, et al. Geotechnical properties of rubber tires and sediments mixtures[J]. **Engineering Technology and Applied Science Research**, 2014, 4(2): 618 - 624.
- [17] 刘方成, 陈璐, 王海东. 橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1903 - 1913.  
LIU Fang-cheng, CHEN Lu, WANG Hai-dong. Evaluation of dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture based on cyclic simple shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1903 - 1913.
- [18] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the PRC. GB/T50123-1999 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [19] ZHENG Y F, SUTTER K G. Dynamic properties of granulated rubber-sand mixtures[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(3): 338 - 344.
- [20] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1970, 96(SM5): 1629 - 1653.
- [21] DARENDELI M B, STOKOE K H. Dynamic properties of soils subjected to the 1994 Northridge earthquake[R]. Austin, TX: Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, 1997.
- [22] PARK T K, SILVER M LS. Dynamic triaxial and simple shear behavior of sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1975, GT6: 513 - 529.
- [23] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
LI Guang-xin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [24] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber(SRM) and gravel/rubber(GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2012, 33(1): 38 - 53.
- ZHAO Yan-lin, CAO Ping, LIN Hang, et al. Rheologic fracture mechanism and failure criterion of rock cracks under compressive-shear load with seepage pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(4): 914 - 925.
- [23] 曹文贵, 王泓华, 张升, 等. 岩石脆延特性转化条件确定的统计损伤方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1391 - 1396.  
CAO Wen-gui, WANG Hong-hua, ZHANG Sheng, et al. Study on decision of conversion condition for brittle-ductile property of rock by statistical damage method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(12): 1391 - 1396.
- [24] 江涛. 基于细观力学的脆性岩石损伤-渗流耦合本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.  
JIANG Tao. Study on constitutive model of coupled damage-permeability process of brittle rock based on mesomechanics[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

---

#### 上接第 2768 页

- [20] 梁昌玉, 李晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1831 - 1838.  
LIANG Chang-yu, LI Xiao, WANG Sheng-xing, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1831 - 1838.
- [21] 王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1704 - 1708.  
WANG Huan-ling, XU Wei-ya, YANG Sheng-qi. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1704 - 1708.
- [22] 赵延林, 曹平, 林杭, 等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹流变断裂贯通机制及破坏准则探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 914 - 925.