

文章编号: 1000-7598(2010)11-3441-07

# 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变 与破坏时效机制研究

黄书岭<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 张传庆<sup>1</sup>

(1. 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, 武汉 430071;  
2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

**摘 要:** 基于水压和应力耦合作用下锦屏深部大理岩的三轴蠕变试验, 研究了大理岩的变形时效特性、等时曲线特征以及时效破坏机制。研究表明, (1) 孔隙水压可以增强大理岩的时效变形能力, 有水压时的稳态蠕变率大于无水压状态时的稳态蠕变率。(2) 裂纹扩容失稳应力强度比可以作为硬脆性岩石是否发生失稳蠕变的门限值, 且当应力强度比到达这一门限值时, 岩石的失稳概率随着时间发展而陡增。(3) 体积蠕变量大于侧向和轴向的蠕变量值, 显示脆性岩石扩容蠕变效应特征显著。(4) 不同时刻的等时曲线具有明显的相似性, 在发生加速蠕变之前, 等时曲线基本呈线性特征; 而在发生加速蠕变时, 等时曲线呈显著非线性特征。

**关 键 词:** 应力和水压耦合; 硬脆性岩石; 三轴蠕变试验; 变形破坏时效机制

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Study of aging failure mechanics and triaxial compression creep experiments with water pressure coupled stress of brittle rock

HUANG Shu-ling<sup>1,2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Chuan-qing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Based on triaxial compression rheological experiments with water pressure coupled stress about the Jinping marble from the deep site in Jinping II diversion tunnel, the aging deformation characteristics, isochronous curve and aging failure mechanics are discussed in detail. The test results show that: (1) Water pressure can enhance the aging deformation capacity of the marble, and the steady-state creep rate under water pressure is greater than that when there is not water pressure. (2) Stress strength ratio of crack dilate instability can be used as creep instability threshold of brittle rock, and when stress strength ratio reached this threshold, the probability of rock instability increased sharply with time to develop. (3) Volume creep value is greater than the lateral or axial creep value, which indicates that there is a distinguishing dilate creep feature of brittle rock. (4) Isochronous curves of brittle rock at different time have obvious similarities, and accelerating creep ago, the curves are linear, but in the event of acceleration creep, the curves are significantly non-linear characteristics.

**Key words:** water pressure coupled stress; brittle rock; triaxial creep; aging deformation and failure mechanics

## 1 引 言

流变特性是岩石的一个重要性质, 很多岩石工程所显露出来的问题往往是与岩石的流变特性密切相关的。陈宗基教授<sup>[1]</sup>曾指出, 一个工程的破坏往往是有一定时间过程的。所以, 岩石时效特性的研究是

岩石力学和岩石工程一项重要的内容, 为此, 人们进行了大量的试验和理论研究<sup>[1-9]</sup>。这些研究主要集中在软弱岩石方面, 对硬脆性岩石较少, 尤其是孔隙水压和应力耦合下脆性岩石的时效特性研究更是少见。随着地下工程向深部发展, 特别是对于水位较高的岩石工程, 不仅要承受深部高应力的作

收稿日期: 2009-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10872209); 国家 973 项目 (No. 2010CB732006); 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资助课题 (No. Z110804)。

第一作者简介: 黄书岭, 男, 1978 年生, 博士, 工程师, 主要从事岩石力学计算理论和岩土工程稳定性评价及控制理论等方面的研究。

E-mail: huangsl\_2002@yahoo.com.cn

用, 同时还要承受孔隙水压的长期作用。现有研究表明<sup>[10-11]</sup>, 岩体内部孔隙水渗流过程及其孔隙水压力的存在, 造成岩体的力学性质变得异常复杂, 往往表现出与常规条件下明显不同的特征。

锦屏 II 级水电站引水隧洞的最大埋深为 2 525 m, 反演回归得到的最大主应力达 70 MPa 左右。而根据三维渗流场分析, 天然状态下三迭系白山组大理岩分布区地下水位埋藏较深, 均在 1 000 m 以上, 其压力水头线平缓, 区域最高地下水位大约为 2 650 m 左右, 最大压力水头约为 1 100 m 左右。在如此之高的地应力和水位下, 引水隧洞工程长期稳定性问题变得异常突出。

在锦屏 II 级水电站工程背景下, 本文采用全自动岩石三轴蠕变伺服仪, 对锦屏深部大理岩进行了水压和应力耦合作用下三轴蠕变试验, 基于这些试验结果, 对应力和孔隙水压耦合作用下脆性岩石的时效特征和破坏时效机制进行了初步探讨。

## 2 试验程序

### 2.1 试验设备

岩石三轴蠕变试验是在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三轴流变试验系统”中的岩石全自动流变伺服仪上进行。试验系统设备由围压、轴压和孔隙水压 3 套独立的加载部分组成。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。该系统具有以下功能和特点: ①高围压(可达 100 MPa)和高轴压(可达 500 MPa)输出; ②特殊设计的水压力施加系统, 具有流量大和稳流、稳压的特点, 并能够直接输出高达 100 MPa 的水压力, 满足高压条件下稳态法渗流试验的要求; ③全自动控制和数据采集; ④可实现应变和应力加载控制方式, 控制精度高。利用该试验系统可以完成干燥和饱和单轴、三轴以及孔隙水压和应力耦合作用下三轴流变试验, 也可以完成饱和和非饱和渗流条件下的三轴流变试验。并可以广泛地适用于硬岩、软岩以及含结构面岩石等等多种岩性结构状态下的流变试验。试验系统具体构造如图 1 所示。

### 2.2 试验设计

本次试验所用的大理岩取自锦屏 II 级引水隧洞辅助洞的深埋段(埋深 2 000 m 左右), 为三叠系第 2 组即白山组大理岩(T2b), 此种岩石由碳酸盐矿物成分组成, 变晶结构, 致密块状构造, 宏观均匀性好, 矿物成分主要为方解石。三轴蠕变试验的岩样尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 试件的加工精度包括平

行度、平直度和垂直度均控制在《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[12]</sup>规定范围之内。考虑到三轴蠕变试验历时较长, 而岩样的数量有限, 采用分级加载的试验方法进行三轴蠕变试验。加载应力水平分 3 级, 根据常规三轴压缩试验来确定每一级的应力大小。进行蠕变试验时, 通过恒温、恒湿装置保持整个试验过程在恒温和恒湿的环境下进行。试验前, 将加工好的岩样首先升温到 500 °C, 然后再降到室温, 采用稳定渗流的方法测得渗透系数为  $10^{-18} \text{ m}^2$ , 与天然状态下大理岩的渗透系数<sup>[11]</sup>相比, 提高了 2 个数量级, 而其强度和变形并未发生明显的改变。采用抽真空饱和的方法使试样试验之前处于饱和状态。由于蠕变试验设备和时间所限, 本次三轴蠕变试验进行了 4 组, 蠕变试验时的孔隙水压和围压设计见表 1。

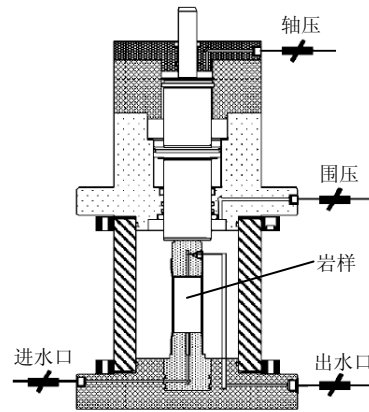


图 1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

表 1 三轴蠕变试验工况

Table 1 Work conditions of triaxial creep test

组号	孔隙水压力/MPa	围压/MPa	备注
R1	0	15	
R2	5	15	试样均处于饱和状态
R3	5	25	
R4	5	35	

### 2.3 试验步骤

在进行孔隙水压和应力耦合下的三轴蠕变试验时, 严格按如下具体步骤来实施:

①首先将饱和岩样放到三轴室中, 启动恒温恒湿装置, 保持整个试验过程温度和湿度不变;

②施加围压, 采用应力控制方式使其保持在一设定值;

③在设定的围压条件下, 在进水口和出水口分级施加水压, 直到预定值;

④增加轴向压力到设定值, 保持轴向压力不变,

直到该压力下岩样的变形稳定,同时记录轴向应变、侧向应变以及时间,再施加下一级轴向压力;重复这一过程,直到试件蠕变破坏为止。

遵循上述这些步骤,完成了整个试验。由此获得了孔隙水压和应力耦合作用下锦屏深部大理岩的变形时效特征与破坏规律。

### 3 脆性岩石的变形时效特性规律

#### 3.1 轴向变形

由试验获得了孔隙水压和不同围压耦合下锦屏大理岩的轴向蠕变曲线,如图 2 所示,图中  $q$  为每级荷载施加的偏应力。由图 2 可以发现,在没有孔隙水压而围压只有 15 MPa 作用时,饱和大理岩的瞬时弹性增量随着轴向应力的增加而减小,轴向蠕变增量也随着轴向应力的增加而增加,而且每一级轴向蠕变量与每一级瞬时弹性量之比也同样在增加,也就是说,随着应力水平的增加,岩石的蠕变量在总变形中所占的比重在增加。

第 1 级荷载(应力强度比为 0.56)时,历时 149 h,轴向蠕变量为该级瞬时弹性量的 16.8%,总蠕变量为总变形的 14%。第 2 级荷载(应力强度比为 0.75)时,历时 161.3h,轴向蠕变量为该级瞬时弹性量的 31.2%,此时总的蠕变量为总变形的 20%(共历时 310.3 h)。第 3 级荷载状态(应力强度比为 0.97)时,轴向变形发生加速蠕变,蠕变量为该级瞬时弹性量的 1.43 倍,历时 8.2 h 后岩石破坏,岩石总的蠕变量为总变形的 43%(共历时 318.5 h)。在围压相同(15 MPa),且同时存在 5 MPa 的孔隙水压作用时,在应力水平基本相同的情况下,从瞬时的 0.1 h 开始,轴向变形在相同历时 100 h 时,有水压时的应变增量为  $16.7 \times 10^{-4}$ ,没有水压时的应变增量为  $16.1 \times 10^{-4}$ ,二者相差约 4%。

随着围压的增加,在应力强度比基本相同的情况下,围压越大,蠕变变形量总体上在递减。如在应力强度比为 0.80,相同历时情况下围压为 15 MPa 的蠕变量为  $25 \times 10^{-4}$ ,而围压为 35 MPa 的蠕变量为  $15 \times 10^{-4}$ 。从应力强度比来看,对没有孔隙水压而围压为 15 MPa 时,应力强度比在 0.56 和 0.75 的情况下,变形表现为稳态蠕变,变形速率随着时间的增长逐渐趋于常数,即保持恒定速率。此后,蠕变变形按这一恒定速率增加;当应力强度比超过裂纹扩容失稳应力强度比 0.85 时<sup>[13]</sup>,脆性岩石在经历了短暂的稳态蠕变后,变形加速,也即出现了加速蠕变,岩石在几个小时内发生破坏。对有孔隙水压的情况,围压在 15~35 MPa 之间,每级的应力强度比

不低于裂纹扩容起始应力强度比  $0.45^{[13]}$ ,但也没有超过裂纹扩容失稳应力强度比,脆性岩石的蠕变变形为稳态蠕变。

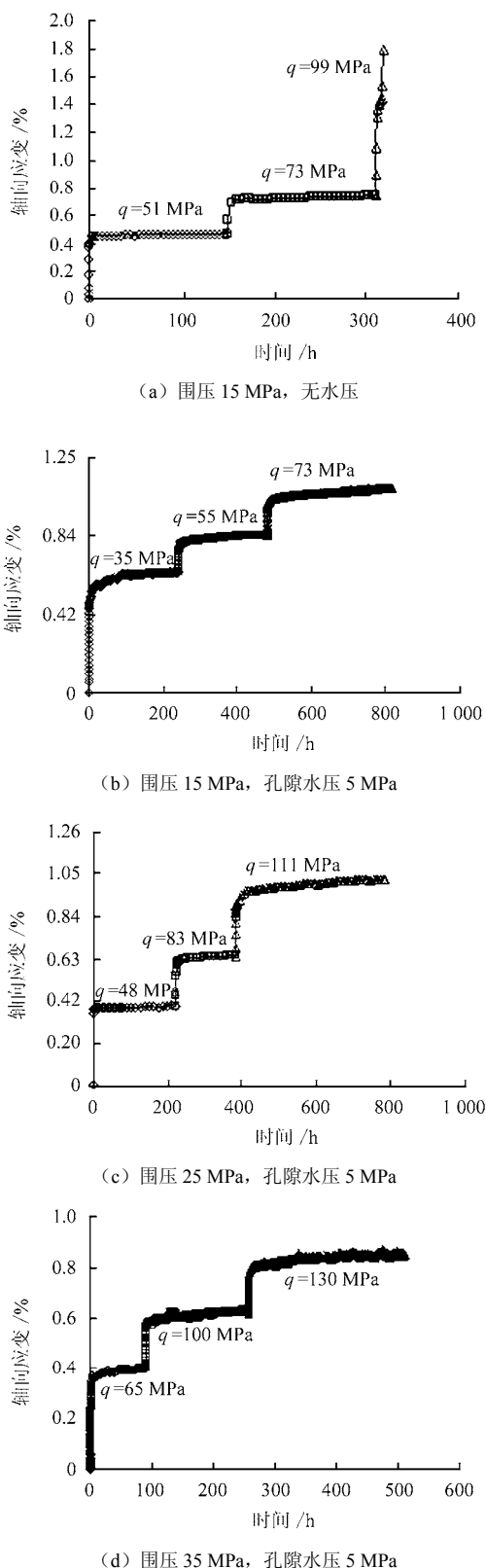


图 2 围压和孔隙水压耦合下的轴向蠕变曲线  
Fig.2 Axial creep curves of saturated marble under the condition of confining pressure coupled water pressure

### 3.2 侧向变形

由大理岩典型的侧向蠕变曲线(图3)可知,在较低的应力状态下,瞬时的弹性变形很小,而侧向蠕变变形随着时间的增加较为显著。对比有无水压情况时发现,围压为15 MPa且有水压时,蠕变量大于相同历时下无水压的情况。对比有孔隙水压下的2种围压(15 MPa和25 MPa),在相同的应力强度比和时程下,围压15 MPa时的蠕变量显著大于围压25 MPa的蠕变量。

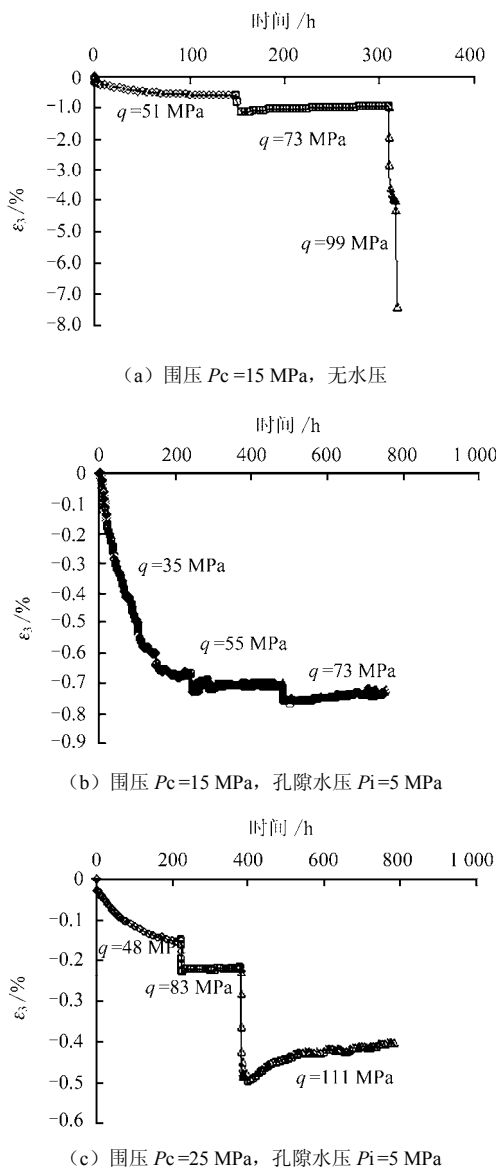


图3 围压和孔隙水压耦合下的侧向蠕变曲线  
Fig.3 Lateral creep curves of saturated marble under the condition of confining pressure coupled water pressure

随着应力水平的升高,侧向蠕变变形不再增加而是出现了降低,特别是当应力强度比接近裂纹扩容失稳应力强度比时,这种现象更为明显。可见岩石的体积变形不是膨胀,而是收缩。显然,这是一

种不正常的情况,而无孔隙水压时侧向蠕变变形也存在这种情况,这一现象反映了岩石内部结构的复杂性,其非均匀的变形导致出现宏观测量变形的反常。

### 3.3 体积变形

图4为围压为15 MPa且不含孔隙水压情况下的大理岩的体积蠕变曲线,该曲线规律和侧向蠕变曲线规律基本一致。不同的是,体积蠕变量均明显大于侧向和轴向的蠕变量值,特别是在较低的围压下岩石扩容蠕变效应显著,随着围压的升高,这种扩容蠕变效应逐渐降低,但在高围压下,脆性岩石不易发生体积蠕变。另外,由图4还可以看出,在偏应力为99 MPa时岩石的体积随时间变化,蠕变速率迅速增加,发生了显著扩容而加速破坏。

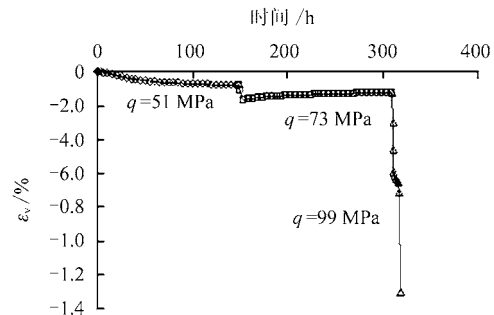


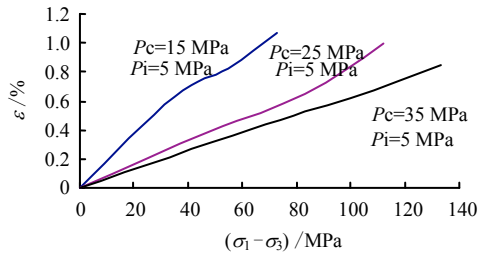
图4 围压15 MPa且无水压时饱和大理岩的体积蠕变曲线  
Fig.4 Volumetric creep curves of saturated marble under the condition of confining pressure 15 MPa

### 3.4 等时曲线

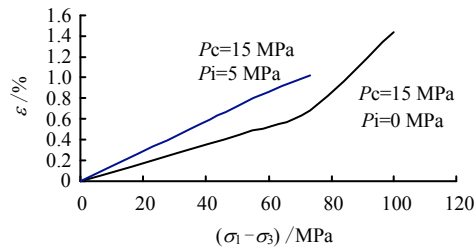
图5为孔隙水压和围压耦合下锦屏大理岩的等时曲线。由图可见,历时100 h、孔隙水压相同时,随着围压增加,相同偏压下岩石的时效变形随之减小,而且偏压越大,减小的量值越明显。也就是说,在相同的高应力下,围压越大,岩石的时效变形越小,即围压对脆性岩石时效变形的约束效应非常显著。若要得到相同变形,围压越高需要的应力水平也就越高。

另外,在试验的应力范围内,岩石的时效变形随着应力的增加基本上呈线性关系。在围压相同而孔隙水压不同时(图5(b)),在到达相同的应变时,无孔隙水压时需要的应力要大于有孔隙水压时需要的应力,可见孔隙水压的存在增强了岩石的时效变形能力,与前述分析结果一致。由于无孔隙水压时在高应力下发生了加速蠕变,等时曲线在这种应力状态时表现为非线性,见图6(a)。从图6不同时刻等时曲线还可以发现,围压和孔压相同时,这些等时曲线具有明显的相似性,在应力水平较低时,随着时间的增加大理岩时效变形表现不显著;在较

高应力水平时，随着时间的增加，大理岩的时效变形开始变得明显；而高应力水平时，大理岩的时效变形随着时间的增加而加速增长。



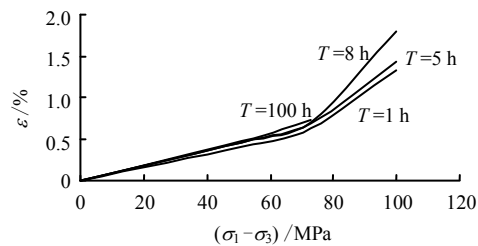
(a) 围压不同、孔隙水压相同，历时 100 h



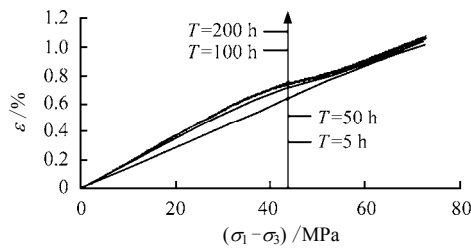
(b) 围压相同，孔隙水压不同，历时 5 h

图 5 相同时刻的等时曲线

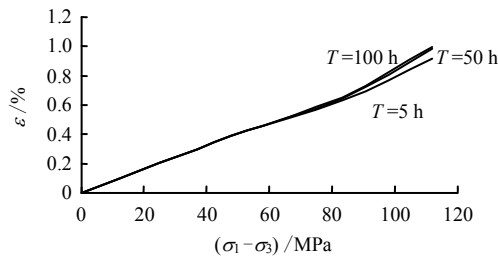
Fig.5 Isochronous curves at same time



(a) 围压 15 MPa，无水压



(b) 围压 15 MPa，孔隙水压 5 MPa



(c) 围压 25 MPa，孔隙水压为 5 MPa

图 6 不同时刻的等时曲线

Fig.6 Isochronous curves at different times

### 4 脆性岩石时效破裂机制初探

现有研究发现<sup>[2, 13]</sup>，岩石的延后变形和时效渐进破坏过程，其本质归结为裂缝扩展的时效特性，且伴随着岩石力学性能的逐步劣化。在这些认识的基础上，下文主要针对孔隙水压和应力耦合作用下大理岩的时效变形破坏机制进行分析。

大理岩蠕变过程中的宏观破坏主要表现为低围压下的劈裂破坏和较高围压下剪切破坏。图 7 为围压为 15 MPa 且孔压为 5 MPa 时的大理岩蠕变破坏后的断裂面，由图可以发现，大理岩的断裂面上存在明显的强烈摩擦滑移作用留下的白色粉末以及水侵蚀留下的痕迹。表明在蠕变的过程中，岩石内部的损伤不断累积发展并最终导致时效性破坏的出现。



图 7 岩石蠕变破坏后的形态和断裂面

Fig.7 Creep fracture surface of marble

应力水平较低时，随着时间的增加，原有裂纹的闭合、晶格缺陷的扩散以及颗粒之间变形的协调等局部结构缓慢的调整，宏观上则表现为变形延迟增长，且逐步趋于 0，形成衰减蠕变。对于硬脆性岩石而言，即便存在水压作用，只要其有效应力低于裂纹起始应力水平，通常也不会造成时效破坏问题。

当应力水平位于裂纹起始应力与裂纹扩容失稳应力之间时，细观裂纹在应力持续作用下产生，裂纹尖端随时间发展而逐渐前移，裂缝宽度增加<sup>[13-14]</sup>，导致岩石开始出现裂纹体积扩容，宏观变形增加，但由于裂纹开裂扩展是稳定进行的，在宏观上表现为蠕变速率保持一个恒定量值，变形按着这个恒定速率增长，即岩石呈现稳态蠕变。在这种情形下，如果存在水压的长期作用，一方面在裂纹尖端存在水的物理化学弱化或者润滑作用，另一方面是水作用在裂纹面上的压力会在裂纹尖端形成一个附加的拉力，有助于增强裂纹扩展的能力，并可能导致张性裂纹的扩展或者闭合裂纹的摩擦滑移，裂纹体积

扩容增加,与无水压时相比,稳态蠕变速率将增大。需要注意的是,在这种情况下,当蠕变速率增大到一定程度时,存在时效变形破坏的风险。当应力水平超过裂纹扩容失稳应力水平时,也就是在高应力水平长期作用时,随着时间的发展,岩石内部不仅会产生大量新的细观裂纹,而且这些裂纹扩展连通,并逐渐形成主裂缝持续发展,岩石的损伤不断累积,裂隙体积进一步扩容。在主裂缝稳定扩展时,岩石为稳态蠕变,但此时稳态蠕变速率显著大于前一段的稳态蠕变速率。随着这种损伤的继续累积,在经历了一段时间后,岩石内部的主裂缝失稳扩展,裂隙体积扩容加剧,蠕变速率增大,岩石变形加速发展,即岩石出现了加速蠕变,意味着岩石失稳破坏的临近。同样,如果存在水压的长期作用,岩石内部主裂缝失稳扩展的历时提前,在一定程度上导致破坏时间缩短。所以,在深部高应力地下工程实践中,对于硬脆性围岩体的这种时效性破坏应当引起足够的关注,以免造成严重的后果。

## 5 结 论

(1) 在孔隙水压力的长期作用下,有孔隙水压力时轴向蠕变量在总变形中所占的比重显著。相同孔隙水压而轴压增加时,瞬时弹性增量逐级递减,蠕变变形增量逐级增加,表明孔隙水压力的存在能够在一定程度上改变大理岩的变形能力,增加蠕变能力。

(2) 在应力强度比基本相同的情况下,围压越大,蠕变变形量总体上递减。裂纹扩容失稳应力强度比可以作为脆性岩石是否发生失稳蠕变的门限值,当应力强度比到达这一门限值时,岩石的失稳概率随着时间增加而陡增。另外,体积蠕变量显著大于侧向和轴向的蠕变量值,且在较低的围压下,扩容蠕变效应显著。

(3) 孔隙水压力相同时,随着围压增加,相同偏压下变形随之减小,且偏压越大,减小的量值越明显;而在围压相同而孔隙水压力不同时,在到达相同的应变时,无孔隙水压力时需要的应力显著大于有孔隙水压力时需要的应力;在发生加速蠕变之前,等时曲线基本上呈线性关系,在发生加速蠕变时,等时曲线表现为非线性。另外,在相同围压和孔压时,不同时刻的等时曲线具有明显的相似性。

(4) 对于硬脆性岩石而言,无论有无水压作用,当应力强度比低于裂纹扩容起始应力强度比,一般不会造成时效变形破坏问题;当应力强度比在裂纹扩容起始应力强度比和裂纹扩容失稳应力强度比之

间时,基本为稳态蠕变,有水压时的稳态蠕变速率比无水压状态时有所增大,增加了出现时效变形破坏现象的概率;当应力强度比大于裂纹扩容失稳应力强度比时,无论有无水压的长期作用,均存在出现加速蠕变等时效变形破坏的风险。

上述这些时效变形破坏机制的分析和探讨,为后续建立该环境下脆性岩石的流变力学模型以及正在建设的锦屏 II 级深埋长大引水隧洞的长期稳定和安全提供重要的基础信息和参考依据。

**致谢:**感谢法国里尔科技大学 Shao Jianfu 教授、胡大伟博士和王伟博士等在试验方法和试验条件等方面的建议和帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 章根德,何鲜,朱维耀. 岩石介质流变学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 王芝银,李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081—1106.  
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081—1106.
- [4] 丁秀丽. 岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [5] 缪协兴. 软岩巷道围岩流变大变形有限元计算方法[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 24—34.  
MIAO Xie-xing. The finite element method of large rheological deformation of the tunnel in soft rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(2): 24—34.
- [6] ITO H, SASAJIMA S. A ten year creep experiment on small rock specimens[J]. **International Journal Rock Mechanics and Mining, Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1987, 24(2): 113—121.
- [7] 陈沅江,潘长良,曹平,等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209—214.  
CHEN Yuan-jiang, PAN Chang-liang, CAO Ping, et al. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 209—214.
- [8] 崔希海,李进兰,牛学良,等. 岩石扰动流变规律和本构关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1875—1881.  
CUI Xi-hai, LI Jin-lan, NIU Xue-liang, et al. Experimental study on rheological regularity and constitutive relationship of rock underdisturbing loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1875—1881.

- HAN Ying, JIANG Cheng-lin. Relationship between expansion energy of initial released gas and gas pressure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(5): 650—654.
- [6] 蒋承林. 煤与瓦斯突出的预测模型及预测指标[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 373—376.  
JIANG Cheng-lin. Forecast model and indexes of coal and gas outburst[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1998, 27(4): 373—376.
- [7] 刘贞堂. 突出危险煤吸附瓦斯后变形规律的研究[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(8): 29—31.  
LIU Zhen-tang. Study on the law of adsorption deformation of outburst coal[J]. **Coal Science and Technology**, 1996, 24(8): 29—31.
- [8] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 26—31.  
ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing. Experimental study on the law of effective stress by methane pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(3): 26—31.
- [9] 狄军贞, 刘建军. 基于 COMSOL Multiphysics 的煤层甲烷拟稳态吸附-运移数值模拟[J]. 中国煤层气, 2007, 4(3): 25—27.  
DI Jun-zhen, LIU Jian-jun. Numerical simulation based on COMSOL Multiphysics to steady and non-equilibrium adsorption-mobilization of coalbed methane[J]. **China Coalbed Methane**, 2007, 4(3): 25—27.
- [10] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 12—14.  
LIANG Bing, ZHANG Meng-tao, PAN Yi-shan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 12—14.
- [11] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祯. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556—561.  
LIU Jian-jun, LIU Xian-gui, HU Ya-ren. Study on nonlinear seepage of rock of low permeability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 556—561.
- [12] 章梦涛, 潘一山, 梁冰, 等. 煤岩流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [13] 张力, 郭勇义. 块煤瓦斯吸附动力过程的实验研究[J]. 煤矿安全, 2000, (9): 17—18.  
ZHANG Li, GUO Yong-yi. Experimental study of the dynamic process of block coal methane adsorption[J]. **Safety in Coal Mines**, 2000, (9): 17—18.
- [14] 范家文, 冯增朝, 段康廉, 等. 煤体变形及其瓦斯排放的相关性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2): 172—174.  
FAN Jia-wen, FENG Zeng-chao, DUAN Kang-lian, et al. Relativity testing study of coal mass deformation and gas drainage[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2004, 35(2): 172—174.
- [15] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563—1568.  
TANG Ju-peng, PAN Yi-shan, LI Cheng-quan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of Coalbed Methanes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1563—1568.

---

#### 上接第 3446 页

- [9] 胡其志, 冯夏庭, 周辉. 考虑温度损伤的岩盐蠕变本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2245—2248.  
HU Qi-zhi, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Study of creep model of rock salt with thermal damage considered[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2245—2248.
- [10] 朱珍德, 郭海庆. 裂隙岩体水力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [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(2): 236—243.  
CHEN Wei-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**, 2008, 27(2): 236—243.
- [12] 长江水利委员会长江科学院. 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.
- [13] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [14] KRANZ R L. Crack-crack and crack-pore interactions in stresses granite[J]. **International Journal Rock Mechanics And Mining, Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(11): 37—47.