

文章编号: 1000-7598 (2013) 07-1881-06

盐岩在围压卸荷作用下的扩容特征研究

姜德义, 范金洋, 陈 结, 任 松, 王 震, 白月明

(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 通过试验模拟盐岩储气库建腔期腔体围岩围压动态降低过程, 开展单轴压缩和三轴卸荷扩容试验, 并分析温度对盐岩试件卸荷扩容特征的影响。试验结果表明: 由于都是应力增加的过程, 卸荷试验的扩容特征与常规单轴试验相比, 在扩容阶段划分上具有一些共同点, 都存在体积压缩段、稳定扩容段和加速扩容段。卸荷试验和单轴试验的压缩极限基本相同。但由于加载方式不同, 卸荷试验的稳定扩容段在整体扩容中所占比例更小, 扩容速率和扩容幅度也较单轴试验小。在相同的偏应力作用下, 卸荷试验产生更大的扩容。温度升高能够促进盐岩的扩容, 表现为加速扩容点前移、初始稳定扩容段缩短、加速扩容段变长、扩容速度加快、扩容幅度增大等。

关 键 词: 盐岩; 围压卸荷; 扩容损伤; 温度效应

中图分类号: TU 456

文献标识码: A

Study of dilatancy characteristics of salt rock under unloading action of confining pressure

JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, REN Song, WANG Zhen, BAI Yue-ming

(State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The dynamic reduction of confining pressure of salt rock gas storage surrounding rock during construction period is simulated by uniaxial compression tests and triaxial unloading confining pressure tests. The effect of temperature on dilatancy characteristics of salt rock are analyzed by the unloading tests. The results show that all the tests are the process of stress increasing. Furthermore, both unloading confining pressure tests and uniaxial compression tests have similar deformation stages of dilatancy curves. The similar deformation stage includes the volume compressed segment, the stable dilatancy segment and the accelerating dilatancy segment. Those two types of tests also have the similar compressed limit. However, due to the different loading modes, the ratio of stable dilatancy in uniaxial tests is larger than that in unloading confining pressure experiments. The dilatancy rate and the value of dilatancy are smaller in unloading confining pressure tests. The unloading confining pressure tests have greater dilatancy under the same deviatoric stress. Higher temperature can promote the dilatancy of salt rock. That means the increasing of temperature can make the accelerating dilatancy point appear forward, the initial stable dilatancy segment shorter, the accelerating dilatancy segment longer, the dilatancy rate and the value of dilatancy higher.

Key words: salt rock; unloading confining pressure; dilatancy damage; temperature effect

1 引 言

随着国家对能源储备的日趋重视, 近年来对油气储备场所的研究也越来越多。由于盐岩具有致密性、低渗透性、自恢复性等诸多特性, 其溶腔作为理想的储备场所已被世界公认, 但盐岩溶腔的建造过程是一个漫长而复杂的工程。溶腔的建造过程是通过钻孔对原岩进行溶解, 溶解界面逐步向外围空

间方向扩展, 并最终形成“梨形”的容纳空间。这个过程将原本处于三轴应力条件下的围岩逐步卸荷, 横向主应力逐渐减小, 偏应力逐步增大, 使溶腔壁面岩体经历了长期的围压卸荷作用。同时受到地温、卤水浸泡、偏应力等因素的影响, 导致盐岩的力学性质发生一些不可逆的变化。盐岩的力学特性对建腔期腔体围岩的稳定性有着重要的意义。由于扩容一定程度上能够比较直接地反映岩石内部损伤情

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 课题编号(No. 2009CB724606)。

第一作者简介: 姜德义, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土力学、采矿工程、安全工程方面的研究。E-mail: deyij@cqu.edu.cn

况, 本文选取扩容特征进行研究。

近年来, 由于工程建设的需要, 国内外很多学者对岩石的扩容开展了一些研究。陈顼等^[1]通过三轴试验证明了岩石强度与体积膨胀与应力路径有关。陈宗基等^[2]认为: 在力的作用下, 岩石会产生扩容, 同时扩容会加剧物化膨胀作用, 使其扩容后的自由膨胀率远远大于静态条件下的膨胀率。朱建明等^[3]通过峰后循环加、卸载试验, 表明破碎岩在峰后区将产生显著的剪胀效应。韩立军^[4]应用能量耗散原理对岩石全应力-应变过程进行分析, 对环向约束条件下岩石破坏后的结构效应进行了深入研究。吴玉山等^[5]研究了卸围压的应力路径对岩石强度和变性特征的影响, 表明应力路径对强度影响不明显, 但对变形特征的影响显著。许东俊等^[6]在真三轴应力状态下研究了不同应力路径的岩石变形破坏试验, 结果表明岩石的轻度、延性、脆性、体积变化和破坏前兆都与应力路径有关。李天斌等^[7]对玄武岩在卸荷状态下的变形破坏特性进行了试验研究, 研究表明卸荷条件下随着破坏时围压的增大, 试样破坏形式逐渐由张性破坏过渡到张剪性破坏, 卸荷方向上的扩容也更强烈。王学滨等^[8]采用梯度塑性理论, 对岩样剪应变局部化引起的扩容进行了理论分析, 得到了弹性阶段及应变软化阶段的轴向应力-体积应变曲线的理论关系。陈剑文等^[9]针对盐岩储气库密闭性分析开展试验研究和理论分析, 提出采用压缩-扩容边界分析盐岩储气库的密闭性。高春玉等^[10]通过大理岩的卸围压同时加、卸轴压的三轴试验模拟岩体开挖状态, 并分析岩石变形特征及参数劣化特征。Takahashi^[11]、Haimson^[12]、Chang^[13]等的研究均发现, 随着中间应力的增大, 扩容起点及扩容体积应变均降低。虽然很多学者已进行了卓有成效的研究工作, 但关于岩石材料的卸荷试验研究, 大部分学者采用常规三轴试验方式研究应力路径对几种岩石的强度、变形和破坏等力学特性的影响, 其结果具有一定的局限性, 且针对建腔期, 随腔体形状扩展围岩受横向应力卸荷作用的受载形式方面的研究还需具体研究。

本文基于盐穴储库建造过程中, 即随腔体形状扩大, 围岩所受横向压力逐渐减小, 而竖向压力保持不变。针对这一工程实际, 笔者设计了三轴卸围压分析盐岩损伤扩容的试验, 即先将盐岩进行三向加载, 当围压接近设定的三向应力状态时, 保持轴压不变, 缓慢减小围压, 以此来模拟盐岩腔体围岩在造腔过程中围压不断降低、偏应力逐渐升高的应力状态。研究腔体围岩在造腔过程中的扩容特性和

损伤状况。

2 试验条件及方法

2.1 试验条件

试样采自巴基斯坦喜马拉雅山区埋深较深的天然盐岩, 呈白色或浅红色, 其中 NaCl 纯度较高, 基本在 96% 以上, 另含有不能溶解的杂质成分。试样加工成标准的 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 盐岩圆柱试样。

试验在煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室进行, 加载试验机采用西安朗杰公司生产的三轴高温盐岩试验机。温控设备功率为 800 W、硅胶加热带尺寸为 $200 \text{ mm} \times 860 \text{ mm}$ 。加载试验机及温控设备布置方式如图 1 所示。



图 1 试验设备和试件样品图

Fig.1 Test instrument and manufactured salt samples

2.2 试验方案设计

为了保证盐岩试样岩性的稳定可靠, 降低其离散性, 选择颜色尽量一致、含杂质成分相近, 裂纹长度、数量和大小差异较小的盐岩试样进行加工。加工完成的试样的端面平整度尽量保证在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内, 以减小端部效应。加工完成的试件如图 1 所示。

腔体周边围岩处于三轴应力状态。建腔过程中, 围岩的垂深不变, 其竖向地应力不变, 围压逐渐减小。因此, 试验方案为:

(1) 试件安装, 并加温, 加至目标温度, 保温 30 min。单轴试验选取 30°C 作为温度条件, 卸荷试验选取 15°C 、 30°C 、 45°C 。

(2) 对不同条件的试件进行加载。加载方案为: 单轴加载方案采用常规的 8~10 min 试验, 加载速率为 0.2 kN/s , 加载至破坏。

卸荷试验加载方案分为如下两步: ①加载段, 使盐岩处于初始应力条件, 并稳压 1 min。以加载速率为 20 kPa/s 的速率, 加围压至预定值 15 MPa ; 再

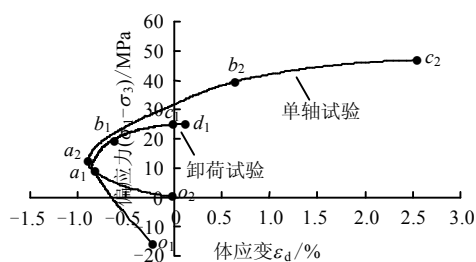
以加载速率为 0.05 kN/s, 加轴压至 25 MPa, 保证轴压和围压加载时间基本相同。②卸荷段, 近似模拟造腔过程中轴压不变, 围压减小的应力变化。保持轴压 25 MPa 不变, 以较小的卸荷速率 5 kPa/s, 逐步降低围压至目标值 0。由于实际建腔期非常长, 卸荷速率采用了相对较小的速率。

3 试验结果分析

3.1 卸围压对盐岩扩容特性的影响

岩石的力学特征与其受力历史和路径有关^[14]。试验将卸围压条件下的盐岩扩容特征与常规试验(以单轴加载为例)进行对比, 以研究卸荷作用对扩容造成的影响。

将同样温度(30 ℃)下的单轴加载试验与卸荷试验进行对比。如图 2 所示, oa 段(即 o_1a_1 和 o_2a_2)偏应力增加, 体积呈现压缩的趋势。在 a 点时, 由于偏应力增大, 体积由压缩转变为膨胀, 直至 c 点试验结束(卸荷完成或者试件破坏)随着偏应力的增加, 体积持续膨胀。两试验都是偏应力增加的过程, 在阶段划分上它们的特征基本相同, 如下所述。



注: o_1 点横坐标即围压加载产生的体积压缩量, 纵坐标即开始加轴压时, 围压为 15 MPa。

图 2 偏应力-体积应变曲线
Fig.2 Deviatoric stress-volumetric strain curves of specimens

oa 为体积压缩段: 原岩内部都存在不同程度的孔隙、裂隙。在加载初期, 都会由于裂隙压密, 出现体积上的压缩变形。 ab 为初始稳定扩容阶段: 压缩至极限后, 应力继续增大使岩石试件产生损伤, 岩性由弹性向塑性变化。此时晶粒间相互有规律的错动挤压, 导致粒间距离增大, 外观上试件颜色和透光性发生变化, 出现体积扩容现象。 bc 为加速扩容段: 偏应力增大至能够破坏晶粒间的相互作用时, 使规律的移动变成时间上突发的、空间上杂乱的错动, 由此形成裂隙, 小裂隙贯通出现较大裂隙, 此时体应变增长较快。

但由于加载方式不同, 扩容阶段发生了不同程度

的变化。本文从以下两个角度分析不同点。

(1) 观察图 2, 从偏应力-体应变关系角度进行对比, 可分为 4 方面。

oa 段形态对比: 单轴的压缩段呈现出下凹形, 是由内部裂隙压密及弹性变形所致。卸荷试验曲线呈平直状。卸荷试验开始时围压为 15 MPa, 裂纹已经基本闭合; 轴向方向上的压缩直接呈现出线弹性变形, 此时应力加载采用的是力控制方式(力随时间线性增加)而径向变形基本不变。所以体应变呈直线状。

ab 、 bc 段对比: 卸荷试验扩容的幅度(阶段内极小值和极大值的差值)较小。单轴试验扩容幅度约为 3.5%, 卸荷试验的扩容幅度近似为 0.9%。由于单轴试验是一种破坏试验, 应力峰值达 46 MPa, 试件处于高应力时, 扩容和损伤演化的速度较快, 幅度较大; 卸荷试验偏应力较小, 试验最大偏应力为 25 MPa。观察 ab 段扩容在整个扩容中占的比例, 单轴试验 ab 段扩容所占比例相对较大, 原因是单轴试验的稳定扩容由裂隙扩张造成, 加速扩容是试件裂隙逐渐贯通濒临破坏造成的; 而卸荷试验这两段的产生机制不同, b 点时开始加速扩容是由于裂隙张开重新发育、新裂隙产生引起的。

c 点之后的对比: 单轴试验中试件由小裂纹发展成大裂纹, 最终汇集贯通成贯通裂纹^[15], 发生 X 型剪切破坏, 形成上、下两个锥形体。由于卸荷试验最终轴压保持为 15 MPa、围压为 0 的静载状态, 卸荷试验中此时岩石表现为匀速扩容状态。

相同偏应力下体应变的对比: a 点之前压缩段, 卸荷试验的体积应变比单轴试验要大得多。此阶段是空间的压密, 在三维应力下, 就会产生更大的体应变。 a 点之后扩容损伤段, 卸荷试验的体应变却又相对较小, 其主要原因是, 在围压作用下盐岩表现出典型的延性特征, 轴向变形和径向变形比单轴时更大, 但体积应变增加不显著, 就是围压的“保护”作用。

(2) 如图 3 所示, 从体应变-轴向应变关系角度出发, 对比两组试验得出如下结论:

a 点压缩扩容过渡的形态不同。单轴的过渡过程比较“平缓”, 甚至出现了短暂的水平直线段; 卸荷试验表现的较为“突然”, 从压缩到扩容出现了迅速的转换。它们出现扩容的机制不同。单轴试验中, 应力逐渐增大, 盐岩经过压密后, 晶粒间出现滑移, 岩石由弹性演变为塑性, 出现扩容。卸荷试验中盐岩的应力条件发生了突然的改变。未卸荷时, 盐岩

初始应力较大,处于塑性状态,但由于空间上和应力上的控制,晶粒的移动未超出破坏范围,相互之间产生的能量以势能的形式存储,一旦开始卸荷,稳定状态遭到破坏,能量逐渐释放,晶粒的相互移动就超出限制,产生损伤裂纹,体积变形上表现为立即出现扩容。可见相对于加载来说,卸围压引起的近似轴向加载方式对扩容是“有利”的。

ab 稳定区间的长度不同。出现扩容后 (*a* 点之后),体应变随轴向变形呈线性变化的长度,单轴试验的线性段由轴向应变的 1.14% 持续到 6.02%,卸荷试验是 0.27% 至 1.67%。

压缩下限基本相同。观察 a_1 和 a_2 , 可以发现:对于差异较小的试件,它们的压缩下限是基本相同的(体积应变 0.95% 左右,观察图 3 可发现在应力为 10.5 MPa 左右时压缩至极限),这是由于无论单轴还是三轴,被压缩的体积量主要是岩石内部孔隙的体积,如果岩石性质相近,内部裂隙的差异较小,它们在应力作用下完全闭合后,体积的压缩比是相近的。

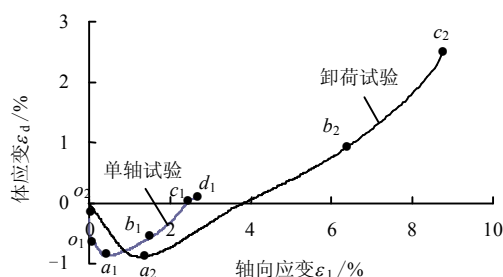


图 3 体应变-轴向应变关系

Fig.3 Volumetric strain-axial strain curves of specimens

卸荷试验的关键因素是其不断变化的围压。卸荷应力控制方式更容易出现扩容,扩容和偏应力有关,更与围压的大小密切相关;同样大小的偏应力下,围压对扩容有一定的抑制作用。

3.2 温度对卸荷过程的盐岩扩容特性影响

为使卸荷试验分析简洁,且压缩段相似度较大,先对压缩段进行说明。第 2.2 节试验步骤 (2) -① 加围压的过程相当于对岩石试件进行了一次径向预压。由图 4 可以看出:在围压增大至 15 MPa 的过程中,盐岩试件在径向上经历了原始裂隙闭合压密阶段和弹性变形阶段;接下来,轴压增大至 25 MPa 的过程中,轴向应力-应变基本呈线性变化,可以认为处于弹性阶段。

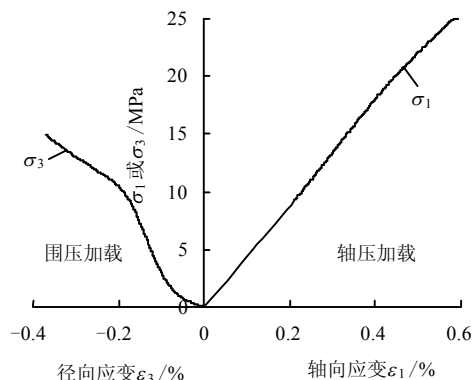
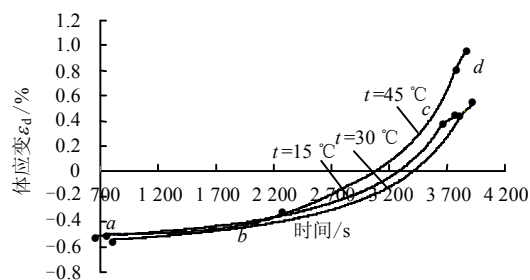


图 4 压缩段应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of specimens in compression period

本试验通过 3 种温度水平的卸围压试验,分析温度对卸荷状态下的盐岩扩容影响。如图 5 所示,卸荷扩容阶段划分和划分依据如下:由于应力状态改变, *oa* 加载段完成后,试件即开始扩容。卸围压开始后,岩石内初始压密的孔隙裂隙,在径向方向上随着围压逐渐减小重新张开,形成 *ab* 初始稳定扩容段。当原始的孔隙或是裂隙重新张开后,其尖部区域就会形成应力集中,随着偏应力的增大,裂隙面上的正应力减小,裂隙间的扩展、变形受到摩擦力的抑制作用也随之减小^[16],局部应力达到破坏极限时,越来越多的裂隙在原来的基础上发展,或产生新生裂隙,为 *bc* 加速扩容段。卸荷结束后,由于偏应力不再增加,卸荷阶段产生的裂纹稳定发展,基本不再产生新的裂纹,内部晶粒之间重新有规律的相互错动、滑移,即 *cd* 后匀速扩容段。



注: 每条曲线 4 个点由左至右依次为 *a*、*b*、*c*、*d*

图 5 不同温度下卸荷段体应变-时间阶段关系

Fig.5 Volumetric strain-time curves of specimens in unloading period of confining pressure under different temperatures

(1) 温度对扩容阶段的影响

岩石的破坏极限是决定岩石加速扩容点的最主要的因素。一般情况下,温度升高会使盐岩的屈服

极限降低^[17], 因此, 加速扩容点 b 会提前出现。经过试验验证: 15 °C 曲线稳定扩容段的长度为 (701, 2 238) (表示从 701 到 2 238 的数学区间), 30 °C 曲线稳定扩容段的长度为 (798, 1 988), 45 °C 曲线稳定扩容段的长度为 (760, 1 722)。稳定扩容段缩短, 加速扩容点明显提前。图 6 标注出了加速扩容点 b 的应力-应变值, 15 °C (-0.388%, 17.255), 30 °C (-0.459%, 15.175), 45 °C (-0.471%, 14.2), 同样可以看出, 温度升高, 出现加速的应力限制呈降低趋势。

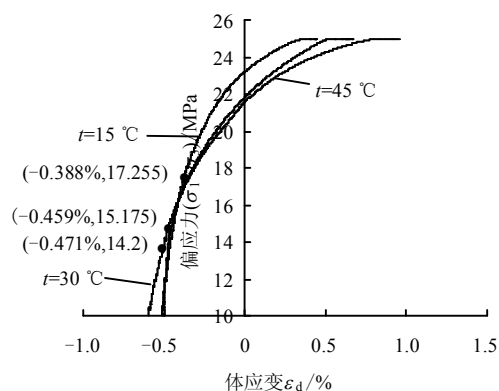


图 6 卸荷段偏应力-体应变关系
Fig.6 Deviatoric stress-volumetric strain curves of specimens in unloading period of confining pressure

(2) 温度对扩容速度和幅度的影响

如图 6 所示, 观察曲线趋势可以看出: 前期缓慢稳定扩容段温度效应不显著。然而加速扩容段的平均扩容速率和后匀速扩容段的扩容速率都是增大的。主要原因是在温度和较高围压共同作用下, 盐岩表现出一种塑性流动行为。卸压中后期, 由于低围压的状态, 温度升高盐岩的剪切屈服强度降低, 盐岩内部的位错阻力下降^[17], 塑性增强, 同样应力下, 盐岩内部晶粒更容易产生位错, 生成裂隙。因此, 出现后期扩容速度增大的现象。由于初始扩容段在整个卸围压过程中时间比例占的相对较小, 同时, 其扩容速率也相对小得多, ε_{ab} (ab 初始稳定扩容段的体积应变) 在卸荷体应变 ε_d 中占的比例很小。加速段扩容速率越快, 其扩容幅度也就越大。试验验证: 15 °C (-0.511%, 0.356%)、30 °C (-0.539%, 0.446%)、45 °C (-0.501%, 0.797%) 扩容幅度随温度表现出增大趋势。

(3) 温度对位移与扩容线性关系的影响

轴向变形和体应变关系如图 7 所示, 在卸荷过程中, 轴向变形和体应变、径向变形和体应变之间呈近似线性关系。经过拟合发现, 15 °C 时斜率为

0.009 5、30 °C 时斜率为 0.0074、45 °C 时斜率为 0.007 7。线性斜率和温度之间的变化没有规律, 温度对线性斜率的影响不明显。

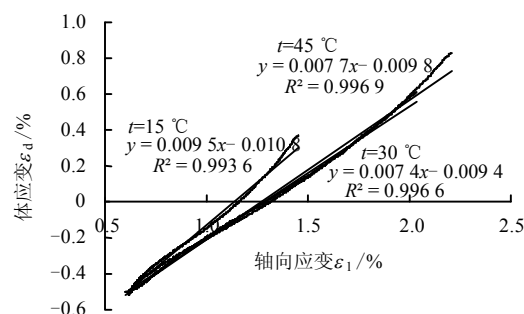


图 7 卸荷段体应变-轴向应变关系
Fig.7 Volumetric strain-axial strain curves of specimens in unloading period of confining pressure

4 结 论

通过保持轴压、卸载围压的试验, 模拟盐穴造腔的过程, 研究盐岩的扩容行为。并根据温度的不同, 分析温度对盐岩的卸荷扩容影响。结论主要有:

(1) 单轴试验和卸荷试验的盐岩扩容阶段基本相同, 都存在压缩段、初始稳定扩容段和加速扩容段。

(2) 与单轴试验相比, 卸荷试验的扩容速率更慢, 扩容幅度更小。

(3) 温度对扩容存在促进作用, 温度升高会促使加速扩容点提前出现, 初始稳定扩容缩短, 加速扩容段加长, 扩容速率增加, 扩容幅度变大等。

参 考 文 献

- [1] 陈颢, 姚孝新, 耿乃光. 应力途径、岩石的强度和体积膨胀[J]. 中国科学, 1979, (11): 1093—1100.
- [2] 陈宗基, 闻宣梅. 膨胀岩与隧洞稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1): 1—10.
CHEN Zong-ji, WEN Xuan-mei. Swelling rocks and stability of tunnels [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1983, 2(1): 1—10.
- [3] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪膨胀形特征研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 19—22.
ZHU Jian-ming, XU Bing-ye, CEN Zhang-zhi. Study of the deformation mechanisms of sliding dilation of post-failure rocks[J]. **Mechanics and Engineering**, 2001, 23(5): 19—22.
- [4] 韩立军. 岩石破坏后的结构效应及锚注加固特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.

- [5] 吴玉山, 李纪鼎. 大理岩卸载力学特性研究[J]. 岩土力学, 1984, 5(1): 30—36.
WU Yu-shan, LI Ji-ding. Unloading properties of marble[J]. **Rock and soil Mechanics**, 1984, 5(1): 30—36.
- [6] 许东俊, 耿乃光. 岩体变形和破坏的各种应力途径[J]. 岩土力学, 1986, 7(2): 17—25.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The various stress paths causing deformation and failure in rocks[J]. **Rock and soil Mechanics**, 1986, 7(2): 17—25.
- [7] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321—327.
LI Tian-bin, WANG Lan-sheng. An experimental study of the deformation and failure features of a basalt under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(4): 321—327.
- [8] 王学滨, 潘一山. 基于梯度塑性理论的岩样单轴压缩扩容分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 721—724.
WANG Xue-bing, PAN Yi-shan. Dilatation analysis of rock specimen under uniaxial compression based on gradient-dependent plasticity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 721—724.
- [9] 陈剑文, 杨春和, 郭印同. 基于盐岩压缩-扩容边界理论的盐岩储气库密闭性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3302—3308.
CHEN Jian-wen, YANG Chun-he, GUO Yin-tong. Study of sealability of cavern for natural gas storage in deep salt formation based on compaction-dilatancy boundary of salt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp. 2): 3302—3308.
- [10] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456—460.
GAO Chun-yu, XU Jin, HE Peng, et al. Study of mechanical properties of marble under loading grand unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456—460.
- [11] TAKAHASHI M, KOIDE H. Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000 m [C]// ISRM International Symposium. Rotterdam: Balkema, 1989: 19—26.
- [12] HAIMSON B, CHANG C. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(1—2): 285—296.
- [13] CHANG C, HAIMSON B. True triaxial strength and deformability of the German continental deep drilling program (KTB) deep hole amphibolite[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2000, 105(18): 999—1113.
- [14] 张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2584—2588.
ZHANG Ru, XIE He-ping, LIU Jian-feng, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2584—2588.
- [15] 徐寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [16] 卢兴利, 刘泉声, 张伟, 等. 高应力软岩非弹性体积增加试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 903—906.
LU Xing-li, LIU Quan-sheng, ZHANG Wei, et al. Test study of inelastic volume increase of soft rock in high stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(7): 903—906.
- [17] 陈剑文. 盐岩的温度效应及细观机理研究[D]. 武汉: 武汉岩土力学研究所, 2008.