

doi : 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.10.025

循环围压下的盐岩扩容特征

李林¹, 陈军朝¹, 吴教锟², 范金洋¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室, 重庆 400044; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400044)

摘 要: 盐穴储库运行过程中围岩应力呈周期性变化, 为揭示应力波动对其稳定性和密闭性的影响, 针对盐岩试样开展了动态围压循环试验, 分析了不同轴向恒定应力与循环上限围压对盐岩试样扩容及损伤特征的影响规律。结果表明: 体应变曲线分为减速扩容段和稳定扩容段, 试样达到稳定扩容点所用的循环数并无显著差异。上限围压越小或轴向恒定应力越大, 盐岩试样扩容幅度越大, 其疲劳寿命就越短, 相应匀速扩容段在整个扩容过程中所占比例就越小, 即加速扩容点会前移。随着试验循环数的增加, 盐岩等容变形比的总体趋势不断减小, 韧性特征减弱, 扩容能力增强。上限围压越小或轴向恒定应力越大, 都会使盐岩的韧性能力损失得更快, 盐岩的扩容能力增强得更显著。

关键词: 盐岩; 疲劳特性; 体应变; 扩容; 围压

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)10-1485-06

Expansion Characteristics of Salt Rock Under Cyclic Confining Pressure

LI Lin¹, CHEN Jun-chao¹, WU Jiao-kun², FAN Jin-yang¹

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing 400044, China. Corresponding author: LI Lin, E-mail: daney0803@163.com)

Abstract: The rock stress changes periodically during the operation of the salt cavern storage. The dynamic rock cyclic tests on the surrounding rock were carried out, and the influence rules of expansion and damage characteristics of salt rock samples under different axial constant stress and confining pressure cycling cap were analyzed to reveal the influence of stress fluctuations on the stability and tightness of rock. The results showed that volumetric strain curves present a decelerating expansion stage and a steady expansion stage, but there is no significant difference in the cycle's number of times needed for reaching the stable expansion point of the sample. The smaller the confining pressure cap is or the bigger the constant axial load is, the greater the expansion margin is and the shorter the fatigue life is; the proportion of steady expansion out of uniform expansion is smaller, namely the accelerated expansion points move forward. With the increase of test cycles, the isovolumetric strain ratio becomes smaller and the toughness decreases while the expansion capability increases. The smaller the confining pressure cap is or the bigger the constant axial load is, the faster the loss of toughness capacity is and the stronger the expansion capacity of salt rock is.

Key words: salt rock; fatigue characteristics; volumetric strain; expansion; confining pressure

盐穴储气库注采气过程引起的胀缩应力变化使得腔壁一定范围内围岩应力呈现周期性变化, 腔壁围岩的应力状态受到赋存埋深、运行气体压力等诸多因素的影响。目前我国储库的运行压力

一般为 5~18 MPa, 潜江地区储库深达 2 km, 运行气压达 20 MPa 以上。大埋深和气体压力的综合作用导致储库有效体积减小、围岩变形、地表不同程度沉陷, 给储库的安全运行带来了隐患。

收稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51574048, 51304256); 重庆市研究生科研创新项目(CYB16029)。

作者简介: 李林(1979-)男, 湖南长沙人, 重庆大学副教授。

近年来,国内外很多学者对单轴循环荷载下的岩石疲劳特性进行了较为广泛的研究,并对围压影响因素下岩石疲劳特性进行了一定的研究.杨春和等^[1]研究了盐岩在单轴循环加卸载条件下的变形特性,郭印同等^[2]深入研究了在此条件下盐岩的疲劳强度及损伤特性,而任松等^[3]在此基础上探讨了温度对盐岩疲劳特性的影响.高红波等^[4]根据工程实际条件模拟了盐岩及含夹层盐岩应力水平不断提高的反复加卸载试验.姜德义等^[5]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.文献[6-8]的研究发现,随着中间应力的增大,扩容起点及扩容体积应变均降低.一些国内外学者^[9-12]也相继探讨了循环荷载下其他岩石的疲劳强度及变形特征,并建立了相应的损伤模型.

上述研究成果对岩石疲劳特性和围压影响下岩石力学特性研究具有重要的推进作用,但是这些试验一方面难以准确有效地反映储气库围岩的运行状态;另一方面针对盐岩在高应力、围压波动等条件下的研究涉及较少.基于此种应力设定,本文设计循环围压试验,研究盐岩在轴向恒定应力和循环围压上限作用下的疲劳特性及扩容特征,以期研究盐岩储气库的稳定性和安全性提供一定的参考.

1 试样与试验情况

在自行设计的高温三轴试验机上完成本次试验,试验所用盐岩试件均为取自巴基斯坦喜马拉雅山区天然盐岩.选取一些含杂质成分基本相同,颜色光亮且没有裂纹的岩盐试件,将试件加工成直径为 50 mm,高径比为 2:1 的标准圆柱形试样,经打磨使试件端面平整度控制在 ± 0.02 mm 以内.采用保持轴向应力恒定,围压不断加卸载的方案.由于试验条件和时间问题,每组试验完成 30 个加卸载周期即结束.试验一:轴向应力取 38.9 MPa,上限围压分别取 10, 15, 20 (X_3, X_2, X_1) MPa;试验二:上限围压取 20 MPa,轴向应力分别取 38.9, 36.8, 34.6 (X_1, X_4, X_5) MPa(单轴抗压强度的 90%, 85%, 80%).不同因素水平下分别做三组重复试验,由于试验结果重复性较好,选取任意一组作为试验结果进行分析.

2 试验结果与讨论

2.1 盐岩的疲劳变形特性

1) 不同上限围压:由于盐岩是软岩,加卸载围压试验中,岩样会发生蠕变效应.但本试验持续时间较短,蠕变变形量不大,故忽略蠕变对本试验的影响.

在高应力、围压波动的条件下,径向应变为试验的主要响应,故将分析对象设定为每个循环的峰值荷载对应的径向应变,如图 1 所示.可以发现,图 1 中曲线分界线前后呈现出明显的阶段特征,将线前段称为减速变形段,后段称为匀速变形段,该匀速段的线性斜率为径向应变速率,经模拟计算得出 X_1, X_2, X_3 的阶段斜率分别为 3.18×10^{-4} , 3.78×10^{-4} , 5.03×10^{-4} .不同上限围压时,径向应变曲线的发展情况差别较大,围压越小,径向变形量的发展越迅速,即径向应变速率越大,每周次塑性变形积累得越快,导致盐岩疲劳寿命越短.主要原因是:试验中围压的作用使盐岩内部颗粒间发生滑移错动的阻力增大,围压的存在增大了颗粒间的斥力势能,在相同能量输入(即轴向应力相同)的条件下,围压越大造成的位移就越小.

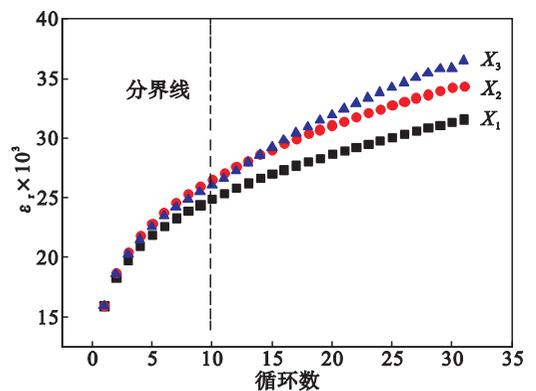


图 1 不同上限围压下的径向应变发展曲线
Fig. 1 Radial strain developing curves under different confining pressure

2) 不同轴向恒定应力:由图 2 可知,虽然轴向应力引起的主要响应并非径向变形,但是径向变形仍然表现出了由此引发的差异.不同条件下经模拟计算得出 X_1, X_4, X_5 匀速变形阶段斜率分别为 3.18×10^{-4} , 2.79×10^{-4} , 2.5×10^{-4} .轴向应力对盐岩径向变形影响主要表现在:随着轴向应力的增大,变形的发展呈现加速的趋势,在减速变形阶段和匀速变形阶段都呈现出明显的塑性变形速率增大的特点,因而盐岩疲劳寿命在减小.其主

要原因是 轴向应力提供了盐岩颗粒滑移运动的主要动力,动力越充足,滑移错动的能力越强,在斥力势相同(即围压)的情况下,轴向应力越大,提供给盐岩内部颗粒的能量越大,其运动的范围也就越大。

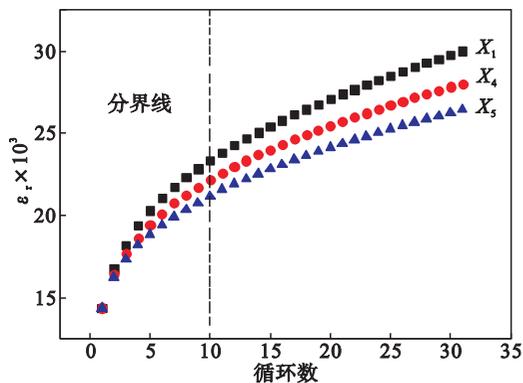


图2 不同轴向恒定应力下的径向应变发展曲线
Fig. 2 Radial strain developing curves under different constant axial loads

一些学者的研究表明,盐岩的疲劳特性曲线同样受控于其对应条件下的全应力应变曲线^[13]。由图 1 和图 2 可知,储气库的运行气压过低(围压的作用)或是储气库建造深度过大(轴向应力的作用)将会导致储气库围岩的塑性损伤增大,疲劳寿命降低,不利于储气库的安全稳定运营。

2.2 盐岩的疲劳扩容特征

扩容一定程度上能够比较直接地反映岩石内部损伤情况,残余应变为每周次体应变的净增加值,是塑性变形的一种表现。通过残余体积应变可以定量分析盐岩在循环围压下的疲劳特性,从而反映试件的扩容特征。取循环过程中每周次循环内峰值应力对应的体应变,如图 3 所示。

加卸载试验开始前,试样先被加载至预定应力状态,设定此时的体积应变为扩容起点(即体应变零点)。加卸载开始时,盐岩试样即出现扩容现象,每个循环开始积累残余变形。弹性范围内,应力作用下盐岩由于球应力张量的作用,基体体积缩小。但由于塑性变形或内部裂隙孔隙发育引发了体积应变的扩容现象,在循环荷载作用下盐岩的扩容行为可以理解盐岩孔隙裂隙特征的行为。由图 3 可知,试样的体积膨胀呈现出与径向变形发展类似的阶段性特征。初期,原生裂纹孔隙快速闭合,新生裂纹孔隙缓慢发育,称为减速扩容段。当循环数达到一定量时(称为稳定扩容点),盐岩内部孔隙裂隙倾向于稳定发展,试样体积稳步膨胀,其残余体应变近似为恒定值,称为匀速扩容段。阶段性特征存在的规律有以下特点:

1) 无论上限围压和轴向恒定应力为多少(试验范围内),体积残余应变的阶段性分界点基本未发生变化。整体而言扩容幅度(即每周次残余体积应变)都是随着循环数的增加而逐渐减小,但减速阶段和匀速阶段分界点的循环数并无显著差异。

2) 上限围压越小或轴向恒定应力越大,其扩容幅度越大。表明围压对岩石的孔隙裂隙发育具有显著的抑制作用^[14],而轴向应力对岩石的孔隙裂隙发育具有促进作用。即盐岩所受的主应力中,最大主应力为裂纹发展的主要驱动力,最小主应力为裂纹发展的阻止力之一。

3) 由 2.1 内容可知,上限围压和轴向应力对盐岩疲劳寿命有较大的影响。在盐岩发生变形时发现扩容现象,那么可以认为扩容现象和盐岩的疲劳寿命也存在一定联系。研究发现,匀速扩容段在整体扩容中所占的比例增大,将导致加速扩容点前移,那么盐岩的疲劳寿命就越短。

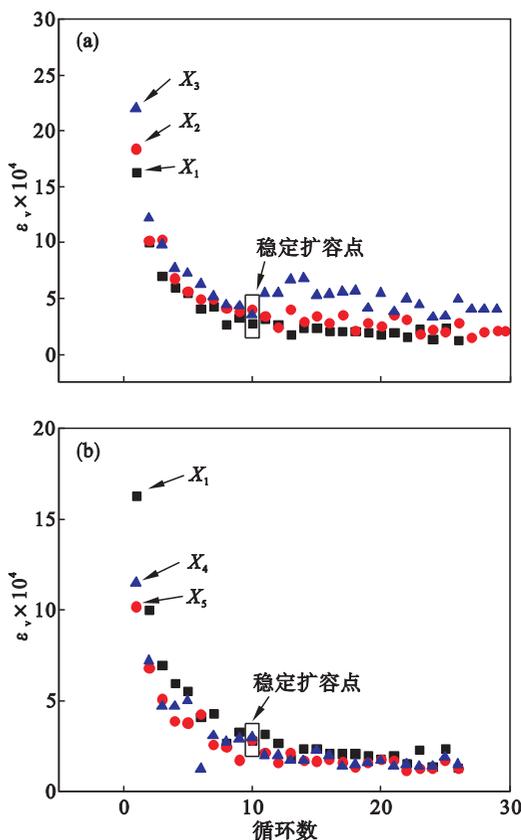


图3 盐岩的残余体应变曲线
Fig. 3 Curves of residual volumetric strain for salt rock
(a)—不同循环上限围压;(b)—不同轴向恒定应力。

2.3 盐岩的等容变形特征

材料受力的同时发生应变响应,即发生扩容。假设体应变与损伤直接相关,那么若材料发生较大变形而伴随有较小的扩容时,说明该材料具有

较好的抵抗损伤的能力. 盐岩的等容变形是指盐岩在发生相同体积应变的情况下,产生形变的大小,它是韧性特征的表现. 因径向应变为本试验的主要应变响应,定义径向残余应变与体积残余应变的比值为等容变形比. 等容变形比越大,材料的韧性越大,对裂纹在材料中扩展的抵抗就越强,也说明材料在弹塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力越强,材料发生断裂的可能性就越小,岩样的扩容幅度就相对越小,其疲劳寿命就越长久. 等容变形比与循环数的关系如图 4 所示.

为更清晰地观察等容变形率的发展趋势,将等容变形比与循环数进行线性拟合,得到线性趋势线. 线性斜率即为等容变形率, $X_1 \sim X_5$ 对应的等容变形率分别为 $-0.003, -0.00948, -0.139, -0.00865, -0.00901$.

观察图 4 可知,循环围压下盐岩的等容变形特征展现出的规律: ①任一试验,随着试验进程的推进,盐岩等容变形比的总体趋势在不断减小. 表明盐岩由于加卸载循环的影响,盐岩的韧性特征在逐渐走弱,抵抗损伤发育的能力在逐渐降低; ②随着上限围压的减小或是轴向恒定应力的增加,会使盐岩的韧性能力损失得相对更快,扩容能力增强,疲劳寿命更短. 上述规律表明: 上限围压越大或轴向恒定应力越小,岩样的径向应变急剧增大并不会引起体应变的急剧膨胀,单位体应变可以积累更多的径向应变,材料抵抗断裂的能力在增强.

3 基于扩容的损伤演化分析

损伤变量是表征材料或结构劣化程度的量度. 对于同一种材料,若忽略其初始损伤,在不同受力状态下损伤的门槛值不同. 损伤变量会不同. 但是损伤应变释放率是一个热力学量,从能量的观点出发,假设损伤变化与体积变化直接相关,即 $D = D(V)$,考虑到热力学本征耗散率正定不等式及 Von Mises 准则,并在假设损伤只与应变张量第一不变量有关情况下,通过化简得^[15]

$$D = D - D_0 = \ln \left(\frac{V - (1 - f_0)m}{V_0 - (1 - f_0)m} \right). \quad (1)$$

式中 f_0 为初始试样的空隙比; m 为试样的质量; V_0 为初始状态的体积.

令 $\frac{(1 - f_0)}{V_0} = a$, 则可以化简为

$$D = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{1 - a} \right). \quad (2)$$

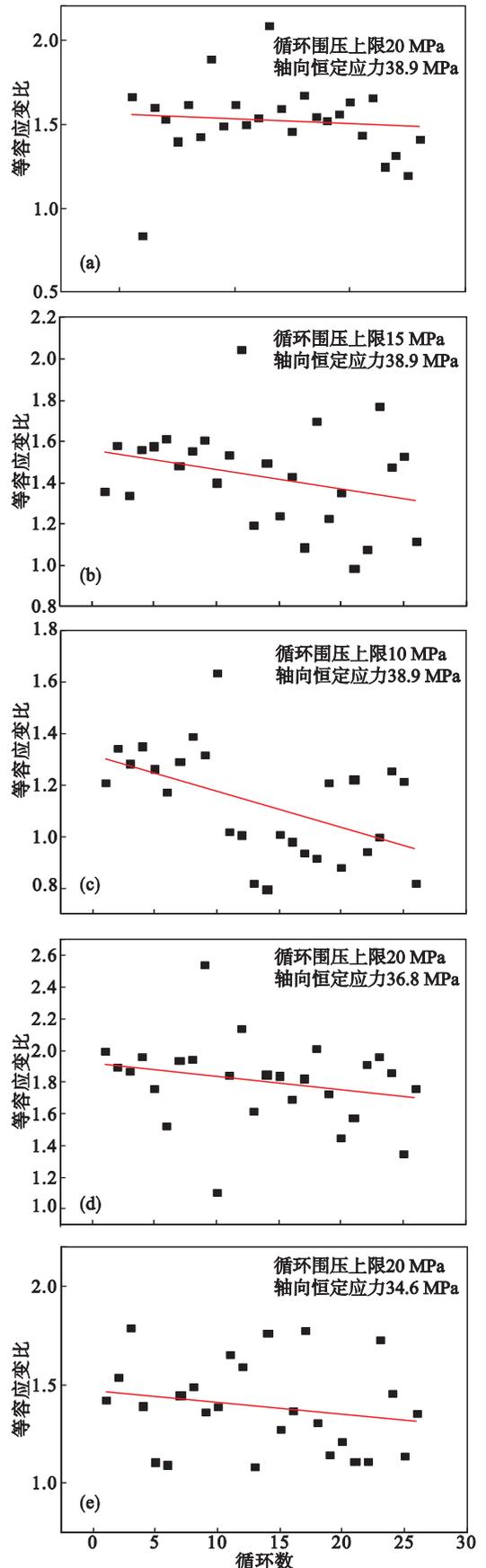


图 4 不同条件下等容应变比与循环数的关系
Fig. 4 Relationship between isovolumetric strain ratio and cycle number under different conditions
(a) X_1 ; (b) X_2 ; (c) X_3 ; (d) X_4 ; (e) X_5 .

式中 ε_v 为体应变. 由于受到体积力的作用, 材料基体会呈现出一定程度的压缩, 这个压缩量和孔隙裂隙体积的增加量共同构成体积应变. 由于真正影响材料损伤的是材料的失效面积, 即扩容孔隙裂隙的增加量. 体积应变添加修正系数 ρ , ρ 由材料的本身性质和当时的受力状态确定, 则式 (2) 可改写为

$$D = \ln \left(1 + \frac{\rho \varepsilon_v}{1-a} \right). \quad (3)$$

根据式 (1) ~ 式 (3) 取每次循环体应变峰值作为参考, 对本次盐岩试件在循环围压下的损伤变量进行计算. 由于循环开始前轴压和围压的目标值不同, 故循环初始损伤会有所不同. 由图 5 可知, 损伤曲线与相应条件下的径向应变曲线极为相似. 说明基于损伤与体应变直接相关的情况下, 围压循环下盐岩的损伤发展模式与径向应变发展模式较为接近.

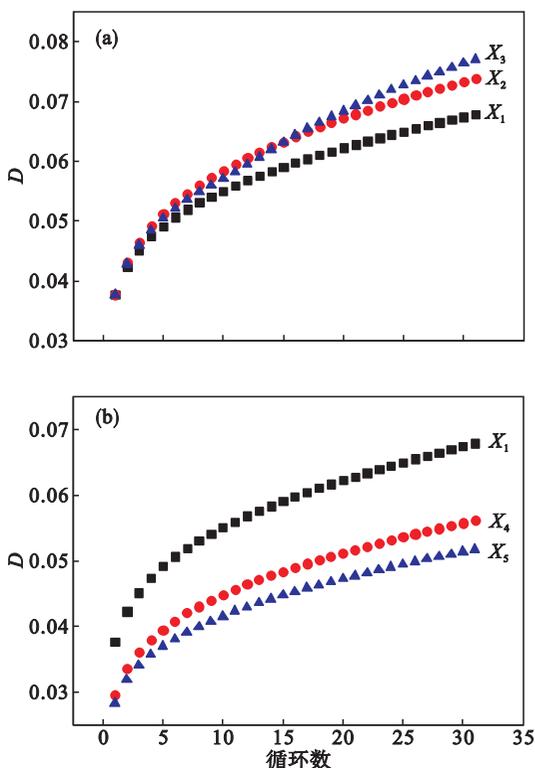


图 5 不同条件下损伤变量与循环数关系

Fig. 5 Relationship between damage variable and cycle number under different conditions

(a)—不同循环上限围压; (b)—不同轴向恒定荷载.

4 结 论

1) 在循环围压试验中, 上限围压越小或者轴向恒定应力越大, 盐岩试件在匀速变形阶段径向应变速率越小, 塑性残余变形积累得越慢, 盐岩的

疲劳寿命越短.

2) 不同条件下, 体应变曲线都会呈现出减速扩容段和稳定扩容段. 上限围压越小或者轴向恒定应力越大, 试件扩容幅度越大, 其匀速扩容段在整个扩容过程中所占比例越小, 导致加速扩容点前移.

3) 任一试验, 随着试验进程的推进, 盐岩等容变形率的总体趋势在不断减小. 上限围压越小或轴向恒定应力越大, 都会使盐岩的韧性能力损失得更快, 导致盐岩的扩容能力增强. 工程中储气库的运行气压过低, 建造深度过大, 都将会导致储气库围岩的塑性损伤增大, 不利于储气库的安全稳定运营.

4) 通过损伤的本质含义, 对原有的盐岩扩容损伤模型进行修正, 建立更加准确完善的扩容损伤模型, 对试样疲劳扩容损伤进行计算, 可以发现盐岩损伤发展模式与径向应变发展模式较为接近.

参考文献:

- [1] 杨春和, 马洪玲, 刘建峰, 等. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 3562-3568.
(Yang Chun-he, Ma Hong-ling, Liu Jian-feng, et al. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 3562-3568.)
- [2] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353-1359.
(Guo Yin-tong, Zhao Ke-lie, Sun Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2011, 32(5): 1353-1359.)
- [3] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 温度对盐岩疲劳特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1839-1845.
(Ren Song, Bai Yue-ming, Jiang De-yi, et al. Experimental study of temperature effect on fatigue property of salt rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(9): 1839-1845.)
- [4] 高红波, 梁卫国, 徐素国, 等. 循环荷载作用下盐岩力学特性响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2617-2623.
(Gao Hong-bo, Liang Wei-guo, Xu Su-guo, et al. Study of mechanical behavior response of salt rock under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2011, 30(1): 2617-2623.)
- [5] 姜德义, 范金洋, 陈结, 等. 盐岩在围压卸荷作用下的扩容特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1881-1886.
(Jiang De-yi, Fan Jin-yang, Chen Jie, et al. Study of dilatancy characteristics of salt rock under unloading action of confining pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(7): 1881-1886.)
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Bagde M N, Petros V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2005, 42(2): 237-250.
- [10] Ladani L J, Dasgupta A. A meso-scale damage evolution model for cyclic fatigue of viscoplastic materials [J]. *International Journal of Fatigue* 2009, 31(4): 703-711.
- [11] 刘恩龙, 黄润秋, 何思明, 等. 循环加载时围压对岩石动力特性的研究 [J]. *岩石力学* 2011, 32(10): 3009-3013.
(Liu En-long, Huang Run-qiu, He Si-ming, et al. Influence of confining pressure on dynamic properties of rock samples subjected to cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3009-3013.)
- [12] 夏冬, 杨天鸿, 王培涛. 循环加卸载下饱和岩石变形破坏的损伤与能量分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)* 2011, 32(6): 867-870.
(Xia Dong, Yang Tian-hong, Wang Pei-tao. Analysis on damage and energy in deformation and fracture of saturated rock subjected to cyclic loading and unloading [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* 2011, 32(6): 867-870.)
- [13] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报* 2003, 22(10): 1581-1585.
(Ge Xiu-run, Jiang Yu, Lu Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2003, 22(10): 1581-1585.)
- [14] 姜德义, 范金洋, 陈结, 等. 应力因素下的盐岩卸荷扩容试验研究 [J]. *岩石力学* 2013, 34(8): 41-46.
(Jiang De-yi, Fan Jin-yang, Chen Jie, et al. Test study of unloading capacity expansion characteristics of salt rock under stress factors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8): 41-46.)
- [15] 姜德义, 范金洋, 陈结, 等. 围压卸载速率对盐岩扩容损伤影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报* 2013, 32(2): 3154-3159.
(Jiang De-yi, Fan Jin-yang, Chen Jie, et al. Research on effect of unloading rate of confining pressure on capacity expansion damage of salt rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2013, 32(2): 3154-3159.)

(上接第 1478 页)

用最广泛的 3dm, dat 及 dtm 文件作为三维实体模型接口的接口文件, 并解析了该三种实体模型文件的数据结构及其存储规律.

2) 以 Microsoft Visual Studio 2010 作为开发工具, 运用 Visual C++ 编程语言成功开发了采空区三维建模可视化集成系统实体模型接口, 有效实现了集成系统与 Surpac, Dimine, 3DMine 等主流矿业软件间的三维实体模型交互与共享, 该数据接口的成功研发有效地完善了集成系统数据输入输出功能结构, 提高了其应用价值, 同时为该三种文件格式的研究人员提供了有益借鉴.

参考文献:

- [1] 罗周全, 刘晓明, 张木毅, 等. 大规模采场三维探测及回采指标可视化计算 [J]. *中南大学学报(自然科学版)* 2009, 40(6): 1732-1736.
(Luo Zhou-quan, Liu Xiao-ming, Zhang Mu-yi, et al. Stope 3D monitoring and its mining index visible calculation [J]. *Journal of Central South University(Science Technology)*, 2009, 40(6): 1732-1736.)
- [2] Hu Y X, Li X B. Bayes discriminant analysis method to identify risky of complicated goaf in mines and its application [J]. *Journal Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2012, 22(2): 425-431.
- [3] Huang P, Yang P, Chen Y Z, et al. Three-dimensional model of Cangshang gold mine based on Surpac [J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 2011, 3(11): 299-306.
- [4] 王绍锋. 三维数字地质模型的研究与实现 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
(Wang Shao-feng. Research and realization of three dimensional digital geologic model of ore body [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.)
- [5] Wang S F, Wang D M, Cao K, et al. Distribution law of 3D fracture field of goaf and overlying strata [J]. *Journal of Central South University* 2014, 45(3): 833-839.
- [6] Elmenreich W, Pitzek S, Schlager M. Modeling distributed embedded applications on an interface file system [C]//IEEE Proceedings of the Seventh International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing. Vienna, 2004: 175-182.
- [7] Geng L Q, Zheng T, Bian Y, et al. Teaching reform of microcomputer principle and interface technology [J]. *Journal of Advanced Materials Research*, 2011, 6: 1737-1740.
- [8] Shan J L, Zhang B H, Bian C P. Application of interface technology to TDI CCD camera control system [J]. *Journal of Microcomputer Information* 2011, 8: 51-52, 27.
- [9] Zhu Q B, Lei S Y. On the interface technology of intelligent equipment [J]. *Journal of Control Engineering China* 2005, 5(12): 486-488.
- [10] Säfsten K, Johansson G. Interface challenges and managerial issues in the industrial innovation process [J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2014, 25(2): 218-239.