

灰岩在三轴变围压循环压缩中的变形特征研究

韩 林, 刘向君, 孟英峰, 李 皋, 刘 洪, 吴小林

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要: 岩石在周期荷载作用下的力学性能是影响岩体工程长期稳定性的重要因素之一, 需研究循环荷载作用下岩石的特性及演化规律。首先采用声波纵、横波波速测量方法, 对岩样进行筛选。设计灰岩在施加不同围压和恒定循环上限应力作用下, 三轴变围压循环加卸载下岩石变形特征测试方案。三轴变围压循环试验在 GCTS - 1000 型岩石力学测试系统上进行, 通过对试验结果的分析表明: (1) 灰岩在变、恒围压加、卸载循环中, 形成一封闭的塑性滞回环。在轴向变形上滞回环面积逐次缩小; 而变围压循环在径向变形上滞回环面积逐次增大, 而恒围压循环在径向变形上滞回环面积几乎相等。(2) 在三轴变围压循环压缩试验中, 围压增加和循环上限应力不变, 残余变形量随着循环次数的增加而呈现出一个递减的趋势, 轴向应变和径向应变的发展趋势是相反的。(3) 在整个循环加卸载过程中, 各个加卸载阶段变形模量值不同, 卸载阶段变形模量高于加载阶段变形模量。(4) 变围压循环加、卸载阶段变形模量的值大于恒围压循环加、卸载阶段下变形模量的值。通过试验, 揭示灰岩在三轴变围压循环下, 加载和卸载 2 种力学状态时变形特性的差异。同时分析变围压循环和恒围压循环状态下岩石弹性参数的差异性。

关键词: 岩石力学; 变围压; 恒围压; 循环; 变形模量; 波速; 残余变形

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 2840 - 05

STUDY OF DEFORMATION BEHAVIOURS OF LIMESTONE UNDER CYCLE TRIAXIAL COMPRESSION WITH DIFFERENT CONFINING PRESSURES

HAN Lin, LIU Xiangjun, MENG Yingfeng, LI Gao, LIU Hong, WU Xiaolin

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The mechanical behavior of rock under cycle load is the one of most important factors which could effect on the long-term stability of rock matrix. So the rock behavior and evolving regular of rock under circulation load are needed to be researched. The samples are selected through the wave velocities of compression wave and shear wave. The rock deformation tests are measured under different confining pressures, constant cycle upper limit confining pressures and triaxial altering confining pressure cycle loading. Triaxial altering confinement pressure cycle test is performed on the GCTS - 1 000 rock mechanic test system. The test results are as follows: (1) The deformation of limestone forms a closed plastic sluggish winding when the limestone is loaded or unloaded under altering or constant confining pressure. The areas of plastic sluggish winding diminish succession on the axial deformation; the areas of plastic sluggish winding under altering confining pressure increase succession on the radial deformation; the areas of plastic sluggish winding under constant confining pressure are almost equal. (2) In the triaxial altering confining pressure test, the residual deformation displays a scaling down tendency in

收稿日期: 2009 - 01 - 08; **修回日期:** 2009 - 06 - 30

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”课题(2006AA06A104)

作者简介: 韩 林(1961 -), 男, 1987 年毕业于西南石油学院机械工程专业, 现为工程师, 主要从事岩石力学试验与测试方面的研究工作。E-mail: fjfhss@126.com

condition that the confinement pressure increases and the cycle upper limit stress does not change. The developing trend of axial deformation and radial deformation is contrast to the result of residual deformation. (3) The deformation moduli of cycle loading or unloading progress are different and the deformation moduli of unloading progress are bigger than the value of loading progress. (4) The deformation moduli measured under altering confinement pressure are bigger than the deformation moduli measured under constant confinement pressure. Through experiments, the deformation character and rock elastic parameters of limestone under triaxial altering confinement pressure cycle exist divergence.

Key words: rock mechanics; altering confining pressure; constant confining pressure; circulation; deformation modulus; wave velocity; residual deformation

1 引 言

岩石在周期荷载作用下的力学性质是影响岩体工程长期稳定性的重要因素之一。在岩体工程和石油工业中,通过研究循环荷载作用下岩石的变形特性、强度特性以及演化规律,有助于正确认识岩石的破坏机制,对工程建筑物的安全和基岩稳定性的影响是不可忽视的。许多学者通过重复加载、循环载荷方式以及不同应力途径对大理岩、花岗岩、红砂岩、煤等岩石强度及变形的力学特征进行了大量的试验研究,得到了许多研究成果^[1~15]。

在油气田的开发过程中,地下各种压力的理论及其评价技术对勘探和开发具有重要意义。在钻井中随着钻深不断加大,地层压力的变化促使岩石变形发生改变,这种改变对安全钻井将产生不可估量的危害。对大坝来说,长时间受到不同载荷的作用,其变形量的变化对它的安全性和稳定性有影响。本研究通过三轴变围压循环试验对灰岩变形特征进行研究,并和恒围压循环试验进行对比,这 2 种循环试验都处在同一循环上限应力作用下。分析在整个变围压循环加、卸载状态下岩样的变形特征,并和恒围压加、卸载循环的变形特性进行对比,分析这两种试验条件下岩石弹性参数的差异性,为工程中岩石力学参数的选取提供依据。

2 岩样及样品的筛选

2.1 试验样品

试验样品取自塔里木地区,为古生界奥陶系上统良里塔格组岩石,岩性为浅灰色荧光生屑砂屑灰岩。埋藏深度为 5 607.74 m,岩样孔隙度的范围为

0.5%~0.8%,其主要矿物成分为方解石 98.97%,铁白云石 1.03%。样品加工成圆柱状($D = 25 \text{ mm}$),高度与直径之比约为 2:1。

2.2 样品的筛选

为消除因岩样个体差别导致的结果差异,减小岩石离散性的影响,选取表面无缺陷岩石,并对岩样进行纵、横波波速测量,剔除波速值差异较大的(表明岩石内部有明显缺陷)。以便在试验中选用相对均质性好的岩石。声波探头的纵波频率为 490 kHz,横波频率为 260 kHz。

3 试验方法

本试验采用三轴循环加、卸载试验,每一次加、卸载循环的围压相同,随后的循环逐次增加围压。循环上限应力值以常规三轴应力试验中的屈服强度为标准,其值相当于三轴压缩时岩石发生屈服强度时值的 73%左右。同时进行恒围压加、卸载循环试验,分析变围压循环和恒围压循环下岩石弹性参数的差异性,变围压三轴循环试验方案见表 1,试验采用应变控制方式。

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of experimental program

试验类型	循环次数	试验围压/MPa	循环上限应力/MPa
	1	10	60
	2	20	60
变围压循环	3	30	60
	4	40	60
	5	50	60

测试在西南石油大学“油气藏地质及开发工程”

国家重点实验室完成，三轴循环压缩试验在 GCTS - 1000 型高温高压三轴岩石力学测试系统上进行，该系统围压 140 MPa，轴压 1 000 kN，试验控制精度：压力 0.01 MPa；液体体积 0.01 mL。

4 试验结果分析

4.1 变围压循环与恒围压循环的比较

灰岩在三轴变围压循环和三轴恒定围压循环时的应力 - 应变曲线见图 1，三轴恒围压加、卸载循环中，围压为 10 MPa，循环上限应力为 60 MPa。应力 - 应变关系是反映岩石在应力作用下变形情况的一个重要力学参量。由于施加应力的方式不同，在两种不同围压循环加、卸载中，加载曲线与卸载曲线不重合，但都各自形成一封闭的塑性滞回环。在相同围压时，变围压的塑性滞回环和恒围压塑性滞回环在第一个循环时几乎相等。当围压逐渐增大，变围压的塑性滞回环大于恒围压塑性滞回环。每一次围压的增加，都导致岩石应力 - 应变关系具有各自的特性。

同时，三轴变围压循环塑性滞回环的面积在轴向变形方向上，第一次循环的滞回环面积很大，随循环次数增加和围压增高，滞回环面积逐次缩小；而在径向变形上，第一次循环的滞回环很小，随循环次数增加和围压增高，滞回环面积逐次增大。三轴恒围压循环塑性滞回环的面积在轴向变形方向上，第一次循环的滞回环面积很大，随循环次数增加滞回环面积逐次缩小，而在径向变形上，滞回环面积几乎相等。

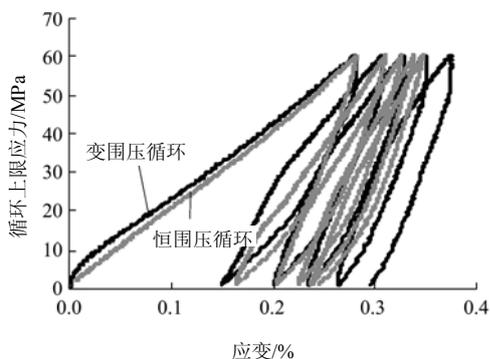


图 1 变围压循环与恒围压循环应力 - 应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of altering confinement pressure and constant confinement pressure cycle

4.2 三轴变围压循环变形特性

灰岩在三轴变围压循环下变形曲线图(见图 2)，灰岩的应力与应变仍具有良好的线性关系，为更好地研究灰岩在整个变围压循环阶段变形规律，用变

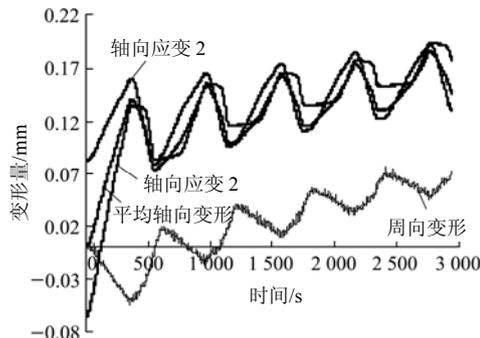


图 2 变围压循环变形曲线

Fig.2 Deformation curves of altering confinement pressure cycle

形模量来描述应力与应变关系(包括初始压密阶段和弹性变形阶段)。

不同的围压和循环上限应力对变形特性的影响随循环加载次数而增加，其斜率表现为逐渐增大，变形模量同时也增大，对试验结果进行线性回归。

灰岩在三轴变围压循环的变形模量满足以下回归关系：

$$E_{\text{加载}} = K_1 \ln(P_c) - K_2 \tag{1}$$

式中： $E_{\text{加载}}$ 为加载段的变形模量； P_c 为试验围压； K_1 ， K_2 均为试验确定的常数， $K_1 = 20\ 754$ ， $K_2 = 25\ 191$ 。式(1)的相关系数为 0.979 2。

$$E_{\text{卸载}} = K_3 \ln(P_c) - K_4 \tag{2}$$

式中： $E_{\text{卸载}}$ 为卸载段的变形模量； K_1 ， K_2 均为试验确定的常数， $K_3 = 19\ 732$ ， $K_4 = 1\ 460.5$ 。式(2)的相关系数为 0.996 6。

变形模量和泊松比间变化规律表明：岩样在三轴变围压循环加卸载试验过程中，每次加卸载的路径不能完全重复，应力与应变不存在一一对应关系，也就是说加卸载过程的变形模量并不完全相同，各个阶段的变形模量存在着差异。同时，岩石在多次不同围压和恒定的循环上限应力作用下，对岩石的致密程度产生了很大影响。

4.3 三轴变围压循环变形特点

从图 1，2 对三轴变围压循环下岩石变形进行分析研究，将曲线每一次达到循环载荷的上限应力所对应的轴向应变和径向应变提取出来，它们与循环

次数间的关系见图 3, 4。从图中不难发现：随着施加的围压和循环次数的增加，循环载荷上限应力对应的轴向应变呈现出逐渐减小的趋势；而径向应变呈现出逐渐增大的趋势。

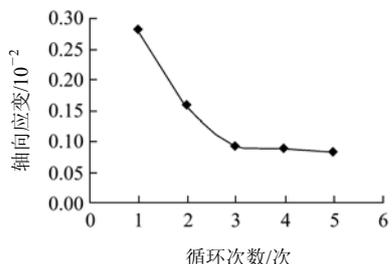


图 3 轴向应变与循环次数的关系

Fig.3 Relationship between axial strain and cycle numbers

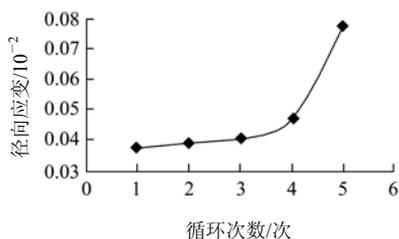


图 4 径向应变与循环次数的关系

Fig.4 Relationship between radial strain and cycle numbers

4.4 循环次数与残余变形量的关系

三轴变围压循环和三轴恒围压循环的加载曲线与卸载曲线形成一封闭的塑性滞回环，当循环上限应力回复到循环下限应力时岩石内部仍然保留有残余应变，产生一定的残余变形量。每次加载、卸载循环将导致残余变形残留下来，而残余变形量的大小、增长趋势以及总的累积量是度量岩石力学性能的标志之一。

将每一次加载、卸载循环的最高点和最低点的位移量提取出来，残余位移量与循环次数的关系见图 5。从图 5 中不难发现：在第一次加载、卸载循环过程，因是整个试验过程中的第一次周期荷载，故残余位移量很大。而变围压循环与恒围压循环的残余位移量与循环次数之间是有区别的，在相同围压下，残余位移量的趋势相近，随着围压逐次增大

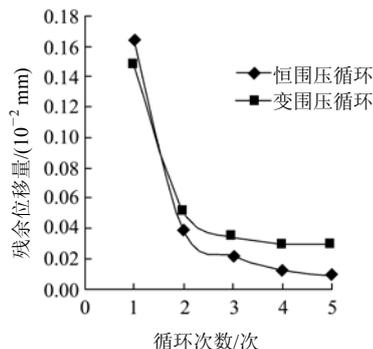


图 5 2 种循环下残余位移量与循环次数的关系

Fig.5 Relationships between residual deformation of two circulations and cycle numbers

后，变围压循环的残余位移量在一定量值下逐渐平缓，而恒围压循环的残余位移量呈逐次下降。

4.5 2 种循环加、卸载下变形模量的比较:

变围压循环与恒围压循环下岩石弹性参数间的对比关系(见图 6, 7)，从图 6 上可发现，在恒围压循环下，加、卸载阶段变形模量随着循环次数增加，其值十分接近，这表明：恒围压循环时塑性滞回环越来越小，循环次数和加、卸载阶段变形模量间是一个收敛的关系。而在变围压循环下，加、卸载阶段变形模量同样随着围压和循环次数增加而增大，是一个发散的关系。变围压加、卸载循环的变形模量均大于恒围压加、卸载循环的变形模量。

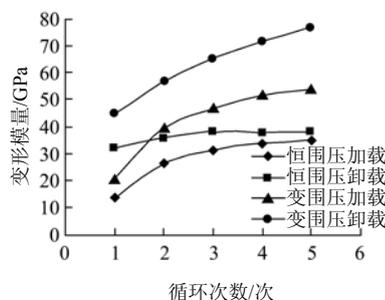


图 6 2 种循环下变形模量比较

Fig.6 Comparison of deformation modulus in two circulations

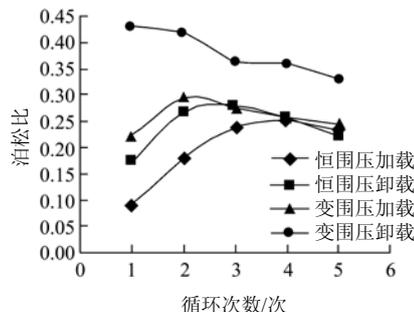


图 7 2 种循环下泊松比比较

Fig.7 Comparison of Poisson's ratio in two circulations

泊松比在2种循环试验条件下的趋势是十分相象的,除了变围压循环卸载阶段(见图7)。

综上所述,残余位移量在变围压循环下逐渐平缓,而恒围压循环是逐次下降。变形模量是变围压的值大于恒围压的值。恒围压加、卸载阶段的变形模量间是一个收敛关系,而变围压加、卸载阶段的变形模量间是一个发散的关系。

本试验结果和红砂岩在周期荷载作用下的结果有相似之处,红砂岩利用变形作为岩石疲劳破坏准则远比从强度角度定义的破坏准则更准确,可以很好地降低离散性的影响^[2]。而大理岩、花岗岩在整个循环过程中,加、卸载过程中杨氏模量其值大致相当^[7,8],而在变围压循环下,加、卸载阶段变形模量是随着围压和循环次数增加而增大,是一个发散的关系。

5 结 论

对灰岩在三轴变围压加、卸载循环试验和三轴恒围压加、卸载循环试验对比研究表明:

(1) 循环时加、卸载路径不能完全重复,应力与应变之间不存在一一对应关系,加载曲线与卸载曲线不重合,形成一封闭的塑性滞回环。

(2) 在岩样整个变围压循环加、卸载过程中,各个阶段加、卸载变形模量有所不同。卸载变形模量高于加载变形模量。

(3) 在三轴变围压循环压缩试验中,围压的增加以及循环上限应力的不变,残余变形量将随着循环次数的增加而呈现出一个递减的趋势,轴向应变和径向应变的发展趋势是相反的。

(4) 变围压加、卸载循环的变形模量的值大于恒围压加、卸载循环的变形模量的值。

(5) 恒围压加、卸载阶段的变形模量间是一个收敛关系,而变围压加、卸载阶段的变形模量间是一个发散的关系。

(6) 变围压循环的变形量比恒围压循环变形量大,变围压更能反映岩石在地层下的实际情况,有助于正确认识岩体的变形机制。

参考文献(References):

[1] 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 Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Testing study of fatigue

deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581 - 1585. (in Chinese))

[2] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 473 - 478. (ZHANG Qingxu, GE Xiurun, HUANG Ming, et al. Testing study of fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 473 - 478. (in Chinese))

[3] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11 - 18. (Ge Xiurun. Study of deformation and strength behaviour of the large-sized triaxial rock samples under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 11 - 18. (in Chinese))

[4] 张浩, 康毅力, 陈景山, 等. 变围压条件下致密砂岩力学性质实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4227 - 4231. (ZHANG Hao, KANG Yili, CHEN Jingshan, et al. Experimental study of mechanical properties of dense sandstone under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4227 - 4231. (in Chinese))

[5] 韩林, 刘向君, 孟英峰, 等. 加载途径对深部孔隙性砂岩力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 596 - 600. (HAN Lin, LIU Xiangjun, MENG Yingfeng, et al. Effect of loading paths on mechanical properties of deep porous sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 596 - 600. (in Chinese))

[6] 李早元, 郭小阳, 韩林, 等. 胶乳对水泥石三轴力学变形能力的作用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 126 - 129. (LI Zaoyuan, GUO Xiaoyang, HAN Lin, et al. Improvement of latex on mechanical deformation capability of cement sheath under triaxial loading condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 126 - 129. (in Chinese))

[7] 苏承东, 杨圣奇. 岩样循环加载条件下强度和变形特征的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 667 - 671. (SU Chengdong, YANG Shengqi. Experimental study of deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2006, 34(6): 667 - 671. (in Chinese))

[8] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588 - 592. (YOU Mingqing, SU Chengdong, XU Tao. Loading or unloading process in axial direction and Young's modulus of specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 588 - 592. (in Chinese))

[9] 许江, 鲜学福, 王鸿, 等. 循环加、卸载条件下岩石类材料变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3040 - 3045. (XU Jiang, XIAN Xuefu, WANG Hong, et al. Experimental study of rock deformation characteristics under cycling loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3040 - 3045. (in Chinese))

[10] 林卓英, 吴玉山. 岩石在循环荷载作用下的强度及变形特征[J]. 岩土力学, 1987, 8(3): 31 - 37. (LIN Zhuoying, WU Yushan. Rock's characteristic of strength and deformation under cyclic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 31 - 37. (in Chinese))

[11] 李永明, 郝临山, 魏胜利, 等. 煤岩加卸载不同应力途径变形破坏力学参数的研究[J]. 煤炭技术, 2006, 25(12): 129 - 131. (LI Yongming, HAO Linshan, WEI Shengli, et al. Research on coal deformation and failure mechanical parameters in different stress way of loading and unloading test[J]. Coal Technology, 2006, 25(12): 129 - 131. (in Chinese))

[12] 杨永杰, 宋扬, 楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201 - 205. (YANG Yongjie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study of characteristics of

- strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 201 - 205.(in Chinese)
- [13] 谢红强, 何江达, 徐 进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 336 - 338.(XIE Hongqiang, HE Jiangda, XU Jin. Deformation characterslics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336 - 338.(in Chinese))
- [14] 陈存礼, 谢定义. 偏应力往返作用下饱和砂土变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 669 - 675.(CHEN Cunli, XIE Dingyi. Testing study of deformation characteristics of saturated sand under repeated deviatoric stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 669 - 675.(in Chinese))
- [15] 莫海鸿. 岩石的循环试验及本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(3): 215 - 224.(MO Haihong. Study of rock's cyclic experiment and constitutive relation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(3): 215 - 224.(in Chinese))