

岩盐时效特性实验研究

Experimental studies on time dependent properties of rock salt

高小平, 杨春和, 吴 文

(中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 本文通过对盐岩单轴、三轴的强度与蠕变实验结果的分析, 研究了应力状态对盐岩的强度及其时间相关性特征的影响。分析结果表明: 盐岩是一种软岩, 围压对盐岩力学性质影响较大; 初始蠕变极限可以表示成稳态蠕变率的函数。通过实验获得的蠕变曲线和岩石参数, 回归出了盐岩的蠕变本构方程, 结果表明该方程能较好的模拟实验结果。

关键词: 盐岩; 蠕变; 时效; 本构方程。

中图分类号: TB 302

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2005)05 - 0558 - 04

作者简介: 高小平(1980 -), 男, 江西上饶人, 硕士在读, 主要从事盐岩力学特性方面和储气库稳定性分析方面的研究。

GAO Xiao-ping, YANG Chun-he, WU Wen

(Key Lab of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Through uniaxial and triaxial compression and creep experiment of rock salt under on high temperature and high pressure, the strength and time dependent properties of rock salt are studied. The results indicate that rock salt is a typical soft rock. The mechanical characteristics of rock salt is strongly dependent on confined pressure. Transient creep limit is a power function of steady state creep strain rate. Through the creep characteristic curves and parameters, the creep constitutive equation of rock salt is regressed and agrees with the experiment result.

Key words: rock salt; creep; time dependent properties; constitutive equation

0 前 言

盐岩的力学性质是盐岩水溶采矿及其相关科学研究的重要基础, 盐岩以其良好的蠕变, 低渗透性及损伤自我恢复的特性, 而被公认可作为能源储存, 高放射核废料永久性处置的理想介质^[1]。盐岩作为一种特殊类型的岩石材料, 对其力学特性的研究在国际上受到广泛的重视。Hunsche、Munson 等人分析研究了盐岩在低应变率下的蠕变行为, 并建立了反映各自实验数据的稳态蠕变率的数学模型^[2]; Carter、Russell 等对盐岩蠕变本构模型作了较为详细的研究^[3]。然而国内外用大试件盐岩进行实验研究的并不多, 为此笔者在高温高压三轴流变实验装置上, 对大试样盐岩进行了常规的单轴和三轴的应力应变全过程试验的同时, 进行了单轴和三轴的蠕变试验, 获得蠕变曲线和岩石参数, 并拟合了实验数据, 提出了符合实验的蠕变本构方程。

1 实验装置与实验方法

本次实验是在长春市新特技术有限公司与中科院武汉岩土力学所共同研制的高温高压三轴流变仪上进行的, 该装置由轴向加压系统、侧向加压系统、孔隙水压系统、温控系统、微机系统组成。各量程的测量精度可保持在 1% 的误差范围内, 满足试验要求。实

验数据由微机自动采集。该试验机的几项性能指标如下: 垂直液压缸最大出力 2000 kN, 变形速率为 0.0001~0.1 mm/s, 位移传感器量程为 50 mm (图 1)。



图 1 岩石高温高压三轴流变仪

Fig. 1 High temperature and high pressure triaxial creep test machine of rock

本次试验所用试样均取自江苏金坛盐矿茅 10 井, 茅 11 井两个钻孔。岩芯套钻钻取, 由于盐岩具有遇水溶解的特点, 因此为了避免试件在加工过程中水对盐岩结构的破坏, 采用干式锯磨法进行全部试样的加工。盐岩呈黑灰色粗粒状, 主要成份为 NaCl, 含少量黑色角砾碎屑及少量泥质胶结物。依据岩石力学实验标准, 加工成直径为 100 mm, 高度为 200 mm 的圆柱体。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50274065); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基础性研究基金资助项目 (Q110205)

收稿日期: 2004 - 07 - 04

本次蠕变试验采用的方案: 试验前先将试件与上, 下垫块安装在同一条轴线上, 外套热缩塑料护套。热缩塑料护套经电吹风热风烘干分钟后就会收缩至试件和端块密贴。端块与热缩塑料护套之间用“O”型圈密封, 将试样装入压力室, 并用油泵向压力室充油, 加围压到所需的压力值并保持不变, 误差控制在 ± 0.2 MPa, 再加轴压。然后保持轴压不变, 轴压的控制精度在试验前给定, 一般为轴压的 $\pm 1\%$, 利用监视屏上描绘的试验曲线, 可以确定试件何时进入稳态蠕变, 进入稳态蠕变后, 再继续做 24~120 h。由于盐岩对蠕变历史具有记忆特性, 因此下一级试验的温压条件应比前一级高, 并且在前一级试验完毕后, 使岩样得到充分的松弛恢复, 一般要在 24 h 以上。

2 盐岩压缩试验

在大多数情况下, 盐岩压缩实验的加载采用应变速率控制, 即加载应变率保持常数, 直到试样破坏, 同时测量试样的轴向位移和轴向应力, 这样可以得出盐岩压缩试验的应力应变曲线。为了便于分析和比较, 本次压缩实验的加载率均为 $5 \times 10^{-5}/s$ 。

从图 2 中可以看出, 盐岩表现出良好的延性特征。单轴抗压强度较低, 也就是说, 由于盐岩的组成成份—盐本身所具有的特性及其胶结状况, 决定了盐岩在单轴压缩状态下的破坏主要是由于轴向压应力引起的横向拉伸应变所致。本次单轴压缩实验得到的结果为: 峰值应力 20.9 MPa, 变形模量 15.5 GPa。

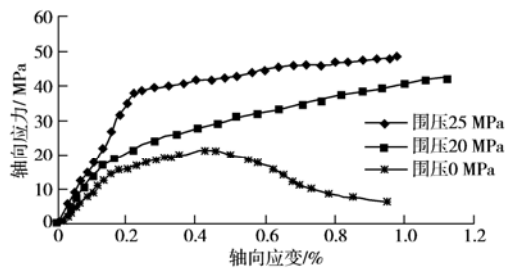


图 2 不同围压下的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock salt under different confining pressures

在等围压三轴压缩应力状态下, 盐岩的应力应变曲线具有阶段性, 盐岩表现出明显的塑性流动, 当盐岩试样达到峰值应力后, 盐岩不像其它脆性岩石呈现突然的崩裂, 而是仍然具有较大的承载能力, 试样并没有明显的破裂面, 而是出现膨胀破坏, 也就是说其破坏不再是纯剪切破坏^[4]。实际上, 盐岩的破坏过程就是盐岩内部损伤积累过程, 裂纹不断扩展的过程, 只是由于盐岩的屈服阶段持续的时间较长而没有像其它脆性岩石那样破坏的那样迅速。研究表明: 当围压

大于 3.5 MPa 时, 盐岩的应变软化现象不再出现, 而且随着围压的不断提高, 盐岩表现为明显的应变硬化特性^[1]。

从表 1、图 3 可以看出, 随着围压增大, 盐岩的弹性模量增大; 线弹性变形阶段增长, 盐岩的三轴抗压强度和破坏时的最大主应力与最小主应力之差均随围压近似呈线性增大。

表 1 盐岩三轴压缩试验结果

Table 1 Experimental results of triaxial compression of rock salt		
围压/MPa	弹性模量/GPa	三轴抗压强度/MPa
0	15.5	20.9
5	16.5	23.7
10	18.5	29.4
15	20.8	36.6
20	21.3	42.9
25	22.8	48.4

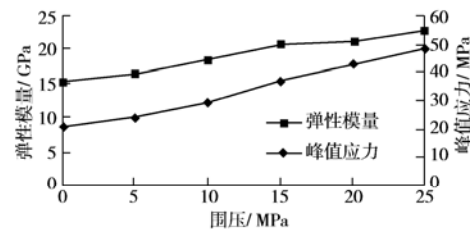


图 3 峰值应力和弹性模量与围压的关系

Fig. 3 Peak stress and Young's modulus of rock salt under different confining pressures

3 蠕变强度及时效特性试验研究

盐岩系盐湖或海洋蒸发结晶而成的沉积岩, 对流变非常敏感, 即使在较低的应力水平下, 也将出现较大的蠕变, 蠕变是一种长期行为^[5], 盐岩蠕变主要包括三个特征阶段: 初始蠕变 I、稳态蠕变 II、加速蠕变 III。

Munson、Langer、Yang 等对此进行了大量的试验研究分析。本次试验研究对 7 个盐岩样品在不同围压及轴压下进行单轴及三轴蠕变试验, 试验结果见表 2。

表 2 盐岩蠕变实验结果表

Table 2 Experimental results of creep of rock salt				
加载应力/MPa		实验时间/h	初始蠕变/%	稳态蠕变率/h ⁻¹
σ_1	σ_3			
10	0	78	0.393	2.0×10^{-4}
10	5	76	0.189	3.0×10^{-5}
15	5	54	0.198	3.5×10^{-5}
25	5	60	0.204	4.2×10^{-5}
20	15	58	0.145	2.0×10^{-5}
25	15	77	0.164	2.4×10^{-5}
30	15	61	0.176	2.8×10^{-5}

3.1 围压效应

图 4 为在偏应力为 10 MPa 情况下稳态蠕变率与

围压关系曲线图。从图中可以看出,随着围压的增加,稳态蠕变率减少。在单轴情况下的稳态蠕变率远比在有围压条件下的稳态蠕变率大得多,这是因为围压的存在限制了盐岩产生蠕变的微裂隙生长和晶粒间的相对滑移,围压效应比较明显。研究表明:当围压大于 3.5 MPa 时,其围压效应将明显减弱。当围压进一步增大时,稳态蠕变率可近似看作与围压无关,而仅仅是偏应力的函数。

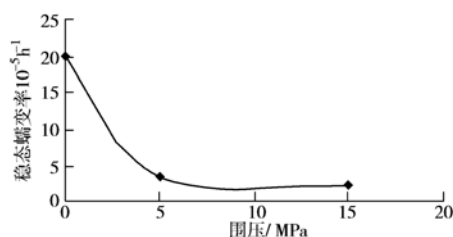


图 4 稳态蠕变率与围压曲线图

Fig. 4 Variation of SS creep strain rate with confining pressure

3.2 轴压效应

图 5 为在恒定围压为 5 MPa 条件下,不同的轴压得出的典型的蠕变曲线。从图中可以看出,随着轴压的增大,蠕变也增大,其稳态蠕变率也明显增大,在围压一定的情况下,增大轴压,加快了晶间弱面的闭合和裂隙的产生,蠕变速度加快。图 6 为相同围压条件下,偏应力与稳态蠕变率曲线图。从图 6 中可以看出,偏应力与稳态蠕变率之间存在很好的幂次律关系,关系如下:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = a(\sigma_1 - \sigma_3)^b, \quad (1)$$

式中 a 为围压及温度的函数; b 为材料常数。 a 、 b 可通过实验数据回归得到。从表 2 中的数据回归后可得 $a = 2.0204$; $b = 0.2427$; 相关系数 $R = 0.9988$ 。

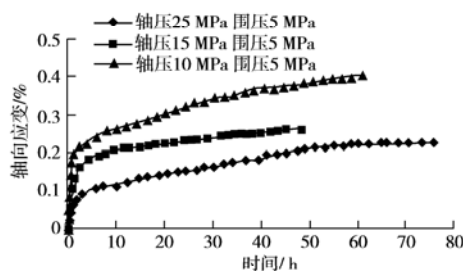


图 5 相同围压下的蠕变应变时间关系曲线

Fig. 5 Creep strain curves under same confining pressure

3.3 初始蠕变极限与稳态蠕变率的关系

围压除对稳态蠕变会产生较大的影响,对初始蠕变也有较大的影响。从表 2 可以看出,随着围压的增大,初始蠕变极限值 ϵ_{max} 变小。在小围压下,如单轴

情况下 ϵ_{max} 可达 0.3%~3%,而在高围压,很快就进入

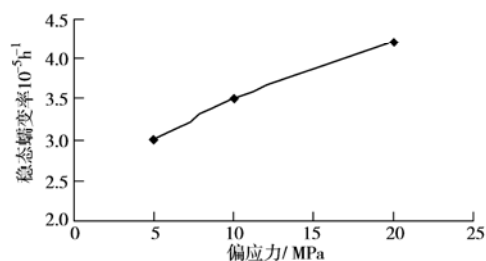


图 6 相同围压下稳态蠕变率与偏应力的关系

Fig. 6 Relationship of SS creep strain rate with deviatoric stress under the same confining pressure

到稳态蠕变阶段。图 7 为初始蠕变极限值与稳态蠕变率关系图,从表 2 中的数据回归后可知两者可以近似用一幂次律函数表示

$$\epsilon_{max} = m \dot{\epsilon}_{ss}^n, \quad (2)$$

式中 m 、 n 为材料常数, $m = 0.1143$; $n = 0.4158$ 。相关系数 $R = 0.9952$ 。

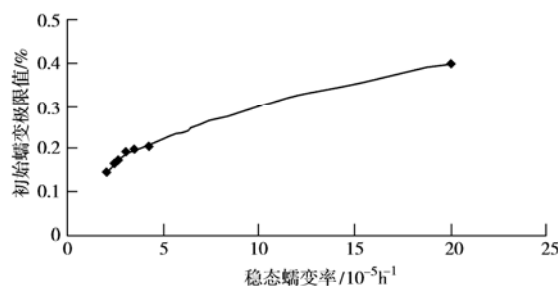


图 7 ϵ_{max} 与 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 曲线图

Fig. 7 $\epsilon_{max} - \dot{\epsilon}_{ss}$ curve

4 盐岩蠕变本构方程

一般来说,对于盐岩,其蠕变主要表现在 I、II 阶段,由于初始蠕变阶段相对于稳态蠕变阶段来说持续时间极短,在工程上可以不考虑,因此盐岩的蠕变特性可用稳态蠕变率来恒量,因此稳态蠕变阶段的本构关系研究对盐岩工程来说也就显得十分的重要^[6]。影响蠕变应变的因素主要是蠕变时间和蠕变应力水平。根据此次盐岩蠕变特性实验结果,可按如下方法得到盐岩的稳态蠕变应变与蠕变时间和蠕变应力水平的关系。

首先通过试验数据的回归分析,得到盐岩的轴向应变与时间的关系为: $\epsilon = At^C$ 。此式表明轴向应变与时间的乘幂之间有良好的线性关系。从实验回归中还发现参数 A 与偏应力的乘幂间也有很好的线性关系。然后得到 $A = B(\sigma_1 - \sigma_3)^D$ 。最终得到盐岩的蠕变本构方程^[7]:

$$\epsilon = Bt^C (\sigma_1 - \sigma_3)^D, \quad (3)$$

式中 B 、 C 、 D 都是材料参数。本次实验回归得到的值分别为: $B = 3.2 \times 10^{-6}$ 、 $C = 0.36$ 、 $D = 2.2$ 。

根据上述本构方程对本次的实验结果进行了对比计算, 从图8中可以看出, 本文提出的蠕变本构方程能较好的模拟实验结果。

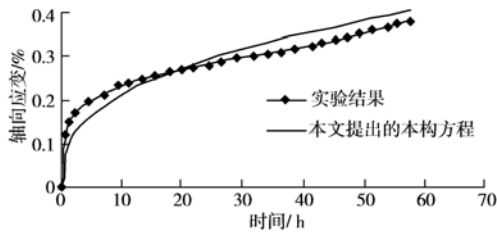


图8 本文的本构方程与实验结果的比较

Fig. 8 Constitutive equation of this paper compared with experiment result of rock salt

5 结 论

(1) 盐岩是一种软岩, 单轴抗压强度较低。盐岩的变形模量与单轴抗压强度的比值与一般的岩石如砂岩, 花岗岩等的变形模量与单轴抗压强度的比值相比较, 要小1~2个数量级。

(2) 随着围压的增大, 盐岩的弹性模量和峰值应力增大。盐岩在三向约束荷载作用下, 其刚度显示出强化趋势。

(3) 在三轴应力状态下盐岩的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线比单轴压缩时具有更好的线性关系, 而且围压的作用限制了产生流变的微裂隙生长和晶粒间的相对滑移。

(4) 围压对蠕变曲线产生影响, 围压越大, 进入稳态蠕变的时间越短, 第II蠕变阶段越明显, 越不容易进入加速蠕变阶段。

(5) 轴压也将对蠕变曲线产生影响, 轴压越大, 轴向应变率越大, 进入第II蠕变阶段的时间就越早,

第II阶段经历的时间越短, 即第II阶段不明显, 岩石试样越容易进入加速蠕变阶段。

(6) 初始蠕变极限与稳态蠕变率存在某种关系, 即: $\varepsilon_{\max} = m \dot{\varepsilon}_{ss}^n$ 。

(7) 回归出了金坛盐岩的蠕变本构方程: $\varepsilon = Bt^C (\sigma_1 - \sigma_3)^D$ 。

参考文献:

- [1] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3):270 - 275.
- [2] Hunsche U. Measurement of creep in rock salt at small strain rates[A]. The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second conference[C]. Germany. Trans Tech Publications. 1984.187 - 196.
- [3] Cater N L, Russell J E. Modified mechanical equation of state for rock salt[A]. the Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference[C]. Germany, Trans Tech Publications, 1984. 409 - 430.
- [4] 刘新荣, 姜德义, 余海龙, 等. 盐岩变形特性试验研究[J]. 矿冶工程, 1999, 19(4):12 - 15.
- [5] 邱贤德, 庄乾城. 盐岩流变特性的研究[J]. 重庆大学学报, 1995, 18(4):96 - 103.
- [6] 刘绘新, 张 鹏, 等. 四川地区盐岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9):1290 - 1294.
- [7] 吴 文. 盐岩的静、动力学特性实验研究与理论分析[D]. 博士学位论文, 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.