

◀“973”计划专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.04.005

## 相对湿度对盐膏岩蠕变规律影响的机理研究

马 跃<sup>1</sup>, 陈 勉<sup>1</sup>, 金 衍<sup>1</sup>, 侯 冰<sup>1</sup>, 杨 沛<sup>2</sup>

(1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆库尔勒 841000)

**摘 要:**为了弄清盐膏岩在井下环境下的蠕变规律,对盐膏岩蠕变规律影响机理进行了研究。采用调节盐溶液中含盐量的方法来控制岩样周围环境的相对湿度值,并在相对湿度为 35%,65%,95%的条件下,进行围压分别为 0,2,5 MPa 的三轴短期压缩试验和单轴应力为 10 MPa 的蠕变试验。相对湿度从 35%增加到 95%,盐膏岩岩样强度由 38.2 MPa 降至 35.2 MPa;弹性模量和泊松比变化量小。相对湿度为 95%时,盐膏岩岩样产生负向的体积应变(膨胀);相对湿度为 35%时,盐膏岩岩样产生正向体积应变(收缩)。研究表明,盐膏岩的强度对于相对湿度的变化不很敏感;结合 Heard 模型,利用蠕变激活能可以解释相对湿度对体应变速率的影响;晶体到毛细管空间的水分子相互运移的机械化学机制,可以解释相对湿度对体应变的影响。研究得到盐膏岩井下真实的蠕变规律,为盐膏层安全钻井提供了理论依据。

**关键词:**盐膏岩 蠕变规律 相对湿度 蠕变激活能 力学化学耦合

**中图分类号:**TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)04-0019-04

## Mechanism of Effect of Relative Humidity on Creep Behavior of Gypsum Rock

Ma Yue<sup>1</sup>, Chen Mian<sup>1</sup>, Jin Yan<sup>1</sup>, Hou Bing<sup>1</sup>, Yang Pei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. Institute of Oil and Gas Engineering, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China)

**Abstract:** In order to find out the creep behavior of salt-gypsum under the down hole conditions, the mechanism affecting salt-gypsum creep was studied. By adjusting the concentration of salt in the salt solution to control the relative humidity around the rock samples, the uni-axial compression test was carried out at 10 MPa and tri-axial compression tests were carried out at confining pressures of 0, 2 and 5 MPa under relative humidity of 35%, 65% and 95% respectively. It was found that in a short-term test of salt-gypsum rock, the rock strength displays a downward trend from 38.2 MPa to 35.2 MPa with the increase of relative humidity from 30% to 90%, the change in Young's modulus and Poisson's ratio is small. When the relative humidity is 95%, the sample generates negative volumetric strain (expansion) and when the relative humidity is 35%, the sample generates positive volumetric strain (shrinkage). The study shows the strength of salt-gypsum is not highly sensitive to the change of relative humidity; and combined with the Heard model, the impact of relative humidity on the volumetric strain rate can be explained by the theory of creep activation energy; and the influence of relative humidity on the volumetric strain can be explained by the mechanical-chemical mechanisms of mutual migration of water molecules between the crystal and capillary spaces. The creep behavior of salt-gypsum rock underground revealed by the study can provide theoretical basis for safe drilling in this kind of formations.

**Key words:** salt-gypsum rock; creep behavior; relative humidity; activation energy for creep; mechanical-chemical coupling

据统计,全球 58% 的商业性油气田与盐系地层有关。这些区块在油气勘探开发过程中,由于盐膏岩导致的井下故障频发,地震勘探时含盐地层的地震信号复杂;钻井过程中因盐膏岩的蠕动使井眼缩径变形,产生卡钻;生产过程中盐膏岩导致套管腐蚀损坏<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外对盐膏岩主要进行了不同应力状态、不同温度下的短期或长期应力试验<sup>[3-5]</sup>,但

收稿日期:2013-02-26;改回日期:2013-06-25。

**作者简介:**马跃(1984—),男,辽宁沈阳人,2007 年毕业于大连海事大学计算机科学与技术专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事岩石力学以及其数值模拟方面的研究。

**联系方式:**(010)89732209, mayue0327@163.com。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层安全高效钻井基础研究”(编号:2010CB226701)和国家自然科学基金项目“深部应力敏感裂缝性地层漏失封堵力学机理研究”(编号:51204195)部分研究内容。

是,岩样从地下取出的时间已久,其所处环境的相对湿度已经发生了改变(与室内的空气湿度达到了平衡),导致试验结果与实际相差很大。在石油开采的不同阶段,盐膏岩周围环境的相对湿度也会发生改变。在钻井阶段,井眼处于固、液、气的复杂环境下,其相对湿度与井眼打开前有所不同;完井或生产阶段,盐膏岩地层中会残留少量钻井液,或者其周围存在着盐水层等,其相对湿度会随着时间的推移而发生变化。不同学者用很多机制来解释相对湿度对盐膏岩行为的影响<sup>[6-14]</sup>,然而,相对湿度对盐膏岩性质的影响机理,国内外至今没有一个合理的解释。

针对钻井液和盐水作用下的深部盐膏层蠕变规律问题,笔者进行了不同相对湿度、应力强度的盐膏岩室内短期和长期应力-应变试验,获得了不同相对湿度条件下的深部盐膏岩强度和蠕变规律,并分析其对盐膏岩蠕变影响的机理,为深部盐膏岩地层井壁稳定预测提供科学理论依据。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验条件

在给定的相对湿度条件下,选择塔里木克深2井6 200~6 300 m井段的8块盐膏岩岩样(编号为KS-1—KS-8),分别进行短期和长期的应力-应变试验。

为了观察盐膏岩在某一相对湿度下的蠕变特性,需要在给定相对湿度条件下进行岩样短期和长期的三轴应力-应变试验。但是,其初始的相对湿度不容易控制。试验采用调整盐溶液中含盐量的方法,来控制岩样孔隙中的相对湿度:首先,把岩样放在一个底部盛有盐溶液并且带有圆孔托盘的玻璃器皿里,上部空气与底部饱和盐溶液相通,把该玻璃器皿放入电热鼓风干燥箱中,温度调至50℃,进行烘干加热,由于盐膏岩岩心非自由表面中存在着一定数量的裂隙和微裂缝,其中的水释放或吸收,就会加速建立盐膏岩岩样孔隙中的水和外面空气相对湿度的一个相对平衡。称重岩样确定平衡是否被建立,如果岩样的重量不再发生变化,说明这种平衡已建立。为了长时间保持这种平衡,防止岩心与室内空气接触导致其相对湿度发生变化,利用热塑管对岩心进行封装,并进行三轴应力-应变试验。

### 1.2 短期应力试验方案

对盐膏岩的短期强度试验,主要是在不考虑时

间效应条件下的单轴或三轴应力试验的基础上进行,从而建立盐膏岩的强度与变形理论。采用三轴压缩试验,围压分别是0,2,5 MPa。圆柱形岩样的直径为25 mm,长度为55 mm。盐膏岩三轴压缩试验加载的轴向应变速率一般为 $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

为了评价相对湿度对盐膏岩短期行为的影响,在相对湿度分别为35%,65%,95%条件下,对KS-1、KS-2、KS-3岩样建立平衡状态,然后进行三轴应力试验,并利用应力-应变曲线的线性部分计算得到岩样的弹性模量和泊松比。根据每一次应变曲线的趋势,判断岩样在加载应力的过程中是否产生破坏。

### 1.3 长期应力试验方案

井眼完钻后,由于地层中残余有钻井液或该地层处于盐水层附近,导致相对湿度随着时间发生改变,并且影响盐膏岩的长期行为。实践证明,体应变是衡量盐膏岩长期行为机制的重要参数。因此,在不同的相对湿度条件下,进行盐膏岩长期蠕变试验。试验时,岩样装有轴向和侧向应变测量仪,可以计算体应变的变化。

在不同相对湿度条件下,对KS-4、KS-5和KS-6的3块岩样加载相同的轴向应力,具体试验方案如表1所示。

表1 不同相对湿度下的单轴加载试验方案

Table 1 The experimental scheme of uni-axial load at constant relative humidity

岩样	相对湿度, %	单轴加载应力/MPa	加载时间/d
KS-4	35	10	120
KS-5	65	10	200
KS-6	95	10	90

## 2 试验结果分析

### 2.1 相对湿度对盐膏岩短期行为的影响

短期应力试验结果如表2所示。由表2可以看出,相对湿度从35%增加到95%,岩样强度由38.2 MPa降至35.2 MPa。但是,由于天然盐膏岩岩样的可变性,无法确定强度变化是由相对湿度导致的。Badens<sup>[6]</sup>通过试验研究了相对湿度对弹性模量、泊松比的影响,结果表明,在相对湿度变化达到100%的时候,弹性模量的变化不超过7%。同样,由表2可以看出,弹性模量和泊松比变化幅度都很小,不足以影响钻井过程中地下盐膏层的不稳定性。

表 2 短期应力试验结果

Table 2 Results of short term stress test

岩样	相对湿度, %	岩石强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
KS-1	35	38.2	3.14	0.36
KS-2	65	36.8	2.78	0.38
KS-3	95	35.2	3.17	0.37

## 2.2 相对湿度对盐膏岩长期行为的影响

在不同的相对湿度条件下盐膏岩长期蠕变试验结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,当相对湿度为 35% 时,体应变增加,40 d 之后,体应变不再增加,体应变速率为 0;当相对湿度为 65% 时,体应变不断增加,体应变速率大体为一定值;当相对湿度为 95% 时,体应变开始不断增加,25 d 后,体应变增加量减小,体应变速度方向由正向转为负向,75 d 后,

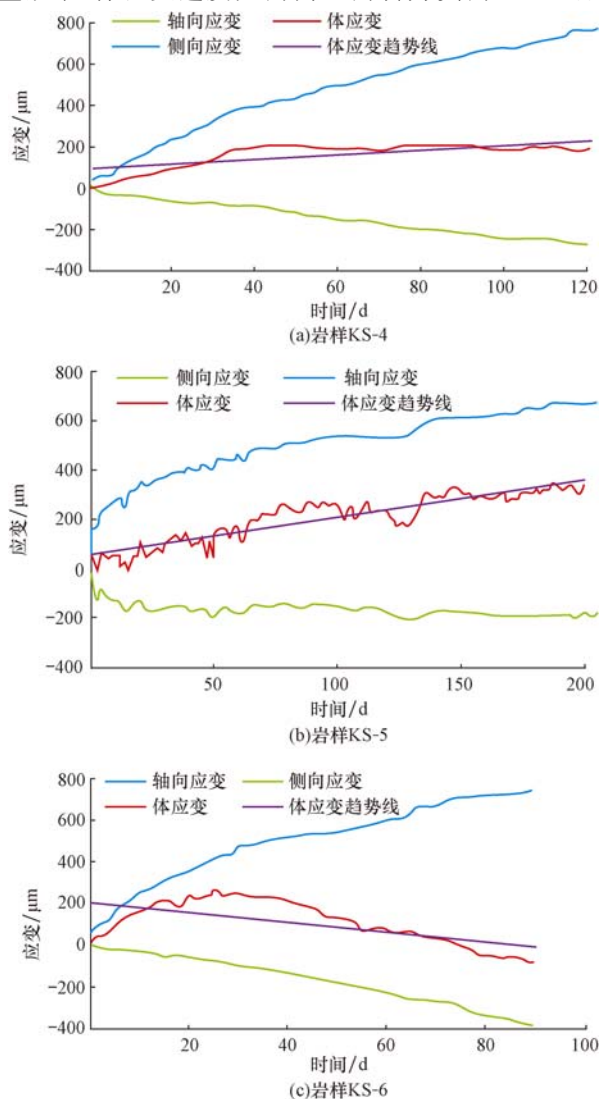


图 1 单轴压缩试验应变-时间曲线

Fig. 1 Strain vs. time curve with uni-axial compression creep test

体应变为负值,表明岩样体积产生膨胀,体应变的总体趋势是负向的。

从图 1 还可以看出,相对湿度 65% 的体应变峰值要高于相对湿度 35% 的体应变峰值,相对湿度 65% 的体应变速率也要高于相对湿度 35% 的体应变速率。与相对湿度为 65% 相比,相对湿度为 95% 时体应变速度方向由正向变为了负向,意味着体应变由收缩变为了膨胀。总体来说,在一个较高相对湿度条件下,观察到一个负向的体积应变(膨胀);然而,对于一个较低相对湿度条件下,体积应变是正向的(收缩)。通过线性拟合得出图 1 中体应变的变化趋势,进而得到相对湿度与蠕变速率的变化关系曲线(见图 2)。

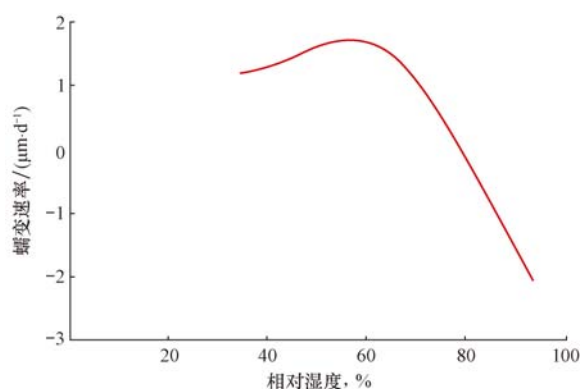


图 2 相对湿度和蠕变速率试验的关系曲线

Fig. 2 Relationship between relative humidity and creep rate

## 3 相对湿度对蠕变影响机制分析

### 3.1 相对湿度对蠕变速率的影响

利用 Heard 模型<sup>[15]</sup>研究发现,在盐膏岩形变过程中,利用蠕变激活能可以解释相对湿度对蠕变速率的影响机制。假设相对湿度增大,导致蠕变激活能增大,利用 Heard 模型可以表达为:

$$\dot{\epsilon} = Ae^{\frac{U_r}{RT}} \sinh(\beta\sigma) \quad (1)$$

在不同相对湿度下,对 2 块岩样施加相同的应力,由于 2 块岩样蠕变激活能不同,根据式(1)可知,2 块岩样的蠕变速率的比值始终都为—个常量,其表达式为:

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) = \frac{U_{r,2} - U_{r,1}}{RT} = \text{Constant} \quad (2)$$

从图 2 可以看出,相对湿度由 35% 增加到 65%,再增加到 95%,蠕变速率一直增大。

对式(2)进行变换,得到式(3):

$$\Delta U = U_{r,2} - U_{r,1} = RT \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) \quad (3)$$



式中:  $U_r$  为蠕变激活能, J/mol;  $R$  为摩尔气体常数,  $R=1.987 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为热力学温度, K;  $\dot{\epsilon}$  是蠕变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\sigma$  为差应力, MPa;  $A, B$  为流变系数。

从式(3)可以看出, 导致蠕变速率改变的原因是蠕变激活能的改变, 即相对湿度增大, 导致蠕变激活能增大。同时, 根据蠕变激活能的变化, 可以解释相对湿度对盐膏岩蠕变速率影响的机理, 但是不能解释相对湿度对体应变影响的原因。

### 3.2 相对湿度对体积应变的影响

盐膏岩内部微观结构具有一种机械化学相互作用的能力。机械化学相互作用是指在机械应力加载的过程中, 在毛管力作用下固体颗粒之间的相互作用<sup>[16]</sup>。这种作用发生的条件是, 毛细管空间中一定要有水的存在, 包括毛细管空间原有的水和来自盐膏岩中的水分子。机械应力的加载伴随着相对湿度的增大, 导致激活能降低, 使盐膏岩水分子离开晶体结构中的位置, 进入到毛管孔隙空间中。此时, 该水分子可以溶解粒子表面的分子, 加之盐膏岩粒子产生压缩形变, 相对湿度由 35% 增加到 65% 时, 岩样收缩; 当相对湿度继续增加时, 虽然盐膏岩粒子压缩产生形变, 但自由水已无法溶解粒子表面的分子, 其无规律的排列占据了毛管孔隙的空间。被驱逐出的水吸附在粒子的表面并保持在孔隙空间中, 随着自由水达到足够数量, 孔隙空间产生水压, 迫使一部分自由水运移到粒子和水分子孔隙当中。故当相对湿度由 65% 增加到 95% 时, 岩样膨胀。

在相对湿度值增大以及应力的作用下, 粒子表面分子被自由水分子逐渐溶解, 该粒子产生压缩形变, 导致岩样收缩; 但是, 随着相对湿度的不断增大, 其超出某一阈值, 自由水能够溶解粒子表面的分子, 孔隙压力不断增大, 更多的自由水被迫运移到粒子和水分子孔隙当中, 从而导致岩样膨胀。因此, 利用机械化学机制可以解释相对湿度对体应变影响的原因。

## 4 结 论

1) 盐膏岩的短期应力主要受到塑性变形机制的控制, 对相对湿度的变化不是很敏感; 随着相对湿度的增大, 短期应力有下降的趋势。

2) 在不同环境下, 相对湿度的改变导致蠕变激活能的变化。蠕变试验结合 Heard 模型研究发现, 蠕变激活能增加, 体应变速率增大; 蠕变激活能减少, 体应变速率减小。

3) 利用晶体到毛细管空间的水分子相互运移的机械化学机制, 可以解释相对湿度对体应变的影响。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 金衍, 陈勉. 盐岩地层井眼缩径控制技术新方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊 1): 1111-1114.  
Jin Yan, Chen Mian. A new approach for controlling tight hole in salt formation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(supplement 1): 1111-1114.
- [2] Ge Weifeng, Chen Mian, Jin Yan, et al. Analysis of the external pressure on casings induced by salt-gypsum creep in build-up sections for horizontal wells[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(6): 711-723.
- [3] Cristescu N D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1993, 30(2): 125-140.
- [4] Hunsche Udo. Result and interpretation of creep experiments on rock salt; the first Conference on the Mechanical Behavior of Salt, State College, 1981[C]. Clausthal-Zellerfeld: Transactions of Technical Publishers.
- [5] Hunsche Udo. Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock; experiment technique and interpretation[M]. Verlag: Springer, 1994.
- [6] Badens E, Veessler S, Boistelle R, et al. Relation between Young's modulus of set plaster and complete wetting of grain boundaries by water[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1999, 156(1/2/3): 373-379.
- [7] Coquard P, Boistelle R. Water and solvent effects on the strength of set plaster[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1994, 31(5): 517-524.
- [8] Kato Y, Matsui M, Umeya K, et al. Influence of surface energy on the mechanical properties of hardened gypsum[J]. Gypsum Lime, 1980, 166: 3-9.
- [9] Sattler H. Elastic and plastic deformations of plaster units under uniaxial compressive stress[J]. Matériaux et Construction, 1974, 7(3): 159-168.
- [10] Meille S. Correlation between mechanical behavior and microstructure of set plaster[D]. INSA de Lyon, France, 2001.
- [11] Meille Sylvain, Saâdaoui Malika, Reynaud Pascal, et al. Mechanisms of crack propagation in dry plaster[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(16): 3105-3112.
- [12] Finot E, Lesniewska E, Mutin J C, et al. Reactivity of gypsum faces according to the relative humidity by scanning force microscopy[J]. Surface Science, 1997, 384(1/2/3): 201-217.
- [13] Andrews H. The effect of water contents on the strength of calcium sulfate plaster products[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1946, 65(5): 125-128.
- [14] Saâdaoui M, Meille S, Reynaud P, et al. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25(14): 3281-3285.
- [15] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 19-30.  
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008: 19-30.
- [16] Kolláth B, Zoltán Juhász A. Mechanochemical capillary reactions in partly dehydrated gypsum and aluminium hydroxide interground powder mixtures[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(12): 1843-1857.

[编辑 滕春鸣]