

文章编号: 0253-9993(2010)01-0042-04

含夹层盐岩蠕变特性试验及其本构关系

唐明明¹, 王芝银¹, 丁国生², 冉莉娜²

(1. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘 要: 为了解某拟建盐穴储库围岩含夹层盐岩的蠕变特性, 对该库址含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩 3 种岩芯试样进行了不同围压下三轴压缩蠕变试验, 分析了其蠕变变形规律。实验结果表明: 含夹层盐岩初始蠕变阶段的持续时间大于泥岩试件而与盐岩试件基本相同, 即第 1 蠕变阶段的持续时间主要由层状盐岩试件中盐岩体部分决定; 第 2 蠕变阶段的稳定蠕变速率则随着泥质夹层含量的不同呈现较大的差异, 在相同应力条件下, 含泥质夹层盐岩试件的蠕变速率小于盐岩而大于泥岩。根据 3 种岩样第 2 蠕变阶段的蠕变特性, 基于含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层的体积分数, 推导了含夹层盐岩蠕变力学参数与纯盐岩及纯泥岩蠕变参数的关系。

关键词: 含泥质夹层盐岩; 蠕变特性; 蠕变速率; 伯格斯蠕变模型

中图分类号: TU458.3 **文献标志码:** A

Creep property experiment and constitutive relation of salt-mudstone interlayer

TANG Ming-ming¹, WANG Zhi-yin¹, DING Guo-sheng², RAN Li-na²

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China)

Abstract: In order to understand the mechanical characteristics of the surrounding layered rock salt of a gas storage cavern in Jiangsu Province, creep experimental studies of triaxial compression under different confining pressures were carried out on three kinds of rock samples which were rock salt, mudstone and salt-mudstone interlayer. The experiments indicate that the duration of the first creep stage of salt-mudstone interlayer is larger than that of mudstone and almost the same as that of rock salt. The duration of the first creep stage is mainly dominated by the salt part of sample. The stability creep rate of the second creep stage shows a large difference because the content of mudstone in salt-mudstone interlayer is different. Under the same stress conditions, the stability creep rate of the second creep stage of salt-mudstone interlayer is much larger than that of rock salt and less than that of mudstone. According to the property of the second creep stage of three kinds of samples and the volume content of mudstone in salt-mudstone interlayer, the relations between the creep parameters of salt-mudstone interlayer and the creep parameters of mudstone and rock salt were obtained.

Key words: salt-mudstone interlayer; creep property; stability creep rate; Burgers creep model

对于盐岩等软弱岩石以及含有泥质充填物和夹层的盐岩, 在恒定应力作用下, 其应变呈现出明显的蠕变特性。关于盐岩蠕变特性及其本构方程的研究在国外较多^[1-4], 如 Haupt, M^[1] 等根据盐岩蠕变变形提出了相关的蠕变模型; Chan, K. S^[2-3] 等基于位错理论对盐岩蠕变实验中的损伤演化进行了研究。近年来, 我国学者对盐岩蠕变变形的研究也取得了一些进

展^[5-7]。杨春和等对盐岩蠕变实验过程中的损伤关系进行了研究。由于我国盐岩层与国外盐丘型盐矿分布不同, 具有层数多、杂质多的特点, 对层状盐岩的蠕变特性方面研究仍相对很少。尤其是在含泥质夹层盐岩体的蠕变参数确定方面, 因夹层盐岩体的蠕变参数与其中泥质夹层的含量有极大的关系, 呈现明显的复杂性和离散性。本文针对层状盐岩的特点, 利用某

地拟建储气库的盐层取芯,对盐岩、泥岩及含泥质夹层盐岩试件 3 种岩芯分别进行三轴条件下的蠕变实验,研究了 3 种岩样初始蠕变阶段持续时间及第 2 蠕变阶段稳定蠕变速率的关系,并根据 3 种岩样第 2 蠕变阶段的蠕变特性,基于含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层体积分数,得到了不同泥质夹层体积分数的含夹层盐岩试件的蠕变力学参数的确定表达式。

1 实验概况

实验仪器采用长春朝阳仪器厂生产的 RLW - 2000 蠕变试验机,试验机提供最大轴向力为 2 000 kN,最大围压为 80 MPa。实验过程中荷载误差不得超过 200 N,仅为最大加载轴向力的 0.01%。

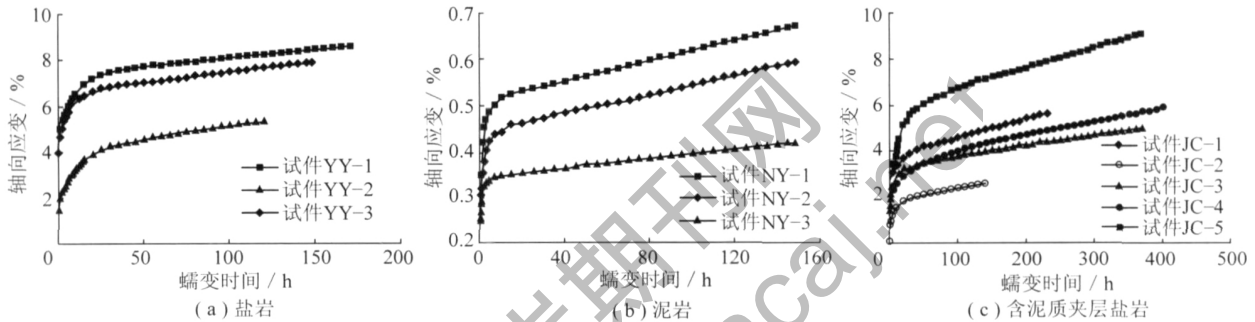


图 1 盐岩、泥岩和含泥质夹层盐岩试件蠕变曲线

Fig. 1 Triaxial creep tests of rock salt, mudstone and salt-mudstone interlayer

对泥岩试件进行三轴蠕变实验,泥岩三轴蠕变曲线如图 1(b) 所示。NY-3 试件围压为 26 MPa,轴压为 40 MPa,蠕变实验时间约 101 h; NY-2 号试件围压为 26 MPa,轴压为 45 MPa,蠕变实验时间约 109 h; NY-1 号试件围压为 26 MPa,轴压为 50 MPa,蠕变实验时间约 107 h。

对含泥质夹层盐岩试件进行三轴压缩实验,三轴蠕变曲线如图 1(c) 所示。试件中泥质夹层角度均接近水平: JC-1 试件夹层厚度为 0.5 ~ 1.8 cm,实验围压为 15 MPa,轴压为 48 MPa; JC-2 试件夹层厚度为 2.5 cm,试件端面含少量缺陷,实验围压为 30 MPa,轴压为 50 MPa; JC-3 试件存在 2 个泥质夹层,试件底部泥岩夹层厚度约为 3 cm,中部泥岩夹层厚度约为 2 cm,实验围压为 20 MPa,轴压为 50.5 MPa; JC-4 试件为灰褐色含大量泥质夹层岩盐试件,在试件上部、中部、下部各有 1 层厚约 2.5 cm 的泥质岩石夹层,实验围压为 8 MPa,轴压为 48 MPa; JC-5 试件夹层厚度为 3.5 cm,实验围压为 20 MPa,轴压为 60 MPa。

由图 1 可以看出 3 种岩芯在不同围压及轴压作用下,其蠕变实验曲线均存在明显的初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段。盐岩试件的持续时间最长,含夹层盐

岩试件的持续时间与纯盐岩试件基本相同,这主要是因为泥质夹层与盐岩体的串联结构使得蠕变第 1 阶段的持续时间主要由盐岩体决定。泥岩试件的持续时间最短。蠕变曲线经历初始蠕变阶段后进入稳态蠕变阶段。在蠕变的第 2 阶段,对于不同的岩芯,当偏应力及围压大体相同时,盐岩的蠕变速率最大,其次是含夹层盐岩,泥岩试件的稳态蠕变速率最小。如:泥岩试件 NY-1 与纯盐岩试件 YY-2 均为围压 26 MPa,轴压 50 MPa,而纯盐岩试件 YY-2 的稳态蠕变速率为 7.61×10^{-5} ,试件 NY-1 的蠕变速率为 1.14×10^{-5} ,前者约为后者的 7 倍;含泥质夹层试件 JC-3 与纯盐岩试件 YY-3 均为围压 20 MPa,轴压 50 MPa,然而试件 JC-3 的稳态蠕变速率为 4.64×10^{-5} ,试件 YY-3 的蠕变速率为 9.81×10^{-5} ,后者约为前者的 2 倍。层状盐岩的轴向蠕变应变来自两部分:一部分为纯盐岩部分的蠕变;另一部分为泥岩夹层蠕变,纯盐岩蠕变率高于泥岩夹层。因此,在相同应力状态下,层状盐岩的蠕变应变、蠕变速率介于纯盐岩与泥岩之间。

2 含夹层盐岩的三轴蠕变压缩实验

对盐岩试件 YY-1、YY-2 及 YY-3 进行三轴蠕变实验,蠕变实验曲线如图 1(a) 所示。其中 YY-1 试件围压 20 MPa,轴压 61.3 MPa; 试件 YY-2 围压为 26 MPa,轴压为 50 MPa; 试件 YY-3 围压为 20 MPa,轴压为 50 MPa。蠕变实验时间 120 ~ 171 h。

通过对 3 种岩样的蠕变实验分析可知,3 种岩芯

3 含夹层盐岩蠕变本构方程

在瞬时弹性变形后,即进入持续时间较短的初始蠕变阶段和较长时期的稳态蠕变阶段。在初始蠕变阶段,应变随时间非线性增加;而在稳态蠕变阶段,应变随时间的变化呈现出线性增加趋势。层状盐岩为横观各向同性介质,在弹性及黏弹性变形阶段其横向变形在岩样不同层位具有相异的变形规律,变化较为复杂。本文仅就其轴向变形问题进行深入分析,3种岩样的蠕变变形均采用如图2^[8]所示的伯格(S-M-K)蠕变模型表示。由于盐岩和含夹层盐岩的初始蠕变阶段持续时间与稳态蠕变阶段相比短得多,因此,忽略初始蠕变阶段的非线性特性,对初始蠕变阶段同样采用线性变形进行处理,即采用图2中虚线所示的直线线性变形作为蠕变曲线,这样,既不会对总蠕变变形量产生影响,又可方便地对长期蠕变进行预测,对油气盐穴储库的长期稳定性评价将不产生明显影响。

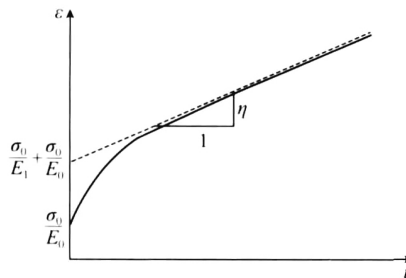


图2 Burgers模型的蠕变曲线

Fig. 2 The creep curve of Burgers model

如图2所示,当忽略第1蠕变阶段的非线性影响时,以 σ_0/E_0 代替 $\sigma_0/E_1 + \sigma_0/E_0$,在三轴应力状态下,根据黏弹性理论和常规三轴蠕变条件,则可得到岩样的轴向应变为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta}t \quad (1)$$

式中 K 、 G 分别为弹性体积模量和剪切模量; η 为剪切黏性系数。

考虑在围压 σ_3 施加过程中,静水压力将使试件产生一定的变形 $\sigma_3/3K$,而这部分变形在实验过程中并没有记录,因而式(1)减去静水压力 σ_3 时的球应变 $\sigma_3/3K$,得到岩样在主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 下的总应变为

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta}t \quad (2)$$

对式(2)进行整理,采用常系数表示,得到

$$\varepsilon_1(t) = A(\sigma_1 - \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)t \quad (3)$$

式中 $A = (3K + G)/(9GK)$, $B = 1/(3\eta)$ 。

根据本次实验的实验曲线,可以得到不同试件的参数,见表1。其中,泥质夹层的体积分数采用如下方法得到:在三维蠕变实验前,称量含夹层泥岩试件

的质量,试验后将所有试件部分(包括破碎部分)放入水中进行溶解,溶解后称量剩余部分质量,并根据泥岩及盐岩的密度得到各自的体积,从而得到泥岩的体积分数。

表1 不同试件蠕变参数及泥质夹层体积分数

Table 1 Creep parameters of the samples

试件编号	偏应力/ MPa	A/ GPa ⁻¹	B/ (GPa·d) ⁻¹	夹层体积分 数
YY-1	41.3	1.850	0.032 6	0
YY-2	24.0	1.840	0.076 1	0
YY-3	30.0	2.150	0.078 5	0
JC-1	33.0	1.100	0.063 4	0.182
JC-2	20.0	0.940	0.062 4	0.281
JC-3	30.5	1.080	0.036 5	0.502
JC-4	40.0	0.918	0.032 4	0.775
JC-5	40.0	1.460	0.052 3	0.375
NY-1	24.0	0.210	0.011 4	1
NY-2	19.0	0.224	0.014 1	1
NY-3	14.0	0.241	0.009 3	1

由表1可知,不同试件有不同的蠕变力学参数 A 、 B 。盐岩体的 A 平均值为 1.950 GPa^{-1} , B 的平均值为 $0.077 3 (\text{GPa} \cdot \text{d})^{-1}$ 。考虑到试件YY-1的值与其他2个差距较大,此处平均值取自试件YY-2及YY-3的值。泥岩体试件 A 的平均值为 0.225 GPa^{-1} , B 的平均值为 $0.011 6 (\text{GPa} \cdot \text{d})^{-1}$ 。而含夹层盐岩试件的参数则随着泥质夹层体积分数的变化有较大的差异。图3为蠕变参数 A 、 B 随泥质夹层体积分数的变化关系。

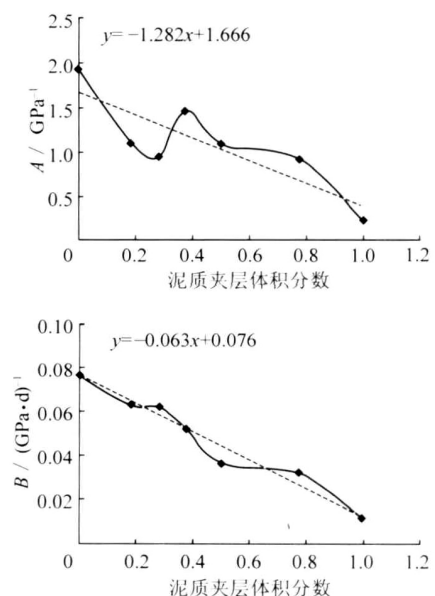


图3 参数A和B随泥质夹层体积分数的变化关系

Fig. 3 The change of the creep parameters A , B with the volume content of mudstone

由图 3 可以看出,蠕变参数 A 、 B 均随泥质夹层体积分数 m 的变化呈现近似线性的关系,分别对 2 条曲线进行线性拟合可以得到

$$\begin{cases} A = -1.282m + 1.666 \\ B = -0.063m + 0.076 \end{cases} \quad (4)$$

对于含夹层盐岩体而言,由于其中泥质夹层与盐岩体互相呈层状分布,因而层状岩体的总变形可以表示为每层岩体变形的综合,即层状盐岩体可认为是多个泥岩夹层与盐岩层串联而成。假设对于一个层状岩体试件,其中第 i ($i=1 \sim n$) 层岩体层高为 l_i ,所占体积含量为 a_i ,则有如下关系:

$$l_1 = a_1 l, l_2 = a_2 l, \dots, l_n = a_n l$$

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n$$

层状岩体的总变形可表示为

$$\varepsilon = \Delta l / l = (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n) / l =$$

$$a_1 \Delta l_1 / l_1 + a_2 \Delta l_2 / l_2 + \dots + a_n \Delta l_n / l_n =$$

$$a_1 \varepsilon'_1 + a_2 \varepsilon'_2 + \dots + a_n \varepsilon'_n$$

其中 ε'_i ($i=1 \sim n$) 为第 i 层岩体的相对应变,即第 i 层岩体的变形与第 i 层高 l_i 的比值。因而有

$$\varepsilon = A(\sigma_1 - \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)t = a_1 \varepsilon'_1 + a_2 \varepsilon'_2 +$$

$$\dots + a_n \varepsilon'_n = (\sigma_1 - \sigma_2) \sum_{i=1}^n a_i (A_i + B_i t)$$

基于忽略蠕变第 1 阶段非线性的 M-K 蠕变模型的分层岩体试件蠕变参数的确定关系式为

$$\begin{cases} A = a_1 A_1 + a_2 A_2 + \dots + a_n A_n \\ B = a_1 B_1 + a_2 B_2 + \dots + a_n B_n \end{cases} \quad (5)$$

对于含泥质夹层盐岩试件,其只有泥岩层及盐岩层 2 层,因而式(5)可写为

$$\begin{cases} A = (1 - m) A_y + m A_n \\ B = (1 - m) B_y + m B_n \end{cases} \quad (6)$$

其中 A_y 、 B_y 分别为盐岩层的体积分数及蠕变参数; a_n 为试件中泥质夹层的总体积分数; A_n 、 B_n 分别为泥岩层的体积分数及蠕变参数。

对于本次实验, $A_y = 1.95$ 、 $B_y = 0.0732$ 、 $A_n = 0.225$ 、 $B_n = 0.0116$,则有

$$\begin{cases} A = -1.725m + 1.95 \\ B = -0.0657m + 0.0773 \end{cases} \quad (7)$$

这与式(4)得出的参数基本吻合。通过以上分析可以得出,对于层状岩体尤其是含夹层盐岩试件的蠕变变形,当忽略其蠕变初始阶段的非线性变化时,可以利用 M-K 蠕变模型来表述其蠕变过程,因此,当通过较少量的实验得到纯盐岩及纯泥岩蠕变参数后,即可根据含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层的体积

分数直接按式(7)得出其蠕变参数。

4 结 论

含夹层盐岩蠕变初始阶段的持续时间略少于盐岩试件而大于泥岩试件,即蠕变第 1 阶段的蠕变时间主要由层状盐岩试件中盐岩体部分决定;蠕变第 2 阶段的稳定蠕变速率则随着泥质夹层体积分数的不同呈现较大的差异,在相同围压及主应力差条件下,含泥质夹层盐岩试件的蠕变速率小于盐岩而大于泥岩。忽略第 1 蠕变阶段的非线性,根据 3 种岩样第 2 蠕变阶段的蠕变特性,基于含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层体积分数,得到了不同泥质夹层含量的含夹层盐岩试件的蠕变力学参数的确定表达式。该结果将为层状盐穴储气库长期稳定性评价提供蠕变力学参数的确定依据。

参考文献:

- [1] Haupt M. A constitutive law for rock salt based on creep and relaxation tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1991, 24: 179-206.
- [2] Chan K S. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1997, 6(1): 122-152.
- [3] Chan K S, Munson D E, Bodner S R. Recovery and healing of damage in WIPP salt [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1998, 7(2): 143-166.
- [4] Hunsche U. Measurement of creep in rock salt at small strain rates [A]. *The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference* [C]. Tech. Publications Inc., 1984: 187-196.
- [5] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报* 2002, 21(11): 1602-1604. Yang Chunhe, Chen Feng, Zeng Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1602-1604.
- [6] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报* 2004, 23(3): 391-394. Liang Weiguo, Zhao Yangsheng. Testing study on mechanical property of thenardite rock salt [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2004, 23(3): 391-394.
- [7] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240 °C 内盐岩物理力学特性的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报* 2004, 23(14): 2365-2369. Liang Weiguo, Zhao Yangsheng, Xu Suguo. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240 °C [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2365-2369.
- [8] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.