

# 砂岩地层井壁稳定性分析

曹园, 蔚宝华, 邓金根, 闫传梁, 袁俊亮

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

**摘要** 南海某油田深部地层砂岩存在因蠕变导致的缩径现象, 有必要分析该油田砂岩地层蠕变性质, 为砂岩地层安全钻井提供借鉴。使用某油田深部地层砂岩岩心进行室内蠕变实验, 测定不同差应力下岩心蠕变率。使用西原模型拟合了实验结果, 拟合精度较高, 并计算了某油田砂岩缩径井段安全钻井周期。计算结果表明, 提高钻井液密度可大幅提高安全钻井周期, 也可采用定期起下钻、下套管封固缩径井段等工程措施阻止或减缓砂岩蠕变。

**关键词** 井壁稳定; 砂岩; 蠕变; 西原模型

**中图分类号** TE256

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.2.005

## Wellbore Stability of Sandstone Formation

CAO Yuan, YU Baohua, DENG Jing, YAN Chuanliang, YUAN Junliang

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** The creep happens in the deep sandstone formation of an oilfield in South China Sea. It is necessary to analyze the sandstone creep behavior to ensure the safety drilling in the field. Creep experiments were carried out with sandstone cores from the field, and creep rates under different differential stress were determined. The experimental data were treated by regression based on the Xiyuan model with a high regression accuracy. The creep rate of the oilfield sandstone based on the Xiyuan model shows that an improving drilling fluid density can greatly improve the safety drilling cycle. The regular tripping and casing and cementing shrinkage hole can also be used to prevent the sandstone creep.

**Keywords** wellbore stability; sandstone; creep; Xiyuan model

石油钻井工程中一般只考虑盐岩、石膏等地层井眼缩径问题, 但深部砂岩地层具有一定塑性特性, 井眼钻开后会产生蠕变导致井眼缩径, 造成钻具阻卡、下套管遇阻、套管挤毁等事故。南海某油田井径测井数据表明, 该油田深部砂岩地层存在缩径现象, 有必要研究发生缩径井段砂岩的蠕变性质, 为该油田及其他油田砂岩井段安全钻井提供借鉴。

Hettema<sup>[1]</sup>使用 Felser 砂岩在不同应力与温度下进行蠕变实验, 随温度、压力升高砂岩应变增大, 应变速率迅速降低并趋于稳定值, 当温度与压力分别升至 250℃ 与 39.6 MPa 时, 应变速率降低至一定值后迅速升高导致岩心破坏, 此时砂岩已具有软岩和石膏的蠕变特性。国内学者<sup>[2-4]</sup>也对砂岩的蠕变特性进行了研究, 但这些研究仅限于浅部地层疏松砂岩, 且实验均在常温下进行。本文模拟实际地层温度, 利用室内蠕

变实验研究某油田深部地层砂岩的蠕变性质, 计算缩径砂岩井段的安全钻井周期。

### 1 实验研究

使用某油田深部地层砂岩岩心(井深 3136.43 m)进行蠕变实验, 实验仪器为 TAW-1000 深水孔隙压力伺服实验系统。模拟该油田深部地层温度, 实验温度设为 120℃。砂岩蠕变速率受差应力(轴压与围压之差)控制<sup>[5]</sup>, 由于常压下应力释放导致的岩心孔隙度增大会对蠕变实验结果产生影响, 实验施加围压 5 MPa 使岩心处于受压状态, 测定岩心轴向蠕变率(岩心轴向位移与岩心原始长度之比)随时间的变化。图 1 为不同岩心不同轴压下蠕变率与时间的关系, 图 2 为同一岩心不同轴压下蠕变率与时间的关系。

收稿日期: 2013-09-13; 修回日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174219); 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介: 曹园, 博士研究生, 研究方向为岩石力学与井壁稳定, 电子信箱: yuancas555@126.com

引用格式: 曹园, 蔚宝华, 邓金根, 等. 砂岩地层井壁稳定性分析[J]. 科技导报, 2014, 32(2): 34-36.

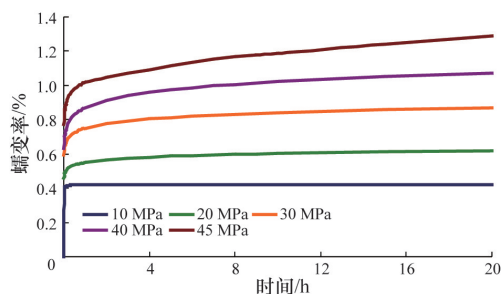


图1 不同轴压下岩心蠕变率随加载时间的变化

Fig. 1 Creep rate vs. time at different axial stresses of different cores

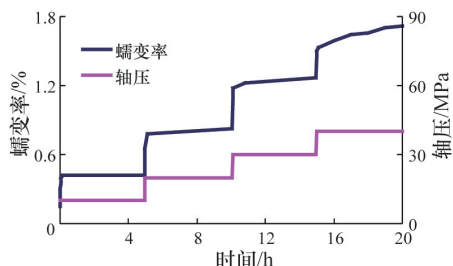


图2 逐级增加轴压岩心蠕变率随加载时间的变化

Fig. 2 Creep rate vs. time at different axial stresses of one core

实验得出,岩心蠕变率受轴向应力影响,应力较小时,岩心仅发生瞬态变形,蠕变率迅速增加至一定值后基本不再随时间增长;应力较大时,岩心蠕变率随实验时间持续增长。岩心存在明显临界蠕变应力,应力大于临界蠕变应力时,岩心发生瞬态蠕变后进入稳定蠕变过程,蠕变率均匀增长,应力越大,蠕变率增长速度越快。本实验条件下,岩心临界蠕变应力为15 MPa。根据位错蠕变理论<sup>[6]</sup>,应力作用下晶格沿滑移面产生位错,不同滑移面位错相互缠结产生应变硬化,而在高温环境下,位错可自由扩展且可从一个滑移面攀移到另一个滑移面,因此高温可降低砂岩蠕变临界应力,实验时模拟地层温度加温才能更准确地评价深部地层砂岩的蠕变性质。

## 2 模型研究

典型岩石蠕变具有3个阶段,初始蠕变阶段(I区)、稳定蠕变阶段(II区)和加速蠕变阶段(III区),应变随时间的变化见图3。对于石油工程深部地层砂岩,其蠕变过程一般只存在初始蠕变及稳定蠕变两个阶段。

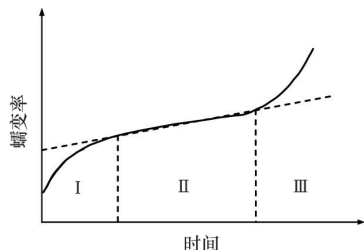


图3 典型岩石蠕变过程

Fig. 3 Typical rock creep process

岩石流变特性一般可用3个单元组合表示,弹性单元、黏性单元与塑性单元<sup>[7]</sup>。弹性单元服从胡克定律,其应力 $\sigma$ 与应变 $\varepsilon$ 关系为 $\sigma=E\varepsilon$ ( $E$ 为弹性模量);黏性单元服从牛顿黏性定律,其应力 $\sigma$ 与应变 $\varepsilon$ 关系为 $d\sigma=\eta d\varepsilon/dt$ ( $\eta$ 为黏滞系数, $t$ 为时间);塑性单元服从库伦摩擦定律,应力达到岩石屈服极限时应变开始持续增加,否则应变为零。一般蠕变模型为上述3个单元的组合,常用模型包括西原模型<sup>[8]</sup>与Burgers模型<sup>[9]</sup>。西原模型由一个弹性体、一个弹性黏性并连体、一个黏性塑性并连体串联而成,Burgers模型由一个弹性黏性并连体、一个弹性体、一个黏性体串联而成(图4,图中 $E_1$ 、 $E_2$ 为弹性模量, $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 为黏滞系数, $\sigma$ 为应力, $\sigma_r$ 为屈服应力)。

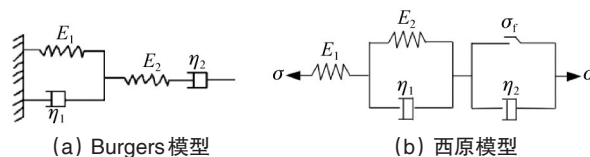


图4 模型流变单元组合

Fig. 4 Rheological model with different unit combinations

蠕变实验发现砂岩只有在应力达到一定程度后才可产生持续变形,因此其蠕变过程更适合用包含塑性单元的西原模型表示

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\xi_1} t\right) \right] & \sigma < \sigma_r \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\xi_1} t\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_r}{\xi_2} t & \sigma \geq \sigma_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_r$ 为屈服应力,MPa; $E_0$ 、 $E_1$ 为弹性模量,GPa; $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 为黏性系数,GPa·h。

使用西原模型对图2实验数据进行拟合,见图5,拟合参数 $E_0=2.45$  GPa, $E_1=60.5$  GPa, $\xi_1=196$  GPa·h, $\xi_2=102$  GPa·h, $\sigma_r=15$  MPa。可以看出,西原模型能够较准确地模拟不同应力状态下砂岩蠕变过程。

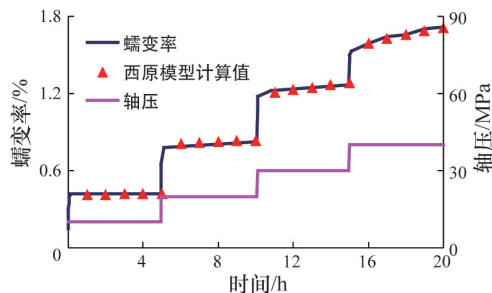


图5 西原模型拟合室内蠕变实验

Fig. 5 Creep test data and calculated data based on Xiyuan model

钻井过程中,钻头破碎井底岩石后,井壁表面水平地应力被钻井液柱压力产生的径向应力代替,一般液柱产生的径向应力小于原始水平地应力,因此砂岩井壁在应力差下向井筒内部变形,造成井筒缩径。因弹性变形及初始蠕变时间很短,弹性变形及初始蠕变阶段井壁向井筒内部蠕变部分可被

钻头再次破碎,起下钻作业也会对初始蠕变井壁进行破坏,所以钻井过程中只需关注稳定蠕变阶段井壁蠕变率。据此可对西原模型进行简化,使其仅包含一个黏性塑性并连体。当井壁上应力差小于井壁砂岩屈服应力时,井壁不会发生稳态蠕变,弹性变形及初始蠕变不会对钻井安全产生影响。

### 3 现场应用

X1井为南海某油田一口探井,储层段井径分别使用随钻测井与电缆测井进行测量,测量时间间隔21 h。图6为井径测井曲线及伽马测井曲线,缩径段伽马值均在70 API左右,可判断岩性为砂岩。X1井井眼缩径速率达到 $0.0025 \text{ h}^{-1}$ ,而能够保证钻井安全的井眼缩径速率为 $0.0010 \text{ h}^{-1}$ [5]。可见,高温高压下砂岩地层缩径不容忽视。

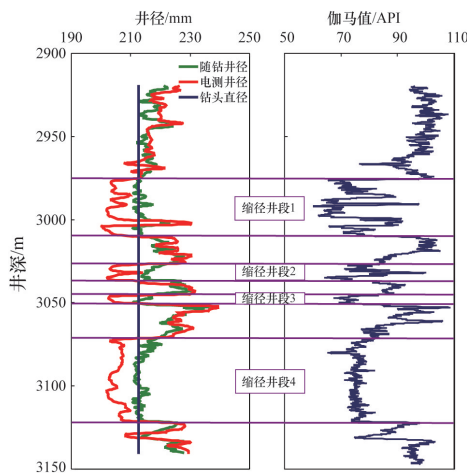


图6 X1井井径测井与伽马测井曲线  
Fig. 6 Caliper and gamma logging data of X1 well

使用西原模型对油田缩径井段地层安全钻井周期进行了预测(图7)。以井眼缩径率20%为安全钻井临界值,钻井液密度为 $1.8 \text{ g/cm}^3$ 时安全钻井周期为3.3 d;钻井液密度提高至 $2.1 \text{ g/cm}^3$ 后,安全钻井周期提高至6.5 d。在保证地层不漏不裂前提下,适当提高钻井液密度可大幅降低砂岩井段缩径率,提高安全钻井周期。此外,为保证安全钻井,缩径砂岩井段钻穿后应定期短程起下钻具破坏已发生蠕变的井壁,防止卡钻,若条件具备,砂岩缩径井段钻穿后宜尽快下套管进行封固。

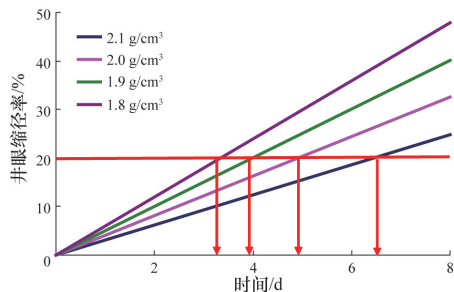


图7 X1井储层安全钻井周期  
Fig. 7 Reservoir safety drilling cycle of X1 well

### 4 结论

1) 石油钻井工程深部砂岩地层可产生缩径,室内实验及现场井径测井资料均表明南海某油田深部砂岩地层蠕变性质较强,如果不采取防范措施可能导致卡钻等复杂情况。

2) 包含有塑性单元的西原模型能较好地模拟深部砂岩地层的蠕变过程,结合实际钻井过程,计算蠕变率时西原模型可仅保留塑性单元与黏性单元并连体。

3) 为保证钻井安全,缩径井段可采取提高钻井液密度、定期短程起下钻具、下套管封固等措施提高安全钻井周期。

### 参考文献 (References)

- [1] Hettema M H H, De Pater C J, Wolf K H A. Effects of temperature and pore water on creep of sandstone rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29 (3): A154.
- [2] 王炳印, 邓金根, 周建良, 等. 疏松砂岩储层水平井眼缩径变形规律数值模拟研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 55-57.  
Wang Bingyin, Deng Jingen, Zhou Jianliang, et al. Numerical simulation of under gauging deformation behavior of horizontal wells in unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (5): 55-57.
- [3] 李忠慧, 楼一珊, 黄万龙, 等. 疏松砂岩储层水平井安全钻井周期确定研究[J]. 钻采工艺, 2009, 32(5): 19-20.  
Li Zhonghui, Lou Yishan, Huang Wanlong, et al. Research on safety drilling period of horizontal well in the loose sandstone reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(5): 19-20.
- [4] 姜永东, 鲜学福, 熊德国, 等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478-1481.  
Jiang Yongdong, Xian Xuefu, Xiong Deguo, et al. Study on creep behavior of sandstone and its mechanical models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1478-1481.
- [5] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 134.  
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008: 134.
- [6] 宋鸿林, 张长厚, 王根厚. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 62-65.  
Song Honglin, Zhang Changhou, Wang Genhou. Structure geology[M]. Beijing: Geology Press, 2013: 62-65.
- [7] 冒海军, 杨春和, 刘江, 等. 板岩蠕变特性试验研究与模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1204-1209.  
Mao Haijun, Yang Chunhe, Liu Jiang, et al. Experiment study of argillaceous sandstone creep characteristics and anchoring control effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1204-1209.
- [8] 韩立军, 王延宁, 蒋斌松, 等. 泥质砂岩蠕变特性与锚固控制效应试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 65-72, 77.  
Han Lijun, Wang Yanning, Jiang Binsong, et al. Testing study on creep characteristics of marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 65-72, 77.
- [9] 李化敏, 李振华, 苏承东. 大理岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3745-3749.  
Li Huamin, Li Zhenhua, Su Chengdong. Testing study on creep characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3745-3749.

(责任编辑 王媛媛)