

文章编号: 1006-6616 (2012) 02-0158-07

复合岩盐层井眼蠕变缩径的数值模拟

曾德智¹, 林元华¹, 卢亚锋^{1,2}, 朱达江¹, 李留伟^{1,3}

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

2. 中国石油西南油气田公司采气工程研究院, 四川 广汉 618300;

3. 北京温菲尔德石油技术开发有限公司, 北京 100083)

摘要: 盐岩在深部高温高压环境下具有很强的蠕变特性, 在岩盐层钻井经常出现井眼缩径、卡钻等复杂事故。目前关于岩盐层井段安全钻进泥浆密度的计算方法主要适用于均匀地应力的情况, 难以在非均匀地应力条件下应用。为此研究建立了三向地应力作用下盐岩和砂泥岩相互交错的复合岩盐层井眼蠕变缩径的三维有限元模型, 并以塔里木油田羊塔克地区深井为例, 研究了非均匀地应力条件下, 复合岩盐层井眼随时间变化的蠕变缩径规律, 得出了一定泥浆密度下岩盐层井眼在不同时刻的井径值。计算结果表明, 安全泥浆密度有限元模拟值与羊塔克地区岩盐层井段实际采用的安全泥浆密度非常接近, 验证了所建数值模型的合理性和计算结果的可靠性, 研究成果为岩盐层井段的安全钻进提供了技术支撑。

关键词: 深井; 岩盐层; 蠕变; 井径; 有限元模拟

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 引言

随着世界油气资源的不断开采, 浅层油气资源已接近枯竭, 为了满足社会发展的需求, 深部地层及复杂地层已成为目前寻找油气资源的主战场。岩盐层是油气成藏的很好盖层, 其下蕴含着大量的油气资源, 美国墨西哥湾, 前苏联班长达勒威油田, 土库曼斯坦阿姆河地区, 中国塔里木、江汉、中原、四川等地区均已发现了这类盐下油气资源^[1-3]。但是, 盐膏岩在地层高温高压的环境下具有很强的流变特性, 当钻开井眼后, 如果泥浆性能选择不当, 在很短时间内便可引起井眼缩径、卡钻、井壁坍塌等井下事故^[4-8]。对于纯岩盐层可采用适当欠饱和盐水钻井液, 复合岩盐层段应更加注意对钻井液密度的控制, 如果不能及时调整复合岩盐层井段的泥浆密度, 会出现一系列井下事故^[9-11]。

目前, 关于岩盐层井段泥浆密度计算的方法主要有两种: 一是根据岩盐层反演理论取得相关力学参数, 采用粘弹性力学模型建立相关泥浆密度公式计算, 该方法的难点是必须获得不同时刻的井径曲线进行反演分析^[12]; 二是通过岩石力学试验取得相关力学参数, 采用理论公式获得岩盐层井眼在安全蠕变速率下的泥浆密度, 该方法按上覆岩层压力计算, 只适用

收稿日期: 2011-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004084); 教育部博士点基金项目(20105121120002)

作者简介: 曾德智(1980-), 男, 副研究员, 主要从事油气钻井工艺、石油管力学与环境行为方面的科研和教学工作。E-mail: zengdezhi1980@163.com

于均匀水平地应力地层^[11,13]，难以在非均匀地应力条件下应用。为此，本文建立了模拟复合岩盐层井眼蠕变缩径的有限元模型，以岩石力学试验数据为基础，采用有限元方法进行数值模拟，得出不同泥浆密度下岩盐层井径随时间变化的蠕变曲线，获得塔里木盆地羊塔克区块控制岩盐层井眼缩径的泥浆密度。

1 盐岩的蠕变及其控制方法

盐岩蠕变是指岩石材料的应力、应变随时间变化的性质。所有的岩石在受到载荷作用下都会发生变形，普通岩石变形很小，基本可以忽略；但泥岩、盐膏岩等软岩却非常敏感。盐岩蠕变主要经历瞬态蠕变（AB 段）、稳态蠕变（BC 段）和加速蠕变（CD 段）3 个阶段（见图 1）。对钻井工程而言，岩盐层被钻开后，将发生瞬态蠕变和稳态蠕变。

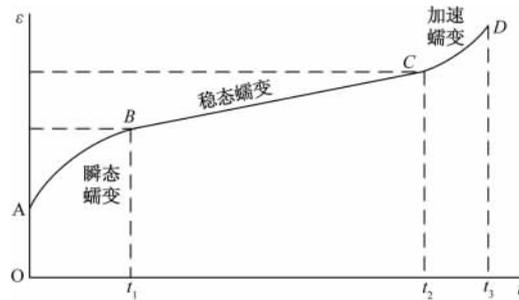


图 1 岩石的蠕变试验曲线

Fig. 1 Curve of rock creep test

盐岩的蠕变是其固有特性，与温度、应力场有关。对某特定工区而言，地层温度、垂直地应力和水平地应力都是固有特性，在钻井过程中只能通过提高泥浆密度改善盐岩所处的应力状态，控制其蠕变速度，进而避免由于蠕变缩径导致的卡钻。然而泥浆密度过大又易导致压差卡钻，在深井中尤其如此。减缓岩盐层蠕变缩径还可采用欠饱和盐水泥浆，溶蚀盐岩，但此法对复合岩盐层并不适用，因为欠饱和盐水泥浆易导致复合管岩盐层井壁坍塌。因此，合理确定钻井泥浆密度是确保复合岩盐管层安全钻进的关键问题。

2 有限元力学模型

从塔里木油田羊塔克地区岩盐层井段井径测井数据可知，井眼呈椭圆形，这反映出岩盐层井段地应力是非均匀的。非均匀地应力作用下盐岩蠕变井眼缩径和套管载荷理论计算方法还不太完善，目前主要依赖于数值模拟计算^[14]，且以往建立的二维平面模型不能反应砂岩—盐岩—砂岩复合岩盐层的蠕变特性及井眼缩径规律。盐岩蠕变具有很强的非线性特征，本文采用 ADINA 有限元力学分析软件对其进行数值模拟，同时利用 FORTRAN 语言对 ADINA 进行了二次开发，将 Heard 蠕变本构方程引入，建立了复合岩盐层井眼缩径分析的三维有限元模型。

2.1 复合岩盐层蠕变分析的三维有限元模型

与二维平面模型不同，本模型考虑了上下砂岩层对岩盐层的限制，如图 2 所示。笔者建立了多个尺寸模型，并对几何模型的大小及其网格划分进行了优化，最终选择模型长度

48 m, 高度 48 m。盐岩层厚度以羊塔克地区地质资料为准, 为 2.9 m。考虑盐岩蠕变非线性较强, 在进行网格划分时采用 8 结点 6 面体单元, 如图 3 所示。

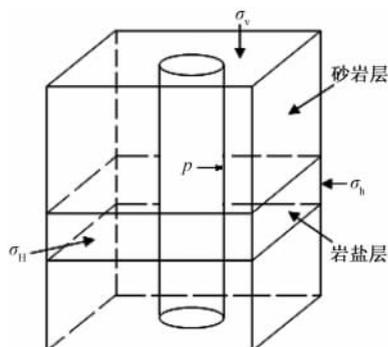


图 2 井眼蠕变缩径力学模型

Fig. 2 Mechanical model of borehole creep shrinkage

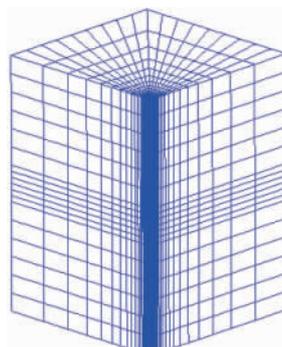


图 3 有限元网格模型

Fig. 3 FEA meshing model

2.2 材料本构模型选择和计算参数选取

对岩盐层可取热弹性蠕变材料, 根据羊塔克地区的岩心试验数据, 其蠕变特性可采用 Heard 蠕变模式近似拟合。Heard 模型的本构关系如下^[11]:

$$\dot{\varepsilon}^c = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot \frac{e^{(B\sigma)} - e^{(-B\sigma)}}{2} \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}^c$ —— 稳态蠕变速率, 1/h;

E —— 盐岩的激能, cal/mol;

R —— 摩尔气体常数, 1.987 cal/mol · K;

σ —— 差应力, MPa;

T —— 热力学温度, K;

A, B —— 流变常数。

对 YT502/E 盐岩岩心进行力学实验, 确定出盐岩的弹性模量为 4920 MPa, 泊松比为 0.45, 对蠕变实验数据利用式 (1) 进行回归, 确定出该盐岩蠕变参数, 如表 1 所示。

表 1 盐岩的蠕变力学参数

Table 1 Mechanical parameters of salt rock creeps

岩心编号	A	B	E
YT502/E	35.275	0.603	19887

砂泥岩的弹性模量为 11549 MPa, 泊松比为 0.27; 通过测试或解释复合盐层上、下砂泥岩地层的地应力, 可反演出复合盐层的地应力状态, 如表 2 所示; 根据羊塔克地区的地温梯度, 岩盐层温度为 363 K。

表 2 盐岩和砂岩地层的地应力

Table 2 Crustal stress of salt rock and surrounding rock layers

地层	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_v /MPa
岩盐层	144.39	127.13	121.25
砂岩层	139.42	104.17	121.25

注: σ_H —— 最大水平地应力; σ_h —— 最小水平地应力; σ_v —— 垂直地应力

3 数值模拟结果及矿场验证

为研究钻井液密度对井眼蠕变缩径的影响，为钻井施工提供泥浆密度设计参数，分别取泥浆密度为 1.7 g/cm^3 、 1.9 g/cm^3 、 2.1 g/cm^3 、 2.3 g/cm^3 ，钻头尺寸分别取 $8\frac{1}{2}$ "、 $9\frac{1}{2}$ "，对井深5250 m处复合岩盐层的蠕变进行了数值模拟计算。

当钻井液密度为 2.1 g/cm^3 时， $8\frac{1}{2}$ " 钻头井眼钻开 24 h 后，井眼缩径变形情况如图4所示。由图可知，在岩盐层的上部和下部由于受到砂泥岩的位移约束，因而缩径较小，盐层中部缩径最大。

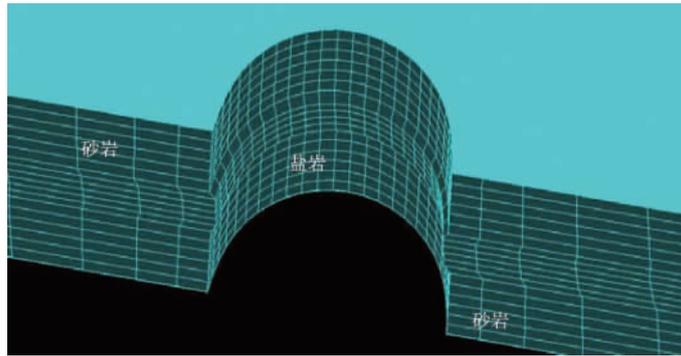


图4 复合岩盐层的蠕变缩径特征

Fig.4 Creep shrinkage characteristics of composite rock salt layer

记 X 方向为椭圆短轴方向， Y 方向为椭圆长轴方向。选取盐层中部井壁节点为考察对象，可得出不同泥浆密度下 X 方向和 Y 方向上井径随时间蠕变的曲线（见图5—图8）。

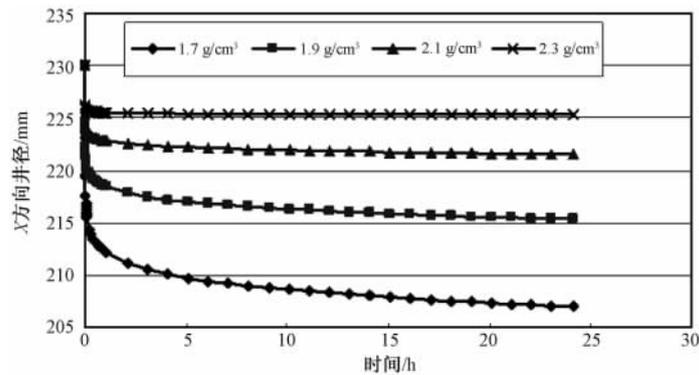


图5 泥浆密度对短轴方向上井眼缩径的影响 ($8\frac{1}{2}$ "钻头)

Fig.5 Effect of mud density to hole shrinkage in the brachy-axis direction ($8\frac{1}{2}$ " bit)

从图5—图8缩径曲线可见，随着泥浆密度的增大，井眼缩径程度减小，且当泥浆密度为 2.3 g/cm^3 时，基本可以抑制岩盐层井眼的缩径，但是仍然存在由于盐岩初始蠕变导致的瞬态缩径。这与钻遇岩盐层的现场施工情况是吻合的，为避免井壁初始蠕变导致的卡钻，通常采用的办法是反复划眼或采用随钻扩眼工具^[11,15]。

通过对比图5—图8的缩径曲线可知，随着时间的推移，井眼缩径趋于稳定，且泥浆密度越大，趋于稳定所需的时间越短。显然，增加泥浆密度，可有效地减少井眼缩径量，顺利

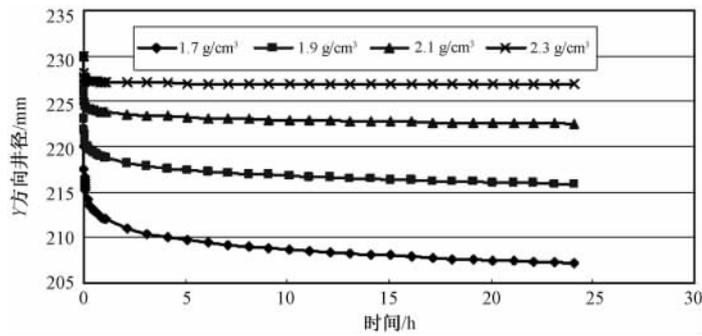


图6 泥浆密度对长轴方向上井眼缩径的影响 (8 1/2" 钻头)

Fig. 6 Effect of mud density to hole shrinkage in the major axis direction (8 1/2" bit)

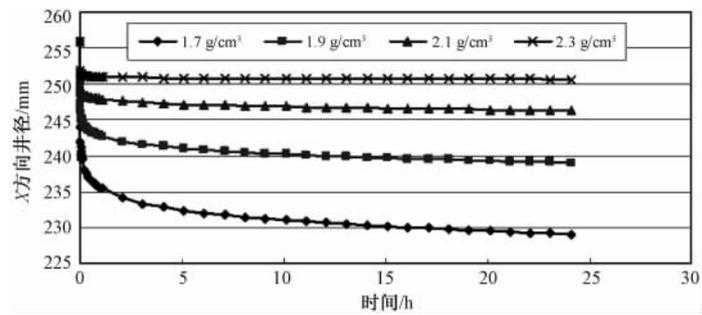


图7 泥浆密度对短轴方向上井眼缩径的影响 (9 1/2" 钻头)

Fig. 7 Effect of mud density to hole shrinkage in the brachy-axis direction (9 1/2" bit)

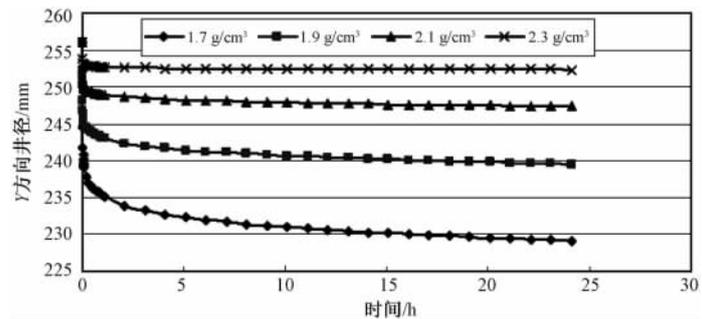


图8 泥浆密度对长轴方向上井眼缩径的影响 (9 1/2" 钻头)

Fig. 8 Effect of mud density to hole shrinkage in the major axis direction (9 1/2" bit)

安全下入套管。

羊塔克区块是塔里木盆地第一个盐下整装凝析油气藏, 盐下蕴藏大量的油气资源。YTK X井是该区块的一口评价井, 该井在 4800 ~ 5200 m 之间第三系层位钻遇大段复合岩盐层, 地层温度约 100 °C, 根据本文的模拟结果, 钻井液密度应取 2.3 g/cm³ 以上。该井岩盐层井段实际采用的泥浆密度为 2.33 g/cm³, 钻井过程未发生卡钻事故, 较好地控制了盐岩的蠕变缩径, 保证了套管顺利下入。

4 结论

采用非线性有限元软件, 建立了模拟复合岩盐层井眼蠕变缩径的三维有限元力学模型。计算了在非均匀地应力作用下控制井眼缩径的最佳泥浆密度, 计算结果与岩盐层井段实际采用的泥浆密度非常接近。该研究成果已经在塔里木油田羊塔克区块得到验证和应用, 确保了羊塔克区块岩盐层钻井安全, 提高了钻井时效。

参 考 文 献

- [1] Holt C A, Johnson J B. A method for drilling moving salt formations—drilling and under reaming at the same time [R]. SPE 13488, 1996.
- [2] Willson S M, Fossum A F, Fredrich J T. Assessment of salt loading on well casings [R]. SPE 81820, 2003; 13 ~ 21
- [3] 刘绘新, 张鹏, 盖峰. 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.
LIU Hui-xin, ZHANG Peng, GAI Feng. Study on creep rule of salt rock in Sichuan region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (9): 1290 ~ 1294.
- [4] 何开平, 张良万, 张正禄, 等. 盐膏层蠕变粘弹性流体模型及有限元分析 [J]. 石油学报, 2002, 23 (3): 102 ~ 106.
HE Kai-ping, ZHANG Liang-wan, ZHANG Zheng-lu, et al. Viscous and elastic flow module for gypseous salt creep and finite element analyses [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23 (3): 102 ~ 106.
- [5] 曾义金, 杨春和, 陈锋, 等. 深井石油套管盐膏岩层蠕变挤压应力计算研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (4): 595 ~ 598.
ZENG Yi-jin, YANG Chun-he, CHEN Feng, et al. Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 595 ~ 598.
- [6] 高德利, 郑传奎, 覃成锦. 蠕变地层中含缺陷套管外挤压力分布的数值模拟 [J]. 中国石油大学学报, 2007, 31 (1): 56 ~ 61.
GAO De-li, ZHENG Chuan-kui, TAN Cheng-jin. Numerical simulation of external pressure distribution of casing string with wear in creep formation [J]. Journal of University of Petroleum, China, 2007, 31 (1): 56 ~ 61.
- [7] 杨恒林, 陈勉, 金衍, 等. 蠕变地层套管等效破坏载荷分析 [J]. 中国石油大学学报, 2006, 30 (4): 94 ~ 96.
YANG Heng-lin, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Analysis of casing equivalent collapse resistance in creep formations [J]. Journal of University of Petroleum, China, 2006, 30 (4): 94 ~ 96.
- [8] 林元华, 曾德智, 施太和, 等. 软岩层引起的套管外载计算方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3): 538 ~ 543.
LIN Yuan-hua, ZENG De-zhi, SHI Tai-he, et al. Study on computation method for casing load induced by soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (3): 538 ~ 543.
- [9] 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): 1111 ~ 1114.
JIN Yan, CHEN Mian. A new approach for controlling tight hole in salt formation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (Supp.): 1111 ~ 1114.
- [10] 郑力会, 陈勉, 张民立, 等. 稳定盐膏层井眼的不饱和有机盐水钻井液新技术 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (11): 1829 ~ 1833.
ZHENG Li-hui, CHEN Mian, ZHANG Min-li, et al. A new technology for controlling hole-stability in salt/gypsum stratum by unsaturated organic-salt liquor drilling fluid [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (11): 1829 ~ 1833.

- [11] 唐继平, 王书琪, 陈勉. 盐膏层钻井理论与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 29~46.
TANG Ji-ping, WANG Shu-qi, CHEN Mian. Practice and theory of drilling in salt rocks [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 29~46.
- [12] 林元华, 曾德智, 施太和, 等. 盐岩层蠕变规律的反演方法研究 [J]. 石油学报, 2005, 26 (5): 111~114.
LIN Yuan-hua, ZENG De-zhi, SHI Tai-he, et al. Inversion algorithm for creep laws of salt rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26 (5): 111~114.
- [13] 杨春和, 曾义军, 吴文, 等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10): 1678~1682.
YANG Chun-he, ZENG Yi-jun, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (10): 1678~1682.
- [14] 楼一珊, 李忠慧, 张春阳, 等. 油气井眼井斜角、方位角对盐岩蠕变的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (增2): 3570~3574.
LOU Yi-shan, LI Zhong-hui, ZHANG Chun-yang, et al. Influence on inclination angle and azimuth angle of borehole on creep of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S2): 3570~3574.
- [15] 吴应凯, 石晓兵, 陈平, 等. 深部盐膏层安全钻井技术的现状及发展方向研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (2): 67~69.
WU Ying-kai, SHI Xiao-bing, CHEN Ping, et al. Status quo and development of safety drilling techniques for deep evaporate beds [J]. Nature Gas Industry, 2004, 24 (2): 67~69.

NUMERICAL SIMULATION OF HOLE CREEP SHRINKAGE FOR COMPOSITE ROCK SALT LAYERS

ZENG De-zhi¹, LIN Yuan-hua¹, LUYa-feng^{1,2}, ZHU Da-jiang¹, LI Liu-wei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Gas Production Engineering Research Institute, PetroChina Southwest Oil and Gas Fields Company, Guanghan 618300, China;

3. Beijing Winfield Petroleum Technology Exploration Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: Salt rocks have very strong creep behaviors in HTHP environment in deep formations, complex accidents such as hole shrinkage, drill pipe sticking, etc. occurring frequently. Current methods to calculate the safe drilling mud density are mainly used in circumstances of homogeneous earth stress. The 3-D finite element analysis (FEA) model of borehole creep shrinkage concerning salt rock and sand shale was established in this paper under triaxial earth stress. On the basis of deep wells of Yangtake in Tarim, laws of borehole creep shrinkage vs time were studied under the condition of heterogeneous earth stress, and values of borehole diameter in different times are obtained when the mud density is specified. Results calculated are very close to the safety drilling mud density field used in rock salt layers, thus verifying the reasonableness and reliability of the model established in the paper. Research results can provide technical support for safe drilling in rock salt layers.

Key words: deep well; rock salt layer; creep; hole shrinkage; finite element simulation