

# 盐岩层井眼缩径粘弹性分析\*

韩建增<sup>1</sup> 李中华<sup>1</sup> 练章华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学力学系 上海 200240) (<sup>2</sup>西南石油学院石油工程系 成都 610500)

**摘要** 在钻井工程中, 盐岩层井眼易发生缩径卡钻。过去常把盐岩作为弹性体或弹塑性体考虑, 而没有考虑其时间效应。工程实践表明, 深部盐岩的变形常随时间而增长, 呈明显的粘弹性状态。假设盐岩为服从麦克斯韦模型的均匀、各向同性的粘弹性介质, 根据弹性-粘弹性对应原理, 对井眼缩径的变化规律进行了理论研究; 在井眼缩径变形弹性解的基础上推导出了粘弹性数学解析表达式, 这对解决盐岩层井眼缩径卡钻及井壁稳定问题具有一定的参考价值。

**关键词** 岩石力学, 盐岩层, 井眼缩径, 粘弹性

**分类号** TE 21, TD 313<sup>+.1</sup>

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)14-2370-04

## VISCOELASTIC ANALYSIS OF WELLBORE SHRINKAGE IN SALT FORMATION

Han Jianzeng<sup>1</sup>, Li Zhonghua<sup>1</sup>, Lian Zhanghua<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

(<sup>2</sup>Petroleum Engineering Department, Southwest Petroleum Institute, Chengdu 610500 China)

**Abstract** In drilling engineering, drill pipe often sticks in salt formation because of wellbore shrinkage. In the past, salt formation is often regarded as an elastic or elastic-plastic body, and the effect of time is not taken into account. However, engineering practice shows that the deformation of deep salt rock increases with time, that is, salt formation is of viscoelasticity. Supposing that salt formation is an isotropic and homogeneous viscoelastic body which obeys the Maxwell model, the wellbore shrinkage is studied carefully, and an expression for predicting wellbore shrinkage is proposed according to the elasticity-viscoelasticity correspondence principle. The expression will provide important reference to solving the problems of wellbore stability and the sticking of drill pipe in salt formation.

**Key words** rock mechanics, salt formation, wellbore shrinkage, viscoelasticity

## 1 引言

油气钻井工程中, 经常遇到厚度从几十米到数百米不等的盐岩层。在江汉、华北、中原、塔里木等油田, 盐岩层埋深通常在 3 000~5 000 m。这种

处于较高温度和围压环境中的盐岩具有较强的流变性, 井眼钻穿盐岩层后, 由于岩石蠕变则会发生井眼缩径。大量的工程实践表明, 盐岩层段钻井工艺复杂, 井下事故频繁<sup>[1~3]</sup>, 如果处理不当, 可能导致埋钻具或大段井眼报废, 严重阻碍了对盐岩下面的储集层的勘探开发。因此, 深入研究盐岩层井眼

2003年3月3日收到初稿, 2003年5月20日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金(50074025)资助项目。

作者 韩建增 简介: 男, 31岁, 1995年毕业于西南石油学院油建工程系, 现为上海交通大学和宝山钢铁股份有限公司博士后, 主要从事石油工程岩石力学、管柱力学方面的研究工作。E-mail: hanjz@sjtu.edu.cn。

缩径问题具有十分重要的工程意义。

## 2 盐岩流变模型及本构关系

初期, 由于人们对盐岩的工程特性认识不足及计算技术上的困难, 常把盐岩作为弹性体来考虑。弹性模型本构关系仅包含杨氏模量和泊松比两个参数, 公式推演和计算过程的实施都较为简便, 可是往往与工程实际情况不符。虽然也有人采用较先进的弹塑性模型<sup>[4, 5]</sup>, 然而它仍没有考虑其时间效应。一般说来, 软弱岩层(例如盐岩、软泥岩等)的变形常随时间而增长, 呈粘弹性状态, 只有采用粘弹性模型才能描述深部盐岩的实际受力变形状态。

后来, 为了描述盐岩的粘弹性本构关系, 人们曾对盐岩的时间效应做了大量的研究<sup>[6~13]</sup>。其中最富有成果性的研究是文[6]研制了一套高温高压三轴蠕变试验装置, 通过对某地区岩样的蠕变试验, 可以回归出该地区盐岩的蠕变方程, 从而对现场施工起到了很好的指导作用。这种经验公式与具体的试验结果相吻合, 但是, 不同地区的盐岩具有不同的蠕变特性, 推广到其他地区时, 可能导致较大的误差。另一种描述盐岩粘弹性本构关系的方法是模型法, 它把盐岩抽象成一系列的粘弹性模型, 不同的模型描述不同的蠕变特性。这种方法的适应性较强, 本文采用的即为粘弹性模型法。

据不完全统计<sup>[14, 15]</sup>, 现有的粘弹性模型不少于百种, 每种模型均有一定的局限性, 其中大多数模型由于数学处理上的困难, 在实际中应用不多。据西南石油学院 2000 年的科研报告“防止江汉油田盐岩层套管挤毁技术研究”, 麦克斯韦模型(见图 1)能较好地模拟盐岩的流变特性, 适当地选择模型参数就可以很好地拟合大多数工程中遇到的情况。

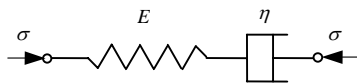


图 1 麦克斯韦模型  
Fig.1 Maxwell model

因为弹簧(H)和粘壶(N)是串联的, 所以弹簧的应力  $\sigma_H$  与粘壶的应力  $\sigma_N$  相等, 且都等于模型的总应力  $\sigma$ ; 而模型的总应变  $\varepsilon$  为弹簧的应变  $\varepsilon_H$  与粘壶的应变  $\varepsilon_N$  之和, 即

$$\varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_N \quad (1)$$

对于弹簧 H, 有

$$\sigma = \sigma_H = E\varepsilon_H \quad (2)$$

对于粘壶 N, 有

$$\sigma = \sigma_N = \eta \dot{\varepsilon}_N \quad (3)$$

由式(1)~(3)得

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为粘性系数,  $E$  为杨氏模量。

式(4)即为麦克斯韦模型的一维形式的应力-应变本构关系式, 相应的三维形式的应力-应变本构关系式为

$$s_{ij} + \frac{\eta}{G} \dot{s}_{ij} = 2\eta \dot{e}_{ij} \quad (5)$$

式中:  $G$  为剪切模量。

式(5)也可写作

$$Ps_{ij} = 2Qe_{ij} \quad (6)$$

式中:  $P, Q$  为微分算子。

$$\left. \begin{aligned} P &= 1 + \frac{\eta}{G} \frac{\partial}{\partial t} \\ Q &= \eta \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## 3 井眼缩径分析

### 3.1 力学模型及基本假设

盐岩具有较强的流动性, 井下高温使其流动性更加明显。井眼钻穿盐岩层后, 原地应力场的平衡遭到破坏, 次生应力场的作用使得岩石向着井眼方向流动, 造成井眼直径减小, 直至达到新的平衡状态。

由于深部盐岩层一般较厚, 因此, 可以假设沿井眼轴线方向上不产生应变, 即井眼变形可视为平面应变问题。为便于研究, 本文作如下 3 个假设: (1) 井眼垂直钻穿盐岩层; (2) 盐岩为均匀、各向同性的粘弹性连续介质; (3) 初始地应力引起的井壁位移在井眼被钻开之前已经完成。

取  $X, Y$  轴与水平地应力的主方向重合,  $X, Y$  方向的主应力分别  $\sigma_H, \sigma_h$ , 井内泥浆压力为  $P_m$ , 力学模型如图 2 所示。

### 3.2 井眼缩径的弹性解

由弹性力学理论可知, 井眼被钻开之前, 在初始地应力  $\sigma_H, \sigma_h$  的作用下, 井壁处任一点已经发生的初始径向位移  $u_r^0$  为<sup>[16]</sup>

$$u_r^0 = -\frac{1-\mu^2}{E} r \left[ \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} (\sigma_H + \sigma_h) + \right]$$

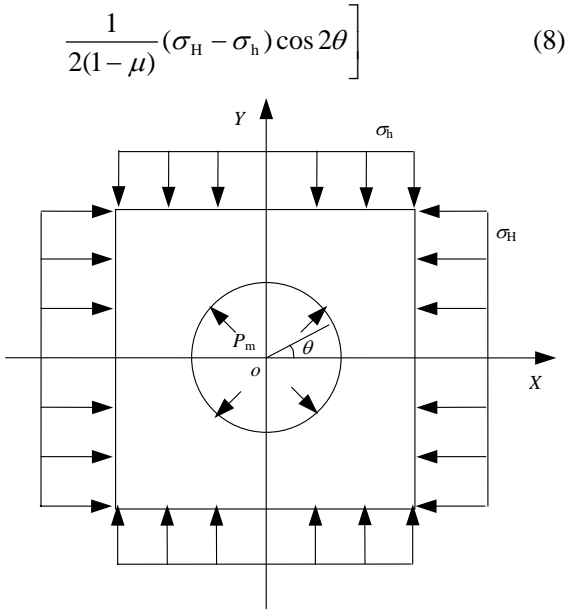


图2 盐岩层井眼力学模型

Fig.2 Mechanical model of wellbore in salt formation

式中:  $r$  为井眼半径,  $\theta$  为角度。

井眼被钻开之后, 在地应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_h$  的作用下, 井壁任一点径向位移为<sup>[16]</sup>

$$u_r^1 = -\frac{1-\mu^2}{E} r [(\sigma_H + \sigma_h) + 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta] \quad (9)$$

在井内泥浆压力  $P_m$  的作用下, 井壁任一点径向位移为<sup>[17]</sup>

$$u_r^2 = \frac{1+\mu}{E} r P_m \quad (10)$$

根据叠加原理, 在井内泥浆压力  $P_m$  和地应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_h$  的作用下, 井壁任一点的径向位移为

$$u_r = u_r^1 + u_r^2 - u_r^0 = \frac{1+\mu}{2E} r [2P_m - (\sigma_H + \sigma_h) - (3-4\mu)(\sigma_H + \sigma_h) \cos 2\theta] \quad (11)$$

### 3.3 井眼缩径的粘弹性解

将  $\mu = \frac{3K-2G}{6K+2G}$ ,  $E = \frac{9KG}{3K+G}$  代入式(11), 得

$$u_r = \frac{r}{4G} \left[ 2P_m - (\sigma_H + \sigma_h) - \frac{3K+7G}{3K+G} (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \right] \quad (12)$$

式中:  $K$  为体积模量。对式(12)取拉普拉斯变换, 得

$$\bar{u}_r = \frac{r}{4} \left[ \frac{\bar{P}}{sQ} (2P_m - \sigma_H - \sigma_h) - \right.$$

$$\left. \frac{\bar{P}(3K\bar{P} + 7\bar{Q})}{sQ(3K\bar{P} + \bar{Q})} (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \right] \quad (13)$$

由麦克斯韦模型的三维本构关系式(6), 得

$$\bar{P} = 1 + \frac{\eta}{G} s, \quad \bar{Q} = \eta s \quad (14)$$

$$\bar{u}_r = \frac{r}{4} \left\{ \frac{1 + \frac{\eta}{G} s}{\eta s^2} (2P_m - \sigma_H - \sigma_h) - \frac{\left(1 + \frac{\eta}{G} s\right) \left[3K \left(1 + \frac{\eta}{G} s\right) + 7\eta s\right]}{\eta s^2 \left[3K \left(1 + \frac{\eta}{G} s\right) + \eta s\right]} (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \right\} \quad (15)$$

对式(15)取拉普拉斯逆变换, 并将半径  $r$  改为直径  $D$ , 则井眼缩径变形的粘弹性解为

$$u_r = \frac{D}{8} \left\{ \left( \frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} \right) (2P_m - \sigma_H - \sigma_h) - \left[ \frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} + \frac{2}{K} - \frac{2G\eta e^{-\frac{3KG}{(3K+G)\eta}t}}{(3K+G)K\eta} \right] (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \right\} \quad (16)$$

## 4 泥浆密度对井眼缩径的影响

某盐岩层弹性模量  $E = 1.823 \times 10^4$  MPa, 粘性系数  $\eta = 7.086 \times 10^7$  MPa · s, 泊松比  $\mu = 0.4$ , 最大水平地应力  $\sigma_H = 72$  MPa, 最小水平地应力  $\sigma_h = 58$  MPa, 初始井径  $D = 216$  mm, 井深  $H = 3000$  m。根据式(16), 当井内泥浆密度  $\rho_m$  分别为 1.50, 1.70, 1.90, 2.10, 2.30, 2.50 g/cm<sup>3</sup> 时的井眼缩径情况如图3所示。

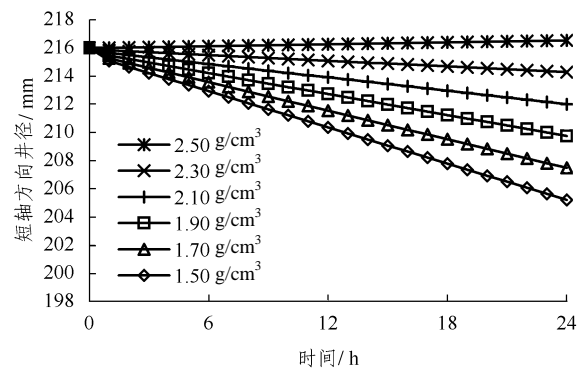


图3 泥浆密度对井眼缩径的影响

Fig.3 Effect of mud density on wellbore shrinkage

一般井眼都有数千米之深,从开钻到完井要经历几个月的时间。为保证钻具、电测仪器及套管顺利下井,要求井眼不能缩径或缩径较小,这就要求选用合适的钻井液密度控制井眼液柱压力,抑制井眼的径向蠕变变形。如果泥浆密度太低,则井眼缩径严重,这在工程上表现为井眼一打开,就在较短的时间内发生较大的井眼缩径,容易造成卡钻事故或井下复杂情况。对于这种易缩径卡钻的盐岩层,随着泥浆密度的增大,井眼缩径变形逐渐减缓,井眼发生同等缩径变形的时间将大大延长。当然,泥浆密度也不能太高,太高了则会导致井眼扩径,本例中当泥浆密度大于  $2.50 \text{ g/cm}^3$  时,井径开始随时间的延长有扩大的趋势。另外,泥浆密度过高也会影响钻速,并有可能产生压差卡钻或者压裂地层造成井漏。根据油气钻井工程经验,认为安全钻井的允许井眼缩径速率为  $0.001 \text{ mm/h}$ 。对于本例而言,临界泥浆密度为  $2.23 \text{ g/cm}^3$ ,泥浆密度高于此临界值并合理安排作业时间是保持正常钻井和不发生缩径卡钻的必要条件。

需要指出的是,采用饱和盐水泥浆并加大泥浆密度防止盐岩层井眼缩径卡钻的传统措施,在高温、高地应力区域不能从根本上解决问题。钻井工程中,无限制地增大泥浆密度容易使其他岩性层段产生复杂情况,并且影响钻速。有关研究表明<sup>[18]</sup>,采用适当密度的欠饱和盐水泥浆,通过调整氯根,让欠饱和盐水泥浆能满足井眼截面的盐溶解速率与缩径速率的平衡,从而达到井眼缩径的目的,这是解决此类问题的有效方法。

## 5 结 语

盐岩层井眼缩径变形受泥浆密度、岩层特性参数、地应力和时间等因素的影响。在盐岩层特性参数、地应力等条件一定的前提下,泥浆密度越大,井眼缩径速率越小。在钻井工程中,应合理安排作业时间,根据井眼缩径速率与泥浆密度的变化关系确定适当的泥浆密度。针对盐岩层钻井问题的复杂性,本文根据粘弹性理论建立了盐岩层井眼缩径的

计算式,对解决盐岩层井眼缩径卡钻及井壁稳定问题具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001
- 2 李允子, 李根明. 中原油田复合盐层及其钻井工艺技术[J]. 石油钻采工艺, 1985, 7(6): 20~25
- 3 孙建成, 王宝新, 苗希庆. 胜利油田郝科 1 井套管挤毁的启示[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(4): 21~27
- 4 练章华, 张先普, 赵国珍等. 岩石、水泥环、套管相互作用的弹塑性有限元力学模型[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(2): 97~103
- 5 金 衍, 陈 勉, 柳贡慧. 盐膏岩地层的井眼缩径变形分析[J]. 石油大学学报, 1999, 23(2): 37~39
- 6 邓金根, 黄荣樽. 200 MPa 200°C 高温高压三轴岩石流变特性的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 63~66
- 7 邓金根. 控制油井盐层段流变缩径的泥浆密度的计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 522~528
- 8 黄荣樽, 邓金根. 流变地层的粘性系数及其影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 836~839
- 9 周祖辉, 黄荣樽, 庄锦江. 大庆泥岩的三轴蠕变试验研究[J]. 华东石油学院学报, 1985, (4): 22~30
- 10 宋卫东, 陆丽娟, 魏凤勇. 塔里木盆地 A 区深部盐层蠕变特性试验研究[J]. 断块油气田, 1999, 6(2): 49~52
- 11 刘新荣, 姜德义, 余海龙等. 岩盐变形特性的试验研究[J]. 矿冶工程, 1999, 19(4): 12~15
- 12 杨春和, 殷建华, Daemen J J K. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262~265
- 13 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
- 14 Hossain M I, Faruque M O, Zaman M. Creep modeling of rock salts for geoenvironmental application[J]. Transactions of the ASME, 1995, 117(1): 108~114
- 15 周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996
- 16 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994
- 17 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990
- 18 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): 1 111~1 114