

# 钻井液密度对井眼缩径影响的黏弹性分析

王耀锋<sup>1</sup> 李军强<sup>1</sup> 杨美全<sup>2</sup> 杨小辉<sup>3</sup> 王水航<sup>4</sup>

(1. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石化华北石油局 西部工程公司, 新疆 轮台 841600; 3. 西北工业大学 机械学院, 陕西 西安 710072; 4. 中国石油测井有限公司 技术中心, 陕西 西安 710021)

**摘 要:**采用开尔文-沃伊特流变模型, 推导出了均匀地应力下盐膏层井眼缩径的黏弹性解析解, 得到了实际可以测量到的井径变化值, 并分析了钻井液密度对井眼缩径的影响。对江汉油田王斜78-1井进行了实例分析, 结果表明, 盐膏层井眼缩径与岩层自身蠕变特性密切相关, 井眼缩径率随着时间的增加而减小且最后趋于一稳定值, 随着钻井液密度升高, 井眼缩径率降低, 当钻井液密度升至某一值时, 井眼缩径率降至零, 此密度即为临界钻井液密度(王斜78-1井的临界钻井液密度为 2.4 kg/L)。钻井液密度高于此临界值并依据岩层自身蠕变特性合理安排作业时间是保证钻井过程中不发生缩径和卡钻等事故的必要条件。

**关键词:**钻井液密度; 井眼; 缩径; 黏弹性分析; 盐膏层; 流变模式; 王斜78-1井

**中图分类号:** TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2009)02-0018-04

由于盐膏层岩石的蠕变特性, 钻井中常发生井眼缩径、卡钻、固井后挤毁套管或大段井眼报废等事故, 造成重大经济损失<sup>[1-3]</sup>。因此, 深入研究盐膏层井眼缩径规律具有十分重要的理论和现实意义。现有文献大多都利用快速拉格朗日元方法(数值软件 FLAC)分析盐膏层的井眼缩径规律<sup>[4-10]</sup>。韩建曾等<sup>[11]</sup>假设盐岩服从麦克斯韦模型, 根据弹性-黏弹性对应原理, 对井眼缩径的变化规律进行了理论研究。这些研究的建模和理论求解过程都比较复杂。对于一些特定的黏弹性问题, 可以利用现成的弹性力学方程解答, 用解基本方程的方法求解<sup>[12-13]</sup>。基于此, 笔者采用开尔文-沃伊特流变模型, 从材料的蠕变方程、几何变形协调及静力平衡三方面进行了分析, 推导出了均匀地应力下盐膏层井眼缩径的黏弹性解析解, 并采用实例分析了钻井液密度对井眼缩径的影响。

## 1 黏弹性流变模型及其本构方程

为了形象描述岩石的黏弹性, 通常采用两种方法: 经验法和模型法。由于经验法是利用岩石的试验数据拟合求得经验公式, 适用范围窄。而模型法是把岩石材料抽象成一系列黏弹性模型, 不同的模型描述不同的蠕变特性, 适应性强。由于开尔文-沃伊特模型(亦称三单元模型)能较好地模拟围岩受力变形的黏弹性, 且比较简单, 在解决实际问题中经常

被采用<sup>[13-14]</sup>。该模型由一根弹簧(H)和一个开尔文单元(K)串联而成, 如图 1 所示。

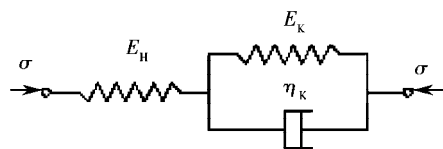


图 1 开尔文-沃伊特模型

因为弹簧(H)和开尔文单元(K)是串联的, 所以弹簧的应力  $\sigma_H$  与开尔文单元的应力  $\sigma_K$  相等, 且都等于模型的总应力  $\sigma$ , 而模型的总应变  $\epsilon$  为弹簧的应变  $\epsilon_H$  与开尔文单元的应变  $\epsilon_K$  之和。

$$\sigma = \sigma_H = \sigma_K \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_H + \epsilon_K \quad (2)$$

对于弹簧 H:

$$\sigma = \sigma_H = E_H \epsilon_H \quad (3)$$

对于开尔文单元 K:

$$\sigma = \sigma_K = E_K \epsilon_K + \eta_K \dot{\epsilon}_K \quad (4)$$

式中,  $\eta_K$  为黏性系数,  $\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。

收稿日期: 2008-09-22; 改回日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“复杂条件下钻井技术基础研究”(编号: 50234030)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)重点项目“旋转导向钻井系统关键技术研究”(编号: 2003AA602013)联合资助

作者简介: 王耀锋(1979—), 男, 陕西宝鸡人, 在读硕士研究生, 工程师, 主要从事石油管柱力学方面的研究工作。

联系电话: (029) 88382608

对式(2)、(3)、(4)进行拉普拉斯变换,得:

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_H + \bar{\epsilon}_K \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = E_H \bar{\epsilon}_H \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = E_K \bar{\epsilon}_K + \eta_K s \bar{\epsilon}_K \quad (7)$$

将式(6)、(7)带入式(5)得:

$$[(E_H + E_K) + \eta_K s] \bar{\sigma} = E_H (E_K + \eta_K s) \bar{\epsilon} \quad (8)$$

对式(8)进行拉普拉斯反变换,得:

$$(E_H + E_K) \sigma + \eta_K \dot{\sigma} = E_H E_K \epsilon + E_H \eta_K \dot{\epsilon} \quad (9)$$

整理式(9),得:

$$\sigma + \frac{\eta_K}{E_H + E_K} \dot{\sigma} = \frac{E_H E_K}{E_H + E_K} \epsilon + \frac{E_H \eta_K}{E_H + E_K} \dot{\epsilon} \quad (10)$$

式(10)即为开尔文-沃伊特模型的一维本构方程。

相应的三维本构方程为:

$$s_{ij} + \frac{\eta_K}{G_H + G_K} \dot{s}_{ij} = \frac{2G_H G_K}{G_H + G_K} e_{ij} + \frac{2G_H \eta_K}{G_H + G_K} \dot{e}_{ij} \quad (11)$$

式中,  $G_H$  为 H 体中弹簧的剪切模量, MPa;  $G_K$  为 K 体中弹簧的剪切模量, MPa。

设自  $t = 0$  时起对模型施加常应力  $\sigma = \sigma_0$ 。引入初始条件  $\epsilon(t_0) = \sigma_0 / E_H$ , 由本构方程式(10)得:

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_K} (1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t}) \right] \quad (12)$$

式(12)即为开尔文-沃伊特模型的一维蠕变方程。

相应的三维蠕变方程为:

$$2e_{ij} = \left( \frac{1}{G_H} - \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right) s_{ij}^c e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t} + \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} s_{ij}^c \quad (13)$$

式中,  $s_{ij}^c$  为应力偏张量的恒定值, MPa。

## 2 井眼缩径黏弹性分析

### 2.1 力学模型及假设

为便于研究,笔者作如下假设:1)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;2)井眼垂直钻穿岩层;3)盐岩为均匀、各向同性的黏弹性介质。地应力为  $p_b$ , 井眼内压为  $p_a$ 。其力学模型如图 2 所示。

### 2.2 黏弹性分析

对于外压为  $p_b$ , 内压为  $p_a$  的厚壁圆筒, 由弹性力学拉梅公式<sup>[15]</sup>得:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{a^2(b^2 - r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} p_a - \frac{b^2(a^2 - r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} p_b \\ \sigma_\theta = -\frac{a^2(b^2 + r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} p_a + \frac{b^2(a^2 + r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} p_b \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\sigma_r$  为厚壁圆筒径向应力, MPa;  $\sigma_\theta$  为厚壁圆筒环向应力, MPa;  $a$  为厚壁圆筒内径, mm;  $b$  为厚壁

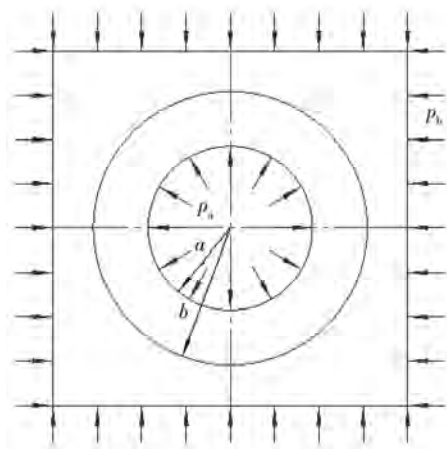


图 2 井眼力学模型

圆筒外径, mm。

井眼围岩可以看成厚壁圆筒的问题, 若将参数  $b \rightarrow \infty$  及  $a/b \rightarrow 0$  代入式(14), 可得岩层应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_r = p_b + \frac{a^2}{r^2} (p_a - p_b) \\ \sigma_\theta = p_b + \frac{a^2}{r^2} (p_b - p_a) \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, 岩层应力场与时间无关, 其应力是恒定的, 属于蠕变, 可直接由蠕变方程式(13)求解变形和位移。式(15)中的第一项为原岩层应力, 第二项为井眼钻开后的附加应力。原岩层应力为均匀地应力场, 只能造成体积应变, 不产生塑性变形和流变, 所以在求解井眼钻开后流变问题时不予考虑。因此, 引起井眼钻开后流变的附加应力场为:

$$\begin{cases} \sigma'_r = \frac{a^2}{r^2} (p_a - p_b) \\ \sigma'_\theta = \frac{a^2}{r^2} (p_b - p_a) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\sigma'_r$  为附加应力场径向应力, MPa;  $\sigma'_\theta$  为附加应力场环向应力, MPa。

采用极坐标, 将式(13)展开得到其切向应变的蠕变方程为:

$$2(\epsilon'_\theta - \epsilon'_m) = \left( \frac{1}{G_H} - \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right) (\sigma'_\theta - \sigma'_m) e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t} + \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} (\sigma'_\theta - \sigma'_m) \quad (17)$$

式中  $\epsilon'_\theta, \epsilon'_m$  为附加应力场的应变;  $\sigma'_\theta, \sigma'_m$  为附加应力场的应力, MPa;  $\sigma'_m = \frac{\sigma'_\theta + \sigma'_r + \sigma'_z}{3}$ 。

对于平面应变问题, 有:

$$\sigma'_z = \mu(\sigma'_r + \sigma'_\theta) \quad (18)$$

将式(16)、(18)代入式(17)得:

$$\sigma'_m = 0 \quad (19)$$

由(19)式可得:

$$\epsilon'_m = \frac{\sigma'_m}{3K} = 0 \quad (20)$$

式中,  $K$  为体积弹性模量, MPa。

由式(19)和式(20)可得:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}'_m &= 0 \\ \dot{\epsilon}'_m &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

将式(19)~(21)代入式(17)得:

$$2\epsilon'_\theta = \frac{a^2}{r^2} (p_b - p_a) \left[ \left( \frac{1}{G_H} - \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right) e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t} + \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right] \quad (22)$$

由轴对称问题的几何方程, 可得:

$$\epsilon'_\theta = \frac{u'}{r} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)得:

$$u' = \frac{a^2}{2r} (p_b - p_a) \left[ \left( \frac{1}{G_H} - \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right) e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t} + \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right] \quad (24)$$

在井壁  $r = a$  处, 其相对位移方程为:

$$u'_a = \frac{a}{2} (p_b - p_a) \left[ \left( \frac{1}{G_H} - \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right) e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t} + \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} \right] \quad (25)$$

当  $t = 0$  时, 式(25)为:

$$(u'_a)_0 = \frac{a}{2G_H} (p_b - p_a) \quad (26)$$

在实际钻井过程中不可能测量到钻穿地层瞬间发生的位移。因此根据叠加原理, 井壁任一点的径向相对位移为:

$$\begin{aligned} u_a &= u'_a - (u'_a)_0 \\ &= \frac{a}{2} (p_b - p_a) \left( \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} - \frac{1}{G_H} \right) (1 - e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t}) \end{aligned} \quad (27)$$

钻井液作用在井壁上的压力为:

$$p_a = \rho g h \quad (28)$$

式中,  $\rho$  为钻井液密度,  $g/cm^3$ ;  $h$  为井深, m。

将式(28)代入式(27)可得井壁任一点的径向相对位移为:

$$u_a = \frac{a}{2} (p_b - \rho g h) \left( \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} - \frac{1}{G_H} \right) (1 - e^{-\frac{G_K}{\eta_K} t}) \quad (29)$$

### 3 实例分析

以江汉油田王斜78-1井为例进行计算, 文献

[16]应用位移反演理论证实了该井的盐膏层蠕变属于开尔文-沃伊特模型, 取参数如下<sup>[10,17]</sup>: 初始井径 230 mm, 井深 3 000 m, 上覆岩层密度 2.40 kg/L, 剪切模量  $G_H$  为 120.61 MPa,  $G_K$  为 63.25 MPa, 黏性系数  $\eta_K$  为  $3.207 \times 10^7$  MPa · s, 泊松比  $\mu$  为 0.4。根据式(29), 计算在井深 2 906.75 m 处, 当钻井液密度  $\rho$  分别为 1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 kg/L 时的井眼缩径情况, 结果见图 3 和表 1。

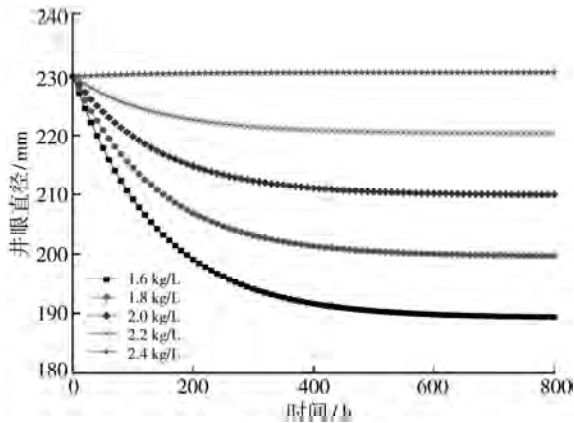


图 3 钻井液密度对井眼缩径的影响

表 1 井眼缩径率及井眼缩径值

钻井液密度/ kg · L <sup>-1</sup>	井眼缩径率/h <sup>-1</sup>		800 h 后井眼 缩径值/mm
	20 h	100 h	
1.6	0.001 1	0.000 6	40.77
1.8	0.000 9	0.000 5	30.41
2.0	0.000 6	0.000 3	20.05
2.2	0.000 3	0.000 1	9.69
2.4	0	0	0

由图 3 和表 1 可以看出, 在盐膏层中井眼缩径率随着时间的增加而减小且最后趋于一稳定值。当钻井液密度为 1.6 kg/L<sup>3</sup> 时井眼缩径最大, 其值为 40.8mm。随着钻井液密度的增大井眼缩径值逐渐减小, 当钻井液密度为 2.4 kg/L 时井眼缩径值为 0, 即此时井眼直径不缩小也不扩大。所求井眼缩径值与文献[17]实测数据基本一致, 与文献[11]有较大差别, 其主要原因是选取的蠕变模型不同。笔者依据位移反演理论得出的结论采用了开尔文-沃伊特蠕变模型, 而文献[11]采用的是麦克斯韦蠕变模型。

在地下温度和压力的作用下, 盐岩的蠕变造成井眼的收缩只能靠调整钻井液密度控制井眼内压来实现。钻井液密度过小井眼收缩加剧, 易造成卡钻、挤毁套管等恶性事故。增大钻井液密度虽然能抑制井眼的收缩, 但会影响钻井速度, 增加钻井成本, 压开地层, 造成钻井液漏失。根据现场的实践经验, 安

全钻井的允许井眼缩径率为 0.001 mm/h。实例分析结果表明,王斜78-1井的临界钻井液密度为 2.4 kg/L。经计算,当时间  $t$  大于 62 h 后,图 3 中各密度钻井液下井眼缩径率均小于允许井眼缩径率。

## 4 结论与建议

1)依据位移反演理论所得的结论,采用开尔文-沃伊特模型流变模型,推导出了均匀地应力下盐膏层井眼缩径的黏弹性解析解,得到了实际可以测量到的井径变化值,分析了钻井液密度对井眼缩径的影响。

2)因采用不同的蠕变模型,计算出的井眼缩径结果不同,因此,利用位移反演理论辨识盐膏层的蠕变规律十分重要。

3)钻井液密度过大或过小对盐膏层钻井、固井均不利。因此,钻井液密度应略高于临界钻井液密度。

4)盐膏层井眼缩径率随着时间的变化而变化,且最后趋于一稳定值。因此,应根据井眼缩径的变化曲线合理安排作业时间,采取合理、安全的钻井措施。

5)建议在塔里木油田等具有大段盐膏层的油气井应用该方法以解决盐膏层钻井、完井难题,避免卡钻、挤毁套管等恶性事故的发生。

## 参 考 文 献

- [1] 王学枫,卢道,李广.塔河油田 TK110X 井盐膏层钻井液技术[J].石油钻探技术,2008,36(2):77-80.
- [2] 邹灵战,邓金根,曾义金,等.深井盐层套管非均匀载荷计算与

套管设计方法研究[J].石油钻探技术,2008,36(1):23-27.

- [3] 裴建忠,刘天科,孙启忠,等.胜利 1 井钻井事故的预防与处理[J].石油钻探技术,2007,35(1):18-21.
- [4] 曾义金,王文立.深层膏岩蠕变特性研究及其在钻井中的应用[J].石油钻探技术,2005,33(5):48-51.
- [5] 赵金洲.深井蠕变地层钻井液密度优化技术[J].岩土力学,2007,28(5):915-920.
- [6] 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(自然科学版),1999,23(2):37-39.
- [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] 曾义金.深部盐膏层蠕变关系研究[J].石油钻探技术,2004,32(3):5-7.
- [9] 曾义金,陈勉.盐岩井眼溶解速率的试验测定[J].石油钻探技术,2003,31(3):1-3.
- [10] 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.
- [11] 韩建增,李中华,练章华.盐膏层井眼缩径黏弹性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(14):2 370-2 373.
- [12] 林元华,曾德智,施太和.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.
- [13] 郑雨天.岩石力学的弹塑性理论[M].北京:煤炭工业出版社,1988:363-367.
- [14] 杨挺青.粘弹性力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1990:23-28.
- [15] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,1990:89-100.
- [16] 林元华,曾德智,施太和,等.盐膏层蠕变规律的反演方法研究[J].石油学报,2005,26(5):111-114.
- [17] 韩建增,施太和,何开平.一种盐膏层蠕变参数的现场评价方法[J].西南石油学院学报,2001,23(3):26-29

[审稿 郝捷年]

## Viscoelastic Analysis of the Affect of Drilling Fluid Density on Wellbore Shrinkage

Wang Yaofeng<sup>1</sup> Li Junqiang<sup>1</sup> Yang Meiquan<sup>2</sup> Yang Xiaohui<sup>3</sup> Wang Shuihang<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, china; 2. Western Engineering Company, Huabei Petroleum Administration, Sinopec, Luntai, Xinjiang, 841600, China; 3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072, China; 4. Technology Center, China Petroleum Logging Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710021, China)

**Abstract:** Using Kelvin-Voigt model, an analytical equation to predict wellbore shrinkage was derived and the measurable change of the wellbore diameter in field was obtained. The effect of drilling mud density on wellbore shrinkage is analyzed. The application results on Well Wangxie 78-1 located in Jiangnan Oil-field demonstrate that the wellbore shrinkage are closely related to formation creep characteristics. The wellbore shrinkage is decreasing with the increasing of time and finally reaches a stable value. With the increasing of drilling fluid density, the wellbore shrinkage ratio decreases. When drilling fluid density reaches a critical value, wellbore shrinkage ratio is zero. This density is the critical drilling fluid density (2.4 g/cm<sup>3</sup> for Well Wangxie 78-1). Keeping the drilling mud density above this critical density and optimizing the operation time according to the formation creep characteristics are very important in order to avoid drilling pipe sticking and wellbore shrinkage and other drilling accidents.

**Key words:** drilling fluid density; borehole; hole diameter reduction; viscoelastic analysis; evaporate bed; rheological model; Well Wangxie 78-1