

# 深井安全钻井液密度窗口影响因素

李玉伟<sup>1</sup>, 艾池<sup>1</sup>, 王志成<sup>2</sup>, 胡超洋<sup>1</sup>, 郝明<sup>1</sup>, 栗爽<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学 教育部提高油气采收率重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国海洋石油工程股份有限公司设计公司 工艺部, 天津 300451)

**摘要:** 考虑钻井液渗滤造成井壁岩石孔隙压力变化和钻井液与地层岩石温差产生的附加应力和应变, 推导了孔隙度与孔隙压力和温差的理论关系, 建立了考虑孔隙压力、温差及孔隙度变化的深井安全钻井液密度窗口计算模型。应用模型计算结果表明: ①深井钻井液与井壁岩石与钻井液温差一定时, 随着钻井液渗滤作用的增强, 井壁岩石孔隙压力增加, 导致坍塌压力增大, 破裂压力减小, 安全钻井液密度窗口变小, 不利于安全钻井。②当井壁岩石孔隙压力一定时, 若钻井液使井壁岩石降温, 则随着温差的增加, 坍塌压力减小, 破裂压力增加, 安全钻井液密度窗口范围变大, 有利于安全钻井; 若钻井液使井壁岩石升温, 则随着温差的增大, 坍塌压力增大, 破裂压力减小, 安全钻井液密度窗口变小, 不利于安全钻井。

**关键词:** 深井 井壁 安全钻井液密度窗口 坍塌压力 破裂压力

**中图分类号:** TE22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)01-0107-04

近年来, 随着深部油气藏的大规模开发<sup>[1-2]</sup>, 深井数量大幅增加, 而深部地层温度和压力变化对安全钻井液密度窗口的影响尚不明确<sup>[3]</sup>。随着井深的增加, 井底压力和温度增大, 使得井下环境愈加复杂, 在钻井过程中容易产生喷、漏、塌和卡等事故, 这大多是由于窄安全钻井液密度窗口条件下, 对窗口计算不准确或钻井液密度控制不当造成的, 如果能够在钻前准确分析出温度和压力变化对安全钻井液密度窗口的影响, 就能够为深井安全钻井提供理论指导<sup>[4-6]</sup>。为此, 笔者考虑了钻井液渗滤对井壁岩石孔隙压力的影响及钻井液与地层岩石温差产生的附加应力和应变, 推导了孔隙度与孔隙压力和温差的理论关系, 建立了考虑孔隙压力变化和钻井液与地层岩石温差引起孔隙度变化的安全钻井液密度窗口计算模型, 以期补充和完善现有深井安全钻井液密度窗口的计算方法。

## 1 井壁岩石孔隙度变化模型

在深井钻井过程中, 钻井液渗滤引起的井壁岩石孔隙压力变化以及钻井液与地层岩石温差作用,

使岩石介质变形, 导致孔隙度发生变化。

当孔隙压力和温度发生变化后, 孔隙度也发生变化, 其计算式为

$$\phi = \frac{(V_{b0} - \Delta V_b) - (V_{s0} - \Delta V_s)}{V_{b0} - \Delta V_b} \quad (1)$$

式中:  $\phi$  为孔隙压力和温度变化后的孔隙度;  $V_{b0}$  为岩石总体积初始值,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta V_b$  为岩石总体积变化值,  $\text{m}^3$ ;  $V_{s0}$  为岩石骨架初始体积,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta V_s$  为岩石骨架体积变化值,  $\text{m}^3$ 。

岩石的总体积应变和岩石骨架体积应变分别定义为

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_b}{V_b} \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_v$  为岩石的总体积应变;  $V_b$  为岩石总体积,  $\text{m}^3$ ;  $\varepsilon_s$  为岩石骨架体积应变;  $V_s$  为岩石骨架体积,  $\text{m}^3$ 。

将式(2)和式(3)代入式(1), 得到变化后孔隙度的表达式为

收稿日期: 2012-12-04。

作者简介: 李玉伟, 男, 在读博士研究生, 从事岩石力学、油水井增产增注方面的研究。联系电话: 13836764227, E-mail: liyuweibox@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“水力压裂岩体损伤演化与微裂缝形成研究”(50974028), 国家青年科学基金项目“基于分数阶理论泥岩动态蠕变细观损伤机理研究与套管外挤损坏判别标准制定”(51104032), 黑龙江省研究生创新科研基金项目“基于分形与损伤理论的巷道围岩稳定性研究”(YJSCX2011-115HLJ)。

$$\phi = \phi_0 - (1 - \phi_0) \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_s}{1 - \varepsilon_v} \quad (4)$$

式中:  $\phi_0$  为初始孔隙度。

由式(4)可知,岩石总体积应变和岩石骨架体积应变的共同作用导致孔隙度发生变化。

根据岩石孔隙压缩系数的定义,并考虑岩石骨架体积变化,得到岩石总体积应变与岩石孔隙压缩系数的关系式<sup>[7]</sup>为

$$C_\phi = \frac{1}{\Delta p} \ln \frac{\phi_0 + \varepsilon_v}{\phi_0(1 + \varepsilon_v)} \quad (5)$$

式中:  $C_\phi$  为岩石孔隙压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\Delta p$  为压差,  $\text{MPa}$ 。

李传亮推导的岩石孔隙体积压缩系数和岩石骨架体积压缩系数间的关系式<sup>[8]</sup>为

$$C_p = \frac{\phi_0}{1 - \phi_0} C_s \quad (6)$$

式中:  $C_p$  为岩石孔隙体积压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $C_s$  为岩石骨架体积压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ 。

岩石骨架体积应变与岩石骨架体积压缩系数的关系可表示为

$$C_s = \frac{\varepsilon_s}{\Delta p} \quad (7)$$

李莲明等通过理论推导,得到岩石孔隙压缩系数与岩石孔隙体积压缩系数和岩石骨架体积压缩系数的关系式<sup>[9]</sup>为

$$C_\phi = (1 - \phi_0)(C_p - C_s) \quad (8)$$

将式(5)、式(6)和式(7)代入式(8)并化简整理,得到岩石骨架体积应变与岩石总体积应变的关系式为

$$\varepsilon_s = \frac{1}{2\phi_0 - 1} \ln \frac{\phi_0 + \varepsilon_v}{\phi_0(1 + \varepsilon_v)} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4),得到变化后的孔隙度与岩石总体积应变的关系式为

$$\phi = \phi_0 - \frac{(1 - \phi_0)}{(1 - \varepsilon_v)(2\phi_0 - 1)} \left[ \varepsilon_v(2\phi_0 - 1) - \ln \frac{\phi_0 + \varepsilon_v}{\phi_0(1 + \varepsilon_v)} \right] \quad (10)$$

若忽略岩石骨架体积应变,变化后的孔隙度与岩石总体积应变的关系式为

$$\phi = \frac{\phi_0 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_v} \quad (11)$$

## 2 井壁岩石总体积应变求解

井壁岩石的总体积应变随着孔隙压力和温度变化均会发生相应改变,假设地层岩石为各向同性

弹性材料,则总体积应变应为孔隙压力变化引起的体积应变和温度变化引起的体积应变之和,即

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{vp} + \varepsilon_{vT} \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon_{vp}$  为孔隙压力变化引起的岩石体积应变;  $\varepsilon_{vT}$  为温度变化引起的岩石体积应变。

### 2.1 孔隙压力变化引起的岩石体积应变

在深井钻井过程中,尽管井壁存在泥饼的遮挡作用,但钻井液在压差作用下仍然会渗流进入地层,使得井壁周围岩体的孔隙压力增大,引起岩石的体积应变。笔者认为这一过程是在相对封闭状态下进行的,杨映涛<sup>[10]</sup>根据渗流力学理论,给出的岩石体积应变与孔隙流体压力间关系的基本微分方程为

$$\frac{\partial \varepsilon_{vp}}{\partial t} - (1 - \phi_0) \frac{\partial \varepsilon_{sp}}{\partial t} - \frac{\phi_0}{E} \frac{\partial p_p}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

式中:  $t$  为钻井液渗滤时间,  $s$ ;  $\varepsilon_{sp}$  为孔隙压力变化引起的岩石骨架体积应变;  $E$  为岩石的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $p_p$  为钻井液渗滤后井壁处地层岩石孔隙压力,  $\text{MPa}$ 。

通过对式(13)积分,并结合式(10),可得岩石体积应变与孔隙压力变化之间的关系式。为求解方便,忽略孔隙压力变化引起的岩石骨架体积应变,并对式(13)积分可得

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\phi_0}{E} \Delta p \quad (14)$$

可见,无论对式(13)直接积分,还是通过简化后积分得到式(14),均可确定井壁岩石体积应变与孔隙压力变化的关系式。

### 2.2 温度变化引起的岩石体积应变

在深井钻井时,由于井眼内钻井液温度低于周围岩石的温度,导致井壁岩石收缩变形并产生附加热应力,当井眼内钻井液温度高于周围岩石的温度时,井壁岩石膨胀变形并产生附加热应力。考虑井壁岩石为各向同性材料时,Closmann<sup>[11]</sup>研究得出岩石温差作用下产生的位移变化为

$$\varepsilon_{vx} = \varepsilon_{vy} = \varepsilon_{vz} = \alpha_T(T - T_0) \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon_{vx}$ ,  $\varepsilon_{vy}$  和  $\varepsilon_{vz}$  分别为水平最大主应力、水平最小主应力和上覆岩层应力3个方向的体积应变;  $\alpha_T$  为平面上岩石的热膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $T$  为地层岩石变化后的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  为地层岩石变化前的温度,  $^\circ\text{C}$ 。

针对所研究的井壁岩石平面受力情况,由温度差引起的岩石体积应变为

$$\varepsilon_{vT} = \varepsilon_{vx} + \varepsilon_{vy} = 2\alpha_T(T - T_0) \quad (16)$$

### 3 安全钻井液密度窗口确定

#### 3.1 井壁围岩应力分布

考虑钻井液渗滤效应及温度变化产生的附加应力,得到井壁上的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = p_w - \phi(p_w - p_p) - \frac{\alpha_T E(T - T_0)}{1 - 2\gamma} \\ \sigma_\theta = -p_w + (1 - 2 \cos 2\theta)\sigma_H + (1 + 2 \cos 2\theta)\sigma_h + \\ \quad A(p_w - p_p) - \frac{\alpha_T E(T - T_0)}{1 - 2\gamma} \\ \sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta + A(p_w - p_p) - \\ \quad \frac{\alpha_T E(T - T_0)}{1 - 2\gamma} \end{cases} \quad (17)$$

$$\rho_m = \frac{(1 - \sin \beta)[\sigma_h - 3\sigma_H + (\alpha + A)p_p] + (\phi - \alpha)(1 + \sin \beta)p_p + 2C_0 \cos \beta - 2 \sin \beta \frac{\alpha_T E(T - T_0)}{1 - 2\gamma}}{H[(1 - \sin \beta)(A - 1) + (1 + \sin \beta)(\phi - 1)]} \times 100 \quad (19)$$

式中:  $\rho_m$  为坍塌压力折算的当量钻井液密度,  $g/cm^3$ ;  $\beta$  为岩石内摩擦角,  $(^\circ)$ ;  $C_0$  为岩石的内聚力, MPa;  $H$  为井深, m。

井壁岩石破裂压力折算的当量钻井液密度为

$$\rho_f = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - Ap_p - \alpha p_p + S_t - \frac{\alpha_T E(T - T_0)}{1 - 2\gamma}}{(1 - A)H} \times 100 \quad (20)$$

式中:  $\rho_f$  为破裂压力折算的当量钻井液密度,  $g/cm^3$ ;  $S_t$  为岩石抗张强度, MPa。

### 4 孔隙压力和温差变化对安全钻井液密度窗口的影响规律

为了明确孔隙压力和温差变化对安全钻井液密度窗口的影响规律,计算时取井深为 5 000 m 处的岩石力学参数。其中,水平最大主应力为 115 MPa,水平最小主应力为 80 MPa,泊松比为 0.18,孔隙度为 0.1,岩石抗张强度为 5.0 MPa,内聚力为 25 MPa,内摩擦角为  $30^\circ$ ,有效应力系数为 0.6,热膨胀系数为 0.000 02,地温梯度为  $0.028 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ,地层初始孔隙压力为 50 MPa。

由井壁岩石孔隙压力和温差变化对安全钻井

其中

$$A = \frac{\alpha(1 - 2\gamma)}{1 - \gamma} - \phi \quad (18)$$

式中:  $\sigma_r$  为井壁岩石的径向应力, MPa;  $p_w$  为井眼内钻井液液柱压力, MPa;  $\gamma$  为地层岩石泊松比;  $\sigma_\theta$  为井壁岩石的周向应力, MPa;  $\theta$  为井壁上任一点与水平最大主应力方向的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\sigma_H$  为水平最大主应力, MPa;  $\sigma_h$  为水平最小主应力, MPa;  $\sigma_z$  为井壁岩石的垂向应力, MPa;  $\sigma_v$  为上覆岩层应力, MPa;  $\alpha$  为有效应力系数。

#### 3.2 深井安全钻井液密度窗口计算模型

由井壁应力分布模型计算得到不同地应力状态,依据摩尔-库伦准则<sup>[12]</sup>进行推导,可以得到不同的地层坍塌压力。在常见的上覆岩层应力为中间主应力的条件下,笔者建立了考虑钻井液渗滤效应和温度变化的安全钻井液密度窗口计算模型。推导井壁岩石坍塌压力折算的当量钻井液密度为

液密度窗口的影响结果(图 1,图 2)可以看出:①当温差一定时,随着钻井液渗滤作用的增强,井壁岩石孔隙压力增加,导致坍塌压力增大,破裂压力减小,安全钻井液密度窗口变小,不利于安全钻进。所以,对于窄安全密度窗口钻井,应增强钻井液的造壁性,减少钻井液滤失对井壁稳定的影响。②当井壁岩石孔隙压力一定时,若井壁岩石温度升高,则随着温差的增大,坍塌压力增大,破裂压力减小,安全钻井液密度窗口也会变小,同样不利于安全钻井;若井壁岩石温度降低,则随着温差的增加,坍塌压力减小,破裂压力增加,安全钻井液密度窗口变大,有利于安全钻井。这说明钻井时钻井液对地层

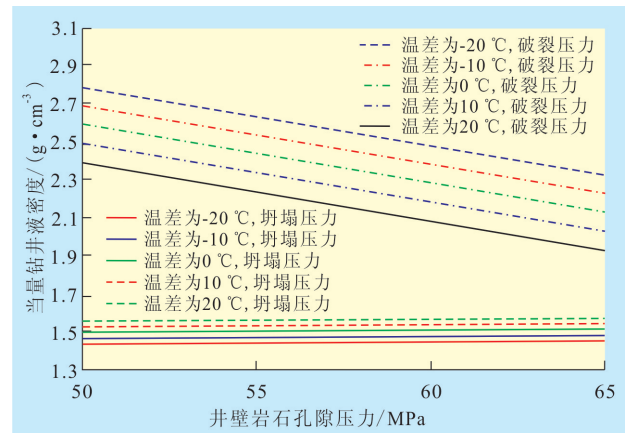


图 1 不同温差条件下井壁岩石孔隙压力变化对安全钻井液密度窗口的影响

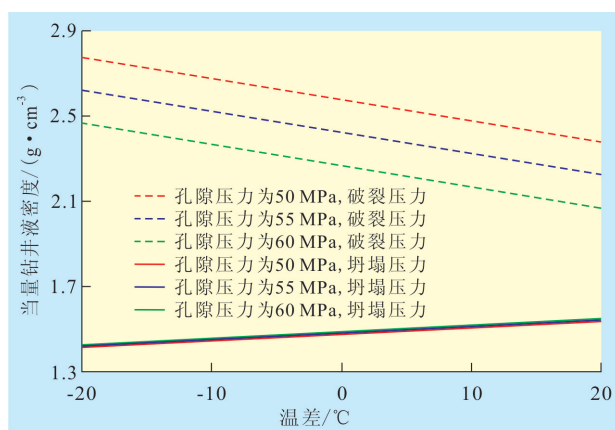


图2 不同井壁岩石孔隙压力条件下温差变化对安全钻井液密度窗口影响

的冷却作用有利于井壁稳定,而钻井液温度升高后,上返循环时对上部地层的升温作用则不利于原有井眼的稳定。另外,由计算结果还可看出,深井钻井时钻井液渗滤引起的井壁岩石孔隙压力变化对地层坍塌压力影响不明显。

## 5 结论

当深井钻井井壁岩石与钻井液温差一定时,随着钻井液渗滤作用的增强,井壁岩石孔隙压力增加,导致坍塌压力增大,破裂压力减小,安全钻井液密度窗口变小,不利于安全钻井。当井壁岩石孔隙压力一定时,若钻井液对井壁岩石降温,则随着温差的增加,坍塌压力减小,破裂压力增加,安全钻井液密度窗口变大,有利于安全钻井;若钻井液对井壁岩石升温,则随着温差的增大,坍塌压力增大,破

裂压力减小,安全钻井液密度窗口变小,不利于安全钻井。

### 参考文献:

- [1] 高喜龙,慈国良,曹胜利,等.埕岛油田埕北326A井组钻井液油层保护技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4):106-110.
- [2] 冯光通,易灿,周波.水平井身轨迹控制技术——以川西地区新场构造须二段新10-1H井为例[J].油气地质与采收率,2011,18(6):107-110.
- [3] 陈森,梁大川,李磊.深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展[J].天然气工业,2008;28(1):85-87.
- [4] Jia Guoyu, Zhang Lisheng, Duan Yongxian. Drilling in high density and thin pressure windows complex formation[C].SPE 104411, 2006.
- [5] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等.高温井地层温度变化对井壁稳定性影响规律研究[J].钻井液与完井液,2004,21(6):15-18.
- [6] 王大勋,刘洪,韩松,等.深部岩石力学与深井钻井技术研究[J].钻采工艺,2006,29(3):6-10.
- [7] 王正茂,胡海燕.出砂储层物性参数动态模型[J].天然气工业,2005,25(6):75-77.
- [8] 李传亮.岩石压缩系数与孔隙度的关系[J].中国海上油气:地质,2003,17(5):355-358.
- [9] 李莲明,李治平,车艳.一种计算地层压力下降岩石压缩系数新方法[J].石油地质与工程,2010,24(3):94-97.
- [10] 杨映涛.论岩石体积应变与孔隙中流体压力的关系及其应用途径[J].水文地质工程地质,1989,16(1):29-31.
- [11] Closmann P J. Thermal stress near a heated fracture in transversely isotropic oil shale[C]. SPE 6183, 1978.
- [12] 郭迎春,薛峰,汪必峰.储层应力应变与裂缝体积密度定量关系研究——以史南油田史深100块沙三段中亚段为例[J].油气地质与采收率,2010,17(4):87-90.

编辑 常迎梅

(上接第106页)

### 参考文献:

- [1] Stavland A, Nilsson S. Segregated flow is the governing mechanism of disproportionate permeability reduction in water and gas shutoff [R]. SPE 71510, 2001.
- [2] Zaitoun A. Water shutoff by relative permeability modifiers [R]. SPE 56740, 1999.
- [3] Lullo G, Rae P. New insights into water control [R]. SPE 79963, 2002.
- [4] 魏发林,刘玉章,唐孝芬,等.新型选择性堵水剂的研究与应用进展[J].油田化学,2007,24(1):93-96.
- [5] Mahajian M, Ranf N. Water control and fracturing [R]. SPE 101019, 2006.
- [6] Guerra R, Maritchev V. Optimized fracture designs with RPM to control water cut [R]. SPE 108781, 2008.
- [7] 付美龙,罗越,何建华,等.聚丙烯酰胺凝胶在裂缝孔隙双重介质中的封堵性能[J].油气地质与采收率,2008,15(3):70-72,75.
- [8] 姚同玉,常迎梅,李继山.阳离子凝胶选择性堵水机理[J].油气地质与采收率,2009,16(2):58-60.
- [9] 谢思宇,叶仲斌,陈洪,等.水溶性聚合物凝胶不成比例降低相渗透率机理研究[J].油气地质与采收率,2010,17(4):52-54,58.
- [10] 舒政,汤思斯,叶仲斌,等.分子间缔合作用对缔合聚合物溶液阻力系数与残余阻力系数的影响[J].油气地质与采收率,2011,18(6):63-66.

编辑 常迎梅