

# 维持井壁稳定的充气钻井液密度确定方法研究<sup>\*</sup>

金衍 陈勉 张广清

(中国石油大学·北京)

金衍等. 维持井壁稳定的充气钻井液密度确定方法研究. 天然气工业, 2006, 26(10): 80-82.

**摘要** 随着我国西部和海洋深层天然气勘探开发不断加快、深入, 钻井不断遇到高温、高压、气侵环境, 受气体侵入的井筒钻井液其密度随温度和压力的变化而变化, 这导致常规井壁稳定研究确定的当量静态钻井液密度不能有效地阻止井下井壁坍塌、缩径引起的复杂情况。国内外高温高压条件下钻井液密度计算模型存在着明显的问题: ①没有考虑气体在环空中的影响, 此时环空中是气液两相流体的流动, 不能用单相液体的情况来对待; ②井筒温度用地温梯度来代替不合理。为此, 在确定有气侵、压耗和温度影响的有效安全钻井液密度时, 分析了气液两相钻井流体受井筒压力、温度、气侵量与钻井液密度的相互影响关系, 结合地层参数、钻井水力参数和钻柱结构, 通过对温度场与压力场的耦合求解, 获取了有效安全钻井液密度的下限和上限, 计算结果在实际钻井中得到了较为成功地应用。

**关键词** 钻井 井壁稳定 钻井液密度 气侵 高温 高压

通过借鉴前人两相流方面的研究成果, 考虑井筒温度为非稳态温度场情况下, 通过有限差分方法进行数值求解, 求解井筒温度和压力场, 确定维持气井井壁稳定的有效安全钻井液密度。

## 一、井筒温度场控制方程

钻井液在井眼中的循环过程分为: ①由地面进入钻柱, 经钻柱向下流动; ②钻井液在井底通过钻头由钻柱进入环空; ③钻井液通过环空向上流动到达地面。

为了建立合适的控制方程引入下列假设: ①流体中的轴向热传导与轴向对流相比可以忽略不计; ②由于环空及钻柱内的流体基本处于紊流状态, 假设环空及钻柱内的流体没有径向稳定梯度; ③流体的热容、密度、热传导系数等参数随温度变化的程度不显著; ④由流体粘性耗散产生的热量可以忽略不计。则井筒钻井液及地层的温度场可由控制方程(1)~(3)和补充方程(4)决定。

钻柱内:

$$A_D \rho_D C_P \frac{\partial T_D(z, t)}{\partial z} + 2\pi r_D U [T_D(z, t) - T_A(z, t)]$$

$$= -\rho_D C_P \frac{\partial T_D(z, t)}{\partial z} \quad (1)$$

环空内:

$$A_A \rho_A C_P \frac{\partial T_A(z, t)}{\partial z} + 2\pi r_D U [T_D(z, t) - T_A(z, t)] +$$

$$2\pi r_B h [T_f(r_B, z, t) - T_A(z, t)] = \rho_D C_P \frac{\partial T_A(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

地层内:

$$\frac{\partial T_f(r, z, t)}{\partial t} = \frac{K_f}{\rho C_{Pf}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_f(r, z, t)}{\partial r} \right] \quad (3)$$

井壁上:

$$2\pi r_B h [T_f(z, t) - T_A(z, t)] = 2\pi r_B K_f \left[ \frac{\partial T_f(z, t)}{\partial r} \right]_{r=r_B} \quad (4)$$

边界条件:

(1) 钻井液入口温度已知, 即:

$$T_D(z=0, t) = T_{D0}(t) \quad (5)$$

(2) 在井底, 钻柱内流体温度与环空温度相等,

即:

$$T_D(z=L, t) = T_A(z=L, t) \quad (6)$$

(3) 地层无穷远处温度等于同一深度无穷远处

<sup>\*</sup> 本文受到国家自然科学基金项目“复杂深井井壁稳定钻前预测研究”(编号: 50304010)、“深部应力敏感性复杂地层的钻井液漏失规律研究”(编号: 90510005)和中国石油创新基金(编号: 05E7015)联合资助。

**作者简介** 金衍, 1972年生, 副教授, 2001年毕业于石油大学(北京)油气井工程专业, 获博士学位。地址: (102249)北京市昌平区中国石油大学 289 信箱。电话: (010)89733799。E-mail: Jiny@bjpau.edu.cn

的温度,即:

$$T_i(r_\infty, z, t) = T_\infty(z) \quad (7)$$

初始条件:

假设在初始时刻地层和井筒内的温度为原始地层温度,即:

$$T_D(z, 0) = T_A(z, 0) = T_i(r, z, 0) = T_\infty(z) \quad (8)$$

式中:  $T_D$ 、 $T_A$ 、 $T_i$  分别为钻柱内流体温度、环空流体温度、地层温度;  $A_D$ 、 $A_A$  分别为钻柱内横截面积、环空截面积;  $v_D$ 、 $v_A$  分别为钻柱内流体流速、环空内流体流速;  $\rho$ 、 $\rho$  循环流体密度、地层密度;  $C_P$ 、 $C_{PI}$  循环流体比热、地层比热;  $r_D$ 、 $r_B$  为钻柱中径半径、井眼半径;  $K_f$  为地层热传导系数;  $h_r$  为井壁对流换热系数;  $U$  为流固表面总体对流换热系数;  $T_0$  为钻井液入口温度;  $T_\infty(z)$  为地层原始温度、深度及地温梯度的函数。

上述方程基本上构成了以后各研究中给出的井筒钻井液及地层温度场分析的理论基础。对于高温高压钻井,含气钻井液的密度是温度和压力的函数。因此,井筒钻井液及地层温度场与井筒流体压力场是耦合在一起的。

## 二、一维两相流条件下井筒压力场

假设两相介质分别有各自的按所占截面计算的截面平均流速,并且两相之间处于热力学平衡状态,则液相和气相两相混合物的连续方程为:

$$\frac{\partial[\rho_g u_g \lambda + \rho_m u_m (1-\lambda)]}{\partial z} + \frac{\partial[\rho_g \lambda + \rho_m (1-\lambda)]}{\partial t} \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  表示两相流体的截面含气率;  $u_g$ 、 $u_m$  为气相和液相的速度;  $\rho_g$ 、 $\rho_m$  为气相和液相的密度。

两相混合物的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_m u_m (1-\lambda) + \rho_g u_g \lambda] + \frac{\partial}{\partial z^2}[\rho_m u_m^2 (1-\lambda) + \rho_g u_g^2 \lambda] + \frac{\partial}{\partial z}(p_g + p_m) + (F_g + F_m) + (W_g + W_m) = 0 \quad (10)$$

式中:  $p_g$ 、 $p_m$  为微元段上气相和液相产生的压力;  $F_g$ 、 $F_m$  为微元段气相和液相的摩阻压降;  $W_g$ 、 $W_m$  为微元段气相和液相的重力压降。

## 三、维持气井井壁稳定的有效安全钻井液密度的确定方法

不考虑温度变化的直井井壁径向应力( $\alpha^N$ )、切

向应力( $\sigma^N$ )为:

$$\alpha^N = p_w - \varphi(p_w - p_p) \quad (11)$$

$$\sigma^N = -p_w + (1 - 2\cos 2\theta)\alpha_1 + (1 + 2\cos 2\theta)\alpha + \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi \right] (p_w - p_p) \quad (12)$$

式中:  $p_w$  为井壁液柱压力;  $p_p$  为地层孔隙流体压力;  $\alpha_1$ 、 $\alpha$  为水平最大地应力和最小地应力;  $\alpha$  为有效应力系数;  $\nu$  为泊松比;  $\varphi$  为地层孔隙度;  $\theta$  为与水平最大地应力方位的夹角。

考虑井壁温度变化,热应变引起的井周附加应力场为:

$$\sigma^T = 0 \quad (13)$$

$$\alpha^T = \frac{E\alpha_m}{3(1-\nu)} [T_w(t) - T_f] \quad (14)$$

式中:  $\alpha^r$ 、 $\sigma^T$  为热应变引起井壁径向应力和切向应力;  $E$  为弹性模量;  $\alpha_m$  为岩石热膨胀系数;  $T_w(t)$  为不同时刻  $t$  井壁的温度。

直井井壁径向应力( $\alpha$ )、切向应力( $\sigma$ ):

$$\alpha = p_w - \varphi(p_w - p_p) \quad (15)$$

$$\sigma = -p_w + (1 - 2\cos 2\theta)\alpha_1 + (1 + 2\cos 2\theta)\alpha + \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi \right] (p_w - p_p) + \frac{E\alpha_m}{3(1-\nu)} [T_w(t) - T_f] \quad (16)$$

由莫尔库仑准则知,井壁坍塌一般发生在最小水地应力方位,即  $\theta = \pi/2$ ,维持井壁稳定的最小液柱压力( $p_b$ )为:

$$p_b = \frac{\gamma(3\alpha_1 - \alpha) - 2CK + [(\alpha + \varphi)K^2 - (\eta m_1 + \alpha)]p_m + \eta m_2 \Delta T(t)}{[K^2(1-\varphi) + \gamma(1-m)]} \quad (17)$$

其中:  $K = \text{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ ,  $m_1 = \frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi$ ,  $m_2 =$

$$\frac{E\alpha_m}{3(1-\nu)}, \Delta T(t) = T_w(t) - T_f.$$

式中:  $H$  为井深;  $C$  为岩石粘聚力;  $\varphi$  为岩石内摩擦角;  $\eta$  为应力非线性修正系数。

由拉伸破坏准则知,井壁坍塌一般发生在最大水地应力方位,即  $\theta = 0$ ,井壁破裂的临界液柱压力( $p^r$ )为:

$$p^r = \frac{3\alpha - \alpha_1 + S_i + m_2 \Delta T(t) - (m + \alpha)p_m}{1 - m} \quad (18)$$

式中:  $S_i$  为地层抗拉强度。

考虑气侵和压耗影响的有效安全钻井液密度的确定方法:由于气—液相流体在井筒中压力、温度与钻井液密度相互作用,无法单独进行各参数的求解,必须将温度场与压力场进行耦合求解。对于某一深

度地层,根据钻井水力参数、钻柱结构,不断迭代液相密度( $\rho_a$ ),直至满足维持井壁稳定的最小液柱压力( $p_b$ )和井壁破裂的临界液柱压力( $p_r$ ),对应的钻井液密度( $\rho$ )和( $\rho$ )为有效安全钻井液密度的下限和上限。

#### 四、应用实例

某井钻至井深 3000 m,井眼井径为 216 mm,钻井液排量为  $0.030 \text{ m}^3/\text{s}$ ,比热为  $3.44 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ,热传导系数为  $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,稠度系数为  $0.051 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ ,流变指数为 0.94;钢材的热传导系数取  $53.60 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,比热为  $0.465 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ;地层密度为  $2.52 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,比热为  $0.82 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ,热传导系数为  $3.42 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,地温梯度为  $3.00 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ,地面温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,钻井液入口温度恒定;水平最大地应力为 65 MPa,水平最小地应力为 52 MPa,地层泊松比为 0.251,弹性模量为 34700 MPa,粘聚力为 26.8 MPa,内摩擦角为  $28^\circ$ ,地层孔隙压力为 36.8 MPa,地层抗拉强度为 2 MPa。

若不考虑气体与温度的影响,常规井壁稳定计算的安全钻井液密度下限为  $1.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,上限为  $2.68 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,地层孔隙压力为  $1.27 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,可以采用欠平衡钻井,钻井液密度设计在  $1.24 \text{ g}/\text{cm}^3$  左右。实际钻井过程中,随着时间推移,发现井内垮塌严重,出口钻井液中有大量垮塌岩屑涌现,排除钻井液化学性能因素,说明充气钻井液密度不够。依据本文的模型,考虑气侵(气侵量估计  $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ )和温度的影响,经计算实际作用在地层的液柱压力为 33.3 MPa(当量钻井液密度为  $1.11 \text{ g}/\text{cm}^3$ ),而维持井壁稳定所需的液柱压力为 34.5 MPa,将钻井液密度调整到  $1.33 \text{ g}/\text{cm}^3$  左右,井底实际液柱压力折合当量钻井液密度  $1.24 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。邻井钻井采用了计算结果,出口钻井液中没

有发现显著的坍塌岩屑,井径测井结果表明地层最大井径扩大率小于 15%。

#### 五、结 论

钻探遇到不同程度高温、高压、气侵环境,井筒气侵钻井液密度随温度和压力的变化而变化,常规井壁稳定研究确定的钻井液密度不能有效地阻止井下井壁坍塌、缩径引起的复杂情况。在确定考虑气侵、压耗和温度影响的有效安全钻井液密度的过程中,应考虑气液两相流体受井筒压力、温度与钻井液密度相互作用,根据地层参数、钻井水力参数、钻柱结构,必须将温度场与压力场进行耦合求解,获取有效安全钻井液密度的下限和上限。

#### 参 考 文 献

- [1] 汪海阁,刘岩生,等.高温高压井中温度和压力对钻井液密度的影响[J].钻采工艺,2000,23(1):56-59.
- [2] 张锐,邱正松.深井水包油钻井液高温高压密度特性模拟实验研究[J].钻井液与完井液,2002,19(3):36-40.
- [3] RAYMOND, L R. Temperature distribution in a circulating drilling fluid[J]. J P T, 1969(3): 333-341.
- [4] THOMPSON M. The prediction of interprediction of down-hole mud temperature while drilling[J]. SPE 14180.
- [5] ROGER J SCHOEPEL. Numerical simulation of borehole and formation temperature distribution while drilling to total depth[J]. SPE 3364.
- [6] 李相方,庄湘琦,等.气侵期间环空气液两相流动研究[J].工程热物理学报,2004,25(1):73-76.
- [7] 金衍,陈勉.大位移井的井壁稳定力学分析[J].地质力学学报,1999,5(1):4-11.

(收稿日期 2006-05-01 编辑 钟水清)