

[引著格式] 胡德云, 赵鹏斐, 周成华, 等. 元坝陆相地层钻井液密度窗口的确定与应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (11+12): 31~38.

元坝陆相地层钻井液密度窗口的确定与应用

胡德云 (中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院, 四川 德阳 618000)

赵鹏斐 (西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610000)

周成华 (中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院, 四川 德阳 618000)

范翔宇 (西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610000)

周鑫 (中石油玉门油田分公司钻采工程研究院, 甘肃 酒泉 735000)

[摘要] 元坝陆相地层地质构造复杂, 工区地层岩层走向高陡且岩石易碎, 井下易发生井漏坍塌事故。通过测井方法构建了元坝地区陆相地层岩石动静力学参数转换模型, 优选了符合元坝地区的地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的计算模型, 结合元坝地层的特殊性, 考虑地层破碎程度、岩石力学特性、地层倾角、井斜角和井斜方位角对元坝陆相地层安全密度窗口的影响, 得到了适用于元坝陆相地层的安全密度窗口。通过YL702井漏失层位安全密度窗口的计算, 表明新建立的安全密度窗口理论计算结果和实钻情况基本相符, 验证了模型的合理性, 研究成果对元坝陆相地层的井壁稳定性研究有借鉴意义。

[关键词] 陆相地层; 元坝地区; 钻井液密度窗口; 坍塌压力; 破裂压力; 地应力; 漏失

[中图分类号] TE21 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 11+12-0031-08

元坝陆相地层地质条件复杂, 地层压力高, 裂缝发育, 煤岩、泥页岩的存在使得钻开地层时, 井周岩石容易崩落, 钻进过程中井塌、卡钻、起下钻遇阻等井下复杂情况时有发生。自流井组东岳庙段到珍珠冲段存在裂缝气层, 易发生漏失, 由于安全密度窗口窄或为负, 导致“喷、漏、塌”同时发生, 严重地制约了工程进度和井下安全。运用测井方法计算建立了该区块陆相地层安全密度窗口, 并根据安全密度窗口及其影响因素修正了密度窗口, 使之更能满足井下作业要求, 减少事故的发生^[1]。

1 安全钻井液密度窗口计算模型的确立

钻井液密度窗口直接影响到井下施工作业时井壁的稳定情况, 若密度过低, 在井壁上就会出现剪切破坏导致井塌或缩径; 若密度过高, 在井壁上会出现拉伸破坏而导致井漏, 一个安全的钻井液密度窗口对钻井整个过程都至关重要。建立安全钻井液密度窗口, 需要求得岩石的静态弹性参数, 并且计算出地层的孔隙压力和地应力, 确定地层的破裂压力和坍塌压力, 根据破裂压力和坍塌压力来确定密度窗口的上限和下限。

1.1 岩石力学参数的求取

岩石的静态弹性参数是实际工程中地层压力计算所必须的参数, 但静态力学参数需要通过三轴试验加载静载荷作用测得岩心的应力—应变曲线来获取, 获取过程较为复杂且花费也较高; 利用地层的声波时差、密度和伽马射线等测井资料可以得到动态岩石力学参数, 这种参数获取较为简单且花费也较低。许多学者通过试验结果分析得到, 对于一块完整的岩石来说, 其动、静态岩石力学参数十分接近, 而在

[收稿日期] 2015-02-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51474185); 国家“973”计划项目 (2013CB228003)。

[作者简介] 胡德云 (1966-), 男, 高级工程师, 长期从事钻完井科研与管理工作; 通信作者: 赵鹏斐, 18081033887@163.com。

弄清动、静态岩石力学参数性质的基础上,通过回归拟合方法建立其相互关系,可以实现由动态到静态岩石力学参数的转换。所以,由于测井资料易获取方便、便宜且地层连续性好,常用测井资料计算岩石力学参数^[2~4]。

根据上述方法,通过元坝陆相地层泊松比和弹性模量参数的对比分析,建立了元坝陆相地层须家河组岩石动、静泊松比和弹性模量的转换模型:

$$\begin{cases} E_s = 0.4393 \times E_d - 9.8905 & (N = 9, R = 0.91) \\ \mu_s = 1.1294 \times \mu_d - 0.1194 & (N = 9, R = 0.73) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 为静态弹性模量, GPa; E_d 为动态弹性模量, GPa; μ_s 为静态泊松比, 1; μ_d 为动态泊松比, 1; N 为样品数; R 为相关系数。

1.2 地层孔隙压力的预测

地层孔隙压力的计算方法主要有等效深度法、伊顿法和有效应力法。鉴于元坝陆相地层的岩性和岩石物理性质,不仅要考虑上覆压实作用,还应考虑到其他的异常压力形成机理和钻井实测压力与测井信息压力响应之间的关系。因此,根据伊顿法的基础公式来推导地层孔隙压力^[5],其公式为:

$$p_p = p_o - (p_o - p_w) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^c \quad (2)$$

式中: p_p 为地层孔隙压力, MPa; p_o 为上覆地层压力, MPa; p_w 为地层水静液柱压力, MPa; Δt_n 为正常压实趋势线上的声波时差值, $\mu\text{s}/\text{ft}$; Δt 为实测点声波时差值, $\mu\text{s}/\text{ft}$; c 为压实指数, 1。

之前的很多研究,因为测井资料的不足,所以常常将压实指数视为常数,并运用到工程计算中去,其计算精度也能满足需求。很多学者根据实测压力资料与测井计算的数据来反推压实指数,得出压实指数应该是一个变化的值。试验证明,压实指数与地层的声波特性相关良好,即压实指数随着声波时差值的降低而增大。在确定压实指数时,选择泥岩层段,剔除其中扩径缩径层段的声波时差值,最后所用的应为所取声波时差的平均特征值。

将这个关系引入伊顿法,则得出改进后的方程:

$$p_p = p_o - (p_o - p_w) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^{25534 \Delta t^{-2.2075}} \quad (3)$$

1.3 地应力的计算

地层密度应该是随地层深度的变化而变化的,所以采用分段求和来求得更接近实际的上覆岩层压力。计算公式为:

$$\sigma_v = 0.00981 \sum_{i=1}^n \rho_i \Delta D_i \quad (4)$$

式中: σ_v 为上覆岩层压力, MPa; ρ_i 为各段密度, g/cm^3 ; ΔD_i 为深度采样间隔, m; 系数 0.00981 的单位为 m/s^2 。

根据测井资料统计,表1给出了元坝地区下沙溪庙组到须家河组各层段平均密度的参考值。

表1 元坝下沙溪庙组到须家河组各层段平均密度参考值

沙溪庙组平均密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	千佛崖组平均密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自流井组平均密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)				须家河组平均密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)				
		大安寨段	马鞍山段	东岳庙段	珍珠冲段	五段	四段	三段	二段	一段
2.510	2.615	2.615	2.647	2.590	2.636	2.653	2.665	2.658	2.667	2.675

水平地应力的计算:考虑到元坝陆相地层岩性致密且微裂缝发育,而Newberry模型主要针对渗透率低但有微裂缝发育的地层,所以采用该公式计算水平最小地应力,公式为:

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} \times (\sigma_v - \alpha p_p) + p_p \quad (5)$$

式中: σ_h 为水平最小地应力, MPa; μ 为泊松比, 1; α 为 Biot 系数, 1。

根据双井径测量资料推导的水平最大地应力为:

$$\begin{cases} \sigma_H = \lambda \sigma_h \\ \lambda = \sigma_H / \sigma_h = 1 + A[1 - (b/a)^2](E/E_{ma}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： σ_H 为水平最大地应力，MPa； λ 为应力不平衡系数，1； a 为井眼长半轴，m； b 为井眼短半轴，m； E 为地层弹性模量，MPa； E_{ma} 为地层骨架弹性模量，MPa； A 为修正系数。

通过测井资料得出：元坝地区陆相地层的水平最大最小地应力基本随埋藏深度增加而增加，部分测点存在离散型；最大最小地应力的比值波动较小，即应力不平衡系数在一个小区间内变化。通过拟合元坝地区 12 口井最小和最大水平地应力，得出工区计算最大水平地应力的经验公式。图 1 是其中 2 口井的拟合情况。拟合结果得出元坝陆相地层 λ 取值为 1.25~1.3。

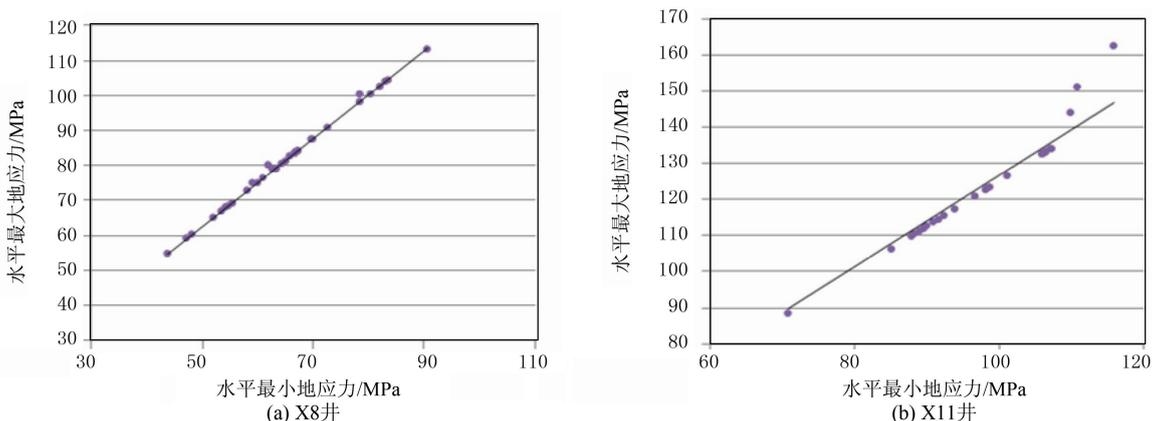


图 1 元坝陆相地层最大最小水平地应力拟合情况

1.4 地层破裂压力和钻井液密度上限的计算

地层破裂压力的计算主要有 3 种方式：一是室内岩石力学破裂压力测试试验；二是油气井现场水力压裂施工；三是根据测井资料 and 一系列公式测算破裂压力。笔者采用第 3 种方法计算地层破裂压力^[5]。

以谭氏模型改进法为原型，根据上覆应力和水平最大最小主应力，并结合元坝陆相地层微裂缝发育的特点，推导建立了该地层的破裂压力 p_f 计算模型：

$$p_f = \alpha p_p + \mu_b \frac{2\mu}{1-\mu} \times (\sigma_v - \alpha p_p) + C_1 \times C_2 \times S_t \quad (7)$$

式中： p_f 为地层破裂压力，MPa； μ_b 为地层水平骨架应力非平衡因子，1；裂缝性地层取 $C_1=0$ ，非裂缝性地层取 $C_1=1$ ；施工压裂时计算的地层破裂压力 $C_2=1$ ，钻井中为预防钻井液密度太大压漏低承压裂缝地层而不考虑地层抗张强度时所计算的地层自然破裂压力（或漏失压力） $C_2=0$ ； S_t 为抗张强度，MPa。

对于元坝陆相地层来说，其微裂缝发育，则 $C_1=0$ ，式 (7) 简化为：

$$p_f = \alpha p_p + \mu_b \frac{2\mu}{1-\mu} \times (\sigma_v - \alpha p_p) \quad (8)$$

考虑到底层破碎程度和地层倾角等对底层破裂压力的影响因素，在计算安全钻井液密度窗口上限时附加 ρ_m ，使所得的钻井液当量密度窗口上限更符合实际情况：

$$\rho_f = \frac{1000 p_f}{9.80665 H} + \rho_m \quad (9)$$

式中： ρ_f 为地层张性破裂的钻井液当量密度，g/cm³； H 为地层埋藏深度，m； ρ_m 为地层张性破裂的钻井液当量密度附加值，g/cm³。

将式 (8) 计算得到破裂压力代入式 (9) 中，就能得到钻进时地层发生张性破裂时的钻井液当量（等效）密度，即为安全钻井液密度窗口上限。

1.5 地层坍塌压力和钻井液密度下限的计算

非均匀地应力下井壁应力计算公式：

$$\begin{cases} \sigma_r = p_w - \alpha p_p \\ \sigma_\theta = \eta[(\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - p_w] - \alpha p_p \\ \sigma_z = \sigma_v - 2\mu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - \alpha p_p \end{cases} \quad (10)$$

式中： σ_r 为井壁围岩所受的径向应力，MPa； σ_θ 为井壁围岩所受的周向应力，MPa； σ_z 为井壁围岩所受的垂向应力，MPa； η 为井壁岩石的非线性应力校正系数； θ 为井壁上某点与X轴的夹角，(°)。

当井壁围岩所受的周向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r 的差值达到一定值后，井眼会因剪切破坏而坍塌。从式(10)中可以看出，当 $\theta = 90^\circ$ 或 270° 时，最容易发生坍塌^[6]，此时井壁上主应力为：

$$\begin{cases} \sigma_r = p_w - \alpha p_p \\ \sigma_\theta = \eta(3\sigma_H - \sigma_h - p_w) - \alpha p_p \\ \sigma_z = \sigma_v - 2\mu(\sigma_H - \sigma_h) - \alpha p_p \end{cases} \quad (11)$$

在井壁稳定力学分析中，Mohr-Coulomb剪切破坏准则常常表示为：

$$(\sigma_H - \alpha p_p) = (\sigma_h - \alpha p_p) \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) + 2C \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

式中： C 为内聚力，MPa； φ 为内摩擦角，(°)。

根据 $p_b = p_w$ ，推导得到计算地层坍塌压力的具体公式为：

$$p_b = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2CK + \alpha p_p(K^2 - 1)}{K^2 + \eta} \quad (13)$$

式中： p_b 为地层坍塌压力，MPa； η 为井壁岩石的非线性应力校正系数，正常取0.8~0.95； σ_H 为最大水平主应力，MPa； σ_h 为最小水平主应力，MPa； σ_v 为上覆岩层应力，MPa； K 为摩擦角有关的参数，一般取 $K = \tan^{-1}(\pi/4 - \varphi/2)$ ； α 为Biot系数，对于川东北陆相地层 $\alpha = 0.6$ 。

如果井底液注压力小于地层压力，就会发生井喷，因此，为了求出安全钻井液密度下限，必须考虑到地层压力 p_p ；还应考虑到地层的破碎性和地层倾角等因素对坍塌压力的影响。所以计算安全密度窗口下限要补充一个钻井液密度附加值 ρ_n ，计算公式为：

$$\rho_b = \frac{1000 \times \max[p_b, p_p]}{9.80665H} + \rho_n \quad (14)$$

式中： ρ_b 为安全钻井液密度下限值，g/cm³。

2 安全钻井液密度窗口影响因素分析

安全钻井液密度窗口受众多因素的影响，地层破碎程度、地层倾角、井眼轨迹、地层强度、钻井液造壁性和钻柱振动等都会影响到钻井液的选择^[7,8]。

2.1 地层破碎程度对安全钻井液密度窗口的影响

元坝陆相地层主要以砂岩、泥岩和砂岩、泥岩不等厚互层为主。由现场资料统计6口有代表性井发生井漏层段，平均裂缝宽度0.530mm，平均裂缝径向延伸距离3.04m，平均孔隙度0.57%，平均裂缝渗透率2376.1mD。地层岩性致密且微裂缝发育。工区处于高陡构造带，有裂缝、孔洞及其发育层。岩层层理和裂缝发育丰富且倾向走向复杂多变，裂缝比较密集且缝宽和缝长较大，地层各向异性程度和破碎程度大，这使得井易漏难堵且堵漏成功率低。要想建立安全密度窗口，必须考虑这些因素，适当地调整钻井液密度窗口，钻井液密度窗口会变窄。

2.2 地层倾角对安全钻井液密度窗口的影响

现场勘探资料表明，元坝地区高陡构造占了整个工区的60%~80%，地层倾角一般30~65°，由目前已钻井资料得，该工区最大的地层倾角达到87°，钻进时非常容易发生井斜。由于高陡地层造斜能力强，加上陆相地层岩石软硬交错，使用常规钻井技术容易使井眼形成键槽，造成键槽卡钻事故^[9]。图1是根据勘探资料绘制的钻井液密度附加值与地层倾角的关系。可见钻井液密度附加值和地层倾角度数呈正相关，即随地层倾角变大，地层坍塌趋势变强。地层倾角在5°时钻井液密度附加值为0.025g/cm³，

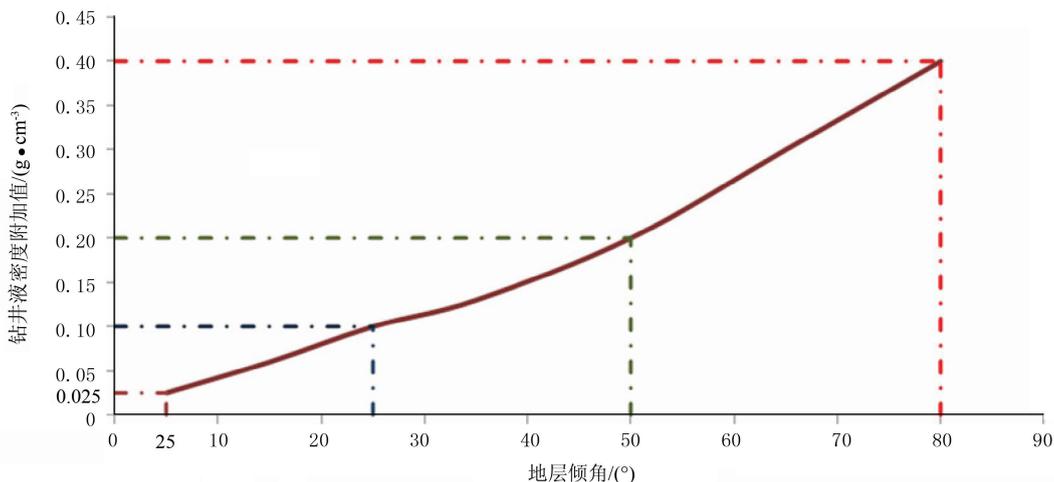


图 2 地层倾角和钻井液密度附加值关系

直到倾角为 80° 时钻井液密度附加值达到了 0.4g/cm³。

2.3 地层岩石力学特性对安全钻井液密度窗口的影响

取元坝 X11 井须家河组须二段一点为例，参数值 $H = 4800\text{m}$, $\sigma_v = 120.435\text{MPa}$, $\sigma_H = 127.848\text{MPa}$, $\sigma_h = 83.577\text{MPa}$, $p_p = 50.356\text{MPa}$, $S_t = 13.357\text{MPa}$, $C = 42.217\text{MPa}$, $\eta = 0.768$, $\mu = 0.289$, $\varphi = 30^\circ$ 。在保持其他参数条件不变情况下，在井斜方位角为 0° 时，分别取 $C = 30、35、40\text{MPa}$ ，进行地层坍塌压力和破裂压力计算，计算结果如图 2 所示。

从图 3 可以看出，在沿最大、最小水平主应力方向钻进时，随着岩石内聚力的增加，安全钻井液密度窗口整体变宽，当岩石内聚强度增大时，破裂压力没有发生变化，3 条破裂压力曲线重合，地层破裂压力不受岩石内聚强度的影响，这与理论分析相符合。

公式 (7) 中取 $C_1 = 1, C_2 = 1$ ，井斜方位角为 0° 时，在保持其他参数不变情况下，分别取 $S_t = 5、10、15\text{MPa}$ 进行地层坍塌压力和破裂压力计算，计算结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，随着抗张强度的增加，地层破裂压力增大，井壁不易发生拉伸破坏；地层坍塌压力不变，安全钻井液密度窗口变宽。因此，在其他条件不变时，地层疏松对钻井保持井壁稳定不利。

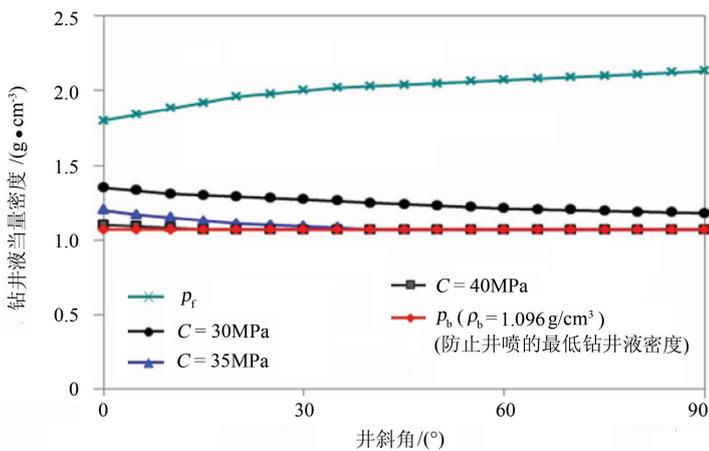


图 3 岩石内聚强度对安全钻井液密度窗口的影响 (井斜方位角为 0°)

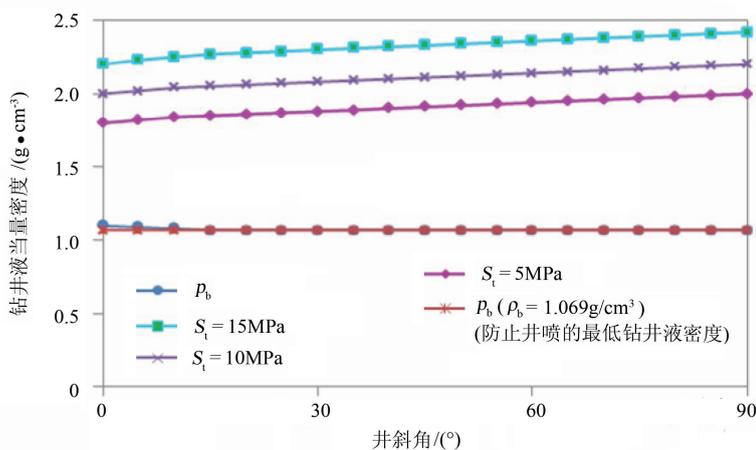


图 4 岩石抗张强度与安全钻井液密度窗口的关系 (井斜方位角为 0°)

2.4 井斜角和井斜方位角对安全钻井液密度窗口的影响

针对元坝地区工区地应力 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 的情况（垂向地应力为第二主地应力）进行计算分析，取 X501 井须家河组须二段一点，井深 $H=5100\text{m}$ ， $\sigma_v = 126.898\text{MPa}$ ， $\sigma_H = 133.438\text{MPa}$ ， $\sigma_h = 85.377\text{MPa}$ ， $p_p = 54.359\text{MPa}$ ， $S_i = 15.454\text{MPa}$ ， $C = 51.283\text{MPa}$ ， $\eta = 0.5$ ， $\mu = 0.299$ ， $\varphi = 30^\circ$ 。计算出不同井斜方位角的坍塌压力和破裂压力钻井液当量密度窗口，如图 5 所示。

从图 5 可以看出，当井斜方位角一定时，随着井斜角的增大，地层坍塌压力钻井液当量密度减小直到等于防止井喷的最低钻井液密度，地层破裂压力钻井液当量密度增加，安全钻井液密度窗口变宽；

当井斜角一定时，随着井斜方位角的增大，地层坍塌压力钻井液当量密度减小直到等于防止井喷的最低钻井液密度，地层破裂压力钻井液当量密度增加，安全钻井液密度窗口变宽。这说明当垂向应力为中间主应力时，在同样的条件下，井斜角或井斜方位角越大，安全钻井液密度窗口越宽，钻井越安全^[10]。

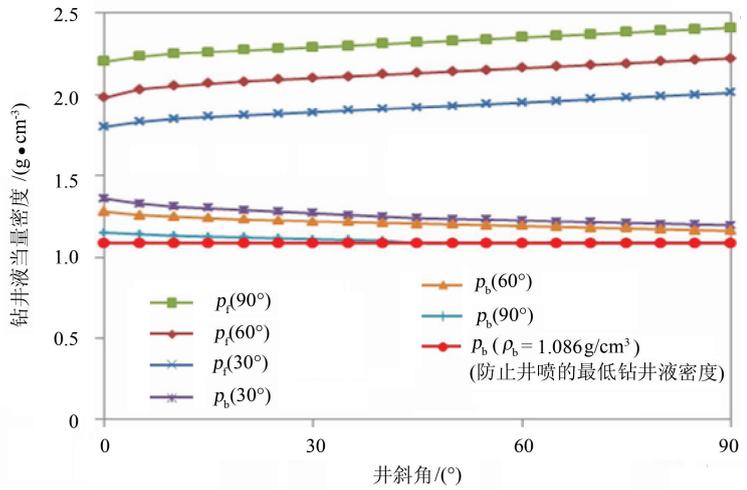


图 5 不同井斜角、井斜方位角对安全钻井液密度窗口的影响

3 元坝陆相地层安全钻井液密度窗口模型的应用

3.1 YL702 井陆相地层漏失情况

YL702 井三开钻进中在井深 3879~4937m 发生多次井漏；完钻后下套管到底循环再次发生井漏，井漏严重（见表 2）。发生井漏后，针对井内实际情况采取不同的堵漏措施 11 次，取得明显的堵漏效果，其中 4 次堵漏一次性成功。全井共计漏失钻井液（ $2.03 \sim 2.25\text{g/cm}^3$ ） 455.52m^3 。

表 2 YL702 井三开井漏情况统计表

井深/m	工况	漏失总量		处理措施	备注
		/m ³	密度 / (g · cm ⁻³)		
3879.87	钻进	61.24	1.80	2 次桥堵	开启、闭合裂缝性漏失
4181.15	钻进	41.8	2.15	随钻堵漏	裂缝性漏失
4245.70	钻进	57.98	2.25	2 次注堵浆静止堵漏	钻遇高压气层，加重井浆进一步撑开 3879.87m 井段裂缝
4397.94	钻进	33.032	2.25	注堵漏浆挤堵	裂缝性漏失
4468.8	下钻划眼	53.67	2.25	堵漏浆挤堵	井浆 CO ₂ 污染增稠，开泵激动压力增大
4560.15	钻进	115.28	2.25	堵漏浆挤堵	裂缝性漏失
4936.63	下套管循环	92.42	2.25	堵浆循环堵漏；2 次堵漏浆挤堵	钻进多次发生井漏，井漏段裂缝和砂体发育较好，套管和井壁环空间隙小，激动压力过大引起井漏

3.2 YL702 井陆相地层钻井液密度窗口建立

首先通过建立的计算模型得出 YL702 井陆相地层钻井液密度窗口，然后再具体分析钻井液密度窗口的影响因素来逐步修正密度窗口，得到最终的安全钻井液密度窗口。

表 3 是计算出的 YL702 井下沙溪庙组到须家河组每段各个岩石力学参数。把计算所得参数代入式 (2) 和 (8) 得到 p_t ，然后根据式 (5)、(6)、(11) 求出 p_b 。考虑地层倾角对安全钻井液密度窗口的影响，取合理的钻井液密度附加值，通过式 (9) 和 (14) 得出了 YL702 井 3008~4929m 钻井液密度

窗口，见表 4。

表 3 YL702 井 3008~4929.6m 岩石力学参数

层段	起始深度 /m	终止深度 /m	岩石力学参数				泊松比	
			弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	抗张强度 /MPa		
下沙溪庙组	3008.00	3576.00	29.46	202.76	15.16	9.96	0.21	
千佛崖组	3576.00	3838.00	33.21	230.59	20.18	11.63	0.21	
自流井组	大安寨段	3838.00	3922.00	35.73	240.16	22.46	12.25	0.22
	马鞍山段	3922.00	4030.00	33.98	239.03	21.67	12.13	0.22
	东岳庙段	4030.00	4154.00	29.83	213.36	17.29	10.62	0.21
	珍珠冲段	4154.00	4254.00	43.54	253.64	28.79	13.45	0.22
须家河组	五段	4254.00	4259.00	46.67	236.26	29.67	12.81	0.22
	四段	4259.00	4349.00	48.31	238.45	31.16	13.05	0.22
	三段	4349.00	4530.00	43.14	226.01	26.67	12.08	0.22
	二段	4530.00	4888.00	37.99	239.54	24.73	12.45	0.22
	一段	4888.00	4929.60	42.60	277.36	33.39	14.90	0.23

表 4 YL702 井 3008~4929m 安全钻井液密度窗口

层段	井段/m	预测窗口下限 / (g · cm ⁻³)	预测窗口上限 / (g · cm ⁻³)	
下沙溪庙组	3008~3576	1.28	2.19	
千佛崖组	3576~3838	1.12	2.21	
自流井组	大安寨段	3838~3922	1.05	2.20
	马鞍山段	3922~4030	1.14	2.24
	东岳庙段	4030~4154	1.44	2.25
	珍珠冲段	4154~4254	1.04	2.18
须家河组	五段	4254~4259	1.16	2.13
	四段	4259~4349	1.16	2.22
	三段	4349~4530	1.22	2.22
	二段	4530~4888	1.24	2.23
	一段	4888~4929	1.38	2.24

关于 YL702 井的具体安全钻井液密度窗口没有准确的参考值，为了验证所建密度窗口的可靠性，根据钻井日志中实际钻井液密度和钻井中井下情况来检验，不难得出预测钻井液密度窗口和实际钻井液密度关系曲线，如图 6 所示。

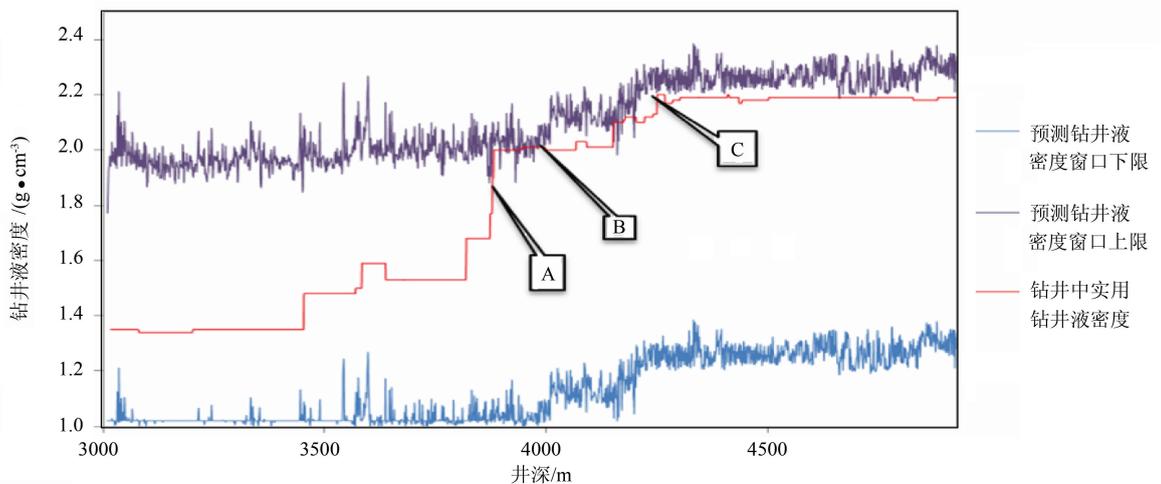


图 6 钻井实用钻井液密度与预测钻井液密度窗口对比

从图6可以看出, A、B、C三点为发生井下事故的点。A点钻遇高纯度石英砂岩, 钻时极慢, 准备起钻。起钻时油气上窜速度不能满足起钻要求, 循环加重, 密度增加到 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时, 油气上窜速度满足起钻要求, 加重过程中发生漏失, 最大漏失速度 $6\text{m}^3/\text{h}$, 漏失量 27m^3 , 打堵漏浆, 完成起钻。B点为前段 $3134\sim 3166.49\text{m}$ 处遇阻, 间断划眼通过, 钻进过程中逐步调整钻井液密度, 发现漏失共 37m^3 , 注入堵漏钻井液, 降低钻井液密度, 完成堵漏。C点钻进至井深 4397.94m 处, 发生裂缝性漏失, 加入细颗粒随钻堵漏材料, 排量 $9\text{L}/\text{s}$, 漏速 $9.5\text{m}^3/\text{h}$, 累计漏失 31.67m^3 。

由于钻井液的选取、钻头钻柱的选取等多种施工因素都会影响钻井中井壁稳定性, 笔者只针对元坝陆相地层地质因素对井壁稳定的影响来确立安全钻井液密度窗口。图6中A、B、C这3次漏失是钻井到 3879 、 4148 、 4397m 深度时钻井液密度引起的漏失, 这与表3中提到的YL702井发生事故点基本相符。其他漏失是因为气压、泵压、或者是钻至漏失点下段由于其他因素导致的漏失, 并不能通过此深度的安全密度窗口和钻遇此深度所用的实际钻井液密度来验证。综上所述, 可以看出钻井实际的钻井液密度基本在预测的安全钻井液密度窗口内, 而且当实际钻井液密度达到预测上限时, 确实发生事故, 可见建立的模型对元坝陆相地层安全钻井液密度窗口预测比较合理。

4 结论

1) 基于岩石的破坏准则计算了坍塌压力和破裂压力, 并且根据元坝陆相地层的地质结构, 考虑地层破碎情况和地层倾角对钻井液密度窗口的影响, 最终建立了元坝陆相地层安全钻井液密度窗口模型。通过YL702井预测密度范围和钻井报告里实用钻井液密度对比得出: 钻井实用的钻井液密度基本在预测的安全钻井液密度窗口内, 而且当实用钻井液密度达到预测上限时, 确实发生事故, 可见笔者对元坝陆相地层安全钻井液密度窗口预测方法较可靠。

2) 在考虑岩石破碎程度和地层倾角影响因素时, 是按照工区每个层段不同地质条件给出的经验附加值, 当钻遇具体井具体层段的井下地质影响因素超出预测范围时, 会发生井下事故, 所以需要实时监控钻井情况做出调整。元坝陆相地层结构多断裂带和褶皱, 发育微裂缝和溶洞, 这是良好的产层特征也易发生井漏事故层段, 所以钻井过程中尽可能地使钻井液密度低于预测安全密度上限。

3) 元坝陆相地层易漏失层段一次性堵漏成功率低, 大多都进行过多次堵漏。在钻井过程中多次发生已堵漏成功层段堵漏材料随钻井液流出, 所以建议研制出高效楔入式封堵材料, 增强反向承压能力。

[参考文献]

- [1] 罗庆, 范翔宇, 夏宏泉, 等. 普光地区安全钻井液密度窗口的测井方法研究 [J]. 钻井液与完井液, 2008, 25 (6): 58~61.
- [2] 刘之的, 夏宏泉, 汤小燕, 等. 成像测井资料在地应力计算中的应用 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27 (4): 9~12.
- [3] 夏宏泉, 游晓波, 凌忠, 等. 基于有效应力法的碳酸盐岩地层孔隙压力测井计算 [J]. 钻采工艺, 2005, 28 (3): 28~30.
- [4] 刘之的. 碳酸盐岩地层井壁稳定性测井评价方法研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2004.
- [5] 周鑫. 川东北陆相地层漏失机理研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [6] 刘向军. 岩石力学与石油工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 120~122.
- [7] 姚如钢, 何世明, 龙平, 等. 破碎性地层坍塌压力计算模型 [J]. 钻采工艺, 2012, 35 (1): 21~23.
- [8] 文静, 何幼斌, 吴彩雄, 等. 地层倾角测井的地质应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2008, 30 (1): 263~265.
- [9] 苏静, 范翔宇, 刘跃辉, 等. 地层倾角测井的地质应用研究 [J]. 国外测井技术, 2009, 30 (3): 12~18.
- [10] 金衍, 陈勉. 井壁稳定力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 24~31.

[编辑] 帅群