

库车坳陷超深油气藏钻井井壁稳定性分析研究及应用*

刘磊^{1,2}, 张辉^{1,2,3,4}, 徐珂^{1,2,3,4}, 来姝君^{1,2}, 袁芳^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆 库尔勒 841000; 4. 新疆超深油气重点实验室, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 库车坳陷克拉苏构造带超深油气储层具有埋深大、温度高、岩性变化大、应力场高等特点, 导致基于常规井壁稳定性分析方法计算的钻井泥浆密度窗口不准, 造成钻进过程中井壁失稳频发, 给钻井安全和环境保护带来隐患. 通过考虑温度效应对井筒应力的影响, 加入基于Mohr-Coulomb破坏准则的弱面(裂缝)失稳条件, 提出了一种根据岩石、弱面不发生剪切失稳的最小泥浆密度和不发生张性失稳的最大泥浆密度, 以及孔隙压力和最小水平主应力的当量泥浆密度6个参数, 共同确定超深储层钻井安全泥浆密度窗口的取值方法. 实际资料应用结果表明, 该方法对库车坳陷博孜区块超深复杂地层的坍塌压力和漏失压力的预测具有很好的适用性和准确性, 为实际钻井施工设计提供有效参考.

关键词: 井壁稳定性; 超深裂缝气藏; 井筒应力; 岩石破裂准则

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.04.08.0001

中图分类号: TE22 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)04-0459-08

引文格式: 刘磊, 张辉, 徐珂, 来姝君, 袁芳. 库车坳陷超深油气藏钻井井壁稳定性分析研究及应用[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(4): 459-466.

英文引文格式: LIU Lei, ZHANG Hui, XU Ke, LAI Shujun, YUAN Fang. Analysis and application of drilling wellbore stability of ultra-deep reservoir in Kuqa depression[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(4): 459-466.

Analysis and Application of Drilling Wellbore Stability of Ultra-Deep Reservoir in Kuqa Depression

LIU Lei^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2,3,4}, XU Ke^{1,2,3,4}, LAI Shujun^{1,2}, YUAN Fang^{1,2}

(1. Research and Development Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla Xinjiang 841000, China; 2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla Xinjiang 841000, China; 3. Engineering Research Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, Korla Xinjiang 841000, China; 4. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-Deep Oil and Gas, Korla Xinjiang 841000, China)

Abstract: The ultra-deep oil and gas reservoir in Rasu structural zone of Kuqa depression has the characteristics of large buried depth, high temperature, large lithologic change and high stress field, which leads to the inaccurate drilling mud density window based on the conventional wellbore stability analysis, resulting in frequent instability of the wellbore during the drilling process, and brings hidden dangers to drilling safety and environmental protection. By considering the influence of temperature effect on the borehole stress and adding the weak surface (fracture) instability condition based on Mohr-Coulomb destruction criterion, we proposed a method to determine the safe slurry density window of ultra-deep reservoir drilling according to six parameters: the minimum slurry density for shear instability and the maximum slurry density for tension instability in rock and weak surface, and the equivalent slurry density of pore pressure and minimum horizontal main stress. The application results of real data show that this method has good applicability and accuracy for the prediction of collapse pressure and leakage pressure in the ultra-deep complex formation in Bozi block of Kuqa depression, and can provide effective reference for the actual borehole drilling design.

Key words: wellbore stability; ultra-deep fracture gas reservoir; borehole stress; rock rupture criteria

* 收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“超深层油气藏开发关键技术研究与应用”(2023ZZ14-03).

作者简介: 刘磊(1995—), 男, 博士, 主要从事水力压裂解释及地质力学的研究, E-mail: liuleizsd@163.com.

0 引言

库车坳陷克拉苏构造带位于塔里木盆地北部南天山造山带与塔北隆起之间,其深层油气资源丰富、勘探潜力大,埋深普遍在5 000 m以下,属于超深层裂缝性砂岩气藏,天然气探明地质储量超过1.4万亿方^[1-3]. 克拉苏构造带挤压变形强烈,形成的逆冲叠瓦状构造岩性多样、变化大,具有埋藏深度大、地层倾角高、孔隙度低、渗透率低、温度高、应力场高且复杂等特点,导致钻进过程中井壁失稳频发,极大制约了超深裂缝性储层的高效开发.

井壁稳定性是指井筒钻进和完井过程中,保持井壁结构稳定,防止井壁坍塌或变形的一种技术措施^[4-5]. 井筒区应力精确计算和岩石强度失稳(破坏)准则是研究井壁稳定性的关键^[6]. Kirsch最早采用弹性力学方法,给出了平面应变假设条件下井孔周围的应力集中弹性方程^[7]. 之后,Westergaard利用弹塑性理论得出了井筒内没有泥浆压力,仅在原场水平应力均匀作用下的井壁围岩弹塑性应力解析解,并利用Mohr-Coulomb准则对井壁围岩进行了简单的稳定性分析^[8]. Biot考虑到井壁围岩会在应力作用下产生微裂隙,提出了经典的多孔弹性介质理论,这一理论很快被应用于井壁稳定分析中^[9-11].

Bradley研究了平面应变条件下考虑孔隙压力的井壁围岩弹性解,假设地层为均匀各向同性,钻井液和孔隙中的流体没有相互作用,认为切向应力代表了井壁周围的主要应力集中效果^[12]. 因此,井壁稳定力学分析模型和研究方法的确定不仅受到岩石本身复杂性的影响,还会受到其特性实验测试方法及技术限制^[12]. 慈建发等则依据岩石断裂损伤原理和泥页岩水化膨胀的特性,编制了相应的有限元计算模型,在Mohr-Coulomb准则基础上得到了维持井壁稳定需要的安全泥浆密度值的计算方法^[13]. 目前国内外围岩应力分析研究表明,线弹性方法仍然是研究井壁稳定问题的主要方法.

本文针对库车坳陷超深层油气藏的井壁失稳问题,在考虑地层温度影响井筒附近地应力基础上,研究了岩石和弱面发生滑移坍塌和张性破裂的失稳准则,并结合孔隙压力和最小水平主应力的当量泥浆密度,提出了安全泥浆密度窗口取值方法. 实际资料应用结果显示,所提方法具有很好的适用性和准确性,能为施工设计提供有效参考.

1 考虑温度效应的井筒区应力

钻井过程中井壁是否失稳与井筒应力和岩石失稳准则密切相关. 应力张量可以根据特征向量分解形成主应力坐标系,其中非对角分量为零,见式(1):

$$\sigma_o = \begin{pmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_H & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: σ_h 、 σ_H 和 σ_v 分别表示最小、最大水平主应力和垂向应力.

实际地层的水平主应力方向以及井轨迹的井斜和方位通常与大地坐标系存在一定的夹角,因此在计算井筒内的径向和切向应力时需要进行坐标系的旋转和转化. 如图1所示,假设最大水平主应力与正北之间的夹角为 γ ,井轨迹方位为 α_b ,井斜为 β_b .

式(2)为远场应力参考坐标系转换到大地参考坐标系所需的旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

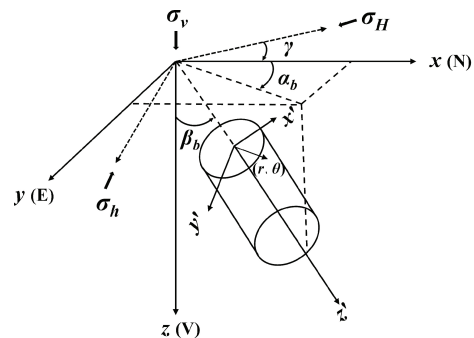


图1 大地参考系与井眼坐标系主应力方向图

式(3)为大地参考坐标系转换到井眼直角坐标系所需的旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_b = \mathbf{R}_y(\beta_b) \times \mathbf{R}_z(\alpha_b) = \begin{pmatrix} \cos\beta_b & 0 & \sin\beta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_b & 0 & \cos\beta_b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\alpha_b & \sin\alpha_b & 0 \\ -\sin\alpha_b & \cos\alpha_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

通过式(2)、式(3)坐标系的旋转,可以得到式(4)井筒直角坐标系应力分量:

$$\sigma_b = \mathbf{R}_b \mathbf{R}_z(\gamma) \sigma_o \mathbf{R}_z^T(\gamma) \mathbf{R}_b^T = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 分别表示井周应力分量的三向正应力, $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ 、 $\tau_{xz}=\tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz}=\tau_{zy}$ 表示井周应力分量的切应力。

井筒极坐标系下应力见式(5):

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^w = p_w \\ \sigma_{\theta\theta}^w = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} - 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - p_w - \sigma^{\Delta T} \\ \sigma_{zz}^w = \sigma_{zz} - \nu [2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta] - \sigma^{\Delta T} \\ \tau_{r\theta}^w = 0 \\ \tau_{\theta z}^w = 2(\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) \\ \tau_{rz}^w = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: p_w 表示井底泥浆压力, θ 表示井周向角, $\sigma^{\Delta T}$ 表示由温度引起的应力变量。

温度引起的应力变量与时间相关,围岩与井内液体的接触时间越长,应力变化传播得越远,Stephens等建立了径向和切向应力与半径 r 和时间 t 之间的关系^[14]。恒温井眼中温度分布的精确解是一个级数展开式^[15],达到稳定状态时,式(6)表明了温度对环向应力的改变量:

$$\sigma^{\Delta T} = \frac{\alpha_t E \Delta T}{1 - \nu} \quad (6)$$

式中: α_t 表示线性热膨胀系数, E 表示杨氏模量, ΔT 表示地层与钻井液之间的温度差, ν 表示泊松比。

如图2所示,从不考虑和考虑温度对井筒应力影响的对比中可以明显看出,考虑温度效应时的井筒内径向正应力和切应力无变化,但周向和垂向正应力更小,更符合钻井时真实的井筒温度和压力状况,根据后续岩石失稳准则计算出的泥浆密度窗口也会更加准确。

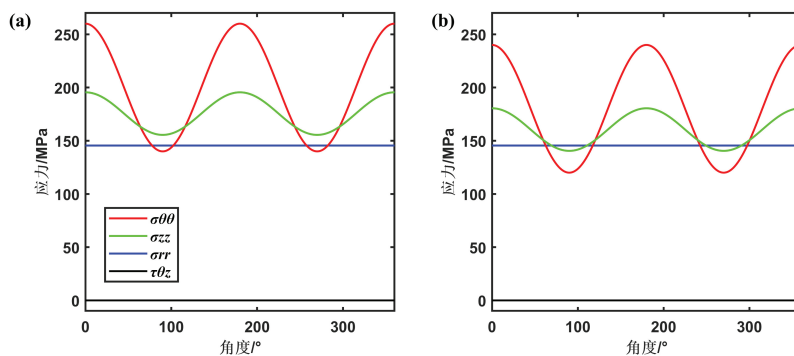


图2 不考虑(a)和考虑(b)温度效应下的井筒应力分量

2 岩石失稳准则

明确井筒周围应力分布后,利用岩石破坏准则估算井筒围岩的稳定性.岩石强度参数可以从室内岩石物理实验或测井取得.岩石失稳准则包括抗拉强度准则、剪切破坏准则以及弱面破坏准则.岩石强度破坏准则多用

主应力表示,式(7)列出了井筒极坐标系应力转化为井壁的三向主应力形式:

$$\begin{cases} \sigma_{n1} = \frac{\sigma_{\theta\theta}^w + \sigma_{zz}^w}{2} + \left(\tau_{\theta z}^w + \frac{(\sigma_{\theta\theta}^w - \sigma_{zz}^w)^2}{4} \right)^{1/2} - \alpha p_p \\ \sigma_{n2} = \sigma_{rr}^w - \alpha p_p \\ \sigma_{n3} = \frac{\sigma_{\theta\theta}^w + \sigma_{zz}^w}{2} - \left(\tau_{\theta z}^w + \frac{(\sigma_{\theta\theta}^w - \sigma_{zz}^w)^2}{4} \right)^{1/2} - \alpha p_p \end{cases} \quad (7)$$

式(8)对三个主应力大小进行排序,得到三向主应力:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \max\{\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}\} \\ \sigma_2 = \text{mid}\{\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}\} \\ \sigma_3 = \min\{\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}\} \end{cases} \quad (8)$$

式中: α 表示Biot系数, p_p 表示孔隙压力, σ_{n1} 、 σ_{n2} 、 σ_{n3} 分别表示井筒的三向有效主应力, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示最大、中间和最小主应力.

1) 张性失稳

拉伸破坏是由于井筒内钻井液密度过大,使得井壁岩石所受周向正应力超过岩石抗拉伸强度造成的.根据最小正应力原则,井壁岩石拉伸破坏需满足式(9)条件:

$$\begin{cases} F_T = \sigma_3 + |T_0| \leq 0 \\ F_{WT} = \sigma_3 + |T_w| \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_0 表示岩层的抗拉伸强度, T_w 表示弱面的抗拉伸强度.

2) 剪切失稳

基于Mohr-Coulomb破坏准则确定的剪切破坏见式(10):

$$F_{\text{Mohr-C}} = c \cdot \cos \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (10)$$

式中: $F_{\text{Mohr-C}} \leq 0$ 时岩石发生剪切失稳, c 表示内聚力, φ 表示内摩擦角.

3) 弱面失稳

天然裂缝性储层中,层理面间的内聚力、内摩擦角等岩石强度参数通常较低,易发生剪切破坏,沿弱面滑动失稳不可忽略.Jaeger等提出了一种发育良好的裂隙岩石剪切破坏概念模型^[16].计算井眼坍塌压力的安全泥浆密度时,应同时考虑基质破坏和滑脱破坏.沿着弱层理面的剪切破坏遵循式(11)条件^[16-17]:

$$\begin{cases} \beta_w = 45^\circ + (\varphi_w/2) \\ \sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \mu_w \sigma_3)}{(1 - \mu_w \cot \beta_w) \sin 2\beta_w} \\ \mu_w = \tan \varphi_w \end{cases} \quad (11)$$

裂纹软弱面滑动破坏的条件为 $\varphi_w < \beta_w < \pi/2$. $\beta_w \leq \varphi_w$ 或 $\pi/2 \leq \beta_w$ 时,弱面不会发生滑动破坏,但基质岩块会发生张性破坏,破坏准则见式(12):

$$\begin{cases} \beta_w = 45^\circ + (\varphi/2) \\ \sigma_1 = 2c_w \tan \beta_w + \sigma_3 \tan^2 \beta_w \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_w 表示弱面的内聚力, μ_w 表示弱面的内摩擦角, β_w 表示最大主应力 σ_1 与弱面法向的夹角.根据岩石失稳准则分析可知,岩石和弱面的张性失稳只与最小正应力及其抗拉强度相关,剪切失稳与最小和最大正应力相关;一般认为中间主应力 σ_2 与岩石强度和井壁失稳无关.

3 安全泥浆密度窗口

油气钻井会导致井眼区岩石的力学状态发生变化,引起井眼的应力集中.为避免井壁失稳,需要根据地应力和岩石的物理性质制定合理的泥浆密度.如图3所示,安全泥浆密度范围应大于地层孔隙压力梯度和剪切破

裂梯度,但小于岩石张性破裂梯度.泥浆密度低于孔隙压力梯度时,导致井壁的严重坍塌;泥浆密度大于孔隙压力梯度、小于剪切破裂梯度时,井眼收缩,直径减小、产生缩径,同时形成一定的剪切破裂;泥浆密度高于张性破裂梯度时,井筒发生张性破裂,造成泥浆漏失;泥浆密度继续增大到压裂压力梯度时,相当于形成水力压裂条件,造成大量循环液漏失至地层中,并产生人工裂缝.只有采用合理的安全泥浆密度才能保证井壁稳定.特别是库车坳陷绝大部分井深都是超过5 000 m的超深油气储层,其地应力强、地层温度高、构造复杂、裂缝发育,经常存在窄安全泥浆密度窗口地层,稍高则泥浆漏失、稍低则气体溢流,即“溢漏同层”^[19].常规方法确定的泥浆密度窗口往往很难满足现场需求,因此需要更为精确的安全泥浆密度窗口确定方法.

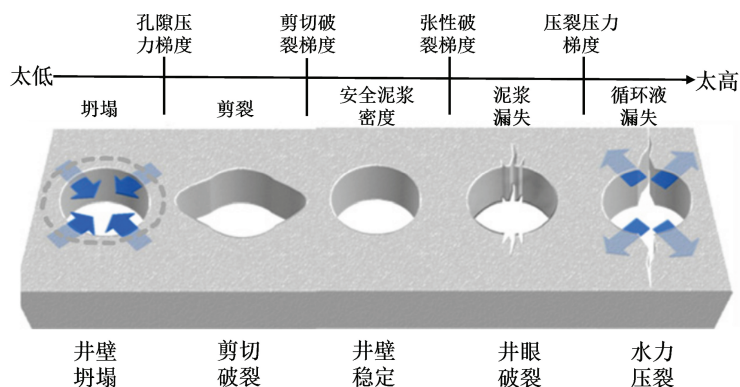


图3 不同泥浆密度对井壁稳定性的影响(据文献[18]修改)

井筒力学稳定性分析中,先计算作用在井筒周围的应力状态,然后根据破坏准则,评估其应力状态的稳定性,确定井筒安全泥浆密度窗口,以避免井壁失稳.钻井液密度与钻井液液柱压力关系见式(13):

$$p_w = 0.009\ 81 \cdot H_{\text{TVD}} \cdot \rho_w \tag{13}$$

式中: p_w 表示井底泥浆压力, H_{TVD} 表示垂直深度, ρ_w 表示泥浆密度.

3.1 安全泥浆密度下限预测

1) 基于剪切破坏的完整岩石坍塌模型

井周应力状态可以判断井壁易发生坍塌破坏的位置,周向应力大于径向应力时,周向应力最大位置最先发生坍塌.数值计算时,首先根据式(1~6)计算泥浆密度为0时的极坐标系应力值,取周向应力最大处对应的周向角 θ ,利用式(7~8)获得井筒面三向主应力,之后逐渐增加泥浆密度 ρ_w ,直至满足式(10)等于0时所对应的泥浆密度,即为维持井壁不发生坍塌的最低钻井液密度 ρ_{wbM} .

2) 基于剪切破坏的弱面坍塌模型

按3.1节1)计算井筒面三向主应力,通过不断增加泥浆密度 ρ_w ,利用式(11)计算最大主应力与弱面法向的夹角 β_w ,满足 $\varphi_w < \beta_w < \pi/2$ 的滑动破坏条件时,进行记录并取满足条件的泥浆密度最大值,即为维持井壁不发生弱面剪切坍塌的最小钻井液密度 ρ_{wbP} .

3) 井喷极限

利用式(13)和邻井的关井静压力计算孔隙压力的当量密度 ρ_p ,作为不发生井喷的最大泥浆密度.

安全泥浆密度的下限取值为维持井壁不发生坍塌、弱面不发生剪切坍塌和不发生井喷的三类泥浆密度中的最大值,见式(14):

$$\rho_{\min} = \max(\rho_p, \rho_{wbM}, \rho_{wbP}) \tag{14}$$

3.2 安全泥浆密度上限预测

1) 基于拉伸破坏的完整岩石破裂模型

井周应力状态可以判断井壁易发生破裂的位置,周向应力小于径向应力时,在周向应力最小值位置最先发生破裂.数值计算时,通过不断增加泥浆密度 ρ_w ,直至取井筒内周向应力最小处,满足式(9) $F_T = \sigma_3 + |T_0| = 0$ 所对应的泥浆密度,即为维持井壁不发生张性破裂的最大钻井液密度 ρ_{wf} .

2) 基于张性破坏的弱面破裂模型

通过不断增加泥浆密度 ρ_w , 利用式(12)计算最大主应力与弱面法向的夹角 β_w , 满足 $\beta_w \leq \varphi_w$ 或 $\pi/2 \leq \beta_w$ 基质岩块张性破坏条件的最小泥浆密度, 即为井壁弱面不发生张性破裂的最大钻井液密度 ρ_{wfP} .

3) 漏失极限

根据式(13)计算最小水平主应力当量密度 ρ_{wh} , 作为不发生漏失的最小泥浆密度.

安全泥浆密度的上限取值为维持井壁不发生张性破裂、弱面不发生张性破裂和发生漏失这三种泥浆密度的最小值, 见式(15):

$$\rho_{\max} = \min(\rho_{wf}, \rho_{wfP}, \rho_{wh}) \quad (15)$$

4 实际资料应用

以库车坳陷博孜A区块的一口博孜X井为例, 目的层钻井过程中采用 1.87 g/cm^3 密度泥浆钻进, 6 759~6 860 m处发生钻井液漏失, 电成像测井显示6 810~6 870 m处附近有井壁崩落. 该区块目的层为白垩系巴什基奇克组, 岩性组合特征为中厚-厚层状褐色、灰褐色细砂岩、含砾细砂岩与薄-中厚层状褐色泥岩、粉砂质泥岩呈等厚-不等厚互层, 局部厚层细砂岩中夹薄层中砂岩及泥砾条带, 储层平均孔隙度约为7%、平均渗透率约为0.3 mD, 测试样品分析显示为典型凝析气藏^[20].

图4为博孜X井井壁稳定性分析结果. 其中: 第一道为钻井过程中测深, 第二道为地质分层, 第三道为三向应力结果, 从图4可以看出该井目的层应力处于走滑断层型; 第四道为计算的泥浆密度窗口, 灰色、黄色、青色和黑色曲线分别表示传统模型下的孔隙压力梯度、坍塌压力梯度、最小水平主应力当量(闭合)压力梯度和破裂压力梯度, 红色和蓝色曲线分别表示新预测模型下的弱面坍塌和破裂压力梯度, 蓝色虚线表示钻进过程中的泥浆密度; 第五道为钻井过程中发生泥浆漏失部位电成像测井解释结果(部分).

结合新安全泥浆密度窗口预测模型结果, 博孜X井目的层建议泥浆密度如表1所示. 新模型与传统模型相比, 可以很好地解释博孜X井钻井过程中的井壁崩落与漏失. 失稳原因分析认为, 钻井过程中泥浆密度过大, 导致裂缝(弱面)发生滑移, 多裂缝滑移引起的井壁崩落, 目的层层理发育, 钻井液侵入地层裂缝, 导致裂缝发生张性破裂, 造成漏失. 工程建议适当降低泥浆密度, 提前准备堵漏剂, 注意降低钻具的震动, 控制起钻、下钻速度, 避免引起井底压力波动. 利用新安全泥浆密度窗口预测模型分析了博孜A区块共计16口井的井壁稳定性及失稳机理, 其中超深复杂地层坍塌压力的预测成功率达到87.5%、地层漏失压力的预测成功率达到93.7%, 表明本文所提安全泥浆窗口预测模型具有很好的适用性和准确性, 实际资料应用效果良好.

最后, 结合Petrel三维建模技术与本文安全泥浆密度窗口预测方法, 建立了博孜A区块考虑弱面坍塌和破裂情况的安全泥浆密度上、下限三维模型(图5). 由图5可知, 整体安全泥浆密度窗口随深度的增加而增加, 但由于地层的构造、地应力、裂缝以及岩石性质等方面的差异, 出现安全泥浆密度窗口的波动, 即图5中的颜色变化. 图6为该区块目的层安全泥浆密度上、下限二维模型, 整体呈现西部高、东部低的趋势, 这是因为构造高部位位置的下方油气聚集可能性更大, 为避免溢流应该给定相对较高的密度窗口, 符合地质工程认识.

最后, 结合Petrel三维建模技术与本文安全泥浆密度窗口预测方法, 建立了博孜A区块考虑弱面坍塌和破裂情况的安全泥浆密度上、下限三维模型(图5). 由图5可知, 整体安全泥浆密度窗口随深度的增加而增加, 但由于地层的构造、地应力、裂缝以及岩石性质等方面的差异, 出现安全泥浆密度窗口的波动, 即图5中的颜色变化. 图6为该区块目的层安全泥浆密度上、下限二维模型, 整体呈现西部高、东部低的趋势, 这是因为构造高部位位置的下方油气聚集可能性更大, 为避免溢流应该给定相对较高的密度窗口, 符合地质工程认识.

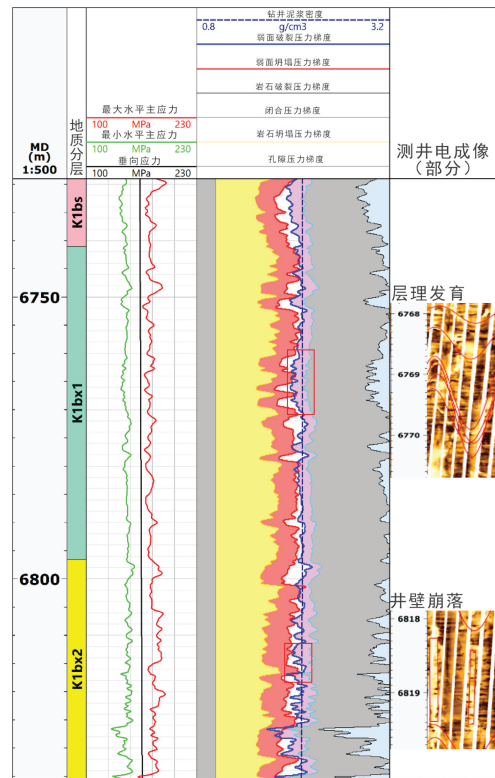


图4 博孜X井井壁稳定性分析

表1 博孜X井建议泥浆密度

开始深度/m	结束深度/m	泥浆密度/(g/cm ³)
6 729	6 813	1.83
6 813	6 835	1.80

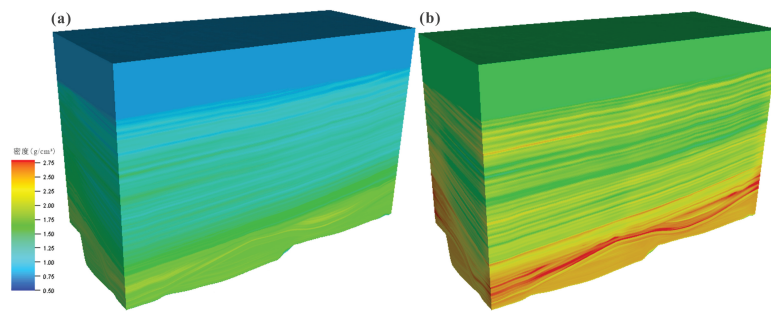


图5 考虑弱面坍塌和破裂的安全泥浆密度下(a)、上(b)限三维模型

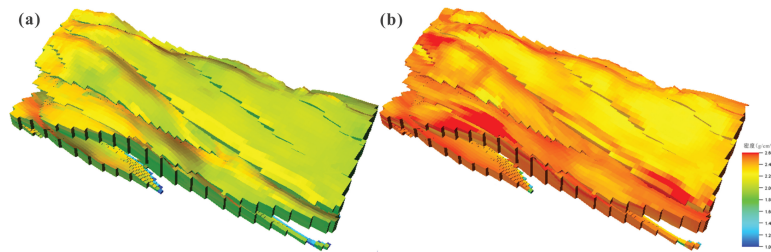


图6 考虑弱面坍塌和破裂的安全泥浆密度下(a)、上(b)限目的层平面俯视图

5 结论

针对库车坳陷克拉苏构造带超深油气储层钻井开采过程中,井筒合理的安全泥浆窗口难以确定,造成井壁坍塌、漏失等井壁失稳问题.本文计算井筒区应力时考虑了地层温度对应力的影响,计算结果表明,相比不考虑地层温度时,井筒的周向和垂向应力更小,更符合井筒区应力分布.基于Mohr-Coulomb破坏准则的岩石失稳条件加入了地层弱面/裂缝的坍塌和破裂,并根据岩石、弱面分别不发生滑移坍塌的最小泥浆密度和不发生张性破裂的最大泥浆密度,以及孔隙压力和最小水平主应力的当量密度6个参数,提出了共同确定安全泥浆窗口上、下限的取值方法.

博孜A区块的实际资料应用效果显示,本文所提安全泥浆密度窗口预测方法,对超深复杂地层坍塌压力和漏失压力的预测成功率分别达到87.5%和93.7%.相比常规泥浆密度窗口预测方法,本文方法增加了对弱面失稳条件的考虑,所确定的泥浆密度窗口在指导库车坳陷超深裂缝性气藏钻井过程中具有更准确、井壁稳定性更高等优点.结合Petrel三维建模技术建立的考虑弱面坍塌和破裂的安全泥浆密度上、下限三维和目的层平面模型,符合地质工程认识,并能为实际施工设计提供有效参考.

参考文献:

- [1] 王清华,杨海军,徐振平,等.塔里木盆地库车坳陷克探1井重大突破与勘探意义[J].中国石油勘探,2023,28(2):1-10.
WANG Q H, YANG H J, XU Z P, et al. Major breakthrough and exploration significance of Well Ketan 1 in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 1-10. (in Chinese)
- [2] 田军,杨海军,吴超,等.博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J].天然气工业,2020,40(1):11-19.
TIAN J, YANG H J, WU C, et al. Discovery of Well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 11-19. (in Chinese)
- [3] 杨海军,李勇,唐雁刚,等.塔里木盆地克拉苏盐下深层大气田的发现[J].新疆石油地质,2019,40(1):12-20.
YANG H J, LI Y, TANG Y G, et al. Discovery of Kelasu subsalt deep large gas field, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1): 12-20. (in Chinese)
- [4] WANG Y, WATSON R, ROSTAMI J, et al. Study of borehole stability of Marcellus shale wells in longwall mining areas[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2014, 4(1): 59-71.
- [5] 林龙生,王文文.井壁稳定性分析在煤层气勘探开发中的应用[J].煤炭科技,2021,42(5):117-121.
LIN L S, WANG W W. Application of wellbore stability analysis in CBM exploration and development[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2021, 42(5): 117-121. (in Chinese)

- [6] 李高仁, 史亚红, 夏宏泉, 等. 基于Mogi-Coulomb强度准则的井壁稳定性力学分析新方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(10): 70-75.
LI G R, SHI Y H, XIA H Q, et al. New method for mechanical analysis of wellbore stability based on Mogi-Coulomb strength criterion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(10): 70-75. (in Chinese)
- [7] KIRSCH G. Die theorie der elastizitat und die beauforisse der festigkeitslehre[J]. Zeitschrift des Vereines Deutsches Ingenieure, 1898, 42: 797-807.
- [8] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98(2): 418-433.
- [9] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12: 155-164.
- [10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- [11] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [12] BRADLEY W B. Failure of inclined boreholes[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1979, 101(4): 232-239.
- [13] 慈建发, 何世明, 李荣, 等. 钻前井壁力学稳定性研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 68-71+162.
CI J F, HE S M, LI R, et al. Pre-spud study on mechanical stability of wellbore[J]. Nature Gas Industry, 2006, 26(6): 68-71+162. (in Chinese)
- [14] STEPHENS G, VOIGHT B. Hydraulic fracturing theory for conditions of thermal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 19(6): 279-284.
- [15] RITCHIE R H, SAKAKURA A Y. Asymptotic expansions of solutions of the heat conduction equation in internally bounded cylindrical geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(12): 1453-1459.
- [16] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [17] SETIAWAN N B, ZIMMERMAN R W. The implications of using anisotropic elasticity and fully-triaxial failure criteria for borehole stability analysis in shales[C]//Proceedings of the 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. June 23-26, 2019, New York City, NY, USA. American Rock Mechanics Association, 2019: ARMA-2019-2178.
- [18] ZHANG J C. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 160-170.
- [19] 阎凯, 李锋. 塔里木油田井控技术研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 522-527.
YAN K, LI F. Research on the well control techniques in Tarim Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 522-527. (in Chinese)
- [20] 徐珂, 张辉, 鞠玮, 等. 库车坳陷博孜X区块超深储层有效裂缝分布规律及对天然气产能的影响[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2489-2505.
XU K, ZHANG H, JU W, et al. Effective fracture distribution and its influence on natural gas productivity of ultra-deep reservoir in Bozi-X block of Kuqa depression[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2489-2505. (in Chinese)

责任编辑: 张自强