

台南气田水平井裸眼井壁稳定性分析*

邓 珊¹, 董长银¹, 谯世君², 周生田¹, 武 龙¹

(1. 中国石油大学(华东), 山东 东营 257061; 2 青海油田公司钻采院)

摘 要: 水平井井壁是否稳定关系到水平井在开采过程中的生产动态。井壁稳定性归根结底是井下岩石所受应力大小与岩石强度大小校核的结果。通过调研总结了四种水平井裸眼井壁稳定性分析模型, 包括抗压强度法、Mohr-Coulum n 剪切应力分析法和Von-M esis 剪切应力分析法。利用上述三种评价方法对台南气田某水平井进行水平井裸眼井壁稳定性分析, 得到的结论均是该水平井井壁不稳定或极不稳定, 结果说明此井需要考虑能够防止井壁坍塌或变形的水平井完井方式, 从而为其进行水平井完井方式优选提供了参考依据。

关键词: 水平井; 裸眼井壁稳定性; 剪切应力; 评价方法; 水平井完井

水平井井壁稳定性是指水平井在生产过程中水平段的井壁是否发生不稳定坍塌现象, 这直接关系到水平井在开采过程中的生产动态。如果在生产条件下, 水平井井壁能够保持稳定, 则不必考虑井壁坍塌的风险以及相应的处理措施。否则, 就需要采取措施减小井壁坍塌风险。因此, 在进行水平井完井方式优选之前, 首先需要预测生产条件下的井壁稳定性, 预测结果将会对水平井完井方式的选择产生重要的影响。井壁稳定性归根结底是井下岩石所受应力大

小与岩石强度大小校核的结果。本文主要研究了抗压强度法、Mohr-Coulum n 剪切应力分析法和Von-M esis 剪切应力分析法等三种水平井裸眼井壁稳定性分析模型^[1-8], 并利用这三种评价方法对台南气田台某水平井进行水平井裸眼井壁稳定性分析。

1 抗压强度法

水平井生产过程中, 井筒附近的压降梯度仅是产层出砂的外因, 而产层岩石的胶结强度以及井壁岩石的应力状态, 才是产层出砂的内在因素。判断水

要集中在3排井以内, 即较高构造部位, 如 Ed_2^{2-1} 和 Ed_2^{2-2} 两小层, 不仅厚度较大, 连片分布, 而且油层原油物性好; 在3排以外构造低部位, 油层厚度薄, 多为油水或油干二类。

油层纵向上主要集中在二砂层组和一砂层组的上部, 其中二砂层组油层最为发育, 在二砂层组中, 以 Ed_2^{2-1} 和 Ed_2^{2-2} 油砂体发育最好, 不仅油层厚, 分布范围广, 而且连通好, 如二砂层组的油层在3排井以内, 油层钻遇率达90%以上。在构造较低部位3排以外油层薄, 油层层数少, 油层钻遇率只有50%左右, 而且油层多为二类油干或二类油水。因此从纵向上看东二段 Ed_2^{2-1} 和 Ed_2^{2-2} 小层为胜二区东二段的主力小层, 一砂层组和 Ed_2^{2-3} 、 Ed_2^{2-4} 小层次之, 而三、四砂层组以水层为主。

3 结论

通过精细地质研究, 对胜坨油田二区东二段进行了全区统层, 并对油水界面进行了调整, 通过分析井点的沉积特征、砂厚、电性特征及曲线特征, 划分4种沉积微相, 建立相模式, 对全区详细划分了沉积相平井井壁稳定或产层岩石坚固程度的定量指标应该

带, 重新绘制了沉积微相图, 明确了剩余储量的分布范围, 为井网完善, 开发调整提供了依据。

[参考文献]

- [1] 林承焰 剩余油形成与分布[M] 东营: 石油大学出版社, 2000
- [2] 刘建民, 李阳 河流成因储层剩余油分布规律及控制因素探讨[J] 油气采收率技术, 2000, 7.
- [3] 杜贤樾等 胜利油区勘探开发论文集[M] 北京: 地质出版社, 1997.
- [4] 王秉海, 钱凯 胜利油区地质研究与勘探实践[M] 东营: 石油大学出版社, 1992
- [5] 赵澄林, 张善文等 胜利油区沉积储集层与油气[M] 北京: 石油工业出版社, 1999
- [6] 张一伟 陆相油藏描述[M] 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [7] 孙永传, 李蕙生编著 碎屑岩沉积相和沉积环境[M] 北京: 地质出版社, 1986

* 收稿日期: 2009- 01- 20

作者简介: 邓珊(1984—), 女, 中国石油大学(华东)应用数学专业硕士研究生。

是反映岩石胶结程度的岩石抗压强度与生产压差下井壁岩石所承受的切向地应力之间的关系。

因此,判断水平井产层在生产压差下岩石坚固程度的定量指标应为:

$$[\sigma] \frac{3-4\mu}{1-\mu} (10^{-6} \rho g H - P_s) + 2(P_s - P_w) \quad (1)$$

其中,方程右边代表水平井井壁岩石所承受的切向地应力,左边为岩石的抗压强度。

如果上式成立,则岩石是坚固的。反之,岩石是疏松的,生产过程中可能坍塌,需要进行防砂型完井。

2 Mohr- Coulomb 剪切应力分析法

井眼挤毁的机理主要是井壁周围的剪切应力超过岩石的剪切强度所造成的。根据Mohr- Coulomb 剪切破坏理论,作用在最大剪切应力平面上的剪切应力和有效法向应力的表达式为^[2,4]:

$$\begin{cases} \tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \Phi \\ \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 - P_0 - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \Phi \end{cases} \quad (2)$$

应用Bradley 的井眼周围应力公式,可以计算 τ_{max} 和 σ_3 ,最后与岩石的直线型强度包络线或双曲线强度包络线进行比较,若岩石的应力状态处在包络线以下,井眼是稳定的。若处在破坏线以上,则表明剪切破坏已经发生,井眼是不稳定的。

3 Von- Mises 剪切应力分析法

3.1 Von- Mises 剪切应力模型

该方法是根据Von Mises 剪切破坏理论进行井眼稳定性的判断,其中考虑了中间主应力的影响。剪切应力均方根和有效法向应力如下:

$$\begin{cases} J_2^{1/2} = \sqrt{\frac{1}{6} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ \bar{J}_1 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - P_0 \end{cases} \quad (3)$$

应用Bradley 的井眼周围应力公式,可以计算 $J_2^{1/2}$ 和 \bar{J}_1 ,最后与岩石的直线型强度包络线进行对比,判断井眼是否稳定。

3.2 模型求解

根据原水平地应力 σ_{r1} , σ_{r2} 和 α ,将原地应力转换为井轴直角坐标系统中的三个法向应力和三个剪切应力:

$$\begin{cases} \alpha_x = (\sigma_{r1} \cos^2 \beta + \sigma_{r2} \sin^2 \beta) \cos^2 \gamma + \alpha \sin^2 \gamma \\ \alpha_y = \sigma_{r1} \sin^2 \beta + \sigma_{r2} \cos^2 \beta \\ \alpha_z = (\sigma_{r1} \cos^2 \beta + \sigma_{r2} \sin^2 \beta) \sin^2 \gamma + \alpha \cos^2 \gamma \\ \tau_{yz} = 0.5 (\sigma_{r2} - \sigma_{r1}) \sin (2\beta) \sin \gamma \\ \tau_{xz} = 0.5 (\sigma_{r1} \cos^2 \beta - \sigma_{r2} \sin^2 \beta + \alpha) \sin^2 (2\gamma) \\ \tau_{xy} = 0.5 (\sigma_{r2} - \sigma_{r1}) \sin (2\beta) \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

将上述三个法向应力和三个剪切应力转换为井眼圆柱坐标系统中的三个法向应力 σ_r , σ_θ 和 σ_z 和三个剪切应力 $\tau_{r\theta}$, τ_{rz} , $\tau_{\theta z}$,得:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_w \\ \sigma_\theta = (\alpha_x + \alpha_y - P_w) - 2(\alpha_x - \alpha_y) \cos (2\theta) - 4\tau_{xy} \sin (2\theta) \\ \sigma_z = \alpha_z - 2U(\alpha_x - \alpha_y) \cos (2\theta) - 4U\tau_{xy} \sin (2\theta) \\ \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \\ \tau_{\theta z} = 2(\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) \end{cases} \quad (5)$$

根据井眼圆柱坐标中的法向应力和剪切应力,计算主应力:

$$\begin{cases} \sigma_1^* = \sigma_r = P_w \\ \sigma_{2,3}^* = \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \pm \frac{1}{2} [(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 - 4\tau_{\theta z}^2]^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

计算后,根据大小重新安排标码。一般情况下取:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_\theta \\ \sigma_2 = \sigma_z \\ \sigma_3 = \sigma_r = P_w \end{cases} \quad (7)$$

3.3 稳定性判断准则

根据直线型强度判据公式,计算相应的剪切强度:

$$\tau = C_i + \alpha \cdot \text{tg} \Phi \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\alpha - \alpha}{\alpha + \alpha} \quad (9)$$

若由(2)式算出的 τ_{max} 由(8)式算出的 τ ,则表明井眼不稳定;反之则井眼稳定。

根据双曲线型强度判据公式,计算相应的剪切强度:

$$\tau_d = \sqrt{(\alpha_x + \alpha)^2 \text{tg} \eta + (\alpha_x + \alpha) \alpha} \quad (10)$$

$$\text{tg} \eta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha} - 3} \quad (11)$$

若由(2)式算出的 τ_{max} 由(10)式算出的 τ_d ,则表明井眼不稳定;反之则井眼稳定。

根据直线型强度判据公式,计算剪切强度均方根:

$$J_{2s}^{1/2} = \alpha + J_1 \cdot \text{tg} \beta \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{3 \cdot C_i}{\sqrt{9 + 12 \text{tg}^2 \Phi}}, \text{tg} \beta = \frac{3 \cdot \text{tg} \Phi}{\sqrt{9 + 12 \text{tg}^2 \Phi}} \quad (13)$$

其中, J_1 为由(2)式算出的有效法向应力,MPa。

如果由(4)式算出的 $J_2^{1/2}$ 由(12)式算出的 $J_{2s}^{1/2}$,则表明井眼不稳定;反之,如果 $J_2^{1/2} > J_{2s}^{1/2}$,则表明井眼稳定。

经过分析研究,认为采用Von Mises 理论计算剪切应力均方根 $J_2^{1/2} > J_{2s}^{1/2}$ (也有叫广义剪切应力)和有效法向应力 J_1 ,结合直线型强度公式计算剪切强度均方根 $J_2^{1/2}$ (广义剪切强度),即用式(3)和式(12)进行井眼稳定性判断最为可靠。



4 台南气田水平井井壁稳定性分析

利用上述水平井裸眼井壁稳定性数学模型对台南气田水平井井壁稳定进行评价与预测。台南气田位于柴达木盆地东部,行政区划属青海省格尔木市辖区,是一个大型的浅层生物气田。由于台南气田储层多,非均质性强,不同位置的岩样具有较大差异,但从总体上分析,取心井段的储层物性具体表现为高孔隙度,中——低渗透率的特点。储层的岩石种类有细砂岩、含泥粉砂岩、泥质粉砂岩和鲕粒砂岩。由于泥页岩特性极易与水发生膨胀、分散,钻井液与泥页岩之间的化学反应将影响到岩石力学性能参数、强度参数和近井壁应力状态的变化,从而导致井壁失稳现象的发生。这种情况下,水平井进行生产作业时,井壁易不稳定,其坍塌风险大,因此在完井过程中需要考虑能够防止井壁坍塌或变形的水平井完井方式,以减小井壁坍塌风险。

4.1 基础数据

使用台南气田台某水平井的资料进行水平井裸眼井壁稳定性分析。该气井井眼直径215 9m,水平井段位于1568~ 2577m 井段,垂深1576 54m,长约1009m,地层压力18 7MPa,井底压力14 5MPa,气层厚度9 3m,岩石密度2650kg/m³,岩石泊松比为36,抗压强度1.26MPa,内聚强度1.31MPa,内摩擦角30 83°;地层原始垂向主应力、原始最小水平主应力和原始最大水平主应力分别为32 175MPa、23 515MPa、33 147MPa。

4.2 井壁稳定性分析结果

根据上述预测模型,以及地层岩石力学特性数据,对台南气田水平井井壁稳定性分析进行预测和评价,得到的结果如表1和图1所示。

表1 裸眼井壁稳定性分析结果

评价方法	评价指标	评价结论
抗压强度法	0.0201	极不稳定
Mohr- Coulumn 剪切应力分析法	0.7262	不稳定
Von- Mesis 剪切应力分析法	0.3689	极不稳定

由表1可知,三种评价方法对台南气田水平井井壁稳定分析得到的结论均是不稳定或极不稳定。其中,Mohr- Coulumn 剪切应力分析法得到的评价指标最大,Von- Mesis 剪切应力分析法得到的评价指标次之,抗压强度法得到的评价指标最小。因此,在进行水平井完井方式优选时,需要考虑能够防止井壁坍塌或变形的水平井完井方式。

由图1可知,对该水平井分别应用抗压强度法、Mohr- Coulumn 剪切应力分析法、Von- Mesis 剪切应力分析法这三种评价方法进行井壁稳定性评价时,得到的评价指标随着井底流压的增大而变化不大,且近似呈直线分布。其中,Mohr- Coulumn 剪切应力分析法得到的评价指标随井底流压的变化相对

明显一些。

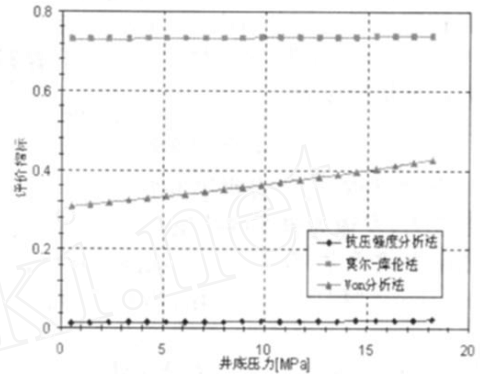


图1 水平井井壁稳定性指标随井底压力的变化关系

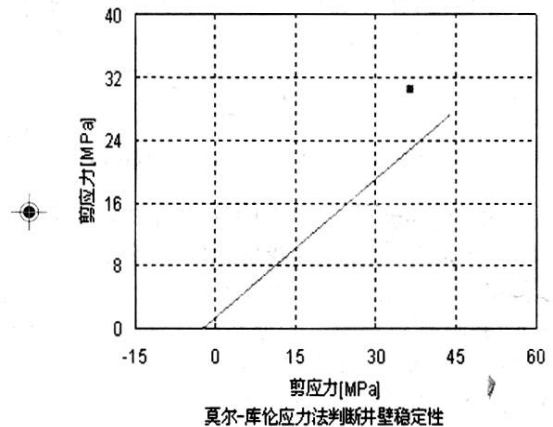


图2 水平井Mohr- Coulumn 应力法判断曲线

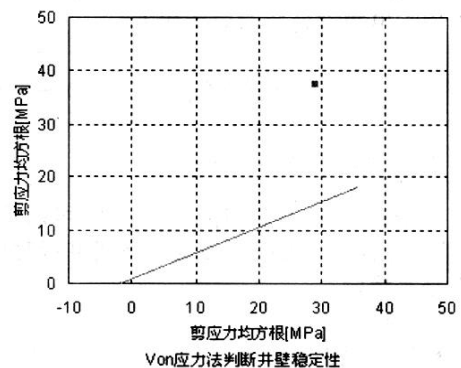


图3 水平井Von- Mesis 应力法判断曲线

图2和图3分别为台南气田台某水平井应用Mohr- Coulumn 剪切应力分析法和Von- Mesis 剪切应力分析法进行井壁稳定性分析时的判断曲线图。上述曲线中,判断点在直线之上表示井壁不稳定,否则表示稳定。由此可知,该水平井井壁不稳定,需要考虑能够防止井壁坍塌或变形的水平井完井方式,以减小生产过程中井壁坍塌风险。

5 结论

5.1 分析了抗压强度法、Mohr-Coulomb 剪切应力分析法、Von-Mises 剪切应力分析法三种水平井裸眼井壁稳定性分析评价方法,并给出了具体的计算方法。

5.2 将三种评价方法应用于台南气田水平井裸眼井壁稳定性分析,得到的结果均为不稳定或极不稳定。其中,Mohr-Coulomb 剪切应力分析法得到的评价指标最大,Von-Mises 剪切应力分析法得到的评价指标次之,抗压强度法得到的评价指标最小。

5.3 应用实例的分析结果表明,在进行水平井完井方式优选时,需要考虑能够防止井壁坍塌或变形的水平井完井方式。这三种评价方法为更多的水平井裸眼井壁稳定性分析的应用提供理论依据。

5.4 台南气田水平井井壁稳定性分析结果已应用于该气田水平井完井方式的评价与优选。根据评价结果,由于井壁不稳定,台南气田水平井完井方式需选择对井壁具有支撑作用的防砂型完井方式,目前已在论证与实施中。

符号说明:

σ —岩石的抗压强度,MPa; μ —岩石泊松比,小数; ρ —上覆岩石平均密度, kg/m^3 ; g —重力加速度, m/s^2 ; H —产层中部深度, m ; P_s —产层孔隙流体压力,MPa; P_w —井底流压,MPa; τ_{\max} —最大剪切应力,MPa; α —有效法向应力,MPa; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力,MPa; P_0 —地层压力,MPa; Φ —内摩擦角; ρ_m 、 ρ_f 分别为钻井液密度和地层密度, g/cm^3 ; η —应力非线性修正系数; a —有效应力系数; $J^{1/2}$ 为剪切应力均方根,MPa; 为有效法向应力,MPa; γ 为井眼的倾斜角度,弧度; β

为井眼的方位角,弧度; σ_1 、 σ_2 为水平地应力,MPa; α 为垂向地应力,MPa; ν 为泊松比,小数; θ 为井眼圆柱体坐标中沿周向的角度,弧度; τ 为剪切强度,MPa; C_i 为岩石的内聚力,MPa; σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa; α 、 β 分别为岩石材质常数和岩石材质常数。

【参考文献】

- [1] 刘厚彬, 孟英峰 超深井井壁稳定性分析[J]. 天然气工业, 2008, 28(4): 67~69.
- [2] 齐从丽, 钟敬敏, 钟水清 川西深层井壁稳定及参数敏感性研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 19~21.
- [3] 黄凯文, 刘书杰 涠洲12-1北油田二段井壁稳定性技术[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(6): 7~9.
- [4] 周长江, 刘向君, 张卓 水平气井井壁稳定性研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 81~89.
- [5] 蒋祖军, 张杰, 孟英峰 气体钻井井壁稳定性评价方法分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 68~70.
- [6] 蔚宝华, 邓金根, 高德利 南海流花超大位移井井壁稳定性分析[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(1): 1~3.
- [7] 李荣, 孟英峰, 汪绪刚 气体钻井中泥页岩地层遇水时的井壁稳定性研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(3): 5~8.
- [8] 梁利喜, 刘向君, 许强 发育有切割井眼结构的井壁稳定性评价研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 27~29.

Analysis of Horizontal Open Hole Stability in Tainan Gas Field

DEN G Shan¹, DON G Chang-yin¹, QIAO Shi-jun², ZHOU Sheng-tian¹, WU Long¹

(1. China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061; 2. Drilling and Mining Institute of Qinghai Oilfield Company)

Abstract: Wellbore stability of horizontal hole related to the production performance of exploitation process. In the final analysis, the stability of wellbore depends on the stress and strength of downhole rocks. Four kinds of horizontal open hole wellbore stability analysis model, include comprehensive strength method, Mohr-Coulomb and Von-Mises shearing stress analytical method, was summarized according to investigation. The wellbore stability result about horizontal open hole in Tainan Gas Field is unstable or extremely unstable, and the result get from those four methods is roughly consistent. This result indicates that the horizontal open hole needs to consider new way of horizontal well completion preventing wellbore collapsing or distortion, which provide a reference for optimizing the methods of horizontal hole completion.

Key words: Horizontal Well; Open Hole Stability; Shearing Stress; Evaluation Method; Horizontal Well Completion