

大位移井的井壁稳定力学分析

金 衍 陈 勉 柳贡慧 陈治喜

摘 要：从井壁稳定的力学机理出发，分析大位移井周的应力分布规律，建立大位移井井壁稳定的力学模型，并据此编制了Windows环境下的井壁稳定分析软件，形成一个方便工程问题分析的集成环境，利用该软件分析了影响井壁稳定性的因素，提出了大位移井钻井的最优井斜方位和安全泥浆密度的选择方法。

关键词：大位移井；井壁稳定；岩石力学

分类号：P634.2，TU457 **文献标识码**：A

WELLBORE STABILITY ANALYSIS OF EXTENDED REACH WELLS

JIN Yan, CHEN Mian, LIU Gonghui, CHEN Zhixi
University of Petroleum, Changping Beijing 102200

Abstract : Stability of extended reach wells is an important subject. Instability problems like lost circulation and borehole collapse during drilling operation lead to poor hole conditions causing a lot of problems like poor cement displacement and others. As a result, excessive nonproductive time and expensive wells are experienced.

This paper is based on a linear elastic and isotropic mechanics models for stress distribution around extended wells, with the aim of improve understanding the general behavior of extended wells. According to the established stability mechanics models, a wellbore stability simulator is developed, which runs under Microsoft Windows with friendly interface, high efficiency of field problem analysis. By using the software, the influence of certain factors on wellbore stability is analyzed. These factors include in-situ stress state, deviation, azimuth, strength rock, mechanical property and mud performance. Finally, the guide to determination of the azimuth and the safe mud density range for extended reach wells is presented.

Key words : extended reach wells; wellbore stability; rock mechanics

随着石油工业的发展，钻井从原来的直井钻井发展到斜度井、水平井等大位移井钻井，尤其在海洋石油钻井中，绝大部分是大位移井。由于井身发生倾斜，井壁稳定性与直井有显著差别，井壁稳定性不仅与井眼轨迹（井斜角、井斜方位）有关，而且还与地应力方位有关。

1 大位移井的井周应力分析

深部地层受三向主地应力作用，上覆地应力 σ_v ，水平最大主地应力 σ_H 和水平最小地应力 σ_h 。选取坐标系(1, 2, 3)分别与主地应力 σ_H 、 σ_h 、 σ_z 方向一致(图1)。为了方便起见，建立直角坐标系(x, y, z)和柱坐标系(r, θ , z)，其中oz轴对应于井轴，ox和oy位于与井轴垂直的平面之中。

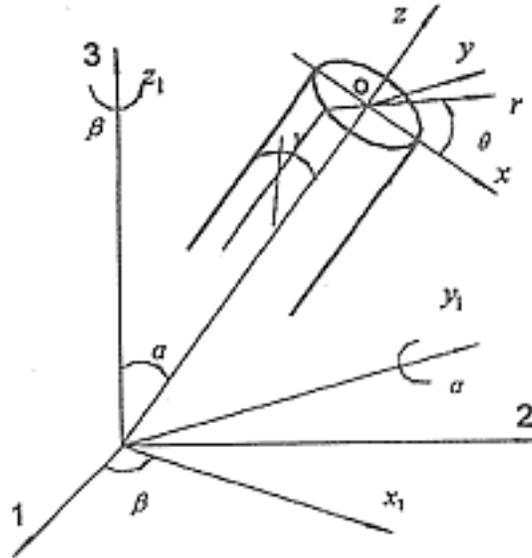


图1 斜井井轴的坐标变换
Fig.1 Coordinate conversion
of deviated well axis

为了建立(x, y, z)坐标与(1, 2, 3)坐标之间的转换关系，将(1, 2, 3)坐标按以下方式旋转(图1)。

(1) 先将坐标(1, 2, 3)以3为轴，按右手定则旋转角 β ，变为(x₁, y₁, z₁)坐标。

为井斜方位与水平最大主地应力方位的夹角，井斜方位是大位移井井眼轴线在水平面的投影迹线与正北方向的夹角，水平最大主地应力方位是该地应力方向与正北方向的夹角；

(2) 再将坐标(x₁, y₁, z₁)以y₁为轴，按右手定则旋转角 α ，变为(x, y, z)坐标。 α 为井斜角，指的是大位移井井眼轴线与铅垂线的夹角。

主地应力坐标系(1, 2, 3)按图1所示旋转到坐标系(x, y, z)并得到如下应力转换关系：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \sigma_H & & \\ & \sigma_h & \\ & & \sigma_z \end{bmatrix} [L]^T \quad (1)$$

其中：

$$L = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta & -\sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

或者可写为：

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= H\cos^2\theta \cos^2\beta + h\cos^2\theta \sin^2\beta + \sin^2\beta \\ \sigma_{yy} &= H\sin^2\theta \cos^2\beta + h\sin^2\theta \sin^2\beta \\ \sigma_{zz} &= H\sin^2\theta \cos^2\beta + h\sin^2\theta \sin^2\beta + \cos^2\beta \\ \sigma_{xy} &= -H\cos\theta \cos\theta \sin\theta \cos\beta + h\cos\theta \cos\theta \sin\theta \sin\beta \\ \sigma_{xz} &= H\cos\theta \cos\theta \cos^2\beta + h\cos\theta \sin\theta \sin^2\beta \\ \sigma_{yz} &= -H\sin\theta \cos\theta \sin\theta \cos\beta + h\sin\theta \cos\theta \sin\theta \sin\beta \end{aligned} \quad (3)$$

上述六个地应力分量作用于井周地层，各自在井周的应力分布经线性叠加可得井周总的应力分布，在柱坐标系中各应力分量 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 、 τ_{rz} 、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$ 可表示为：

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R^2}{r^2}P_m + \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2}(1 - \frac{R^2}{r^2}) + \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\cos 2\theta + \\ &\sigma_{xy}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\sin 2\theta + \delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)}(1 - \frac{R^2}{r^2}) - \varphi](P_m - P_p) \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= -\frac{R^2}{r^2}P_m + \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{R^2}{r^2}) - \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{3R^4}{r^4})\cos 2\theta - \\ &\sigma_{xy}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\sin 2\theta + \delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)}(1 - \frac{R^2}{r^2}) - \varphi](P_m - P_p) \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_{zz} - \nu[2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})(\frac{R}{r})^2\cos 2\theta + 4\sigma_{xy}(\frac{R}{r})^2\sin 2\theta] + \\ &\delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi](P_m - P_p) \end{aligned} \quad (4c)$$

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{xy} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta z} = \sigma_{yz} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \cos \theta - \sigma_{zx} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \sin \theta$$

$$\sigma_{zr} = \sigma_{xz} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \cos \theta + \sigma_{yz} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \sin \theta$$

式中：R为井眼半径； P_m 为泥浆柱压力； P_p 为孔隙压力； ν 为泊松比； α 为渗透性系数，当井壁为不可渗透时为0，井壁渗透时为1； φ 为孔隙度。

当 $r=R$ 时，井壁上应力分量可表示为：

$$\begin{aligned} r &= P_m - \alpha \varphi (P_m - P_p) \\ &= A \frac{h+B}{H+C} + \frac{v+(K_1-1)P_m - K_1 P_p}{v+K_1(P_m - P_p)} \\ z &= D \frac{h+E}{H+F} + \frac{v+K_1(P_m - P_p)}{v+K_1(P_m - P_p)} \\ z &= G \frac{h+H}{H+J} + \frac{v}{v+K_1(P_m - P_p)} \\ r &= r_z = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

式中：

$$\begin{aligned} A &= \cos^2 \theta \{ \cos^2 \theta (1-2\cos^2 \theta) \sin^2 \theta + 2\sin^2 \theta \sin^2 \theta \} + (1+2\cos^2 \theta) \cos^2 \theta \\ B &= \cos^2 \theta \{ \cos^2 \theta (1-2\cos^2 \theta) \cos^2 \theta - 2\sin^2 \theta \sin^2 \theta \} + (1+2\cos^2 \theta) \sin^2 \theta \\ C &= (1-2\cos^2 \theta) \sin^2 \theta \\ D &= \sin^2 \theta \sin^2 \theta + 2v \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2 \theta + 2v \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \theta) \\ E &= \cos^2 \theta \sin^2 \theta - 2v \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2 \theta + 2v \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta \cos^2 \theta) \\ F &= \cos^2 \theta - 2v \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ G &= -(\sin^2 \theta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \sin^2 \theta \sin^2 \theta) \\ H &= \sin^2 \theta \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \cos^2 \theta \sin^2 \theta \sin^2 \theta \\ J &= \sin^2 \theta \sin^2 \theta \\ K_1 &= \left[\frac{\alpha(1-2c)}{1-\nu} - \varphi \right] \end{aligned}$$

井壁处的主应力 σ_i 、 σ_j 、 σ_k 可表示为：

$$\sigma_i = r = P_m - \alpha \varphi (P_m - P_p)$$

$$\begin{aligned}\sigma_j &= \frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] + \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \\ \sigma_k &= \frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z}\end{aligned}\quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned}X &= (A+D)_{h+(B+E)}_{H+(C+F)}_{v} \\ Y &= (A-D)_{h+(B-E)}_{H+(C-F)}_{v} \\ Z &= 4(G_{h+H}{}_{H+J}{}_{v})^2\end{aligned}$$

2 井壁稳定力学机理

2.1 剪切破坏

当井内液柱压力较低时,井壁周围岩石所受应力超过岩石本身的强度而产生剪切破坏,脆性地层产生坍塌掉块,井径扩大,而塑性地层则向井眼内产生塑性变形,造成缩径。

剪切破坏如图2所示。剪切面的法向和 σ_1 的夹角等于 θ ,法向正应力 σ_n ,剪应力为 τ_n 。根据库仑的研究,岩石破坏时剪切面上的剪应力必须克服岩石的固有剪切强度C值(称为粘聚力)加上作用于剪切面上的摩擦阻力,即:

$$\tau_n = \sigma_n \tan \phi + C \quad (7)$$

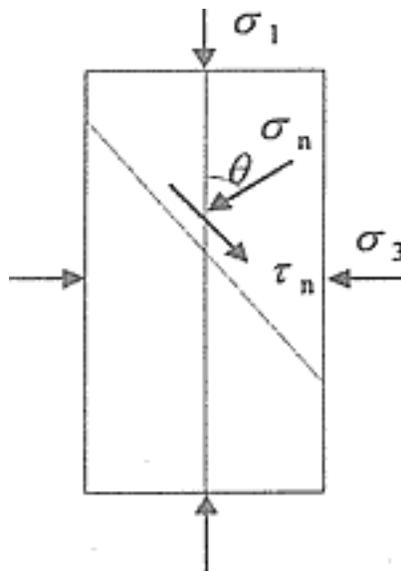


图2 岩石的剪切破坏
Fig.2 Shear failure of rock

上式为摩尔库仑强度准则, ϕ 为内摩擦角。
设安全系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{\sigma_n \tan \phi + C}{\tau} \quad (8)$$

并令系数 M 为:

$$M = 1 + (F_s - 1) \cos^2 \phi \quad (9)$$

正应力 σ_n 和剪应力 τ 用主应力 σ_1 和 σ_3 可表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi - \zeta P_p \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi \end{aligned} \quad (10)$$

式中 ζ 为有效应力系数。将摩尔库仑强度准则改写为:

$$f = M \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \zeta P_p \right) - \sin \phi \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \zeta P_p \right) - 2C \cos \phi = 0 \quad (11)$$

井壁岩石的剪切破坏可分为三种形式:

(1) σ_r 为最小时

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} [X - 2K_1 P_p + (2K_1 - 1) P_m] + \frac{1}{2} \sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \quad (12)$$

代入 (11) 式得迭代方程

$$f(P_m) = M \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} + \zeta P_p \right) + \sin \phi \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \zeta P_p \right) + 2C \cos \phi = 0 \quad (13)$$

(2) σ_r 为居中时

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] + \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \\ \sigma_3 &= \frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z}\end{aligned}\quad (14)$$

代入(11)式得迭代方程

$$f(P_m) = M(\sigma_3 - \sigma_1) + \sin\phi(\sigma_1 + \sigma_3 - 2P_p) + 2C\cos\phi = 0 \quad (15)$$

(3) σ_1 为最大时

$$\sigma_1 = P_m - P_p$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \quad (16)$$

代入(11)式得迭代方程

$$f(P_m) = M(\sigma_3 - \sigma_1) + \sin\phi(\sigma_1 + \sigma_3 - 2P_p) + 2C\cos\phi = 0 \quad (17)$$

2.2 拉伸破坏

从力学角度,地层破裂是由于井内泥浆密度过大使岩层所受的周向应力超过岩石的拉伸强度 S_t 而造成的,即

(1)当井壁为不可渗透时

$$\sigma_3 - P_p = -|S_t| \quad (18)$$

即:

$$\frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} - \zeta P_p = -|S_t| \quad (19)$$

(2)当井壁为渗透时

$$\sigma_3 - P_m = -|S_t| \quad (20)$$

$$\frac{1}{2}[X - 2K_1P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2}\sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} - \zeta P_m = -|S_t|$$

(21)

对于直井产生水平裂缝情况，上式可以简化。水平裂缝一般发生在那些岩层交错，层面常是一些弱面，由于多数这些弱面又近于水平，钻井液沿这些弱面侵入的地层。此外，当地层较浅时，也有可能形成水平裂缝。在地下岩石发生水平破裂时，必须有井内钻井液侵入地层，从而产生垂直方向的力克服上覆岩层压力 γ_v 、钻井液向地层中滤失而增大的应力分量以及岩石在垂直方向所具有的抗拉强度 S_t 。

$$\text{井壁周围岩石在垂直方向的应力: } \sigma_z = \gamma_v + K_1(P_m - P_p) \quad (22)$$

$$\text{由此井内钻井液侵入地层中,故垂直的有效应力 } \sigma_z: \quad \sigma_z = \sigma_z - P_p \quad (23)$$

$$\text{水平破裂时条件: } \sigma_z = -S_t \quad (24)$$

$$\text{产生水平缝的破裂压力: } P_f = P_p + \frac{\sigma_z + S_t}{1 - K_1} \quad (25)$$

3 影响大位移井井壁稳定性因素分析

3.1 井眼轨迹和地应力状态的影响

3.1.1 垂向地应力为第二主地应力时的井壁稳定性 为便于分析，假定水平最大主地应力为正北向，上覆地应力 $\gamma_v = 2.23 \text{ MPa/m}$ ，水平最大主地应力 $\sigma_H = 2.49 \text{ MPa/m}$ 和水平最小地应力 $\sigma_h = 1.76 \text{ MPa/m}$ ，粘聚力 $C = 7 \text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\phi = 25^\circ$ ，拉伸强度 $S_t = 5 \text{ MPa}$ ，孔隙压力 $P_p = 1.0 \text{ MPa/m}$ ；泊松比 $\nu = 0.2$ ，泥浆在井壁处不发生渗透。如图3所示，破裂压力和坍塌压力用当量泥浆密度表示，随着井斜方位角的增大，破裂压力值将增加，坍塌压力值也将增大。但当井斜角接近 90° 时，破裂压力值先增大后略减小，坍塌压力值趋于一定值。

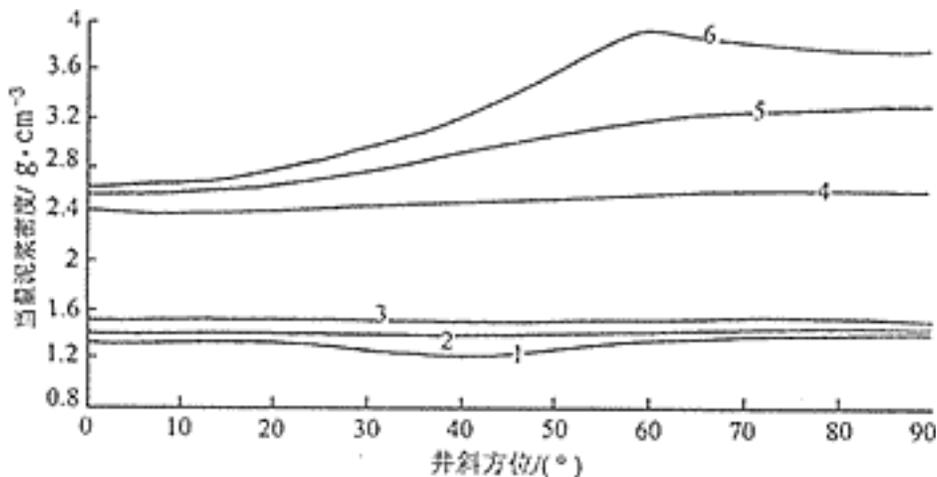


图3 井斜方位对井壁稳定性的影响

Fig.3 The influence of direction on borehole

- 1.井斜角90°时的坍塌压力；2.井斜角60°时的坍塌压力；
- 3.井斜角30°时的坍塌压力；4.井斜角30°时的破裂压力；
- 5.井斜角60°时的破裂压力；6.井斜角90°时的破裂压力

图4示井斜角对井壁稳定性的影响规律，随着井斜角的增大，破裂压力值将增加，而坍塌压力值将减小。这说明，在同样条件下，井斜角越大，钻井越安全，换句话说，只要垂井是安全的，斜井和水平井也安全。

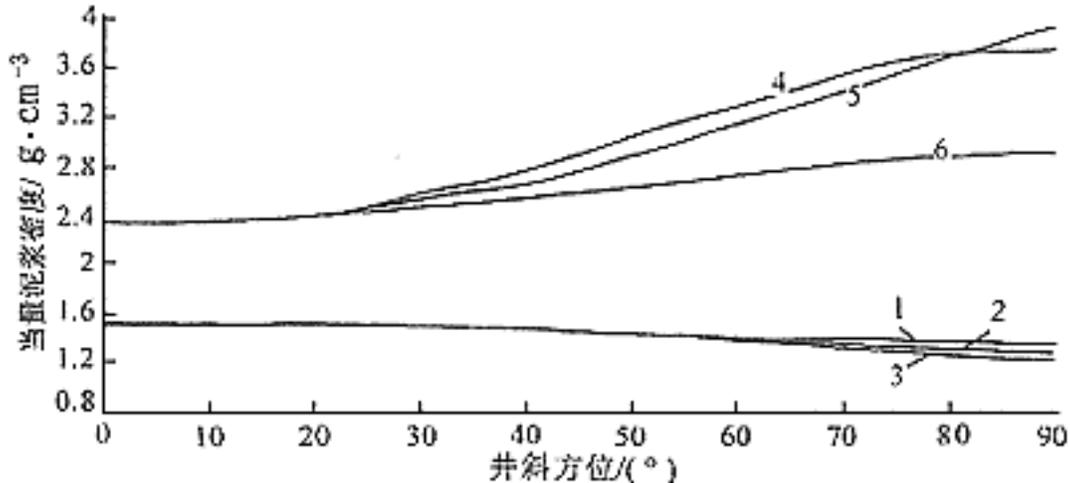


图4 井斜角对井壁稳定性的影响

Fig.4 The influence of deviation on borehole

- 1.井斜方位90°时的坍塌压力；2.井斜方位60°时的坍塌压力；
- 3.井斜方位30°时的坍塌压力；4.井斜方位90°时的破裂压力；
- 5.井斜方位60°时的破裂压力；6.井斜方位30°时的破裂压力

3.1.2 垂向地应力为最大地应力时的井壁稳定性 为便于分析，假定水平最大主地应力为正北向，上覆地应力 $\nu=2.23\text{MPa/m}$ ，水平最大主地应力 $H=2.09\text{MPa/m}$ 和水平最小地应力 $h=1.56\text{MPa/m}$ ，其余参数与3.1.1相同。

如图5所示，随着井斜方位角的增大，破裂压力值将增大，坍塌压力值将减小。这说明，朝着最小地应力方向钻井较为安全，而最大地应力方位一般不利于钻井。图6示井斜角对井壁稳定性的影响规律，随着井斜角的增大，破裂压力值增大，而坍塌压力值虽有局部减小但总体是增大的。这说明，如果泥浆密度对直井不安全，则对斜井和水平井也不一定安全。

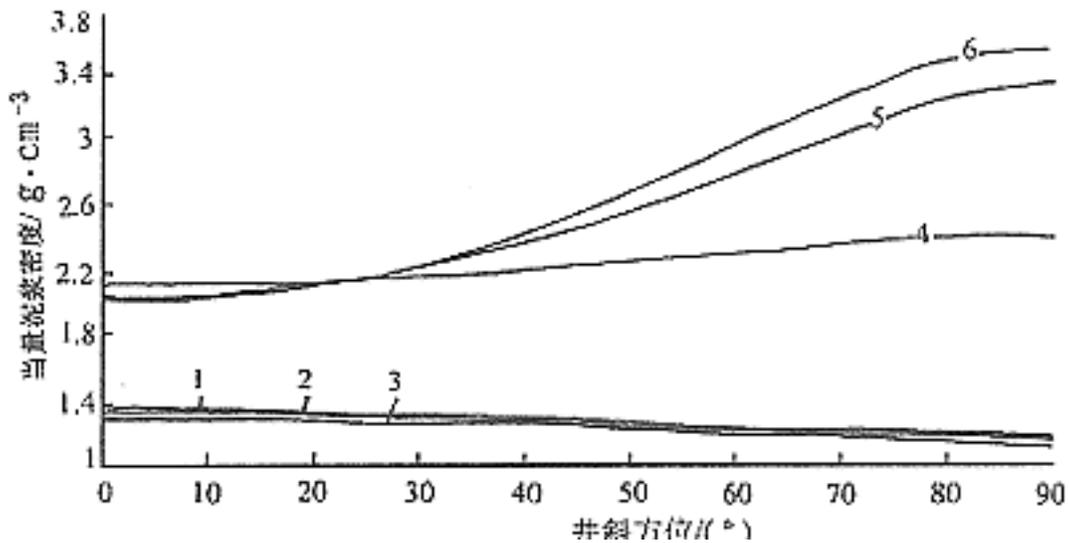


图5 井斜方位对井壁稳定性的影响

Fig.5 The influence of direction on borehole stability

- 1.井斜角90°时的坍塌压力；2.井斜角60°时的坍塌压力；
- 3.井斜角30°时的坍塌压力；4.井斜角30°时的破裂压力；
- 5.井斜角60°时的破裂压力；6.井斜角90°时的破裂压力

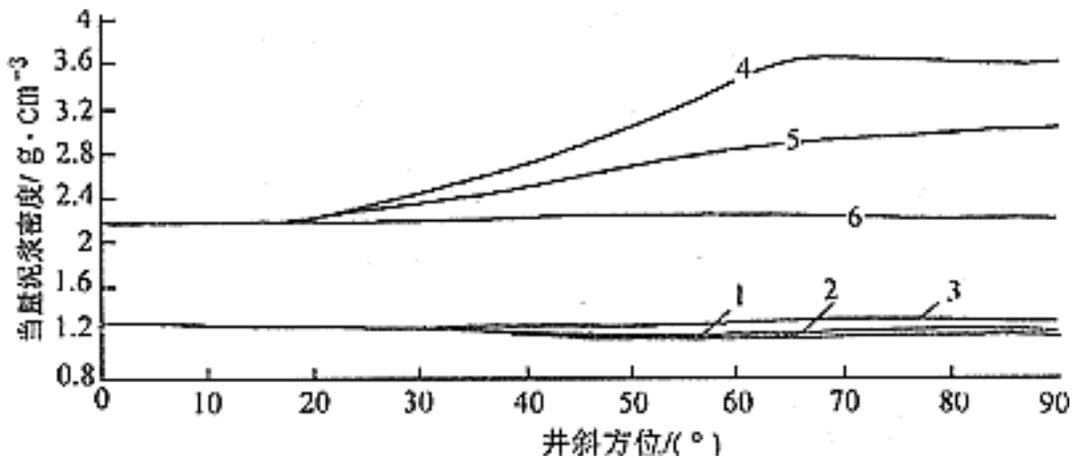


图6 井斜角对井壁稳定性的影响

Fig.6 The influence of deviation on
borehole stability

- 1.井斜方位90°时的坍塌压力；2.井斜方位60°时的坍塌压力；
- 3.井斜方位30°时的坍塌压力；4.井斜方位90°时的破裂压力；
- 5.井斜方位60°时的破裂压力；4.井斜方位30°时的破裂压力

3.2 井壁渗透性的影响

泥浆的造壁性能对井壁稳定有着显著的影响。不同的泥浆在井壁上形成的泥饼的性能有显著差别，泥浆滤液在井壁上的渗透能力也不同，从而导致泥浆柱压力的扩散程度不一样。泥浆柱压力的扩散程度越好，井壁稳定性越差；当井壁完全渗透时，井壁稳定性最差。渗透系数为零时，井壁不渗透，井段井壁稳定性最高；渗透系数为1时，井壁全渗透，井段井壁稳定性最低。此时，坍塌压力接近或超过破裂压力，几乎不可能进行钻井作业。因此，钻井时要求泥浆造壁性能高，在井壁形成薄而韧性的泥饼。

3.3 地层强度的影响

地层强度包括地层的粘聚力、内摩擦角和抗拉强度。地层增厚，坍塌压力降低，破裂压力增大，安全泥浆密度范围扩大，井壁稳定性提高，钻井就安全。尤其是地层强度对浅井井壁稳定性有显著影响。如果浅部地层强度太低，就需大幅度提高泥浆密度来满足井壁稳定。

3.4 地应力 H/h 的影响

地应力的比值对坍塌压力和破裂压力（破裂压力和坍塌压力用当量泥浆密度表示）有显著的影响。 H/h 比值越大，坍塌压力和破裂压力的差值就越小，钻井作业就越困难，图7是 H/h 从1.0变化到1.7时的坍塌压力和破裂压力的变化情况。若在1.63附近，坍塌压力和破裂压力几乎相等，这对于钻井来说是个灾难。由此可见，井壁的力学失稳的主要诱因之一是强地应力非均匀性。

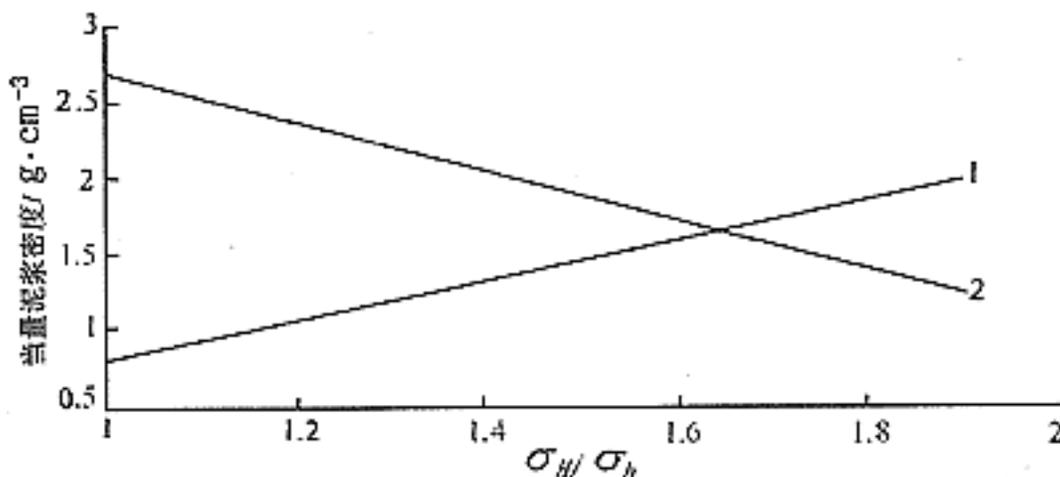


图7 地应力非均匀性对井壁稳定性的影响

Fig.7 The influence of inhomogeneous stress
on borehole stability

1.坍塌压力；2.破裂压力

4 井壁稳定综合解释软件包

井壁稳定综合解释软件包的设计思想是：总体结构合理，适合功能扩展，采取开放式稳定计算模块为中心模块，其他模块相互独立，通过磁盘文件或一定的数据结构与中心模块接口。模块以完成某一项功能为原则，分为测井数据处理、孔隙压力的预测、岩石力学参数测井解释、地应力分析、水化校核、稳定分析计算、压力波动和输出接口等8个模块(图8)。

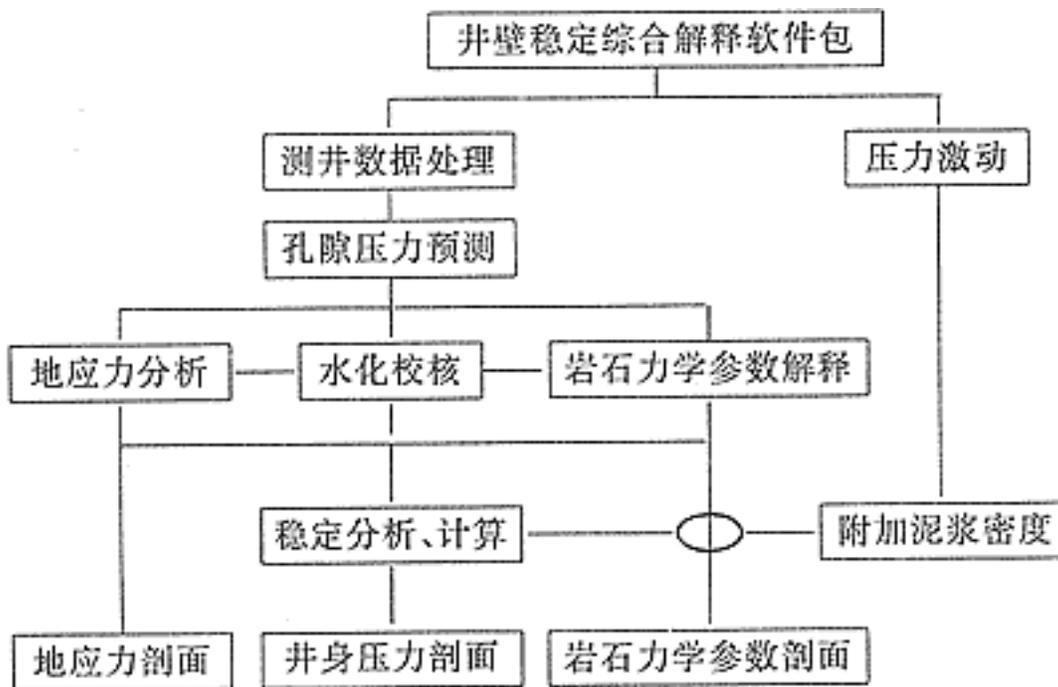


图8 软件包总体结构

Fig 8 Diagram of software package

预期效果以工程要求为准则，能给出适合井身结构设计的压力剖面；给出孔隙压力、地应力、岩石力学参数测井解释剖面，形成相应的数据文件，提供优化的井眼轨迹和合理的钻井液密度范围。

该软件包在Windows环境下运行，提供方便、友好的输入输出界面和在线帮助，既可以作为井壁稳定分析的工具，也可以用来测井解释岩石力学参数、孔隙压力检测、分析泥页岩水化对井壁稳定的影响。分析计算所得的井壁稳定钻井安全泥浆密度范围可作为井身结构设计的依据和分析钻井复杂事故的基础。该软件包在渤海油田和塔里木油田得到较为成功的应用。

5 建议

大位移井的井眼方位要视三个主地应力状态而定。当垂向主地应力大于水平最大地应力且差值不大或水平最大地应力为最大地应力时，最佳井眼方位在水平最小地应力或近水平最小地应力方位，此时钻井所要求的泥浆密度最低。但当垂向地应力比水平最大地应力大得多时，最佳井眼方位要具体分析。

利用各向同性地层线弹力学计算所得的泥浆密度与实用的泥浆密度有一定的出入是正常的。泥浆密度的选择首先要充分考虑井内泥浆柱压力的变化范围，根据井壁稳定力学模型确定理论安全的泥浆密度上、下限；其次要充分利用可以得到的井下复杂情况和泥浆密度资料进行详细地分析，依据井壁失稳引起的复杂情况对理论安全泥浆密度上、下限进行校正，得到校正的安全泥浆密度范围。若工程作业中允许井壁地层有一定程度的坍塌（脆性地层）和可以承受一定的井眼缩径率（蠕变地层），则可适当降低泥浆密度，这要视井眼裸露时间的长短而定。最后，预测钻井施工过程起、下钻速度，泥浆返速、划眼频率和井眼清洗次数等，应结合施工经验对安全泥浆密度进行适当调整，确定施工泥浆密度。

基金项目：霍英东教育基金资助

作者简介：金衍(1972-)，男，助教，石油大学在读博士，从事岩石力学、井壁稳定方面的研究。

作者单位：石油大学，北京 昌平 102200

参考文献

- [1] Lowrey J P, Ottesen S. An assessment of the mechanical stability of wells offshore Nigeria [J] . SPE26351.
- [2] Aadnoy B S and Chenevert M E. Stability of highly inclined boreholes [J] . SPE Drilling Engineering, Dec. 1987: 364-374.
- [3] 陈 勉, 陈治喜, 黄荣樽. 大斜度油井的井壁坍塌与破裂 [C] . 中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集, 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 425—429.
- [4] 黄荣樽, 邓金根, 程远方, 葛洪魁. 石油工程岩石力学研究进展 [J] . 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17 (增刊) .
- [5] Santarelli F J, et. Wellbore stability analysis made easy and practical [J] . SPE26351.

收稿日期：1998-05-14