

斜直井井壁张性裂纹的位置及走向 与井眼压力的关系

黄荣樽 白家祉 周煜辉 刘玉石
(石油大学) (北京石油勘探开发科学研究院)

预测井眼内张性裂纹的位置和走向是十分重要的。油气田开发人员可以根据裂纹的位置和走向布置开发井和注水井井网。钻井施工人员可以根据井眼破裂时的井眼压力选择安全的钻井液密度和确定套管下入深度。本文应用弹性力学理论,给出了井壁周围的应力分布公式。由最大有效主应力准则确定张性裂纹的位置和走向,以及井眼压力、井斜角和方位角对裂纹的起裂和走向的影响。由裂隙断裂条件分析了垂直于井眼轴向破裂的情况。由上述分析可以确定井壁可能发生的张性破坏形式。

主题词 岩石力学 破裂压力 井压力 钻井液 密度 井眼稳定 计算机应用

作者黄荣樽,1930年生。1953年毕业于清华大学石油系钻井专业,现为石油大学教授。白家祉,1917年生。1939年毕业于清华大学机械系,现为北京石油勘探开发科学研究院教授。周煜辉,1933年生。1953年毕业于清华大学石油系钻井专业,现为北京石油勘探开发科学研究院高级工程师(教授级)。刘玉石,1956年生。1981年毕业于大连理工大学力学系,现为北京石油勘探开发科学研究院高级工程师。

引 言

斜直井井壁发生张性裂纹有两种情况:一是有目的地对井眼进行压裂,以增加油气产量,压裂前要求能预测裂纹的位置和走向,以防止采油井和注水井的裂纹贯通;二是在钻井施工中,由于不知道地层的特性,导致钻井液密度过大,将井眼压裂,发生一系列钻井事故。

C. H. Yew 对斜井的压裂问题进行了研究,但是没有考虑裂隙的断裂问题。本文对水力压裂问题和裂隙的断裂问题进行了分析,给出了裂纹产生时的临界井眼压力。这对钻井施工中保持井壁稳定,选择合适的钻井液密度具有指导作用。

井壁应力状态

当已知地层原始应力及方向,可按如下方法建立井眼周围应力公式。取上覆压力 σ_3 沿铅垂方向,另两个地应力 σ_1, σ_2 沿水平方向,见图 1。

为方便起见,用直角坐标 $x y z$ 和圆柱坐标 $r \theta z$ 来表示斜井眼, P_0 是孔隙压力, 设井斜角为 α , 相对 σ_1 的方位角是 ϕ 。通过旋转坐标系建立地应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 与 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 的转换关系, 首先绕 3 轴逆时针转 ϕ 角成坐标系 $x_1 y_1 z_1$, 然后绕 y_1 轴逆时针转 α 角成新坐标系 $x y z$ (见图 1)。新坐标系 $x y z$ 与坐标系 1 2 3 之间的转换关系由变换矩阵给出

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\alpha & \sin\alpha \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \cos\phi \sin\alpha & \sin\phi \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

也可以记为

$$[X] = [T][J] \quad (2)$$

式中 $[X]$ —— $x y z$ 坐标列阵;

$[T]$ ——转换矩阵;

$[J]$ ——原坐标列阵。

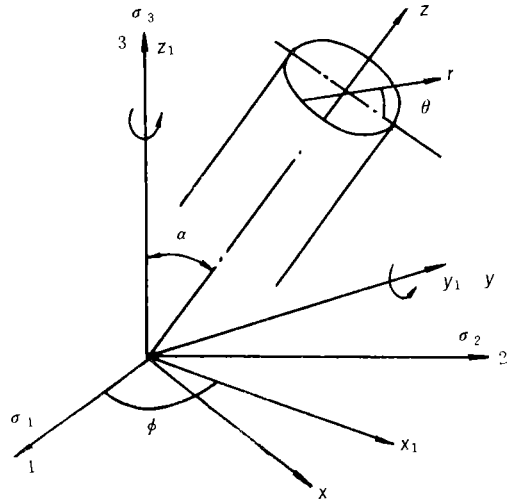


图 1 井眼坐标变换图

文献[1]给出了两个坐标系中应力分量的关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\alpha & \sin\phi \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \cos\phi \sin\alpha & \sin\phi \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\alpha & -\sin\phi & \cos\phi \sin\alpha \\ \sin\phi \cos\alpha & \cos\phi & \sin\phi \sin\alpha \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设岩石具有线弹性和各向同性性质, 不渗透, 井壁周围处于平面应变状态(沿纵向不变形), 则井壁周围的应力状态由下式给出^[2,3]

$$\left. \begin{aligned} -\sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ &\quad + \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \frac{a^2}{r^2} P_w - P_0 \\ -\sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ &\quad - \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - \frac{a^2}{r^2} P_w - P_0 \\ -\sigma_z &= \sigma_{zz} - 2\mu(\sigma_x - \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\mu\tau_{xy} \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta - P_0 \\ -\tau_{r\theta} &= \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \right] \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \\ -\tau_{rz} &= (\tau_{xz} \cos\theta + \tau_{yz} \sin\theta) \left(-\frac{a^2}{r^2}\right) \\ -\tau_{\theta z} &= (-\tau_{xz} \sin\theta + \tau_{yz} \cos\theta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

把 $r=a$ 代入公式(4), 得井壁上的应力

$$\begin{aligned}
 -\sigma_r &= P_w \\
 -\sigma_\theta &= (\sigma_x + \sigma_y - P_w) - 2(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}\sin 2\theta \\
 -\sigma_z &= \sigma_{zz} - 2\mu(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - 4\mu\tau_{xy}\sin 2\theta \\
 \tau_{r\theta} &= \tau_{rz} = 0 \\
 -\tau_{\theta z} &= 2(-\tau_{xy}\sin\theta + \tau_{yz}\cos\theta)
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 P_w ——井眼压力;
 r ——距井眼中心的径向距离;
 a ——井眼半径;
 μ ——泊松比。

以上公式是采用弹性力学方法推导的,其压应力为负,拉应力为正。

拉伸破坏及开裂位置

设岩石的抗拉强度为 T ,当井壁上最大有效拉应力超过拉伸强度时,即发生拉伸破坏

$$\sigma_m(\theta) - \alpha_1 P_w \geq T \quad (6)$$

式中 $\sigma_m(\theta)$ ——最大拉应力;
 α_1 ——Biot 系数。

井眼的压裂裂纹就是某一有效主应力大于抗拉强度而产生的。由井壁应力公式(5),可得出最大拉应力在 $z-\theta$ 面上。

$$\sigma_{\max}(\theta) = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (7)$$

此处 $\sigma_{\max}(\theta)$ 是角度 θ 的函数,在某一 θ 角处 $\sigma_{\max}(\theta)$ 取最大值,当最大有效应力大于 T 时,就会在此 θ 角位置产生裂纹。所以井壁上裂纹位置由下式给出

$$\frac{d\sigma_{\max}(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (8)$$

文献[4]给出了裂纹的走向

$$v = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_\theta - \sigma_z} \right) \quad (9)$$

在液压作用下,如果裂纹是由孔边开裂转入垂直于井眼轴向的破裂,即井眼轴向是 σ_3 的情况下,其开裂条件不同于前面的条件,而应采用裂隙断裂条件。即对于裂隙内有 P_w 的液压情况下,其裂隙扩展条件根据文献[5]的推导可得

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 4P_w$ 时

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8T(\sigma_1 + \sigma_3 - 2P_w) = 0 \quad (10)$$

当 $(\sigma_1 + 3\sigma_3) < 4P_w$ 时

$$\sigma_3 - P_w + T = 0 \quad (11)$$

算 例

某地层原始地应力 $\sigma_1 = 50\text{MPa}$, $\sigma_2 = 30\text{MPa}$, 上覆压力 $\sigma_3 = 40\text{MPa}$, 抗拉强度 $T = 4\text{MPa}$ 。当

井斜角分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° , 方位角 ϕ 分别是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时, 算出破裂位置 θ, v 及井眼压力 P_w 。

计算程序如下:

1. 输入地应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 井斜角 α , 方位角 ϕ 。
2. 由公式(3)把 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 用 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 表示。
3. 输入井眼压力范围 P_{w1}, P_{w2} , 用二分法求解 $P_w = (P_{w1} + P_{w2})/2$ 。
4. 由公式(5)求井壁上的应力 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z; \tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}$ 。
5. 由公式(7)求最大拉应力 $\sigma_m(\theta)$ 。
6. 判断有效主应力 $\sigma'_m(\theta) = \sigma_m(\theta) - \alpha_1 P_w$ 是否大于拉伸强度 T , 如果 $\sigma'_m(\theta) < T$, 则用二分法改变 P_w 值后返回到程序 4。(本算例取 $\alpha_1 = 1$)。
7. 由公式(8)求裂纹位置 θ 角。
8. 由公式(9)求裂纹方向 v 。
9. 输出 P_w, θ, v , 此时 P_w 就是发生破裂时的井眼压力。

井斜角 α 与井壁破裂时井眼液柱压力的关系见图 2, 方位角 ϕ 与井眼压力的关系见图 3, 方位角与裂纹走向的关系见图 4, 方位角与裂纹位置的关系见图 5。

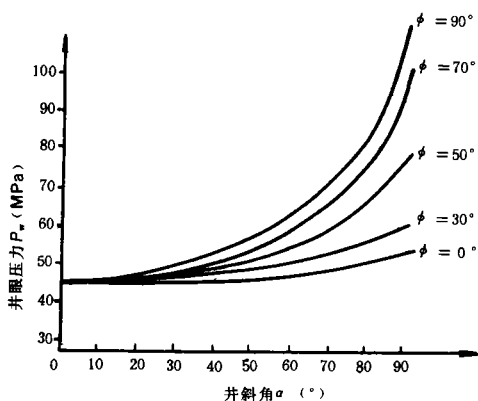


图 2 α 与 P_w 的关系

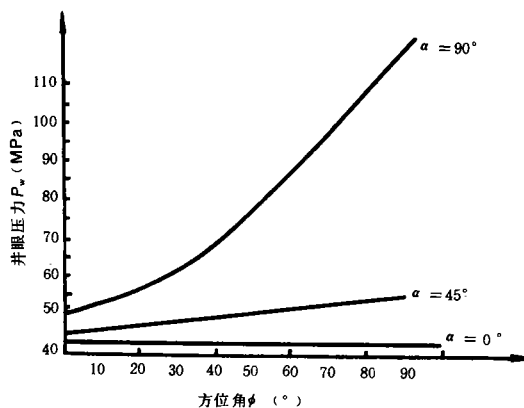


图 3 ϕ 与 P_w 的关系

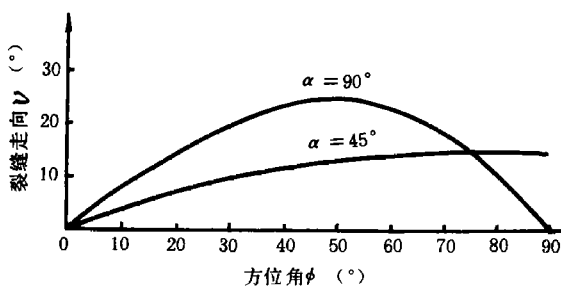


图 4 ϕ 与 v 的关系

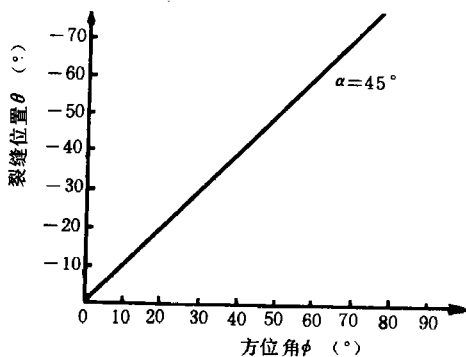


图 5 ϕ 与 θ 关系

当井斜角是 90° 、 Φ 角也是 90° 时,则井眼的轴向沿最小主应力方向,这时就要应用裂隙断裂条件,当裂纹由孔边开裂转入垂直于井眼轴向破裂时,液压 P_w 由下式给出^[3]:

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 4P_w$ 时

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8T(\sigma_1 + \sigma_3 - 2P_w) = 0$$

把 σ_1, σ_3 及 T 数据代入,即求出

$$P_{w1} = 33.75(\text{MPa})$$

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 4P_w$ 时

$$P_{w2} = \sigma_3 + T = 30 + 4 = 34(\text{MPa})$$

$$4P_{w2} = 136\text{MPa}$$

而 $\sigma_1 + 3\sigma_3 = 50 + 90 = 140(\text{MPa}) > 4P_{w2}$

所以取 $P_w = P_{w1} = 33.75(\text{MPa})$ 。

Griffith 准则在此处用来分析垂直井眼轴向的裂纹。如果孔壁出现平行于井眼轴向开裂,则还要应用孔壁开裂的最大拉应力准则。当开裂延展到孔外岩石区时,再应用 Griffith 准则来分析。这样裂纹由孔边开裂时需要高的井眼压力,裂纹延展到孔外岩石区后,井眼压力就不需要那么高了。

结 论

由计算和分析可知:

1. 随着井斜角的增加,达到井眼破裂时的钻井液柱压力也增加。这与铅垂应力不是最大主应力有关。
2. 井斜角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时,方位角对井眼破裂压力的影响不大,当井斜角接近 90° 时,方位角对井眼破裂压力的影响变大。
3. 地应力的 3 个主应力大小顺序不同时,会得出不同的结论,所以必须对不同的地层进行具体分析。

(本文收到日期:1993年3月22日)

[本文责任编辑 应硕源]

参 考 文 献

- [1] 胡海昌:《弹性力学的变分原理及其应用》,科学出版社,1981年,第368~370页
- [2] 徐芝伦:《弹性力学》,人民教育出版社,1978年,第80~94页
- [3] 黄荣博:地层破裂压力预测模式的探讨,《华东石油学院学报》,1984年第4期,第1~12页
- [4] C. H. Yew and Y. Li.: Fracturing of a Deviated Well, SPE 16 930, P509~518
- [5] 周维垣主编:《高等岩石力学》,水利电力出版社,1990年,第16~26页