

综合钻井及水力压裂的水平井井眼方位优化

刘阳¹ 陈平¹ 连太炜² 马天寿¹

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2. 中国石油川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院

摘要 地应力是井眼失稳和裂缝起裂的直接控制因素, 如何分析不同断层机制下的井眼稳定性和水力压裂随井眼方位变化的响应规律对页岩气钻完井显得更加重要。为此, 基于线弹性力学原理、改进的摩尔库伦准则及张性破裂准则, 建立了井眼稳定性和裂缝起裂的力学模型, 计算分析了不同应力状态下井眼稳定性和水力压裂对井眼方位的设计要求。结果表明, 对于正断层应力状态, 钻直井或沿最小水平主应力方向的小斜度井有利于井眼稳定, 且裂缝的起裂压力主要受射孔方位角控制; 对于滑移断层应力状态, 钻水平井有利于井眼稳定, 安全钻井方位处于最大水平主应力与最小水平主应力之间, 且起裂压力受井眼方位角和射孔方位角双重控制; 对于逆断层应力状态, 沿最大水平主应力方向钻水平井有利于井眼稳定, 而起裂压力主要受射孔方位角控制。最后, 结合井眼稳定性和水力压裂分析结果, 提出了井眼方位优化方法, 并针对性地分析不同断层机制下的最优井眼方位。该研究为矿场井眼方位优化提供了理论支撑。

关键词 地应力 水平井 井眼稳定 水力压裂 断层机制 射孔方位角 井眼方位优化

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.S1.026

近年来, 由于页岩气水平井和压裂技术的突破与大规模应用, 在全球掀起了一场“页岩气革命”^[1-2]。但页岩气水平井钻井过程中仍然遇到许多工程挑战, 其中井壁失稳便是最为棘手的问题之一^[2-4]。针对页岩气水平井井壁失稳难题, 国内外许多学者开展了大量的研究工作, 并取得了很多重要结论和认识^[5-11]: 正断层应力($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$)状态下, 最佳钻井方位为最小水平地应力方向; 走滑断层应力($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$)状态下, 最佳钻井方位为与最大水平地应力方向夹角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 方向; 逆断层应力($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)状态下, 最佳钻井方位为最大水平地应力方向。尽管这些定性的结论和认识为页岩气水平井井眼轨迹优化设计提供了重要参考, 但受四川盆地乃至整个西部地区复杂地应力场影响, 仅满足安全钻井需要的井眼方位并不能保证良好的水力压裂效果。而有关页岩储层水力压裂的研究, 大多集中在不同构造地层水力裂缝的延伸规律及分段压裂设计参数优化等方面^[12-18], 并未从钻完井及压裂改造一体化设计的角度对井眼轨迹进行系统优化, 从而导致四川盆地页岩气开发效果不理想^[4,10]。为此, 亟需对现有理论和

设计方法进行整合创新, 全面考虑四川页岩气区储层岩石力学及地应力特征, 综合分析不同应力机制下井眼稳定性和水力压裂随井眼方位变化的响应规律, 进而提出页岩气水平井井眼方位优化方法。

1 水平井井眼周围的应力分布

1.1 水平井井壁应力分布模型

为了建立任意井眼轨迹下的井壁应力分布模型, 需要将大地直角坐标系(N, E, Z)、原地应力直角坐标系(x, y, z)以及井眼直角坐标系(x_b, y_b, z_b)按一定的几何关系进行转换, 如图1所示。

规定 z 为垂直方向, N 和 E 在水平面内, 垂向应力 σ_v 沿 z 方向, 最大水平地应力 σ_H 在 x 轴方向, 而最大水平地应力与 N 方向呈夹角 Ω 。由于井眼直角坐标系(x_b, y_b, z_b)是基于井眼轨迹建立的, 规定 z_b 为井眼轴线方向, 而 x_b 轴和 y_b 轴处于井眼横截面内, 定义井斜角 α 和井斜方位角 β 来表示井眼直角坐标系与原地应力直角坐标系之间的关系。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号: 2013CB228003)、四川省国际科技合作与交流项目(编号: 2017HH0061、2016HH0001)和四川省科技支撑计划项目(编号: 2015SZ0003)资助。

作者简介: 刘阳, 1989年生, 博士研究生; 主要从事页岩气水平井钻井及降摩减阻技术方面的研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区西南石油大学科技园大厦1008室。电话: 18380154452。ORCID: 0000-0001-6400-8763。E-mail: liuyang2013swpu@163.com

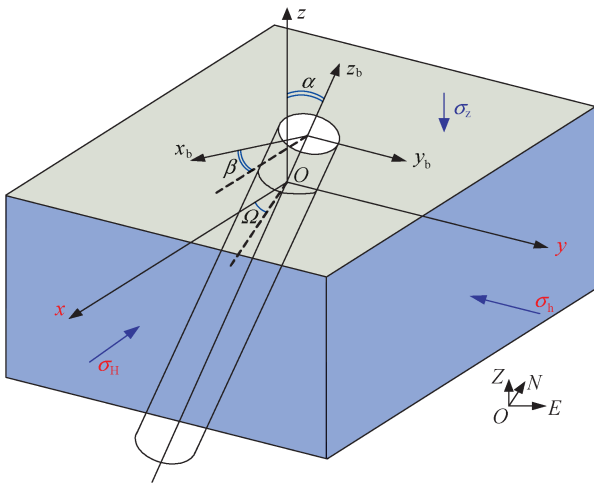


图 1 斜井井周坐标转换关系图

基于平面应变假设, Bradley 建立了井周应力分布模型, 当 $r=r_w$ 时井壁的应力分布可以表示为^[8,11]:

$$\begin{cases} \sigma_r = p_w - \delta\phi(p_w - p_p) \\ \sigma_\theta = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta - \\ \quad 4\tau_{xy}\sin 2\theta + (K_1 - 1)p_w - K_1 p_p \\ \sigma_z = \sigma_{zz} - 2\nu[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta - 2\tau_{xy}\sin 2\theta] - \\ \quad K_1(p_w - p_p) \\ \tau_{\theta z} = 2\tau_{yz}\cos\theta - 2\tau_{xz}\sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_H \cos^2(\beta - \Omega) \cos^2 \alpha + \\ \quad \sigma_h \sin^2(\beta - \Omega) \cos^2 \alpha + \sigma_v \sin^2 \alpha \\ \sigma_{yy} = \sigma_H \sin^2(\beta - \Omega) + \sigma_h \cos^2(\beta - \Omega) \\ \sigma_{zz} = \sigma_H \cos^2(\beta - \Omega) \sin^2 \alpha + \\ \quad \sigma_h \sin^2(\beta - \Omega) \sin^2 \alpha + \sigma_v \cos^2 \alpha \\ \tau_{xy} = -\sigma_H \cos(\beta - \Omega) \sin(\beta - \Omega) \cos \alpha + \\ \quad \sigma_h \cos(\beta - \Omega) \sin(\beta - \Omega) \cos \alpha \\ \tau_{yz} = -\sigma_H \cos(\beta - \Omega) \sin(\beta - \Omega) \sin \alpha + \\ \quad \sigma_h \cos(\beta - \Omega) \sin(\beta - \Omega) \sin \alpha \\ \tau_{zx} = \sigma_H \cos \alpha \sin \alpha \cos^2(\beta - \Omega) + \\ \quad \sigma_h \cos^2 \alpha \sin^2(\beta - \Omega) - \sigma_v \sin \alpha \cos \alpha \end{cases}$$

式中 σ_r 表示井壁地层的径向应力分量, MPa; σ_θ 表示井壁地层的环向应力分量, MPa; σ_z 表示井壁地层的轴向应力分量, MPa; $\tau_{\theta z}$ 表示井壁地层的剪切应力分量, MPa; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 分别表示坐标系 (x, y, z) 中的正应力分量, MPa; τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 分别表示坐标系 (x, y, z) 中的剪切应力分量, MPa; σ_H 、 σ_h 、 σ_v 分别表示最大水平主应力、最小水平主应力和垂向应力, MPa; θ

表示井周任意位置对应的圆周角, ($^\circ$); α 表示井斜角, ($^\circ$); β 表示井斜方位角, ($^\circ$); Ω 表示水平最大地应力方位角, ($^\circ$); p_w 表示井筒液柱压力, MPa; p_p 表示地层孔隙压力, MPa; K_1 表示常数, 且 $K_1 = \delta[(1 - 2\nu)/(1 - \psi)]$; ν 表示岩石泊松比, 无因次; ψ 表示孔隙度, 无因次; δ 表示渗透性系数, 渗透性井壁取值为 1, 非渗透井壁取值为 0。

1.2 水平井射孔孔道应力分布模型

假设水力射孔井眼为一个微型的水平井眼, 则水力射孔井筒是由两个不同尺寸的孔眼垂直相交而成, 且受两个相互垂直的主应力 σ_θ 和 σ_z 的共同作用, 射孔井筒几何模型及其应力重新分布如图 2 所示。

图 2 中, σ_θ 为孔眼切向应力, $\sigma_{\theta l}$ 为形成纵向裂缝的集中应力, $\sigma_{\theta t}$ 为形成横向裂缝的集中应力。同时考虑压裂液渗滤效应引起的附加阻力, 那么圆柱坐标系下射孔水平井射孔孔道表面的应力场分布为^[13]:

$$\begin{cases} \sigma'_r = p_w - \delta\phi(p_w - p_p) \\ \sigma'_\theta = 2p_w(1 + \cos 2\theta') + (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})(1 + \cos 2\theta') + \\ \quad \sigma_{zz}(1 - 2\cos 2\theta') - 4\tau_{\theta z}\sin 2\theta' - \\ \quad 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta'[\nu(1 - 2\cos 2\theta') + (1 + 2\cos 2\theta')] - \\ \quad 3K_1(p_w - p_p) \\ \sigma'_z = p_w + \delta\phi(p_w - p_p) - \\ \quad 2\nu\cos 2\theta'(\sigma_{zz} - \sigma_{xx} - \sigma_{yy} + p_w) - 4\nu\tau_{\theta z}\sin 2\theta' - \\ \quad \nu\cos 2\theta'[2(1 - \nu)(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta] - \\ \quad K_1(p_w - p_p) \\ \tau'_{r\theta} = \tau'_{\theta z} = \tau'_{rz} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 σ'_r 、 σ'_θ 、 σ'_z 分别为射孔孔道径向、环向和轴向应力分量, MPa; $\tau'_{r\theta}$ 、 $\tau'_{\theta z}$ 、 τ'_{rz} 为射孔孔道表面的剪应力分量, MPa; θ' 为裂缝起裂方位角, ($^\circ$)。

1.3 水平井射孔孔道应力分布模型

不考虑井壁渗流及泥页岩水化膨胀的影响, 根据线性孔隙弹性理论, 水平井井壁处的 3 个主应力为:

$$\begin{cases} \sigma_i = \sigma_r \\ \sigma_j = 0.5(\sigma_\theta + \sigma_z) + 0.5[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2]^{0.5} \\ \sigma_k = 0.5(\sigma_\theta + \sigma_z) - 0.5[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2]^{0.5} \end{cases} \quad (3)$$

同理, 对于射孔水平井筒而言, 只要将式 (3) 中的 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 用 σ'_r 、 σ'_θ 、 σ'_z 替换, 即可求得射孔孔道处的 3 个主应力。

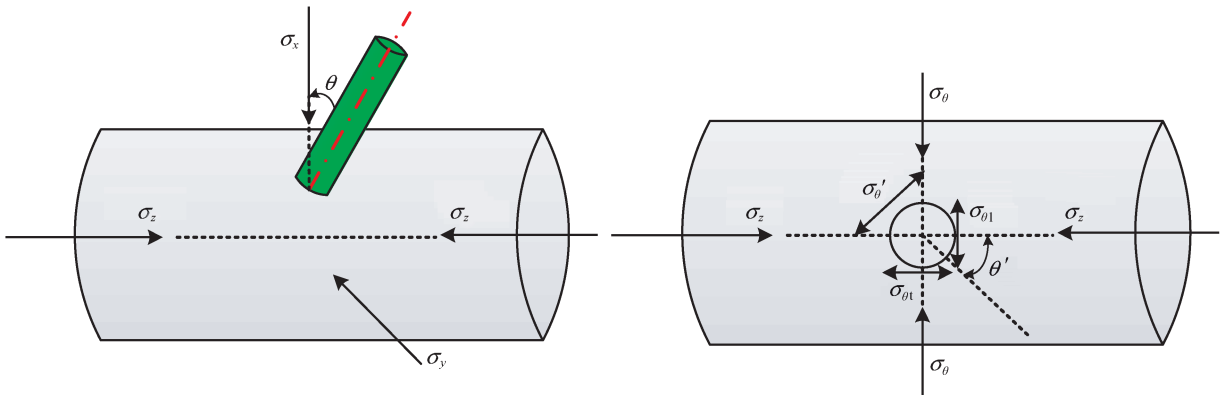


图 2 射孔井筒几何模型和应力分布图

2 井眼稳定及裂缝起裂控制方程

2.1 井眼稳定控制方程

井眼稳定分析的另一个重要方面即是强度准则的选取, 目前描述岩石强度破坏的准则种类繁多, 如 Mohr-Coulom (M-C)、Drucker-Prager (D-P)、Hoek-Brown (H-B) 准则等^[9,11]。实际经验表明, 对于比较坚硬的岩石, M-C 准确的计算结果较为可靠, 故本文采用 M-C 准则进行分析计算。采用主应力表示的 M-C 准则为:

$$\sigma_1 = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (4)$$

式中 σ_1 和 σ_3 分别表示最大和最小主应力分量, MPa; C 表示内聚力, MPa; φ 表示内摩擦角, ($^\circ$)。

定义函数 f_{M-C} 来判断井壁是否发生剪切破坏, 即

$$f_{M-C} = 2C \cos \varphi + \sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3) - \cos \varphi (\cos 2\varphi - \sin 2\varphi) (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (5)$$

若 $f_{M-C} < 0$, 则岩石发生剪切破坏; $f_{M-C} = 0$, 则岩石处于极限平衡状态; $f_{M-C} > 0$, 则岩石不发生破坏。

2.2 裂缝起裂控制方程

根据岩石本体张性破裂准则, 当岩石受到的最小有效主应力达到岩石的抗拉强度 σ_t 时, 岩石将在垂直于最小有效主应力的平面处破裂^[9], 即

$$\sigma_3' = -|\sigma_t| \quad (6)$$

同样地, 定义函数 f_T 来判断井壁岩石的破裂情况, 即

$$f_T = \sigma_3' + |\sigma_t| \quad (7)$$

若 $f_T < 0$, 则岩石发生拉张破裂; $f_T = 0$, 则岩石处于极限平衡状态; $f_T > 0$, 则岩石不发生张性破裂。

3 井眼方位对井壁稳定和水力压裂的影响

为了明确井斜角、井眼方位角及射孔方位角对井眼稳定性和水力压裂的影响, 以川渝地区页岩气藏岩石力学及地应力参数为例进行分析, 基础参数如表 1 所示。

3.1 井眼方位对井壁稳定的影响

基于表 1 中不同应力状态下的地层参数, 采用 MATLAB 编程计算不同应力状态下井斜角和方位角对井眼稳定性的影响规律, 结果如图 3 所示。由图 3-a 可知, 正断层应力状态下的坍塌压力密度随钻井方位角 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 增加而逐渐降低, 随井斜角的增加 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 呈现出先减小后增加的趋势, 且在井斜角为 $20^\circ \sim 50^\circ$ 范围内取得最小值, 即在该井斜范围且沿最小水平主应力方向钻进井壁最稳定。图 3-b 表示滑移断层应力状态下的坍塌压力密度随井斜角的增加而逐渐降低, 即钻水平井有利于井眼稳定, 而坍塌

表 1 基础参数表

编号	断层机制	TVD/m	原地应力 /MPa				岩石力学参数					其他参数		
			σ_v	σ_H	σ_h	$\Omega/(^\circ)$	ψ	ν	c_0	φ	S_t	p_p	α_p	δ
1	NF	2 506	61.2	55.5	47.6	N0°E	5	0.26	13	28	1.85	30.2	0.4	0
2	SSF	1 525	35.1	47.15	28.9	N0°E	5	0.18	11	28	1.54	15.3	0.65	0
3	RF	2 009	37.15	58.08	47.9	N0°E	8	0.22	15	22	2.16	21.8	0.5	0

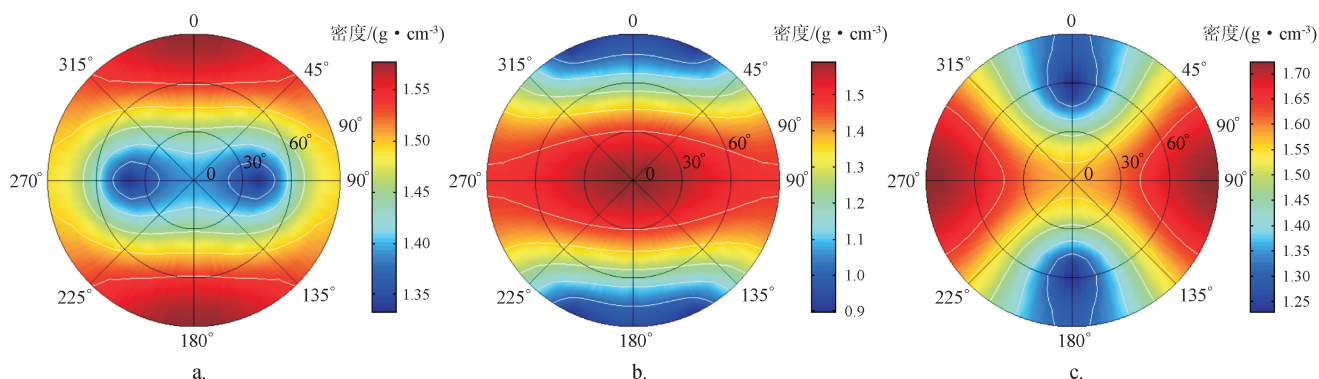


图3 坍塌压力密度随井斜角方位角变化规律图

塌压力随方位角 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 的增加呈现出先降低后增加的趋势, 且在最大水平主应力夹角为 30° 时取得最小值, 说明滑移断层应力模式下, 水平井安全钻井方位处于最大水平主应力和最小水平主应力之间。图 3-c 表示逆断层应力模式的计算结果, 分析可知, 沿最大水平主应力方向钻水平井, 井眼稳定性最好, 而沿最小水平主应力方向钻进, 易发生井壁失稳。

3.2 井眼方位对水力压裂的影响

受不同应力状态的影响, 水平井井筒与储层的组合方式及压裂方法决定了能否有效压开储层。而出于压裂施工过程中的井眼稳定性方面的考虑, 页岩气藏普遍采用套管固井+射孔+分段压裂的储层改造模式。为此, 研究了正断层、滑移断层和逆断层 3 种应力状态下井眼方位角及射孔方位角对裂缝起裂压力的影响规律, 结果如图 4 所示。对于正断层应力模式 (图 4-a), 当井眼方位角和射孔方位角均为 0° 时, 裂缝起裂压力取得最小值; 当井眼方位角为 0° , 射孔方位角为 90° 时, 裂缝起裂压力取得最大值; 当射孔方位角一定时, 裂缝起裂压力随井眼方位角变化不大, 尤其当射孔方位角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围时, 井眼方位角对起裂压力影响甚微; 当井眼

方位角一定时, 起裂压力随射孔方位角增加而增加, 且变化幅度较大。对于滑移断层应力模式 (图 4-b), 当井眼方位角和射孔方位角均为 90° 时, 裂缝起裂压力取得最小值; 当井眼方位角和射孔方位角均为 0° 时, 裂缝起裂压力取得极大值; 当井眼方位角一定时, 起裂压力随射孔方位角变化较大, 尤其当井眼轨迹沿最小水平主应力方向钻进时, 起裂压力随射孔方位角变化而呈现出较大范围波动。当射孔方位角一定时, 起裂压力随井眼方位角也呈现出较大的波动。对于逆断层应力模式 (图 4-c), 当井眼方位角和射孔方位角均为 90° 时, 裂缝起裂压力取得最小值。当射孔方位角为 90° 时, 井眼方位角对起裂压力影响较小。但需要注意的是, 对于任意的井眼方位, 射孔方位角对起裂压力变化起关键作用。

3.3 井眼方位对井眼稳定和水力压裂的影响

由上述分析可知, 对于正断层应力状态, 钻直井或井斜较小的井有利于井眼稳定, 且安全井眼方位为最小水平主应力方向, 而该应力状态下裂缝钻成的水平井, 其起裂压力主要受射孔方位角控制, 井眼方位角对起裂压力影响较小。故一般选择最小水平主应力方向作为最优井眼方位, 既能保证有效的井眼稳定

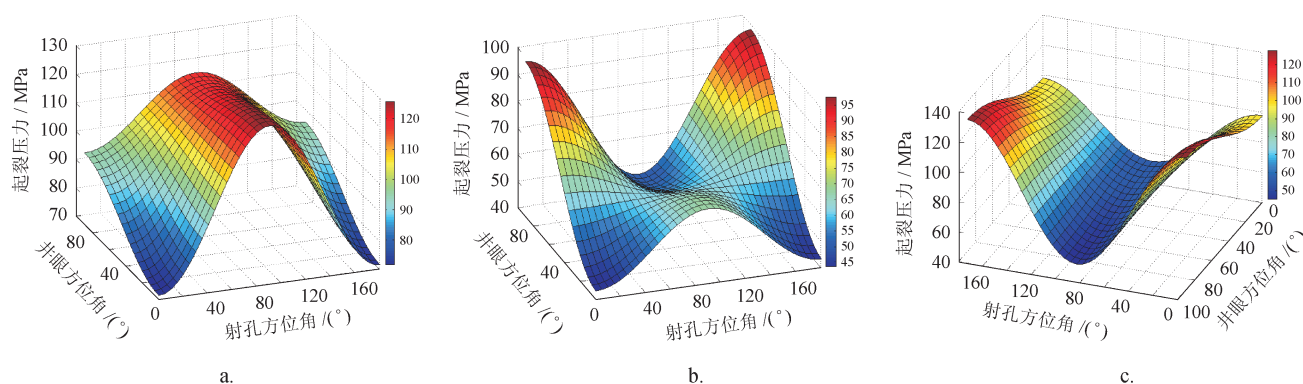


图4 不同应力状态下的起裂压力随方位角变化图

性,又有利于裂缝起裂和延伸;对于逆断层应力状态,沿最大水平主应力方向钻水平井既有利于井眼稳定,又有利于压裂造缝,但射孔方位角是影响起裂压力大小的主要控制因素之一;对于滑移断层应力状态,其安全钻井方位处于最大水平主应力方位与最小水平主应力方位之间,而井眼方位沿最小水平主应力或最大水平主应力方向钻进均能保证较小的起裂压力,关键取决于射孔方位角的大小,从而导致该应力状态下安全钻井和水力压裂对井眼方位的要求互为矛盾体。

4 井眼方位优化方法

从提高油气井产能的角度考虑,能穿过最多天然裂缝的方向或压裂改造能形成多条垂直于井轴的人工裂缝的方向为最优产能方向^[6,10]。尤其对非常规油气藏来说,大规模水力压裂技术是确保单井产量的必要手段,并要求井眼轨迹沿最大水平主应力方向延伸。显然,这与优快钻井所需的安全钻井方位有所差异。为此,Al-Ajmi 和 Zimmerman^[19] 基于地应力状态建立了一种井眼轨迹优化模型,该模型描述的最优井眼轨迹为:在原地应力的最大主应力(σ'_1)、最小主应力(σ'_3)所处平面内,偏离最大主应力(σ'_1)一定角度 β_{opt} 的轨迹即为最佳轨迹。该模型可以写成如下的简洁表达式:

$$\beta_{opt} = -\sin^{-1} \sqrt{\frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}} \quad (8)$$

式中 β_{opt} 表示在最大最小主应力所处平面内偏离最大主应力的角度, (°); σ'_1 为原地应力状态下的最大主应力, MPa; σ'_2 为原地应力状态下的中间主应力, MPa; σ'_3 为原地应力状态下的最小主应力, MPa。

因此,不同地应力状态下的最优井眼轨迹可以采用式(8)快速计算出来,并与前述计算结果进行对比,如表 2 所示。根据表中数据分析不难得出如下结论:

1) 对于正断层应力状态,沿最小水平主应力方向钻进能够获得最佳的井眼稳定性,而沿最大水平主应力方向钻进能够获得较好的水力压裂效果。但对于水力压裂来说,当射孔方位角为 0° 时,不同井眼方位角对起裂压力的影响较小。故沿最小水平主应力方向钻进既能保证井眼稳定性,又能获得良好的压裂效果。

2) 对于走滑断层应力状态,井眼方位沿最小水平主应力方向能够获得良好的压裂效果,但该方位对应的井眼稳定性最差。综合分析井眼稳定和水力压裂的分析结果,确定出了走滑断层应力状态下的最优井眼方位,即偏离最大水平主应力方向 35.6°。

3) 对于逆断层应力状态,沿最大水平主应力方向钻进能够获得最佳的井眼稳定性,而沿最小水平主应力方向钻进能够获得较好的水力压裂效果。但对于水力压裂来说,当射孔方位角为 90° 时,不同井眼方位角对起裂压力的影响较小。故沿最大水平主应力方向钻进既能保证井眼稳定性,又能获得良好的压裂效果。

表 2 不同地应力状态下分析得到的最优井眼轨迹参数表

编号	断层机制	A&Z 模型计算得到的最优井眼轨迹			常规井壁稳定模型		水力压裂	
		β_{opt}	最优轨迹		最优轨迹		最优轨迹参数 ($\alpha=90^\circ$)	
			轨迹参数	井型	轨迹参数	井型	井斜方位角	射孔方位角
1	NF	49.6°	$\alpha=49.6^\circ$ $\beta=90^\circ$	斜井	$\alpha=45^\circ$ $\beta=90^\circ$	斜井	$\beta=0^\circ$	$\theta=0^\circ$
2	SSF	35.6°	$\alpha=90^\circ$ $\beta=35.6^\circ$	水平井	$\alpha=90^\circ$ $\beta=30^\circ$	水平井	$\beta=90^\circ$	$\theta=90^\circ$
3	RF	45.7°	$\alpha=44.3^\circ$ $\beta=0^\circ$	斜井	$\alpha=60^\circ$ $\beta=0^\circ$	斜井	$\beta=90^\circ$	$\theta=90^\circ$

5 结论

1) 通过斜井井眼周围应力分析,井眼稳定性受地应力状态控制。正断层应力状态下,钻直井或井斜较小的井有利于井眼稳定,且安全井眼方位为最小水平主应力方向;滑移断层应力状态下,钻水平

井有利于井眼稳定,且安全井眼方位处于最大水平主应力与最小水平主应力之间;逆断层应力状态下,钻水平井有利于井眼稳定,且安全井眼方位为最大水平主应力方向。

2) 通过射孔水平井井筒应力分析,裂缝起裂压力受地应力状态和射孔参数控制。正断层和逆断层应

力状态下钻成的水平井, 井眼方位角对起裂压力影响较小, 而射孔方位角对起裂压力大小起决定性因素; 滑移断层应力状态下, 井眼方位角和射孔方位角均对起裂压力有较大的影响, 且当两者等于 90° 起裂压力取得较小值, 此时的井眼方位有利于裂缝延伸。

3) 综合分析井眼稳定性和水力压裂对井眼方位的设计要求, 确定了不同应力状态下的最优井眼方位。即正断层应力状态下沿最小水平主应力方向钻进既能保证井眼稳定性, 又能获得良好的水力压裂效果; 走滑断层应力状态下的最优井眼方位为偏离最大水平主应力方向 35.6° 。逆断层应力状态下的最优井眼方位为最大水平主应力方向。

参 考 文 献

- [1] 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 程克明, 董大忠. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5).
- [2] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景 (一) [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 698-701.
- [3] 崔思华, 班凡生, 袁光杰. 页岩气钻完井技术现状及难点分析 [J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 72-75.
- [4] 陈平, 刘阳, 马天寿. 页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 1-7.
- [5] 刘向君, 罗平亚, 孟英峰. 地应力场对井眼轨迹设计及稳定性的影响研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 57-59.
- [6] 金娟, 刘建东, 沈露禾, 张安新, 刘文欣. 斜井水平井优势钻井方位确定方法研究 [J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 26-29.
- [7] 陈朝伟, 张辉, 申彪, 尹国庆, 王晓丰. 水平井安全和危险钻井方位 [J]. 石油学报, 2013, 34(1): 164-168.
- [8] Lu YH, Chen M, Jin Y, Ge W F, An S & Zhou Z. Influence of porous flow on wellbore stability for an inclined well with weak plane formation [J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(6): 616-624.
- [9] 陈平, 马天寿, 范翔宇. 基于井壁稳定分析的井眼轨迹优化方法 [J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 84-92.
- [10] 范翔宇, 吴昊, 殷晟, 夏宏泉, 陈平, 雷梦, 等. 考虑井壁稳定及增产效果的页岩气水平井段方位优化方法 [J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 94-99.
- [11] Ma T, Chen P, Yang C & Zhao J. Wellbore stability analysis and well path optimization based on the breakout width model and Mogi-Coulomb criterion [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 135: 678-701.
- [12] 郭天魁, 张士诚, 刘卫来, 赖文旭. 页岩储层射孔水平井分段压裂的起裂压力 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 87-93.
- [13] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析 [J]. 西南石油大学学报, 2013, 35(1): 1-9.
- [14] 赵立强, 邢杨义, 刘平礼, 邢杨梅, 龚云蕾. 不同构造地层水平井压裂起裂规律研究 [J]. 石油天然气学报, 2013, 35(5): 108-114.
- [15] Zhou S, Hillis R & Sandiford M. A study of the design of inclined wellbores with regard to both mechanical stability and fracture intersection, and its application to the Australian North West Shelf [J]. Journal of applied geophysics, 1994, 32(4): 293-304.
- [16] Araujo E, Casalis D & Ward C. Geomechanical Modeling Helps Design the Wells in the Néuquen Basin, Argentina [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 4-7 October 2009, New Orleans, Louisiana, USA. DOI:https://doi.org/10.2118/124982-MS.
- [17] Fallahzadeh SH, Shadizadeh SR & Pourafshary P. Dealing With the Challenges of Hydraulic Fracture Initiation in Deviated Cased Perforated Boreholes [R]. SPE 132797, 2010.
- [18] 吕志凯, 何顺利, 罗富平. 射孔水平井分段压裂起裂压力理论研究 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 72-75.
- [19] Al-Ajmi AM & Zimmerman RW. A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 69(1): 53-62.

(修改回稿日期 2017-05-17 编辑 凌 忠)