

径向井压裂激活天然裂缝模型研究

赵 腾¹, 张绍哲¹, 邵春磊¹, 刘庆岭², 张 超¹, 孙 鹏¹, 李振涛¹

(1. 中国石油大港油田公司 新项目事业部, 天津 300280; 2. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034)

摘要:径向井压裂技术是在主井眼钻出径向井的基础上再实施压裂,是一种新型的非常规储层改造技术。针对径向井穿过天然裂缝后,天然裂缝对裂缝起裂的影响开展研究,建立径向井压裂激活天然裂缝解析模型,分析天然裂缝位置、倾角、方位角以及储层地应力状态对裂缝起裂的影响。结果表明:随天然裂缝与主井筒距离增大,天然裂缝拉伸激活压力显著增大,剪切激活压力变化较小;随天然裂缝倾角增大,天然裂缝激活压力增大,方位角对激活压力无影响;正断层和逆断层地应力状态下,天然裂缝容易激活;走滑断层地应力状态下,天然裂缝较难激活。研究成果为径向井压裂技术在含天然裂缝储层推广应用打下了基础。

关键词:径向井压裂;天然裂缝;拉伸起裂;剪切起裂;非常规储层

中图分类号:TE358 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)08-0250-05

径向井压裂技术是在钻出径向孔眼的基础上再实施压裂^[1-2],能够诱导裂缝起裂与延伸^[3-4],增大储层改造体积,是一种新型的非常规储层改造技术^[5],已经在大庆^[6]、辽河^[7]等多个油田成功应用。裂缝起裂压力预测对于径向井压裂参数优化设计十分重要,而前人主要围绕均质储层开展研究^[8-10]。非均质储层相对于均质储层,裂缝形成规律存在较大差别^[11-13]。对于非均质含天然裂缝储层,由于天然裂缝胶结强度显著低于岩石本体,径向井穿过天然裂缝后再实施压裂时,天然裂缝可能会先于井壁岩石本体起裂,对压裂效果产生影响,而尚未有对此的研究模型。

为了解决上述问题,采用解析方法,建立径向井压裂过程中天然裂缝激活解析模型,分析不同天然裂缝位置、倾角、方位角以及原地应力状态的影响,以期为该技术在现场推广应用提供理论支撑。本模型的创新点在于同时考虑了天然裂缝拉伸与剪切激活,能够分析天然裂缝的位置、产状与胶结强度变化对裂缝起裂的影响规律。

1 模型建立

1.1 几何模型

为了建立径向井压裂过程中天然裂缝激活解析模型,做出如下假设:①径向井视为与主井筒正交;②天然裂缝具有一定的走向角和倾角,胶结强

度弱于岩石本体;③储层岩石本体为均质线弹性体,各向力学性质一致。

基于以上假设建立的几何模型如图 1 所示,主井筒为垂直井,从主井筒上钻出径向井,与有一定走向角和倾角的天然裂缝相交。对径向井实施压裂时,随着压裂液不断泵入,径向井井筒内压力不断增大,水力裂缝首先从径向井井壁岩石本体起裂或天然裂缝位置起裂。

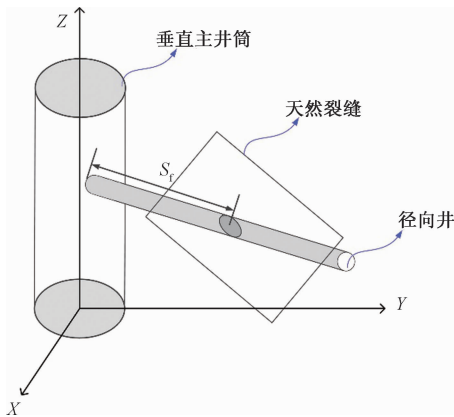


图 1 几何模型

1.2 径向井井周应力场

为了获得径向井井周应力场,首先计算主井筒井周应力场。将拉应力定义为正,叠加主应力和井筒内压力,主井筒井周应力场可以表示为^[14]

收稿日期:2021-03-16

作者简介:赵腾(1987—),男,天津人,中国石油大港油田公司新项目事业部,工程师,研究方向为页岩油钻井、试油压裂、连续油管作业、带压下泵等。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} - 4 \frac{R^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) + p_w \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) - p_w \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos(2\theta) \\ \sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 3 \frac{R^4}{r^4} + 2 \frac{R^2}{r^2} \right) \sin(2\theta) \\ \sigma_{rz} = \sigma_{z\theta} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: σ_H 为最大水平地应力, MPa; σ_h 为最小水平地应力, MPa; σ_v 为垂直地应力, MPa; p_w 为井筒内压力, MPa; R 为主井筒半径, m; ν 为岩石泊松比; r 为主井筒周围任一点至主井筒轴线的距离, m。

获得主井筒井周应力场后, 计算径向井井周应力场。图 2 所示为径向井与主井筒相连示意图。径向井方位角 θ 定义为孔眼轴线方向与最大水平地应力, σ_H 方向夹角。径向井井筒井周应力可以通过叠加主井筒和径向井眼应力集中得到^[15-16], 如式(2)所示。

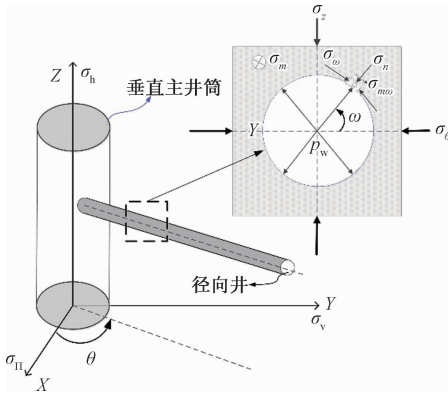


图 2 径向井井周应力示意图

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_n = p_w \\ \sigma_\omega = -p_w + (\sigma_\theta + \sigma_z) - 2(\sigma_\theta - \sigma_z) \cos(2\omega) \\ \sigma'_{zz} = \sigma_r - 2\nu_2(\sigma_\theta - \sigma_z) \cos(2\omega) \\ \sigma'_{z\omega} = 2\sigma_{r\theta} \sin \omega \\ \sigma_{r\phi} = \sigma'_{nzz} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: σ_n 、 σ_ω 和 σ_m 分别代表 n 、 ω 和 m 方向正应力, MPa; $\sigma_{n\omega}$ 代表垂直于 m 方向平行 ω 方向的切应

力, MPa, $\sigma_{n\omega}$ 代表垂直于 n 方向平行 ω 方向的切应力, MPa, σ_{nm} 代表垂直于 m 方向平行 n 方向的切应力, MPa, ω 代表径向井眼水平方向顺时针夹角, ($^\circ$)。

径向井井壁任一点三向主应力为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma_n \\ \sigma_2 = \frac{1}{2} [(\sigma_\omega + \sigma'_{zz}) + \sqrt{(\sigma_\omega - \sigma'_{zz})^2 + 4\sigma_{z\omega}^2}] \\ \sigma_3 = \frac{1}{2} [(\sigma_\omega + \sigma'_{zz}) - \sqrt{(\sigma_\omega - \sigma'_{zz})^2 + 4\sigma_{z\omega}^2}] \end{array} \right. \quad (3)$$

1.3 裂缝起裂判断

1.3.1 径向井井眼壁面起裂

随井底压力 p_w 不断增大, 当井眼壁面任一点有效主应力 ($\sigma_3 - p_p$) 大于岩石本体拉伸强度 σ_T 时, 裂缝在径向井眼壁面起裂。

$$\sigma_3 - p_p \geq \sigma_T \quad (4)$$

式中, p_p 代表储层孔隙压力, MPa。

1.3.2 天然裂缝拉伸激活

如图 3 所示, 在地应力坐标系 (X, Y, Z) 内, 天然弱面方向向量 $\mathbf{n}_f$ 为

$$\mathbf{n}_f = \sin(\beta_f) \sin(\alpha_f) \mathbf{i} + \sin(\beta_f) \cos(\alpha_f) \mathbf{j} + \cos(\beta_f) \mathbf{k} \quad (5)$$

式中: β_f 为天然裂缝倾角, ($^\circ$); α_f 为天然裂缝方位角, ($^\circ$)。

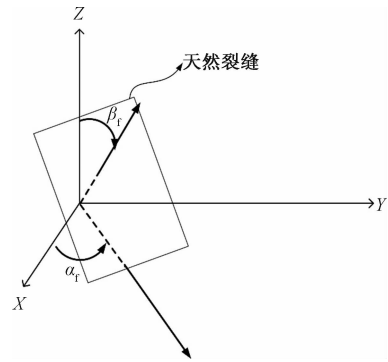


图 3 天然裂缝示意图

含天然裂缝的岩石拉伸强度低于岩石本体。Nova 等^[17] 推导得到了含天然裂缝岩石拉伸强度 σ_{Tf} 的公式, 据实验证明有较高的精度^[18]。含天然裂缝岩石拉伸强度介于垂直于天然裂缝方向拉伸强度 T_f 与岩石本体拉伸强度 T_m 之间, 且是天然裂缝与拉应力夹角 ζ 的函数, 即

$$\sigma_{Tf} = \frac{2T_f T_m}{(T_f + T_m) - (T_f - T_m) \cos(2\zeta)} \quad (6)$$

当天然裂缝与径向井井眼交线任一点有效主

应力大于拉伸强度时,即

$$\sigma_3 - p_p \geq \sigma_{Tf} \tag{7}$$

天然裂缝被激活。

1.3.3 天然裂缝剪切激活

除拉伸激活外,天然裂缝另一种激活形式为剪切激活。参照摩尔-库仑准则^[14],推导天然裂缝缝面上剪切起裂控制条件。天然裂缝剪切激活时必须克服天然裂缝黏聚力 c_f 以及作用在裂缝面上的摩擦阻力。天然裂缝剪切起裂条件为

$$\tau_f \geq c_f + \mu_f \sigma_f \tag{8}$$

式中: τ_f 代表作用在裂缝面上的剪切应力; μ_f 代表天然裂缝内摩擦角; σ_f 代表作用在裂缝面上的正应力。

如图 4 所示,作用在裂缝面上切应力和正应力分别表示为

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\eta \tag{9}$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\eta \tag{10}$$

式中, η 为天然裂缝与主应力 σ_1 方向的夹角。

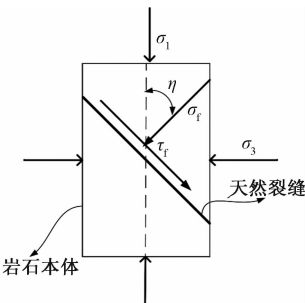


图 4 天然裂缝剪切激活示意图

将式(9)和式(10)代入式(8),得到式(11),即为天然裂缝剪切激活控制条件。

$$\sigma_1 \geq \frac{(\sin 2\eta + \mu_f - \mu_f \cos 2\eta) \sigma_3 + 2c_f}{\sin 2\eta - \mu_f - \mu_f \cos 2\eta} \tag{11}$$

1.3.4 起裂判断

径向井井眼壁面起裂计算得到的起裂压力为 p_{fw} ,天然裂缝拉伸激活计算得到的起裂压力为 p_{ft} ,天然裂缝剪切激活计算得到的起裂压力为 p_{fs} 。天然裂缝与井眼壁面岩石本体竞相起裂,最终起裂压力 p_i 取三者最小值,即

$$p_i = \min(p_{fw}, p_{fs}, p_{ft}) \tag{12}$$

2 结果分析

基于所建立的径向井压裂过程中天然裂缝激活模型,分析不同天然裂缝位置、倾角、方位角以及原地应力状态的影响。选用松辽盆地某致密油藏参数作为计算基本参数,见表 1。

表 1 计算基本数据

参数	取值	参数	取值
水平最大地应力/MPa	44	主井筒直径/m	0.1
水平最小地应力/MPa	38	岩石泊松比	0.3
垂向地应力/MPa	50	径向井直径/m	0.03
孔隙压力/MPa	28	径向井长度/m	50
岩石杨氏模量/GPa	26	岩石内聚力/MPa	5
岩石泊松比	0.24	岩石内摩擦系数	0.8
岩石孔隙度	0.11	天然裂缝内聚力/MPa	1
岩石渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	0.85	天然裂缝内摩擦系数	0.2
岩石抗拉强度/MPa	6	天然裂缝抗拉强度/MPa	1.5

2.1 天然裂缝位置的影响

为了研究不同天然裂缝位置的影响,如图 1 所示,定义天然裂缝距主井筒长度为天然裂缝与径向井轴线交点与主井筒距离,记为 S_f 。选取两个典型径向井方位角,分别为 30° 和 60° ,设置天然裂缝倾角和走向角均为 45° ,仅改变天然裂缝距主井筒长度 S_f ,计算裂缝起裂压力,结果如图 5 所示。图 5 (a)展示了径向井方位角为 30° 时,裂缝起裂压力随天然裂缝距主井筒长度变化。可以看出:随天然裂缝与主井筒距离增大,天然裂缝拉伸激活压力先迅速增大,距离大于 1 m 后趋于平稳并远大于井眼壁

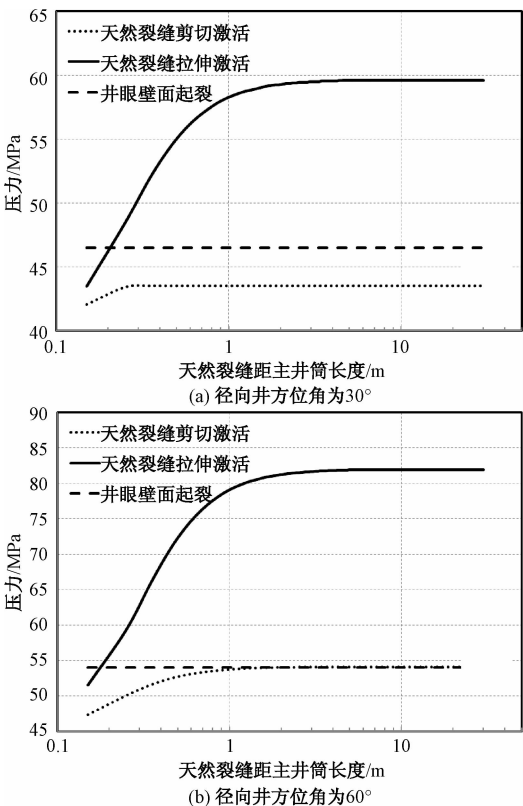


图 5 裂缝起裂压力随天然裂缝距主井筒长度变化

面起裂压力;随天然裂缝距主井筒长度增大,天然裂缝剪切激活压力变化较小,且三者中始终最小。由图 5(b)可以看出,径向井方位角 60°时裂缝起裂规律与径向井方位角 30°时类似。因此,随天然裂缝与主井筒距离增大,天然裂缝拉伸激活压力显著增大,剪切激活压力变化较小。

2.2 天然裂缝倾角和方位角的影响

天然裂缝倾角 α_f 和方位角 β_f 如图 3 所示。设置径向井方位角为 30°,天然裂缝距主井筒长度为 5 m,仅改变天然裂缝倾角 α_f 和方位角 β_f ,计算裂缝起裂压力,结果如图 6 所示。图 6(a)展示了天然裂缝拉伸激活压力随天然裂缝倾角与方位角变化,可以看出:天然裂缝拉伸起裂压力仅与倾角相关,与方位角无关;随天然裂缝倾角增大,天然裂缝拉伸起裂压力缓慢增大。图 6(b)展示了天然裂缝剪切激活压力随天然裂缝倾角与方位角变化,可以看出:天然裂缝剪切起裂压力同样仅与倾角相关,与方位角无关;随天然裂缝倾角增大,天然裂缝剪切起裂压力先显著增大,后缓慢降低;天然裂缝倾角

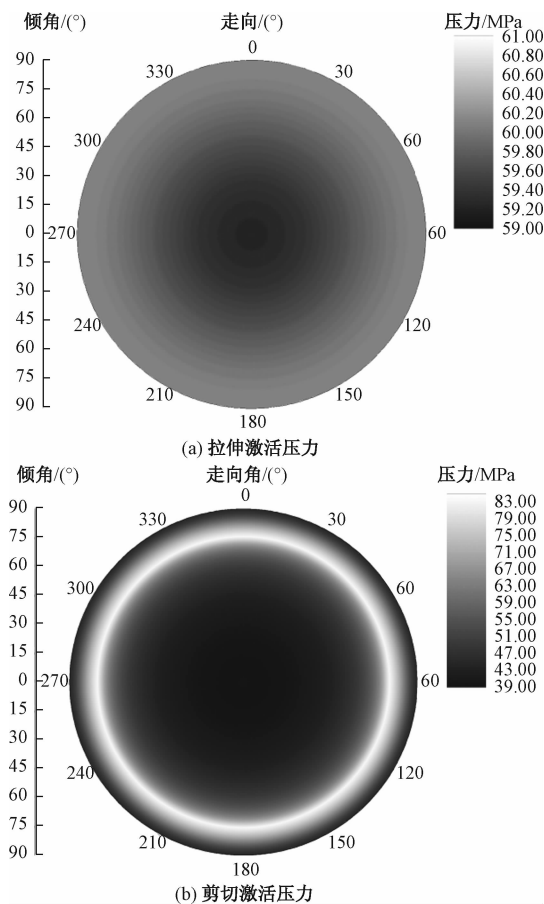


图 6 天然裂缝激活压力随天然裂缝倾角与方位角变化

大于 53°时,剪切激活压力大于岩石本体起裂压力。因此,天然裂缝激活压力仅与天然裂缝倾角相关,随倾角增大,天然裂缝变得较难激活。

2.3 原地应力状态的影响

地层中存在 3 种地应力状态,包括正断层应力状态 ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$)、走滑断层 ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) 和逆断层应力状态 ($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)。给定油藏地应力状态为正断层应力状态 ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$)。为了研究另两种应力状态对裂缝起裂的影响,分别改变三向地应力大小,其余参数与表 1 相同。径向井方位角为 30°,天然裂缝倾角和走向角均为 45°。

图 5(a)所示为正断层应力状态下(三向地应力分别为: $\sigma_v=50$ MPa, $\sigma_H=44$ MPa, $\sigma_h=38$ MPa)计算结果。由图可知,正断层应力状态下,裂缝起裂以天然裂缝剪切激活为主。图 7(a)所示为走滑断层应力状态下(三向地应力分别为: $\sigma_H=50$ MPa, $\sigma_v=44$ MPa, $\sigma_h=38$ MPa)计算结果。由图可知,走滑断层应力状态下,除近井筒外 ($S_f < 0.3$ m),天然拉伸与剪切激活压力均于井眼壁面起裂压力,因此此种应力状态下,以井眼壁面起裂为主,天然裂缝较难激活。图 7(b)所示为逆断层应力状态下裂缝起裂压力(三向地应力分别为: $\sigma_H=50$ MPa, $\sigma_h=44$ MPa, $\sigma_v=38$ MPa)。由图可知,逆断层应力状

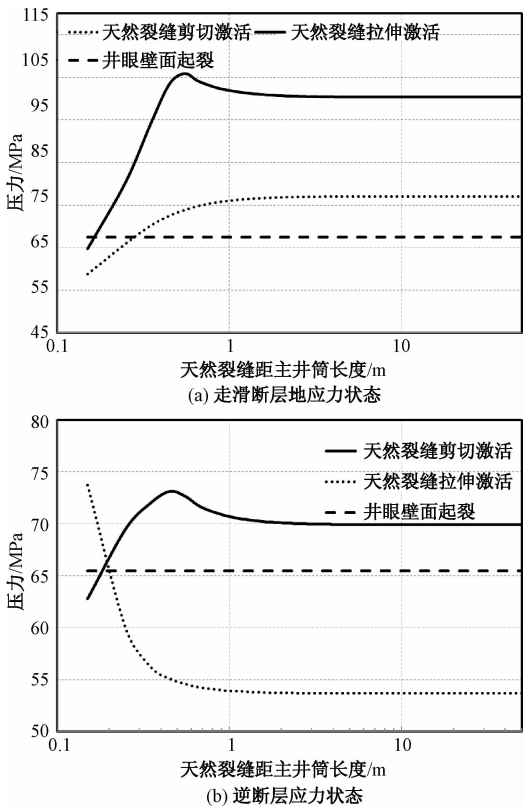


图 7 不同地应力状态裂缝起裂压力变化

态下,靠近主井筒外($S_t < 0.25\text{ m}$),天然裂缝拉伸激活压力显著低于天然裂缝剪切激活压力以及井眼壁面起裂压力,因此此种应力状态下,裂缝起裂以天然裂缝拉伸激活为主。

3 结论与建议

建立了径向井压裂过程中天然裂缝激活解析模型,分析了不同天然裂缝位置、倾角、方位角以及原地应力状态的影响,得到以下结论:

1)随天然裂缝与主井筒距离增大,天然裂缝拉伸起裂压力显著增大,剪切起裂压力变化较小。

2)天然裂缝起裂与天然裂缝倾角相关,与天然裂缝方位角无关。随天然裂缝倾角增大,天然裂缝较难激活。

3)对于正断层地应力状态,天然裂缝激活以剪切起裂为主;对于走滑断层地应力状态,天然裂缝较难激活;对于逆断层地应力状态,天然裂缝激活以拉伸起裂为主。

建议开展径向井压裂过程中天然裂缝激活室内实验研究,对理论模型进行验证和补充。

参考文献

- [1] 李根生,黄中伟,田守增,等.水力喷射径向钻孔与压裂一体化方法:CN103883293A [P]. 2014-06-25.
- [2] 鲜保安,夏柏如,张义,等.开发低煤阶煤层气的新型径向水平井技术[J].煤田地质与勘探,2010,38(4):25-9.
- [3] 胡胜勇.水力喷射钻孔定向压裂技术试验研究[J].钻采工艺,2014(5):59-62.
- [4] 苏建.水力喷射定向深穿透压裂技术研究与应用[J].石油化工高等学校学报,2014,27(2):55-8.
- [5] 付宣,李根生,黄中伟,等.煤层气径向水平井压裂室内试验与产能数值分析[J].石油钻探技术,2016,44(2):99-105.
- [6] LI Y, WANG C, SHI L, et al. Application and development of drilling and completion of the ultrashort-radius radial

well by high pressure jet flow techniques[C]//International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing: Society of Petroleum Engineers, 2000:1-5.

- [7] 刘普国.水力喷射钻孔后多裂缝压裂技术研究[J].化学工程与装备,2015(12):144-146.
- [8] GUO T, GONG F, SHEN L, et al. Multi-fractured stimulation technique of hydraulic fracturing assisted by radial slim holes [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 572-83.
- [9] GUO T, RUI Z, QU Z, et al. Experimental study of directional propagation of hydraulic fracture guided by multi-radial slimholes [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 592-601.
- [10] 龚迪光,曲占庆,郭天魁,等.径向井水力压裂摩阻影响因素与计算公式[J].钻井液与完井液,2016,33(3):102-106.
- [11] 卞晓冰,张士诚,韩秀玲,等.海上低渗透油藏水力压裂技术适应性评价[J].科学技术与工程,2011,11(34):8461-8463.
- [12] 张焯,潘林华,周彤,等.页岩水力压裂裂缝扩展规律实验研究[J].科学技术与工程,2015,15(5):11-16.
- [13] 申颖浩,葛洪魁,程远方,等.水力压裂拟三维模型数值求解新方法[J].科学技术与工程,2014,14(26):219-223.
- [14] FJAR E, HOLT R M, RAAEN A, et al. Petroleum related rock mechanics [M]. Amsterdam: Elsevier, 2008: 78-82.
- [15] HOSSAIN M, RAHMAN M, RAHMAN S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 27(3): 129-149.
- [16] 朱海燕,邓金根,刘书杰,等.定向射孔水力压裂起裂压力的预测模型[J].石油学报,2013,34(3):556-562.
- [17] NOVA R, ZANINETTI A. An investigation into the tensile behaviour of a schistose rock [C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Amsterdam: Elsevier, 1990: 1-6.
- [18] MA T, WU B, FU J, et al. Fracture pressure prediction for layered formations with anisotropic rock strengths [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 485-503.

Research on Activation Model of Natural Fracture by Radial Wellbore Fracturing

ZHAO Teng¹, ZHANG Shao-zhe¹, TAI Chun-lei¹, LIU Qing-ling²,
ZHANG Chao¹, SUN Peng¹, LI Zhen-tao¹

(1. New Project Division of PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

2. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: Radial wellbore fracturing technology is a new unconventional reservoir reconstruction technology, which is based on the radial wellbore drilled from the main wellbore. The influence of natural fracture on fracture initiation is studied after radial wellbore intersect with natural fracture. The analytical model of natural fracture activation by radial wellbore fracturing is established. The influence of natural fracture location, natural fracture dip angle, azimuth angle and reservoir in-situ stress state on fracture initiation is analyzed. The results show that: with the increase of the distance between the natural fracture and the main wellbore, the tensile activation pressure of the natural fracture increases significantly, while the shear activation pressure changes slightly. With the increase of the natural fracture dip angle, the natural fracture activation pressure increases, and the azimuth angle has no effect on the activation pressure. Under the normal fault and reverse fault stress state, the natural fracture is easy to activate; under the strike slip fault stress state, the natural fracture is difficult to activate. This study lays a foundation for the application of radial well fracturing technology in reservoirs with natural fractures.

Key words: radial wellbore fracturing; natural fracture; tensile failure; shear failure; unconventional reservoir