

DOI: 10.11779/CJGE201403024

压裂中水力裂缝穿过天然裂缝判断准则

张 然¹, 李根生^{1*}, 赵志红², 盛 茂¹, 范 鑫¹, 迟焕鹏¹

(1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学), 北京 102249; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川 成都 610500)

摘 要: 为准确预测水力压裂过程中水力裂缝是否会穿过天然裂缝及其穿出方向, 基于弹性力学理论, 建立了水力裂缝穿过天然裂缝的判断准则, 并给出了水力裂缝穿出天然裂缝时穿出角度的计算方法。计算结果表明: 在给定逼近角下对应有确定的水力裂缝穿过天然裂缝所需的水平主应力比值范围, 超过或低于这个范围水力裂缝将不能穿过天然裂缝; 高逼近角及高水平主应力比值下水力裂缝易直接穿过天然裂缝; 在相同逼近角下, 水平主应力比值越大, 穿出方向总是倾向于靠近增大的水平主应力方向。

关键词: 裂缝性储层; 天然裂缝; 穿过; 主应力差异; 逼近角; 穿出角度

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0585-04

作者简介: 张 然(1987-), 男, 博士研究生, 就读于中国石油大学(北京)石油工程学院, 主要从事页岩气井水力压裂造缝机理及水力参数研究。E-mail: zhang_lili8877@sina.com。

New criteria for hydraulic fracture crossing natural fractures

ZHANG Ran¹, LI Gen-sheng¹, ZHAO Zhi-hong², SHENG Mao¹, FAN Xin¹, CHI Huan-peng¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key

Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The complexity of a hydraulic fracture network depends on the behaviors of induced hydraulic fractures as they intersect natural fractures, so it is important to understand the mechanism of fracture intersection under particular field conditions of in-situ stresses, rock and natural fracture properties. An accurate criterion for the fracture propagation across natural fractures is established, and the direction of the reinitiated fracture is also studied. The results show that for a given approaching angle there exists a certain range of stress ration when crossing occurs, beyond this range crossing will not occur. Under high horizontal differential principle stress and approaching angle, hydraulic fracture is more likely to cross the natural fracture. As the stress ration increases, the direction of reinitiated fracture draws closer to the direction of the incremental principle stress. This new criterion can be applied in the general analysis of fracture network and simulation of numerical fracture network.

Key words: fractured reservoir; natural fracture; crossing; stress ration; approaching angle; reinitiated angle

0 引 言

储层发育的微裂缝可为油气提供充足的储集空间, 也可为油气提供运移通道, 更能有效提高油气的产量。对于与水力裂缝即将相交的天然裂缝, 其发生剪切破坏、错断以及滑移等都会极大地影响水力裂缝延伸路径^[1-3]。Dyneshy^[4-5]提出了水力裂缝非稳态扩展概念, 并认为非稳态扩展机制是岩石发生剪切破坏。Warpinski等^[6]研究认为水力裂缝遇到天然裂缝时, 天然裂缝易发生剪切破坏。Hossain等^[7]采用分形理论反演模拟天然裂缝网络, 在考虑了线弹性和弹性裂缝变形以及就地应力场变化的基础上, 建立了节理、断层发育条件下裂缝剪切扩展准则。Blanton^[8-9]通过理论与实验研究后认为水平主应力差和逼近角是影响水力

裂缝走向的主要因素, 国内学者^[10-11]在实验的基础上也得到了与Blanton类似的结论。Renshaw等^[12]研究表明, 水力裂缝垂直于界面拓展时流体会沿着界面渗透一段距离后突破界面并沿原方向延伸, 但其只建立了逼近角为90°时的穿过判断准则。以往学者对天然裂缝张开及剪切破坏做了详细研究, 但对于水力裂缝穿过天然裂缝的情形却很少涉及, 本文在前述研究的基础上建立了水力裂缝穿过天然裂缝的判断准则, 计算了不同逼近角下水力裂缝的穿出角度, 分析了水平主

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(51210006); 国家自然科学基金重点项目(51234006)

收稿日期: 2013-04-10

***通讯作者**

应力比值与逼近角对水力裂缝穿出方向的影响。

1 准则的建立

裂缝性致密油气藏在压裂过程中, 水力裂缝必然会遭遇天然裂缝发育带。水力裂缝与天然裂缝相交时, 当作用于天然裂缝壁面应力达到岩石抗张强度, 同时天然裂缝不发剪切滑移时, 水力裂缝穿过天然裂缝。如图 1 所示, 假设水力裂缝在延伸过程中遇到一条中等程度的天然裂缝, 其中逼近角为 β , 水力裂缝穿出角度为 γ , σ_1 和 σ_3 分别为最大水平主应力和最小水平主应力 (MPa)。

在远场应力与水力裂缝综合作用下, 作用于天然裂缝上的应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (3 - \cos \theta) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta, \\ \sigma_\theta &= \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

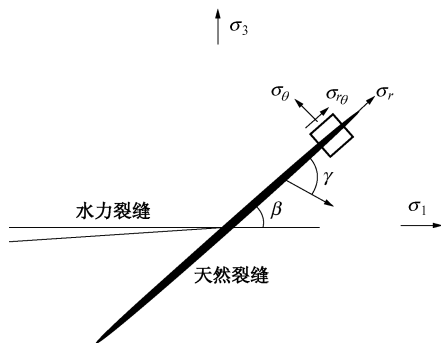


图 1 水力裂缝穿出天然裂缝示意图

Fig. 1 Schematic of fracture crossing interface

天然裂缝壁面上的主应力大小为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} \\ \sigma_{r3} \end{aligned} \right| = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2}, \quad (2)$$

式中, σ_{r1} , σ_{r3} 为天然裂缝壁面上不同点处最大、最小主应力。

若要新缝在天然裂缝壁面起裂, 则作用于壁面上的应力必须达到岩石抗张强度, 即最大主应力满足

$$\sigma_{r1} = T_0, \quad (3)$$

结合式 (1) ~ (3) 并令

$$K = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (4)$$

可得到简化的关于 K 的方程

$$mK^2 + nK + j = 0, \quad (5)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} m &= 2 - 2\cos \theta, \\ n &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta (1 - \cos \theta) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \sin \theta + \\ &\quad 4\left(T_0 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right), \\ j &= \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta\right)^2 - \left(T_0 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式 (5) 有两个解, 一根为最大主应力等于岩石抗张强度时的解, 另一根为最小主应力等于岩石抗张强度时的解, 前者为所需的解, 其对应的临界距离 r_c 为

$$r_c = \frac{K_I^2 \cos^2 \frac{\theta}{2}}{8K^2 \pi}. \quad (7)$$

若水力裂缝穿过天然裂缝, 则除了满足前述分析的应力条件外, 还需满足在该应力条件下, 天然裂缝不发生剪切破坏, 也即

$$|\tau_{r\theta}| < \tau_0 + k_f \sigma_\theta, \quad (8)$$

式中, τ_0 为岩石黏聚力 (MPa), k_f 为天然裂缝摩擦系数。

当式 (3) 与式 (8) 同时满足时, 水力裂缝穿过天然裂缝。

3 穿出角度

穿出裂缝的走向与天然裂缝壁面上最小主应力方向一致, 计算主方向公式为

$$\tan 2a = \frac{2\tau_{r\theta}}{\sigma_r - \sigma_\theta}, \quad (9)$$

式中, 主方向角度 a 有两个解, 且两个主方向相差 90° , 互相垂直。

3 准则对比与分析

3.1 准则对比

假设岩石抗张强度为 2 MPa, 断裂韧性为 $1.45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 天然裂缝摩擦系数为 0.8。使用文中准则进行计算并与 Renshaw 和 Pollard 建立的准则进行了对比。

如图 2 所示, 在逼近角为 90° 情况下, 本文建立的准则曲线始终处于 Renshaw 和 Pollard 准则曲线的下方, 两者偏差较小, 但 Renshaw 和 Pollard 准则与其试验结果进行对比时, 曲线并未完全包络发生穿过的岩样, 说明其曲线偏高, 表明本文中准则更接近于真实情况。

3.2 准则分析

使用文中建立的判断准则分别计算逼近角为 30° , 60° 及 90° 时, 水力裂缝穿过天然裂缝所需的水平主应力比值范围及穿出角度。

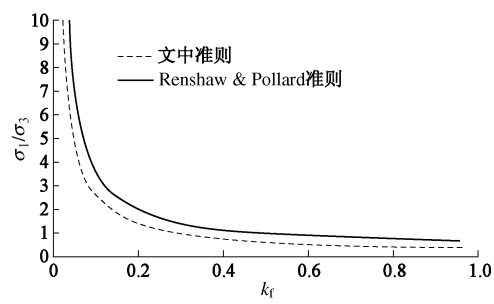


图 2 文中准则与 Renshaw & Pollard 准则对比

Fig. 2 Comparison between Renshaw & Pollard's criterion and new criterion

从图 3 可以看出, 逼近角为 90° 时随主应力差异增大, 穿出角度越接近裂缝初始延伸方向, 但由于水力裂缝造成的天然裂缝壁面应力不同于远场应力, 穿出裂缝不会沿初始方向继续延伸。90° 条件下当主应力差异低于 0.47 时, 水力裂缝不会穿过天然裂缝。

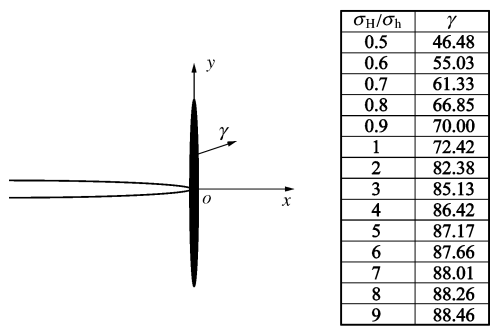


图 3 逼近角 90° 时穿出角度

Fig. 3 Reinitiated angle at approaching angel of 90°

从图 4 可以看出, 逼近角为 60° 时随主应力差异增大, 穿出角度越接近裂缝初始延伸方向。当主应力差异低于 0.37 时, 水力裂缝不会穿过天然裂缝。

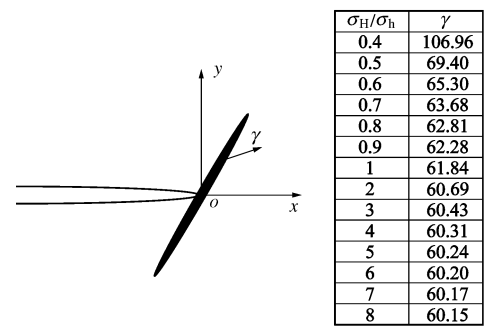


图 4 逼近角 60° 时穿出角度

Fig. 4 Reinitiated angle at approaching angel of 60°

图 5 为逼近角为 30° 下不同应力差异下的穿出角度, 计算表明当主应力差异低于 1 时, 水力裂缝穿过天然裂缝。即当主应力比值大于 1 时, 水力裂缝不会穿过天然裂缝。

表 1 为在不同逼近角下发生穿过时的水平主应力比值及穿出角度范围。从中可以看出在较低逼近角下,

除非水平主应力比值小于 1, 否则不会发生穿过。高逼近角及高水平主应力比值下水力裂缝易直接穿过天然裂缝。相同逼近角下, 水平主应力比值越大, 穿出方向总是倾向于靠近增大的水平主应力方向。

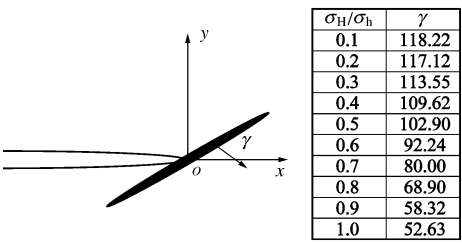


图 5 逼近角 30° 时穿出角度

Fig. 5 Reinitiated angle at approaching angel of 30°

表 1 不同逼近角下发生穿过时水平主应力比值及穿出角度范围

Table 1 Range of stress ration and reinitiated angle at different approaching angels

$\beta/(^{\circ})$	σ_1/σ_3	γ
15	0.002~0.97	104.9~51.3
30	0.02~1.02	119.9~51.5
45	0.28~1.6	127.2~50.5
60	>0.37	121.9~60.12
90	>0.46	41.3~89.2

分析可知在给定逼近角下, 存在水力裂缝穿过天然裂缝的水平主应力比值范围, 超出或低于该范围水力裂缝将不会穿过天然裂缝。逼近角低于 30° 时, 在 $\sigma_1/\sigma_3>1$ 情况下水力裂缝不会穿过天然裂缝, 逼近角大于 60° 时, 在 $\sigma_1/\sigma_3>1$ 情况下水力裂缝必然会穿过天然裂缝。

4 结 论

(1) 基于线弹性理论, 建立了水力裂缝穿过天然裂缝的判断准则, 给出了不同逼近角下水力裂缝穿出天然裂缝时穿出角度的计算方法。

(2) 给定逼近角下对应有水力裂缝穿过天然裂缝的水平主应力比值范围, 超过或低于这个范围水力裂缝将不能穿过天然裂缝。

(3) 高逼近角及高水平主应力比值下水力裂缝易直接穿过天然裂缝。在相同逼近角下, 水平主应力比值越大, 穿出方向总是倾向于靠近增大的水平主应力方向。

参考文献:

[1] 吴 奇, 胥 云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革: 体积改造技术概论[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 7 - 12. (WU Qi, XU Yun, WANG Teng-fei, et al. The revolution of

- reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2011, **31**(4): 7 - 12. (in Chinese))
- [2] CIPOLLA C L, WARPINSKI N R, MAYERHOFER M J, et al. The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture-treatment design[R]. SPE 115769, 2008.
- [3] 雷 群, 胥 云, 蒋廷学, 等. 用于提高低—特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J]. 石油学报, 2009, **30**(2): 237 - 241. (LEI Qun, XU Yun, JIANG Ting-xue, et al. "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, **30**(2): 237 - 241. (in Chinese))
- [4] DANESHY A A. Off-Balance Growth: A new concept in hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Technology, 2003, **55**(4): 78 - 85.
- [5] DANESHY A A. Analysis of off-balance fracture extension and fall-off pressures[C]// SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 2004.
- [6] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, **44**(2): 209 - 220.
- [7] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. Volumetric growth and hydraulic conductivity of naturally fractured reservoirs during hydraulic fracturing: A case study using Australian conditions[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, 2000.
- [8] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]// SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. Pittsburgh, Pennsylvania, 1982.
- [9] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[C]// SPE Unconventional Gas Technology Symposium. Louisville, Kentucky, 1986.
- [10] 周 健, 陈 勉, 金 衍, 等. 多裂缝储层水力裂缝扩展机理试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, **32**(4): 51 - 54. (ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experiment of propagation mechanism of hydraulic fracture in multi-fracture reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008, **32**(4): 51 - 54. (in Chinese))
- [11] 周 健, 陈 勉, 金 衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. 石油学报, 2007, **28**(5): 109 - 113. (ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, **28**(5): 109 - 113. (in Chinese))
- [12] RENSHAW C E, POLLARD. An experimentally verified criterion for propagation across unbonded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics, 1995, **32**(3): 237 - 249.