

文章编号: 0253-9993(2011)01-0065-05

地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响

唐书恒¹ 朱宝存¹ 颜志丰²

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院 北京 100083; 2. 河北工程大学 资源学院 河北 邯郸 056038)

摘 要: 以晋城矿区西部3号煤层的地应力及煤岩的力学性质数据为基础,采用数值模拟方法求解了不同地应力条件下井壁处及天然裂缝缝端的破裂压力,分析了地应力对水力压裂起裂压力、起裂位置的影响。研究发现:起裂压力和起裂位置不但与地应力方位有关,而且与地应力大小有关;随水平主应力差系数增大,天然裂缝与最大水平主应力间的夹角对破裂压力的影响程度增大。对于晋城矿区西部3号煤层,当水平主应力差系数大于0.84时,易产生较为平直的水力主缝;小于0.47时,易于产生网状裂缝;在0.47~0.84时,起裂方位与天然裂缝的分布有关。不同地区,用于判断起裂方位的水平主应力差系数不同。

关键词: 地应力;煤层气井;水力压裂;天然裂缝;破裂压力;起裂方位

中图分类号: TE357.1 **文献标志码:** A

Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells

TANG Shu-heng¹ ZHU Bao-cun¹ ,YAN Zhi-feng²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Resources, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The crustal stress and mechanics properties data from No. 3 coal seam in the western Jincheng mining area were analyzed. With a finite-element method, the formation fracture pressure at borehole walls and natural fracture tips under different conditions of crustal stress was calculated. The effect of crustal stress on initiation pressure and azimuth was calculated. Initiation pressure and azimuth are related with the magnitude and direction of crustal stress. The influence degree of the angle between a natural fracture and the maximum horizontal principal stress on fracture pressure increases with increasing principal stress difference coefficient. In No. 3 coal seam in the western Jincheng mining area, hydraulic main fractures are easy to occur when the coefficient exceeds 0.84, net-like fractures are easy to occur when the coefficient is less than 0.47, and initiation azimuth is related with natural fracture distribution when the coefficient is between 0.47 and 0.84. In difference areas, the coefficient used to analyze the initiation azimuth is difference.

Key words: crustal stress; coal bed methane; hydraulic fracturing; natural fractures; fracture pressure; initiation azimuth

地应力条件不仅对于煤储层渗透性具有重要的影响^[1-2],同时,地应力大小和方向也是控制煤层气井水力压裂裂缝起裂压力、起裂位置及裂缝形态的重要参数。钻井之前,地应力处于平衡状态;钻开井眼,局部扰动破坏了原有平衡状态,井筒周围地应力重新分布。压裂施工后,最初在井筒处产生多条裂缝,这

些裂缝在距井筒一定范围内发生转向或相互扭曲,随着裂缝的延伸,最终在垂直于最小水平主应力方向形成一条裂缝^[3]。水力裂缝起裂方位不但与地应力方位有关,而且地应力大小也影响裂缝的扩展模式。在进行随机裂缝性储层压裂时,高水平主应力差条件下,容易产生较为平直的水力主缝;在低水平主应力

收稿日期: 2010-06-23 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05034-003); 国家自然科学基金资助项目(40972108); 国家863计划专题课题(2006AA06Z235); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0864)

作者简介: 唐书恒(1965—),男,河北正定人,教授。Tel: 010-82320601 E-mail: tangsh@cugb.edu.cn

差条件下, 径向网状扩展模式占优势^[4-6]。

目前, 关于起裂压力的研究比较充分^[7-10], 而对水力裂缝起裂位置的研究较为欠缺。本文以晋城矿区西部 3 号煤层的地应力和煤岩的力学性质数据为基础, 利用 ANSYS 软件, 采用数值模拟方法研究了地应力及局部扰动对水力压裂起裂压力、起裂位置的影响。

1 数值模型及方法

1.1 数值模型

模型基于以下假设: 岩石线弹性、均质、各向同性, 体力为零, 垂向作用力不变, 压应力为正; 不考虑煤层中渗流场、温度场与地应力场的耦合效应。

井筒半径 0.1 m, 考虑到边界效应, 地层模型的平面尺寸大于井筒半径 20 倍。采用直角坐标系, 井筒中心为坐标原点, 单位 m, 如图 1(a) 所示。

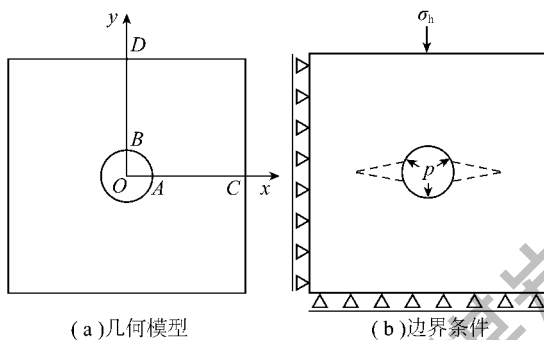


图 1 模型边界条件

Fig. 1 Boundary conditions of model

模型边界条件如图 1(b) 所示。左边界 x 方向和底边界 y 方向约束, 右边界施加 σ_H (最大水平主应力), 上边界施加 σ_h (最小水平主应力), 井筒及裂缝处施加液压 p 。

晋城矿区西部 3 号煤层的弹性模量 5.08 GPa, 泊松比 0.28, 抗拉强度 0.4 MPa^[10]。3 号煤层地应力特征: 最小水平主应力为 2.1 ~ 11.6 MPa, 平均值为 7.5 MPa; 最大水平主应力为 4.5 ~ 17.9 MPa, 平均值为 10.0 MPa; 水平主应力差为 0 ~ 7.7 MPa, 平均值为 2.4 MPa^[10]。

1.2 理论模型

水力压裂的力学模型可简化为一个平面问题, 相当于两个主应力 σ_H 和 σ_h 作用在有一圆孔(半径为 a) 的无限大平板上, 据弹性力学分析圆孔外任一点 M 处的应力为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= [(\sigma_H + \sigma_h)/2][1 - (a^2/r^2)] + [(\sigma_H - \sigma_h)/2] \sin 2\theta [1 + (2a^2/r^2) - (3a^4/r^4)] \\ \sigma_\theta &= [(\sigma_H + \sigma_h)/2][1 + (a^2/r^2)] - [(\sigma_H - \sigma_h)/2] \cos 2\theta [1 + (3a^4/r^4)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} &= -\tau_{\theta r} = -[(\sigma_H - \sigma_h)/2] \sin 2\theta [1 + (2a^2/r^2) - (3a^4/r^4)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 σ_r 为 M 点的径向应力; σ_θ 为切向应力; $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta r}$ 为剪应力; r 为 M 点到圆孔中心的距离; θ 为 M 点和圆孔中心连线与最大水平主应力 σ_H 的夹角。当 $r = a$ 时, 由式(1)可得出孔壁上 A 、 B 两点(图 1(a)) 的应力集中分别为

$$\sigma_A = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad \sigma_B = 3\sigma_H - \sigma_h$$

使孔壁产生张性破裂的外加液压 p_c 称为起裂压力。不考虑孔隙压力条件下, 地层起裂压力等于孔壁破裂处的应力集中加上岩石的抗张强度 T , 即

$$p_c = 3\sigma_h - \sigma_H + T \quad (2)$$

1.3 计算方法

Hossain 等^[11] 认为, 采用最大拉应力准则作为地层破裂的判据比其他破裂准则更精确。因此本文以最大拉应力准则作为预测地层破裂的判据。

水力压裂时, 工作液压在井壁处产生的拉应力超过岩石的抗拉强度时, 地层中会出现微裂缝。数值模拟求解出井壁处产生的最大周向拉应力, 与岩石的抗拉强度比较, 两者相等时的工作压力 p_c 即为目标地层的起裂压力。研究表明, 外加液压与井壁处产生的最大周向拉应力间存在很好的线性关系, 由求解数据得出两者的回归方程, 代入岩石的抗拉强度, 计算出工作压力即为一定地应力条件下的地层起裂压力。

1.4 地应力条件

水力压裂模拟中要求模拟地层条件, 其中最主要的是地应力的大小和分布。水平地应力场的特征可用水平主应力差系数 K_h (无因次) 表示, 定义为

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h}$$

依据晋城矿区西部 3 号煤层的地应力特征^[12], 设计的地层应力条件见表 1。

表 1 地应力数据

Table 1 The data of curstal stresses

地应力条件	σ_h /MPa	σ_H /MPa	K_h
I	2	10	4.00
II	4	10	1.50
III	6	10	0.67
IV	8	10	0.25
V	10	10	0
VI	10	12	0.20
VII	10	14	0.40
VIII	10	16	0.60
IX	10	18	0.80

2 井筒周围的地应力特征

钻井以后(井筒半径 0.1 m),井筒附近原地应力的平衡状态被破坏,引起地应力在井筒附近重新分布。由于井筒对地应力的局部扰动,使最大水平主应力沿井筒周向呈环状分布,最小水平主应力沿井筒呈放射状分布。

图 2 表示最小水平主应力沿图 1(a) 中路径 AC、BD 的分布。由图 2 可以看出,应力集中范围与地应力大小无关,最小水平主应力沿路径 AC、BD 在距 O 点(井筒中心) 1 m 处接近原地应力大小,应力集中的影响范围约为井筒半径的 10 倍。Chen Zhongming^[13]也证明应力集中的范围一般不超过 5 倍井眼直径的距离。

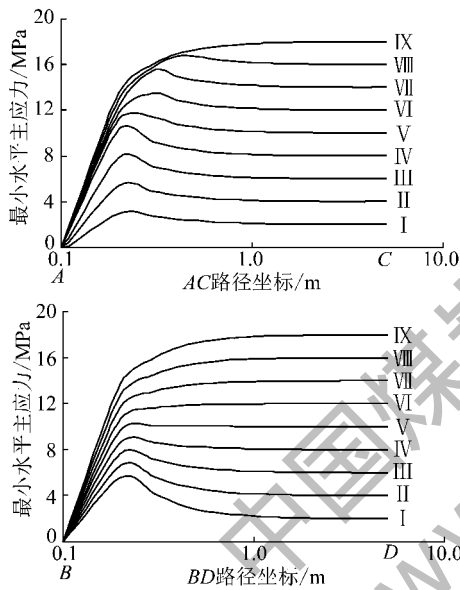


图 2 最小水平主应力沿 AC、BD 路径分布

Fig. 2 Minimum horizontal principal stress distribution along AC and BD path

3 裂缝起裂压力

3.1 应力集中对起裂压力的影响

由于应力集中,钻井后井筒附近地应力重新分配,影响范围约为井筒半径的 10 倍,井筒对地层应力的局部扰动改变了地层的起裂压力。

根据弹性力学理论,不考虑孔隙压力条件下,地层起裂压力等于孔壁破裂处的应力集中加上岩石的抗张强度(式(2))。采用有限元方法求解不同地应力条件下(表 1)地层的起裂压力。比较起裂压力的有限元解和解析解,发现二者吻合的很好(图 3)。但起裂压力存在负值区域,这时的起裂压力具有一定的理论意义,说明当水平主应力差足够大时($K_h > 2$),

由于井筒对地层应力的局部扰动,在井壁处可以产生大于地层起裂压力的张应力,不需要外加液压地层即可破裂,在井筒附近形成复杂的裂缝。

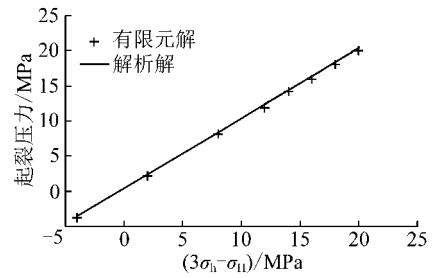


图 3 起裂压力与 $3\sigma_h - \sigma_H$ 的关系

Fig. 3 Relationship between initiation pressure and $3\sigma_h - \sigma_H$

3.2 天然裂缝对破裂压力的影响

煤储层中(特别是井筒附近)存在各种成因的天然裂缝。天然裂缝不但使岩石抗张强度降低,也改变井筒附近地应力的大小和方向,影响压裂裂缝的起裂、扩展。表 2 为采用有限元方法计算的天然裂缝与最大水平主应力夹角 θ 为 0、30、45、60、90° 时,在不同地应力条件下的地层破裂压力。

表 2 煤层破裂压力数据

地应力条件		天然裂缝端破裂压力 / MPa				
井壁处破裂压力		0°	30°	45°	60°	90°
I	-3.77	2.18	1.85	3.39		
II	2.20	4.44	4.33	5.49	7.36	11.21
III	8.18	6.70	6.72	7.56	8.80	11.21
IV	14.15	8.96	9.12	9.60	10.26	11.21
V	20.03	11.22	11.03	11.21	11.21	11.21
VI	18.02	11.22	11.03	11.84	12.49	13.47
VII	15.98	11.22	11.03	12.18	13.43	15.73
VIII	13.93	11.22	11.03	12.60	14.31	17.99
IX	11.89	11.22	11.03	12.93	15.17	20.25

由于天然裂缝对地应力的局部扰动,地层破裂压力不再受井筒引起的应力集中的影响。 θ 值不同,对地应力产生不同程度的影响。图 4 为不同地应力条件下破裂压力随夹角 θ 的变化。 $\theta < 30^\circ$ 时,对破裂压力的影响很小,破裂压力由最小水平地应力大小和煤岩的抗拉强度决定。 $\theta > 30^\circ$ 时,相同地应力条件下,破裂压力随 θ 值增大而增大;但地应力条件不同, θ 值对破裂压力的影响程度不同。相同地应力条件下,夹角 θ 对破裂压力的影响可用角度影响系数 K_θ (无因次)表示,定义为

$$K_\theta = \frac{p_{c90} - p_{c30}}{p_{c30}}$$

式中 p_{c90} 为 $\theta = 90^\circ$ 时的破裂压力; p_{c30} 为 $\theta = 30^\circ$ 时的

破裂压力。

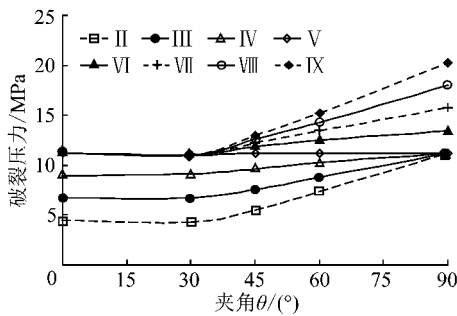


图 4 破裂压力随夹角 θ 的变化

Fig. 4 The change curves of fracture pressure with θ

图 5 反映了地应力条件与 K_p 的关系。随 K_h 增大 K_p 线性增大,说明随着水平主应力差增大,夹角 θ 对地层破裂压力的影响程度增大。

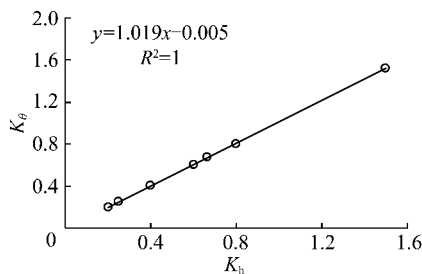


图 5 K_p 与 K_h 的关系

Fig. 5 Relationship between K_p and K_h

4 裂缝起裂方位

若仅考虑井筒引起的地应力局部扰动,水力裂缝的起裂方位由水平主应力特征决定。最初在井壁处产生多条裂缝,随着裂缝的延伸,最终在垂直于最小水平主应力方向形成一条裂缝^[3]。Yew^[14]认为裂缝的转向仅存在于近井筒区域。由于应力集中的影响范围仅限于井筒附近,因此,对裂缝起裂方位的研究特别关注井筒附近区域。

钻井后井筒周围 σ_H 沿井筒周向呈环状分布, σ_h 沿井筒呈放射状分布。压裂施工的外加液压改变了井筒附近的地应力分布,使 σ_H 沿井筒周向呈环状分布, σ_h 沿井筒呈放射状分布。由于井筒周围地应力分布特征,压裂裂缝从井壁处起裂,当水平主应力差较小时,可以形成放射状的多条裂缝^[15]。

煤储层压裂施工后,近井筒区域可以形成复杂的裂缝:一方面是受井筒应力集中的影响;另一方面是由于煤储层近井筒区域存在各种成因的天然裂缝,天然裂缝影响了煤储层的破裂压力和起裂方位。可以通过比较相同地应力条件下井壁处破裂压力与天然裂缝缝端破裂压力的相对大小来研究天然裂缝对起裂方位的影响。

井壁处及天然裂缝缝端破裂压力数据见表 2,两者相对大小可用破裂压力差系数 K_p (无因次) 表示,定义为

$$K_p = \frac{P_{c2} - P_{c1}}{P_{c1}}$$

其中 p_{c1} 为井壁处破裂压力; p_{c2} 为天然裂缝缝端破裂压力。当 $K_p < 0$ 时,水力裂缝沿天然裂缝起裂、扩展; $K_p > 0$ 时,在井壁处垂直最小水平主应力方位起裂。

图 6 (a) 表示不同地层应力条件下 K_p 的变化情况。随着 K_h 增大 K_p 增大; 夹角 θ 不同, K_p 随 K_h 的变化趋势不同。相对于每一个夹角 θ 存在一个临界水平主应力差系数 K_{h0} , 当 $K_h > K_{h0}$ 时 $K_p > 0$; 当 $K_h < K_{h0}$ 时 $K_p < 0$ 。夹角 θ 与 K_{h0} 呈对数关系(图 6 (b)) 随 θ 增大 K_{h0} 以对数形式减小。

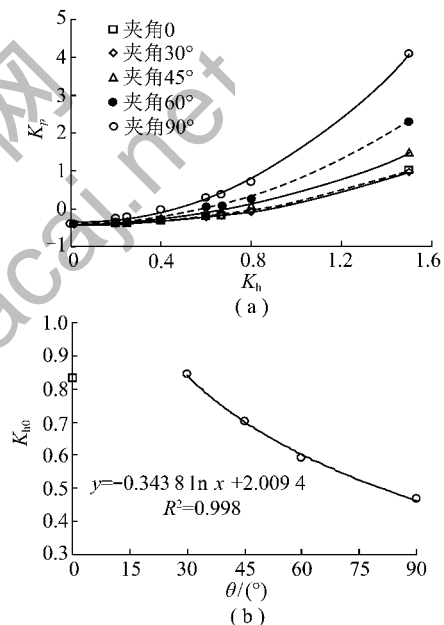


图 6 K_p 、 K_h 及 K_{h0} 、 θ 间的关系

Fig. 6 Relationships between K_p and K_h , between K_{h0} and θ

晋城矿区西部 3 号煤层的地应力及煤岩力性质条件下, K_{h0} 值较小, 变化范围在 0.47 ~ 0.84 (图 6 (b))。 $K_h > 0.84$ 时, 对应于不同夹角 θ 的 $K_p > 0$, 天然裂缝缝端破裂压力大于井壁处破裂压力; 水力裂缝不容易沿天然裂缝延伸, 易于在井壁处沿垂直最小水平主应力的方位起裂并延伸, 产生较为平直的水力主缝。由于 K_h 越大, 夹角 θ 对地层破裂压力的影响程度越大(图 5), 因此 K_h 越大, 越容易产生较为平直的水力主缝。 $K_h < 0.47$ 时, 对应于不同夹角 θ 的 $K_p < 0$, 天然裂缝缝端破裂压力小于井壁处破裂压力, 水力裂缝容易沟通各种成因的天然裂缝, 并沿天然裂缝扩展, 产生网状裂缝。 K_h 在 0.47 ~ 0.84 时, 水力裂缝起裂方位与天然裂缝的发育类型及分布有关。

参数 K_{h0} 具有相对性,不同地区的地应力条件不同, K_{h0} 大小和变化范围不同,但总可以求出。不同地区,虽然没有统一的 K_{h0} 值,但地应力对起裂方位的影响可表述为高水平主应力差条件下,容易产生较为平直的水力主缝;在低水平主应力差条件下,径向网状扩展模式占优势^[6]。

5 结 论

(1) 应力集中使最大水平主应力 σ_H 沿井筒周向呈环状分布,最小水平主应力 σ_h 沿井筒呈放射状分布。应力集中的影响范围约为井筒半径的 10 倍。

(2) 天然裂缝与最大水平主应力夹角 θ 值不同,对破裂压力的影响程度不同。 $\theta < 30^\circ$ 时,对破裂压力的影响很小; $\theta > 30^\circ$ 时,破裂压力随 θ 值增大而增大。随水平主应力差系数 K_h 增大,夹角 θ 对地层破裂压力的影响程度增大。

(3) 天然裂缝的存在影响水力裂缝的起裂方位。可以通过比较井壁处与天然裂缝缝端破裂压力大小来判断水力裂缝起裂方位。

(4) 水力裂缝起裂方位不但与水平主地应力方位有关,而且与水平主应力差的大小有关。高水平主应力差条件下,水力裂缝易于在井壁处沿垂直最小水平主应力的方位起裂并延伸,产生较为平直的水力主缝。低水平主应力差条件下,水力裂缝容易沟通各种成因的天然裂缝,并沿天然裂缝扩展,产生网状裂缝。

(5) 随天然裂缝与最大水平主应力夹角 θ 增大,临界水平主应力差系数 K_{h0} 以对数形式减小。每一个地区可以求出一组 K_{h0} 用以判断水力裂缝的起裂方位。

参考文献:

[1] 李志强,鲜学福,徐龙君,等.地应力、地温场中煤层气相对高渗区定量预测方法[J].煤炭学报,2009,34(6):766-770.
Li Zhiqiang, Xian Xuefu, Xu Longjun, et al. Quantitative predicting method of coalbed methane relative high permeability region in geostress and geothermal field[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 766-770.

[2] 邓泽,康永尚,刘洪林,等.开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J].煤炭学报,2009,34(7):947-951.
Deng Ze, Kang Yongshang, Liu Honglin, et al. Dynamic variation character of coal bed methane reservoir permeability during depletion[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 947-951.

[3] Hallan S D, Last N C. Geometry of hydraulic fractures from modestly

deviated well bores[R]. SPE 20656, 1991.

[4] Doe T W, Boyce G. Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stress[J]. Rock Mechanics and Mining Science, 1989, 26: 605-611.

[5] Renshaw C E, Pollard D D. Are large differential stresses required for straight fracture propagation paths[J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16(6): 817-822.

[6] 陈勉,周健,金衍,等.随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J].石油学报,2008,29(3):431-434.
Chen Mian, Zhou Jian, Jin Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 431-434.

[7] 李根生,刘丽,黄中伟,等.水力射孔对地层破裂压力的影响研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(5):42-45.
Li Gensheng, Liu Li, Huang Zhongwei, et al. Study of effect of hydraulic perforating on formation fracturing pressure[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006, 30(5): 42-45.

[8] Crosby D G, Rahman M M, Rahman M K, et al. Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, 35: 191-204.

[9] 朱宝存.煤层气井水力压裂力学机制数值模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008:34-55.
Zhu Baocun. Numerical modeling of mechanical mechanism of hydraulic fracture in coalbed methane well[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2008: 34-55.

[10] 朱宝存,唐书恒,颜志丰,等.地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响[J].煤炭学报,2009,34(9):199-202.
Zhu Baocun, Tang Shuheng, Yan Zhifeng, et al. Effects of crustal stress and natural fractures on fracture pressure of coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 199-202.

[11] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. JPSE, 2000, 27: 129-149.

[12] 倪小明,王延斌,接铭训,等.不同构造部位地应力对压裂裂缝形态的控制[J].煤炭学报,2008,33(5):505-508.
Ni Xiaoming, Wang Yanbin, Jie Mingxun, et al. Stress's influence in different tectonic positions on fracturing interstitial morphology[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 505-508.

[13] Chen Zhongming, Economides M J. Effect of near wellbore fracture geometry on fracture execution and post treatment well production of deviated and horizontal wells[R]. SPE 39425, 1999.

[14] Yew C H, Schmidt J H, Li Yi. On fracture design of deviated wells[R]. SPE 19722, 1993.

[15] Warpinski N R, Lorenz J C. Author's reply to discussion of examination of a cored hydraulic fracture in a deep gas well[R]. SPE 26946, 1992.