

富县区块浅层致密油藏压裂裂缝扩展形态研究

常兴浩

(中国石化华北分公司,河南郑州 450006)

摘 要:为了提高富县区块延长组浅层致密砂岩油藏压裂改造效果,研究了压裂裂缝扩展形态及其对压后产量的影响。采用室内声发射凯塞尔效应方法,结合现场裂缝监测、压裂压力降落特性和压后试油结果进行分析,认为裂缝扩展形态与油层埋深和层位直接相关,长 2、长 3 和长 6 储层的压裂裂缝主要为水平缝或复杂缝,长 7 和长 8 储层的压裂裂缝主要为垂直缝。水平裂缝压后生产效果差,必须根据不同的深度与层位对压裂设计和现场施工工艺进行优化,尽可能避免形成单一水平裂缝。在一口水平井进行了现场试验,压裂施工 11 段,试油最高产油量 13.54 t/d,目前稳产油量 8.93 t/d,取得了较好的改造效果。研究结果可为其他地区浅层油藏的压裂设计与施工提供技术参考。

关键词:浅层 致密油藏 裂缝扩展形态 富县区块

中图分类号:TE357.1⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)03-0109-05

Fracture Propagation in Shallow Tight Reservoirs of Fuxian Block

Chang Xinghao

(Sinopec Huabei Sub-Company, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: Reservoirs in Yanchang Formation of Fuxian Block are shallow in buried depth, and complex in fracture propagation and shape. In order to improve fracturing effect in shallow tight sandstone reservoirs, the fracture propagation shape and its effect on production were investigated. On the basis of acoustic emission Kessel Effect experiment results, the analysis was made with fracture monitoring data, the fracturing pressure drop characterization and oil test results after fracturing, show that fracture propagation shape is directly related to the depth and layers of reservoirs, the main fractures created in the layers Chang 2, Chang 3 and Chang 6 were horizontal or complex, but main fractures in the layers Chang 7 and Chang 8 are vertical. Because the horizontal fractures greatly affect the fracturing effect, it is very important to optimize the fracture design and the technique to avoid forming horizontal fractures. One horizontal well fractured with 11 stages, has high output of oil 13.54 t/d, and kept stable oil production of 8.93 t/d currently, indicating good fracturing results. The research results of this article can provide technical reference for other similar shallow reservoirs.

Key words: shallow formation; tight reservoir; fracture propagation shape; Fuxian Block

富县探区位于鄂尔多斯盆地东南部,构造位于伊陕斜坡南部,该区中生界延长组储层自上而下发育有长 2、长 3、长 6、长 7 和长 8 储层等多套油层,埋深 150~1 300 m,储层孔隙度 7.5%~12.6%,渗透率小于 1 mD,总体表现为低孔、致密的特点,未经压裂改造油井无自然产能。前期由于对裂缝形态认识不清,压裂主要设计为垂直缝,极大地影响了压裂施工效果。目前,富县探区部分浅层井压裂后产油量

很低,甚至根本不出油,也反映出这种影响的严重性。因此,研究富县探区中生界延长组储层不同深

收稿日期:2013-01-07;**改回日期:**2013-05-11。

作者简介:常兴浩(1962—),男,云南楚雄人,1985年毕业于成都地质学院石油系,2005年获中国矿业大学资源普查专业博士学位,高级工程师,长期从事石油天然气及煤层气勘探开发研究及项目管理工作。

联系方式:(0371)86002172, hbsjchangxh@vip.163.com。

度或层位压裂裂缝的扩展形态规律,针对性选择压裂工艺并优化压裂设计,可以提高压裂后的开发效果。

目前国内外对裂缝扩展形态的研究方法包括三轴应力状态、停泵压力和裂缝监测等方法^[1-9]。笔者在室内三轴应力状态分析试验的基础上,结合现场裂缝监测、瞬时停泵压力梯度分析、压后试油结果等手段,综合研究浅层储层的裂缝形态,其中瞬时停泵压力梯度分析方法简便可靠,具有较强的实用性。

1 压裂裂缝扩展形态研究

1.1 三轴应力状态

采用室内声发射凯塞尔效应方法,对富县探区长2、长3、长6、长7和长8等储层的岩样进行了三轴应力大小测试,结果见表1。

表1 声发射凯塞尔效应试验结果

Table 1 Test results of acoustic emission experiment with Kessel Effect

层位	井深/m	上覆岩层压力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa
长2	391.71~392.09	9.07	14.18	8.26
长3	546.85~547.10	15.24	19.34	14.76
长6	498.23~500.34	11.80	16.81	10.18
长7	941.04~942.04	22.39	27.17	19.41
长8	751.39~752.48	17.72	23.43	16.15

从表1可以看出:1)各个层位最小水平主应力和上覆岩层压力均小于最大水平主应力,最大水平主应力与最小水平主应力差为5.92~7.76 MPa,上覆岩层压力与最大水平主应力相差4.78~5.71 MPa;2)不同层位最小水平主应力与上覆岩层压力复杂变化,长2、长3、长6和长8层最小水平主应力与上覆岩层压力相近,长2、长3层应力差不超过1.00 MPa,长6、长8层相差约1.60 MPa,长7层最小水平主应力明显小于上覆岩层压力,应力差达2.98 MPa。

1.2 瞬时停泵压力梯度变化规律分析

瞬时停泵压力消除了摩阻的影响,基本代表了裂缝的延伸压力,是最小水平主应力与岩石应力强度因子的综合反映。根据井底瞬时停泵压力梯度和上覆岩层应力梯度的对比,可以大致判断压裂裂缝形态。

1.2.1 深度与瞬时停泵压力梯度的关系

按深度统计富县探区中生界延长组储层95井

次压裂的瞬时停泵压力梯度变化情况,结果见图1,可以看出:1)瞬时停泵压力梯度受深度的影响明显,深度越大,梯度越小;2)不同深度段的瞬时停泵压力梯度有一定变化规律,在0~500 m深度内,瞬时停泵压力梯度大于0.025 MPa/m;当深度500~800 m时,瞬时停泵压力梯度在0.025 MPa/m上下变化;当深度大于800 m时,瞬时停泵压力梯度基本小于0.025 MPa/m,且比较集中。

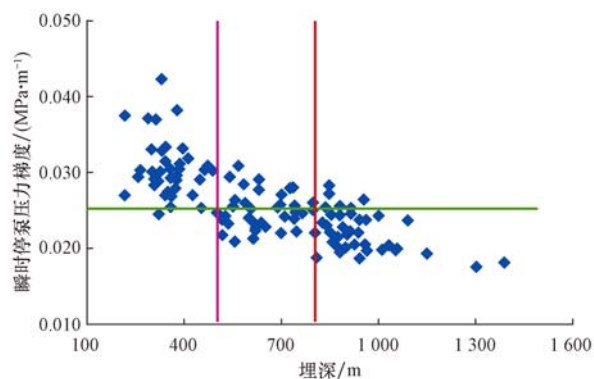


图1 瞬时停泵压力梯度与埋藏深度的关系

Fig. 1 Relationship between instantaneous pump-stopping pressure gradient and burial depth

1.2.2 层位与瞬时停泵压力梯度的关系

按层位统计分析富县探区已压裂井的瞬时停泵压力梯度分布规律(见图2),可以看出:长6、长7和

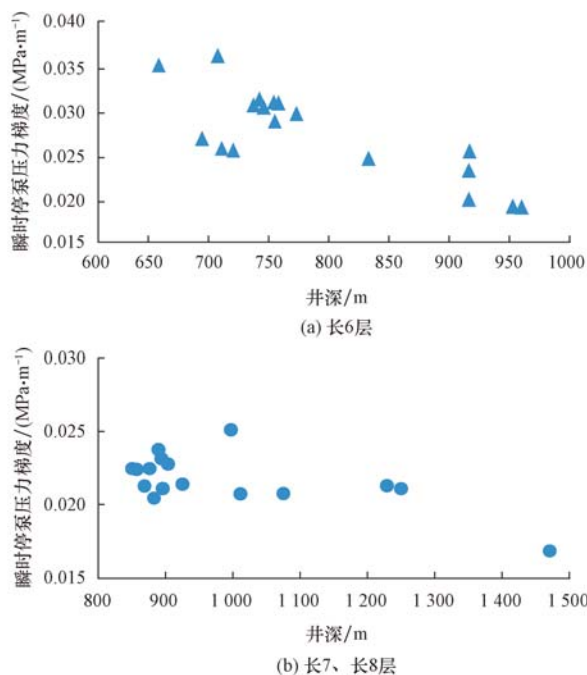


图2 瞬时停泵压力梯度与井深的关系

Fig. 2 Relationship between instantaneous pump-stopping pressure gradient and well depth

长 8 层位的瞬时停泵压力梯度分布各有不同,长 6 层瞬时停泵压力梯度为 0.020~0.035 MPa/m,长 7 和长 8 层瞬时停泵压力梯度基本在 0.025 MPa/m 以下。瞬时停泵压力梯度的变化反映出裂缝扩展的压力变化。

1.3 区块裂缝形态分布规律

水力压裂形成的裂缝形态主要取决于岩石所受的三轴应力状态,当最小水平主应力大于垂向应力时,产生水平缝^[10]。根据长 2、长 3、长 6、长 7 和长 8 储层的上覆岩层压力与最大水平主应力和最小水平主应力的关系,初步判断长 2、长 3 层的压裂裂缝形态主要为水平缝,长 6、长 8 层的压裂既可能形成水平缝,也可能形成垂直缝,而长 7 层压裂形成垂直缝。

根据岩石密度计算富县探区上覆岩层最大应力梯度大约为 0.023~0.025 MPa/m,将该数据与井底瞬时停泵压力梯度对比,综合分析认为当该区储层埋深大于 800 m 时以垂直缝为主,小于 500 m 时基本为水平缝,500~800 m 内各种形态裂缝均可能产生。如果按层位的瞬时停泵压力梯度来判断,则长 7、长 8 层为垂直缝,长 6 层可能形成水平缝或垂直缝。

为进一步分析验证岩心三轴应力测试与瞬时停泵压力梯度的裂缝形态判断结果,现场采取了压裂前后的井温测井^[11-12]和压裂过程中的地面微地震等裂缝监测技术。压裂前后 2 口直井(长 2 和长 6 储层)的井温测井曲线(见图 3 和图 4)负异常情况不同,表明 A 井长 2 储层压后形成了水平缝,B 井长 6 储层压后形成了垂直缝。

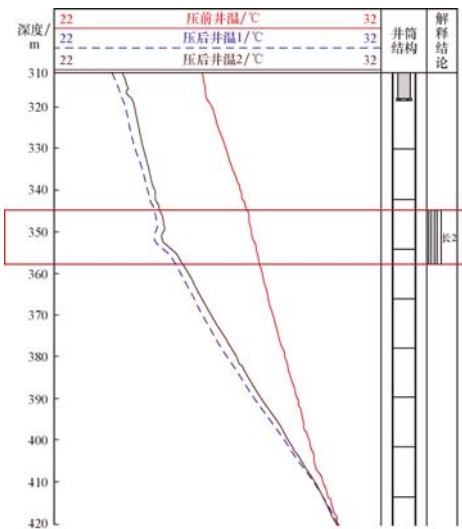


图 3 A 井长 2 储层井温测井曲线
Fig. 3 Temperature logging curve of Chang 2 layer in Well A

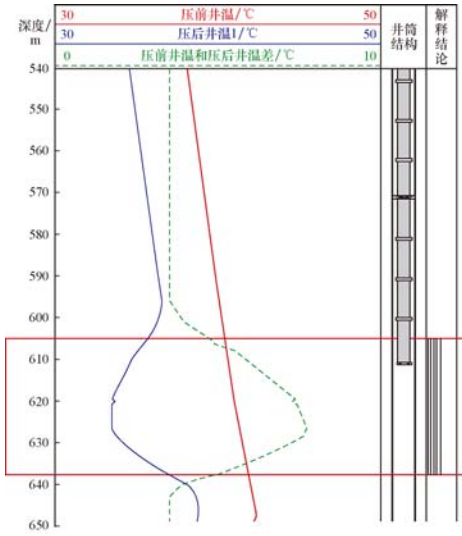


图 4 B 井长 6 储层井温测井曲线
Fig. 4 Temperature logging curve of Chang 6 layer in Well B

地面微地震法监测结果表明,长 6 层既出现了水平缝,也出现了垂直缝,而长 7、长 8 层则形成垂直缝(见表 2),表明富县延长组储层裂缝形态的研究结果与现场施工情况基本相符。

表 2 地面微地震监测结果
Table 2 Ground micro-seismic monitoring results

序号	层位	顶深/ m	底深/ m	瞬时停泵 压力/MPa	瞬时停泵 压力梯度/ (MPa·m ⁻¹)	微地震 监测结果
1	长 6	540.8	542.4	7.00	0.023 36	垂直缝
2	长 6	803.6	810.9	8.10	0.019 83	垂直缝
3	长 6	625.0	643.0	9.40	0.024 63	水平缝
4	长 7	933.5	959.4	14.10	0.024 38	垂直缝
5	长 8	890.0	894.0	20.62	0.023 10	垂直缝
6	长 8	900.0	903.0	20.51	0.022 80	垂直缝
7	长 8	863.0	870.0	18.41	0.021 20	垂直缝
8	长 8	873.0	876.0	19.64	0.022 50	垂直缝
9	长 8	892.5	895.0	18.83	0.021 10	垂直缝
10	长 8	921.5	924.5	19.73	0.021 40	垂直缝

综合三轴应力测试、瞬时停泵压力梯度统计与井温测井和微地震监测结果,基本确定了富县探区延长组储层压裂裂缝扩展形态规律,即埋深大于 800 m 时以垂直缝为主,小于 500 m 时为水平缝,而 500~800 m 时各种形态裂缝均可能产生。

1.4 裂缝形态对压裂后产量的影响分析

压裂形成水平缝后,油气从地层到压裂裂缝的渗流主要为垂向渗流,致密储层垂直渗透率较低,仅相当于水平渗透率的 1/10 左右,导致原油很难从地

层流到裂缝,形成水平缝的油井压裂后产油量普遍较低,甚至不产油(见表3)。

表3 富县探区部分浅层井试油结果统计

Table 3 Part of oil testing results of shallow layers in Fuxian Block

序号	层位	瞬时停泵压力梯度/(MPa·m ⁻¹)	日产液/(m ³ ·d ⁻¹)	日产油/(t·d ⁻¹)	裂缝形态
1	长7	0.024 38	5.40	2.70	垂直缝
2	长6	0.024 31	3.17	0.44	垂直缝
3	长6	0.023 17	3.20	0.37	垂直缝
4	长6	0.023 69	2.70	0.80	垂直缝
5	长6	0.019 37	11.42	0.25	垂直缝
6	长8	0.024 13	3.46	0.13	垂直缝
7	长6	0.025 16	3.12	0.22	水平缝
8	长6	0.030 21	2.43	0.13	水平缝
9	长2	0.031 02	9.32		水平缝
10	长2	0.025 91	0.40		水平缝
11	长2	0.029 74	1.67		水平缝
12	长6	0.026 54	3.60		水平缝
13	长6	0.025 15	0.51		水平缝
14	长6	0.025 31	4.29		水平缝

2 现场施工工艺

鉴于水平缝对压后油井产量的不利影响^[14-15],在实际压裂设计及施工时需要采取控制措施,避免或者减少水平缝的形成。针对长2、长3和长6等容易形成水平缝的储层,压裂工艺设计与现场施工可采取以下技术措施^[18-19]。

定向水力喷射射孔 优化喷嘴位置和方向,沿套管壁垂向喷射出一定长度和深度的孔眼,来代替常规射孔孔眼,压裂时,压裂裂缝受水力喷射孔眼的诱导,直接向前延伸,形成指定形式的裂缝。

高密度排状对称射孔 采用相位角为180°定向排状对称高孔密射孔,利用孔密较高的排状射孔孔眼形成垂向破碎带,诱导人工裂缝直接沿排状射孔孔眼向破碎带延伸^[15]。

缝内转向压裂 采取化学暂堵剂暂堵和施工参数控制技术,在主裂缝内形成局部堵塞和缝内压力升高,突破地应力对压裂裂缝延伸方向的控制,压开新的支裂缝、实现裂缝转向,或突破泥质薄夹层、实现对储层纵向更多含油小层的充分改造。

压裂现场实时诊断裂缝形态与调整 针对长6层或深500~800 m的油井,在压裂前置液泵入阶

段瞬时停泵一次,根据瞬时停泵压力梯度判断裂缝形态,并对设计和施工参数做出相应调整。

3 现场应用

富县区块某水平井水平段长1 000 m,采用多级管外封隔器分段压裂工艺分11段进行压裂投产。该井长3层垂深463.2 m,由于储层埋藏浅,易形成水平缝,压裂设计时主要以水平缝进行方案设计,采用大排量、低砂比、大砂量的设计思路,目的是在压裂时尽可能不形成单一的水平缝;同时做了一套针对垂直缝的压裂设计预案。

2012年10月,对该井长3油层进行了分段压裂施工作业。为了进一步确认裂缝形态,在该井泵入第一段前置液阶段进行了一次瞬时停泵测试,瞬时停泵压力8.8 MPa,停泵压力梯度0.028 8 MPa/m,根据压裂裂缝形态研究结果,判断该层压后将形成水平缝,因此按照水平缝的压裂设计方案进行施工。

该井压后放喷、机抽排液10 d后开始见油,试油期间最高日产油13.54 t/d,目前稳产8.93 t/d,平均含水29.8%,取得了较好的改造效果。

4 结论与认识

1) 根据三轴应力测试、瞬时停泵压力梯度统计与井温测井和微地震监测结果,基本确定了富县探区延长组储层压裂裂缝扩展形态规律,埋深大于800 m时以垂直缝为主,小于500 m时基本为水平缝,而500~800 m时各种形态裂缝均可能产生。

2) 长2、长3和长6储层的人工裂缝形态主要为水平缝或复杂裂缝,而长7和长8储层的人工裂缝形态主要为垂直缝。压裂设计要依据储层和深度,按不同的裂缝形态分别设计施工方案。

3) 水平缝影响压裂后增产效果,对于长2、长3和长6储层的压裂应从射孔、压裂施工参数与缝内转向等方面采取措施,尽量减小形成单一水平缝的概率,最大程度地增加裂缝的复杂性或裂缝的改造体积,以提高单井产量。

参 考 文 献

References

- [1] 唐涛. 地应力扰动场研究及其对人工裂缝形态的影响初探[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(3): 23-25.
Tang Tao. Research of stress perturbation field and influence

- of artificial fracture morphology[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2009, 28(3): 23-25.
- [2] 蒋廷学, 王欣. 由瞬时停泵压力估算裂缝闭合压力的现场方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(3): 42-45.
- Jiang Tingxue, Wang Xin. Research of fracture closure pressure estimated with method of instantaneous stop the pump pressure[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999, 18(3): 42-45.
- [3] 蒋廷学, 汪永利, 丁云宏, 等. 由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2424-2429.
- Jiang Tingxue, Wang Yongli, Ding Yunhong, et al. Determination of rock mechanics parameters by pressure of surface fracturing treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2424-2429.
- [4] 陈凤, 罗美娥, 张维平, 等. 大庆外围油田地应力特征及人工裂缝形态分析[J]. 断块油气田, 2006, 13(3): 13-16.
- Chen Feng, Luo Mei'e, Zhang Weiping, et al. Terrestrial stress characteristics and artificial fracture pattern analysis of Daqing periphery oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006, 13(3): 13-16.
- [5] 王秀娟. 大庆外围低渗透储层裂缝与地应力研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 88-90.
- Wang Xiujuan. Research of fractures and stress in daqing peripheral low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5): 88-90.
- [6] 王秀娟, 赵永胜, 王良书, 等. 大庆喇萨杏油田水力压裂人工裂缝形态研究[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 51-55.
- Wang Xiujuan, Zhao Yongsheng, Wang Liangshu, et al. Geometry of artificial fractures formed by hydraulic fracturing in Laxaxing Oilfield of Daqing Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 51-55.
- [7] 徐向荣, 马利成, 唐汝众. 地应力及其在致密砂岩气藏压裂开发中的应用[J]. 钻采工艺, 2000, 23(6): 17-21.
- Xu Xiangrong, Ma Licheng, Tang Ruzhong. Application of formation stress in tight sandstone gas reservoir fracturing development[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(6): 17-21.
- [8] 苏生瑞, 朱合华, 王士天, 等. 断裂物理力学性质对其附近地应力的影响[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 655-658.
- Su Shengrui, Zhu Hehua, Wang Shitian, et al. The effect of fracture properties on stress field in the vicinity of a fracture[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2002, 32(6): 655-658.
- [9] 达引朋, 赵文, 卜向前, 等. 低渗透油田重复压裂裂缝形态规律研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 781-784.
- Da Yinpeng, Zhao Wen, Bo Xiangqian, et al. Study on fracture pattern law for re-fracturing in low permeability reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(6): 781-784.
- [10] 李颖川. 采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 237-245.
- Li Yingchuan. Production engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 237-245.
- [11] 张高玖, 赵德勇, 丁建锁, 等. 井温资料在南阳油田压裂中的应用[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2008, 10(3): 1-3.
- Zhang Gaojiu, Zhao Deyong, Ding Jiansuo, et al. Application of well logging temperature in Henan Oilfield[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2008, 10(3): 1-3.
- [12] 黎昌华, 白璐. 井温测井在油气田开发中的应用[J]. 钻采工艺, 2001, 24(5): 35-37.
- Li Changhua, Bai Lu. Application of well temperature logging in oilfield development[J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24(5): 35-37.
- [13] 刘伟伟, 苏月琦, 王茂文, 等. 特低渗油藏压裂井注采井距与注水见效关系[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 736-739.
- Liu Weiwei, Su Yueqi, Wang Maowen, et al. Relationship of injector-producer spacing and waterflooding response for fracturing wells in ultra-low permeability reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(6): 736-739.
- [14] 冯晴, 吴财芳, 雷波. 沁水盆地煤岩力学特征及其压裂裂缝的控制[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 100-104.
- Feng Qing, Wu Caifang, Lei Bo. Coal/rock mechanics features of Qinshui Basin and fracturing crack control[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 100-104.
- [15] 邓金根, 蔚宝华, 王金凤, 等. 定向射孔提高低渗透油藏水力压裂效率的模拟试验研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 14-16.
- Deng Jingen, Yu Baohua, Wang Jinfeng, et al. Simulation trial research on increasing hydraulic fracturing efficiency of low permeability reservoir by oriented perforation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 14-16.
- [16] 程百利. 腰英台油田压裂改造工艺技术研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 123-125.
- Cheng Baili. Study on fracturing technology in Yaoyingtai Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 123-125.
- [17] 汪国庆, 周承富, 王玉忠, 等. 福山凹陷小断块油藏储层压裂技术研究与应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 813-816.
- Wang Guoqing, Zhou Chengfu, Wang Yuzhong, et al. Research and application on fracturing of small fault block reservoir in Fushan Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 813-816.
- [18] 张广清, 陈勉. 定向射孔水力压裂复杂裂缝形态[J]. 石油勘探与开发, 2009, 39(1): 103-107.
- Zhang Guangqing, Chen Mian. Complex fracture shapes in hydraulic fracturing with orientated perforations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 39(1): 103-107.
- [19] 王祖文, 郭大立, 邓金根, 等. 射孔方式对压裂压力及裂缝形态的影响[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(5): 47-50.
- Wang Zuwen, Guo Dali, Deng Jingen. Effect of perforation mode on the fracturing pressure and cranny geometric shape[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(5): 47-50.