

特低渗透砂岩油藏动态裂缝成因及 对注水开发的影响

——以安塞油田王窑区长6油组为例

谢景彬, 龙国清, 田昌炳, 侯建锋, 李军诗, 王友净

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:安塞油田王窑区长6油组主要发育北东—南西向、近南北向2组天然裂缝,在注水开发过程中,注入水水淹方向与天然裂缝发育方向并不完全一致。在分析天然裂缝发育特征的基础上,结合不同开发阶段的油水井生产动态、吸水剖面和时间推移试井等资料,利用库伦破裂准则和格里菲斯裂缝扩展理论研究动态裂缝成因。结果表明,随着注入水压力的升高,原本无效的天然裂缝选择性开启和方向性扩展、延伸、沟通而形成的动态裂缝造成水淹,研究区动态裂缝的开启压力为20~23 MPa,延伸方向为北东65°~75°,与现今最大水平主应力方向一致。动态裂缝加剧了储层非均质性,造成现今最大水平主应力方向的快速水淹、水窜,降低了平面上和纵向上的动用程度,从而影响了油藏开发效果。

关键词:特低渗透 动态裂缝 成因机理 注水开发 长6油组 安塞油田

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0106-05

Genetic mechanism of dynamic fracture and its influence on water flooding development in extra-low permeability sandstone reservoir: a case of Chang6 member in Wangyao area, Ansai oilfield

Xie Jingbin, Long Guoqing, Tian Changbing, Hou Jianfeng, Li Junshi, Wang Youjing

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: There are two sets of conjugate shear fractures in the NE-SW and N-S orientations in Chang6 reservoir, Ansai oilfield. But the watered direction was inconsistent with the nature fractures. On the basis of analyzing the nature fractures characteristics, the produce curves, the injection index curves, the intake profiles and the time-lapse well test in different development stages of Wangyao area were used to study the response characteristics of dynamic fractures. Because of the increasing water injection pressure, the closed nature fractures opened selectively, expanded and connected oil and water wells, which caused the water flooding of oil zones. According to the Coulomb-Mohr shear failure theory and Griffith failure criteria, the opening pressures of dynamic fractures are 20-23 MPa and the ultimate extension directions are NE 60°-75° which is consistent with the current maximum horizontal major stress direction. The dynamic fractures aggravate the reservoir heterogeneity and cause the quick water flooding along the current maximum horizontal major stress direction, which reduces the producing degree horizontally and vertically and influences the reservoir development effects.

Key words: extra-low permeability; dynamic fractures; genetic mechanism; water flooding development; Chang6 member; Ansai oilfield

收稿日期:2015-03-18。

作者简介:谢景彬(1988—),男,山东聊城人,工程师,硕士,从事油气田开发地质研究。联系电话:15652751526, E-mail: xiejingbin@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“低渗、特低渗油气田经济开发关键技术”(2001ZX5013)。

特低渗透砂岩油藏储层物性差,只有经过酸化和压裂等措施后才能获得工业油流^[1-2],其天然裂缝较发育,控制了渗流系统,从而影响开发效果^[1-4]。对于天然裂缝的识别、成因机理、参数表征和分布预测等,前人通过地质方法、地球物理方法、动态方法、室内和矿场实验方法以及数值模拟方法等都做过相应的研究^[2-7],主要侧重于油田开发前的天然裂缝静态参数表征和分布规律研究,而在天然裂缝对水驱开发的影响方面研究较少,仅局限在裂缝应力敏感性研究和从缝网匹配的角度考虑井网部署。

特低渗透砂岩油藏天然裂缝的发育程度、规模、产状、力学性质、充填状况、渗流能力和成因机制等各不相同,影响因素较多,难以获得准确的参数;多数天然裂缝在地下是闭合、被充填的,孔隙度小,利用常规办法难以识别,在开发初期往往被忽略^[2-5];随着开发的不断深入,天然裂缝的开启、闭合、扩展延伸及渗流能力将发生变化^[2-5,8]。笔者在研究安塞油田王窑区长6油田天然裂缝发育特征的基础上,分析其开发生产特征,从油田开发的角度总结出动态裂缝概念,并探讨了动态裂缝的成因,分析了动态裂缝对特低渗透砂岩油藏开发的影响,以期为该油藏的注水开发提供有利依据。

1 区域概况

安塞油田王窑区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡的东南部,为一平缓的西倾单斜构造,其主要的产油层为上三叠统延长组长6油组,储层主体为三角洲前缘水下分流河道砂体^[9-12],以细砂岩为主,受成岩作用影响,物性较差,平均孔隙度为13%,平均渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原始地层压力为8.31~10 MPa,地层压力系数为0.7~0.8,属于低孔、特低渗透、低压油藏。安塞油田王窑区于1991年采用225~300 m井距不规则反九点面积井网进行早期注水开发,初期注水压力为5~6 MPa;1993年年产油量达到高峰后,逐渐下降;截至2012年底,其平均单井产能为1.42 t/d,综合含水率为61%,采出程度为17%,平均累积注采比为1.72。

2 天然裂缝发育特征

晚中生代以来多期构造运动造成了鄂尔多斯盆地中生界发育区域性构造裂缝^[7-9,11-13]。根据地壳露头资料统计,鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层存在东西向、北西—南东向、南北向

和北东—南西向4组高角度天然裂缝,不同地区天然裂缝的优势走向和发育程度不同,在盆地西南部主要表现为北西—南东向和北东—南西向,而盆地东北部主要表现为近东西向和南北向^[7-8,11-14]。

距离研究区较近的延河剖面,主要发育北东—近东西、北北西—近南北向为主的2组共轭剪裂缝,以垂直缝、高角度缝为主,纵向贯穿砂体,终止于岩性界面;天然裂缝密度与岩层厚度关系明显,岩层越厚,裂缝间距越大,裂缝密度越小,岩层越薄,裂缝间距越小,裂缝密度越大(图1)。地磁定向岩心、薄片统计资料表明,研究区主要发育北东—南西向、近南北向2组天然裂缝。研究区天然裂缝平面分布不均,单井钻遇天然裂缝最多的为东部王19-30井,80 m的岩心钻遇6条天然裂缝,西部多数井未见天然裂缝,平均每100 m岩心天然裂缝不足2条,这可能与天然裂缝多为高角度缝有关^[12],也与长6油组发育厚层状多期叠置水下分流河道砂体有关,研究区河道砂体单层厚度为2~5 m,复合砂体最厚为10 m以上,天然裂缝发育较差^[15-17]。



图1 延河剖面延长组天然裂缝发育特征

Fig.1 Natural fractures of Yanchang Formation in Yanhe outcrop

岩心薄片镜下鉴定结果表明,研究区发育天然微裂缝,其长度为10~50 mm,缝宽为1~50 μm ,近61.75%的裂缝被钙质、泥质充填,部分被碳质、沥青质充填,充填较为严重,属无效裂缝。

3 动态裂缝概念及成因

3.1 动态裂缝概念

研究区不同开发阶段的油水井生产曲线、吸水剖面和时间推移试井等资料表明,天然裂缝特征在开发过程中是动态变化的。如图2所示,油井暴性水淹显示了天然裂缝开启和延伸沟通的特征。油井王21-08井生产5 a后在2个月内含水率由40%上升到84%,同时对应的注水井王20-06井注水量从30 m^3/d 上升到50 m^3/d ,而注入压力没有变化,表

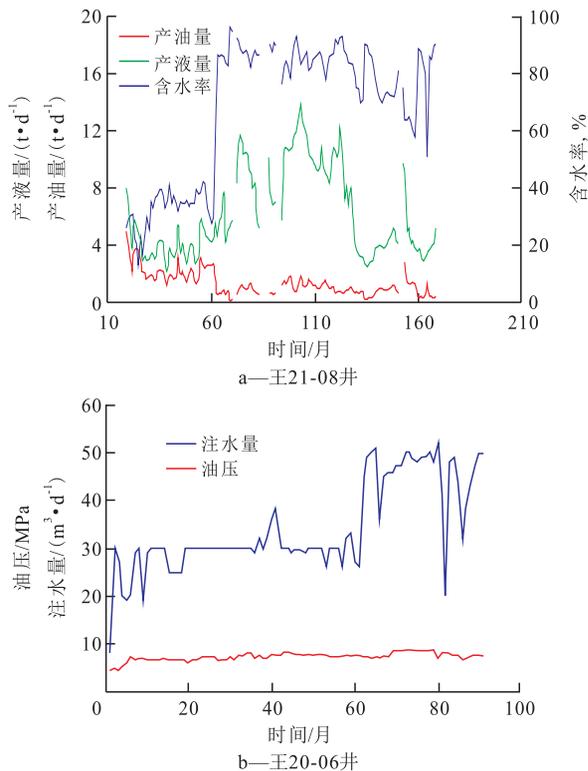


图2 安塞油田王窑区油水井生产动态曲线

Fig.2 Production performance curves of oil and water wells in Wangyao area, Ansai oilfield

明天然裂缝延伸致使油水井窜通,造成油井的暴性水淹,油井产液量增加,而产油量降低。

从图3可以看出,注水井王17-012井吸水指示曲线斜率反应吸水指数的大小,在注水压力为8 MPa的附近存在拐点,拐点前吸水指数约为4 m³/(d·MPa),拐点后吸水指数上升为15 m³/(d·MPa),表现出天然裂缝开启吸水能力增大的特征,天然裂缝开启压力为20 MPa左右。

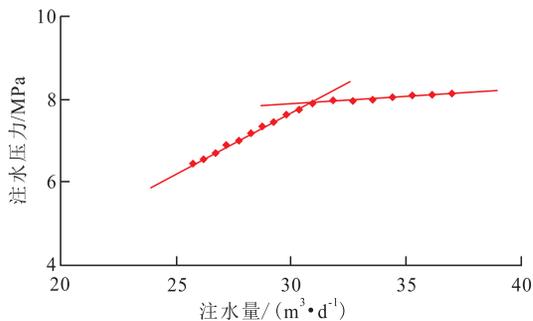


图3 王17-012井吸水指示曲线

Fig.3 Suction indicator curve of Well Wang 17-012

吸水剖面也能反映裂缝开启的特征,如王22-2井早期的吸水剖面相对均匀,后出现尖峰状。时间推移试井分析表明,天然裂缝开启后裂缝规模在不断扩大,如王22-23井2001年试井分析裂缝半长为79.8 m,折算有效渗透率为2.58×10⁻³ μm²;2007年试井分析裂缝半长为124 m,有效渗透率为11.4×10⁻³

μm²,同时地层静压由16.29 MPa上升为19.3 MPa。

由此可见,随着油田注水开发过程中注水压力增加,地层压力抬升造成地下天然微裂缝开启、扩展延伸,裂缝渗流能力增大,裂缝特征与开发初期静态特征相比发生变化^[11,13],这种伴随开发动态变化而逐渐变化的裂缝可称之为动态裂缝。

3.2 动态裂缝成因

3.2.1 裂缝开启压力

特低渗透砂岩油藏天然裂缝在地下多是闭合充填的^[8,12,14-15],属无效裂缝。当注水压力升高时,裂缝开启压力将会引起无效裂缝的开启,同时储层渗流能力增大,沿裂缝方向发生水淹和水窜。

研究区油层埋深为1 200 m,原始地层压力为9.5 MPa,现今最大水平主应力约为23 MPa,现今最小水平主应力约为20 MPa(现今水平应力差为3 MPa,切应力较小可忽略不计)。储层天然裂缝降低了抗张强度(可近似看为0)^[8,10],根据库伦破裂准则,随孔隙压力增加,有效正应力逐渐减小,应力圆向左移动,与包络线相切时闭合缝重新张开。

不同走向裂缝的开启压力与裂缝产状及其与现今最大水平主应力的夹角有关。假设天然裂缝为垂直裂缝,缝面在现今应力场中所受应力为

$$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) + \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\cos 2\beta \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) - \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\cos 2\beta \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sin 2\beta \quad (3)$$

式中:σ_x和σ_y分别为平行、垂直裂缝面所受应力,MPa;σ_{max}和σ_{min}分别为现今最大、最小水平主应力,MPa;β为裂缝走向与最大主应力的夹角,(°);τ_{xy}为裂缝尖端切应力,MPa。

天然裂缝开启主要是由垂直作用于裂缝面的张应力引起的,当孔隙压力大于其最大张应力时裂缝开启,可估算出不同走向垂直裂缝的开启压力(假设均为垂直裂缝)。研究区不同走向的天然裂缝开启压力的估算值为20~23 MPa(表1),当裂缝走向平行于现今最大水平主应力时所需开启压力最小,垂直于现今最大水平主应力时所需开启压力最大。

3.2.2 裂缝延伸方向

随着注水压力的不断增大,不同走向的天然裂缝在现今应力状态下沿现今水平最大主应力方向延伸扩展,从而导致储层的水淹、水窜。格里菲斯裂缝扩展理论^[15-19]认为,裂缝最初扩展的方向不是完全沿着裂缝走向,而是与裂缝长轴呈一定的夹

表1 安塞油田王窑区不同走向天然裂缝
开启压力的估算值

Table1 Opening pressure estimation of natural fractures with
different directions in Wangyao area, Ansai oilfield

$\beta/(\circ)$	σ_x/MPa	σ_y/MPa	τ_{xy}/MPa
0	23.00	20.00	0
10	22.91	20.09	0.51
20	22.65	20.35	0.96
30	22.25	20.75	1.30
40	21.76	21.24	1.48
45	21.50	21.50	1.50
50	21.24	21.76	1.48
60	20.75	22.25	1.30
70	20.35	22.65	0.96
80	20.09	22.91	0.51
90	20.00	23.00	0

角,夹角大小与裂缝端点切应力大小有关,扩展产生后,其延伸方向逐渐转为与最大主应力方向一致。研究区取心井天然裂缝的优势走向不明显,存在多方向天然裂缝,而注水开发中暴性水淹、水窜方向具有高度一致性,为北偏东向 $65^\circ \sim 75^\circ$,与现今最大水平主应力方向一致,与天然裂缝走向并不完全相同,这与格里菲斯裂缝扩展理论一致。

4 动态裂缝对特低渗透油藏注水开发的影响

裂缝对特低渗透油藏开发的影响有利有弊,有利方面是裂缝改善了储层的渗流能力,是油藏流体的主要渗流通道,对油气井产能有直接的影响;不利方面在于裂缝增强了油层非均质性,水淹、水窜严重,油井暴性水淹降低了注入水的波及系数,开发效果变差。与天然裂缝发育的储层相比,动态裂缝对油田开发的影响表现为:①在开发早期几乎没有裂缝显示。在钻井、取心、测井和试油试采中难以识别,裂缝参数难以确定,影响早期开发的井网部署及注水开发技术政策的制定。例如王20-06井在注水5 a后才显示出裂缝水淹特征(图2)。②裂缝增强了油层非均质性。例如王20-06井1998年吸水剖面优势吸水段在下部,2004年吸水剖面优势吸水段在上部,优势吸水段的变化与裂缝的开启、扩展延伸有关,裂缝的动态变化造成了优势吸水层段迁移现象,增强了油层非均质性。③动态裂缝的存在使油层动用状况更加复杂。王检16-151、王检16-152、王检16-153为水井王16-15周围的3口检查井,水线方向附近王检16-151井的含水率为

90%,距离水线70 m的王检16-152井含水率为67%,距离水线120 m的王检16-153井含水率为40%(图4),这与裂缝水窜特征一致,而3口井的平均含油饱和度分别为52%,50.5%和49%,表明在水线方向上注入水沿裂缝快速突破引起水淹,而油层水洗程度相对较低、动用程度较差。④特低渗透油藏大多为天然微裂缝储层,天然微裂缝的参数表征存在很大的不确定性,动态裂缝沿现今最大水平主应力方向的扩展、延伸模式一定程度上简化了由于天然微裂缝参数表征的不确定性带来的开发风险。

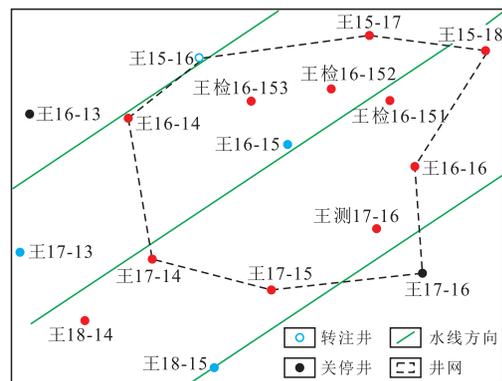


图4 安塞油田王窑区检查井组水淹方向及开采现状
Fig.4 Water flooding direction and well production status
of the observation well group in Wangyao
area, Ansai oilfield

5 结论

特低渗透储层天然裂缝参数表征存在很大的不确定性,露头裂缝优势方向与取心井磁定向、裂缝方向以及水淹方向并不完全一致,是裂缝研究的难点所在。特低渗透砂岩油藏大多属于微裂缝储层,天然裂缝在地下多为闭合无效缝,在开发早期不易识别,无效缝随注水压力的增加和地层压力的抬升逐渐开启、扩展延伸,裂缝特征逐渐显现形成动态裂缝。安塞油田王窑区长6油组不同走向的裂缝开启压力为20~23 MPa,动态裂缝的最终扩展延伸方向为北东 $65^\circ \sim 75^\circ$,与现今最大水平主应力方向一致。动态裂缝一方面增强了油层非均质性,使水驱动用状况更加复杂,另一方面简化了微裂缝参数表征的不确定性,因此正确认识油层的裂缝类型、合理部署井网、制定合理开发技术政策,开发中控制利用好动态裂缝是特低渗透砂岩油藏水驱开发的关键。

参考文献:

- [1] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997.

- Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oil-field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [2] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- Mu Longxin, Zhao Guoliang, Tian Zhongyuan, et al. Study on prediction of reservoir fractures[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [3] 聂永生, 田景春, 魏生祥, 等. 裂缝三维地质建模的难点与对策[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 39-41.
- Nie Yongsheng, Tian Jingchun, Wei Shengxiang, et al. Difficulties and treatments in three-dimensional geological modeling of fractural reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 39-41.
- [4] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Yuan Shiyi, Song Xinmin, Ran Qiquan. Development technology for fractured reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [5] 曾大乾, 张世民, 卢立泽. 低渗透致密砂岩气藏裂缝类型及特征[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 36-39.
- Zeng Daqian, Zhang Shimin, Lu Lize. Types and characteristics of fractures in tight sandstone gas reservoirs with low permeability [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 36-39.
- [6] 王振宇, 陶夏妍, 范鹏, 等. 库车坳陷大北气田砂岩气层裂缝分布规律及其对产能的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 51-56.
- Wang Zhenyu, Tao Xiayan, Fan Peng, et al. Distribution rule of fractures and their effect on deliverability in sandstone reservoirs, Dabei gas field, Kuqa foreland basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 51-56.
- [7] 张莉. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 21-24.
- Zhang Li. Characteristics of reservoirs fracture and the analysis of stress field in Shaanxi-Gansu-Ningxia basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(2): 21-24.
- [8] 赵军龙, 朱广社. 低渗透砂岩天然裂缝综合判识技术研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- Zhao Junlong, Zhu Guangshe. Study on comprehensive identification technology for natural fractures of low permeability sandstone reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [9] 李凤杰, 王多云, 徐旭辉. 鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组储层特征及影响因素分析[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 365-370.
- Li Fengjie, Wang Duoyun, Xu Xuhui. The influential factors and characteristics of Triassic Yanchang formation reservoir in Longdong area, Ordos basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(4): 365-370.
- [10] 范存辉, 郭彤楼, 王本强, 等. 四川盆地元坝中部地区须家河组储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 52-54.
- Fan Cunhui, Guo Tonglou, Wang Benqiang, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Xujiahe formation, central Yuanba of Sichuan basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 52-54.
- [11] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-178.
- Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Chengen. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-178.
- [12] 王瑞飞. 特低渗透砂岩油藏储层微观特征——以鄂尔多斯盆地延长组为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Wang Ruifei. The microscopic characteristics of extra-low permeability sandstone reservoirs: a case study on Yanchang formation of Ordos basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [13] 张泓. 鄂尔多斯盆地中新代构造应力场[J]. 华北地质矿产杂志, 1996, 11(1): 87-92.
- Zhang Hong. Mesozoic and Cenozoic palaeotectono-stress field of Ordos basin [J]. Journal of Huabei Geology and Minerals, 1996, 11(1): 87-92.
- [14] 周新桂, 孙宝珊, 谭成轩, 等. 现今地应力与断层封闭效应[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 127-131.
- Zhou Xingui, Sun Baoshan, Tan Chengxuan, et al. State of current geo-stress and effect of fault sealing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 127-131.
- [15] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 195-200.
- Zhou Xingui, Zhang Linyan, Qu Xuefeng, et al. Characteristics and quantitative prediction of distribution laws of tectonic fractures of low-permeability reservoirs in Yanhewan area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 195-200.
- [16] 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 91-93.
- Zeng Lianbo, Tian Chonglu. Tectonic stress field and the development of low permeability oil fields [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 91-93.
- [17] 张流, 周永胜. 储层裂缝发育程度的判别准则[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 33-37.
- Zhang Liu, Zhou Yongsheng. Evaluation criteria for development degree of micro cracks in oil and gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 33-37.
- [18] 刘建军, 刘先贵. 油气储层裂缝扩展的动力学模型[J]. 工程力学, 2001, (增刊): 118-122.
- Liu Jianjun, Liu Xiangui. The dynamics model of reservoir fracture extension [J]. Engineering Mechanics, 2001, (Supplement): 118-122.
- [19] 关宝文, 郭建明, 杨燕, 等. 油气储层裂缝预测方法及发展趋势[J]. 特种油气藏, 2014, 21(1): 12-17.
- Guan Baowen, Guo Jianming, Yang Yan, et al. Methods of fracture prediction in oil & gas reservoirs and their development trend [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 12-17.