

水平井分段压裂产能电模拟实验方法

刘长印,李凤霞,孙志宇,黄志文

(中国石化石油勘探开发研究院 中国石油化工集团公司海相油气藏开发重点实验室,北京 100083)

摘要:为了对水平井分段压裂产能影响因素进行模拟,研究了一种水平井分段压裂产能电模拟实验方法。首先,根据水平井分段压裂后的实际地层情况,模仿研制了一套三维电场模拟装置;然后,根据要模拟的砂体展布特征、油气藏的流动边界类型、水平井在砂体中的井眼轨迹、地层渗透率及地层厚度等,设置电模拟的电解液和电解池尺寸等,根据水平井长度、裂缝高度、裂缝长度、压裂段数、裂缝条数和缝间距等,设置模拟井筒及裂缝;最后,通过采集电流信号,以确定产能的大小。利用该实验方法分别开展了针对某河流相沉积砂体的水平井压裂裂缝形态及位置优化模拟、裂缝条数及间距优化模拟和不同地层厚度对比模拟实验,优化出的结论及参数为现场实施提供了技术支持。这种电模拟实验方法能够精确模拟水平井压裂完井的各项参数对产能的影响,对水平井压裂完井设计具有一定指导意义。

关键词:电模拟;产能;分段压裂;水平井

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A

Electric simulation experiment procedure for predicting productivity of multi-stage fractured horizontal wells

Liu Changyin, Li Fengxia, Sun Zhiyu, Huang Zhiwen

(Key Laboratory of Marine Oil & Gas Reservoirs Development, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: An electric simulation experiment procedure for predicting productivity of multi-stage fractured horizontal wells was proposed in the paper. Firstly, we developed a 3D electric field simulator based on the actual situation of reservoirs after a multi-stage fracturing in a horizontal well. Secondly, we set up parameters for an electrolyte and an electrolytic cell based on sandbody distributions, flow boundary types of reservoirs, well bore trajectory in sandbodies, permeability and thickness of reservoirs and etc. We then input parameters of simulated wellbores and fractures in accordance to the length of a lateral, height and length of fractures, numbers of stages, numbers of fractures, spacing between fractures and so on. Finally, we gathered electronic signals to predict the productivity. The procedure was applied to a fluvial sandbody to optimize geometry and placement as well as numbers and spacing of fractures in laterals based on comparative simulation experiments in reservoirs of different thickness. The results provided technological support to field operation. The procedure with its accurate simulation of the influence of fracturing parameters upon productivity of wells may be used as guidance for the design of horizontal well fracturing and completion.

Key words: electric simulation, productivity, staged fracturing, horizontal well

进入21世纪以来,水平井分段压裂技术的成功应用,使美国页岩油气产量大幅上升。目前,“水平井+分段压裂”已经成为国内外非常规油气开发的关键技术。当前的水平井产能预测主要是理论解析计算方法和数值模拟方法,计算水平井产能或者水平井压裂产

能的理论公式所需参数多且计算量大^[1-4]。而在应用水-电相似原理开展电场模拟实验方面,众多学者目前已开展了多项技术研究和试验^[5-8],如电场模拟方法研究注采井网、电场模拟方法研究垂直井的压后产能及电场模拟方法研究水平井压裂产能等,也有一些

收稿日期:2016-02-26;修订日期:2017-02-15。

第一作者简介:刘长印(1965—),男,高级工程师,试油测试、压裂。E-mail:liucy.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-005)。

相关的电场模拟实验装置。但这些研究有一定的局限性,主要表现为:①只开展二维的平面模拟,没有开展三维空间中的水平井完井方式对生产的影响模拟;②数据采集方法简单,无法实现自动采集,实验数据测试的工作量大;③无法深入探索水平井井筒三维压力场分布,对现场应用指导作用有限。通过电模拟实验可以快速地模拟水平井产能,以及模拟水平井井筒周围的压力场分布情况,同时可用电流密度比表示水平井压裂产能的大小,为预测水平井压裂产能研究提供了一种新方法和对比依据。

本文研究了一种水平井分段压裂产能电模拟实验方法。这种方法能够精确模拟水平井压裂完井的各项参数对产能的影响,从而提高水平井完井设计与施工的效率。

1 工作原理及装置特点

1.1 工作原理

电场与渗流场具有很好的相似性,它们都符合拉普拉斯方程[公式(1)和式(2)]。水平井分段压裂产能电模拟实验方法能够实现对实际水平井压裂完井参数的有效模拟。

电流场拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 z^2} = 0 \quad (1)$$

渗流场拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 z^2} = 0 \quad (2)$$

式中: U 为电压,V; p 为地层压力,MPa。

通过电流大小能够反映出地层压裂后产能大小,从而能够研究实际作业环境下的各个参数对压裂后产能的影响,确定各个参数的最优值。

在实际操作时,可通过改变电解质溶液的高度和浓度,模拟地层厚度和渗透率对产能的影响,通过改变铜网片与金属管之间的夹角、铜网片的高度和长度、铜网片之间的距离及铜网片的数量等,模拟不同裂缝布置方式和不同裂缝参数对产能的影响,从而优选合理参数值;另外,还可以通过改变电压值,模拟不同地层压力对产能的影响。

与现有技术相比,该方法的优点在于,可改变电解池两侧的导电金属网之间的电压值、电解液高度值、压裂缝间距值、压裂缝长度值和压裂缝宽度值中的任一项参数,通过采集电流信号,获取该项参数的最优值,从而为水平井完井设计与施工过程中的这些参数的设

计提供参考。

1.2 装置构成及特点

水平井开采三维电场模拟实验装置主要包括实验液罐系统、定位系统、电信号测量系统和数据记录及处理系统。各个系统所含装置包括:①长方形电解池(长1.5 m,宽0.75 m,高0.5 m);②电信号测量装置,电压测量精度为0.005 V,电流测量精度为0.005 A;③丝杠定位和位移传感器系统,定位测量精度为1 mm;④直流稳压电源;⑤循环泵;⑥废液处理罐;⑦数据采集处理系统;⑧152.4 mm 铝塑管及管阀件等组成井筒模拟装置;⑨由20目的铜网片组成的裂缝模拟装置。

本装置申请了《一种水平井开采三维点模拟实验装置》实用新型专利,专利号为ZL 2011 2 0266884.7。

其中,数据采集系统由测点位置控制、仪器控制柜、数显表(电流、电压、位移)、连接导线、计算机接口卡、串行接口以及计算机等部分组成。

图1为长方形电解池的俯视图。根据实验需要,该装置具有如下特点:①电解池侧面采用有机玻璃制作,透明;②具有良好的塑性,盛满液体后不发生形变;③具有一定强度,偶尔被硬物撞击而不易碎;④电解池上方无封口,但对侧面各边角作安全处理;⑤电解池内在纵向上对角安装测量液面的标尺,精度为1 mm;⑥电解池内装有安装井筒模拟的滑轨和固定装置,可在任意位置锁定,滑轨外部对应位置有刻度尺,可知道锁定的位置;⑦电解池内长方形纵向两个面装有导电网;⑧导电网采用目数很小的导电铜网,确保透明度30%;⑨电解池外部接循环泵,以方便液体循环流动;⑩电解池与下柜采用可卸式固定,方便设备搬运。

图2为电场模拟定位和数据采集装置结构图。该设计包括以下几个特点:①定位装置主要是对测点探针的定位,能够使得探针在电解池中立体空间移动并记录位置和电压;②能够分别实现自动操作和手动操作,手动和自动有转换机构;③极限位置设计有行程控制开关,起限位和保护作用;④定位装置整体不与电解池接触,但其位置固定装置精确配合电解池的位置;⑤具有一根测试探针,但可以升级为5根测试探针。

其中,电解池为上方敞口的长方形缸体,在电解池上开有进口和出口,进口和出口均与循环泵连接,通过循环泵的作用使电解池内的液体循环流动;在电解池长度方向的两个侧面的内表面上装有导电网。电信号测试系统包括探针和探针定位机构;在探针定位机构

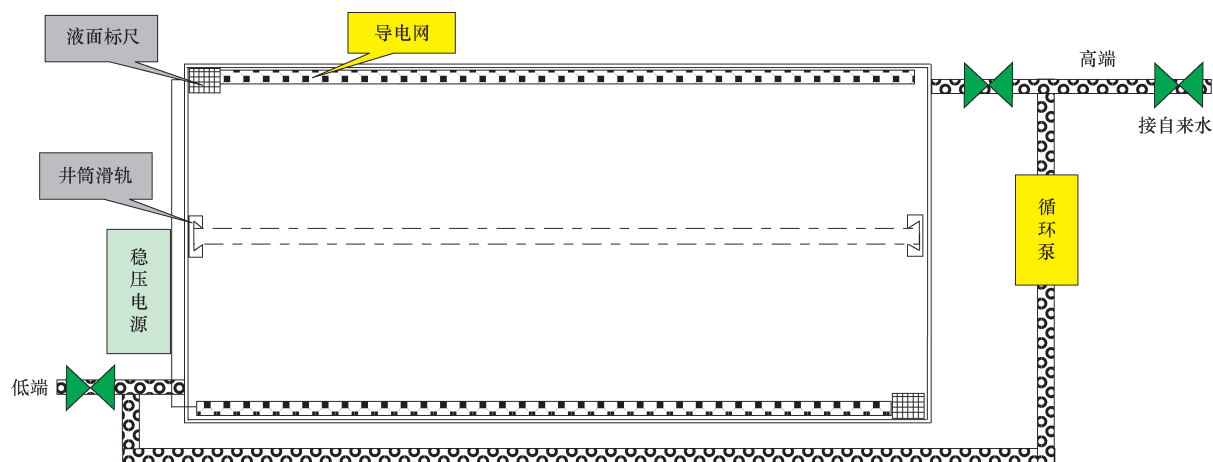


图1 电场模拟电解池装置结构

Fig. 1 Diagram showing structure of electrolytic cell device for electric field simulation

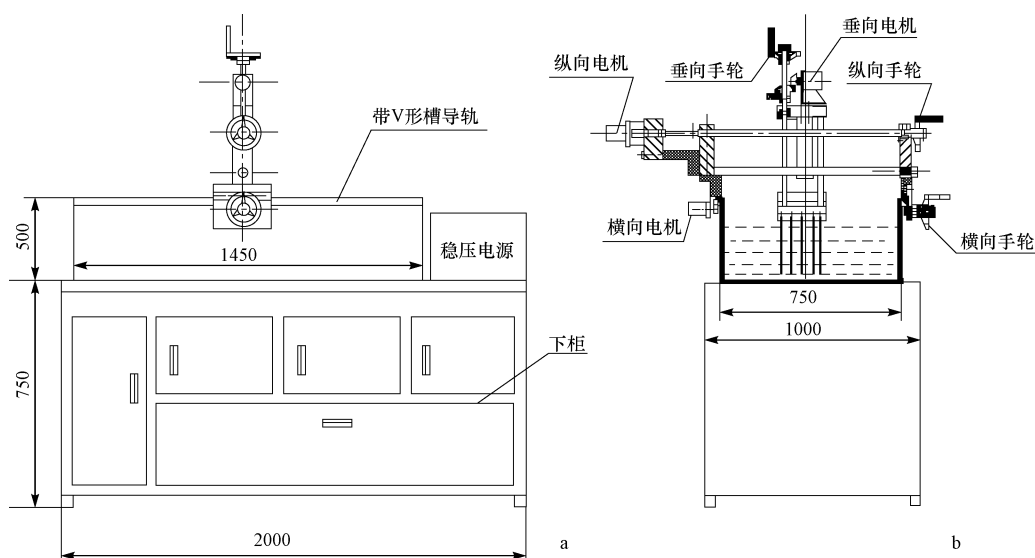


图2 电场模拟定位和数据采集装置结构

Fig. 2 Diagrams showing the structure of device for positioning and data acquisition of electric field simulation

a. 装置正面图; b. 装置侧面图

上固定有至少一根探针,探针定位机构包括三维导轨和位移传感器,三维导轨包括 X 向导轨、 Y 向导轨和 Z 向导轨,探针通过三维导轨在三维空间内移动。在电解池的两宽度方向侧面的内表面上均固定有铅垂的滑轨,两个滑轨相对设置,并分别位于两个宽度方向侧面的中间位置。模拟井筒的两端分别安装在两根滑轨的滑槽内,模拟井筒水平安装或与水平线成角度安装,模拟井筒可以沿滑轨上下移动,并可在任意位置进行锁定。

本装置和现有同类装置相比可开展的实验研究项目更多,体现在以下7个方面:

1) 通过改换不同的井筒物理模型,能够模拟包括裸眼完井、筛管完井、射孔完井和水力压裂等不同的水

平井完井方式情况下井筒周围的静态压力场和渗流场;

2) 通过改变分段压裂井筒模型,可以模拟不同裂缝条数、裂缝尺寸、裂缝形态和裂缝夹角情况下井筒周围的静态压力场和渗流场,进而模拟压裂后的产能;

3) 通过改变电解质溶液的电阻率,模拟不同地层渗透率对上述各种水平井完井方式下的产能影响;

4) 通过改变电解质溶液的液面高度,能够模拟不同储层厚度下的上述各种情况;

5) 通过改变外部电场电压,能够模拟不同能量供给时的上述各种情况;

6) 通过加入导电纤维,可以模拟微裂缝发育地层时的上述各种情况;

7) 改变水平井和电网的电极,可以实现水平井注水的各种模拟。

2 实验方法及步骤

在水平井完井施工过程中,有可能影响水平井分段压裂后产能的参数包括:地层厚度、地层渗透性、地层压力、压裂缝长度、压裂缝高度、压裂缝间距、压裂缝条数、水平井数、井筒长度、裂缝与井筒的夹角以及上述参数之间的相互组合^[9-13]。

下面将详细地描述电模拟实验方法的各个步骤。

1) 步骤1:根据要模拟的砂体展布特征及油气藏的流动边界类型,布置电解池对应两侧的导电金属网。以设计方形的电解池为例,如果油气藏仅在一个方向为流动性边界,则仅在电解池一组对应侧设置导电金属网来模拟。根据地层渗透性配制相应浓度的电解质溶液,例如可以采用盐水或者硫酸铜溶液。根据地层厚度值确定电解质溶液在电解池中的高度,根据水平井在砂体中的位置设置金属管在电解质溶液中的对应位置。

2) 步骤2:根据水平井筒长度、裂缝的高度、裂缝的长度、压裂段数、裂缝条数和缝间距,确定金属管和铜网片的尺寸以及相对位置,如图3所示。

3) 步骤3:接通电源,以在导电金属网之间形成电压值。

4) 步骤4:采集电流信号,以模拟产能的大小。

由此,能够精确模拟水平井压裂完井的各项参数对产能的影响,并且能够根据实际作业情况得到各项参数的合理值。

具体研究过程中,可以改变步骤1中电解质溶液的高度,以研究地层厚度值对产能的影响,由此能够模拟不同的地层厚度值;也可以改变电解质溶液的浓度值,以研究地层渗透性对产能的影响,由此能够模拟不同地层渗透率对水平井产能的影响。

按图3所示,可以改变铜网片与金属管之间的夹角,以确定裂缝与水平井筒之间夹角对产能的影响,由此能够确定裂缝与井筒之间夹角的最优值;可以改变步骤2中铜网片的高度和长度,以确定裂缝高度和裂缝长度对产能的影响,由此能够优选裂缝高度和裂缝长度的合理值;还可以改变铜网片间的距离,以确定缝间距对产能的影响,从而优选合理缝间距。

另外,也可以改变铜网片的数量,以确定裂缝条数对产能的影响,从而优选合理裂缝条数。

进一步地,还可以改变电压值,以确定地层压力对产能的影响,从而能够模拟不同地层压力。

3 实例分析

以某河流相沉积砂体为研究对象^[14-16],平行于井筒方向为定压边界,垂直于井筒方向为封闭边界,即水平井井筒的方向垂直于封闭边界。具体参数设置和模拟结果如下。

3.1 实验一:裂缝形态及位置对比模拟实验(图3)

实验条件:

- 1) 金属管管长 140 cm,模拟水平井筒 1 400 m;
- 2) 铜网片长度 20 cm 和 40 cm 各两片,模拟裂缝长度 200 m 和 400 m;

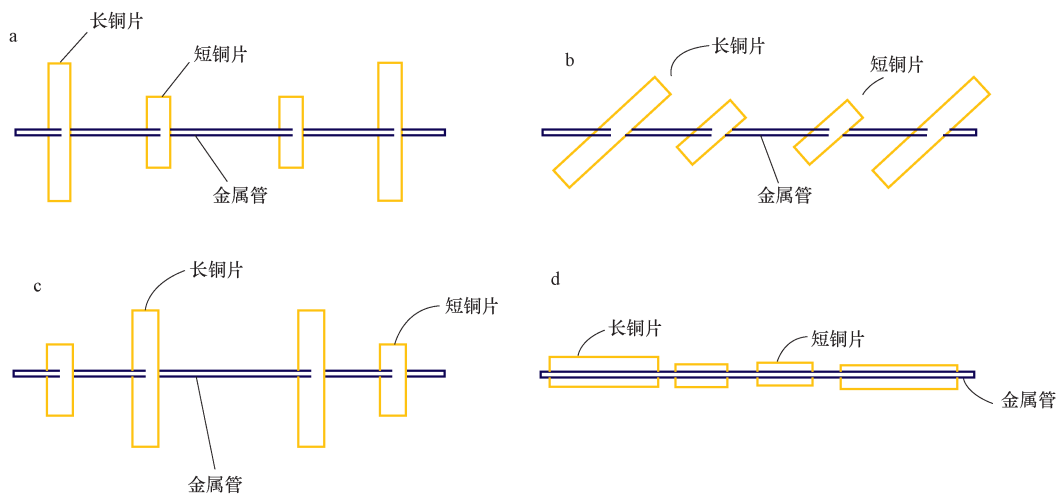


图3 水平井井筒与不同尺寸裂缝相对位置关系示意图

Fig. 3 Diagram showing relative position of horizontal well to fractures with different sizes

a. 两边长中间短与井筒垂直裂缝;b. 两边长中间短与井筒斜交裂缝;c. 两边短中间长与井筒垂直裂缝;d. 两边长中间短与井筒平行裂缝

- 3) 铜网片 4 片,模拟压裂裂缝条数 4 条;
- 4) 铜网片间距 25 cm,模拟裂缝间距 250 m;
- 5) 铜网片宽度 5 cm,模拟裂缝高度 50 m;
- 6) 铜网片与金属管夹角 90° 和 45° ,模拟裂缝与井筒夹角 90° (图 3a)和 45° (图 3b);
- 7) 电解液厚度 30 cm,模拟地层厚度 30 m;
- 8) 电压 1.38 V;
- 9) 体积浓度 0.1% 盐水。

4 条裂缝对比实验分别为:①两片长度较长的铜网片位于金属管的两端,两片长度较短的铜网片位于金属管的中间部位,铜网片均垂直于金属管,即裂缝垂直于井筒(图 3a);②两片长度较长的铜网片位于金属管的两端,两片长度较短的铜网片位于金属管的中间部位,铜网片与金属管夹角 45° ,即裂缝与井筒的夹角为 45° (图 3b);③两片长度较短的铜网片位于金属管的两端,两片长度较长的铜网片位于金属管的中间部位,铜网片均垂直于金属管(图 3c);④4 片铜网片(包括两片长度较短的铜网片和两片长度较长的铜网片)均平行于金属管,即 4 条裂缝均平行于井筒(图 3d)。

4 种情况实验结果为:4 组实验对应的电流分别为 0.032,0.014 4,0.028 和 0.02A,说明在多裂缝存在的情况下,长度较长的裂缝在井筒两端比在井筒的中间部位时输出的电流较大,也就是产量高;而裂缝与井筒夹角为 45° 时产量最小;第四组实验的结果显示平行于井筒的裂缝对产能的影响介于垂直于井筒的裂缝和与井筒呈 45° 的裂缝之间。

3.2 实验二:裂缝条数及间距优化实验

实验条件:

- 1) 金属管管长 140 cm,模拟水平井筒 1 400 m;
- 2) 铜网片 4~11 片,模拟压裂段数 4~11 段;
- 3) 铜网片长度 40 cm,模拟裂缝长度 400 m;
- 4) 铜网片间距 11.7~28 cm,模拟裂缝间距 117~280 m;
- 5) 铜网片宽度 7 cm,模拟裂缝高度 70 m;
- 6) 电解质溶液高度 30 cm,模拟地层厚度 30 m;
- 7) 电压 3.25 V,4.18 V;
- 8) 体积浓度 0.1% 盐水。

通过设定电压 3.25 V 和 4.18 V,开展两组对比实验,分别测试 4~11 条裂缝时的电流(图 4)。两个电压条件都反映出裂缝条数达到 9 条后,电流增加幅度变缓,即在上述实验条件下,9 条裂缝是比较合理的。应用到实际地层情况为,水平井井筒为

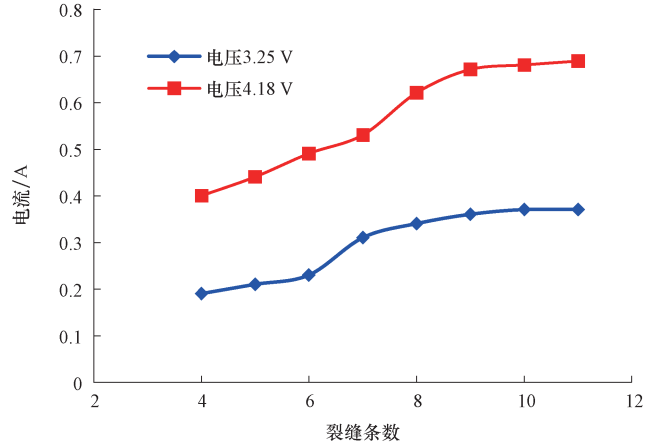


图 4 不同电压、不同裂缝条数实验模拟结果

Fig.4 Results of experimental simulation for different voltage and fracture number

表 1 不同电解质溶液高度实验模拟结果对比

Table 1 Comparison of experimental simulation results for different height of electrolyte

电解质溶液高度/cm	300	250	200
电流/A	0.63	0.56	0.48

1 400 m 的情况下,裂缝条数 9 条,裂缝间距 140 m 为最佳。

3.3 实验三:地层厚度影响实验

采用实验一的实验条件,改变电解质溶液的高度,对应地层厚度(表 1),观察实验电流变化情况。从表 1 可以看出,随着电解质溶液高度的减小,输出电流减小,说明地层厚度是影响产能效果的一个关键因素。

4 结论

1) 水平井分段压裂产能电模拟实验方法能够模拟不同的水平井完井方式情况下井筒周围的静态压力场和流量。

2) 利用电模拟装置可以模拟水平井不同裂缝条数、裂缝尺寸、裂缝形态和裂缝夹角等对产能的影响,进而优选相关参数。

3) 利用电模拟装置可模拟不同地层厚度、渗透率、微裂缝发育及非均质性对水平井完井方式下的产能影响,对水平井完井压裂设计具有一定指导意义。

参 考 文 献

- [1] 李宗田,苏建政,张汝生. 现代页岩油气水平井压裂改造技术[M]. 北京:中国石化出版社,2015:127~129.

- Li Zongtian, Su Jianzheng, Zhang Rusheng. Modern fracturing technology of horizontal well in shale[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015: 127–129.
- [2] 周德华, 焦方正, 葛家理. 裂缝网络油藏水平井开发电模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 216–220.
- Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Ge Jiali et al. Electric analogy modeling experiment of fracture network reservoir development by horizontal wells[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(2): 216–220.
- [3] 魏建光, 汪志明, 张欣. 裂缝参数对压裂水平井产能影响规律分析及重要性排序[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(5): 631–639.
- Wei Jianguang, Wang Zhiming, Zhang Xin. Influence of fissure feature parameters on the productivity of fractured horizontal wells and the ranking method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(5): 631–639.
- [4] 牟珍宝, 袁向春, 朱筱敏. 低渗透油藏压裂水平井产能计算方法[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 337–340.
- Mu Zhenbao, Yuan Xiangchun, Zhu Xiaomin. The calculating method of horizontal wells with hydraulic fractures for low permeability reservoirs[J]. Geoscience, 2009, 23(2): 337–340.
- [5] 吴晓东, 隋先富, 安永生, 等. 压裂水平井电模拟实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 740–743.
- Wu Xiaodong, Sui Xianfu, An Yongsheng, et al. Electrolytic simulation experiment of fractured horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 740–743.
- [6] 明玉坤. 分段压裂水平井注水开发电模拟实验[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 91–93.
- Ming Yukun. Water flooding electric simulation experiment in multi-staged fracturing horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 91–93.
- [7] 于姣姣, 贾宗文, 曲占庆, 等. 菱形联合井网整体压裂电模拟实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(29): 8612–8617.
- Yu Jiaojiao, Jia Zongwen, Qu Zhanqing, et al. Electrical simulation experiment of integral fracturing of diamond combined well pattern[J]. Scienc Technology and Engineering, 2013, 13(29): 8612–8617.
- [8] 朱明. 基于电模拟实验的多分支井产能研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(9): 20–38.
- Zhu Ming. Study on multi-lateral wells productivity based on electric analogy[J]. Scienc Technology and Engineering, 2012, 12(9): 20–38.
- [9] 苏建政. 水平井压裂选井选层技术探讨[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 455–457.
- Su Jianzheng. Research on selection of well and formation for horizontal well fracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(4): 455–457.
- [10] 刘长印. 不同类型油气井压裂选井选层影响因素分析[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 32–35.
- Liu Changyin. Influence factors analysis in different types of oil and gas well candidates for hydraulic fracturing[J]. Well Testing, 2009, 18(1): 32–35.
- [11] 唐汝众, 温庆志. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 80–83.
- Tang Ruzhong, Wen Qingzhi. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 80–83.
- [12] 刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地致密砂岩气田水平井开发气藏工程优化技术[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 261–266.
- Liu Zhongqun. Engineering optimization technique of horizontal well development for Daniudi tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 261–266.
- [13] 邓庆杰, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 浅水三角洲分流河道砂体沉积特征——以松辽盆地三肇凹陷扶Ⅱ-Ⅰ组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 118–127.
- Deng Qingjie, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas distributary channel sand bodies: A case from Ⅱ-Ⅰ Formation of Fuyu oil layer in the Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 118–127.
- [14] 武恒志, 叶泰然, 赵迪, 等. 川西坳陷陆相致密气藏河道砂岩储层精细刻画技术及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 230–239.
- Wu Hengzhi, Ye Tairan, Zhao Di, et al. Fine characterization technique and its application to channel sandstone in continental tight gas reservoirs of western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 230–239.
- [15] 杨辰雨, 田景春, 张翔, 等. 基于砂体构型精细刻画潮坪砂坝优质砂体——以大牛地气田 D17 井区太原组 2 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 248–254.
- Yang Chenyu, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Configuration-based fine description of high-quality sand bodies in tidal-flat bar—Taking the tight sandstone reservoir in the 2nd member of the Taiyuan Formation in D-17 well block in Daniudi gas field as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 248–254.
- [16] 郭智, 贾爱林, 何东博, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田辫状河体系带特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 197–204.
- Guo Zhi, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Characteristics of braided river sedimentary system zones in Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 197–204.

(编辑 李 军)