

# 一种水平井压裂裂缝定量描述方法

刘长印

中国石化石油勘探开发研究院采油所·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

通讯作者:Email: jxdzsley@163.com

项目支持:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”中课题“中西部地区碎屑岩领域勘探关键技术”(2016ZX05002-005)

引用:刘长印. 一种水平井压裂裂缝定量描述方法[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 1-5.

Cite: LIU Changyin. A quantitative description method for horizontal well fracture [J]. Well Testing, 2020, 29(5): 1-5.

**摘要** 针对水平井压裂后裂缝形态及复杂程度缺乏有效评价手段的问题,研究了一种水平井压裂裂缝复杂程度定量评价的方法。利用压降数据计算得到 $G$ 函数曲线图版,拟合时叠加导数曲线在裂缝闭合点前呈现“上凸”,表明具有裂缝发育的特征。根据叠加导数曲线“上凸”波动大小和次数将 $G$ 函数曲线分为四种曲线类型并进行量化,依据其反应的裂缝复杂程度,分别赋予不同的权重值;加入水平井压裂总段数、每种类型裂缝段数,计算水平井压裂裂缝复杂程度评价系数。7口井计算应用,评价系数越高,压后效果越好,通过该值与压后产量交汇分析得出两者的相关系数达0.923 9,证明了该方法具有一定的可行性,实现了裂缝复杂程度评价量化,为压裂效果评价提供了理论依据。

**关键词** 水平井; 压裂; 裂缝形态; 裂缝复杂程度; 定量评价; 评价系数;  $G$ 函数曲线

**中图分类号**: TE357      **文献标识码**: A      **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.001

## A quantitative description method for horizontal well fracture

LIU Changyin

*Oil Production Institute of Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute · Key Laboratory of Marine Oil and Gas Reservoir of Sinopec, Beijing 100083, China*

**Abstract:** A quantitative method to evaluate the fracture complexity of horizontal wells has been studied in view of the problem that there is no effective method to evaluate the fracture geometry and complexity for horizontal wells after fracturing. The graph of  $G$  function curve was calculated by using the pressure drop data. When matching, if the superposed derivative curve is “convex” before the fracture closure point, it indicates that the formation has the characteristics of fracture development. The  $G$  function curve is divided into four types and quantified according to the amplitude and frequency of “convex” fluctuation on the superposed derivative curve. Different weight values will be given to each type according to the complexity reflected. The evaluation coefficient of fracture complexity of horizontal well is calculated by adding the total number of fracture sections of horizontal well and the number of fracture sections of each type. The application of 7 wells shows that the higher the evaluation coefficient is, the better the effect after fracturing is. Through the intersection analysis of the value and the output after fracturing, the correlation coefficient of the two is 0.923 9, which proves that the method is feasible to a certain extent, realizes the quantitative evaluation of fracture complexity, and provides a theoretical basis for the evaluation of fracturing effect.

**Keywords:** horizontal well; fracturing, fracture geometry; fracture complexity; quantitative evaluation; evaluation coefficient;  $G$  function curve

非常规储层开发过程中通过采取一定的水力压裂手段使人工裂缝延伸的同时沟通天然裂缝,从而形成人工裂缝与天然裂缝相互交错的复杂裂缝网络,增大储层改造体积,提高单井产能及最终采收率。复杂裂缝网络的形成被认为是非常规油气井压裂成功的关键,而判断压裂后裂缝形态复杂性对进一步优化压裂施工参数、合理部署开发井网有一定的指导作用。

微地震监测技术已被发展应用于评估压裂后裂缝的空间几何形态<sup>[1-2]</sup>。邵晓光等<sup>[3]</sup>、赵博雄等<sup>[4]</sup>、芮拥军<sup>[5]</sup>、周从业<sup>[6]</sup>分别介绍了微地震技术基本原理、该技术国内外的应用状况及地面微地震监测可行性,微地震事件指的是由水力压裂造成的应力和孔隙压力改变导致的微小地震,这些微地震是沿着已有较脆弱面产生滑移和拉张变形造成的。压裂措施后进行效果评价,对比微地震事件到达的

时间和P波、s波的特征,可以获得以下储层裂缝信息和起到以下作用:(1)裂缝高度、长度和走向;(2)裂缝复杂程度,如形成的裂缝是网络缝还是两翼板状缝;(3)裂缝位置;校正水力裂缝模型;(4)天然裂缝特征;(5)识别和避开地质危害,如断层、水体和喀斯特地形。根据监测得到的微地震云图,不但可以确定裂缝的几何形状,还可以预测岩石变形或失效的模式(拉张或剪切)。该方法属于地震解释的范畴,地震信号受其他干扰因素影响,存在多解性,而且由于成本较高,采用该项技术的井只是少数,具有一定的局限性。

高艳玲等<sup>[7]</sup>提出利用声波测井技术检测压裂缝高度。王莎莎<sup>[8]</sup>、赵玉婷等<sup>[9]</sup>、苗洪波等<sup>[10]</sup>、谢建勇等<sup>[11]</sup>介绍了温度测井、微破裂四维影像、示踪剂监测等水力压裂常用裂缝监测技术,这些技术在裂缝高度、缝长方面可以给出参考数据,但对复杂裂缝形态描述方面都比较欠缺。

相对的,压裂后的压降分析为裂缝形态诊断提供了一种简单高效的评价方法<sup>[12]</sup>。 $G$ 函数分析是压后压降分析的主要方法,这一特殊的方法能够对压裂施工结束后的压裂过程进行评估,对裂缝的复杂性做出判断,从而改进压裂方案、优化气田压裂参数、提高压裂施工效果。关于利用压降 $G$ 核函数分析应用较多。赵文等<sup>[13]</sup>、黄杰等<sup>[14]</sup>分别介绍了 $G$ 函数曲线的具体应用。唐莉<sup>[15]</sup>、曾博等<sup>[16]</sup>、梁志剑等<sup>[17]</sup>、杨宇等<sup>[18]</sup>也将 $G$ 函数曲线分析方法应用在了评价压裂效果中,充分体现了该方法在评价压裂效果时的重要性。但目前只是定性判断裂缝的形态, $G$ 函数曲线重点还是计算压裂液液体效率、裂缝闭合时间及闭合压力等信息,在定量评价压裂裂缝复杂程度方面还无法实现。

我国非常规储层主要采用水平井缝网压裂方式进行开采,利用“滑溜水+胶液”体积压裂设计理念。采用多簇射孔、大液量、大排量、中小粒径支撑剂及多段塞等施工技术,确保复杂裂缝的形成。但压裂后是否形成了复杂裂缝,以及形成的裂缝程度,都缺乏一个定量的评价方法,这个问题是目前困扰开发设计人员的一个难题。因此,有必要开发一种水平井压裂裂缝评价方法及系统,用于确定非常规储层水平井压裂是否形成缝网以及复杂程度,为开发技术人员提供压裂效果评价依据。

## 1 $G$ 函数曲线分析方法简介

压裂后压降曲线是指压裂施工停泵后井底或

井口压力随时间变化的关系曲线。通过对压降曲线的 $G$ 函数分析,可以确定裂缝延伸情况。 $G$ 函数方程形式如下:

$$G = \int_0^\theta \xi^{\alpha_a + \alpha_{c2} - 1/2} \int_0^{\xi - \alpha_a} \frac{1}{(1 - \lambda^{1/\alpha_a})^{1/2}} d\lambda d\xi$$

式中: $\alpha_a$ 为滤失面积参数; $\alpha_c$ 为泵注期间滤失参数; $\alpha_{c2}$ 为关井期间滤失参数; $\theta$ 为无因次时间; $\lambda, \xi$ 分别为无因次水平尺寸。

利用压降 $G$ 核函数分析,可识别裂缝发育程度,可采用 $G$ 函数叠加导数曲线定性识别储层是否存在天然裂缝,然后计算滤失系数的大小,评价天然裂缝的发育程度。对照标准的 $G$ 函数图版可知:当导数为常量并且该叠加导数曲线位于一条通过原点的直线上时为标准滤失,如图1所示;如果叠加导数曲线在裂缝闭合点前呈现“上凸”,如图2所示,则表明储层具有裂缝发育的特征。

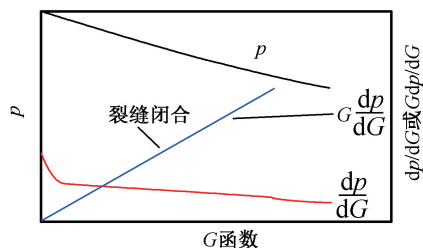


图1  $G$ 函数标准滤失曲线

Fig. 1 Standard filtration curve for  $G$  function

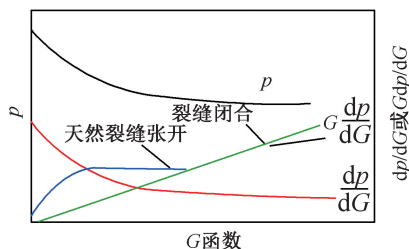


图2  $G$ 函数裂缝发育滤失曲线

Fig. 2 Fracture development filtration curve for  $G$  function

## 2 压裂裂缝定量描述方法

基于 $G$ 函数曲线的压裂裂缝定量描述方法首先根据 $G$ 函数曲线复杂程度进行分类,再分别根据其反应的裂缝复杂程度赋予不同的权重值,最后建立计算水平井压裂裂缝复杂程度评价系数计算模型,对具体井进行判断应用。具体步骤:(1)根据 $G$ 函数曲线类型进行分类;(2)对各类 $G$ 函数曲线量化赋值;(3)建立裂缝复杂程度评价系数的计算模型。

根据压后 $G$ 函数曲线上反映的裂缝复杂程度,

将  $G$  函数曲线分为四类(图 3)。

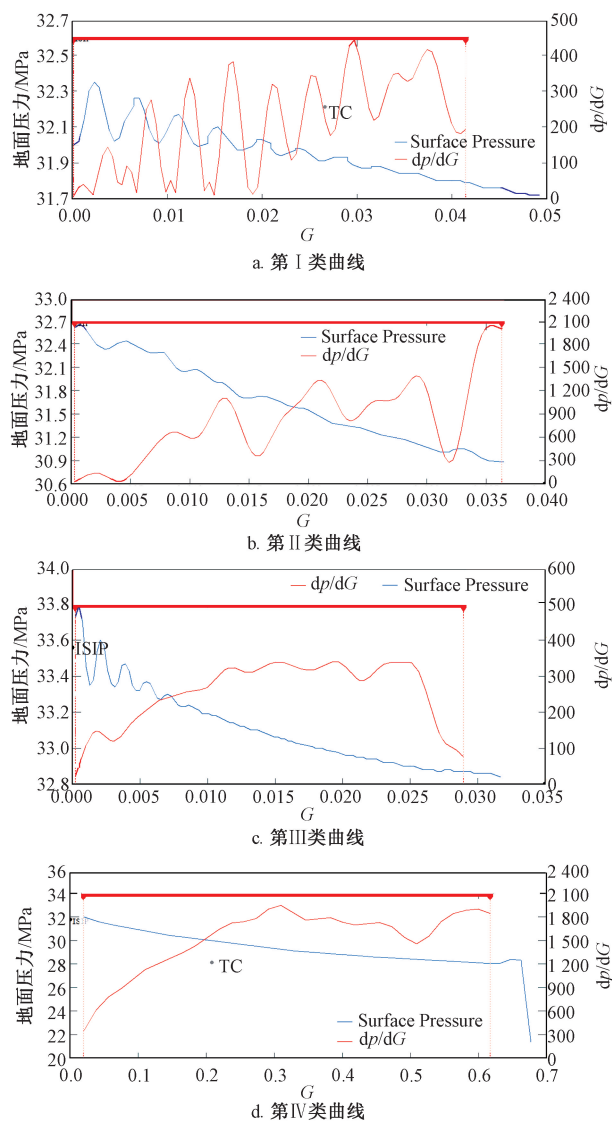


图 3 四类  $G$  函数曲线

Fig. 3 4 types of  $G$  function curves

具体分类方法如下:

第 I 类曲线,波动频率 4~6 次/0.03  $G$  时间,波动幅度 2.0~4.0 MPa,曲线整体呈上升趋势的  $G$  函数曲线(图 3a);

第 II 类曲线,波动频率 2~4 次/0.03  $G$  时间,波动幅度 1.0~2.5 MPa,曲线整体呈上升趋势的  $G$  函数曲线(图 3b);

第 III 类曲线,波动频率 1~2 次/0.03  $G$  时间,波动幅度 0.5~1.5 MPa,曲线整体呈下降趋势的  $G$  函数曲线(图 3c);

第 IV 类曲线,波动频率 0~1 次/0.03  $G$  时间,波动幅度 0~0.5 MPa,曲线整体呈先上升后平缓趋势的  $G$  函数曲线(图 3d)。

为了进一步确定水平井压裂裂缝效果,根据权重分析法<sup>[19-22]</sup>对各曲线类型进行了定量分析。依据四类函数曲线的类型及反应的裂缝复杂程度,分别赋予不同的权值:第 I 类曲线的量化系数为  $a_1 = 1$ ,第 II 类曲线的量化系数为  $a_2 = 0.6$ ,第 III 类曲线的量化系数为  $a_3 = 0.3$ ,第 IV 类曲线的量化系数为  $a_4 = 0.1$ 。

设水平井压裂的总段数为  $x$ ;根据四类曲线统计:第 I 类曲线的段数为  $x_1$ ,第 II 类曲线的段数为  $x_2$ ,第 III 类曲线的段数为  $x_3$ ,第 IV 类曲线的段数为  $x_4$ ,即

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$$

计算水平井裂缝复杂程度评价系数为

$$Y = (a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4)/x$$

通过  $Y$  值计算,实现裂缝复杂程度评价量化。水平井裂缝复杂程度评价系数越高,压后效果越好,产量越高。建立裂缝复杂程度评价系数计算模型;便于非常规储层水平井评价应用。

### 3 涪陵焦石坝地区页岩气应用情况

四川盆地涪陵焦石坝地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩沉积背景及岩性岩相特征,与北美 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩具有很好的对比性。2013 年,对 JY1 井含气页岩段进行测试,获得高产工业气流,取得南方海相页岩气勘探的重大突破。涪陵焦石坝地区五峰组-龙马溪组页岩储集空间主要为裂缝及有机质,有机质表面的有机质面孔率一般介于 10%~50%,平均面孔率为 30%。页岩储集层有效孔隙度主要分布在 1.17%~7.98%,平均为 4.61%,有效储层渗透率主要分布在 0.001 5~5.710 0 mD,平均为 0.25 mD。

利用该方法对焦石坝页岩气井应用 7 口井,裂缝复杂程度评价系数越高,分支缝体积越大,压后效果越好,产量越高,具体  $Y$  值与产量关系如图 4 所示。

其中两口典型井计算情况如下:

A 井垂深 2 556.81~2 590.32 m,水平井段长 1 477.00 m,脆性较好,具备形成复杂裂缝条件,压裂总段数  $x = 15$  段。采用 100 目粉陶+40/70 目树脂覆膜砂+30/50 目树脂覆膜砂支撑剂组合,选用减阻水+胶液液体组合,入井液量 28 650.2 m<sup>3</sup>,砂量 773.3 m<sup>3</sup>。其中,第 I 类曲线的段数为  $x_1 = 9$ ,第 II 类曲线的段数为  $x_2 = 3$ ,第 III 类曲线的段数为  $x_3 = 1$ ,



第Ⅳ类曲线的段数为  $x_4 = 2$ 。则该井水平井段裂缝复杂程度评价系数  $Y = 0.735$ , 压后试气, 12 mm 油嘴, 30 mm 孔板, 日产气  $38.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 无阻流量  $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 效果较好。

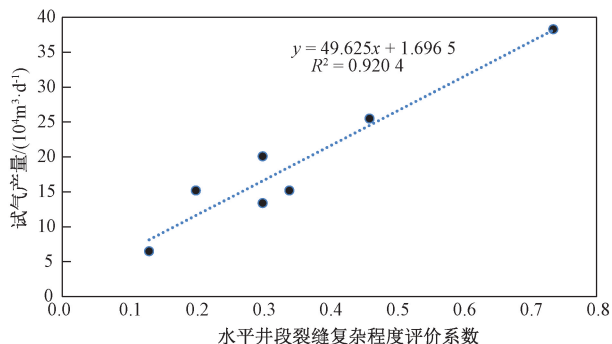


图4 裂缝复杂程度评价系数与试气产量关系图

Fig. 4 Relationship between fracture complexity evaluation coefficient and gas testing production

B井垂深 2 335.23 ~ 2 396.59 m, 水平井段长 1 480.15 m, 压裂总段数  $x = 13$  段。采用与 A 井相同设计思路和工艺, 入井液量  $22\,212 \text{ m}^3$ , 砂量  $874 \text{ m}^3$ 。其中, 第Ⅰ类曲线的段数为  $x_1 = 2$ , 第Ⅱ类曲线的段数为  $x_2 = 4$ , 第Ⅲ类曲线的段数为  $x_3 = 6$ , 第Ⅳ类曲线的段数为  $x_4 = 10$ 。则该井水平井段裂缝复杂程度评价系数  $Y = 0.30$ , 压后试气, 10 mm 油嘴, 27 mm 孔板, 日产气  $13.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 无阻流量  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 效果较差。

从两口典型井分析来看, 水平井段裂缝复杂程度评价系数越高, 压后效果越好, 产量越高。

## 4 结论

(1) 本文研究的基于  $G$  函数曲线的压裂裂缝定量描述方法, 能够定量评价水平井压裂裂缝复杂程度, 通过对 7 口井计算应用, 裂缝复杂程度评价系数与压后产量具有较好的相关性, 证明该方法具有一定的可行性, 可以对非常规水平井的压裂裂缝效果进行定量评价, 对水平井压裂设计优化具有指导意义。

(2)  $G$  函数曲线分析方法的基础是要有压后压降数据, 然而目前一是测压降的井和段数较少, 二是测压降时间较短, 使该方法应用受到一定的局限, 还需要加强对施工过程数据的实时分析方法研究, 充分利用压裂施工过程中的数据信息, 评价压裂裂缝延伸过程及改造体积, 为压裂裂缝评价提供更多技术手段。

致谢: 感谢本论文完成过程江汉油田涪陵页岩气分公司工程

技术人员提供的指导和帮助。

## 参考文献

- [1] 左立娜, 袁和平, 刘志娟, 等. 压裂裂缝地面微地震监测技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(3): 61-66.  
ZUO Lina, YUAN Heping, LIU Zhijuan, et al. Surface micro-seismic monitoring technology for fractured fractures [J]. Well Testing, 2019, 28(3): 61-66.
- [2] 任朝发. 井中微地震监测质量控制与微地震事件筛选方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 44-52.  
REN Chaofa. Quality control of downhole micro-seismic monitoring and interpretation method of micro-seismic events [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 44-52.
- [3] 邵晓光, 董宏丽, 代丽艳. 微地震监测技术综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(1): 55-61.  
SHAO Xiaoguang, DONG Hongli, DAI Liyan. Review of microseismic monitoring technology [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(1): 55-61.
- [4] 赵博雄, 王忠仁, 刘瑞, 等. 国内外微地震监测技术综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1882-1888.  
ZHAO Boxiong, WANG Zhongren, LIU Rui, et al. Review of microseismic monitoring technology research [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1882-1888.
- [5] 芮拥军. 地面微地震水力压裂监测可行性分析[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 341-345.  
RUI Yongjun. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 341-345.
- [6] 周从业. 涪陵地区页岩气层地震预测技术在水平井压裂评价中的应用[J]. 江汉石油科技, 2017, 27(2): 20-23.  
ZHOU Congye. Application of seismic prediction technology for shale gas formation in Fuling area in fracture evaluation of horizontal wells [J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2017, 27(2): 20-23.
- [7] 高艳玲, 沈继斌, 陈华勇, 等. 偶极声波测井技术在检测压裂裂缝高度中的应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(8): 58-59, 64.  
GAO Yanling, SHEN Jibin, CHEN Huayong, et al. Application of dipole acoustic logging technology in detecting crack height [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2012, 9(8): 58-59, 64.
- [8] 王莎莎. 温度测井在油气田开发中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(5): 193.  
WANG Shasha. Application of temperature logging in oil and gas field development [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 32(5): 193.
- [9] 赵玉婷, 夏富国, 董传瑞, 等. 水力压裂常用裂缝监测技术评价[J]. 石油和化工节能, 2018(5): 28-35.  
ZHAO Yuting, XIA Fuguo, DONG Chuanrui, et al. Evaluation of common fracture monitoring technology in hydraulic

- fracturing [J]. *Petroleum & Chemical Energy Conservation*, 2018(5):28-35.
- [10] 苗洪波,胡晓波,王建鹏,等. 微破裂四维影像技术在水力压裂效果监测中的应用[J]. *非常规油气*, 2014,1(1):60-64.
- MIAO Hongbo, HU Xiaobo, WANG Jianpeng, et al. Application of the microfracture dimensional imaging technology in terms of monitoring the effect of hydraulic fracturing [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2014,1(1):60-64.
- [11] 谢建勇,王旭,石彦,等. 示踪剂在致密油水平井中的应用[J]. *新疆石油天然气*, 2015,11(3):63-66.
- XIE Jianyong, WANG Xu, SHI Yan, et al. The application of tracer in tight oil horizontal wells [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2015,11(3):63-66.
- [12] 常宝华,强小龙,杨亚涛,等. 低渗透气藏压裂水平井试井曲线特征及影响因素[J]. *油气井测试*, 2018,28(2):1-6.
- CHANG Baohua, QIANG Xiaolong, YANG Yatao, et al. Well testing curves of fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs: characteristics and influencing factors [J]. *Well Testing*, 2018,28(2):1-6.
- [13] 赵文,张遂安,孙志宇,等. 基于  $G$  函数曲线分析的压后裂缝复杂性评估研究[J]. *科学技术与工程*, 2016,16(33):29-33,45.
- ZHAO Wen, ZHANG Sui'an, SUN Zhiyu, et al. Evaluative research for the fracture complexity after fracturing based on the  $G$ -function curves analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016,16(33):29-33,45.
- [14] 黄杰,巩永刚,徐延涛,等.  $G$  函数分析在压裂充填施工中的应用研究[J]. *海洋石油*, 2019,39(2):57-61.
- HUANG Jie, GONG Yonggang, XU Yantao, et al. The application of  $G$  function in Bohai Oilfield frac-pack treatment [J]. *Offshore Oil*, 2019,39(2):57-61.
- [15] 唐莉. 压裂井裂缝闭合前  $G$  函数分析方法研究[J]. *中国石油和化工*, 2016(S1):245-246.
- TANG Li. Study on  $G$  function analysis method before fracture closure in fractured wells [J]. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2016(S1):245-246.
- [16] 曾博,王莉,张晓伟. 小型压裂测试分析方法在页岩气开发中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2014,14(8):151-155.
- ZENG Bo, WANG Li, ZHANG Xiaowei. Application of min-frac analysis in the development of shale plays [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014,14(8):151-155.
- [17] 梁志剑,叶静然. 水力压裂裂缝效果影响因素研究[J]. *煤炭技术*, 2019,38(1):83-85.
- LIANG Zhijian, YE Jingran. Study on influencing factors of hydraulic fracturing effect [J]. *Coal Technology*, 2019,38(1):83-85.
- [18] 杨宇,康毅力,郭春华,等. 裂缝性地层测试压裂分析在川西须家河组的应用[J]. *石油钻探技术*, 2006,34(6):57-60.
- YANG Yu, KANG Yili, GUO Chunhua, et al. The application of mini-frac calibration for fractured reservoir in Xujiache group of West Sichuan basin [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006,34(6):57-60.
- [19] 张玲,魏绍蕾,黄学斌,等. 基于综合权重法的页岩气储量评价方法探讨[J]. *石油实验地质*, 2017,39(5):694-699.
- ZHANG Ling, WEI Shaolei, HUANG Xuebin, et al. Shale gas reserve quality evaluation based on a comprehensive weighting method [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017,39(5):694-699.
- [20] 刘长印,孙志宇. 低渗气藏水平井压裂造段决策方法[J]. *油气井测试*, 2016,25(3):73-74.
- LIU Changyin, SUN Zhiyu. Decision-making method for selection of horizontal well fracturing point in low permeability gas reservoir [J]. *Well Testing*, 2016,25(3):73-74.
- [21] 刘克奇,徐俊杰,杨喜峰. “权重法”在东濮凹陷卫城81断块沙四段储层评价中的应用[J]. *特种油气藏*, 2005,12(1):46-48,55.
- LIU Keqi, XU Junjie, YANG Xifeng. Application of “weight method” for reservoir evaluation in S4 of Weicheng81 block in Dongpu sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005,12(1):46-48,55.
- [22] 梁榜,卢文涛,曾勇,等. 涪陵焦石坝页岩气初期产能主控因素研究[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2016,29(5):1-4.
- LIANG Bang, LU Wentao, Zeng Yong, et al. Main controlling factors for early productivity of shale gas in Fuling Jiaoshiba area [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2016,29(5):1-4.

编辑 穆立婷

第一作者简介:刘长印,男,1965年出生,博士,高级工程师,2004年毕业于西南石油大学石油与天然气开发专业,主要从事试油测试、压裂工作。电话 010-82316405;Email:jxdzslcy@163.com。通信地址:北京市海淀区学院路31#,邮政编码:100083。