

致密油储层孔隙度测定方法

王磊¹,李克文²,赵楠¹,张辉¹,褚岩岩¹

(1.中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057; 2.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:致密油储层孔隙结构以微孔和纳米级孔隙为主,孔隙度一般小于10%。常规孔隙度测定方法很难准确、快速测定致密油储层孔隙度。因此,基于波义耳定律,同时引入孔隙度测定压力区分度函数,分析不同参数对孔隙度测定精度的影响,优化实验仪器参数,设计出适合致密油储层孔隙度测定的实验装置。利用该实验装置测定致密油储层岩心样品孔隙度为2.55%,而利用压汞法测定的孔隙度为2.40%,2种方法的测定结果相差不大。为了验证优化后的实验装置的准确性,利用该实验装置对已知孔隙度为25.16%的人造岩心的孔隙度进行测定,其值为25.56%,表明优化后的实验装置能够快速、准确测定致密油储层岩心样品的孔隙度。

关键词:致密油 孔隙度 敏感性分析 参数优化 实验装置

中图分类号:TE112.23

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)04-0049-05

Methods research of porosity determination for tight oil reservoir

Wang Lei¹, Li Kewen², Zhao Nan¹, Zhang Hui¹, Chu Yanyan¹

(1.Zhanjiang Branch, China National Offshore Oil Corporation (China) Ltd., Zhanjiang City, Guangdong Province, 524000, China; 2.School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China)

Abstract: Porosity is an important parameter of reservoir rock, which is mainly used to evaluate reservoir physical properties and to calculate original reserves of petroleum. Pore structure characterization of tight oil reservoir is mainly on micro-nano scale. The tight oil reservoir porosity is generally less than 10%. It is difficult to measure tight oil reservoir porosity accurately and quickly using conventional methods. Based on Boyle's law and pressure differentiation function of porosity measuring, parameters affecting the accuracy of porosity measurement were analyzed. Also, experimental instrument parameters were optimized. Experimental apparatus for porosity determination, which is suitable for the tight oil reservoir, was designed. The porosity of a core sample is 2.55% using the experimental apparatus, while the core porosity is 2.40% using mercury intrusion method. The two results agrees. In order to verify the accuracy of the experimental apparatus, the porosity of an artificial core which is 25.16% was measured using the optimized experimental apparatus. The result is 25.56%. Therefore, porosity of the tight samples can be quickly and accurately determined by the optimized experimental apparatus.

Key words: tight oil; porosity; sensitivity analysis; parameter optimization; experimental apparatus

致密油是一种典型的非常规油气资源,是指以吸附或游离状态赋存在生油岩中,或者与生油岩互层、紧邻致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的油气聚集^[1-3]。致密油储层主要包括页岩、致密砂岩、致密碳酸盐岩等,孔隙结构主要是微孔和纳米级孔隙^[4-8]。美国是致密油资源开发最多的国家,2010年致密油产量突破3 000×

10⁴ t。中国致密油资源非常丰富,其中致密砂岩、泥岩等储层中的致密油地质储量为106.7×10⁸~111.5×10⁸ t,页岩储层中的致密油地质储量为476.44×10⁸ t。目前,中国致密油的勘探开发及相关研究处于准备阶段^[9-13]。

孔隙度是评价储层物性、计算油气储量的重要参数,其测定方法主要有:高压压汞法、气体等温吸

收稿日期:2015-05-08。

作者简介:王磊(1986—),男,陕西渭南人,助理工程师,硕士,从事采油工程及提高采收率研究。联系电话:13702682177, E-mail:wanglei95@cnoc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金重点项目“提高低渗透油气田采收率的气润湿反转理论和方法”(51034004)。

附法、核磁共振法、扫描电子显微镜法及波义耳定律双室法。由于致密油储层孔隙主要为纳米—微米级孔隙,液态汞难以进入,并且高压汞破坏岩石样品,产生人工裂隙,影响致密油岩样孔隙度的测定结果。对于压汞法无法测定的孔隙区域,尤其是纳米级孔隙,可以采用气体等温吸附法,但是该方法受分析方法和理论模型的限制,重叠部分的符合度不高。核磁共振法和扫描电子显微镜法的实验设备昂贵,目前不适用于大量样品的分析^[14-16],而波义耳定律双室法比较适合快速测定致密油储层孔隙度。

波义耳定律是指当温度为常数时,一定质量理想气体体积与其绝对压力成反比^[17]。其实验装置主要包括:参考室、岩心样品室、测压装置和氦气源。将氦气充入岩心样品孔隙内部,根据波义耳定律可测定孔隙体积。该方法的优点是操作简单、快速、成本低。由于页岩、致密砂岩、致密碳酸盐岩等致密油储层孔隙度测量精度要求较高,所以需要测定仪器参数进行敏感性分析,进而优化实验装置及测试条件。

1 参数计算

1.1 仪器参数

根据实验原理,需要进行2次测试,仪器参数的关系式为

$$p_{c1}V_1 + p_{y1}V_2 = p_{cy1}(V_1 + V_2) \quad (1)$$

$$p_{c2}V_1 + p_{y2}(V_2 + V_b) = p_{cy2}(V_1 + V_2 + V_b) \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可得

$$V_1 = -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} V_b \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} V_b \quad (4)$$

其中

$$\lambda_1 = \frac{p_{y1} - p_{cy1}}{p_{c1} - p_{cy1}} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{p_{y2} - p_{cy2}}{p_{c2} - p_{cy2}} \quad (6)$$

1.2 样品孔隙度

对于圆柱体岩心样品,其体积为

$$V_y = \frac{\pi L D^2}{4} \quad (7)$$

根据实验原理可得

$$\begin{aligned} p_c V_1 + p_y (V_2 + V_b - V_y + V_k) = \\ p_{cy} (V_1 + V_2 + V_b - V_y + V_k) \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(8),得岩心样品孔隙体积为

$$V_k = \frac{V_1(p_c - p_{cy})}{p_{cy} - p_y} + V_y - V_2 - V_b \quad (9)$$

根据式(9),得到岩心样品孔隙度为

$$\phi = \frac{V_k}{V_y} \times 100 = \left[\frac{\frac{V_1(p_c - p_{cy})}{p_{cy} - p_y} - V_2 - V_b}{V_y} + 1 \right] \times 100 \quad (10)$$

2 仪器参数优化原理

由于致密油储层岩心样品孔隙度偏低,所以仪器参数与压力计量装置的精度会对测定结果产生较大影响。这些仪器参数主要包括:参考室与岩心样品室体积、参考室与岩心样品室初始压力、岩心样品体积等。因此,有必要定量分析仪器参数对测定结果的影响。

引入不同孔隙度岩心样品测定所得的平衡压力变化函数 Y ,即孔隙度测定压力区分度函数。对于不同孔隙度的岩心样品,所测得的 Y 值越大,仪器测量精度越高,孔隙度测定效果越好。如何组合仪器参数,使得 Y 值最大的具体方法如下。

根据式(10)可得致密油储层岩心样品孔隙度测定过程中的平衡后压力为

$$p_{cy} = \frac{V_1 p_c + \left[\left(\frac{\phi}{100} - 1 \right) V_y + V_2 + V_b \right] p_y}{\left(\frac{\phi}{100} - 1 \right) V_y + V_2 + V_b + V_1} \quad (11)$$

孔隙度测定压力区分度函数 Y 为

$$Y = p_{cy}(\phi_1) - p_{cy}(\phi_2) \quad (12)$$

一般情况下 $\phi_2 = \phi_1 + 0.01$,致密油储层岩心样品孔隙度一般小于10%,可以假定 ϕ_1 为4%, ϕ_2 为5%,进行仪器参数优化。

3 敏感性分析

影响函数 Y 的因素主要有:参考室体积、充满标准块后岩心样品室自由体积、标准块体积、岩心样品体积、参考室初始压力和岩心样品室初始压力。对这些影响因素进行了敏感性分析。

由参考室体积、充满标准块后岩心样品室自由体积与 Y 值的关系(图1)可以看出:随着参考室体积增加, Y 值先增大后减小(图1a);随着充满标准块后

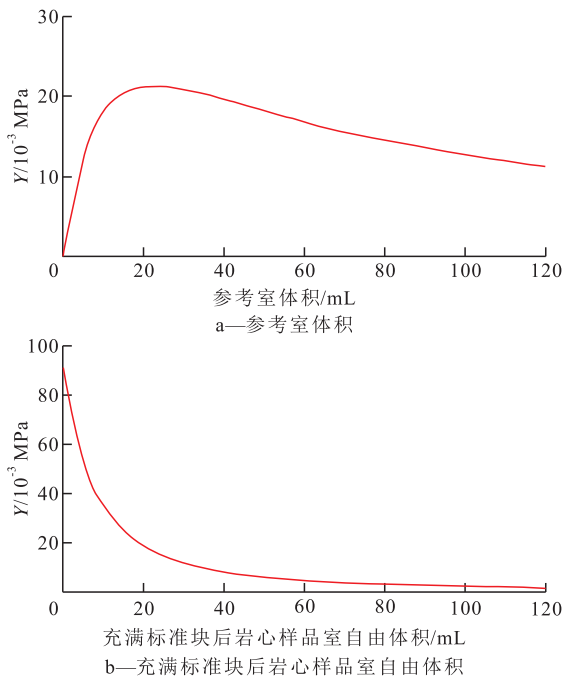


图1 参考室体积、充满标准块后岩心样品室自由体积与Y值的关系

Fig.1 Relationship between V_1 , V_2 and Y

岩心样品室自由体积的增加, Y值减小(图1b)。

当岩心样品体积为 100 mL时,标准块体积越接近于岩心样品体积, Y值越大(图2a)。当岩心样品体积与标准块体积相等时,岩心样品体积越大, Y值越大(图2b)。

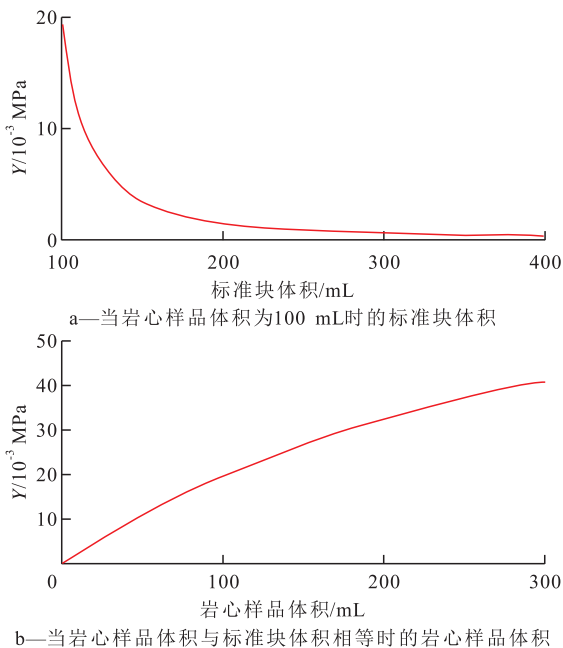


图2 标准块体积、岩心样品体积与Y值的关系

Fig.2 Relationship between V_b , V_v and Y

根据式(11)和式(12)可知, Y值与参考室初始压力呈正相关关系, 参考室初始压力越大, Y值越大; Y值与岩心样品室初始压力呈负相关关系, 岩心

样品室初始压力越大, Y值越小。

由敏感性分析结果可见, 当参考室体积合适、充满标准块后岩心样品室自由体积越小、参考室初始压力越大、岩心样品室初始压力越小、岩心样品体积与标准块体积越接近及岩心样品体积越大时, Y值越大, 实验装置的测量精度越高。将岩心样品室的初始压力定为大气压, 由于所搜集到的岩心样品体积为 90 ~ 100 mL, 所以将标准块体积定为 100 mL。因此, 可调整的参数主要有: 参考室体积、充满标准块后岩心样品室自由体积和参考室初始压力。

根据敏感性分析结果, 利用式(11)和式(12)对实验装置进行优化。优化后实验装置的参考室体积与充满标准块后岩心样品室自由体积分别为 12.84 和 18.88 mL。测压装置的精度为 0.001 MPa。

4 效果评价

致密油储层岩心样品来自松辽盆地青山口组。由不同充满标准块后岩心样品室自由体积下参考室体积对Y值的影响(图3)可见, 参考室体积在最优区域范围内。由不同参考室体积下充满标准块后岩心样品室自由体积对Y值的影响(图4)可见, 充满标准块后岩心样品室自由体积比较合理,

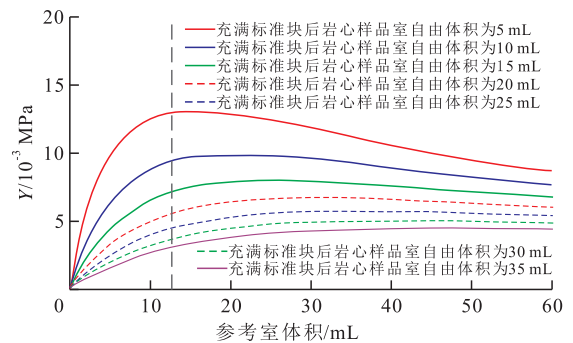


图3 不同充满标准块后岩心样品室自由体积下参考室体积与Y值的关系

Fig.3 Relationship between V_1 and Y with different V_2

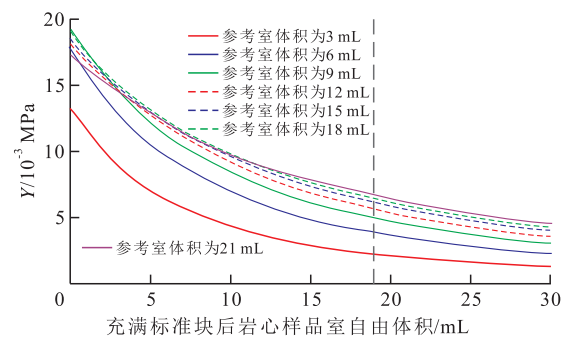


图4 不同参考室体积下充满标准块后岩心样品室自由体积与Y值的关系

Fig.4 Relationship between V_2 and Y with different V_1

对应的 Y 值在测压装置精度范围内。根据优化后的参考室体积和充满标准块后岩心样品室自由体积,结合式(11)和式(12),计算得 Y 值为0.005 8 MPa,能够达到测压装置精度范围要求。

利用优化后的实验装置,通过调节参考室的初始压力,获得对应的致密油储层岩心样品孔隙度,测定岩心样品孔隙度的平均值为2.55%。为了验证测定结果的准确性,对同一致密油储层岩心样品,通过压汞法测定其孔隙度为2.40%。两者相差不大,说明优化后的波义耳定律双室法实验装置能较准确、快速地测定致密油储层岩心样品的孔隙度。

对已知孔隙度的人造岩心进行测定,该人造岩心孔隙度为25.16%。利用优化后的装置测定人造岩心的孔隙度为25.56%,误差为1.59%,进一步说明优化后的波义耳定律双室法实验装置的精度较高。

5 结论

致密油储层孔隙结构主要是微孔和纳米级孔隙,孔隙度测量精度要求较高,影响致密油储层孔隙度测定精度的因素主要有:参考室体积、充满标准块后岩心样品室自由体积、标准块体积、岩心样品体积、参考室初始压力和岩心样品室初始压力。敏感性分析结果表明:参考室体积取值合适、充满标准块后岩心样品室自由体积越小、参考室初始压力越大,岩心样品室初始压力越小,标准块体积和岩心样品体积越接近,岩心样品体积越大,孔隙度测定装置的测量精度越高。

通过参数优化,设计出测定致密油储层孔隙度的实验装置,对于同一致密油储层岩心样品,该装置测定的结果与压汞法相差不大,并且对已知孔隙度的人造岩心进行测试,结果准确,证明优化后的波义耳定律双室法实验装置能够快速、准确地测定致密油储层样品的孔隙度。

符号解释:

p_{e1} 和 p_{e2} ——第1次、第2次测定的参考室初始压力, MPa; V_1 ——参考室体积, mL; p_{y1} 和 p_{y2} ——第1次、第2次测定的岩心样品室初始压力, MPa; V_2 ——充满标准块后岩心样品室自由体积, mL; p_{cy1} 和 p_{cy2} ——第1次、第2次测定的平衡压力, MPa; V_b ——标准块体积, mL; V_y ——岩心样品体积, mL; L ——岩心样品长度, cm; D ——岩心样品直径, cm; p_c ——参考室初始压力, MPa; p_y ——岩心样品室初始压力, MPa; V_k ——岩心样品孔隙体积, mL; p_{cy} ——平衡压力, MPa; ϕ ——岩心样品孔隙度, %; Y ——孔隙度测

定压力区分度函数, MPa; ϕ_1, ϕ_2 ——不同岩心样品的孔隙度, %。

参考文献:

- [1] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-349.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-349.
- [2] 李建青, 高玉巧, 花彩霞, 等. 北美页岩气勘探经验对建立中国南海相页岩气选区评价体系的启示[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 23-27, 32.
Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al. Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 23-27, 32.
- [3] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [4] 魏海峰, 凡哲元, 袁向春. 致密油藏开发技术研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 62-66.
Wei Haifeng, Fan Zheyuan, Yuan Xiangchun. Review on new advances in foreign tight oil development technology and their enlightenment[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 62-66.
- [5] Biglarbigi K, Dammer A, Cusimano J, et al. Potential for oil shale in the United States[C]. SPE paper 110590 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11-14 November, 2007.
- [6] Cuitis M E, Ambrose R J, Sondergeld C S, et al. Structural characterization of gas shales on the micro- and nano-scales[C]. SPE paper 137693 presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, 19-21 October, 2010.
- [7] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales[C]. SPE paper 131771 presented at SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010: 1-25.
- [8] Bustin R M, Bustin A M M, Cui X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics[C]. SPE paper 119892 presented at SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, USA, 2008: 1-28.
- [9] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30, 64.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- [10] 景东升, 丁锋, 袁际华. 美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J]. 国土资源情报, 2012, (1): 18-19, 45.
Jing Dongsheng, Ding Feng, Yuan Jihua. Present situation, experi-

- ence and enlightenment of the exploration and development of tight oil in USA[J].Land and Resources Information, 2012, (1): 18-19, 45.
- [11] 孟庆峰,侯贵廷.页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J].油气地质与采收率, 2012, 19(1): 11-14.
Meng Qingfeng, Hou Guiting. Geological controls on shale gas play and potential of shale gas resource in upper Yangtze region, China[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 11-14.
- [12] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报, 2012, 33(2): 173-186.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J].Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-186.
- [13] 葛善良,鲁新便,盛海波,等.塔中顺9井区柯下段致密砂岩储层特征及成岩演化[J].油气地质与采收率, 2014, 21(4): 42-45.
Ge Shanliang, Lu Xinbian, Sheng Haibo, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of tight sandstone reservoir of Shun9 well block in Tazhong area[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 42-45.
- [14] 曲岩涛,戴志坚,李桂梅,等.SY/T 5336—2006 岩心分析方法[S].北京:石油工业出版社, 2007.
Qu Yantao, Dai Zhijian, Li Guimei, et al. SY/T 5336-2006 Practices for core analysis[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [15] 李先鹏.一种改进的岩样有效孔隙度测定方法[J].江汉石油学院院报, 1997, 19(2): 39-41, 51.
Li Xianpeng. An improved method of measuring effective porosity of rock samples[J].Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1997, 19(2): 39-41, 51.
- [16] 沈小平.油层物理实验技术[M].北京:石油工业出版社, 1995: 30-82.
Shen Pingping. Reservoir physics experiment technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 30-82.
- [17] 田华,张水昌,柳少波,等.致密储层孔隙度测定参数优化[J].石油实验地质, 2012, 34(3): 334-339.
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Parameter optimization of tight reservoir porosity determination[J].Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 334-339.

编辑 刘北羿

(上接第48页)

- [15] 王彦仓,焦勇,汪剑,等.浅谈沁水盆地郑庄区块陷落柱形成机理及分布规律[J].中国石油勘探, 2010, 2(2): 45-49.
Wang Yancang, Jiao Yong, Wang Jian, et al. A preliminary study on genetic mechanism and distribution regularity of Zhengzhuang Block collapse column in Qinshui Basin[J].China Petroleum Exploration, 2010, 2(2): 45-49.
- [16] 尹尚先,吴文金.华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究[M].北京:煤炭工业出版社, 2008: 9-12.
Yin Shangxian, Wu Wenjin. Study on karst collapse column and its water inrush in North China coalfield [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008: 9-12.
- [17] 张同兴,闫东育,马建民,等.煤系地层陷落柱特征与煤层气分布浅析[J].断块油气田, 2003, 10(1): 22-24.
Zhang Tongxing, Yan Dongyu, Ma Jianmin, et al. An approach to the characteristics of Karst collapse in coal measure strata and the distribution of coalbed methane [J].Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(1): 22-24.
- [18] 刘人和,刘飞,周文,等.沁水盆地煤岩储层特征及有利区预测[J].油气地质与采收率, 2008, 15(4): 16-19.
Liu Renhe, Liu Fei, Zhou Wen, et al. Characteristics and favorable area prediction of coal reservoirs in Qinshui Basin [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4): 16-19.
- [19] 邱先强,任广磊,李治平,等.煤层气藏产能动态预测方法及参数敏感性分析[J].油气地质与采收率, 2012, 19(6): 73-77.
Qiu Xianqiang, Ren Guanglei, Li Zhiping, et al. Study on dynamic prediction method and parameter sensitivity analysis of coalbed methane reservoir production [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 73-77.
- [20] 薄冬梅,赵永军,姜林.煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素[J].油气地质与采收率, 2008, 15(1): 18-21.
Bo Dongmei, Zhao Yongjun, Jiang Lin. Research method and main influencing factors of coal reservoir permeability [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 18-21.

编辑 王星