

页岩储层组构特征对自发渗吸的影响

黄睿哲^{1,2,3}, 姜振学^{1,2,3*}, 高之业^{1,2,3}, 李宜润^{1,2,3}, 张 昆^{1,2,3}, 张醒初^{1,2,3}, 宁传祥^{1,2,3}
(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 科学技术研究院, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京) 非常规油气协同创新中心, 北京 102249)

摘要:自发渗吸是利用水力压裂和水平钻井技术在开发页岩油气过程中出现的重要现象。孔隙结构和矿物组成是影响页岩储层自发渗吸的重要因素。通过对页岩样品进行自发渗吸实验,探讨其孔隙连通性、页理方向和矿物组成对页岩储层自发渗吸速率的影响,并利用自发渗吸曲线斜率评价页岩储层的孔隙连通性。结果表明,与常规油气储层相比,页岩储层孔隙连通性较差,自发渗吸曲线斜率明显低于理论值。页理方向也会对自发渗吸产生影响,顺层自发渗吸曲线斜率通常较高,但是也有样品表现为穿层自发渗吸曲线斜率与顺层自发渗吸曲线斜率相当,这可能是由于页岩储层中亲水性矿物含量较高,使水在页岩储层中对运移的方向依赖性减弱。自发渗吸与页岩矿物组成密切相关:当页岩中粘土矿物含量较高时,吸水膨胀使页岩储层中原有孔隙结构发生改变,导致重复实验时页岩储层自发渗吸的曲线斜率逐渐减小;当页岩中石英等脆性矿物含量较高时,自发渗吸曲线变化不大,说明实验的重复性较好。页岩储层的自发渗吸曲线斜率越大,其渗透性越好,越有利于页岩油气的开发。

关键词:自发渗吸 页岩 孔隙连通性 页理 矿物组成

中图分类号:TE311

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)01-0111-05

Effect of composition and structural characteristics on spontaneous imbibition of shale reservoir

Huang Ruizhe^{1,2,3}, Jiang Zhenxue^{1,2,3*}, Gao Zhiye^{1,2,3}, Li Yirun^{1,2,3}, Zhang Kun^{1,2,3},
Zhang Xingchu^{1,2,3}, Ning Chuanxiang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China;
2. Institute of Science and Technology, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 3. Unconventional Oil and Gas Collaborative Innovation Center, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: The spontaneous imbibition occurs during development of shale oil and gas by using technologies of horizontal drilling and hydraulic fracturing. Shale reservoir pore structure and mineral composition are the important factors that have an impact on shale spontaneous imbibition. The impact of pore structure, mineral composition and direction of lamination on shale spontaneous imbibition rate was studied through spontaneous imbibition experiments of shale samples, and the pore connectivity of shale reservoir was evaluated by using the slope of spontaneous imbibition curve. The results show that shale reservoir pore connectivity is poor and the slope of spontaneous imbibition curve is significantly lower than the theoretical value compared with conventional oil and gas reservoirs. Lamination direction will also have an impact on the spontaneous imbibition, and the slope of spontaneous imbibition curve tested along the lamination is usually higher than that tested against the lamination. But the experiment results of some samples also show that the slope of spontaneous imbibition curve tested along the lamination is comparable with that tested against the lamination, which is probably due to the fact that higher content of hydrophilic mineral in shale reservoirs can weaken the impact of lamination on the direction of water migration.

收稿日期:2016-09-23。

作者简介:黄睿哲(1992—),男,山东东营人,在读硕士研究生,从事非常规储层方面的研究。联系电话:18800195773, E-mail:hrzcup@163.com。

*通讯作者:姜振学(1963—),男,吉林梨树人,教授,博士。联系电话:(010)89733328, E-mail:jiangzx@cup.edu.cn。

基金项目:国家“973”计划“中国东部古近系陆相页岩油资源潜力与分布规律”(2014CB239105),国家自然科学基金项目“页岩储层基质孔隙连通性及其定量评价方法”(41502125),国土资源部项目“南方富有机质页岩储集能力及其控制因素调查”(ZX20150274)。

Spontaneous imbibition behavior is closely related to the composition of the shale minerals. When the content of clay minerals is high, the original pore structure of shale changes under the effect of water swelling, which would result in the decrease of the slope of spontaneous imbibition curve if the experiment was repeated. When the content of brittle minerals, like quartz, in shale is high, the spontaneous imbibition curve would show little change in the repeated experiment, which indicates a good repeatability. The greater the slope of spontaneous imbibition curve is, the better the permeability is, and thus it is more conducive to the development of shale oil and gas.

Key words: spontaneous imbibition; shale; pore connectivity; lamination; mineral composition

中国页岩气资源丰富^[1-3],但在常规油气勘探中,页岩常被当作烃源岩和盖层。而作为低孔特低渗透的非常规油气储层,其岩性致密^[4],但孔隙类型多样,发育大量有利于页岩气保存的粒间孔、粒内溶孔及有机质孔等孔隙^[5-7]。页岩储层非均质性较强,孔隙度一般小于10%,渗透率为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[8]。自发渗吸是岩石孔隙中的一种润湿性流体在毛管压力作用下自发地取代另一种非润湿性流体的过程,也是天然裂缝油藏水驱采油的重要机理^[9]。中外学者对常规油气储层的自发渗吸规律进行了大量研究^[10]。孔隙结构、流体性质和彼此之间的相互作用是影响页岩储层自发渗吸的主要因素;此外,实验所用样品的尺寸、形状、边界条件也是影响自发渗吸的重要因素^[11]。

页岩储层中粘土矿物对孔隙连通性的影响较大,粘土矿物吸水膨胀,破坏原有的孔隙结构;粘土矿物中蒙脱石的吸水膨胀能力最强,晶层间吸附大量水分子,造成晶层间距增大,封闭、阻塞孔隙和喉道,导致其孔隙度和渗透率降低;伊利石可形成多种晶体结构,其中束状和纤维状结构吸水膨胀,对孔隙的破坏程度最大;绿泥石虽不具有膨胀性,但容易被酸化,也导致页岩储层被破坏;高岭石不具有膨胀性,常以碎屑形式存在于砂岩中;混层粘土矿物一般为伊/蒙混层和绿/蒙混层,常因膨胀层的诱发,导致粘土矿物解体、运移,阻塞孔隙和喉道,使储层物性变差^[12]。

自发渗吸实验常用来研究常规油气储层的润湿性等性质^[13-14],针对页岩储层组构特征开展自发渗吸的研究仍较少,页岩储层组构指的是页岩矿物组成和孔隙结构。为此,对页岩样品进行自发渗吸实验,根据实验结果分析页岩的页理方向及样品的重复实验对自发渗吸的影响并评价页岩储层的孔隙连通性,以期页岩油气勘探开发提供依据。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验用水为去离子水,密度为 1 g/cm^3 。实验用

岩心样品取自渝东南地区A井志留系龙马溪组和奥陶系五峰组(表1,表2)。实验所用样品形状为边长约为1 cm的立方体,每个深度选取顶、底面分别平行和垂直于页理方向的样品,其中,前者样品编号为T,后者样品编号为P。样品的顶、底面不作处理,其余四面用环氧树脂涂盖并密封以隔绝液体。

表1 实验样品物性参数

Table1 Physical property parameters of experimental samples

编号	长度/ cm	宽度/ cm	高度/ cm	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1T	1.13	1.04	1.06	0.90	0.085 2
1P	1.06	1.08	1.01	0.90	0.085 2
2T	1.12	1.03	1.05	1.61	0.001 9
2P	1.15	1.23	1.17	1.61	0.001 9
3T	0.96	1.17	1.18	4.65	0.000 3
3P	1.11	1.24	1.23	4.65	0.000 3

表2 实验样品矿物成分及含量

Table2 Mineral composition of experimental samples %

编号	石英	长石	方解石	白云石	黄铁矿	伊利石	绿泥石	伊/蒙混层	高岭石
1T	34.3	7.4	5.8	0	5.5	36.7	5.2	2.8	2.3
2T	32.8	14.3	9.2	0	1.9	33.4	7.1	1.3	0
3T	69.7	3.2	1.8	13.7	2.0	4.0	1.5	4.1	0

岩心样品的孔隙度由AutoPore IV9500全自动压汞仪测定,脉冲渗透率由PDP-200超低渗透率测量仪测定,矿物成分由Panalytical X'Pert PROX-ray衍射仪测定。自发渗吸仪器由电子天平、计算机和可调节支架组成。

1.2 实验方法

Handy将自发渗吸模型^[15-16]简化为

$$H=at^{0.5} \quad (1)$$

式中: H 为吸水高度,m; a 为常数,与岩心孔隙度、渗透率、毛管压力、气水界面以下的含水饱和度、水粘度等因素有关^[17]; t 为自发渗吸时间,s。

对式(1)两边取对数,得

$$\lg H=0.5 \lg t + \lg a \quad (2)$$

由式(2)可知,以吸水高度对数值($\lg H$)为 y 轴,时间对数值($\lg t$)为 x 轴作图,理论上得到的自发渗吸直线斜率为0.5。Hu等指出:孔隙连通性好的岩石中自发渗吸曲线会出现斜率为0.5的情况,此时,页岩储层孔隙连通的概率(p)大于0.28;孔隙连通性

差的岩石自发渗吸曲线斜率小于0.5;当 $p=p_c$ ($p_c=0.2488$, p_c 为渗流阈值)时,自发渗吸曲线斜率为0.26;当 $p \approx 0.255$ 时,在有限的渗吸时间内自发渗吸曲线斜率从0.26增大为0.5^[18]。同时,渗流理论也指出有孔介质较低的自发渗吸曲线斜率与较低的孔隙连通性密切相关^[19],因此可以根据自发渗吸曲线斜率定量评价页岩储层的孔隙连通性。

实验在常温常压条件下进行,具体实验步骤包括:①将样品放入60℃的恒温烘箱内烘干处理,用样品夹将烘干后的样品固定,并与电子天平的底部相连,调节支架使样品底部浸入自发渗吸溶液中。

电子天平与计算机通过数据线连接,计算机能自动记录电子天平的读数。②每次自发渗吸实验后,样品需重新烘干,以备重复渗吸实验时使用,每个样品需要进行3次自发渗吸实验。

2 实验结果与分析

2.1 孔隙连通性对自发渗吸的影响

分别对1T和2T样品进行首次自发渗吸实验,根据所得数据编绘2块样品的自发渗吸曲线(图1a, 1b)。分析发现:1T样品实验的前5 h内自发渗吸曲

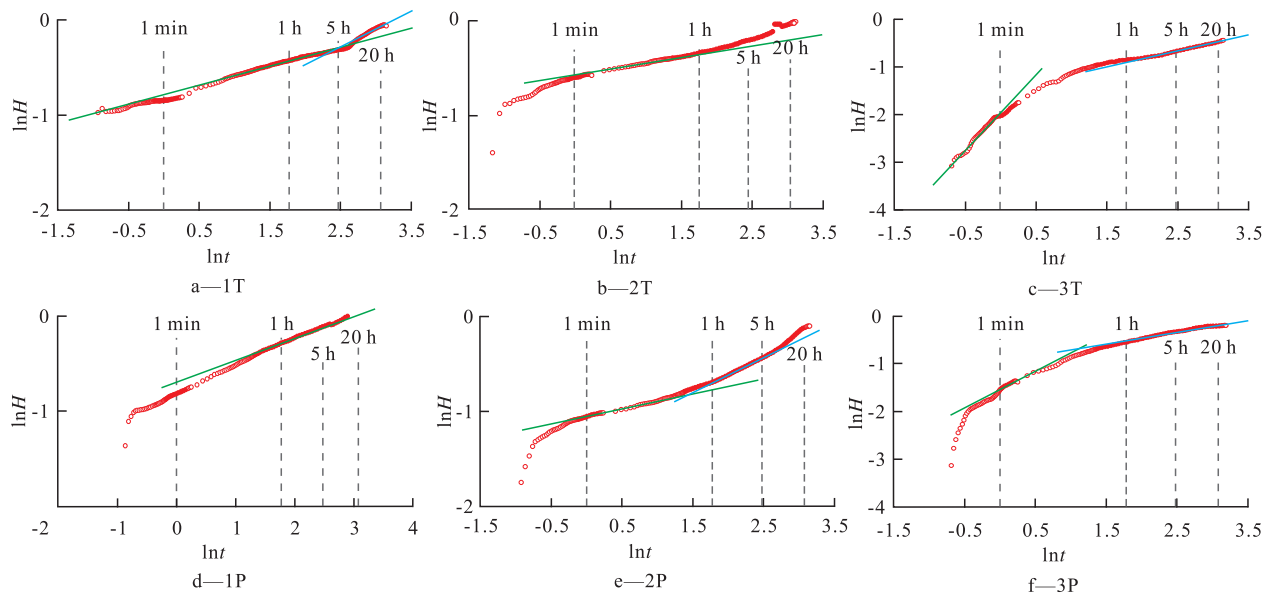


图1 6块样品不同页理方向首次实验的自发渗吸曲线

Fig.1 Spontaneous imbibition curves of six pieces of sample tested along and against lamination direction for the first time

线斜率为0.234,5 h后斜率增至0.441;2T样品的自发渗吸曲线斜率在实验过程中始终为0.181,2块样品的自发渗吸曲线斜率均未达到0.5,这说明2块样品的孔隙连通性均较差,其中1T样品的孔隙连通性比2T样品好。导致页岩储层孔隙连通性变差的原可能是由于粘土矿物充填于较大的粒间孔内,阻塞孔隙和喉道。观察A井龙马溪组实验样品的微孔隙扫描电镜照片(图2)可知,样品中矿物颗粒间的孔隙大部分被片状、层状、束状、纤维状的伊利石和伊/蒙混层及鳞片状的绿泥石等粘土矿物充填,这些粘土矿物虽然晶粒间发育纳米级的晶间孔^[20](图2a),但由于大量微米级的粒间孔也被充填(图2b),使其孔隙连通性变差,导致页岩储层的渗透率总体下降。

2.2 页理方向对自发渗吸的影响

页理又称页状层理,是在页岩中发育的水平层

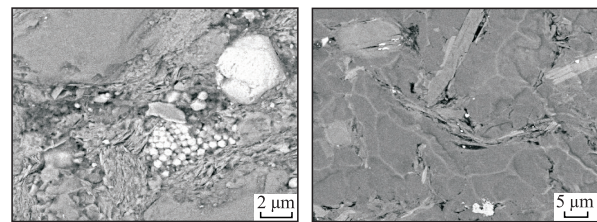


图2 实验样品微孔隙扫描电镜照片

Fig.2 SEM images of microscopic pores of experimental samples

理,其厚度小于1 cm^[21],由沉积成岩作用形成,也是页岩结构的一个重要特征。样品采样地点位于重庆市彭水县,在五峰组—龙马溪组沉积时期研究区主要为深水陆棚沉积环境^[22],是有利于页理发育的静水环境,岩心观察后也证实其页理比较发育。由于页岩的页理方向不同对自发渗吸的影响也不同,故对不同页理方向的实验样品分别进行自发渗吸

实验并编绘自发渗吸曲线(图1)。

同一深度下不同页理方向3块样品的自发渗吸曲线进行对比分析发现:1P样品的自发渗吸曲线斜率在前5 h内大于1T样品的自发渗吸曲线斜率,5 h后1T样品的自发渗吸曲线斜率大于1P样品的(图1a,1d),2P样品的自发渗吸曲线斜率始终大于2T样品的自发渗吸曲线斜率(图1e,1b),说明实验初期顺层自发渗吸的速率大于穿层自发渗吸的速率,这与页岩润湿性偏向亲油有关,润湿性与页岩有机质和矿物组成密切相关,水在亲油页岩中的运移具有方向依赖性,更易沿页理方向运移,而垂直页理方向的运移受到限制。实验后期由于不同样品内部非均质性的影响,自发渗吸速率出现差异。3T样品的自发渗吸曲线斜率大于3P样品的自发渗吸曲线斜率(图1c,1f),说明穿层自发渗吸速率大于顺层自发渗吸速率。这可能是由于样品中石英含量较高,达69.7%,由于石英为亲水性矿物,导致页岩亲水性较强,而水在亲水页岩中运移的方向依赖性较弱;同时,3T样品的亲水性、孔隙连通性较好,因此会出现穿层自发渗吸曲线斜率大于顺层自发渗吸曲线斜率的情况。综上所述,根据页理方向对自发渗吸曲线的影响,可以对页岩储层润湿性进行定性评价;同时,利用不同页理方向自发渗吸速率的差异对页岩储层保存条件进行评价。

2.3 矿物组成对自发渗吸的影响

对同一块样品进行多次实验后发现,其自发渗吸曲线的斜率会发生变化。为了降低不同页理方向对自发渗吸的影响,对每块样品进行3次实验,选取编号为T的样品的实验结果进行计算和分析(表3)发现,1T和2T样品在重复实验后自发渗吸曲线斜率呈现减小的趋势,1T样品的自发渗吸曲线斜率减小较为明显;3T样品的自发渗吸曲线斜率在第2次实验中略有减小,在第3次实验中明显增大,并超过在第1次实验中的自发渗吸曲线斜率。这是因为样品重复试验中,自发渗吸曲线斜率的变化与粘土矿物和脆性矿物的含量有关。分析表2可知:1T和2T样品的粘土矿物含量分别为47.0%和41.8%,均以伊利石为主;在重复实验中,粘土矿物吸水膨胀,破坏、阻塞孔隙和喉道,导致自发渗吸曲线斜率减小;3T样品由于石英等脆性矿物含量较高,粘土矿物含量较少,吸水膨胀对孔隙造成的影响较小,自发渗吸曲线斜率在3次实验中没有出现明显减小的趋势,说明实验的重复性较好,这也反映了该样品较为稳定的特点,有利于页岩气开发。

表3 实验样品在重复实验中自发渗吸曲线斜率
Table3 Spontaneous imbibition curve slope
for repeated experiment

编号	第1次	第2次	第3次	平均值	标准差
1T	0.338	0.161	0.046	0.182	0.120
2T	0.181	0.180	0.118	0.160	0.029
3T	0.339	0.318	0.407	0.355	0.038

在自发渗吸重复实验中,一部分样品在实验进行1~5 h后,自发渗吸曲线斜率出现增大的趋势,分析原因可能是由于粘土矿物的水化作用。粘土矿物吸水后晶体表面被水化,粘土晶体表面直接吸附水分子或通过吸附的可交换性阳离子间接吸附水分子,从而导致水化^[23]。粘土矿物的水化作用相当于在粘土矿物表面形成一层非常薄的水膜,提高样品的亲水性,从而导致自发渗吸的速率增大。

3 结论

与常规油气储层相比,页岩储层孔隙连通性较差,自发渗吸曲线斜率明显低于理论值。自发渗吸曲线的斜率能够反映页岩储层孔隙连通情况,其斜率越大,页岩储层的孔隙连通性越好。粘土矿物充填于页岩孔隙较大的粒间孔内,造成孔隙和喉道被阻塞,导致页岩储层的孔隙连通性变差。页理方向也会对自发渗吸产生影响,顺层自发渗吸曲线斜率通常较高,但是也有样品表现为穿层自发渗吸曲线斜率与顺层自发渗吸曲线斜率相当,这可能是由于页岩储层中亲水性矿物含量较高,使水在页岩储层中对运移的方向依赖性减弱。自发渗吸与页岩矿物组成密切相关:当页岩中粘土矿物含量较高时,吸水膨胀使页岩储层中原有孔隙结构发生改变,导致重复实验时页岩储层自发渗吸的曲线斜率逐渐减小;当页岩中石英等脆性矿物含量较高时,自发渗吸曲线变化不大,说明实验的重复性较好。页岩储层的自发渗吸曲线斜率越大,其渗透性越好,越有利于页岩油气的开发。

参考文献:

- [1] 伍岳,樊太亮,蒋恕,等.四川盆地南缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩矿物组成与脆性特征[J].油气地质与采收率,2015,22(4):59-63.
Wu Yue, Fan Tai liang, Jiang Shu, et al. Mineralogy and brittleness features of the shale in the upper Ordovician Wufeng Formation and the lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (4):59-63.
- [2] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现

- 状[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 26-31.
- Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(1): 26-31.
- [3] 武瑾, 梁峰, 拜文华, 等. 渝东北地区下志留统龙马溪组页岩气勘探前景[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 50-55.
- Wu Jin, Liang Feng, Bai Wenhua, et al. Exploration prospect of lower Silurian Longmaxi Formation shale gas in northeastern Chongqing City [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 50-55.
- [4] 赵俊龙, 汤达祯, 许浩, 等. 基于二氧化碳吸附实验的页岩微孔结构精细表征[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(5): 156-161.
- Zhao Junlong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Fine characterization of the shale micropore structures based on the carbon dioxide adsorption experiment [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(5): 156-161.
- [5] 林彤, 雍自权, 刘树根, 等. 川东南石林地区五峰组—龙马溪组黑色页岩特征[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(3): 83-93.
- Lin Tong, Yong Ziquan, Liu Shugen, et al. Basic characteristic of shale of Wufeng—Longmaxi formation in Shilin, southeast of Sichuan basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(3): 83-93.
- [6] 张琴, 刘畅, 梅啸寒, 等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 666-674.
- Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 666-674.
- [7] 马勇, 钟宁宁, 程礼军, 等. 渝东南两套富有机质页岩的孔隙结构特征——来自FIB-SEM的新启示[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 109-116.
- Ma Yong, Zhong Ningning, Cheng Lijun, et al. Pore structure of two organic-rich shales in southeastern Chongqing area: Insight from Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope (FIB-SEM) [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(1): 109-116.
- [8] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.
- [9] Kazemi H, Merrill L S, Porterfield K L, et al. Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs [J]. *SPEJ*, 1976, 16(3): 114-122.
- [10] Ma S, Morrow N R, Zhang X. Generalized scaling of spontaneous imbibition data for strongly water-wet systems [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1997, 18(3/4): 165-178.
- [11] 周凤军, 陈文明. 低渗透岩心渗吸实验研究[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(1): 54-56.
- Zhou Fengjun, Chen Wenming. Study on spontaneous imbibition experiment of low permeability core [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2009, 2(1): 54-56.
- [12] 杨兴华. 低渗透油藏注水开发中粘土矿物的变化及作用分析[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- Yang Xinghua. The analyse of the change and function of clay mineral in waterflood development in the low-permeability reservoir [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [13] 许建红, 马丽丽. 低渗透裂缝性油藏自发渗吸渗流作用[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 111-114.
- Xu Jianhong, Ma Lili. Spontaneous imbibition in fractured low permeability reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(3): 111-114.
- [14] 李士奎, 刘卫东, 张海琴, 等. 低渗透油藏自发渗吸驱油实验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 109-112.
- Li Shikui, Liu Weidong, Zhang Haiqin, et al. Experimental study of spontaneous imbibition in low-permeability reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 109-112.
- [15] Handy L L. Determination of effective capillary pressures for porous media from imbibition data [J]. *Petroleum Transactions, AIME*, 1960, 219(5): 75-80.
- [16] 蔡建超, 郁伯铭. 多孔介质自发渗吸研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(6): 735-754.
- Cai Jianchao, Yu Boming. Advances in studies of spontaneous imbibition in porous media [J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(6): 735-754.
- [17] Gao Zhiye, Hu Qinhong. Wettability of Mississippian Barnett Shale samples at different depths: Investigations from directional spontaneous imbibition [J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(1): 101-114.
- [18] Hu Q, Ewing R P, Dultz S. Low pore connectivity in natural rock [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 133: 76-83.
- [19] Stauffer D, Aharony A. Introduction to percolation theory [M]. 2nd ed. London: Taylor and Francis, 1992.
- [20] 王亮, 陈云燕, 刘玉霞. 川东南彭水地区龙马溪组页岩孔隙结构特征[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(5): 80-88.
- Wang Liang, Chen Yunyan, Liu Yuxia. Shale porous structural characteristics of Longmaxi Formation in Pengshui area of southeast Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(5): 80-88.
- [21] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [22] 李一凡, 樊太亮, 高志前, 等. 渝东南地区志留系黑色页岩层序地层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 299-306.
- Li Yifan, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, et al. Sequence stratigraphy of Silurian black shale and its distribution in the southeast area of Chongqing [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 299-306.
- [23] 王茂桢, 柳少波, 任拥军, 等. 页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 207-216.
- Wang Maozhen, Liu Shaobo, Ren Yongjun, et al. Pore characteristics and methane adsorption of clay minerals in shale gas reservoir [J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 207-216.