

# 不同覆压条件下储层物性变化特征及水驱油实验研究

李百川<sup>1</sup>, 周巨标<sup>2</sup>, 丁玉盛<sup>2</sup>, 李祥珠<sup>2</sup>, 刘一丹<sup>1</sup>, 王梦琪<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国石化江苏油田分公司 第三采油厂, 安徽 天长 239300)

**摘要:**在油田注水开发过程中,地层中流体静态平衡被打破,岩石储层在上覆地层压力作用下发生形变,从而改变岩石的物性特征,进而影响水驱采收率。以王龙庄油田、经中油田取心井岩心为实验样品,开展了不同围压下的岩石物性测定及水驱油实验,结果表明:岩石孔隙度、渗透率与围压呈幂函数关系,且随着围压的增加,岩石孔隙度、渗透率逐渐减小;水驱油效率与围压呈指数函数关系,并确定了不同指数的分布范围。

**关键词:**水驱油实验;围压孔隙度;围压渗透率;驱油效率

中图分类号: TE348

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)02-0022-07

## Experimental Study of Reservoir Physical Property Change and Water Flooding under Different Overburden Pressures

LI Baichuan<sup>1</sup>, ZHOU Jubiao<sup>2</sup>, DING Yusheng<sup>2</sup>, LI Xiangzhu<sup>2</sup>, LIU Yidan<sup>1</sup>, WANG Mengqi<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;  
2. Anhui Oil Production Plant of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Tianchang, Anhui 239300, China)

**Abstract:** In oilfield water flooding, due to the breaking of formation hydrostatic balance, reservoir rock deforms under the overburden pressure, changing its physical properties and thereby affecting its water flooding recovery. An experiment, with the core of coring wells in Wanglongzhuang oilfield and Suizhong oilfield as samples, was carried out to measure the petrophysical property and water flooding under different confining pressures. The results show that rock porosity and permeability are of power function relationship to confining pressure, decreasing with the increase of confining pressure, while oil displacement efficiency of water flooding is of exponential function relationship to confining pressure, determining the distribution range of different exponents.

**Key words:** water flooding experiment; confining pressure porosity; confining pressure permeability; oil displacement efficiency

油田注水开发是国内外普遍采用的有效保持地层能量的一种开发方式,可以提高油田的采油速度和采收率。但是,长期注水会对储层物性产生一定影响,特别是油田进入高含水期时,储层物性变化对油田开发效果的影响尤为明显<sup>[1-3]</sup>。地层压力是储层物性的一个重要影响因素,直接影响储层的孔隙度、渗透率及孔隙体积压缩系数等<sup>[4]</sup>。在油田投入开发后,随着地层内部压力不断变化,地层中有效压力也会随之变化,可能引起储层岩石发生形变,从而改变岩石孔隙结构及骨架结构特征,导致储层物性参数发生变化<sup>[5]</sup>。因此,只有正确认识上覆地层压力对储层物性的影响规律,才能更有利于油田注水开发调整措施的制定。通过室

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172109, 51504143); 山东省自然科学基金项目(ZR2014DP012)

作者简介: 李百川(1990—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事油气田开发方面的研究。E-mail: libaichuan0313@163.com

内模拟实验,评价不同岩样在不同围压作用下的物性变化特征及不同围压下的水驱油效果,可指导油田的高效开发。

## 1 实验设备与条件

### 1.1 仪器设备

实验主要采用高温高压覆压孔渗测量仪,测量在不同覆压下的孔隙度和渗透率。实验以氮气为介质测试,按照石油行业标准<sup>[6]</sup>“覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法(SY/T6385—1999)”进行,并对实验结果进行校正(图1)。

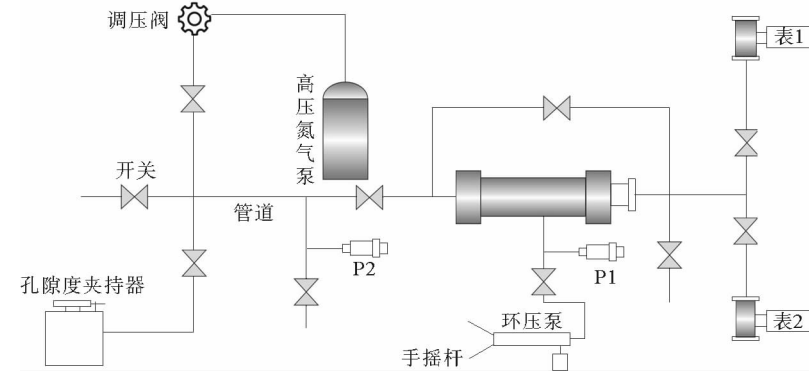


图1 孔隙度、渗透率测量设备流程图

Fig. 1 Porosity, permeability measurement instrumentation diagrams

驱替实验采用油水相对渗透率测量仪进行,设备主要包括驱替泵、压力传感器、岩心夹持器、手摇泵和恒温系统等。除驱替泵和手摇泵外,其他部分置于恒温箱内(图2)。

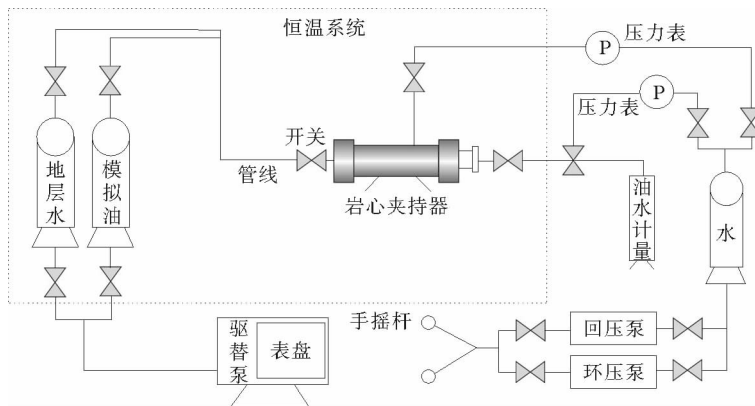


图2 水驱油实验流程图

Fig. 2 Water flooding experimental flow chart

### 1.2 实验用油

实验用油为王龙庄油田油样与煤油混合样,按照地层温度条件配制成粘度为  $23.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  的模拟油。

### 1.3 实验岩心

实验所用岩心为王龙庄油田、绥中油田取心井岩心与人造岩心。根据实验目的,选取渗透率级别为  $3\,000, 1\,000, 500, 100 \text{ mD}$  的岩心各三块(表1)。

表 1 实验样品参数  
Tab. 1 Test sample parameters

样品号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	渗透率/mD	样品来源
SKD-3000A	6.68	2.50	35.69	3 015.65	绥中油田取心井
SKD-3000B	5.78	2.50	33.49	3 102.39	绥中油田取心井
SKD-3000C	3.88	2.48	35.96	2 899.65	绥中油田取心井
SKD-1000A	7.87	2.50	34.42	1 082.05	人造岩心
SKD-1000B	5.68	2.51	15.80	1 045.38	人造岩心
SKD-1000C	5.58	2.48	17.36	1 089.62	人造岩心
SKD-500A	6.93	2.49	16.50	512.18	绥中油田取心井
SKD-500B	6.67	2.49	16.85	530.15	人造岩心
SKD-500C	5.69	2.49	17.18	536.01	人造岩心
SKD-100A	6.64	2.49	3.91	114.04	天 95-3
SKD-100B	6.67	2.49	33.70	110.15	人造岩心
SKD-100C	5.85	2.48	7.57	89.66	人造岩心

## 2 实验方法与结果

### 2.1 实验方法

在相对渗透率的室内测量过程中,由于实验设计的理论基础不同,测量手段可分为两种,即“稳态法和非稳态法”<sup>[7]</sup>。

稳态法是直接根据达西定律,在实验过程中,设定一定比例的油和水通过标准岩样,达到流量稳定状态,记录压差和流量,就得到一个实验点。改变油水的注入比例,重复上述过程,可以得到一系列实验点,然后根据单相流的达西定律计算不同含水饱和度下的相对渗透率。

非稳态方法是在满足相似准则条件下,设定一定注入速度或注入压力,直接进行水驱,并间隔一定时间测量阶段产油、累积产液以及岩心两端压差,但是非稳态法需要建立足够大的驱替速度或驱替压差,以消除或减低岩心出口段因毛管力引起的饱和度梯度一末端效应。

非稳态法与稳态法相比,其优点是测量时间短,实验强度低,但其数据分析中需要求解隐式方程,还需要用到不同数学拟合回归方法,目前最常用的方法是 JBN(Johnson-Bossler-Naumann)方法。

本次实验采用《中华人民共和国天然气行业标准》中的非稳态法测定水驱油效率实验<sup>[8]</sup>,采用 JBN 方法计算实验数据,并绘制关系曲线。

### 2.2 实验步骤

- 1)将岩心放在孔隙度夹持器中,在环压约 850 kPa 时测量样品岩心的常温常压孔隙度;
- 2)以恒定速率用实验氮气流经岩心夹持器中的样品岩心,直到流经岩心内部的氮气流速稳定,测得气体流速,计算岩心的气测渗透率;
- 3)用 3~5 个标准块,检查仪器的可靠性,测得标准块值与标准块的标定值相比较,相对误差在 5% 以内,则认为所用仪器合格;
- 4)将岩心放在岩心夹持器中,用手摇杆加不同环压值,多次试验测得岩心不同围压下的孔隙度值;
- 5)在不同环压值下重复测得渗透率值,得到不同围压下的渗透率值;
- 6)启动抽真空系统,将岩心抽成真空。在 50 °C 条件下,采用恒速法(0.2 mL/min)向岩心夹持器中注入实验用水,直到饱和为止,根据湿重与干重计算水的质量;
- 7)在 50 °C 条件下,采用稳定流(0.2 mL/min)的驱替方法饱和模拟油,在岩样出口端计量出水量,计算出饱和油质量与束缚水饱和度;

8) 在 50 °C 条件下, 采用稳定流(0.2 mL/min)的驱替方法进行恒速水驱油, 在岩样出口端以一定时间间隔, 记录见水前的无水期产油量、见水时间、见水时的累计产油量、累计产液量和岩样两端压力差随时间的变化关系, 待出口端不再出油且压差稳定时结束实验;

9) 计算含水率、采收率与水驱油效率;

10) 重复步骤 1)~8), 分别对 9 块实验样品进行实验, 记录每一块样品的实验数据。

### 2.3 覆压孔渗的测量

利用实验样品进行覆压孔渗测量, 分别选取围压值为 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 MPa, 测试结果见表 2、表 3。

表 2 孔隙度覆压测试结果  
Tab. 2 Porosity overburden pressure test results

样品号	围压/MPa							
	5	10	15	20	25	30	35	40
SKD-3000A	34.33	32.57	31.57	31.20	31.00	30.88	30.80	30.70
SKD-3000B	32.42	30.32	29.34	29.00	28.70	28.66	28.60	28.50
SKD-3000C	34.62	33.54	32.00	31.80	31.50	31.42	31.30	31.20
SKD-1000A	33.46	31.26	30.27	29.60	29.40	29.28	29.20	29.10
SKD-1000B	15.64	14.87	14.40	14.10	14.00	13.93	13.90	13.90
SKD-1000C	17.07	16.48	15.89	15.40	15.20	15.13	15.05	15.00
SKD-500A	16.20	15.20	14.81	14.50	14.40	14.33	14.30	14.20
SKD-500B	16.50	16.00	15.50	15.20	15.00	15.00	15.00	14.90
SKD-500C	16.60	15.80	15.59	15.30	15.10	15.09	15.10	15.00
SKD-100A	3.77	3.50	3.36	3.32	3.29	3.28	3.27	3.26
SKD-100B	32.40	30.30	29.34	29.00	28.70	28.66	28.60	28.50
SKD-100C	7.20	6.84	6.62	6.48	6.42	6.41	6.39	6.37

表 3 渗透率覆压测试结果  
Tab. 3 Permeability overburden pressure test results

样品号	围压/MPa							
	5	10	15	20	25	30	35	40
SKD-3000A	2 914.32	2 826.12	2 752.30	2 714.09	2 690.89	2 684.12	2 678.65	2 668.90
SKD-3000B	2 992.25	2 905.32	2 825.40	2 775.60	2 758.32	2 746.30	2 742.32	2 740.30
SKD-3000C	2 806.16	2 715.25	2 648.90	2 609.69	2 587.35	2 581.12	2 575.30	2 566.20
SKD-1000A	1 023.30	964.65	915.48	873.84	857.81	853.08	849.21	842.61
SKD-1000B	981.10	932.61	881.75	840.84	825.09	820.42	816.30	814.90
SKD-1000C	1 034.18	977.32	930.45	890.66	875.34	871.60	867.21	860.82
SKD-500A	493.21	480.20	468.40	460.96	457.02	456.70	455.32	453.28
SKD-500B	512.18	497.74	484.80	477.13	473.05	470.20	469.16	468.40
SKD-500C	520.16	505.22	493.13	482.41	478.28	477.10	476.18	474.37
SKD-100A	110.28	106.07	104.56	102.28	101.41	101.20	101.80	100.58
SKD-100B	103.30	99.78	96.63	94.52	93.71	93.50	93.30	92.95
SKD-100C	86.01	83.27	81.50	80.69	80.01	79.80	79.60	79.35

## 2.4 水驱实验

利用实验样品分别在加围压 5, 10, 20 MPa 的情况下, 以模拟地层水与模拟油完成的水驱油实验, 结果见表 4~6。

表 4 5 MPa 水驱油实验结果

Tab. 4 5 MPa water flooding experiment result

样品号	孔隙度/%	渗透率/mD	原油粘度/(mPa·S)	驱油效率/%	样品来源
SKD-3000A	45.00	2 914.20	23.50	65.80	绥中油田取心井
SKD-1000A	33.46	1 023.30	23.50	62.10	人造岩心
SKD-500A	16.20	493.10	23.50	60.45	绥中油田取心井
SKD-100A	3.77	110.40	23.50	57.30	天 95-3 井

表 5 10 MPa 水驱油实验结果

Tab. 5 10 MPa water flooding experiment result

样品号	孔隙度/%	渗透率/mD	原油粘度/(mPa·S)	驱油效率/%	样品来源
SKD-3000B	46.40	2 905.20	23.50	61.24	绥中油田取心井
SKD-1000B	30.32	932.30	23.50	54.30	人造岩心
SKD-500B	16.00	497.70	23.50	51.74	人造岩心
SKD-100B	30.30	99.80	23.50	48.75	人造岩心

表 6 20 MPa 水驱油实验结果

Tab. 6 20 MPa water flooding experiment result

样品号	孔隙度/%	渗透率/mD	原油粘度/(mPa·S)	驱油效率/%	样品来源
SKD-3000C	43.70	2 609.70	23.50	54.10	绥中油田取心井
SKD-1000C	31.80	890.70	23.50	47.90	人造岩心
SKD-500C	15.30	482.40	23.50	45.40	人造岩心
SKD-100C	6.48	80.70	23.50	39.20	人造岩心

## 3 实验结果分析

### 3.1 不同围压下孔隙度和渗透率测量结果分析

对 12 块样品在不同围压下的孔隙度与渗透率进行测量, 从图 3、图 4 可以看出, 随着围压增大, 岩心的孔隙度、渗透率逐渐减小, 并呈幂函数规律变化。总的趋势是, 在围压增大初期, 变化幅度较大, 围压进一步增大后, 变化幅度相对减小。

根据实验结果, 对孔隙度与渗透率随围压的变化曲线进行回归, 得到了回归方程与相关系数。

样品号 SKD-500B 的孔隙度与围压力的关系式为:

$$\phi = 16.468 P^{-0.052}, R^2 = 0.9635. \quad (1)$$

其中:  $\phi$  为围压下的孔隙度测定值, %;  $P$  为围压值, MPa;  $R$  为相关系数。

样品号 SKD-100A 的渗透率与围压的关系式为:

$$K = 114.03 P^{-0.061}, R^2 = 0.9801. \quad (2)$$

其中:  $K$  为围压下的渗透率测定值, mD;  $P$  为围压值, MPa;  $R$  为相关系数。

根据实验结果, 幂函数关系能较好地描述孔隙度、渗透率与围压的关系, 其相关系数达到 0.98。其相应关系式为

$$Y = Y_0 P^{-\beta}. \quad (3)$$

其中:  $Y$ —围压下的孔隙度与渗透率测定值, %, mD;  $P$ —围压值, MPa;  $Y_0, \beta$ —回归系数。

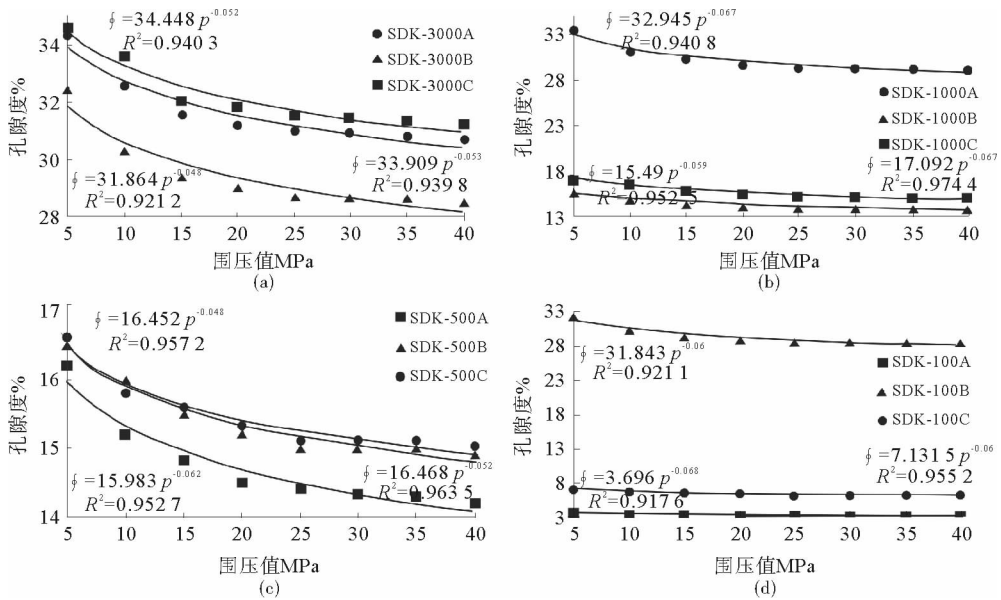


图3 不同岩样的围压孔隙度测量结果对比图

Fig. 3 Different kind of rock overburden pressure porosity measurements comparison chart

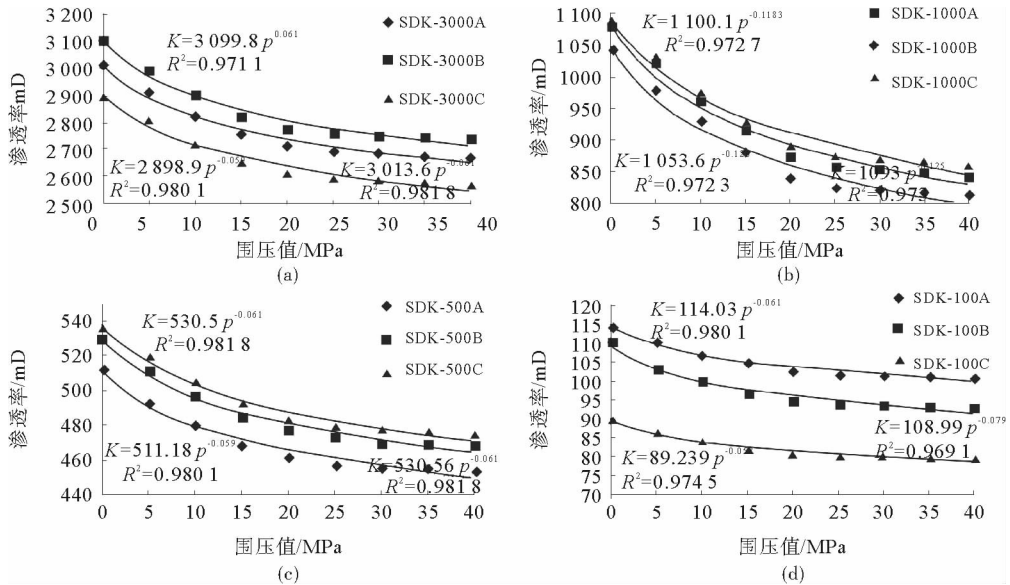


图4 不同渗透率级别下的岩样围压渗透率测量结果对比图

Fig. 4 Different rock samples permeability overburden pressure levels under different permeability measurement results comparison chart

根据试验室测试结果研究表明,随着围压增大,孔隙度和渗透率值变小;地面孔隙度和渗透率小的砂岩  $\beta$  值较大,即净覆压对低孔渗砂岩的影响较大;地面孔隙度和渗透率大的砂岩  $\beta$  值较小,即净覆压对高孔高渗砂岩的影响较小<sup>[9]</sup>。

### 3.2 不同围压下水驱油实验结果分析

将 12 个不同渗透率级别的样品岩心,在饱和油粘度为 23.5 MPa · s,温度为 50 °C,围压值分别为 5, 10, 20 MPa 的情况下进行油水两相驱替,记录不同时刻采出水量与采出油量以及累产水量与累产油量,当含水

率达 99% 时结束驱替实验, 计算此时的驱油效率为最终驱油效率(图 5)。

根据 4 组不同围压下的驱替效率, 回归出四条围压值与驱油效率方程。

1 000 mD 左右的岩心驱油效率与围压的关系式为:

$$E = 80.391e^{-0.13P}, R^2 = 0.9996. \quad (4)$$

其中:  $E$  为驱油效率, %;  $P$ —围压值, MPa;  $R$  为相关系数。

根据实验结果, 指数函数能较好地描述驱油效率与围压的关系, 其相关系数达 0.99。其相应关系式为

$$E = E_0 e^{-\lambda P}. \quad (5)$$

其中:  $E$ —驱替效率, %;  $P$ —围压值, MPa;  $E_0$ ,  $\lambda$ —回归系数。

## 4 结论

1) 通过室内试验, 建立岩心孔隙度、渗透率随围压变化的关系模型, 随着围压的增大, 岩石孔隙度、渗透率逐渐减小, 变化规律呈幂函数关系。

2) 通过室内水驱油实验, 建立岩心的驱油效率随围压变化的关系模型, 驱油效率与围压呈指数函数关系, 围压越大, 驱油效率越低, 且围压的变化对低渗透油田的驱油效率影响较大。

## 参考文献:

- [1] 林琳, 陈琳琳, 路小兵, 等. 室内试验研究储层应力敏感性[J]. 石油化工应用, 2015, 34(6): 110-113.  
LIN Lin, CHEN Linlin, LU Xiaobing, et al. Indoor experimental study on reservoir stress sensitivity[J]. Petrochemical Industry Application, 2015, 34(6): 110-113.
- [2] 史长林, 张凤红, 陈平. 水驱实验模拟注水开发对储层的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 87-89.  
SHI Changlin, ZHANG Fenghong, CHEN Ping. Affection of simulating water-flooding by water injection tests on reservoir properties[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(5): 87-89.
- [3] 郭莉, 王延斌, 刘伟新, 等. 大港油田注水开发过程中油藏参数变化规律分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 85-86.  
GUO Li, WANG Yanbin, LIU Weixin, et al. Variation law of reservoir parameters during water flooding in Dagang oil field [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(1): 85-86.
- [4] 冯鑫, 李丰辉, 侯东梅, 等. 异常高压油气藏储层物性随有效压力变化的研究[J]. 中国海上油气, 2008, 20(5): 316-318.  
FENG Xin, LI Fenghui, HOU Dongmei, et al. Abnormal high pressure hydrocarbon reservoir properties change with effective pressure[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(5): 316-318.
- [5] 薛清太. 地层上覆压力下物性参数特征研究[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 43-45.  
XUE Qingtai. Investigation on characteristics of physical parameters under formation overburden pressure[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6): 43-45.
- [6] 国家石油和化学工业局. 中华人民共和国石油天然气行业标准, SY/T 6385-1999 覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [7] 中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所, 中石化胜利油 W 有限公司地质研究院. SY/T 5336-2006 岩心分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社 2006.
- [8] 杨清彦. 两相驱替相对渗透率研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 8-13.
- [9] 吴凡, 孙黎娟, 何江. 孔隙度、渗透率与净覆压的规律研究和应用[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(4): 23-25.  
WU Fan, SUN Lijuan, HE Jiang. Research and application of the law of porosity and permeability of the net overburden pressure[J]. Southwest Petroleum University, 1999, 21(4): 23-25.

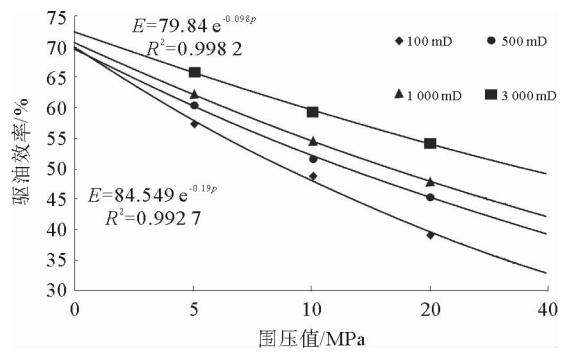


图 5 不同覆压下不同渗透率级别的岩心驱替效率对比图

Fig. 5 Different levels of different permeability cover pressure core flooding efficiency comparison chart