

离心法和隔板法测量低渗透储层饱和度指数的对比

韩学辉¹, 李峰弼¹, 戴 蕾², 唐 俊¹, 王雪亮³, 王洪亮³, 房 涛³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油西部钻探工程有限公司钻井工程技术研究院, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石油西部钻探工程有限公司测井公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 为了开发低渗透储层饱和度指数测量方法, 分别应用半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测和离心法测量 4 种典型低渗透储层的饱和度指数 n , 对比分析饱和度指数测量结果的差异性和机制, 结合储层饱和度测井评价考察方法的适应性。结果表明: 对于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的低渗透岩心, 两种方法均适用; 当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 由于存在毛管压力与电阻率不平衡和“蒸发”的影响, 离心法的适应性变差, 隔板法仍然适用, 但适应性会受到隔板突破压力的限制; 隔板法能够同时提供毛管压力曲线用于划分储层类型, 并给出相应的饱和度指数, 有助于应对低渗透储层的非均质性。

关键词: 低渗透; 饱和度指数; 隔板法; 离心法; 非均质性

中图分类号: P 618.13

文献标志码: A

引用格式: 韩学辉, 李峰弼, 戴蕾, 等. 离心法和隔板法测量低渗透储层饱和度指数的对比[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 47-53.

HAN Xuehui, LI Fengbi, DAI Lei, et al. Comparison of saturation exponent of low permeability reservoir obtained by centrifuge method and porous plate method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 47-53.

Comparison of saturation exponent of low permeability reservoir obtained by centrifuge method and porous plate method

HAN Xuehui¹, LI Fengbi¹, DAI Lei², TANG Jun¹, WANG Xueliang³, WANG Hongliang³, FANG Tao³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Engineering Institute, Western Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Karamay 834000, China;

3. Well Logging Company, Western Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Karamay 834000, China)

Abstract: In order to develop an experimental method for measuring saturation exponent, a porous plate method for capillary pressure-resistivity connection survey and a centrifuge method were used respectively to determine the saturation index for four low permeability reservoirs, and the differences in the measurements were compared accordingly. In addition, the different mechanism and applicability of these two methods were analyzed using the saturation measurements from well logs. The results show that the centrifuge method is not applicable when the permeability is lower than $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ to $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ because of the disequilibrium of capillary pressure and resistivity, as well as the effect of evaporation. However, the porous plate method is preferably applicable when the work pressure is not higher than the breakthrough pressure. The porous plate method can provide both saturation index and capillary pressure curve, which can be used to determine the reservoir type and its saturation index, thus can be applied to deal with heterogeneity in reservoirs.

Key words: low permeability; saturation exponent; porous plate method; centrifuge method; heterogeneity

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家油气专项(2011ZX05009-003); 国家留学基金项目(201306455002)

作者简介: 韩学辉(1974-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为储层岩石物理。E-mail: hanxuehui@upc.edu.cn.

目前, Archie 公式仍是低渗透储层估算原始含水饱和度的常用方程^[1-3]。其中, 饱和度指数 n 的测量是通过降低或增加含水饱和度来测量电阻增大率后幂函数拟合得到的。由于低渗透储层渗流能力差, 增加或降低饱和度方法中驱替或吸吮过程的毛管压力与电性平衡会影响到饱和度指数的测量^[4-6], 最终影响含油气饱和度的计算精度, 因此低渗透储层饱和度指数 n 的测量方法以及方法的适应性一直受到岩石物理学家和测井分析家的广泛关注^[7-13]。笔者应用目前较为常用的离心法和半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测方法测量 4 个低渗透、特低渗透油气藏储层的饱和度指数, 对比分析饱和度指数的测量结果的差异性和机制, 结合储层饱和度测井评价考察方法的适应性。

1 实验方法和实验装置

1.1 测量原理

离心法是指岩心在高速离心机旋转过程中, 孔隙流体所受的离心力大于毛管压力时将会相对于岩石骨架发生位移, 并从岩石孔隙中排出。实验时, 逐渐增加离心转速并测量该转速下的饱和度和电阻

率, 绘制电阻增大率-饱和度交会图后幂函数拟合得到饱和度指数。

隔板法是利用半渗透隔板在一定压力范围内只允许单相流体通过的特性, 通过逐级加压驱替实验测量电阻增大率, 同时记录驱替压力与含水饱和度, 绘制电阻增大率-饱和度交会图后幂函数拟合得到饱和度指数, 同时可得到一条毛管压力曲线。实验进行至隔板的最大突破压力(在该压力非润湿相开始通过隔板)时终止^[14]。

1.2 实验装置

图 1 为研制的半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测装置。该装置由哈斯勒夹持器、压力施加子系统、温度施加子系统、饱和度计量子系统和电阻率测量子系统组成。温度范围为室温 ~ 80 °C, 压力包括围压和驱替压力, 围压的控制范围为 0 ~ 30 MPa, 驱替压力取决于隔板的突破压力(1.5 MPa, 最大 6.8 MPa)。饱和度的计算依据驱替过程中的出液量, 采用精度为 0.02 mL 的量筒计量。电阻率可实现在线测量, 为了减小测量过程中的接触电阻, 岩心夹持器(图 1(c)) 采用多孔导电橡胶作为耦合材料^[15]。



图 1 半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测装置

Fig. 1 Device for capillary pressure-resistivity connection survey based on porous plate method

2 实验及结果分析

为了考察不同饱和度指数测量方法的适应性, 分别应用半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测和离心法测量 4 种典型低渗透储层的饱和度指数 n , 对比分析饱和度指数测量结果的差异性和机制。

2.1 实验条件

由于 CSC-42 型离心机不能对岩样施加地层压力, 也不能在线测量电阻率, 需要在停止离心后取出测量电阻率, 电阻率的测量采用常温常压的测量方式^[16]。降饱和度时采用氮气、空气作为驱替介质。

这些条件与储层的真实条件有一定差异, 但由于温度、压力、驱替介质条件基本一致, 并不妨碍考察两种实验测量方法的差异性。

2.2 实验样品

实验样品来自 S、M、D、X 井区共 4 个低渗透、特低渗透油气藏。为了更好地分析两种方法的适应性, 补充测量了 DJ 井区中、高渗透油气藏 6 块中高孔渗样品。表 1 给出了 54 块岩心的岩性、孔隙度和渗透率。为考察两种实验测量方法的差异性, 每块样品都加工了平行样。

表 1 岩石样品基本参数
Table 1 Basic parameters of samples

区块	样品号	岩性	孔隙度 $\varphi/\%$	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	区块	样品号	岩性	孔隙度 $\varphi/\%$	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$
M	8086	细砂岩	15.44	16.50	S	S013	石英砂岩	8.81	6.76
M	8109	细砂岩	7.96	0.10	S	S015	石英砂岩	5.17	1.56
M	8126	细砂岩	17.70	22.30	S	S017	石英砂岩	5.72	0.29
M	8178	细砂岩	12.77	7.03	S	S027	石英砂岩	4.03	0.11
M	17451	细砂岩	13.91	2.11	S	S048	岩屑砂岩	4.61	0.07
M	17462	细砂岩	5.76	0.10	S	S051	岩屑砂岩	2.53	0.16
M	17482	细砂岩	14.53	61.25	S	S056	岩屑砂岩	3.24	0.30
M	17525	细砂岩	10.46	3.68	S	S062	岩屑砂岩	7.05	0.34
M	17526	细砂岩	11.80	6.34	S	S065	岩屑砂岩	7.88	0.59
X	07407	砂砾岩	16.03	1.47	S	S090	岩屑砂岩	9.03	0.54
X	07418	砂砾岩	13.75	0.82	S	S122	岩屑砂岩	5.81	0.40
X	07429	砂砾岩	14.88	0.29	S	S125	岩屑砂岩	10.29	0.57
X	18232	砂砾岩	14.73	3.53	S	S167	岩屑砂岩	5.50	0.51
X	18234	砂砾岩	12.27	0.71	S	S187	岩屑砂岩	10.63	0.74
X	18287	砂砾岩	8.14	0.08	D	20264	火山岩	21.21	0.03
X	18131	砂砾岩	16.15	6.23	D	20266	火山岩	18.34	0.06
X	18136	砂砾岩	15.02	5.92	D	20268	火山岩	12.93	0.02
X	07465	砂砾岩	13.30	12.59	D	20285	火山岩	21.07	0.10
X	07480	砂砾岩	14.45	19.09	D	20289	火山岩	15.8	0.08
X	07485	砂砾岩	13.18	2.05	D	20293	火山岩	17.19	0.05
X	07520	砂砾岩	13.86	2.11	D	20295	火山岩	17.38	0.12
S	S004	石英砂岩	7.62	1.20	DJ	106	中砂岩	26.97	103.70
S	S006	石英砂岩	7.88	3.99	DJ	30	中砂岩	34.30	292.80
S	S007	石英砂岩	6.86	1.16	DJ	136	中砂岩	27.94	395.70
S	S008	石英砂岩	6.29	1.76	DJ	3	中砂岩	33.44	169.50
S	S009	石英砂岩	6.37	1.66	DJ	10	中砂岩	31.79	1174.00
S	S011	石英砂岩	7.21	3.78	DJ	38	中砂岩	35.65	1625.30

2.3 实验步骤

- (1) 岩心钻取、端面切割后抛光,以避免由于存在楔形空隙而导致接触电阻变大。
- (2) 应用二氧化碳溶解气驱方法对含油岩心洗油^[17-18]。
- (3) 烘干岩心后用氦气法测量孔隙度、渗透率等基本物性参数。
- (4) 基于二氧化碳置换抽真空加压饱和和技术饱和和地层水^[19]。
- (5) 分别应用半渗透隔板法毛管压力-电阻率联测和离心法测量饱和度指数。

2.4 实验结果分析

图 2 为低渗透性油气藏饱和度指数 n 与岩心物性参数的交会图。在实验考察的范围内发现:离心法确定饱和度指数 n 总体上高于隔板法确定的饱和度指数 n ; 两种方法的差值有随着岩心孔隙度、渗透率变小而增大的趋势; 对于渗透率在 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的低渗透岩心,两种实验方法得到的 n 值大致相当,平均绝对偏差小于 0.05; 当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,离心法确定的饱和度

指数 n 明显偏大,最大值甚至可达到 5.8,远远超过一般的认识。分析认为,造成这种差异性的原因主要是由于低渗透岩心物性较差,需要的毛管压力与电性平衡的时间长,而离心法降饱和度会导致岩心轴向上的毛管压力和饱和度不均匀分布。通常在岩心轴向上靠近离心机转轴的一端含水饱和度较低,表现为略干燥,测量岩心电阻时岩心端面与电极之间的接触电阻增大,导致岩心电阻率测量结果偏高。

图 3 为本次实验中得到的毛管压力曲线图和电阻增大率与含水饱和度的交会图。由图可见,M 地区与 S 地区半渗透隔板毛管压力曲线均存在一定的差异性,表明岩心在孔隙结构上存在一定的非均质性。进一步结合孔隙度、渗透率等地质参数,对岩心做了分类并分别给出了饱和度指数。M 地区毛管压力曲线大致呈“上凸”、“下凹”两类(图 3(a))。“上凸”型储层孔喉半径小,排驱压力高,孔隙度基本小于 10%,渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为相对较差储层或者非储层,对应饱和度指数较高。“下凹”型储层孔喉半径大,排驱压力低,分选略差,孔隙度基本大于 10%、渗透率高于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为相对优质

储层,对应饱和度指数略低(图3(b))。S地区毛管压力曲线大致呈“上凸”、“下凹”两类(图3(c))。相比M地区,S地区孔隙度和渗透率普遍较低。“上凸”型储层主要为岩屑砂岩,孔喉半径小,渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为相对较差储层,饱和度指数

高“下凹”型储层主要为石英砂岩,孔喉半径略大,渗透率大多高于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,排驱压力低,分选好,为相对优质储层,对应的饱和度指数低(图3(d))。

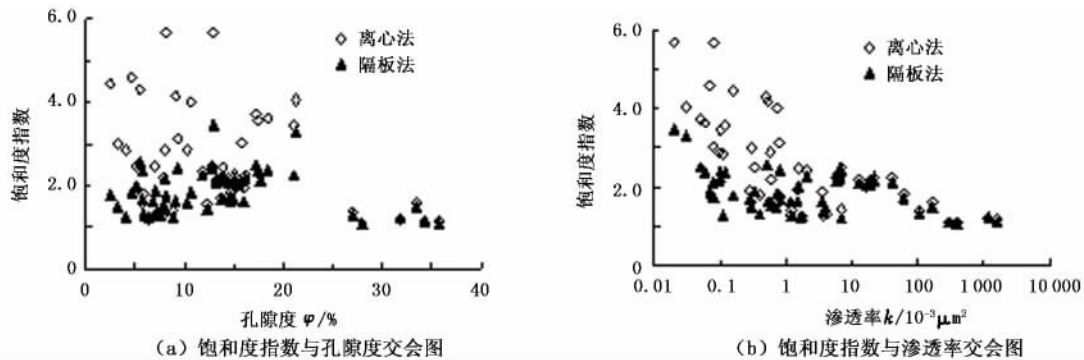


图2 低渗透性油气藏饱和度指数与物性参数交会图

Fig.2 Cross plots of saturation exponent and physical parameters of low permeability reservoirs

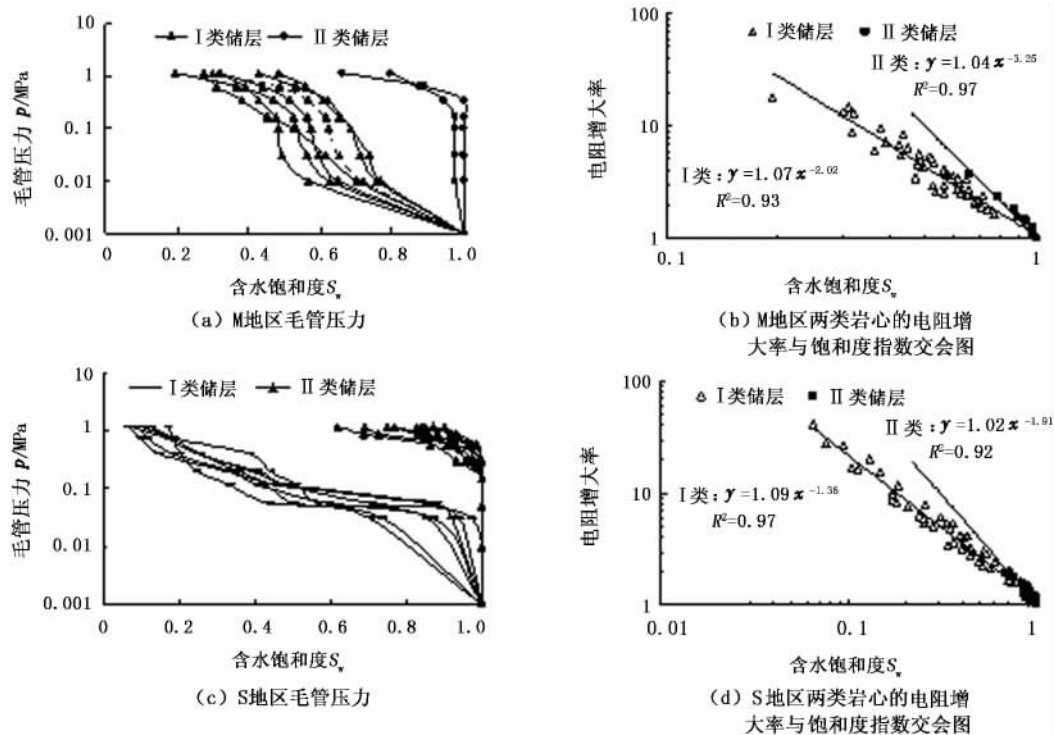


图3 半渗透隔板法测量的毛管压力曲线和电阻增大率与饱和度指数交会图

Fig.3 Capillary pressure curves and cross plots of saturation exponent and resistivity index based on porous plate method

3 饱和度指数在饱和度计算的应用性评价

M地区三工河组储层渗透率分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $11.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。隔板法和离心法测量饱和度指数分别为2.14和2.20,基本无差异。图4为M地区某井饱和度计算结果图。

由图可见,应用两种方法确定的饱和度计算的含油饱和度基本一致,且计算结果与密闭取心饱和度分析结果吻合得较好(平均误差小于5%),能够满足储层饱和度计算精度的要求。

SU77地区XX组储层渗透率分布在 $0.011 \times 10^{-3} \sim 2.55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.167 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低渗透气藏。隔板法和离心法测量饱

和度指数分别为 1.80 和 3.15 ,差异很大。图 5 为 X 井饱和度计算结果图。3 047 ~3 051m 为生产井段 ,并与其余 2 层(5 m) 合试 ,日产气为 12 152 m³。可见 ,应用隔板法测量饱和度指数计算含气饱和度平均为 68% ,比离心法确定饱和度指数计算的饱和度平均提高 12% ,与生产情况吻合得较好。

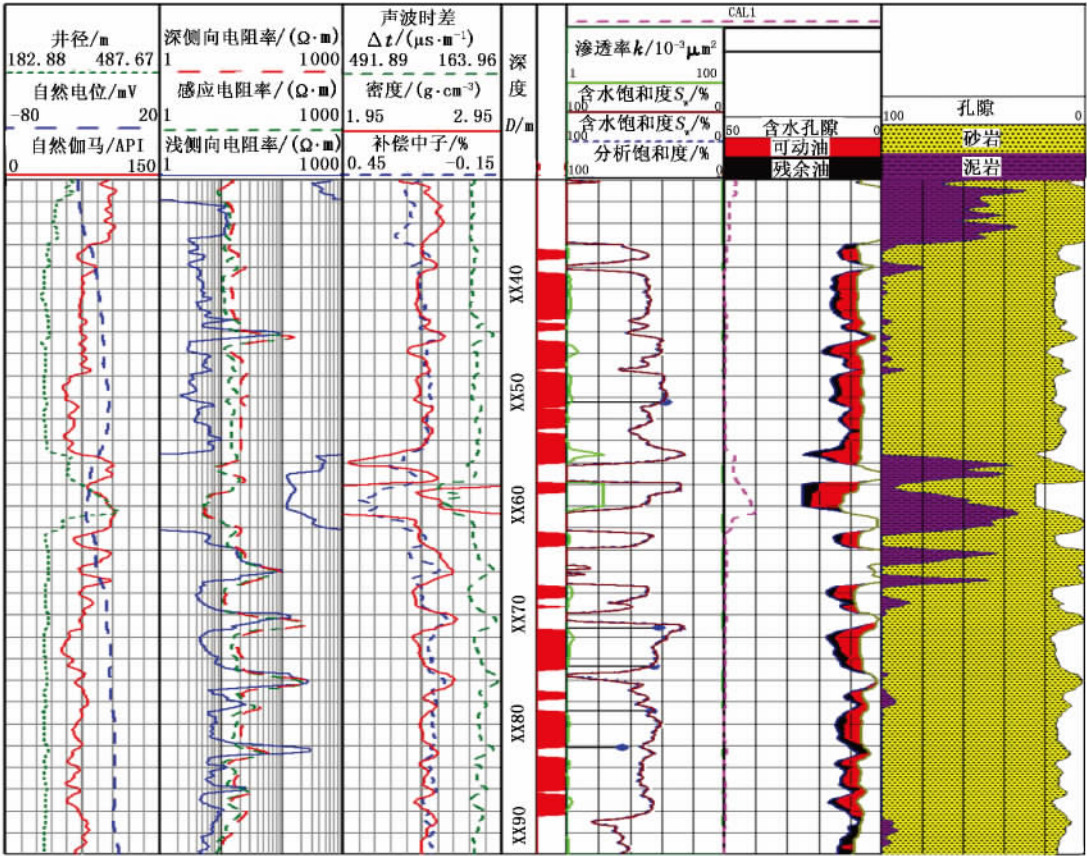


图 4 两种方法确定的饱和度指数在 M 地区某井饱和度计算中的应用

Fig. 4 Saturation evaluation with saturation exponents measured by two methods in a well of M aera

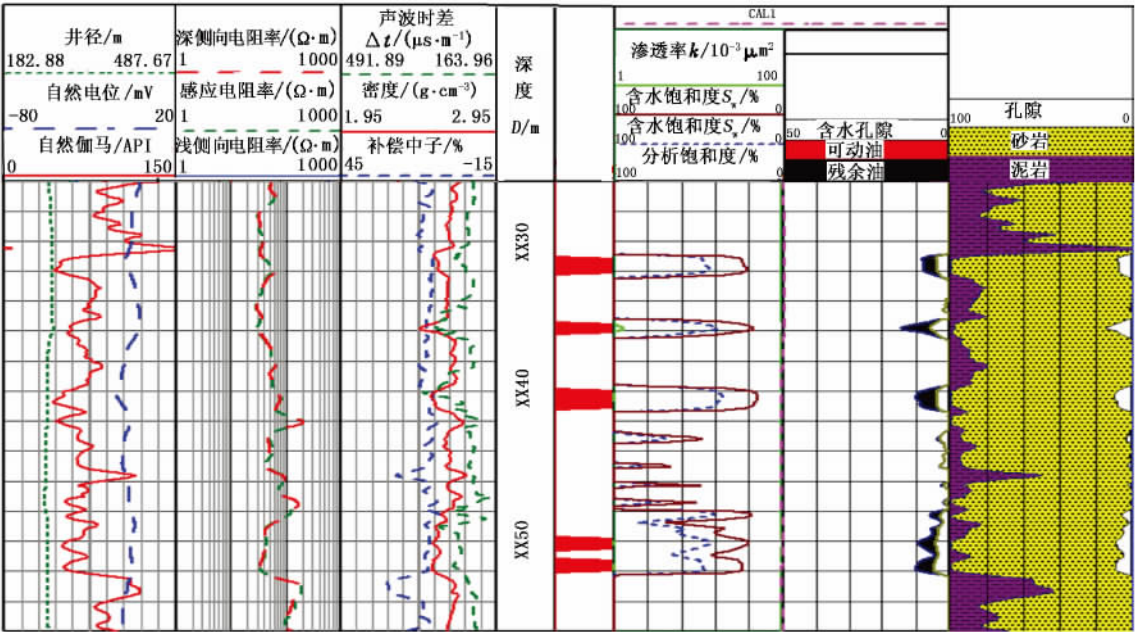


图 5 两种方法确定的电性参数在 S 地区某井饱和度计算中的应用

Fig. 5 Saturation evaluation with saturation exponents measured by two methods in a well of S aera

4 结 论

(1) 对于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的低渗透岩心,离心法和隔板法均适用,因此可使用离心法在满足精度要求条件下测量饱和度指数以提高测量效率(隔板法精度好,但测量周期经常为2个月左右);当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,离心法的适应性变差,隔板法应仍然适用,但适应性会受到隔板突破压力的限制。本次研究中,很多样品的含水饱和度下降很少,甚至不足40%,明显受到了实验采用半渗透隔板的突破压力仅为1.2 MPa的限制。

(2) 当渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,离心法测量结果“失真”的主要原因是由于毛管压力不平衡而导致的岩心轴向上的毛管压力和饱和度的不均匀以及离心过程中“蒸发”的影响。离心法本身的缺陷导致无法通过建立两种方法测量结果的回归关系对离心法测量结果加以修正。因此,在该条件下使用隔板法是比较稳妥的作法。

(3) M地区和S地区的应用案例表明能够同时提供毛管压力曲线用于划分储层类型(识别非储层)并给出相应的饱和度指数,可在一定程度上有效应对低渗透储层的非均质性。

(4) 饱和度指数 n 与岩性、物性参数存在某种相关性,建议将岩电实验与岩性、物性实验相结合,使用变 n 值方式可在一定程度上解决均质储层饱和度的评价。实验研究的部分样品渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于致密气层的范围,应用隔板法取得了较好的实验效果,有必要进一步考察应用隔板法测量致密气层饱和度指数的适应性。

参考文献:

- [1] 雍世和,洪有密. 测井资料综合解释与数据处理[M]. 北京:石油工业出版社,1982.
- [2] 周荣安. 阿尔奇公式在碎屑岩储层中的应用[J]. 石油勘探与开发,1998,25(5):80-82.
ZHOU Rongan. The application of Archie equation to the evaluation of clastic reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 80-82.
- [3] 韩学辉,匡立春,何亿成,等. 岩石电学性质试验研究方向展望[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):348-355.
HAN Xuehui, KUANG Lichun, HE Yicheng, et al. A view of the experimental study on rock electric property [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 348-355.
- [4] 万金彬,杜环虹,孙宝佃,等. 低孔隙度低渗透率岩心欠饱和对岩电实验参数的影响分析[J]. 测井技术,2006,30(6):503-505.
WAN Jinbin, DU Huanhong, SUN Baodian, et al. Undersaturation effects on electrical experimental parameters of core with low porosity and low permeability [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(6): 503-505.
- [5] 李奎周,葛新民,汪海龙,等. 基于实验条件下的低孔低渗岩心饱和度指数影响因素研究[J]. 特种油气藏,2011,18(3):35-38.
LI Kuizhou, GE Xinmin, WANG Hailong, et al. Study on influence factors of saturation index of low porosity and permeability cores under experiment condition [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 35-38.
- [6] 王宪刚,任晓娟,张宁生,等. 低渗透率气藏岩石电性参数特征及影响因素[J]. 测井技术,2010,34(1):6-8.
WANG Xiangang, REN Xiaojuan, ZHANG Ningsheng, et al. On rock electrical parameters characteristics in low-permeability gas reservoir and its influential factors [J]. Well Logging Technology, 2010, 34(1): 6-8.
- [7] 李新. 用气驱减饱和度法测量电阻增大率[J]. 江汉石油学院学报,2003,25:40-41.
LI Xin. Measuring resistive expanding rate with gas driving saturation reducing technique [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25: 40-41.
- [8] 张明禄,石玉江. 复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J]. 石油物探,2005,44(1):21-28.
ZHANG Minglu, SHI Yujiang. On Archie's electrical parameters of sandstone reservoir with complicated pore structures [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(1): 21-28.
- [9] 张进,周改英,杨永刚,等. 低渗透致密砂岩气藏岩电实验研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2009,11(5):18-19.
ZHANG Jin, ZHOU Gaiying, YANG Yonggang, et al. Rock-electric experiment study on low permeability and tight sand gas reservoir [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2009, 11(5): 18-19.
- [10] 俞军,耿昕,李晓辉. 低渗透油藏岩电实验方法改进及应用效果[J]. 测井技术,2006,30(5):394-396.
YU Jun, GENG Xin, LI Xiaohui. Improved rock resistivity measurement method in low permeable reservoir and its application [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(5): 394-396.
- [11] 王黎,孙宝佃,沈爱新,等. 某油田低孔隙度低渗透率泥质砂岩储层岩电实验及应用[J]. 测井技术,

- 2005 29(2): 91-94.
- WANG Li, SUN Baodian, SHEN Aixin, et al. On application of rock electricity parameters of shaly sand reservoir with low-porosity and permeability, X Field [J]. Well Logging Technology, 2005 29(2): 91-94.
- [12] 赵杰, 姜亦忠, 俞军. 低渗透储层岩电实验研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004 23(2): 61-63.
- ZHAO Jie, JIANG Yizhong, YU Jun. Electricity experiment study of low-permeability reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004 23(2): 61-63.
- [13] 钟蕴紫, 孙耀庭, 张俊杰, 等. 低孔隙度低渗透率岩心水驱油岩电实验研究 [J]. 测井技术, 2005 29(5): 449-452.
- ZHONG Yunzi, SUN Yaoting, ZHANG Junjie, et al. Rock electricity mechanism experiments on low permeability and low porosity cores in water-displacing-oil process [J]. Well Logging Technology, 2005 29(5): 449-452.
- [14] 中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所. SY/T 5346-2005 岩石毛管压力曲线的测定 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [15] 韩学辉, 李峰弼. 一种用于半渗透隔板法毛管压力电阻率联测的夹持器: 中国 201220249149. X [P]. 2012-12-05.
- [16] 韩学辉, 李峰弼, 杨龙, 等. 岩心电阻测量夹持器: 中国 201020213137. 2 [P]. 2011-04-20.
- [17] 韩学辉, 杨龙, 王洪亮, 等. 一种实用的 CO₂ 溶解气驱岩心洗油方法 [J]. 石油实验地质, 2013 35(1): 111-114.
- HAN Xuehui, YANG Long, WANG Hongliang, et al. A practical core cleaning method based on CO₂ dissolved gas drive [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1): 111-114.
- [18] 韩学辉, 李峰弼, 唐俊, 等. 一种二氧化碳溶解气驱岩心洗油仪: 中国 201120434212. 2 [P]. 2012-06-13.
- [19] 韩学辉, 李峰弼, 郭俊鑫, 等. 一种岩心抽真空加压饱和装置: 中国 201120434183. X [P]. 2012-07-04.
- (编辑 修荣荣)