

鄂尔多斯盆地致密砂岩气储层饱和度测井评价方法

陈雨龙^{1,2}, 张冲^{1,2}, 朱林奇², 刘敬强², 程媛², 郭聪²

1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100
2. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 430100

摘要 以鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密砂岩气储层为例, 研究了其饱和度测井评价方法。宏观上基于岩屑石英砂岩及岩屑砂岩, 微观上基于残余粒间孔及溶蚀-粒间孔, 结合岩样薄片显微分析资料、岩电试验资料以及网络模型数值模拟结果, 分析获得致密气储层的导电规律: 地层因素 F 、孔隙度 ϕ 与电阻率指数 I 、含水饱和度 S_w 的关系由于岩性及孔隙类型的不同而存在差异, 岩屑砂岩因其岩屑成分及孔隙类型的复杂性, 增加了岩石的导电难度, 在同等条件下, 地层因素及电阻率指数均高于岩屑石英砂岩; 电阻率指数与含水饱和度呈现指数关系, 而非 Archie 模型的乘幂关系。在此基础上, 分类型建立了可变胶结指数 (m) 的改进 Archie 模型, 并应用于石盒子组致密气储层饱和度测井评价, 结果显示饱和度计算值的绝对误差小于 5%, 验证了该测井评价方法的实用性。

关键词 致密砂岩气储层; 含水饱和度; 导电规律; 改进 Archie 模型

饱和度评价是油气储层定量评价的核心^[1], 计算饱和度最常用方法是测井解释^[2], 基本依据为经典 Archie 模型^[3]。随着非常规油气的勘探开发, 致密砂岩气储层所占比例越来越高, 然而经典 Archie 模型是基于中高孔渗储层试验提出的, 对于致密砂岩气储层则不太适用。致密砂岩气储层计算饱和度值, 一般采取两种方法, 一是重新建立与之对应的饱和度方程, 但难度很大; 二是在对储层导电规律认识基础上, 对已有的饱和度模型进行改进或修正, 从而较好地控制饱和度计算精度^[4]。

与常规储层相比, 致密砂岩气储层由于孔渗很低、岩性复杂、沉积/成岩作用强, 使得孔隙类型多样、结构复杂、次生孔隙较发育、孔径级差大、非均质性强^[2,5-6], 导致其导电规律比较复杂。本文以鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密砂岩气储层为例, 在分析储层导电规律的基础上, 研究适用于该区域致密砂岩气储层饱和度测井评价的改进 Archie 模型。

1 区域概况

鄂尔多斯盆地某区域, 构造上属于鄂尔多斯盆地晋西扰褶带。研究区内上古生界二叠系发育有多个层系, 石盒子组是主要的工业天然气储层之一。依据石盒子组 523 块岩样物

性分析和 85 块岩样薄片显微分析资料统计, 储层岩性为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩(图 1), 其中岩屑以火山岩与火山碎屑岩为主, 其次有沉积岩及变质岩, 其余为少量的泥化碎屑、绿帘石、云母、钙化碎屑、副矿物等(图 2); 孔隙度主要分布区间为 3%~12%, 平均 7.13%, 渗透率主要分布区间为 $0.03 \sim 1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.56 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于致密砂岩气储层(图 3); 孔隙类型主要发育残余粒间孔和溶孔(粒间溶孔和溶蚀粒间孔), 有少量晶间孔发育, 次生孔隙较发育(图 4)。

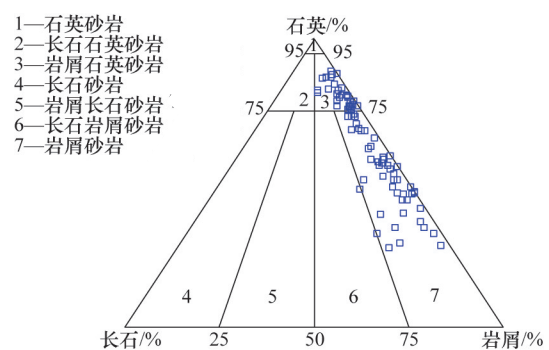


图 1 致密气储层岩性

Fig. 1 Lithology analysis of tight gas reservoir

收稿日期: 2015-07-08; 修回日期: 2015-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41404084); 湖北省自然科学基金项目(2013CFB396); 国家科技重大专项(2013E-3809)

作者简介: 陈雨龙, 硕士研究生, 研究方向为复杂储层测井解释与应用, 电子信箱: cylogging@163.com; 张冲(通信作者), 副教授, 研究方向为复杂储层测井解释理论与方法, 电子信箱: yzlogging@163.com

引用格式: 陈雨龙, 张冲, 朱林奇, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩气储层饱和度测井评价方法[J]. 科技导报, 2016, 34(11): 90-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.11.014

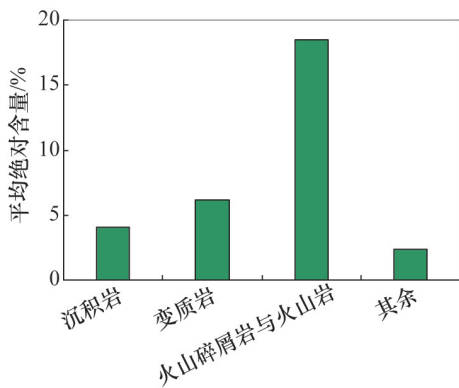


图2 致密气储层岩屑成分

Fig. 2 Cuttings analysis of tight gas reservoir

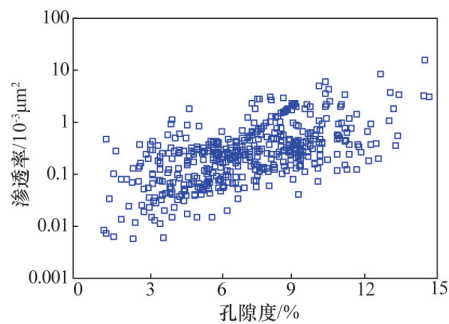


图3 致密气储层孔渗关系

Fig. 3 Porosity-permeability of tight gas reservoir

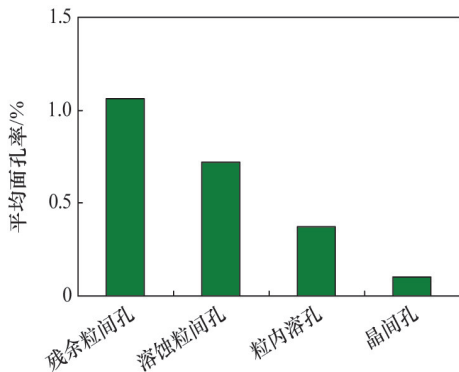


图4 致密气储层孔隙类型

Fig. 4 Pore type analysis of tight gas reservoir

2 致密气储层的导电规律

在岩性复杂、低孔低渗的致密砂岩气储层,岩电关系具有很强的非 Archie 现象^[7-15]。针对鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密砂岩气储层饱和度测井评价问题,要建立适用于该区域致密砂岩气储层的饱和度模型,首先要研究该地区储层的导电规律。研究数据来源于该区域 56 块岩样薄片分析和岩电试验资料。

对于岩样薄片的分析发现,该区域岩屑砂岩孔隙类型以溶孔为主,岩屑石英砂岩以残余粒间孔为主,两者具有很好的对应关系(图 5)。依据薄片分析资料,将岩电数据分为两类,一类为岩屑石英砂岩,孔隙以残余粒间孔为主,另一类为

岩屑砂岩,孔隙以溶孔为主。宏观上基于岩性,微观上基于孔隙类型,对储层导电规律进行研究。

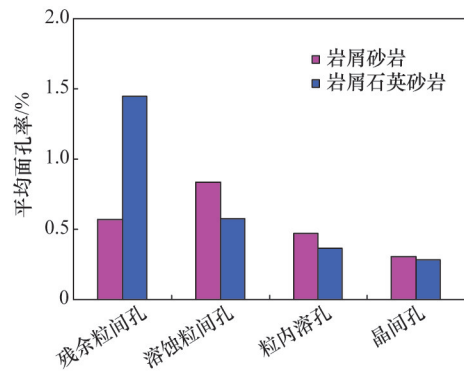


图5 致密气储层不同岩性的孔隙类型

Fig. 5 Porosity-permeability of different lithology of tight gas reservoir

2.1 地层因素与孔隙度的关系

地层因素 F 与孔隙度 ϕ 之间的关系如图 6 所示。由图 6 可知,地层因素和孔隙度依据岩性可分为 I、II 2 类不同变化趋势,且在相同孔隙度情况下, I 类的胶结指数 m 小于 II 类。

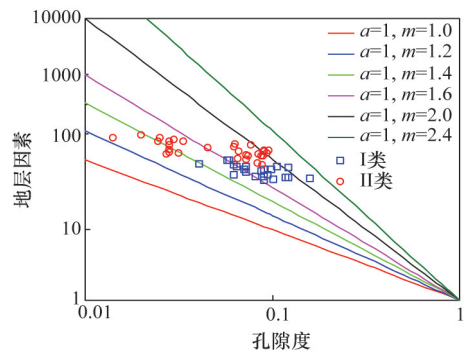


图6 致密气储层地层因素与孔隙度关系

Fig. 6 Formation factor and porosity of tight gas reservoir

岩屑砂岩由于岩屑含量较高,成分不稳定,沉积、成岩作用强,特别是后生成岩作用,导致其孔隙结构变得复杂,次生孔隙发育,孔径变差,小孔隙增加。岩屑石英砂岩由于稳定成分石英含量高,沉积、成岩相对较弱,大孔隙的残余粒间孔保存较好。在地层水矿化度不变的情况下,次生孔隙由于复杂的孔隙结构以及较多的小孔隙,增加了岩石导电难度。

2.2 电阻率指数与含水饱和度的关系

电阻率指数 I 与含水饱和度 S_w 的关系如图 7 所示。由图 7 可以发现,电阻率指数与含水饱和度关系依据岩性不同有一个明显分叉现象,在相同含水饱和度情况下, I 类的饱和度指数 n 同样小于 II 类。

次生孔隙越发育,孔隙结构越复杂,即小孔隙的分布越广及其所占比例越高,岩石的导电性越差。同样,由于岩屑石英砂岩和岩屑砂岩的特点,在地层水矿化度及含水饱和度

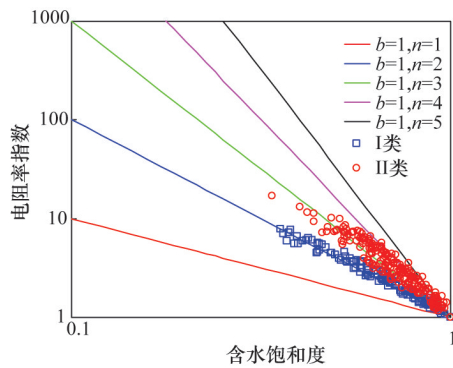
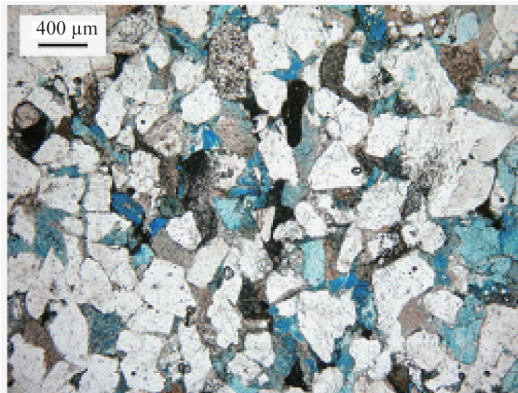


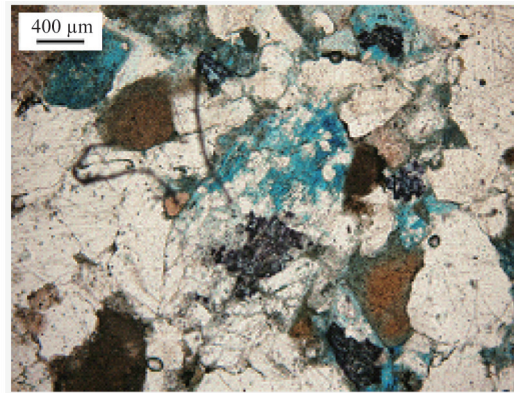
图7 致密气储层电阻率指数与含水饱和度关系
Fig. 7 Resistivity index and water saturation of tight gas reservoir

不变的情况下,岩屑砂岩由于次生孔隙较发育,相对于以残余粒间孔为主要孔隙空间的岩屑石英砂岩的导电能力要弱很多。

进一步研究电阻率指数 I 与含水饱和度 S_w 的关系,发现



(a) 残余粒间孔薄片



(b) 溶蚀孔薄片

图8 致密气储层岩样薄片显微照片

Fig. 8 Microscopic analysis of microscope image of tight gas reservoir

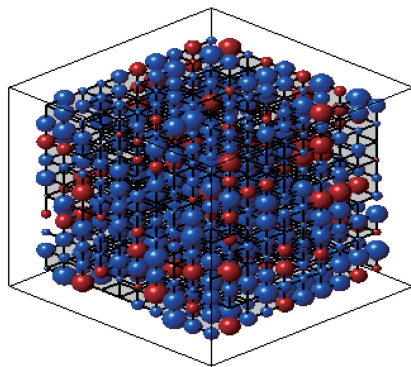


图9 数值模拟三维非规整网络
Fig. 9 Numerical simulation of 3D irregular network

在中含水饱和度和高含水饱和度情况下,两者变化趋势不一致,在高含水饱和度时,满足 Archie 模型整体趋势,而在中含水饱和度时电阻率指数偏向饱和度轴, $I-S_w$ 整体呈非乘幂关系,可能为指数关系^[16]。由于缺少特低含水饱和度分析数据,难以准确描述 $I-S_w$ 关系,因此,选择建立在有效介质及逾渗理论基础上的网络模型进行数值模拟。采用 Wang 等^[17] 的模型,分别模拟孔渗相当条件下的岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,也得到不同孔隙类型的电阻率指数随着含水饱和度不同而变化的规律。

岩屑砂岩和岩屑石英砂岩由于岩石成分与含量的不同,导致沉积、成岩作用强弱及孔隙类型不同,在数值模拟中具体表现为喉道长度、水膜厚度及配位数的不同,如图8所示。数值模拟的三维非规整网络如图9所示,主要参数如表1所示。两种孔隙类型模拟结果与岩电试验结果如图10所示,两者具有很好的一致性,说明了该模型模拟结果的可靠性,同时也说明电阻率指数与含水饱和度呈指数关系,而非乘幂关系。

表1 数值模拟的主要参数

Table 1 Main parameters of numerical simulation

岩样	喉道长度/ μm	偏态	水膜厚度/ μm	配位数
岩屑砂岩	6.192	0.27	0.005	3.50
岩屑石英砂岩	1.141	0.27	0.010	4.50

天然气的润湿性较石油差很多,因而气层中的水更容易附着在岩石表面,表现为中等偏强的亲水特征。含水饱和度的不同,反映在流体的分布状态不同,随着含水饱和度的减小,不导电的油气逐渐占据岩石大孔隙喉道,而导电的水主要存在于小喉道中,此时电阻率主要受孔隙结构的影响,这种状况在致密储层中更为明显。在高含水饱和度情况下,水分布在大孔隙中,导电路径也是主要沿着大孔隙行进,导电

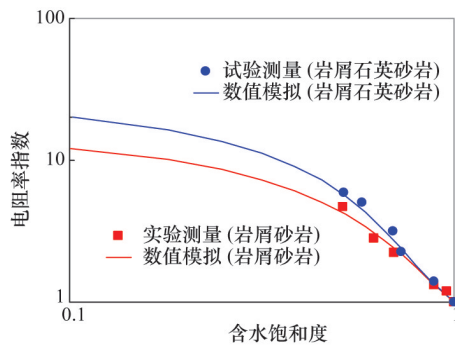


图 10 数值模拟结果与试验结果比较

Fig. 10 Comparison of numerical simulation results and experimental results

特性与 Archie 模型一致;在中低含水饱和度情况下,水主要黏附在岩石表面或者小孔隙中,导电路径变得复杂,增加了岩石导电的难度,使得电阻率指数逐渐偏向饱和度轴。由图 10 可以看出,在含水饱和度大于 50% 情况下,电阻率指数与含水饱和度的关系基本满足 Archie 模型,但在含水饱和度小于 50% 情况下,电阻率指数开始偏向饱和度轴,并随着含水饱和度降低其偏向越明显。

3 致密气储层的饱和度模型

3.1 改进 Archie 模型

根据鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密气储层的导电规律,将该区域岩电关系按照岩性(孔隙类型)分为两类,建立相对应的饱和度模型。

首先,根据 56 块岩样的岩电试验资料,利用 Archie 公式求取胶结指数,即

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1)$$

式中, R_o 为饱和水地层电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; ϕ 为孔隙度(小数); a 为岩性系数; m 为胶结指数。

相对于 Archie 模型中的其他参数, m 的变化对饱和度的计算精度影响更大^[3,18], 因此获得准确的胶结指数对于计算饱和度显得尤为重要。令 $a=1$, 求出每块岩样的胶结指数 m , 分岩性(孔隙类型)建立胶结指数与孔隙度拟合关系如图 11 所示。

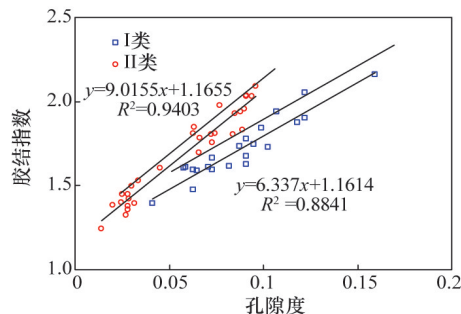


图 11 胶结指数与孔隙度的拟合

Fig. 11 Relationship between resistivity index and water saturation

然后,根据电阻率指数 I 与含水饱和度 S_w 的关系,对 Archie 模型进行改进,即

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b_c}{e^{n_c \cdot S_w}} \quad (2)$$

式中, R_t 为视地层电阻率, $\Omega \cdot m$; b_c 、 n_c 为改进的饱和度系数(对应于 Archie 模型中的饱和度系数 b 、 n)。

分岩性(孔隙类型)建立如图 12 所示的电阻率指数与含水饱和度的关系,求得饱和度系数 b_c 、 n_c 。

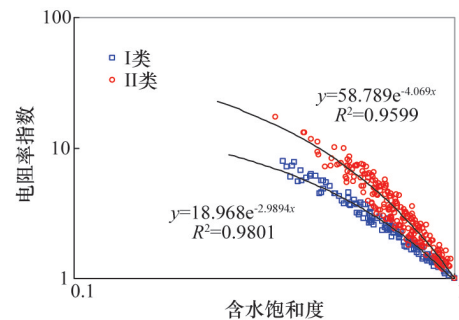


图 12 电阻率指数与含水饱和度关系

Fig. 12 Relationship between resistivity index and water saturation

最终建立适合于鄂尔多斯盆地致密砂岩气储层的变胶结指数 m 的改进 Archie 模型为

$$S_w = \frac{1}{n_c} \ln \left(\frac{a \cdot b_c \cdot R_w}{R_t \cdot \phi^m} \right) \quad (3)$$

$$\text{I类 } m = 6.337\phi + 1.1614 (a = 1), n_c = 2.9894, b_c = 18.968 \quad (4)$$

$$\text{II类 } m = 9.0155\phi + 1.1655 (a = 1), n_c = 4.069, b_c = 58.789 \quad (5)$$

3.2 岩性识别

应用改进 Archie 模型对致密砂岩气储层饱和度进行测井解释,岩性识别是一个关键。鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密砂岩气储层的岩屑主要为火山岩及火山碎屑岩,其自然伽马比砂岩较高,其光电吸收指数与地层中各种元素的原子序数有关,因此可用岩屑的自然伽马及光电吸收指数来指示储层岩性。根据 85 块岩样薄片分析资料和测井资料,利用自然伽马 GR 和光电吸收指数 P_e 建立岩屑石英砂岩和岩屑砂岩的识别模板(图 13),其中 $GR > 72$ 、 $P_e > 2.1$ 为岩屑砂岩; $GR < 72$ 、 $P_e < 2.1$ 为岩屑石英砂岩。

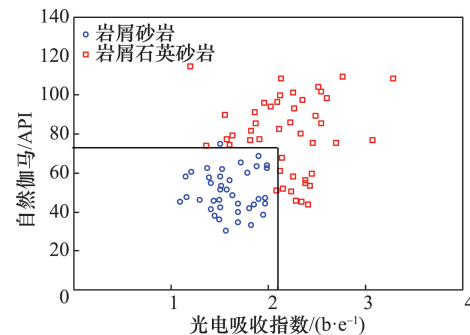


图 13 致密气储层岩性识别模板

Fig. 13 Recognition of lithology of tight gas reservoir

3.3 实例分析

依据建立的改进 Archie 模型,并以 Archie 模型作为对比,编制解释程序并挂载在相应的测井解释平台上,对鄂尔多斯盆地某区域石盒子组致密砂岩气储层进行饱和度测井解释处理,其中 A 井部分层段的处理结果如图 14 所示。

图 14 中,第 1~3 列分别为岩性测井、孔隙度测井、电阻率测井的原始测井曲线,第 4 列为深度,第 5~7 列依次为测井解

释的孔隙度曲线、饱和度曲线及岩性剖面,第 8 列为解释结论。由第 6 列可以看出,改进 Archie 模型计算的饱和度与岩样饱和度吻合,明显优于 Archie 模型计算的饱和度。改进 Archie 模型计算值、Archie 模型计算值与 27 块岩样饱和度数据的比较如图 15 所示,可以看出改进 Archie 模型计算的饱和度值绝大多数在误差范围(5%)之内,验证了改进 Archie 模型的可靠性。

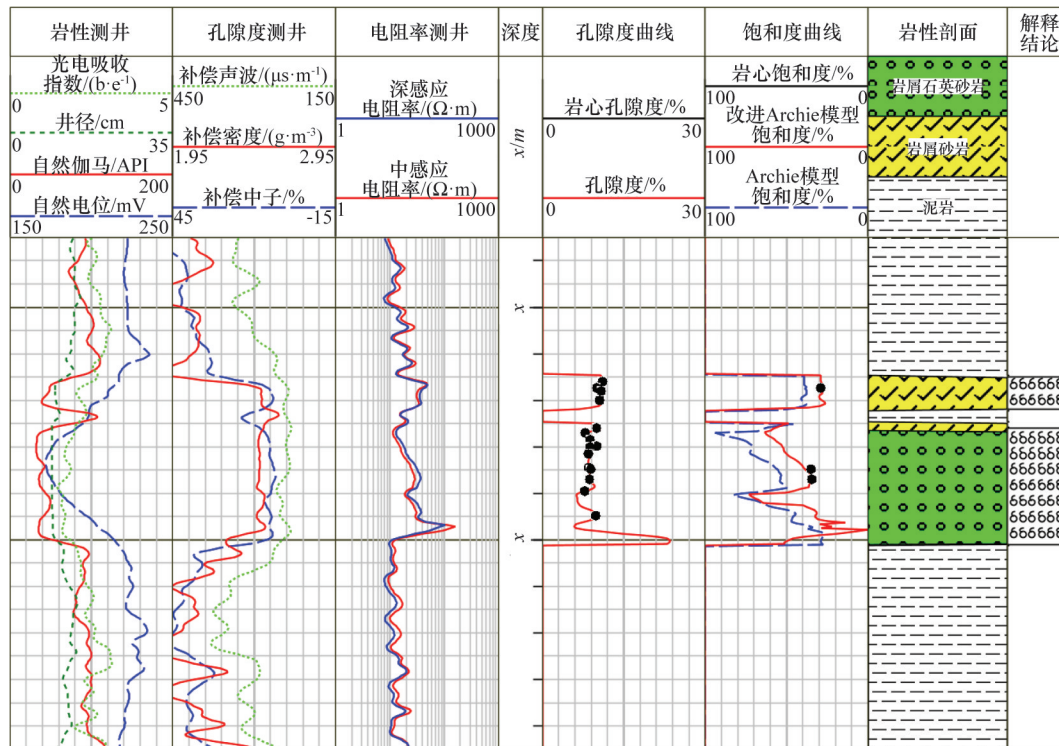


图 14 A 井部分层段处理结果

Fig. 14 Results figure in well A

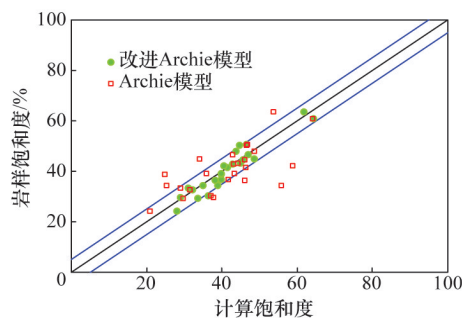


图 15 计算饱和度与岩样饱和度对比

Fig. 15 Contrast the result between calculating and core saturation

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地某区域致密砂岩储层的岩性为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,2 种岩性的孔隙类型差异较大,岩屑砂岩

以溶蚀孔隙为主,岩屑石英砂岩以残余粒间孔隙为主。2 种岩性的胶结指数 m 与孔隙度具有明显的线性关系,而电阻率指数与含水饱和度呈现凸形关系。在胶结指数 m 与孔隙度的线性关系中,岩屑砂岩的斜率比岩屑石英砂岩大。在电阻率指数与含水饱和度的凸形关系中,相同含水饱和度下,岩屑砂岩的电阻率指数比岩屑石英砂岩大。

2) 根据对鄂尔多斯盆地某区域致密砂岩气储层导电规律的认识,建立了改进 Archie 模型,并应用于该区域勘探井的饱和度评价,将计算结果与岩样分析饱和度比较,改进 Archie 模型计算结果的绝对误差控制在 5% 以内,精度满足储层计算的要求。

参考文献 (References)

- [1] 孙建孟, 王克文, 李伟. 测井饱和度解释模型发展及分析[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 101-107.
Sun Jianmeng, Wang Kewen, Li Wei. Development and analysis of logging saturation interpretation models[J]. Petroleum Exploration and

- Development, 2008, 35(1): 101-107.
- [2] 罗少成, 成志刚, 林伟川, 等. 复杂孔隙结构储层变岩电参数饱和度模型研究[J]. 测井技术, 2015, 39(1): 43-47.
Luo Shaocheng, Cheng Zhigang, Lin Weichuan, et al. Research on saturation model of variable rock-electric parameters for reservoirs with complicated pore structures[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(1): 43-47.
- [3] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [4] 中国石油勘探与生产分公司. 低孔低渗油气藏测井技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 110-120.
PetroChina Exploration & Production Company. Technique and application of low porosity and low permeability oil and gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2009.
- [5] 张龙海, 周灿灿, 刘国强, 等. 孔隙结构对低孔低渗储集层电性及测井解释评价的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 671-676.
Zhang Longhai, Zhou Cancan, Liu Guoqiang, et al. Influence of pore structures on electric properties and well logging evaluation in low porosity and permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 671-676.
- [6] 孙小平, 石玉江, 姜英昆. 复杂孔隙结构储层含气饱和度评价方法[J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 41-44.
Sun Xiaoping, Shi Yujiang, Jiang Yingkun. Method of evaluating gas saturation in the reservoir with complicated pore structures[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3): 41-44.
- [7] Glover P W J. A generalized Archie's law for n-phases[J]. Geophysics, 2010, 75(6): E247-E265.
- [8] Chen X, Kuang L C, Sun Z C. Archie parameter determination by analysis of saturation data[J]. Petrophysics, 2002, 43(2): 103-107.
- [9] Haro C. The equations archie forgot: Anisotropy of the rocks[C]. Society of Petroleum Engineers, Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, France, October 4-7, 2009.
- [10] Montaron B. Connectivity theory—a new approach to modeling non-Archie rocks[J]. Petrophysics, 2009, 50(2): 102-115.
- [11] Kumar M, Senden T J, Sheppard A P. Probing the Archie's exponent under variable saturation conditions[J]. Petrophysics, 2011, 52(2): 124-134.
- [12] 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 92-134.
Zeng Wenchong. Logging evaluation technology for hydrocarbon reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 92-134.
- [13] 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.
- [14] 李霞, 赵文智, 周灿灿, 等. 低孔低渗碎屑岩储集层双孔隙饱和度模型[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 82-91.
Li Xia, Zhao Wenzhi, Zhou Cancan, et al. Dual-porosity saturation model of low-porosity and low-permeability clastic reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 82-91.
- [15] 陈玉凤, 李栋梁, 梁德青, 等. 南海沉积物天然气水合物饱和度与电阻率的关系[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 504-512.
Chen Yufeng, Li Dongliang, Liang Deqing, et al. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 504-512.
- [16] 岳文正, 陶果. 饱和多相流体岩石导电规律的数值实验[J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 39(1): 154-160.
Yue Wenzheng, Tao Guo. Numerical simulation of electrical properties of rock saturated with multiphase fluids[J]. Science in China: Earth Sciences, 2008, 39(1): 154-160.
- [17] Wang Y M, Sharma M M. A network model for the resistivity behavior of partially saturated rocks[C]. The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts 29th Annual Logging Symposium Transactions, San Antonio, Germany, June 5-8, 1988.
- [18] Fleury M, Boyd D. Water saturation from NMR, resistivity and oil base core in a heterogeneous middle east carbonate reservoir[J]. Petrophysics, 2006, 47(1): 60-73.

Saturation log evaluation method in the Ordos Basin tight sandstone gas reservoir

CHEN Yulong^{1,2}, ZHANG Chong^{1,2}, ZHU Linqi², LIU Jingqiang², CHENG Yuan², GUO Cong²

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Education Ministry of Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. Geophysics and Oil Resource Institute, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract As a saturation logging evaluation problem, the conductance mechanism is studied with a tight gas reservoir in the Shihezi formation in Ordos Basin as an example, based macroscopically on the lithic quartz sandstone and the lithic sandstone, microscopically on the remnant intergranular pore and the corrosion intergranular pore, and combined with the thin section analysis data and the litho-electric experiment data. The relationships between the formation factor (F) and the porosity (φ), the resistivity index (I) and the water saturation (S_w) are affected by the lithology and the pore type. The conductance of the lithic sandstone is decreased because of the complexity of the mineral and pore type. Under the same condition, the formation factor and the resistivity index of the lithic sandstone are greater than those of the lithic quartz sandstone. The relationship between the resistivity index and the water saturation is exponential rather than as a specific power relation based on the numerical simulation of the network model. On the basis of the conductance mechanism, a modified Archie model of changeable cementation index is built for different lithologies and pore types. Applying the saturation model to this area, its practicability is confirmed.

Keywords tight sandstone gas reservoir; water saturation; conductance mechanism; improved Archie model

(责任编辑 韩晓明)