

文章编号: 0253-9985(2002)04-0364-04

阿尔奇公式与储层孔隙结构的关系

李秋实¹, 周荣安², 张金功³, 吴汉宁³, 李学森⁴

(1. 西北大学地质系, 陕西西安 710069; 长庆石油勘探局博士后工作站, 陕西西安 710021; 石油大学博士后流动站, 北京 102200; 2. 长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710021; 3. 西北大学地质系, 陕西西安 710069; 4. 胜利油田物探研究院博士后科研工作站, 山东东营 257022)

摘要: 通过对陕 141 井区上古生界山 2 储层的毛管压力曲线和岩电实验资料的研究, 认为阿尔奇公式中的电阻率因素 F 不但与储层孔隙度、孔隙的曲折度有关, 而且与储层的孔喉比有关, 当孔隙度一定时, 孔喉比越小, F 值越低; 地层电阻率指数 n 值的大小主要受储层孔喉比的影响, 当储层为孔喉比等于 1 的管状孔时, n 等于 1, 值最小。孔喉比越大, n 值越大。其原理是当孔隙饱含油时, 不仅导体截面减小, 而且导体长度增加。

关键词: 石英; 孔隙结构; 成岩作用; 岩电试验; 压汞曲线; 电阻率指数

第一作者简介: 李秋实, 男, 29 岁, 博士后, 油气地质

中图分类号: P618.130.2⁺1 文献标识码: A

阿尔奇公式作为计算含油饱和度的经典公式, 一直在测井解释中发挥着重要的作用, 但阿尔奇公式与储层孔隙结构的关系, 一直未能解决。通过对陕 141 井区山 2 储层毛管压力曲线和岩电实验资料的研究, 建立了它们之间的关系, 并给阿尔奇公式赋予了新的含义, 又为孔隙结构的研究提供了新的方法。

1 问题的提出

陕 141 井区属长庆气田东区, 其上古生界的山

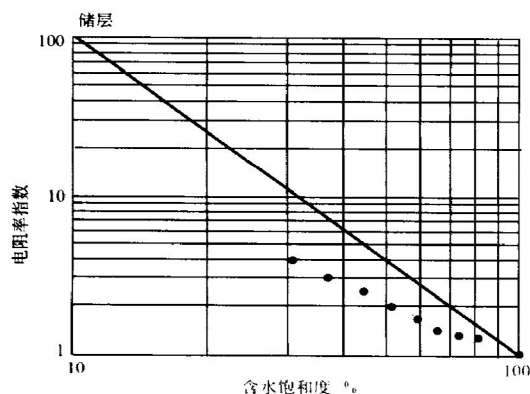


图 1 陕 211 井山 2 储层电阻率指数与含水饱和度关系图

Fig. 1 Correlation between resistivity index and water-bearing saturation in Shan No. 2 reservoir of Shaan No. 211 well

(岩芯号= 189, 深度= 2 926.2 m, $\Phi= 8.84\%$, $K= 8.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $b= 0.846$, $n= 1.182$)

2 储层埋深 3 000 m 左右, 为石英含量达 80% 以上的纯石英砂岩。该储层经过了强烈的成岩作用, 储层孔隙结构发生了很大的变化, 岩电实验的饱和度指数 n 值为 1.1~1.3, b 值为 0.9~1.0 (图 1), 压汞曲线平台平缓 (图 2), 物性表现为低孔隙度 (7.78%~10.48%), 高渗透率 ($6.65 \times 10^{-3} \sim 33.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) (图 3), 出现了罕见的孔喉比接近于 1 的管状孔储层。

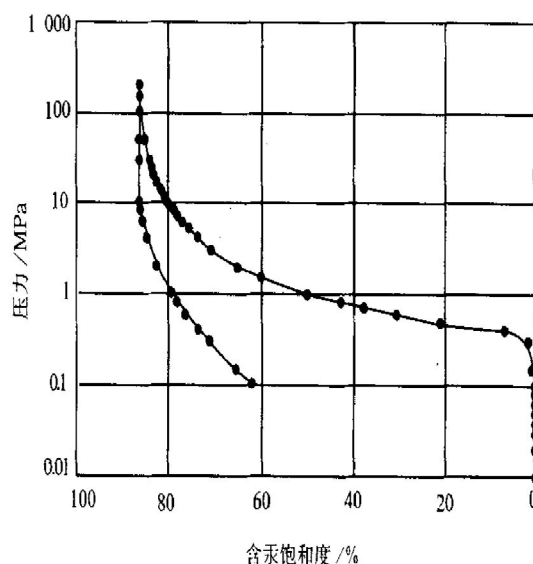


图 2 陕 211 井山 2 储层压汞曲线

Fig. 2 Mercury-injection curve of Shan No. 2 reservoir in Shaan No. 211 well

(岩芯号= 189, 深度= 2 926.2 m, $\Phi= 8.84\%$, $K= 8.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $b= 0.846$, $n= 1.182$)

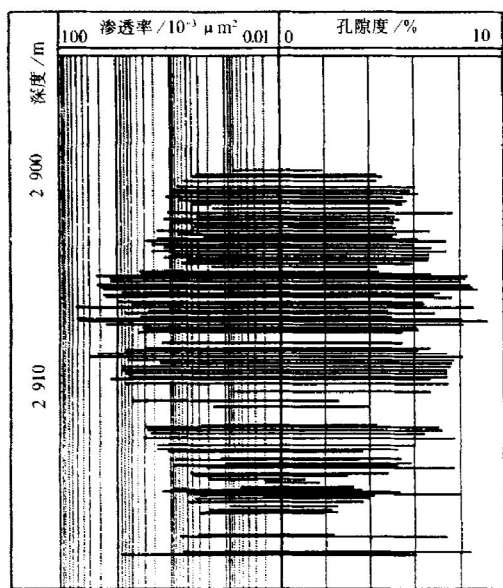


图3 陕211井孔隙度-渗透率剖面图

Fig. 3 section of porosity and permeability in Shaan No. 211 well

2 电阻率与孔隙结构

目前描述储层孔隙结构的方法有两种:一是实验室方法,即常规的毛管压力曲线^[1],它是研究储层孔隙结构的主要方法,反映的是储层喉道的大小和分选程度,分选越好,平台越平缓;二是测井方法,即核磁共振成像测井技术^[2],它的 T_2 分布实际上是储层孔径大小的分布, T_2 值大,孔径大, T_2 值小,孔径小。以上两种方法在储层研究中都起着很重要的作用,但都存在无法确定储层孔喉比这一重要参数的缺点,而阿尔奇公式中的各个参数,与储层孔喉比这一参数有着密切的关系。

根据地层电阻率的体积模型,阿尔奇公式中的电阻率因素公式为^[3,4]

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\Phi} \left(\frac{L_w}{L} \right)^2 \quad (1)$$

式中 F 为地层电阻率因素; R_o 为 100% 含水地层电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; Φ 为岩石孔隙度, %。

上式说明, F 与 Φ 成反比, 并与储层孔隙曲折度 (L_w/L) 成正比, 这在很多论著中被认为是正确的。但分析认为, F 值不但与孔隙的曲折度有关, 而且与孔喉比有关, 当地层孔隙度一定时, F 值与孔喉比成正比, 孔喉比为 1 时的 F 值最小。假设孔隙与喉道的长度相等, 孔隙截面积为 S_1 , 喉道截面积为 S_2 时, 它的 F 值是孔喉比为 1 时的

$\frac{(S_1 + S_2)^2}{4S_1S_2}$ 倍。因此 F 为

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\Phi} \left(\frac{L_w}{L} \right) \left(\frac{\gamma_\Phi}{\gamma_p} \right)^l \quad (2)$$

式中 L 为样品长度; L_w/L 为孔隙的曲折度; γ_Φ/γ_p 为孔喉半径比; S_i 为喉道截面积, l 为系数。

而 (L_w/L) , γ_Φ/γ_p 与渗透率关系最好且成反比, 所以 F 与 K 成反比。因此 F 值的计算公式近似地表示为

$$F = \frac{R_o}{R_w} \approx \frac{a}{\Phi^b K^l} \quad (3)$$

式中 a, m, l 为系数。

经过大量的数据证明, 渗透率值的引进, 增强了阿尔奇公式应用时的稳定性。

3 影响 n 值的因素

阿尔奇公式中, 一般认为 n 值接近 2, 使用时常取值为 2, 而在该区, 经大量的岩电实验分析, n 值在 1.1~1.3 之间, 其原因是出现了近似于管状孔的孔隙结构。

影响 n 值的主要因素是什么? 根据导体电阻率计算公式

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4)$$

式中 ρ 为导体的电阻率, 为常数; L 为导体的长度, m ; S 为导体的截面积, m^2 。 R 的大小与 L 成正比, 与 S 成反比。阿尔奇公式为

$$R_t = R_o \frac{b}{S_w^n} = R_o \frac{b S_w^{1-n}}{S_w} \quad (5)$$

式中 S_w 为地层含水饱和度, %。其中 $R_o = R_w \frac{a}{\Phi^b K^l}$, 对某一地层而言, R_o 为一定值, 所以决定地层电阻率 R_t 的因素是 S_w^n 和 b 。当地层为孔喉比等于 1 的管状孔、饱含水时

$$S_w = L(S_1 + \dots + S_i + \dots + S_n) \quad \text{且 } S_1 \geq \dots \geq S_i \geq \dots \geq S_n$$

$$R_t = R_o \frac{L}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{L^2}{S_w} \quad (6)$$

L 为定值, R_t 与 S_w 成反比, 这时 n 等于 1。

对于球形孔(图4), 当它的半径为 r , 球体内充满电阻率为 R_w 的液体时, 根据电场理论, 在一个半径为 h 的截面上, 应该是一个等势面, 它的电阻为

$$R_t = R_w \int_r^h \frac{dl}{\pi [r^2 - (r-l)^2]} \quad (7)$$

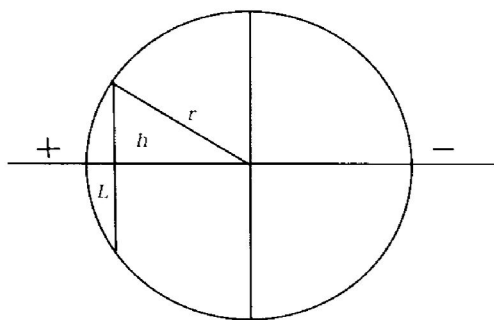


图4 球形孔电阻率计算模型

Fig. 4 Calculating pattern for resistivity of balled pores

当球体内有油滴时, 设它的形状同样为球形。位于球体的中心, 随着油滴体积的增大, 电阻率也随之增大, 这时阿尔奇公式中的 n 等于 2。实际中, 孔隙的形状一般比球形孔要扁, 故 n 值一般小于或接近 2, 只有当岩石颗粒成熟度低, 以点接触为主, 孔隙表面很不规则, 凹凸不平时, n 值才大于 2, 这就是为什么在阿尔奇公式中 n 值接近 2 的原因。因为在阿尔奇公式中, S_w 代表的是导电体截面的变化参数, S_w^{n-1} 值代表的是导电体长度的变化参数。

通过上面分析认为, 电阻率指数 n 值与孔隙度、渗透率有一定的关系。在以粒间孔为主的储层, 孔隙度高、渗透率低时, n 值低, 主要原因是岩石颗粒细, 分选好, 孔喉比小; 孔隙度低、渗透率高时, n 值高, 原因是岩石颗粒粗, 在大的孔隙中, 常常有小的颗粒充填, 岩石颗粒分选也相应变差。而对于那些经过强烈压实和溶解作用的储层, 孔喉比小, 所以 n 值也相应地低。 n 值的变化规律是, 随着孔渗比由大到小, n 值由低到高再到低。当然, n 值的大小也与测量时 S_w 的值有关。图 5 是不同渗

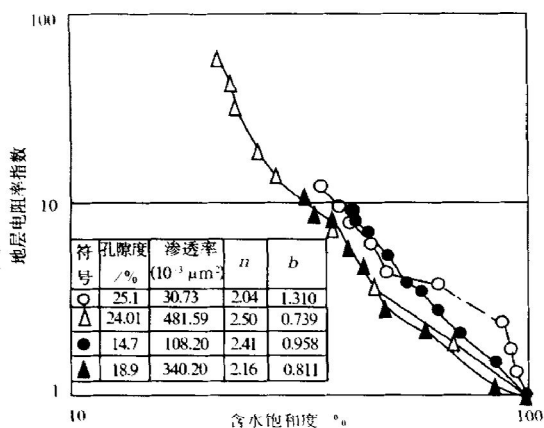
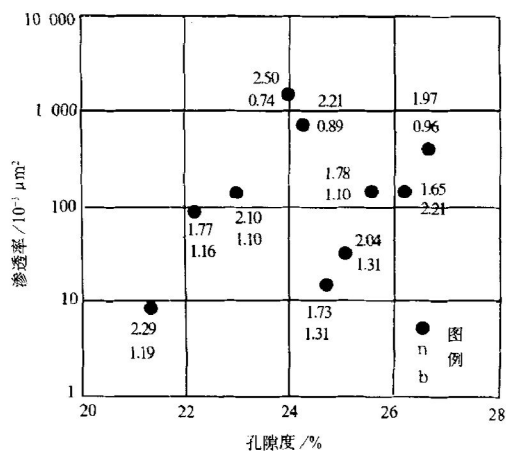


图5 电阻率指数与含水饱和度关系图

Fig. 5 Correlation between resistivity index and water-bearing saturation

透率、孔隙度的电阻率指数与含水饱和度关系图, 图 6 是某油田孔隙度、渗透率与 n, b 关系图。说明了阿尔奇公式中的 n, b 值与孔隙度、渗透率的关系。

图6 X 油田孔隙度、渗透率与 n, b 关系图Fig. 6 Correlation of porosity and permeability to n and b

4 结论

(1) 陕 141 井区上古生界山 2 储层特殊的孔隙结构, 使储层性质发生了质的变化, 表现为压汞曲线平台平缓, 岩电实验的饱和度指数 n 值为 1.1~1.3, b 值为 0.9~1.0, 物性表现为低孔隙度 (7.78%~10.48%), 高渗透率 ($6.65 \times 10^{-3} \sim 33.58 \times 10^{-3} \mu m^2$), 出现了罕见的管状孔。

(2) 阿尔奇公式中的电阻率因素 F 不但与储层孔隙度、孔隙度的曲折度有关, 而且与储层的孔喉比有关, 孔喉比越小, F 值越低。该区储层的研究, 不仅给阿尔奇公式赋予了新的含义, 并为孔隙结构的研究开辟了新的途径。

(3) 地层电阻率指数 n 值的大小主要受储层孔喉比的影响, 当储层为孔喉比为 1 的管状孔时, n 等于 1 最小, 孔喉比越大, n 值越大。 n 值反映的是储层孔喉比的大小。 n 值的最小值是 1, 一般接近于 2。它是研究储层孔喉的一种重要方法。储层孔喉比是形成高电阻率和低电阻率油层的根本。说明在强成岩作用的岩石中, 也可能存在好的储层。

参 考 文 献

- 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 贾文玉. 成像测井技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 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
- 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

RELATIONS BETWEEN ARCHIE' S FORMULA AND RESERVOIR PORE STRUCTURE

Li Qiushi¹ Zhou Rongan² Zhang Jingong³ Wu Hannin³ Li Xuesen

(1. Department of Geology, Northwest University, Postdoctor Station of Changqing Petroleum Exploration Bureau, Xi'an, Shanxi, Postdoctor Mobile Station of Petroleum University (Beijing); 2. Exploitation Institute of Changqing Oil company Xi'an, Shanxi; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi)

Abstract: It is discovered by the experimental study on Shan-2 Paleozoic reservoir of Shan-141 well area that the resistivity factor F in Archie's Formula is not only related with the porosity and tortuosity of the pore but also related with the throat of the pore as well. When the throat rate = 1, the minimum of n is 1, when the throat becomes larger, n becomes larger accordingly. It is concluded that the smaller the ratio of the pore throat, the lower the Value F is. The size of Value n of the reservoir resistivity index is chiefly effected by the ratio of the pore throat. The theory is that when the pore is full of oil, the layer of the conductor decreases and the length of it increases.

Key words: quartz; pore structure; diagenesis; rock-electric testing; mercury-injection curve; resistivity index

(上接 363 页)

FRACTURE FEATURES OF REVERSED BASIN: TAKING SANZHAO AREA OF SONGLIAO BASIN FOR EXAMPLE

Zhang Li¹ Yue Leping² Yang Yajuan¹ Wang Xiujuan³

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an)

Abstract: Songliao basin has principally experienced extensional and reverse stages. A set of near-NW tension fractures and two sets of oblique shear fractures were chiefly formed in the stage of extensional structure, whereas two sets of near-NE and NW shear fractures and one set of EW spreading fractures were developed in the stage of reverse structure. Fault growth activities could not cease basically until the late Qingshankou Formation. Structural fractures were not well-developed due to sediments in plasticity in the Third-Forth Member of Quantou Formation and Qingshankou Formation in particular. Most of fractures formed in the stage of extensional structure are discovered to be filled with calcite and in inefficient due to prolonged process of diagenesis. During the reverse stage, structural fractures were extensively formed by compressional process because the reservoir in the basin was already in deep diagenesis. Therefore, fractures in Sanzhao area were mainly formed in the reverse stage.

Key word: Reverse structure; fracture; Sanzhao area; Songliao basin