



# Research on the Resistivity Formula of Sandstone Based on Unit Volume Model

Yang Keping, Shao Yanrui, Xie Li, Bai Xinguo, Zhao Ke, Cao Chengcheng

Petrochina Huabei Oilfield Company Tarim Project Department, Renqiu, China

## Email address:

ykbym123@sina.com (Yang Keping)

## To cite this article:

Yang Keping, Shao Yanrui, Xie Li, Bai Xinguo, Zhao Ke, Cao Chengcheng. Research on the Resistivity Formula of Sandstone Based on Unit Volume Model. *Asia-Pacific Journal of Earth Sciences*. Vol. 2, No. 1, 2020, pp. 1-6.

Received: May 31, 2020; Accepted: June 15, 2020; Published: June 28, 2020

**Abstract:** Based on the in-depth analysis of the conductive network of rock and the principle of equivalent resistance, the unit volume model of rock is established. The rock resistivity response equation is derived on the basis of straightening out the relationship between the macropores and the micropores connected with the pore water, and a new rock resistivity response equation is proposed in combination with the regression results of the single rock sample in the logging rock experiment. In this paper, the response equation of rock resistivity is preliminarily proved by the method of inverse proof, and the physical meaning of the parameters of the new formula is analyzed in depth. According to the research knowledge in the field of rock resistivity for many years, the new formula is tested, and the results show that the new formula is in line with the research results in the field. The new formula considers that the rock resistivity and the connected pore water volume are power functions, which solves some unclear problems in the rock resistivity response equation for many years. The parameter of the formula is the intrinsic attribute parameter of rock, which has certain use value. According to the new formula, the formula of calculating reservoir water saturation by using radial resistivity ratio has achieved certain effect in practical application, which shows that the new formula has not only theoretical significance, but also practical application significance, and is worth further promotion and use.

**Keywords:** Rock Resistivity, Connected Water Pore Volume, Response Equation, Derivation Proof, Attribute Parameter

## 基于单位体积模型的砂岩电阻率公式研究

杨克兵, 邵彦蕊, 谢力, 白新国, 赵克, 曹程程

中国石油华北油田塔里木项目部, 任丘, 中国

## 邮箱

ykbym123@sina.com (杨克兵)

**摘要:** 通过对岩石导电网络进行深入分析, 结合等效电阻的原理建立岩石单位体积模型, 在理顺大孔隙与微孔隙连通孔隙水关系的基础上对岩石电阻率响应方程进行推导。依据测井岩电实验单块岩样的回归结果, 提出了一个新的岩石电阻率响应方程, 并对新公式参数的物理意义进行了探讨。根据多年来在岩石电阻率领域研究认识对新公式进行检验, 结果表明新公式符合领域研究成果。新的公式认为岩石电阻率与连通孔隙水体积为幂函数关系, 解决了多年来在岩石电阻率响应方程上一些模糊不清的问题。公式的参数为岩石的固有属性参数, 具有一定的使用价值。依据新公式所推出的使用径向电阻率比值计算储层含水饱和度的公式, 在实际应用中已经取得一定效果, 表明新公式不仅具有理论意义, 而且具有实际应用意义, 值得进一步推广使用。

**关键词:** 岩石电阻率, 连通水孔隙体积, 响应方程, 推导证明, 属性参数

1. 引言

电阻率是用来表示各种物质电阻特性的物理量，某种材料制成的长为1米，横截面积为1平方米的导体的电阻，在数值上等于这种材料的电阻率。它反映物质对电流阻碍作用的属性，与物质的种类有关，受温度影响。也可表述为物质单位体积的电阻，大多数情况，它是物质的一个固有属性参数，在温度一定的条件下具有固定值。但对各种不同的砂岩类物质而言，电阻率不是一个固定值，而是随岩石连通孔隙所含孔隙水、泥质、矿物质等的变化而变化。因为储层连通孔隙所含油、气、水的变化能够影响岩石电阻率的变化，岩石电阻率是评价储层含油饱和度的最关键参数之一。多年来，形成了以阿尔奇公式为代表的计算储层含水饱和度的许多方法 [1-5]，形成了一些评价储层电阻率的模型，例如三水模型等 [6-7]。但是，对砂岩电阻率的导电机理研究及计算公式的推导较为复杂，理论推导证明逻辑并不严密，实际应用中经常有不吻合情况，而且解决不了低阻油层、复杂孔隙储层及水淹层等测井疑难层的评价 [8-11]。所形成的这些含水饱和度计算公式为经验公式，经不起实验数据的反算，如阿尔奇公式用实验数据反算误差有大于20%的，表明这些公式并没有反映岩石导电的本质，并不是真正的岩石导电公式 [12-14]。

因此，继续深入研究砂岩电阻率的响应方程，揭示岩石的导电本质，有助于提高含水饱和度的计算精度，为油气层评价及储量计算提供可靠参数。

2. 岩石电阻率的影响因素分析

岩石是由矿物和孔隙中流体以及胶结物组成，大多数砂岩，当其不含导电液体时，由造岩矿物组成的岩石骨架几乎是不导电的。许多岩石之所以能导电，是因为它们在地下不同程度的具有一定的孔隙，并在其中充填了一定数量的盐水溶液造成的。这些盐溶液由于盐类离解形成了正离子(如 $\text{Na}^+$ ， $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等)和负离子(如 $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ 等)，离子在电场作用下发生运动，就构成了岩石中电流流动的媒介物。于是，电流通过孔隙水流过岩石，岩石因此具有了一定的导电性。其中，金属矿物的电阻率极低，造岩矿物及石油的电阻率极高，火成岩电阻率高，而沉积岩电阻率较低。不同岩石之间以及同种岩石电阻率的差异变化，是由多种因素影响造成的。一般认为主要的因素是岩石孔隙度、孔隙结构、孔隙中所含流体性质、泥质含量、导电矿物以及岩石所处温度等 [15-16]。

岩石孔隙度、孔隙结构及孔隙中所含流体性质对导电性的影响是最主要的因素，岩石孔隙度越大，孔隙结构越简单，所包含孔隙水矿化度越高，则岩石电阻率越低，反之则岩石电阻率越高。其中还涉及孔隙所含流体是否饱满的问题，当连通孔隙饱含水时（水层），岩石电阻率相对最低，当连通孔隙饱含油时（油层），岩石电阻率相对最高。

导电矿物对岩石电阻率的影响最为明显，当岩石含有导电矿物条带时（如黄铁矿等），岩石电阻率极低，如果岩石内存在非均匀分布的导电矿物条带，将会影响对岩石

电阻率的准确评价。岩石里面的泥质也是能导电的，但它并不是依靠在溶液中自由运动的离子来传送电流，而是在外电场作用下，泥质颗粒表面吸附的离子沿表面移动（通常是阳离子移动）来传送电流。此外，泥质也会吸附黏土水，也会形成导电网络参与导电过程。泥质含量对电阻率的影响体现在泥质条带或层状泥质分布以及黏土，会导致岩石电阻率降低。

所有上述影响的存在均需要连通的导电路径，当导电矿物、泥质含量、孔隙水处于分散分布，位于岩石骨架的包围之中，形成不了导电网络时，可以认为这些成分不参与导电过程，不用考虑它们对岩石导电的影响。

可以看出，岩石导电的决定性因素取决于岩石成岩时所形成的导电网络，这个网络包含了孔隙度和孔隙结构的影响在内。导电网络除了可动孔隙水的变化会导致岩石电阻率变化外，对于某一指定岩石，其它因素均为固有影响因素，即其它因素已经稳定，无法改变，只会对岩石电阻率贡献固定值（常量）。

3. 单位体积导电模型的建立及公式推导

在研究岩石导电网络时，前人早就通过建立导电体积模型的方式对岩石导电机理进行了简化 [17-18]，包括后来的毛管导电模型 [19-20]，并使用简化模型对岩石电阻率响应方程进行了推导。认为岩石组分可分为骨架、导电矿物、泥质、孔隙水和烃类。针对沉积砂岩，由于导电矿物比较少见，建立导电模型可不予考虑，这样所建立的岩石导电体积模型就包含岩石颗粒骨架、层状泥质、黏土吸附水、微孔隙水、自由水、烃类等，见图1。其中，岩石颗粒骨架和烃类是不参与导电的。



图1 砂岩导电体积模型。

这样，岩石导电结构可认为是自由水、束缚水、黏土水等导电因素的并联导电过程，自由水、束缚水、黏土水等导电因素的导电路径是弯曲的，其弯曲程度是孔隙结构变化的根源。总体而言，人们基于导电体积模型所建的岩石电阻率导电公式还是非常复杂，体现在两个方面，一是公式表述非常复杂，二是公式参数较多，在实际中无法有效使用，如宋延杰等推导的白云岩储层导电公式 [21]。因此，在岩石电阻率导电体积模型的基础上，通过等效电阻对其进行简化，建立单位体积导电模型，找出对导电变化影响的最主要因素。有助于描述复杂的岩石导电网络，有助于加深对岩石导电特征的认识和对岩石电阻率响应方程进行可靠推导。

### 3.1. 单位体积导电模型的建立

前面分析已经提到,砂岩的导电体系是一个连通网络,实际上是由孔隙空间以及连通孔隙空间的吼道所组成的网络。由于沉积砂岩均有一定的均质性,因而可采用单位体积的概念来模拟计算砂岩的电阻率。假设某种类型的砂岩存在一个导电最小体积单位,称为单位体积砂岩,砂岩的电阻则是这个单位体积砂岩的电阻串并联之和,如果单位体积的电阻为 $r$ ,则砂岩电阻 $R$ 可表示为:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=n} r_{ik}} \quad (1)$$

可以看出,砂岩单位体积模型能够简化电阻率公式的推导。针对岩石单位体积电阻,其导电网络可设计为大喉道孔隙水(自由水)、微细喉道孔隙水(束缚水)、固有导电网络等效电阻(包含黏土、层状泥质、导电矿物等导电效应)并联导电模式。其中,单位体积的连通孔隙度即砂岩有效孔隙度,等于自由水与束缚水之和,即:

$$\Phi_e = \Phi_f + \Phi_{wi} \quad (2)$$

结合三水导电模型<sup>[19-20]</sup>,采用等效电阻的原理,假定单位体积砂岩内仅有三条弯曲导电毛管,分别代表自由水、束缚水、固有导电网络,属于非均匀毛管并联导电,而非连通孔隙水被认为不参与导电过程。这样,就建立岩石单位体积导电模型(图2)。

### 3.2. 单位体积模型的公式推导

根据砂岩单位体积模型,假定自由孔毛管截面积为 $S_f$ ,长度为 $L_f$ ,束缚孔毛管截面积为 $S_i$ ,长度为 $L_i$ ,固有导电网络毛管截面积为 $S_c$ ,长度为 $L_c$ ,见图2,则其对应电阻 $R_f$ 、 $R_i$ 、 $R_c$ 分别为:

$$R_f = r_w \frac{L_f}{S_f} \quad (3)$$

$$R_i = r_{wi} \frac{L_i}{S_i} \quad (4)$$

$$R_c = r_c \frac{L_c}{S_c} \quad (5)$$

则岩石单位体积电阻 $r$ 可表示为:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_c} \quad (6)$$

可以看出,由于沉积浸泡作用,微孔隙水(束缚水)与自由水应有相同的地层水电阻率,即 $r_w$ ,因而没有必要单独设立一个束缚水电阻率 $r_{wi}$ 。其次,弯曲毛管不利于公式的推导,可采用相同长度不同截面积的等效毛管代替,而总的孔隙度大小不变,即:

$$\Phi_e = L_f * S_f + L_i * S_i = L_t * S_{t1} + L_t * S_{t2} \quad (7)$$

假定取直后毛管长度为 $L_t$ ,自由水截面积与束缚水截面积分别为 $S_{t1}$ 、 $S_{t2}$ ,见图2,这样,岩石单位体积内自由水与束缚水毛管电阻可表示为:

$$R_f = r_w \frac{L_f}{S_f} = r_w \frac{L_t}{S_{t1}} \quad (8)$$

$$R_i = r_w \frac{L_i}{S_i} = r_w \frac{L_t}{S_{t2}} \quad (9)$$

根据并联导电原理,饱含水单位体积砂岩电阻可表示为:

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{r_w \frac{L_t}{S_{t1}}} + \frac{1}{r_w \frac{L_t}{S_{t2}}} + \frac{1}{R_c} \quad (10)$$

当储层含油时,其导电毛管长度不变,但含水截面积变小,因为大部分孔隙体积为油气,假定含水的截面积为 $S_{t4}$ ,则单位体积砂岩电阻可表示为:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{r_w \frac{L_t}{S_{t4}}} + \frac{1}{r_w \frac{L_t}{S_{t2}}} + \frac{1}{R_c} \quad (11)$$

对公式11,则有:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_{t4} + S_{t2}}{r_w L_t} + \frac{1}{R_c} = \frac{(S_{t4} + S_{t2}) * L_t}{r_w L_t * L_t} + \frac{1}{R_c} = \frac{\Phi_w}{r_w L_t * L_t} + \frac{1}{R_c} \quad (12)$$

在式12中, $\Phi_w$ 为连通孔隙里的剩余含水孔隙(剩余自由水+微孔隙水),除了 $\Phi_w$ 为变量外,其余均为常量,因此式12可表示为:

$$R_t = \frac{c}{\Phi_w} + d \quad (13)$$

式中, $R_t$ 为单位体积岩石电阻率,单位, $\Omega \cdot m$ ;  $\Phi_w$ ,连通孔隙里的剩余含水孔隙体积,单位,小数; $c$ 、 $d$ 为系数,无量纲。式13即为单位体积砂岩电阻率的公式样式,表明按单位体积导电模型的理想状态下砂岩电阻率与含水孔隙体积为一种简单幂函数关系。

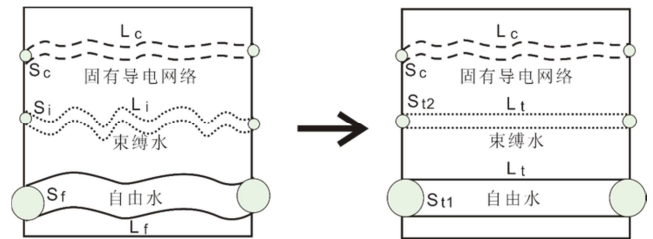


图2 岩石单位体积非均匀毛管并联导电模型示意图。

可以看出,岩石电阻仅与有效孔隙里的剩余含水孔隙(包含微孔隙水)为函数关系,当储层含不同程度的油气时,黏土吸附水及其它固有导电因素对储层的导电贡献没有变化,导致储层电阻率变化的根本原因是自由水孔隙体积的变化。因此,对含油气砂岩来说,电阻率是在以黏土吸附水及其它固有导电因素为导电基础上的电阻率变化。即对同一个储层,含油与含水的电阻率区别是在一个电阻率基数之上的变化,而这个基数就是黏土吸附水及其它固有导电因素对电阻率的贡献。所以黏土吸附水及其它固有导电因素对电阻率变化的影响是固定的,可当做常数影响来处理,则含油气电阻率响应方程可以看作电阻率与储层连通孔隙里的含水孔隙体积的函数,即:

$$R = F(\Phi_w) \quad (14)$$



实际中砂岩电阻率的公式如何确定呢,由于真实砂岩均存在一定非均值性,一块砂岩不同区域的单位体积电阻有可能存在区别,则不同区域单位体积的 $R_t$ 有可能不一样,但砂岩的电阻仍由这些单位体积电阻串并联组成,公式14可表述为:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=n} \left( \frac{c_{ik}}{\Phi_{wik}} + d_{ik} \right)} \quad (15)$$

由于 $c_{ik}$ 与 $d_{ik}$ 均为常数,表明岩石电阻仍然是与有效孔隙里的剩余含水孔隙(包含微孔隙水)为函数关系,这一函数关系为一种复合幂函数关系。

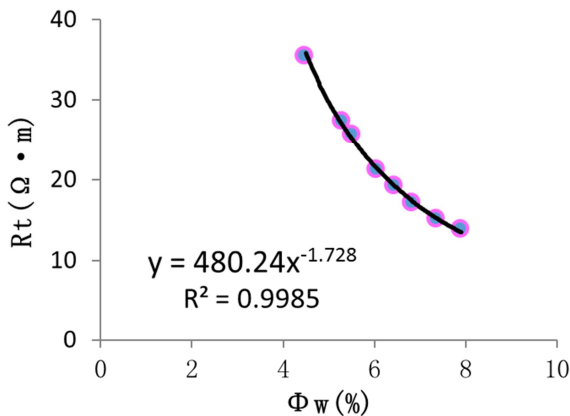


图3 单块岩样测量数据的回归关系。

根据上述分析,有两个新观点:①砂岩电阻率可表述为岩石连通含水孔隙体积的函数;②砂岩电阻率的公式样式可表述为幂函数关系。根据这一原则,对大量单块岩样的岩电测量数据进行统计。依据单块岩样测量结果,取其中测量电阻率及含水孔隙体积进行回归,结果表明砂岩电阻率与含水孔隙体积为幂函数关系,相关系数高达0.99以上,见图3,该关系形式为:

$$R_t = \frac{aR_w}{\Phi_w^m} \quad (16)$$

式中:  $R_t$ —砂岩测量电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;

$R_w$ —砂岩地层水电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;

$\Phi_w$ —砂岩有效孔隙里含水孔隙体积, 小数;

$a$ 、 $m$ —回归系数, 无量纲。

式16即为新的含油气砂岩的电阻率响应方程,表明岩石电阻率随岩石所含连通孔隙水体积(包含微孔隙)的变化而变化,呈幂函数关系。因此,岩石电阻率可表示为岩石连通孔隙水电阻率(地层水电阻率)、连通孔隙水孔隙体积的函数,其它导电因素如粘土水及导电矿物等的影响可以在回归系数里面体现。

同时,砂岩电阻率与含水饱和度的关系也为幂函数关系,可以通过上述公式16推导出来。针对砂岩单位体积模型,含水饱和度表示为:

$$S_w = \frac{\Phi_w}{\Phi} \quad (17)$$

针对公式16,左边同时除以 $\Phi^m$ ,则有:

$$R_t = \frac{aR_w}{\Phi_w^m} = \frac{aR_w}{\left( \frac{\Phi_w}{\Phi} \right)^m} = \frac{bR_w}{S_w^m} \quad (18)$$

即:

$$R_t = \frac{bR_w}{S_w^m} \quad (19)$$

式中:  $S_w$ 为含水饱和度,  $b$ 为系数,其它与式16相同。表明砂岩电阻率与含水饱和度关系也为幂函数关系,并且其指数仍为孔隙结构指数,并不是另外一个饱和度指数。

#### 4. 与以往实验规律的吻合情况分析

通过大量岩电实验资料,已经证明的岩石导电规律有两个<sup>[1]</sup>: ①饱含水电层电阻率与该储层所含水的电阻率(即地层水电阻率)成正比,其比例系数称为地层因子,用 $F$ 表示; ②储层含油气时的电阻率与该储层饱含水时的电阻率成正比,其比例系数称为电阻率指数,用 $I$ 表示。通过岩电实验,所确立的关系式为:

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\Phi^m} \quad (20)$$

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{1}{S_w^n} \quad (21)$$

根据新公式,按上述关系形式进行推导,针对公式20,由式16,有:

$$R_o = \frac{aR_w}{\Phi^m}$$

可推出

$$I = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\Phi^m}$$

表明公式16对岩石导电的第一个规律完全符合,即纯水层岩石电阻率与地层水电阻率的比值为一常数,该常数的大小与储层孔隙度及孔隙结构指数相关。而且,这里直接推导出系数为 $a$ ,不为1,与实际应用是吻合的。后来阿尔奇公式通过修正,才由1变为 $a$ ,但并没有说清楚为什么1要变为一个系数 $a$ ,使用新公式推导,来源清楚了。针对新公式推导,可以清楚看出,饱含水岩石电阻率与该岩石所含水的电阻率成正比关系,这一关系仅针对同一块岩样。相同岩性的不同岩样,仅在 $a$ 、 $m$ 岩电系数相同的情况下才具有相同的比值,当岩电系数存在差异时,是不能把这些数据放在一块进行回归的,这是阿尔奇公式的一个明显缺陷 [13]。

针对公式21,由式16,有:

$$R_t = \frac{aR_w}{\Phi_w^m} \quad R_o = \frac{aR_w}{\Phi^m}$$

可推出

$$F = \frac{R_t}{R_o} = \frac{1}{\frac{\Phi_w^m}{\Phi^m}} = \frac{1}{\left( \frac{\Phi_w}{\Phi} \right)^m} = \frac{1}{S_w^m}$$

表明公式16对岩石导电的第二个规律完全符合,即含油储层岩石电阻率与该层完全含水时岩石电阻率的比值为一个常数,该常数的大小与储层含水饱和度及孔隙结构指数相关。这里的系数为1,并不是人们所认为的b,表明阿尔奇公式提出的1是正确的,实际资料回归也证实了这一点。

因此,新的公式能够与以往的实验规律完全吻合。从岩电实验的资料看,每块岩样都可回归出一个m值与a值,这与岩样的真实情况吻合,因为岩石的孔隙结构与渗流特性千变万化,不同孔隙范围的储层m值与a值接近或类似倒有可能,要是一样反而有问题了,表明新的公式与实际情况更为符合。

同时,目前最新研究根据径向电阻率比值提出了一个新的含水饱和度计算公式 [22], 见式22:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{R_w/R_{mf}}{R_t/R_{xo}}} \quad (22)$$

依据公式16,有:

$$R_t = \frac{aR_w}{\Phi_w^m} \quad R_{xo} = \frac{aR_{mf}}{\Phi_m^m}$$

可推出:

$$\frac{R_t}{R_{xo}} = \frac{R_w}{R_{mf}} * \frac{\Phi_m^m}{\Phi_w^m} = \frac{R_w}{R_{mf}} * \frac{1}{S_w^m}$$

可推出:

$$S_w = \sqrt[m]{\frac{R_w/R_{mf}}{R_t/R_{xo}}} \quad (23)$$

可以看出,公式23与公式22完全一致,表明由阿尔奇公式所推出的公式由公式16推导更简洁,说明公式22的参数n即新公式16的参数m,由单块岩样的实验参数确定,更清楚的表明了参数的来源。因此,用连通孔隙水体积的幂函数关系式来表述岩石电阻率响应方程,能够把握含油气砂岩的电阻率变化规律,反映了岩石导电的本质。

## 5. 参数物理意义及创新认识

### 5.1. 参数物理意义

依据新的电阻率响应方程公式16,该公式 $R_t$ 为地层岩石测量电阻率,是电阻率仪器测量数据; $R_w$ 为地层水电阻率,可通过地层水分析资料或邻近水层资料反算得到; $\Phi_w$ 是砂岩连通孔隙水体积,是需要计算得到的结果。因此,实际使用要落实的参数只有两个,即单块岩电实验测量资料回归系数a、m,参数的物理意义即指参数a、m值的物理意义。先看m值,依据公式理解,m值为幂函数的指数。针对本公式,m值是连通孔隙水的变化对岩石电阻率变化的影响程度反映,具有m值越大, $R_t$ 值越大并且 $R_t$ 值随 $\Phi_w$ 值变化越大的特点。电阻率随连通孔隙水变化的程度越大,表明岩石的非均质性越强。因此,m值的大小能够反映储层的非均质程度,具有m值越小,储层非均质性越弱,m值越大储层非均质性越强的特点。可以看出,m值同时也

反映岩石孔隙结构变化情况,孔隙结构变化越快,代表储层非均质性越强,m值定义为孔隙结构指数是比较合理的。但是,m值是否反映孔隙曲折程度还有待于进一步研究。

再看a值,毫无疑问,a值是一个正比例系数,a值越大,计算的电阻率越大,a值越小,计算的电阻率越小。这有几个方面的意思,首先,岩石泥质含量、矿物质等岩石固有导电影响因素应该在a值上有所体现。当岩石泥质含量、矿物质等导电因素活跃,影响大时,a值应该变小;其次,当岩石泥质含量、矿物质等导电因素不活跃,影响一般时,a值可能还与孔隙吼道的粗细相关。当岩石孔隙吼道比较粗时,a值可能小一些;当岩石孔隙吼道比较细时,a值可能大一些,这些还有待于进一步研究。此外,a值也可称为储层电阻率随连通孔隙水变化的增大率,就是对不同孔隙结构及成分的岩性,电阻率随含水孔隙体积变化的增大倍数是不一样的。

综上所述,公式的参数a值与m值,是岩石本身的一种固有属性参数。对相同的岩样来说,使用不同的地层水矿化度浸泡,所回归的参数都相同,说明该套参数具有唯一性和稳定性,能够描述岩石的导电特性。由于a值与m值由于是通过测量气体的侵入过程得到的参数(侵入反应在气吹过程上),表明与储层渗透性有内在的联系,是反应储层渗透性的最直接、最可靠的参数,无疑为今后更深入的剖析储层的渗透性打开了一扇大门。

### 5.2. 创新认识

本次研究,与以前认识相比,具有5个创新之处,具体为:

①采用等效电阻的观点简化了岩石电阻率公式的推导,体现在两个方面,一是对黏土、导电矿物等固有导电网络采用等效电阻进行推导,避免其复杂性对公式推导的影响。二是采用不同截面积、相同长度的等效毛管代替以前不同截面积、不同长度的毛管,简化了并联电阻的推导,使得连通孔隙水体积能够出现在单位体积电阻的表达式内,为进一步认识连通孔隙水对导电的影响提供了依据。

②把大孔隙连通水和微孔隙连通水(以前认为的束缚水)合并起来认识,认为它们具有相通的地层水电阻率。而以前都认为束缚水电阻率与地层水电阻率不同 [23],具有专门的表达词汇 $R_{wi}$ ,新的认识基于岩石沉积原理,具有一定的理论依据,降低了公式推导的难度。

③新提出了连通孔隙水导电的理论,结合了以前地层水和束缚水并联导电的优点。新的提法避免了阿尔奇公式的孔隙度、含水饱和度概念不清的问题 [24-25]。以前阿尔奇公式的孔隙度一会是总孔隙度、一会是有效孔隙度,含水饱和度是否为总含水饱和度也存在争议,导致使用中存在随意性。本次研究彻底解决了这一问题,新公式的孔隙度毫无疑问是所有连通孔隙,包含连通的微孔隙,应为岩石有效孔隙度。所对应含水饱和度应为有效孔隙里的总含水饱和度,即包含微孔隙水饱和度(以前束缚水饱和度),这样,所计算出的含油饱和度一般不会大于80%,为检验结果的合理性提供了依据。

④新提出了岩石电阻率与储层连通水孔隙体积及含水饱和度为幂函数关系,而且储层深电阻率与冲洗带电阻

率的径向电阻率比值与含水饱和度也为幂函数关系,为今后对岩石电阻率开展更深入研究提供了依据。

⑤新提出了公式参数 $a$ 值与 $m$ 值为岩石固有属性参数的观点,表明可依据 $a$ 值与 $m$ 值对储层岩性开展进一步类别划分,为进行岩性细微识别、储层分类评价等开辟了广阔的应用前景。

## 6. 结论

①新的岩石电阻率响应方程推导过程合理,与测井岩电实验资料具有较好的一致性,回归公式相关系数高,避免了阿尔奇公式与实验资料反算相对误差大的局限性,能够反映岩石导电的本质,可在实际中推广使用。

②新公式认为岩石电阻率与连通水孔隙体积及含水饱和度为幂函数关系,岩石径向电阻率比值与含水饱和度也为幂函数关系,这一关系还有待于实验资料的进一步检验,公式也需要更为合理的推导证明。

③新的岩石电阻率响应方程为深入认识岩电关系、提高测井油水层识别精度提供了理论依据,为解决测井低阻油层等疑难层的评价提供了新的手段。同时,新的岩电关系也有助于电阻率测井仪器的设计及应用进步。

④新公式参数确定除了利用岩电实验资料外,目前还没有更好的方法,有待于今后更进一步的深入研究。

## 参考文献

- [1] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J].Tnas Am Inst MechEng,1942,146:54~61.
- [2] Simandoux P. Dielectric measurements of porous media: Application to measurement of water saturations, study of the behavior of argillaceous formations[J].Revue de L'Institut Franais du Petrole,1963,18(S1): 193-215
- [3] 毛志强,朱卫红,汪如军. 塔里木盆地油气层低阻成因实验研究(II)[J].测井技术,1999,6:404-410.
- [4] 赵彦超,周渤然.泥质砂岩的三种导电模型的研究[J].测井技术,1998,22(2):75-78.
- [5] 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,2008,2: 101-107.
- [6] 张丽华,潘保芝,李舟波等.新三水导电模型及其在低孔低渗储层评价中的应用[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):431-435.
- [7] 宋延杰,陈济强,唐晓敏等.低孔渗泥质砂岩三水孔隙结合导电模型及其在海上油田的应用[J].大庆石油学院学报,2010,34(6): 106-110.
- [8] 吴健,胡向阳,梁玉楠等.珠江口盆地低阻油层饱和度评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(1):312-319.
- [9] 赵彦超,吴春萍,吴东平.致密砂岩气层的测井评价[J].地质科技情报,2003,22(4):65-70.
- [10] 沈爱新,王黎,陈守军.油层低电阻率及阿尔奇公式中各参数的岩电实验研究[J].江汉石油学院学报,2003,25(增):24-25.
- [11] 张明禄,石玉江.复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J].测井技术,2005,29(5):446-448.
- [12] 孙建国.阿尔奇(Archie)公式:提出背景与早期争论[J].地球物理学进展,2007,22(2):472-486.
- [13] 杨克兵,王竞飞,马凤芹,等.阿尔奇公式的适用条件分析及对策[J].天然气与石油,2018,36(2):58-63.
- [14] 张洁,罗健,夏瑜,等.阿尔奇公式的适用性分析及其拓展[J].地球物理学报,2018,61(1):311-322.
- [15] 冯进.基于数字岩石物理实验的岩石电性影响因素分析[J].中国海上油气,2012,24(6):12-16.
- [16] 张兆辉,高楚桥,高永德.孔洞型储层电阻率理论模拟及影响因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(2):79-83.
- [17] 张建华,刘振华,仵杰.电法测井原理与应用[M].西安:西北大学出版社,2002.
- [18] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:中国石油大学出版社,2007.
- [19] 莫修文,贺铎华,李舟波等.三水导电模型及其在低阻储层解释中的应用[J].长春科技大学学报,2001,31(1):92-92.
- [20] 丁明海,吴晓莉.泥质砂岩三孔隙度测井解释方法研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(4):101-102.
- [21] 宋延杰,张桢楠,唐晓敏,等.基于连通导电理论的白云岩储层导电模型[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2015,31(2):247-252.
- [22] Yang K B, Xi L, Zhang L, et al. Study on a New Method for Calculating Water Saturation [J].International Journal of Oil,Gas and Coal Engineering, 2019, 7(6): 125-128.
- [23] 何伶,丁娱娇,迟秀荣等.歧口凹陷内因低电阻率油气层饱和度定量评价方法[J].测井技术,2014,38(1):51-58.
- [24] 荆万学,陈永吉.浅探阿尔奇公式的物理学原型[J].测井技术,1997,21(4):289-291.
- [25] 杨克兵,袁晓红,刘明波,等.使用电阻率比值法评价油层的方法研究[J].天然气勘探与开发,2015,38(1):37-39.

## 作者简介



杨克兵,男,1967年生,高级工程师,1989年毕业于江汉石油学院测井专业,现主要从事测井解释及油气地质综合研究。