

利用电阻率计算胶结系数与饱和度指数

姚 仁

上海建科深水港检验有限公司 上海 201306

【摘 要】胶结系数和饱和度指数是定量评价含油储层的重要参数,其值的准确性对测井解释尤为关键。本文利用Keller公式和Waxman公式,推导了电阻率表达式,利用电阻率与孔隙率和含水率等基本物性参数多元拟合,进一步计算胶结系数和饱和度指数。为验证该方法的适用性,以上海地区粉质粘土为研究对象,对同一勘查区两个钻孔取得的共9个原状样进行电阻率与孔隙率、含水率多元回归分析,各钻孔数据独立分析结果的 R^2 都在0.95以上,得到的表达式成立且可靠性极高,由表达式推算的土体胶结系数都为0.74,饱和度指数分别为1.24和1.20,由于两个钻孔为一个勘查区内,将两组数据统一分析获取的胶结系数与饱和度指数与单独分析进行对比,结果离散程度很小。证明利用Waxman电阻率模型,通过多元回归分析的方法求取胶结系数和饱和度指数对于非饱和粘性土是可行的,这为利用电阻率模型推算不同类型储层胶结系数和饱和度指数,进一步利用Archie公式计算含油饱和度提供了理论基础。

【关键词】Archie公式;胶结系数;饱和度指数;电阻率;多元回归

引言

含油饱和度是油藏数值模拟、储油层定量评价及储层测井解释的重要参数^[1],其值的准确性取决于胶结系数和饱和度指数,通过利用参数 m 、 p 代入Archie公式^[2]计算含油饱和度。当前获取胶结系数和饱和度系数主要有两种方法:一是通过岩电实验直接测得相关参数,在双对数坐标上分别建立 $F-\phi$ 关系式和 $I-S_w$ 关系式,利用数据回归求取胶结系数 m 和饱和度指数 p ^[3];二是根据前人的工作经验,在某一地区取定值。国内外很多学者尝试从其影响机制出发,研究相对简单、准确的测试方法和计算方法。Neustaeder针对如何计算深部致密的碳酸盐岩的 m 值,根据岩芯分析的数据,提出了胶结系数与孔隙率的Shell公式;Bori对低孔隙率碳酸盐岩的胶结系数影响因素展开了研究,通过对海湾地区岩样数据的总结分析,提出了胶结系数与小数值形式孔隙率的Bori公式;国内学者张祖坡等通过改进油水相对渗透率实验,在实验中同时测量胶结系数和饱和度指数,其结果与对井中岩样进行岩电实验的测试结果对比,效果很好,其测试参数可很好应用于测井解释;曾文冲在室内试验的基础上,分析出胶结系数与渗透率和孔隙率的相关关系,通过与汉布尔公式和胜利油田地层公式的比对,得出其关系式计算出的值满足测井解释精度的要求;李先鹏通过对岩电实验数据进行分析,得出不同地层的胶结系数都不相同,并结合岩电实验数据和测井结果,建议采用多元线性回归分析法建立胶结系数的

物理模型,使求取的目的层的胶结系数尽量接近地层真实的胶结系数值;蒋龙升等从沉积相角度分析,结合岩电实验分析资料,得出了储层电阻率的主要因素是岩土骨架本身,胶结系数 m 主要与钾长石含量有关,饱和度指数 p 只要与钾钍比相关,从而推导出一种利用自然伽马能谱资料来计算储层 m 、 p 的模型,用模型计算储层的胶结系数和饱和度指数,其值与实测值的平均误差为10%以内。

综上所述,传统的测试计算方法需要根据研究区的岩电实验数据,利用统计方法来确定,涉及的岩电参数较多,过程复杂,且人为因素的干扰较大;利用其影响参数建立计算模型,复杂程度上并没有实际意义上的减小。本文以测井饱和度解释模型为基础,从Keller模型和Waxman模型出发,推导适用于非饱和和无粘性岩土体及非饱和粘性岩土体的电阻率模型,通过多元回归分析的方法求取胶结系数 m 和饱和度指数 p 。利用上海某小区9组原状土样数据,通过拟合电阻率模型,利用多元回归分析求取 m 、 p ,验证了该方法的稳定性,为更准确地计算含油储层的含油率饱和度提供一种方法依据。

1 理论推导

在石油开采前期工作中,可信度较高的岩芯测试方法存在费时费力的问题,因此简便易行的电阻率测井方法逐渐发展起来,用以定性评价储油层及定量求出储层流体饱和度。

1942年,Archie利用试验研究饱和和无粘性土电阻率与其内部结构的关系,推导了描述岩土体电阻率和孔隙度与孔

隙水电阻率之间的关系式，并应用前人的研究数据进行验证，吻合度很好，其表达式为：

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (1)$$

式中： ρ 为岩土体电阻率， $\Omega \cdot m$ ； a 为实验参数； ρ_w 为孔隙水电阻率， $\Omega \cdot m$ ； n 为孔隙度，%； m 为胶结系数。

1.1 非饱和和无粘性土

Keller针对Archie公式的适用对象，把其模型拓展应用于非饱和和无粘性岩土体，建立了关于电阻率与孔隙率和含水率饱和度的方程：

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_r^{-p} \quad (2)$$

式中： S_r 为含水饱和度，%； p 为饱和度指数。

在土体基本物理性质的7个基本指标中，土粒密度和含水率为实测指标，而饱和度通常是用含水率、土粒密度、孔隙率换算得到，如下式：

$$\begin{cases} S_r = \frac{\omega \rho_s}{e} \\ e = \frac{n}{1-n} \end{cases} \quad (3)$$

其中： ω 为含水率，%； e 为孔隙比； ρ_s 为土粒密度， $g \cdot cm^{-3}$ 。将式3代入式2，可得

$$\rho = a\rho_w n^{p-m} (1-n)^{-p} \omega^{-p} \rho_s^{-p} \quad (4)$$

针对同一地区，土粒密度和孔隙水的电阻率不变，故式4的变量只要孔隙率和含水率，令

$$\begin{cases} x = p - m \\ y = p \\ A = a\rho_w \rho_s^{-p} \end{cases} \quad (5)$$

故式5整理得：

$$\rho = A\omega^{-y} n^x (1-n)^{-y} \quad (6)$$

在实际工程应用中，利用式6，测得岩土体的电阻率、含水率、孔隙率等参数，按式6进行多元回归分析，便可推算出胶结系数和饱和度指数。

1.2 非饱和粘性土

针对非饱和粘性岩土，其电阻率模型被学者熟知的是Waxman公式，其把岩土体的导电看作是土体颗粒和孔隙水溶液两部门并联导电的结果，在Archie公式的基础上提出了适用于非饱和粘性岩土体的电阻率模型：

$$\rho = \frac{a\rho_w n^{-m} S_r^{1-p}}{S_r + \rho_w BQ} \quad (7)$$

上式中： B 为反离子层电导率， S/m ； Q 为单位孔隙阳离子交换量； BQ 为土颗粒表面双电层的电导率， S/m 。

由式3替换含水饱和度，推出：

$$\rho = \frac{a\rho_w n^{-m} [\omega \rho_s (1-n)]^{1-p}}{\omega \rho_s (1-n) n^{-p} + \rho_w BQ n^{-p}} \quad (8)$$

对式8取倒数，则式8可改写为：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{a\rho_w \rho_s^{-p}} n^{m-p} (1-n)^p \omega^p + \frac{BQ}{a\rho_s^{1-p}} n^{m-p} (1-n)^{p-1} \omega^{p-1} \quad (9)$$

对式9分析得出，与上式4类同，同一地点黏性土的BQ值相同，只有土体的孔隙率和含水率是变量，故与上文分析一样，令

$$\begin{cases} A = \frac{1}{a\rho_w \rho_s^{-p}} \\ B = \frac{BQ}{a\rho_s^{1-p}} \\ x = m - p \\ y = p \end{cases} \quad (10)$$

则非饱和粘性岩土体的电阻率模型可以简化为：

$$\frac{1}{\rho} = An^x (1-n)^y \omega^y + Bn^x (1-n)^{y-1} \omega^{y-1} \quad (11)$$

2 试验研究

2.1 土样相关参数测试

本次试验的土样取自上海某小区，在小区两个采集点利用钻孔取9组原状土样。一个采集点取4组（1~4）原状土样，取样深度在2~3.5m，取样间隔0.3m；另一采集点取5组（5~9）原状土样，取样深度在2~4m，取样间隔0.4m，两取样点之间的间距为50m，土样为黄褐色粉质粘土。

土样基本物性参数的测试根据《土工试验方法标准GB/T50123-1999》进行，利用烘干法测量土体含水率，孔隙率按换算公式计算获取。

现有的土体电阻率测试方法有两极法和四极法，两极法通过直接测土样两端的电压降和供电电流来计算土电阻率，操作简单不需要在土样内部安装测量电极对土样无扰动。但是测试结果受电极影响较大，为了尽量减少极化效应带来的影响，采用石墨电极进行供电，测试时为了降低电极与土样接触带来的影响，在土样与电极接触端涂抹导电硅胶，测试电阻率仪器及装置。

2.2 多元回归拟合

上文通过推导建立了电阻率与各相关参数的预测模型，为验证模型的适用性及推算胶结系数和饱和度指数，本文选取Matlab数学分析软件进行多元回归分析。

Matlab是MathWorks公司推出的商业数学软件,它将数值分析、数据可视化以及非线性动态系统的建模、分析等功能集于一体。其中的Curve Fitting程序模块,不仅提供了各种拟合曲线的方法,包括线性和非线性回归、样条和插值以及平滑等,而且具有完善的数据可视化功能,能绘制处理二维曲线和三维曲面,其处理分析的结果能够快速、直观的得到拟合曲面与数据之间的关系,广泛应用于数据的多元回归分析。

针对第一采集点的数据,根据推导建立的式11,取电导率(电阻率的倒数)、孔隙率和含水率进行多元回归拟合,并将模型曲面及数据点绘成三维图。

多元回归分析所得拟合函数的回归误差平方和为0.00000015,接近为0,R2值为0.9919,模型曲面及数据点绘成三维图所示,函数的三维曲面与数据点的拟合很好,离散很小,建立的回归方程成立,且可靠性极高。建立的电阻率模型表达式为:

$$\frac{1}{\rho} = 0.003n^{-0.50}(1-n)^{1.24}\omega^{1.24} + 0.030n^{-0.50}(1-n)^{0.24}\omega^{0.24} \quad (12)$$

多元分析拟合得到表达式成立,结合式10,推算出第一采集点土体的胶结系数为0.74,饱和度指数为1.24。

在第二采集点,对5组数据采取与第一采集点的相同的处理步骤,并对其进行多元回归分析,分析结果的三维图,了解到数据点与函数模型的三维曲面完全重合,所得函数的回归平方和接近为0,R2为0.9981,多元回归建立的表达式成立,推算得到的胶结系数为0.74,饱和度指数为1.20。

通过对比第一采集点与第二采集点的分析结果,分析推算的饱和度指数分别为1.24和1.20,胶结系数都为0.74,饱和度指数推算的结果十分接近,可以确定,在同一地层两个不同采集点分析推算的值都能反映这一地层的胶结系数和饱和度指数,证实了方法的可行性。为验证利用模型进行多元回归分析推算结果的一致性和适用性,对采集的全部数据,进行多元回归分析。

模型曲面与全部数据点三维分布图所示,9个数据点与函数模型三维图的完全重合,所得函数的回归平方和为

0.00000024,R方为0.9677,因此拟合的函数表达式成立,推算得出胶结系数为0.75,饱和度指数为1.21。

整理全部数据分析推算的胶结系数与饱和度指数与单独在每个采集点数据分析推算的值相差很小,胶结系数三个推算值的标准差为0.0471,饱和度指数三个推算值的标准差为0.0170,离散程度都很小。证明利用相对应的电阻率模型,通过对同一地层任意组数据(大于4组)进行多元回归分析,推算求取的胶结系数和饱和度指数都能很好反映地层的真实值,且一致性很好。

因此可以认为,在测井解释工作中,只需测试对应四组储层岩体的电阻率、含水率和孔隙率值,结合相对应的电阻率模型(式6和式11),利用多元回归分析求取胶结系数和饱和度指数的方法是可行的。

3 结论

本文基于适用于非饱和和无粘性土的Keller公式和适用于非饱和粘性土的Waxman公式的基础之上,推导了更加简洁的电阻率模型,提出利用物性参数(电阻率、孔隙率和含水率)进行多元回归分析的方法求取地层的胶结系数和饱和度指数。以上海地区粉质粘土为研究对象,首先对同一地区两个不同采集点的数据单独进行多元回归求值分析,然后对两个采集点的全部数据进行分析,通过确定表达式是否成立及对比三个推算值的离散程度,验证了方法的可行性和推算结果的一致性,为定量分析储层含油饱和度工作中求取胶结系数 m 和饱和度指数 p 提供了一种简便精确的方法。

参考文献:

- [1] 王建,吕成远,胡永华,孙志刚.地层条件下岩石电性特征实验研究[J].石油勘探与开发,2004(01):113-115.
- [2] ARCHIE G E. The electric resistivity logs as an aid in determining some-reservoir characteristics[J]. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146: 54-61.
- [3] 张丽华,潘保芝,单刚义.孔隙度指数m确定方法研究进展[J].地球物理学进展,2010,25(03):975-981.

作者简介:

姚仁(1993-),男,汉,江西上饶,中级工程师,硕士研究生,研究方向:主要从事建筑行业检验检测。