

密度测井资料在确定岩层孔隙度上的应用

李准喆¹ 苏艳龙²

(1. 辽宁省核工业地质局 241 大队, 辽宁 凤城 118100; 2. 辽河油田裕隆实业集团有限公司, 辽宁 盘锦 124011)

摘 要 : 孔隙度是储层评价的重要参数之一。密度测井是一种重要的孔隙度测井方法, 在石油勘探领域常常被用作确定岩层孔隙度。通过研究密度测井的基本原理、仪器构成、刻度方法等, 推导出不同情况下孔隙度的计算公式。并利用该公式进行 Matlab 编程, 对实际测井数据进行处理, 计算了多个井段的岩层孔隙度, 证明了密度测井在孔隙度计算方面具有很高的应用价值。

关键词 : 孔隙度; 密度测井; 定量计算

DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2014.06.015

APPLICATION OF DENSITY LOGGING DATA IN THE CALCULATION OF POROSITY OF ROCK FORMATION

LI Zhun-zhe¹, SU Yan-long²

(1. No. 241 Team, Liaoning Bureau of Geology for Nuclear Industry, Fengcheng 118100, Liaoning Province, China;

2. Yulong Industry Group Co. Ltd., Liaohe Oilfield, Panjin 124011, Liaoning Province, China)

Abstract : Porosity is one of the important parameters in reservoir evaluation. Density logging is commonly used to determine the porosity of rock formations in petroleum exploration. With studies on basic principles, instrument and calibration method of density logging, the calculation formulas for porosity in different situations are derived. Such formulas are applied in the Matlab program to process the practical logging data and calculate porosities of rock formations in multiple well sections. The result shows that the method of density logging is highly applicable in porosity calculation.

Key words : porosity; density logging; quantitative calculation

0 引言

石油勘探的目标是地下岩层当中的油气资源, 而油气资源存在于岩层孔隙之中。想要充分了解地层的储集性, 孔隙度是必须要研究的一项参数。目前孔隙度测井方法主要有密度测井、声波测井、中子测井以及后来发展起来的核磁共振测井等。本文主要研究其中的密度测井, 介绍该方法的基本理论, 通过岩石中不同成分密度之间的关系, 推导出孔隙度计算公式, 并对实测数据进行计算, 求出孔隙度的大小。

1 密度测井简介

密度测井又称伽马-伽马测井、散射伽马测井, 是基于康普顿-吴有训散射效应来研究岩层密度的一种测井方法。

密度测井是目前国内外各大油田广泛使用的一种测井方法。该方法可以同中子测井、声波测井等相配合, 用来确定岩性, 还可以为地震勘探提供声阻抗数据。同时在煤田测井中, 也是一个重要的划分煤层的手段。此外, 密度测井还具有一个重要的应用, 就是测定岩石的孔隙度^[1-3]。

相对于自然伽马测井, 密度测井采用的是主动测量方式。它利用人工放射性物质产生的射线, 来探测地层的体积密度(即岩石的总体密度, 包括固体骨架和孔隙中的流体)^[4-5]。井下仪器由 γ 源和加屏蔽的探测器组成。探测器记录由地层散射的 γ 射线。散射 γ 射线和地层电子密度有关, 因此与地层的密度有关。为了减小井径变化和泥饼的影响, 采用源距不同的 2 个探测器, 并且 γ 源和探测器都装在滑板上, 贴井壁进行测量。

收稿日期: 2013-09-29; 修回日期: 2014-02-24。编辑: 李兰英。

作者简介: 李准喆(1965—), 男, 高级工程师, 现从事物探找矿工作。通信地址: 辽宁省凤城市凤华街 735 号, E-mail: mengwei.2003@163.com

近探测器的结果用来校正井径变化和泥饼对远探测器的影响^[6]。

2 密度测井仪的测量原理

密度测井仪的读数主要取决于地层的电子密度(单位体积内的电子数目)。当岩石孔隙中充满淡水时,可以写出体积密度及电子密度指数的响应方程^[7]:

$$\rho = \varphi \rho_1 + (1 - \varphi) \rho_2 \quad (1)$$

$$\rho_e = \varphi \rho_{e1} + (1 - \varphi) \rho_{e2} \quad (2)$$

求解(1)(2)式可得:

$$\rho = \frac{\rho_e - \rho_{e2}}{\rho_{e1} - \rho_{e2}} \rho_1 - \frac{\rho_e - \rho_{e2}}{\rho_{e1} - \rho_{e2}} \rho_2 + \rho_2 \quad (3)$$

式中的 ρ 为地层密度 ρ_1 为孔隙流体的密度 ρ_2 为岩石骨架的密度 ρ_{e1} 为孔隙流体的电子密度 ρ_{e2} 为岩石骨架的电子密度 φ 为岩石孔隙度。

密度测井仪通常是在充满淡水的纯石灰岩地层中进行刻度的^[8-9]。把(3)式中相应参数 $\rho_1 = 1.000 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 2.710 \text{ g/cm}^3$ $\rho_{e1} = 1.1101$ $\rho_{e2} = 2.7076$ 代入,则:

$$\rho = 1.0704 \rho_e - 0.1183 \quad (4)$$

在实际测井时,岩性和孔隙流体的性质可能不同于刻度井的条件,所以,仪器读数给出的可能不是实际体积密度。对于充满淡水的砂岩和白云岩,仪器读数基本上等于真实体积密度,而对于钾盐、岩盐、石膏、硬石膏、煤和含天然气地层,要从密度测井读数求出真实体积密度时,则需另外进行校正。

3 利用密度测井资料计算岩层孔隙度

岩层密度 ρ_b 由岩石骨架密度 ρ_{ma} 和孔隙中的流体密度 ρ_f 共同决定。而岩层孔隙中的流体对岩层密度的贡献与岩石的孔隙度 φ 的大小有关。 ρ_b 、 ρ_{ma} 、 ρ_f 和 φ 之间的关系可以表示为^[10]:

$$\rho_b = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_{ma} \quad (5)$$

解出孔隙度 φ 的表达式为:

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (6)$$

当侵入带中含有残余油气时,流体密度 ρ_f 应该按下式确定^[10]。

$$\rho_f = S_{hr} \rho_{hr} + (1 - S_{hr}) \rho_{mf} \quad (7)$$

式中的 S_{hr} 为残余烃饱和度 ρ_{hr} 为残余烃密度 ρ_{mf} 为泥浆滤液密度。

把(7)式代入(6)式中,整理可得:

$$\varphi = \frac{\varphi_D}{1 + S_{hr} \frac{\rho_{mf} - \rho_{hr}}{\rho_{ma} - \rho_{mf}}} \quad (8)$$

式中的 φ_D 是按照(6)式算出的视孔隙度,而 φ 则表示消除了烃影响的孔隙度。

当地层中除了岩石骨架和孔隙流体以外还存在泥质时,岩层密度表达式将改写为如下形式^[10]:

$$\rho_b = \varphi \rho_f + V_{sh} \rho_{sh} + (1 - V_{sh} - \varphi) \rho_{ma}$$

式中的 ρ_{sh} 为泥质的密度, V_{sh} 为泥质含量。

则孔隙度 φ 的表达式可以写为:

$$\varphi = \frac{(\rho_{ma} - \rho_b) - V_{sh}(\rho_{ma} - \rho_{sh})}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (9)$$

以下将采用实际测井数据来计算岩层孔隙度。本文所选取的数据来自葡 XXX 井。本井是位于松辽盆地中央拗陷区大庆长垣葡萄花构造上的一口评价井,测井测量的主要地层为:黑帝庙油层组、嫩江组二段、葡萄花油层组和扶余油层组。

利用 Matlab-2012a 软件对公式(9)进行编程。编程时,可将孔隙度 φ 设为未知量,而骨架密度 ρ_{ma} 、孔隙流体密度 ρ_f 、岩层密度 ρ_b 以及泥质含量 V_{sh} 可以通过查表获得或者实际测得。其中,根据实际情况,通过表 1^[10]选取合适的岩石骨架及孔隙流体密度参数,将该井的实测数据制作成表 2,由此获得岩层密度、泥质含量以及含水饱和度的值(解释时使用)。

表 1 常见矿物和流体的密度
Table 1 Densities of minerals and fluids

矿物或流体	密度/(g/cm ³)
石英	2.65
方解石	2.71
白云石	2.87
钾盐	1.98
盐岩	2.165
石膏	2.32
无烟煤	1.4~1.8
烟煤	1.2~1.5
淡水	1
盐水(2%)	1.146
原油	0.85 左右
天然气	0.001293

将以上选取的数据输入公式(9)所编程序中,可以计算出每组数据的孔隙度大小 φ ,并填入表 2 之中。再将计算出的孔隙度结合含水饱和度可对地层的储集性进行初步解释。对于孔隙度很小,含水饱和度为 100% 的层段可以解释为干层。对于孔隙度较大,含水饱和度为 100% 的层段可以解释为水层。对于孔隙度较小,含水饱和度较大的层段可以解释为差油层。对于孔隙度较大,含水饱和度较大的层段可以解释为油水同层。对

表 2 葡 XXX 井孔隙度计算和解释结果
Table 2 Calculation and interpretation result of the porosity in Pxxx well

序号	井段/m	厚度/m	$\rho_d/(g/cm^3)$	$V_{sh}/\%$	$S_{wt}/\%$	$\varphi/\%$	解释结果
41	578.6~579.8	1.2	2.28	41.9	100	15.0	水层
42	582.8~587.0	4.2	2.24	24.5	100	22.1	水层
43	596.4~604.2	7.8	2.19	18.1	100	26.0	水层
44	607.4~613.6	6.2	2.21	16.3	100	25.5	水层
45	631.4~633.8	2.4	2.18	14.1	100	27.0	水层
46	653.4~659.6	6.2	2.26	21.3	100	22.7	水层
47	704.6~709.4	4.8	2.18	13.7	100	27.1	水层
48	716.0~717.6	1.6	2.32	34.7	100	18.0	水层
49	719.8~722.2	2.4	2.20	40.1	100	17.8	水层
50	1171.6~1174.8	3.2	2.24	9.1	54	23.4	油层
51	1179.0~1180.8	1.8	2.35	30.2	72	14.7	差油层
52	1181.8~1185.4	3.6	2.23	6.9	51	23.9	油层
53	1187.8~1189.8	2.0	2.26	16.4	53	20.2	油层
54	1195.0~1198.6	3.6	2.25	4.7	57	24.0	油层
55	1212.2~1215.4	3.2	2.24	11.0	86	22.1	油水同层
56	1216.6~1217.4	0.8	2.29	11.4	86	20.3	油水同层
57	1218.2~1220.8	2.6	2.26	12.3	88	21.5	油水同层
58	1658.2~1659.4	1.2	2.46	21.1	93	9.6	差油层
59	1662.6~1663.4	0.8	2.55	40.1	100	4.7	干层
60	1675.2~1679.8	4.6	2.37	16.6	70	16.1	差油层
61	1701.8~1704.8	3.0	2.54	30.6	100	5.8	干层
62	1743.2~1751.4	8.2	2.53	35.1	100	5.5	干层
63	1754.6~1758.0	3.4	2.45	23.9	81	10.8	差油层
64	1772.8~1774.6	1.8	2.62	47.0	100	0.5	干层
65	1827.0~1831.4	4.4	2.50	40.3	100	4.3	干层
66	1847.4~1851.6	4.2	2.58	42.8	100	1.8	干层
67	1859.0~1860.4	1.4	2.49	30.9	100	7.3	干层
68	1870.2~1871.0	0.8	2.59	38.6	100	2.2	干层
69	1877.0~1878.2	1.2	2.52	46.8	100	2.6	干层

于孔隙度较大 ,含水饱和度较小的层段可以解释为油层. 将解释结果填入表 2.

将以上结果与该井的实际解释结果相对照 ,孔隙度计算的结果误差很小 ,而解释结果基本正确. 从而证明了利用密度测井资料确定岩层孔隙度的可行性.

4 结论

孔隙度是石油储层评价的重要参数 ,如何比较准确地确定地层孔隙度是石油勘探的关键之一. 密度测井在石油勘探中是一种重要的孔隙度测井方法 ,其最基本的用途就是确定岩层的孔隙度. 通过上述工作 ,可以简单有效地计算不同岩层的孔隙度 ,证明了密度测井在孔隙度计算方面的应用价值. 随着科学技术的不断进步 ,密度测井技术也会随之不断更新. 未来 ,密度测井在石油领域会发挥越来越重大的作用.

参考文献 :

[1]杨荣国. 利用密度测井资料确定七里村油田长 6 油层上覆压力[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 13: 106—107.
[2]洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营 :中国石油大学出版社, 2002: 235—292.
[3]姚旭刚. 国内低渗透油气田高效开发钻完井关键技术发展现状[J]. 钻井工程, 2013, 33(2): 65—70.
[4]黄隆基. 放射性测井原理[M]. 北京 :石油工业出版社, 1985: 105—162.
[5]胡澍. 密度测井的理论与实践[J]. 测井技术, 1980(5): 29—36.
[6]吴文胜, 肖立志. 高分辨率密度测井探测器晶体尺寸的选择[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(3): 364—367.
[7]赵太平, 刘天定, 王秀明. 补偿密度测井仪器刻度对测井响应的影响分析[J]. 测井技术, 2011, 35(6): 576—580.
[8]宋有麟. 补偿密度测井刻度的理论计算[J]. 石油仪器, 1997, 11(6): 7—8.
[9]楚泽涵, 高杰, 黄隆基. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京 :石油工业出版社, 2008: 102—183.
[10]李舟波. 钻进地球物理勘探[M]. 北京 :地质出版社, 2006: 132—146.