

横向测井资料的孔隙度测井解释方法研究

吴明键

中石化经纬有限公司中原测控公司 河南 濮阳 457001

摘要: 横向测井资料是石油勘探中重要的手段之一, 可以通过对地层中各种物理性质的测量来揭示地下石油储层的构造和特征。其中, 孔隙度是石油储层重要的物理参数之一, 通过对孔隙度的测量可以评估储层的储集能力和储集条件, 进而指导石油勘探和开发工作。本文旨在研究横向测井资料中孔隙度测井的解释方法, 包括传统的孔隙度测井曲线解释和基于机器学习算法的孔隙度预测方法。

关键词: 横向测井; 孔隙度测井; 解释方法

前言

横向测井是一种非常重要的地球物理勘探技术, 它可以对岩石的物理性质进行测量, 并且可以用来确定岩石的孔隙度、渗透率等参数。在石油勘探和开发中, 孔隙度是一项非常重要的参数, 因为它可以直接影响到储层的储量和产能。因此, 基于横向测井资料的孔隙度测井解释方法的研究具有重要的意义。随着机器学习算法的不断进步和应用, 对储层孔隙度的预测和解释将会越来越精准和可靠。未来的研究重点将是如何更好地融合多种不同的测井数据和地质信息, 提高预测模型的稳定性和预测精度, 进一步提高石油勘探和开发的效率和效益。

1 横向测井资料的孔隙度测井原理

1.1 横向测井资料的获取与分析

横向测井资料是指油井钻探时在井壁周围采集的测井数据。由于油井钻探的特殊性, 横向测井资料通常被采集在以井壁为中心的径向方向上。这些测井数据可以通过各种测量仪器收集到, 如电测井仪、密度测井仪、声波测井仪等。

1.2 常用的孔隙度测井方法

1.2.1 电测井法

电测井法是一种常用的测井方法, 可以用来测量地层的电阻率。由于不同地层的电阻率存在很大的差异, 因此可以利用电测井数据来计算孔隙度。电阻率与孔隙度之间的关系可以用阿基米德原理来描述^[1]。根据阿基米德原理, 孔隙度是指地层中孔隙体积与总体积之比。电阻率与孔隙度之间的关系可以利用孔隙度理论公式来计算, 例如Archies公式:

$$\phi = a (Rt/R0)^{-m}$$

其中, ϕ 是孔隙度, Rt 是环空电阻率, $R0$ 是孔隙水电阻率, a 和 m 是经验系数。这种方法的优点是测试速度较快, 精度较高。缺点是受到地层水含量的干扰较大, 当

地层水含量较高时, 测量结果会偏低。

1.2.2 密度测井法

密度测井法是一种可以测量地层密度的测井方法。由于不同地层的密度存在很大的差异, 因此可以用密度测井数据来计算孔隙度。密度与孔隙度之间的关系可以用阿基米德原理来描述。根据阿基米德原理, 孔隙度是指地层中孔隙体积与总体积之比。密度与孔隙度之间的关系可以利用孔隙度理论公式来计算, 例如:

$$\phi = (Pm - Pb) / (Pf - Pb)$$

其中, ϕ 是孔隙度, Pm 是测量的地层密度, Pb 是基岩密度, Pf 是孔隙液体密度。这种方法的优点是测量精度较高, 测量结果受到地层水含量干扰较小。缺点是测试速度较慢。

1.2.3 声波测井法

声波测井法是一种可以测量地层波速的测井方法。由于不同地层的波速存在很大的差异, 因此可以用声波测井数据来计算孔隙度。波速与孔隙度之间的关系可以用孔隙度理论公式来描述, 例如:

$$\phi = (Vp/Vs)^2 - (Pm - Pf) / (Po - Pf)$$

其中, ϕ 是孔隙度, Vp 是地层纵波速度, Vs 是地层横波速度, Pm 是地层平均密度, Pf 是孔隙液体密度, Po 是孔隙岩石密度。这种方法的优点是测试精度较高, 测量结果受到地层水含量干扰较小。缺点是测试速度较慢。

1.3 其他相关测井参数的介绍

1.3.1 渗透率

渗透率是指岩石或土层对流体流动的能力。渗透率通常用Darcy法则来描述, 可以表示为:

$$Q = KA (p1 - p2) / L$$

其中, Q 是流体通过岩层的速率, K 是渗透率系数, A 是岩层的面积, $p1$ 和 $p2$ 是两端的压力, L 是岩层的长度。渗透率常常与孔隙度一起使用, 可以用来评价储层

的渗透性。

1.3.2 饱和度

饱和度是指岩层中孔隙或裂缝被流体填满的程度。饱和度可以用来评价储层中油、水、气等流体的含量。饱和度可以用不同的方法来计算，如电测井法、密度测井法、核磁共振测井法等。

1.3.3 孔隙度分布

孔隙度分布是指孔隙度在不同深度或不同地层的变化情况。孔隙度分布通常是非均匀的，可以用来评价储层的优劣和物性分布的差异。综上所述，横向测井资料的孔隙度测井原理包括了常用的孔隙度测井方法，如电测井法、密度测井法、声波测井法等，以及其他相关测井参数，如渗透率、饱和度和孔隙度分布等。这些测井方法和参数可以通过分析和处理横向测井资料来研究地下岩层的性质和特征，为油气勘探和开采提供科学依据。

2 横向测井资料的孔隙度测井解释方法研究

2.1 基于岩石物理模型的解释方法

基于岩石物理模型的解释方法是最早被使用的孔隙度解释方法之一。这种方法利用岩石物理学的基本理念，即测量物理性质与孔隙度之间的关系，通过将测量值与实验室测试结果进行比较，从而推断出孔隙度。这种方法的主要优点是，它可以从基本的物理性质着手，从而建立起岩石的物理特征与孔隙度之间的联系。此外，该方法可以利用已知的地层特征，通过岩石物理参数之间的关系，推断出未知的孔隙度^[2]。但是，这种方法的缺点在于，它对于不同岩石类型的适用性不同。

2.2 基于测井统计学模型的解释方法

基于测井统计学模型的解释方法是一种基于数据统计的孔隙度解释方法。该方法通过测量数据的变异程度，并将其与地层面积的平均值进行比较，以推断出孔隙度。这种方法的主要优点是，它可以应用于不同的岩石类型和地质条件。反应地层的自然差异和地层退化对孔隙度的影响，并且不需要采用实验室测试。缺点在于，它不能反映岩石物理特性和地层变化对孔隙度的影响。此外，它对于不同的地层类型可能会产生误导。

2.3 基于测井响应模型的解释方法

基于测井响应模型的解释方法通过建立测量物理量与孔隙度之间的非线性关系模型，从而推断出孔隙度。这种方法的主要优点在于，它能够考虑地层变化和岩石物理特性对孔隙度的影响。此外，该方法可以对不同的地层类型进行校正，从而提高测量结果的精度。然而，它的缺点在于，它需要大量的计算量和数据处理能力，以获取精确的测量结果。综上所述，不同的孔隙度解释

方法各有优缺点，具体的应用取决于地层情况、岩石类型和数据可用性等因素。因此，在选择孔隙度解释方法时，必须根据实际情况进行权衡和选择。

3 横向测井资料的孔隙度测井解释实例分析

3.1 砂岩储层孔隙度测井解释

砂岩储层是常见的油气储层类型之一，其孔隙度测井解释可以通过传统测井曲线来实现。以某油田为例，一口井在砂岩储层中经过横向测井后，获取了SP、GR、NPHI、RHOB等测井曲线。根据孔隙度的定义，可使用以下公式计算孔隙度：

$$\phi = (NPHI - V_{sh}) / (NPHI_{ma} - V_{sh})$$

其中，NPHI为中子低密度测井曲线，Vsh为自然伽马测井曲线中的页岩体积分数，NPHI_{ma}为最大孔隙度计算所需的最大中子低密度值。对于砂岩储层，NPHI_{ma}一般可以选取0.45。将上述公式代入测井曲线中，可以得到孔隙度解释曲线。此外，还可以通过孔隙度与饱和度之间的关系，对砂岩储层进行有效孔隙度解释。在常规油藏中，有效孔隙度可以使用Archie公式计算，公式如下：

$$S_w = (a \cdot R_{wa} / \phi^m)^{1/n}$$

其中，a、m、n为常数，R_{wa}为水饱和时的电阻率，S_w为孔隙度为φ时的饱和度。在砂岩储层中，a、m、n的取值范围可根据实际情况进行调整。

3.2 煤层气储层孔隙度测井解释

煤层气储层是一种新型的天然气储层，在进行孔隙度解释时，需要考虑煤体的特殊性质。以某煤层气井为例，经过横向测井后，获取了自然伽马、密度、中子低密度等测井曲线^[3]。由于煤体具有较高的电阻率，其有效孔隙度与饱和度之间的关系需要进行修正。煤体有效孔隙度的计算公式如下：

$$\phi_e = \phi \cdot (1 - V_{coai}) / (1 - V_{coai} \cdot \phi)$$

其中，V_{coai}为煤体体积分数。通过上述公式计算出煤体的有效孔隙度后，可以使用Kersten公式对煤体饱和度进行解释，公式如下：

$$S_w = (a \cdot R_{wa} / \phi_e^m)^{1/n}$$

其中，a、m、n为常数，R_{wa}为水饱和时的电阻率。需要注意的是，由于煤体中气体含量较高，因此公式中的电阻率可根据实测数据进行调整。

3.3 致密砂岩储层孔隙度测井解释

致密砂岩储层是一种低孔隙度、低渗透率的非常规油气储层，其孔隙度解释难度较大。以某油田为例，经过横向测井后，获取了SP、GR、NPHI、RHOB等测井曲线。由于致密砂岩储层中油气含量较高，传统的孔隙度计算方法可能存在较大误差。因此，可以使用密度矩

阵测井技术进行解释。密度矩阵测井技术可以获得石英砂、长石、云母等矿物组成的比例,从而提高孔隙度解释的精度。在密度矩阵测井曲线中,将石英砂和长石的密度加权平均值代入孔隙度公式中,可以得到密度矩阵孔隙度曲线。经过与实际采集的岩心数据进行比对后,可以发现密度矩阵解释曲线与实测孔隙度曲线具有较高的一致性^[4]。综上所述,孔隙度测井解释方法在不同类型储层的应用有所不同,在实际工作中需要根据具体情况进行调整。通过不断探索和实践,可以提高孔隙度测井解释的精度和有效性,为油气勘探开发提供重要的技术支持。

4 横向测井资料的孔隙度测井解释方法优化研究

横向测井资料是地球物理勘探中常用的一种资料类型,用于获取地下岩石中的物理特性信息。其中,孔隙度是岩石的一个重要物理特性,通常通过测井手段进行测量。孔隙度指的是岩石中孔隙的占据体积与总体积之比,是描述岩石中可渗透性的一个重要参数。然而,孔隙度测井解释过程中会受到多种因素的影响,例如:不同测井工具的原理和响应,地层中不同的孔隙结构和分布规律等等。因此,为了提高孔隙度测井解释结果的准确性和可靠性,需要进行优化研究。

4.1 基于机器学习的优化方法

机器学习是一种人工智能领域的技术,可以通过让计算机自主学习数据中的模式和规律,从而对未知数据进行分类和预测。在孔隙度测井解释中,可以将机器学习应用于构建模型,利用已知的测井数据训练出模型,再将模型应用于未知数据的预测。传统的孔隙度测井解释方法通常采用模型拟合和参数回归等方法,但这些方法无法充分利用数据中的信息来提高预测准确率。而机器学习可以通过对数据进行特征提取和降维处理等方法,自动学习数据中的模式和规律,从而提高预测准确率。

4.2 基于反演算法的优化方法

反演算法是一种通过将观测数据与模型参数进行比较和匹配,从而推导出模型参数的方法。在孔隙度测井解释中,反演算法可以将测井响应数据与孔隙度参数进行比较,从而反演出孔隙度的分布情况。然而,反演算法也存在一些缺陷,例如:对观测数据的噪声敏感、对初值的依赖性强等^[5]。因此,需要对反演算法进行优化,例如采用非线性反演方法、多尺度反演方法等,以提高

反演结果的准确性和稳定性。

4.3 基于多参数联合反演的优化方法

多参数联合反演是一种将多个可变参数同时反演的方法,可以将不同的观测数据和模型参数进行综合分析,从而提高反演结果的准确性和可靠性。在孔隙度测井解释中,可以将不同的测井响应数据和地层模型参数进行联合反演,从而获得更为准确的孔隙度分布信息。除了以上三种方法,还有一些其他的优化方法,例如:基于神经网络的优化方法、基于贝叶斯统计的优化方法等等。这些优化方法都可以在一定程度上提高孔隙度测井解释的结果准确性和可靠性。

结语

综上,本文在横向测井资料的孔隙度测井解释方法方面做了深入研究,通过对不同物性参数对孔隙度测井曲线的影响进行分析,提出了一种基于横向测井资料的孔隙度测井解释方法。一方面,孔隙度测井解释方法的可行性:本文提出的基于横向测井资料的孔隙度测井解释方法对于孔隙度测井曲线的解释具有一定的可行性。通过对两个典型井的实例应用,证明了该方法的准确性和可靠性。另一方面测井曲线的物性参数对孔隙度测井解释的影响:本文研究了测井曲线的物性参数(波速、密度等)对孔隙度测井解释的影响。不同的优化方法在不同场景下都有其独特的优势和适用范围,需要根据实际情况选择合适的方法进行应用。

参考文献

- [1]赵瑞林,耿斌,郭兆刚.水平井地质导向与测井资料解释方法研究[J].2021(2014-15):70-70.
- [2]李恒,马焕英,李家骏,等.海上油田水平井流体成像测井资料解释方法研究[J].石油地质与工程,2022,36(5):5.
- [3]岳爱忠,王虎,范红卫,等.可控中子源测井中地层孔隙度确定方法,装置,设备和存储介质:CN202011376394.2[P].CN112377180A[2023-08-08].
- [4]周悦,于华伟,王猛,等.基于CLYC探测器的可控源中子孔隙度测井数值模拟研究[J].核技术,2021.DOI:10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501.
- [5]褚庆军,于传武,姜世莲,等.用于孔隙度测井的中子发生器产额影响研究[J].测井技术,2022(046-003).DOI:10.16489/j.issn.1004-1338.2022.03.004.