

页岩气储层测井解释评价技术探究

李 庆

中石化经纬有限公司胜利测井公司解释研究中心 山东 东营 257000

摘要：页岩气作为重要的非常规天然气资源，其储层评价是技术开发的核心。测井技术是揭示页岩气成藏规律、提供工程参数的关键手段。本文探讨了页岩气储层的地质特征，分析了测井解释评价技术的重点和难点，包括矿物质含量、地化参数、物性参数及岩石参数的评价方法。通过综合应用多种测井技术和解释模型，旨在为页岩气储层的准确识别、分区评价及工程决策提供理论支撑和实践指导。

关键词：页岩气储层；测井解释评价；技术方法

引言：随着全球能源需求的不断增长，页岩气作为一种重要的非常规天然气资源，其开发利用日益受到关注。页岩气储层因其特殊的地质特征，如低孔低渗、有机质含量高及裂缝发育等，给测井解释评价带来了巨大挑战。本文旨在深入探究页岩气储层的测井解释评价技术，通过分析现有技术的优缺点，提出改进和优化方案，为页岩气勘探开发提供更为准确的地质信息和工程参数。

1 页岩气储层的基本特征

1.1 页岩气储层的定义与分类

1.1.1 页岩气的成因与储存机制

页岩气，作为一种非常规天然气资源，主要存储在页岩储层中。它的成因与储存机制相对复杂。页岩气主要由泥页岩层中的有机质在地质历史过程中经过热解和生物化学作用生成。这些气体在储层中以多种方式存在，主要包括吸附态、游离态以及溶解态。其中，吸附态气体主要吸附在页岩的有机质和黏土矿物表面，而游离态气体则储存在页岩的孔隙和裂缝中。溶解态气体则相对较少，主要溶解在储层流体中。

1.1.2 页岩气储层的类型与特点

页岩气储层可以根据其岩石学特征和有机质丰度进行分类。主要类型包括高有机质含量储层和低有机质含量储层。高有机质含量储层的有机质丰度较高，一般在2%以上，具有较强的吸附能力，有利于气体的储存。而低有机质含量储层的有机质丰度较低，气体生成量较小，但其开采难度相对较小。此外，页岩气储层还具有非均质性强、各向异性明显的特点，这增加了勘探和开发的难度。

1.2 地质特征

(1) 既是烃源岩又是储集体的特性。页岩气储层具有独特的“自生自储”特性，即泥页岩层既是烃源岩又

是储集体。这意味着页岩气在生成后，无需长距离运移即可在储层中聚集。这种特性使得页岩气藏通常具有较大的资源量和较稳定的产能。(2) 矿物成分复杂且富含有机质。页岩气储层的矿物成分复杂，主要包括黏土矿物、石英、碳酸盐矿物等。其中，黏土矿物和有机质对气体的吸附和储存起着重要作用。有机质不仅是生成页岩气的主要来源，还提供了大量的吸附表面，有利于气体的吸附储存。(3) 自由气与吸附气共存。在页岩气储层中，自由气和吸附气共存。自由气主要储存在页岩的孔隙和裂缝中，而吸附气则吸附在有机质和黏土矿物表面。这种共存机制使得页岩气储层具有较大的储气能力和较高的开采潜力。(4) 孔隙度与渗透率低。页岩气储层的孔隙度和渗透率通常较低。孔隙度一般在1%至6%之间，渗透率则小于0.1mD。这种低孔低渗的特性增加了开采难度，需要采用特殊的技术和方法进行开采^[1]。(5) 各向异性与非均质性明显。页岩气储层具有明显的各向异性和非均质性。这主要是由于页岩的沉积环境和成岩作用过程复杂多变所致。这种特性使得储层的物理性质和流体流动特性在空间上存在差异，增加了勘探和开发的复杂性。(6) 分布范围广且生产寿命长。页岩气储层在全球范围内广泛分布，且生产寿命相对较长。这使得页岩气成为一种重要的能源资源，具有广阔的发展前景。

2 页岩气储层测井解释评价技术的挑战

2.1 储层/产层识别与属性量化难题

(1) 超微孔环境下的储层识别。页岩气储层具有极低的孔隙度和渗透率，通常孔隙度低于10%，渗透率更是处于微毫达西甚至纳达西级别。这种超微孔环境使得储层的识别变得极为困难。传统的测井方法在面对这种复杂地质条件时，往往难以准确界定储层及产层的范围。因此，如何利用多种测井数据协同反演，如密度、声波、核磁共振等，以准确识别超微孔环境下的储层，是

当前亟待解决的技术难题。（2）多种测井方法的综合反演需求。由于页岩气储层的复杂性，单一测井方法往往难以全面反映储层的特性。因此，需要综合运用多种测井方法进行反演，以获取更为准确的储层信息。然而，如何有效整合这些测井数据，实现数据的互补与交叉验证，以构建覆盖从微观物性到宏观工程参数的综合评价体系，是当前技术面临的又一挑战。

2.2 裂缝系统的表征

（1）裂缝对流体运移的重要性。裂缝在页岩气开发中起着至关重要的作用，它们作为流体运移的主要通道，对储层的渗透性和产能具有显著影响。因此，准确表征裂缝系统对于评估储层潜力和制定开发方案具有重要意义。（2）传统测井工具在分辨微小裂缝时的局限性。然而，页岩中的裂缝系统往往非常复杂，且微小裂缝的分布和规模难以预测。传统测井工具在分辨这些微小裂缝时存在明显的局限性，如分辨率不足等问题。这使得裂缝系统的准确表征变得尤为困难。为了克服这一挑战，需要采用更为先进的测井方法，如电阻率成像（FMI）、声波扫描等，以实现对裂缝形态、走向、密度及综合导流特征的精细评价^[2]。

2.3 高精度工程参数的获取

（1）地层力学参数与孔隙-渗流特性的需求。在设计水平井钻井及多级压裂工程时，需要精确提供地层力学参数和孔隙-渗流特性，如杨氏模量、泊松比、岩石强度参数以及孔隙度和渗透率等。这些参数对于评估储层的可压裂性和制定增产措施至关重要。（2）数据融合与综合储层评价模型的构建。为了获取高精度工程参数，需要将地质建模、统计反演与人工智能算法相结合，进行数据融合和综合储层评价模型的构建。然而，由于页岩气储层的非均质性和各向异性等特点，数据多尺度、多物理场的联合解析成为一大难题。这要求开发新的解释算法和数值仿真工具，以实现更为准确的储层评价。

3 页岩气储层测井解释评价技术与方法

3.1 矿物质含量评价

3.1.1 方法介绍

（1）三孔隙度方法：通过声波时差、中子孔隙度和密度测井数据，结合岩石物理学模型，可以推算出储层的总孔隙度及各类孔隙的分布情况。进一步地，结合储层岩石的矿物组成特征，可以估算出各种矿物的相对含量。这种方法快速且相对经济，但在复杂岩性储层中可能存在一定的误差。（2）元素能谱方法：利用伽马射线能谱仪测量储层岩石中自然放射性元素的特征X射线和伽马射线，通过解析这些射线的能量谱，可以确定岩石中

各种元素的含量，进而推算出矿物的具体组成。这种方法准确性高，但设备成本和维护费用也相对较高。（3）伽马射线计算方法：通过测量储层岩石的自然伽马射线强度，结合已知矿物的伽马射线产额数据，可以反推出岩石中放射性矿物的含量。这种方法操作简便，但受限于放射性矿物的种类和含量，对于非放射性矿物的评估能力有限。

3.1.2 优劣势分析

（1）三孔隙度方法：优势在于成本低、操作简便，能够快速提供孔隙度和矿物含量的大致估算；劣势在于精度受储层岩性和流体性质影响较大，特别是在复杂岩性储层中可能产生较大误差。（2）元素能谱方法：优势在于能够提供详细的矿物组成信息，准确性高；劣势在于设备成本高，操作复杂，且对放射性环境有一定的要求。（3）伽马射线计算方法：优势在于操作简便，成本较低；劣势在于适用范围受限，主要适用于含有放射性矿物的储层，对于非放射性矿物的评估能力有限。

3.2 地化参数计算

3.2.1 计算方法

（1）含碳量：可以通过元素能谱方法或总有机碳（TOC）分析仪直接测定。元素能谱方法通过测量岩石中碳元素的含量来间接计算含碳量；TOC分析仪则通过高温氧化法直接测量岩石样品中的有机碳含量。（2）热成熟度：通常通过镜质体反射率（Ro）来表征。Ro可以通过显微镜下的光学测量获得，也可以通过测井数据（如电阻率、密度等）进行间接计算。热成熟度越高，说明有机质转化程度越高，储层含气潜力越大。（3）镜质体反射率：是评价有机质成熟度的一种常用指标。其测量需要专业的显微镜和光源设备，操作相对复杂，但准确性高^[3]。

3.2.2 应用

（1）电阻率方法：在富含有机质的页岩储层中，电阻率与有机质的含量和热成熟度密切相关。通过电阻率测井数据可以间接推算出有机质丰度和热成熟度。（2）放射性预算：虽然放射性元素与有机质含量没有直接关系，但放射性预算可以提供岩石中放射性元素的含量信息，为其他地化参数的计算提供辅助信息。（3）中子方法：中子测井可以提供储层中的含氢指数信息，这与有机质的含量有一定的相关性。通过中子测井数据可以间接推算出有机质丰度。

3.3 物性参数评价

3.3.1 计算方法

（1）孔隙度：可以通过三孔隙度测井数据进行计

算。声波时差、中子孔隙度和密度测井数据分别反映了岩石的声学特性、含氢指数和体积密度，结合这些数据可以计算出总孔隙度、有效孔隙度等关键参数。（2）

渗透率：由于页岩储层的渗透率极低且非均质性强，直接测量渗透率困难且成本高昂。因此，通常采用间接方法进行估算。常用的方法包括基于孔隙度、泥质含量、有机质丰度等参数的经验公式，以及基于核磁共振（NMR）测井或压汞法等实验室数据的转换模型。

3.3.2 三孔隙度与电阻率结合的应用

三孔隙度测井数据与电阻率测井数据的结合应用，可以提供更全面的储层物性信息。例如，通过声波时差和中子孔隙度的差异可以识别出不同类型的孔隙（如粒间孔、有机质孔等），而电阻率数据则有助于区分孔隙中的流体类型（如水、油、气）。这种综合应用有助于更准确地评估储层的储集能力和流体分布。

3.3.3 渗透率计算中的泊肃叶公式与软件应用

泊肃叶公式是描述多孔介质中流体流动的经典公式，但在页岩储层中直接应用泊肃叶公式进行渗透率计算存在困难，因为页岩的孔隙结构复杂且非均质性强。然而，一些先进的测井解释软件和模型，如Eclipse、Petrel等，结合了地质统计学、分形几何学和流体动力学等多学科理论，能够更准确地模拟和预测页岩储层的渗透率。这些软件通常提供了基于多种测井数据的综合解释方法，包括孔隙度、渗透率、饱和度等参数的联合反演和优化。

3.4 含气量计算

3.4.1 吸附气与游离气的计算方法

（1）吸附气：页岩储层中的吸附气主要吸附在有机质和黏土矿物表面。吸附气的含量可以通过等温吸附实验来测定，该实验模拟了不同压力下气体在岩石上的吸附行为。基于实验数据，可以建立吸附等温线模型，进而估算储层中的吸附气含量。（2）游离气：游离气存在于岩石的孔隙空间中，其含量可以通过孔隙度、气体密度和地层压力等参数计算得出。在页岩储层中，游离气的含量通常较低，但在高产井中仍占有一定比例^[4]。

3.4.2 等温吸附实验与经验公式的应用

等温吸附实验是评估页岩储层吸附气含量的最直接方法。然而，实验过程复杂且成本高昂，因此在实际应用中常采用经验公式进行估算。这些经验公式通常基于大量的实验数据和地质统计分析，能够考虑多种影响因

素（如有机质丰度、热成熟度、孔隙结构等），从而提供相对准确的吸附气含量预测。

3.5 岩石参数计算

3.5.1 弹性参数与强度参数的评价

（1）弹性参数：包括弹性模量、泊松比等，反映了岩石对外部应力的响应特性。这些参数可以通过声波测井数据计算得出，对于理解储层的变形机制和预测开采过程中的压力变化具有重要意义。（2）强度参数：如单轴抗压强度、抗拉强度等，直接反映了岩石的抵抗破坏能力。这些参数通常通过实验室实验（如单轴压缩实验、巴西劈裂实验等）来测定。在实际应用中，可以结合测井数据和地质统计模型进行预测和评估。

3.5.2 经验公式的拟定与实验数据的利用

为了更准确地评估岩石参数，研究者们常根据实验数据和地质特征拟定经验公式。这些公式能够综合考虑多种因素对岩石参数的影响（如岩石成分、孔隙度、温度等），从而提高评估的准确性。同时，充分利用实验数据（如岩石力学实验、测井数据等）进行参数反演和校验也是提高评估精度的重要手段。在拟定经验公式时，需要注意公式的适用范围和局限性，避免过度外推和误用。

结束语

综上所述，页岩气储层测井解释评价技术是页岩气勘探开发的关键环节，对于提高储层识别精度、优化开发方案具有重要意义。随着技术的不断进步和创新，未来的测井解释评价将更加注重多学科融合、数据智能化处理及综合解释能力的提升。通过持续探索和实践，我们有理由相信，页岩气储层的测井解释评价技术将为全球能源开发注入新的活力，推动页岩气产业的持续健康发展。

参考文献

- [1] 李松臣,位蕊,李兆惠.页岩气储层测井解释评价技术方法分析[J].陕西煤炭,2020,(05):54-55.
- [2] 刘鸿博.基于体积模型和约束优化算法的页岩气储层孔隙度测井解释方法研究[J].自然科学,2020,(11):112-113.
- [3] 冷玥,赵迪斐,郭英海,等.页岩气储层测井评价技术研究与应用现状[J].非常规油气,2020,(10):107-108.
- [4] 颜磊,周文,樊靖宇,等.川南深层页岩气储层含气量测井计算方法[J].测井技术,2021,(12):149-150.