井中地震测井仪 (VSP) 在高温井中的应用

张 鹏 (中海油田服务股份有限公司油技上海作业公司, 上海 200137)

摘要: VSP 又称垂直地面剖面法, 是一种以井孔为依托来实现地震波采集的地球物理方法, 能够测定井孔周边地质剖面垂直变化, 也能够完成不同深度的井中观测, 该种方式具备分辨率高、信噪比高以及动力学特征明显等优势, 能够提供精准的时深转换以及速度模型, 辅助地面完成资料的处理、完成岩性以及储层物性的研究。不过当前全球范围内的能源紧张促使天然气以及石油勘探逐渐朝向更深地层开展, 但对于高压高温井测井而言, 伴随着储存实际深度的增加, 地层性质会发生改变, 也会对测井仪器的稳定性和精准性产生影响, 对测井仪器也提出了更高的要求, 只有充分考虑多种实际因素、做好科学决策才能够有效满足高温测井的需求。本文将对井中地震测井仪 (VSP) 在高温井中的应用进行分析与探讨, 以期能为石油资源的勘探、开采提供重要的参考。

关键词: 井中地震测井仪; VSP 测井技术; 高温高压井

1 VPS 测井技术概述

1.1 技术原理

VPS 测井技术从地表激发震源, 可以同时完成多个观测点、多个深度的地震信号收集, 测线沿着井孔呈现垂向布置, 进而实现垂直地震剖面平面图的获取。该过程包含零井源距观测、非零井源距观测以及 VSP 斜井观测三种方法。测井接收点全部分布于地质介层内部, 受到干扰较少, 能够有效避免地表低降速带吸收地震波而造成的地震波衰减。在检测过程当中, 既能接受自上而下的下行波, 也能接收自下而上的上行波。井中地震测井仪 (VSP) 设备系统主要由测量定位装置、激发震源、井下仪、地面仪、电缆、绞车以及相应的资料处理软硬件组成, 各个系统装置在测井工作进行时紧密连接, 突破了传统测井弊端, 有效地改善了地面地震资料的解释。

当前在应用 VPS 测井技术完成测井任务时, 不仅能够形成详细的地震资料; 同时能够利用地震资料提高记录分辨率、提升地质现象的横向分辨能力从而对地质的岩性以及储集层进行研究, 更能真实的探测反应地层的构造形态进行地震反射层的识别, 实现了从单一少量的地质任务朝向高分辨率、多地质以及深层勘探任务的跨越。不难看出, VSP 测井技术能够直接完成地质地震对应关系的建立, 利用井筒波进行地下裂缝探测, 对二次采油系统进行监视等应用也在探索之中。

1.2 地震测井仪 (VSP) 的应用

1.2.1 资料的采集

VSP 资料的采集工作主要是指测井工作开展之前对油井周边综合情况建立详尽的了解为测井工序提供基础。需要调查的内容包含地形地物周边的实际情况, 油区周边交通配置以及水源分布情况。同时, 也需要对与施工有关的问题进行系统化的分析, 并按照实地考察的综合状况编制各项测量报表, 确定测量施工的可能性。需要依据所获取的资源完成施工设计书的编制, 并按照设计书的要求测定大井的炮点、高程坐标、位置等基础信息, 从而进行测量作业点的确定, 这样才能更好地分析表层低降速带的速度和厚度, 并根据其数值变化选

择激发井深。另外, 在资料的采集过程当中应该充分考察爆炸半径, 根据实际试验确定药量保证反射波具备足够的反射能量。

1.2.2 资料的处理

VSP 资料处理要在实际观测系统记录条件的基础上建立, 同时结合激发因素以及处理目标综合实验根本确定内容以及顺序。首先, VSP 资料采集的过程当中原始资料中会因为各种随机以及噪声等干扰而导致有用信息的掩盖, 所以 VSP 资料必须经过处理对无用信息进行剔除; 其次 VSP 资料处理的过程中应该选择适当的处理目标, 并以目标为导向完善处理流程, 结合实际前提条件的利用, 针对实际情况选择最有效的、效率最高的处理方法。整个 VSP 资料的处理过程分为三个层次, 第一层次为预处理, 包含解编以及增益恢复等工作; 第二层次为常规处理, 主要是指深度叠加、垂直叠加, 同样也包含上下行波长的分离和振幅处理; 第三层次为特殊处理, 特殊处理的过程当中具备一定的针对性, 主要是指对偏移 VSP 资料的处理, 包括斜井 VSP, 移动震源 VSP 等。

1.2.3 资料的解释应用

VSP 技术反映的是地下地层结构以及测量参数之间直接的对应关系, 有效地改善了传统地面地震资料的解释效果, 在对 VSP 资料的解释运用过程当中, 首先进行的是声波时差数据合成记录的制作, 利用 VSP 速度针对性地对泥浆侵入以及井径坍塌等因素造成的声波时差的速度误差予以矫正, 得到精准的时深数据关系, 并利用矫正记录完成层位的标定, 以确认在地震剖面上正确的反射层位; 接下来要进行的工作是对 VSP 资料中提取的速度参数对合成记录结果的纠正, 同时将纠正得出的成果进行地质层位标记以及储层标记, 最后一步根据测井录井结果形成信息报表。

1.3 VPS 测井过程中的影响因素

1.3.1 深度、压力、温度因素

随着岩石埋藏深度的增大地震波的速度也会随之增大, 因为相关研究表明, 随着井层层深度的加深, 其温

度和压力都会随之产生一定的变化，每增加 100m 的井深会导致地层温度升 3-4℃，地层压力的影响主要表现在对介质密度的影响上，随着低压的增大介质的密度逐渐增大，尤其对于深度埋藏的岩石而言，所需要承受的地层压力是一个积累的过程，深度越深压实作用越强介质密度越大，产生的地震波速度也就越大。而且不同的地层时代虽然岩石成分深度相近，但在时代的积累背景之下，较早岩层的岩石成岩时间较长，致密性表现更为明显同近代地层地震波会产生较大的差异。而随着温度的升高，岩石组分状态和弹性都会发生改变，所以会对地震波速度造成影响。

1.3.2 震源频率因素

在实际的测井过程当中，需要通过不同频率地震波进行勘探、测量，VPS 测井技术的根本在于地表震源的激发，震源是可控的，只有合理的对震源进行选择才能够实现准确的信息获取。当地面仪器发射出遥控信息时，内部的电路会以地面仪表发射的控制信息为基础，形成扫描的频率信息，再利用液压伺服系统的控制器用震动仪器发出延续震动讯号，进而引发地震波效应的产生。目前已知当前全波测井所采用的是 103Hz 高频地震波测量方式，而传统的地质调查研究采用的则是 101Hz 的地震波作用。在 VSP 测量过程当中，一般使用的地震波频率都要低于 100Hz，才可以真实的反应岩层的弹性和特性。

VPS 测井选用的振波速度计算根据公式：

$$v \approx \sqrt{\frac{2\eta\omega}{\nu}}$$

式中：

$\eta = (4/3) \eta$ ， η 为岩体的弹性黏滞系数；

ω 为圆频率；

ν 为波速。

1.3.3 岩性、岩体结构因素

VSP 测井技术实施的过程当中受岩性以及岩体结构构造的影响较为明显，岩性因素主要是指各类岩石类型和成分之间产生的差异化，岩石构成当中会有一定的孔隙产生随之岩层密度发生改变，在孔隙度以及流体性质的影响下地震波速度也会发生改变。岩体当中存在的层面断面以及节理发育等问题都会造成岩体弹性的改变，对于岩体结构构造而言，孔细节处理以及层面断层表现的发育性越强，相应的地震波速度就会越低。另外，在岩当中难免会有水源的存在，不同的含水量差异会导致整个岩层弹性产生差异，直接影响着地震波速度。

2 高温井测井应用

2.1 油气勘探开发发展趋势

随着人们对油气需求量的增加以及世界能源的日益紧张，油气资源的开发利用成为了各国竞争的主要内容。当前世界范围内的油气勘探开发皆完成了从原来的常规资源开发到非常规资源开发的转变，我国在非常规油气

资源开发过程当中占据着一定的优势形成了较大的潜力，尤其是深层油气储量丰富发展前景十分可观。近年来全球范围内的油气开发大多集中于海上，而我国的深海油气开发也实现了跨越式的发展。油气勘探开发逐渐向深层高温高压进军，但同时也对测井技术带来了一定的挑战和考验。

2.2 高温井测井特征

高温高压井最大的特点就是深度深、温度高、压力高，这样的井孔通常具备岩层埋藏深度大底层压实严重的特征，无论对其流体性质进行评价还是对其储存参数进行获取，都存在着较大的技术困难。且在高温高压下，普通的测井仪器已经超出适用范围，难以满足实际需求，如果测井过程当中未能制定科学的方案采用全新的测井仪器进行数据采集，容易导致测井数据不精准甚至是生产测井失败。

2.3 高温井测井突破

随着技术的发展和突破，我国逐步进入 8000m 以上超深层油气勘探开发的全新阶段，但随着油气井深的不断增加，传统的测井电子传感器难以在高温高压环境之下实现精度的测量，因此技术的提升是保证产品价值实现长效机制的有效途径，也是推进加大油气资源勘探开发的根本动力。当前，低频与宽频激发、宽线长排列高覆盖观测、高密度的两宽一高的三维地震勘探技术进入规模化应用阶段，三维 VSP 与三维地震数据采集一体化技术也得到了良好的延伸。

我国超高温测井系统的开发和应用建设如火如荼，成为极端环境当中探清油气储藏的火眼金睛，也为油气储藏实现油气储量的评价提供了有效参考。例如中海油田服务有限公司所研发的超高温满贯测井“ESCOOL”系统，成像质量达到国际先进设备主流，结合生、电、放射、核磁等高精尖技术，融合了电缆高速数据传输以及井下总线高速通信技术，创造了 5572m 井深和 193℃ 井温的作业记录，完成了智能化、数据化的超越，为探测神秘的地下世界提供了更多可能。

3 井中地震测井仪（VSP）在高温井中的应用

3.1 高温井测井设计

3.1.1 完成井中地震测井仪校验

高温井温度压力也普通井差异较大，会对井中地震测井仪产生一定的影响，所收集到的资料也会有所偏差。为此，在测井过程当中要保证测井仪器具备良好的一致性和稳定性，根据实际测井要求以及测井深度对测井仪器进行校验，完成误差量以及偏差幅度的测量和控制。

3.1.2 模拟地层条件完成岩心实验

模拟地层条件下的岩心实验能够完成对温度、压力以及地层进行常规条件的确定，从而明确温度和压力对岩石孔渗造成的影响，确定延时参数和骨架值，保证测井过程当中数据的获取以及实验的开展过程的参考意义，从而满足高温测井实际问题。

3.1.3 制定作业方案

首先要考虑到测井难度和影响因素,根据现有的技术指标和安全标准提出科学可行的作业方法,严格地按照仪器设备制造商所给出的检测手段以及主要参数进行管理。其次,高温井深度较深会超出仪器有效测量范围,因此要在现有的指标的基础之上进行必要的改造和优化,并根据实际情况进行适当的调整和完善、保证仪器具备良好的抗高温高压性能、保证测定方案达到科学性的需求。

3.1.4 及时评价处理测井资料

资料的处理和评价能够形成有效的参考,因此在测井实际工作开展之前要对相关的资料进行处理、评价和调整,据资料特点以及处理要求掌握方法类型和评价标准。整个资料的处理包含特殊环境之下曲线的矫正;完成电阻率正演和反演的计算,减小环境因素造成的测井资料误差;对高温高压地层进行预测确定温度和压力值;并对储存特性进行适当的分析和研究,以确保测井资料在评价的过程中达到高标准、严要求,提升整体评价效果。

3.2 高温井测井准备

3.2.1 电缆准备

常规测井过程当中电缆对信号衰减较弱,但在高温条件之下随着温度的增加电缆的电阻明显增加,且高温井深度较深电缆长度更长,所以整个测量过程当中会对信号产生一定程度的衰减影响。为此,在进行测井施工工作之前要保证电缆达到耐高温和耐高压的要求,同时考虑电缆与仪器接收系统的匹配程度。通过环境模拟计算电缆型号和规格,保证其在测量过程当中同井中地震测井仪实现良好的匹配,最大限度地避免型号尺寸的错误,另外随着使用长度的加大,电缆自身的自重也会大幅增加,因此在测量过程当中会受到较大的张力,进行电缆选择时要考虑仪器的承重情况保证其具备一定的拉力克服能力,促使其发挥功能作用。

3.2.2 仪器设备的准备

井中地震测井仪设备系统包含地面仪器也包含井下仪器,因此在仪器准备过程当中应该综合考虑设备标准做好地面设备以及仪器设备的准备工作,保证其功能型号符合测定需求,根据实际情况做好参数调整,同时对整个系统仪器实施全面的检测保证仪器设备可靠性,保证在井下工作时实现正常稳定的运行。另外,高温测井深度较深,所以电缆始终处于高张力承受状态,而此时的仪器设备也要保证具有良好的张力以解决仪器设备不适应等问题。

3.3 高温井测井实施

测井实施的过程当中应该综合考虑各种条件的影响,根据作业特点分析高温井的特殊之处,同时对压力设备的应用型号和方法进行完善分析做好方案执行工作。高温井下条件比较复杂泥浆腐蚀性气体等存在会影

响整个测量结果,以泥浆为例,随着温度和压力的增加泥浆的黏度也会明显上升,所以地震测井仪在下井的过程当中会受到较大的阻力,因此在仪器下井之前,应该做好通井工作,利用泥浆循环的原理保证泥浆温度降低,保证仪器长时间运行。

3.4 基于 VSP 测井信息的岩体物理力学参数的计算及其应用

松泊比参数 σ 反映的是岩石矿物成分结构以及孔隙度含水量,利用松泊比物理参数能够完成岩层孔隙度和渗透性进行判断,松泊比 σ 计算公式如下:

$$\sigma = \frac{2-r^2}{2(1-r^2)}$$

剪切模量 μ 反映的是表征岩层以及岩体所能够承受的剪切力, μ 值越大岩石韧性越强,岩石颗粒较粗,岩层的胶结程度越好。剪切模量 μ 计算公式如下:

$$\mu = \rho \times V_s^2$$

压缩模量 K 被称为岩石抗压系数,展现的是岩石的刚性程度,其数值的大小同岩体围压密切相关,能够推断出地层压力的变化。压缩模量 K 计算公式如下:

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}$$

杨氏模量 E 真实地反映岩石内部结构以及矿物成分、构造和孔隙度,不含砂体的黏土层中杨氏模量 E 变化范围较小,杨氏模量 E 计算公式如下:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

4 综述

垂直地面剖面法 VSP 测井技术是一项成熟的井中物探技术,测井过程当中表现出的优势较为明显。随着我国油气勘探范围的扩大,对高温井测井中地震测井仪的应用也提出了更高的要求。在高温井测井过程当中,首先要保证方案的科学性和先进性,根据实际作业需求和条件做好仪器调整,提升仪器针对性,突破测井过程中的难点问题,保证实际测井效果达到预期目标,为油气勘探提供有效参考。

参考文献:

- [1] 张雄辉,游畅,华远飞.超高温高压井测井技术及应用探讨[J].石化技术,2021,28(04):65-66.
- [2] 杨金华,张焕芝.非常规、深层、海洋油气勘探开发技术展望[J].世界石油工业,2020,27(06):20-26.
- [3] 姜元刚.新疆油田 VSP 测井数据库系统研发与反思[J].石河子科技,2011(06):41-42+40.
- [4] 仇燕.斜井 VSP 射线追踪正演模拟[D].成都:成都理工大学,2008.

作者简介:

张鹏(1985-),男,汉族,陕西渭南人,毕业于西安石油大学,本科,中级职称,研究方向:测井。