



核物理方法在石油测井中的应用

郭余峰 单秀兰

利用核物理方法进行地球物理测井,称为核测井.核测井是以研究岩石及其孔隙流体的某种核物理性质为基础的.核测井与其它测井方法(如电法测井、声波测井等)相比,具有独特的优点.它既可以在裸眼井中又可以在套管井中测量,而且不受井内介质的限制.因此,它在测井中得到越来越广泛的应用.

核测井方法有许多种,概括起来可以分为三大类,即伽马测井、中子测井和同位素示踪测井.

一、伽马测井

伽马测井是以研究地层的自然放射性,以及伽马射线与地层相互作用为基础的测井方法.其方法有以下几种:

1. 自然伽马和自然伽马能谱测井

自然伽马测井是地球物理测井中最基本同时也是最简单的测井方法,它采用探测器直接记录井孔剖面中地层的自然伽马强度.岩石的自然放射性是由天然放射系的一些核素产生的,由于不同岩石所含的放射性核素含量不同,因而所辐射的强度也不同,利用自然伽马测井曲线可以反映不同地层的岩性剖面.

自然伽马测井反映的仅是地层放射性的总效应,自然伽马能谱测井则能测得地层伽马射线的能量分布.根据能谱分析,可以获得地层中钾、铀和钍等放射性核素的含量及其分布情况,这对进一步利用地层提供的自然伽马信息,解决较复杂的岩性划分、地层对比以及确定地层的泥质含量等地质问题,都具有很重要的意义.

2. 密度测井

密度测井又称伽马-伽马测井.选用 ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ 年)做为辐射源,它发射能量为 0.662MeV 的伽马射线,这种能量的伽马射线与地层作用的形式主要是光电效应和康普顿效应.康普顿效应与地层密度成正比,光电效应则对地层岩性有更高的灵敏度.为此,在探测被地层散射的伽马射线时,记录仪器开设两个

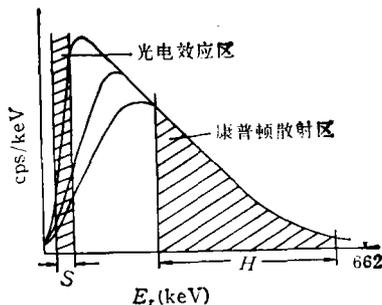


图1 在密度相等的不同石灰岩中测得的散射-吸收伽马能谱

窗口,一个记录光电效应区的 $40\sim 80\text{keV}$ 的伽马射线,另一个记录康普顿散射区的 $180\sim 540\text{keV}$ 的伽马射线,如图2所示.

利用高能谱段H的计数可以求得地层的密度,利用低能谱段S与高能段H计数率的比值,可以求出岩石的光电吸收截面指数,它们可有助于复杂岩性的分析.

对于生产井中的混合流体,也可以用光电效应和康普顿效应来测量其平均密度和含水率.从图2可知,当伽马射线能量 $E_\gamma < 30\text{keV}$ 时,水、原油或甲烷的质量

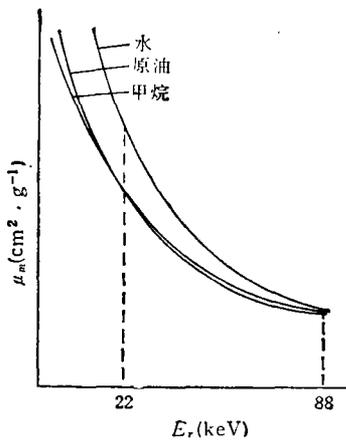


图2 原油、甲烷和水的吸收系数曲线

吸收系数 μ_m 有明显的差别,这是由于光电效应起主要作用的缘故.当 $E_\gamma > 60\text{keV}$ 后,水、原油或甲烷的质量吸收系数的差别就不大了.当 $E_\gamma > 90\text{keV}$ 时,它们的质量吸收系数基本相等.

选取 ^{109}Cd ($T_{1/2} = 453\text{d}$)作为辐射源,它发射能量分别为 22keV 和

88keV 两组伽马射线.由于低能量的伽马射线与物质作用主要是光电效应,因此可用其测定混合流体的视含水率;能量较高的一组伽马射线与物质作用主要是康普顿效应,用它测定混合流体的平均密度.有了这两个参量,就可以求出混合流体中油和天然气(主要成分是甲烷)的含量.

二、中子测井

利用中子与地层中的物质的相互作用来研究地层、寻找油气藏和解决油田开发中问题的测井方法,称为中子测井.中子测井可概括分为一般中子测井和脉冲中子测井.

1. 一般中子测井

一般中子测井多采用 (α, n) 同位素中子源,早期曾使用 $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ 源,近年来主要使用 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 源,这种源的半衰期较长(433年),伴生的伽马射线较弱,中子的平均能量为 5MeV ,是一种比较理想的中子源。

中子源放出的快中子与地层物质作用时,不断损失能量而逐渐减速。在岩石物质中中子减速较小,而在含有大量氢的水层和油层中减速较大。减速后的热中子很容易被岩石中的原子核所俘获,同时放出伽马射线。在距中子源较远的位置对俘获伽马射线进行探测,根据伽马射线的强弱,就可以了解岩石中含氢量的多少,进而可以用它来划分多孔岩层和测定其孔隙度。这种测井方法称为中子-伽马法。

如果用中子探测器来代替上述的伽马射线探测器,则称为中子-中子法。中子-中子法记录的是地层中被减速的热中子和超热中子。在记录超热中子时,地层水和岩石骨架中含有的热中子强吸收体(如C1和B)的干扰可以大大减小,因此突出了对含氢量的识别能力,热中子和超热中子测井主要是用来测定地层的孔隙度。

2. 脉冲中子测井

利用 $^1\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 反应的井下脉冲中子发生器,发射出 14MeV 的快中子。快中子射入地层后,首先进行非弹性散射,产生非弹性散射伽马射线,紧接着便是弹性散射,使中子能量进一步损失而变成热中子。热中子被地层中岩石物质的原子核俘获,同时放出俘获伽马射线。此外,快中子和热中子都可以使地层中物质的原子核活化,活化的原子核衰变时放出伽马射线(如图3)。

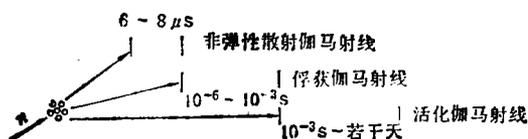


图3 快中子诱发的伽马射线时间分布

在脉冲中子产生后的不同时间内对伽马射线进行测量,可以构成不同的测井方法。

由于碳的快中子宏观非弹性散射截面在含油岩层要比含水岩层大,而氧的快中子宏观非弹性散射截面在含油岩层比含水岩层小,而且碳和氧的快中子非弹性散射伽马射线的能量差别也很大(分别为 4.43MeV 和 6.13MeV),所以利用碳和氧的快中子非弹性散射伽马峰之比,就可以成为判别地层中含油和含水量的灵敏指示。因此,这种方法又称为C/O能谱测井。这种测井方法主要用来确定地层的含油饱和度。

在地层中,对其它核素的非弹性散射伽马及俘获

伽马特征谱的测量,还能得到许多与地层岩性以及孔隙度等有关的信息。

从脉冲中子变为热中子的瞬间起,到热中子大部分(约63.7%)被地层中的物质吸收时止,热中子所经历的这段平均时间称为热中子的寿命。测量热中子在地层中寿命的测井方法,称为中子寿命测井。很明显,不同岩性的地层和地层孔隙中充填的液体不同,对中子的吸收能力也不同,因而中子的寿命也不同。利用中子寿命测井可以区分油水层,划分油、气和水界面。

地层物质中的原子核,被中子活化以后发生核衰变而放出伽马射线,测量这些活化伽马射线的测井方法,称为中子活化测井。中子活化测井可以直接测定地层中所含核素的类别及其含量,因而可以确定地层的岩性和孔隙流体的性质。

三、放射性同位素示踪测井

放射性同位素示踪测井,是利用人工放射性同位素作为示踪剂,了解井下采油、注水的动态,以及检查油井的技术状况。通常把 $^{131}\text{I}(T_{1/2}=8.04\text{天})$ 或 $^{137}\text{Ba}(T_{1/2}=11.7\text{天})$ 用活性炭吸附后掺入流体注入井内,通过液体在井内的流动,而使同位素分布到各种孔隙空间。利用探测器对示踪物质进行追踪测量,可以确定流体的运动状态及其分布规律,从而可以解决分层注水以及检查井下施工质量等问题。

近年来已研制成功 $^{137}\text{Ba}-\text{GTP}$ 型同位素微球载体,这种微球载体既可以滤积在井壁上便于放射性探测,又可以在一定时间后溶解而不影响地层的吸水能力。目前,这种微球在油田生产中已经得到了广泛的应用。

随着核物理学、核电子学以及电子计算技术的发展,各种核物理方法已经广泛地应用到石油测井中,并在不断地深入和发展。它的发展趋势有以下几个方面。

1. 超高能次生伽马能谱测井。将中子发生器发射的中子能量由 14MeV 提高到 200MeV 以上,用超高能中子轰击地层中的核素,这样将会产生一些新的核反应,使微量元素测井成为可能。超高能中子测井信息,可用于确定油气藏岩层的孔隙度、含油饱和度、矿化度、渗透率、粘土含量和岩石的矿物成分等,使得识别油气层和确定剩余油、气饱和度的精度大大提高。

2. 碳同位素测井。我们一般都称 ^{14}C 为时代,因此利用测量岩层中的碳同位素 ^{14}C 的信息,可以用来鉴定油气藏岩层的地质时代和年龄,对于分析和研究油气藏的形成以及所处的地质环境具有重要的意义。

3. 核磁测井。核磁测井是利用核磁共振现象来测定地层中自由流体的含量、地层的孔隙度、渗透率、含油饱和度,以及划分储集层、确定出水量等问题的测井方法,它具有功能全、精度高等优点。目前,这种测井方法在国外已开始应用,被誉为“万能测井”。