

测油井 性散射 $\gamma$ 能谱 用快中子非弹

### 一、概述

随着大规模的石油勘探与开发，在近代核物理和电子学技术高度发展的基础上，核技术在石油测井中得到了广泛的应用，形成了一个重要的测井分支，统称放射性测井。普通的测井方法，如电法测井、声波测井等，只

能测裸眼井，不能测套管井。而放射性测井，因中子和 $\gamma$ 射线能穿透地层、套管以及仪器的外壳，则既可以测量裸眼井，又可以测套管井。

放射性测井中比较重要的方法有中子测井（如中子- $\gamma$ 测井，中子寿命测井等）和能谱测井。中子- $\gamma$ 测井是通过测量地层的含氢量来确定地层的岩性和孔隙度。中子寿命测井是测热中子在地层中被吸收的时间——中子寿命。当油田地层的矿化度高（NaCl含量高于50000ppm）时，由于Cl和H的热中子俘获截面相差很大，所以油层和水层的热中子寿命有明显的差别。在高矿化度油田的套管井中，中子寿命方法可以有效地划分出油层和水层。但当油田水的矿化度较低时（NaCl含量低于20000ppm），含油砂岩和含水砂岩的热中子寿命基本相同，则中子寿命法便无法分清油岩层和水岩层。而能谱测井则不受水的矿化度限制。能谱测井（包括自然 $\gamma$ 能谱、中子俘获 $\gamma$ 能谱、中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱和活化 $\gamma$ 能谱测量）是直接测地层的元素及含量。

现在油田普遍采用注水开发技术。所谓注水开发就是在两排油井的中间，打一些水井，以一定的压力把水注入地层中，用水把油顶出来。这样可以保持地层的原始压力，维持较长时间的稳产。但是由于地层结构、渗透率等不同，水在油层中推进的速度并不均匀，在水速快的部分将出现油层水淹。所以在油田开采到中晚期，急需判断在生产井套管外面油层注水开发后的变化，以确定有无继续开采的价值，为二次采油提供必要的参数。在淡水油田中，只有快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井能完成这一任务。许多国家都先后开展了这方面的工作。美国、苏联、日本等国，在五十年代便开始了NaI(Tl)-快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井的方法研究，六十年代投入现场实验，七十年代投入小批量生产。我国于六十年代中开始了NaI(Tl)-快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井的方法实验，七十年代末投入现场实验。由于Ge(Li)探测器有很高的能量分辨率，

所以有些国家开始探索Ge(Li)-快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井的可能性。我国于1974年开始了这项研究的实验工作，79年投入现场实验。结果表明，Ge(Li)-快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井方法的灵敏度很高。

### 二、快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井原理

快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井，是通过测量快中子与地层中的某些元素的原子核发生非弹性散射产生的 $\gamma$ 射线的能谱，来判断地层中某些元素的含量。

当一束14MeV的快中子射入地层后，与地层中元素的原子核发生非弹性散射，将核激发。受激核退激时便放出 $\gamma$ 射线。这个过程几乎是立即发生的。然后中子通过弹性散射慢化为热中子。在砂岩地层中，慢化时间大约需 $10^{-6}$ — $10^{-3}$ 秒。热中子不断地被地层中某些原子核所俘获，同时放出俘获 $\gamma$ 射线。时间再晚些，将有一些生成的活化核衰变，放出活化 $\gamma$ 射线。图1给出了在砂岩地层中，中子脉冲宽度为10微秒时，上面三种 $\gamma$ 射线的时间关系。

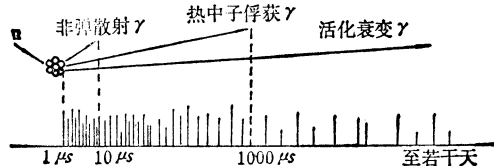


图1 中子轰击砂岩层产生三种 $\gamma$ 射线的时间关系（脉冲宽度10微秒）

不同的原子核所放出的 $\gamma$ 射线具有不同的特征，通过对 $\gamma$ 能谱的分析可以判断原子核的种类。而分析 $\gamma$ 谱的强度可以定出元素的含量。

为确定油田地层中的油层、水层和油水含量，分别选取碳和氧作为油和水的指示元素。因为油层中碳的含量远多于水层，而水层中氧的含量则多于油层。在砂岩地层中，除了C、O、Si、H外，还有少量的Fe、Na、Mg及Cl等元素。

通过测量C/O比值来确定地层中的油水含量，既可以提高灵敏度，又可以避免中子产额绝对测量的麻烦。实际上测得的C/O比值远小于这个计算值，这与仪器性能及周围的环境均有关系。

应该指出的是，C/O比值测井方法对C元素是灵敏的。如果只测C/O比值，则无法分清是地层岩石骨架中的碳，还是地层孔隙流体中的碳。还必须通过其它参数的测量，如Si/Ca比值，来判断地层的岩性。

我们知道，当 $\gamma$ 射线与物质相互作用时，将产生三种效应：光电效应、康普顿效应和电子对效应。 $\gamma$ 射线能量超过3MeV时，在NaI(Tl)和Ge(Li)晶体中主要是电子对效应。所谓电子对效应，就是当能量高于1.02MeV的 $\gamma$ 射线进入探测器时，其能量有可能全部被探测器的原子核电场吸收而形成一对正负电子

对(即一个正电子和一个负电子)。正电子在探测器中湮没时,产生两个大小相等方向相反的湮没光子,它们具有的能量为 0.511MeV。当两个光子都被探测器吸收时,则探测到的 $\gamma$ 射线能量为入射 $\gamma$ 射线能量;如果两个光子中有一个逃出探测器,则探测到的 $\gamma$ 射线能量比入射 $\gamma$ 射线能量低 0.511MeV。如果两个光子都逃出探测器则探测到 $\gamma$ 射线能量比入射 $\gamma$ 射线能量低 1.02MeV。所以对入射能量为 $E_\gamma$ 的 $\gamma$ 射线入射到探测器时将可能出现能量为 $E_\gamma$ ,  $E_\gamma-0.511\text{MeV}$ 和 $E_\gamma-1.02\text{MeV}$ 的三个峰,即全能峰,单逃逸峰和双逃逸峰。显然C的 4.43MeV $\gamma$ 射线和O的 6.13MeV $\gamma$ 射线也分别有三个峰。……

用 NaI(Tl) 测量,这三个峰是分不开的(因 NaI(Tl) 的能量分辨最好只有 $\sim 8\%$ ),只能用三个峰的总面积来计算 C/O 比。这样本底影响大,灵敏度低。求出的饱和油砂与饱和水砂的 C/O 比值之差只有 20% 左右。

Ge(Li) 探测器的能量分辨比 NaI(Tl) 要高一个量级还多,这些峰可以清晰的分开,可单独求某一个峰的面积,本底影响易扣除。用双逃逸峰求出的饱和油砂与饱和水砂的 C/O 比值,其相对差值可达 200% 以上。在复杂地层,同时测量俘获 $\gamma$ 射线,便可以识别岩性。

### 三、仪器设备

快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井仪器包括脉冲中子源、 $\gamma$ 射线探测器和电子学线路三部分。

(1) 脉冲中子源:脉冲中子源由密封中子管、120kV 的直流靶压和脉冲调制线路组成。中子管产额一般为 $10^7-10^8$ 中子/秒。使用寿命大约 100—200 小时。

由前面我们可以知道,14MeV 中子射入地层产生的非弹性散射 $\gamma$ 、俘获 $\gamma$ 和活化 $\gamma$ 有着不同的时间分布,因而可以从时间关系上将这三种 $\gamma$ 射线区别开来。使用脉冲中子源正是为了减小俘获 $\gamma$ 、活化 $\gamma$ 对非弹性散射 $\gamma$ 谱测量的影响。如果中子脉冲频率太高,则前一个中子脉冲则产生的俘获 $\gamma$ 影响太大;如果中子脉冲频率太低,测量时间过长,统计就不易准确。因此中子脉冲的频率和宽度必须进行适当的选择,一般都采用 5000 周—10000 周的频率,5—10 微秒的脉冲宽度。

(2)  $\gamma$ 射线探测器: $\gamma$ 射线探测器有两种:一是 NaI(Tl) 闪烁计数器。它的优点是使用方便,探测效率高。但是它的能量分辨差,饱和油砂与饱和水砂的 C/O 比差别小。另一种是半导体探测器,如 Ge(Li) 或高纯 Ge。这类探测器能量分辨高,区分地层含油饱和度差别的能力强。特别是当地层的组份比较复杂时,它能清晰地同时给出各种元素的俘获 $\gamma$ 射线谱,来

判别岩性。在这一点上,NaI(Tl) 则无法与之相比。但 Ge(Li) 探测效率低,需要低温工作条件,技术上比较复杂,实现连续测井有困难,主要用来解决疑难层。

(3) 电子学系统:图 2 给出了 Ge(Li) 非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井装置方块图。整个装置分成地面和井下两部分,中间用测井电缆连接。同步信号产生器的同步信号分两路送出,一路送中子管的控制线路,产生脉冲中子;另一路送至地面,经延迟后,控制线性门,以选择合适的测量时间。线性门 2 为本底门。 $\gamma$ 射线探

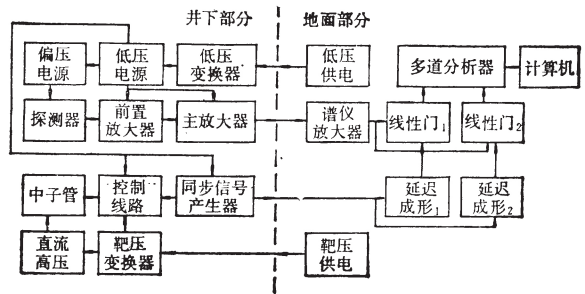


图 2 Ge(Li) 非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井装置方块图

测器接受到的信号,经前置放大器送入主放大器,放大后送到地面,再经整形放大送入线性门,最后送入多道分析器进行脉冲分析。多道分析器与小型计算机连接,可以同时进行数据处理。

一般石油井的深度多在千米以上,井下温度较高,因而要求电子学线路的温度稳定性要好。

### 四、结束语

非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井,主要用来判断油层、水层及油水含量。由实验结果知道,含油饱和度与 C/O 比值之间近似成线性关系。以预先在标准井中测得的不同含油饱和度的 C/O 比值为标准,便可由测得的 C/O 比值求出某一待测层点的含油饱和度。

假设孔隙度为 $\phi_0$ 时,在标准井中测得饱和油砂的 C/O 比值为 $A_1$ ,饱和水砂的 C/O 比值为 $A_2$ ,则在相同孔隙度下测得的任一 C/O 比值 $A_x$ 对应的含油饱和度为:

$$S_0 = \frac{A_x - A_2}{A_1 - A_2} \times 100\%$$

如果所测地层的孔隙度为 $\phi_i$ ,则 $A_x$ 对应的含油饱和度为:

$$S_i = \frac{A_x - A_2}{(A_1 - A_2) \times \eta} \times 100\%$$

其中

$$\eta = \frac{\phi_i / \phi_0}{(100 - \phi_i) / (100 - \phi_0)}$$

所测含油饱和度的精确度,取决于饱和油砂与饱和水砂 C/O 比值的相对差值及测量误差。C/O 比值相对差值大,测量误差小,则区分含油饱和度的能力

强,精确度高。油井中的测量误差主要是统计误差。

目前,快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井是淡水油田套管井中确定油层、水层、判断水淹程度的唯一有效方法。其测井符合率达80%以上。在所有的测井方法中,是符合率最高的一种。虽然它的技术是比较复杂的,但由于这一方法显示了很大的优越性,仍然得到了较快的发展。世界上很多大油田都使用了NaI(Tl)进行快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井,并且正在积极开展Ge(Li)快中子非弹性散射 $\gamma$ 能谱测井方法的研究。