

利用碳氧比测井数据获得岩性不相关孔隙度指数

刘富华

1 南京大学地球科学与工程学院 2 中核坤华能源发展有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v2i2.110

[摘要] 碳氧比能谱测井数据在解释过程中通常只利用能谱数据获得地质信息,其时间谱仅在控制中子发生器激发逻辑上产生作用。利用碳氧比能谱测井 γ 计数时间谱数据进行处理和分析,可以得到岩性不相关孔隙度指数。通过比较岩性不相关孔隙度指数和由能谱分析获得的含 H 指数,得到的岩性不相关孔隙度指数更能反映地层真孔隙信息。

[关键词] 碳氧比能谱测井; 时间谱; 岩性不相关孔隙度指数; 岩性相关孔隙度指数; 岩性指数

1 中子与地层的反应及 γ 射线的释放

1.1 中子与地层的反应

除了地层原本就含有的自然 γ 之外,碳氧比能谱测井探测的更多是由于快中子在进入地层之后与地层物质发生的一系列反应所释放出的 γ 射线^[1,2]。通常所提到的中子的能量都是指中子的动能 $E_n=mv^2/2$ 。按照能量大小可以将中子划分为^[3]: 快中子 ($E_n>0.5\text{MeV}$)、中能中子 ($0.5\text{MeV}>E_n>1\text{KeV}$)、慢中子 ($E_n<1\text{KeV}$)。每一种中子所对应的能量并不是确定的,因为在温度不同的情况下中子的活性就会不同,在本文中采用 25°C 的时候各类中子对应的能量。

碳氧比测井中脉冲中子源发射出能量为 14MeV 的快中子,快中子射入地层之后,与地层中的物质发生一系列核反应,反应过程如下:

(1) 快中子非弹性散射: 快中子被靶核吸收形成复核,而后再放出一个能量较低的中子,靶核仍处于激发态。这种处于激发态的原子核通过放射 γ 粒子的方式回到基态;

(2) 快中子对原子核的活化: 快中子与某些原子核反应生成新原子核,有些是放射性核素,以一定的半衰期衰变,并发射出 β 或 γ 粒子;

(3) 快中子的弹性散射及其减速过程: 中子和原子核碰撞后,系统的总动能不变,中子所损失的动能全部转换成反冲核的动能,而反冲核仍处于基态;

(4) 热中子在岩石中的扩散和被俘获: 最后当中子的能量与组成地层的原子达到热平衡状态时,中子不再减速。热中子被俘获时释放出 γ 粒子。

碳氧比能谱测井仪通过探测地层中的 γ 粒子,分析得到非弹性散射 γ 能谱和俘获 γ 能谱。通常碳氧比能谱测井仪在发射快中子的同时记录非弹和俘获复合谱,在发射间隙记录俘获谱,经过处理可以得到非弹谱。图 1 为同一测量点处记录的非弹谱、俘获谱和时间谱。

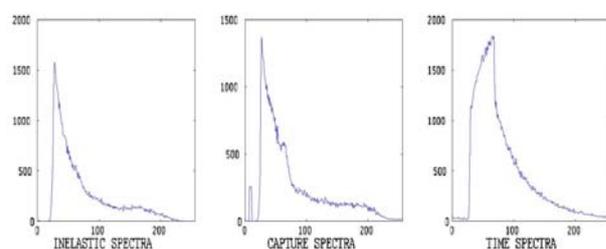


图 1 同一测量点的非弹、俘获和时间谱

1.2 中子衰减在 γ 计数时间谱上的反映

由图 1 可知,在计数上升(发射中子)的过程中受非弹和俘获双重影响,而在计数下降的过程中所记录的技术主要是俘获的响应。因为 γ 计数率和地层中含中子数量呈正相关,因此俘获 γ 射线探测过程中的数量衰减说明了地层内中子数量的减少。

图 2 和图 3 分别是在 0 孔隙度和 10% 孔隙度条件下中子速度和中子计数关系的示意图,图中不同颜色的曲线表示在某一时刻中子在速度域上的分布与其计数之间的关系。在快中子发射 $100\mu\text{s}$ 之后,中子就基本处于速度分布固定的麦克斯韦分布上。此时中子已经几乎全部减速为热中子,其速度分布只与介质的温度有关。由此可以断定,在中子脉冲发射停止后到中子达到稳态之前地层中的主要发生超热中子与地层介质间的弹性散射。

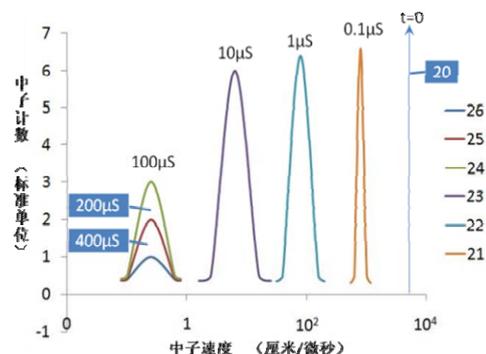


图 2 零孔隙度岩层中子计数和速度的关系

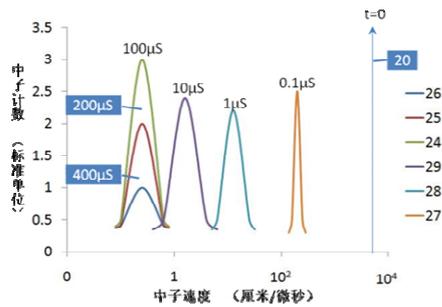


图3 10%孔隙度岩层中子计数和速度的关系

因为碳氧比能谱测井仪的脉冲周期同样为 100 μs, 可以认为在俘获 γ 测井时地层中超热中子与地层介质间发生的弹性散射是中子数量衰减的主要原因。中子在弹性碰撞中最大能量损失如(1)式所示:

$$\overline{\Delta E_{\max}} = \left[1 - \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \right] E_0 \quad (1)$$

(1)式中: A—靶核质量数 E₀—中子初始能量

通过上式可以推导中子在弹性碰撞中平均能量损失如(2)式所示:

$$\overline{\Delta E} = \frac{2A}{(A+1)^2} E_0 \quad (2)$$

由公式(1)和(2)易知靶核质量越小, 中子能量损失越大。故质量数小的原子越多, 超热中子衰减的越快。地层孔隙中的流体主要是烃及水, 包含大量的 H 原子, 而岩石骨架中原子的原子核质量数较大。所以孔隙度越大含有的 H 原子越多, 对中子的能量衰减越明显。超热中子的衰减速度会直接影响被俘获的热中子数量, 也就间接反映在了时间谱俘获区间 γ 计数的衰减上。

2 岩性不相关孔隙度指数获得与分析

2.1 基于时间谱分析获得岩性不相关孔隙度指数

图4为一个测量点上记录的 γ 计数时间谱, 记录宽度为 100 μs, 分 256 道记录。横轴为时间记录点, 纵轴为每一时刻对应的 γ 计数值。选择时间谱中第 76 到地 200 时间记录道的数据作为种子衰减谱, 以去除非弹 γ 的影响。γ 衰减谱如图 5 所示。

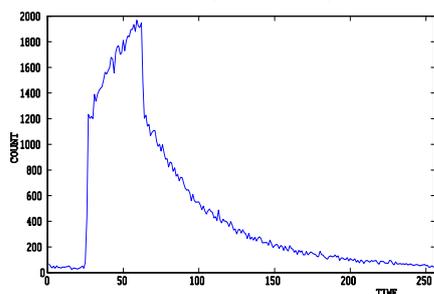


图4 γ 计数时间谱

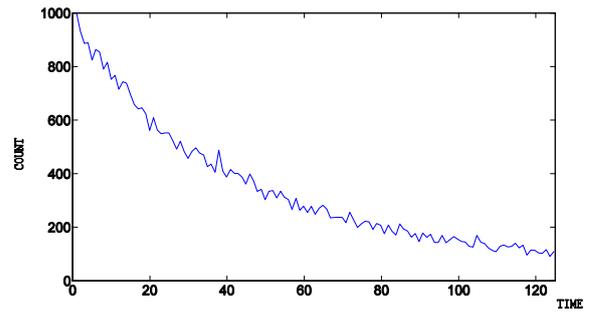


图5 γ 计数衰减谱

每一个测量点都能获取一个 γ 计数衰减谱, 通过将每一个衰减谱分为两部分(本研究将衰减谱分为 1 至 62 道和 63 至 125 道两部分), 每个部分的计数分别求和, 之后再计算两部分的比值, 就能得到一个代表 γ 计数衰减速度的指数。

所有测量点所对应的 γ 计数衰减指数组合在一起将形成一条 γ 计数衰减曲线。这条曲线反映了地层中超热中子弹性散射发生过程中中子数量减少的情况。如果某一测量点目的地层中 H 元素含量较多, 则探测到的 γ 衰减谱中显示的衰减速度快, 其在曲线上对应的值较低, 反之对应的值会较高。因而这条反映地层含 H 元素含量的曲线可以称为岩性不相关孔隙度指数曲线。如图 6 所示, 横坐标为深度, 纵坐标为对应深度的岩性不相关孔隙度指数。

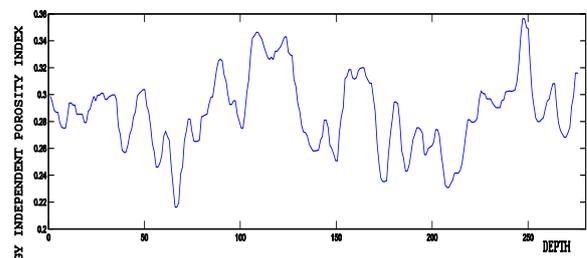


图6 岩性不相关孔隙度指数曲线

2.2 基于能谱分析的含 H 指数曲线的获得

碳氧比能谱测井仪记录的俘获谱信息中可以获取含 H 指数。通常碳氧比的能谱分析采用能窗法, 就是分析中子与地层中不同元素之间发生非弹散射和俘获效应时放出的 γ 能量值的不同, 在非弹谱和俘获谱上分别划定对应的能量区域来代表该元素在地层中的含量。表 1 为 H、Si 和 Ca 在俘获谱上对应的能窗和该能窗在能谱上对应的能量道址的范围。

表1 H、Si 和 Ca 在俘获谱上的对应信息

地层元素	H	Si	Ca
能窗范围 (MeV)	2 [~] 2.58	2.91 [~] 5.32	5.34 [~] 6.81
能量道址	51 [~] 66	74 [~] 736	137 [~] 174

由于 Si 和 Ca 是地层岩石主要组成元素, 因此 H/(Si+Ca) 能反映

地层中 H 元素的含量。将其计数按照 $H/(Si+Ca)$ 进行计算, 可以得到相应测量点的含 H 指数。得到含 H 指数曲线如图 7。

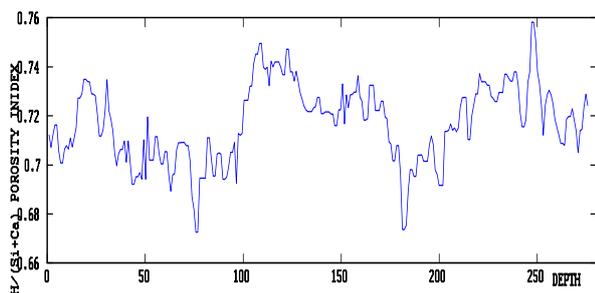


图 7 能谱孔隙度指数曲线

2.3 岩性不相关孔隙度指数与含 H 指数对比

放射性测井都会面临放射性统计起伏问题, 除了用低速测量来增加计数率降低统计起伏以外, 也有利用后续处理以减小统计起伏的影响的方法。碳氧比能谱测井仪采用能窗法对获得的谱信息进行处理。在能窗的选取中首先要达到能反映一种元素的能量的计数尽可能的包括在能窗内, 其次还要考虑减少其他能量相近的由其他元素所发射出的 γ 计数的干扰。这两个过程是相互矛盾的, 因此通过能窗选定的计数中除了有目的元素的 γ 计数自身统计起伏的影响还掺杂其他元素 γ 计数的影响。

通过分析 γ 计数时间谱却利用了衰减过程中所有的 γ 计数。尽可能多的计数能够很好的消除统计起伏的影响, 因此通过时间谱分析获得岩性不相关孔隙度指数有更好的指示地层孔隙度信息的能力。

比较图 6 和图 7 两种孔隙度指数曲线, 二者在整体大趋势上有一定的相关性, 但是两条曲线在细节上有比较多的不同, 这是因为:

(1) 能谱孔隙度指数在计算的过程中除了与地层中 H 含量相关之外还与 Si 和 Ca 的含量相关, 因此当地层的岩性界面变化时, 也将对含 H 指数曲线值造成影响;

(2) 岩性不相关孔隙度指数虽然是间接反映地层的孔隙度信息, 但从上文公式 (2) 中易知岩性不相关孔隙度曲线几乎只与地层中 H 元素的含量有关, 因此岩性不相关孔隙度指数曲线没有那么多细节上的尖峰, 变化也较平缓。

通过上述分析可知, 岩性不相关孔隙度指数曲线相比能谱孔隙度指数曲线能够更好地反映地层孔隙度信息。在判断层位上岩性不相关孔隙度指数曲线的能力也更加突出, 岩性不相关孔隙度指数在地层评价中也有较好的应用价值。

3 结论

碳氧比能谱测井思想从 50 年代提出以来, 其主要的地质信息的获得和解释思路都是从能谱分析上入手。碳氧比能谱测井的能谱资料的深入开发和应用已经得到了很大的发展, 但是 γ 计数在时间域上的分析却发展甚少。

本文利用碳氧比能谱测井仪的 γ 计数时间谱数据进行分析处理, 获得了岩性不相关孔隙度指数, 认识了其地质意义和其在测井解释及地层评价中应用的可行性。证明了碳氧比能谱测井的时间谱资料中同样能够获取地层孔隙度信息。

通过本文中介绍的处理方法和手段所得到的岩性不相关孔隙度指数丰富了碳氧比能谱测井所获得的信息, 在测井解释和地层评价的过程中也将有良好的应用。对那些没有进行过裸眼井放射性测井系列的生产井, 也可以在碳氧比能谱测井的同时获得其孔隙度信息。

[参考文献]

- [1] 张志友, 王敬缺. 碳氧比在油田开发中的应用[J]. 油气井测试, 1998, (3): 54-56.
- [2] 庞巨丰, 陈军, 杨懿峰, 等. 快中子非弹性散射 γ 全能谱测井实验与谱分析[J]. 测井技术, 1993, (05): 349-356+380.
- [3] 吴文圣, 肖立志. 小井径双源距 C/O 测井响应随源距的变化关系[J]. 核电子学与探测技术, 2006, (03): 257-260+290.