

14MeV脉冲中子在地球物理测井中的应用

潘洪进 陈芳贵

(江汉石油管理局测井研究所)

摘要: 目前14MeV脉冲中子在地球物理测井中正在得到日益广泛的应用。本文主要介绍了中子寿命测井、加速器补偿超热中子孔隙度测井、次生 γ 能谱测井、瞬发裂变中子测井和一些其它测井应用。

一、引言

自从1959年FD-T中子发生器产生以来,已发展了一系列脉冲中子地球物理测井方法和仪器。中子发生器向地层发射14MeV脉冲中子,中子与井眼周围的介质除了非弹性散射发射瞬发 γ 射线外,中子还被介质慢化为热中子,而发生 (n,γ) 反应,发射俘获 γ 。另外中子还与地层中元素产生各种核反应而发射活化 γ ,通过对这些 γ 射线和热中子衰变率的测量和计算,可以提供地层有关元素含量的信息,从而确定所需要的有关参数。对于石油测井来讲,利用得到有关元素的信息,确定地层中油水饱和度、孔隙度、岩性、粘土类型及矿化度等参数,然后进一步对地层的结构及石油的含量进行研究。对于铀矿地质,主要利用14MeV中子被地层慢化为热中子,而这些热中子引起 ^{235}U 裂变,并发射中子群,然后又被地层介质慢化为热中子,测量这些超热中子及热中子反映地层的含量,这称为瞬发裂变中子测井。

利用上述原理目前已有中子寿命、C/O比、次生 γ 能谱、活化及瞬发裂变中子测井。本文主要介绍这些测井方法在近几年以来的新发展及其应用。

二、中子寿命测井

中子寿命测井也叫热中子衰减时间测井

(TDT)。它是脉冲中子测井方法最常用和重要的一种,该方法早在60年代就投入现场使用。它解决的地质问题主要是在裸眼井和套管井中划分油气、水层。主要原理是脉冲中子被地层介质减速而慢化为热中子,然后被地层介质吸收,测量热中子在地层中的衰减率反映地层岩石的化学组成和含量,也就是热中子衰变率与地层热中子宏观俘获截面 Σ 有关,可以按下列公式定量解释地层含水饱和度:

$$S_w = \frac{\Sigma_{\text{测井}} - \Sigma_{m_0} + \phi(\Sigma_{m_0} - \Sigma_h)}{\phi(\Sigma_w - \Sigma_h)} \quad (1)$$

其中 Σ_{m_0} , Σ_w , Σ_h 分别表示地层骨架,水和油气的热中子宏观俘获截面, ϕ 为地层孔隙度。

在通常中子寿命测井仪器中,在一个脉冲测量周期内开二个测量门I和II,设二个门时间内测量计数率为 N_1 和 N_2 时,而地层俘获截面和计数率有下列关系:

$$\Sigma = 35 \lg N_1 / N_2 \quad (2)$$

这种固定门的方法往往给实际测量带来困难。例如高碳化度砂岩地层,热中子寿命短,而致密灰岩地层热中子寿命长。如果要求每周期内测量本底以前热中子计数率降为1/1000,显然二者在选择开门计数时间上有矛盾。因此固定计数门不能根据实际需要在测量过程中自动调节,而美国Schlumberger公司在70年代末发展一种称TDT-M型中子寿命测井仪,测量时间的分配随被测地层的

中子寿命的差别而自动进行调节, 该仪器的测量结果比固定门仪器统计涨落误差小, 测井速度也有提高, 目前该型仪器设有十几个计数门, 而每个门的启开和门的宽度按一定比例调节, 因此这种技术也称为“比例因子”方法。

1985年Randall(伦德尔)等人推出了PDK-100型测量地层热中子宏观截面 Σ 的新脉冲中子测井系统, 它除了确定地层宏观热中子俘获截面外, 还提供地层孔隙度测井曲线, 测量标准偏差曲线以及井眼环境有关信息。该仪器测井的基本原理与前面脉冲俘获测井一样, 不同的仅在于信息记录方式不同, 一来脉冲后, 仪器中的长短探测器所探测到的中子俘获 γ 射线按多定标方式记录在100道内, 每道计数 $10\mu s$, 整个循环周期为 $1000\mu s$, 这样该系统得到唯一俘获 γ 射线的衰变谱, 从 γ 射线的时间谱上可以得到许多有关地层信息, 这对提高测井解释能力非常重要, 例如, γ 射线时间谱的早期部分是中子非弹性散射 γ 谱, 由长短源距探测器测量的 γ 射线计数之比(RIN)曲线对确定井眼条件、鉴定井眼源体接触界面非常重要; 当中子源关闭后, 测量到的 γ 射线主要来源于热中子俘获, 从热中子开始衰变部分, 两个探测器测量计数率比曲线(RBOR)对井眼、地层性质很灵敏, 对确定井内矿化度、源体接触面和套管的变化起了重要作用; 而非弹性散射 γ 和俘获 γ 计数率比(RICS)曲线对地层孔隙度很灵敏。测量标准偏差MSD曲线可以随时监视 Σ 的测量精度。PDK-100型测井系统经过现场试验得到大量的数据, 对井眼条件和石油储集层可以进行更完善的解释。

脉冲中子俘获测井主要是测量地层的 Σ 反映地层的含油或含水饱和度, PDK-100型系统测量地层的 Σ 不象前面所述的固定门和比例因子方法, 因为这两种方法的缺点是在离脉冲束较远的测量门, 计数率低而引起统计误差大, 因此该仪器采用伦德尔1983年提出平均时间测量地层 Σ 值。

每一脉冲中子束后, 地层中任何一点的热中子密度都按指数规律变化:

$$n = n_0 e^{-t/\tau} \quad (3)$$

式中 n 为 t 时刻的热中子计数率, n_0 为 t 在零时刻的热中子计数率, τ 为热中子衰变常数。

(3)式等效于中子寿命测井仪所测量到的俘获 γ 射线强度的衰减, 这就是平均时间技术测量地层 Σ 的物理基础。

令 $\tau = 1/\Sigma V$, 则在平均时间 \bar{t} 内俘获 γ 射线的计数率为:

$$n(\bar{t}) = n_0 e^{\Sigma V \bar{t}} \quad (4)$$

其中 V 为热中子的速度, ΣV 为衰变率。在测量时间内记录一个 γ 脉冲的平均时间 \bar{t} 为:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^G t p(t) dt}{\int_0^G p(t) dt} \quad (5)$$

式中 $p(t)$ 为在 t 时间内产生 γ 脉冲的几率函数, $0, G$ 分别为测量门计数起始和终止时间。因为在时间 t 产生俘获 γ 射线的几率正比于热中子的强度, 因此 $P(t)$ 可表示为:

$$P(t) = P_0 \exp(-\Sigma V t) \quad (6)$$

其中 P_0 为归一常数, 将(6)代(5)可以得到:

$$\bar{t} = \frac{1 - (1 + \Sigma V G) \exp(-\Sigma V G)}{\Sigma V [1 - \exp(-\Sigma V G)]} \quad (7)$$

其中 G 为测量时间的门宽, 方程(7)是计算平均时间的一个标准数学表达式。通常, 测量 \bar{t} 的方法是累计从门起始到记录每个脉冲相隔时间的总和, 然后把这个总和除以门时间内的脉冲总数, 结果在测量门时间内观察到的 γ 射线分布是一个脉冲时间的算术平均值。

根据方程(7), 预先制作标准 $\Sigma - \bar{t}$ 刻度曲线, 在实际测井时, 只要测得 \bar{t} 值, 就可以在标准曲线上求得地层的 Σ 值。很显然该技术与前面所述固定门式比例因子法不同, 它不受远距脉冲测量门计数低的影响, 虽然计数率低但得到同样的平均时间 \bar{t} 。因此, 从方程(7)求出的 Σ 值不受计数低的影响, 从而改变了由于统计误差引起测量精度

难以提高的弊病。同时也不改变 Σ 值的物理意义及测井解释。测井误差小,重复性好,只要在普通的中子寿命测井仪器上稍加改进就可以实现。

三、加速器补偿超热中子孔隙度测井

地层孔隙度是石油地质评价中一个很重要的地质参数。目前用5居里 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 中子源的井壁中子测井仪和20居里 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ 中子源的补偿中子测井仪。前者测量超热中子,后者测量热中子指示地层的孔隙度。很显然,这两种仪器操作人员必须受很大的剂量。1986年M.L.Gartner等人研制成功加速器补偿超热中子孔隙度测井仪,它具有下列优点:(1)用超热中子计数指示地层孔隙度不受吸收热中子很强的B、Gd、Cd等元素影响,因为在泥质砂岩中经常存在B、Gd、Cd等三种元素,用通常热中子测井计算的孔隙度一般要加几个孔隙度单位。(2)孔隙度计算统计精度高,(3)使用加速器源在通电以前没有放射性,操作人员安全;(4)设计的仪器是圆柱形,结构比较简单,因此它取代了机械复杂的井壁超热中子测井仪。

该仪器的井眼,居中及岩性影响和普通补偿中子仪器一样,现场测量的孔隙度值与同位素源的井壁中子测量值一样。

四、次生 γ 能谱测井

14MeV脉冲中子诱发的次生 γ 能谱测井是60年代初发展起来的一种新测井技术,70年代以后得到迅速发展。该方法的主要物理基础是14MeV脉冲中子与地层核素发生非弹性散射慢化后又与地层核素发生俘获反应,这两种反应都使核素发射特征能量的非弹性散射 γ 和俘获 γ ,根据这些 γ 射线的能量和强度,计算得到地层中出现的元素及其含量,从而解释地层的岩性、孔隙度、含油饱和度

等地层参数。

目前国际上有二个公司研究次生 γ 能谱测井仪,一是美国德莱赛公司的C/O比测井系统,二是斯伦贝谢公司的GST或IGT (Induced Gamma Ray Spectrometer Tool) 测井系统,这两种仪器目前都采用NaI(Tl)探测器,而GST系统的Ge(Li)探测器或高纯锗探测器仪器还在研究之中,还没有投入商业使用。

1985年德莱赛公司推出多参数C/O能谱测井仪,称为MSIC/O能谱仪,该仪器在技术上有较大的改进,除了测量油水饱和度外,还能比原来C/O比测井仪得到更多更精确的地层参数。该仪器能承受较高的计数率,256多道分析器及微机放在井下,由井下微机控制数据采集和分析,并进行数据处理,每7公分测量井段进行一次两点刻度,作自动增益调整,保证精确的测井响应。在测量非弹性 γ 能谱时,设C、O、Si和Ca能窗,分别得到C/O、Si/Ca比值;而测量俘获 γ 谱时,设Si、Ca、Fe、H、Cl能窗,分别得到Si/Ca、Fe/Si+Ca、H/Si+Ca及Cl/H比值,由这些比值分别指示地层油、水饱和度、岩性、矿化度和孔隙度等等地质参数。

斯伦贝谢公司近两年也对GST测井仪进行改进,主要是进一步提高计数率,目前中子发生产额已达到 $10^{10}\text{n}/\text{秒}$ (使用仅为 $3 \times 10^8\text{n}/\text{秒}$)。井下采用512道多道分析器及脉冲堆积排除器,而探测到的 γ 射线信号经多道分析后送至地面的CSU计算机测井系统,由该系统进行计算处理,然后向井下发送操作和控制命令。

对测量到的非弹性散射和俘获 γ 射线谱的分析不是采用能窗设置方法,而是采用最小二乘方拟合能谱的方法,获得地层有关元素及其含量。这种方法与前面设置能窗法比较,能得到更多的中子引起的 γ 射线谱信息。同时,在非弹性 γ 射线谱中,得到C、O、Ca、Fe、S和Si的含量,而在俘获 γ 谱中得到Ca、Cl、Fe、H、S和Si等元素的含量,根据

有关元素含量的比值，确定地层的参数如下表：

元素含量比	相互反应	名称	标记
C/O	非弹性散射	油饱和度指示	COR
Cl/H	俘获反应	矿化度指示	SIR
H/(Si+Ca)	俘获反应	孔隙度指示	PIR
Fe/(Si+Ca)	俘获反应	泥质指示	IIR
Si/(Si+Ca)	俘获和非弹性	岩性指示	LIR

该方法若与自然 γ 能谱测井，Al活化测井组合，同时可确定十几种元素。如果采用高纯Ge探测器，同时可确定30多种元素，利用得到元素及其含量的信息，可以确定地层矿物组分、阳离子交换量、粘土含量、粒度、孔隙度、渗透率等地层参数。利用元素确定地质参数，人们也称为地球化学测井。由于中子和中子激发的 γ 射线能量高，穿透力强，不但用于勘探测井，而且可用套管生产测井。各国专家们认为中子激发 γ 能谱测井是非常有前途的核测井方法。

五、瞬发裂变中子测井

瞬发裂变中子测井近几年由Sandia 国家实验室发展起来的铀矿地质勘探新测井方法。早在70年代Jan, CzuBek等人提出用脉冲中子照射铀矿地层，探测 ^{235}U 裂变引起的缓发中子和瞬发中子达到勘探地下铀矿的目的。1979年Sandia 实验室完成了瞬发裂变中子测井样机并投入现场试验，近几年以来在仪器设计、电子线路及软件等方面不断完善并投入正式使用。

加速器向井眼周围发射 $10\mu\text{s}$ 宽的 14MeV 脉冲中子与地层中各种核弹性碰撞很快损失能量。对于大多数地层，脉冲来过后经历 $200\mu\text{s}$ 左右，中子几乎完全慢化成热中子。如果 ^{235}U 核吸收热中子，大多数核将发生裂变，而每次裂变放出二个或三个中子，这些

中子90%以上约在 10^{-14} 秒内瞬时发射，能量平均为 2MeV 左右。这些中子在地层穿过几厘米就慢化到超热中子能量($0.5\text{eV}-1\text{KeV}$)，而PFN测井仪就是探测这些超热中子反映地层铀的异常。

如果地层没有铀，则原来的超热中子大约在 $200\mu\text{s}$ 之内就消失，若有铀，由裂变中子产生的超热中子存在的时间比原来超热中子存在长几千微秒。因此利用脉冲源、超热中子和热中子的时间关系解释铀矿测井。

超热中子数不仅与 ^{235}U 的原子数有关，也与热中子衰变时间 τ 有关。设时间 t 时刻裂变产生的超热中子数为：

$$n_e(t) = KN_n N_0(t) \quad (8)$$

其中 K 为比例常数， N_n —单位体积中 ^{235}U 的原子数， $N_0(t)$ 为地层热中子总数。当源中子慢化后，热中子数按指数规律衰变：

$$N_0(t) = N_0(0) \exp(-t/\tau) \quad (9)$$

而 t 时间后地层中产生超热中子总数为：

$$\begin{aligned} N_e(t_1) &= \int_0^{t_1} n_e(t) dt \\ &= KN_n N_0(0) \tau \exp(-t_1/\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 τ 为热中子衰减时间，它与地层中是否有水关系非常密切。 $N_0(0)$ 等于源中子数减去慢化前被吸收的中子。

从(10)式可以看出，要计算地层铀的含量必须测量热中子衰减时间，因此该仪器用一个 ^3He 计数管记录超热中子，用一个监视热中子俘获 γ 射线的NaI(Tl)探测器。它们获取信号送到地面进行处理，计算分析得到铀的品位。现场试验表明PFN测井方法得到铀品位值与岩芯分析一致性很好。目前该方法除了铀矿勘探外，还用钚沉淀废物测井，钚沉淀物一般浓度从 2000nCi/g 到 10nCi/g 。可地下条件复杂，计数率高，而PFN测井方法已成功测量地下Pu废物中Pu的含量。

PFN测井方法的先决条件是必须有铀矿存在，但铀矿形成的理论，在铀矿的沉淀过

程中伴随着Al、Ca、C、K、Na、S、Ba、Cu、Fe、Mo、Se、和V_a等元素的富集。D·H·Janasen等人设计了高纯锗探测器脉冲测井仪，利用快中子激发的瞬发 γ 谱，探测以上伴生元素的异常勘探铀矿，或者从得到 γ 谱确定感兴趣元素及某些元素比值的变化，从而预测铀矿沉淀区域并可以对矿的前景作出评价。

六、其他测井应用

1. 脉冲中子活化氧的方法确定井下套管外面水的活动。在石油井生产开发过程中，普遍存在的问题就是套管外面水泥区域内槽中水的流动。这种槽式沟主要由地层的压力差而形成的公共通道，使水流向水泥区或盐水流向淡水区，能够及时监督地层中水的流动非常重要。Mckinley等人曾用噪声测井技术确定液体的确实位置。但如果地层压力低而噪声幅度太低，而测量不够理想，因此Wichmann等人提出用脉冲14MeV中子活化水中氧的方法确定套管外面水的流动，Texaco等人进一步完善上述的方法，设计一套双探测器测井仪器，建立一套水流动的监视系统，当流动的水被井下仪器产生14MeV中子照射后，水中的氧与中子作用发生 $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ 反应，放射性 ^{16}N ，半衰期为7.3

秒，发射的 γ 射线能量为6.13MeV, 7.13MeV。根据测井速度和探测到6.13的 γ 射线强度，分别计算出套管外水的流动方向、流速、流量及径向位置等流体参数。

很显然，这种方法比以往使用同位素示踪剂方法优越，不需要向地层注入示踪剂，也不需要射孔，而得到流体参数比一般示踪方法多。

2. 脉冲中子探测地层压力的异常。一般来讲，As、Si活化测井和通常电阻率，声波及密度测井已广泛用于精确估计地层压力的范围。但近几年以来不少人提出裸眼测井信号穿透与地层异常压力有关。另外由于井塌及井眼条件，电阻率测井不能进行，因此有人提出用脉冲中子探测地层异常压力。P. K. Taneja指出，探测地层异常压力主要根据地层体积中流体含量变化，如果任何测井仪器直接或间接反映地层孔隙度变化，就能指示地层压力的异常，而脉冲中子测量地层 Σ 值与孔隙度有关。 $[\Sigma = \Sigma_m(1 - \phi) + S_w\phi \Sigma_w]$ ，因此测得地层 Σ 值偏离正常压力时的 Σ 值，就表示异常压力。在墨西哥海湾进行的12个现场分析，证明了上述的观点。

除此以外，在石油测井中还有Si、Al活化测井，它对确定地质岩性及粘土含量非常重要。