

碳氧比能谱测井 数据处理与解释方法

刘宪伟 郭冀义 杨景海 著

石油工业出版社



碳氧比能谱测井数据 处理与解释方法

刘宪伟 郭冀义 杨景海 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分七章,主要介绍了碳氧比能谱测井的基本原理及井下仪器、数据预处理、模型的建立、提高地层剩余油饱和度精度的方法等内容。全书注重理论联系实际,实用性强,是作者多年工作的总结。

本书可供石油地质、石油工程等专业工程技术人员,及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

碳氧比能谱测井数据处理与解释方法/刘宪伟,郭冀义,杨景海著.
北京:石油工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-5021-9205-1

I. 碳…

II. ①刘… ②郭… ③杨…

III. 能谱测井-数据处理

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 173516 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523735 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.25

字数:284 千字

定价:85.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

经过几十年的开发,中国陆上绝大多数油田已进入高含水、高采出程度阶段,二次采油、三次采油已成为主要的开发手段,直接在套管井中确定产层孔、渗、饱变化,水淹程度,剩余油分布等是油田开发亟待解决的问题。而碳氧比能谱测井作为一种重要的油田开发监测手段,能在套管井中直接确定产层(储层)参数、剩余油饱和度分布及水淹程度等,是不依赖于裸眼井测井资料而能独立进行套管井剩余油评价的监测方法,是油田稳产的重要支撑技术,目前已得到广泛应用。

碳氧比能谱测井是通过测量 14.1 MeV 的脉冲中子在地层中激发出的非弹性散射伽马射线、俘获伽马射线等的能谱,来分析和确定地层的岩性和剩余油饱和度的一种测井方法。它是目前为数不多的不受地层水矿化度影响、在套管井中直接测量储层剩余油饱和度的测井方法。围绕确定的储层剩余油饱和度的大小,主要有以下用途:

- (1) 判断储层水淹程度,为采油厂调层、补孔、封堵产水层提供依据,从而增加原油产量,降低含水率;
- (2) 识别气层;
- (3) 确定油、气、水界面;
- (4) 评价储层渗透性及储层渗透性变化;
- (5) 在老井中寻找潜力层,使老井稳产、高产;
- (6) 新投产的调整井射孔前加测碳氧比,进行二次解释,确定最佳开采方案;
- (7) 在裸眼井资料缺失井中划分和评价储层;
- (8) 在高含水的厚产层中确定最佳射孔位置;
- (9) 在观察井中定期进行碳氧比能谱测井,通过开发层系地质参数的变化,分析邻井措施效果;
- (10) 通过时间推移测井,确定产层动用程度;
- (11) 根据测—注—测技术,确定产层残余油饱和度;
- (12) 区块剩余油饱和度评价。

本书是笔者多年工作的总结,它提供了碳氧比能谱测井数据处理和解释及软件编写工作中的成果和心得。本书在编写过程中,尤其注重内容的实用性和简化繁琐的理论推导,分析大量实例并总结出相应的规律。

全书共分七章,第一章简要介绍了碳氧比能谱测井基本原理及井下仪器的实现;第二章详细介绍了数据预处理方法及实例;第三章针对碳氧比能谱测井探测深度浅、环境因素影响大的缺点,利用蒙特卡罗数值模拟方法系统研究了不同井况和地层对碳氧比数值的响应规律;第四章根据蒙特卡罗数值模拟结果和仪器刻度数据,建立了相应综合解释模型,给出了具体实例和应用效果;第五章探讨了碳氧比能谱测井全谱解析方法;第六章针对原有脉冲中子寿命测井和脉冲中子—中子测井确定地层宏观俘获截面方法的缺点,提出了利用快速傅里叶变换方法确

定地层宏观俘获截面方法;第七章探讨提高地层剩余油饱和度评价精度的手段和方法。

感谢原大庆生产测井研究所乔贺堂所长、张宝群副所长高瞻远瞩,于20世纪90年代初组建了核测井研发团队。从研发团队组建起到2011年年底,各届领导都十分重视核测井的研发工作,给予了大力支持和帮助,先后研发成功了单源距碳氧比能谱测井仪(NaI晶体)、双源距碳氧比能谱测井仪(BGO晶体)、单向脉冲中子氧活化测井仪、小直径脉冲中子综合测井仪、脉冲中子全谱测井仪(PNST)、双向脉冲中子氧活化测井仪和正在研发的脉冲中子地层元素测井仪。所研发的井下仪器除在大庆油田应用外,涵盖了全国大部分陆上油田,取得了良好应用效果。

本书在编写和修改过程中,得到了中国石油学会测井专业委员会陆大卫主任和赵培华博士的鼎力支持、得到了中国石油勘探开发研究院李宁教授的深切教诲、得到了中国石油大学(华东)黄隆基教授的热情指导、得到了《测井技术》编辑部主任赵舒平老师和中国石油大学(华东)范宜仁教授及中国石油大学(北京)毛志强教授的殷切鼓励,感谢中国石油大学(华东)张锋教授、原子能科学研究院王新光博士在蒙特卡罗数值模拟方面的悉心指导,感谢李文义、金京虎、温玉波的鼓励,书中的一些学术观点源于东北石油大学宋延杰教授的启迪,大庆油田勘探开发研究院刘传平副总工程师、大庆测井公司陈国华副总工程师提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

笔者在工作和本书编写过程中始终得到了大庆油田有限责任公司谢荣华副总工程师的支持与帮助,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示由衷的谢忱。

本书在编写过程中始终得到了大庆测试技术服务分公司张玉洁书记、刘兴斌总工程师、张奇斌副经理、张永奎副经理、李进旺副经理、李权修副经理、李众欢副经理和马水龙副总工程师等领导的大力帮助和支持,使本书得以完稿。本书在编写过程中借鉴了李瑞丰高级工程师和沈付建高级工程师的部分观点,他们和孙亮博士、李淑萍高级工程师、张林周工程师、李晓伟工程师、孟凡宇工程师等也做了大量基础性工作,黄晓萍高级工程师、童峥晖工程师和张晓春工程师为作者编写的碳氧比能谱测井数据处理及解释应用软件以及脉冲中子全谱测井数据处理及解释应用软件提供了大量帮助,梁庆宝工程师和李函璐工程师为仪器刻度建造了刻度井群,以董建华高级工程师、韩东庆高级工程师等为核心的井下仪器研发人员给予了许多现场支持,在此一并表示感谢。

提供帮助的人很多,不应该忘记的是我的博士生导师——中国石油勘探开发研究院谭廷栋教授,老师严肃的科学态度、严谨的治学理念、精益求精的工作作风、渊博的知识、创新的思维和高尚的人格,一直深深地感染和激励着我,在此仅以此书缅怀恩师谭廷栋教授。

本书承蒙东北石油大学宋延杰教授和中国石油大学(华东)张锋教授在承担繁重教学和科研任务的同时,在百忙之中对全书分别进行了详细审阅,提出了许多宝贵的建议和修改意见。同时大庆测试技术服务分公司技术发展部蔡兵主任在本书出版中给予了极大的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

书中疏漏和错误之处敬请大家批评指正。

2012年5月于大庆

目 录

第一章 碳氧比能谱测井基本原理及测井仪器	(1)
第一节 碳氧比能谱测井的物理基础	(1)
第二节 碳氧比能谱测井的地质基础	(3)
第三节 碳氧比能谱测井对地层理论响应规律及解释基础	(4)
第四节 碳氧比能谱测井仪基本描述	(7)
第二章 碳氧比能谱测井数据预处理	(11)
第一节 能谱异常数据识别、剔除和填充方法	(11)
第二节 能谱漂移校正	(14)
第三节 非弹性散射谱生成方法	(23)
第四节 曲线获取	(25)
第五节 曲线滤波	(27)
第三章 碳氧比能谱测井对井况和地层响应规律	(31)
第一节 数值模拟基本模型	(31)
第二节 井眼持油率对 C/O 值的影响	(33)
第三节 地层孔隙度对 C/O 值的影响	(46)
第四节 含油饱和度对 C/O 值的影响	(53)
第五节 水泥环厚度对 C/O 值的影响	(64)
第六节 钢套管尺寸对 C/O 值的影响	(67)
第七节 结论	(73)
第四章 碳氧比能谱测井解释模型的建立及应用	(74)
第一节 解释模型建立的物理基础及现有解释模型分析	(74)
第二节 综合解释模型的建立	(78)
第三节 解释模型中参数的确定	(80)
第四节 精细解释方法及应用	(82)
第五节 快速直观解释方法及应用	(101)
第五章 碳氧比能谱测井解谱方法探讨	(116)
第一节 普通加权最小二乘模型回顾及分析	(116)
第二节 约束加权最小二乘法在谱解析中的应用	(118)
第六章 脉冲中子寿命测井和脉冲中子—中子测井	(122)
第一节 PNC 测井和 PNN 测井的基本原理	(122)
第二节 计数率衰减谱异常数据识别、剔除和填充	(125)

第三节	常规方法确定地层 τ 和 Σ 分析	(128)
第四节	快速傅里叶变换方法确定井眼和地层的 τ 和 Σ	(133)
第五节	确定井眼和地层 τ 和 Σ 方法的改进	(136)
第六节	获取地层 τ 和 Σ 方法比较	(138)
第七节	曲线描述及应用	(140)
第七章	提高剩余油饱和度精度的方法与途径	(151)
第一节	重复测量提高地层剩余油饱和度精度	(151)
第二节	施加自适应虚拟探测器提高剩余油饱和度精度方法	(152)
第三节	提高碳氧比能谱测井测速原理及应用效果评价	(156)
第四节	曲线高分辨率处理	(163)
参考文献		(168)

第一章 碳氧比能谱测井基本原理及测井仪器

本章简要介绍了碳氧比能谱测井的物理基础和地质基础及该测井方法的优缺点;给出了碳氧比能谱测井对地层理论响应规律及定量确定储层剩余油饱和度的理论基础;最后对井下测井仪器的实现进行了简单描述,用一个可控中子源实现了碳氧比测井、脉冲中子寿命 PNC、脉冲中子—中子(PNN)和氧活化(用以指示出水层)等 4 种测井方法。

第一节 碳氧比能谱测井的物理基础

碳氧比能谱测井是通过测量 14.1MeV 的脉冲中子在地层中激发出的非弹性散射伽马射线、俘获伽马射线等的能谱,来分析和确定地层的岩性和含油饱和度的一种测井方法。它是目前为数不多的不受地层水矿化度影响、在套管井中直接测量储层剩余油饱和度测井方法,根据储层剩余油饱和度的大小,还可以判断油层的水淹程度、划分油水层、确定油水界面及进行潜力层挖潜等。

由中子发生器所产生的能量为 14.1MeV 的快中子通过井眼射入地层,首先发生的是非弹性散射,在受激靶核跃迁到基态时,发射非弹性散射伽马射线(由于快中子发射后在大约 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s 就发生快中子非弹性散射,因此,采用脉冲中子同步测量技术测量非弹性散射伽马射线能谱)。接着发生的是弹性散射过程,在地层内经过 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ s 的弹性散射后,几乎所有的快中子都被慢化成热中子,并不断地被周围介质俘获,放出俘获伽马射线。最后放出的伽马射线是由于活化衰变而产生的。图 1-1-1 是快中子轰击原子核时产生的伽马射线的时间序列示意图^[1]。这三种伽马射线之间有一定的时间延迟,可以从时间上将它们区分出来。

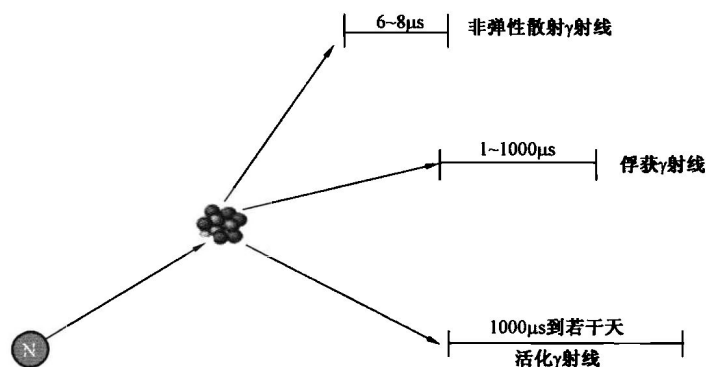


图 1-1-1 快中子轰击原子核时产生的伽马射线的时间分布示意图

当快中子与靶核作用时,快中子被靶核吸收形成复合核,然后快中子再以较低的能量发射出来,靶核则处在激发态上,激发态上的靶核又通过发射伽马射线迅速返回基态,此过程产生的伽马射线称为非弹性散射伽马射线。

不同靶核与快中子发生非弹性散射反应的前提是快中子的能量必须大于靶核的第一激发

能级能量,而同位素中子源产生的中子能量多在 6MeV 以下^[2],不能用来激发快中子非弹性散射伽马射线(^{16}O 发生非弹性散射需要快中子能量至少大于 8MeV)。碳氧比能谱测井使用的是加速器中子源,其优点是发射的中子强度高和单色,能量达到 14.1MeV;可以产生脉冲中子;加速器不工作时,不产生放射性。因此碳氧比能谱测井可以说是绿色环保的,使用可控放射源也是核测井发展趋势^[3]。

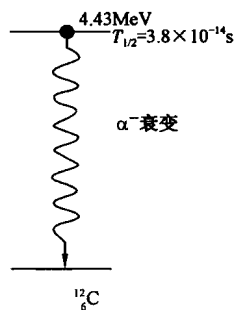


图 1-1-2 ^{12}C 快中子非弹性散射产生 4.43MeV 伽马射线的能级图

不同靶核与快中子发生非弹性散射反应后,都伴有各自特征能量的伽马射线发射。以 ^{12}C 、 ^{16}O 为例^[4],两者都具有较大的非弹性散射截面(^{12}C 、 ^{16}O 的截面分别为 0.353b 和 0.104b),均能放出较高能量的特征伽马射线,且两种伽马射线的能量差较大($\Delta E = 1.70\text{MeV}$),这为伽马能谱分析提供了有利的条件。

^{12}C 激发态的半衰期为 $3.8 \times 10^{-14}\text{s}$,产生能量为 4.43MeV 的伽马射线。图 1-1-2 给出了 ^{12}C 与快中子反应示意图,其反应为 $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ 。

^{16}O 激发态的半衰期为 $1.7 \times 10^{-11}\text{s}$,主要产生能量为 6.13MeV 的伽马射线,同时也产生 6.92MeV 及 7.12MeV 的伽马射线,但出现概率低。图 1-1-3 给出了 ^{16}O 与快中子反应示意图,其反应为 $^{16}\text{O}(n, n'\gamma)^{16}\text{O}$ 。

除了 ^{12}C 、 ^{16}O 外,还能够被探测器探测到的非弹性散射伽马射线的常见元素有 ^{14}Si 、 ^{20}Ca 、 ^{26}Fe 、 ^{16}S 等。

俘获伽马射线是指 14.1MeV 的快中子经与地层元素发生非弹性散射和弹性散射后,逐渐变为热中子,热中子被靶核俘获形成复合核,复合核比原来核多了一个中子处于激发态,激发态回到基态时放出的伽马射线称为俘获伽马射线。以 ^{35}Cl 为例,主要的俘获反应为 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 。

^{35}Cl 激发态的半衰期约为 10^{-20}s 。但并不是所有元素都能产生俘获伽马射线,而且有的伽马射线能量超出了碳氧比能谱测井仪器探测范围,能被碳氧比能谱测井仪器探测到的俘获伽马能谱的常见元素除氯 ^{35}Cl 外,还有 ^1H 、 ^{14}Si 、 ^{20}Ca 、 ^{26}Fe 、 ^{16}S 、 ^{22}Ti 等。

事实上,快中子与地层中靶核发生上述两种核反应(非弹和俘获)外,还发生快中子的弹性散射和活化反应等。

快中子的弹性散射是指中子源发射的快中子在最初极短时间内,经过一次、二次非弹性散射损失了大量能量,此后中子已没有足够的能量再与靶核发生非弹性散射,只能通过弹性散射继续减速,中子与靶核发生弹性散射,它们的总动能不变,中子损失的能量全部转换成反冲核

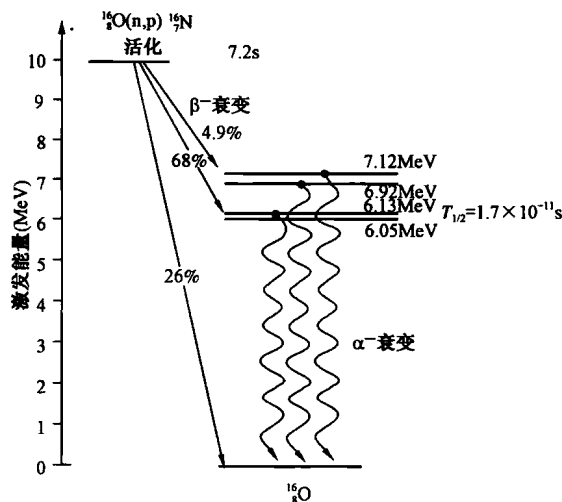


图 1-1-3 ^{16}O 快中子非弹性散射能级图

左边为氧活化,右边为 ^{16}O 某些可能的非弹性散射辐射

的动能,而反冲核仍处于基态。该过程可将快中子变为慢中子。

活化反应是指靶核变成不稳定的中间同位素,经过较长时间的半衰期衰变成最终核,若该核处于激发态,则返回基态时产生瞬时伽马射线辐射。图 1-1-3 说明了氧活化情况,整体来看,氧活化反应为 $^{16}_8\text{O}(n,p)^{16}_7\text{N}(\gamma)^{16}_8\text{O}$ 。

不稳定的中间同位素氮的半衰期为 7.13s,它通过 β 辐射衰变到 $^{16}_8\text{O}$ 的激发态,再通过伽马辐射迅速衰变。其他常见的活化反应有硅活化(Si,半衰期 2.3min)、铝活化(Al,半衰期 9.5min)、铁活化(Fe,半衰期 2.6h)等。

由于高能脉冲中子轰击地层后时刻发生活化反应,因此井下仪器在标准刻度井刻度时应在非刻度层调试仪器,待仪器工作稳定后,将井下仪器探测器和中子管的中心位置移至刻度层的中部进行测量,点测测量时间最好不超过 5min,这样才能最大限度地降低活化伽马射线对非弹谱、俘获谱等测量的影响。

仪器外壳、井眼中流体、套管、固井水泥环等因素对伽马谱的影响也不容忽视。因此,实际测井测得的伽马射线能谱非常复杂,谱中包括井眼和地层中各种元素的贡献。即使对于较好的饱和油砂层,碳氧比能谱测井测得的非弹性散射伽马能谱里也几乎看不到任何明显的峰。碳氧比能谱测井在实测井中测得的伽马能谱如图 1-1-4 所示。

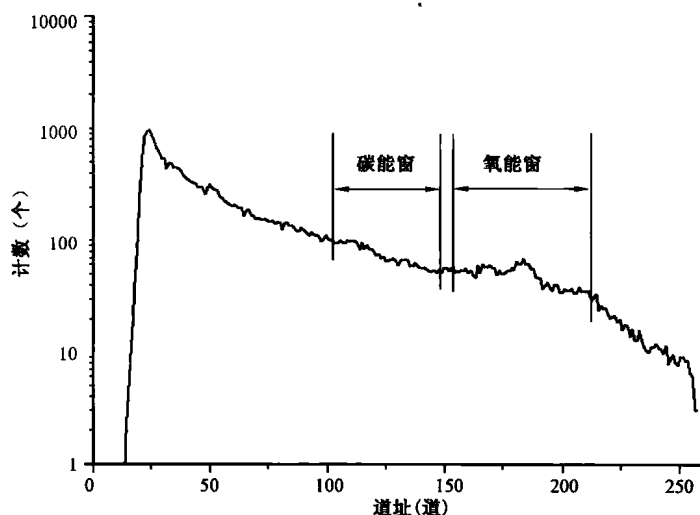


图 1-1-4 实测井中采集的非弹性散射伽马能谱

第二节 碳氧比能谱测井的地质基础

从地质方面考虑,石油中含有大量的碳元素,几乎不含氧元素;水中含有大量的氧元素,几乎不含碳元素。在含油储层碳氧比值大,在含水储层碳氧比值小,这样可以利用碳氧比值的大小定量评价储层剩余油饱和度^[2]。利用碳氧比值来评价储层中的剩余油饱和度有两个优点:一是可以消除中子产额不稳定造成的影响;二是可以提高识别油水层的灵敏度^[5]。

如图 1-2-1 所示,无论近探测器,还是远探测器测得的非弹谱,在 ^{12}C 能窗,模拟地层是

油砂(含油饱和度 $S_o = 100\%$)的计数率明显大于模拟地层是水砂($S_o = 0$)的计数;在 ^{16}O 能窗,模拟地层是水砂的计数率明显大于模拟地层是油砂的计数率,说明油砂中碳多,水砂中氧多。在油砂层和水砂层中计算的近、远探测器碳氧比值见表1-2-1。从表中明显看出,油砂层中计算的碳氧比值大于水砂层中计算的碳氧比值。

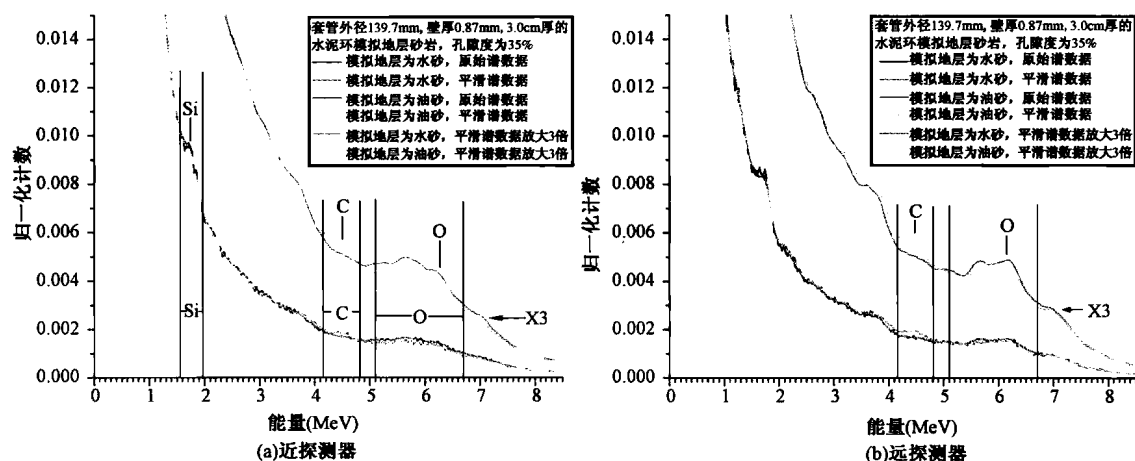


图1-2-1 碳氧比仪器在油砂和水砂刻度井中刻度得到的非弹谱

表1-2-1 油砂层、水砂层中计算的近、远探测器碳氧比值

碳氧比值	油砂层	水砂层
近探测器碳氧比值(NCOR)	0.5939	0.5236
远探测器碳氧比值(FCOR)	0.5407	0.4631

为了避免因岩石骨架中含碳而造成误解,引入中子与钙、硅、氢等元素的核反应参数,通过非弹钙硅比(地层水矿化度变化较大或矿化度未知时)或俘获硅钙比(地层水矿化度变化不大时)的测量来指示地层的岩性;利用俘获铁硅比+钙参数指示套管和接箍的存在或地层中铁矿物的含量;利用氢硅比+钙参数和俘获硅计数率指示地层的孔隙度;利用氯氢比参数指示地层水矿化度的变化。利用这些辅助曲线为碳氧比能谱测井的综合解释提供重要的地质依据,提高剩余油饱和度的解释精度。

第三节 碳氧比能谱测井对地层理论响应规律及解释基础

不同地层具有不同的碳原子密度、氧原子密度,这是碳氧比能谱测井用来区分不同地层的地质基础。直接由地层碳原子密度、氧原子密度比值(C/O)是地层中剩余油饱和度变化的直接反映^[6]。

设地层孔隙度为 ϕ ,含油饱和度为 S_o 、含水饱和度为 S_w ,碳和氧的原子密度分别为 n_c 和 n_o ,石油中不含氧,地层水中不含碳,且 $S_o + S_w = 1$,按线性体积模型,则碳和氧的原子密度分别为:

$$\begin{aligned} n_c &= \phi S_o nc_h + (1 - \phi) nc_{ma} \\ &= \phi S_o nc_h + (1 - \phi) V_{ca} nc_{ca} \end{aligned} \quad (1-3-1)$$

$$\begin{aligned} n_o &= \phi(1 - S_o) no_w + (1 - \phi) no_{ma} \\ &= \phi(1 - S_o) no_w + (1 - \phi) [V_{ca} no_{ca} + (1 - V_{ca}) no_{si}] \end{aligned} \quad (1-3-2)$$

式中 V_{ca} ——骨架中钙质体积含量；

nc_h, nc_{ca} ——待定常数，分别为每立方厘米油和每立方厘米石灰岩骨架中碳原子的个数；

no_w, no_{ca}, no_{si} ——待定常数，分别为每立方厘米水、每立方厘米石灰岩骨架和每立方厘米砂岩骨架中氧原子的个数。

待定常数的数值由下列公式计算：

$$nc_h = \frac{N_A \rho_h}{M_h} \cdot n_1$$

$$nc_{ca} = \frac{N_A \rho_{ca}}{M_{ca}} \cdot n_2$$

$$no_w = \frac{N_A \rho_w}{M_w} \cdot n_3$$

$$no_{ca} = \frac{N_A \rho_{ca}}{M_{ca}} \cdot n_4$$

$$no_{si} = \frac{N_A \rho_{si}}{M_{si}} \cdot n_5$$

式中 N_A ——阿佛加德罗常数，取 6.022×10^{23} /分子；

$\rho_h, \rho_w, \rho_{ca}, \rho_{si}$ ——分别为油、水、石灰岩骨架和砂岩骨架的密度， g/cm^3 ；

M_h, M_w, M_{ca}, M_{si} ——分别为油、水、石灰岩骨架和砂岩骨架的摩尔质量， g/mol ；

n_1, n_2 ——分别为每个油分子、石灰岩骨架分子中的碳原子个数；

n_3, n_4, n_5 ——分别为每个水分子、石灰岩骨架分子和砂岩骨架分子中的氧原子个数。

式(1-3-1)除以式(1-3-2)，得到原子密度，即：

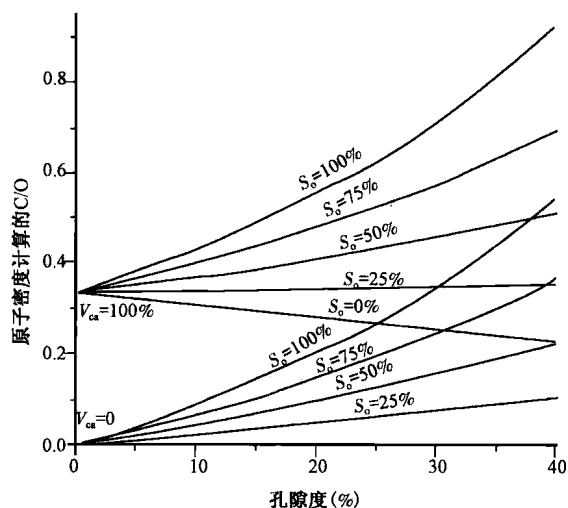
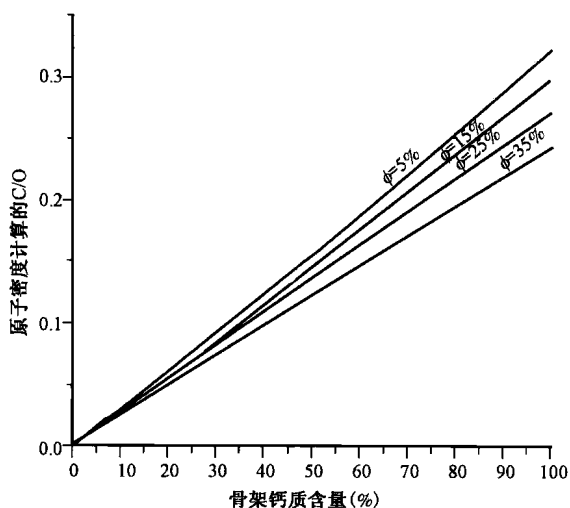
$$C/O = n_c/n_o = \frac{\phi S_o nc_h + (1 - \phi) V_{ca} nc_{ca}}{\phi(1 - S_o) no_w + (1 - \phi) [V_{ca} no_{ca} + (1 - V_{ca}) no_{si}]} \quad (1-3-3)$$

$nc_h, nc_{ca}, no_w, no_{ca}$ 和 no_{si} 5 个待定常数确定以后(表 1-3-1)，就可以利用式(1-3-3)计算 C/O。C/O 不但是 S_o 的函数，而且还是 ϕ, V_{ca} 的函数。

表 1-3-1 元素浓度 ($10^{22}/\text{cm}^3$)

待定常数	物质成分	分子式	密度 (g/cm^3)	元素浓度
nc_h	油	$n(\text{CH}_2)$	0.87	4.302
nc_{ca}	石灰岩	CaCO_3	2.71	1.632
no_{ca}				4.896
no_{si}	砂岩	SiO_2	2.65	5.317
no_w	水	H_2O	1.0	3.346

如图 1-3-1 和图 1-3-2 所示:


 图 1-3-1 C/O 值与 ϕ 、 S_o 和 V_{ca} 的关系曲线

 图 1-3-2 $S_o = 0$ 时 C/O 值与 V_{ca} 和 ϕ 的关系曲线

(1) 在纯砂岩地层中, 由于岩石骨架中不含碳, 所以当 $\phi = 0$ 时, $C/O = 0$, 而在纯石灰岩地层中, 在 $\phi = 0$ 时, $C/O = 0.333$, 这是因为石灰岩骨架中含碳的缘故。

(2) 对骨架中钙质含量不同的地层, 当 $S_o = 0$ 时, C/O 随孔隙度的增加而呈非线性降低, 这是因为 $S_o = 0$ 意味着孔隙流体中不含碳, 孔隙度的增加则意味着骨架中含碳量减少, 同时孔隙流体中氧增加(图 1-3-2)。

(3) 无论对纯砂岩地层, 还是对纯石灰岩地层, 在孔隙度一定的情况下, C/O 随 S_o 的增大而增大。

(4) 无论对纯砂岩地层, 还是对纯石灰岩地层, C/O 对油水层的分辨能力随着孔隙度的增加而增加(指 $C/O_o - C/O_w$ 增大), 反之则减小。当孔隙度为零时, 无论对纯砂岩地层还是对石灰岩地层, C/O 值对油层没有分辨能力。

(5) 对纯砂岩地层, 当 $\phi = 35\%$ 时, 油砂与水砂 C/O 差值是 0.4357, 当 $\phi = 10\%$ 时, 差值仅是 0.0899; 对纯石灰岩地层, 当 $\phi = 35\%$ 时, 纯油层与纯水层 C/O 差值是 0.5628, 当 $\phi = 10\%$ 时, 差值仅是 0.1211。说明碳氧比能谱测井在高孔隙度地层识别油水层的能力很强, 在低孔隙度地层识别油水层的能力差, 这是其致命弱点。

从以上分析看出,地层 S_o 越高, C/O 越大,因此,在已知岩性和孔隙度情况下,利用式(1-3-3),根据 C/O 大小完全可以确定 S_o ,这就是碳氧比能谱测井解释剩余油饱和度的基础。

第四节 碳氧比能谱测井仪基本描述

在金属套管井中,碳氧比能谱测井能有效评价地层剩余油饱和度,具有不受地层水矿化度影响的优点,但缺点是探测深度浅,井眼效应明显。单源距碳氧比能谱测井仪精度较低,施工复杂,测前需洗井、刮蜡等作业,不但增加成本,还可能因清水倒灌地层而影响测井效果^[7,8]。为了减小井眼效应影响,提高地层剩余油饱和度解释准确性,发展了双源距碳氧比能谱测井技术^[9,10],让远探测器主要响应地层参数,近探测器主要响应井眼条件,包括套管结蜡、凝油及井内多相流等影响,通过补偿解释计算出地层剩余油饱和度,可免除测前刮蜡、洗井等作业,避免了清水倒灌储层的可能。测井资料在老井堵水补孔选层、新井射孔选层、剩余油分布等方面起着重要作用^[11]。但双源距碳氧比能谱测井仪(DDCO)功能单一,不直接测量孔隙度和泥质含量,也不直观指示出水层位或识别气层。使用完钻时孔隙度和泥质含量等参数参与解释,可能导致部分老井剩余油饱和度的计算误差增大,为解决这一问题,开发了脉冲中子全谱测井仪(PNST)^[12]。

国内外目前有多种商用碳氧比能谱测井仪器投入使用,应用最广泛的主要有斯伦贝谢公司的储层饱和度测井仪(RST)^[13-17]、哈里伯顿公司的储层监测测井仪(RMT)^[18]、贝克休斯公司的储层性能监测测井仪(RPM)^[19]和大庆油田的PNST。见表1-4-1,四种仪器功能略有差异,但PNST和国外仪器相比,增加了脉冲中子—中子测井仪(PNN)功能,因此本节着重介绍PNST。

表 1-4-1 几种碳氧比能谱测井仪的参数

		RST	RMT	RPM	PNST
设计模式		C/O + PNC + OAI	C/O + PNC + OAI	C/O + PNC + OAI	C/O + PNC + PNN + OAI
测井功能	岩性分析	√	√	√	√
	基质元素、矿物分析	√			
	泥质含量	√	√	√	√
	剩余油饱和度精度(%)	5%	10%	√	7%
	分层能力(m)	0.6	0.8	0.9	0.6
	渗透性直观指示				√
	识别气层	√	√	√	√
	产层出水分析	√	√	√	√
仪器参数	耐温(℃)	150	163	177	150
	耐压(MPa)	103.4	103.4	138	60
	外径(mm)	63.5/43	54	43	90
	长度(m)	10/10.3	8.4	9.1	4.5

注:OAI——氧活化指数。

一、技术思路

PNST 中设计有 1 个中子发生器、2 个伽马探测器和 1 个热中子探测器,中子发生器与伽马探测器组合实现双源距碳氧比能谱测井、中子寿命测井、能谱水流测井功能^[20],中子发生器与热中子探测器组合实现脉冲中子—中子测井功能^[21,22],仪器一次下井能同时记录这四种测井资料。

在 10kHz 中子脉冲频率下,在中子爆发时期与间歇时期分别采集非弹性散射伽马射线能谱(含部分俘获伽马射线贡献,若想得到纯净的非弹性散射伽马射线能谱,即净谱,需要扣除俘获伽马射线贡献)与俘获伽马射线能谱,处理出 C/O、Ca/Si 等非弹曲线数据和 Si/Ca、H/(Si + Ca)、Si/(Si + Ca) 等俘获曲线数据;另外,还用双伽马探头的谱数据计算出近/远非弹性散射伽马比值与近/远俘获伽马比值,从长、短源距伽马探头的谱数据计算出非弹性散射伽马/俘获伽马比值。在 0.5kHz 中子脉冲频率下,两个伽马探测器测量 14.1MeV 的脉冲中子经井眼和地层慢化而返回井眼内的俘获伽马计数率随时间衰减的时间谱,计算出地层热中子宏观俘获截面 Σ_{FM} ;热中子探测器测量热中子计数率随时间衰减的时间谱,从热中子计数率衰减时间谱计算出地层热中子宏观俘获截面 Σ_{PNN} ;同时测量 Σ_{FM} 与 Σ_{PNN} 的原因是,在较低宏观俘获截面和较高伽马本底地层, Σ_{PNN} 的测量误差比较小^[23]。10kHz 与 0.5kHz 中子脉冲过后,在 3ms 停歇发射中子期间,测量本底能谱(也称活化能谱),提取氧能窗计数率,称为氧活化指数(OAI)。

二、仪器设计

双源距碳氧比能谱测井、中子寿命测井、脉冲中子—中子测井、能谱水流测井都是传统的脉冲中子测井方法,要想一支测井仪具有上述四种功能,技术关键是:(1)传感器结构的合理设计,保证各测量参数测量精度和分层能力;(2)仪器工作时序的合理设计,并且中子发生器能瞬间切换工作频率。

原有 DDCO 的传感器结构(包括仪器外径、屏蔽体材料与尺寸、源距以及晶体体积比例)是根据蒙特卡罗数值模拟结果进行优化设计的^[10],由于新设计的 PNST 的首要功能是双源距碳氧比能谱测井,因此中子管与伽马探测器组合结构继承了 DDCO 的传感器结构,即自成靶中子管的靶极靠近钨镍铁合金屏蔽体安装、屏蔽体的另一端有大尺寸双源距 BGO(锗酸铋)伽马射线探测器。由于伽马射线探测器组与屏蔽体占据了中子管的一侧,热中子探测器只能安放于中子管的另一侧,即³He 热中子探测器设计在中子发生器内。这样设计能有效保证四种测井功能的测量精度和分层能力。

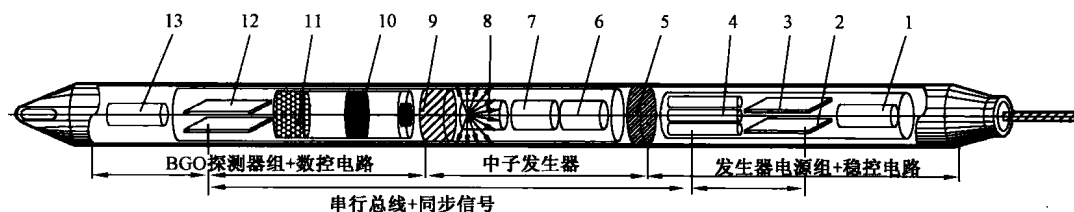


图 1-4-1 PNST 仪器结构示意图

1,13—低压电源;2—传输电路;3—中子发生器稳控电路;4—中子发生器稳控电源组;5—连接头;
6—高压电源;7—³He 探测器;8—中子管;9—屏蔽体;10—BGO 探测器组;11—吸热剂;12—数控电路

如图 1-4-1 所示。PNST 仪器主要包括四部分:(1)探测器及线性放大电路;(2)主数采集、自动稳谱、控制、传输电路;(3)低压电源;(4)中子发生器、自动控制及工作参数采集电路。探测器及线性放大电路部分主要包括长、短源距 BGO 伽马射线探测器、 ^3He 热中子探测器、线性放大器及信号采集处理电路,主要功能是探测伽马射线及热中子信号,完成对探测器信号的预处理。数据采集、控制、自动稳谱、传输电路部分主要功能是对伽马射线能谱、时间谱及中子脉冲幅度谱、时间谱的采集,实现不同的中子爆发、采集时序,完成近、远光电倍增管自动稳谱高压的控制,完成井下仪器和地面采集板之间的通信和传输等功能。中子发生器自动控制及采集电路部分主要包括直流阳极高压模块、脉冲阳极高压开关模块、灯丝控制模块、靶压控制电路、中子发生器自动控制采集电路等,实现对中子管参数的采集及对中子发生器自动控制。

PNST 设计有分别以碳氧比能谱、中子寿命、能谱水流为优先测井项目的多种测井模式(工作时序),每种模式都兼顾几种测井方法。下面以碳氧比为优先测井项目的碳氧比模式为例,介绍组合测井的实现方法。

在碳氧比模式下,PNST 测量近、远 BGO 探测器的非弹性散射伽马能谱、俘获伽马能谱、本底能谱、时间谱,同时测量 ^3He 探测器的时间谱及脉冲幅度谱。发射中子脉冲时序如图 1-4-2 所示,1 个中子爆发短周期为 $100\mu\text{s}$,其中中子爆发时间占 $40\mu\text{s}$,中子爆发间歇时间占 $60\mu\text{s}$,中子爆发短周期反复出现 450 次,持续 45ms ,然后中子爆发 $200\mu\text{s}$,中子停歇 4.8ms ,形成 1 个 50ms 完整周期;每

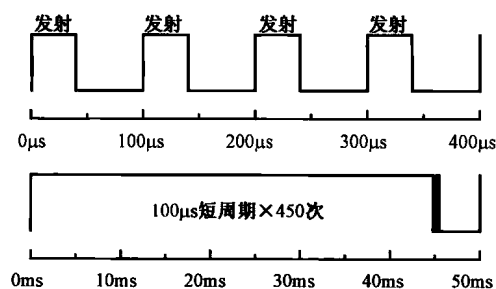


图 1-4-2 PNST 测井模式的发射中子脉冲时序

秒内出现 20 次这样的循环。对近、远 BGO 探测器均测量 3 张 256 道的能谱:第 1 张能谱在中子爆发时测量,时间上占短周期中从 $5\mu\text{s}$ 至 $40\mu\text{s}$;第 2 张能谱在中子停歇后立即测量,占短周期中从 $50\mu\text{s}$ 至 $95\mu\text{s}$ 的时间;第 3 张能谱测量活化与本底伽马射线,在完整周期中子爆发最后 3ms 内测量。近、远 BGO 探测器时间谱分成 2 部分:第 1 部分测量短周期时间谱,占 100 道,每道 $1\mu\text{s}$;第 2 部分在完整周期的最后 5ms 测量,前 2ms 内 $20\mu\text{s}$ 为 1 道,占 100 道,后 3ms 内 $200\mu\text{s}$ 为 1 道,占 15 道;时间谱的有效数据共占 215 道。对 ^3He 热中子探测器测量 256 道的脉冲幅度谱,在完整周期的最后 5ms 的前 2ms 测量 100 道的时间谱。

DDCO 的中子管阳极脉冲发生器只能提供单一频率的高压,PNST 需兼顾多种测井方法,中子爆发时序较复杂,中子管阳极高压的脉冲频率必须随着测井方法的改变而变化。为此,新设计了综合时序发生器和中子管阳极高压变换器^[24],中子管阳极高压电源能在 $1\mu\text{s}$ 时间内进行 0 与 2.4kV 的切换,实现了以任意时序程控发射中子的功能。并且,由于阳极高压脉冲为方波,有助于得到较干净的非弹净谱,从非弹总谱按一定比例扣除俘获谱即可获得非弹净谱。

PNST 还使用了中子产额全自动控制与稳定技术^[25]、伽马射线能谱漂移自动跟踪与校正技术等新技术,使下井仪不用人工调节就能稳定地工作于最佳状态,有效地增加了测量谱有效数据量,提高了测井质量。

三、仪器性能实验室检定

在大庆油田测井试井检测实验中心地层参数实验室的刻度井中对 PNST 的碳氧比测井性能进行了检验。1 号刻度试验井带 139.7mm 的套管、30mm 水泥环,模拟地层孔隙度为 35%、含油饱和度为 0,2 号刻度试验井带 139.7mm 的套管、30mm 水泥环,模拟地层孔隙度为 35%、含油饱和度为 100%。将某支 PNST 测井仪分别置于 1 号、2 号刻度试验井的套管中,套管内充满水,按 4.5s 一个采样点时间驱动方式记录 100 个采样点,在两口刻度实验井中得到的远伽马射线探测器 C/O 及其不确定度分别为 0.4450 ± 0.0063 和 0.5581 ± 0.0048 ,近伽马射线探测器 C/O 及其不确定度分别为 0.5126 ± 0.0049 和 0.6136 ± 0.0049 。C/O 动态范围的定义是在实验室孔隙度为 35%、含油饱和度分别为 100% 和 0 的砂岩地层中,某种仪器测得 C/O 的变化范围。该 PNST 远、近伽马射线探测器 C/O 动态范围分别为 25.4% 和 19.7%,两探测器水砂岩 C/O 值相对误差分别为 1.43% 和 0.95%,油水砂岩 C/O 值相对误差分别为 1.15% 和 0.88%,含油饱和度计算误差分别为 5.6% 和 4.8%。另外,1 号刻度试验井地层热中子俘获截面值约为 12.9cu,该 PNST 在 1 号刻度试验井按 4.5s 一个采样点时间驱动方式记录 100 个采样点,远伽马射线探测器、近伽马射线探测器和热中子探测器测得的未做扩散校正的 Σ 分别为 $11.32\text{cu} \pm 0.55\text{cu}$ 、 $14.65\text{cu} \pm 0.50\text{cu}$ 和 $24.06\text{cu} \pm 0.13\text{cu}$ 。

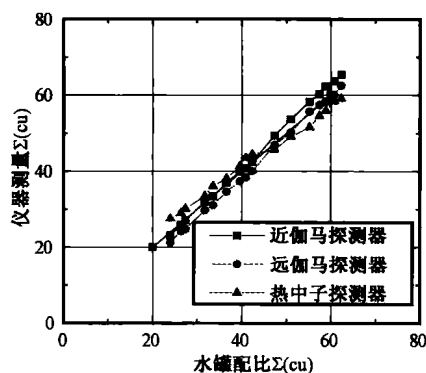


图 1-4-3 PNST 在水罐中刻度 Σ 结果

用标准刻度水罐对 PNST 的 Σ 测井性能进行了检验。标准刻度水罐带 139.7mm 的套管、无水水泥环,仪器置于套管中,套管内充满空气,在水罐内加注不同浓度水溶性钆盐络合物的水来改变 Σ ,实验结果如图 1-4-3 所示。由于扩散效应影响,近伽马射线探测器测得的 Σ 大于远伽马射线探测器测得的 Σ 。当 Σ 较低时受井眼效应影响热中子探测器测得的 Σ 偏大。当 Σ 大于 45cu 时由于井眼效应影响热中子探测器测得的 Σ 偏小。这时伽马射线本底影响逐渐显得不重要而使远伽马射线探测器测得的 Σ 逐渐接近真值。