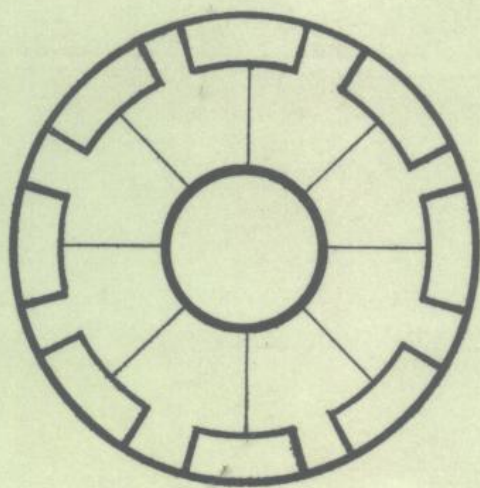


套管井测井解释原理与应用

[美]斯仑贝谢公司

刘呈冰 高中民 译



(北京)

8

石油工业出版社

套管井测井解释原理与应用

[美]斯仑贝谢公司

刘呈冰 高中民 译

陆凤根 耿全喜 校

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书是斯仑贝谢公司 1989 年出版的一部系统介绍套管井测井解释原理与应用的书籍。主要内容包括:套管井地层评价、套管井完井评价、固井质量评价、套管和油管腐蚀评价、射孔技术、完井设计和地层沉降监测等。本书是目前套管井测井解释与应用领域中内容最丰富和最系统的专业书籍之一。它代表了当前世界上套管井测井解释技术的水平。本书可作为测井、采油等专业的现场科技人员、生产管理人员及大专院校有关师生的参考用书。

* * *

原书共分十章,根据内容的要求删去了与套管井测井解释与应用关系不大的第一、二章,其余八章在翻译时未做改动。

本书第一、二、三章由刘呈冰译,第四、五、六、七、八章由高中民译,全书由陆凤根、耿全喜校,陆凤根统校。

套管井测井解释原理与应用

[美]斯仑贝谢公司

刘呈冰 高中民 译

陆凤根 耿全喜 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京仰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14 $\frac{1}{8}$ 印张 362 千字 印 1—1000

1993 年 10 月北京第 1 版 1993 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-0893-9/TE·835

定价:9.80 元

(内部发行)

序

半个多世纪以来,测井技术经历了不断发展和配套的成功过程。1929年9月5日,道尔受雇于斯仑贝谢兄弟在Pechelbronn油田用点测方法成功地测出第一条电阻率曲线。不到两年,电阻率测井首先在委内瑞拉、美国和俄国等国家投入商业服务,地球物理测井作为油田地质和工程的专门技术在工业界扎下了根。这门技术之所以能够在石油工业中首先被承认和被接受,首先要归功于各井的测井曲线在横向井间具有良好的可对比性。这在当时条件下,对于地下地质学的研究来说是何等重要。天才的道尔在他自己的事业的开始就断言,为了能在油田综合技术之中立足,保持和扩大测井技术的商业服务市场,要坚持不懈地加强测井新技术的研究和开发工作。表1简明地描述了测井技术的发展和配套过程。这个过程大致可以分为三个阶段。第一阶段用了近40年的时间,地球物理测井基本完成了方法学方面的突破,以阿尔奇公式为基本模式,通过电阻率测井和岩性孔隙度测井进行油气藏地层评价。后两个阶段主要是依靠社会工业化和高科技成果实现一系列技术上的重大突破。第二阶段用了十多年时间,就完成了测井技术的配套,提高了测井数据的采集和处理精度。在地层评价的基础上,进一步扩充了测井技术在油田地质和工程中的应用领域。第三阶段才开始几年时间,依靠当代高科技,特别是微电子技术、材料和加工技术方面的成果,测井技术的发展和配套出现了更重大的突破点。这些突破点可归纳成主要的两个方面,一方面是方法性的,即除了采集参数性宏观测井数据外,当代测井技术能采集更多的描述性微观图象数据;另一方面是技术性的,使测井技术沿着如下四个“化”的方向发展。

表1 测井技术设备五方面配套内容的变化情况

年 代 配 套 内 容	70年代	80年代	90年代	突破领域
测井仪器的方法性配套	系列化	系列优化提高测量精度	阵列化	克服探测深度和纵向分辨率间的矛盾;采集数据量“爆炸”
井下仪器与地面仪器的配套	模拟运算和记录	数字处理、记录 数控采集	多任务、多用户、成象记录、全方位数控	测井电缆数据传输遥测标准化; 直觉用户接口
系统中软件和硬件的配套	准硬件设备	人机对话通讯 (软件专利性的)	软件、硬件、接口标准化、趋向准软件系统	系统灵活性
测井工艺和工具的配套	解决刻度方法	建立刻度系统	开发质量控制和保证系统; 特殊作业工艺工具系列配套	质量控制和保证系统
数据处理和解释方法技术配套	手工解释	计算机数字处理	测井解释工作站	视感分析技术化; 多学科综合研究

1)测井井下仪器阵列化。组合的多个测井传感器可从根本上改善测井仪器的探测性能,解决纵向探测深度和横向分辨率不可兼顾的矛盾。

2)测井数据电缆传输遥测化。由此不但使测井技术进一步纳入社会工业标准化的良性环境,而且较完美地解决了巨大测井信息量的电缆传输问题。

3)测井数据采集记录多用户成象化。由此提高测井作业的效率,减少钻井队等待时间;并且实现宏观测井参数和微观测井描述性数据的图象记录。

4)测井数据处理和解释的工作站化。利用工作站系统处理和解释测井数据可最佳发挥分析人员的经验和视感“相面”能力;更主要的是可以对一个油田从勘探到开发进行连续性研究,提高油田的综合和长期效益。

本书主要介绍生产测井及评价技术。套管井测井技术的发展和配套进程比裸眼井测井迟了十年。当代套管井测井技术日趋完善,在油田开发中的技术作用越来越重要。它与裸眼井测井技术一起,使地球物理测井成为油田时空中普及程度最大的一种专门技术。考虑到此书在套管井测井技术中的地位,在这里简要回顾一下套管井测井技术的发展和配套过程是有益的。

套管井测井是从检查油井固井质量开始的。E. P. 哈里伯顿首先采用水泥固井技术。1937年斯仑贝谢公司成功地用连续井温测井的方法确定水泥返高的位置。但直到1961年研制成功声幅测井仪之后才开始有效地评价套管的水泥固封质量。

紧接着出现的油井电缆测井业务是射孔技术。它的进程表是:19世纪20年代出现子弹射孔方法;第二次世界大战后,于1947年,威勒克斯研制成效果好得多的聚能射孔弹;1949年斯仑贝谢开始这项技术,而且在第二年创造了过油管的负压射孔技术和井口防喷装置;不久又出现油管传输射孔及射孔测试联作的技术。与之孪生的是射孔深度跟踪测井技术,除1939年开始的核测井校深法之外,磁性定位器的发明,使套管接箍可用来作为油气层的对深标志。

套管井测井技术在发展进程中,开发了岩性、储层评价和井间地层对比技术。特别是热中子衰减时间测井方法使套管井储层评价逐步成为常规手段。最新推出的双脉冲热中子衰减时间测井和次生伽马能谱测井可有效减少井筒环境影响,更加准确地求出生产层中的含油饱和度。

桥塞和封隔器技术,井内流体性质和流量的动态监测技术成为套管井测井的又一个重要分支;加上套管井电缆地层测试、管柱腐蚀评价、地震测井等新技术的开发、套管井电缆测井技术为开发地质、油藏工程和油井工程等发挥十分重要的作用。

全书共分八章,内容十分丰富和系统。本书的价值,除了技术上的参考和应用之外,结合工作实际,还应该注意如下几个方面:

- 1)套管井测井方法和技术的系列配套;
- 2)套管井测井数据采集和分析的刻度和标定方法;
- 3)生产测井的运行方式。

这里着重讨论一下生产测井的运行方式,因为实践已表明这个问题已严重制约这门专业技术的效率和效益。一个油气田进入开发阶段之后,油(气)水井数量越来越多,开发地质、油藏动态、油井工程等波及的时空问题越来越复杂,程度越来越深,面越来越广;另一方面是出现油田生产任务与动态监测占用时间及资金之间的尖锐矛盾。不抓监视和调控是不科学的,特别是复杂的陆相油气田,其后果是不堪设想的。但是,没有一个合理的运行方式,也是不科学的,不经济的,而且是难以奏效的。要把套管井测井工作作为一个油田的动态检测的系统工程来抓,在搞好方法和技术配套,数据采集及分析的刻度方法之后,综合其他专业技术和学科研究,确

定小规模试验区 and 面上的观察井,要“沉痛”放弃一部分产量,花一部分资金,按时间轴上的坐标抓好监测工作。这样做,还是在这时间轴的某一个坐标点上,将会出现效益的信号。

陆凤根

1992年5月于胜利油田

目 录

第一章 套管井地层评价技术	(1)
第一节 用于套管井地层评价的测井资料	(1)
第二节 自然伽马测井	(1)
一、伽马光子的特性	(2)
二、仪器	(3)
三、刻度	(3)
四、自然伽马能谱测井	(4)
五、物理原理	(4)
六、测量原理	(4)
七、曲线显示	(5)
八、解释方法	(5)
九、用途	(6)
第三节 中子测井	(6)
一、原理	(6)
二、仪器	(7)
三、曲线显示	(8)
四、仪器刻度	(8)
五、探测特性	(9)
六、仪器响应	(9)
七、盐水的含氢指数	(9)
八、烃的测井响应	(9)
九、泥岩束缚水的影响	(11)
十、岩性影响	(11)
十一、用中子测井曲线求孔隙度	(11)
十二、热中子测量	(11)
第四节 声波测井	(12)
一、原理	(12)
二、曲线显示	(14)
三、地层的声波速度	(14)
四、求孔隙度(用威利时间平均公式)	(14)
五、测井质量	(17)
六、用途	(18)
第五节 热中子衰减时间测井	(19)
一、简介	(19)
二、原理	(20)
三、TDT—K 测井仪	(21)
四、曲线显示	(21)

五、双脉冲热中子衰减时间测井仪	(23)
六、用 TDT—K 测井曲线求孔隙度	(29)
七、用双脉冲热中子衰减时间测井曲线求孔隙度	(29)
八、用 TDT—K 测井曲线探测天然气	(29)
九、用双脉冲热中子衰减时间测井曲线探测天然气	(30)
十、热中子衰减时间测井曲线的解释方法	(31)
十一、各种骨架的俘获截面	(31)
第六节 次生伽马能谱测井仪 (GST)	(40)
一、简介	(40)
二、技术原理	(40)
三、快中子反应	(40)
四、中子俘获反应 (也称为热中子吸收)	(41)
五、曲线显示	(42)
六、碳/氧比资料的解释方法	(44)
七、俘获工作方式下所测资料的解释方法	(45)
八、用途	(48)
九、储层动态监测	(50)
十、生产动态监测	(50)
十一、注入动态监测	(51)
十二、注入井动态监测	(53)
十三、生产井动态监测	(54)
第二章 完井评价技术	(59)
第一节 生产测井服务项目	(59)
一、生产测井的用途	(60)
二、油井动态	(60)
三、井的故障	(60)
第二节 垂直管柱中的流动	(60)
一、单相流动	(60)
二、多相流动	(61)
第三节 生产测井仪器与解释	(64)
一、流动速度	(64)
二、转子式流量计	(64)
三、单相流动的解释方法	(66)
四、双程测量技术	(70)
五、放射性示踪测井仪	(73)
六、流体密度测井仪	(76)
七、井温测井仪	(78)
八、噪声测井仪	(80)
九、砾石充填测井	(81)
十、生产测井井场快速直观解释程序	(83)
十一、制定作业计划	(88)
第四节 生产测井与试井	(90)
一、试井基础	(90)
二、向井内径向流动的模拟	(91)

三、径向流动模拟过程中的模拟误差	(93)
四、用于试井的井下流动测量结果	(95)
五、层状油藏的测试	(97)
六、计算机采集与解释的特点	(98)
第三章 固井评价技术	(104)
第一节 固井技术	(104)
第二节 水泥胶结—变密度测井	(105)
第三节 补偿水泥胶结测井仪	(108)
第四节 水泥评价测井仪	(109)
第五节 微环隙	(111)
第六节 第三界面反射	(112)
第七节 天然气效应	(113)
第八节 现场实例	(114)
第九节 水泥胶结质量评价程序	(117)
第四章 套管和油管腐蚀现象的测井评价技术	(124)
第一节 腐蚀现象的预测	(124)
一、腐蚀和防护评价测井仪 (CPET)	(125)
二、测井实例	(125)
第二节 管柱损耗的监测	(126)
一、多频电磁套管测厚仪 (METT)	(127)
二、厚度测量方法	(127)
三、套管特性比	(127)
四、测井质量	(128)
五、测试井中的测井曲线	(128)
六、磁导率变化的补偿	(128)
七、外层套管的裂口	(128)
八、套管的破裂	(128)
九、三层套管	(129)
十、双层套管	(130)
十一、水泥评价测井仪 (CET)	(131)
十二、套管内外壁的腐蚀现象	(133)
十三、找漏	(134)
十四、井下声波电视测井仪 (BHTV)	(134)
十五、放大深度比例	(135)
十六、多臂井径仪	(138)
十七、管子分析测井仪 (PAT)	(138)
十八、电磁测厚技术	(139)
十九、多层套管	(140)
二十、套管上的孔洞与锈斑	(140)
二十一、防护腐蚀评价测井仪	(143)
第三节 综合测井评价实例	(143)
第五章 射孔技术	(147)
第一节 聚能射孔弹理论	(147)
第二节 射孔枪系统的设计	(149)

第三节	射孔系统的工业性测试	(150)
第四节	井下条件下射孔枪系统的性能	(151)
第五节	完井设计	(153)
一、	自然完井	(153)
二、	选择最佳负压条件指南	(157)
三、	防砂完井	(159)
四、	强化完井	(160)
第六节	斯仑贝谢射孔分析程序 (SPAN)	(160)
一、	概述	(160)
二、	孔口直径的估算	(160)
三、	射孔深度计算中的地层特性校正	(161)
四、	计算生产率	(162)
第七节	完井技术	(163)
一、	电缆套管射孔技术	(164)
二、	过油管射孔技术	(164)
三、	油管传射孔技术	(165)
第八节	完井评价	(166)
第六章	岩石力学特性与完井设计	(169)
第一节	弹性系数	(169)
第二节	固有强度的计算以及它与地层垮塌的关系	(171)
一、	产液孔隙周围的应力	(171)
二、	关于“垮塌”问题的解	(172)
三、	Griffith 破裂准则	(173)
四、	Mohr—Coulomb 破裂准则	(173)
第三节	关于水力压裂的应力分析	(175)
一、	用测试压裂数据进行刻度	(176)
二、	压裂压力计算	(178)
第四节	水力压裂裂缝几何形状的分析	(178)
一、	裂缝高度	(179)
二、	Frac Hite 程序	(179)
三、	裂缝延伸方向	(180)
第七章	套管井垂直地震测井技术	(183)
第一节	套管井垂直地震测井设备	(183)
第二节	数字检验炮测量技术	(184)
第三节	时—深转换与速度剖面	(184)
第四节	Geogram 处理	(186)
第五节	垂直地震剖面	(188)
第六节	VSP 处理	(189)
第七节	非零井距垂直地震剖面	(189)
第八节	变井源距测量技术	(193)
第九节	采集 VSP 数据的井下阵列地震仪 (DSA)	(194)
第十节	VSP 测量的基本用途	(194)
第十一节	透射波法测量的解释	(194)
第八章	其它套管井服务项目	(197)

第一节	连续导向测井仪 (GCT)	(197)
第二节	测量理论	(198)
一、	刻度	(199)
二、	测井质量控制	(199)
三、	精度	(199)
四、	井场处理	(200)
五、	成果显示	(200)
第三节	卡点指示测井仪 (FPIT)	(203)
第四节	水力封隔	(205)
一、	过油管桥塞 (Plus Plug)	(206)
二、	PosiSet 机械回堵仪	(206)
第五节	套管井电缆地层测试器	(207)
第六节	地层层段测试器 (FIT)	(208)
第七节	双发重复地层测试器	(208)
第八节	跟踪电磁打捞仪 (CERT)	(209)
第九节	沉降监测	(210)
一、	简介	(210)
二、	地层沉降测量技术	(210)
第十节	地层沉降监测仪 (FSMT)	(210)
一、	电缆运动的测量	(211)
二、	放射性标志弹的定位	(211)
三、	测量理论	(211)
四、	FSMT 测井仪刻度	(213)
五、	测井步骤	(213)
六、	测井数据处理	(213)
七、	成果显示	(213)
附录	书中所用非法定单位与国际标准单位的换算关系	(216)

第一章 套管井地层评价技术

第一节 用于套管井地层评价的测井资料

用于地层评价的套管井测井曲线主要是一些由放射性测井仪器所测的曲线，例如，热中子衰减时间（TDT）、次生伽马能谱（GST）、补偿中子（CNL）、自然伽马（GR）和自然伽马能谱（NGS）测井仪所测的曲线。另外，在胶结好的套管井中，阵列声波或长源距声波（LSS）测井仪可提供孔隙度数据，在特殊情况下，密度测井曲线也是有用的。

1) 自然伽马测井曲线是进行对比和控制岩性的基本测井曲线。特别重要的是，用它能够估算泥质含量。在产出的水中含有溶解的放射性盐类的许多老井中，由于放射性沉淀物积聚在套管上，特别是积聚在套管的射孔井段，所以，自然伽马测井曲线的上述用途就可能失效。在这种情况下，需要使用自然伽马能谱测井数据和裸眼井测井数据。

2) 使用自然伽马能谱测井仪可以识别粘土类型和计算粘土体积。与总自然伽马曲线相比，钍和钾响应曲线通常是更好的泥质指示曲线。自然伽马能谱曲线和次生伽马能谱曲线组合使用可以对岩性复杂的混合岩体进行矿物体积分析。

3) 补偿中子测井给出的是主要取决于地层含氢量的孔隙度指数。如果胶结良好，补偿中子测井曲线与阵列声波测井曲线组合使用可在套管井中探测气层。在理想条件下，也可以组合使用密度和补偿中子测井曲线探测气层。

4) 在胶结良好的套管井中，阵列声波测井可提供用于确定孔隙度及计算岩石力学特性参数的地层纵波与横波时差数据。

5) 热中子衰减时间测井根据盐水和油气之间的区别给出含水饱和度。其附加测量结果也用于计算视孔隙度和视地层水矿化度。在某些情况下，可以用之探测气层。热中子衰减时间测井曲线还是一种有效的泥质指示器。

6) 次生伽马能谱测井仪测量一些常见矿物的伽马产额，伽马产额与地层的流体、孔隙度和岩性有关。由于用这种仪器确定地层含水或含油饱和度时与地层水的矿化度无关，所以，这种仪器可在地层水矿化度未知的地层或地层水太淡而不能进行热中子衰减时间测井的地层中使用。

本章将介绍这些测井方法的原理、特点和解释方法。在套管井测井解释中，由裸眼井测井数据或岩心数据求出的孔隙度、岩性和泥质含量信息总是有帮助作用的。

第二节 自然伽马测井

自然伽马（GR）测井测量地层的自然放射性。自然伽马测井有两种：一种是常规的自然伽马测井，只测总放射性；另一种是自然伽马能谱测井，测量总放射性以及产生这种放射性

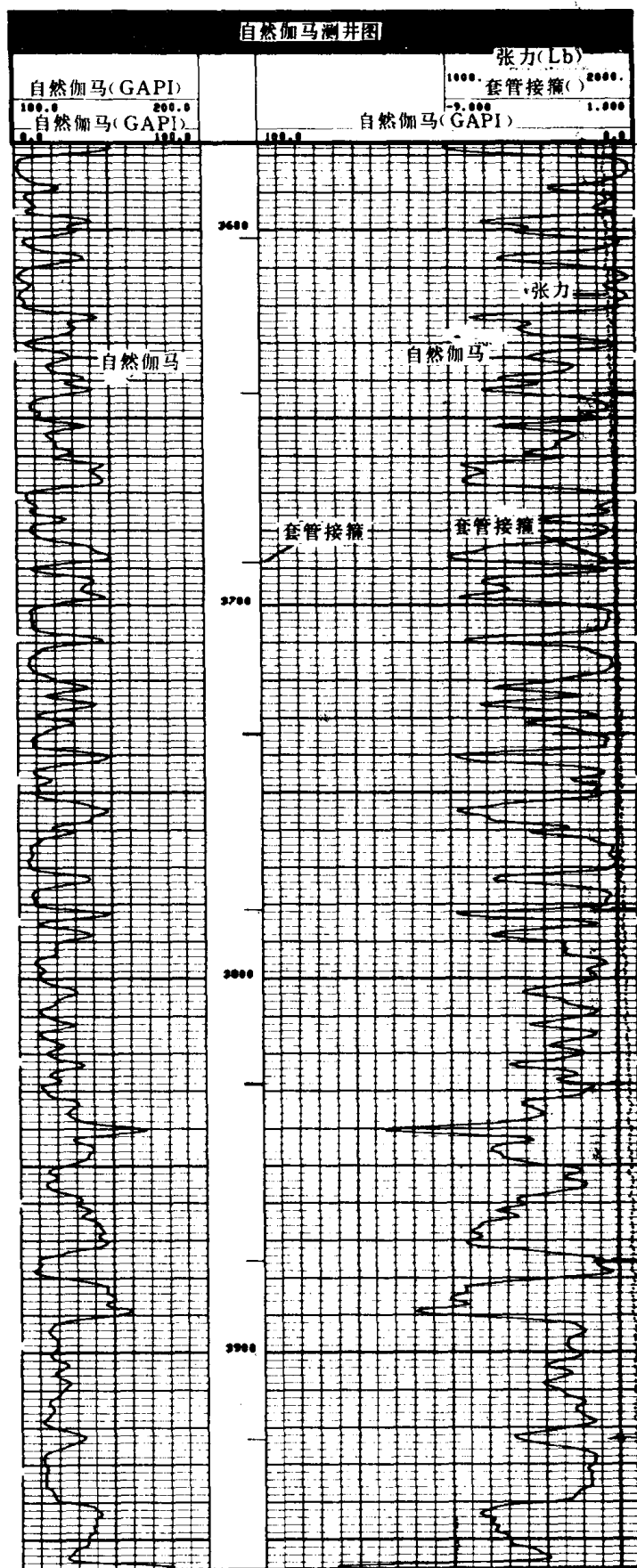


图 1—1 常规自然伽马测井图

的钾、钍和铀的含量。

自然伽马测井曲线通常记录在测井图的第 1 道(左边一道)上。它通常与诸如水泥评价曲线或热中子衰减时间曲线等其它曲线同时记录。现在,在测量每一种套管井测井曲线时,几乎都要带测一条自然伽马曲线。

自然伽马和自然伽马能谱测井曲线的用途如下:

- 1) 把可能的孔隙性、渗透性储集岩石(砂岩、石灰岩、白云岩)与非渗透性粘土岩及泥岩区分开;
- 2) 确定地层界面;
- 3) 匹配套管井测井曲线和裸眼井测井曲线的深度;
- 4) 定性分析泥质含量;
- 5) 监测放射性示踪剂;
- 6) 帮助识别岩性(矿物);
- 7) 用自然伽马能谱测井曲线探测和评价放射性矿物;
- 8) 用自然伽马能谱测井曲线确定钾、钍和铀的含量;
- 9) 用自然伽马能谱测井曲线监测多种同位素示踪剂。

在沉积岩地层中,自然伽马测井曲线通常反映地层的泥质含量。这是因为放射性元素常常集聚在粘土和泥岩中的缘故。如果不含有象火山灰或花岗岩这类的放射性杂质,而且地层水中不含有溶解的放射性盐类的话,仅纯地层的放射性是很低的。图 1—1 是一张常规自然伽马测井图。

一、伽马光子的特性

伽马光子是由某些放射性元素自然地幅射出的一些高能电磁波脉冲。在地球上遇到的几乎所有的伽马光子都是由原子量等于 40 的放射性钾同位素 (^{40}K) 以及铀—钍族

的放射性元素辐射的。

每一种元素所辐射的伽马光子的数量和能量是不同的(图1—2):⁴⁰K 辐射能量为1.46MeV 的单能伽马光子,而铀—钍族的元素辐射各种能量的伽马光子。

伽马光子在通过地层时,与地层物质的原子相继发生康普顿散射碰撞,每一次碰撞失去一部分能量。在伽马光子失去足够的能量以后,它与地层中的原子发生光电效应而被原子吸收。因此,当伽马光子通过地层时,它们逐渐被吸收,而它们的能量逐渐减小。

吸收率随地层密度的变化而变化。两个单位体积的放射性物质含量相同但密度不同的地层呈现不同的放射性;密度较低的地层的放射性要略高一些。经过适当的井眼环境校正后,自然伽马测井响应与地层中的放射性物质的重量含量成正比:

$$GR=\frac{\sum \rho_i V_i A_i}{\rho_b}$$

(1--1)

- 式中
- ρ_i ——放射性矿物的密度;

V_i ——放射性矿物的体积系数;

A_i ——与矿物的放射性相对应的比例系数;

ρ_b ——地层的体积密度。

在沉积岩地层中,自然伽马测井的探测深度大约为1ft。

二、仪器

自然伽马探头包含一个能测量探头附近的一定体积地层中产生的伽马光子的探测器。现在,通常用闪烁计数器测量伽马光子。闪烁计数器比以前使用的盖革—米勒计数器的计数效率要高得多。因为闪烁计数器的计数效率高,所以,它只需要几英寸长,因此,它的垂直分辨率较高。自然伽马测井通常与大多数套管井测井项目组合使用。

三、刻度

自然伽马测井仪的一级刻度标准由设在休斯顿市的美国石油协会(API)的测试井确定。用一个现场刻度标准(放射性源)把每一只仪器刻度到API标准,而自然伽马曲线采用API单位。沉积岩地层的放射性范围一般为几个API单位(硬石膏或岩盐)至200多个API单位(泥岩)。

实行API刻度以前,自然伽马测井曲线采用的单位是每吨微克镭当量(地层)。这些单位和API单位的换算关系如表1—1所示。

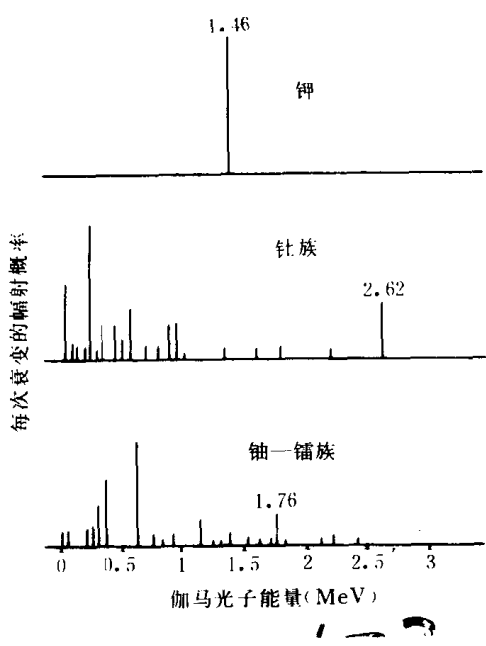


图1—2 放射性矿物的伽马辐射谱

表1—1 斯伦贝谢自然伽马测井的老单位与API单位的换算关系

仪 器	老单位 (微克镭当量/t (地层))	API 单位/老单位
GNT—F	1	16. 5
GNT—J. K, GLD—K	1	11. 7

四、自然伽马能谱测井

和自然伽马测井一样，自然伽马能谱测井测量地层的自然放射性。所不同的是，自然伽马测井只测量总放射性，而自然伽马能谱测井既测量伽马光子的数量，又测量每一个伽马光子的能量，因此，自然伽马能谱测井能够确定地层中的放射性钾、钍和铀的含量。

五、物理原理

地球上的大部分伽马光子是由三种放射性同位素的衰变产生的，它们是：半衰期为 1.3×10^9 a 的钾 $40(^{40}\text{K})$ 、半衰期为 4.4×10^9 a 的铀 $238(^{238}\text{U})$ 和半衰期为 1.4×10^{10} a 的钍 $232(^{232}\text{Th})$ 。

^{40}K 直接衰变为稳定的氩 $40(^{40}\text{Ar})$ ，同时辐射一个能量为 1.46MeV 的伽马光子。而 ^{238}U 和 ^{232}Th 则要经过一系列的衰变顺序衰变为一系列子同位素，最后才衰变为稳定的铅同位素。如图 1—2 所示，这些衰变的结果是辐射出了许多不同能量的伽马光子和形成了非常复杂的能量谱。钍族的 2.62MeV 的特征峰和铀族的 1.76MeV 的特征峰分别是由铊 $208(^{208}\text{Tl})$ 和铋 $214(^{214}\text{Bi})$ 的衰变产生的。

一般认为地层处于永久平衡状态之中，即在母同位素衰变为子同位素的同时，子同位素也在按同样的速率衰变。这意味着在一个特定的元素系列中，母元素和子元素的相对比例是相当固定的；因此，测量其能谱中的一个特定部分的伽马光子计数就可以推导出任何其它部分的伽马光子计数。用这种方法可以求出现存的母同位素的含量。

一旦求出母同位素的含量，也就可以求出稳定同位素的含量。 ^{40}K 和总钾的比值是非常稳定的，在地球上是一个常数。除了 ^{232}Th 以外，钍的其它同位素很少，可以忽略不计。铀的同位素的相对比例多少取决于它们所处的环境，而且由于它们的半衰期不同而逐渐发生变化，目前， ^{238}U 和 ^{235}U 的比值约为 137。

六、测量原理

自然伽马能谱测井仪使用碘化钠 (NaI) 晶体闪烁探测器。地层辐射出的伽马光子能直接到达探测器的很少。相反，它们与地层发生光电效应、康普顿散射和电子对作用等三种可能的相互作用而被散射并失去能量。由于这些相互作用与碘化钠闪烁探测器的响应特性的影响，使得如图 1—2 所示的原始能谱变化为图 1—3 所示的这种相当“模糊不清”的能谱。

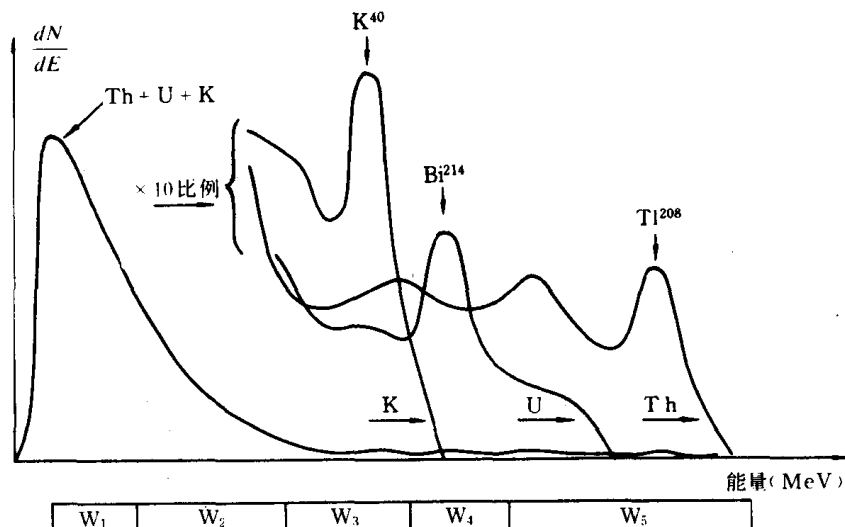


图 1—3 钾、铀和钍的响应曲线 (NaI 晶体探测器)

把探测到的能谱的高能部分分为 W_3 、 W_4 和 W_5 三个能量窗口，每一个能量窗口覆盖一个能够代表一个放射性族的特征峰（图 1—3）。知道了仪器的响应曲线和每一个窗口的计数后，就可以求出地层中的 ^{232}Th 、 ^{238}U 和 ^{40}K 的含量。

在 高能部分，特征峰最易识别，但相对来说计数率非常低，因此，即使测速很低，测量结果也要受统计起伏的影响。能谱的低能部分的计数率较高，把低能部分的计数率加进高能部分的计数率中，那么，在 高能窗口的较大的统计起伏误差可以减小 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。使用一种滤波技术可使统计起伏误差再减小 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ ，这种滤波技术是把一个特定深度的计数率与以前的计数率进行比较，把假的变化去掉，只保留与地层变化有关的变化。一般情况下，只把滤波后的数据显示在胶片上，而未经滤波的原始数据则总是记录在磁带上。

七、曲线显示

自然伽马能谱测井记录地层中的钾、钍和铀的含量（浓度）。这些曲线通常显示在测井图的第 2 道和第 3 道上（图 1—4）。钍和铀的浓度是用百万分率（ppm）表示的，而钾的浓度是用百分率（%）表示的。

除了这三种放射性元素的浓度之外，还记录一条总（常规）自然伽马曲线，该曲线显示在第一道上。把钾、钍和铀的浓度线性相加便得到总自然伽马响应。总自然伽马以 API 为单位。如果需要的话，也可以给出一条“无铀”自然伽马曲线（CGR）。无铀自然伽马曲线是把钍和钾产生的伽马放射性进行简单相加的结果。

八、解释方法

三个放射性族主要在以下地方出现：

- 1) 钾：存在于云母、长石、云母质粘土（伊利石）及放射性蒸发岩中。
- 2) 钍：存在于泥岩、重矿物中。
- 3) 铀：存在于磷酸盐、有机物中。

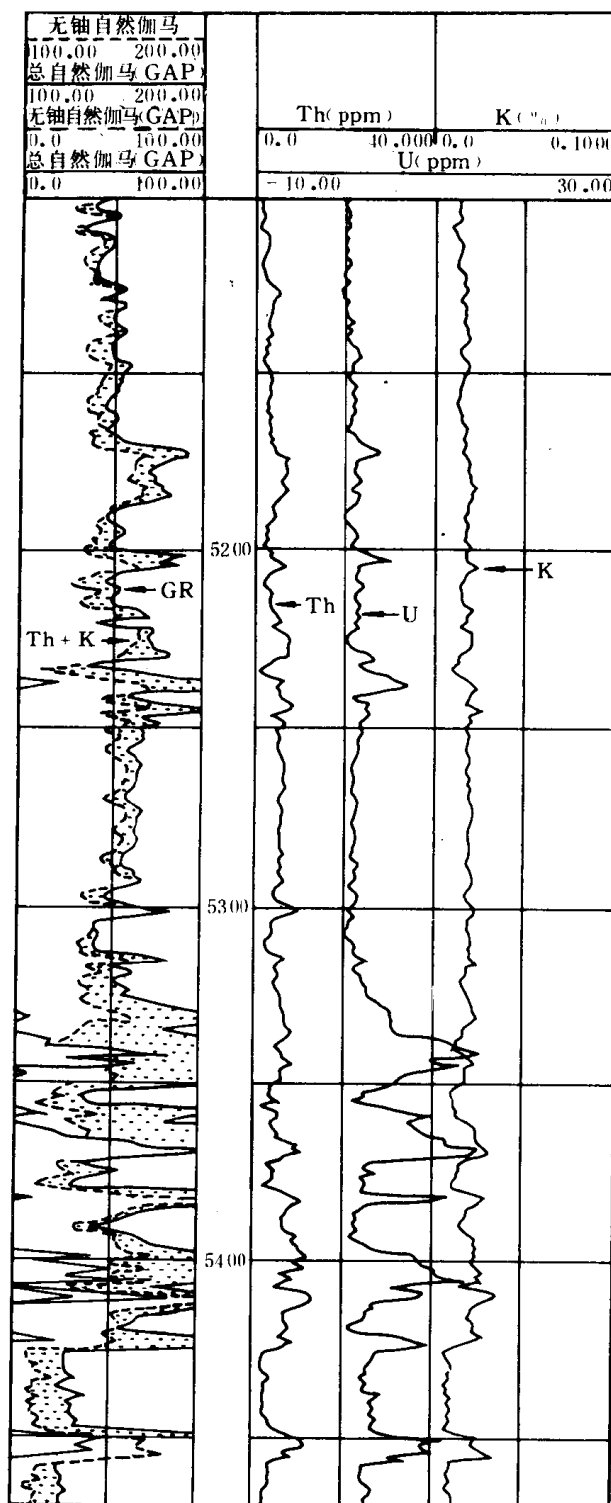


图 1—4 自然伽马能谱测井图

放射性类型的具体含义取决于所测量的地层。在碳酸盐岩中，铀通常指示有机物、磷酸盐和缝合线。钍和钾的含量代表粘土含量。在砂岩中，钍的含量反映的是重矿物及粘土的含量，而钾通常指示云母和长石。在泥岩中，钾的含量指示粘土类型和云母含量，钍的含量则取决于碎屑物质的多少或泥质成分的多少。

在泥岩中，铀的含量高就说明这种泥岩是生油岩。在岩浆岩中，三种放射性族的相对比例指示岩石的类型，其中，Th/K 比值和 Th/U 比值特别有用。

在地层中发现的放射性矿物在某种程度上取决于地层的沉积方式。搬运方式和再造及蚀变的程度也是影响因素。例如，由于钍的溶解度很低，所以，它的流动度是有限的，它常常与重矿物积聚在一起。另一方面，铀的溶解度和流动度都比较高，因此，在有地层水流过的断层面、裂缝和地层中，铀的含量增高。同样，在渗透性地层中和在正生产的油井的油管及套管上，铀的含量也增高。海相沉积物的特点是其放射性物质的含量极低，三种放射性族的含量都很低。风化层常常表现为钍和钾的含量明显变化，而 Th/K 比值则基本不变。

九、用途

可以利用自然伽马能谱测井曲线探测、识别和评价放射性矿物，也可用其识别粘土类型和计算粘土体积。而根据这些信息可以进一步了解岩石的物源、沉积环境、成岩过程和岩石物理特性（如表面积、孔隙结构）。

自然伽马能谱测井曲线中的钍和钾曲线或钍曲线本身常常是一种比常规自然伽马曲线好得多的泥质指示器。因此，砂泥岩解释程序可以从使用自然伽马能谱测井数据中得益。在含钍和钾的地层中，也可用自然伽马能谱曲线进行地层对比。

把自然伽马能谱测井曲线与其它对岩性敏感的测井曲线（如次生伽马能谱和中子测井曲线）组合使用可以对复杂岩性地层进行矿物体积分析。地层的岩性越简单，识别矿物的可靠性就越大，体积的计算精度也就越高。

第三节 中子测井

套管井中子测井曲线主要用于划分孔隙性地层和求地层的孔隙度。中子测井主要响应于地层的含氢量。因此，在孔隙被水或油充满的纯地层中，中子测井曲线反映的是液体孔隙度。在自然伽马测井曲线对比性差的地方（如图 1—5 所示的纯的巨厚碳酸盐岩）也可以用中子测井曲线与裸眼井测井曲线进行对比。

中子孔隙度与声波孔隙度或岩心分析孔隙度对比，通常可以识别气层。

一、原理

中子是不带电的粒子，每一个中子的质量约等于一个氢原子的质量。安装在探头中的一个放射性源连续地辐射高能（快）中子。这些快中子与地层中的原子核发生碰撞，这种碰撞可以想象为“台球”间的弹性碰撞。每次碰撞，中子都损失一部分能量。

每次碰撞中子所损失的能量的大小取决于与之碰撞的原子核的相对质量。当中子与一个质量与之相等的原子核（即氢核）相碰撞时，其能量损失最大。中子与重核发生碰撞时速度下降很小。因此，中子的减速主要取决于地层的含氢量。

经过不断碰撞，超热中子在几微秒的时间内就被减速成能量约为 0.025MeV 的热中子。尔后，热中子随机扩散（扩散过程不再损失能量），直到被诸如氯、氢或硅这样的原子核俘获为