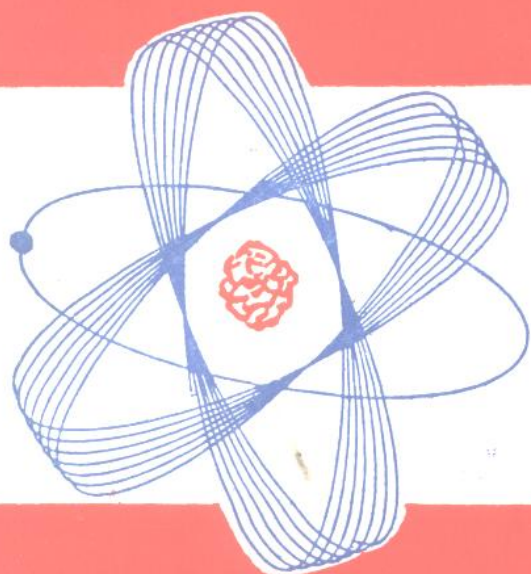


自然伽马能谱测井译文选



自然伽马能谱 测井译文选

81

2

石油工业出版社

内 容 提 要

自然伽马能谱测井是一种新型测井方法, 它可以直接测量地层中铀、钍、钾等放射性元素的含量, 从而能够鉴别岩性, 评价地层泥质含量及粘土类型, 指示泥岩裂缝, 评价生油岩及花岗岩冲积储集层等, 同时在指示地层年代及研究地质变迁等方面也具有功效。本文选在汇编过程中, 译者翻阅了几十篇国外论文, 从中挑选能反映现代技术水平的二十四篇论文进行了汇编。文选中论述了自然伽马能谱测井理论基础及地质基础, 分析了影响能谱测量的因素, 介绍了仪器刻度和稳谱技术以及测井资料解释技术, 并附有大量现场应用实例。

本文选可作为测井专业的仪器操作及研制人员、资料评价和实验室分析人员的参考用书。也可供地质研究人员参考。

自然伽马能谱测井译文选

吴三省 译 金振武 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京计量印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 15 3/4印张 385千字 印1—1,500

1988年9月北京第1版 1988年9月北京第1次印刷

书号: 15037·2905 定价: 2.95元

ISBN 7-5021-0055-5/TE·55

出版者的话

为了配合引进国外测井仪器及国内在“七五”期间研制自然伽马能谱测井仪器的攻关任务,要注意学习、借鉴和掌握国外先进测井技术,提高我国石油测井技术人员的技术水平,我们出版了《自然伽马能谱测井译文选》。该文选收集了国外有关自然伽马能谱测井理论、地质基础、测量技术、实验室研究、资料评价方面二十四篇论文进行翻译和汇编。汇编中,在保持原论文内容完整性的前提下,对论文中相互重复的和一些不必要的内容、图幅作了删减。

该译文选共分四部分内容,第一部分是自然伽马能谱测井理论基础与原理;第二部分是自然伽马能谱测井的刻度及影响因素的校正;第三部分为资料解释及地质应用;第四部分是稳谱技术,因此该文选可作为测井仪器操作和研制人员、实验室研究人员及测井资料评价人员的参考用书。也可供地质研究人员参考。

目 录

第一部分 自然伽马能谱测井理论基础与原理	(1)
一、自然伽马能谱测井	(1)
二、自然伽马能谱测井	(11)
三、自然伽马能谱测井理论、解释和实际应用	(21)
四、各种砂岩的自然伽马射线数据	(36)
五、用伽马能谱仪器对钻井岩芯进行放射性元素扫描	(48)
第二部分 自然伽马能谱测井的刻度及影响因素的校正	(61)
一、自然伽马能谱测井的现场试验结果	(61)
二、自然伽马能谱测井 I ——能量稳定方法	(71)
三、自然伽马能谱测井 II ——井眼校正系数	(77)
四、自然伽马能谱测井 III ——地层与薄层的影响	(91)
五、闪烁晶体伽马能谱测井中, 岩性、井眼环境和探头设计的定量影响	(104)
六、伽马能谱测井的刻度和校正技术	(115)
七、谱放射性探测器的刻度和误差分析	(125)
八、氯化钾 (KCl) 和重晶石泥浆对 NGT 测井影响的校正	(132)
九、API 和 KUT 测井刻度 HOC 委员会推荐的刻度装置的设计	(144)
第三部分 自然伽马能谱测井资料解释及地质应用	(151)
一、伽马能谱测井曲线的定量解释	(151)
二、泥质碎屑储集层岩芯和测井分析的综合研究	(160)
三、用能谱测井研究得克萨斯白垩纪碳酸盐岩剖面	(175)
四、鉴别泥岩裂缝储集层和生油岩特性的伽马能谱评价技术	(186)
五、用伽马能谱测井数据评价花岗岩冲积储集层	(200)
六、用伽马测井寻找套管后面流体的迁移	(207)
七、应用数字时间系列分析从伽马曲线中定量确定铀含量	(211)
第四部分 稳谱技术	(229)
一、在下井仪器中用发光二极管进行伽马射线稳谱	(229)
二、在线稳峰的计算机编码	(234)
三、伽马能谱测井鉴别煤沉积方法中 BGO 与 NaI(Tl) 探测器性能比较	(238)
书中使用的非许用单位与许用单位换算表	(247)

第一部分 自然伽马能谱测井 理论基础与原理

一、自然伽马能谱测井

G. A. Lock W. A. Hoyer

摘要 近年来,自然伽马能谱测井仪已成功地投入商业性服务。通过现场实践表明,该测井仪器对地层对比、矿产勘探以及岩性鉴别等极为有效。它可以直接测量地层中钾、铀、钍等放射性元素的含量。

自然伽马能谱测井在用于解决 Santa Barbara 槽沟的地层对比问题上获得了成功。在该槽沟火山灰中测得的钍丰度给地层对比提供时间标志。同时,由于能谱测井能够将钾发射的伽马射线区分出来,所以它还可用于勘探钾盐。

使用能谱测井仪和中子活化技术在现场进行元素分析的可能性已经得到证实。在活化分析中,通常是由井下测井仪器中配置的中子源产生中子。由于中子活化,使得待鉴别的元素具有放射性。在那些需要定量地鉴别像铜、铁、铝等元素的地区,这种元素鉴别技术有可能直接地应用于矿物测井。另外,还可能涉及到化学和矿物学方面的一些应用。自然伽马能谱测井还可以起到指示地质年代或者指示可能的地质事件。同时活化分析还表明,通过现场测井对于某些关键元素(如硅、铝、镁、钾、铁和钙)的确定,将有助于岩性的鉴别。

引言

自然伽马能谱测井仪测量 K、U、Th 三种主要天然放射性源对总伽马射线的各自贡献。分别记录来自 K、U、Th 的计数率,同时也测量常规自然伽马射线总计数率。

几年前就已经认识到这种类型谱信息的可能用途,选择性地鉴别天然放射性,既促使实验室研究又促进现场研究,以探寻天然放射性分布模式的地质意义。据 Brannon 和 Osoba⁽¹⁾ 报告,第一次自然伽马能谱测井表明,在砂岩、泥岩和石灰岩中放射性分布很不一致。它们之间的差别在以下三个方面具有重要意义:井间对比,矿产勘探以及现场元素分析。

下面讨论能谱测井在上述所提到的三个方面中的应用以及仪器的工作原理、仪器刻度和质量控制。

自然伽马能谱测井的应用

井间对比

自然伽马能谱测井具有将地层总放射性区分为来自 K、U、Th 三种成分放射性的能力,

这种能力常常使得有可能认识到用其他方法所不能显示出来的地层的独特性质。如图 1 所示的 Santa Barbara 槽沟的一个测井剖面。在 8601~8609 英尺●井段具有相当高的钍含量,而该井段在常规自然伽马测井图上与相邻井段没有明显差别。这个层段的岩性特点是斑脱岩地层,正如下面要指出的那样,斑脱岩地层的钍含量可能是个很有用的标志。

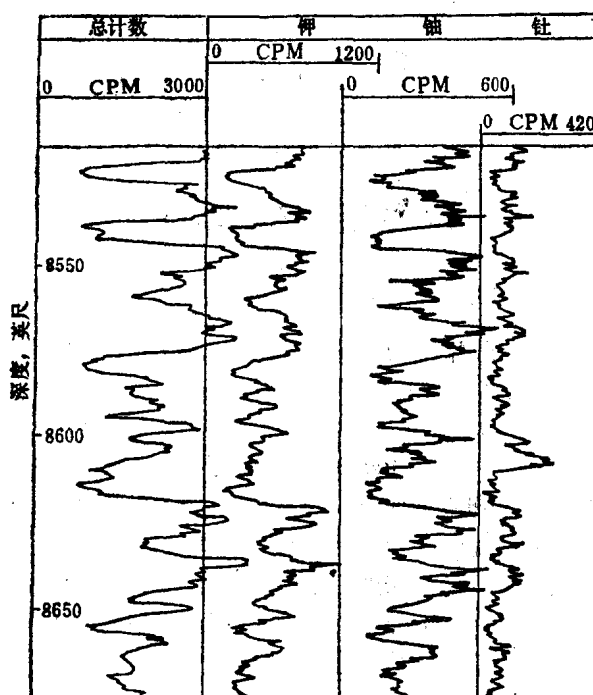


图 1 Santa Barbara 槽沟的自然伽马能谱测井

一般说来,斑脱岩是地层的时间标志,因此它是地层对比有用的辅助手段。它来源于火山灰,其分布范围大,代表着同时代地质上发生的事件。但是采用通常的测井技术往往不能将它们从高放射性泥岩中区分开来。由于它们含有异常高的钍含量,因此利用自然伽马能谱测井就可以将它们从其他高放射性泥岩地层中鉴别出来。早在 1962 年,Esso 生产研究公司的 A.L.Pierson 等人就估计到在一个给定的斑脱岩地层中,钍含量基本相同。为了证实这一估计,A.L.Pierson 等人在得克萨斯,俄克拉何马,堪萨斯的 23 个地区获得了 Pear L'ette 火山灰的样品,样品覆盖了大约 40 000 平方英里的区域。这些样品的实验分析所确定的钍含量,偏离其平均值不超过 5%。他们的结论是以钍含量为特征的斑脱岩露头可以广泛地应用于放射性鉴别地质年代。

能谱测井仪的发展使得有可能在地层对比有严重问题的 Santa Barbara 槽沟区域检验这种理论。Ventura 盆地是深海沉积,主要由硅质和钙质微化石组成,它经受了明显的成岩作用。成岩作用所引起的变化并不是一定与地层界面一致。由于这个原因和逐渐地但却又明确的横向剖面的变化,使得根据电测井的常规地层对比变得复杂化。幸而主要目的层是在火山活动

●本书中,对于非法定计量单位均使用中文单位名称;对于法定计量单位除去正文叙述中使用中文单位名称外,表格、插图及公式均使用符号单位——中文本编者。

减弱期间沉积的,因而在绝大多数井中都能遇到斑脱岩。曾经作过这样一种尝试:利用该地区中的4口井的能谱测井和感应测井资料进行地层对比。根据能谱测井资料所做的地层对比和已有的资料符合得非常好。测井资料的对比剖面示于图2。在确定对比关系的过程中,发现很高的放射性夹层及特别高的钍含量的夹层是非常有用的。在过去的地质时期,火山很活动的区域内,也有可能应用这种类型的能谱测井。

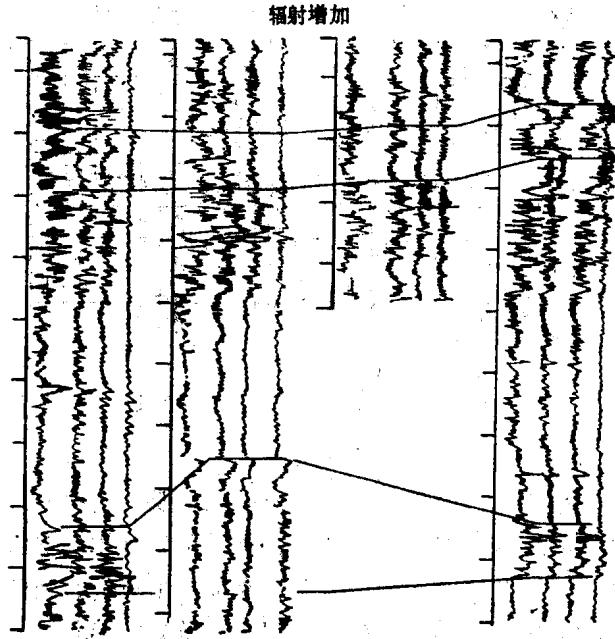


图2 Santa Barbara 槽沟自然伽马能谱测井资料的地层对比

钍/铀比和盆地特征

各方面作者都指出沉积地层的放射性特点均有其地质意义。Adams 和 Weaver 证实 Th/U 比指示沉积过程。Whitfield, Rogers 和 Adams 等人检验了某些火成岩中生油层和 Th、U 含量之间的关系。50 年代后期, A. L. Pierson 研究了各种岩石类型中的放射性沉积并继而从 Th/U 比和盆地结构的变化之间寻找关系。在测量了东得克萨斯盆地、西得克萨斯盆地、科罗拉多盆地以及 Canadian Williston 盆地的大量岩石样品中得到了 Th/U 比资料。根据在海水中钍比铀更容易沉淀的事实,这些测量结果是很有用的。Th/U 比应该是研究沉积盆地的一个很有用的关键指标。

近年来,苏联工作者已证实地貌的变化与 Th/U 比的变化之间有相关关系。特别是他们发现了 Th/U 比的变化反映了盆地的含盐量,沉积环境——是氧化环境还是还原环境以及海侵和海退的周期。

除了可用于盆地研究之外,钾曲线和铀曲线也可用于地层对比。图3上的测井剖面就清楚的说明了这一点。图中所给出的测井剖面取自得克萨斯西南方向一口井的自然伽马能谱测井(注意:与前面测井曲线图相比,该图上铀,钾道的位置互换了)。在 10760 英尺~10774 英尺井段钾道显示出异常高的计数率。这个地层很可能是由伊利石,海绿石或长石组

成。但在这个区域似乎不太可能有长石。应用能谱测井技术，能够在一个相当大的区域里找到这个地层。

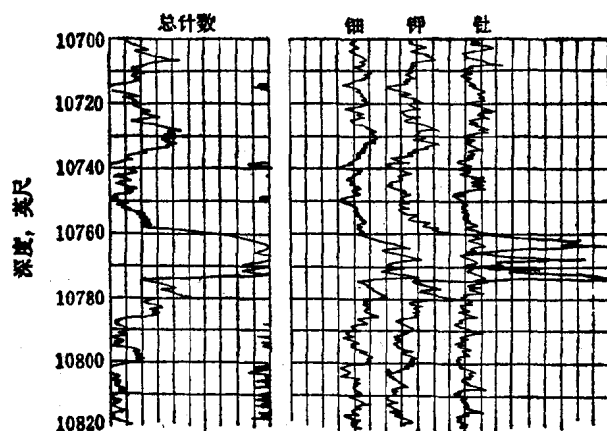


图3 得克萨斯西南一口井的高钾层段

矿产勘探

自然伽马能谱测井的某些相当明显的应用至今尚未提及。这些应用包括勘探在经济上有重要意义的钾矿和铀矿。Piler 和 Prerson 曾利用这种测井技术勘探钾盐。在新墨西哥东南部范围广大的蒸发岩地层中进行了几次能谱测井。在地层中无钍、无铀或它们含量很低的情况下，由测量 1.46 MeV 的伽马射线计数率就可以定量确定钾含量。对钾测井来说，由于蒸发岩剖面含有极小量的放射性粘土，几乎成为一种理想状况。图 4 作为这种测井的实例给出了在新墨西哥一口试验井中的 20 英尺井段上由取芯分析得到的岩性资料与钾测井之间的比较曲线。钾道的高计数率清楚地划分出岩芯分析得到的钾矿床的位置。将这个计数率与某种

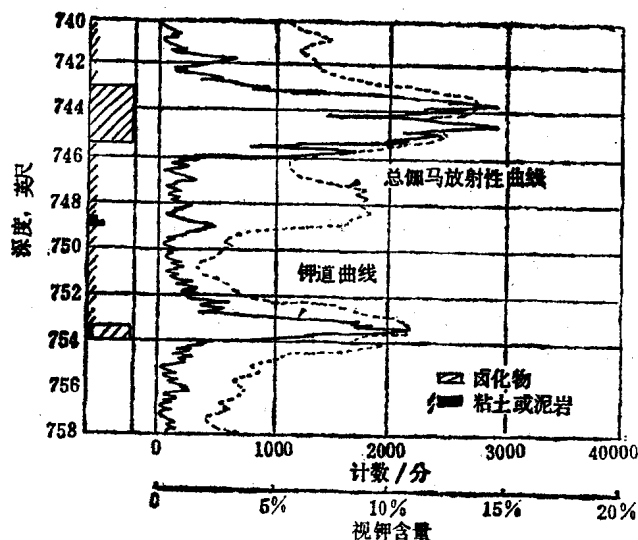


图4 新墨西哥的一口井中总伽马曲线，钾曲线和岩性曲线的比较

已知钾含量的刻度标准相比较就能把它转换为定量的含钾百分数。同时得到的总计数率曲线对于勘探含有粘土的地层是很有用的，没有这个附加信息，在这些地层中很可能对钾含量作出不适当的估计。

1968年，在南得克萨斯的铀矿床中进行了能谱测井，目的是在伽马射线辐射强度上的变化与矿物含量的高低之间建立关系。可惜这个铀矿辐射太强以致使探测系统由于计数率太高而饱和。在饱和状态下，探测器对矿物浓度的变化就不敏感了。矿业服务公司采用了适用于铀矿勘探的仪器，现已能够投入商业使用。如附录 I 中所引证：1.76 MeV 的伽马射线实际上是由铀的子体铋-214(Bi^{214}) 所产生。当根据能谱测井进行矿物估价时，必须注意要确保铀和它的子体之间处于放射性平衡状态。

在从常规伽马测井和从专用伽马能谱测井中获得的定量信息方面做了大量的研究工作。这些研究集中在解决薄层影响，钻井泥浆对伽马射线的衰减，和求解 K、U、Th 浓度的联立方程。现有的能谱测井仪允许现场应用这些资料来确定它们的效益。

现场的元素分析

伽马能谱测井能识别特殊能量范围内的伽马射线的能力使得它特别适于配合中子活化分析。这个过程包括一段时间的中子照射，并经过预先选择好的时间间隔之后，然后探测由中子照射所产生的伽马射线。所测得的伽马射线的能量直接与中子所打中的元素有关。例如，中子和硅核碰撞可以形成铝同位素 Al^{28} （这个同位素不稳定，它以 2.3 分钟的特征半衰期衰变）。伴随着衰变过程将发射 1.78 MeV 的伽马射线。因此，在中子照射以后，探测到 1.78 MeV 伽马射线就说明存在着 Si^{28} 。1.78 MeV 的伽马射线也可能由激发的 Al^{27} 产生。但是高能中子的照射通常产生占优势的硅响应。同样，在照射期间还可以形成其他许多放射性同位素。它们以各自独特的特征半衰期衰变，放射出各自独特的伽马射线。图 5 表示在得克萨斯北部的一口取芯井中获得的活化谱实例。该谱的测量条件是：14 MeV 中子加速器源照射 10 分钟，间隔 13 分钟，测量 5 分钟。曲线显示了很明显的硅和铝的响应，合理选择照射时间、间隔时间和测量时间，能够使得在实际可用的时间范围内对任何一个感兴趣的放

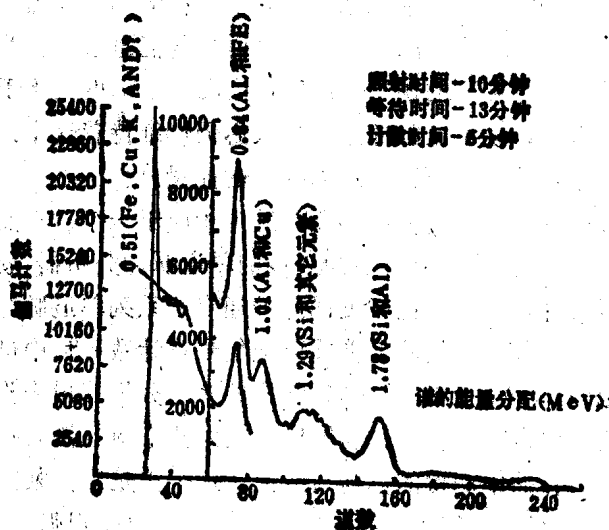


图 5 静态活化谱

放射性同位素的测量达到最优化。实际上,这种技术可以加以推广,用于鉴别氧、硅、铝、锰和铁等元素。

活化资料可以由俘获伽马射线的测量来补充。在中子照射期间产生的伽马射线称为俘获伽马射线,它们的能谱主要反映氧、硅、氢含量的变化。图6是由装有中子发生器的伽马能谱测井仪在淡水环境中测得的俘获伽马射线谱,所以只有硅和氢的响应是明显的。

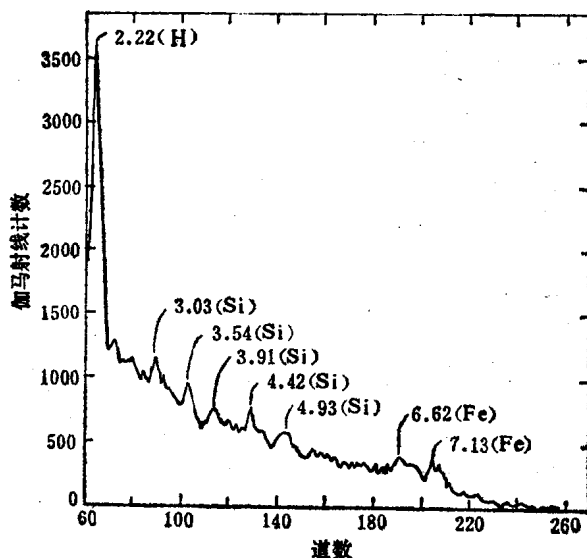


图6 俘获伽马射线谱(能量以 MeV 标定)

伽马能谱测井仪的测井过程

为了更好的理解伽马能谱测井仪的工作过程,将它与常规伽马测井仪作一比较。两种测井仪的井下仪器部分基本相同,常规伽马测井仪包含探测伽马射线的闪烁晶体,并将伽马射线脉冲转换为电压脉冲,电脉冲被放大,并加到电缆上。在地面,这些脉冲在计数率计中进行求和,然后将连续得到的脉冲总数记录到胶卷上。能谱测井仪器的探测过程和常规伽马测井仪一样,只是要注意保存所测得的每一个伽马射线的能量信息。为了做到这一点,要使用高分辨率的闪烁晶体,使探测到的伽马射线所产生的电压幅度正比于入射伽马射线的能量。使用高质量的井下放大器,使电压脉冲通过放大后仍然维持着这个比例关系。从而到达地面的脉冲高度仍然正比于产生这个脉冲的伽马射线的能量。

通过以下将要叙述的刻度过程,能够预先确定相应于一个已知能量伽马射线产生的脉冲高度。如果让这些脉冲通过一个能调节脉冲高度的单道脉冲分析器,就能单独选择那些对应于给定能量的伽马射线脉冲。一串不同幅度的脉冲通过一系列单道脉冲分析器,就能将该串脉冲划分为一系列的能量间隔,然后将各能窗中的信号在计数率计中进行积分,便取得给定能窗中总计数的连续记录。一个能显示伽马射线谱的多道分析器用来作为一种监示设备,以确保增益在整个测井过程中维持不变。利用地面放大器来调整任何必需的增益变化。

图7表示典型岩石样品中测得的伽马射线谱。这个谱是用德莱赛-阿特拉斯公司的伽马能谱测井仪通过2000英尺电缆取得的。试验表明,钾峰总是很强,所以能够为在测井期间监示增益变化提供一个可靠的参考峰。

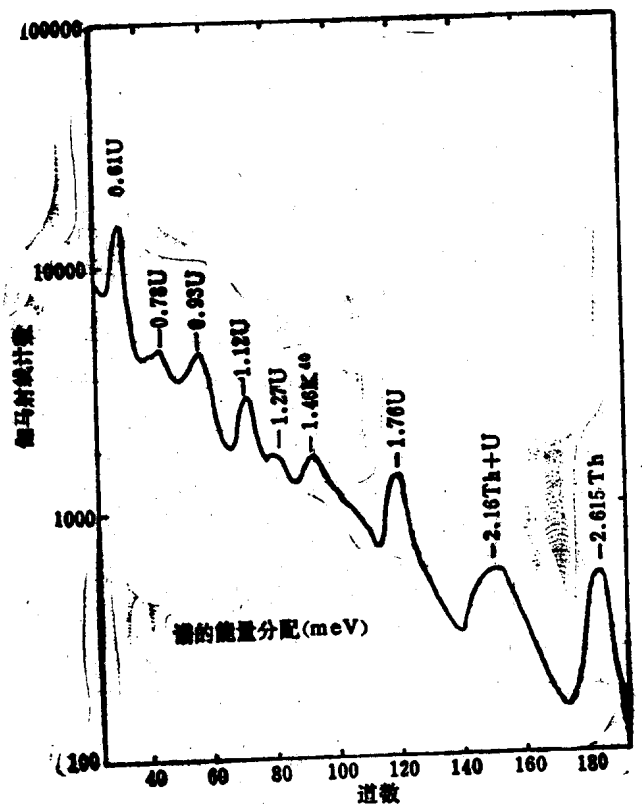


图7 典型岩样的自然伽马能谱

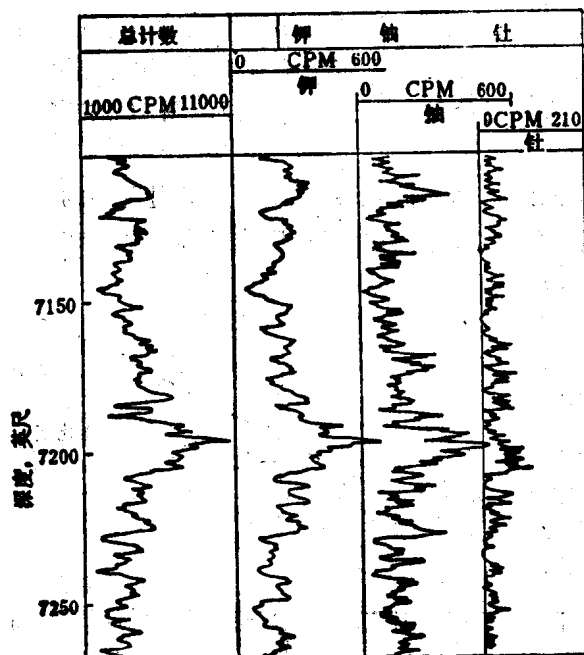


图8 自然伽马能谱测井格式

当这种仪器用作自然伽马能谱测井仪时，使用三个单道分析器记录 K、U、Th 的计数率。另外，还记录总计数率。4 条曲线全部记录在 2 英寸或 4 英寸标准测井胶卷上。总计数率曲线在左边第一道，右边是其它三条曲线。图 8 表示典型测井图格式。每条曲线的比例为计数/分。图 9 表示整个测井装置的框图。

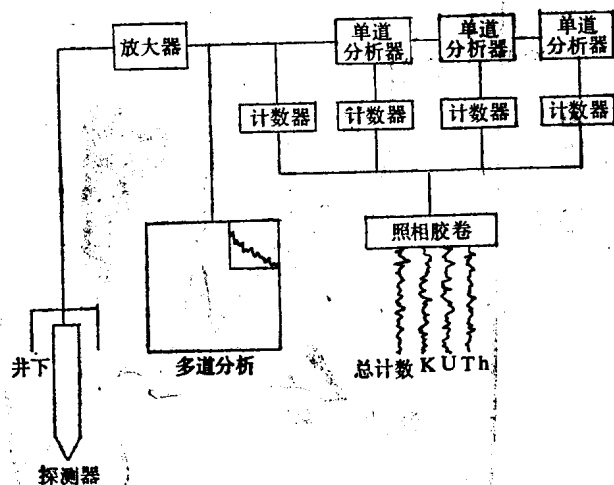


图 9 自然伽马能谱测井仪框图

刻度和质量控制

能谱测井质量控制主要是将一系列单道分析器置于合适的能窗位置并在整个测井过程中保持这个标定。刻度过程的第一步是在测井之前取得与电缆相连接的测井仪器的能量刻度。图 10 表示图 7 中给出的典型岩石谱中的道数和伽马射线能量之间的关系。由于道数和能量之间的关系是线性的，可以利用这个标定来选取 1.46 MeV 的钾、1.76 MeV 的铀和 2.62 MeV 的钍能量。我们一直使用能峰的 $\pm 10\%$ 作为道宽。图 10 的刻度图上注明了 $\pm 10\%$ 的道宽范围。

上述刻度是在测井前由测井工程师在井场完成。测井过程中的质量控制包括确保这些窗口能稳定在它们各自适当的位置上，并且为了以后作为参考记录在测井图上。

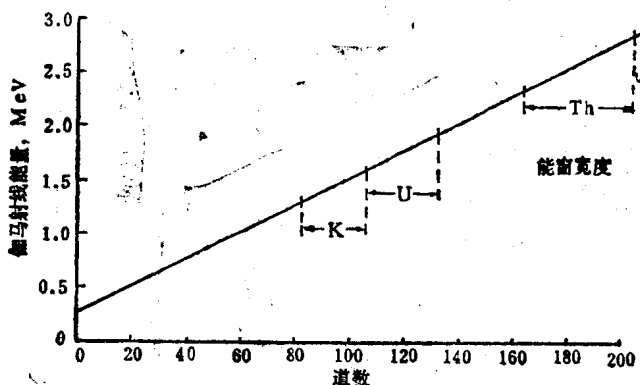


图 10 谱测井的能量刻度范围

测井后最有效的质量控制方法是检查测井图。在整个测井深度上，三条曲线不应和另一条总计数曲线混淆。这种现象可能是单道分析器的窗口相互重叠，结果将不能取得各自独立的K、U、Th测井曲线。

由于只有钍峰不受铀和钾伽马射线的影响。铀峰受到来自钍伽马射线漫化散射的影响，而钾峰既受到来自钍伽马射线漫化散射影响又受到来自铀伽马射线漫化散射影响。漫化散射是指某些伽马射线失去其部分能量从而落到较低能窗中。

散射进入低能的这部分能量的伽马射线影响并不重要。它们不能掩盖某个元素的含量明显变化所产生的结果，而所有三种放射性元素以同样方式变化的可能性是极小的。所以测井图的直观检查是一种可以接受的质量控制技术。

为获得质量好的伽马能谱测井资料，提出一个例行的检查表，该表格形式在附录Ⅱ中给出。附录中还包含一些其它常规过程，这些过程使得在获取井下刻度及测井图头表格中的数据上所需要的使用时间达到最小。测井图头上的信息主要是要保证合适的晶体分辨率，在地面上正确确定能量窗口并且维持它在井下不变。这些信息可以帮助测井分析家查找能谱测井中任何操作上出现的问题。

结 论

1) 自然伽马能谱测井可帮助解决具有火山活动历史的那些地区的地层对比问题。Santa Barbara井里火山灰中的钍丰度在提供地层对比的时间标志方面特别有用。

2) 已经证实利用能谱测井仪和中子活化分析技术在井场对硅、铝、氧、锰等元素进行元素鉴别是可行的。这种元素鉴别技术可专门应用于矿产测井和岩性鉴别测井。

附录I 自然伽马射线源

本文中对于钾、铀、钍的放射性特征能峰有必要更全面的解释一下：这里的钍和铀涉及的是两个放射性系列，即钍族和铀族。以上称为钍峰的2.62 MeV的伽马射线实际上是由钍的子体 Tl^{203} 发射的。同样1.76 MeV的铀峰是由铀的子体 Bi^{214} 发射的。主要放射性系列是平衡状态，钍、铀的这些特征峰都是可以从文献上查到的标准特征峰。峰内伽马射线的强度分别正比于钍和铀的丰度。放射性平衡问题对石油勘探来说并不怎么重要，但对用这种方法来勘探铀矿就变得很重要了。

钾特征峰处的伽马射线来自 K^{40} 的天然放射性。钾有三种同位素： K^{39} 、 K^{40} 和 K^{41} 。其丰度分别为93.08%，0.0119%和6.9%。尽管 K^{40} 同位素只有很小的丰度，然而它所发射的伽马射线却比钍和铀放射的射线要多得多。

附录II 自然伽马能谱检验表

1. 测井图头

- 1) 记录每条曲线的时间常数。
- 2) 记录每道灵敏度。

3) 记录测井速度。

4) 记录窗口宽度。

格式:

	K	下界	上界
K、U、Th 道数	U	下界	上界
	Th	下界	上界
上峰道数		测井前在地面上	
		在测量井段底部	

2. 测井图部分

1) 记录零线。

2) 以较低灵敏度重复测量那些光点出界部分的剖面。

3) 保证总伽马射线计数率曲线和这口井的其他伽马测井曲线基本吻合。

4) 在接近测量井段底部温度最高的井段处进行井下刻度检验, 以使得收集有用谱所花费的时间最少。在井眼中做这种刻度检验时应十分细心, 因为当井下仪器移动时, 探测器传上来的噪声有时严重地损害谱的质量。

5) 至少应有 250 英尺的重复测量井段。

6) 在套管井中应保证测速不超过 12 英尺/分。

3. 测井前的仪器刻度

1) 将钍刻度源放在探测器的刻度距离上。

2) 调整系统增益使 2.62 MeV 的钍峰在____道。

3) 用第____道和第____道窗宽记录计数率。

4) 仪器正常时记录到的计数率应是 $\pm$ ____。

二、自然伽马能谱测井

J. H. Young

摘要 自然伽马测井是一种用来评价铀矿床和提供岩性资料的测井方法。

自然伽马能谱测井是一种按照钾、铀、钍能量对伽马射线进行分类的测井方法，是常规伽马测井的改进。谱的信息提高了自然伽马测井的有效性，增加了地层所产生的伽马射线成分的信息。K、U、Th 测井特别适用于低品位铀矿床[●]的评价和怀疑有钍异常的地层。对钾和钍的鉴别还有助于对许多岩层的分类。

在 K、U、Th 测井中，特别重要的是对伽马能谱测井探测器能窗灵敏度的刻度。一种连续控制 KUT 探测器灵敏度的方法是利用一台计算机和一个 Mn^{54} 参考源。

对钾、等价铀和钍元素浓度的评价是使用一个来自探测器原始计数率数据组合的 9 个系数的剥谱矩阵。原始计数率和浓度都对深度进行作图。本文叙述 K、U、Th 的评价方法和应用剥谱矩阵的刻度方法。同时讨论了数据的精度和测井速度对精度的影响。

引言

伽马测井用于作为指示岩性和铀矿品位测量的矿物测井已有一段时间了。但是常规伽马测井的总计数率不能鉴别主要放射性矿物——铀以及作为重要天然放射性来源的钍和钾之间放射性源的差别。伽马射线能谱测井是一种鉴别伽马射线源的精确方法。这种鉴别是建立在测量伽马射线能量的基础上，因为不同的放射性元素发射出不同特征能量的伽马射线。K、U、Th 三种元素和它们的子体构成天然放射性元素的 98%。

从钾、铀、钍测井取得的资料使得对矿床品位（特别是存在钍异常情况）的估计更精确。对钾和钍的分析还可以鉴别岩性特征和进行井与井之间的地层对比。

理论和定义

由大多数放射性元素发射的伽马射线具有一定的穿透范围和强度，能被井下仪器探测器所检测。给定的放射性同位素以一定速率和离散能级发射伽马射线。发射的速率往往受到统计偏差的影响。即在一个长时间周期上平均速率可以认为是个常数，而在短时间周期上的计数率却是变化的。但是发射伽马射线的能级基本上是清晰的。

常规伽马测井的计数率没有涉及伽马射线的能级，测量的参数是以计数/秒表示的伽马射线强度。这种以计数/秒的放射性测量不仅是井内条件的函数，也是伽马射线探测器本身的函数。探测器之间测量偏差的主要来源是闪烁晶体的尺寸，而仪器外壳和电子线路也影响探测器的灵敏度。两个不同类型的探测器在同一个井眼中测量的计数率一般是不同的，而同

●在石油测井中，经常遇到的是一些含有铀元素沉积的储集层——中文本编者。

一型号的仪器基本上可以有相同的灵敏度。

对于铀测井，仪器灵敏度通过一个“k系数”的常数进行标准化。按照如下公式，“k系数”与等价铀品位的计数率有关：

$$\{GdD = 2k\{NdD \quad (1)$$

式中积分是对所有铀矿层的评价。对式(1)的计算是假定用于铀层评价的探测器总伽马射线的响应全部都来自铀。具体地说，地层中存在钍元素(Th^{232})时，铀品位的计算将产生偏差。1%的钍就相当于常规伽马射线测井0.4%的铀含量。而伽马射线能谱测井在有其他放射性元素存在时对铀的估计精确得多。因为它的基础是测量作为伽马射线能量函数的不同计数率。

天然产生的放射性同位素可分为两类：系列的和非系列的。系列同位素具有高原子序数(Z从81~92)，它是聚集的同位素族，并从一种到另一种按顺序衰变，一直达到稳定的铅同位素为止。非系列同位素分散产生，经一次蜕变后就衰变成稳定的同位素。

两种天然放射性系列是以铀同位素开始的铀系和钍系。第三种天然放射性系列是钍系，从钍-232开始衰变到铅-208。从地质上来讲，钍能从铀中分离产生或与铀共生。地壳中钍的平均丰度是12 ppm，铀是4 ppm。

天然产生的非系列放射性同位素列于表1。人们仅仅考虑对伽马射线测井有意义的元素：钾-40，其平均同位素丰度是3 ppm。

表1 天然产生的非系列放射性同位素

同位素	半衰期 (a)	同位素含量 (%)	元素丰度 (ppm)	同位素丰度 (ppm)	衰变类型	能 量 (keV)
钾-40	1.3×10^9	0.0118	25900	3.6	β , 俘获	1460
铷-87	4.7×10^{10}	27.85	310	86.0	β	无伽马射线
钐-147	1.06×10^{11}	14.97	6.5	0.97	α	
镭-176	2.1×10^{10}	2.59	0.8	0.02	β	88.3, 202, 309
铯-137	7×10^{10}	62.93	0.001	0.0006	β	
		(元素的%)	(地球表面的 ppm)			

从地质上考虑，自然伽马能谱测井的应用实际上不是测量伽马射线能量而是将伽马射线源(如K、U、Th)进行分类。 K^{40} 发射1460 keV能量的特征伽马射线，不发射其他伽马射线，也不产生放射性衰变。可以用1320~1575 keV能量窗口的计数率直接探测。但是铀发射许多不同能量的伽马射线，以 U^{235} 和 U^{238} 为主，铀矿中包含80多种其他的放射性同位素，它们的一部分衰变系列称为同位素子体。铀和它的大多数同位素子体不止发射一种伽马射线，而且有几种不同的能级。实际上，常规伽马射线测井仪器测量的大多数放射性不是来自铀本身而是 U^{238} 同位素的子体—— Bi^{214} 。 Bi^{214} 发射50个以上能级的伽马射线。它的能量范围从63 keV到3070 keV。铀是利用KUT探测器进行间接探测，伽马射线计数的能窗为1650 keV到2390 keV。这个范围包含了 Bi^{214} 发射的1764 keV、1728 keV和2204 keV能量的伽马射线。其中1764 keV射线最强(是2204 keV强度的3倍)。钍也是以2475 keV到2765 keV能窗对于 Tl^{203} (Th^{232} 的同位素子体)发射的2615 keV伽马射线计数而间接探测。

由于铀、钍发射出其他能量的伽马射线和康普顿散射效应的影响，使得按K、U、Th能

窗计数率计算它们的浓度变得复杂。康普顿散射是一种 γ 射线随着被原子折射而能量衰减的过程。由于这种影响, Tl^{201} 发射的能量为 2615 keV 的伽马射线可降低到 1500 keV, 从而落在钾窗范围内。但是散射的和待测的伽马射线之间是有一定比例关系的。

测量效率取决于仪器的性能。有意义的三个元素与三个测量能窗之间的相互影响, 元素浓度的标准化可以用 9 个系数表示 (与常规伽马射线测井的 K 系数类似)。该系数排列在如下的 3×3 矩阵方程中:

$$[C] = [R][S] \quad (2)$$

式中 $[S]$ 是剥谱矩阵。它在已知浓度的模型井中通过对仪器刻度确定。

仪器的 K、U、Th 道之间的稳定关系受闪烁晶体和光电倍增管转换效率的影响。从伽马射线能量到光能的转换中, 闪烁晶体的效率取决于温度。在光能变成电脉冲过程中, 光电倍增管的转换效率取决于温度和管子老化的程度。用调整仪器灵敏度的方法来补偿由温度和时间变化而引起的变化, 以确保 KUT 测量的精度。这个调整应当在测井期间内完成。因为温度是随着井深、仪器本身加热程度以及其他因素而变化。

仪器灵敏度标准化的方法之一, 是从已知能量的伽马射线中给系统引入一个信号。这个信号作为和其他信号有关的参考点。

来自 Mn^{54} 的 835 keV 的伽马射线是在 K、U、Th 能窗以下, 不会通过康普顿散射把计数加到有意义的能窗中去。在井内测井期间可对此信号进行监视, 使系统的增益按照需要进行调整, 以保持仪器合适的灵敏度。

仪 器

自然伽马能谱测井的井下仪器类似于常规伽马射线仪器, 都是使用闪烁探测器并从中检出电子信号。只是前者的计数脉冲是对应一个特定的伽马射线能量范围。

仪器框图示于图 1。井下仪器包括闪烁系统、能量鉴别器、计数器和数字数据发送器。地面系统由数字计算机控制。从井下仪器中接收的数据, 经计算机处理后, 由电缆向井下仪器输送一个调整稳定系统增益的信号, 地层原始资料记录在磁带上, 便于以后处理。

闪烁晶体是一种直径为 1.5 英寸[●], 长 12 英寸由铯激发的碘化钠晶体。晶体的特殊结构保证了伽马射线入射到晶体的不同部分都有均匀的光输出。一个小的 Mn^{54} 源贴在闪烁晶体的侧面, 提供一个已知伽马射线能量 (835 keV) 的参考信号。首先调整光电倍增管增益, 使 Mn^{54} 的指示信号落在预定能窗内, 然后利用稳定信号控制光电倍增管 (PMT) 的高压使得由于温度变化和材料老化所引起的灵敏度的变化得到补偿。在稳定条件下, 线性放大器的模拟脉冲正比于由闪烁产生的伽马射线的能量。模拟脉冲送到一组脉冲高度鉴别器。它是一个划分 K、U、Th 或 Mn^{54} 能窗的装置, 也是一个除低能伽马射线以外总的伽马射线鉴别器。脉冲高度鉴别器中的数据脉冲送到累计每个窗内放射性速率的计数器, 然后将数据发送到地面。

在地面, 将井下发送来的原始数据输入计算机, 并编码贮存在磁带上。可以从原始数据中有选择的进行地层的实时显示。计算机能同时把稳定井下仪器增益的脉冲数据进行实时处

●英寸为非法定计量单位 (1 英寸 = 2.54 厘米) —— 中文本编者。