

# 核谱技术在地球物理测井中的应用

方映东 潘洪进

(江汉测井研究所 湖北潜江 433123)

**摘 要** 本文将简要介绍自然  $\gamma$  能谱, 活化  $\gamma$  能谱和瞬发  $\gamma$  能谱在地球物理核测井中的应用及发展前景.

**关键词** 活化  $\gamma$  谱, 瞬发  $\gamma$  谱, 岩性密度, 光电吸收截面.

## 1 引 言

当前,核物理应用科学发展的一个重要方面,就是核物理在其它领域中的应用.这些先进的技术,成熟的物理方法和计算机技术软硬件的配合,使核谱技术如虎添翼地在各学科领域中发挥着创造性.甚至是革命性的巨大作用,核测井就是明显一例.核测井最早出现于 30 年代,40 年代开始研究中子- $\gamma$  测井,50 年代至 60 年代研究自然  $\gamma$  测井和  $\gamma$ - $\gamma$  测井.目前,中子- $\gamma$  和  $\gamma$ - $\gamma$  测井技术已日趋成熟,走在这项技术发展前沿的是美苏等国.能源发展的紧迫性,尤以石油和煤炭的勘探和开发,极大地激励着核测井技术迅速发展.在新概念和新技术的启发下,一批高科技和高性能的核测井仪器不断问世.如各种成像和传感技术的出现,标志着核测井技术领域的新突破.据不完全统计,目前有 20 多种核测井仪器服务于现场,而能谱测井技术则是核测井发展的主导方面.核能谱测井不仅可以识别地质上的复杂岩性,还可鉴别矿物,研究岩石骨架结构与性质,此外,还可确定沉积环境,地质史和分析剩余油分布状况.

核测井与电学方法和声学方法测井相比较,最突出的优越性,也是上述两种方法不能相比拟的——就是核测井既可用于裸眼井,也可用于套管井.在油田中、后期生产开发中,热中子衰减时间测井(TDT)和 C/O 比测井的投入应用,标志着在分析剩余油分布,确定残余油饱和度方面更显示出核能谱测井的独特作用.利用这些核测井技术可以监视石油产层中

油与水的运动状态,水淹程度,以及为提高采收率提供可靠的数据.本文就各种核能谱测井技术在地球物理测井中的典型应用做以简要介绍.

## 2 能谱密度测井

60 年代问世的  $\gamma$ - $\gamma$  测井,就是今天人们熟悉的补偿密度测井.随着石油勘探发展要求,70 年代末,80 年代初,美国斯仑贝谢测井公司又推出新型核能谱测井仪,即岩性密度测井仪,有人称之为能谱密度测井.它除了提供原有的体积密度  $\rho_v$  参数外,还能测量地层岩石光电吸收截面  $P_e$ (巴/电子), $P_e$  值称为质量光电吸收截面. $P_e$  值直接反映不同岩性地层特征,如表 1 所示.

表 1  $P_e$ 、 $\rho_v$  和  $U$  值

矿物名	$P_e$	$\rho_v$	$U=(P_e \times \rho_v)$
石英	1.81	2.65	4.80
方解石	5.05	2.71	13.68
白云石	3.14	2.87	8.99
硬石膏	5.08	2.96	15.02
盐岩	4.65	2.17	9.64
淡水	0.35	1.00	0.39
油气	$\leq 0.12$	$< 1$	$< 0.12$
盐水 200.000ppm	1.2	1.15	1.48

由表 1 可知,几种矿物的  $P_e$  和  $U$  值对岩性的变化很敏感.能谱密度测井的出现,从而提高了测井信息对岩心的分辨率.显然,这种测量方法的邹型已体现在 50 年代所提出的选

择 $\gamma$ - $\gamma$ 法之中. 总之, 经历了漫长的道路, 才投入生产服务, 并以崭新的面目显示出新的使用价值和生命力.

目前, 已将曾广泛应用的双源距补偿密度测井发展为岩性密度测井. 它在下井仪器滑板上装有 1.5 居里的 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 源和两个探测器, 其中长源距测量康普顿散射  $\gamma$  射线强度, 即  $\rho_b$  体积密度, 短源距测光电效应散射  $\gamma$  射线能谱, 即质量光电吸收截面因子  $P_e$ . “ $\gamma$ - $\gamma$ ”散射的基本原理是基于地层不同介质对  $\gamma$  射线的散射和吸收特性. 通过测量  $\gamma$  射线的散射强度, 便可确定地层两个重要特性参数, 即等效原子序数  $Z_{eq}$  和地层电子密度  $\rho_e$ . 前者与地层矿物化学成份有关, 而后者则与地层体积密度相关. 数学表示式如下:

$$P_e = (Z/10)^{3.6} \text{ bar/e} \quad (1)$$

$$\rho_e = (\rho_b + 0.1883)/1.6704 \quad (2)$$

其中  $P_e$  为光电吸收截面指数,  $\rho_e$  为电子密度,  $\rho_b$  则为测井所反映的地层体积密度. 实际表明, 由补偿密度发展成为岩性密度, 是因光电吸收截面对识别复杂岩性十分灵敏所致. 但是, 由于仪器探测深度浅, 以及对多原子序数元素的灵敏性, 故  $P_e$  测量值又受到井眼不平整性, 泥浆冲刷, 泥并和重晶石泥浆的影响. 在 80 年代中期, W. E. Schultz 和 A. Nunley 等人又提出一种新的能谱密度测井仪, 称之为双探测器岩性测井, 而这种新的能谱密度测井称为 SDL 系统. 其特点是长短源距探测器皆可单独测量  $P_e$  值, 根据实验和现场资料分析, 短源距测量的  $P_e$  对泥并不灵敏. 究其原因可发现, 被泥并或冲洗带掩盖了地层段的  $P_e$ , 又因长短源距探测灵敏度之差异, 所以, 它可以提供识别井眼状况和减少  $P_e$  值误差的机理. 由于 SDL 系统具有高计数率性能和统计误差小等优点, 故测量的密度曲线和  $P_e$  曲线重复性有较大提高.

SDL 测井仪中的两个探测器都具有能谱测量能力, 分别以  $P_{eL}$  和  $P_{eS}$  表示. 通常称谱高能区计数率与低能区计数率比值 ( $R_L$  和  $R_S$ ) 为光电效应比值, 它能有效地测量地层光电特

性, 并利用  $P_e$  值在地层中得到的关系, 可以将  $R_L$  和  $R_S$  转换成  $P_{eL}$  和  $P_{eS}$ . 由于密度测量与  $P_e$  测量原理不同, 不能像补偿密度那样, 用短源距  $P_e$  去补偿长源距  $P_e$  值. 因此, 在现行的测井曲线上可同时显示  $P_{eL}$  和  $P_{eS}$  值, 也就是把  $P_{eL}$  和  $P_{eS}$  值重叠在无重晶石的泥浆中, 两个  $P_e$  值是一致的, 即长短源距探测器测量的是地层真实的  $P_e$  值. 当两个  $P_e$  值出现差异时, 说明井眼中存在泥并或冲洗带, 而此时的  $P_{eS}$  接近地层真值. 在有重晶石的井中, 两个  $P_e$  的差异可指示泥并, 冲洗带和仪器轻微偏离井壁等情况.

双源距  $\gamma$ - $\gamma$  仪器原理是根据散射  $\gamma$  谱形确定地层密度和  $Z_{eq}$ , 近来, J. Charbucnski 又提出确定影响  $\gamma$  散射形状的其他参数. 例如井径, 重元素含量, 粒度大小和影响煤中的灰含量.

### 3 次生 $\gamma$ 能谱测井

次生  $\gamma$  能谱测井, 又称 14MeV 脉冲中子能谱测井, 它是 60 年代初发展起来的一种新型能谱测井技术. 由于核技术的发展, 70 年代后期次生  $\gamma$  能谱测井才获得迅速发展. 到了 80 年代它已成为核测井最新手段. 该方法主要物理基础是通过 14MeV 脉冲中子与地层核素发生弹性, 非弹性散射, 慢化后又与地层核素发生  $(n, \gamma)$  反应. 另外, 中子与地层核素产生三种反应, 每种核反应的不同核素发射不同能量的特征  $\gamma$  射线. 如, 非弹性散射  $\gamma$  射线, 缓发活化  $\gamma$  射线和瞬发俘获  $\gamma$  射线. 次生  $\gamma$  能谱测井根据射线能量和强度进行有效的探测, 就可确定地层主要元素及其含量. 从而获得解释地层岩性、孔隙度、含量、水饱和度等重要参数.

目前, 国际上生产这种仪器主要是美国两个厂家: 斯仑贝谢生产 GST 次生  $\gamma$  能谱测井仪; 德莱赛生产 C/O 比能谱测井仪, 1985 年后又推出 MSI C/O 比能谱测井仪. 八十年代起, 上述两厂家的能谱测井仪在全世界范围内投入测井服务. 我国已引进大批 3700 及 CSU 测井先进新技术. 国内目前已能组装生产 3700 测井系统, 大庆测井公司研制的 C/O 比能谱测井仪于 1991 年通过鉴定.

MSI 的新 C/O 能谱仪与原来 C/O 比测井仪相比有下列特点：1. 计数率高；2. 256 道分析器及微机控制置于下井仪器内；3. 由微机控制数据采集和分析，同时进行数据处理。在测量非弹性散射  $\gamma$  谱时，首先设置 C、O、Si 和 Ca 能窗，分别获取 C/O 和 Si/Ca 比值。而测量瞬发俘获  $\gamma$  谱时，同时设置 Si、Ca、Fe、H 和 Cl 能窗，分别得到 Si/Ca、Fe/Si+Ca、H/Si+Ca 和 Cl/H 比值。通过这些比值的测量，可得到有关反映层岩性、孔隙度和矿化度等有关参数。

与此同时，GST 测井仪也进行一系列改进，主要是提高计数率，井下采用了 512 道分析器及脉冲堆积排除器。被探测到的  $\gamma$  射线经多道分析后送到地面 CSU 计算机处理系统进行数据处理。GST 仪器在测量非弹性和俘获  $\gamma$  射线谱时，不是采用设置能窗方法，而是采用最小二乘方拟合能谱方法获取地层有关元素含量。这种方法与设置能窗方法相比较，它能得到更多的  $\gamma$  射线谱信息。在非弹性  $\gamma$  谱中，可得到 C、O、Ca、Fe、S 和 Si 含量。在俘获  $\gamma$  谱中，可得到 Ca、Cl、Fe、H、S 和 Si 等元素含量。表 2 给出了由上述元素含量所确定的反映地层性质的一些信息。

表 2 由元素含量确定的地层特性

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

ARCO 为高分辨率能谱仪，采用高纯锗探测器，能量分辨率为 5keV，在环境 100°C 条件下可连续工作 12 个小时以上。井下采用两个缓冲存储器，它在地面计算机系统的控制下，井下仪器向地面发送 4000 道的  $\gamma$  能谱，经处理后可确定 30 多种元素。如此之多的信息量，可预见其应用前景是十分可观的。

#### 4 自然 $\gamma$ 能谱测井

50 余年来，常用自然  $\gamma$  测井划分地层，它

是评价储集层不可少的方法之一。但无一个测井公司的仪器能把 U、Th、K 放射性元素的贡献从泥质中分离出来。直到 80 年代，美国斯仑贝谢及德莱赛公司推出自然  $\gamma$  能谱测井仪才使这一愿望成为现实。自然  $\gamma$  能谱测井，除记录自然  $\gamma$  射线强度曲线外，同时还可记录 U、Th、K 三种元素含量曲线。它的出现提高了人们对泥岩地层深层次的认识，并为确定泥质含量和划分粘土类型提供了最可靠的地质依据。80 年代中期，江汉测井研究所研制成功自然  $\gamma$  能谱和岩性密度测井仪。

测量 U、Th、K 天然放射性元素的核物理原理就是测量它们的特征  $\gamma$  射线峰，如表 3 所示

表 3 U、Th 和 K 的特征  $\gamma$  射线峰

元 素	$\gamma$ 射线能量(MeV)
K	1.46
U	0.52, 0.609, 1.76, 2.02
Th	0.583, 0.928, 2.62

德莱赛公司自然  $\gamma$  能谱仪采用 (50×300) mmCsI 晶体，以脉冲幅度形式传送到地面 512 道谱仪。井下仪器设置三个能窗，并有稳谱，斯仑贝谢公司采用 (43×300) mmNaI(Tl) 晶体。井下设五个能窗，编码传输，用  $^{241}\text{Am}$  源稳谱。根据能窗记录的  $\gamma$  射线计数率，利用最下二乘及加权方法计算 U、Th 和 K 元素在地层中的含量。仪器响应方程由矩阵表示

$$C = AM \quad (3)$$

则其解为

$$M = (A^TWA^{-1})A^TWC \quad (4)$$

式中  $C_i$  为第  $i$  能窗计数率

$M_j$  为第  $j$  种元素的含量 ( $j=U, Th, K$ )

$W_{ij}$  为加权因子

$A_{ij}$  为单位元素  $j$  在  $i$  能窗的计数率

(称为在标准条件下仪器灵敏度)

$A_{ij}$  为灵敏度矩阵，也称系数矩阵。在已知 U、Th、K 含量模型内确定。随计算机技术的发展，目前已有专门计算机软件，依据给定条件计算矩阵系数。

由于来自地层的  $\gamma$  射线在未到达探测器

之前,被地层核素及仪器外壳散射或者吸收.若是套管井, $\gamma$ 射线会被水泥环或套管散射或吸收.由于康普顿散射作用,低能区计数率降低,谱形畸变.因此,近几年又研制成功补偿自然 $\gamma$ 能谱测井仪(CSNG).这种仪器采用低原子序数金属做仪器外壳(指探测器部分),可使更多的低能 $\gamma$ 射线进入探测器,并采用加权最小二乘方选择 13 个能窗计数率计算元素含量.当进行全谱分析时,除提供地层中 U、Th 和 K 含量外,还可对井眼泥浆物质的吸收和散射影响进行有效补偿.例如在裸眼井中,可以识别岩性,在套管井中,0~35keV 能窗计数率用 275keV 峰归一化后,即可反映套管是较轻或者较重,哪里套管是否失落,套管的始末端在哪里.另外,还可反映出套管是否被腐蚀或者磨损.

在铀矿地质中,由于铀及其衰变产物平衡破坏,传统的 $\gamma$ 测井难以确定地层铀含量.但是, $^{238}\text{U}$ 的第二代产物 $^{234}\text{Pu}$ ,在地质年代上总是与铀维持平衡.根据这一原理,美国地质调查局 Senftle 和 Tannaer 研制成功高分辨率铀矿 $\gamma$ 射线能谱仪,普林斯顿技术研究所可提供技术服务.

### 5 地球化学测井

地球化学测井仍是地球物理测井的另一种方法.它是近两年来才投入现场服务的一种崭新的核测井仪器,仪器结构及测量原理不是最新研究成果,但其解释方法原理确是一种新技术.地球化学测井仪是集自然 $\gamma$ 能谱测井仪 NGT,次生 $\gamma$ 能谱测井仪 GST,铝活化 $\gamma$ 能谱测井仪 AACT,及其辅助测井 AMS、TCC 及 CNT 于一身的核能谱测井仪,简称 GLT.它通过测量地层中 U、Th、K、Al、Si、Ca、Fe、S、Ti 和 Gd 十种元素含量,然后再经过闭合模型将地层化学元素含量转换成地层矿物丰度.该结果给地质学家及测井工程师,在识别地质上的复杂岩性,鉴别矿物类型,评价沉积环境和地质史提供了丰富的信息.因此,测井专家认为该项技术是 80 年代测井技术上的一项大突破.

GLT 仪器辅助部分 AMS、TCC 和 CNT 分别是测量井眼泥浆矿化度及俘获截面  $\Sigma_{oh}$ ,数

据传送短节和补偿中子测井仪.仪器总长 21m,测速为 120m/h,比常规核测井速度慢 3 倍.但是,由于它一次测井可获取丰富的地层信息和快速测井,从而弥补了测速慢的不足.

该仪器除脉冲中子发生器外,还装一个铜源( $^{252}\text{Cf}$ ).由于 $^{252}\text{Cf}$ 源平均能量为 2.348MeV,明显低于 Am-Be 中子源,所以该中子源可减少干扰,有利于核谱分析.

由于元素的核性质不同,所用的中子源和测量方法也不同,这样可降低干扰,使被测元素达到最大灵敏度.表 4 列出了核谱测井确定的化学元素方法.表 5 列出了地球物理参数与核谱测量技术的关系.

表 4 核谱测井所确定的化学元素

中子源	核反应形式	测量元素
14MeV	非弹性散射	C, O, Si, Ca, Fe
14MeV	俘获 $\gamma$ 谱	H, Mg, Si, S, Cl, Gd
$^{252}\text{Cf}$ 或 14MeV	活化 $\gamma$ 谱	Na, Mg, Al, Ca, Ti
	自然 $\gamma$ 谱	U, Th, K

表 5 地球物理参数与核测量关系

地球物理参数	物理参数	核测量技术
含油饱和度	C/O	非弹性散射 $\gamma$ 谱
粘土类型 和矿物类型	U, Th, K	自然 $\gamma$ 谱
	Si, Ca, S, Fe, Ti, Gd	俘获 $\gamma$ 谱
	Al	活化 $\gamma$ 谱

经过大量岩心的中子活化分析和 X-衍射分析, Herron 提出了元素含量与矿物丰度间的定量关系,可用矩阵表示如下:

$$[E] = [C][M] \quad (5)$$

则

$$[M] = [E][C]^{-1} \quad (6)$$

其中,  $[C]$  为正矩阵系数,它的值可由文献查出或由已知样品回归分析给出,  $[E]$  为元素重量百分矩阵,  $[M]$  是矿物重量百分矩阵.

有关地球化学测井应用, Herron 已作了详细分析介绍. P. Berger 等人也发表了在中国南海一口井成功应用的综述报告.以元素含量数据分析应用前景,大致可分三类:直接、间接和推论应用,如表 6 所示.

表 6 地球化学测井应用

直接应用	油气勘探 原岩矿物勘探 流体杂质确定 井与井间关系 砂岩分类 矿物学
间接应用	总粘土含量确定 阳离子交换量确定 钻井风险 评价 井位确定 颗粒密度 孔隙度
推论应用	沉积环境诊断 原生物矿物评价 油粘度 颗粒大小 渗透率

地球化学测井的垂直分辨率较差,约 3 尺,而地层微扫描 FMS 的垂直分辨率高,约几公分:近来,有人综合解释了 GLT 和 FMS 数据,用 GLT 数据刻度 FMS 数据,并且把 FMS 求得的粘土矿物的高频成份加到 GLT 粘土矿物中,从而得到一条新的高分辨率 GLT 曲线.由 GLT 提高分辨率后求得矿物类型与井眼成像(FMSI)组合使得地质学家更好地评价测井直观图.沉积环境和储层走向及数据.总之,地

球化学测井是非常有前途的方法.

## 6 结束语

当前核测井发展趋势一是与其它测井方法组合,使一次测井获取更多的地质信息,二是核测井本身的组合,完善与提高.

1990 年,斯仑贝谢公司推出了 MAXIS-500 测井装置.该系统全称为“多功能数据采集和成像系统”,它的问世标志测井技术已跨入一新的阶段.与此同时,也预示出今后地球物理测井发展新动向——即各种成像技术. MAXIS-500 有 9 种下井仪器,主要是电法测井系列和声波测井系列成像技术,其中核测井仅有核孔隙度-岩性测井仪(NPLT).核测井领域今后发展趋势是  $\gamma$  成像和中子成像.随着科学技术的发展,不久将推出  $\gamma$  射线井下成像仪器.

## Applications of Nuclear Spectrum Analysis to Geophysical Well Logging

Fang Yindong Pan Hongjing

(Institute of Jianghan Well Logging, Hubei Qianjiang 433123)

**Abstract** This paper introduces briefly the applications of natural, radioactive and prompt  $\gamma$  rays energy spectrum analysis to the geophysical well logging as well as its prospects.

**Key Words** radioactive  $\gamma$  spectrum, prompt  $\gamma$  spectrum, litho - density, photoelectric absorption cross section