

## 地层元素测井技术最新进展及其应用

张 锋<sup>1</sup>, 刘军涛<sup>1</sup>, 冀秀文<sup>2</sup>, 袁 超<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555;

2. 中国石油 大港油田测试公司, 天津 大港 300280)

**摘要:** 地层元素测井是一种通过测量中子与地层元素原子核作用放出的伽马射线, 得到元素含量进而确定矿物含量的中子伽马能谱测井技术, 在复杂储层岩性识别、非常规储层评价等方面得到了广泛应用。本文简要介绍了元素能谱测井的核物理和地质基础, 并对元素俘获能谱测井(ECS)、地球化学测井(GEM)和地层岩性能谱测井(FLS)等几种仪器技术指标进行分析; 系统讨论了确定元素含量的谱分析技术及矿物含量的氧化物闭合模型和统计分析方法; 总结了元素能谱测井在地层评价中的应用。最后提出采用可控中子源和多探测器系统、多参数测量是地层元素测井的发展趋势。

**关键词:** 地层元素; 能谱测井; 技术进展

中图分类号: TL99; TE19 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2011)增刊-0021-08

### Development of Formation Element Logging Technique and Its Application

ZHANG Feng<sup>1</sup>, LIU Jun-tao<sup>1</sup>, JI Xiu-wen<sup>2</sup>, YUAN Chao<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Well Testing Company, Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Formation elements logging is a neutron gamma spectroscopy logging technique used to acquire the content of elements and minerals by recording the gamma ray produced by the reaction of neutron and elemental nucleus in the formation. It has a wide usage in discriminating complex lithology and evaluating unconventional reservoir. In this paper, the geological basement and nuclear physics basement of elemental spectroscopy logging are briefly stated. Technical specification of the elemental capture spectroscopy tool, the geochemical logging tool and the formation lithology spectrometer tool are analyzed. Methods of determining the elements content by spectroscopy analysis and acquiring mineral content by oxide closure model, cluster-factor analysis are systematically discussed. The application of elemental spectroscopy logging in formation evaluation is summarized and finally that controllable neutron source, multi-detectors, multiparameter measurement will be the de-

收稿日期: 2011-10-24; 修回日期: 2011-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40874065); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10CX03001A)

作者简介: 张锋(1970—), 男, 山东莒南人, 副教授(博士), 主要从事油井方法基础研究

velopment trend of formation elements logging is raised.

**Key words:** formation element; spectroscopy logging; development

地层元素测井是利用中子源产生的快中子进入地层,与地层元素原子核发生作用放出伽马射线,记录非弹性散射和俘获伽马能谱,以实验标准谱为基础,利用谱分析技术得到地层元素含量,并利用氧化物闭合模型和聚类因子分析等方法确定地层矿物类型及含量,进而进行地层评价<sup>[1]</sup>。

地层元素测井可以识别复杂岩性、确定孔隙度、渗透率、骨架密度、粘土体积等参数,此外能够为研究沉积环境及致密气和页岩气等储层勘探提供重要技术手段<sup>[1-5]</sup>。了解国外地层元素测井技术进展及其应用,并在此基础上形成自主的地层元素测井技术是我国石油勘探开发的迫切需求。

## 1 地层元素测井原理

### 1.1 元素测井伽马能谱

#### 1.1.1 非弹性散射伽马能谱

快中子先被靶核吸收形成复核,而后放出一个能量较低的中子,靶核仍处于激发态,常常以发射伽马射线的方式释放出激发能而回到基态。由此产生的伽马射线称为非弹性散射伽马射线<sup>[1]</sup>。不同原子核发生非弹性散射反应截面和放出的 $\gamma$ 射线能量不同,在地层中与快中子发生非弹性散射的主要有碳、氧、硅、钙及铁等元素的原子核<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 热中子俘获伽马能谱

快中子经过一系列的非弹性和弹性散射,能量逐渐降低,形成热中子。靶核俘获一个热中子而变成激发态的复核,然后复核放出一个或几个伽马光子,放出激发能而回到基态。这种伽马射线称为热中子俘获伽马射线。不同原子核具有不同的能级,因而各种原子核放出的伽马射线能量也不相同。在元素测井中俘获伽马射线主要由氢、氯、硅、钙、铁、硫、钛、铬及钾等元素原子核与热中子发生的俘获作用产生<sup>[5]</sup>。

### 1.2 元素测井地质基础

地壳中的化学元素只相对集中于少数几种,其中 O(49.13%)、Si(26.00%)、Al(7.45%)、Fe(4.20%)、Ca(3.25%)、Na(2.40%)、K(2.35%)、Mg(2.35%)和 H(1.00%)等 9 种

元素已占地壳总质量的 98.13%,其余元素仅占 1.87%<sup>[6]</sup>。同样,尽管地壳岩石中已发现的矿物多达 2 200 种,但在火成岩、变质岩和页岩中常见的矿物种类也不过十余种。因此,利用已确定的十余种元素含量的中子伽马能谱测井,就能鉴别出地壳岩石中矿物的类型及丰度,从而进行地层评价。

## 2 元素能谱测井技术发展

### 2.1 斯伦贝谢公司 ECS 测井仪<sup>[2]</sup>

斯伦贝谢公司的 ECS(Elemental Capture Spectroscopy)测井仪器主要由 592 GBq(16 Ci)的<sup>241</sup>Am-Be 中子源和 1 个 BGO 晶体探测器组成,利用硼套来减少非地层俘获产生的伽马射线,如图 1 所示。中子进入地层后与元素原子核作用放出非弹性散射伽马射线和俘获伽马射线,利用 BGO 探测器记录 254 道伽马能谱,每种元素产生特定能量的特征伽马射线,其计数率与元素的丰度呈比例。ECS 测井仪主要利用俘获伽马能谱确定元素含量<sup>[2]</sup>。

ECS 仪器是从 GLT(Geochemical Logging Tool)和 RST(Reservoir saturation Tool)发展起来的,其外径为 127 mm,长约 3.1 m,重 138 kg,适用最大和最小井眼尺寸分别为 500 mm 和 165 mm,测井速度为 540 m/h,采样间隔为 0.15 m,测量伽马射线能量范围为 600 keV~8 MeV,纵向分辨率和探测深度分别为 45.72 cm 和 22.86 cm。测井不受泥浆类型影响,可以和多种测井仪联合测量,具有仪器短、应用简单、快速等特点,可以测量足够元素种类进行岩性评价。一般条件下元素含量的不确定度分别为:Si, 2.16%; Ca, 2.19%; Fe, 0.36%; S, 1.04%; Ti, 0.1%; Gd,  $3.48 \times 10^{-6}$ <sup>[7]</sup>。

### 2.2 哈里伯顿公司 GEM 测井仪<sup>[3]</sup>

哈里伯顿公司的 GEM(Geochemical logging)测井仪同样采用<sup>241</sup>Am-Be 同位素中子源和 1 个 BGO 晶体探测器,采用优化的中子和伽马射线屏蔽来提高信噪比,如图 2 所示。采用同位素源目的是减小仪器电路及结构复杂性,增加测量稳定性,减小仪器长度,但采集到的信息相对于脉冲中子源比较单一



图1 ECS测井仪

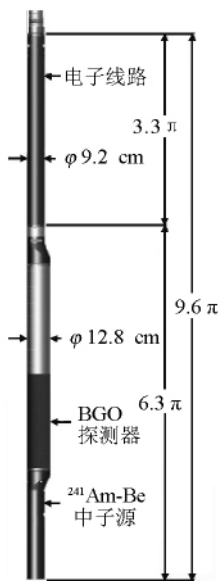


图2 GEM测井仪

GEM通过和直径90 mm的测井短节组合使用,一次下井能够进行补偿中子、伽马-伽马密度和自然伽马能谱测井。测井过程中能够实时输出元素含量进行地层岩性评价。探测器部分最大直径为120 mm;探测器部分的上部和下部都是偏心设计,有利于其他偏心仪器的连接;仪器贴井壁测量,连接扶正器可在直径500 mm的井眼进行测量;可以在油基泥浆、水基泥浆及孔隙钻井条件下使用,纵向分辨率为54 cm。

### 2.3 贝克休斯公司 FLS 测井仪<sup>[4]</sup>

贝克休斯公司的 FLS (Formation Lithology

Spectrometer)测井仪由高频率的 D-T 脉冲中子发生器、BGO 晶体闪烁探测器、高速井下传输线路和高强度钛外壳组成,并采用相应的中子和伽马屏蔽体来消除井眼等环境伽马的影响,其结构示意图示于图 3。

FLS 仪器的发射脉冲示于图 4。脉冲中子源工作频率为 10 000 Hz;脉冲中子工作时段分为两个阶段,第一阶段包括 950 个重复工作的短周期,每个短周期工作时间为 100 μs,其中 10~40 μs 记录非弹伽马信息,50~100 μs 记录俘获伽马信息;第二阶段包括 50 个工作时间为 100 μs 的短周期,这个阶段关闭脉冲中子发生器,记录伽马本底谱,用于非弹谱和俘获谱本底的扣除。脉冲中子发生器较同位素中子源获得地层信息多,但 FLS 的非弹谱信息探测深度较小,统计涨落较大,采用单探测器不能充分利用各种谱数据信息获取地层参数。

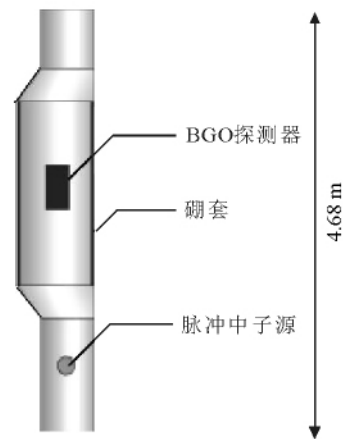


图3 FLS测井仪示意图

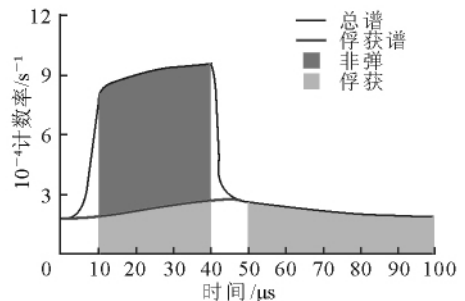


图4 FLS脉冲中子发射时序

### 3 地层元素测井能谱数据处理方法

地层元素测井仪器探测来自于井眼和地层中所有元素原子核的非弹及俘获混合伽马能谱,

如何从混合能谱中准确得到各元素的质量分数是元素测井应用的关键所在。

### 3.1 建立地层常见元素的标准伽马能谱

利用元素测井仪器测量混合伽马能谱,建立地层常见元素原子核的标准伽马能谱,并采用最优的解谱方法进行数据处理,最终得到地层的元素含量,因此地层常见元素的标准伽马能谱是进行谱数据处理的关键。地层常见元素的非弹和俘获标准伽马能谱,通常采用模型井实验和数值模拟方法获得。

利用仪器测量已知元素组成的地层,获得常见元素标准非弹和俘获伽马能谱及不同岩性条件下的混合伽马能谱,以此为基础对仪器进行刻度校正,为测量数据的处理解释提供依据。Pemper<sup>[4]</sup>等利用 FLS 仪器在模型井中得到的常见岩性地层的俘获伽马能谱和非弹伽马能谱示于图 5 和图 6。

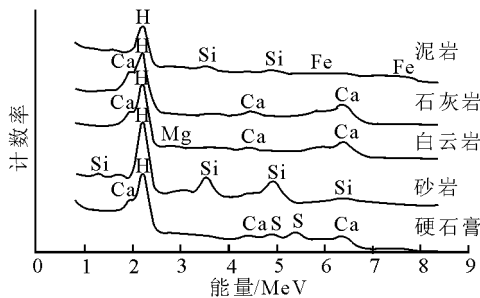


图 5 地层常见岩性俘获谱

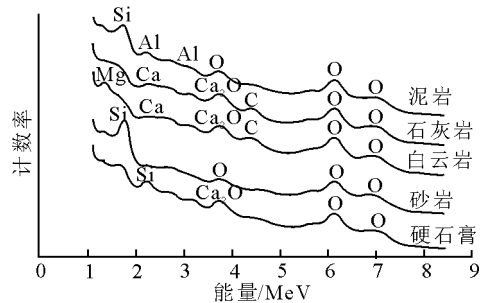


图 6 地层常见岩性非弹谱

利用蒙特卡罗数值模拟方法时可以根据实际条件设定计算模型,得到地层常见元素的标准探测器响应能谱<sup>[8]</sup>,模拟时地层填充  $H_2O$ 、 $C_{22}H_{46}$ 、 $SiCl_4$ 、 $MgCl_2$  和  $CaCl_2$ ,记录快中子与 $^{16}O$ 、 $^{12}C$ 、 $^{28}Si$ 、 $^{24}Mg$  和  $^{40}Ca$  发生非弹性散射放出的伽马谱;地层分别填充  $SiO_2$ 、 $CaCO_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $K_2O$ 、 $Fe_2O_3$  和  $CuS$ ,记录热中子与 $^{28}Si$

$^{40}Ca$ 、 $^{27}Al$ 、 $^{48}Ti$ 、 $^{39}K$ 、 $^{56}Fe$  和  $^{65}Cu$  发生俘获反应放出的伽马谱。探测器为 BGO 晶体,能量分辨率为 12%,得到的元素标准非弹和俘获伽马谱示于图 7 和图 8。

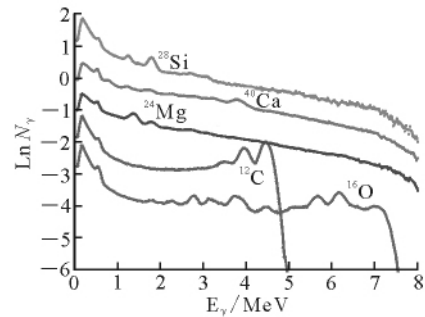


图 7 地层常见元素非弹标准谱

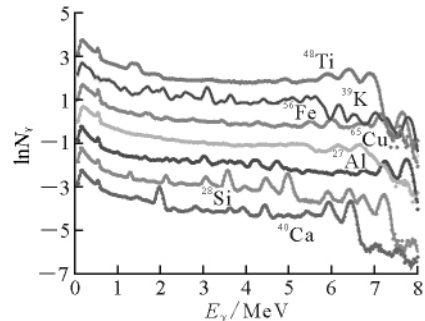


图 8 地层常见元素俘获标准谱

利用数值模拟方法获取元素标准伽马能谱可以根据实际需要设定计算模型,弥补难以建立不同地层条件下模型井的不足,成本低、操作简单。但对实际能谱进行数据处理时必须通过实验获得实际仪器的测量伽马能谱,将模型井获得数据与数值分析结果反复对比,建立两者之间响应关系,最终得到一套标准伽马能谱,为确定元素含量提供基础数据。

### 3.2 确定地层元素产额<sup>[9]</sup>

在确定地层元素含量时,通常采用最小二乘进行谱数据处理,假定地层中有  $m$  种元素,在整个伽马能谱中选取  $n$  个能量道区, $c_i$  是测量伽马能谱第  $i$  道的计数率,则有:

$$c_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_j + \epsilon_i, i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $\alpha_{ij}$  为测井仪器的响应矩阵元,由  $m$  个归一化的标准谱产生; $y_j$  为第  $j$  种元素的相对产额; $\epsilon_i$  为误差。用最小二乘法可得:

$$Y = (A^T A)^{-1} \cdot [A^T C] \quad (2)$$

为了判断拟合度的好坏,拟合度可用  $\Delta$  表示:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + y_j)^2} < \epsilon \quad (3)$$

若  $\Delta$  太大,则可能漏掉或多加了一些地层元素的标准谱,也可能是能窗选取不当,则改变区段或标准谱数再作拟合,直到获得可以接受的结果。

利用非弹谱求解地层元素产额时,探测深度约为 12.7~25.4 cm,统计涨落误差较大,受井眼条件(井眼尺寸、井内流体、套管)等影响较大,需要进行精细影响因素校正;利用俘获谱求解地层有关元素产额时,探测深度约为 20.3~30.5 cm,统计误差较小,脉冲时序及硼套都能够减小井眼条件的影响,因此解释结果也较为精确。

### 3.3 元素产额向元素含量的转换<sup>[10]</sup>

设  $F$  为随深度而变化的归一化因子,  $Y_i$  为元素  $i$  的相对产额,  $S_i$  为元素  $i$  的探测灵敏度因子,  $W_i$  为元素  $i$  的百分含量,则相对产额与元素百分含量的关系为:

$$W_i = F \frac{Y_i}{S_i} \quad (4)$$

归一化因子  $F$  满足闭合条件,即所有元素的质量百分数之和为 1。

对于非弹谱根据地层元素闭合模型有:

$$F_I \left[ \sum_i \frac{Y_{Ii}}{S_{Ii}} \right] + W_H = 1 \quad (5)$$

式中:  $F_I$  为非弹伽马能谱的归一化因子;  $Y_{Ii}$  为元素  $i$  的非弹伽马能谱相对产额;  $S_{Ii}$  为元素  $i$  的非弹伽马能谱探测灵敏度因子;  $W_H$  为氢元素百分含量;

对于俘获谱根据元素闭合模型有:

$$F_C \left[ \sum_i \frac{Y_{Ci}}{S_{Ci}} \right] + W_C + W_O + W_K + W_{Al} = 1 \quad (6)$$

式中:  $F_C$  为俘获伽马能谱的归一化因子;  $Y_{Ci}$  为元素  $i$  的俘获伽马能谱相对产额;  $S_{Ci}$  为元素  $i$  的俘获伽马能谱探测灵敏度因子;  $W_C$ 、 $W_O$ 、 $W_K$ 、 $W_{Al}$  分别为碳、氧、钾、铝元素百分含量;利用公式(5)和公式(6),采用非弹和俘获伽马能谱联合求解可得到地层有关元素百分含量。

若只利用俘获伽马能谱求解地层元素含量,由于俘获伽马不能测出碳、氧、钠和镁,元素的闭合条件不满足,采用氧化物闭合模型可以近似解决没有碳和氧的测量值问题,使这些元素的氧化

物和碳酸盐的质量百分数之和为 1,每个深度点有特定方程:

$$F_C \left[ \sum_i X_i \frac{Y_{Ci}}{S_{Ci}} \right] + X_K W_K + X_{Al} W_{Al} = 1 \quad (7)$$

式中:  $X_i$  为元素  $i$  的氧化物或碳酸盐的质量与第  $i$  种元素的质量比,定义为元素  $i$  的氧化物指数;  $W_K$  为利用自然伽马能谱测井确定的 K 的质量百分含量;  $W_{Al}$  为利用活化测井确定的 Al 的质量百分含量。闭合模型中不考虑镁的影响,可以利用光电吸收截面指数确定镁的含量。

总体来讲,产额向元素转换受到不同元素的反应截面、地层密度、特殊岩性、中子源强度、探测器效率以及选择能量窗的影响。所有的影响都体现在了将伽马产额转换成地层元素含量的经验算法中;对于不同矿物中的相同元素,可以采用不同的转换算法,例如在方解石中钙产额向元素含量转换与在硬石膏地层不一样;计算泥岩地层中硅的含量时,必须进行修改校正,因为泥岩中含有高俘获截面元素(如 Fe、K、Gd 和 Ti)。

### 3.4 元素含量向矿物含量转换

元素含量与矿物含量之间的定量关系是经过大量岩芯的中子活化分析及 X 衍射分析后提出的。这种定量关系包含两个方面的内容:其一是通过样品的中子活化分析确定出 21 种元素含量,然后是对样品进行 X 衍射分析确定出 4 种或 6 种矿物含量,最后将 21 种元素含量和 6 种矿物含量、样品的 CEC 值以及粒径小于 20  $\mu\text{m}$  的矿物作为变量进行统计因子分析;其二是建立闭合模型,将所选定的元素和矿物进行多元回归分析。Herron 采用数理统计中的因子分析法得出元素含量与矿物的转换关系为:

$$E_i = \sum_{j=1}^m C_{ij} + M_j \quad (8)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  种元素的含量;  $C_{ij}$  为第  $j$  种矿物中第  $i$  种元素的含量;  $M_j$  为第  $j$  种矿物的含量<sup>[11]</sup>。

## 4 地层元素测井的应用

元素测井主要用于确定地层的岩性及岩石类型、根据矿物含量确定骨架密度、估算地层阳离子交换量、求取地层宏观俘获截面、解释沉积环境、推算成岩作用、根据矿物组成计算孔隙度及渗透率等<sup>[10]</sup>。

#### 4.1 确定地层矿物含量

元素测井通过氧化物闭合模型和综合处理解释可定量得到如下矿物含量:硅酸盐岩中的石英、燧石、钾长石、钠长石和钙长石;碳酸盐岩中的方解石、白云石、铁白云石、文石、菱铁矿、菱菱铁矿、菱镁矿和高镁方解石;粘土岩中的伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石和海绿石;其他矿物有白云母、黑云母、黄铁矿、蛋白石、石膏、硬石膏、重晶石、赤铁矿、天青石和萤石<sup>[11,12]</sup>。

Andy Kristianto<sup>[13]</sup>等利用 X 射线衍射仪对岩样进行化验分析,并与元素能谱测井矿物含量计算结果对比,对比结果显示,解释曲线与岩心分析结果相关性很好。

Woodford 页岩是美国中西部地区的主要产气层, Younan<sup>[14]</sup>等对该地区一口井进行了元素能谱测井,探测到了该井油页岩层,得到该页岩层的主要矿物组成为石英、伊利石、绿泥石、白云石、黄铁矿,为压裂液类型的选择提供了参考依据;元素能谱测量结果与该井岩心 X 衍射测量结果基本一致。

#### 4.2 确定地层粘土体积

斯伦贝谢公司研究了泥质含量与单种元素、单种氧化物或碳酸盐、氧化物或碳酸盐组合之间的相关性,泥质含量是指高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石及海绿石的总量。相关性示于图 9 和

图 10,可以看出 Al 与泥质含量的相关性最好,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$  及 Fe 组合与泥质含量也有着很好的线性关系。因此可以通过元素或是氧化物组合确定地层泥质含量<sup>[15]</sup>。

#### 4.3 地层岩性分析

贝克休斯公司通过归纳一般岩性与氧化物组合的对应关系,利用常见元素氧化物的三元交会图进行岩性识别<sup>[4]</sup>,如图 11 所示利用  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{SiO}_2$  交会图识别地层岩性;除此之外还可以利用  $\text{CaO}$ 、S 及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等组合进行岩性识别;利用非弹谱求取 C 含量可以用于识别煤层。斯伦贝谢利用总泥质含量、总石英-长石-云母含量、总碳酸盐含量三元交会进行复杂岩性识别<sup>[16]</sup>,如图 12 所示。地层元素测井在火山岩、页岩等复杂岩性的识别方面起到了重要作用,可以通过 FMI 与元素测井结合进行的火山岩储层的综合评价<sup>[17]</sup>,还可以通过元素俘获谱测井结合 QAPF 识别火成岩岩性<sup>[18]</sup>。除了在电缆测井中的应用外,元素测井已经应用到了随钻中。Tore Gjerdingen<sup>[19]</sup>等研究了随钻测井(LWD)中的元素能谱,能够确定 10 种元素(Si、Ca、Fe、S、Ti、Gd、K、Mg、H 和 Cl),并对这些元素在各种变化测井(钻井速度)、动态井眼环境以及不同的仪器形状等随钻条件的测量进行了研究。

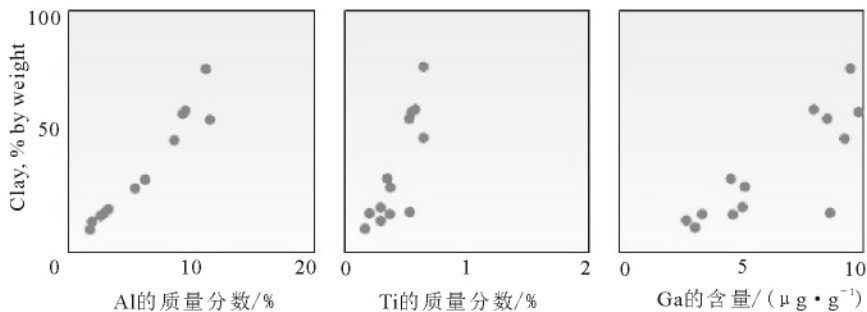
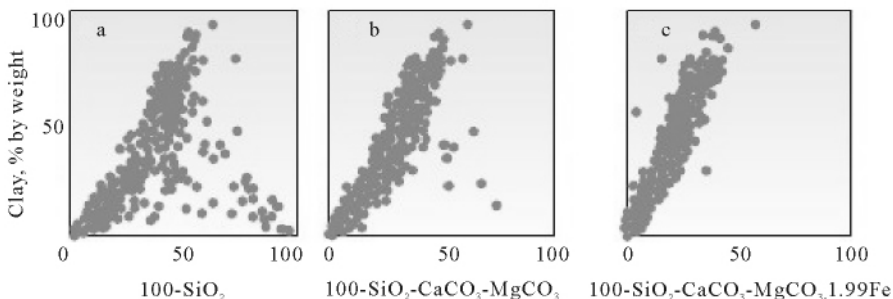


图 9 粘土含量与单种元素含量相关性



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

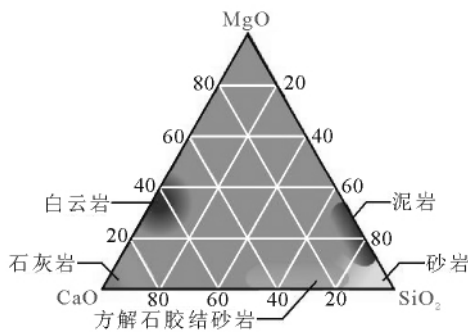


图 11 贝克休斯公司岩性识别图版

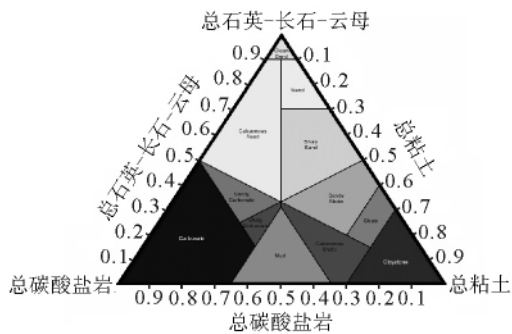


图 12 斯伦贝谢公司岩性识别图版

4.4 确定骨架参数

地层各组成矿物的含量得到之后,可以用下面经验公式来近似确定地层密度:

$$\frac{1}{\rho_{ma}} = \sum_{j=1}^m \frac{M_j}{\rho_j} \quad (9)$$

式中:  $\rho_j$  为第  $j$  种矿物的密度;  $\rho_{ma}$  为地层骨架密度;  $M_j$  为矿物  $j$  的百分含量。

地层的热中子俘获截面是单位体积内某种元素丰度和该元素的热中子微观截面乘积的线性叠加<sup>[20]</sup>:

$$\Sigma = \sum_{j=1}^m \frac{W_{ij}}{\sigma_j} \quad (10)$$

式中:  $\sigma_j$  为第  $j$  种元素的热中子重微观俘获截面;  $W_{ij}$  为第  $j$  种元素的质量百分含量。

利用根据矿物组成求得的骨架密度确定地层的孔隙度,基本公式为:

$$\varphi = (\rho_a - \rho_b) / (\rho_f - \rho_b)$$

式中:  $\varphi$  为孔隙度;  $\rho_a$  为地层视密度,可以由补偿密度测井获取;  $\rho_b$  为由元素能谱测井得到的骨架密度;  $\rho_f$  地层流体密度。

研究发现,根据元素能谱测井提供的矿物含量能够很好地估算地层渗透率  $K$ ,经验公式如下:

$$K = A_f \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \exp(\sum_j B_j M_j) \quad (11)$$

式中:  $M_j$  为岩石骨架中矿物  $j$  的百分含量;  $B_j$  为与矿物  $j$  有关的参数;  $\varphi$  为孔隙度;  $A_f$  为给定层段最高长石含量函数,反应成分和结构成熟度<sup>[21]</sup>。

4.5 研究沉积环境

不同地质时期沉积岩中一些元素的丰度及组合特征的变化能够反映出当时沉积环境的变化情况<sup>[22]</sup>。Si 主要集中在砂岩、硅质岩等,它的丰度与分布对其他元素有很大影响;钙化物容易风化分解出 Ca 离子进入水溶液,河水中阳离子 Ca 离子含量最大,而在海水中正好相反<sup>[23]</sup>;S 的丰度与分布受沉积环境影响较大,在还原条件下硫化物富集<sup>[24]</sup>;Fe 在沉积物中的含量随着沉积物粒度的变细而增加,在泥岩沉积物中它的含量随着碳酸盐物质的富集而变少;Ti 是典型的亲碎屑元素,在碎屑沉积物中明显遵从元素的粒度控制,含量随粒度的变细而升高;沉积岩中随着沉积物的粒度由粗变细,稀土元素 Gd 的含量增加,即 Gd 元素富集于细粒沉积物中;Ti 在地壳中分布广泛,由于具有强烈的亲氧性,可形成多种氧化物和含氧酸盐<sup>[25]</sup>。

5 结束语

地层元素测井通过记录非弹伽马和俘获伽马能谱信息,以元素标准谱为基础,采用谱数据处理技术获取地层元素含量,通过氧化物闭合模型及聚类分析得到地层矿物含量,为解决地质问题提供了更加可靠有效的手段。元素能谱测井在地层矿物识别、岩性识别、确定地层粘土含量、计算骨架参数、研究沉积环境等方面有着广阔的应用前景。

现有地层元素测井仪主要由<sup>241</sup>Am-Be 中子源或脉冲中子管和单 BGO 探测器组成,同位素中子源不符合 HSE 要求,单 BGO 探测器采集地层信息较为单一;采用脉冲中子源及多探测器系统,采集能谱及时间谱,一次下井实现地层多参数测量是地层元素测井的发展趋势。提高脉冲中子源产额及稳定性、增加探测器探测效率及分辨率也是以后研究的重点。

参考文献:

[1] 黄隆基.放射性测井原理[M].北京:石油工业出版社,1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- 版社,1985:118.
- [2] Egbe Samuel James, Omole O, Jacob Diedjomahor. Calibration of the elemental capture spectroscopy tool using the niger delta formation, SPE111910[R]. Abuja, Nigeria: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [3] James Galford, John Quirein, Scott Shannon, et al. Field test results of a new neutron-induced gamma-ray spectroscopy geochemical logging tool [R]. SPE123992. New Orleans, USA: Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [4] Pemper R, Sommer A, Guo P, et al. A new pulsed neutron sond for derivation of formation lithology and mineralogy [R]. SPE102770. San Antonio, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [5] Raghu Ramamoorthy. A look at spectroscopy[J]. Formation Evaluation Review, 2001, 2(6): 270-275.
- [6] Herron MM. Mineralogy from geochemical well logging[J]. Clay and Clay Minerals, 1986, 34(2): 204-213.
- [7] Zaki B. Theory, measurement and interpretation of well logs[Z]. SPE Textbook Series Vol. 4.
- [8] 张锋, 王新光, 侯爽, 等. 脉冲中子地层元素能谱测井方法及数值模拟研究[C]//第六届中俄测井国际学术交流会议论文集. 青岛, 2010:133-139.
- [9] Schweitzer JS, et al. Elemental concentration from gamma-ray spectroscopy logs[J]. Nucl Geophys, 1988, 2(3): 175-182.
- [10] Hertzog R, Colson L, Seeman B, et al. Geochemical logging with spectrometry tools [R]. SPE16792. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [11] Grau JA, Schweitzer JS. Elemental concentration from thermal neutron capture gamma ray spectra in geological formation[J]. Nucl Geophys, 1989, 2(3): 1-9.
- [12] Suan LH, Michael MH. Application of nuclear spectroscopy logs to the derivation of formation matrix density [C]//The 41st Annual Logging Symposium of the Society of Professional Well Log Analysts. Dallas Texas, 2000.
- [13] Andy Kristianto, Yulianto Jong, Comparison of conventional log interpretation with neutron log interpretation and X-ray diffraction laboratory analysis: A case study [C]//International Petroleum Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.
- [14] Younane Abousleiman, Minh Tran, Son Hoang. Geomechanics field and laboratory characterization of woodford shale: The next gas play [R]. SPE110120. Anaheim, California, USA: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [15] Grau JA, Schweitzer JS, et al. A geological model for gamma-ray spectroscopy logging measurement [J]. Nucl Geophys, 1989, 3(4): 351-359.
- [16] Marie Van Steen, Adel Farghaly. Enhanced formation evaluation and high-resolution facies determination using spectroscopy logs in the Nile delta, Egypt [R]. SPE127965. Cairo, Egypt: Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [17] 王智, 金立新, 关强, 等. 基于 FMI 与 ECS 的火山岩储层综合评价方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(5): 58-64.
- [18] 韩琳, 张建民, 邢艳娟, 等. 元素俘获谱测井(ECS)结合 QAPF 法识别火成岩岩性[J]. 测井技术, 2010, 34(1): 47-50.
- [19] Tore Gjerdingen, Jeppe Nygaard, Tarek Elshayeb, et al. Application of spectroscopy and sigma measurements to enhance petrophysical evaluations and geosteering in the mineralogical complex, thin bedded Nahr Umr sandstone reservoir [R]. IPTC13723, 2009.
- [20] 庞巨丰, 李敏. 地层元素测井中子-伽马谱解析方法的实际应用[J]. 同位素, 2006, 19(4): 214-217.
- [21] M. Herron. Estimating the Intrinsic Permeability of Clastic Sediments from Geochemical Data, SPWLA [C]//28th Annual Logging Symposium, 1987.
- [22] 袁祖贵. 地层元素测井(ECS)评价油水层[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(2): 126-131.
- [23] 袁祖贵. 用地层元素测井(ECS)资料研究沉积环境[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(4): 347-351.
- [24] 程华国, 袁祖贵. 用地层元素测井(ECS)资料评价复杂地层岩性变化[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(3): 233-238.
- [25] Colson JL, Grau JA, Herzog MM, et al. Application using geochemical logs [C]//Middle East Oil Conference and Exhibition. Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 1989.