

# 注入剖面核示踪同位素测井技术研究

金 勇<sup>1</sup>, 陈福利<sup>1,2</sup>, 柴细元<sup>2</sup>, 李冬梅<sup>2</sup>

(1. 石油大学(北京) 石油勘探数据中心, 北京 100083; 2. 大港油田 测井公司, 天津 300280)

**摘要:** 利用放射性同位素示踪位置灵敏探测技术进行测井的可行性研究, 为精确测量同位素示踪污染(或滤积)位置及污染量, 提高放射性同位素示踪注入剖面评价成果的可靠性提供依据。文章涉及放射性同位素示踪能谱测井仪研制、模拟井刻度实验、实验数据分析等方面。实验结果表明, 放射性同位素示踪能谱测井技术在理论上和生产中具有良好的应用前景。

**关键词:**  $^{131}\text{Ba}$ ; 注入剖面; 能谱测井仪; 实验方法

**中图分类号:** TE151      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2004) S0-0214-05

## Technique of Injection Profile Nuclear Trace in Isotope Logging

JIN Yong<sup>1</sup>, CHEN Fu-li<sup>1,2</sup>, CHAI Xi-yuan<sup>2</sup>, LI Dong-mei<sup>2</sup>

(1. *Petroleum Exploration Data Center, University of Petroleum, Beijing 100083, China;*

2. *Well Logging Corporation, Dagang Oilfield Group Corporation, Tianjin 300280, China)*

**Abstract:** The radioactive isotope tracer position can be detect sensitively in logging. In order to accurately measure contaminated isotope position and amount, improve the reliability of the isotope tracer injection profile evaluating result, the feasibility of radioactive isotope tracer detection technique in logging is research. The contents concern in the development of radioactive isotope tracer energy spectrum logging device, the calibration experiment in model well, the analysis of experimental data, the data interpreting, and so on. The result shows that radioactive isotope tracer petroleum logging technique possesses favorable application prospect both in theory and in production.

**Key words:**  $^{131}\text{Ba}$ ; injection profile; energy spectrum logging device; experiment method

我国大多数油田以注水开发为主, 注水剖面测井在油田动态监测中占主导地位。在油田动态监测中, 注入剖面核示踪同位素测井应用十分广泛, 年测井工作量在 20 000 井次以上。当前, 油田普遍采用  $^{131}\text{Ba}$ -GTP 微球做示踪剂

进行注水剖面测量<sup>[1]</sup>。因受注水管柱状况、示踪剂特性、地层孔眼特征等多种因素的影响, 同位素注水剖面不同程度地存在污染, 给资料处理造成困难。

现有的污染校正技术无法准确识别污染类

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-04-27

基金项目: 中国石油燃气集团公司和中国石油股份有限公司资助项目(960301-06)

作者简介: 金 勇(1962—), 男, 云南建水人, 高级工程师, 硕士, 测井技术研究和软件开发专业

型及其污染量,人工经验判别校正带有较大的随机经验性,解释可靠性难以保证。

常规同位素注水剖面测井仅录取井下示踪强度曲线,靠示踪强度曲线异常来解释分层注水状况。事实上,这种方法必然存在人为的多解性。这是由于在实施同位素示踪注水剖面测井中,70%以上的井存在不同程度的污染,测井资料并不完全直接反映分层注水量。油田虽在减少同位素污染测井工艺、增加测量参数、提高对污染类型的识别能力、给出相应的污染校正处理等方面做了大量努力,但仍未从根本上解决同位素污染类型(特别是组合污染)识别及其污染量准确计算问题。

为精确测量同位素示踪污染位置及污染量,提高核示踪同位素注入剖面解释成果的可靠性,研究利用核示踪同位素位置灵敏探测技术进行测井的可行性,即示踪 能谱测井技术。开展同位素注入剖面 能谱测井技术研究的目的

的,正是为了解决常规同位素注水剖面测井所存在的问题,从测井理论及应用上寻求解决同位素污染类型(特别是组合污染)识别及其污染量的计算方法。

### 1 同位素 能谱测井仪

受注水剖面测井的井筒条件限制,研制的同位素注入剖面 能谱测井仪为小直径仪器<sup>[2]</sup>,其外观尺寸为  $\phi 40\text{ mm} \times 2\ 096\text{ mm}$ 。受仪器尺寸和能谱测量条件的限制,采用模拟信号传输、地面信息分离、进行模数转换和记录的测量方式。

同位素 能谱测井仪分为井下和地面两部分(图 1)。井下仪由探头、滤波电路、放大电路、复合电路、驱动电路和高、低压电源等组成;地面仪包括信号分离器、可编程放大器、多道脉冲幅度分析器、节箍定位信号放大器等。

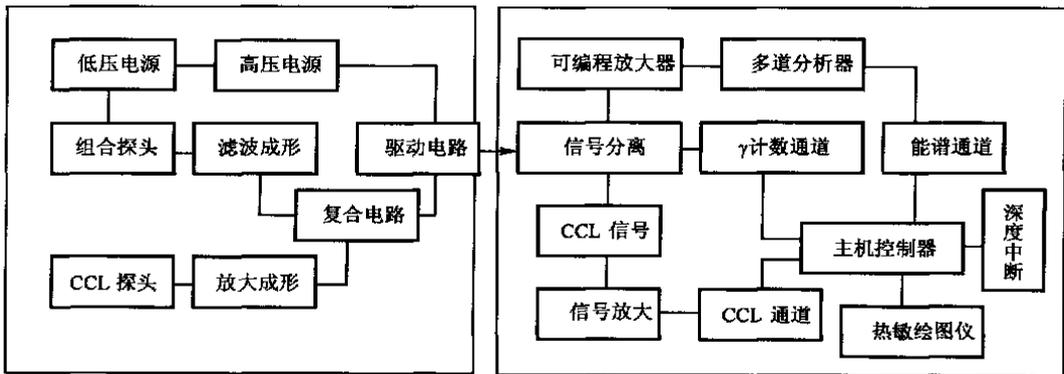


图 1 同位素 能谱测井仪系统构成

Fig. 1 Structure of isotope energy spectrum logging device

井下仪器探头由 能谱探测器和磁性节箍定位器组成。 能谱探测器由一  $\phi 25\text{ mm} \times 130\text{ mm}$  NaI 闪烁晶体与光电倍增管耦合构成。为增强能谱测量的稳定性,在探测器前端放置一较小的镅源做稳峰源,以寻峰变化大小为基础,适当调节倍增管电压而达到稳峰的目的。寻峰和稳谱由计算机控制自动完成。

能谱测量的好坏与探头的特性密切相关。好的探头必须具有较强的计数能力和较高的分辨率。目前,提高计数能力的方法是增大探头

尺寸,或延长探测时间。在探头尺寸限制下,只有通过降低测速(最好定点测量)来提高计数。

小直径 能谱测井仪因受较多条件的限制,未采用井下信息处理和数字信号传输技术。地面仪将井下上传来的模拟电信号进行地面处理后转换成数字信号,记录在磁盘(带)上,即为能谱测井信息。

同位素 能谱测井信息主要包括谱信息、射线强度信息和接箍磁性定位信息等。同位素能谱测井信号经多道脉冲幅度分析器被分成

512道不同能量的谱数据,其中,前511道记录低于 $^{131}\text{Ba}$ 发射的最大射线能量的谱数据,第512道记录来自地层的所有高能射线能量的

谱数据。同位素能谱测井仪的主要性能指标测定结果列于表1。

表1 同位素能谱测井仪主要性能指标的测定结果

Table 1 Test result of characteristics of isotope  $\gamma$ -energy spectrum logging device

性能指标	测定结果	备注
耐温	125	实验测定
耐压	60 MPa	实验测定
本底计数	500 ~ 1 500 CPS	有稳峰镅源
计数率稳定性	$\pm 5\%$	加铯源,计数率约为5 000 CPS
谱稳定性(峰漂)	$\pm 3\%$	实验测定
灵敏度	> 0.7 API/CPS	刻度实验测定
测量重复性误差	$\pm 5\%$   (API)	仪器刻度后
抗震性	3G	实验测定
脉冲幅度 宽度	> 10V < (10 $\pm 3$ ) $\mu\text{s}$	$^{137}\text{Cs}$ 峰幅度/宽度
能量非线性 分辨率	<   $\pm 3\%$   > 12% ( $^{137}\text{Cs}$ )	配测井电缆, 59 ~ 661 keV

注:CPS为每秒计数;API为美国石油协会放射性测井标准单位

## 2 模拟井刻度实验

### 2.1 模拟井

为进行同位素能谱测井实验研究,大港油田测井公司建造了一座模拟实际注水井状况的模型井<sup>[3]</sup>。

模型井主体由模拟砂泥岩地层(水泥混凝土浇注)、5-1/2 套管、2-1/2 油管组成。模型井直径1 m,总长度3.3 m,地下埋深1.5 m,地上高1.8 m,模拟地层径向厚度0.43 m。为配合同位素模拟实验,在模拟井身上按螺旋型分布预留了7个 $\phi 60.4$  mm棒孔,同时配置了7支 $\phi 60$  mm  $\times 45$  cm水泥混凝土圆柱棒,圆柱棒一端中心开有 $\phi 10$  mm、深10 cm的模拟地层射孔孔眼。

实验时,在模拟井孔眼中放置相应活度的同位素示踪剂,将棒体插入模拟井棒孔。模拟井套管、油管为油田常用管材,整体上符合注水井实际状况。

### 2.2 刻度实验方法

投入同位素能谱测井实验的井下仪器,共两支,分别编号为1#、2#。在将测井仪与测井绞车配接并调试正常后,进行仪器灵敏度刻度,即把仪器放入放射性刻度井中,分别测量高放层和低放层的射线计数率,根据 $^{137}\text{Cs}$ 的

标准API值(137.37API),求出测井仪的灵敏度。

刻度方法实验在模型井上进行。首先进行本底谱刻度,接着进行同位素处于各种标准位置下的谱测量,最后进行各种位置下组合谱测量。本底谱刻度分地面和井中两步进行。地面刻度时,仪器距地面1 m,测量来自宇宙中的射线能谱本底值,记录时间为500 s。将仪器放入井中,测量地层射线能谱本底值,测量时间500 s。

进行单一位置的标准谱测量时,将一定活度的 $^{131}\text{Ba}$ -GTP微球撒在宽胶带纸上,标上样品编号,根据标准谱刻度的需要,选择一定编号的样品分别置于仪器探头、油管内壁、油管外壁、套管内壁、套管外壁、地层孔眼(模拟地层孔眼的水泥棒孔)等位置。用能谱仪测量这些标准位置下的能谱数据(要求能谱仪器探头正对放射源样品),每个位置测量10次,每次记录时间200 s。若放射性强度太小,可延长测谱记录时间。

把测得的标准谱作为能谱测井数据分析的基础数据,要求必须有较充分的计数率和清晰的谱形。为寻求合理的测井速度,在测量标准谱的同时,分别重复5次测量2 s(225 m/h)、

4 s(112.5 m/h)、8 s(56 m/h)的能谱数据。

为分析同位素强度、位置与能谱测量的关系,调整探头与同位素样品的相对位置,测量其能谱数据,测量时间 200 s。

针对同位素组合污染的模拟刻度实验方法是:选取不同编号的同位素样品(强度不同),按油管外壁-套管内壁、油管外壁-套管外壁、油管外壁-地层内、套管内壁-地层内、套管外壁-地层内、油管外壁-套管内壁-地层内等不同方式组合,测量其能谱数据,测量时间 200 s。

为获得同位素能谱测井仪器探头的有效探测半径,了解仪器探头在剖面上的响应规律,在模拟井中进行剖面刻度实验。为此,将样品放置于模拟井中的不同位置,分别使仪器正对样品、在模拟井中向上/下 5、10、20、60 cm 处,测量能谱数据,测量时间 200 s。

在模拟井刻度实验过程中,为检测仪器的性能,进行自动稳峰、无自动稳峰条件下的道漂刻度实验、计数率效应实验等。在大港油田 X6 井进行实际测井试验,获取了相关数据资料。

### 3 实验数据分析

同位素能谱实验数据分析方法与自然能谱测井数据分析相似,所不同的是,后者采用 U、Th、K 的特征射线谱作标准谱进行谱处理<sup>[4]</sup>,前者用<sup>131</sup>Ba 处于特定位置的特征射线谱作标准谱进行谱处理。

能谱仪的灵敏度是重要特征指标之一,它由放射性刻度井刻度实验获得。

表 2 列出了谱仪灵敏度的刻度结果。从表 2 可看出,两支谱仪均有较高的灵敏度,1 #、2 # 谱仪的灵敏度分别为 0.766 和 0.611 API/CPS。

表 2 同位素能谱仪器的灵敏度刻度数据

Table 2 Sensitive calibration of isotope-energy spectrum logging device

仪器编号	刻度计数率(CPS)		灵敏度/ (API/CPS)	备注
	高放层	低放层		
1 #	320	143	0.766	对 <sup>137</sup> Cs
2 #	338	113	0.611	对 <sup>137</sup> Cs

注:CPS 为每秒计数;API 为美国石油协会放射性测井标准单位

<sup>131</sup>Ba 发射 496 keV 特征射线。实验数据分析表明:在模拟井中,在同位素处于单一位置情况下,峰康比  $R$  (给定道数情况下射线 496 keV 峰区计数率与康普顿降能散射区计数率的比值)可清楚区分同位素所处的位置。表 3 列出了同位素所处部分位置下的峰康比  $R$ 。

模拟井的实验结果表明,标准的峰康比  $R$  与测井仪器、同位素类型、介质状况、分析道宽等有关。测井前,应获取在模拟井中的实际刻度数据,模拟井的条件应与实际井的状况相似。

实验结果显示, $R$  正比于同位素与探头间的距离  $L$  和通过介质的密度  $\rho$  的乘积。

对同位素组合污染情况,用简单的峰康比值法不能予以区分,必须进行全谱分析,求得各个位置的同位素污染量(污染百分比)。

解谱原理是:把组合污染看成是几种单一位置污染的线性组合,利用单一污染的刻度谱作标准谱,求出标准谱的谱系数,再利用加权最小二乘法求解组合污染的测量谱,求出同位素组合污染类型及污染量(污染百分比)。

表 4 列出了同位素组合污染模拟井刻度实验测量及解谱分析结果。实验结果分析表明,对于同位素组合污染,解谱分析结果与实测值相近,利用解谱分析能够解决同位素组合污染量问题。

利用峰康比和计数率对模拟井剖面刻度实验能谱测量数据进行综合分析,分析结果列于表 5。

剖面刻度实验结果显示,对相同强度的<sup>131</sup>Ba 布放而言,随其距井轴中心(探头位置)的距离增加,能谱测量的计数率减小,而峰康比值增大,探头的响应与<sup>131</sup>Ba 对探头所张的立体角关系密切,计数率随立体角的增加而增加,峰康比  $R$  随射线穿过介质厚度增加而增大。

油管外壁污染计数率剖面呈尖刀状,峰康比剖面变化剧烈,探头有效响应距离为<sup>131</sup>Ba 布放位置的上下 10 cm 内;套管内壁污染计数率剖面呈钝刀状,峰康比剖面变化较剧烈,探头有效响应距离为<sup>131</sup>Ba 布放位置的上下 15 cm 内;<sup>131</sup>Ba 在地层内的计数率和峰康比剖面均呈波浪形变化,探头有效响应距离为<sup>131</sup>Ba 布放位置上下 25 cm 内。

表3  $^{131}\text{Ba}$  模拟井刻度实验获得的峰康比Table 3 Peak to kang ratio of  $^{131}\text{Ba}$  in modeling well calibration

仪器编号	同位素布放位置	计数率(CPS)	峰康比 $R$	相对标准偏差 $s_R/\%$
1 #	油管外	363	3.16	2.08
	套管内	930	3.91	6.11
	地层中	387	5.63	3.02
2 #	油管外		2.97	
	套管内		3.71	
	地层中		4.78	

注:  $R$  和  $s_R$  分别为 10 次测量的算术平均值和相对标准偏差

表4 同位素组合污染模拟井刻度实验测量及解谱分析结果

Table 4 Test and analysis result of isotope combined pollution in modeling well

样品分组	组合类型	污染量			实测计数率(CPS)		
		油管外壁 实测/解谱	套管内 实测/解谱	地层内 实测/解谱	油管外壁	套管内壁	地层内
第1组	三位置组合	0.216/0.166	0.544/0.540	0.230/0.294	363	930	387
	套外-地层组合		0.706/0.673	0.294/0.367			
	油外-套内组合	0.281/0.233	0.719/0.767				
	油外-地层组合	0.484/0.374		0.516/0.626			
第2组	三位置组合	0.177/0.377	0.598/0.303	0.225/0.319	176	593	223
	套外-地层组合		0.727/0.565	0.273/0.435			
	油外-套内组合	0.229/0.400	0.771/0.600				
	油外-地层组合	0.441/0.489		0.559/0.511			

注:CPS为每秒计数率

表5 模拟井同位素剖面刻度实验能谱测量数据分析

Table 5 Logging spectrum data analysis of isotope profile in model well calibration

同位素 布放位置	探头相对同位素所在位置(下方为“-”,上方为“+”(cm))处的每秒计数与峰康比之比 CPS/ $R$							
	-60	-20	-10	-5	0	5	10	20
油管外壁			504/6.438	1898/4.095	2833/2.764	2427/2.690	477/5.093	
套管内壁	67/4.762	78/5.229	183/5.498	424/5.041	971/3.873	980/3.656	458/4.304	103/5.591
地层内		391/5.474	269/4.663		454/5.438		466/5.278	433/5.113

注:CPS为每秒计数率

在模拟刻度井完成试验后,在大港 X6 井(深度 > 3 000 m, 温度 > 100 )进行了实际测井试验。实际测井录取的能谱测井数据显示,能谱测井仪基本上达到设计指标要求。

本实验研究表明,注入剖面同位素能谱测井能够解决同位素污染类型识别及其污染量计算问题。利用峰康比值法能够确定同位素示踪剂相对于井眼(探头)的邻近程度,加权最小二乘解谱算法可给出放射性强度随深度的变

化,并可定量计算污染量。根据同位素示踪剂随注入流体在井下的分配原理<sup>[5]</sup>,可进行定量的示踪剂污染计算和归位处理。

#### 4 结论

1) 根据注入剖面测井技术发展的需要,成功地研制了小直径( $\phi 40$  mm)注入剖面同位素能谱测井仪,用此测井仪进行模拟井刻度实

(下转第 226 页, Continued on p. 226)

则标定时的信噪比极差。

4) 由于 LSO 熔点高,生长困难,目前价格还较为昂贵,大大制约了其应用。随着国产 LSO 晶体的上市,以 LSO 组成的各类探测器将在脉冲射线测量、医学成像、高能粒子探测等领域发挥更大的作用。

本项工作在完成过程中得到了中国原子能科学研究院周祖英研究员、侯龙研究员的指导和帮助,陈宏涛、王东、苏晓斌和倍加器运行组同志同志给予了大力支持和密切配合,西北核

技术研究所的阿景焯、张文首、王凯等同志在单能源的制备方面进行了很好的合作。在此,一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 任国浩,王绍华,李焕英,等. 掺铈硅酸镧晶体的生长与闪烁性能[J]. 无机材料学报,2003,18(2):269~274.
- [2] 秦来顺,任国浩. 硅酸镧闪烁晶体的研究进展与发展方向[J]. 人工晶体学报,2003,32(4):286~294.

(上接第 218 页,From p. 218)

验,获得了丰富的基础数据,为同位素能谱测井技术的进一步研究和应用奠定了基础。实验结果表明,注入剖面同位素能谱测井技术已具备现场测试和应用条件,显示了该项技术的良好应用前景。

2) 为满足生产应用的需要,所研制能谱仪的时间灵敏性和位置敏感性需进一步改善。

#### 参考文献:

- [1] 陈福利,柴细元,金勇,等. 放射性同位素示踪注水剖面污染校正研究[J]. 测井技术,2003,27(6):528~533.
- [2] 谢荣华. 生产测井技术应用与发展[M]. 北京:石油工业出版社,1998.82~88.
- [3] 张金新. 同位素示踪能谱注水剖面测井方法实验研究[R]. 天津:大港油田测井公司,1995.
- [4] 黄隆基. 自然能谱测井原理及应用[M]. 北京:石油工业出版社,1995.131~139.
- [5] 姜文达. 放射性同位素示踪注水剖面测井[M]. 北京:石油工业出版社,1997.38~89.