

基于脉冲中子源的元素分析测井仪设计

李晋宇 马双宝

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

摘要:为在石油测井过程中获取地层元素种类及含量等信息,研制了一种基于脉冲中子源的地层元素测井仪器。仪器控制中子源以脉冲的形式向地层发射中子,通过对脉冲时序进行控制,仪器可对中子反应不同阶段产生的 γ 射线的能量进行测量,从而获取详细的能谱与时间谱数据。经测试,仪器性能达到设计指标,能够有效获取256个能道,对应 γ 射线能量为0~10 MeV的能谱数据,包括非弹性散射谱、中子俘获谱和背景谱,以及256道,对应100 ms中子发射周期的时间谱数据。对纯水井、含硫井、含碳井等实验井进行了化学源测试,所得测量结果与已知数据基本符合。

关键词:脉冲中子源;时序控制;能谱;时间谱

中图分类号: TL817⁺.2 TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 490.15

Design of elemental analysis logging tool based on pulsed neutron source

Li Jinyu Ma Shuangbao

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to obtain the information about the species and content of the formation elements in the process of petroleum logging, a logging tool used for detecting formation elements based on the pulsed neutron source is developed. The neutron source, controlled by the instrument, sends neutrons to the formation in the form of pulses, by controlling the timing of the pulses, the tool can get the energy of gamma ray produced during different stages of neutron reaction, then detailed energy spectrum and time spectrum data can be obtained. The experiments show that the instrument performance meet the design index, the instrument can effectively get the energy spectrum data consist of 256 energy channels, corresponding to 0~10 MeV γ ray energy, including the inelastic scattering spectrum, the neutron capture spectrum and the background spectrum; in addition, a 256 channels time spectrum corresponding to a 100 ms neutron emission period is achieved. The experimental wells, such as pure water well, sour well and carbon bearing well, are tested using the chemical neutron source, and the measured results were in good agreement with the known data.

Keywords: pulsed neutron source; timing control; energy spectrum; time spectrum

1 引言

随着石油资源的消耗与开采难度的提高,油气勘探需要新的手段。基于脉冲中子源的元素分析测井仪通过获取不同中子反应阶段的 γ 能谱与时间谱为地层元素分析提供数据支持^[1-3]。国外在该领域的研究开展较早,已有斯伦贝谢 ECS、哈里伯顿 GEM、贝克修斯 Flex 等成熟的仪器。国内在该方面尚处于起步阶段,目前仅有大庆油的 PNST-E,仍有很大的发展空间^[4-7]。

仪器的设计基于核电子学的相关理论和方法,通过对时序的控制来区分中子反应过程中的非弹性散射、中子俘

获等阶段。相比化学源仪器,本仪器具有无污染,获取数据更为全面的优点。

本文在最后使用信号发生器对仪器的基本功能进行了测试,进行了实验井测试并将测量结果与已知数据进行了对比分析。

2 仪器结构

2.1 总体结构

仪器由脉冲中子发生器、 γ 探测器、采集控制系统与通信系统组成,置于不同短节中,中子发生器位于最前端短节,采集控制系统与通信系统位于最后端短节。地面通

收稿日期:2017-03

过 EDIB 总线与主控通信系统进行数据交换,该总线为全双工。采集控制系统采用 485 总线与主控通信系统通信,采用 232 总线与中子发生器进行通信,如图 1 所示。

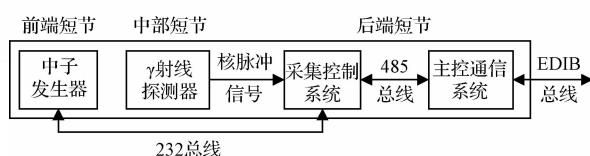


图 1 仪器总体结构

2.2 中子发生器

仪器使用东方测控公司的 DF5760 中子发生器。工作时,存储器内部灯丝通电发热使存储器放出 D-T 气体,气体在离子源的 2 kV 高压作用下发生电离,随后在靶极高压作用下轰击在靶上,释放中子。电路通过控制离子源电压实现中子的脉冲发射,如图 2 所示。

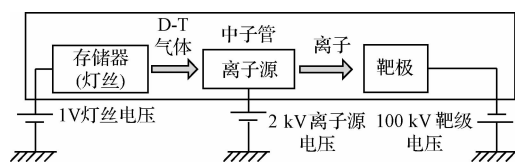


图 2 可控中子发生器

2.3 γ 探测器

伽马探测器是仪器的关键组成部分,位于保温瓶中,是整个仪器中唯一非高温部件。探测器由探头(包括 BGO 闪烁晶体、光电倍增管)和光电倍增管高压电路构成,用以将 γ 射线的能量转换为可供测量的电信号^[8-9],如图 3 所示。

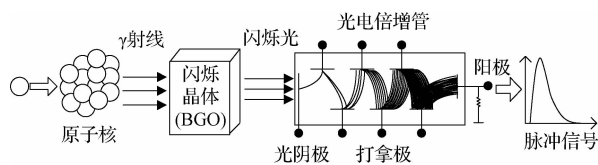


图 3 γ 探测器原理

中子进入地层后与地层中各元素相互作用,逐渐损失能量并放出 γ 射线,闪烁晶体吸收 γ 射线后发出强度对应 γ 射线能量的可见光,可见光进入光电倍增管经高倍放大后变为可测量的脉冲电信号。

2.4 采集控制系统

采集控制系统由信号预处理电路以及采集控制电路组成,采用 DSP+FPGA 构架^[10]。探测器输出的脉冲信号经过预处理电路后转化为大小合适顶端平滑的脉冲信号^[11-12],采集控制电路通过门限去掉因堆叠产生的大信号和背景噪声来筛选出有效信号。如图 4 所示,对应 γ 射线能量 0~10 MeV 的有效信号经 ADC 量化后,DSP 存储空间中对应道址计数加 1,最终累加为包含 256 个能道的能谱数据^[13-15]。电路使用 FPGA 控制中子的发射时序以及 ADC 的采集时序。DSP 采用 TI 公司 32 位定点

TMS320F2812,FPGA 采用 ACTEL 公司 A3P1000。

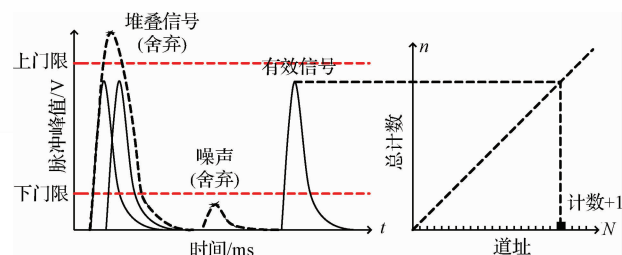


图 4 道址累加

系统通中子源的开启与关闭控制脉冲中子的时序。如图所示 5,一个中子爆发周期长 100 μs ,中子管在此期间内开启 40 μs ,关闭 60 μs ,产生对应宽度与间隔的中子脉冲,采集系统以一定的延时 t_d 对非弹性散射阶段与中子俘获阶段的脉冲进行计数累加, t_d 与仪器的具体参数有关,通过实验可测定。一个中子发射周期长 100 ms,其中包含 950 个中子爆发周期,总计 95 ms,在此时间段内采集的所有计数合并后分别获得非弹谱与俘获谱。脉冲最后 5 ms 停止发射,系统在最后 4 ms 进行测量取得背景能谱,如图 6 所示。

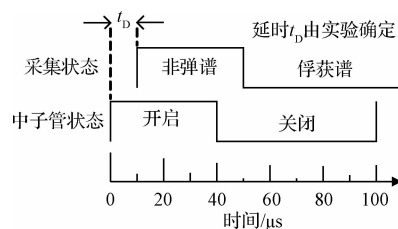


图 5 中子爆发周期

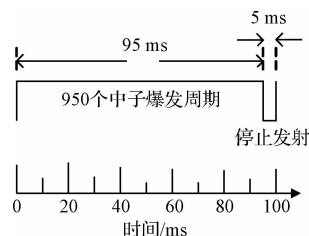


图 6 中子发射周期

对时间谱进行获取时,仅对有效脉冲的数量进行统计,将长 100 μs 的中子爆发周期的前 40 μs 按时刻分为 100 份,对应时间谱的 0~99 道,每一道的计数对 0.4 μs 内的有效脉冲总数,将 950 次的计数结果进行累加即可得到在长 100 ms 的完整中子发射周期中非弹性散射阶段的计数;同样,中子爆发周期的后 60 μs 对应中子俘获阶段的计数,在时间谱中为 100~199 道;中子发射周期的最后 4 ms 对应背景计数,在时间谱中为 200~255 道。

2.5 主控通信系统

主控通信电路采用 DSP+FPGA 构架,作用为工况监测和曼码通信。工况监测电路监测仪器在工作过程中各

路供电电压以及环境温度,并将工作状态反馈至地面。曼码电路使用 FPGA 进行编解码,采用标准曼彻斯特码,下发命令速率为 20.83 Kbps,上传数据速率为 93.75 Kbps^[16-17]。

3 工作流程

仪器工作时,地面会首先向仪器发送一个训练命令以

确定仪器通信系统是否正常工作,主控系统收到命令后会向地面系统回一串特定的字,确认通信正常后系统进入正常工作状态。在工作状态下,地面每 1 s 下发一个数据请求命令帧,主控系统收到命令后从采集系统取得上一秒内测得的所有谱数据,封装为一个 1 134 字的数据帧并上传,如图 7 所示。

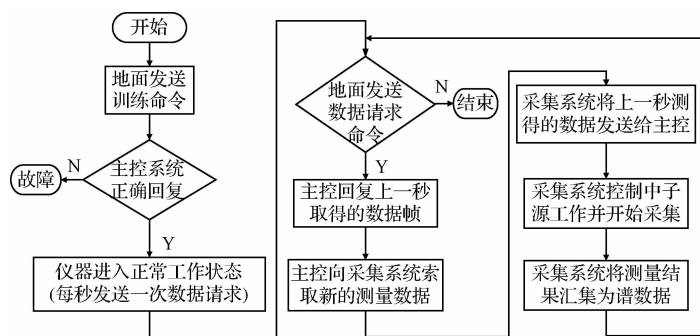


图 7 仪器工作流程

4 实测结果

对仪器进行测试时使用电缆将仪器与 ELIS 地面系统连接,通过地面系统读取测量数据。对仪器的功能进行测试。首先使用信号发生器直接对采集系统提供脉冲信号来对采集性能和成谱性能进行测试,再使用 Am-241/Be 化学源进行实验并测试。

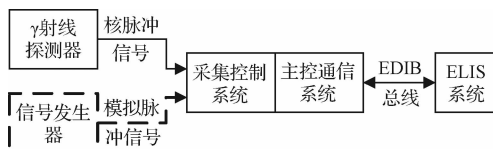


图 8 通信测试

4.1 采集性能测试

使用信号发生器产生 30 kHz 频率将脉冲信号并送入采集电路,记录不同幅值的信号被转化后的道址,之后在 150℃ 下进行一次同样测量。由表 1 和图 9 可知脉冲幅值与道址具有良好的线性关系。

表 1 幅值量化测试

输入电压/mv	50	150	250	350	450	550
常温下道址	22	66	110	154	198	242
150℃下道址	22	66	110	154	198	242

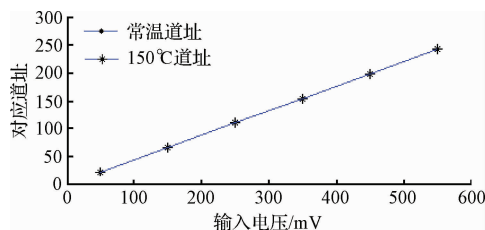


图 9 幅值量化测试

使用信号发生器将同频率的脉冲信号送入采集电路,记录 1 s 内采集到的脉冲的个数。由表 2 可知仪器并未出现错计数或漏计数的情况,计数率达 100 K/s,满足实际测井要求。

表 2 采集系统 1 s 内计数测试

信号源频率	10 K	30 K	75 K	100 K
常温计数	10 000	30 000	75 000	100 001
150℃计数	10 000	30 000	75 000	100 001

4.2 能谱与时间谱测试

使用信号发生器模拟单一能量的 γ 射线脉冲信号对仪器的成谱能力进行测试,脉冲频率为 100 kHz,系统不断发出中子源开启关闭命令,同时配合该命令进行数据采集,在长 100 ms 的中子发射周期中测的数据最终形成 4 张谱,分别为非弹谱、俘获谱、背景谱和时间谱。

能谱测试中,一个中子爆发周期中的非弹谱与俘获谱分别设置为 40 μ s 和 60 μ s,因此理论上二者的总计数比例应为 2 : 3。从图 10 可以看到,非弹谱总计数为 37 999,俘获谱总计数为 56 995,比例为 2 : 3,与理论情况一致。在 100 ms 的中子发射周期内,非弹谱占用时间为 95 ms $\times$ 0.4 = 38 ms,而背景谱时间占用时间为 4 ms,因此二者总计数比应为 19 : 2,实际背景谱总计数为 4 001,二者比例为 19 : 2,与理论情况一致。

时间谱测试中,中子发射时间、中子衰减时间、背景时间分别占 95、1 与 4 ms,理论上 3 部分的计数比应为 95 : 1 : 4。图 10 的时间谱中,1~100 道总计数对应中子发射时段的总脉冲计数;101~200 道总计数对应中子衰减时段总计数;201~220 道对应背景时段总计数,在 DSP 程序中进行统计得到 3 个阶段的总计数为 94 994 : 1 000 : 4 001 = 94.994 : 1 : 4.001,与理论值基本一致。

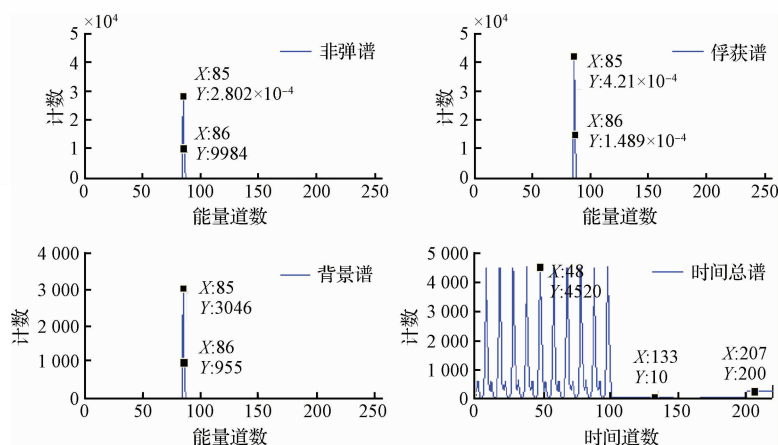


图 10 时间谱测试

时间谱1~100道不均匀的原因是所用脉冲信号为信号发生器发生的固定频率信号,并非随机信号。

4.3 实验井测试

连接地面系统,使用18居里 ^{241}Am -Be中子源进行实验井测试,各井中被测对象分别为纯水、硫、碳、二氧化硅以及碳酸钙。得到对应的全阶段 γ 能谱数据,并与表3中已知元素能窗数据进行对比。

表 3 已知地层各元素 γ 射线主要能窗

核素	主要反应	特征能窗/MeV
1H	俘获	1.950~2.500
12C	非弹	4.150~4.810
16O	非弹	5.150~6.650
32S	俘获	5.120~5.720
28Si	非弹	1.560~1.980
	俘获	3.170~4.650
40Ca	非弹	2.800~4.150
	俘获	5.320~6.800

图11~15中,横坐标代表 γ 射线能量,纵坐标代表该能道的计数占总计数的百分比。图11中可明显看到2.2 MeV的氢元素俘获峰和4.4 MeV的Am-241/Be源伴随产生的伽玛射线峰,图12中可看到5.4 MeV的硫元素俘获峰,图13经对比可看到4.4 MeV的碳元素非弹峰,图14中可看到1.7 MeV的硅元素非弹峰和3.6 MeV

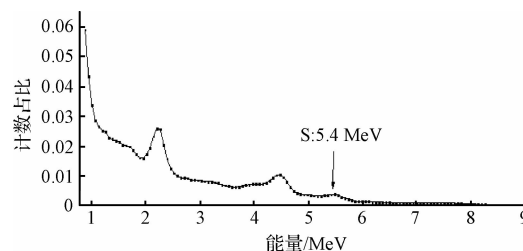


图 12 S

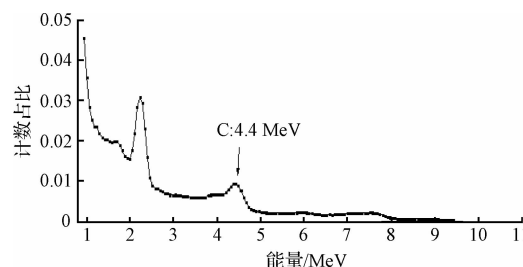
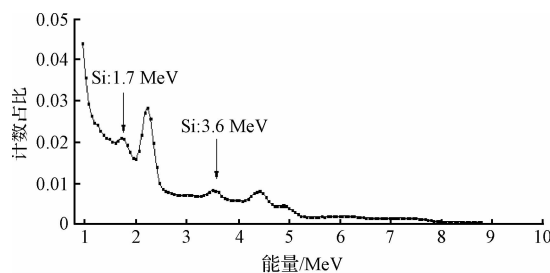
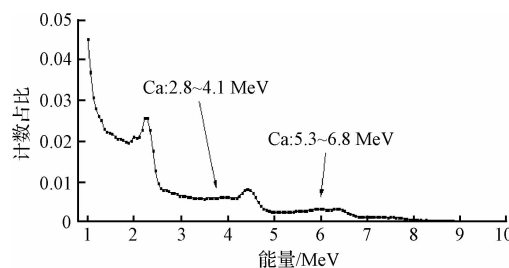
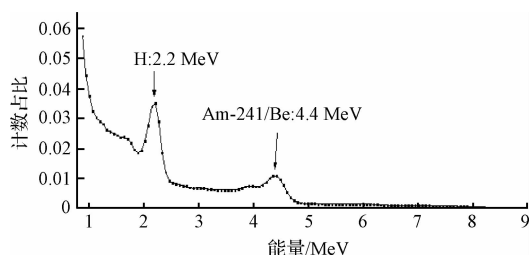


图 13 C

图 14 SiO_2 图 15 CaCO_3 图 11 H_2O

(下转第 95 页)