

doi: 10. 11720/wtyht. 2024. 2455

陈元庆, 黄清波, 刘金尧, 等. 数字化 γ 能谱测井探管研制[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 210–215. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2455>

Chen Y Q, Huang Q B, Liu J Y, et al. Development of a digital γ spectral logging probe[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 210–215. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2455>

数字化 γ 能谱测井探管研制

陈元庆, 黄清波, 刘金尧, 王先贺, 黄亮, 吴伟军

(核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050011)

摘 要: 针对铀钍混合型矿床上无法精确测量地层中铀、钍含量的问题, 本文研制了一台基于溴化铯晶体的数字化 γ 能谱测井探管。该仪器采用直径 38 mm×38 mm 的溴化铯晶体, 提高了铀灵敏度和在低铀、低钍含量矿层的探测效率。采用 C8051 单片机作为核心处理器, 对溴化铯探测器原始信号进行了滤波成形处理, 通过能谱采集器得到 γ 能谱数据。通过对 γ 能谱数据进行逆矩阵解谱, 即可得到矿层中铀、钍的精确含量。通过 RS-485 总线将 γ 能谱数据传送至测井主机。测试结果表明: 本仪器在标准铀钍混合模型上的测量准确度高, 其示值误差小于 6%, 稳定性小于 1.5%, 重复性小于 1%, 钍系 ^{208}Tl 的 2.62 MeV 能量峰漂移不超过 ± 0.3 道, 检查测井异常相对误差小于 4%, 可应用于铀矿勘查测井工作。

关键词: γ 能谱测井; 溴化铯; 逆矩阵解谱

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0210-06

0 引言

在我国, 用于计算铀矿储量的主要测井方法是 γ 总量测井法, 该方法是将地层中铀、钍和钾等 γ 放射性核素的贡献均作为铀的贡献, 计算出铀的当量含量。我国北方可地浸砂岩型铀矿^[1]一般不伴生钍, 可采用 γ 总量测井来测定铀含量。但是南方硬岩铀矿床也是我国勘查的重点类型, 其中部分属于铀钍混合型矿床。在海外铀资源勘查领域, 重点开发的纳米比亚罗辛铀矿和湖山铀矿均属于铀钍混合矿。 γ 总量测井法不能区分地层中铀钍核素的比例, 无法满足精确测量铀矿钻孔地层中铀、钍含量的要求^[2]。在铀钍混合型矿床上, 用于计算储量的铀含量是通过采集岩心后进行分析测试^[3]、对 γ 总量测井结果进行修正后获取的, 提高了生产成本。

γ 能谱测井中, 常常采用碘化钠 (NaI)、锗酸铋 (BGO) 和溴化镧 (LaBr₃) 等晶体探测器。针对碘化钠探测器能量分辨率相对不高、锗酸铋探测器能量

分辨率相对较差和受温度影响较大、溴化镧探测器存在本底干扰的问题, 本文选用了直径 38 mm×38 mm 的信号衰减时间短、分辨率比较好、自身无本底干扰的新型溴化铯 (CeBr₃) 晶体对 γ 射线进行探测, 研制了一台基于溴化铯晶体的数字化 γ 能谱测井探管。

1 数字化 γ 能谱测井探管设计方案

1.1 辐射探测器

探测器一般由闪烁晶体和光电倍增管 (PMT) 组成。 γ 射线与闪烁晶体相互作用, 使闪烁晶体中原子、分子激发, 在退激时形成闪烁光。闪烁光被光电倍增管光阴极收集后, 发出光电子, 经倍增放大后被阳极收集输出电脉冲信号^[4]。

γ 能谱测量常用的探测晶体材料, 主要有碘化钠、锗酸铋、溴化镧和溴化铯。几种晶体材料的参数对比如表 1 所示。

碘化钠信号衰减时间长、分辨率一般、受温度影响大、本底低; 锗酸铋信号衰减时间长、分辨率差、受

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 中核集团集中研发“新型关键勘查技术装备研制”(物 SD03-01)

第一作者: 陈元庆 (1982-), 男, 大学本科, 2004 年毕业于电子科技大学, 主要从事核仪器研制工作。Email: wowplayer@126.com

表 1 常见晶体材料参数
Table 1 Parameter table of crystal materials

晶体材料	光产额 /(光子/ keV)	衰减时间 /ns	密度/(g· cm ⁻³)	分辨率% /@ 662keV	温度影响系数 /(%·°C ⁻¹)
碘化钠	38	250	3.67	7~8	-0.3
溴化钷	63	35	5.29	3.5~4.5	0
锗酸铋	8~10	300	7.13	10~15	-1.2
溴化铯	68	16.8	5.1	4.5~6	0

温度影响大、本底低^[5]；溴化钷信号衰减时间短、分辨率好、基本不受温度变化影响，但溴化钷中存在的两种放射性核素¹³⁸La 和²²⁷Ac，会对天然放射性核素的测量产生影响^[6]；溴化铯信号衰减时间短、分辨率比较好、基本不受温度变化影响，不会带来本底辐射。

本仪器采用了直径 38 mm×38 mm 的溴化铯晶体。

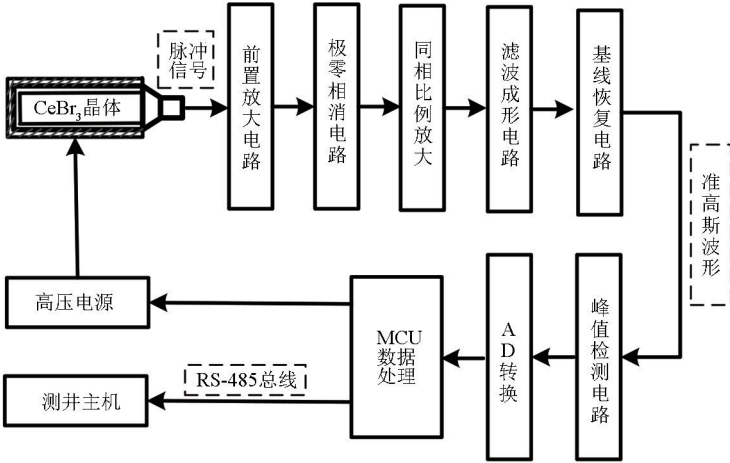


图 1 能谱采集电路框
Fig. 1 Block diagram of energy spectrum acquisition circuit

1.3 供电和通讯单元

本仪器采用 TPS54360 电源模块，其具有宽电压输入的特性(6~60 V)来保证探管正常工作。探管与测井主机之间用 RS-485 通信，采用 MAX487 芯片。该芯片拥有斜率电平变化功能，具有传输距离长和信号稳定性高的特性。

1.2 能谱采集器

能谱采集器电路框如图 1 所示，能谱采集器由前置放大电路、极零相消电路、同相比例放大电路、滤波成形电路以及多道脉冲幅度分析电路组成。 γ 射线进入溴化铯晶体后与之发生相互作用，发射出闪烁光子，这些闪烁光子经过光电倍增管的倍增之后形成电子流，从而产生脉冲信号^[7]。溴化铯探测器输出的电脉冲信号首先通过前置放大电路、主放大电路对溴化铯探测器输出的电脉冲信号进行放大、成形、滤波等处理，形成准高斯波形的脉冲信号。经过多道脉冲幅度分析电路后，脉冲信号转为数字信号，通过 MCU 对能谱数据进行逆矩阵解谱运算，得到铀、钍含量，最后通过 RS-485 总线将测井数据传输至测井主机。

1.4 γ 能谱测井仪结构设计

本文所研制的 γ 能谱测井探管的长度为 1 100 mm，外壳直径为 53 mm，质量 7.5 kg。用于固定溴化铯晶体和电路板的黄铜管壁厚 1 mm，直径为 43 mm，探管外壳采用了壁厚 3 mm 的 430 不锈钢管，仪器实物如图 2 所示。

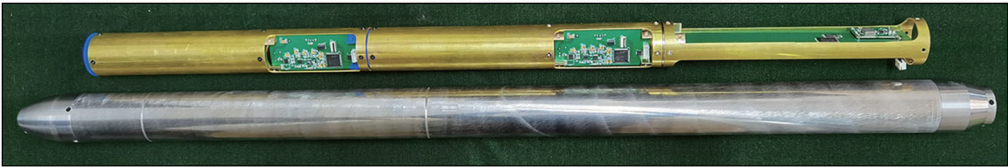


图 2 γ 能谱测井仪器实物
Fig. 2 Instrument physical picture of γ -ray spectrum logging instrument

2 稳谱和解谱算法

2.1 稳谱算法

本文采用多特征峰稳谱法,算法过程是:首先在 γ 谱中寻找并计算出钾、铀、钍 3 个特征峰的峰位;再计算出 3 个特征峰的面积、净面积以及 3 个特征峰面积的相对比值等信息;依据各个特征峰面积比值,选定稳谱特征峰;以特征峰面积为权重,以特征峰位为参考,计算出光电倍增管高压修正值;最后通过 C8051 单片机的 DAC 功能控制高压模块,修正光电倍增管高压值,完成稳谱,如图 3 所示。

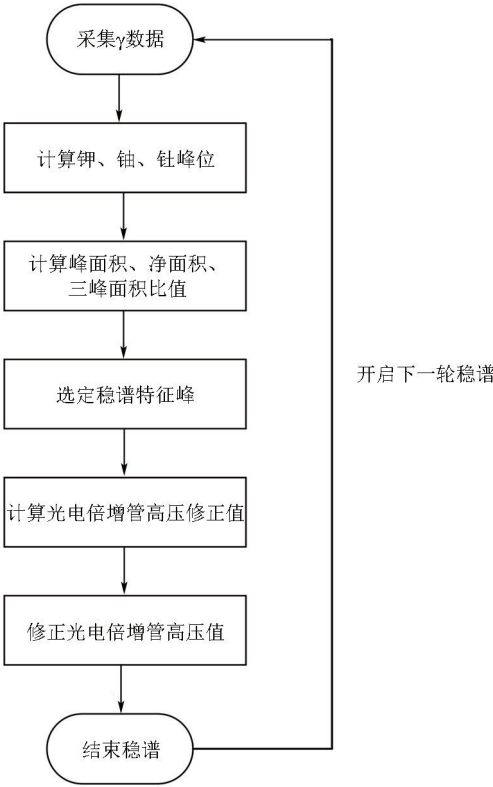


图 3 稳谱算法流程

Fig. 3 Spectrum stabilization algorithm flow

2.2 解谱算法

溴化铯晶体探测地层 γ 射线后,通过多道分析器形成 γ 谱。 γ 谱可以清晰地分辨出各核素能量峰值。要从 γ 谱中获得各个核素的含量,必须对全谱进行解析。先对谱进行预处理,包括剔除全谱的异常值、寻峰和稳谱等,最后进行解谱处理。

本仪器采用的解谱方法是逆矩阵解谱法^[8]。3 个特征能量峰区间为“能窗”,在已知各能窗计数率和灵敏度系数的条件下,基于 γ 射线在能窗内线性迭加的机理,建立线性方程组,求取钻孔地层中铀、钍和钾含量的方法,建立的线性方程组如式(1)所

示:

$$n_i = \sum_{j=1}^3 s_{ij} q_j \quad , \quad (1)$$

式中: i 为能窗的序号; j 为铀、钍和钾元素的序号; n_i 为第 i 能窗扣除本底后的净计数率, s^{-1} ; s_{ij} 为单位含量的第 j 种元素发射的 γ 射线对第 i 能窗的灵敏度系数,对于铀、钍元素,单位为 $1/(s \cdot 10^{-6})$,对于钾元素,单位为 $1/(s \cdot 10^{-2})$; q_j 为第 j 种元素的含量,单位为 $10^{-6}g/g$ (铀)、 $\times 10^{-6}g/g$ (钍)和 $\times 10^{-2}g/g$ (钾)。

式(1)的矩阵表达式如式(2)所示:

$$S \cdot Q = N \quad , \quad (2)$$

式中: S 为灵敏度系数矩阵,由 s_{ij} 组成的 $[3 \times 3]$ 矩阵; Q 为地层中铀、钍和钾的含量列式,即由 q_j 组成的 3 元素列式; N 为各能窗计数率的列式,由 n_i 组成的 3 元素列式;从式(2)中可以推导出计算钻孔地层中铀、钍和钾含量的式(3):

$$Q = S^{-1} \cdot N \quad , \quad (3)$$

逆矩阵解谱法的实施主要包括以下三步:

第一步,根据式(2),采用“灵敏度计算模型体源”的含量和各能窗计数率,计算其灵敏度系数矩阵,对灵敏度系数矩阵求逆,得到剥离系数矩阵;

第二步,根据式(3),采用“验证模型体源”的各能窗的计数率和第一步中计算出的剥离系数矩阵,计算出“验证模型体源”的主元素含量值;

第三步,计算“验证模型体源”的主元素含量的示值误差。

3 性能测试

本文研究过程中执行的依据主要是《JJG(军工)27-2012 γ 测井仪检定规程》^[9],针对数字化 γ 能谱测井探管进行测试。

3.1 稳定性测试

仪器开启稳谱后,使用 UThF-0.07-0.2-I 混合模型体源进行测试。仪器放置于混合模型体源矿层中心处;每 1 h 测量 1 组数,共测量 9 组,每次累计计数不少于 10^4 个。经测试,仪器各能窗的稳定性 $< 1.5\%$,其结果如表 2 所示。

表 2 仪器稳定性测试

Table 2 Instrument stability test

	钾窗计数	铀窗计数	钍窗计数	总计数
9 组平均值	34846.33	94479.56	16790.11	2681818.33
相对标准偏差/%	0.55	0.60	0.77	0.29
最大偏差/%	1.09	1.02	1.37	0.46

3.2 重复性测试

仪器开启稳谱后,使用 UThF-0. 2-0. 07-I 混合模型体源进行测试,仪器放置于混合模型体源矿层中心处;测量次数不少于 10 次,每次测量时间不少于 600 s,每次累计计数不少于 10^4 个。经测试,仪器在混合模型体源 UThF-0. 2-0. 07-I 上各能窗的重复性 <1%,其结果如表 3 所示。

表 3 仪器重复性测试
Table 3 Instrument repeatability test

	钾窗计数 率/s ⁻¹	铀窗计数 率/s ⁻¹	钍窗计数 率/s ⁻¹	总计数率/ s ⁻¹
10 组平均值	206. 57	604. 39	26. 01	15850. 82
均方差	0. 66	1. 31	0. 20	31. 56
重复性	0. 32%	0. 22%	0. 76%	0. 20%

3.3 稳谱效果测试

仪器开启稳谱后,逐渐增温或降温,温度变化梯度不大于 10 ℃/h。在此期间,探管持续工作,每组数据的测量时间不小于 600 s。每间隔 5 ℃ 选取一组数据,计算钍系 ^{208}Tl 的 2. 62 MeV 能量峰位,取其中最大和最小两组数据与所有抽取测量数据的平均值进行比较。经测试,钍系 ^{208}Tl 的 2. 62 MeV 能量峰漂移不超过 $\pm 0. 3$ 道,如表 4 所示。

表 4 仪器稳谱效果测试
Table 4 Instrument spectrum stabilization effect test

序号	温度/℃	光电倍增管高压/V	^{208}Tl 峰位/道
1	-5. 2	528. 6	429. 8
2	0. 2	529. 6	429. 9
3	5. 0	529. 7	429. 7
4	10. 3	530. 1	429. 8
5	14. 5	530. 1	429. 9
6	20. 6	531. 1	429. 9
7	26. 0	532. 1	430. 1
8	30. 8	534. 2	430. 0
9	35. 0	536. 1	430. 1
10	41. 1	539. 6	430. 1
11	45. 2	543. 9	430. 0
12	50. 5	550. 0	430. 0
13	54. 6	557. 6	430. 1
14	60. 4	570. 6	430. 0
15	64. 8	587. 0	430. 1
16	70. 4	617. 4	430. 1
17	74. 5	638. 6	430. 0
18	80. 1	662. 4	430. 1

3.4 示值误差测试

仪器开启稳谱后,利用核工业放射性勘查计量站内的模型体源,采用逆矩阵解谱法,计算其剥离系数矩阵,并在混合模型体源上验证测试结果。

选择 F-0-I、KF-6-I、UF-0. 2-I、ThF-0. 3-I、UThF-

0. 01-0. 03-I、UThF-0. 2-0. 07-I 和 UThF-0. 07-0. 2-I 共 7 个模型体源,对仪器分别进行测量,每个模型体源测量十组数据,每组数据测量时间为 60 s,测量数据见表 5。

表 5 模型体源测量数据记录

Table 5 Record of measurement data from model sources

模型	钾窗 计数	铀窗 计数	钍窗 计数	总计数	测量时间/s
F-0-I	0. 60	1. 20	0. 11	33. 03	1
KF-6-I	4. 34	5. 60	0. 17	108. 64	1
UF-0. 2-I	193. 67	581. 01	7. 55	15712. 50	1
ThF-0. 3-I	90. 78	213. 20	81. 25	8835. 31	1
UThF-0. 01-0. 03-I	18. 65	48. 50	9. 40	1594. 65	1
UThF-0. 2-0. 07-I	207. 81	604. 34	26. 65	17222. 86	1
UThF-0. 07-0. 2-I	115. 65	314. 02	55. 12	10465. 10	1

采用铀模型体源 UF-0. 2-I、钍模型体源 ThF-0. 3-I、钾模型体源 KF-6-I 和本底模型体源 F-0-I 来计算剥离系数矩阵,其中本底模型体源用来扣除相应的本底计数率和含量。验证模型体源采用混合模型体源 UThF-0. 2-0. 07-I、UThF-0. 07-0. 2-I 和 UThF-0. 01-0. 03-I。

依据上述的解谱计算方法,基于选定的模型体源和能窗方案,利用逆矩阵解谱法,本仪器在 3 个混合模型体源中测量的铀和钍元素的示值误差均小于 6%,其计算结果如表 6 所示。

表 6 示值误差测试

Table 6 Indication error test

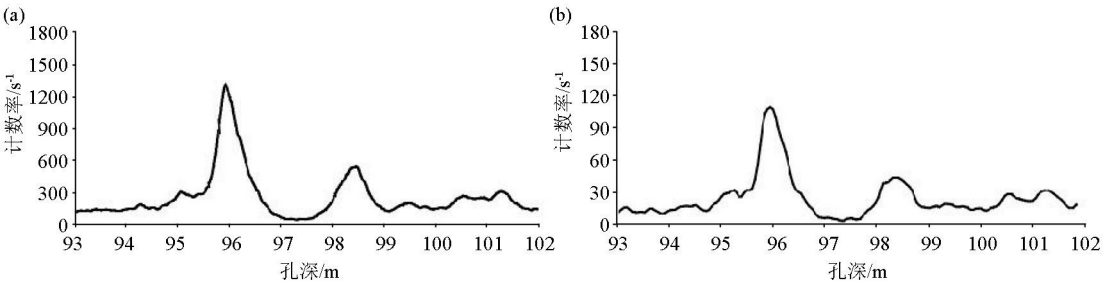
模型体源	核素	标称值/ ($10^{-6}\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	测量值/ ($10^{-6}\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	示值误差/%
UThF-0. 01-0. 03-I	铀	99	98. 54	-0. 46
	钍	322	337. 40	4. 78
UThF-0. 2-0. 07-I	铀	2050	2168. 70	5. 79
	钍	712	741. 79	4. 18
UThF-0. 07-0. 2-I	铀	693	717. 08	3. 47
	钍	1969	1968. 61	-0. 02

3.5 野外测井试验

在内蒙古苏尼特左旗进行了 γ 能谱测井试验,采用连续测量,探管提升速度为 3 m/min,以 10 cm 间隔记录 512 道全谱数据。

图 4 为 BC1002 钻孔中 FD-3019 γ 测井仪和数字化 γ 能谱测井探管测得的测井曲线。FD-3019 反映的是 γ 总计数曲线,数字化 γ 能谱测井探管反映了 U 窗计数曲线,可见两种仪器的测量曲线形态符合良好。

数字化 γ 能谱测井探管解释结果与 FD-3019 解释结果做对比,从表 7 可见,两种仪器在铀异常段测得米百分数相对误差小于 4%。



a—FD-3019 总计数测井曲线;b—数字化 γ 能谱测井探管 U 窗测井曲线
a—FD-3019 total count logging curve; b—U-window logging curve of digital gamma-ray spectrum logging probe

图 4 钻孔 BC1002 测井曲线

Fig. 4 Logging curve of bore hole BC1002

表 7 分层解释结果

Table 7 Layer interpretation result

井孔编号	起始深度/m	结束深度/m	厚度/m	平米铀量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)		相对误差/%
				FD-3019	数字化 γ 能谱测井探管	
BC1002	95.05	102.05	7.0	0.01329	0.01283	-3.5
BC4802	90.65	92.35	1.7	1.4934	1.4635	-2.0
WTZK491-157	89.55	97.85	8.3	2.0665	2.0356	-1.5

4 结论

针对目前在铀钍混合型矿床上的测井需求,研制了一台数字化 γ 能谱测井探管。该仪器采用直径 38 mm×38 mm 溴化铯晶体来提高铀灵敏度,对溴化铯晶体、能谱采集器和解谱方法进行了研究,解决了在中国南方和纳米比亚铀钍混合型矿床上无法精确测量地层中铀、钍含量的问题,减少了岩心采样和分析测试工作,节约了生产经费,提升了测井工作效率,降低了生产时间成本。

测试结果表明:本仪器在标准铀钍混合模型上的测量准确度高,其示值误差小于 6%,稳定性小于 1.5%,重复性小于 1%,钍系 ^{208}Tl 的 2.62MeV 能量峰漂移不超过±0.3 道,检查测井异常相对误差小于 4%,可应用于铀矿勘查测井工作。

参考文献 (References) :

[1] 杨玉勤,张翔,石连成,等. 砂岩型铀矿航磁微弱异常提取方法[J]. 物探与化探,2021,45(1):29-36.
Yang Y Q,Zhang X,Shi L C,et al. A study of the method of extracting aeromagnetic weak anomalies from sandstone-type uranium deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(1):29-36.

[2] 杨再超. 自然伽马能谱测井应用研究[J]. 电脑知识与技术,2016,12(14):234-235.
Yang Z C. Study on application of natural gamma-ray spectrometry logging[J]. Computer Knowledge and Technology,2016,12(14):234-235.

[3] 张金带,李子颖,蔡煜琦,等. 全国铀矿资源潜力评价工作进展

与主要成果[J]. 铀矿地质,2012,28(6):321-326.

Zhang J D,Li Z Y,Cai Y Q,et al. The main advance and achievements in the potential evaluation of uranium resource in China[J]. Uranium Geology,2012,28(6):321-326.

[4] 陈凯,阳正勇,周荣辉,等. 阿尔布拉格地区地面伽马能谱特征及与铀成矿关系分析研究[J]. 物探与化探,2018,42(4):703-707.

Chen K,Yang Z Y,Zhou R H,et al. The ground gamma energy spectrum in Aerbulage area and its relationship with uranium mineralization[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):703-707.

[5] 汤彬. 核辐射测量原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.

Tang B. Principle of nuclear radiation measurement[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press,2011.

[6] 甘霖. LaBr_3 探测器本底扣除方法研究及软件设计[D]. 成都:成都理工大学,2015.

Gan L. Background deduction method research and software design in LaBr_3 γ energy spectrum[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2015.

[7] 周倩倩,侯越云,梁珺成,等. 一种新型溴化铯闪烁体探测器性能研究[J]. 原子能科学技术,2018,52(2):371-377.

Zhou Q Q,Hou Y Y,Liang J C,et al. Study on performance of a novel CeBr_3 scintillator detector[J]. Atomic Energy Science and Technology,2018,52(2):371-377.

[8] 李传伟,廖琪梅,李安宗,等. 自然伽马能谱解谱方法研究[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(4):796-800.

Li C W,Liao Q M,Li A Z,et al. Study on the methods of spectrum skipping for spectrum gamma logging[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology,2008,28(4):796-800.

[9] 国防科技工业 1313 二级计量站. JJG(军工)27-2012 γ 测井仪检定规程[S].

National Defense Technology Industry 1313 Secondary Measure-

ment Station. JJG (Military Industry) 27-2012 γ Verification Reg-
ulation for Logging Tools [S].

Development of a digital γ spectral logging probe

CHEN Yuan-Qing, HUANG Qing-Bo, LIU Jin-Yao, WANG Xian-He, HUANG Liang, WU Wei-Jun
(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: Given that it is difficult to accurately determine the uranium and thorium contents in the strata of uranium-thorium mixed deposits, this study developed a digital γ spectrum logging probe based on cerium tribromide (CeBr₃) crystals. Using CeBr₃ crystals with a diameter of 38 mm×38 mm, the logging probe improved the sensitivity to uranium and the detection efficiency of ore beds with low uranium and thorium contents. The logging probe operated as follows. First, the original signals from the CeBr₃ detector were filtered and shaped using the C8051 single-chip microcomputer as the core processor. Then, the γ spectrum data were obtained using the energy spectrum collector. After the spectrum unfolding based on the inverse matrix is performed for the γ spectrum data, precise uranium and thorium contents in the ore beds were obtained. Finally, the γ spectrum data were transmitted to the host computer for logging through the RS-485 bus. The results show that the logging probe had high measurement accuracy in the standard uranium-thorium mixed model, with indication errors of less than 6%, stability of less than 1. 5%, and repeatability of less than 1%. Moreover, the 2. 62 MeV energy peak drift of thorium ²⁰⁸Tl did not exceed ±0. 3 channels, and the relative errors of log anomalies were less than 4%. Therefore, the digital γ spectrum logging probe proposed in this study is applicable to the exploration and logging of uranium deposits.

Key words: γ spectral log; cerium bromide; spectrum unfolding based on the inverse matrix

(本文编辑:王萌)