铀矿定量γ能谱测井规范

目 录

[前 言 1](#_Toc2511)

[1 适用范围 2](#_Toc1855)

[2 引用文件 2](#_Toc17147)

[3 术语和定义 2](#_Toc32530)

[3.1 γ能谱测井 2](#_Toc6809)

[3.2 饱和模型体源 2](#_Toc16268)

[3.3 换算系数 3](#_Toc30024)

[3.4 剥离系数 3](#_Toc1222)

[3.5 饱和计数率 3](#_Toc10472)

[3.6 特征参数(α) 3](#_Toc22176)

[3.7 套管及井液修正系数 3](#_Toc2384)

[4 仪器性能检查及校准 4](#_Toc24356)

[4.1 仪器性能要求 4](#_Toc28592)

[4.2 仪器性能检查 4](#_Toc13544)

[5 测井工作方法 6](#_Toc14810)

[5.1 测井准备 6](#_Toc16806)

[5.2 仪器检查 6](#_Toc26894)

[5.3 钻孔冲洗 6](#_Toc28255)

[5.4 测井方式 7](#_Toc1027)

[5.5 回程差 7](#_Toc18880)

[6 测井数据处理 7](#_Toc15928)

[6.1 测井原始数据预处理 7](#_Toc17072)

[6.2 放射性元素定量解释 8](#_Toc14040)

[6.3 铀含量影响因素修正 10](#_Toc8225)

[7 质量控制 11](#_Toc29621)

[7.1 重复测井 11](#_Toc26783)

[7.2 检查测井 12](#_Toc8484)

[7.3 测井结果验证 13](#_Toc16183)

[8 仪器维护与安全防护 14](#_Toc9673)

[8.1 仪器维护 14](#_Toc10405)

[8.2 安全防护 14](#_Toc20871)

[附录A UGSL-2型 γ能谱测井仪钍、铀、钾含量换算系数 15](#_Toc753)

[附录B UGSL-2型γ能谱测井仪水层吸收系数 15](#_Toc26932)

[附录C UGSL-2型γ能谱测井仪铁套管吸收系数 15](#_Toc2778)

[附录D 换算系数求法 17](#_Toc7368)

[附录E 剥离系数求法 18](#_Toc26056)

[附录F 换算系数与剥离系数验证方法 18](#_Toc9244)

[附录G 套管及井液修正系数 18](#_Toc7193)

[参考文献 19](#_Toc24172)

前 言

目前国内外伽马能谱测井主要为定性测量，因此无定量测量规范可循。随着伽马能谱测井技术的快速发展以及实际应用需求，有必要制定和推广定量γ能谱测井规范，对促进我国铀资源领域技术发展具有现实作用。

本标准提出单位：中国广核集团有限公司

本标准归口单位：中国能源研究会核能专业委员会

本标准起草单位：中国广核集团铀矿采冶技术研发中心，东华理工大学，核工业航测遥感中心

本标准主要起草人：郝金龙，汤彬，董文明，刘志锋，王海涛，陈宁，张积运，邓洪泽，荣建锋

# 适用范围

本标准规定了γ能谱测井的仪器性能、校准方法、测量方法、测井资料处理、铀含量影响因素修正、质量控制、仪器维护和安全防护等基本要求。

本标准适用于放射性元素钍、铀、钾的γ能谱测井及其含量的定量解释。

# 引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是标注日期的引用文件，其后所有的修订版均不适用于本标准。

EJ/T 611 γ测井规范

EJ/T 20183 γ能谱测井规范

JJG27 γ测井仪检定规程

EJ/T 363 地面γ能谱测量规范

DZ/T 0199 铀矿地质勘查规范

EJ/T 1157 地浸砂岩型铀矿地质勘查规范

# 术语和定义

本标准采用下列术语和定义。

## γ能谱测井

根据放射性核素的γ射线能量差异，利用γ能谱测井仪器测定岩石中的放射性钍、铀、钾元素含量及铀当量含量的一种测井方法。

## 饱**和模型体源**

能模拟在水平方向和垂直方向无限延伸均匀辐射介质所形成的天然辐射特征的放射性标准物质。根据所含主元素不同，分为铀模型体源、钍模型体源、钾模型体源和混合模型体源。

## 换算系数

换算系数表示单位含量的放射性核素（铀、钍、钾）的特征能量的γ射线在特定能量区间产生的计数率。表征测量得到的伽马计数率与测量目标体含量之间的换算关系。

本标准推荐的特定能区（以下简称为谱段）必须包括钍、铀、钾元素的特征能量峰，其中受地层散射射线影响较大的低能区（≤0.4MeV）不列入用于定量解释的谱段，本标准推荐的谱段如下：

钍谱段的能量范围必须覆盖钍系2.62MeV的主特征峰：0.4MeV ～2.8MeV；

铀谱段的能量范围必须覆盖铀系1.76MeV的主特征峰：0.4MeV ～1.9MeV；

钾谱段的能量范围必须覆盖钾1.46MeV的主特征峰：0.4MeV ～1.6MeV。

## 剥离系数

本标准将待定量的放射性元素称为主元素，所对应谱段称为主谱段；需剥离的放射性元素称为辅元素，所对应谱段称为辅谱段。

剥离系数表示辅元素在其辅谱段产生的计数率与其在主谱段产生的计数率之比，亦称为辅元素在主谱段的贡献率。

## 饱和计数率

在分层解释中，饱和计数率的物理含义为：采用铀/钍/钾元素含量为)的岩石构建饱和矿层，该矿层中心点的计数率则为饱和计数率。

## 特征参数(α)

表示单位吸收层厚度对γ照射量率衰减的百分数，通常与探头结构、钻孔条件和地层环境等参数有关，单位为每米，（1/m）；

## 套管及井液修正系数

套管及井液修正系数是指钻孔套管壁及井液对核素谱线吸收影响的修正系数，常用套管有铁质的和PVC的、井液吸收层通常有水或泥浆。

# 仪器性能检查及校准

## 仪器性能要求

γ射线的能量范围：60keV～3MeV。

NaI(TI)晶体探测器能量分辨率：≤7.8%（对137Cs源的662 keV全能峰）。

LaBr3(Ce)晶体探测器能量分辨率：≤4.5%（对137Cs源的662 keV全能峰）。

数字脉冲幅度分析器道数：≥256道。

测井速度：矿段测速2～4m/min，非矿段测速≤10m/min，下井测速≤10m/min。

铀含量测量范围：0.005%~0.5%（NaI(TI)晶体），0.01%~5%（LaBr3(Ce)晶体）。

能量非线性：＜0.5%。

工作温度：0℃～+50℃。

湿度：20%RH～95%RH。

## 仪器性能检查

### 稳定性检查

#### 短期稳定性

γ能谱测井仪在饱和模型或检查验证孔中连续测试8h，所测量的Th、U、K谱段计数率的相对误差均小于5％(每组测量数据不少于30个，组间时间间隔不小于30min)，相对误差按式(1)计算：

 (1)

式中：

——Th、U、K谱段计数率的相对误差，%；

——第i组的Th、U、K谱段计数率各自的平均值，单位均为s-1；

——第1组的Th、U、K谱段计数率各自的平均值，单位均为s-1。

#### 长期稳定性

γ能谱测井仪工作前、工作后应在检查短期稳定性的饱和模型或检查验证孔中进行长期稳定性检查。每一次检查测量，至少应分别读取Th、U、K谱段5组计数率。仪器长期稳定性的相对误差均不大于5%，否则该仪器应重新校准，符合要求后，方可投入使用。相对误差按式(2)计算：

 (2)

式中：

——Th、U、K含量相对误差，%；

——第j次的Th、U、K谱段计数率各自的平均值，单位均为s-1；

——γ能谱测井仪年度使用前第一次短期稳定性检查8组Th、U、K谱段计数率各自的平均值，单位均为s-1。

### 准确性检查

γ能谱测井仪校准后，通过混合模型测量的钍、铀、钾含量与其标准含量的相对误差均不大于5％，相对误差按式(3)计算：

 (3)

式中：

——测量值的相对误差，%；

——测井仪在混合模型中测量的钍、铀、钾含量，单位均为%；

——混合模型的标准钍、铀、钾含量，单位均为%。

### 一致性检查

在同一工作区块使用两台或两台以上仪器工作时，必须作一致性检查，检查应在相同测量条件下进行。通常多台仪器按同一混合模型进行测量，其中任意两台仪器测量值的相对误差应不大于5％，相对误差按式(4)和式(5)计算：

 (4)

 (5)

式中：

——钍、铀、钾测量相对误差，%；

——任意两台仪器的测量值，单位均为%；

——多台仪器测量值的平均值，单位均为%；

——同一区块工作仪器的台数。

# 测井工作方法

## 测井准备

在测井之前，钻探人员应及时清理测井场地，使钻台前应有足够可以停靠测井车的开阔场地，且周边环境不影响测井及车辆进出。在测井期间，钻机必须留在原地，并留有值班人员。

测井人员得到测井通知后，应按时到达井场，详细了解钻孔情况及矿化位置，并准备仪器设备，确认仪器处于正常工作状态后开始测井。

## 仪器检查

在每天测井工作之前后，应进行仪器稳定性检查，检查合格后方可正式开展工作，并认为当天所测数据可靠有效。

## 钻孔冲洗

测井前用无放射性的井液进行冲孔，当排出的井液γ当量铀含量不超过0.005%时，方可进行测井。

如果钻孔中有井液，在测井前需要测量井液的密度，最大测量允许误差为0.1g/cm3，同时记录井液深度，以便在进行数据处理时进行井液影响修正。

对于干式钻进的钻孔，测井时可以免冲孔。

## 测井方式

测井探管在下放过程中应连续监测孔内矿化情况并进行记录；正常测量时，应自下而上连续测量。其中，探管下放速度≤10m/min，探管下放至井底后，应立即上提0.1m～0.3m；探管提升测量时，矿段测速为2～4m/min，非矿段测速≤10m/min；数据采集间距≤0.10m。

测井速度应保持匀速，速度变化不大于5%。测井探管在下放接近井底和上提接近井口时应放慢速度。

## 回程差

在测井过程中，要监测回程差，累计误差超过0.1%时，应查明原因，必要时应重新测井。

# 测井数据处理

## 测井原始数据预处理

### 死时间修正

伽马能谱测井原始数据必须进行死时间修正，死时间修正公式：

（6）

式中：

——测井原始计数率，s-1；

——修正后的计数率，s-1；

——仪器死时间，μs。

### 仪器本底扣除

在进行计数率修正及数据解释前，每个测点各个谱段均须减去仪器本底计数率，方可进行后续定量解释。减去仪器本底后的计数率按式(7)计算：

 (7)

式中：

——第i个谱段、第j个测点的测量计数率，s-1；

——前述测得的仪器本底计数率，s-1；

——第i个谱段、第j个减去本底后的测量计数率，s-1。

### 套管及井液层修正

在扣除仪器本底后，应对具有套管及井液吸收层的谱段计数率进行修正，其修正后的计数率按式(8)计算：

 () (8)

式中：

——修正前各测点各谱段的计数率，s-1；

——修正后各测点各谱段的计数率，s-1；

——k元素*i*谱段P吸收层（套管或井液）的修正系数，无量纲。

## 放射性元素定量解释

数据预处理后，方可进行放射性元素的定量解释，该标准定量解释方法用分层解释法。

分层解释是将异常段划分为数个厚度（视厚度）为0.1m的单元层，并解释出异常段内每个单元层的放射性元素含量，按其变化规律确定出矿层（矿体）。下面主要介绍反褶积分层解释法。

### 反褶积法

#### 饱和计数率计算

对钻孔中的放射性矿层进行定量解释时，首先求得任一测点的饱和计数率,其中饱和计数率的可按照以下三点式、五点式或者七点式反褶积公式计算。

1. **三点式反褶积法计算公式：**

 (9)

1. **五点式反褶积法计算公式：**

 (10)

1. **七点式反褶积法计算公式：**

 (11)

式中：

——第i个谱段、第j个测点的饱和计数率；

——测点间距，单位cm，默认10cm；

——第i个谱段的特征参数，单位cm-1，按以下流程计算（图1）。



**图1 αi计算流程图**

 (12)

 (13)

——矿层本底，单位s-1；

E——相对判别因子，由用户给定，砂岩铀矿取值范围为[-2%,-1%]，硬岩铀矿取值范围为[-3%,-2%]。

#### 单元层含量计算

在求得饱和计数率之后，按式(14)的方程组计算任一单元层内放射性元素含量。

 (14)

式中：

Qk（Zj）——第k种放射性元素在钻孔深度Zj处所产生的饱和计数率；

qk（Zj）——钻孔深度Zj处的单元层内第k种放射性元素的含量；

——换算系数（i=k），可通过标准模型求取；

——剥离系数（i≠k），可通过标准模型求取；

上标k——第k种元素（分别为Th，U，K元素）；

下标i——第i种谱段（分别为Th，U，K谱段）。

### 矿层含量计算

矿层含量按式(15)计算：

 (15)

式中，

——矿层含量，单位为%；

——单元层含量，单位为%；

——单元层厚度，单位为m；

——矿层厚度，单位为m。

## 铀含量影响因素修正

测井解释的铀含量需要进行铀镭平衡系数、射气系数及湿度修正，修正后的铀含量按式(16)计算：

 (16)

式中：

——修正前铀含量，单位为% ；

——修正后铀含量，单位为% ；

——铀镭平衡系数；

——射气系数，%；

——矿石湿度，%。

# 质量控制

## 重复测井

### 基本要求

1. 基本测井结束后应由同一操作员使用同一台仪器进行第二次测井。
2. 铀含量不低于0.01%，且矿化厚度(或视厚度)不小于0.7m，重复测井钻孔数量应不少于总矿化孔数量的10％。

### 误差要求

当铀含量[0.01%，0.03%）时，重复测井相对偏差应不超过10％。

当铀含量≥0.03% 时，重复测井相对偏差应不超过5％。

重复测井相对偏差按式(17)计算：

 (17)

式中：

——基本测井异常面积或线储量，m·% ；

——重复测井异常面积或线储量，m·%；

——重复测井异常面积或线储量的相对偏差，%。

1. 重复测井的合格率按式(18)计算：

 (18)

式中：

——重复测井相对偏差符合要求的单矿段数量；

*B*——符合重复测井要求的总矿段数量；

——单矿段重复测井的合格率，%。

## 检查测井

如果发现测量结果有疑问时，则必须进行检查测量，测量技术条件应保持不变。

### 检查方法

检查测井应使用不同仪器、不同人员进行全孔测量。检查测井的钻孔数量应不小于钻孔总数的5％，并选择有代表性的矿化孔进行测量。

### 质量要求

1. 含量不小于0.01%，且矿化厚度(或视厚度)不小于0.7m，检查测井异常面积或米百分值相对误差应不超过10％，矿段检查测井的合格率应不小于80％。
2. 检查测井相对偏差按式(19)计算：

 (19)

式中：

——基本测井异常面积或米百分值，m·% ；

——检查测井异常面积或米百分值，m·%；

——检查测井相对偏差，%。

1. 检查测井的合格率按式(20)计算：

 (20)

式中：

——检查测井相对偏差符合要求的矿段数量；

——检查测井矿段总数量；

——矿段检查测井的合格率，%。

## 测井结果验证

通常取含矿岩心样化学分析结果进行对比，目的是检查测井质量和验证测井效果。

### 矿心取样对比要求

用于对比的矿心应具有代表性，其采取率应不小于85％，要求矿心中铀无溶蚀淋滤现象。对比的矿段数量应不小于总矿段数量的10％，对比矿心累计长度应不小于50m。对比系统误差按式(21)计算：

 (21)

式中：

——γ能谱测井解释修正后的单矿段测量值，单位分别为%U，%Th，%K；

——γ能谱测井解释修正后的单矿段厚度值，m；

——矿心取样分析的单矿段含量值，单位分别为%U，%Th，%K；

——经矿段采取率修正后的单矿段厚度值，m；

——矿心取样对比系统误差值。

### 对比系统误差要求

当核素（U、Th、K）矿化岩心的f0值在0.9～1.1之间时，γ能谱测井质量合格，否则应增加取样数量。当已达到规定取样数量上限时，f0值仍超过规定要求时，则应找出超差原因。

# 仪器维护与安全防护

## 仪器维护

仪器设备必须按照其操作说明书及相关标准进行维护。

每天工作前和工作后，必须对仪器进行灵敏度检查，并用该数据进行仪器长期稳定性检查。

测井过程中，操作员应认真观察测井仪器设备的运行状况，发现异常情况应及时处理。

当测井仪更换光电倍增管、晶体等重要元器件后会引起仪器灵敏度变化，应重新标定仪器，并进行短期稳定性检查。

长期不使用的仪器应存放在专门仪器库中，而且每隔三个月通电检查一次。

## 安全防护

测井现场应具备安全保障措施，否则不应开展测井工作。

凡从事测井作业的人员应经过测井技术培训，并取得健康、安全和环保培训合格证书。

测井操作员在标定仪器以及工作时，应佩戴个人辐射计量仪，以便监测个人受辐射情况。

测井车内应配备二氧化碳气体灭火器，并且在有效期内。

在测井过程中遇有雷电出现时，应暂停测井，等雷电不再出现时，再恢复正常测井工作。

在露天开采铀矿爆破区块附近作业时，在爆破30 min前，应将测井人员及仪器设备撤离到安全场所。

# 附录A UGSL-2型 γ能谱测井仪钍、铀、钾含量换算系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **仪器型号** | **在饱和模型上测得的含量换算系数** | | |
| s-1/0.01%U | s-1/0.01%Th | s-1/%K |
| UGSL-2 | 4.3 | 1.9 | 11.9 |
| 注：该仪器为LaBr3(Ce)晶体探测器。 | | | |

# 附录B UGSL-2型γ能谱测井仪水层吸收系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **能段/水层厚度(mm)** | **25** | **35** | **45** | **60** |
| 全能段吸收系数(%) | 15.47 | 18.85 | 20.47 | 24.62 |
| Th能段吸收系数(%) | 16.01 | 19.26 | 21.25 | 24.97 |
| U能段吸收系数(%) | 16.00 | 19.30 | 21.25 | 24.97 |
| K能段吸收系数(%) | 15.96 | 19.26 | 21.19 | 24.85 |
| 注：该仪器为LaBr3(Ce)晶体探测器。 | | | | |

# **附录C UGSL-2型γ能谱测井仪铁套管吸收系数**

**图2 UGSL-2测井仪铁套管吸收曲线（总量）**

**图3 UGSL-2测井仪铁套管吸收曲线（Th能段）**

**图4 UGSL-2测井仪铁套管吸收曲线（U能段）**

**图5 UGSL-2测井仪铁套管吸收曲线（K能段）**

# **附录D 换算系数求法**

标准模型是校准γ能谱测井仪器的计量装置。γ能谱测井仪每年投入使用前应在标准模型上进行校准，并由具有资质的计量部门出具校准证书。校准时间间隔不超过12个月。

求取时，采用零值模型（或者悬浮在宽阔水域中，水面和水底距探头至少3m）测量各谱段的仪器本底计数率，分别采用钍、铀、钾的模型测量仪器各谱段的计数率，换算系数按(22)式计算：

 (22)

上式中的钍、铀、钾模型中的辅元素含量和零值含量均可忽略不计。

式中:

上标k——表示Th、U、K元素；

下标i——表示Th、U、K谱段；

——第个谱段的仪器本底计数率，s-1；

——标准模型的中心测点；

——模型中的对应元素的含量，%。

# **附录E 剥离系数求法**

根据剥离系数的定义，采用校准换算系数相同的模型，按式(23)求得辅元素()对主谱段()的剥离系数：

 (23)

式中:

上标k——表示Th、U、K元素；

下标i——表示Th、U、K谱段；

、——在零值模型上测得的对应谱段的仪器本底。

# **附录F 换算系数与剥离系数验证方法**

可用混合模型检验换算系数与剥离系数的可靠性，将混合模型的各放射性元素含量、求取的换算系数与剥谱系数代入式(24)，得到各谱段的计算计数率：

 (24)

在混合模型中测量各谱段的计数率，其测量计数率与式(24)的计算计数率的相对误差均不大于5％，相对误差按式(25)计算：

 (25)

式(9)和式(10)中：

——不同谱段根据已经混合模型换算出来的计数率，s-1；

——不同谱段在混合模型上的测量计数率，s-1；

——计算的相对误差。

# **附录G 套管及井液修正系数**

钻孔套管（铁质或PVC等）、井液（水或泥浆）等吸收层修正系数按式(26) 计算：

 (26)

式中：

——套管及井液吸收层厚度，单位为mm，其中空气吸收层厚度对修正系数影响忽略不计；

通过不同材质、不同厚度套管及井液吸收层，测量对应的～曲线，查该曲线得到修正系数值；

——第*i*个谱段第P种吸收层（套管或井液）的修正系数，无量纲。

# **参考文献**

[1] 汤彬. γ测井分层解释法[M]. 北京:原子能出版社, 1993.

[2] 汤彬, 乐仁昌, 周蓉生, 刘玲, 周书民. 一种新的伽玛能谱测井定量解释方法研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2):594-597.

[3] 汤彬, 王仁波, 吴永鹏. 基于LaBr3(Ce)晶体的多道γ能谱测井仪[Z]. 中国发明专利:201110068619.2, 2011.

[4] 汤彬, 王海涛, 陈锐，黄凡，张积运，张雄杰，刘志锋，王仁波，周书民，管少斌，瞿金辉. 融合自然γ能谱与中子时间谱的铀矿测井刻度参数求法[Z]. 中国发明专利: 201810516711.2, 2018.

[5] 汤彬, 王海涛, 陈锐，黄凡，张雄杰，刘志锋，王仁波，张积运，周书民，管少斌，瞿金辉. 融合瞬发中子时间谱修正自然γ总量的铀矿测井定量方法[Z]. 中国发明专利: 201810076976.5, 2018.

[6] 汤彬. 钻孔γ场理论与核测井分层解释方法研究与应用[D]. 成都:成都理工大学博士论文, 2008.

[7] 王仁波，王海涛，刘志锋，黄凡，汤彬. 湖山铀矿放射性能谱测井系统研究——新型γ能谱测井系统研制》项目成果报告[R]. 2019.