

# 基于CeBr<sub>3</sub>闪烁探测器的铀含量快速测定方法研究

徐稼宁, 刘洋\*, 李天宇, 于子竣

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年7月6日

## 摘要

为了满足天然矿样中铀含量快速、无损测定的要求, 本文建立了以CeBr<sub>3</sub>闪烁探测器为基础的 $\gamma$ 能谱检测系统, 并提出了用234 mPa 1001 keV特征 $\gamma$ 射线对铀进行快速定量的方法。该系统由CeBr<sub>3</sub>晶体、高灵敏光电倍增管、前端模拟电子学模块、模数转换单元和FPGA数字处理模块组成, 可以将入射 $\gamma$ 射线产生的闪烁光信号有效地转化为电脉冲, 并形成能谱, 实现天然矿样快速 $\gamma$ 能谱采集和实时分析。系统经过<sup>137</sup>Cs、<sup>60</sup>Co标准源标定之后, 在<sup>137</sup>Cs 662keV处得到平均能量分辨率为4.42%, 在609~2614 keV范围内具有较好的能量线性, 可以保证低计数率下目标峰的可靠识别。针对天然矿样中<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K等多种天然放射性核素混合导致的谱干扰问题, 本文以<sup>234</sup>mPa 1001 keV峰为定量目标峰, 结合1764 keV和2614 keV峰作为辅助约束, 对<sup>226</sup>Ra与<sup>232</sup>Th干扰贡献进行剥离, 并建立了<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K标准谱数据库。采用高斯峰叠加线性本底模型对目标峰和辅助峰进行拟合, 消除干扰后得到<sup>238</sup>U活度和铀质量分数的准确反演结果。该方法对低品位矿样具有较好的峰识别能力以及干扰抑制作用, 即使目标峰的计数率很低, 误差仍然控制在12%以内。用国家一级放射性标准物质GBW04112、GBW04127a对方法进行验证。结果表明, GBW04112样品<sup>238</sup>U活度测定值为9.20 Bq/g, 与标称值8.35 Bq/g相比, 相对误差为10.21%; GBW04127a测定值为11.03 Bq/g, 标称值10.56 Bq/g, 相对误差为4.47%。进一步对三种低品位天然矿样(铀含量约0.005%)进行应用验证, 样品A、B、C的 $\gamma$ 能谱法测定值分别为0.00556%、0.00481%和0.00601%, 与化学法结果相比, 相对误差分别为8.79%、9.31%和11.68%。结果表明, 该方法不仅可以对低品位天然矿样中的铀含量进行快速无损测定, 在现场初筛、大批量矿样快速分级方面也具有较好的工程适用性以及推广前景, 未来在环境监测、核废料管理等领域也有着广阔的应用前景。

## 关键词

CeBr<sub>3</sub>闪烁探测器,  $\gamma$ 能谱, 铀含量, <sup>234</sup>mPa, 1001 keV特征峰, 剥谱分析

\*通讯作者。

# Research on a Rapid Quantitative Determination Method for Uranium Content Based on a CeBr<sub>3</sub> Scintillation Detector

Jianing Xu, Yang Liu\*, Tianyu Li, Zijun Yu

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: April 9, 2026; accepted: April 20, 2026; published: July 6, 2026

## Abstract

To find a better solution for determining the quantity of uranium in nature rocks quickly and without destruction, we built up a  $\gamma$  ray spectrometer with CeBr<sub>3</sub> scintillator. Then put forward to use the special 1001 keV radiation gamma ray from <sup>234</sup>mPa effectively to measure its amount. The system has a CeBr<sub>3</sub> Crystal, high sensitive photomultiplier tube and Analog Front - End Electronic Components, A/D transformation part and FPGA Digital Processing parts. It turns the scintillations generated when incident  $\gamma$ -rays strike it into pulse currents efficiently to make energy spectrums; thus,  $\gamma$ -spectra can be acquired from natural ore samples fast, and they can be analyzed straightaway. Calibrate with <sup>137</sup>CS and <sup>60</sup>Co standards source to get the calibration factor, it is obtained at an average of 4.42% for the 662 keV (<sup>137</sup>CS) energy level and have a good linear relationship on 609~2614 KeV which ensure that we can find the correct peak easily even when working on high background count rate scenarios. To avoid spectrum interference due to the coexistence of more than two kinds of natural radionuclide such as <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K in natural ore sample, we choose the 1001 keV peak of <sup>234</sup>mPa as main quantification peak. The 1764 keV and 2614 keV peaks are included in order to help separate the interfering contributions of radium-226 and thorium-232. A standard spectral database has been formed for <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K. For my target, as well as for the auxiliary peak I have applied the Gaussian with linear background fit. The accurate inversion of the <sup>238</sup>U activity and the uranium mass fraction after interference subtraction. It is good at recognizing the peaks and suppressing interference on the low grade ore sample with an overall error of < 12% though there are very few. Validated with the national first - class certified reference material: GBW04112, GBW04127a the GBW04112's measured <sup>238</sup>U activity is 9.20 Bq/g and the relative error between its activity and the certified value of 8.35 Bq/g is 10.21%. For GBW04127a, the value is 11.03 Bq/g and its certified value is 10.56 Bq/g; thus, there is an error of 4.47%. Moreover, it was also employed for 3 low grade nature ore sample which have about 0.005% of uranium the results of the  $\gamma$  spectrometry on samples A, B and C are: 0.00556%, 0.00481%, 0.00601% with corresponding relative error compared to chemically analyzed result is: 8.79%; 9.31%; 11.68%. Above all, indicates the method we put forward can quickly determine uranium content on low level nature material without destroying it and has huge potential for use in on-site sorting of ore with first category and so on. It can be applied in the environment monitoring as well, like nuclear waste disposal.

## Keywords

CeBr<sub>3</sub> Scintillation Detector,  $\gamma$ -Ray Spectrometry, Uranium Quantification, <sup>234</sup>mPa, 1001 keV Characteristic Peak, Spectral Deconvolution



## 1. 引言

铀含量的测定对于铀矿资源勘查、矿石分级、资源评价以及现场快速筛查等都有很重要的意义[1]。虽然传统的化学分析方法具有较高的定量精度，但是它存在着样品前处理繁琐、检测周期长、不能实现快速无损分析的缺点[2]，在大批量矿样初筛以及现场快速判断等方面受到了限制。相比之下， $\gamma$ 能谱分析具有无损、快速、样品消耗少、多核素同时测定等特点[3]，对天然放射性核素测量及矿样快速评价有良好的应用前景。

但是天然矿样的 $\gamma$ 能谱是由多种天然放射性核素共同产生的，谱线叠加、干扰严重，给铀含量的快速定量造成困难。一方面， $^{238}\text{U}$ 本身 $\gamma$ 射线发射概率小[4]，直接测量困难；另一方面，在复杂的本底以及多核素混合谱中，目标峰很容易受到康普顿散射和连续本底的影响[5]，定量准确度很难得到保证。用 $^{238}\text{U}$ 的短寿命子体 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 发射出的766 keV和1001 keV特征峰来间接测量，已经被证明是快速测铀的一种有效方法，其中1001 keV峰受样品自吸收和低能本底的影响较小，更适合做定量分析的目标峰[6]。

探测器选择上 $\text{CeBr}_3$ 闪烁探测器具有高光输出、快衰减时间以及较好的能量分辨率的特点[7]，配合数字化信号采集技术，给天然矿样快速 $\gamma$ 能谱分析提供可靠的硬件支持。目前，以 $\gamma$ 能谱为基础的天然矿样测铀大多使用特征峰经验判读或者全谱拟合法，但是在低品位矿样中，由于目标峰信号弱、干扰大，仍然缺少既能快速又能具有工程适用性的定量方法[8]。

为了解决上述问题，本文设计出一个基于 $\text{CeBr}_3$ 闪烁探测器的 $\gamma$ 能谱检测系统，以 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的1001 keV特征峰为靶峰，建立 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{40}\text{K}$ 的标准谱数据库，采用1764 keV和2614 keV辅助峰约束的剥谱分析方法[9]。扣除其它核素干扰之后，可以得到天然矿样中 $^{238}\text{U}$ 活度和铀质量分数的快速反演结果。本文主要工作有系统搭建、能量刻度与标定、标准谱数据库建立和剥谱定量模型建立，用国家标准物质和低品位矿样结合化学法验证方法的准确性、工程适用性。需要指出的是，本文方法以天然矿样中 $^{238}\text{U}$ 与其短寿命子体 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 近似处于放射性平衡为前提，该前提通常适用于长期封闭、未发生明显淋滤迁移和近期扰动的天然矿样；对于遭受强氧化淋滤、地下水迁移、采后破碎堆置或人为分离处理后的样品，该平衡关系可能被破坏，从而导致由 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 特征峰反演 $^{238}\text{U}$ 含量时产生系统偏差。

## 2. 方法与实验条件

本文根据 $^{238}\text{U}$ 和其短寿命子体 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 在长期地质封闭条件下近似处于放射性平衡的关系，用测量 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的特征 $\gamma$ 射线来间接定量天然矿样中的 $^{238}\text{U}$ [4]。根据峰位识别性、样品自吸收效应、探测器响应稳定性、多核素干扰特征等因素，选择1001keV作为 $^{238}\text{U}$ 定量分析的基准峰[4][6]；以 $^{226}\text{Ra}$ 的1764 keV峰、 $^{232}\text{Th}$ 的2614 keV峰为辅助约束峰，来估计其它天然放射性核素在目标能区的干扰贡献[7][9]。为了达到快速无损测量的目的，本文建立了一个以 $\text{CeBr}_3$ 闪烁探测器为基础的 $\gamma$ 能谱检测系统。系统由 $\text{CeBr}_3$ 晶体、光电倍增管、前端模拟电子学模块、模数转换单元和FPGA数字处理模块组成，可以实现 $\gamma$ 射线信号的探测、脉冲处理和能谱形成[1][3]。实验中用 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 标准源对系统进行能量刻度、能量分辨率和线性标定，在此基础上做标准物质测量和天然矿样分析。因此，在工程应用中，本方法更适用于原状岩心、封存条件较稳定且未经历显著后生蚀变的天然矿样；若样品存在铀系子体逃逸、富集或不平衡累积现象，则应结合化学分析或延长封存平衡时间对结果进行校核。此外，剥谱系数实质上由辅助峰与

目标峰对应的标准谱响应关系确定。实验中首先采用  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) 标准源完成能量刻度, 并结合天然本底及标准样品中 609 keV、1460 keV、1764 keV 和 2614 keV 等特征峰对感兴趣能区的效率响应进行校核, 从而建立 609~2614 keV 范围内的相对探测效率刻度曲线结果如图 1。

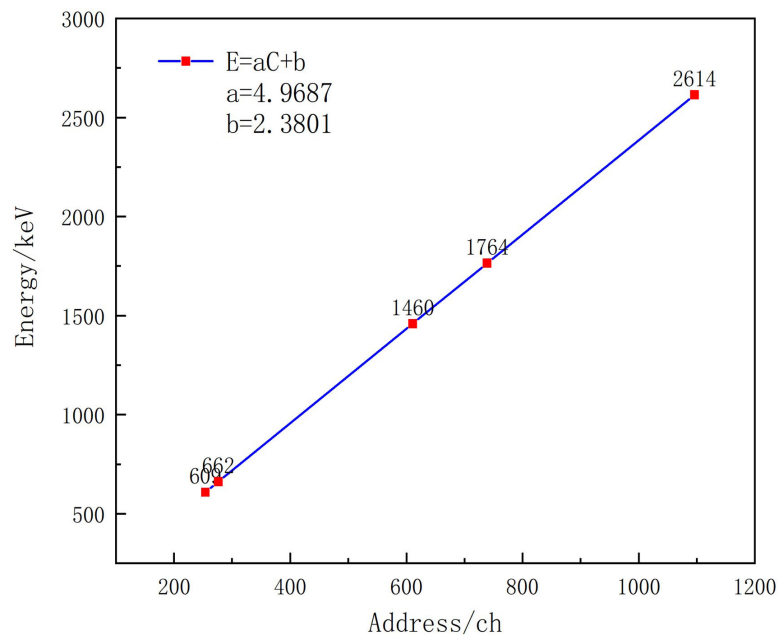


Figure 1. Detection efficiency calibration curve

图 1. 探测效率刻度曲线图

标准谱数据库是以国家一级放射性标准物质为基础建立的, 具体见表 1。表中给出了铀、钍和钾标准样品的比活度和标物质量。

Table 1. Summary of four standard reference samples

表 1. 四种标准样品明细表

序号	国家统一编号	名称	比活度(Bq/g)	标物质量(g)
1	GBW04302a	铀粉末源	$^{238}\text{U}$ 53.2	300.42
2	GBW04305a	铀镭平衡粉末源	$^{238}\text{U}$ 39.5 $^{226}\text{Ra}$ 38.8	350.40
3	GBW04308	钍粉末源	$^{232}\text{Th}$ 13.9	350.34
4	GBW04326	钾-40 粉末源	$^{40}\text{K}$ 3.13	350.40

设第  $i$  类标准样品的原始测量谱为  $M_i(E)$ , 本底谱为  $B(E)$ , 样品质量为  $m_i$ , 则其单位质量标准谱可表示为:

$$S_i(E) = \frac{M_i(E) - B(E)}{m_i} \quad (1)$$

其中,  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  标准谱分别由对应标准物质直接获得; 由于实验中未采用独立  $^{226}\text{Ra}$  标准源, 本文通过铀镭平衡标准样与钍标准样的差谱近似构建  $^{226}\text{Ra}$  标准谱, 即:

$$S_{Ra}(E) = S_{U-Ra}(E) - S_U(E) \quad (2)$$

待测样品测量时, 首先采集样品谱和本底谱, 经时间归一化后进行本底扣除, 并进一步按样品质量归一化处理。设待测样品原始谱为  $M(E)$ , 本底谱为  $B(E)$ , 样品质量为  $m$ , 则单位质量净谱可表示为:

$$S(E) = \frac{M(E) - B(E)}{m} \quad (3)$$

在完成谱预处理后, 分别选取 1001 keV、1764 keV 和 2614 keV 附近能区作为目标峰和辅助峰分析窗口。考虑到天然矿样  $\gamma$  谱中的特征峰通常叠加在康普顿连续本底之上, 本文采用高斯函数叠加线性本底模型对局部峰区进行拟合:

$$f(E) = A \exp\left[-\frac{(E - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] + pE + q \quad (4)$$

式中,  $A$  为峰高,  $\mu$  为峰位,  $\sigma$  为高斯峰宽参数,  $pE + q$  为局部线性本底。由拟合结果可进一步求得净峰面积:

$$P = A\sigma\sqrt{2\pi} \quad (5)$$

并将其作为后续剥谱分析和活度反演的直接输入量。

对于天然矿样混合谱, 待测谱可以看成  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  等标准谱按一定比例叠加得到的。本文使用特征峰约束的分步剥谱方法, 首先利用 1764 keV 和 2614 keV 辅助峰分别求解  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{232}\text{Th}$  的响应系数:

$$k_{Ra} = \frac{P_{1764}}{P_{Ra,1764}}, k_{Th} = \frac{P_{2614}}{P_{Th,2614}} \quad (6)$$

式中,  $P_{1764}$  和  $P_{2614}$  分别为待测样品在 1764 keV 和 2614 keV 峰区拟合得到的净峰面积,  $P_{Ra,1764}$  和  $P_{Th,2614}$  分别为标准谱在对应峰区的单位质量净峰面积。若  $^{40}\text{K}$  在目标能区贡献不可忽略, 则进一步估算其响应分量。于是, 归属于  $^{238}\text{U}$  的 1001 keV 目标峰净计数可写为:

$$P_{U,1001} = P_{1001} - k_{Ra}P_{Ra,1001} - k_{Th}P_{Th,1001} - k_K P_{K,1001} \quad (7)$$

当  $^{40}\text{K}$  在 1001 keV 附近贡献较弱时, 可忽略最后一项。

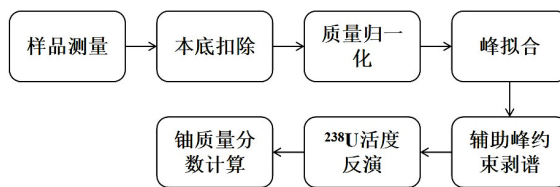
在获得  $^{238}\text{U}$  对应的 1001 keV 净峰面积后, 结合标准铀样品实现  $^{238}\text{U}$  比活度反演。设待测样品中  $^{238}\text{U}$  的 1001 keV 净峰面积为  $P_{U,1001}$ , 标准铀样品在相同峰区的单位质量净峰面积为  $P_{U,std}$ , 其已知比活度为  $a_{U,std}$ , 则待测样品中  $^{238}\text{U}$  比活度为:

$$a_U = \frac{P_{U,1001}}{P_{U,std}} a_{U,std} \quad (8)$$

进一步设纯  $^{238}\text{U}$  的单位质量活度为  $a_0$ , 则样品中铀质量分数可表示为:

$$\omega(U) = \frac{a_U}{a_0} \times 100\% \quad (9)$$

据此, 本文形成了完整分析流程如图 2, “样品测量 - 本底扣除 - 质量归一化 - 峰拟合 - 辅助峰约束剥谱 -  $^{238}\text{U}$  活度反演 - 铀质量分数计算” 的完整分析流程。



**Figure 2.** Flowchart of uranium content determination procedure  
**图 2.** 铀含量求解步骤流程图

### 3. 实验结果与论证

#### 3.1. 标准样含量测定验证

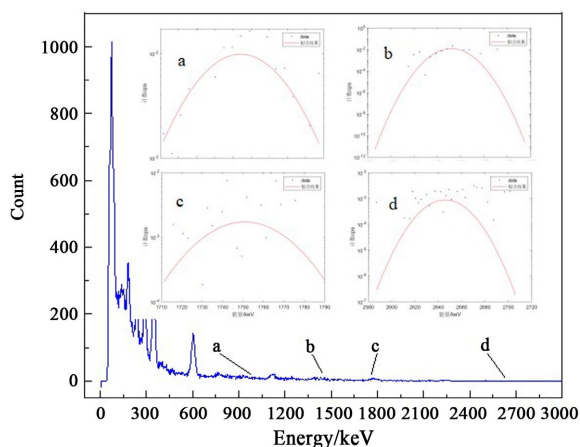
为验证所提方法的准确性和稳定性，本文选取国家一级放射性标准物质 GBW04112 和 GBW04127a 作为实验对象，对方法进行了验证。GBW04112 铀镭天然系矿石粉末标准物质含有  $^{238}\text{U}$  和  $^{226}\text{Ra}$ ，GBW04127a 铀钍天然系矿石粉末标准物质含有  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{232}\text{Th}$ ，两者均具有较为复杂的多核素背景具体数值见表 2，能够较好模拟实际矿样的测量条件。

**Table 2.** Detailed table of two ore samples

**表 2.** 两种矿石样品明细表

序号	国家统一编号	名称	比活度(Bq/g)	标物质量(g)
1	GBW04112	铀镭天然系矿石粉末	$^{238}\text{U}$ 8.35	350.92
			$^{232}\text{Th}$ 0.045	
			$^{226}\text{Ra}$ 8.66	
			$^{40}\text{K}$ 1.03	
2	GBW04127a	铀钍天然系矿石粉末	$^{238}\text{U}$ 9.31	302.50
			$^{226}\text{Ra}$ 9.45	
			$^{232}\text{Th}$ 2.96	

实验中用建立的  $\text{CeBr}_3\gamma$  能谱检测系统对两种标准物质进行  $\gamma$  谱采集，用特征峰约束剥谱模型提取出  $^{238}\text{U}$  活度。为了保证测量结果的准确性，所有的标准物质都在相同的几何条件下进行测量，并且进行了本底扣除和质量归一化处理得到的谱图如图 3、图 4 所示。



**Figure 3.** Schematic of gamma spectrum and peak position window fitting for GBW04112  
**图 3.** GBW04112 能谱及峰位窗口拟合示意图

图 2 中的 a 点为  $^{238}\text{U}$  对应的  $^{234}\text{mPa}$  1001 keV 峰位, b 点为  $^{40}\text{K}$  的 1460 keV 峰位, c 点为  $^{226}\text{Ra}$  的 1764 keV 峰位, d 点为  $^{232}\text{Th}$  的 2614 keV 峰位。

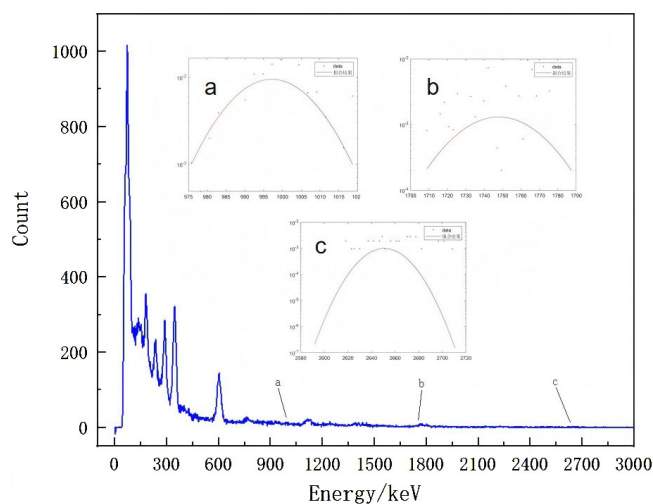


Figure 4. Schematic of gamma spectrum and peak position window fitting for GBW04127a  
图 4. GBW04127a 能谱及峰位窗口拟合示意图

图 3 中的 a 点为  $^{238}\text{U}$  对应的  $^{234}\text{mPa}$  1001 keV 峰位, b 点为  $^{226}\text{Ra}$  的 1764 keV 峰位, c 点为  $^{232}\text{Th}$  的 2614 keV 峰位。

最后用标准铀样品的  $^{238}\text{U}$  活度和净计数率比值反演铀含量, 再和标称值比较。实验结果用柱状图的形式在图 5 中呈现出来。

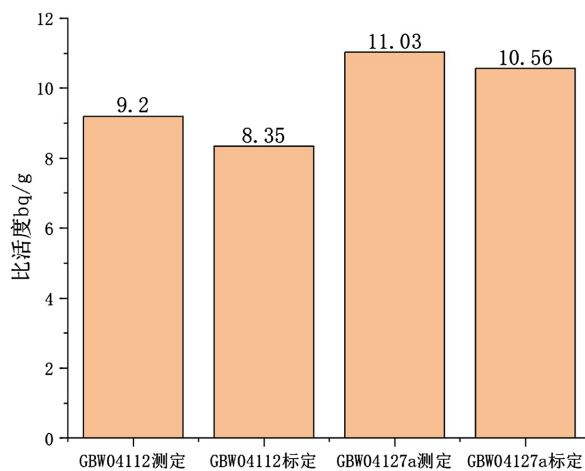


Figure 5. Sample specific activity bar chart  
图 5. 样品比活度柱状图

GBW04112 样品的  $^{238}\text{U}$  活度测定结果为 9.20 Bq/g, 相较其标称值 8.35 Bq/g, 计算得到相对误差为 10.21%。根据实验数据, 用 1001 keV 特征峰加辅助峰剥谱分析法得到可靠  $^{238}\text{U}$  活度值, 再通过反演计算得到样品中铀的质量分数为 0.0341%。

GBW04127a 样品的  $^{238}\text{U}$  活度测定值为 11.03 Bq/g, 对应标称值为 9.31 Bq/g, 相对误差为 18.47%。

由于该样品中含有  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  两种元素, 因此对目标峰的干扰需要使用特征峰约束剥谱模型来校正。实验结果表明, 通过结合 1764 keV 和 2614 keV 辅助峰的约束, 能够有效剥离  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{232}\text{Th}$  对  $^{238}\text{U}$  1001 keV 目标峰的干扰, 实现对  $^{238}\text{U}$  活度的准确测定。再通过反演计算得到样品的铀质量分数为 0.0458%。鉴于表 2 中该标准物质给出的  $^{238}\text{U}$  比活度为 9.31 Bq/g, 正文中原“10.56 Bq/g”属于标称值引用错误, 本文已据表 2 统一订正。

### 3.2. 矿石样品与测量条件

为了检验提出的方法在实际应用中是否有效, 本文选取了新疆伊犁盆地铀矿田三个低品位天然矿样作为样品 A、样品 B、样品 C 进行验证。所有的样品都是从岩心上采集的, 铀含量约为 0.005%, 是典型的低品位矿样, 有较高的应用价值, 可以用于实际矿物资源评价。

实验时所有的样品都在相同的几何条件下进行测量。为了消除样品间的质量差别, 在实验开始前对每一个样品都进行了称重, 质量分别为 1790 g、1167 g、900 g, 然后按照样品的质量对  $\gamma$  能谱进行归一化。除此之外, 在正式测量之前所有的样品都进行了本底谱的采集, 以消除环境辐射的影响。之后, 每一个样品的测量时间为 6000 秒, 得到全谱数据如图 6 所示, 其中包含有 1001 keV、1764 keV、2614 keV 等重要的特征峰。

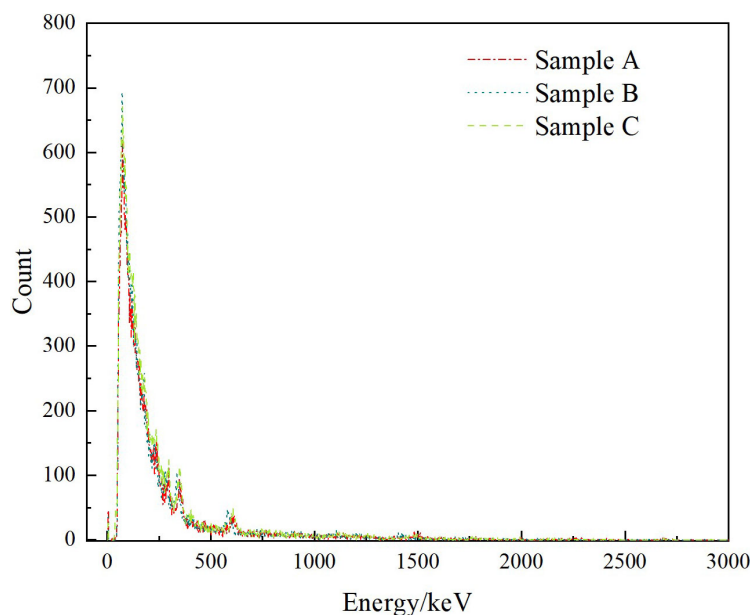


Figure 6. Gamma spectrum of ore sample  
图 6. 矿石样品能谱图

### 3.3. 矿石 $^{238}\text{U}$ 活度测定结果

利用所提出的特征峰约束剥谱分析方法, 对三份来自新疆伊犁盆地铀矿田的低品位天然矿石样品的  $^{238}\text{U}$  活度进行了测定。通过对 1001 keV 目标峰以及 1764 keV 和 2614 keV 辅助峰进行峰拟合, 获得了各样品的  $^{238}\text{U}$  活度值, 结果如图 7 所示。

从实验结果可知, 该方法可以测定低品位矿样中  $^{238}\text{U}$  的含量, 相对误差小, 对低铀含量样品具有可行性、稳定性。虽然样品 A、B、C 的铀含量都比较低, 但是经过 1001 keV 特征峰高精度提取以及辅助峰约束之后, 可以剥离掉其他的天然核素干扰, 得到可靠的定量结果。

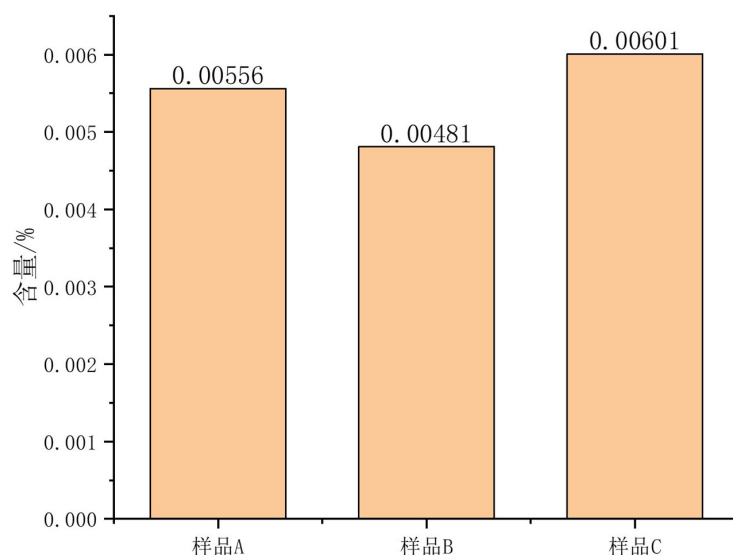


Figure 7. Uranium content results of ore samples

图 7. 矿石样品铀含量结果

### 3.4. 与化学法对比结果

为了进一步证明所提出的方法可靠,本文用基于  $\text{CeBr}_3\gamma$  能谱法的铀含量测定结果同传统的化学分析法做了比较。化学分析用酸浸提取法测定铀含量,对每一个样品做了三次平行测定。三种低品位天然矿样的测定结果如表 3 所示。

Table 3. Uranium content results table for three samples

表 3. 三个样品铀含量结果表

样品名称	化学方法结果/%	$\gamma$ 能谱分析结果/%	误差/%
样品 A	0.00511	0.00556	+8.79
样品 B	0.00440	0.00481	+9.31
样品 C	0.00538	0.00601	+11.68

表中给出了三种样品铀含量的测定结果,同时给出了化学法和  $\gamma$  能谱法的对比以及相对误差。化学法结果是用酸浸提取等常规实验方法得到的铀的质量分数,而  $\gamma$  能谱分析结果则是本文提出的一种特征峰约束剥谱定量方法,该方法把  $^{234}\text{mPa}$  1001 keV 特征峰当作目标峰,同时将 1764 keV 和 2614 keV 峰当作辅助约束。

由表可知,三种样品的  $\gamma$  能谱测量值都比化学法结果大一些,相对误差分别是 8.79%、9.31%和 11.68%。虽然样品中铀的含量很低(0.0044%到 0.0060%),但是该方法仍然可以有效地提取出目标峰,并且可以准确定量,说明特征峰约束剥谱方法在低计数率下具有较好的峰识别能力和干扰剥离效果。误差一般控制在 12%左右,说明方法是可靠的、稳定的,也证明了  $\gamma$  能谱测定技术可以用于低品位天然矿样快速、无损铀含量筛查,为矿石初筛和现场快速判别提供了一个可行的工程应用方案。与传统化学法相比,本文方法无需酸浸和复杂前处理,更适合现场快速筛查与批量分选,但其定量精度受放射性平衡状态、峰拟合统计涨落和谱干扰扣除精度影响。与单峰经验判读法相比,本文并非只利用 1001 keV 单一特征峰,而是通过 1764 keV 和 2614 keV 辅助峰对  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  贡献进行约束,因此在低计数率、低品位和多核素混

合背景下具有更好的抗干扰能力。与全谱拟合法相比,本文方法计算量更小、参数更少、对现场实时处理更友好,尤其适用于目标峰计数率较低而又需要快速给出分级结果的应用场景。

### 3.5. 方法精度与误差分析

为了评价提出的方法的准确性,本文对两种标准物质和三种天然矿样的测量误差来源进行了综合分析。不同样品误差存在差异,主要可能与这些因素有关:首先是不同样品中 1001 keV 目标峰计数率不同,低计数样品的峰面积统计不确定度更大;其次因为 1764 keV 和 2614 keV 辅助峰强度及核素组成不同,会影响干扰剥离量的稳定性;接着对于不同样品的密度、粒度和基体组成存在差异,可能带来自吸收效应和标准谱匹配偏差;最后,样品中若存在局部放射性不平衡,则由  $^{234}\text{mPa}$  反演  $^{238}\text{U}$  时会引入额外系统误差。此外,系统能量分辨率、峰拟合窗口设置、本底扣除和质量归一化等因素也会共同影响最终结果。结合本实验在  $^{137}\text{Cs}$  662 keV 处 4.42% 的能量分辨率,可以认为本文方法在低品位矿样条件下将综合误差控制在约 8%~12% 范围内。

综上所述,在标准物质验证中,所提方法具有较好的精密度和稳定性,所有的测量结果相对误差都在 10% 以内,说明该方法可以用于低品位矿样中  $^{238}\text{U}$  活度的快速测定。但是由于低品位样品的  $^{238}\text{U}$  特征峰很弱,所以其计数率比常规样品要小得多,背景干扰对测量结果的影响也更严重。因此本底扣除准确是提高测量精度的关键。因此,本文对所有的样品都做了本底扣除,从而有效地去除环境辐射以及系统噪声。结果表明,所用的本底扣除法可以有效地去除非目标信号,提高测量的准确性、可靠性。

### 3.6. 结果总结

经过对 GBW04112、GBW04127a 两种标准物质的检验,可知该方法可以准确测定标准物质中  $^{238}\text{U}$  的活度,在复杂的多核素背景中也有较好的抑制作用。采用 1001 keV 特征峰加辅助峰约束剥谱分析法,在多核素干扰情况下可以得到  $^{238}\text{U}$  活度,也可以处理低品位矿样。从实验结果可以看出,该方法的相对误差在 10% 以内,有较好的应用前景和工程适用性。标准物质验证再次证明了  $\text{CeBr}_3\gamma$  能谱检测系统和剥谱模型是可靠的、有效的,也说明该方法可以满足天然矿样中  $^{238}\text{U}$  含量的快速、无损测定要求。

## 4. 总结与展望

总体上,以  $\text{CeBr}_3\gamma$  能谱检测系统以及特征峰约束剥谱法为依托,本文方法兼具快速、无损、计算简便和工程适用性强等优势,特别适合用于铀矿勘探现场初筛、低品位矿样快速分级以及资源评价中的预判场景。同时,本文也明确了该方法对  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{mPa}$  近似平衡关系的依赖性,后续可通过补充效率刻度数据、扩大标准样本覆盖范围以及与全谱拟合算法联用,进一步提高在复杂背景下的稳健性和定量精度。

### 基金项目

本研究得到了国家重点研发项目(2022YFB1902700)、国家教育部装备预研联合基金(8091B042203)、国家自然科学基金(11875129)、辐射应用创新中心基金(KFZC2020020402)、中国铀业有限责任公司与华东理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(2022NRE-LH-02)等支持。

### 参考文献

- [1] 刘金尧,陈元庆,黄清波,等. 数字化  $\gamma$  能谱测井探管研制[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 210-215.
- [2] 郭冬发,范光,欧光习,等. 与地浸砂岩型铀矿有关的分析测试技术发展趋势[J]. 国外铀金地质, 2002, 19(3): 147-154.
- [3] Marchais, T., Pérot, B., Toubon, H., Bensedik, Y., Mieszkalski, R., Hocquet, S., *et al.* (2025)  $\text{CeBr}_3$   $\gamma$ -Ray Logging Probe

Qualification for Uranium Mining Applications. *EPJ Web of Conferences*, **338**, Article ID: 05002.

<https://doi.org/10.1051/epiconf/202533805002>

- [4] Yücel, H., Çetiner, M.A. and Demirel, H. (1998) Use of the 1001 Kev Peak of  $^{234m}\text{Pa}$  Daughter of  $^{238}\text{U}$  in Measurement of Uranium Concentration by HPGe  $\gamma$ -Ray Spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **413**, 74-82.  
[https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(98\)00562-2](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(98)00562-2)
- [5] Martin, C., Almaz, E., Sabry, M. and Landsberger, S. (2025) Rapid High Precision Analysis of Uranium Content in Texas Ores Using  $\gamma$ -Ray Spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, **290**, Article ID: 107812.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107812>
- [6] Al-Ghamdi, H., El-Nahal, M.A., Saleh, I.H., Elsafi, M., Sayyed, M.I. and Almuqrin, A.H. (2022) Determination of  $^{238}\text{U}$  and  $^{40}\text{K}$  Radionuclide Concentrations in Some Granite Rocks by Gamma Spectroscopy and Energy Dispersive X-Ray Analysis. *Materials*, **15**, Article 5130. <https://doi.org/10.3390/ma15155130>
- [7] 汤彬, 张雄杰, 刘志锋, 等. 一种基于能谱测井特征谱峰的铀矿定量剥离系数求法[P]. 中国专利, CN112630849B. 2021-04-09.
- [8] 陈元庆, 黄清波, 刘金尧, 等.  $\gamma$ 能谱法测量核材料铀富集度应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41(1): 6-11.
- [9] 汤彬, 张雄杰, 刘庆成, 等. 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.