

黄宇琦, 钟春明. 高纯锗 γ 谱仪测量矿渣中的 ^{232}Th [J]. 世界核地质科学, 2025, 42(1): 211-217. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.019

HUANG Yuqi, ZHONG Chunming. The measurement of ^{232}Th in slag with high-purity germanium γ spectrometer[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 211-217 (in Chinese).

高纯锗 γ 谱仪测量矿渣中的 ^{232}Th

黄宇琦, 钟春明

- 核工业二三〇研究所, 湖南 长沙 410007
- 湖南中核环保科技有限公司, 湖南 长沙 410007
- 湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410007

摘要 为了准确测量伴生放射性矿废渣中的 ^{232}Th , 尤其是针对处于不平衡条件下的矿渣样品的测量, 给辐射环境监管提供数据支持。建立了利用高纯锗 γ 谱仪测量矿渣中 ^{232}Th 的方法。通过选择 ^{232}Th 衰变链子体的特征 γ 射线进行间接测量, 采用相对比较法计算其比活度。把处于不平衡状态的矿渣样品封存20 d, 使 ^{228}Ra 与 ^{228}Ac 达到平衡, ^{228}Th 与 ^{224}Ra 及后续子体达到平衡, 再利用换算关系求得母体核素 ^{232}Th 的比活度。方法准确高效, 检出限为 $1.1\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, 精密度优于5%, 相对误差低于5%。高纯锗 γ 谱仪测量矿渣中 ^{232}Th 的方法不用进行复杂的化学处理, 弥补电感耦合等离子体质谱法的不足; 不平衡条件下的计算方法也比利用单一特征峰或多个特征峰的平均值更可靠。

关键词 高纯锗; 矿渣; ^{232}Th ; 伴生放射性; 放射性平衡; 环境; 固体废物;

中图分类号 TL75 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636(2025)01-0211-07

The measurement of ^{232}Th in slag with high-purity germanium γ spectrometer

HUANG Yuqi, ZHONG Chunming

- Research Institute No. 230, CNNC, Changsha 410007, China
- Hunan Zhonghe Nuclear Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China
- Hunan Engineering Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources, Changsha 410007, China

Abstract: In order to accurately measure ^{232}Th in the waste residues of associated radioactive mines, especially for the measurement of slag samples under non-equilibrium conditions, and to provide data support for radiation environment supervision, a method for measuring ^{232}Th in slag using a high-purity germanium γ spectrometer was established. The method involves indirect measurement by selecting the characteristic γ rays of the daughter nuclides in the decay chain of ^{232}Th , and calculating its specific activity by the relative comparison method. The slag samples in a non-equilibrium state are sealed for 20 days to enable ^{228}Ra and ^{228}Ac to reach equilibrium, and ^{228}Th , ^{224}Ra and subsequent daughter nuclides to reach equilibrium. Then, the specific activity of the parent nuclide ^{232}Th is obtained through conversion relationships. This method is accurate and efficient, with a detection limit of $1.1\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, a precision better than 5%, and a relative error

收稿日期: 2024-12-16 改回日期: 2024-12-29

第一作者: 黄宇琦, 男, 1992年生, 工程师, 主要从事物理分析。E-mail: 549660154@qq.com

Received date: 2024-12-16 revised date: 2024-12-29

First author: HUANG Yuqi, male, born in 1992, engineer, focusing on physical analysis. E-mail: 549660154@qq.com

lower than 5 %. The method of measuring ^{232}Th in slag using a high-purity germanium γ spectrometer does not require complex chemical treatment, which makes up for the deficiencies of inductively coupled plasma mass spectrometry. The calculation method under non-equilibrium conditions is also more reliable than using the average value of a single characteristic peak or multiple characteristic peaks.

Keywords: high-purity germanium; slag; ^{232}Th ; associated radioactivity; radioactive equilibrium; environment; solid waste

伴生放射性矿是指含有较高水平天然放射性核素浓度的非铀矿。这类矿产资源中不仅包含有经济价值的主要元素(如稀土元素、钽、铌、锆和磷酸盐等),同时也含有一定量的天然放射性物质,主要是铀(U)和钍(Th)系列的放射性核素。这些放射性物质在矿产开采、加工过程中可能会释放出来,对环境和人体健康造成潜在的影响^[1]。

由于伴生放射性矿在开采和利用过程中可能产生放射性污染,因此对于这类矿产的开发需要遵循严格的环境保护标准和措施,确保辐射安全^[2]。生态环境部等相关部门已经制定相关法律法规和技术指南,用于指导和规范伴生放射性矿的开发利用活动,减少对环境和公众健康的潜在风险。根据生态环境部相关规定,含超过 $1\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的放射性核素的伴生放射性矿及其废渣需要被纳入监管范围,而准确测量放射性核素活度浓度是有效监管的前提^[3]。

^{232}Th 是伴生放射性固体废物环境风险监管的重要项目之一,常用的分析方法有 γ 能谱法^[4]、电感耦合等离子体质谱法^[5]、X 射线荧光光谱法^[6] 和化学比色法等^[7]。伴生放射性矿渣成分复杂,干扰元素多,化学前处理难,因此不用复杂前处理的 γ 能谱法常作为 ^{232}Th 测量的推荐方法。由于 ^{232}Th 的衰变链长且复杂,在实际工作中,用 γ 能谱法测量伴生放射性矿废渣中时也面对诸多难题,比如特征峰之间的互相干扰、低能端探测器的能量响应限制、自吸收与散射效应、环境本底与宇宙射线干扰和仪器的稳定性与校准问题等^[8]。另外对比一般矿产,伴生放射性矿有着更为特殊的开采技术和复杂的工艺流程,从而更容易打破 ^{232}Th 的衰变链,导致 ^{232}Th 与其子体处于放射性不平衡状态,给测量带来更大的难度和不确定性。

1 实验部分

1.1 实验原理

^{232}Th 是一种长寿命的放射性核素,其半衰期约为 140 亿年。 ^{232}Th 通过一系列衰变最终转化为稳定的 ^{208}Pb 。在这个衰变链中,会产生多个放射性核素,其中一些会发射 γ 射线。例如, ^{232}Th 衰变链中的重要中间产物包括 ^{228}Ac 、 ^{208}Tl 等,这些同位素在衰变过程中会发射特定能量的 γ 射线。每个核素发射的 γ 射线具有特定的能量,这些能量值是唯一的,可以用来识别特定的核素。

γ 能谱法通常使用高纯锗(HPGe)探测器,其具有极高的能量分辨率,可以准确区分不同能量的 γ 射线,适用于实验室高精度分析。探测器接收到的 γ 射线信号会被转换为电信号,经过放大和数字化处理后,形成能谱图。能谱图显示不同能量 γ 射线的强度分布。通过分析能谱图中的峰位置和强度,可以确定样品中 ^{232}Th 及其衰变产物的含量^[9]。其构成和原理示意如图 1。

1.2 仪器与工作参数

高纯锗 γ 能谱仪:ORTEC GEM100-95 型,美国阿美特克有限公司;分析天平:LQ-C5001 型,浙江乐祺公司。高纯锗 γ 能谱仪工作参数:运行高压:4 160 V;工作温度:25 $^{\circ}\text{C}$;工作湿度:<65 %;测量时间:30 000 s;样品盒:聚乙烯塑料圆柱盒 $\varphi 75\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}$ 。能量响应范围:40 keV 至 10 MeV。能量分辨率:在 1.332 MeV (Co-60 源)处为 1.8 keV。监测效率校准源:7NTR/70-805 $\varphi 75\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}$,中国计量科学研究院。

1.3 样品处理方法

样品经烘干和破碎后,研磨成粉状。预先将样品盒称重,随即称取大约 350 g 样品装入样品盒,装样过程中用铁勺逐步压实,表面用薄

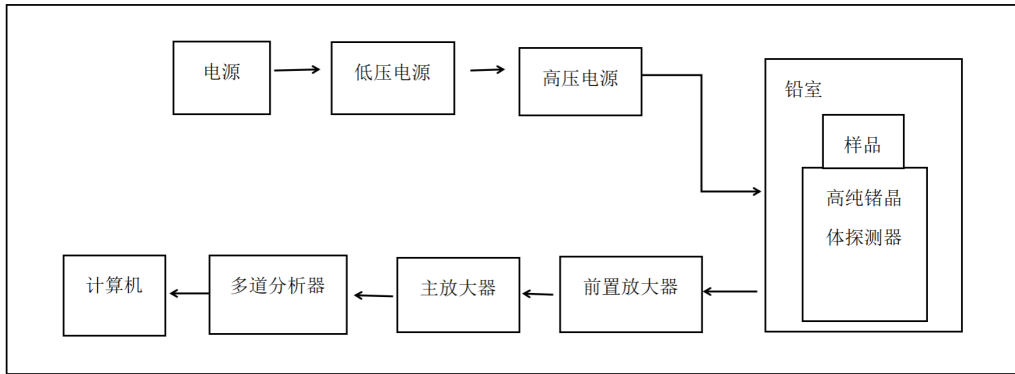
图 1 高纯锗 γ 能谱仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a high-purity germanium gamma-ray spectrometer

板刮平,不留空隙并盖紧盖子,最后再次称量总重,计算得出样品的净质量。严格控制装样过程,目的是使样品与标准源在密度和几何形状上接近一致,如果两者相差较大,需要进行自吸收校正。实验表明:样品粒度、密度、紧实度和均匀度等都对自吸收产生一定影响^[10]。虽然前处理没有化学处理过程,回收率可以视为 100%,但是也需要重视装样过程,以免产生额外误差。

1.4 上机测量

表 1 ^{232}Th 射线类型和能量Table 1 Types and energies of ^{232}Th radiation

射线类型	能量/keV	分支比/%
α 射线	4 012.3	78.2
α 射线	3 947.2	21.7
α 射线	3 811.1	0.069
γ 射线	63.8	0.263
γ 射线	140.9	0.021

想要直接测量 ^{232}Th 的 γ 射线来确定其比活度是不可行的,通常需要通过其衰变链中子体核素的 γ 射线来间接推算。间接测量的前提条件是 ^{232}Th 和其衰变链中的子体达到放射性平衡。 ^{232}Th 的衰变链是一系列连续的放射性衰变过程,最终达到稳定的 ^{208}Pb ,又被称为钍系或 $4n+0$ 系^[11],其衰变链图如图 2。

虽然 ^{232}Th 的子体众多,但是并非都可以用于间接测量。一个理想的特征 γ 射线峰应该具有高分支比、较高的能量和较低的背景干扰等条件^[12]。表 2 列出几个常用于 ^{232}Th 测量的特征 γ 射线峰。

将封装好的样品置于探测器上测量,室内保持恒温、恒湿。测量前后都应该测量仪器的本底值,计算时取平均值。测量时间可以由特征峰峰面积判断,其统计误差应小于 10%,最长不超过 24 h,本文选择测量时间为 30 000 s。

2 结果与讨论

2.1 特征射线峰的确定

^{232}Th 自身发射的 γ 射线能量有 63.8 和 140.8 keV,但是发射率极低,如表 1 所示。

2.2 比活度的计算

^{232}Th 的比活度计算方法有核素全吸收峰探测效率法、 γ 射线全吸收峰探测效率法和相对比较法等。本文采用易于理解的相对比较法进行计算^[13]。其计算公式如式(1):

$$A_1 = \frac{A_0(N_1 - N_b)}{(N_0 - N_b)} \quad (1)$$

式(1)中: A_1 —待测样品 ^{232}Th 的比活度, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; A_0 —校准源中 ^{232}Th 的比活度, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; N_1 —待测样品中特征 γ 射线峰的净计数率, cps; N_0 —校准源中特征 γ 射线峰的净计数率, cps; N_b —本底计数率, cps。

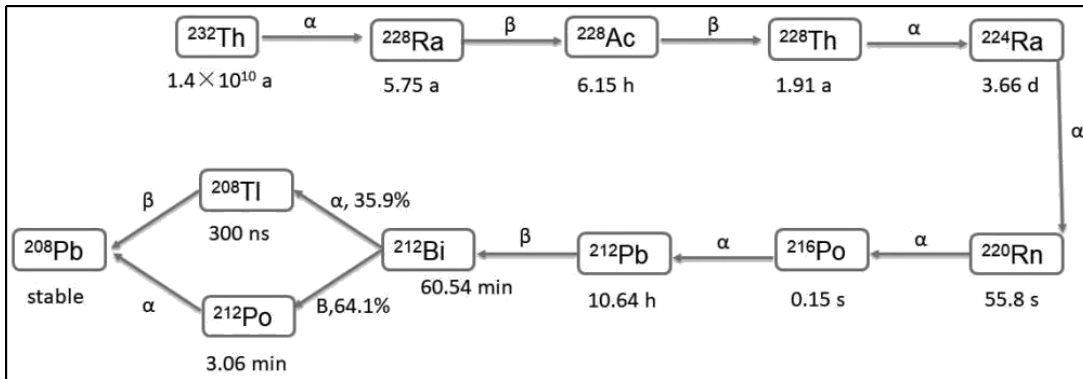


图 2 ²³²Th 的衰变链

Fig. 2 The decay chain of ²³²Th

表 2 选用的 ²³²Th 子体特征射线峰

Table 2 The characteristic ray peaks of the selected ²³²Th daughter

子体核素	半衰期	能量/keV	分支比/%
²⁰⁸ Tl	3.053 min	583.1	84.5
²¹² Pb	10.64 h	238.2	43.3
²¹² Bi	60.55 min	727.3	6.58
²²⁸ Ac	6.13 h	911.2	25.8

在 γ 核素测量中,相对比较法是一种常用方法,它通过与已知标准源进行比较,可以有效减少由于仪器响应特性或环境条件变化引起的系统误差;可以通过选择与待测样品物理性质相似的标准源来进一步提高测量的准确性。而且校准过程较为简单,可以通过与该标准源的比较来确定其他样品的比活度或其他相关参数。伴生放射性矿及其废渣的样品经过一段时间的测量后,得到表 2 中特征峰的净计数率,代入式(1)计算后得出相应结果。

2.3 方法检出限

高纯锗 γ 谱仪测量矿渣中的 ²³²Th 的检出限可以用式(2)计算^[14]:

$$LLD = \frac{4.66}{E \cdot m} \sqrt{\frac{N_b}{T_b}} \quad (2)$$

式(2)中:LLD—方法检出限, Bq·kg⁻¹; N_b—特征峰

的本底计数率, cps; T_b—本底测量时间, s; E—特征峰处的探测效率,无量纲; m—样品质量, kg。

上式是基于 95% 置信度下的简化算法,所选特征峰、测量时间和装样质量都会影响计算结果。当上式选取 ²³²Th 在 911.2 keV 处的特征射线峰, N_b、T_b、E 和 m 分别取值 0.003 93 cps、300 00 s、0.004 56 和 0.35 kg, 计算得到方法检出限为 1.1 Bq·kg⁻¹。

2.4 方法精密度与正确度

按照上述实验流程和测量方法,对不同比活度的放射性标准物质 GBW04110、GBW04115 和 GBW04116 进行实验,并选择 911.2 keV 为特征射线峰来计算,结果如表 3。由表 3 可见,该方法精密度良好,小于 5% (n=8), 准确度较高, 相对误差都低于 $\pm 5\%$, 测定结果均落在参考值范围内。

表 3 方法精密度及正确度

Table 3 Precision and trueness of the method

标准物质编号	性质	测定值/ (Bq·kg ⁻¹)	平均值/ (Bq·kg ⁻¹)	精密度 RSD/%	相对误差/%	参考值/ (Bq·kg ⁻¹)
GBW04110	矿石	108.3、107.2、100.1、106.4、103.4、106.5、95.4、97.8	103.1	4.4	2.0	101.1 \pm 8.1
GBW04115	矿石	1 225.6、1 234.8、1 229.4、1 288.0、1 276.3、1 245.7、1 240.6、1 239.0	1 247.4	1.7	-1.4	1 265.8 \pm 56.6
GBW04116	矿石	8 062.4、8 066.9、8 210.5、8 023.8、8 092.1、8 180.4、8 124.7、8 032.7	8 099.2	0.8	-0.9	8 168.9 \pm 161.8

2.5 ^{232}Th 在非平衡条件下的测量

放射性平衡是指在放射性衰变链中,当母核素的衰变速率与子体核素的产生速率相等时所达到的一种动态平衡状态。在这种状态下,虽然母核素不断衰变成子体核素,但由于子体核素也在不断地衰变成其他核素或稳定同位素,因此子体核素的数量保持恒定,即其浓度不再随时间变化^[15],其动力学方程可表述为式(3):

$$A_i(t) = \sum_{k=1}^i A_{k,i} \quad (3)$$

式(3)中: $A_i(t)$ —衰变链中第 i 种核素经过时间 t 后的比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; $A_{k,i}$ —第 k 种核素的初始放射性比活度 $A_k(0)$ 对第 i 中核素的放射性比活度 $A_i(t)$ 的贡献, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

伴生放射性矿的矿渣中 ^{232}Th 时常出现不平衡现象。矿石经过物理分离、化学提取等处理过程中,如酸浸、碱浸等,不同的放射性核素由于化学性质的不同,可能表现出不同的溶解性和反应活性。这意味着某些放射性核素更容易被提取或留在矿渣中,从而破坏原有的放射性平衡。例如, ^{232}Th 及其衰变产物在不同 pH 值下的溶解度差异可能导致它们在处理过程中分布不均。此外,还有时间因素、环境污染和人为干预等,也可能影响放射性核素的分布,进而影响放射性平衡^[16]。

放射性平衡一旦被打破,需要等待 10 个半衰期(按各子体中最长半衰期计算)才能被视

为再次达到平衡。在非平衡情况下, ^{232}Th 及其衰变子体之间没有固定的比例关系,这时很难通过一个特征 γ 射线峰的计数来计算 ^{232}Th 的含量^[17]。由图 2 可见, ^{232}Th 的衰变子体中长半衰期的核素有 ^{228}Ra (5.75 a) 和 ^{228}Th (1.91 a), 因此将样品封存 20 d 后, ^{232}Th 的子体 ^{228}Ra 和 ^{228}Th 会形成 2 个独立的衰变链, ^{228}Ra 与 ^{228}Ac 达到平衡, ^{228}Th 与 ^{224}Ra 及后续子体达到平衡, 通过式(3)和衰变定律式(4)可进一步推导出 ^{232}Th 、 ^{228}Ra 和 ^{228}Th 的比活度关系, 表述为式(5):

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

$$A_1 = 1.02A_4 - 0.02A_2 \quad (5)$$

式(4)和(5)中: A_0 —某一特定核素的初始比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; A —经过衰变时间 t 后的比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; λ —核素的衰变常数, s^{-1} ; A_1 —待测样品中 ^{232}Th 的比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; A_2 —待测样品中 ^{228}Ra 的比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; A_4 —待测样品 ^{228}Th 的比活度, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

综上所述,利用高纯锗 γ 能谱仪,可以通过 ^{212}Pb 的特征射线 238.2 keV 得到 A_4 , 通过 ^{228}Ac 的特征射线 911.2 keV 得到 A_2 , 进而计算出母核素 ^{232}Th 的比活度。

2.6 实际矿渣样品测量

根据上述实验方法,对某稀土公司的矿渣样品封存 20 d 后进行测量,选用 238.2 和 911.2 keV 的特征峰进行测量,并将结果代入式(5)进行计算得到 ^{232}Th 的比活度值(A_1),结果列于表 4。

表 4 矿渣样品的测量结果

Table 4 Results of measurements on mining slags

样品编号	性质	A_4 测定值/ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	A_2 测定值/ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	A_1 计算值/ ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1	中和渣	314.0	33.9	319.6
2	优溶渣	1 035.6	8 355.7	889.2
3	优溶渣	2 214.8	335.6	2 252.4
4	酸溶渣	460.1	6 102.1	347.3
5	尾矿渣	55.4	680.5	42.9
6	浸出渣	1 406.8	673.6	1 421.5

由表 4 可见,所选矿渣测试样品中 ^{232}Th 和其衰变子体处于不平衡状态,因而用某一个子体的特征峰并不能代表 ^{232}Th 的真实比活度。但是将样品封存 20 d 后,根据式(5)进行计算可以得到 ^{232}Th 的比活度值(A_1)。并且当 A_4 远

小于 A_2 时, A_2 对结果的影响才能体现出来,否则 A_1 约等于 A_4 。为进一步验证实验结果,利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对上述矿渣样品中的 Th 进行测量,并将测量结果换算为比活度单位,列于表 5。

表 5 电感耦合等离子体质谱法的测量结果

Table 5 Results of the ICP-MS

样品编号	性质	ICP-MS测定值/(Bq·kg ⁻¹)	与 A ₁ 的比值
1	中和渣	342.5	1.07
2	优溶渣	819.7	0.92
3	优溶渣	2 354.2	1.05
4	酸溶渣	313.9	0.90
5	尾矿渣	45.9	1.07
6	浸出渣	1 563.7	1.10

通过表 5 中的对比可以看出,表 4 中 A₁ 的计算值与电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)所测得的 Th 的值十分接近,很好地验证了用上述方法计算得出的 ²³²Th 的值更接近真实值,比用某一个特征峰或多个特征峰的平均值更加可靠。

3 结 论

1) 利用高纯锗 γ 能谱仪测量矿渣中的 ²³²Th, 选择子体的特征 γ 射线进行间接测量, 并采用相对比较法计算, 是一种准确且高效的方法, 能为伴生放射性矿的辐射环境监管提供有力支持。

2) 实验结果表明: 方法具有检出限低和精密度高等优点, 方法检出限为 1.1 Bq·kg⁻¹, 精密度优于 5%, 可适用于实际矿渣样品的测量。

3) 将处于不平衡状态的矿渣样品封存 20 d 后测量子体核素 ²²⁸Ra 和 ²²⁸Th 的比活度, 进而换算出 ²³²Th 的比活度更接近真实值, 可以避免因放射性不平衡导致测量不准的问题。

参考文献

- 李利, 陈丽萍, 杜娟. 某伴生放射性矿开发利用企业伴生放射性废渣源项调查及治理对策建议[J]. 工程建设与设计, 2024(17): 133-135.
LI Li, CHEN Li-ping, DU Juan. The source term investigation and control countermeasures of associated radioactive waste residue in an associated radioactive mine development and utilization enterprise [J]. Construction & Design for Engineering, 2024(17): 133-135(in Chinese).
- 高思旂, 杨春, 谢树军, 等. 我国伴生放射性矿辐射环境监管的思考[J]. 核技术, 2023, 46(1): 5-8.
GAO Siyi, YANG Chun, XIE Shujun, et al.

Consideration on radiation environmental supervision of associated radioactive mines [J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1): 5-8(in Chinese).

- 孙庆红. 伴生放射性废物管理探讨[J]. 辐射防护通讯, 2005, 25(4): 20-24.
SUN Qinghong. Discussions on NORM/TENORM waste management [J]. Radiation Protection Bulletin, 2005, 25(4): 20-24(in Chinese).
- 彭崇, 赖晓洁, 陈晶. 用高纯锗(HPGe) γ 谱仪测量天然放射性核素活度[J]. 大众科技, 2008(10): 100-101.
PENG Chong, LAI Xiaojie, CHEN Jing. Measuring the activity of natural radioactive nuclides using a high-purity germanium (HPGe) gamma-ray spectrometer [J]. Popular Science & Technology, 2008(10): 100-101(in Chinese).
- 鄢飞燕, 刘朝, 张鑫, 等. TBP 萃淋树脂分离 ICP-MS 测定八氧化三铀中的钍和锆[J]. 化学分析计量, 2016, 25(3): 18-19.
YAN Feiyan, LIU Chao, ZHANG Xin, et al. Determination of trace thorium and zirconium in triuranium octoxide by ICP-MS with separation of TBP-Levextrel [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2016, 25(3): 18-19(in Chinese).
- 柳金良, 张鑫, 刘朝. 波长色散 X 射线荧光光谱法测定进口八氧化三铀中的铀[J]. 湿法冶金, 2024, 43(2): 208-213.
LIU Jinliang, ZHANG Xin, LIU Chao, et al. Determination of uranium in imported uranium trioxide by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry [J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(2): 208-213(in Chinese).
- 张良圣, 常阳, 谢灵扬, 等. 氢化物发生-电感耦合等离子体质谱法测定砂岩型铀矿样品中痕量镉[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(1): 65-70.
ZHANG Liangshen, CHANG Yang, XIE Lingyang, et al. Determination of trace cadmium in sandstone type uranium ore samples by hydride generation inductively

- coupled plasma mass spectrometry[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(1): 65-70 (in Chinese).
- 8 谢胜凯, 周良慧, 陈萌, 等. 高纯石英样品中放射性钍和铀含量的测量方法研究[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(3): 875-878.
XIE Shengkai, ZHOU Lianghui, CHEN Meng, et al. Determination of thorium and uranium in high purity quartz samples[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 875-878 (in Chinese).
- 9 韩建, 吕旭, 韩万兵. 高纯锗 γ 能谱仪在测定土壤中放射性核素中的应用[J]. 山西化工, 2023, 43(5): 44-46.
HAN Jian, LYU Xu, HAN Wanbing. Application of high purity germanium γ energy spectrometer in the determination of radionuclides in soil [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(5): 44-46 (in Chinese).
- 10 王福, 吴良英. 低本底高纯锗 γ 能谱仪在天津海岸带现代地质环境变化研究中的应用[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(4): 310-313.
WANG Fu, WU Liangying. The application of low background HPGe γ spectrometer on the modern geo-environmental changes of Tianjin coast [J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(4): 310-313 (in Chinese).
- 11 李国庆, 林盛, 罗宇成. 建筑材料天然放射性测试衰变链平衡时间探讨[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(5): 141-143.
LI Guoqing, LIN Sheng, LUO Yucheng. Discussion on the balance time of the natural radioactive decay chain of building materials [J]. New Building Materials, 2024, 51(5): 141-143 (in Chinese).
- 12 张会乔, 张若焯, 姚明. 高纯锗 γ 能谱法测量伴生放射性矿稀土酸熔渣 ^{238}U 方法研究[J]. 江西化工, 2023, 39(2): 44-45.
ZHANG Huiqiao, ZHANG Ruoxuan, YAO Ming. HPGe γ study on the method of measuring ^{238}U rare earth acid slag of associated radioactive ore by energy spectrum [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2023, 39(2): 44-45 (in Chinese).
- 13 钟春明. 某铀矿液态流出物放射性调查及环境影响评价[J]. 铀矿冶, 2024, 43(4): 120-124.
ZHONG Chunming. Radioactivity investigation and environmental impact assessment of liquid effluent from a uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 120-124 (in Chinese).
- 14 史蕾, 常明杰, 郭学文. 关于高纯锗 γ 能谱分析方法探测下限的探讨[J]. 中国科技纵横, 2024(17): 88-90.
SHI Lei, CHANG Mingjie, GUO Xuewen. Discussion on the detection limit for HPGe γ spectrometer [J]. China Science & Technology Overview, 2024(17): 88-90 (in Chinese).
- 15 刘立坤, 周志波, 李多宏, 等. 钍样品放射性平衡判断方法[J]. 世界核地质科学, 2020, 37(2): 127-129.
LIU Likun, ZHOU Zhibo, LI Duohong, et al. Determination method of radioactivity balance of thorium sample [J]. World Nuclear Geoscience, 2020, 37(2): 127-129 (in Chinese).
- 16 宁健, 汤泽平, 程晓波, 等. 2020—2022年某伴生放射性矿辐射环境特征分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(12): 118-120.
NING Jian, TANG Zeping, CHENG Xiaobo, et al. Analysis of radiation environment characteristics of an associated radioactive mine from 2020 to 2022 [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(12): 118-120 (in Chinese).
- 17 苑超, 周程, 朱晓翔, 等. 稀土尾矿砂放射性活度的测量与计算[J]. 原子核物理评论, 2015, 32(4): 460-464.
YUAN Chao, ZHOU Chen, ZHU Xiaoxiang, et al. Measurement and calculation of rare earth mine tailings radioactivity [J]. Nuclear Physics Review, 2015, 32(4): 460-464 (in Chinese).