

# $\gamma$ 能谱测量及其应用<sup>\*</sup>

郑碧华<sup>1,2</sup>, 陈劲民<sup>1,2</sup>, 熊正烨<sup>1</sup>

(1. 中山大学理工学院, 广东 广州 510275; 2. 湛江海洋大学理学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 指出了 $\gamma$ 能谱测量在核物理实验中的重要地位; 根据国内外文献报道, 简述了 $\gamma$ 能谱测量测量的基本原理, 及其在测量技术、解谱方面的进展, 综述了它在地质探测、环境及核工业检测等方面的应用, 并讨论了它与其他测量手段结合而产生新的应用领域。

**关键词:** 伽马能谱; 核物理实验; 辐射探测

**中图分类号:** TL817; O4-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) S1-0158-03

射线(包括 $x$ 射线)能谱测量即测量其计数随能量的分布, 它是核辐射探测的一个重要方面。在高等院校的近代物理实验教学中占有一定的地位<sup>[1,4]</sup>, 在核物理的研究中, 测量原子核激发态能级、研究核的衰变纲图、测定短的核寿命、进行核反应实验研究等都离不开对 $\gamma$ 射线的测量。在放射性分析方面, 如进行放射性矿石分析、测定反应堆燃料元件的燃耗、实现某些裂变产物的流线分析以及在环境保护工作中分析污染物的成分等都是基于 $\gamma$ 射线的强度和能谱的测量。此外, 在放射性同位素的工业、农业、医疗和各种核技术应用中也经常要求进行 $\gamma$ 射线强度和能量的各种测量。

## 1 能谱仪的结构

测量 $\gamma$ 射线的能谱的仪器, 简称 $\gamma$ 能谱仪, 其一般结构如图1所示。

探头系统 → 脉冲放大器及数据采集接口 → 计算机系统

图1 能谱测量仪的基本结构

Fig 1 Schematic of  $\gamma$ -ray spectra analyser

$\gamma$ 射线在探头中沉积能量, 形成电压脉冲, 电压脉冲经线性放大、A/D转换等处理后, 被计算机系统采集。根据射线能量沉积形成的方式不同, 又可分成多种不同的探头, 主要有以NaI(Tl)为代表的闪烁体探头, 和以高纯锗为代表的半导体探头。人们还在不断研究性能更加优越的新探头<sup>[3]</sup>。

$\gamma$ 射线沉积的能量在闪烁体中变成荧光放出, 荧光在光电倍增管的光阴极上打出电子, 而后被放大形成电压脉冲。 $\gamma$ 光子沉积的能量多, 探头输出

的脉冲幅度越大。微机多道系统分析脉冲的高度分布, 就可以得出 $\gamma$ 射线在闪烁体中沉积的能量的分布, 这就是闪烁体能谱仪测到的 $\gamma$ 能谱。

与NaI(Tl)闪烁谱仪不同的是, HPGc谱仪所用探头是高纯锗探头。 $\gamma$ 射线在高纯锗中沉积能量, 产生电子空穴对, 电离的电荷被收集并放大, 形成电压脉冲。

闪烁探测器探测效率高、维护方便, 价格不算太贵, 但能量分辨率较差。半导体探测器探测效率不如闪烁探测器高, 但能量分辨率高, 适于作精密 $\gamma$ 能谱测量。半导体探测系统一般包含低温和真空系统以及精密脉冲发生器, 因此它价格较贵, 维护也不方便。

## 2 $\gamma$ 能谱测量的应用

总的来说,  $\gamma$ 谱仪的主要作用是, 通过能量测量说明是哪一种放射性核素, 通过强度测量说明放射性核素的含量。由于 $\gamma$ 射线在探测物质中沉积能量有多种方式, 使得 $\gamma$ 谱较复杂。实际测量中 $\gamma$ 射线的谱形是更加复杂的, 其原因是除了本底与干扰等因素的影响外, 所测谱中含有多种能量的强度不同的 $\gamma$ 射线, 这些 $\gamma$ 射线的单能谱加在一起都在输出谱形中出现, 特别是能量很接近的 $\gamma$ 射线, 往往以重峰形式出现, 而强度弱的 $\gamma$ 谱线又容易被强峰或本底所掩盖。复杂的 $\gamma$ 谱中往往包含几十条甚至上千条入射 $\gamma$ 射线的信息。所以对所测 $\gamma$ 射线的能谱进行分析与处理是一个很重要的问题。对NaI(Tl)的解谱方法有较早期的有剥谱法和逆矩阵法。随着电子计算机的发展, 又发展起

\* 收稿日期: 2005-02-02

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(04009733)

作者简介: 郑碧华(1951年生), 女, 实验师; 通讯联系人: 熊正烨; E-mail: stsxzy@sysu.edu.cn

多种方法,如函数拟合法,权重最小二乘法等,直到现在国内外还有不少人在研究解谱技术<sup>[5-9]</sup>。随着解谱技术的发展, $\gamma$ 谱仪的应用也越来越广泛。

$\gamma$ 能谱测量在地质工业中,具有很广泛的应用。在地质工业中,常要对地层进行横向和纵向的勘测。横向勘测中,常用 $\gamma$ 能谱仪测量U、Th、K分别为1.76MeV、2.62MeV、和1.46MeV的特征 $\gamma$ 射线,直接探测岩石、土壤中U、Th、K含量的横向分布规律。通过数据处理,提出和总结出控制花岗岩型铀矿成矿的综合地质条件及其 $\gamma$ 能谱标志,最后对测区 $\gamma$ 能谱资料进行分析和类比,提出成矿有利地区,供地质找矿验证<sup>[7-9]</sup>。纵向勘测即测井技术,自然 $\gamma$ 能谱测井就是其中一种很有效的方法。自然 $\gamma$ 能谱测井(NGS)也是测量地层的自然放射性,测量各个能量的伽马射线数量,就可以确定地层中放射性K、Th和U的浓度。地壳中K的平均浓度大约为2.6%;U大约是3ppm;Th大约是12ppm。显然,个别地层中的数量可能明显大于或小于这些数值,不同的地层或特殊矿物具有特征的铀、钍和钾浓度。因此,NGS测井经常可以单独地或共同地用来鉴别处于何种地层、鉴别矿井或油井的矿物或矿物类型<sup>[9]</sup>。

在核工业中,核材料的严格控制和管束是非常重要的,核材料管理的目标之一是要确定所管辖核材料的种类和性质。同位素丰度的测定不仅能区别核材料的种类和性质,而且在核材料的衡算中也不可缺少,特别是对含钚物料的定量测量。铀、钚同位素丰度测定的经典方法是质谱法。质谱法虽然分析精度较高,但工作周期长,而且需要取样分析,属于破坏性分析方法。 $\gamma$ 能谱法测定铀、钚同位素丰度属于非破坏性分析方法。该方法可对整个样品进行扫描测量,不需要取样,分析速度快,适合于对大量含有核材料的物料进行现场盘存测量。具体的测量方法参看文献<sup>[10-11]</sup>。

在环境监测中, $\gamma$ 能谱测量也能大显身手。随着人们生活水平的提高,人们对居室的要求也越来越高,人们常用一些石材来装饰居室。而室内 $\gamma$ 辐射主要来源于建筑材料(包括石材),因此,对石材的放射性评价显得非常重要。一般情况下,采用能谱测量方法能满足石材矿山放射性预评价的需要。可用 $\gamma$ 能谱仪在野外岩石露头直接测定铀、钍、钾的含量。该类仪器通过测量1.76MeV的能量峰,按铀镭平衡的假设计算得出铀的含量。因此,石材放射性评价工作中,可按放射性平衡时的理论计算公式计算镭的含量,然后将镭、钍、钾含量转换成比活度,按石材标准(JC518.93)分类评

价。由于活性炭会吸附氡及其衰变子体,将活性炭盒在居室中放置一段时间后,盒内就吸附了一定量氡及其子体。可用 $\gamma$ 射线能谱仪测量出氡的子体衰变活度,从而推算出居室内的氡的浓度。这种测量氡浓度的方法,在一些发达国家和地区被普遍采用。

核辐射泄漏事故中, $\gamma$ 能谱法也是一种很常规的确定所泄漏核素的方法。人们还把 $\gamma$ 能谱装在轻型越野车或飞机上,与GPS导航仪一起构成一套完整的车载或机载多道 $\gamma$ 能谱测量系统。该系统可快速进行环境 $\gamma$ 能谱测量,不仅可用于测定环境天然放射性元素浓度,而且在核事故应急处理、核环境污染监测中发挥很大的作用<sup>[12-14]</sup>。 $\gamma$ 能谱测量在天文探测方面也有较多地运用<sup>[15]</sup>。

### 3 $\gamma$ 能谱测量的扩展应用

$\gamma$ 能谱测量装置和其他的设备结合在一起,可以构成很多其他的系统,这些扩展的系统在科研生产中也发挥着很大的作用。

中子和原子核相互作用时,辐射俘获是很主要的作用过程。中子很容易进入原子核形成一个处于激发态的复合核,复合核通过发射一个或几个光子迅速跃回基态。这种俘获中子,放出 $\gamma$ 辐射的过程称为“辐射俘获”用 $(n, \gamma)$ 表示。这种现象称为“活化”或“激活”,所产生的放射性称为“感生放射性”。用 $\gamma$ 能谱测量测量装置测量经过中子辐照的材料中的放射性,就可知道中子的强度,这就是活化法。因此, $\gamma$ 能谱测量装置与适当的材料结合,就可组成中子通量密度测量系统<sup>[16-17]</sup>。在 $\gamma$ 能谱测量基础上发展起来的活化分析法(包括中子活化分析,质子活化分析等)现已成了一门独立的学科,应用越来越广泛。

如果将反符合及符合电路等多探头系统与 $\gamma$ 能谱测量装置结合,则可以降低宇宙射线和环境辐射对本底的贡献,以及压低主探测器的 $\gamma$ 谱中的康普顿平台,提高对多种 $\gamma$ 成分的分析能力,组成低水平 $\gamma$ 放射性的测量系统。根据各种符合的特点,又分为总和符合谱仪、康普顿谱仪、电子偶谱仪等。采用 $\beta$ - $\gamma$ 能谱符合法对环境大气中放射性气体氙的监测,不仅可以测量痕量氙的放射性活度,更重要的是可以获得氙的各放射性核素间的比率<sup>[18]</sup>。利用不同能量窗域的 $\beta$ 射线脉冲或内转换电子作为门控信号,和与之相应的 $\gamma$ 射线能谱或特征X射线能谱相符合,可同时高灵敏地测量环境大气中<sup>133</sup>Xe和<sup>135</sup>Xe等氙核的放射性活度。目前最好的这类测量系统与普通 $\gamma$ 能谱测量装置相比,

探测效率变化不到一个数量级而本底却降低 4~5 个量级。

总而言之,  $\gamma$  能谱测量作为示踪、活化分析、低水平测量等技术的基础, 是实验核物理最广泛的应用之一, 它在自然科学的许多领域, 乃至工农业生产, 卫生环境监测, 甚至考古学等方面都有非常重要意义。因此, 人们也在为提高测量  $\gamma$  能谱的响应范围、能量分辨率等参数而不遗余力。

## 参考文献:

- [1] 郑碧华, 熊正烨. 在  $\gamma$  能谱测量中验证康普顿效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(S): 154—156.
- [2] 熊正烨, 郑碧华. 从能谱测量实验谈教学方法变化[J]. 物理实验, 2004, 24(1): 29—30.
- [3] MOSS C E, IANAKIEV K D, PRETTYMAN T H, et al. Multi—element large—volume CdZnTe detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, 458: 455—460.
- [4] GUNNINK R, ARLT R. Methods for evaluating and analyzing CdTe and CdZnTe spectra [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, 458: 196—205.
- [5] BRUTSCHER J, ARLT R, CZOCK K H. Isotope identification software for Gamma spectra taken with CdZnTe detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, 458: 189—195.
- [6] NGUYEN H V, CAMPBELL J M, COUCHELL G P, et al. Programs in C for parameterizing measured NaI Gamma response functions and unfolding of continuous gamma spectra [J]. Computer Physics Communications, 1996, 93: 303—321.
- [7] 杨亚新, 刘庆成, 龙期华等. 核探测技术在粤北下庄铀矿田找矿中的应用研究[J]. 地质地球化学, 2003, 31(3): 93—96.
- [8] SELVASEKARAPANDIANA S, SIVAKUMARA R, MANIKANDAN N M, et al. Natural radionuclide distribution in soils of Gudalore India[J]. Applied Radiation and Isotopes 2000, 52: 299—306.
- [9] 彭琥. 20 世纪 90 年代核测井进展[J]. 测井技术, 2001, 25: 5—11.
- [10] ABOUSAHL S, MICHIELS A, BICKEL M, et al. Applicability and limits of the MGAU code for the determination of the enrichment of uranium samples[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 368: 443—448.
- [11] 唐培家, 李鲲鹏.  $\gamma$  能谱法测定铀、钍同位素丰度[J]. 同位素, 2001, 14: 167—173.
- [12] 陆士立, 翟玉贵, 马艳芳等. CZD—6 型车载多道  $\gamma$  能谱测量系统[J]. 铀矿地质, 1998, 14(2): 112—114.
- [13] AAGEA H K, KORSBECHA U, BARGHOIZ K, et al. A new technique for processing airborne gamma ray spectrometry data for mapping low level contaminations[J]. Applied Radiation and Isotopes 1999, 51: 651—662.
- [14] STRUWE H, MACMAHON D. Feasibility study for the use of gamma and X—ray spectrometry to determine uranium contamination[J], Appl. Radiat. Isot., 1996, 47: 1141—1146.
- [15] SKINNER G K. Gamma—ray astronomy—future prospects [J]. Adv. Space Res., 1996, 15(5): 161—170.
- [16] ROBIN P G, SAYYED E, YUANSHUI Z, et al. NaI detector neutron activation spectra for PGNA applications [J]. Applied Radiation and Isotopes 2000, 53: 483—497.
- [17] METWALLY W A, GARDNER R P. Stabilization of prompt gamma—ray neutron activation analysis(PGNA) spectra from NaI detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 525: 518—521.
- [18] 张圈世, 阎春光, 贾怀茂. 测量环境中痕量放射性氡的能谱符合法[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(S): 27—29.

## Application and Detection of $\gamma$ -ray Spectra

ZHENG Bi-hua<sup>1, 2</sup>, CHEN Jin-min<sup>1, 2</sup>, XIONG Zheng-ye<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Engineering, Sun Yat—sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Science School, Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** It is showed that detection of  $\gamma$ -ray spectra is very important in nuclear physics. Based on the references reported, this paper presents the principle of  $\gamma$ -detection and the improvement of detecting technique and analyse. The paper also proposes the application of  $\gamma$ -ray spectra in geological detection, environmental supervision and radiation detection etc, and shows the extended applications of the combination of  $\gamma$ -ray spectra detection and other techniques.

**Key words:** gamma ray spectra; nuclear physics experiment; radiation detection