

## PGNAA 方法学的发展与现状

王兴华<sup>1,2</sup>, 孙洪超<sup>3</sup>, 姚永刚<sup>2</sup>, 肖才锦<sup>2</sup>, 张贵英<sup>2</sup>,  
金象春<sup>2</sup>, 华 龙<sup>2</sup>, 周四春<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;  
3. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 瞬发伽马中子活化分析(PGNAA)为非破坏性、在线测量的核分析方法。目前国际上有 30 多座研究堆建立了 PGNAA 实验室。本文介绍了三种定量瞬发伽马活化分析方法: 相对法、校准曲线法、 $k_0$  因子法, 阐述了基本原理及其应用领域, 以及针对短寿命核素高精度测量的束流斩波器技术, 针对大样品测量带来的中子自吸收和伽马自屏蔽效应的内标法。此外还简介了基于 CARR 堆的热中子瞬发伽马活化分析装置进展情况, 对国内的 PGNAA 问题进行了探讨。

**关键词:** PGNAA;  $k_0$  法; 束流斩波器; 内标法

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2014)04-0251-06

doi: 10.7538/tws.2014.27.04.0251

## Development and Status of Prompt Gamma Neutron Activation Analysis Technique Methodology

WANG Xing-hua<sup>1,2</sup>, SUN Hong-chao<sup>3</sup>, YAO Yong-gang<sup>2</sup>, XIAO Cai-jin<sup>2</sup>,  
ZHANG Gui-ying<sup>2</sup>, JIN Xiang-chun<sup>2</sup>, HUA Long<sup>2</sup>, ZHOU Si-chun<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. China Institute For Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) is one of the nondestructive and On-line measurement of nuclear analytical methods, There are more than 30 PGNAA laboratories which are established based on the research reactor currently. The basic principle and the application field of three kinds of analytical method of PGNAA were introduced, such as the relative comparison method, calibration method,  $k_0$ -factor method. The short life nuclides is proposed using the beam chopper technique in order to improve the measurement accuracy. The internal standard method was proposed for that large sample neutron measurement that brings self absorption and gamma-ray self shielding effect. The PGNAA system was introduced at CARR. It provides methodology reference to establish the prompt gamma activation analysis on the base of CARR for our country.

收稿日期: 2014-09-14; 修回日期: 2014-10-10

作者简介: 王兴华(1988—), 男, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 核能与核技术工程专业

**Key words:** PGNAA ;  $k_0$  method; Beam chopper; large sample PGNAA

瞬发伽马中子活化分析,通称为 PGNAA (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis),是利用中子束流轰击样品元素的原子,俘获产生的瞬发伽马射线,而不同核素俘获中子后产生的瞬发伽马特征谱是不同的,利用这种特征,通过测量瞬发伽马谱的特征峰的能量和强度确定各元素的种类和含量<sup>[1-2]</sup>。

PGNAA 技术原理上可以测量元素周期表上的绝大部分元素<sup>[3]</sup>,由其在分析(n,  $\gamma$ )反应截面较大的元素(B, Cd, Gd, H 等)其灵敏度较高,通常作为常规活化分析的补充,对大样品中轻元素的分析是唯一方法。PGNAA 技术应用十分广泛,如高科技领域的氢燃料电池和半导体材料的氢改性研究,国防科技领域的储氢材料的研究,以及地质矿产探测、环境样品的测量和考古研究等。

## 1 PGNAA 定量分析方法

在瞬发伽马中子活化分析来说,通常使用的定量分析方法主要有相对法、校准曲线法、 $k_0$  因子法。相对比较法的特点是使用相同的辐照和测量条件以及相同的样品几何,其准确度很高,但每个元素都需要标准<sup>[4-5]</sup>。其计算公式如下。

$$\frac{w_x}{w_s} = \frac{A_{sp,x}}{A_{sp,s}} \quad (1)$$

其中: $w_s$ 、 $w_x$  分别为已知标样和未知待测样品的元素含量; $A_{sp,s}$ 、 $A_{sp,x}$  分别为已知标样和未知待测样品的特征峰强度。

校准曲线法<sup>[6]</sup>即为对一系列含有待测元素的标准样品进行测量,得到其一系列待测元素的特征峰强度与含量的关系曲线,该方法与相对法相比较,得到的数据更精确,但是工作量大,需要建立峰强度与含量关系的数据库。

由于瞬发伽马活化分析的样品量(或体积)通常都比较大,要找到相同的标准且含有所有的待测元素标准并非易事,因而发展了  $k_0$  法。目前国际上获取 PGNAA- $k_0$  值的方法有两种,一种是通过实验测量,如日本 JAERI<sup>[7]</sup>,匈牙利<sup>[8]</sup>,美国 NIST<sup>[9]</sup> 等。另一种是通过理论计算,如韩国 KAERI、国际原子能机构 IAEA<sup>[10]</sup>

等。PGNAA- $k_0$  法的基本原理如下。

$$P_A = N \cdot \sigma \cdot \phi \cdot t \cdot \gamma \cdot \epsilon = \left( \frac{N_A \theta W}{M} \right) \cdot \sigma \cdot \phi \cdot t \cdot \gamma \cdot \epsilon \quad (2)$$

(2)式中: $N$  为靶核素原子数, $N_A$  为阿弗加德罗常数, $\theta$  为核素的同位素丰度, $W$  为靶核素的质量, $M$  为靶核素的克原子质量, $\gamma$  为  $\gamma$  射线分支比, $\phi$  为中子注量率, $\sigma$  为中子俘获有效截面, $\epsilon$  为探测器全能峰的绝对探测效率, $t$  为中子辐照时间。

设  $x$  代表待测核素, $c$  代表比较器核素,将(2)式进行比较,并将式中的常数之比定义为  $k_0$  值,则  $k_{0,x}$  可以表示为:

$$k_{0,x} = \frac{M_c \cdot \theta_x \cdot \sigma_x \cdot \gamma_x}{M_x \cdot \theta_c \cdot \sigma_c \cdot \gamma_c} (\text{理论}) = \frac{p_{A,x} \cdot t_c \cdot w_c \cdot \epsilon_c}{p_{A,c} \cdot t_x \cdot w_x \cdot \epsilon_x} (\text{实验}) \quad (3)$$

Molnar 等<sup>[11]</sup>经实验并编评了 79 种元素的  $k_{0,H}$ (以  $^2\text{H}$  2 223 keV 为比较器的  $k_0$  值)。如果需要 H 以外的任何元素  $x$  作为比较器,则可通过(4)式进行转化  $k_{0,x}$ :

$$k_{0,x} = \frac{k_{0,H}}{k_{0,H(x)}} \quad (4)$$

PGNAA 定量分析方法发展相对已经很成熟,分析的精度不断提高,其应用范围广泛,在线 PGNAA 技术的发展,将在煤炭、水泥工业的在线监测,化学武器方面的检测,以及环境和地质样品测量等方向发挥越来越大的作用。

## 2 短寿命核素分析方法

瞬发伽马活化分析是在线测量所有核反应产生的伽马射线,即瞬发伽马和短寿命核衰变伽马射线。由于瞬发伽马射线能量高,Compton 本底对短寿命核素测量有很大影响。通过束流调制器可以在时间上对两种伽马射线进行区分,即对中子束流进行周期性的开和关,开堆时候两种伽马一起测,关的时候只能测衰变伽马。将两种谱相减,可分别得到瞬发伽马谱和衰变伽马谱,降低了彼此的干扰。这种方法被 Zeisler<sup>[12]</sup>、Revay<sup>[13]</sup> and Belgya<sup>[14]</sup> 使用。Molnar<sup>[15]</sup> 等讨论了短寿命核素对分析的作用,发现有 40 种元素可以采用该技术进行分析。

### 2.1 短寿命核素分析基本原理

在典型的实验中,每次转动周期时间短,转动频率高,分析持续次数多( $>100\ 000$ ),假定每次转动周期时间比测量核素的半衰期小的多( $\lambda T \ll 1, T = t_a + t_w + t_c$  这里  $T$  表示周期,  $t_a, t_w, t_c$  分别表示活化时间,冷却时间,测量时间)。在这种假设下,放射性连续变化,循环活化的一般公式<sup>[16]</sup>:

$$A_d = \frac{N\Phi\sigma_d\epsilon(E_d)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c}) \left[ \frac{n}{1 - e^{-\lambda T}} - \frac{e^{-\lambda T} (1 - e^{-\lambda T})}{(1 - e^{-\lambda T})^2} \right] \quad (5)$$

式中,  $A_d$  为峰面积,  $N$  为原子个数,  $\Phi$  为中子注量率,  $\sigma_d$  为反应截面,  $\epsilon$  为绝对效率,  $\lambda$  为衰变常数,  $n$  为测量时间内转动周期个数。同时可以简化为连续中子束活化公式为:

$$A'_d = N\Phi\sigma_d\epsilon(E_d)t_m \left( 1 - \frac{1 - e^{-\lambda t_m}}{\lambda t_m} \right) \quad (6)$$

式中,  $A'_d$  为峰面积,  $t_m$  为测量时间。

一种情况,当  $x = \lambda * T \ll 1$ , 当  $n \rightarrow \infty, \lambda T \rightarrow 0$ ,  $A_d/A'_d$  的极限为两个时间比例常数的乘积即:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \lambda T \rightarrow 0}} \left( \frac{A_d}{A'_d} \right) = \frac{t_a}{T} \cdot \frac{t_c}{T} = K \cdot L \quad (7)$$

式中,  $K = t_a/T, L = t_c/T$ 。

这样,在更长的时间段内中子注量率的平均值为:  $\bar{\Phi} = \frac{1}{T} \int_0^{t_a} \Phi dt = \Phi \cdot \frac{t_a}{T} = \Phi \cdot K$ , 如果核素的衰变常数足够小,可以认为核数的活度在测量时间内保持不变。基于以上两点,并且考虑到死时间校正因子  $\eta$ , 累积峰面积可以表示为:

$$A_d = \sigma_d \Phi K N_d \epsilon(E_d) L t_m \eta_d \cdot \left( 1 - \frac{1 - e^{-\lambda t_m}}{\lambda t_m} \right) \quad (8)$$

中子束流关闭时,瞬发伽马射线峰面积表示为:

$$A_p = \sigma_p K \Phi N_p \epsilon(E_p) t_m \eta_p \quad (9)$$

公式下标  $d$  表示衰变时间段,  $p$  表示瞬发时间段。

另一种情况,当核素半衰期与转动一周的周期相当( $\lambda * T > 1$ ),  $n$  依然很大时,公式1中括号内的相趋近于  $\frac{n}{(1 - e^{-\lambda T})}$ , 周期个数  $n$  可以表示为衰变谱计数时间与一个转动周期内计数时间的比值:  $t_d/t_c$ 。因此,公式(5)可以简化为

$$A_d = \frac{N_d \Phi \sigma_d \epsilon(E_d)}{\lambda} \cdot$$

$$\frac{(1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c})}{1 - e^{-\lambda T}} \cdot \frac{t_d}{t_c} \cdot \eta_d \quad (10)$$

### 2.2 短寿命核素分析应用

一些重要的核素如<sup>24m</sup>Na( $T_{1/2} = 20.20$  ms), <sup>72m</sup>Ga( $T_{1/2} = 39.68$  ms), <sup>71m</sup>Ge( $T_{1/2} = 20.40$  ms), <sup>103m</sup>Ru( $T_{1/2} = 1.69$  ms), <sup>114m</sup>In( $T_{1/2} = 43.1$  ms), <sup>175m</sup>Yb( $T_{1/2} = 68.3$  ms)和<sup>194m</sup>Ir( $T_{1/2} = 31.85$  ms), 具有实际应用价值,可用此方法进行测量。其他核素半衰期大于0.5 s,可以直接使用简化公式(8)。匈牙利布达佩斯中子活化实验室用该方法测量了F、Na、Sc、V、Mn、Br、I、Ag、In、Hf和Yb,得到很好的结果<sup>[17]</sup>。Molnar和Revay<sup>[18-19]</sup>等用该技术测量了<sup>99</sup>Tc、乙酸铀酰以及浓缩铀的氧化物,也取得了较为满意的结果。

束流斩波器PGNAA通常使用的是反应堆中子源,因而,也就决定了束流斩波器PGNAA的应用范围,无法进行现场测量,通常需要取样测量。如环境、地质样品的测量以及要求测量精度高的样品等。这种方法可以有效地降低瞬发伽马活化分析的本底,尤其测量短寿命核素时,其本底有时可以降低几个数量级,元素的探测极限可以降低一个数量级。

### 3 针对大样品分析方法

一般来说,相对常规中子活化分析,瞬发伽马活化分析(PGNAA)分析的样品量相对较大,为几百毫克以上。由于中子和伽马射线的穿透能力都比较强,小样品本身对中子和伽马的衰减可以忽略。但当样品量较大时,中子和伽马射线的自吸收和自屏蔽效应就会对结果产生较大影响,需要对其进行校正<sup>[20]</sup>。这种方法对于瞬发伽马活化分析的现场应用具有重要的意义,如瞬发伽马活化分析确定油层位置<sup>[21-23]</sup>,煤矿开采时确定煤的品质<sup>[24-26]</sup>,含氮爆炸物的检测<sup>[27-28]</sup>以及人体中氮的测量<sup>[29]</sup>等。但面临伽马射线自吸收和中子自屏蔽问题。对于大样品分析来说,中子和伽马射线的自屏蔽和自吸收的校正很复杂。常用蒙卡模拟方法对中子在大样品中输运和伽马射线在大样品中的衰减进行模拟,并结合实验对模拟过程进行修正<sup>[30-31]</sup>。但是蒙卡方法只适用于描述为规则几何的中子自屏蔽和伽马射线自吸收效应,是特定的几何条件下一种近似结果,在实际现场应用中,样品

几何形状多样,样品本身元素含量的变化都会使模拟结果与实际有很大的偏差,可操作性较差。

### 3.1 针对大样品分析方法基本原理

瞬发伽马活化分析针对大样品及不规则样品发展了一种内标准法<sup>[32-35]</sup>,比较好地解决了中子自屏蔽和伽马射线自吸收的问题。采用样品内核素进行在线效率刻度,由于用来进行效率刻度的核素与被分析的核素具有相同几何条件的中子自屏蔽和伽马自吸收效应,因此可以消除中子自屏蔽和伽马自吸收对分析结果的影响。

通常探测器效率表示为多项式形式:

$$\ln \epsilon_E = \sum_{i=0}^m a_i (\ln E)^i \quad (11)$$

公式中,  $\epsilon_E$  为能量为  $E$  的伽马全能峰效率;  $a_i$  为  $m$  次多项式的系数。

一般来说,采用多能伽马核素进行相对效率刻度即可,但有时很难在样品中找到一种核素,其伽马能量范围覆盖整个感兴趣的核素范围。这时候需要采用几种多能伽马核素进行相对效率刻度。然后进行相对效率曲线归一:

$$(\epsilon_E)_1 = C' \cdot (\epsilon_E)_2 \quad (12)$$

$$\ln(\epsilon_E)_1 = \ln C' + \ln(\epsilon_E)_2 \quad (13)$$

式中:  $(\epsilon_E)_1, (\epsilon_E)_2$  分别为核素 1 和核素 2 刻度的相对效率,  $C'$  为常数。因此,从不同核素得到的相对效率曲线可以表示为:

$$\ln \epsilon_E = k_j + \sum_{i=0}^m a_i (\ln E)^i \quad (14)$$

其中,  $k_j$  为第  $j$  个核素特征常数,  $m$  为多项式的次数。使用最小二乘法对公式(14)进行拟合,共有  $(n+m)$  个参数。其中  $n$  为刻度效率曲线的核素个数,  $m$  为多项式的次数。使用多个核素进行相对效率刻度覆盖了整个感兴趣的能量范围。

### 3.2 针对大样品分析方法应用

在瞬发伽马活化分析大样品或不规则样品时,先用其他分析方法或在分析的样品中均匀地加入(或已经存在)已知量的特定元素,那么在线测量时,就可以用样品本身的核素刻度出一条绝对效率曲线。这条效率曲线可以避免进行复杂的中子自屏蔽和伽马自吸收效应的校正。Sudarshan 等<sup>[36]</sup>使用这种方法测定钛硼合

金中 B, Ti, Mo, Cr, Si 的含量,并且与化学分析的方法结果吻合。可见,这种方法对校正中子自屏蔽和伽马自吸收是有效的。因此,大样品的分析方法对于 PGAA 技术的工业现场应用,以及珍贵大样品的分析,不规则和不易采样的大样品的分析都具有重要的意义。

## 4 结语

瞬发  $\gamma$  中子活化分析具有其独特优势,可以对常规活化分析难以测定的元素进行分析,理论上可以分析自然界的所有元素,但部分元素的灵敏度不如常规活化分析<sup>[37]</sup>。本文主要讨论了瞬发  $\gamma$  中子活化分析基本概念,以及目前国内外所使用的三种定量分析方法,短寿命核素分析方法以及针对大样品的 PGNAA 分析方法。

迄今为止,全世界将近有 30 多个实验室建立了瞬发  $\gamma$  中子活化分析(PGNAA)实验装置<sup>[38]</sup>,而我国在这方面研究仅限于仪器瞬发伽马中子活化分析(IPNA)技术基础研究,相对于反应堆 PGNAA 技术发展缓慢,其存在提供理想的中子束流强度差,本底高等问题。瞬发伽马复杂谱解谱处理方法和稳谱技术等也存在一定的技术瓶颈问题。目前我国已建先进研究反应堆<sup>[39]</sup>(CARR),亚洲中子注量率最高的堆,其重水层内最大未扰热中子通量可达到  $5 \times 10^{14}$  n/(cm<sup>2</sup> · s)。充分利用中国先进研究堆(CARR)的热中子瞬发伽马活化分析平台,为我国的反应堆 PGNAA 系统基础研究提供了方法学上参考和借鉴,缩小与国外发达国家的差距。

## 参考文献:

- [1] 卢毅,宋朝晖. 瞬发伽马中子活化分析技术发展现状[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(12): 1 527-1 531.  
Lu Yi, Song Zhaohui. Development of prompt gamma neutron activation analysis techniques[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(12): 1 527-1 531(in Chinese).
- [2] 张兰芝,倪邦发,田伟之,等. 瞬发  $\gamma$  射线中子活化分析的现状与发展[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(3): 282-288.  
Zhang Lanzhi, Ni Bangfa, Tian Weizhi, et al.

- Status and development of prompt  $\gamma$ -ray neutron analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(3): 282-288(in Chinese).
- [3] Hamid A. "Determination of  $k_0$ -values for some elements in neutron capture gamma-ray for prompt activation analysis"[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2012, 291: 623-628.
- [4] 田伟之,倪邦发,王平生,等. 中子活化分析在当代无机痕量分析计量学中的作用 II. 参量法 NAA-相对法 NAA 的理想辅助方法[J]. 核化学与放射化学, 2004, 26(4): 193-197.  
Tian Weizhi, Ni Bangfa, Wang Pingsheng et al. Role of neutron activation analysis in metrology of modern inorganic trace analysis II. parametric NAA-an Ideal "Back-up" method for relative NAA[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2004, 26(4): 193-197(in Chinese).
- [5] Acharya R. Prompt gamma-ray neutron activation analysis methodology for determination of boron from trace to major contents[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2009, 281(2): 291-294.
- [6] Harrison R K, Landsberger S. Determination of boron over a large dynamic range by prompt-gamma activation analysis [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2009, 267: 513-518.
- [7] Mastue H, Yonezawa C.  $k_0$  standardization approach in neutron-induced prompt gamma-ray analysis at JAERI[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2000, 245(1): 189-194.
- [8] Revay Zs, Molnar G L. A new gamma-ray activation analysis using the  $k_0$  approach[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2000, 244(2): 383-389.
- [9] Paul R L, Lindstrom RM, Heald A E. Cold Neutron Prompt Gamma-ray activation analysis at NIST-recent Development [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(1): 63-68.
- [10] Choi H D, Sun G M. Development of a Database for PGNAA[R]. Vienna: IAEA, 1999.
- [11] Molnar G L. Handbook of prompt Gamma Activation Analysis with neutron beams[M]. Budapest: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [12] Zeisler R, Lamaze G P, Chen-Mayer H H. Coincidence and anti-coincidence measurements in prompt gamma neutron activation analysis with pulsed cold neutron beams[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2001 (248): 35-38.
- [13] Revay Z, Belgya T, Szentmiklosi L, Molnar G L. Prompt gamma activation analysis using a chopped neutron beam[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2005, (264): 277-281.
- [14] Revay Zs, Molnar G L, Belgya T et, al. In-beam determination of  $k_0$  factors for short-lived nuclides[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003, (257): 561-564.
- [15] Molnar G L, Revay Zs, Szentmiklosi L. New perspectives for very short-lived neutron activation analysis[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2004, (262): 157-163.
- [16] Szentmiklosi L, Revay Zs, Belgya T. Measurement of partial gamma-ray production cross-sections and  $k_0$  factors for radionuclides with chopped-beam PGAA [J]. Nuclear Instruments & Methods In Physics Research, 2006, (564): 655-661.
- [17] Szentmiklosi L, Revay Zs, Belgya T. An improved beam chopper setup at the Budapest PGAA facility[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2007, (263): 90-94.
- [18] 张海青,秦亚丽,倪邦发,等. 大样品中子活化分析的理论依据和误差修正[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(10): 1 238-1 242.  
Zhang Haiqing, Qin Yali, Ni Bangfa, et al. Theory and Error Correction for Large Sample Neutron Activation Analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44 (10): 1 238-1 242(in Chinese).
- [19] Yonezawa, C, Matsue H, McKay K, et al, Analysis of marine samples by neutroninduced prompt gamma-ray technique and ICP-MS[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2001, (248): 719-725.
- [20] Ilker Meric G A, Johansen J. Mattingly R, et al. On the ill-conditioning of the multiphase flow by prompt gamma-ray neutron activation analysis [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, (95): 401-404.
- [21] Jiixin Wang, Fusheng Li, Robin P G. On the use of prompt gamma-ray neutron activation analysis for determining phase amounts in multiphase flow[J]. Measurement Science and Technology, 2008, (19): 1-6.
- [22] Borsaru M, Biggs M, Nichols W, et al. The ap-

- plication of prompt-gamma neutron activation analysis to borehole logging for coal[J]. *Appl Radiat Isot*, 2001, (54): 335-343.
- [23] Goodarzi F, Swaine D J. The influence of geological factors on the concentration of boron in Australian and Canadian coals[J]. *Chem Geol*, 1994, (118): 301-318.
- [24] Xiaogang Han, Gardner RP. The Monte Carlo code CEARCPG for coincidence prompt gamma-ray neutron activation analysis[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research*, 2007, 263(1): 320-325.
- [25] Farsoni A T, Miresghi S A. Design and evaluation of a TNA explosive-detection system to screen carry-on luggage[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2001, (248): 695-697.
- [26] Pesente S, Cinausero M, Fabris D, et al. Effects of soil moisture on the detection of buried explosives by radiative neutron capture[J]. *Nucl Instr and Meth*, 2001, (A 459): 577-580.
- [27] Chichester D L, Empey E. Measurement of nitrogen in the body using a commercial PGNA system-phantom experiments [J]. *Appl Radiat Isot*, 2004, (60): 55-61.
- [28] Degenaar I H, Blaauw H M, de Goeij J J M. Correction for neutron self-shielding in large-sample prompt-gamma neutron activation analysis [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003, 257(3): 467-470.
- [29] Nasrabadi M N, Mohammadi A, Jalali M. Gamma self-shielding correction factors calculation for aqueous bulk sample analysis by PGNA technique[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009; 1 208-1 212.
- [30] Nakahara H, Oura Y, Sueki, K, et al. Some basic studies on non-destructive elemental analysis of bulky samples by PGAA[J] *J Radioanal Nucl Chem*, 2000, 244: 405-411.
- [31] Oura Y, Nakahara H, Sueki K. Completely non-destructive elemental analysis of bulky samples by PGAA, Czech[J]. *J Phys*, 1999, (49a): 311-321.
- [32] Sudarshan K, Tripathi R, Nair AGC. A simple method for correcting the neutron self-shielding effect of matrix and improving the analytical response in prompt gamma-ray neutron activation analysis [J] *Analytica Chimica Acta*, 2005, (549): 205-211.
- [33] Sudarshan K, Nair AGC, Goswami A. A proposed  $k_0$  based methodology for neutron activation analysis of samples of non-standard geometry [J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2003, (256): 93-98.
- [34] Sudarshan K, Tripathi R, Nair AGC, et al. A simple method for correcting the neutron self-shielding effect of matrix and improving the analytical response in prompt gamma-ray neutron activation analysis [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, (549): 205-211.
- [35] 张兰芝,倪邦发,田伟之,等. 瞬发  $\gamma$  中子活化分析系统的建立[J]. *原子核物理评论*, 2005, 22(1): 103-105.  
Zhang Lanzhi, Ni Bangfa, Tian Weizhi, et al. System of prompt  $\gamma$ -ray neutron activation analysis[J]. *Nuclear Physics Review*, 2005, 22(1): 103-105(in Chinese).
- [36] 田伟之. 中子活化分析[M]//丁大钊,叶春堂,赵志祥,主编. *中子物理学—原理、方法与应用*,北京:原子能科学出版社,2001:859-935.
- [37] Bangfa Ni, Caijing Xiao. A brief introduction to NAA facilities of China Advance Research Reactor at CIAE[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2012, (291): 313-319.