

文章编号: 1007-4627(2003)04-0295-04

中子俘获瞬发 γ 活化分析数据库*

周春梅

(中国原子能科学研究院, 中国核数据中心, 北京 102413)

摘要: 简要地介绍了热中子俘获瞬发 γ 射线数据的测量、评价、检验及其中子俘获瞬发 γ 射线活化分析数据库的研制、结构和基本数据内容等。

关键词: 中子; (n, γ) 反应; 瞬发 γ ; 活化分析; 数据库

中图分类号: O571.323 **文献标识码:** A

1 引言

中子俘获瞬发 γ 射线能量、强度及其衰变纲图是原子核物理研究、核技术应用和核工程设计的基本数据, 具有广泛的应用价值。今天, 随着核科学技术的发展, 中子俘获瞬发 γ 射线活化分析 (PGAA) 技术已被广泛地应用于材料科学、化学、地质、探矿、农业、食品分析、环境科学和医学等方面, 特别对低 Z 、高丰度和高截面元素, 如 H, B, Cd 和 Gd 等的分析灵敏度高。现在, 世界上许多国家都先后建立了中等中子通量或高中子通量的研究性核反应堆, 有的还配套建立了高质量的中子导管或过滤中子束装置, 以及热或冷中子束装置。这些设备为中子俘获 PGAA 技术的发展和應用提供了必要和重要的条件。

PGAA 是非破坏性的辐射分析技术, 具有快速并能同时进行包括元素周期表内从氢至铀的多元素分析。PGAA 技术需要准确的热中子俘获瞬发 γ 射线数据和衰变纲图。但是, 目前的数据还不够完全和准确, 更没有相应的中子俘获 PGAA 数据库。在国际核数据委员会 (INDC) 的批准与支持及有关专家会议推荐与建议的条件下, 于 1999—2003 年国际原子能机构核数据科 (NDS) 专门组织了中子俘获 PGAA 数据库研制的合作研究项目^[1-3]。该项目的任务是进行热中子俘获瞬发 γ 射线数据的测量、评价及其数据库研制。参加该项目的有来自加拿大巧克河实验室、中国原子能科学研究院中国核数据中心、匈牙利同位素与表面化学研究所化学研

究中心、印度巴巴原子研究中心放射化学研究部、韩国汉城国立大学核子工程系、美国劳伦兹 Berkeley 实验室、美国洛斯阿拉莫斯实验室、美国国家标准与技术实验室、美国 Brookhaven 实验室国家核数据中心、越南河内核子研究所和维也纳国际原子能机构核数据科等的有关科学家和专家。经多年共同努力, 该项合作研究任务已经完成, 并于 2003 年 3 月 24—26 日在维也纳国际原子能机构总部召开了总结与研讨会, 一致通过了共同合作研制的中子俘获 PGAA 数据库及其技术文件^[4]。

本文简要地介绍了中子俘获瞬发 γ 射线数据的测量、评价、检验, 中子俘获 PGAA 数据库的研制, 基本数据内容与具体应用等。

2 数据测量和评价

中子俘获 PGAA 数据库的数据主要是中子俘获瞬发 γ 射线的能量、产生截面, 以及以氢作标准的同位素发射 γ 射线强度的比值 K_0 、中子俘获截面、同位素丰度与原子重量和同位素衰变 γ 射线数据等。为了研制该数据库, 除了充分利用现有的比较好的数据库以外, 还要进行相当大部分数据的测量与评价, 才能完成该数据库的研制。

2.1 数据评价

至 20 世纪 90 年代, 世界上主要有两个热中子俘获瞬发 γ 射线数据库: (1) 加拿大巧克河实验室

收稿日期: 2003 - 05 - 14; 修改日期: 2003 - 06 - 04

* 基金项目: 国际原子能机构资助项目 (IAEA No. 10693/CPR)

作者简介: 周春梅 (1938—), 男 (汉族), 广东兴宁人, 研究员, 从事核数据评价与数据库研制。

Lone 等^[5]利用 Ge(Li) 探测器测量元素的热中子俘获瞬发 γ 射线谱数据进行汇编, 并公开出版发行. 从核结构和核衰变纲图的角度来考虑, 其相当多的 γ 射线的指定是不可信的, 因此该 γ 射线数据不能被采用; (2) 保存在美国 Brookhaven 国家实验室国家核数据中心的、并由核结构和核衰变数据评价国际协作网各成员国数据评价中心评价的评价核结构数据库(ENSDF)^[6]中含有 $A > 45$ 核区的热中子俘获瞬发 γ 射线实验测量评价数据. ENSDF 的数据库热中子俘获瞬发 γ 射线强度数据中有部分强度在不同 γ 射线能区往往采用不同 γ 射线强度归一化因子, 为此要进行重新调整和计算, 甚至有些要进行重新测量才能得到所需的热中子俘获瞬发 γ 射线强度数据; 此外, 该数据库还没有 $A < 45$ 核区的热中子俘获瞬发 γ 射线实验测量评价数据, 因此, 对这一部分数据要进行评价, 并按 ENSDF 数据格式建库、存入 ENSDF 库中, 以满足用户需要.

为此, 中国原子能科学研究院中国核数据中心^[7-10]承担了 $A < 5$ 核区的热中子俘获瞬发 γ 射线数据的评价, 以及 $A > 190$ 核区部分核素的热中子俘获瞬发 γ 射线数据的更新和修订工作, 以满足中子俘获 PGAA 数据库研制的需要和其它方面的应用需要.

20 世纪 80 年代, 美国 Brookhaven 国家实验室国家核数据中心出版的中子截面^[11, 12]中含有热中子俘获截面和中子俘获共振积分数据, 目前已有许多新的更准确的数据发表, 因此, 这一部分数据也要重新进行评价和修订. 这项工作已由美国 Brookhaven 国家实验室国家核数据中心^[13]承担, 并已圆满完成.

2.2 数据测量

需要进行测量的主要是一部分元素的中子俘获瞬发 γ 射线的能量、产生截面, 以及以氢作标准的同位素发射 γ 射线强度的比值 K_0 等数据, 这些数据主要由匈牙利同位素与表面化学研究所化学研究中心^[14]、印度巴巴原子研究中心放射化学研究部、韩国汉城国立大学核子工程系、美国洛斯阿拉莫斯实验室^[15, 16]和越南河内核子研究所承担, 以满足

中子俘获 PGAA 数据库研制的需要和其它方面的应用需要.

3 数据检验

评价中子俘获瞬发 γ 射线数据入库应该做 ENSDF 数据格式检验. 此外, 还要做物理自洽检验. 现以热中子 $^{13}\text{C}(n, \gamma)$ 反应瞬发 γ 射线强度平衡自洽检验为例(见图 1)做简要分析和介绍.

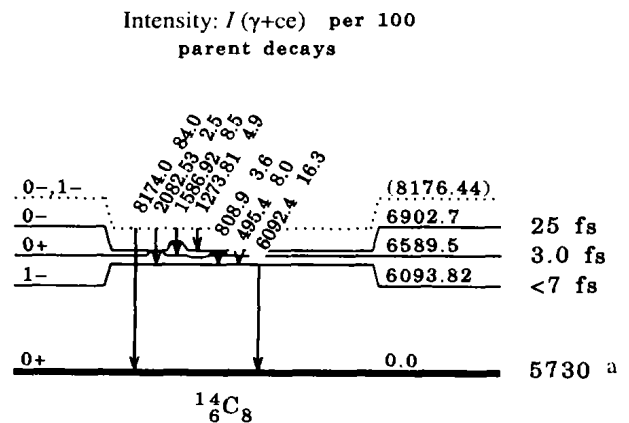


图 1 热中子 $^{13}\text{C}(n, \gamma)$ 反应评价衰变纲图

^{13}C 原子核俘获一个中子后, 形成复合核 ^{14}C , 然后以发射 γ 射线的方式进行退激发衰变. 假定第 i 条能级, 并有 j (或 k) 条 γ 射线, 即 $i = 0, 1, \dots, m$ (其中 0 是其基态, m 是俘获态) 和 $j, k = 1, 2, \dots, n$ 是衰变 γ 射线,

$$\sum_j I_{\gamma ij}(\text{输出}) \approx \sum_k I_{\gamma ki}(\text{输入}), \quad i \neq 0, m \quad (1)$$

$$\sum_j I_{\gamma mj}(\text{输出}) \approx \sum_k I_{\gamma km}(\text{输入}), \quad (2)$$

$$I_{\gamma ij} = I_{ij}(1 + \alpha_{ij}), \quad (3)$$

$$I_{\gamma ki} = I_{ki}(1 + \alpha_{ki}), \quad (4)$$

其中, $I_{\gamma ij}$, $I_{\gamma ki}$, I_{ij} 和 I_{ki} 是 ij 和 ki γ 射线的总跃迁强度和 γ 射线强度. α_{ij} 和 α_{ki} 分别是 ij 和 ki γ 射线的内转换系数. 表 1 中的有关数据就是由上述公式计算的. 由于实验测量的不确定性, 因此它们只能是在其不确定度范围内符合. 由表 1 可看出, 其各条能级上总 γ 跃迁强度基本上是平衡的.

表 1 热中子 $^{13}\text{C}(n, \gamma)$ 反应 γ 射线强度平衡*

能级能/keV	RI(OUT)	RI(IN)	RI(NET)	TI(OUT)	TI(IN)	TI(NET)	Net Feeding (CALC)
0.0	0.000	100.3 (25)	-100.3 (25)	0.000	100.3 (25)	-100.3 (25)	-0.3 (25)
6 093.82 (20)	16.3 (8)	14.1 (7)	2.2 (11)	16.3 (8)	14.1 (7)	2.2 (11)	2.2 (11)
6 589.5 (3)	8.0 (3)	8.5 (5)	-0.5 (6)	8.0 (3)	8.5 (5)	-0.5 (6)	-0.5 (6)
6 902.7 (3)	3.6 (3)	4.9 (10)	-1.3 (11)	3.6 (3)	4.9 (10)	-1.3 (11)	-1.3 (11)
8 176.44 (1)	100 (3)	0.000	100 (3)	100 (3)	0.000	100 (3)	100 (3)

* 表中 RI 为 γ 跃迁强度, TI 为 $\gamma+ce$ 强度.

4 中子俘获 PGAA 数据库

中子俘获 PGAA 数据库是由有关数据文件合成的. 这些数据是分别采用了各种不同数据格式的文本文件给出的. 经数据综合处理, 最后总装并形成中子俘获 PGAA 数据库.

4.1 γ 射线能量

对上述评价和测量得到的中子俘获瞬发 γ 射线能量进行加权的最小二乘法拟合, 得到各条能级的能量, 再由有关能级能量差计算得到 γ 射线能量 (要对 γ 射线发射作核反冲能量的修正) 作为评价推荐数据.

4.2 γ 射线产生截面

在 ENSDF 数据库中, 中子俘获瞬发 γ 射线强度是归一到 100 次中子俘获状态下发射瞬发 γ 射线强度 (或称几率), 利用已评价的中子俘获截面^[12], 可以计算获得 γ 射线产生截面. 如果测量和评价的

均是 γ 射线产生截面, 可通过加权或非加权平均方法获得 γ 射线产生截面.

4.3 K_0 值

以氢作标准的发射 γ 射线强度的比值 K_0 由有关数表计算获得.

4.4 原子重量

原子重量采用评价推荐数据^[17].

4.5 中子俘获 PGAA 数据库及其数据表

中子俘获 PGAA 数据库主要根据上述提供的评价和测量数据, 并由美国劳伦兹 Berkeley 国家实验室和维也纳国际原子能机构核数据科负责设计与研制. 该数据库给出了在元素周期表内从氢至铀所有元素的热中子俘获瞬发和缓发 γ 射线数据, 其中之一是分别按元素和同位素为序给出, 另一个是按 γ 射线能量为序给出. 在此以 H, He 和 Li 元素及其同位素为例说明 (见表 2).

表 2 H, He 和 Li 元素热中子俘获瞬发和缓发 γ 射线数据

元素	σ_T/b	E_γ/keV	$\sigma(E_\gamma)/b$	K_0
^1H	0.332 6(7)	2 223. 248 35(9)	0.332 6(7)	1.000 0(21)
^2H		6 250. 243(3)	0.000 519(7)	0.001 560(21)
^3He	$4.2(12) \times 10^{-11}$	20 520. 46	$4.2(12) \times 10^{-11}$	$3.2(9) \times 10^{-11}$
^6Li		477. 595(3)	0.001 53(8)	0.000 67(4)
^7Li	0.045(3)	980. 53(7)	0.004 15(13)	0.001 81(6)
^7Li		1 051. 90(7)	0.004 14(12)	0.001 81(5)
^7Li		2 032. 30(4)	0.038 1(8)	0.016 6(4)
^6Li		6 768. 81(4)	0.001 51(9)	0.000 66(4)
^6Li		7 245. 91(4)	0.002 47(14)	0.001 08(6)

* E_γ/keV 和 $\sigma(E_\gamma)/b$ 分别为 γ 射线的能量和 γ 射线产生截面, σ_T 为热中子反应截面.

参 考 文 献:

- [1] Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M. Development of a Database for Prompt γ -ray Neutron Activation Analysis[R]. Summary Report Held in Vienna at 2 to 4 November 1999, INDC(NDS)-411 (2000).
- [2] Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M. Development of a Database for Prompt γ -ray Neutron Activation Analysis[R]. Summary Report Held in Vienna at 14 to 17 May 2001, INDC(NDS)-424 (2001).
- [3] Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M. Development of a Database for Prompt γ -ray Neutron Activation Analysis[R]. Summary Report Held in Vienna at 24 to 26 March 2003, INDC(NDS)-443 (2003).
- [4] Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M, Firestone R B. Database of Prompt Gamma-rays from Slow Neutron Capture for Elemental Analysis[R]. IAEA-TECDOC-xxx, to be published (2003).
- [5] Lone M A, Leavitt R A, Harrison, D A, *et al.* Prompt Gamma Rays from Thermal-neutron Capture[J]. *At Data & Nucl Data Tables*, 1981, **26**, 511.
- [6] Tuli J K, Burrows T W. Evaluated Nuclear Structure Data File. A Computer File of Evaluated Experimental Nuclear Structure Data Maintained by the National Nuclear Data Center[Z]. Brookhaven National Laboratory, USA, 2002.
- [7] Zhou Chunmei. Thermal-neutron Capture Data for $A=1-25$ [R]. INDC(CPR)-051 (2000).
- [8] Zhou Chunmei, Firestone R B. Thermal-neutron Capture Data for $A=26-35$ [R]. INDC(CPR)-054 (2001).
- [9] Zhou Chunmei, Firestone R B. Thermal-neutron Capture Data for $A=36-44$ [R]. INDC(CPR)-057 (2003).
- [10] Zhou Chunmei. Thermal-neutron Capture Data Update and Revision of Some Nuclides for $A>190$ [R]. INDC(CPR)-055 (2001).
- [11] Mughabghab S F, Divadeenam M, Holden N. Neutron Cross Sections, $Z=1-60$ (Vol. 1 Part A) [M]. New York, Academic Press, 1981, 1-60.
- [12] Mughabghab S F, Divadeenam M, Holden N. Neutron Cross Sections, $Z=61-100$ (Vol. 1 Part A) [M]. New York, Academic Press, 1984, 61-100.
- [13] Mughabghab S F. Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G -factors [R]. INDC(NDS)-440 (2003).
- [14] Molar G L. New Prompt Gamma-ray Data, Private Communication[Z]. 2003, to be published.
- [15] Reedy Y, Frankle S C. Evaluated Prompt Gamma-rays from Radiative Capture of Thermal Neutrons by Elements from Hydrogen to Zinc [J]. *At Data & Nucl Data Tables*, 2002, **80**, 1.
- [16] Reedy Y, Frankle S C. Evaluated Database for Prompt Gamma-ray from Radiative Capture of Thermal Neutrons by Elements from Hydrogen to Zinc [R]. INDC(NDS)-209 (2002).

Database of Prompt γ -ray Activation Analysis of Neutron Capture*

ZHOU Chun-mei

(China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The evaluation, measurement, and check of prompt γ -ray data for neutron capture are presented. The development of the database of prompt γ -ray activation analysis for neutron capture, and its structure and basic data are also described in the text.

Key words: neutron; (n, γ) reaction; prompt γ -ray; activation analysis; database

* Foundation item: IAEA (10693/CPR)