

14MeV 中子引起的 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 的核反应截面测量

张锋^{1,2;1)} 孔祥忠²

1 (石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257062)

2 (兰州大学现代物理系 兰州 730000)

摘要 利用活化方法测量了 14MeV 中子引起的 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 的反应截面. 中子注量由监督反应 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 给出, 中子能量利用 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应的截面比来确定.

关键词 活化法 截面 (n, x) 反应

1 引言

在聚变反应堆的活性区由 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应产生大量的 14MeV 中子 ($\sim 10^{15} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 因此, 对聚变堆结构材料的活化问题不容忽视. 铅和钨是聚变反应堆重要的结构材料. 14MeV 中子引起的 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 的反应截面对聚变反应堆的安全和环境的评价具有重要的意义, 并为堆的结构材料的放射性废物处理和辐射防护提供相关数据.

袁俊谦等^[1] 和 YU Yuwen 等^[2] 测量过 $^{206}\text{Pb}(n, \alpha)^{203}\text{Hg}$ 的反应截面, Sakiisaka M^[3] 和 Qaim S M 等^[4] 测量过 $^{182}\text{W}(n, p)^{182}\text{Ta}$ 和 $^{183}\text{W}(n, p)^{183}\text{Ta}$ 的反应截面; 但 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 的反应截面以前没有测量过, 因此本次实验结果具有重要的意义.

由于实验中采用的为天然样品, 而铅和钨又是多同位素的元素, 因此每个产物核都由多个反应道产生, 如 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$ 反应包括 $^{206}\text{Pb}(n, \alpha)^{203}\text{Hg}$, $^{207}\text{Pb}(n, n'\alpha)^{203}\text{Hg}$ 和 $^{208}\text{Pb}(n, 2n\alpha)^{203}\text{Hg}$ 等反应道的贡献. 同样, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 反应分别包括 $^{182}\text{W}(n, p)^{182}\text{Ta}$, $^{183}\text{W}(n, d^+)^{182}\text{Ta}$ 和 $^{183}\text{W}(n, p)^{183}\text{Ta}$, $^{184}\text{W}(n, d^+)^{183}\text{Ta}$ 等反应道. 每个反应的反应阈能不

同, 截面的能量关系不同, 对测量截面的贡献也不同, 为此本工作给出的为元素的反应截面, 即在截面计算中不引入各同位素丰度的数值.

在本工作中, 我们利用活化法和高纯锗探测器测量了 3 个反应的剩余核的 γ 放射性, 在兰州大学强流中子发生器上完成了中子能量在 13.5—14.7MeV 范围内的两种元素的 3 个 (n, x) 反应截面的测量.

2 实验

样品的辐照是在兰州大学 ZF-300-II 强流中子发生器上进行, 以 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源, 平均氘束能量为 $E_d = 125\text{keV}$, 束流强度为 $I_d \approx 20\text{mA}$, 氘-钛靶厚度 $0.9\text{mg}/\text{cm}^2$, 中子产额 $1 \times 10^{12} - 3 \times 10^{12} \text{n/s}$. 在照射期间, 中子注量率的变化用铀裂变室监测, 以使对样品照射时注量率随时间的变化作校正. 样品分别放在与入射氘束方向成 $0^\circ - 140^\circ$, 距氘-钛靶 2—20cm 远的地方. 以 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面作为标准, 测量了 $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ 和 $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ 的反应截面. 铅和钨样品分别夹在两片铍片之间照射. 中子能量利用 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应的截面比来确定 (Lewis and Zieba, 1980)^[5].

2002-04-22 收稿, 2002-09-09 收修稿稿

1) E-mail: zhfy_cn@sina.com

²⁰³Hg, ¹⁸²Ta, ¹⁸³Ta 和 ^{92m}Nb 的 γ 放射性用国产的 CH8403 同轴高纯锗 γ 探测器测量, 其相对效率为 20%, 能量分辨率为 2.6keV(1.33MeV). 对探测器的 γ 绝对探测效率进行了精确刻度. 首先把美国国家标准局生产的 SRM4275 (Standard Reference Material 4275) 型标准源放在距高纯锗晶体 20cm 处进行绝对效率刻度, 得出绝对效率曲线. 由于在实际测量过程中, 样品是放在距高纯锗晶体 2cm 处, 所以用一组单能源分别在 20cm 和 2cm 处测量出这两个位置的各项 γ 射线能量的效率比, 然后从这组不同能量的效率比和上述 20cm 处绝对效率曲线计算出 2cm 处的绝对效率刻度曲线, 标准源的误差小于 1%, 在 2cm 处所定的效率误差小于 1.5%.

实验中反应产物核的半衰期、 γ 射线的能量、强度列于表 1 (Browne and Firestone, 1996)^[6].

表 1 核反应及核数据

反应道	$T_{1/2}/d$	E_{γ}/keV	$I_{\gamma}(\%)$
⁹³ Nb(n, 2n) ^{92m} Nb	10.15	934.5	99.2
Pb(n, x) ²⁰³ Hg	46.612	279.1967	81.5
W(n, x) ¹⁸² Ta	115.0	1121.299	35.1
W(n, x) ¹⁸³ Ta	5.1	353.99	11.229

3 实验结果及讨论

截面利用下列公式来计算:

$$\sigma_x = \frac{[SeI_{\gamma}KMD]_0[\lambda AFC]_x}{[SeI_{\gamma}KMD]_x[\lambda AFC]_0} \sigma_0,$$

其中下标“0”表示标准反应, 下标“x”表示待测反应的物理量, 式中 ϵ 为所测特征 γ 射线全能峰效率; I_{γ} 为特征 γ 射线的强度; M 为样品的质量; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 为测量收集因子; t_1 和 t_2 分别是停止照射到测量开始和到测量结束的时间间隔; A 为样品元素的原子量; C 为实测全能峰面积; F 为总的 γ 活度校正因子, 其表达式为

$$F = f_s \times f_c \times f_g,$$

这里 f_s , f_c 和 f_g 分别是样品给定 γ 射线能量的自吸收因子、级联 γ 射线符合效应修正因子和几何修正因子.

表 3 截面误差来源及贡献(%)

反应道	标准截面	计数统计	探测效率	样品质量	γ 射线自吸收	级联 γ 符合效应	几何因素	总的误差
Pb(n, x) ²⁰³ Hg	1.0—2.0	3.8—4.1	5.0	0.1	1.0	1.0	1.0	6.7—7.0
W(n, x) ¹⁸² Ta	1.0—2.0	0.5—1.7	5.0	0.1	1.0	1.0	1.0	5.4—5.9
W(n, x) ¹⁸³ Ta	2.0	0.5	5.0	0.1	1.0	1.0	1.0	5.7

K 为中子注量波动因子, 其表达式为

$$K = \left[\sum_1^L \Phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi S,$$

这里 L 为辐照时间分成的段数; Δt_i 为第 i 段的时间间隔; λ 为衰变常数; T_i 为第 i 段时间结束到辐照结束的时间间隔; Φ_i 为在 Δt_i 内入射到样品上的中子通量; Φ 为 T (全部辐照时间) 时间内入射到样品上的平均中子通量; $S = 1 - e^{-\lambda T}$ 表示剩余核的生长因子.

我们所测的反应截面及所用的标准截面见表 2.

在本工作中由于每个产物核都由多个反应产生, 而每个反应的贡献又是中子能量的函数, 在截面的计算中不考虑各同位素丰度的影响, 表 2 列出的是元素的截面.

本工作在 13.5—14.7MeV 的中子能区内利用活化技术和高纯锗探测器测量了铅和钨的 3 个 (n, x) 的反应截面. 在铅的测量中, 为了防止核反应 ²⁰⁴Pb (n, 2n)²⁰³Pb 产生的 279.188keV γ 射线的影响, 样品分别被冷却了 ²⁰³Pb 半衰期 ($T_{1/2} = 2.1694d$) 的 17, 18.6 和 52 倍的时间后测量.

表 2 测量结果及标准截面

反应道	E_{γ}/MeV	σ
Pb(n, x) ²⁰³ Hg	13.5 ± 0.2	235 ± 16 μ b
	14.4 ± 0.2	295 ± 20 μ b
	14.7 ± 0.2	333 ± 23 μ b
W(n, x) ¹⁸² Ta	13.5 ± 0.2	0.60 ± 0.04mb
	14.4 ± 0.2	0.86 ± 0.05mb
	14.7 ± 0.2	1.03 ± 0.06mb
W(n, x) ¹⁸³ Ta	14.7 ± 0.2	707 ± 40 μ b
	13.5 ± 0.15	448.9 ± 7.4mb ^[7]
	14.41 ± 0.16	458.0 ± 4.5mb
⁹³ Nb(n, 2n) ^{92m} Nb	14.7 ± 0.2	458.2 ± 9.2mb

本工作的主要实验误差来源有: 计数统计误差, 标准截面误差, 探测效率, 样品质量, γ 射线的自吸收、级联 γ 符合效应、测量几何因素以及散射中子的影响等等. 本次实验中各方面的误差对反应截面的贡献如表 3 所示.

我们用高分辨率的高纯锗探测器得到了比较可靠、准确的测量结果.

参考文献 (References)

- 1 YUAN Jun-Qian, WANG Yong-Chang, YANG Jing-Kang et al. Nucl. Tech., 1993, 16(9):518 (in Chinese)
(袁俊谦, 王永昌, 杨景康等. 核技术, 1993, 16(9):518)
- 2 YU Yu-Wen, Gardner D C. Nucl. Phys., 1967, A98:451
- 3 Sakisaka M. J. Phys. Soc. Jap., 1959, 14:554
- 4 Qaim S M et al. Nucl. Phys., 1975, A242(2):317—322
- 5 Lewis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, 174:141—145
- 6 Browne E, Firestone R B. Table of Radioactive Isotope, 1996, Wiley, New York
- 7 ZHAO Wen-Rong, LU Han-Lin, YU Wei-Xiang. INDC (CPR)-16, 1989, 55

Measurement of Cross Sections for $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ and $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ Reactions Induced by 14 MeV Neutrons

ZHANG Feng^{1,2,1)} KONG Xiang-Zhong²

1 (School of Earth Resources and Information, University of Petroleum, Shandong Dongying 257062, China)

2 (Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract The cross sections for $\text{Pb}(n, x)^{203}\text{Hg}$, $\text{W}(n, x)^{182}\text{Ta}$ and $\text{W}(n, x)^{183}\text{Ta}$ reactions have been measured by the activation method. The neutron fluences were determined by the cross sections of $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ reaction. The neutron energies in the measurements were determined by the cross section ratios of $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ and $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ reactions.

Key words activation method, cross section, (n, x) reaction