

14MeV 中子引起的 $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g, m}\text{Re}$ 和 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 的核反应截面测量

张锋^{1,2;1)} 孔祥忠² 蒲忠胜² 朱学彬²

1(石油大学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 $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g}\text{Re}$, $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184m}\text{Re}$ 和 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 核反应的截面. 中子能量 $E_n = (14.7 \pm 0.2)\text{MeV}$ 时的实验结果分别为: $(1817 \pm 85)\text{mb}$, $(390 \pm 18)\text{mb}$ 和 $(2038 \pm 82)\text{mb}$. 并利用 HFIT 程序计算了中子能量在 7—18MeV 范围内的截面值, 给出了其中两个核反应的激发函数曲线.

关键词 活化 截面 中子

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. 铪和铱是重要的聚变反应堆材料. 14MeV 中子引起的 $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g}\text{Re}$, $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184m}\text{Re}$ 和 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 的核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, 并且对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. 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铪和铱的 3 个核(n, 2n)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 $E_d = 125\text{keV}$, 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 $(1-3) \times 10^{12}\text{n}/\text{s}$, 辐照时间 2.5—30h. 在照射期间, 中子注量率的变化用铀裂变室来监测, 以便对样品照射时注量率随时间的变化作校正. 样品放在与入射氘束方向成

2001-07-05 收稿, 2001-10-16 收修改稿

1) E-mail: zhfxycn@sina.com

0°、距氙-钛靶 2cm 远的地方. 以⁹³Nb(n,2n)^{92m}Nb 反应截面作为标准, 测量¹⁸⁵Re(n,2n)^{184g}Re, ¹⁸⁵Re(n,2n)^{184m}Re 和¹⁹¹Ir(n,2n)¹⁹⁰Ir 的反应截面. 铼、铱和铌样品做成直径为 20mm 的圆片, 厚度分别为 0.04mm, 0.2mm 和 0.1mm. 铼和铱样品分别夹在两片铌片之间照射. 中子能量利用⁹⁰Zr(n,2n)^{89m+g}Zr 和⁹³Nb(n,2n)^{92m}Nb 反应的截面比来确定 (Lewis and Zieba, 1980)^[1].

^{184g}Re, ^{184m}Re, ¹⁹⁰Ir 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条 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衰变常数、 γ 射线的能量、强度以及靶核的丰度列于表 1 (Browne and Firestone, 1996)^[2].

表 1 核反应及核数据

3 实验结果及讨论

截面利用下列公式来计算:

$$\sigma_x = \frac{[\epsilon I_\gamma NKMD]_0 [\lambda AFC]_x}{[\epsilon I_\gamma NKMD]_x [\lambda AFC]_0} \sigma_0,$$

其中: 下标“0”表示标准反应, 下标“x”表示待测核素的物理量, 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; N 为所测核素的丰度; 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.

K 为中子注量波动因子, 其表达式为:

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

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.

测的反应截面及其他文献值列于表 2, 利用 HFTT 程序^[3] 计算所得到的激发函数曲线如图 1 和图 2 所示.

表 2 测量结果及文献值

反应道	本工作		文献值 ^[4-15]					
	E_n/MeV	σ/mb	E_n/MeV	σ/mb				
$^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g}\text{Re}$	14.7 ± 0.2	1817 ± 85	14.1	1800 ± 600	R. A. Karam et al (1962)			
			14.1	1910 ± 600	Barry J. et al (1962)			
			14.9	1430 ± 200	Druzhinia et al (1967)			
			14.44	1886 ± 75	卢涵林等(1999)			
			14.47	1886 ± 71	卢涵林等(1999)			
			$^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184m}\text{Re}$	14.7 ± 0.2	390 ± 18	14.1	1120 ± 400	Bass R. et al (1961)
$^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184m}\text{Re}$	14.7 ± 0.2	390 ± 18	14.9	260 ± 100	Druzhinia et al (1967)			
			14.44	442 ± 21	卢涵林等(1999)			
			14.47	428 ± 21	卢涵林等(1999)			
			13.73	345 ± 52	王秀元等			
			14.67	301 ± 45	王秀元等			
			14.81	416 ± 62	王秀元等			
			$^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$	14.7 ± 0.2	2038 ± 82	14.7	1730 ± 135	W. DILG et al (1968)
						14.1	1995 ± 100	B. P. Barhurst et al (1975)
						14.5	1960 ± 230	Bormman et al (1970)
						14.9	1723 ± 130	W. DILG et al (1968)
14.0	2042 ± 125	E. Kondaiah et al (1974)						
14.7	1716 ± 125	S. M. QAIM (1972)						
14.81	1571 ± 126	王秀元等						
14.67	1585 ± 106	王秀元等						
14.47	1537 ± 123	王秀元等						
13.73	1544 ± 120	王秀元等						
$^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$	14.7 ± 0.2	2038 ± 82	14.0	1878 ± 135	(评价)姚立山			
			13.9	2031 ± 134	M. HERMAN et al (1984)			
			14.5	2077 ± 135	M. HERMAN et al (1984)			
			15.0	2211 ± 171	M. HERMAN et al (1984)			
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$	14.7 ± 0.2	458.2 ± 9.2						

从表 2 可以看出, 我们的实验结果和以前绝大部分的文献值符合较好, 对于 $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g}\text{Re}$ 反应, 只有 A. A. Druzhinia 等人^[4] 的实验结果偏低; 对于 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 反应, W. DILG 等人^[8] 和王秀元的结果偏低. 并从图 1 和图 2 的 $^{185}\text{Re}(n, 2n)^{184g}\text{Re}$ 和 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 的激发函数曲线可以看出, 在 8—13 MeV 能区内反应截面随着中子能量的增加而增

大,在 14MeV 中子能区,反应截面随着中子能量的增大没有明显变化,中子能量达到 15MeV 以后,截面又随着中子能量的增大而降低.

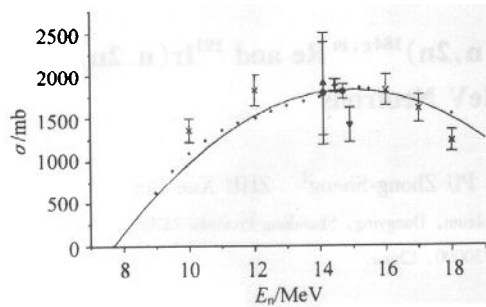


图 1 ¹⁸⁵Re(n,2n)^{184g}Re

—○—R. A. Karam, —▲—Barry, J.,
—▼—Druzhinia, —+—Lu Hanlin,
—x—Huang Xiaolong, (evaluation) —●—this work.

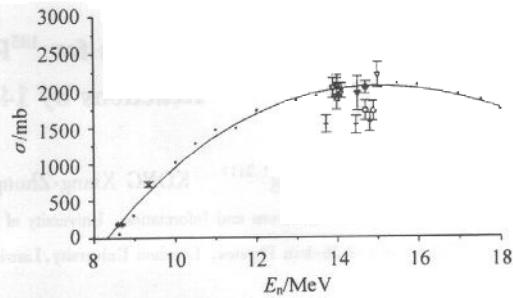


图 2 ¹⁹¹Ir(n,2n)¹⁹⁰Ir

—○—W. DILG, —▼—Bormann,
—▲—E. Kondaiah, —+—Wang Xiuyuan,
—△—Yao Lishan, —▽—M. HERMAN,
—x—B. P. Bayhurst, —●—this work.

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.

1970 年以前的结果比我们的数值偏低. 他们的截面是用 NaI(Tl) 探测器测量剩余核的 β 或 γ 射线的放射性得到的, 其能量分辨率低. 我们用高分辨率的高纯锗探测器得到了更加可靠、准确的反应截面.

参考文献 (References)

- Lewis V F, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**:141—144
- Browne E, Firestone R B. Table of Radioactive Isotopes, 1996
- HUANG Fei-Zeng, SHI Zhao-Min, BAO Shang-Lian. Universitatis Pekinensis, 1989, **25**(3):289—299 (in Chinese)
(黄斐增, 施兆民, 包尚连. 北京大学学报, 1989, **25**(3):289—299)
- Druzhinia A, A Lbov A A, Bilibin L P. Nucl. Phys., 1967, **5**:18
- Karam R A, Parkinson T P, Munno F J et al. Report NP - 11874, 1962
- Barry J. J. Nucl. Energy, 1962, **AB16**:467
- Bass R, Bonner T W, Haenni H P. Nucl. Phys., 1961, **23**:122
- Dilg W, Vonach H, Winkler G et al. Nucl. Phys., 1968, **A118**:9—16
- Qaim S M. Nucl. Phys., 1972, **A185**:614—624
- Bayhurst B P, Gilomre J S, Prestwood R J et al. Phys. Rev., 1975, **C12**:451—467
- Bormann H. Acta Phys. Australian, 1970, **31**:354
- Kondaiah E. J. Phys. A, 1974, 1457
- YAO Li-Shan. HEP & NP, 1990, **11**(4):533—542 (in Chinese)
(姚立山. 高能物理与核物理, 1990, **11**(4):533—542)
- Herman M, Marcinkowski A. Nucl. Phys., 1984, **A430**:69—83
- LU Han-Lin, ZHAO Wen-Rong, YU Wei-Xiang et al. Atomic Energy Science and Technology, 1999, **33**(5):410—414 (in Chinese)
(卢涵林, 赵文荣, 于伟祥等. 原子能科学技术, 1999, **33**(5):410—414)

Measurement of Cross Sections for $^{185}\text{Re}(n,2n)^{184g,m}\text{Re}$ and $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ Reactions by 14 MeV Neutrons

ZHANG Feng^{1,2,1)} KONG Xiang-Zhong² PU Zhong-Sheng² ZHU Xue-Bin²

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

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

Abstract The cross sections of $^{185}\text{Re}(n,2n)^{184g}\text{Re}$, $^{185}\text{Re}(n,2n)^{184m}\text{Re}$ and $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ reactions induced by 14.7MeV neutrons were measured by the activation method. The experimental results for the reactions are $(1817 \pm 85)\text{mb}$, $(390 \pm 18)\text{mb}$ and $(2038 \pm 82)\text{mb}$, respectively. And the excitation curves of these reactions were calculated by using the code HFTT in neutron energy range from 7 MeV to 18 MeV.

Key words activation, cross sections, neutron

Received 5 July 2001, Revised 16 October 2001

1) E-mail: zhfxycn@sina.com