

$^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 反应截面测量

孔祥忠 王永昌 袁俊谦 杨景康 王学智

(兰州大学现代物理系, 730001)

王 经

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

本文报告了在 $E_n = 13.40 - 14.79\text{MeV}$ 中子能区用活化法以 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 截面为中子注量标准测得的 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 的反应截面, 中子能量是用铈铯截面比法测定的. 文中将实验测量值与理论计算值进行了比较, 还对上述三个反应的截面进行了编评, 给出了推荐的激发曲线.

一、序 言

钼的天然同位素较多, 活化后 γ 谱复杂, 给活化法测量 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 快中子反应截面带来了很大困难. 目前国外所发表的上述三个截面的数据较少, 分散较大^[1-24], 大部分只测了个别能量点, 只有一两家测了几个点的数据, 国内尚未见报道; 且钼又是核聚变的结构材料之一, 因此我们用活化法在 $13.40 - 14.79\text{MeV}$ 中子能区测量了 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(np)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 的反应截面, 并将实验测量值与理论计算值进行了比较, 还对上述三个反应的截面进行编评, 给出了推荐的激发曲线.

二、实验过程

1. 样品照射

实验工作是在 T-400 中子发生器上进行的. 以 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 作中子源, 入射氘束能量 $E_n = 360\text{keV}$ 束流强度 $I_d \approx 2\text{mA}$, 氘-钛靶厚度 $\sim 1.6\text{mg}/\text{cm}^2$, 中子产额为 $(1-2) \times 10^{11}$ 中子/秒. 氘束与氘-钛靶成 45° 角, 在与氘束入射方向成 $0^\circ - 150^\circ$ 之间放置样品, 照

射时间为 1—4 小时。以 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面作为标准测量 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$; $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+s}\text{Zr}$ 的反应截面。铝和铝样品做成直径为 20mm 的圆片,厚度分别为 0.2mm 和 0.1mm,纯度分别为 99.99% 和 99.999%。每组样品的铝片分别夹在两铝片之间,外面包有 Cd 片以屏蔽热中子。把六组样品安置在距中子源中心 4—9.3cm 的六个中子能量处,这六处中子能量是用铈锆截面比的方法^[25,26]测定的,中子能量分别为 13.40, 13.61, 14.06, 14.27, 14.65 和 14.79(MeV)。

2. γ 放射性测量

^{99}Mo , ^{96}Nb , ^{89}Zr 和 ^{24}Na 的 γ 放射性用国产 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 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) 型标准点源放在距高纯锗晶体 20cm 处进行该处的绝对效率刻度,得出绝对刻度曲线。由于在实际测量时,样品是放在距晶体 2cm 处,所以用一组单能源分别放在 20cm 和 2cm 处测量出这两个位置处各条 γ 射线的效率比,然后从这个不同能量的效率比和上述 20cm 的绝对效率刻度曲线,计算得 2cm 处的绝对效率刻度曲线。标准源的误差小于 1%,我们在 2cm 处所定的效率误差小于 1.5%。实验中所测的 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+s}\text{Zr}$ 四个反应靶核丰度分别是 100%, 9.63%, 16.68% 和 14.84%。剩余核的半衰期、 γ 射线能量和 γ 强度列于表 1 中,这些数据取自文献[27]中,在计算 γ 放射性活度时,对 γ 射线在样品中的自吸收,级联 γ 符合效应及测量几何等进行了校正。

表 1 所采用反应产物的衰变数据

反 应	$E_{\gamma}(\text{keV})$	$T_{1/2}$	I_{γ}
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1368.598	14.659h	100%
$^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$	739.508	2.7477d	12.14%
$^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$	1091.316	23.35h	48.5%
$^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+s}\text{Zr}$	909.15	3.268d	99.01%

三、实验结果

截面的计算公式如下:

$$\sigma_{\text{Mo}} = \frac{[\varepsilon I_{\gamma} \eta S m D K]_{\text{Al}} [\lambda A F C]_{\text{Mo}}}{[\varepsilon I_{\gamma} \eta S m D K]_{\text{Mo}} [\lambda A F C]_{\text{Al}}} \sigma_{\text{Al}}$$

其中 ε 为所测的特征 γ 射线全能峰效率; I_{γ} 为特征 γ 射线的强度; η 为所测核素的丰度; $S = 1 - e^{-\lambda T}$ 表示剩余核的生长因子; λ 为衰变常数, T 是全部中子照射时间; m 为样品质量; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 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 是样品元素的原子量; C 为实测的全能峰面积; F 为总的 γ 活度校

正因子, 其中主要包括 γ 射线在样品中的自吸收校正, 级联 γ 符合效应校正和几何校正等。K 是中子注量波动校正因子, 为 1.0079—1.0086, 其表达式为:

$$K = \left[\sum_{i=1}^l \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi S$$

其中 l 表示将照射时间分成的段数; Δt_i 为每段的时间间隔; T_i 为第 i 段时间结束到照射结束的时间间隔; ϕ_i 为在 Δt_i 内入射到样品上的平均中子通量; Φ 为在 T 时间内入射到样品上的平均中子通量。表 2 是本文所测量的 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 反应截面数据。 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面数据取自文献[28]。实验误差主要来自标准截面误差 1.2—1.5%, 统计误差 0.8—1.6%, γ 相对效率误差 0.7%, 称重误差 0.15%, 自吸收校正误差 1%, 级联符合校正误差 1%, 以及用铈锆截面比确定中子能量的误差 0.4% 等。

表 2 所测 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 截面

中子能量 (MeV)	13.40±0.05	13.61±0.05	14.06±0.07	14.27±0.07	14.65±0.11	14.79±0.11
参考截面 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}(\text{mb})$	127.1±1.9	125.8±1.7	122.4±1.7	120.0±1.7	113.3±1.6	112.7±1.3
截面 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$ (mb)	1523±46	1544±46	1514±45	1511±45	1498±45	1516±45
$^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$	19.7±0.7	21.3±0.7	22.7±0.7	25.1±0.8	26.0±0.8	28.0±0.8
$^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$	28.2±0.9	28.8±1.0	28.9±1.0	30.2±1.0	30.4±1.0	31.6±1.1

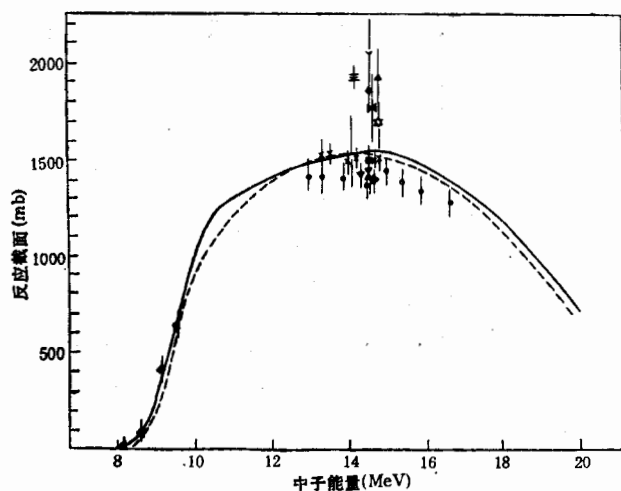
四、结果评述

我们把文献[1]的理论计算与本实验结果及可能收集到的实验数据绘在图 1—3 中, 由图可看出 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$ 和 $^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 反应截面的理论曲线与本实验结果符合较好。

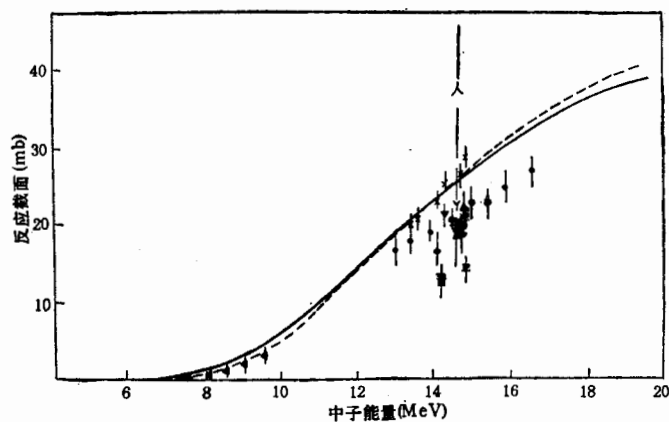
我们对目前为止可能收集到的实验数据进行了评价推荐, 将所收集数据的相对标准截面, γ 射线强度和半衰期依文献[27]进行修正, 并在 14.5MeV 能量处归一, 然后根据各家数据的实验误差给出不同的权重, 计算从阈能到 20MeV 能量的评价激发曲线。

$^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$ 反应截面的测量数据较少, 在 14MeV 附近也较分散, 最大相差 170%。但从 70 年以后发表的数据来看除 Maslov 和 Araminowicz 以外, 还是比较一致的, 与本工作的测量结果也是相符的, 这为我们在 14MeV 附近的编评打下了基础。比较遗憾的是, 在 8—10MeV 能区只有 M. M. Rahman^[29] 一家数据, 在 10—12 MeV 和 17—20 MeV 能区没有实验数据, 我们只能参考理论计算的结果给出推荐值。因此在 8—12 MeV 和 17—20MeV 能区编评误差大。

$^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$ 反应截面的测量数据较多, 但从现有的数据来看分歧大。在 14 MeV 附近最小值为 12±2mb, 最大值为 64±8mb。从激发函数走向看, 本工作的测量结果与文献[1]的测量结果及理论曲线是一致的, 我们即以此为基础进行了评价。在 6—10MeV 能区只有 M. M. Rahmen 一家数据, 在 5—6MeV, 10—12MeV 和 17—20MeV 能区没有实验数据, 我们只能参考理论计算结果给出推荐值。因此在 5—12MeV 能区和 17—20MeV

图1 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ 反应截面 $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$

- A. Marcinkowski (86) ✕ Y. Fujino (82) ☆ S. Amemiya(82) ▼ Lu Wen-den(70)
 † P. Strohal (62) † P. Cuzzocrea (67) ◀ M. M. Rahman (85) ▽ J. Csikai (67)
 ■ Astumi(84) ≡ Maslov(72) ◆ Araminowicz(73) ▲ C. S. Khurana(61) ► S. M. Qaim(72) × This Work — Theory Cal. -- Evaluation

图2 $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ 反应截面 $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$

- A. Marcinkowski (86) ✕ Y. Fujino(77) ☆ S. Amemiya(82) ▼ Lu Wen-den(72)
 ◆ P. Strohal (62) † P. Cuzzocrea (67) ◀ M. M. Rahman (85) ▲ O. И. Артемьев (82)
 † E. T. Bralitt (63) Z N. I. Molla (86) ■ C. V. Srinivasa Rao (81)
 ≡ Atsumi (84) ► R. Pepelini (85) ► S. M. Qaim (74) × This Work — Theory Cal. -- Evaluation

能区编评误差大。

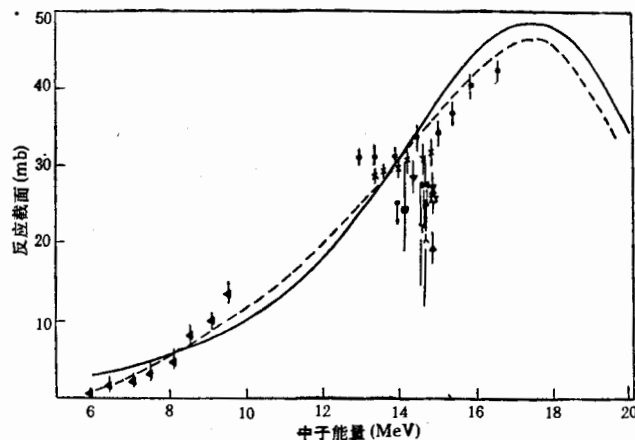
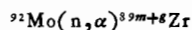
$^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 反应截面的测量数据较少, 在 14 MeV 附近除 Y. Kanda 一组十个数据明显偏大外, 其它数据亦较分散。近期的数据总的来讲比早期略有抬高, 从激发曲线走向看, 本工作的测量结果与文献[1]的测量结果是一致的, 我们即以此为基础进行了评价。14 MeV 附近 $^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ 激发曲线上升快, 截面值与中子能量关系密切, 这是数据分散的主要原因。此外 ^{92}Mo 核素的丰度早年数据为 15.84%、15.05%, 而近年为

表 3 反应截面推荐值

$^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$		$^{96}\text{Mo}(n, p)^{96}\text{Nb}$		$^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+g}\text{Zr}$	
$E_n(\text{MeV})$	$\sigma(\text{mb})$	$E_n(\text{MeV})$	$\sigma(\text{mb})$	$E_n(\text{MeV})$	$\sigma(\text{mb})$
8.5	125±20	5.0	0.011±0.004	5.0	0.26±0.06
9.0	409±48	5.5	0.024±0.006	5.5	0.54±0.10
9.5	651±75	6.0	0.051±0.009	6.0	1.02±0.12
10.0	854±100	6.5	0.11±0.02	6.5	1.74±0.40
11.0	1161±100	7.0	0.21±0.03	7.0	2.75±0.45
12.0	1358±100	7.5	0.41±0.05	7.5	4.05±0.55
13.0	1468±78	8.0	0.75±0.15	8.0	5.56±0.70
13.5	1496±78	8.5	1.36±0.30	8.5	7.36±1.0
14.0	1509±78	9.0	2.42±0.40	9.0	9.25±1.1
14.5	1509±78	9.5	3.72±0.50	9.5	11.2±1.5
15.0	1497±78	10.0	5.24±0.70	10.0	13.2±2.5
15.5	1474±86	11.0	8.83±0.80	11.0	17.1±3.0
16.0	1440±86	12.0	13.0±1.0	12.0	20.9±3.0
17.0	1344±100	13.0	17.5±1.0	13.0	25.0±1.0
18.0	1208±100	13.5	19.7±1.0	13.5	27.1±1.0
19.0	1029±100	14.0	22.2±1.0	14.0	29.4±1.1
20.0	798±100	14.5	24.6±1.0	14.5	31.9±1.2
		15.0	26.9±2.0	15.0	34.5±1.5
		15.5	29.1±3.0	15.5	37.2±3.0
		16.0	31.2±3.5	16.0	39.9±3.2
		17.0	34.9±4.0	17.0	44.7±3.6
		18.0	37.7±4.3	18.0	47.1±3.8
		19.0	39.4±4.4	19.0	44.7±3.6
		20.0	41.1±4.6	20.0	36.4±3.0

14.84%。这也是数据分散的原因之一, 但大多数文章没有给丰度数据, 无法归一因而编评误差大。在 6—10 MeV 能区只有 M. M. Rahmen 一家数据, 在 5—6 MeV, 10—12 MeV 和 17—20 MeV 能区没有实验数据, 我们只能参考理论曲线走向和 14 MeV 及 6—10 MeV 的实验值给出推荐值, 因此在 5—12 MeV 和 17—20 MeV 能区编评误差大。

以上三个反应道的各家数据以及我们的编评结果分别见图 1—3 和表 3。

图3 $^{92}\text{Mo}(n, \alpha)^{89m+8}\text{Zr}$ 反应截面

- A. Marcinkowski(86) ✕ Garlea(86) ☆ S. Amemiya(82) ▼ Lu Wen-den(72) √ P. Strohal(62) ↓ P. Cuzzocrea (67) ◀ M. M. Rahman(85) ▲ O. И. Артемьев (82) ∩ E. T. Bralitt (63) ▶ S. M. Qaim(74) ■ C. V. Srinivasa Rao (81) ⋈ Atsumi (84)
 × This Work — Theory Cal -- Evaluation

参 考 文 献

- [1] A. Marcinkowski et al., *Z. Phys.*, **A323**(1986), 91.
 [2] Y. Fujino et al., *Bull Inst Chem Res (Kyoto Univ)*, **60**(1982), 205.
 [3] S. Amemiya et al., *J. Nucl. Sci. Technology*, **19**(1982), 781.
 [4] P. Strohal et al., *Nucl. Phys.*, **30**(1962), 49.
 [5] Lu Wen-deh et al., *Phys. Rev.*, **C1**(1970), 350.
 [6] S. M. Qaim, *Nucl. Phys.*, **A185**(1972), 614.
 [7] P. Cuzzocrea et al., *Nucl Phys.*, **A103**(1967), 616.
 [8] E. T. Bralitt and R. W. Fink, *Phys. Rev.*, **131**(1963), 2649.
 [9] D. G. Gardner et al., *Nucl. Phys.*, **A96**(1967), 121.
 [10] C. V. Srinivasa, et al., *Phys. Scr.*, **24**(1981), 935.
 [11] R. C. Haight et al., *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 700.
 [12] Lu Wen-deh and R. W. Finion, *Phys. Rev.*, **C4**(1971), 1173.
 [13] O. И. Артемьев, *Атомная Энергия*, **49**(1980), 195.
 [14] E. B. Paul et al., *Can. J. Phys.*, **31**(1953), 267.
 [15] C. S. Khuvana et al., *Nucl. Phys.*, **28**(1961), 560.
 [16] J. Csikai et al., *Acta. Phys. Acad. Sci Hung.*, **23**(1967), 87.
 [17] Maslov, *Jadernye Konstanty*, Obninsk Report (1972).
 [18] S. Amemiya et al., *J. NST*, **19**, (10) (1982), 781.
 [19] Atsumi et al., *P. NEANDC (J)-106/U*, **55**(1984).
 [20] M. M. Rahman et al., *Nucl. Phys.*, **A435**(1985), 43.
 [21] Pepelnic et al., *P. NEANDC (E)-262U* (1985).
 [22] Garlea, et al., *P. INDC (ROM)-017*, **22**, 8(1986).
 [23] Molla, et al., *R. INDC (BAN)-003*, (1986).
 [24] Y. Kanda, *Nucl. Phys.*, **A185**(1972), 177.
 [25] V. E. Lewis and K. J. Zieba, *Nucl. Instr and Meths.*, **174**(1980), 141
 [26] V. E. Lewis, *Metrologia.*, **20**(1984), 49.
 [27] E. Browne and R. B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes* (1986).

- [28] S. Tageser and H. Vonach, Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements Technical Reports Series No. 227 P-6 IAEA Vienna, 1983.
[29] M. M. Ranman and S. M. Qaim, *Nucl. Phys.*, **A435**(1985), 43.

The Cross Section Measurements for the $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ and $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ Reactions

KONG XIANGZHONG WANG YONGCHANG YUAN JUNQIAN

YANG JINGKANG WANG XUEZHI

(Department of Modern Physics, Lanzhou University 730001)

WANG JING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The cross sections for $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$, $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ and $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$ have been measured by using the activation method relative to the cross sections of $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ in the neutron energy range 13.40—14.79 MeV. The comparison between the values of measured and calculated using theory mode was made. The evaluated excitation functions for the three reactions are given.