

$\text{Mo}(d, x)^{95m}\text{Tc}$, $\text{Mo}(d, x)^{96g}\text{Tc}$ 和 $\text{Mo}(d, x)^{97m}\text{Tc}$ 反应的激发函数

吴胜 龙先灌 彭秀峰 何福庆 刘慢天

(四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

摘 要

用活化法和选靶技术, 测量了入射氘核能量从 3.2 到 13.3 MeV 范围内, $\text{Mo}(d, x)^{95m}\text{Tc}$, $\text{Mo}(d, x)^{96g}\text{Tc}$ 和 $\text{Mo}(d, x)^{97m}\text{Tc}$ 反应的激发函数, 并与复合核统计模型理论计算作了比较.

一、引 言

钼在一定能量的轻带电粒子轰击下发生核反应后, 可以生成半衰期适中的放射性核素, 用它作为指示剂可以反映某些过程的一些有意义的动力学特征. 因此, 这些核反应的激发函数的研究, 具有十分重要的意义. 到目前为止, 氘核在钼上引起核反应的截面数据很少, 只有 Āanda 和 Svoboda^[1] 给出了入射氘核能量从 0.8 到 12.7 MeV 范围内 (d, n) 和 $(d, 2n)$ 反应的截面数据, 但是他们给出的数据的形式有些不明确, 并且未给出截面值的测量误差, 因而给使用带来了不便. 为此, 我们用活化法和选靶降能技术, 使用高纯锗探测器和 γ 能谱自动获取与分析系统, 对氘核轰击钼靶所产生的放射性产物, 不经过化学分离而直接进行 γ 能谱测量, 从而确定了入射氘核能量从 3.2 到 13.3 MeV 范围内, $\text{Mo}(d, x)^{95m}\text{Tc}$ 、 $\text{Mo}(d, x)^{96g}\text{Tc}$ 和 $\text{Mo}(d, x)^{97m}\text{Tc}$ 反应的激发函数, 并与复合核统计理论计算值作了比较, 理论与实验结果符合较好.

二、实 验

1. 制靶

实验所用的钼靶是用纯度为 99.95% 的金属钼片通过碾压制得的, 由中国原子能科学研究院提供. 每块钼片的厚度约为 $10\text{mg}/\text{cm}^2$. 靶厚用精度为百万分之一克天平由称重法测得, 靶厚的均匀性好于 95%, 每块钼靶都分别夹在两片高纯铝箔制作的捕集箔中间, 以防止由于核反冲引起的核反应产物的丢失. 第一片铝箔厚为 $1.25\text{mg}/\text{cm}^2$, 其余的均为 $4.96\text{mg}/\text{cm}^2$. 整个靶迭由 11 组靶片构成.

2. 辐照

辐照是在我所 1.2m 迴旋加速器上的 11° 管道专用靶室中进行的。实验装置的详细描述见文献 [2], 从加速器引出的能量为 13.4 MeV 氖核, 打在法拉第筒内的迭靶上, 用 ORTEC439 型数字束流积分仪测量入射粒子电量。在法拉第筒前加有电压为 -300V 的电极, 来抑制二次电子发射。辐照时, 每 200s 记录一次束流电量, 总辐照时间为 12200s, 平均束流强度为 0.25 μA, 积分电量约为 3000 μC。辐照时, 靶迭用液氮冷却。

3. γ 能谱测量

核反应产物的 γ 能谱用 ORTEC GEM-30195 型高纯锗探测器测量。探测器的能量分辨率 (FWHM) 对 ⁶⁰Co 的 1.33MeV γ 射线为 1.95keV。γ 能谱的数据获取和分析由 ORTEC 800 型 ADC, Apple II+ 和 IBM PC/XT 微机系统进行, 可以直接给出 γ 能谱每个峰的净面积及其误差。整个测量系统用中国计量科学院提供的 ¹⁵²Eu、⁵⁷Co 和 ⁵⁴Mn 等标准放射源作过能量刻度和探测效率刻度。探测效率的误差为 3% 左右。

4. 数据处理及结果

天然元素钼有七种同位素, 其丰度分别为 ⁹²Mo(14.84%), ⁹⁴Mo(9.25%), ⁹⁵Mo(15.92%), ⁹⁶Mo(16.68%), ⁹⁷Mo(9.55%), ⁹⁸Mo(24.13%) 和 ¹⁰⁰Mo(9.63%)。

与本文有关的核反应产物的衰变数据和核反应 Q 值列于表 1 中^[3]。

表 1 核反应产物的衰变数据和核反应 Q 值

核反应产物	半衰期	γ 射线能量 (keV)	绝对强度(%)	核反应	Q 值 (MeV)
^{95m} Tc	61.0D	582.1	31.5	⁹⁴ Mo(d,n) ^{95m} Tc	2.7
		835.1	28.0	⁹⁵ Mo(d,2n) ^{95m} Tc	-4.7
		786.2	9.10		
^{96g} Tc	4.28D	849.9	97.8	⁹⁵ Mo(d,n) ^{96g} Tc	3.2
		812.5	82.2	⁹⁶ Mo(d,2n) ^{96g} Tc	-5.9
		1126.8	15.2	⁹⁷ Mo(d,3n) ^{96g} Tc	-12.8
^{97m} Tc	89.0D	96.5	0.32	⁹⁶ Mo(d,n) ^{97m} Tc	3.4
				⁹⁷ Mo(d,2n) ^{97m} Tc	-3.6
				⁹⁸ Mo(d,3n) ^{97m} Tc	-12.2

在计算反应截面时, 我们分别选取 835.1, 812.5 和 96.5 keV γ 射线作为核反应产物 ^{95m}Tc, ^{96g}Tc 和 ^{97m}Tc 的标识 γ 射线。用活化法确定核反应截面的计算公式为

$$\sigma = \frac{MA(t)}{N_0 \chi \beta \lambda \varepsilon p} \left[\sum_i \frac{Q_i}{1.6 \times 10^{-19}} e^{-\lambda(t-t_i)} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中 M 为原子量; ε 为探测器对待测标识 γ 射线全能峰的探测效率; p 为核反应产物 γ 衰变放出标识 γ 射线的绝对强度; λ 为衰变常数; N₀ 为阿佛加德罗常数; χ 为单位面积的靶重; A(t) 为单位时间记录到的全能峰的净计数; β 为靶物质的纯度; Q_i 为辐照时间间隔 t_i 内束流积分量; t - t_i 为第 i 段轰击停止到 γ 能谱测量开始的时间间隔。

氖核入射到各个靶片上的能量 E_d 由能损数据^[4]计算得到。

由 (1) 式计算的截面数据见表 2。表中还给出了截面测量的误差, 其来源包括: 靶

的质量厚度不均匀性误差 (小于 5%), 效率刻度误差 (2%—4%), 标识峰计数的统计误差和束流积分量的误差。总误差为 6—8%。

表 2 核反应截面实验值(以毫巴为单位)

$E_d(\text{MeV})$	Mo(d,x) ^{95m} Tc	Mo(d,x) ^{96g} Tc	Mo(d,x) ^{97m} Tc
13.3	35.7±2.0	154±9	20.4±1.4
12.5	33.1±1.8	135±8	18.3±1.3
11.6	36.0±2.0	135±8	21.1±1.5
10.7	34.3±1.9	120±7	18.5±1.7
9.7	36.5±2.0	115±7	19.1±1.3
8.7	28.7±1.6	78.6±4.8	19.4±1.7
7.6	21.8±1.2	50.2±3.1	17.9±1.2
6.3	13.8±0.8	29.1±1.8	16.3±1.3
4.9	4.82±0.30	14.3±0.9	7.56±0.76
3.2	0.45±0.07	2.0±0.2	0.50±0.06

实验测量的结果见图 1。为了比较,我们还画出了 Ěranda 和 Svoboda 的结果。从图 1 中可以看出,对于 Mo(d,x)^{96g}Tc 和 Mo(d,x)^{97m}Tc 反应,两家的结果符合较好。对于 Mo(d,x)^{95m}Tc 反应,Ěranda 的结果低于我们的测量值。一个可能的原因是 Ěranda 所用的 ^{95m}Tc 的标识 γ 射线的绝对强度较大,而我们采用的值是较新的实验测量值。

三、理论计算

对于 Mo(d,x)^{96g}Tc 反应,在我们实验测量的能区,有贡献的反应是⁹⁵Mo(d,n)^{96g}Tc 和 ⁹⁶Mo(d,2n)^{96g}Tc。我们用复合核统计模型计算了 ⁹⁶Mo(d,2n)^{96g}Tc 反应的激发函数。

根据复合核统计模型,(d,2n) 反应截面为

$$\sigma(d,2n) = \sigma_c(d) \frac{\Gamma_{2n}(E_c)}{\Sigma\Gamma_T(E_c)} \quad (2)$$

其中 $\sigma_c(d)$ 为复合核形成截面; E_c 为复合核激发能; $\frac{\Gamma_{2n}}{\Sigma\Gamma_T}$ 为复合核经由 2n 衰变的几率。假定复合核蒸发中子是逐个的蒸发事件,则(2)式可写成

$$\sigma(d,2n) = \sigma_c(d) \left[\frac{\Gamma_n}{\Gamma_n + \Sigma\Gamma_j} \right] \cdot B_n \quad (3)$$

其中 Γ_n 为中子宽度; $\Sigma\Gamma_j$ 为带电粒子总宽度,对于重核 $\Sigma\Gamma_j \ll \Gamma_n$, 因而

$$\sigma(d,2n) = \sigma_c(d) \cdot B_n \quad (4)$$

根据文献 [5], B_n 的解析形式为:

$$B_n = 1 + \exp[2(a_n Q'_n)^{1/2}] \left\{ 2(Q_n Q'_n)^{3/2} - 3a_n Q'_n + \left(\frac{3}{2} - a_n \beta - a_n R_n \right) \right. \\ \left. \times [2(a_n Q'_n)^{1/2} - 1] \right\} / \exp[2(a_n R_n)^{1/2}] \left\{ 2a_n R_n - \left(\frac{3}{2} - a_n \beta \right) \right\}$$

$$\times [2(a_n R_n)^{1/2} - 1] \}, \quad (5)$$

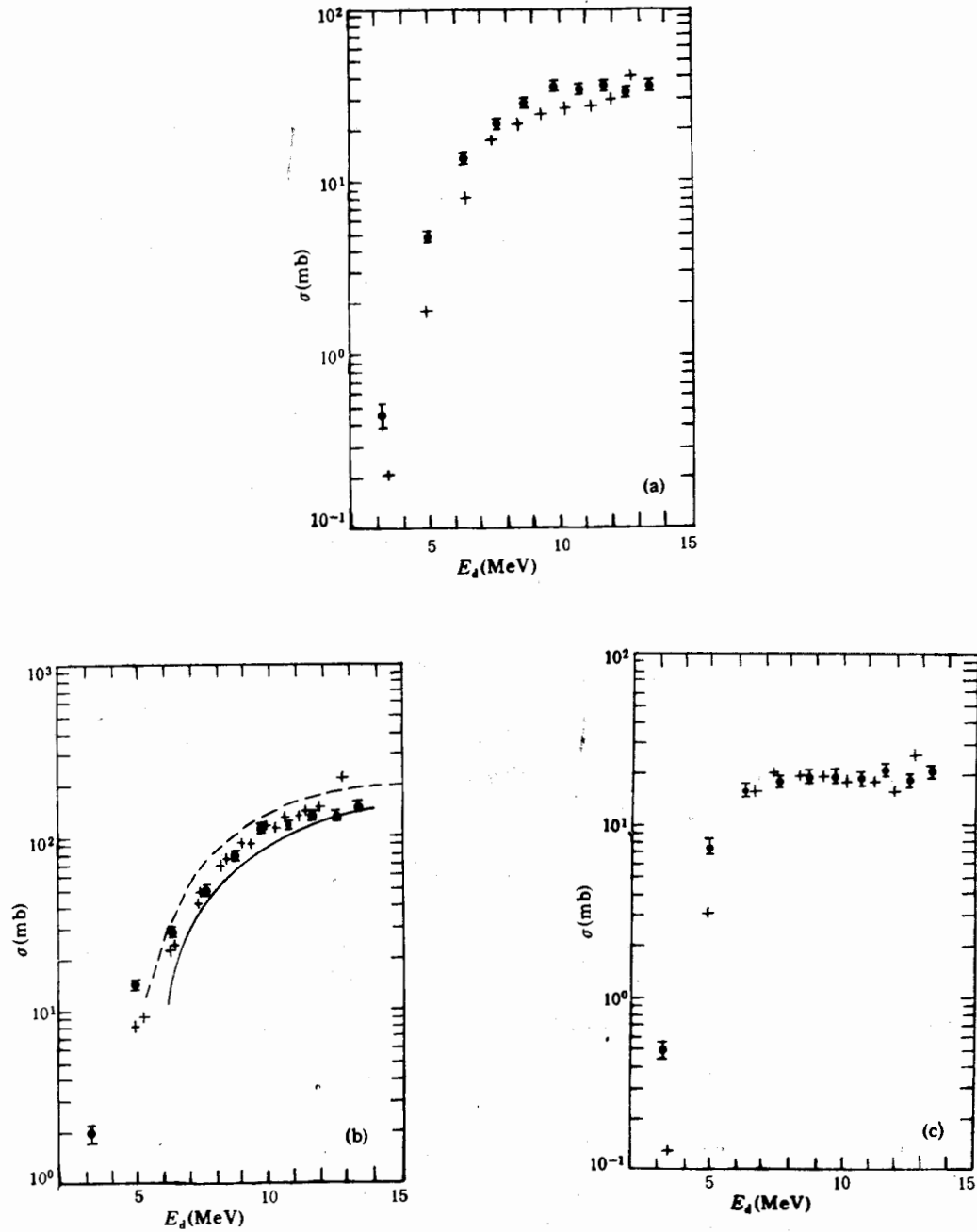


图1 Mo(d, x) 反应激发函数

实验测量 \square 本工作 $+$ Randa and Svoboda

理论计算—— $r_0 = 1.3$ fm --- $r_0 = 1.5$ fm

(a) $\text{Mo}(d, x)^{233m}\text{Tc}$ (b) $\text{Mo}(d, x)^{236}\text{Tc}$ (c) $\text{Mo}(d, x)^{237m}\text{Tc}$

其中, $a_n = [0.00917s + 0.12]A$, $\beta = (2.12A^{-2/3} - 0.050)/\alpha$, $\alpha = 0.76 + 2.2A^{-1/3}$, $R_n = E_c - Q_n - \delta$, $\delta = \delta(N) + \delta(Z)$ 为对能修正; $s = s(N) + s(Z)$ 为壳修正; Q_n 为复合核蒸发一个中子的分离能; Q'_n 为蒸发一个中子的剩余核再蒸发一个中子的结合能。

在计算 $^{96}\text{Mo}(\text{d}, 2\text{n})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 反应截面时, 复合核形成截面 $\sigma_c(\text{d})$ 取自 Shapiro^[6] 的计算值, 参数 δ 和 s 取自文献 [7]。

理论计算和实验结果比较见图 1(b), 图中两条曲线分别对应于参数 $r_0 = 1.3\text{fm}$ 和 1.5fm 。可以看出, 在 $^{96}\text{Mo}(\text{d}, 2\text{n})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 反应阈能以上激发函数的理论计算与实验结果符合得很好, 低于上述阈能时, 截面是由 $^{95}\text{Mo}(\text{d}, \text{n})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 反应贡献的。

我们采用活化法和高分辨 γ 能谱技术, 对氘核轰击天然元素钼靶所产生的放射性产物直接进行测量, 确定了在 3.2 到 13.3 MeV 能区 $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{95\text{m}}\text{Tc}$, $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 和 $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{97\text{m}}\text{Tc}$ 反应的激发函数, 实验测量与 Āanda 的结果基本一致。我们还给出了截面的测量误差。

我们用复合核统计模型计算了 $^{96}\text{Mo}(\text{d}, 2\text{n})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 反应的激发函数, 计算结果与实验测量的 $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{96\text{g}}\text{Tc}$ 反应激发函数符合, 因此, 可以认为, 用复合核统计模型能够较好地描述上述反应过程。

参 考 文 献

- [1] Z. Āanda and K. Svoboda, *J. Inorg. and Nucl. Chem.*, **38**(1976), 2289.
- [2] 龙先灌, 彭秀峰, 何福庆, 原子核物理, **9**(1987), 48.
- [3] U. Reus and W. Westmeier, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **29**(1983), 194.
- [4] C. F. Williamson, J-P. Boujot and J. Picard, CEA-R-3042, 1966.
- [5] I. Dostrorsky, *Phys. Rev.*, **116**(1959), 638.
- [6] M. M. Shapiro, *Phys. Rev.*, **90**(1953), 171.
- [7] A. Gilbert and A. G. W. Cameron, *Can. J. Phys.*, **43**(1965), 1446.

Excitation Functions for $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{95\text{m}}\text{Tc}$, $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{96\text{g}}\text{Tc}$ AND $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{97\text{m}}\text{Tc}$ Reactions

WU SHENG LONG XIANGUAN PENG XIUFENG HE FUQING LIU MANTIAN

(Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

ABSTRACT

The excitation functions are determined by activation method and stacked-foil technique for the reactions $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{95\text{m}}\text{Tc}$, $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{96\text{g}}\text{Tc}$ and $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{97\text{m}}\text{Tc}$ from 3.2 to 13.3 MeV. The experimental results are compared with theoretical calculation by compound nucleus statistical model.