

文章编号: 1007-4627(2006)03-0296-04

14 MeV 中子引起的核反应截面测量中监督反应的研究*

罗均华, 易艳玲, 孔祥忠

(兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 讨论了 14 MeV 中子引起的核反应截面测量中监督反应对测量结果的影响, 同时列出了常用的一些监督反应及参数, 利用截面的评价价值给出了一些监督反应的截面随中子能量变化的关系曲线, 并对 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 反应做了定性分析, 说明了监督反应的选取对反应截面测量的重要性。

关键词: 中子; 核反应; 截面测量; 监督反应

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

T(d, n) ^4He 反应作为 14 MeV 单能中子源有着广泛的应用, 特别是在核数据测量如核反应截面的测量中, 常以 14 MeV 能量点作为绝对测量点。而核反应截面是核物理的重要研究课题之一, 它能揭示入射粒子与靶核相互作用机制, 加深对核力、核结构的认识, 也是核技术和核能利用的基础数据, 特别是在核反应理论模型的建立和完善、聚变反应堆的设计、数据库的建设以及天体物理方面都有重要的意义。因而, 核反应截面测量的准确性就显得非常重要。

D-T 中子源虽然是典型的 14 MeV 单能中子源, 但是在实验中由于 d 束照射在 T-Ti 靶上形成自生 D 靶, 可产生能量较低的 d-D 中子^[1], 同时还有散射中子都会对 14 MeV 中子的单能性有一定的影响。通常扣除低能中子影响所采用的方法有^[2]: (1) 做空靶实验; (2) 用样品照射处的中子能谱和截面曲线经计算扣除低能中子的影响; (3) 选用与待测反应有几乎相同反应阈能和相似的激发函数形状的监督反应, 同时用已测得的中子能谱扣除监督反应与待测反应因截面曲线形状不同引起的差别。大多数的核反应截面测量^[3-15]都使用监督反应来约去计算公式中的中子注量率这一参量。但许多文

献在截面测量中没有注意到监督反应与低能中子的关系, 致使测得的反应截面值因监督反应的选取不合适而有一定的分歧。

本文主要讨论了 14 MeV 中子引起的核反应截面测量中监督反应的作用原理以及监督反应对核反应截面测量的影响, 并做了定性的分析, 同时还列举了一些常用的监督反应及其相关参数, 用评价价值给出了它们的激发函数曲线。

2 原理与方法

核反应截面测量的计算有如下公式:

$$\sigma = \frac{\lambda AFC}{\epsilon_p I_\gamma \eta K S M D N_A \phi}, \quad (1)$$

其中: ϵ_p 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; λ 为衰变常数; $S = 1 - e^{-\lambda T}$ 表示剩余核的生长因子, T 是总的中子照射时间; M 为样品质量; N_A 为阿伏加德罗常量; ϕ 为中子注量率; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 为测量收集因子, t_1 为从照射到测量开始的时间间隔, t_2 为从照射结束到测量结束的时间间隔; A 为样品元素的原子量; C 为实测的全能峰面积; F 为总的 γ 活度校正因子, 其表达式为

* 收稿日期: 2006-03-01; 修改日期: 2006-06-26

* 基金项目: 中国核数据中心资助项目

作者简介: 罗均华(1971-), 男(汉族), 甘肃张掖人, 博士研究生, 讲师, 从事粒子物理与原子核物理的研究;

E-mail: luojh03@st.lzu.edu.cn

$$F = f_s \times f_c \times f_g \quad , \quad (2)$$

其中, f_s , f_c 和 f_g 分别是给定 γ 射线在样品中的自吸收因子、级联 γ 符合效应修正因子以及几何校正修正因子; K 为 neutron 注量波动校正因子, 其表达式为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^l \Phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i})}{\Phi \cdot S} e^{-\lambda T} \quad , \quad (3)$$

其中, l 为将照射时间分成的段数, Δt_i 为每段的时间间隔; Φ_i 为在 Δt_i 内入射到样品的平均中子通量, Φ 为在 T 时间内入射到样品上的平均中子通量。

为了约去(1)式中的中子注量率 ϕ , 一般选另一核反应, 该反应的反应截面精确知道(一般选截面评价值), 且该反应对应的核物质(简称监督片)与待测量样品有同样的几何截面, 把待测量样品夹在两监督片之间同时照射。这样把两反应的计算公式相比, 即可得到公式^[3]:

$$\sigma_x = \frac{[\epsilon_p I_\gamma \eta K S M D]_0}{[\epsilon_p I_\gamma \eta K S M D]_x} \cdot \frac{[\lambda A F C]_x}{[\lambda A F C]_0} \cdot \sigma_0 \quad , \quad (4)$$

其中, 下标“0”和“x”分别表示监督片和待测核素的物理量。

3 结果与讨论

由于待测反应和监督反应有各自的阈能, 所以低能中子对截面的影响也不一样, 致使对截面的测量有一定的误差。如在(4)式中, 如果待测反应阈能较低, 而选用的监督反应阈能较高, 则 C_0 比 C_x 较少地计入了低能中子的影响, 致使所测截面偏高, 反之亦然。同时由于单能中子的能量有一定的不确定度, 为了得到与某一能量点对应的更准确的截面值, 监督反应的选择还要注意在该能量点附近其截面要平稳变化。我们把常用的一些监督反应^[3-15]及其相关参数列于表 1。表中靶核丰度、子核半衰期及其特征 γ 射线能量和强度等数据除¹⁸F 取自中国核数据中心外, 其余均采用文献[16]的数据。把各监督反应的截面随中子能量的变化表示于图 1, 图中截面的评价值除⁹³Nb(n, 2n)^{92m}Nb 取自文献[17]和¹⁹⁷Au(n, 2n)¹⁹⁶Au 取自 CENDL-2 数据库外其余均来自数据库 JENDL3.3。

表 1 一些常用的监督反应及其相关参数

监督反应		母核丰度(%)	子核 $T_{1/2}$	E_γ/keV	$I_\gamma(\%)$	阈能/MeV
文献	反应道					
[3]	⁹³ Nb(n, 2n) ^{92m} Nb	100	10.15 d	934.46	99	8.93
[13]	⁹⁰ Zr(n, 2n) ⁸⁹ Zr	51.45	78.41 h	908.96	100	12.1
[5]	⁶⁵ Cu(n, 2n) ⁶⁴ Cu	30.83	12.700 h	1 345.77	0.437	10.06
[4] [5]	⁶³ Cu(n, 2n) ⁶² Cu	69.17	9.74 min	875.68	0.150	11.0
[11]	⁷⁵ As(n, 2n) ⁷⁴ As	100	17.77 d	595.847	59	10.4
[8]	⁵⁹ Co(n, 2n) ⁵⁸ Co	100	70.82 d	810.764	99	10.6
[5]	⁵⁸ Ni(n, 2n) ⁵⁷ Ni	68.077	35.60 h	1 377.63	81.7	12.4
[6]	¹⁹ F(n, 2n) ¹⁸ F	100	109.77 min	1 656	100	11.0
[7]	⁵⁵ Mn(n, 2n) ⁵⁴ Mn	100	312.3 d	834.848	99.976	10.4
[12]	¹⁹⁷ Au(n, 2n) ¹⁹⁶ Au	100	9.7 h	147.81	42.5	8.112
[3] [4] [5]	²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	100	14.959 h	1 368.633	100	3.248
[9]	²⁷ Al(n, p) ²⁷ Mg	100	9.458 min	843.74	71.8	1.9
[10]	⁵⁶ Fe(n, p) ⁵⁶ Mn	91.72	2.578 5 h	846.771	98.9	2.97
[15]	⁵⁴ Fe(n, p) ⁵⁴ Mn	5.8	312.3 d	834.848	99.976	0
[11]	⁷⁵ As(n, p) ^{75g} Ge	100	82.78 min	264.658 4	11	0.4
[4]	²⁸ Si(n, p) ²⁸ Al	92.23	2.241 4 min	1 778.969	100	4.0
[14]	³² S(n, p) ³² P	95.02	14.262 d	1 711	100	0.957

下边仅以 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 反应为例定性地介绍低能中子在 14 MeV 中子能区截面测量中的影响。反应 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 的阈能为 1.9 MeV, 在产物核的生成中包含了大量低能中子的影响。把收集到的 26 家数据根据中子注量率测量方法的不同分为两组, A 组 9 家数据, 用 $(n, 2n)$ 监督反应, 只记录 9 MeV 以上的中子, B 组 17 家的中子注量率用 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 或 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 等低阈能的反应监督。再把 A 组和 B 组的数据根据入射中子能量分为 4 组: (14.7 ± 0.1) , (14.4 ± 0.1) , (14.1 ± 0.1) 和 (13.5 ± 0.1) MeV, A 组共有 8, 4, 4 和 4 家, B 组有 13, 3, 7 和 2 家; 对应 4 个能量点的平均截面分别为 A 组: 82.5, 83.8, 86.0 和 100.3 mb; B 组: 70.1, 66, 73.1, 91 mb; 而在这 4 个能量点的评价截面为: 70.3, 73.0, 75.8, 81.5 mb。从以上数据可以看出, 在 A 组的中子注量率测量中基本上不包括低能中子的影响, 因此截面测量值偏大。B 组中子注量率中包括了大于 2.97 MeV 或 3.248 MeV 中子的贡献, 在截面测量中抵消了部分低能中子的影响, 给出比 A 组低的截面值。从上例中两组平均截面的比较可定性地了解低能中子对低阈能

反应截面的影响。

在 14 MeV 中子引起的核反应截面测量中, 随着照射时间的增加, 在 T-Ti 靶上形成自生 D 靶; 实验大厅内低能散射中子都会对所测量核反应截面产生一定的影响。根据所测量反应和监督反应的阈能以及它们的激发函数形状, 恰当地选取监督反应是避免低能中子对核反应截面测量影响的有效途径。

4 结论

在高精度核反应截面测量中, 低能中子对测量结果的影响是不能忽略的, 特别是对低反应阈能的截面测量影响更大。为了得到可靠的测量结果, 实验中必须采取有效措施尽量减小它们的影响, 除了前两种方法外, 第三种方法中监督反应的选择也是一种非常重要的环节。

在单能中子对应的活化截面测量中, 为尽量消除低能中子的影响, 通常根据待测反应的阈能选用有相同或相近阈能的监督反应来测量中子的注量

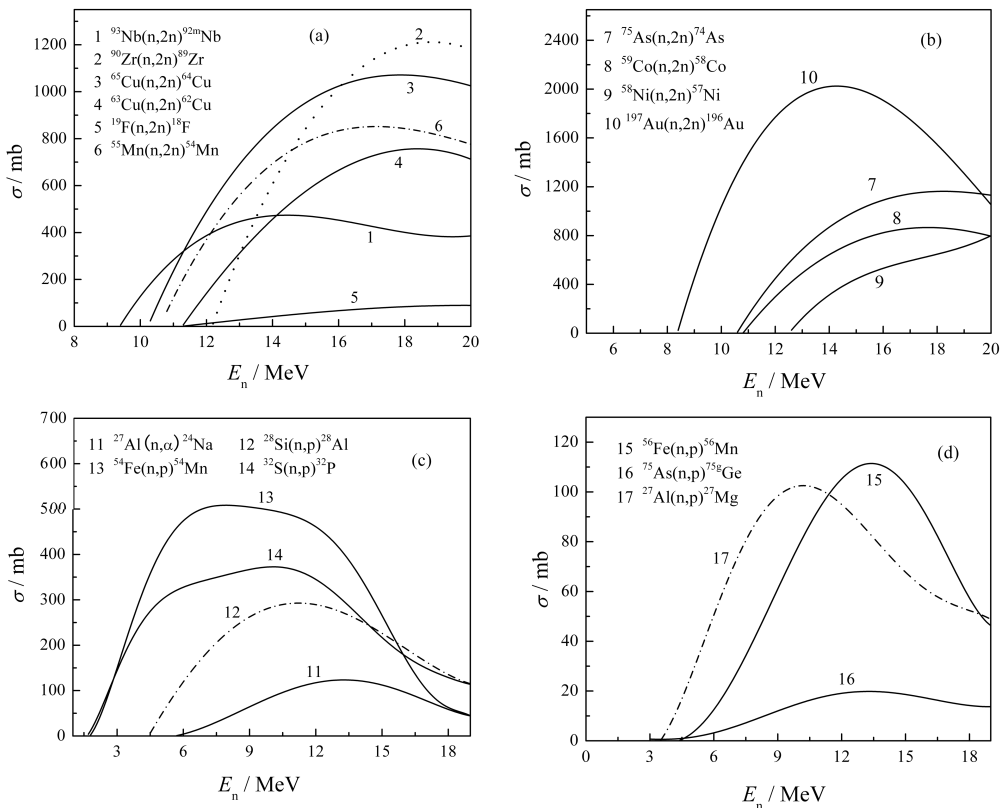


图 1 部分监督反应与中子能量截面关系

率,同时激发函数的走势也要注意。在一般的测量中,都选用含有待测反应母核同位素的天然样品,一次照射会测出多个核反应的截面,在这种情况下,

可根据需要同时选用多个监督反应,对不同的待测反应进行监督。

参 考 文 献:

- [1] 赵文荣,于伟翔,卢涵林. 原子能科学技术, 1995, **29**(4): 294.
- [2] 黄小龙,于伟翔,韩晓刚等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(12): 1 074.
- [3] Kong Xiangzhong, Wang Yongchang, Wang Rong, *et al.* Radiochim Acta, 1998, **81**: 63.
- [4] Strain J E, Ross W J. 14 MeV Neutron Reactions. 1965, ORNL-3672.
- [5] Preiss I L, Fink R W. Nucl Phys, 1965, **15**: 326.
- [6] Bormann M, Seebeck U, Voights W, *et al.* Zeitschrift fuer Naturforschung, 1966, **A21**: 988.
- [7] Sekine T, Baba H. J Inorg Nucl Chem, 1981, **43**(7): 1 427.
- [8] Qaim S M, Wolfe R, Liskien H. Excitation Functions of (n, t) Reactions on ^{27}Al , ^{59}Co , ^{93}Nb . 1980, INDC(EUR)-13, 23.
- [9] Mangal S K, Khurana C S. Nucl Phys, 1965, **69**: 158.
- [10] Hankla A K, Fink R W, Hamilton J H. Nucl Phys, 1972, **A180**: 157.
- [11] Qaim S M, Molla N I. 1972, Nucl Phys, **A185**: 614.
- [12] Ikeda Y, Konno C, Mizumoto M, *et al.* Activation Cross Section Measurement at Neutron Energies of 11.0, 12.0 and 13.2 MeV Using ^1H ($^{11}\text{B}, \text{n}$) ^{12}C Neutron Source at JAERI. 1991, Report JAERI-M-91-032, 281.
- [13] Bayhurst B P, Gilmore J S, Prestwood R J. Phys Rev, 1975, **C12**: 451.
- [14] Cohen B L. Phys Rev, 1951: **81**: 184.
- [15] Zaidi J H, Karim H M A, Arif M, *et al.* Radiochim Acta, 1993, **60**(4): 169.
- [16] Browne E, Firestone R B. Table of Isotopes. New York: Wiley, 1996.
- [17] Wagner M, Vonach H, Pavlik A, *et al.* Physik Daten Physics Data, Evaluation of Cross Sections for 14 Important Neutron-dosimetry Reactions. 1990, (13): 5.

Research of Choice of Monitor in Cross Section Measurements for the Reactions Induced by 14 MeV Neutrons^{*}

LUO Jun-hua, YI Yan-ling, KONG Xiang-zhong

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

Abstract: It was discussed in this article that the effects of different monitors in the cross section measurements of nuclear reactions induced by 14 MeV neutrons, at the same time some monitors and correlative parameters were listed. The excitation functions of monitors are taken from the evaluated cross sections, and a qualitative analysis has been performed for $^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{p})^{27}\text{Mg}$ reaction. It indicates that the choice of monitor is very important for cross section measurements.

Key words: neutron; nuclear reaction; cross section measurement; monitor