

单能中子源中低能成份对活化 截面测量的影响*

黄小龙 于伟翔 韩晓刚 赵文荣 卢涵林

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

陈金象 施兆民 唐国有 张国辉

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 对用单能中子源作活化截面测量时低能中子干扰的影响作了分析研究,并从测量的两种常用中子源 $T(d,n)^4\text{He}$ 和 $D(d,n)^3\text{He}$ 的中子源能谱中验证了这种定性分析.最后给出了两个比较典型的反应 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 和 $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ 反应的截面测量结果.

关键词 单能中子源 低能中子 活化截面测量

1 引言

中子核反应截面是一种非常重要的核数据,在核物理基础研究及核工程应用等方面都具有广泛的实用价值.

实验测量中子核反应截面时,需用合适的单能中子源,尤其对高精度的实验测量.目前在中子能量 $E_n < 20\text{MeV}$ 能区,常用以下4种中子源: $T(d,n)^4\text{He}$ 、 $D(d,n)^3\text{He}$ 、 $T(p,n)^3\text{He}$ 和 $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$,这些中子源都有其特定的单色性范围.另一方面,虽然实验中已作了多方面精心安排,实验方案选用尽可能降低各种低能中子对截面测量的影响,但由于实验条件中有些干扰因素无法避免,中子源还可能存在着低能成份,这必将影响低阈核反应截面的测量.

本文以常用的 $T-d$ 和 $D-d$ 中子源为例,对不同能区的中子能谱进行了测量,以观察中子源中低能中子的种类及形成的过程,在实验中定量地确定其对截面测量的影响,并给出了 ^{58}Ni 和 ^{64}Zn 两个核素的 (n,p) 反应的截面测量结果.

1997-10-28收稿,1998-01-09收修改稿

* 北京大学重离子研究所部分财政资助

2 中子源

中子能量小于 20MeV 能区中子反应截面的测量, 常采用下列 4 种核反应作为单能中子源: $T(d, n)^4\text{He}$ 、 $D(d, n)^3\text{He}$ 、 $T(p, n)^3\text{He}$ 和 ${}^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 。在各种加速器上通过这些核反应, 可以获得从几十 keV 直到 20MeV 能区的单能中子源。表 1 列出了这些中子源的有关特性。

表 1 常用加速器中子源

核反应	入射粒子能区 (MeV) (有效单色性范围)	中子能区 (MeV) (单色中子范围)	加速器类型	注 释
${}^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	1.881—7 (1.881—2.37)	0.03—5.3 (0.03—0.6)	静电加速器	$E_p > 2.37\text{MeV}$ 时, 有 ${}^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}^*$ 第一激发态 (能量为 0.431MeV) 反应产生的中子干扰
$T(p, n)^3\text{He}$	1.019—12 (1.019—8.35)	0.2—11.2 (0.2—7.7)	静电加速器 串列加速器 回旋加速器	$E_p > 8.35\text{MeV}$ 时, 有三体反应 $T(p, np)D$ 产生的中子干扰
$T(d, n)^4\text{He}$	0.1—12 (0.1—3.71)	13—20 以上 (13—20)	高压倍加器 静电加速器 回旋加速器 串列加速器	$E_d > 3.71\text{MeV}$ 时, 有三体反应 $T(d, np)T$ 产生的中子干扰
$D(d, n)^3\text{He}$	0.1—10 (0.1—4.45)	2—13 (2—7.8)	高压倍加器 静电加速器 回旋加速器 串列加速器	$E_d > 4.45\text{MeV}$ 时, 有三体反应 $D(d, np)D$ 产生的中子干扰

使用这些中子源时, 应知道中子能量 (与入射的带电粒子能量、中子的出射角有关)、中子能量的单色性 (与所用中子束的张角、靶或窗材料的吸收性能、是否有三体反应、反应产物是否处于激发态有关)、中子产额 (与核反应截面、靶厚、靶物质对入射粒子的阻止本领有关) 等因素。从这些因素出发, 在中子反应截面测量能区, 所选用的中子源原则上单色性很好, 低能成份较少, 例如, Li-p 和 T-p 源, 存在的低能中子就很少 (主要是散射中子)。这是因为只有在质子能量超过 2.38、7.08MeV 后, Li-p 源由于受 ${}^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}^*$ 处于第一激发态和 ${}^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}^{**}$ 处于第二激发态等反应的干扰, 才出现较严重的低能中子干扰 (同时只要入射质子能量低于 3MeV, 轰击各种结构材料时就不会有大量低能中子产生)。对 T-d 和 D-d 中子源而言, 情况就不同, 它本身总伴随有低能中子的干扰, 尤其是 D-d 中子源。另外在 7—13MeV 中子能区, 由于缺乏理想的单色中子源, 大多数实验室都使用 D-d 中子源并采用气体氘靶, 以提高中子产额。在这段能区低能中子的影响随主中子能量提高越来越严重。

用 T-d 和 D-d 中子源进行实验时, 主要通过下述途径产生低能中子: (1) 靶室在 d 束的照射下形成自生 D 靶, 通过 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应产生中子 (由于入射到束流阻止板中的 d 束能量在不断衰减, 因此产生较主中子能量低的中子); (2) 当入射 d 束能量大于 4.45MeV 时, 三体反应 $D(d, np)D$ 的出现, 将产生破裂中子; (3) 主中子与靶、靶室结构材料和冷却剂的作用和散射; (4) 入射 d 束轰击靶室及管道等结构材料, 通过核反应产生本底中子。

这些低能中子与主中子混在一起形成多种分布的中子能谱, 干扰了主中子的单色性,

必将给中子活化截面的测量带来很大困难. 能否有效地排除这些低能中子的干扰是获得可靠数据的关键.

3 中子低能成份对活化截面测量的影响

在活化截面测量中, 主要测量两个物理量, 一是测量中子活化生成的放射性核素的活性, 另一个量就是入射中子的注量. 注量测量方法有绝对测量和相对测量. 在绝对测量中, 由测量与中子相伴产生的其它粒子 (如 ^3He 、 ^4He) 或反应截面已经准确知道的反应产物 (如 $\text{H}(n, p)$) 得到中子注量; 在相对测量中, 选一截面值已知的参考反应定出入射中子注量.

若主中子存在低能中子干扰, 根据测量原理, 将通过所测的放射性和入射中子注量对活化截面测量产生影响. 下面以 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 、 $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$ 两个典型反应为例, 分析低能中子对活化截面测量的影响.

3.1 1—6MeV 中子能区

在 1—6MeV 中子能区, 常使用 D-d、T-p 和 $^7\text{Li-p}$ 中子源. 从前面对这三种中子源的特性分析来看, D-d 源中低能中子的干扰尤为严重, 为说明此问题, 用 $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$ 反应的实验数据按使用中子源的不同进行分类, 图 1 给出了几家主要测量结果. 由图可以看出, 使用 Li-p 和 T-p 源的测量结果, 其激发曲线的形状与本工作的结果较为一致, 彼此符合较好; 使用 D-d 源的测量结果, 分歧较大, 特别是中子能量大于 2.8MeV 时, 其截面数据与使用 T-p 和 Li-p 源的实验数据相比差别增大.

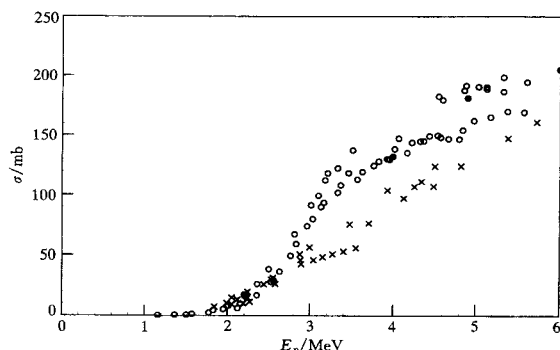


图 1 $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$ 反应

○用 $^7\text{Li-p}$ 和 T-p 中子源测量, ×用 D-d 中子源测量, ●本工作.

为直观地说明低能中子及其形成过程, 我们用飞行时间技术, 在 0° 角测量了 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反应中子能谱. 实验在北京大学静电加速器上进行, 入射氘能量分别为 2MeV 和 3MeV, 使用较新的 D 靶, 靶厚为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$. 同时还测量了靶厚约 $1.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 、已用过十多个小时的 D 靶的中子能谱. 从两块靶的能谱比较可以明显地看出旧靶中有较多的低能中子成份 (一直延伸到 3MeV), 而较新的 D 靶中低能中子不仅数量少, 而且能区也较窄. 显然加速氘的

中子源反应中低能中子成份是不可避免的 (详见图 2).

因此截面测量无论在待测反应或测中子注量的反应激发函数中, 只要其中之一对低能中子是灵敏的, 就会影响截面测量值. 在 $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$ 反应中已明显地表现出来, 其激发函数形状的差异也是由于低能成份中子角分布比主中子角分布平缓所致.

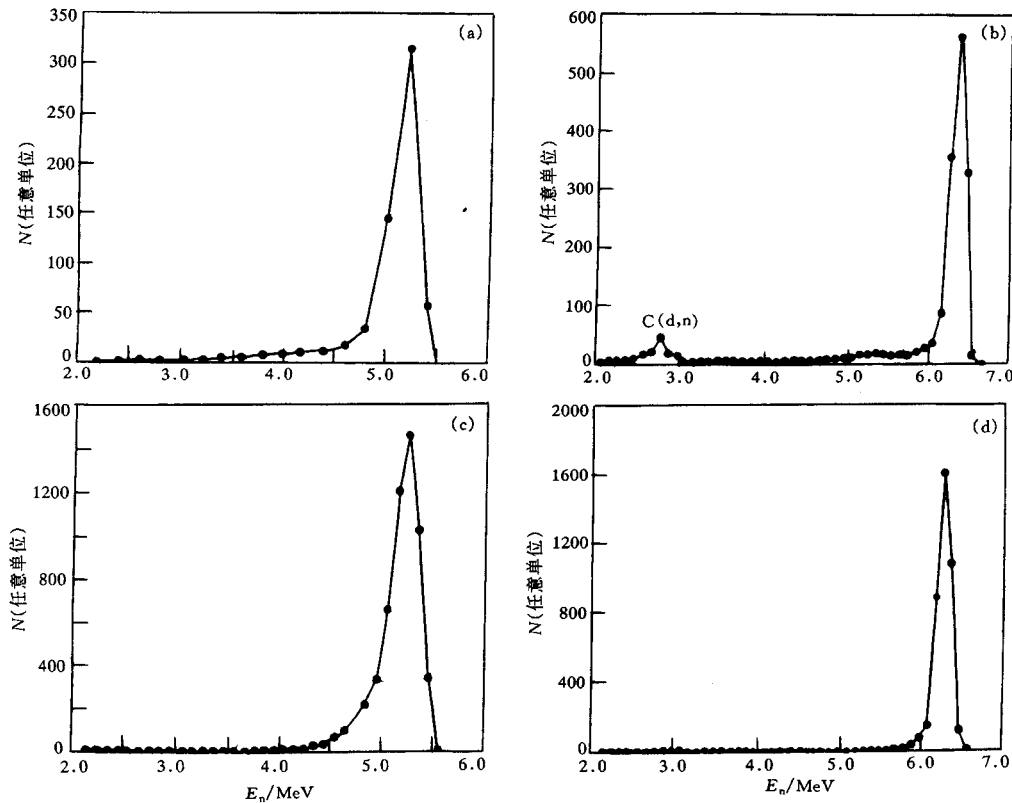


图 2 用钚轰击钚靶, 测量到的中子能谱

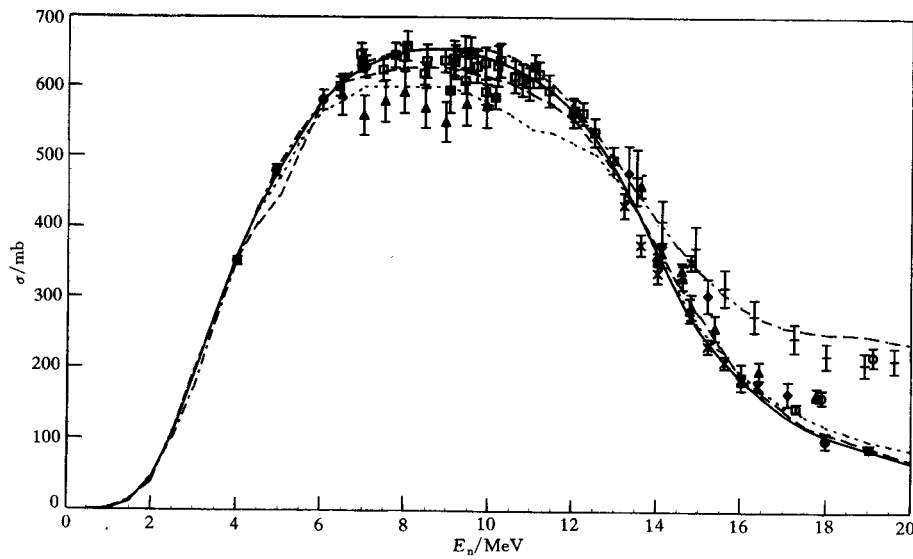
(a) $E_d = 2.0\text{MeV}$; (b) $E_d = 3.0\text{MeV}$; 用钚轰击已使用过的钚靶(靶厚 $1.7\text{mg}/\text{cm}^2$);
 (c) $E_d = 2.0\text{MeV}$; (d) $E_d = 3.0\text{MeV}$; 用钚轰击未用过的钚靶(靶厚 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$).

3.2 6—13MeV 中子能区

在 6—13MeV 中子能区, 主要使用 D-d 中子源, 各种低能中子的影响相当严重. 从 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m}} + \text{gCo}$ 反应主要的实验数据来看(图 3), 彼此存在较大分歧, 尤以 D.L.Smith^[1] 等不同年代测量的实验数据最为突出. 其差异主要是由低能中子影响造成的.

近年来, 实验工作者对低能 D-d 中子有了新的认识, 为了得到更准确的截面值, 专门进行了国际比对. 1991 年比对的结果表明 75 年 D.L.Smith 和 89 年 H.Vonach^[2] 等的实验数据偏低, 他们的测量数据在这次比对中明显提高, 增加的主要原因是以前的实验中对低能中子影响的修正不足. 由这次国际比对可看出, 在这段能区, 低能中子确实严重影响截面值的测量. 在这段能区多采用 ^{238}U 裂变反应为标准反应, 它的反应阈能比待测反应 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m}} + \text{gCo}$ 低, 因标准反应比待测反应对低能中子更灵敏, 中子注量偏大, 导致待测截面偏低.

为了弄清此能区低能中子的成份, 用阈探测器测量了 D-d 中子源的中子能谱. 实验在中国原子能院 HI-13 串列加速器上进行, 入射 d 束能量 $\sim 8.4\text{MeV}$, 选用的探测样品及有关特性见表 2, 各产物核的活性用 Ge(Li) γ 谱仪测量, 也一同列于表 2. 用 SAND-II 解谱程序

图 3 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 反应

— 本评价; --- ENDF/B-6; ... JENDL-3; - - - BROND-2;
 + B Bormann; × A Paulsen; ▲ DL Smith; △ Li Tingyan; ◇ A Hudson; ■ H Vonach;
 □ 91 年国际比对; ○ 本工作 (未扣除低能中子影响); ● 本工作.

进行解谱. 所解能谱示于图 4.

从图 4 可以看出, D-d 中子能谱中, 除主中子外还有 D(d, np)D 破裂中子, 同时可清楚地看到低能 D-d 中子和冷却水散射等低能成份的中子.

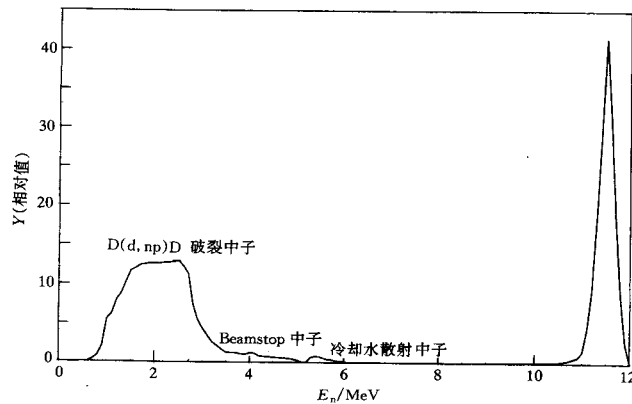


图 4 D-d 中子源能谱

主中子能量为 11.5 MeV, 用 SAND-II 解谱.

当中子能量小于 20 MeV 时, T-d 源原则上是理想的单色中子源, 因为此时三体干扰反应 T(d, np)T (阈能为 3.71 MeV) 并未出现. 但在 T 靶中自生 D 靶产生的 D-d 中子、主中子经多次散射产生的低能中子和加速器离子束束流中少量碳引起的 C-d 中子. 通过实验表明这些低能中子的影响程度是随 T-Ti 靶使用时间增加和入射氦能量的提高而增大.

3.3 13—20 MeV 中子能区

这段能区的中子源普遍采用 T(d, n) ^4He 反应, 在高压倍加器和静电加速器上实现.

在该能区, 仍以 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 反应为例说明低能中子的影响. 从主要的实验数据来看 (图 3), 各家数据分歧较大, 尤其在 13—20 MeV 高能区 ($E_n > 15\text{MeV}$). 根据对各家实验条件的分析及对 T-d

表2 选用探测样品及有关数据

样品及核反应	半衰期	Q值 (MeV)	反应阈能 (MeV)	测量活性值	所用截面来源
$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	4.5h	-0.33	~0.4	7.1590×10^{-17}	评价值
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70.82d	0.4	~0.5	6.1057×10^{-17}	评价值
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	83.79d	-1.58	~3.6	1.8397×10^{-17}	评价值
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	43.67h	-3.12	~5.0	2.2311×10^{-18}	评价值
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2.59h	-2.92	~4.0	5.4635×10^{-18}	评价值
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15h	-3.13	~6.0	6.8747×10^{-18}	评价值
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	312.12d	0.08	~2.0	4.7485×10^{-17}	评价值
$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	27.7d	0.84	~4.1	4.0034×10^{-18}	评价值
$^{181}\text{Ta}(n,2n)^{180}\text{Ta}$	8.15h	-7.58	~7.7	7.6109×10^{-17}	评价值
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	6.183d	-8.07	~8.4	1.1528×10^{-16}	评价值

实验在北京大学静电加速器上进行,入射 d 束能量分别为 2.0、3.0MeV,采用飞行时间法在 0° 角测量. 所测实验结果列于表 3.

表3 T靶中低能D-d中子成份的实验测定

E_d /MeV	使用T靶情况	T(d,n)中子能量 (MeV)	D(d,n)中子分布范围 (MeV)	D(d,n)/T(d,n)	C(d,n)中子峰值 (MeV)	C(d,n)/T(d,n)
2.0	新	18.35	4.75—5.45	1.4 %	无	
2.0	旧	18.3	3.2—5.6	5.2 %	无	
3.0	新	19.5	4.6—6.6	6.6 %	2.8	13.6%
3.0	旧	19.6	4.2—6.6	27.4 %	2.8	16.4%

从表 3 可以看出,在 T-d 源中,即使使用新 T 靶,随着入射 d 束能量的增加,低能 D-d 中子也会越来越严重;在使用旧 T 靶时,低能 D-d 中子的成份就多几倍.因此在活化截面测量时,应特别注意高能区的低能中子影响.如果待测反应和参考反应都是高阈反应,则问题小些.对低阈反应,低能中子的影响大大增加,必须作修正.

为判断这种分析方法的正确性,1996 年在北大静电加速器上对高能区进行了检验性实验测量.重复 B. Bormann^[3]和李庭晏^[4]的实验条件,即入射氘束能量分别为 3.0、2.0MeV.当用新的 T-Ti 靶测量时, 0° 角的测量结果分别与两者一致.即使把氘束能量降至 1.7MeV,其测量结果还是明显地有低能中子影响的特征(详见表 4).显然在 15~20MeV 能区,几家数据从最高能点的值来看实验的系统偏差在这里是不重要的,只是由入射氘能量的差异才引起这么大的分歧.表 4 给出了低能中子的影响随入射 d 能量的变

表4 $[Y \cdot \sigma]_D / [Y \cdot \sigma]_T$ 与入射氘核平均能量 \bar{E}_d 的关系

相关实验	\bar{E}_d /MeV	T-d源 E_a /MeV	D-d源 E_a /MeV	Y_D / Y_T	$\sigma_{D-D} / \sigma_{D-T}$	$\frac{[Y \cdot \sigma]_D}{[Y \cdot \sigma]_T}$
B. Bormann	3	19.6	6.2	3.51	6.5	22.8
李庭晏	2	18.0	5.2	2.89	4.1	11.8
检测点*	1.7	17.7	4.9	2.45	3.5	8.5
A.Hudson ^[5,6]	1.2	17.1	4.3	1.62	2.7	4.4
A.Paulsen	0.8	16.4	3.8	0.87	1.9	1.6
检测点*	0.125	14.8	2.9	0.0083	0.58	0.005

* 检测实验.

化规律.

4 两个典型反应的实验测量

既然所用单色中子源中低能中子成份严重影响活化截面的测量,那么实验上如何才能得到较准确的截面测量值呢?显然,对低能中子影响的准确修正是能否得到可靠测量数据的关键.

通常扣除低能中子影响所采用的方法有:(1)做空靶实验;(2)用样品照射处的中子能

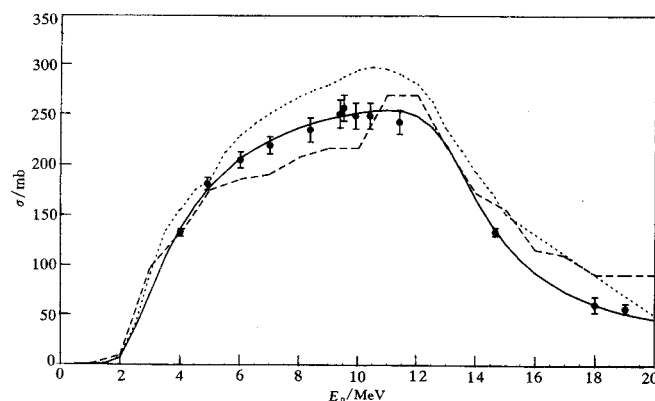


图 5 $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ 反应截面

● 本工作测量值; — 本工作评价值; ... JEF-2; --- IRDF-82.

在图 3 和图 5 分别标出,显然对此两反应的截面数据有很大改善,尤其在中子能量大于 17MeV 能区,首次得到了可靠的实验数据,比前人的实验值下降了 30%—50%.

本工作的实验结果如图 3 和图 5 所示.

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的反应阈能和相似的激发函数形状的参考反应,同时用已测得的中子能谱扣除参考反应与待测反应因截面曲线形状不同引起的差别.

在上述认识的基础上,对两个比较典型的低阈能反应 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$ 和 $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ 反应的截面进行了实验测量.在仔细扣除低能中子对截面的影响后,得到的测量结果

参 考 文 献

- [1] Smith D L et al. Nuclear Science Engineer., 1975, 58:314—325; Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. & Tech., Juelich, 1991, 282—293
- [2] Vonach H et al. NEANDC-259. 1989, 165—172
- [3] Bormann B et al. EANDC(E)-66, 1966, 42—51
- [4] Li Tingyan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics. (in Chinese), 1992, 6:151—162
(李庭晏等. 高能物理与核物理, 1992, 6:151—162)
- [5] Paulsen A et al. Int. Conf. on Chem. Nucl. Data, Canterbury, 1971, 129—134
- [6] Hudson A et al. Ann. Nuclear Energy., 1978, 5:589—596

The Effect of Low Energy Neutrons From Monoenergetic Neutron Source on Activation Cross Section Measurements*

Huang Xiaolong Yu Weixiang Han Xiaogang Zhao Wenrong Lu Hanlin

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Chen Jinxiang Shi Zhaomin Tang Guoyou Zhang Guohui

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The effect to low energy neutrons from monoenergetic neutron source on activation cross section measurements was analysed and studied. This analysis was proved by the measured neutron spectra of $T(d,n)^4\text{He}$ and $D(d,n)^3\text{He}$ neutron sources. Finally the cross sections for $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ and $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ reaction were given.

Key words monoenergetic neutrons, low energy neutrons, activation cross section measurement

Received 28 October 1997, Revised 9 January 1998

* Supported Partially by Institute of Heavy Ion Physics, Peking University