

# $^{50,48,46}\text{Ti}$ 的 $(n,p)$ 、 $(n,\alpha)$ 和 $^{58}\text{Ni}$ 的 $(n,2n)$ 、 $(n,p)$ 反应截面的测量\*

袁俊谦 王永昌 孔祥忠 杨景康

(兰州大学现代物理系, 730001)

## 摘 要

本文叙述了从 13.50 MeV 到 14.81 MeV 中子能区用活化法相对  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  的反应截面, 对  $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$ 、 $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 、 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$  五个反应截面的测量。并将所得的结果和其他作者的结果进行了比较。

## 一、前 言

钛和镍都是聚变反应堆的重要结构材料,  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 、 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  反应产生的质子和  $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$  反应产生的  $\alpha$  粒子进而形成氢和氦气, 对 D-T 聚变堆的安全运行关系很大, 在研究中子辐射损伤时必须考虑,  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$  反应阈能高, 它可以作为聚变堆中子剂量和 D-T 中子成分测量的高阈探测器, 所以这些反应的截面为人们所重视。对钛, 由于天然钛的同位素比较多而且质量数都是相邻的, 因此一个同位素核的  $(n,p)$  反应将受相邻同位素核的  $(n,d)$ 、 $(n,np)$  和  $(n,pn)$  反应的干扰, 所以现有截面数据分歧比较大。对镍的这两个反应, 现在国外虽有许多数据发表, 但彼此之间有较大的分歧, 文献[1]对其有详细的比较。在国内北京原子能研究院在较宽能区对这两个反应的截面做了测量, 卢涵林等最近给出了这两个反应截面的编评推荐曲线<sup>[2]</sup>。我们用强流中子发生器在 13.50—14.81 MeV 中子能区对这五个反应的截面用活化法进行了测量。

## 二、实验过程

### 1. 样品照射

实验工作是在兰州大学 ZF-300-II 型强流中子发生器上进行的。以  $\text{T}(d,n)^4\text{He}$  作中子源, 平均氘束能量  $\bar{E}_d$  为 125keV, 束流强度约 20mA, 氘靶厚度约 0.9 mg/cm<sup>2</sup>, 靶点处中子产额为  $1-3 \times 10^{12}$  中子/s。在与入射氘束夹角为 0°—130° 之间放置六组样品, 样品距中子源中心距离最近是 5cm, 最远是 28cm。样品位置处的中子能量是用铈钴截面

本文 1990 年 12 月 28 日收到。

\* 核工业公司 1989 年基金资助。

比测定的。对钛样品的六个能量点的值为 14.81、14.67、14.38、14.18、13.84 和 13.50 MeV，照射时间 6.56h。对镍样品的六个中子能量值为 14.62、14.43、14.21、14.00、13.79 和 13.64 MeV，样品照射时间为 7.38h。钛、镍样品都是天然同位素丰度的纯金属片，直径都是 20 mm，钛片厚度为 0.5 mm，纯度为 99.98%。镍片厚度为 0.5 mm—0.7 mm，纯度为 99.9%。中子注量监督片为 0.1mm 厚的纯铝片，直径也是 20mm，纯度为 99.99%。每个样品都夹在两个铝片之间。照射期间中子通量的变化是用铀裂变室监督的，以便修正中子通量波动。

## 2. 剩余核的放射性测量

剩余核的活性是由测量它们  $\gamma$  射线谱的全能峰来求得的。我们的  $\gamma$  谱仪是由国产的 CH8403 同轴高纯锗探测器与 ORTEC7450 型多道脉冲幅度分析器组成。探测器相对效率为 20%，能量分辨为 3keV（对 1.33 MeV  $\gamma$  射线），对  $\gamma$  射线的探测效率是用美国国家标准局生产的 SRM4275 型标准点源进行刻度的，估计效率误差小于 1.5%。对  $^{50}\text{Ti}(n, \alpha)^{47}\text{Ca}$ 、 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 、 $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 、 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$  等反应剩余核放射性活度计算用到的核数据<sup>[3]</sup>和级联符合加合修正系数如下表所示：

表 1 反应产物核数据

| 反应道                                       | 靶核同位素丰度 | 产物核半衰期  | 测量的 $E_r(\text{keV})$ | $\gamma$ 发射率(%) | 符合加合修正系数 |
|---|---------|---------|-----------------------|-----------------|----------|
| $^{50}\text{Ti}(n, \alpha)^{47}\text{Ca}$ | 5.3%    | 4.536d  | 1297.068              | 74.9            | 1        |
| $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$      | 73.7%   | 1.821d  | 1312.046              | 100             | 1.218    |
| $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$      | 8.0%    | 83.83d  | 1120.515              | 99.987          | 1.100    |
| $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$     | 67.88%  | 36.072h | 1377.62               | 77.9            | 1.132    |
| $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$   | 67.88%  | 70.916d | 810.79                | 99.5            | 1.034    |
| $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ | 100%    | 14.96h  | 1368.598              | 100             | 1.074    |

在放射性活性测量时，由于  $^{58}\text{Co}$  的  $m$  态半衰期为 9.2 h，所以对  $^{58m+g}\text{Co}$  活性的测量冷却时间应保证  $m$  态全部衰变到基态。我们实际冷却时间为 45d。在计算  $\gamma$  射线活性时对中子注量波动、 $\gamma$  射线在样品中的自吸收、级联  $\gamma$  符合效应及测量几何等进行了校正。

## 三、实验结果和讨论

测量截面的计算公式如下：

$$\sigma_s = \frac{[\epsilon I_r \eta K g M D]_m \cdot [\lambda A F C]_s}{[\epsilon I_r \eta K g M D]_s \cdot [\lambda A F C]_m} \cdot \sigma_m \quad (1)$$

在此，下标  $s$  代表被测样品的参数， $m$  表示监督标准的参数。公式中各参数的意义如下： $\epsilon$  为探测器对特征  $\gamma$  射线全能峰的探测效率； $I_r$  为特征  $\gamma$  射线强度； $\eta$  为所测核素的同位素丰度； $g = 1 - e^{-\lambda T}$  表示剩余核的生长因子，其中  $\lambda$  为衰变常数， $T$  为中子照射时间； $M$  为样品质量； $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$  为测量收集因子，其中  $t_1$  为从照射结束到测量开

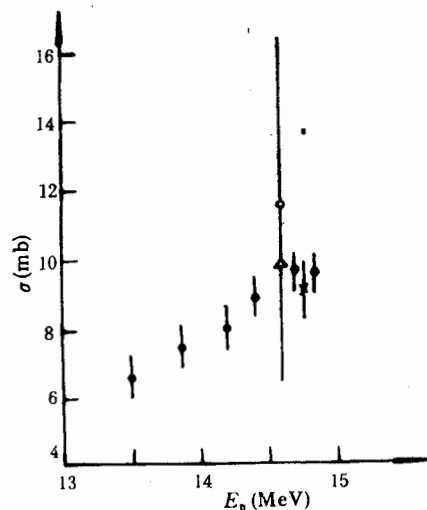
始的时间间隔,  $t_2$  为从照射结束到测量结束的时间间隔;  $A$  为元素的原子量;  $C$  为测量的全能峰面积;  $F$  为总的  $\gamma$  活性校正因子,  $F = f_s \cdot f_c \cdot f_g$ , 而  $f_s, f_c$  和  $f_g$  分别为  $\gamma$  射线在样品中的自吸收修正因子、级联符合加合修正因子和测量几何修正因子;  $K$  为中子注量波动校正因子, 其表达式为:

$$K = \left[ \sum_{i=1}^l \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi g, \quad (2)$$

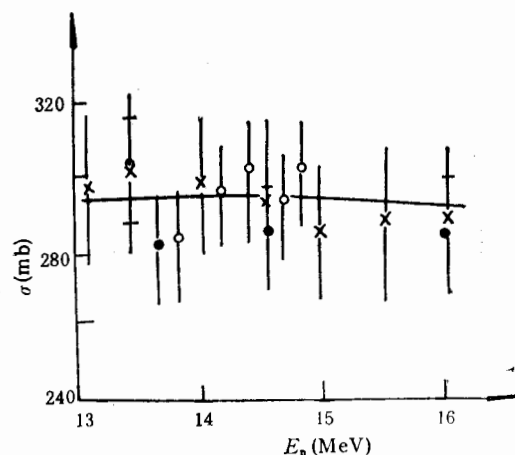
其中  $l$  为将照射时间分成的段数;  $\Delta t_i$  为每段的时间间隔;  $T_i$  为第  $i$  段时间结束到照射结束的时间间隔;  $\phi_i$  为在  $\Delta t_i$  内入射到样品上的平均中子通量。我们测量的结果如表 2 所示:

表 2 测量结果

|  |                |                |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 中子能量 (MeV)   | 13.50          | 13.84          | 14.18          | 14.38          | 14.67          | 14.81          |
| $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$ 反应截面 (mb) | $6.6 \pm 0.5$  | $7.4 \pm 0.5$  | $8.0 \pm 0.5$  | $8.9 \pm 0.5$  | $9.6 \pm 0.5$  | $9.5 \pm 0.6$  |
| $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 反应截面 (mb)      | $306 \pm 15$   | $286 \pm 14$   | $299 \pm 13$   | $305 \pm 13$   | $294 \pm 12$   | $305 \pm 12$   |
| $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 反应截面 (mb)      | $61.3 \pm 2.8$ | $62.4 \pm 2.8$ | $64.4 \pm 2.7$ | $65.7 \pm 2.7$ | $63.5 \pm 2.6$ | $65.6 \pm 2.6$ |
| 中子能量 (MeV)   | 13.64          | 13.79          | 14.00          | 14.21          | 14.43          | 14.62          |
| $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ 反应截面 (mb)     | $13.0 \pm 0.5$ | $16.9 \pm 0.6$ | $22.8 \pm 0.8$ | $26.6 \pm 0.8$ | $30.5 \pm 0.9$ | $34.2 \pm 1.0$ |
| $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$ 反应截面 (mb)   | $442 \pm 16$   | $434 \pm 16$   | $403 \pm 13$   | $367 \pm 11$   | $328 \pm 9$    | $318 \pm 8$    |

图 1  $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$  反应截面与中子能量关系

● 本文 × 文献[4] △ 文献[5]预计  
值 ○ 文献[5]测量值

图 2  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$  反应截面与中子能量关系

○ 本文 × 文献[6] ● 文献[7] — 文献[2]

实验误差主要来自标准截面误差,计数统计误差, $\gamma$ 探测效率误差,样品称量误差,自吸收校正误差,级联符合加合修正误差,用铀截面比定中子能量的误差和中子通量波动修正误差。由于天然钛中 $^{46}\text{Ti}$ 的丰度为8%, $^{47}\text{Ti}$ 的丰度为7.5%,而 $^{46}\text{Ti}$ 的(n,p)反应产物与 $^{47}\text{Ti}$ 的(n,d)、(n,pn)、(n,np)反应产物一样都是 $^{46}\text{Sc}$ ,所以本结果给出的 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 的反应截面是 $^{46}\text{Ti}$ 的(n,p)和 $^{47}\text{Ti}$ 的(n,d)、(n,np)、(n,pn)反应

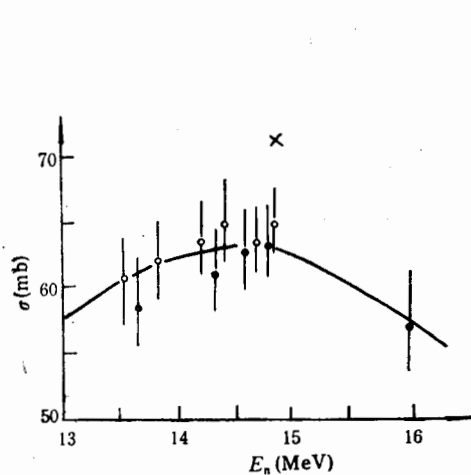


图3  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$  反应截面与中子能量关系  
 ○ 本文 × 文献[4] ● 文献[7]测  
 量值 — 文献[2]编评推荐值

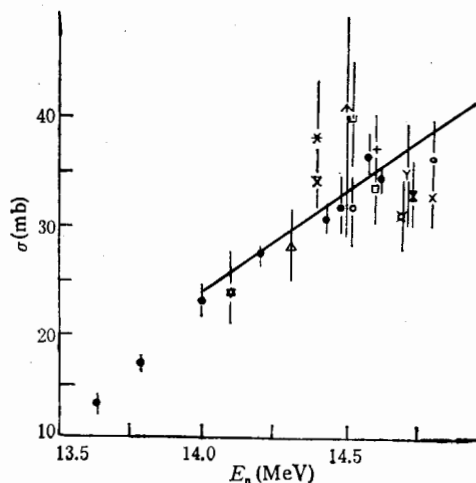


图4  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$  反应截面与中子能量关系  
 ↑ (53) E. B. Paul × (61) L. A. Rayburn □ (62) W. G. Cross ⊙ (62) R. N. Glover ⊠ (63) E. T. Bramlitt γ (65) J. E. Strain + (65) J. Csikái  
 △ (68) J. K. Temperley ○ (69) R. C. Barrall \*  
 (70) R. W. Finck × (73) J. D. Hemingway ☆ (75) R. Spangler ⊕ (77) Huang Jianzhou × (85) I. Ribansky — (89) Evaluated ● 本文

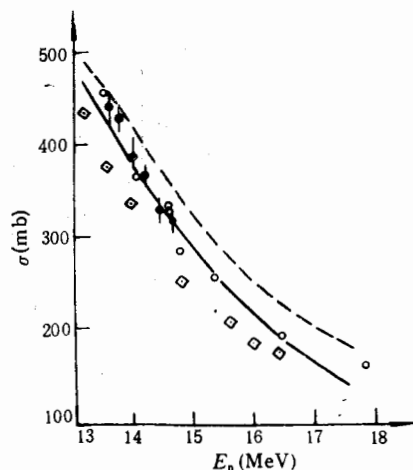


图5  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$  反应截面与中子能量关系  
 ◇ (71) A. Paulsen ○ (77) Huang Jianzhou ○ (85) Fan Peiguo ○ (89) Li Tinyan --- (82) IAEA-NDS-48 — (89) Evaluated ● 本文

的截面和. 对  $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$  反应, 我们的测量结果与其他人的比较如图 1 所示. 从图看出我们的结果与文献[4]在误差范围内符合得比较好, 与文献[5]的预计值也是一致的, 但它的测量值偏大 27%, 因为它的误差范围是  $\pm 43\%$ , 所以在误差范围内是符合的. 关于  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$  的反应我们的结果与其他人的比较如图 2 所示. 由图可见, 我们的结果与文献[6,7]的测量值和文献[2]的编评推荐值在误差范围内符合得比较好. 在文献[4]中作者在 14.8MeV 中子能点用分离同位素分别测得  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46m+g}\text{Sc}$  的截面为  $266.7 \pm 8.6\text{mb}$ ,  $^{47}\text{Ti}(n,np)^{46m+g}\text{Sc}$  的截面为  $62.8 \pm 2.4\text{mb}$ , 在误差范围内与我们的结果比较一致. 关于  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ , 我们的测量结果与别人的比较如图 3 所示. 我们的测量值与文献[7]的测量值和文献[2]的编评推荐值都符合得比较好. 文献[4]的结果偏大 9%. 由于  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$  反应实验阈能约为 1MeV, 这样  $D(d,n)^3\text{He}$  反应产生的中子对这个反应将有一定的影响. 为了减少这个影响我们在进行这个实验时用了新的氚靶. 为了比较, 在图 4、图 5 中分别给出了我们的测量结果和赵文荣、卢涵林等<sup>[2]</sup> 1989 年的编评推荐曲线及其有关的实验数据. 从图中看出两者符合得比较好.

### 参 考 文 献

- [1] 黄建周 崔云峰 赵文荣 陈宝林, 原子能科学技术, **3**(1977), 211.  
 [2] Zhao Wenrong and Lu Hanlin et al., Compilation Measurement and Evaluation of Nuclear Activation Cross Section for Nuclear data Applications, CNDC-89014.  
 [3] E. Browne and R. B. Firstone, Table of Radioactive Isotopes, (1986).  
 [4] I. Ribansky and S. Gmuca, *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **9**(1983), 1537—1547.  
 [5] *Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ.*, **60**(1982), 211—213.  
 [6] H. Liskien and Paulsen, *Nucl. Phys.* **63**(1965), 393—400.  
 [7] Lu hanlin et al., *PHE*, **3**(1979), 242.

## The Cross Section Measurement for the Reactions of $^{48,46}\text{Ti}(n,p)^{48,46}\text{Sc}$ $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$ and $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$

YUAN JUNQIAN WANG YONGCHANG KONG XIANGZHONG YANG JINGKANG  
 (Department of Modern Physics, Lanzhou University 730001)

### ABSTRACT

The cross sections for the  $^{50}\text{Ti}(n,\alpha)^{47}\text{Ca}$ ,  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$  and  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$   $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$  reactions have been measured by using the activation method relative to the cross sections of the  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  reaction in the neutron energy range of 13.50—14.81MeV. The neutron energies were determined by the cross section ratios of the  $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89m+g}\text{Zr}$  and  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$  reactions. The results obtained are compared with the published and to be published data of several authors.