

测量天然镍($n, x\alpha$)反应 α 粒子发射的能谱和角分布*

叶邦角 范扬眉 韩荣典 王忠民 虞孝麒 杜淮江

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230027)

用中国科学技术大学的多路望远镜系统测量了天然镍在 14.6 MeV 中子能量下的 ($n, x\alpha$) 反应发射 α 粒子的双微分截面。使用多重二维粒子鉴别技术有效地鉴别了 p 、 α 粒子和 γ 射线; 使用厚靶技术提高了事件率, 减少了统计误差。测量了从 $24.5^\circ \sim 165^\circ$ 的 16 个反应角, 并由此得到了 α 粒子的角度积分能谱、角分布和总发射截面, 并与美国 B-6 库评价结果和其它实验小组结果进行了比较。

关键词 14 MeV 中子 天然镍 双微分截面 多路望远镜系统

中图分类号 O 571.434 O 571.435

测量强中子场中结构材料的带电粒子发射反应数据在设计聚变堆中具有重要意义。结构材料内部在强中子的照射下将发生变异, 并产生氢气和氦气泡, 直接影响结构材料的使用寿命。带电粒子的能谱和角分布在核理论模型计算和核数据评价中也相当重要。目前国际上能够测量带电粒子发射的实验小组仅有几家, 所测得的实验数据很少, 对某些反应各家的数据存在较大差异, 一些重要的核素甚至无可用的实验数据。世界各大数据库的评价数据差异也较大^[1]。国际原子能委员会要求加强这方面的工作, 特别是 α 粒子发射核数据的测量和评价工作, 组织了 IAEA 协调研究项目 (CRP), 主要目标是测量 ^{56}Fe 、 ^{nat}Fe 、 ^{58}Ni 和 ^{nat}Ni 等核的 α 粒子发射双微分截面^[2]。

为了达到这个目的, 最近国际上一些研究机构开始加强这方面的工作。日本的大阪大学^[3]、东北大学^[4]和美国的 Los Alamos 实验室^[5]都建立了专门的探测系统, 用于测量带电粒子发射的能谱和角分布, 北京大学在 5.13 MeV 能点用屏栅电离室对 $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应的 α 粒子能谱和角分布进行了测量研究^[6]。中国科技大学的测量小组专门设计了 1 套用于测量带电粒子发射的多路望远镜系统^[7], 该系统可以同时测量 $24.5^\circ \sim 165^\circ$ 的 16 个反应角, 并可以同时测量反应谱和本底谱。系统使用多重二维粒子分辨技术, 可以有效地分辨带电粒子和 γ 射线。使用厚靶技术既提高了事件率, 又减少了本底的影响; 提高了能谱高能端的可靠性, 同时也减少了统计误差。从 1992 年至今, 本工作已经测量了一些结构材料的质子发射的能谱和角分布, 如

* 中国科学技术大学青年基金资助项目

叶邦角: 男, 36 岁, 核物理与核技术专业, 副教授

收稿日期: 1997-12-04 收到修改稿日期: 1998-03-27

$^{93}\text{Nb}(n, xp)^{[8]}$ 、 $^{nat}\text{Fe}(n, xp)^{[9]}$ 、 $^{nat}\text{Ni}(n, xp)^{[10]}$ 和不锈钢的 $(n, xp)^{[11]}$ 反应。现在本工作将第1次进行 α 粒子发射的双微分截面的测量,以获得 α 粒子发射的能谱和角分布,并由此得到 α 粒子的总发射截面。

1 实验

中国科学技术大学的多路望远镜系统由圆柱型双层多丝正比室和中心闪烁体组成^[12]。外层与内层正比室分别由32路阳极丝和16路阳极丝组成,带电粒子通过多丝室时将产生能量损失信号,由外层阳极丝信号可以得到能损 ΔE 信号和丝地址信号,每1根阳极丝对应于1个反应角。内层丝信号与中心能量探测器的信号符合产生门控信号,用于打开线性门电路对信号进行在线选择,不致使前端电路产生严重的脉冲堆积。中心CsI(Tl)探测器除了产生能量信号外,还产生脉冲形状分辨信号,用于鉴别粒子^[13]。

由于 α 粒子在多丝室中的能量损失较大,因此多丝室的工作电压不需要太高,故选择-620V。系统采用95%Ar+5%CO₂混合气体,工作气压为100Pa,采用流气式工作模式。CsI(Tl)晶体的直径为25.4mm,厚度为1mm,足以停止最大能量的 α 粒子。辐照时,中心探测器用厚为20cm的铁屏蔽,天然镍靶的尺寸为0.5mm×40mm×289mm,正好覆盖16个反应室,铝箔作为衬底,无靶的半边也采用铝箔同时测量本底,这是因为铅有极小的 α 粒子产生截面($< 1 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$)。系统放置时,使CsI(Tl)的中心与T-Ti中子源的距离为400mm,整个系统在强度为 $3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的中子场中辐照大约120h。中子通量由伴随 α 粒子法测量。多丝室内用于本底测量的1个室中装有弱 ^{241}Am α 源,用于监测整个系统的稳定性。同时由多个单道定标器监测各重要参数的计数稳定性。当辐照进行到大约一半时,靶转动180°,以消除可能由几何不对称造成的影响。

整个数据采集工作用智能CAMAC机箱控制器控制。对每1个 (n, xp) 核反应事件,有5个参数被同时记录下来,并按一定的格式存储在CAMAC控制器的缓冲区中。即能量损失 ΔE 信号、丝地址信号、能量 E 信号、脉冲形状分辨PSD信号和带电粒子从外层丝到中心探测器的飞行时间TOF信号。由于5个参数到达ADC的时间略有差别,采用峰保持器使五参数同步地被记录在机箱控制器的缓冲区中。当缓冲区记满或采集完成时,数据自动传输给计算机。在线计算机能监控整个操作系统,并能显示各丝的采集状况、直方图和散点图等。

2 数据处理和结果

数据的离线分析过程由以下几步组成。第1步进行粒子鉴别,用PSD谱可以很好地把 γ 射线引起的计数从数据中删除。由PSD、 E 和 ΔE 3个谱可以组合成3个二维分辨谱,能有效地鉴别质子和 α 粒子。图1~3分别是 E - ΔE 、 E -PSD和 ΔE -PSD谱。

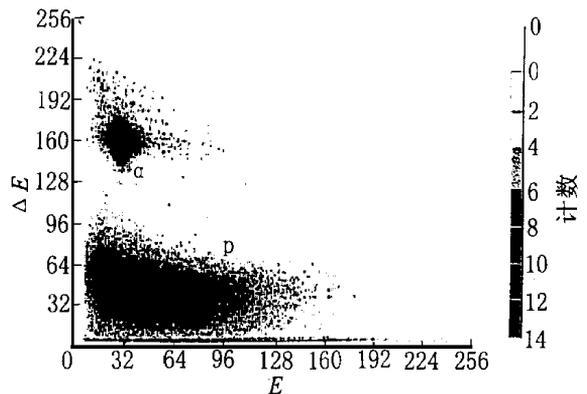


图1 二维 E - ΔE 粒子分辨谱

Fig 1 Two-dimensional E - ΔE spectrum of identification particles
 E 、 ΔE 均用道数表示

由图 1 可知: 在低能端 $E-\Delta E$ 有较好的分辨, 而在高能端由图 2 可知 E -PSD 谱有较好的分辨, 3 个二维谱的组合正好能有效地鉴别 p 和 α 粒子。第 2 步进行本底扣除, 每个反应角都有对应的反应谱和本底谱, 两者相减即可得到净能谱。第 3 步进行厚靶谱的数据转换, 过程类似于参考文献[7]中的过程, 其中 $d\epsilon/dx$ 采用 J. F. Ziegler^[14] 的结果, 由转换后的净能谱可以计算得到 16 个反应角的双微分截面。图 4 示出反应角为 88.3° 时的双微分截面。数据的误差由两部分组成: 一是系统误差, 它由各部分误差组成, 总系统误差为 6.2%; 另一个是统计误差, 取 1σ 值。

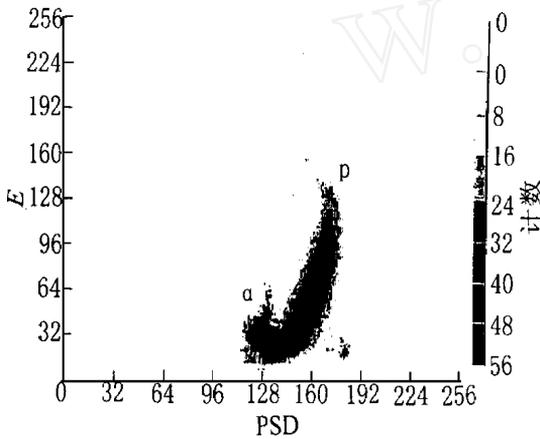


图 2 二维 E -PSD 粒子分辨谱

Fig 2 Two-dimensional E -PSD spectrum of identification particles
 E 、PSD 均用道数表示

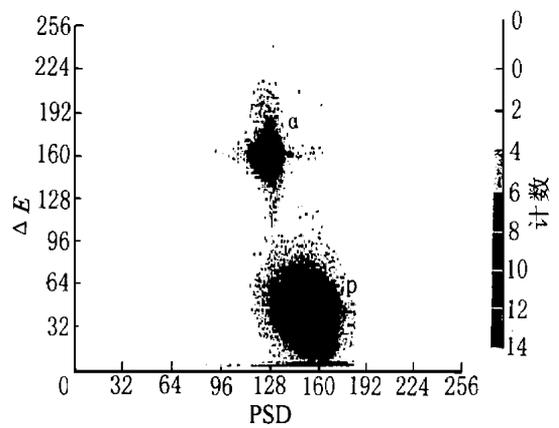


图 3 二维 ΔE -PSD 粒子分辨谱

Fig 3 Two-dimensional ΔE -PSD spectrum of identification particles
PSD、 ΔE 均用道数表示

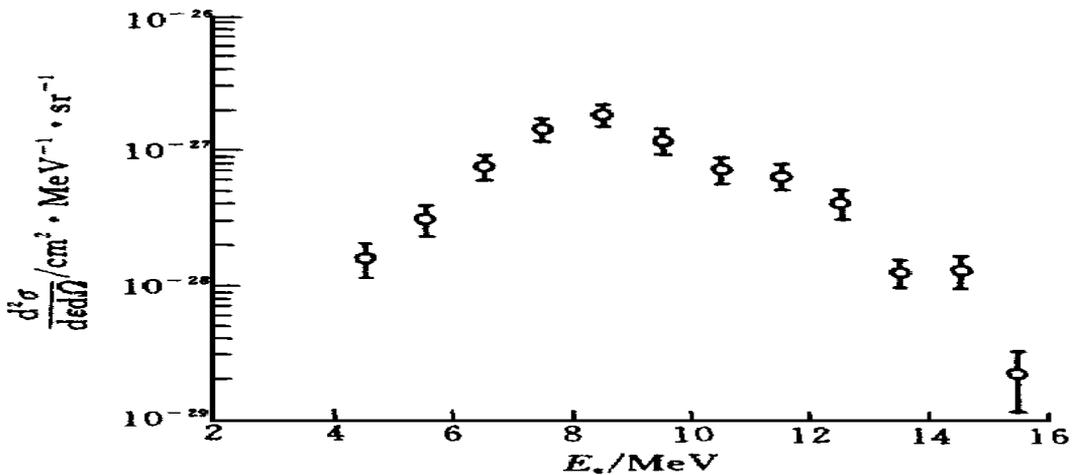


图 4 $^{64}\text{Ni}(n, x\alpha)$ 反应在 88.3° 时的双微分截面

Fig 4 Double-differential cross sections of $^{64}\text{Ni}(n, x\alpha)$ reaction at 88.3°

由双微分截面可以得到角分布。为了更清楚地显示角分布随出射 α 粒子能量的变化,把数据分成 3 个能区: 3~ 7、7~ 11 和 11~ 15M eV (图 5)。图中的曲线是二阶勒让德函数拟合的结果。由图可见: 随着出射 α 粒子能量的增加,角分布前倾不十分明显,说明在此核反应过程中复合核反应占主导地位。

由双微分截面得到的角度积分 α 粒子发射能谱列于表 1。图 6 是几家结果的比较。由图可见: 在低中能端,B-6 结果与本实验结果符合较好; 在高端端,B-6 结果略低于本结果。作为比较,图中给出美国 S. Grimes^[15] 和日本 M. Baba^[16] 的实验结果。在低能端,他们的结果略低于本结果,高能端在实验误差范围内三家结果基本符合。

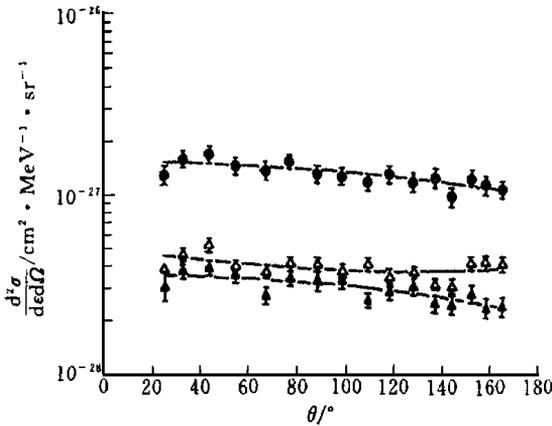


图 5 $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应的角分布

Fig 5 Angular distributions of $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ reaction

— 7~ 11M eV; — 3~ 7M eV; — 11~ 15M eV

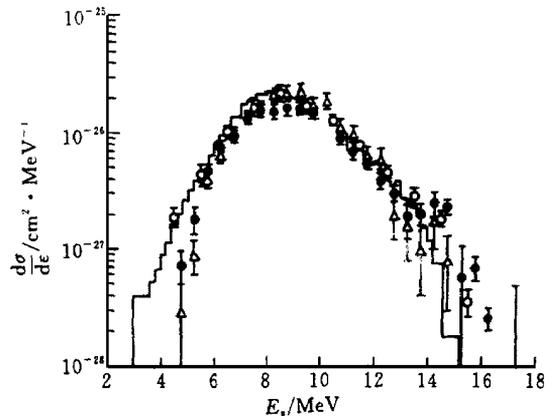


图 6 $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应的出射 α 粒子能谱

Fig 6 Energy spectra of emitted α particle from $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ reaction

— S. M. Grimes 的结果; — M. Baba 的结果;
— 本实验结果; 实线 — ENDF/B-6 的评价结果

作为比较,表 2 列出了世界几个主要评价库对⁵⁸Ni, ⁶⁰Ni 和²²⁶Ni(n, α) 反应的评价结果。表中还给出了 S. Grimes, M. Baba 和 R. Fischer^[17] 的实验结果。各评价库、各实验数据及其相互之间都存在一些差异,这有待于更精确的测量予以澄清。

表 1 $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ 核反应角度积分截面

Table 1 The angle-integrated cross sections of $^{226}\text{Ni}(n, \alpha)$ reaction

E_{α}/MeV	$10^{27} \frac{d\sigma}{d\epsilon} / \text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{-1}$	E_{α}/MeV	$10^{27} \frac{d\sigma}{d\epsilon} / \text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{-1}$
4.0~ 5.0	1.89 ± 0.34	10.0~ 11.0	12.82 ± 1.34
5.0~ 6.0	4.34 ± 0.87	11.0~ 12.0	7.96 ± 0.87
6.0~ 7.0	10.24 ± 1.34	12.0~ 13.0	4.60 ± 0.56
7.0~ 8.0	16.46 ± 2.71	13.0~ 14.0	2.87 ± 0.48
8.0~ 9.0	22.09 ± 3.42	14.0~ 15.0	1.86 ± 0.27
9.0~ 10.0	16.96 ± 2.47	15.0~ 16.0	0.36 ± 0.09

表2 α 粒子发射总截面比较Table 2 Comparison of the α particle emission cross sections

评价库或 测量组	$10^{27}\sigma/\text{cm}^2$					
	$^{58}\text{Ni}(n, x\alpha)$	$^{60}\text{Ni}(n, x\alpha)$	$^{61}\text{Ni}(n, x\alpha)$	$^{62}\text{Ni}(n, x\alpha)$	$^{64}\text{Ni}(n, x\alpha)$	$^{nat}\text{Ni}(n, x\alpha)$
ENDF/ β -6	113.12	68.95	47.90	18.00	7.99	96.52
JENDL-3	102.98	71.32	39.10	18.65	5.53	90.11
BROND-2	161.87	59.73	40.23	21.00	4.78	127.40
CENDL-2						121.03
S. Grimes	106 ± 17	76 ± 12				97 ± 16
M. Baba						85 ± 9
R. Fischer		69 ± 3				
本工作						102 ± 8

本工作是在中国核数据中心的支持下完成的。作者特别感谢日本东北大学的M. Baba教授提供他们的和美国S. Grimes的实验数据。

参 考 文 献

- 1 Baba M. Status of Neutron Induced α p production Cross Section Data. Proc of the 1995 Symposium on Nuclear Data. JAERI, Tokai, Japan. 1995. 104
- 2 Vonach H, Chiba S, Pashchenko AB. Report on the IAEA Coordinated Research Program on "Improvements of Measurements, Theoretical Computations and Evaluations of Neutron Induced Helium Production Cross Sections". Proc Int Conf on Nucl Data for Sci Tech. Gatlinburg. 1994. 925
- 3 Kokoo, Murata I, Takahashi A. Double Differential Charged Particle Emission Cross Sections of Vanadium for 14.1 MeV Incident Neutron. 1996 Symposium on Nuclear Data. JAERI, Tokai. 1996. 24
- 4 Baba M, Ito N, Matsuyama I, et al. Measurement of Double-differential (n, α) Cross Sections of Fe, Ni, Cu and ^{50}Cr for 4.5-14.1 MeV Neutrons. Proc Int Conf on Nuclear Data for Sci Tech. Gatlinburg. 1994. 941
- 5 Sterbenz SM, Bateman FB, Lee TM, et al. The $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)$ Reaction From Threshold to 30 MeV. Proc Int Conf on Nuclear Data for Sci Tech. Gatlinburg. 1994. 925
- 6 Tang GY, Bai XH, Shi ZM, et al. Measurement of Angular Distribution at 5.13 MeV for Reaction of $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)^{55}\text{Fe}$. Commun Nucl Data Prog, 1994, 10: 14
- 7 Ye BJ, Fan YM, Wang ZM, et al. Development of a Multitelescope System for Measurement of Differential (n , Charged Particle) Reaction. Commun Nucl Data Prog, 1993, 10: 19
- 8 Ye BJ, Fan YM, Wang ZM, et al. The $^{93}\text{Nb}(n, xp)$ Reaction at $E_n = 14.6$ MeV. Nucl Sci Eng, 1994, 67: 117
- 9 Ye BJ, Fan YM, Wang ZM, et al. Proton Emission in Reaction of 14.6 MeV Neutrons With Natural Iron. Nucl Sci Eng, 1996, 122: 136
- 10 Ye BJ, Wang ZM, Fan YM, et al. Measurement of Double-differential (n, xp) Cross Sections of Natural Nickel in 14.6 MeV Neutron Energy. Nuclear Physics A, 1997, 612: 213
- 11 Fan YM, Ye BJ, Wang ZM, et al. Proton Emission Cross Sections for Bombardment of Stainless Steel

- by: 14.6 MeV Neutron Fusion Technology, unpublished
- 12 Ye BJ, Fan W, Fan YM, et al Development of a Pulse Discrimination Circuit Nucl Instrum Methods A, 1994, 345: 115
- 13 叶邦角, 范扬眉, 虞孝麒, 等. 一个五参数数据获取系统的研制. 中国科学技术大学学报, 1995, 25: 25
- 14 Ziegler JZ Helium Stopping Powers and Ranges in all Element Matter New York: Pergamon Press, 1997. 76~ 78
- 15 Grimes SM, Haight RC, Alvar KR, et al Charged-particle Emission in Reactions of 15 MeV Neutrons With Isotopes of Chromium, Nickel and Copper Phys Rev C, 1979, 19: 2127
- 16 Ito N, Baba M, Matsuyama S, et al Large Solid Angle-spectrometer for the Measurements Differential (n, Charged-particle) Cross Sections Nucl Instrum Methods A, 1994, 337: 474
- 17 Fischer R, Traxler G, Uhlir M, et al $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)^{53}\text{Cr}$ and $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$ Reactions at $E_n = 14.1\text{ MeV}$. Phys Rev C, 1984, 30: 73

MEASUREMENT OF THE ENERGY SPECTRUM AND ANGULAR DISTRIBUTION OF α -PARTICLES EMITTED FROM $^{nat}\text{Ni}(n, x\alpha)$ REACTION

Ye Bangjiao Fan Yangmei Han Rongdian Wang Zhongmin Yu Xiaoqi Du Huaijiang

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230027)

ABSTRACT

The double-differential cross sections of α -particles emitted from $^{nat}\text{Ni}(n, x\alpha)$ reaction at neutron energy 14.6 MeV are measured using the multitelescope system of University of Science and Technology of China. Proton, alpha particles and gamma ray are identified by two-dimensional spectra. The thick target technique is used to increase the event rates and decrease the statistical errors. The spectra are measured at 16 reaction angles from 24.5° to 165° . Angle-integrated cross sections, angular distributions and α -particle emission total cross sections are obtained from the double-differential cross sections. The present results are compared with the ENDF/B-6 evaluation data and other experimental results.

Key words 14 MeV neutron Natural nickel Double-differential cross section Multitelescope system