

快中子(n, α)和(n, p)反应的研究*

陈译民 张雪梅 陈迎棠
(清华大学物理系 北京 100084)

唐国有 张国辉
(北京大学重离子研究所 北京 100871)

Yd Gledenov G Khuukhenkhoo M V Sedysheva
(俄罗斯联合原子核研究所 JINR Dubna Russia 141980)

摘 要 快中子核反应数据, 不论对反应堆和聚变堆的设计, 还是对核反应机制和核结构的研究及其理论的发展均有着重要的意义. 由于屏栅电离室的诸多特点, 被用于快中子核反应截面、能谱及双微分截面的测量. 作为系统研究的一部分, 利用屏栅电离室在北京大学4.5 MV 静电加速器上和4~7 MeV 能区内, 对 ^{40}Ca 、 ^{64}Zn 、 ^{58}Ni 、 ^{54}Fe 、 ^{39}K 的(n, α)反应进行了成功的测量, 并对 ^{58}Ni 的(n, p)反应进行了初步的测量. 实验给出了反应中出射粒子的微分能谱、角分布和反应截面. 从测量结果来看, 在所测能区内, 角分布大致是90°对称的, 说明在此能区复合核反应机制起主要作用.

关键词 屏栅电离室 (n, α)和(n, p)反应 角分布 微分能谱 反应截面

分类号 O571.421

1 引言

对快中子引起的核反应中出射的带电粒子的能谱和角分布进行研究, 有着重要的实际应用价值, 能够为反应堆和聚变堆的设计提供有用的数据. 人们知道, 快中子的(n, α)反应中出射 α 粒子能够在结构材料中形成气泡和肿胀, 使材料的性能变差, 同时(n, p)反应中出射的质子也使结构材料变脆. 因此对(n, α)和(n, p)反应进行研究就显得至关重要. 与此同时, (n, α)和(n, p)反应的研究对于核反应机制和核结构的研究及有关理论的发展, 也有着重要的意义. (n, α)和(n, p)反应的实验结果很少, 这是由于中子引起的发射带电粒子的核反应截面比较小, 研究比较困难, 除了 $E_n=14$ MeV 附近有一些数据外, 在低能区研究较少. 尤其在大多数出射带电粒子开放道的3~10 MeV 能区内, 不仅数据很少且仅有的一些数据分歧也较大. 在这些数据中, 有很大一部分是用活化法测得的. 活化法虽然比较简单, 但要求余核的放射性

半衰期要适当, 太长太短都不行, 对于稳定的余核更是无能为力; 而且只能得到总截面, 无法得到出射粒子的能谱和角分布. 许多年来, 直接法测量中, 各种带电粒子探测器得到充分发展, 已成功地用于10~14 MeV 中子能区, 但在小于10 MeV 的能区中, 由于测量立体角太小, 探测效率低, 很少得到采用.

最近7~8年来, 清华大学核物理教研室与北京大学重离子所和俄罗斯联合原子核研究所合作, 采用屏栅电离室对4~7 MeV 的(n, α)和(n, p)反应进行了系统的研究, 取得了一定的进展, 形成了自己的特色.

屏栅电离室对带电粒子的探测效率近100%, 立体角近 2π , 可根据所测的粒子种类来选择合适的结构、工作气体及气压, 使之不仅有较好的粒子分辨本领, 而且能同时给出能谱和角分布. 正是由于这些特点, 屏栅电离室在(n, α)和(n, p)反应的研究中^[1~6]得到了应用.

本课题组(清华大学物理系、北京大学重

* 国家自然科学基金(项目号19675022)和核工业总公司基金资助.

离子物理研究所和俄罗斯联合原子核研究所的联合工作组)的实验是在北京大学 4.5 MV 静电加速器上进行的,单能中子是用氘束轰击固体 D-Ti 靶或 D₂ 气体靶的 D(d,n) 反应得到的。

2 屏栅电离室的结构特点及工作原理

由于工作的进展,我们先后采用了 3 个不同的屏栅电离室,从最初的铝外壳的低气压电离室^[1~4]发展到现在的 不锈钢外壳的高气压电离室,这样用同一电离室既可测量 (n,α) 反应又可测量 (n,p) 反应。同时靶装置也有了很大的改善。屏栅电离室由俄罗斯联合原子核研究所加工制造。

目前的高气压屏栅电离室外壳呈圆柱形,直径为 28.2 cm。室内极板呈正方形 (19 cm × 19 cm),由聚乙烯螺栓支持。阴极和阳极及屏蔽极板由厚铝做成。栅极由镀金钨丝制成,栅丝直径为 0.1 mm,丝间距为 2 mm。图 1 给出了该电离室的结构示意图。可以看出,它由背靠背的两个屏栅电离室组成,靶样品放在电离室中心,在实验中可以同时测量前后向的事件和本底。与以前的低气压电

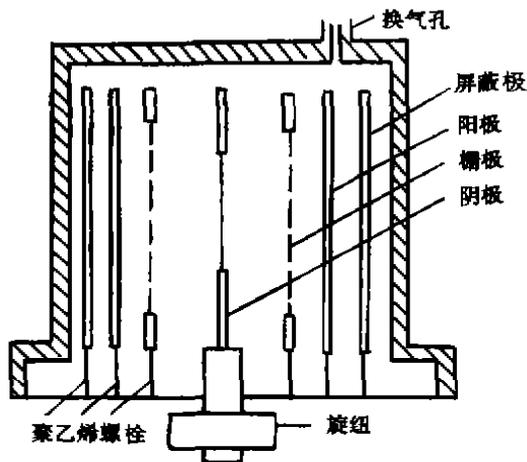


图1 屏栅电离室结构示意图

离室最大不同之处在于它可耐十几个大气压,可以把能量为 5~6 MeV 的质子阻止在电离室内,这样就可测量 (n,p) 反应截面。加

了屏蔽极,能有效地屏蔽从电离室壁出射的粒子对阳极信号的影响。电离室中一次可以放 5 个样品,这些样品镶嵌在位于阴极板夹层中可以转动的靶衬片上,阴极中部有一圆孔正好允许一个样品露出,只有处于这个位置的样品产生的带电粒子能进入电离室中,其他的样品都被阴极挡住。在不破坏高压,不改变电离室工作条件的情况下,可通过电离室底的旋钮转动带动齿轮使靶片转动来更换样品,给测量工作带来了极大的方便。

屏栅电离室的工作原理与一般电离室相同,但应指出的是,由于带电粒子的出射角度不同,它们在阴极和栅极间运动时产生的电离径迹重心到阴极的距离就不同,因此在阴极上感应出的电荷也就不同,于是可从阴极信号中提出带电粒子出射角度的信息。当可以忽略电子的俘获效应,且输出回路的时间常数远大于电子的收集时间而远小于正离子的收集时间时,下面的公式成立^[1]:

$$\begin{aligned} V_c &= G_c E \left(1 - \frac{\bar{x}}{d} \times \cos\theta \right), \\ V_a &= G_a E \left(1 - \frac{\sigma \bar{x}}{d} \times \cos\theta \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\cos\theta = \frac{d}{\bar{x}} \frac{1 - k_s \left(\frac{V_c}{V_a} \right)}{1 - \sigma k_s \left(\frac{V_c}{V_a} \right)}, \quad (2)$$

其中, V_c 、 V_a 和 G_c 、 G_a 分别为阴极和阳极信号的幅度和比例常数, E 为入射带电粒子的能量, d 为阴极和栅极间的距离, θ 为粒子出射方向和阴极平面的法线之间的夹角, σ 为屏蔽失效因子, $k_s = G_a/G_c$, \bar{x} 为电离径迹的电荷密度重心与粒子出射点的距离。

3 屏栅电离室的调试

电离室经过调试确定实验时的工作电压以及一些关键物理参数。电离室中的工作气体一般采用含百分之几二氧化碳的氩气或氮气。

3.1 工作电压的选择

工作电压的选择原则是电子收集达到饱和, 即栅极对电子的俘获作用因子 $\lambda \approx 0$, 且极板之间的边缘效应可以忽略. 保持阳极-栅极场强与栅极-阴极场强比不变, 测量不同工作气体气压(0.12~0.4 MPa)下的阴极饱和曲线(见图2). 在相同的条件下, 保持阴极电

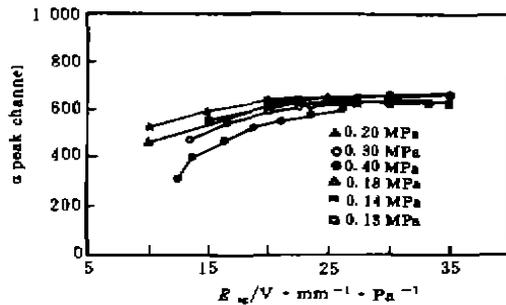


图2 不同气压下的阴极饱和曲线

压不变, 测量不同气压下的阳极-栅极场强与栅极-阴极场强比饱和曲线(见图3). 从图中可以看出, 当阴极和栅极间的约化场强为250~300 $V \cdot mm^{-1} \cdot MPa^{-1}$ 时, 阴极信号基本达

到饱和. 同时应保证阳极和栅极间的约化场强为栅极和阴极间的1.6倍以上.

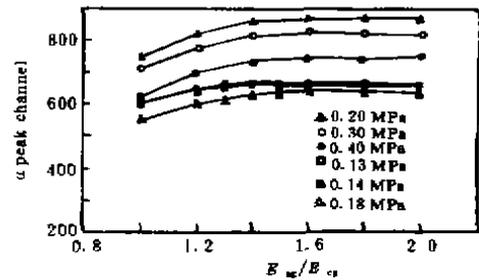


图3 不同气压下的 $E_a/E_c \sim peak$ 曲线

3.2 系统的能量刻度

我们用 Pu 混合 α 源(^{234}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 及 ^{244}Cm)进行能量刻度. 它的 α 粒子能量比较集中, 在5~6 MeV 附近. 在实验时, 同时测量 6LiF 在热中子作用下产生的氟(2.727 MeV)和最大能量的 α 粒子(2.055 MeV)得到两点能量. 并仔细调节电子学系统, 保证良好的线性(可用脉冲发生器监测). 这样有利于提高能量刻度的准确性.

表1 不同方法测得中子通量的比较

测量方法	中子积分通量 ϕ_0 (中子数/sr)		BF ₃ 计数		ϕ_0/BF_3 计数	
	通量值	误差	计数值	误差	计数值	误差
聚乙烯薄膜(模拟)	2.06×10^{11}	3%	1 692 000	5%	1.21×10^5	6%
^{238}U	1.33×10^{12}	3%	10 862 000	5%	1.23×10^5	6%

薄膜测得的通量根据4.4 MeV H(n,p)的截面和反冲质子数计算得到, ^{238}U 测得的通量由4.4 MeV $^{238}U(n,d)$ 截面和裂变碎片数计算得到.

4 中子通量监测

为了检验监测中子通量的结果, 把已知质量的 ^{238}U 和聚乙烯薄膜样品放在电离室中, 在中子能量为 4.4 ± 0.2 MeV 时, 在同样条件下对中子的绝对通量进行测量. 在这两类测量中都用 BF₃ 计数器进行中子通量的相对监测, 并进行归一. 从表1中可以看出, 两者在误差范围内相等.

5 实验安排和结果

电离室的输出信号经过前置放大器、主放大器、延迟成形, 进入 ADC 经过模数变换后, 由双参数数据获取系统采集送入主机, 同时得到阴极和阳极信号. 将这种信号处理后, 就可得到反应的能谱和角分布.

我们先后对 ^{40}Ca 、 ^{64}Zn 、 ^{58}Ni 、 ^{54}Fe 、 ^{39}K 的(n,α)反应进行了测量, 并对 $^{58}Ni(n,p)$ 反

应进行了试测. 下面是实验得到的部分结果.

5.1 微分能谱

图4给出了 $E_n = (4.5 \pm 0.3) \text{ MeV}$ 、 $(5.5$

$\pm 0.2) \text{ MeV}$ 和 $(6.5 \pm 0.2) \text{ MeV}$ 时 $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$ 反应在 36.87° (实验室系) 方向上的出射粒子的能谱. 从谱上可清楚看到分离得很

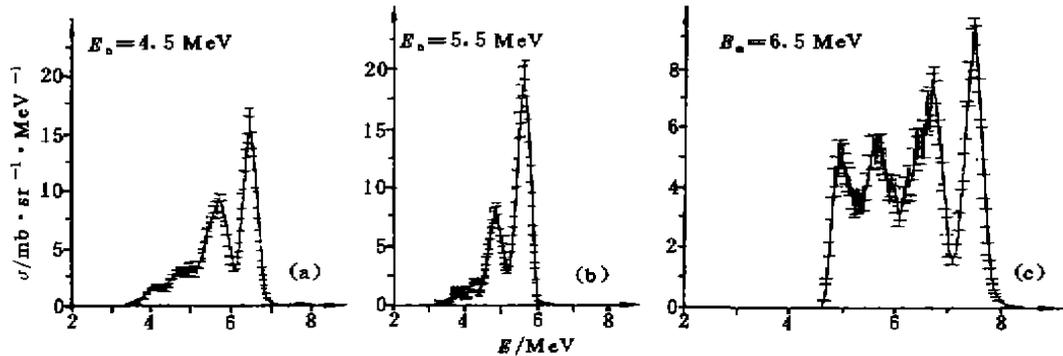


图4 $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$ 反应在 36.87° 方向上的出射粒子能谱

好的几组粒子. 其中高能组对应余核处于基态, 较低能组对应余核处于第一和第二激发态. 图5是 $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反应出射质子的能谱. 从实验中可以看出, 当靶很薄时, 由于粒子在靶中损失的能量少, 与较厚的靶相比, 可以得到较好的能谱. 当然, 薄靶的测量时间相应的要长一些. 可以选择适当的靶厚, 既能得到比较理想的能谱 (相应得到比较精确的双微分截面), 又不花费过长的测量时间.

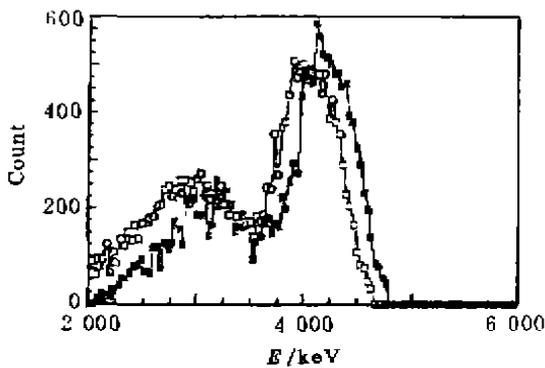


图5 $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反应的出射质子能谱
□正向 ($0^\circ \sim 90^\circ$), □反向 ($0^\circ \sim 90^\circ$).

5.2 角分布

图6给出了 $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$ 反应在 $E_n = 4.5 \pm 0.3 \text{ MeV}$ 、 $5.5 \pm 0.2 \text{ MeV}$ 和 6.5 ± 0.2

MeV 时的角分布 (质心系). 曲线是多项式拟

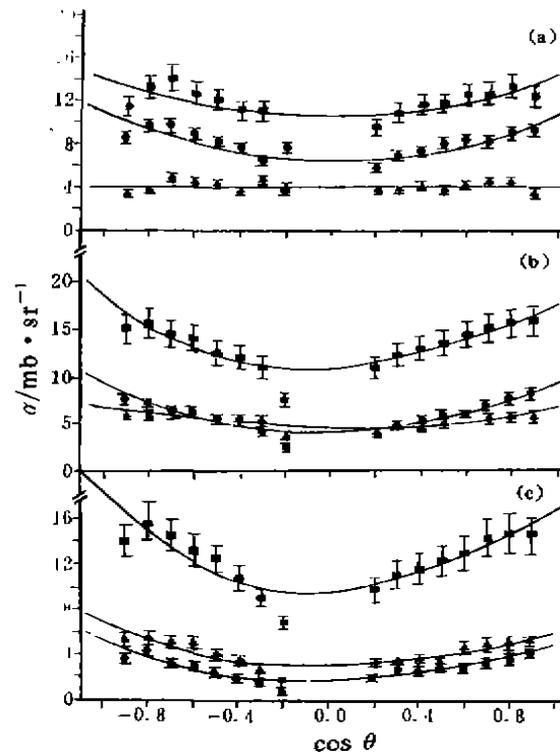


图6 $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$ 反应在质心系的角分布
(a) 4.5 MeV , (b) 5.5 MeV , (c) 6.5 MeV ;
□ total, · alpha 0 为余核基态, ▲ alpha 12 为余核第一激发态与第二激发态的和.

合的结果. 其中, 6.5 MeV 时的 alpha E 是指余核能量小于 2.4 MeV 时出射的 α 粒子.

从实验结果来看, 在中子能量为 4~7 MeV 时, (n,α) 的角分布基本为 90° 对称. 在中子能量为 4 MeV 时, (n,p) 的角分布基本为 90° 对称.

5.3 反应截面

表2是对⁶⁴Zn、⁵⁸Ni、⁵⁴Fe的(n,α)反应测得的截面^[1~4], 样品均为同位素靶. 表3和表4为天然CaF₂靶和天然KI靶时测得的⁴⁰Ca、³⁹K的截面值. 由于采用了很薄的靶, 所以同时得到分截面和全截面. 其中, 6.5 MeV 时

的σ(n,α)是指余核能量小于2.4 MeV 时出射的 α 粒子的截面.

6 结论

从目前得到的结果看, 在4~7 MeV 能区, (n,α)反应的角分布大致是90°对称的, 在4 MeV 时, ⁵⁸Ni(n,p)反应的角分布也是90°对称. 这说明在此能区, 复合核反应机制起主要作用. 同时得到的微分能谱、角分布及反应截面说明屏栅电离室作为一种(n,α)和(n,p)反应的研究工具是很成功的. 作为系统研究, 进一步的实验还在进行中.

表2 所测核素的截面值

核素	含量(%)	厚度/mg·cm ⁻²	样品直径/cm	截面/mb		
				E _n =5 MeV	E _n =6 MeV	E _n =7 MeV
⁵⁸ Ni	99.9	0.50±0.01	4	47.4±5.0		
			6	75±16	95±20	
⁶⁴ Zn	98.4	0.250±0.013	10	34±3		
⁵⁴ Fe	99.87	1	4	8.8±2.6		

表3 ⁴⁰Ca(n,α)³⁷Ar 的反应截面

E _n /MeV	σ(n,α ₀)/mb	σ(n,α _{1,2})/mb	σ(n,α)/mb
4.9±0.1	157±15	42±6	199±20
6.0±0.1	93±9	76±8	198±20

表4 ³⁹K(n,α)³⁶Cl 的反应截面

E _n /MeV	σ(n,α ₀)/mb	σ(n,α _{1,2})/mb	σ(n,α)/mb
4.5±0.3	98±8	51±5	149±14
5.5±0.2	71±6	66±6	166±16
6.5±0.2	36±4	52±6	160±20

致谢 本工作所用电离室由 A. Zak (Lodz University, Lodz, Poland) 设计; 所用数据采集系统由北京大学的夏松江老师制作; 实验

中得到北京大学 4.5 MV 静电加速器组的大力协助, 特此感谢!

参 考 文 献

- 1 陈迎春, 齐奔基, 陈泽民等. 用于快中子引起带电粒子核反应研究的屏蔽电离室及双参数测量系统. 核电子学与核探测技术, 1995, 15: 72~78
- 2 唐国有, 曲德成, 仲文光等. 用双屏蔽电离室测量快中子(n, α)反应的双微分截面. 核技术, 1994, 17: 129~135
- 3 Chen Yingtang, Chen Zemin, Qi Huiquan *et al.* Angular Distribution and Cross Section Measurements of $^{44}\text{Zn}(n, \alpha)^{61}\text{Ni}$ Reaction for Neutron Energy 5 MeV. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1995, 17(2): 167~170
- 4 范弄红. ^{68}Ni 和 $^{64}\text{Fe}(n, \alpha)$ 反应研究. 北京大学博士生论文, 1996
- 5 Ito N, Baba M, Matsuyama S *et al.* Large Solid Angle Spectrometer for the Measurements of Differential (n) Charged-particle) Cross Sections. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1994, A337: 474~485
- 6 Baba M, Ito N, Hirakawa N *et al.* Differential α -Production Cross Sections of Iron and Nickel for 4.3 to 14.1 MeV Neutrons. Journal of Nuclear Science and Technology, 1994, 31(7): 745~747

Study of Fast Neutron Induced (n, α) and (n,p) Reactions

Chen Zemin Zhang Xuemei Chen Yingtang

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Tang Guoyou Zhang Guohui

(Institute of Heavy Ion Physics of Peking University, Beijing 100871)

Yd Gledenov G Khuukhenkhoo M V Sedysheva

(Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia 141980)

Abstract The study of the charged particle emission reactions induced by 3~7 MeV fast neutrons is of considerable interest for both nuclear applications and the understanding of basic nuclear problems. For its many merits, twin gridded ionization chamber is used in the studies of (n, α) and (n,p) reactions. As a part of systematic investigation, the (n, α) reactions for some nuclei, such as ^{40}Ca , ^{64}Zn , ^{68}Ni , ^{54}Fe , ^{39}K have been studied. Cross sections, differential energy spectra and angular distributions of the outgoing particles are obtained. (n,p) reaction for ^{68}Ni is also studied and some preliminary results are obtained. For all of the reactions we have studied, the angular distributions are almost symmetric about 90 degree. The results show that the compound nucleus reaction mechanism is important in this energy range.

Key words twin gridded ionization chamber (n, α) and (n,p) reactions cross section differential energy spectra angular distribution

Classifying number O571.421