

\* \* \* \* \*  
\* 简报 \*  
\* \* \* \* \*

## 20 MeV/u $^{40}\text{Ar}$ 离子与 $^{238}\text{U}$ 相互 作用中的靶余核

秦 芝 李文新 孙彤玉 赵莉莉 张 翔  
尹新民 吴定清 郑纪文 刘国兴 赵之正

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

采用核化学技术测定了20 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  离子与 $^{238}\text{U}$  靶相互作用中靶余核的生成截面,由此得到了该反应的电荷分布和质量分布。结果表明,裂变产物源于不同的反应机制,在入射粒子能量为20 MeV/u时,对应于重靶余核的“类熔合峰”依然存在。

**关键词** 电荷分布 质量分布 核化学技术  $^{40}\text{Ar}$   $^{238}\text{U}$

由于中能重离子是研究热核最有效的工具,所以近年来对中能重离子引起的核反应进行了广泛的研究。文献[1—4]报道了高能和中能重离子粒子轰击锕系靶核的实验结果。Pollacco等<sup>[1]</sup>研究了Ar+Th反应中裂变碎片的折叠角分布,发现入射粒子能量在39—44 MeV/u时,类熔合峰消失;江栋兴等<sup>[2]</sup>测量了该反应的中子多重性,发现Ar离子的能量在27—77 MeV/u之间变化时,平均多重性事件数为一常数,且具有相似的中子多重性分布。对于在中能区(10—100 MeV/u)热核的形成和衰变演化过程,由于实验方法的不同,得出了互相矛盾的结果。运用核化学技术探测类熔合过程产生的重靶余核和多重碎裂(导致重靶余核消失)产生的中等质量碎片的产生截面,可以了解类熔合峰的“消失”过程。该方法的最大特点是可以准确地指明反应产物的电荷数Z和质量数A,没有探测器截止阈的限制,可以探测到反冲动能很低的重靶余核;还可观察重离子碰撞的全过程。本文运用核化学技术研究20 MeV/u $^{40}\text{Ar}$ 离子与 $^{238}\text{U}$ 靶相互作用,旨在了解中能重离子引起的裂变过程和重靶余核的生成信息。

### 1 实验部分

#### 1.1 靶子和照射

按文献[5]推荐的条件,采用电沉积法制备天然铀靶。靶子厚度为4.22 mg/cm<sup>2</sup>, $^{238}\text{U}$ 的天然丰度为99.24%。靶组由铀靶和6.0 mg/cm<sup>2</sup>的纯铝收集箔组成,靶组固定在带有冷却水系统

收稿日期:1995-03-20 收到修改稿日期:1995-11-16

的法拉第筒上,在偏压环上加-100 V 电压,以免电子逃逸而造成束流测量的不准确。在中国科学院近代物理研究所兰州重离子研究装置(HIRFL)的 SSC 出口处进行照射。照射束流是25 MeV/u 的 $^{40}\text{Ar}^{+18}$ 离子,经降能箔后,打在铀靶中心位置的能量为20 MeV/u。照射时间约14 h,束流用法拉第筒收集,并用电流积分器和定标器测量束流强度。平均束流强度约16 nA,总积分束流为582  $\mu\text{C}$  或 $4.81 \times 10^{15}$ 个 $^{40}\text{Ar}$ 离子。

## 1.2 $\gamma$ 能谱测量和数据处理

照射结束后,靶子连同铝收集箔一起经效率刻度的高纯锗探测器进行直接 $\gamma$ 能谱测量。探测器的相对效率为18%,能量分辨为2.1 keV(对 $^{60}\text{Co}$ 的1332 keV  $\gamma$ 射线)。脉冲幅度分析和数据获取系统由微机和美国 Ortec 公司的 M919多道缓冲器组成。照射结束后25 min 开始测量并持续2个月,最短测量时间为300 s,最长测量时间为54000 s。测量过程中定期进行能量刻度。

$\gamma$ 能谱分析、生成截面的计算、电荷分布和质量分布的计算均采用文献[6]中描述的方法在 VAX-8350计算机上完成。

## 2 结果和讨论

### 2.1 生成截面

实验测到了从 $^{72}\text{Zn}$ 到 $^{239}\text{Np}$ 共101个放射性核素,并计算了它们的生成截面。与240 MeV  $^{12}\text{C}+^{238}\text{U}$  的实验数据<sup>[3]</sup>相比,本文所测到的核素要少一些,这主要是因为实验中使用了化学组分离技术,对碱土、稀土、卤素、锕系元素进行了化学分离,使探测灵敏度有所提高。但本实验中测到了 $^{230}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{Pa}$  等几个近靶产物,这可能是由于较重的轰击导致周边碰撞引起的核子转移反应几率有所增加。经放射性靶核的衰变分析,扣除了 $^{238}\text{U}$  的 $\alpha$ 衰变对 $^{234}\text{Pa}$ 的贡献。

### 2.2 电荷分布的计算

实验中所得到的生成截面中,只有很少部分屏蔽核的截面可以直接作为独立产额,大部分核素的截面为累积产额或部分累积产额对母体的 $\beta$ 衰变贡献修正后才能将其换算成独立产额。对于一些稳定核或没有合适的 $\gamma$ 射线可被探测的核素,无法直接测定其生成截面。然而,它们在核反应中却具有不可忽略的生成截面,必须通过同量异位素的独立产额随反应产物 $Z$ 和 $A$ 的系统性用 MASSY 程序<sup>[5]</sup>计算这些核素的独立产额。其中假设反应产物的电荷分布用下述高斯函数来描述:

$$\sigma_{Z,A} = \sigma_A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} e^{-\frac{(Z-Z_p)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_A$ 为质量产额,即给定质量链上各同量异位素的独立产额 $\sigma_{Z,A}$ 之和; $\sigma_z$ 为高斯分布的宽度参数, $Z_p$ 为该质量链的最可几电荷数。需要特别指出的是,当有两种不同的反应机制对同一质量链的产额都有贡献时,必须用具有不同参数的两个高斯分布的叠加来拟合实验数据<sup>[7]</sup>。在此基础上,再进一步假设高斯宽度参数和质量产额随质量数缓慢变化;对于一种给定的反应机制,最可几电荷数 $Z_p$ 为质量数 $A$ 的线性函数,可用下式表示:

$$Z_p = K_0 + K_1 A + K_2 A^2 \quad (2)$$

式中, $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 为可调参数。将实验数据根据相邻的质量数以及位于 $\beta$ 稳定线的位置(丰中子或缺中子核素)划分为13个质量区间,调整 $Z_p$ 值,对照射过程中来自母体 $\beta$ 衰变对产额的贡献进行修正后,就可由实验测定的累积产额计算出各同量异位素的独立产额。20MeV/u $^{40}\text{Ar}+$

表1 20 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$  反应中的电荷分布参数

质量区间	产物类型	$K_0$	$K_1$	$K_2$	$\sigma_z$
72—75	所有产物	2.25	0.405	0.00	1.0
76—93	缺中子产物	2.60	0.405	0.00	0.9
82—92	丰中子产物	1.20	0.405	0.00	0.8
94—106	缺中子产物	4.40	0.405	0.00	0.9
95—111	丰中子产物	1.65	0.405	0.00	0.9
110—124	缺中子产物	3.15	0.405	0.00	0.9
112—128	丰中子产物	0.75	0.405	0.00	1.0
125—139	缺中子产物	2.75	0.405	0.00	0.9
129—134	丰中子产物	-0.55	0.405	0.00	0.9
135—143	丰中子产物	-0.50	0.405	0.00	0.9
145—163	所有产物	3.30	0.45	-0.000216	0.8
165—173	所有产物	2.00	0.45	-0.000216	0.7
232—239	所有产物	-0.35	0.45	-0.000216	0.6

注:  $Z_p = K_0 + K_1 A + K_2 A^2$

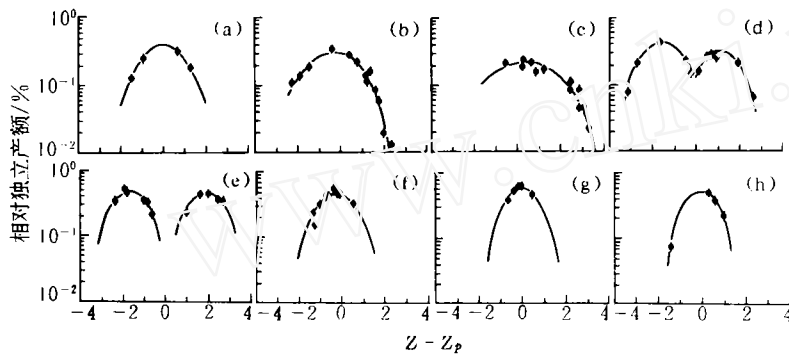


图1 各质量区间的电荷分布曲线

(a) —  $72 \leq A \leq 75$ , (b) —  $76 \leq A \leq 93$ , (c) —  $94 \leq A \leq 106$ , (d) —  $110 \leq A \leq 124$   
 (e) —  $125 \leq A \leq 143$ , (f) —  $146 \leq A \leq 161$ , (g) —  $165 \leq A \leq 173$ , (h) —  $232 \leq A \leq 239$

$^{238}\text{U}$  反应中各质量区间的电荷分布参数列入表1。对应质量区间的电荷分布曲线示于图1。由图1可见,对  $A=72-75$  和  $A=143-173$  质量区间的实验数据可用单一高斯分布很好地拟合,而质量数  $A=80-145$  之间的裂变产物的电荷分布必须用两条叠加的高斯曲线分别拟合丰中子核素和缺中子核素的实验数据。这说明在该质量区丰中子产物和缺中子产物来源于不同的反应机理,这一点与中能重离子和非裂变靶核相互作用的情况有所不同。Mcgaughey 等<sup>[4]</sup>在研究高能 $^{12}\text{C}$  与 $^{238}\text{U}$  相互作用中产物的反冲性质时,发现丰中子产物与缺中子产物的产生机理是完全不同的。他们认为丰中子产物来源于低能裂变,而缺中子产物来源于高能裂变和散裂过程。

本实验认为裂变区的丰中子产物来源于低能裂变(如库仑激发引起的裂变,少数核子转移引起的裂变),而考虑到入射粒子的能量为20 MeV/u,可以忽略散裂过程的贡献,裂变区缺中子产物主要来自高激发能的裂变过程(如类熔合裂变或非平衡过程引起的快裂变)。

### 2.3 质量分布

将给定质量链上同量异位素的独立产额相加,即得到该链的质量产额,20 MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>238</sup>U 反应中靶余核的质量分布示于图2。由图2可以看出,该质量分布与1.0 GeV <sup>12</sup>C + <sup>238</sup>U 反应没有多大差别,在 A=80—145 裂变质量区内存在一对称裂变峰,峰位在 A=110 附近,质量数接近靶质量的“类熔合峰”依然存在,且具有不可忽略的生成截面。这可能是由周边碰撞引起的转移反应而产生的。因为在中能重离子<sup>12</sup>C、<sup>40</sup>Ar 和<sup>197</sup>Au 靶相互作用中,发现随着入射粒子能量的增加,周边碰撞的几率增大,重靶余核的截面有增大的趋势,而裂变截面会逐渐减小<sup>[6]</sup>。

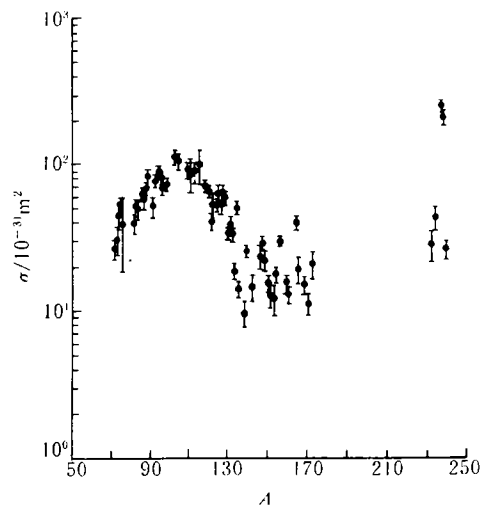


图2 20 MeV/u <sup>40</sup>Ar + <sup>238</sup>U 反应中靶余核的质量分布

## 3 结论

(1) 裂变区的丰中子产物来源于低能裂变(如库仑激发引起的裂变,少数核子转移引起的裂变),缺中子产物主要来自高激发能核的裂变过程(如类熔合裂变或非平衡过程引起的快裂变)。

(2) 质量分布在 A=80—145 裂变质量区内存在一对称裂变峰,峰位在 A=110 附近,质量数接近靶质量的“类熔合峰”依然存在,且具有不可忽略的生成截面。

## 参 考 文 献

- 1 Pollacco EC, Conjeaud M, Harar S, et al. High Momentum and Energy Transfer Induced by 1760 MeV <sup>40</sup>Ar on <sup>197</sup>Au and <sup>232</sup>Th Targets. Phys Letts, 1984, 146B: 29.
- 2 Jiang DX, Douber H, Galin J, et al. Saturation of Thermal Energy Deposited in Au and Th Nuclei by Ar Projectiles Between 27—77 MeV/nucleon. Nucl Phys, 1989, A503: 560.
- 3 Lee CH, Yu YW, Lee D, et al. Charge and Mass Distributions From the Reaction of 240 MeV <sup>12</sup>C Ions With <sup>238</sup>U. Phys Rev, 1988, C38: 1757
- 4 McGaughey PL, Loveland W, Morrissey DJ, et al. Uranium Target Fragmentation by Intermediate and High Energy <sup>12</sup>C and <sup>20</sup>Ne Ions. Phys Rev, 1985, C31: 896.
- 5 秦 芝. 电沉积法制备<sup>233</sup>U 同位素靶. 核技术, 1995, 94.
- 6 李文新, 孙彤玉. 核化学研究中  $\gamma$  能谱的测量和分析. 原子能科学技术, 1990, 24(2): 60.
- 7 Yu YW, Lee C, Moody KJ, et al. Yield Recoil Properties of Iodine Isotopes From the Interaction of 240 MeV <sup>12</sup>C With <sup>238</sup>U. Phys Rev, 1987 C36, 2396.

- 8 Aleklett K, Loveland W, Liljezin JO, et al. Heavy Residues Properties in Intermediate Energy Nuclear Collision With Gold. In: Shen WQ, Luo YX, Liu JY, eds. International Symposium on Heavy Ions Physics and Its Application. Singapore: World Scientific Press. 1991, 140.

## TARGET RESIDUES FROM THE INTERACTION OF NATURAL URANIUM TARGET WITH 20 MeV/NUCLEON $^{40}\text{Ar}$ IONS

Qin Zhi, Li Wenxin, Sun Tongyu, Zhao Lili, Zhang Xiang,  
Yin Xinming, Wu Dingqing, Zheng Jiwen, Liu Guoxin, Zhao Zhizheng

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

### ABSTRACT

The production cross sections of target residues from the interaction of natural uranium with 20 MeV/nucleon  $^{40}\text{Ar}$  ions have been measured using nuclear chemistry techniques. Charge and mass yield distributions are obtained from these data. It is proved that the process of formation of neutron-excessive nuclides is different from that of neutron-deficient products. The appearance of fusion-like peak corresponding to heavy residues at incident projectile energy of 20 MeV/nucleon is observed.

**Key Words** Charge distribution Mass yield distribution Nuclear chemistry techniques  
 $^{40}\text{Ar}$   $^{238}\text{U}$