

80MeV / u ^{16}O + Fe 反应中 靶碎片的产额研究*

李文新¹ 赵莉莉² 秦 芝² 孙彤玉² 安部静子³

大久保嘉高³ 岩本正子³ 小林羲男³ H.Maeda³ 安部文敏³

1 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (日本理化学研究所 日本埼玉县和光市 351-01)

摘要 使用核化学技术测量了 80MeV / u ^{16}O 离子和天然铁反应中 25 个靶碎片的生成截面。根据这些数据导出了电荷分布和质量分布。实验结果和以前发表的数据进行了比较,指出 $A = 48$ 质量链的电荷分布宽度参数 σ_z 和最可几电荷 Z_p 随轰击能量增加而略微增加。根据高能核反应的极限碎裂和因子化概念讨论了靶碎片的质量产额分布。

关键词 核反应 中能 电荷分布 质量分布 极限碎裂

1 引言

近年来,低能 ($\leq 10\text{MeV/u}$) 和高能 ($\geq 200\text{MeV/u}$) 之间过渡能区的中能重离子反应研究引起了很大的兴趣。但是,大部分工作涉及到的能区都是中能区的低能端,入射重离子的总动能低于 $1\text{GeV}^{[1-4]}$ 。最近我们使用核化学方法研究了 $80\text{MeV/u } ^{16}\text{O}$ 和 $135\text{MeV/u } ^{12}\text{C}$ 离子与天然铁靶的相互作用。其中 $135\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应的实验研究已作了报道。研究的重点在于质量分布的理论描述,结果发现级联两体碎裂模型^[5]和改进过的不对称分子动力学计算^[6]均能很好地再现实验测定的质量产额分布。本文报道 $80\text{MeV/u } ^{16}\text{O} + \text{Fe}$ 反应中靶碎片的产额及其分布研究,并和 $135\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 以及我们先前发表的其它有关反应研究结果进行比较和讨论。

1998-04-29收稿

* 国家自然科学基金(19475056)资助

2 实验

2.1 照射

照射在日本理化研究所 (RIKEN) 的 Ring Cyclotron 上进行. 靶组由 3 片厚度均为 $15.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 、纯度为 99.99% 的天然铁箔组成. $80\text{MeV}/\text{u}$ 的 ^{16}O 束流用电流积分仪以多定标方式记录, 典型流强约 200enA . 照射时间为 60min . 照射结束, 仅中间一片铁箔用于 γ 能谱测量. 靶组这样安排可以不再需要对反应产物由于反冲引起的产额变化作任何修正.

2.2 γ 能谱测量和数据处理

铁箔上的 γ 活性用效率刻度过的 HPGe 探测器测量, 测量时间持续 1 个月. 获得的 γ 能谱在理化学研究所的 FACOM 1800 计算机上用 BOB 程序分析^[7]. 其余数据分析工作均在中国科学院近代物理研究所 (兰州) 进行. 放射性核素鉴别、生成截面计算均按以前描述过的方法在 VAX-8350 计算机上完成^[8]. 计算中使用的有关核数据取自文献 [9].

3 结果

3.1 生成截面

本工作测定了从 ^{22}Na 到 ^{57}Co 共 25 个放射性核素的生成截面并给在表 1 中. 列出的误差为标准偏差, 包括 γ 谱分析误差, 分解衰变曲线的误差以及 5% 的 γ 探测效率的误差, 靶厚和束流测量误差不包括在内. 为了与 $135\text{MeV}/\text{u}$ $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应相比较, 各个碎片在两

表1 $80\text{MeV}/\text{u}^{16}\text{O}+\text{Fe}$ 反应中靶碎片的生成截面

核素	类型	截面 (mb)	核素	类型	截面 (mb)
^{22}Na	C^+	8.90 ± 1.90	^{48}Cr	C^+	1.62 ± 0.19
^{24}Na	C^-	8.35 ± 1.50	^{48}V	C^+	48.5 ± 3.10
^{28}Mg	C^-	0.86 ± 0.06	^{48}Sc	I	0.94 ± 0.10
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	C^+	3.07 ± 0.33	^{49}Cr	C^+	14.1 ± 2.80
^{39}Cl	C^-	1.01 ± 0.12	^{51}Cr	C^+	98.9 ± 10.7
^{41}Ar	C^-	1.41 ± 0.21	^{52}Mn	I	31.6 ± 1.50
^{42}K	I	9.65 ± 1.20	^{52}Fe	C^+	1.33 ± 0.15
^{43}K	C^-	2.79 ± 0.19	^{54}Mn	I	82.0 ± 10.20
^{43}Sc	C^+	12.90 ± 2.40	^{55}Co	C^+	2.41 ± 0.15
$^{44\text{m}}\text{Sc}$	I	24.50 ± 1.50	^{56}Co	C^+	6.13 ± 0.54
$^{44\text{g}}\text{Sc}$	I	15.40 ± 2.20	^{56}Mn	C^-	4.50 ± 0.56
^{46}Sc	I	20.30 ± 1.60	^{57}Co	C^+	26.6 ± 4.00
^{47}Sc	I	6.93 ± 0.75			

表中 C^+ 和 C^- 分别表示包括了丰质子和丰中子前驱核的累积产额, I 表示独立产额.

个反应中的截面比 σ_o / σ_c 显示在图 1 中. 除了最轻的²²Na 和超靶碎片, 即 Co 的同位素外, 所有碎片在¹⁶O + Fe 和¹²C + Fe 反应中生成截面之比 σ_o / σ_c 彼此非常接近, 其平均值为 1.23, 最大偏离也只有 10% 左右.

3.2 电荷分布和质量产额分布计算

电荷分布描述一个质量链上各同量异位素的独立产额 $\sigma(Z, A)$ 随原子序数 Z 的变化, 通常用高斯函数表示:

$$\sigma(Z, A) = \sigma(A) (2\pi\sigma_z)^{-1/2} \exp[-(Z - Z_p)^2 / 2\sigma_z^2], \quad (1)$$

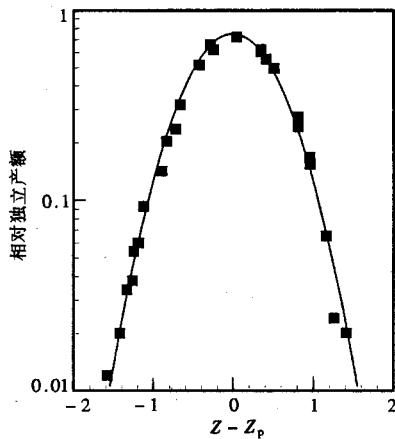


图 2 80MeV/u ¹⁶O+Fe 反应中靶碎片的电荷分布.

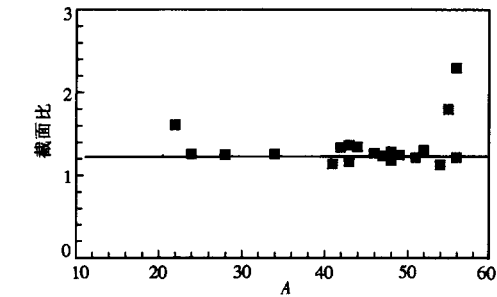


图 1 不同质量靶碎片在¹⁶O + Fe 和¹²C + Fe 反应中生成截面比
直线表示截面比为 1.23.

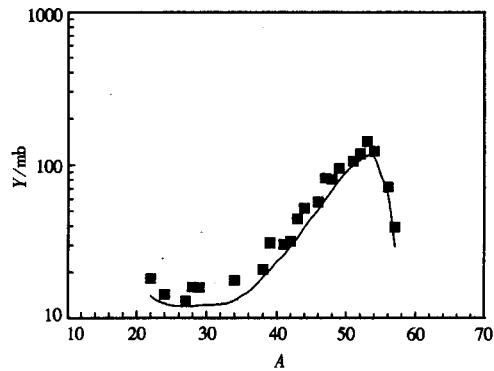


图 3 80MeV/u ¹⁶O+Fe 反应中靶碎片的质量产额分布
实线为 135MeV/u ¹²C+Fe 反应的质量产额分布.

这里 $\sigma(A)$ 为质量产额, σ_z 为电荷分布的宽度参数, Z_p 为该质量链的最可几电荷. 本工作中只有在 $A = 48$ 的质量链上测定了⁴⁸Sc、⁴⁸V 和⁴⁸Cr 这三个核素的产额. 因此, 使用逐渐逼近法可以求解方程(1), 得到 σ_z 为 0.531. 对于其余质量链的产额计算, 必须进一步假设电荷分布的 Z_p 值在一个小的质量区间内是质量数 A 的线性函数, 电荷分布宽度参数 σ_z 取作 0.531, 并在所有的质量区间保持不变. 计算得到的电荷分布和质量产额分布分别描绘在图 2 和 图 3 中. 计算的细节已在以前的论文中描述了^[1].

4 讨论

4.1 电荷分布

按照统计理论, 电荷分布宽度随着初始复合系统的激发能的增加而增加. 但是实验发现, 分布宽度对入射能非常不灵敏, 以至在带电粒子引起重核裂变的电荷分布研究中, 分布宽度与入射能量依赖关系的研究结果常有矛盾. 在重离子反应中, 情况也相似.

Cho 等^[3]在 15—45 MeV / u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的研究中指出, 电荷分布宽度和最可几电荷 Z_p 值与入射能量无关. 相反 Pienkowski 等^[4]在 8—46 MeV / u $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 的研究中得到电荷分布宽度随入射能增加而明显加大, 而 Z_p 值也基本上保持不变.

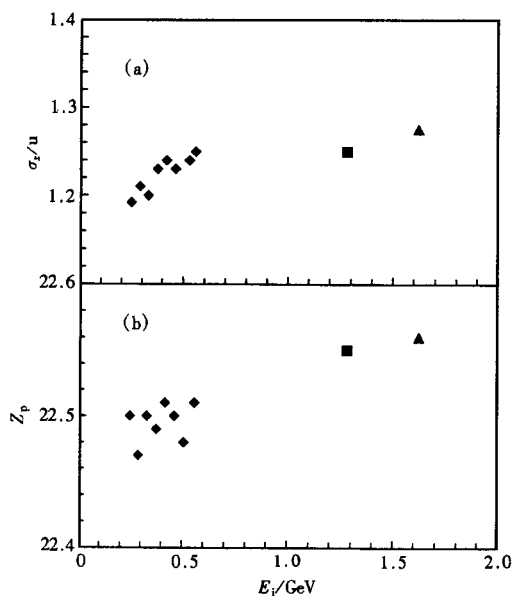


图 4 $A=48$ 的电荷分布宽度 σ_z (a) 以及最可几电荷 Z_p (b) 随入射离子能量的变化
◆文献 [1, 2], ▲文献 [5], ■本文.

本工作根据实验测定的 ^{48}Cr , ^{48}V 和 ^{48}Sc 的生成截面, 使用前面描述的方法计算得到了 80 MeV / u $^{16}\text{O} + \text{Fe}$ 和 135 MeV / u $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应中 $A = 48$ 链上电荷分布宽度参数 σ_z 和最可几电荷 Z_p . 这些数据和以前 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 的结果^[1, 2] 一起描绘在图 4 中. 由于低产额测量误差的影响, 实验结果比较分散, 但仍能清楚看到电荷分布宽度参数 σ_z 随入射能增加而缓慢上升, 支持了我们以前作出的结论^[1]. 需要特别指出的是, 由于研究的入射能大大扩展, 图上还首次显示了 Z_p 值也随入射能增加而略微增大.

由此可见, 在重离子碰撞中, 入射动能大部分耗散在初始碰撞中轻粒子或中等质量碎片的发射. 靶余核的初级碎片在形成时没有很高激发能, 因而 σ_z 和 Z_p 值对入射能的变化不很灵敏. 但是随着入射能的增加, 沉积在初级碎片的激发能还是略有增加, 导致电荷分布宽度逐渐变

大, 并且激发能的增加使初级碎片发射中子数增多, 结果产物向缺中子一边移动, 因此 Z_p 值略微增大.

4.2 质量分布

80 MeV / u $^{16}\text{O} + \text{Fe}$ 反应靶碎片的质量分布 (图 3) 仍具有中能重离子反应典型的形状. 但是, 和入射能量低于 1 GeV 的 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应相比^[1-4], 轻质量 ($A \approx 20-30$) 碎片产额明显增加. 例如同 46.4 MeV / u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 相比, 产额增加了大约 5 倍^[1], 结果使得质量分布指数区 ($37 < A < 51$) 的斜率变小. 因此, 整个质量分布形状和高能质子或高能重离子反应又有某些相似^[10]. 反映了 80 MeV / u $^{16}\text{O} + \text{Fe}$ 应处于过渡能区的特征. 为了进一步比较, 135 MeV / u $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应靶碎片质量产额分布^[5] 也描绘在图 3 中. 可以看到, 两个质量产额分布形状极为相似. 表征质量分布的两个参数是平均质量数和质量分布指数区的斜率. 对于 80 MeV / u $^{16}\text{O} + \text{Fe}$ 和 135 MeV / u $^{12}\text{C} + \text{Fe}$, 计算得到的平均质量数和斜率分别为 46.3, 46.7 和 0.124, 0.127. 表明两个质量分布的形状确无明显差别.

Cumming 等^[10]分析了质子和高能重离子轰击天然铜靶时靶碎片质量分布指数区斜率和入射能的依赖关系, 指出斜率随入射能增加而迅速下降, 当入射能在 1—2 GeV 时, 斜率变化趋缓. 最后, 入射能超过 2 GeV, 靶核发生“极限碎裂”, 此时, 斜率或整个质量分布形

状不再随入射能量增加而明显变化。看来,在我们所涉及到能区的重离子和铁相互作用中,从质量分布的标度来看,已趋于接近极限碎裂。质量分布形状几乎和入射能量无关,而它们绝对数值大小则与炮弹的几何截面密切相关,这就是高能核反应中的“因子化”概念。对图 3 的质量产额曲线积分得到¹⁶O + Fe 和¹²C + Fe 反应总截面分别为 1.68b 和 1.38b,总截面比值为 1.22。事实上,正如图 1 所示的,在¹⁶O + Fe 和¹²C + Fe 反应中几乎所有碎片的生成截面之比都接近于 1.23 的平均值。非常有趣的是这两个反应总截面的比值和各个碎片生成截面比的平均值都与¹⁶O 和¹²C 核的几何截面比 1.21 极为接近,这似乎是极限碎裂和因子化的重要证据。

处于中能区高能端的重离子反应的实验数据还较少,要了解重离子反应怎样向核子-核子碰撞起主要作用的高能反应过渡还需要在实验和理论上作出更大的努力。

感谢日本理化学研究所矢野安重、俊藤 彰、加濑昌之博士和 Ring cyclotron 全体运行人员对本工作的支持。

参 考 文 献

- 1 Li Wenxin et al. *Radiochimica Acta*, 1996, **72**:109—119
- 2 Li Wenxin et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1990, **14**:745—752
(李文新等. 高能物理与核物理, 1990, **14**:745—752)
- 3 Cho S Y et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:2227—2236
- 4 Pienkowski L et al. *Phys. Rev.*, 1991, **C43**:1331—1351
- 5 Qin Zhi et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1995, **19**:481—488
(秦芝等. 高能物理与核物理, 1995, **19**:481—488)
- 6 Qin Zhi et al. *Z. Phys.*, 1996, **A355**:315—316
- 7 Baba H et al. *Japan Atomil Energy Research Institute Report*, 1972, **JAERI 1227**
- 8 Li Wenxin, Sun Tongyu. *Atomic Energy Science and Technology (in Chinese)*, 1990, **24**:60—65
(李文新, 孙彤玉. 原子能科学技术, 1990, **24**:60—65)
- 9 Reus U, Westemeies W. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1983, **29**(2)
- 10 Cumming J B et al. *Phys. Rev.*, 1978, **C17**:1632—1648

Study of Yields for Target Fragments From the Reaction of Iron With 80MeV / u¹⁶O Ions *

Li Wenxin¹ Zhao Lili² Qin Zhi² Sun Tongyu² S.Ambe³ Y.Ohkubo³
M.Iwamoto³ Y.Kobayashi³ H.Maeda³ S.Ambe³

1(*Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

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

3(*The Institute of Physical and Chemical Research, Japan, Wako, Saitama 351-01*)

Abstract Production yields were determined for 25 target fragments produced from the reaction of iron with 80 MeV/u ¹⁶O ions. From these data, charge distribution and mass yield distribution have been deduced. The experimental results are compared with those reported from our previous work. It is found that the width parameter σ_z and the most probable charge Z_p of the charge distribution increase slowly with increasing bombarding energy. The mass yield distribution is discussed in terms of the concepts of limiting fragmentation and factorization.

Key words nuclear reaction, intermediate energy, charge distribution, mass yield distribution, limiting fragmentation

Received 29 April 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19475056)