

## 96 MeV<sup>16</sup>O + <sup>64</sup>Ni 反应机制的研究\*

阎德宏 郭忠言 邬恩九 尹淑芝 范恩杰

郝洪飞 刘冠华 张庆利 冯恩普

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

路秀琴 赵 葵 程业浩 李庆利 李 民 姜承烈

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

### 摘 要

在 96 MeV<sup>16</sup>O 离子轰击下, 测量了 <sup>16</sup>O + <sup>64</sup>Ni 反应出射碎片 ( $\alpha$  直至 O 元素) 的 Wilczynski 图和角分布, 并提取出 DIC 截面和反应时间等物理量; 讨论了反应的 DIC 特征; 看到了出射碎片  $\alpha$  和 Li 主要来源于复合核蒸发的迹象。

### 一、引 言

低能重离子反应中主要存在有三种反应机制: 直接反应、深度非弹性散射及熔合反应。深度非弹性散射是介于直接反应和熔合反应之间的中间过程。对中重和重系统的这一过程的广泛研究表明: 各种不同自由度在不同的时间尺度内随反应时间增加而逐步达到平衡。例如  $N/Z$  自由度, 总动能自由度, 角动量自由度, 质量不对称自由度等在给定的系统转动一周所需的时间内依次达到平衡。

熔合反应表现出统计平衡特性。它是在内部核子相互作用达到动态平衡的基础上形成的。由于复合核的稳定状态, 它将根据入射炮弹带入碰撞体系的激发能和角动量情况, 在比直接反应, 深部非弹反应更为长久的时间里 ( $10^{-16}$ s 左右) 各向同性地蒸出质子,  $\alpha$  粒子乃至 Li、Be 等较复杂的粒子, 即所谓的复杂粒子蒸发<sup>[1]</sup>。

以往的工作大多集中在重的弹靶系统上<sup>[2,3]</sup>。对于较轻的重离子反应随着反应时间的增加是否仍经历从准弹过渡到深部非弹机制, 直至全熔合的演变过程? 它们具有什么样的特性? 研究这些问题是有意义的。

本文的一些作者已经对一些轻反应系统的深部非弹性机制进行了研究<sup>[4-6]</sup>。这里将报告又一个较轻的反应系统的实验结果, 并着重讨论随反应时间的增加反应机制发生的演变, 最后尝试讨论了复杂粒子的蒸发现象。

本文 1989 年 10 月 31 日收到。

\* 国家自然科学基金资助的课题。

## 二、实验装置及数据处理

实验是在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列静电加速器上进行的。<sup>16</sup>O 离子束流能量为 96 MeV, 经光栏系统准直在靶上得到直径为  $\phi$  3 mm, 流强为 200 nA 的离子束流; 1.5 mg/cm<sup>2</sup> 的 <sup>64</sup>Ni 靶位于  $\phi$  60 cm 的靶室中心, 靶室真空度为  $6.7 \times 10^{-6}$  mbar.

实验中使用两个望远镜探测器,  $\Delta E$  探测器由 6 cm 厚度的纵向场屏栅电离室构成.  $P_{10}$  工作气体 (10% 甲烷, 90% 氩气), 工作气压 400 mbar, 流气式, 由稳压控制系统稳定气压. E 探测器为 Si(Li) 漂移型探测器, 耗尽层为 5 mm. 两套望远镜间隔 40° 角, 固定于遥控步进转盘上. 实验时以 5° 步长在 30°—130° 角域进行了测量. 检验探测器和法拉弟筒用于对束流的监视和绝对测量.

实验数据的在线获取由原子能研究院的 VAX-11/780 机上的 XSYS 数据获取系统完成. 数据以事件方式记录在磁带上. 实验数据的离线分析在近代物理所的 VAX-11/8350 机上用 KVI-PAX 软件分析完成.

## 三、实验结果

图 1 给出在 96 MeV 能量下 <sup>16</sup>O + <sup>64</sup>Ni 反应出射产物的  $d^3\sigma/dE d\Omega dZ$  质心系等高图 (Wilczynski 图). 从图 1 可见, 对于炮弹附近的类弹产物, N, 可以明显地区分出两种不同的反应成份. 第一种成份是小角度高能端的准弹反应, 其截面随角度增加下降很快, 在  $\theta_{gr}$  ( $\theta_{gr} = 31^\circ$ ) 附近占优势. 第二种成份是深部非弹反应产物, 该成份随角度增加其能量下降徐缓, 并最终趋于一平衡值. 此时反应系统达到相对运动能量的完全弛豫. 该

表 1 在 96 MeV 轰击能量下 <sup>16</sup>O + <sup>64</sup>Ni 反应产物全弛豫动能

出射粒子	He	Li	Be	B	C	N	O
实验全弛豫动能 $E_{tot}^{th}(\text{MeV})$	10.9	13.4	17.1	21.5	25.4	26.7	30.2
$r_0 = 1.33\text{fm}$ $E_{coul}(\text{MeV})$	13.6	19.4	24.8	29.7	34.4	38.7	42.2
$r_0 = 1.33\text{fm}$ $E_{rot}(\text{MeV})$	1.0	2.2	2.9	4.1	4.5	4.8	5.7
$r_0 = 1.33\text{fm}$ $E^{th} = E_{coul} + E_{Nucl} + E_{rot}$	10.2	13.2	17.1	21.3	25.0	26.9	30.6
半经验模型 <sup>1)</sup> 值 $E_{sem}^{th}$	9.4	13.5	17.0	20.6	23.9	26.9	29.7
$\Delta E_{sem}^{th}(\text{MeV})$	$\pm 0.4$	$\pm 0.6$	$\pm 0.7$	$\pm 0.9$	$\pm 1.0$	$\pm 1.1$	$\pm 1.3$
$E_{rot}/E^{th}$	0.10	0.17	0.17	0.19	0.18	0.19	0.19

1) V. E. Viola et al. [9].

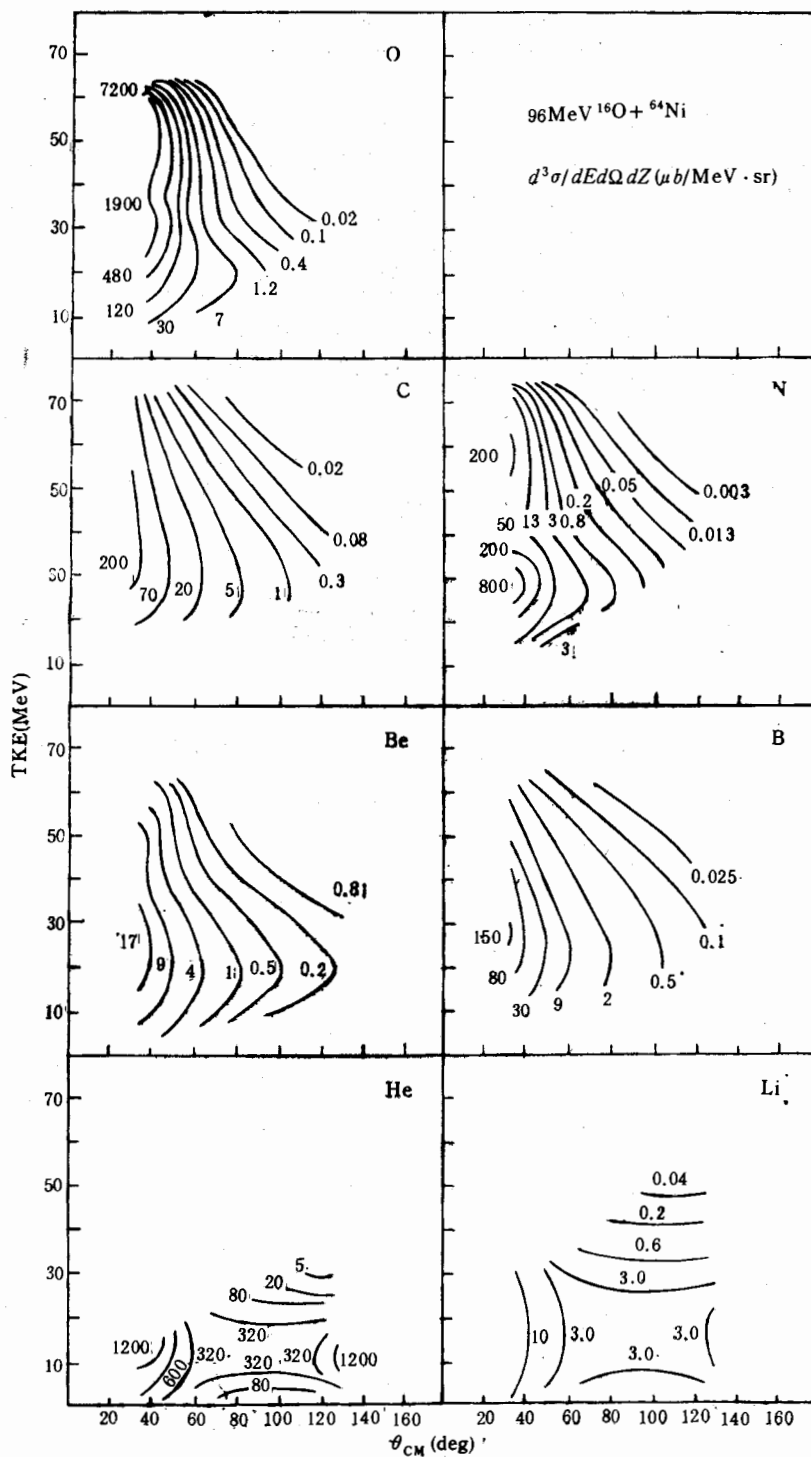


图1  $96\text{ MeV } ^{16}\text{O} + ^{64}\text{Ni}$  反应中出射碎片在 TKE- $\theta$  平面上的  $d^3\sigma/dEd\Omega dZ$  等高图

深度非弹成份在  $\theta > \theta_{gr}$  时占居主导地位。当类弹碎块远离弹核时, 由于交换核子数增加, 具有明显结构的准弹成份逐渐减小; 深度非弹的份额愈来愈大, 几乎只能观察到 DIC 一种成份; 并且在小角度时, 最可几 TKE 值已经较小, 随角度增加此能量的降低更加缓慢, 最后也趋向一平衡值 (全弛豫能量)。不同出射产物全弛豫能量列于表 1 中。

图 2、3 分别给出各出射道全能谱积分的角分布及对各种出射道求积的不同 TKE 间隔积分的角分布。从图 3 可见, 角分布展现出前冲特征, 可分解为 QE 和 DIC 两种成分, 它们分别对应曲线上两种不同斜率, 其中 DIC 成份的斜率随能量耗散 TKEL 增加逐渐变小。对 DIC 过程, 角分布可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$d^2\sigma/dE d\Omega \propto \exp(-\mu\theta/\sin\theta), \quad (1)$$

用它拟合 DIC 部分的角分布得到衰减系数  $\mu$ , 由  $w\tau = \frac{1}{\mu}$  提取出反应

时间  $\tau$ 。其中转动频率取为<sup>[5]</sup>  $w = [2(E_{cm} - V_c)/\mu]^{1/2}/R$ 。  $E_{cm}$ 、 $V_c$  及  $R$  分别为质心系相对运动能量, 入射道库仑位垒以及弹核与靶核的半径和。得到的出射碎片  $\mu$  与  $\tau$  值列于表 2。对反应产物  $Z$  值积分的总角分布, 也用上面的公式进行了拟合 (见图 5), 得到的 DIC 及 QE 部份的结果一并列于表 2。表 3 还给出了不同 TKE 间隔对应的人射角动量  $l_i$  值,  $l_i$  的计算公式为:

$$l_i = [(l_i + 1)^2 - \Delta\sigma_{ij}/\pi\lambda^2]^{1/2} - 1, \quad (2)$$

其中  $\lambda = \frac{1}{K}$ ,  $\Delta\sigma_{ij}$  为 TKE 间隔  $[TKE_i, TKE_j]$  中的总出射道截面值。图 4 给出了反应时间  $T_{int}$  与人射道角动量依赖关系。做为比较还给出了较重反应系统的结果<sup>[2,3]</sup>。

图 5 是反应截面的分解图, 将所有元素的能谱积分后得到的总角分布再拟合 DIC 组份, 外推并积分, 可得到实验测量出射产物的 DIC 截面为 48.8 mb。

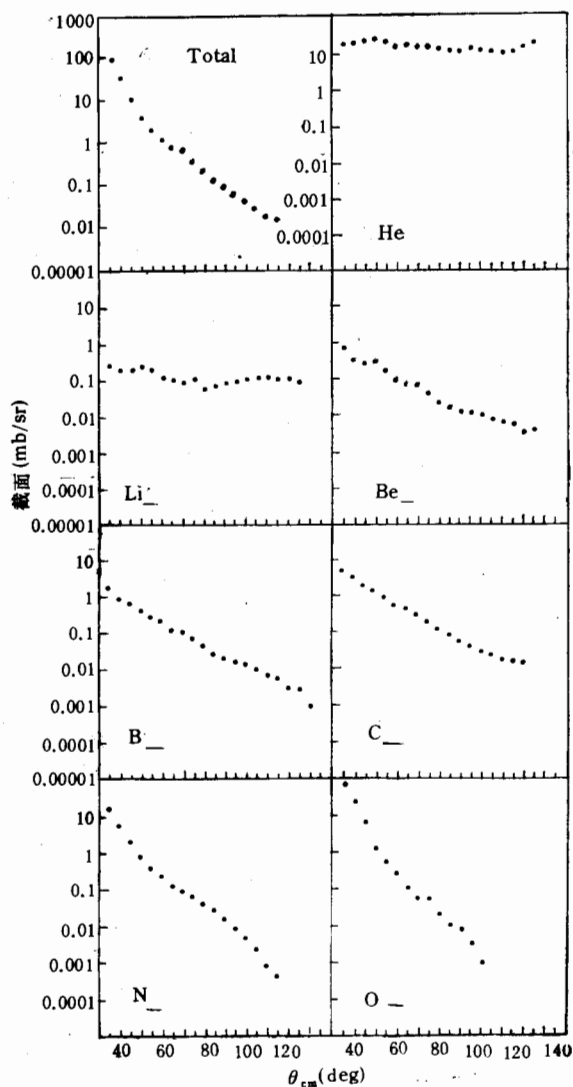


图 2 出射碎片角分布及总角分布

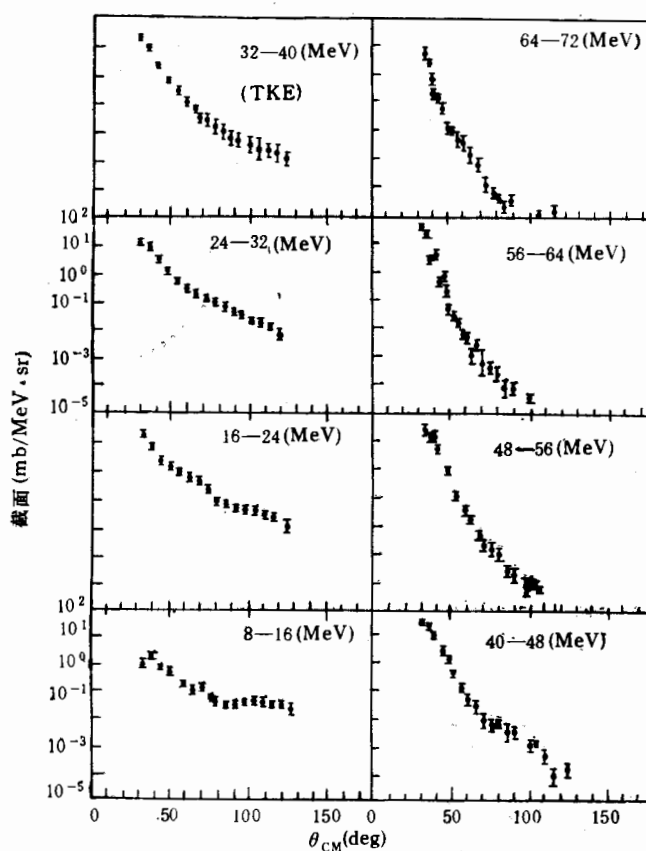


图3 不同 TKE 间隔出射碎片总角分布

表2 出射道反应时间

	Be	B	C	N	O	QE	DIC
$\mu$	2.88	4.32	5.02	5.84	7.55	8.34	2.94
$\tau$	2.29	1.52	1.31	1.13	0.87	0.79	2.24

单位:  $\mu(\text{rad}^{-1})$ ;  $\tau(10^{-22}\text{s})$ 表3  $96\text{ MeV }^{16}\text{O} + ^{64}\text{N}$  TKE区间的反应时间  $\tau$ 

TKE (MeV)	64-72	64-56	56-48	48-40
$\mu(\text{rad}^{-1})$	9.59	7.13	6.82	5.11
$\tau(\times 10^{-22}\text{s})$	0.69	0.92	0.97	1.20
平均入射角动量 ( $\hbar$ )	52.6	50.1	47.3	44.5
$\bar{l}_i/l_{\text{max}}$	0.99	0.945	0.892	0.839
TKE (MeV)	40-32	32-24	24-16	16-8
$\mu(\text{rad}^{-1})$	4.47	3.72	3.37	1.96
$\tau(\times 10^{-22}\text{s})$	1.49	1.77	1.96	3.36
$\bar{l}_i(\hbar)$	41.9	39.1	36.4	35.6
$\bar{l}_i/l_{\text{max}}$	0.79	0.74	0.69	0.67

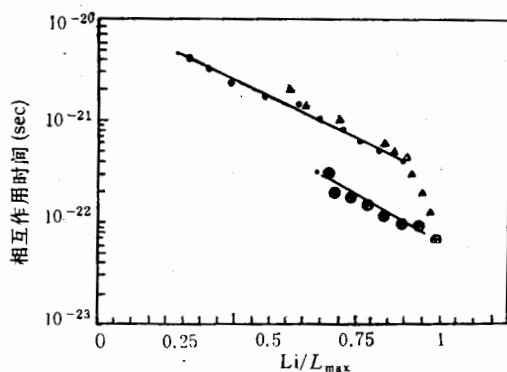


图 4 相互作用时间与  $l_i/l_{\max}$  关系曲线  $\oplus$  来自于本次实验,  $\triangle, \bullet$  分别为  $505 \text{ MeV } ^{86}\text{Kr} + ^{139}\text{La}$  反应及  $940 \text{ MeV } ^{136}\text{Xe} + ^{209}\text{Bi}$  反应实验结果

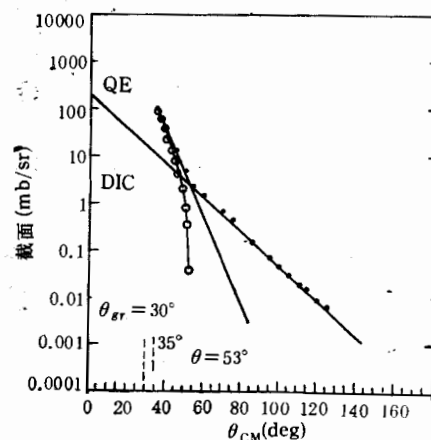


图 5  $96 \text{ MeV } ^{16}\text{O} + ^{64}\text{Ni}$  反应 QE 和 DIC 产物角分布

#### 四、结果与讨论

实验得到了  $96 \text{ MeV } ^{16}\text{O} + ^{64}\text{Ni}$  出射类弹碎片能谱和角分布及其相互关系。实验结果表明,在该系统反应中,确实存在 DIC 反应机制,它具有人们研究得比较多的重系统 DIC 的基本特征与规律性。

实验得到的产物大体上分为两个组份,即作用时间短,偏转角小,交换核子数少,能量耗散少的准弹和作用时间长,偏转角大,交换核子数较多,能量耗散逐渐增大最终达到完全弛豫的 DIC 组分。轻系统的全弛豫动能除库仑能外,离心能和剩余核子相互作用能也不可忽略。用包括库仑能,转动能及核能三部分的能量公式拟合实验 TKE 全弛豫能量,得到的核半径参数值为  $r_0 = 1.33 \text{ fm}$  (见表 1)。这一结果比单纯库仑能拟合得到的核半径参数值  $r_0 = 1.68 \text{ fm}$  要小,介于全熔合的临界半径参数 ( $0.96 \text{ fm}$ ) 和核势开始起作用的相互作用半径参数<sup>[8]</sup>  $r_{\text{int}} = 1.65 \text{ fm}$  之间。表明深部非弹反应在比准弹作用半径小但比全熔合半径大的区域;可能是一个比较合理的量。表 1 还列出了用 V. E. Viola 半径经验公式计算的参考值,可见它们彼此间较好地符合。

在角分布中观察到的两种不同斜率的组分,小角度处斜率较大部分对应于准弹过程,较大角区中斜率较小的部分对应于深部非弹过程。这样就可以从实验上大体区分出深度非弹反应及准弹反应的贡献(见图 5)。深度非弹组分的角分布斜率随 TKE 能损增大及转移核子数增多而变小,从另一侧面反映了反应的弛豫过程。根据角分布斜率可以定出平均的深非弹相互作用时间及作用时间随能量耗散而增大的关系(表 2)。它们大致在  $10^{-22}$  秒数量级。图 4 显示出较轻的系统反应时间短,中重及重系统反应时间趋长。三个系统的结果均表现出  $T_{\text{int}}$  与  $l_i$  之间有负指数关系:  $T_{\text{int}} \propto e^{-k_i l_i}$ 。

另外,我们注意到,实验测得的出射碎片 He、Li 的  $d^2\sigma/dEd\Omega$  等高图及其角分布均表现出明显的复合核蒸发特征,尤其是 Li 元素具有较高的出射道产额,单纯的 DIC 机

制不能很好地理解这一现象。如把 He、Li 归为复合核复杂粒子蒸发,以形式  $N(E_a) \propto \exp(-E/T)$  拟合质心系  $90^\circ$  角以后的  $\alpha$  粒子和 Li 的能谱,可得出  $T_\alpha = 3.3$  MeV 和  $T_{\text{Li}} = 4.5$  MeV。根据复合核理论  $T = \frac{1}{12} \sqrt{E^*/a}$  (其中,  $E^*$  是激发能,  $a = A_c/13.5 \sim A_c/8.0$  为复合核能级密度参数)对 96 MeV 能量下  $^{16}\text{O} + ^{64}\text{Ni}$  反应系统计算其复合核温度,有  $T = 2.64 \sim 3.4$  MeV。实验提取的  $T_\alpha$  较好地与理论计算符合。 $T_{\text{Li}}$  略高于计算值,这可能意味着 Li 产物不完全是复合核蒸发的贡献,而是有一部分 DIC 成份。对于本实验复合核蒸发复杂粒子现象的更多认识,有待于今后更进一步的实验研究和分析。

作者感谢原子能研究院串列加速器实验组的大力支持和关心。感谢数据获取室及垒下熔合与裂变反应研究组的有益帮助与协作。

### 参 考 文 献

- [1] L. G. Sobolka et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 2187.
- [2] J. R. Huisenga, *Nucl. Phys.*, **A387**(1982), 257.
- [3] R. Voudenbosh et al., *Phys. Rev.*, **17**(1978), 1672.
- [4] 沈文庆等,高能物理与核物理, **9**(1985),332.
- [5] 谢元祥等,高能物理与核物理, **8**(1984),746.
- [6] 郭忠言等,高能物理与核物理, **7**(1987),497.
- [7] J. Galin, *J. Phys.*, **37**(1976), c5-83.
- [8] W. W. Wilke et al., *VR-NSEL*, **221**(1980).
- [9] V. E. Viola et al., *Phys. Rev.*, **31**(1985), 1550.

## Study of the Reaction Mechanisms Induced by $^{16}\text{O}$ on $^{64}\text{Ni}$ at 96 MeV

YAN DEHONG GUO ZHONGYAN WU ENJIU YIN SHUZH FAN ENJIE  
XI HONGFEI LIU GUANHUA ZHANG QINGLI FENG ENPU  
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, 730000)

LU XIUQIN ZHAO KUI CHENG YEHAO LI QINGLI LI MIN JIANG CHENGLIE  
(Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

### ABSTRACT

The angular distributions and Wilczynski plots of emitted fragments from He to O in reaction of  $^{16}\text{O} + ^{64}\text{Ni}$  at 96 MeV have been measured. The DIC cross section and interreaction time were obtained. DIC character of the reaction was discussed. The trace which shows that the emitted fragments of He and Li mainly come from the evaporation process of compound nuclei emerged.