

# 离线 $\gamma$ 技术测量重离子熔合复合核 平均角动量 \*

钱 兴 江 栋 兴 林 俊 松

(北京大学技术物理系, 北京 100871)

刘 大 鸣 李 泽

(中国原子能研究院, 北京 102413)

(1994 年 12 月 13 日收到)

使用离线  $\gamma$  测量技术在质心系 25.0—40.5 MeV 的能区测量了  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  熔合反应产生的二中子和三中子蒸发道的激发函数。由于在相同的激发能下, 蒸发道的相对截面比与复合核的角动量有很强的依赖关系, 应用统计蒸发程序(CASCADE), 从二中子和三中子蒸发道的截面中提取不同能量下的复合核平均角动量和熔合截面。同时从能很好地拟合熔合激发函数的简单耦合道模型(CCFUS)计算中提取复合核的平均角动量。两种方法得到的复合核平均角动量随入射能量的变化相一致, 表明耦合道模型能同时合理地解释近垒及垒下  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  系统的熔合截面加强和复合核角动量分布展宽的实验结果。

PACC: 2586; 2475; 2570

## 1 引言

近垒及垒下重离子熔合研究是当前低能核物理研究的热点, 自从实验发现垒下重离子熔合截面比简单的一维势垒穿透模型预言的要强以来, 理论和实验都进行了极为广泛的研究。人们对熔合截面相对于一维势垒穿透模型的加强有了较全面的了解, 建立了如表面零点振动、耦合道、相互作用玻色子、中子流和颈生成及额外推动力等模型。这些模型都引进了使熔合截面有可能增加的各种自由度, 在一定程度上减少理论和实验的差异。

单纯测量垒下熔合截面激发函数来检验现有理论具有相当的局限性, 不同的分波截面分布可以具有相同的熔合截面。因此测量分波截面分布或相关的矩, 可以更加严格地判别垒下熔合截面理论的真实性, 研究各种自由度在熔合过程中所起的作用。

$\gamma$  测量技术, 由于能测量到较小的截面, 因此可以研究较低能区的反应机制。此外直接测量蒸发剩余核, 不仅可以得到熔合过程, 而且可以得到复合核蒸发过程的一些信息。在相同的激发能下, 复合核蒸发道的相对截面比与复合核的角动量有很强的依赖关系。测量蒸发道的相对截面比并与统计模型计算比较, 可以得到复合核平均角动量, 反过来也可以检验熔合理论。

\* 核工业总公司科学基金资助的课题。

## 2 实验方法与结果

实验是在中国原子能研究院的 HI-13 串列静电加速器上进行的。靶片为自衬的铌薄箔片 ( $2.7 \text{ mg/cm}^2$ )，使用叠靶照射技术，每次照射二片或四片靶。在靶片之间使用铝薄箔片 ( $0.443 \text{ mg/cm}^2$ ) 隔离，用铝片既作降能片又作收集片收集反冲的蒸发剩余核。铌片和铝片的厚度使用称重法和  $\alpha$  粒子透射法确定，其测量误差在 5% 之内一致。实验分三次照射，弹核轰击的实验室系能量在 44 至 48 MeV 之间。弹核在靶片上的能量取入射能量和出射能量的平均值。靶片上的束流绝对能量不确定性约在 0.7 MeV 之内，主要是能损歧离和最初束流的能量离散。在实验过程中，由于测量的核素寿命较短 ( $^{103}\text{Ag}$ ,  $T_{1/2} = 65.7 \text{ min}$ ;  $^{102}\text{Ag}$ ,  $T_{1/2} = 12.9 \text{ min}$ )，束流轰击选定 10 min，这时  $\gamma$  堆积效应可以忽略。束流由靶后对次级电子抑制的法拉第筒收集，用束流积分仪测量总电荷。实验时平均束流强度为 230 nA 左右，稳定性在 5% 之内。辐照后的靶片和收集片一起做离线测量。使用高纯锗 (HPGe) 和锗锂 (Ge(Li)) 两个探测器测量蒸发剩余核的  $\gamma$  射线能谱，锗锂和高纯锗的探测效率分别为 20% 和 35%。用标准源进行探测器的效率和能量刻度，它们对  $^{60}\text{Co}$  的 1332.5 keV 的  $\gamma$  射线能量分辨率 (FWHM) 为 1.8 keV。被测量的核素通过其  $\gamma$  射线的能量、强度分支比以及半衰期而确认。用 S90 多道脉冲分析器与 AST-286 微机系统获取  $\gamma$  能谱及处理数据。使用 SPAN 程序分析  $\gamma$  能谱，SUN 和 HTANA3 程序分别被用来分类核素和拟合  $\gamma$  衰变曲线，获取  $\gamma$  计数。实验测量的  $\gamma$  跃迁，对  $^{103}\text{Ag}$  核的能量为 118.7

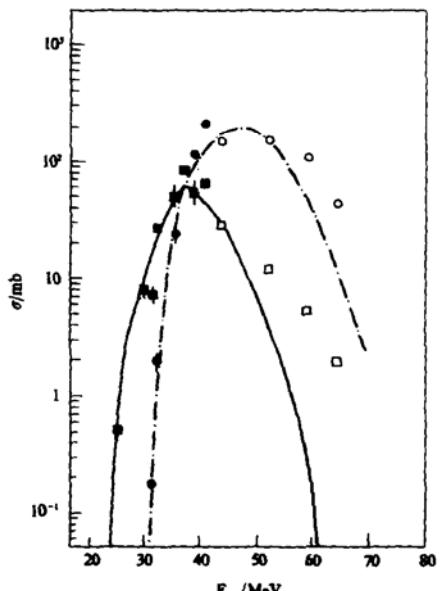


图 1  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  熔合反应产生的  $^{103}\text{Ag}$ ,  $^{102}\text{Ag}$  核的激发函数和误差。方点和圆点分别为  $^{103}\text{Ag}$ ,  $^{102}\text{Ag}$  核；实线和虚线为模型计算曲线；实点和空点分别代表我们和文献 [2] 的测量结果。

和 148.1 keV，相应的强度分支比为 31.3% 和 28.4%；对  $^{102}\text{Ag}$  核的能量为 556.6, 1256.9 和 1581.4 keV，分支比分别为 97.7%, 12.7% 和 13.7%<sup>[1]</sup>。

当靶被照射  $T$  时间后，冷却  $t_1$  后在  $t_1$  和  $t_2$  之间探测到的活化产物放出某种特征  $\gamma$  线的数目  $Y$  为

$$Y = n\sigma\varphi[1 - \exp(-\lambda T)][\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)]\epsilon_\gamma I_\gamma / \lambda, \quad (1)$$

其中  $n$  为单位面积的靶核数， $\sigma$  为活化产物产生截面， $\varphi$  为单位时间的入射粒子数， $\lambda$  为放射性反应产物核的衰变常数。 $\epsilon_\gamma$  和  $I_\gamma$  分别为探测效率和  $\gamma$  射线强度分支比。

图 1 示出  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  熔合反应产生的  $^{103}\text{Ag}$  和  $^{102}\text{Ag}$  核的激发函数和误差。从图 1 可

见两组数据在相近的能量端能很好衔接。考虑截面的主要误差有：1%—5%的计数统计误差，5%靶厚的系统误差， $\gamma$ 绝对效率及强度分支比的误差和4%—5%的放射性同位素半衰期误差，截面总误差在8%—20%之间。

### 3 模型计算结果与讨论

假如没有入射道效应，复合核按统计模型蒸发粒子而退激。各蒸发道的截面，可以精确地由统计模型计算确定。在相同的激发能下，复合核的角动量直接决定着蒸发剩余核的截面。

复合核蒸发过程使用 Hauser-Feshbach 统计理论描述，蒸发剩余核截面的计算使用 CASCADE 程序<sup>[3]</sup>。在 CASCADE 程序中，只要激发能允许一直可接连蒸发粒子。程序的输入中，衰变链核的基态质量使用实验值。仅考虑质子、中子和  $\alpha$  粒子的蒸发。在计算穿透系数时，质子使用 Perey 的光学势<sup>[4]</sup>，中子和  $\alpha$  粒子分别使用 Wilmore 等<sup>[5]</sup>和 Huijzen<sup>[6]</sup>的光学势。所有势的实部和虚部都使用 Woods-Saxon 形状的径向相关形式。E1, M1 和 E2 型  $\gamma$  跃迁的约化跃迁率使用 Endt 的值<sup>[7]</sup>。不同核在不同激发能和角动量区域的能级密度使用 Reisdorf<sup>[8]</sup>的表达式计算，能级密度参数取为  $A/9 \text{ MeV}^{-1}$ 。其它参数使用估计值。在缺少复合核角动量分布真实信息的情况下，我们尝试使用扁平、高斯、Woods-Saxon 等不同形状的角动量分布。经过仔细分析表明，对于不同形状的角动量分布，在合理参数下，从剩余核截面比  $\sigma_{3n}/\sigma_{2n}$  提取的平均角动量相差并不大，这与文献[9]的结果一致。为此简单假设复合核角动量分布为以下的高斯分布形式：

$$\sigma(l) \propto \exp[-(l - \langle l \rangle)^2/2a^2], \quad (2)$$

其中  $a/\langle l \rangle = 0.30$ ,  $\langle l \rangle$  为平均角动量。

图 2 示出不同复合核  $^{105}\text{Ag}$  平均角动量下，剩余核截面比  $\sigma_{3n}/\sigma_{2n}$  与激发能的关系。图 2 中不同能量点上提取的复合核平均角动量用实点表示在图 3 中。

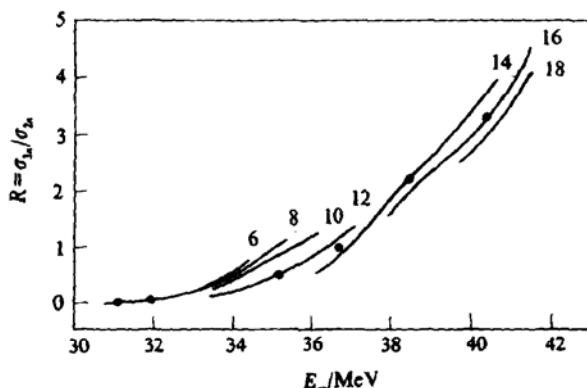


图 2 复合核  $^{105}\text{Ag}$  不同平均角动量下，剩余核截面比  $\sigma_{3n}/\sigma_{2n}$  与激发能的关系。实线为 CASCADE 程序计算曲线；复合核平均角动量从 6—18。

从 CASCADE 程序计算还可知，在实验测量能区二中子和三中子蒸发道是复合核的主要衰变道，它们的截面和占总熔合截面的 50% 至 65%。从二中子和三中子蒸发道截面推得的熔合截面用实点表示在图 4 中。

在近垒及垒下能区重离子熔合截面相对于一维势垒穿透模型有很大的加强。在已有的很多模型中，耦合道理论是处理近垒及垒下熔合最为成功的理论。模型认为入射道和其它道如非弹性激发道、转移道耦合，改变熔合位垒，从而使熔合截

面得到增强。计算熔合截面和复合核平均角动量使用简单的耦合道程序 CCFUS<sup>[10]</sup>。

在 CCFUS 中, 核势使用 Christensen 等的势<sup>[11]</sup>, 弹靶核的基态分别与<sup>12</sup>C 的第一激发态  $2^+$  ( $E^* = 4.434$  MeV,  $\beta_2 = 0.592$ )<sup>[12]</sup>; <sup>93</sup>Nb 的最初四个激发态:  $7/2^+$  ( $E_1^* = 0.744$  MeV,  $\beta_2 = 0.046$ ),  $11/2^+$  ( $E_2^* = 0.809$  MeV,  $\beta_2 = 0.043$ ),  $3/2^+$  ( $E_3^* = 0.950$  MeV,  $\beta_2 = 0.053$ ) 及  $5/2^+$  ( $E_4^* = 0.979$  MeV,  $\beta_2 = 0.046$ ) 耦合 (<sup>12</sup>C 的基态  $0^+$ , <sup>93</sup>Nb 的基态  $9/2^+$ )<sup>[13]</sup>。非弹性激发道的耦合强度使用以下形式:

$$F_k(r) = \beta_{\lambda k} / (4\pi)^{1/2} [-R_k dV_n(r)/dr + 3Z_1 Z_2 e^2 R_k^\lambda / (2\lambda + 1) r^{\lambda+1}], \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为跃迁的多极性,  $k$  是指弹靶核,  $R$  为核半径,  $V_n$  为核势,  $\beta_k$  为形变参数, 从电磁折合跃迁几率  $B_k(E_\lambda)$  值计算得

$$\beta_{\lambda k} = [4\pi/3ZR_k^\lambda][B_k(E_\lambda)/e^2]^{1/2}, \quad (4)$$

其中  $R = 1.2A^{1/3}$ 。

分析表明, 仅考虑非弹性激发道的耦合不足以解释实验测量的截面加强, 需要考虑转移道的耦合。入射道与不同转移道耦合对熔合截面加强程度由有效  $Q_{\text{eff}}$  值决定, 转移道的有效  $Q_{\text{eff}}$  值越大, 转移截面也大, 对熔合截面加强的贡献也大。有效  $Q_{\text{eff}}$  值定义为

$$Q_{\text{eff}} = Q_{gk} + E_c, \quad (5)$$

其中  $Q_{gk}$  为基态  $Q$  值,  $E_c$  为入射道和作为熔合门庭态的转移反应出射道的库仑位垒差。

对于<sup>12</sup>C + <sup>93</sup>Nb 系统的所有可能的转移道, 有效  $Q_{\text{eff}}$  值最大的是  $\alpha$  转移道,  $Q_{\text{eff}}$  为 5.14 MeV。其次是单质子转移道  $Q_{\text{eff}}$  为 -2.382 MeV。在计算中仅考虑这两个转移道的耦合。考虑转移道后, 主要不确定性是转移道的形成因子(form factor), 由于目前没有垒下转移反应的实验数据, 形成因子暂时作为可调参数取 1.8 MeV。

图 3 和图 4 分别示出从蒸发剩余核截面中提取的<sup>12</sup>C + <sup>93</sup>Nb 复合核平均角动量和熔合截面与模型计算的比较。图中的复合核平均角动量, 在考虑 CASCADE 输入参数变化等误差的影响后, 最大不确定性估计在  $1.3\hbar$  之内。实线和虚线分别是耦合道模型与一维势垒穿透模型计算曲线, 在一维势垒穿透模型计算中使用的参数为位垒高度 34.65 MeV, 位垒半径 9.39 fm, 位垒曲率  $\hbar\omega$  为 3.87 MeV<sup>[14]</sup>。从图可见, 耦合道模型与一维势垒穿透模型相比, 使熔合截面有很大的加强, 同时复合核角动量分布也有很大的展宽。耦合道模型能同时很好地拟合实验测量得到的复合核平均角动量和熔合截面, 表明在熔合过程中熔合截面和入射道角动量有直接的对应关系。<sup>12</sup>C + <sup>93</sup>Nb 系统近垒及垒下熔合机制可用耦合道模型很好地解

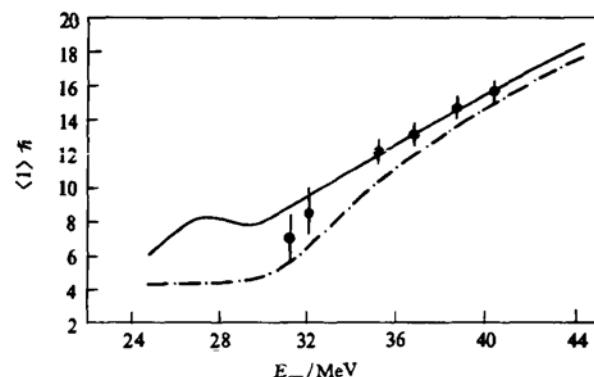


图 3 <sup>12</sup>C + <sup>93</sup>Nb 复合核平均角动量与模型计算的比较。●为实验值; 实线和虚线分别为耦合道模型与一维势垒穿透模型计算曲线

释, 没有发现角动量分布展宽的异常<sup>[15]</sup>.

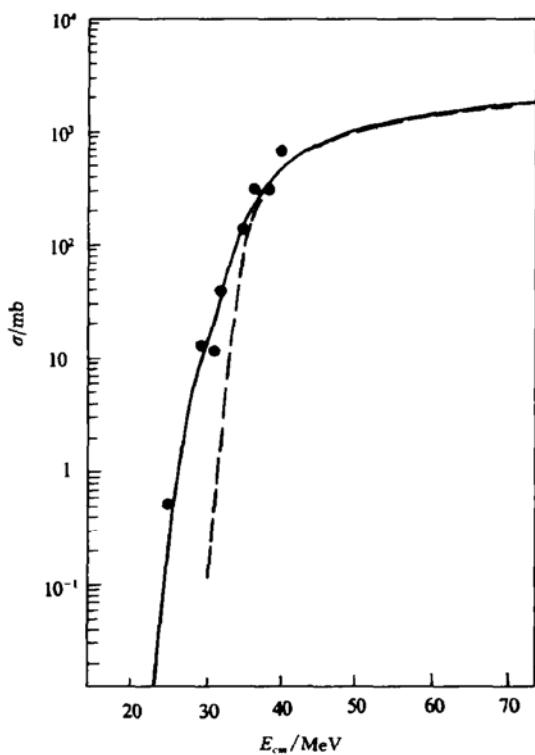


图 4  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  激发函数与模型计算的比较. ●为实验值; 实线和虚线分别为耦合道模型与一维势垒穿透模型计算曲线

#### 4 结 论

使用叠靶和离线  $\gamma$  测量技术在近垒及垒下能区测量了  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  熔合反应产生的二中子和三中子蒸发道的激发函数. 应用统计蒸发程序, 从二中子和三中子蒸发剩余核截面中提取了不同能量下的复合核平均角动量和熔合截面. 熔合截面能用包括非弹性激发和  $\alpha$  转移道的简单耦合道模型很好地拟合. 从耦合道模型计算中提取了复合核平均角动量. 两种方法得到的复合核平均角动量与入射能量的变化相自洽, 表明耦合道模型能同时合理地解释近垒及垒下  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  系统的熔合截面加强和复合核角动量分布展宽的实验结果.

用  $\gamma$  测量技术直接测量蒸发剩余核, 从剩余核相对截面比中提取复合核平均角动量的信息是研究重离子近垒及垒下反应机制的重要方法. 需要指出的是由于测量的是相对截面比, 因此测量时的许多实验误差可以消除, 测量结果是相当精确的. 但其方法的缺点是平均角动量值要受统计模型参数的影响. 为了正确选取参数和验证统计模型分析, 事先最好使用轻离子熔合反应作为刻度反应进行预实验.

感谢中国原子能研究院 HI-13 串列加速器国家实验室提供品质良好的束流。感谢张焕乔、刘祖华研究员在多方面给予的帮助。

- [1] E. Browne *et al.*, Table of Radioactive Isotopes (1986).
- [2] P. Misaelides *et al.*, *Radiochim. Acta*, **28**(1981), 1.
- [3] F. Pühlhofer *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A280**(1977), 267.
- [4] F.G. Perey., *Phys. Rev.*, **131**(1963), 745.
- [5] D. Wilmore *et al.*, *Nucl. Phys.*, **55**(1964), 673.
- [6] J. R. Huizenga *et al.*, *Nucl. Phys.*, **29**(1961), 242.
- [7] P. M. Endt *et al.*, *At. Data Nucl. Data Tables*, **26**(1981), 47.
- [8] W. Reisdorf *et al.*, *Z. Phys.*, **A300**(1981), 227.
- [9] M. Dasgupta *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1414.
- [10] C. H. Dasso *et al.*, *Comp. Phys. Commun.*, **46**(1987), 187.
- [11] P. R. Christensen *et al.*, *Phys. Lett.*, **65B**(1976), 19.
- [12] H. Sievers *et al.*, *Nucl. Data Sheets*, **54**(1988), 99.
- [13] S. Raman *et al.*, *At. Data Nucl. Data Tables*, **36**(1987), 1.
- [14] 钱兴等,高能物理与核物理, **19**(1995), 603.
- [15] R. Vandenbosch *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 1234.

## THE AVERAGE ANGULAR MOMENTUM IN HEAVY-ION INDUCED FUSION REACTION BY OFF-LINE $\gamma$ TECHNIQUE

QIAN XING JIANG DONG-XING LIN JUN-SONG

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

LIU DA-MING LI ZE

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

(Received 13 December 1994)

Partial cross sections of two-and three-neutrons evaporation channels following the fusion reaction  $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$  have been measured for center-of-mass energies from 25.0 to 40.5 MeV by off-line  $\gamma$  technique. The total fusion cross sections and average angular momenta as a function of energy have been deduced from these cross sections on the basis of statistical evaporation model calculation(CAS CADE). The fusion cross sections are well reproduced by the simplified coupled channel model (CC FUS). The average angular momenta deduced from the partial cross section ratios are consistent with that extracted from the CC FUS calculation.

PACC: 2586; 2475; 2570