

近垒及垒下 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 的蒸发剩余核截面*

钱兴 江林兴 林俊松

(北京大学技术物理系 北京 100871)

刘大鸣 李泽

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1994-05-17 收稿

摘 要

使用离线 γ 测量技术在实验室系 28.3MeV 至 45.7MeV 的能区首次测量了 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产生的 8 个核素及同质异能态的激发函数。使用包括非弹性激发和 α 转移道的简单耦合道模型,结合统计蒸发程序对实验结果进行拟合。计算结果能较好地重现强截面的中子蒸发道(xn)的激发函数。而对于弱的质子(xpyn)特别是 α 粒子(x α yn)蒸发道的截面,实验测量明显高于模型计算结果。 α 转移道与入射道耦合作为熔合反应的门庭态使垒下能区重离子熔合截面有很大的加强,实验测量与理论计算的比较表明对于 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应系统在垒下能区可能存在着很强的 α 转移截面。

关键词 近垒及垒下重离子熔合,蒸发剩余核截面,统计蒸发模型,耦合道模型。

1 引 言

近年来,人们对近垒及垒下重离子熔合作了广泛的研究。理论上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,引进了使熔合截面可能增加的各种自由度。建立了如表面零点振动、耦合道、中子流等模型^[1]。目前研究的主要内容是揭示各种自由度的相互作用机制。研究表明垒下熔合截面的加强直接受到其它反应道,如非弹性激发道,转移道等存在的影响。这种影响的机制并没有被很好地认识。

目前大多数研究的反应系统是较对称的中重系统或重系统,这些系统垒下熔合截面有很大的加强。为研究转移过程对中重核熔合的影响,实验选用 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 系统。 ^{12}C 是 α 集团核,从有效 Q 值来看,有较强的 α 转移截面。这个反应系统到目前为止只有两家进行过熔合截面的测量^[2,3],而且使用的弹核实验室系入射能量都在 50MeV 至 100MeV 之间。但这两家实验结果并不一致。在更低的近垒及垒下能区该体系的熔合截面及剩余核截面还未曾被测量过。

* 核工业总公司科学基金资助。

2 实验方法和结果

实验是在原子能院的 HI-13 串列静电加速器上进行的。靶片为自衬的铌薄片 ($2.7\text{mg}/\text{cm}^2$), 使用叠靶技术, 每次照射二片或四片靶。靶片之间使用铝片 ($0.443\text{mg}/\text{cm}^2$) 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 α 粒子透射法确定, 其测量误差在 5% 之内相一致。实验共分七次照射, 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, 主要是能损歧离及最初束流的能量离散。束流在靶片和收集片中的能量衰减使用 Northcliffe 等的阻止本领表^[4] 进行计算。表 1 是 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 蒸发剩余核的半衰期及相关的核谱学数据^[5]。为了避免可

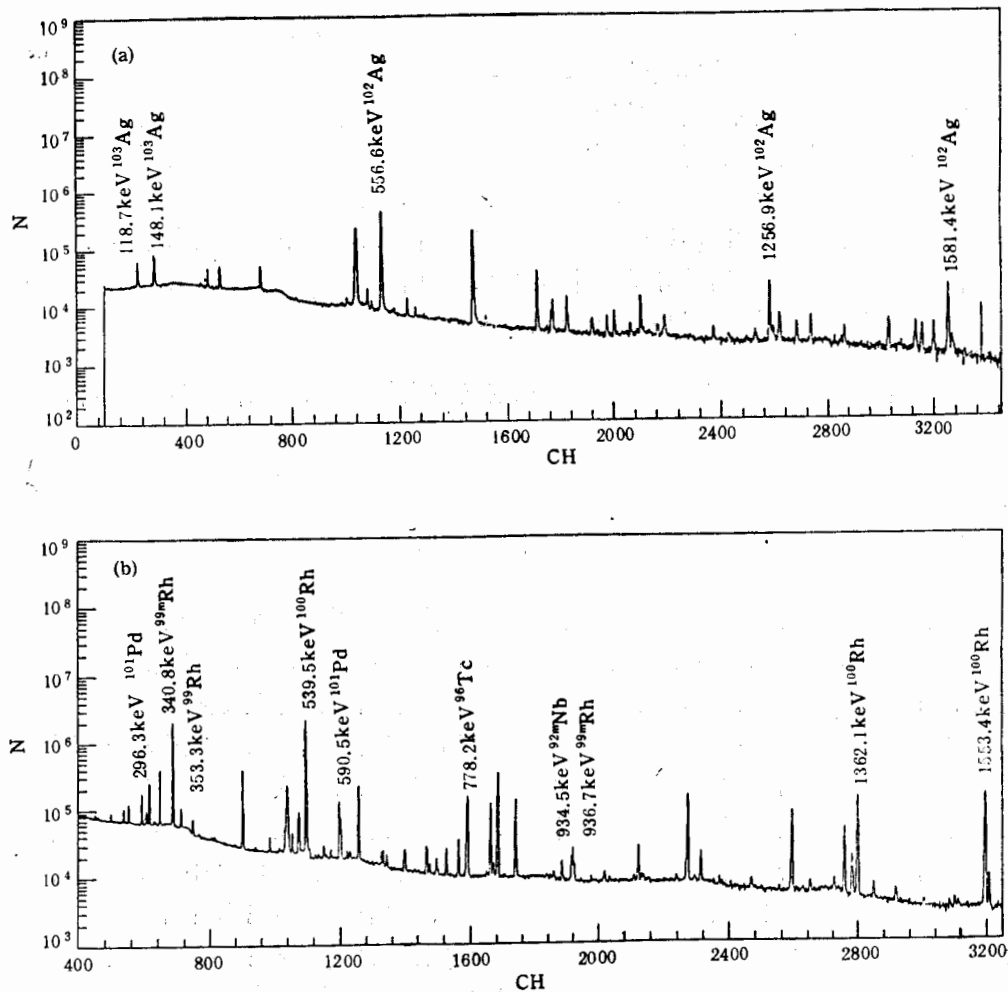


图 1 45.7 MeV 的 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产物的 γ 全谱

(a)、(b) 分别是测量短寿命和长寿命核素的 γ 谱。

能的 γ 堆积效应, 测量前做了预实验。在实验过程中, 测量较短寿命的核素时, 束流轰击选定 10min 而测量长寿命的核素束流轰击 2h, 这时堆积效应可以忽略。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 230nA 左右, 稳定度在 5% 之内。辐照后的靶片和收集片一起做离线测量。对长寿命核素连续跟踪测量两个月。使用高纯锗 (HPGe) 和锗锂 (Ge(Li)) 两个探测器测量蒸发剩余核的 γ 射线能谱, P 型同轴 HPGe 的体积为 110cm^3 (国产探测器, 探测效率约为 20%), 而 Ge(Li) 探测器是 ORTEC 产品, 探测效率为 35%。它们对 ^{60}Co 的 1332.5 keV 的 γ 射线能量分辨率 (FWHM) 为 1.8keV。被测量的样品放在有机玻璃的架上, 几何位置离探测器顶 5cm。在相同的几何位置用标准源进行探测器的效率和能量刻度。被测量的核素通过其 γ 射线的能量, 强度分支比以及半衰期和表 1 做比较而确认。用 S90 多道脉冲分析器与 AST-286 微机系统获取 γ 能谱及处理数据。使用 SPAN 程序分析 γ 能谱, SUN 和 HTANA3 程序分别被用来分类核素和拟合 γ 衰变曲线, 获取 γ 计数。图 1 是实验室能量 45.7MeV 的 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产物的 γ 全谱, 感兴趣的 γ 跃迁的能量范围在 100keV 到 1.5MeV 之间, 其中图(a)是冷却 27min 后测量较短寿命核素的 γ 全谱, (b)为冷却 1112min 后测量较长寿命核素的 γ 全谱。

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 γ 线的数目 Y 为:

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

其中 n 为单位面积的靶核数, σ 为活化产物产生截面, φ 为单位时间的人射粒子数, λ 为

表 1 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 的蒸发剩余核核谱学数据^[5]

剩余核	衰变道	自旋	半衰期	$E_{\gamma}(\text{keV})$	$I_{\gamma}(\%)$
^{103g}Ag	2n	7/2	65.7min	118.7	31.3
				148.1	28.4
^{102g}Ag	3n	5	12.9min	556.6	97.7
				1256.9	12.7
				1581.4	13.7
^{101}Pd	p3n	5/2	8.47h	296.3	19.2
				590.5	12.1
^{100g}Rh	$\alpha n/2p3n$	1	20.8h	539.5	78.4
				1362.1	15.1
				1553.4	21.4
^{99m}Rh	2p4n/ α 2n	9/2	4.7h	340.8	69.3
				936.7	2.2
^{99g}Rh	α 2n	1/2	16.1d	353.3	33.7
				528.6	40.0
^{96g}Tc	2 α n/4p5n	7	4.28d	778.2	100.0
^{92m}Nb	拾取一中子	2	10.15d	934.5	99.0

放射性反应产物核的衰变常数。 ϵ_r 和 I_r 分别是探测效率和 γ 射线强度分支比。对于有较长寿命母核的情况(即 ^{100}Rh)，母核和子核的截面利用衰变增长方程：

$$A_d(t) = A_p(T)\lambda_d[\exp(-\lambda_p t) - \exp(-\lambda_d t)]/(\lambda_d - \lambda_p) + A_d(T)\exp(-\lambda_d t), \quad (2)$$

通过最小二乘法拟合子核的放射性活度而得到。其中 $A_d(t)$ 是冷却 t 后的子核活度。 $A_p(T)$ 和 $A_d(T)$ 分别是束流照射 T 后停止时母核和子核的活度。 λ_p 和 λ_d 分别是母核和子核的衰变常数，图 2 是 ^{103}Ag 、 ^{102}Ag 放射性活度随时间的变化关系。图 3 中给出了反应产生的 8 个核素及同质异能态的截面和误差。考虑截面测量的误差主要有：1%—5% 的计数统计误差，5% 靶厚的系统误差， γ 绝对效率及强度分支比的误差和 4%—5% 的射性同位素半衰期误差，对于较强剩余核截面总误差在 8%—20% 之间。

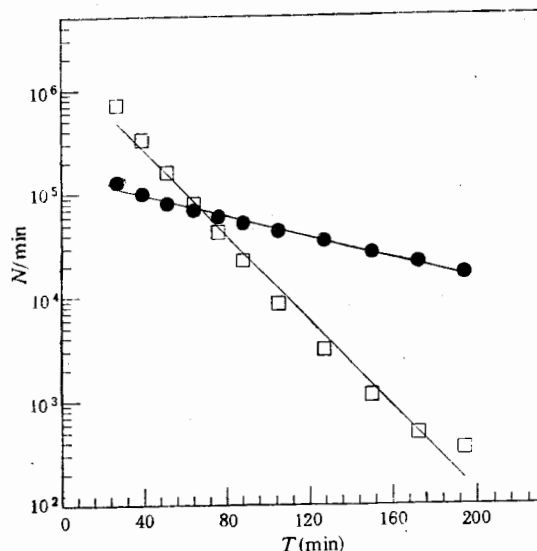


图 2 ^{103}Ag 、 ^{102}Ag 核放射性活度随时间的变化关系
●, □ 分别是 ^{103}Ag 、 ^{102}Ag 核。

3 计算结果及讨论

由于 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 系统在垒上较高能区目前没有融合截面的实验数据，因此无法直接由实验提取位垒参数，只能从计算中得到。对于这个系统的质量区域不同形式的核势如 Krappé-Nix-Sierk 势，Blocki 亲近势得到位垒参数相差不大，都和 Vaz 等的系统学相一致^[6]。用 Blocki^[7] 亲近势计算得到 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 的位垒高度是 34.65 MeV，位垒半径是 9.39 fm，位垒曲率 $\hbar\omega$ 使用 Reidorf 的经验关系^[8]： $\hbar\omega = (4.6V_B/\mu)^{1/2}$ 为 3.87 MeV，其中 V_B 是位垒高度， μ 是入射道折合质量。这样实验测量涉及到垒上 4 MeV 至垒下 10 MeV 的能量范围。在这能区重离子融合截面相对于一维势垒穿透模型有很大的加强。此外复合核的角动量分布也比一维势垒模型的预言有较大的展宽，即有更大角动量的弹核参与了融合过程。现已有很多模型进行解释，其中耦合道理论是目前处理垒下融合最为成功的理论。模型认为入射道和其它道如非弹性激发道、转移道耦合，改变融合位垒，

从而使熔合截面得到增强。它不仅能合理地给出熔合截面的加强, 而且还能较好地预言角动量分布的展览。在缺少复合核角动量分布真实信息的情况下, 使用简单的耦合道程序 (CCFUS)^[9] 预言的熔合截面和角动量分布作为随后进行统计蒸发计算的基础。

在 CCFUS 中, 核势使用 Christensen 和 Winther 势^[10], 弹靶核的基态分别与 ^{12}C 的第一激发态 $2^+(E^* = 4.434\text{MeV}, \beta_2 = 0.592)$ ^[11]; ^{93}Nb 的最低四个激发态: $7/2^+(E_1^* = 0.744\text{MeV}, \beta_2 = 0.046)$ 、 $11/2^+(E_2^* = 0.809\text{MeV}, \beta_2 = 0.043)$ 、 $3/2^+(E_3^* = 0.950\text{MeV}, \beta_2 = 0.053)$ 、及 $5/2^+(E_4^* = 0.979\text{MeV}, \beta_2 = 0.046)$ 耦合 (^{12}C 的基态 0^+ ,

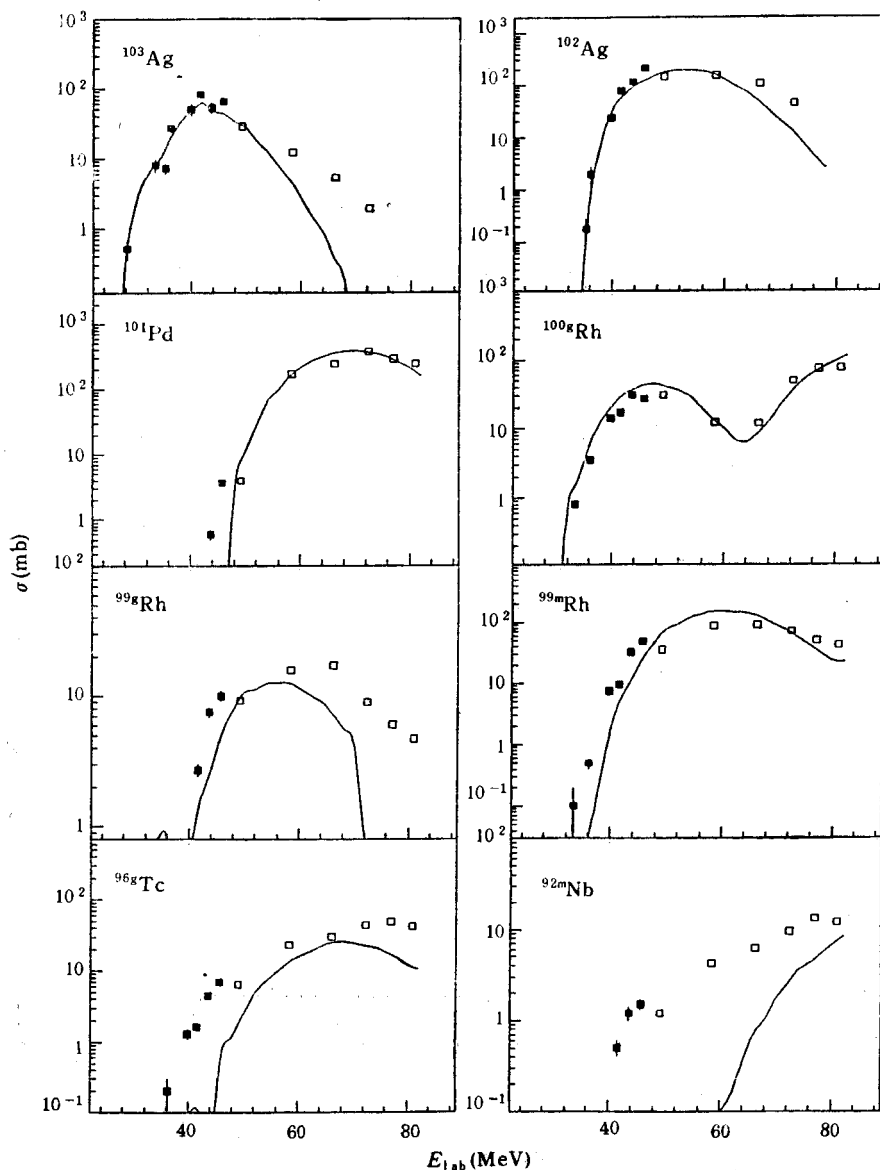


图 3 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产生的 8 个核素及同质异能态的激发函数与理论预言作的比较

■是我们的实验值, □是文献[3]的实验值, 实线是最后模型的拟合曲线。

^{93}Nb 的基态 $9/2^+$ ^[12]。非弹性激发道的耦合强度使用以下形式:

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

其中 λ 是跃迁的多极性, K 是指弹或靶核, R 是核半径, V_n 是核势。 β_k 是形变参数, 从电磁折合跃迁几率 $B_k(E_\lambda)$ 值计算得到:

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

这里 $R = 1.2A^{1/3}$ 。

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融合截面加强程度由有效 Q 值 Q_{eff} 决定, 转移道的 Q_{eff} 值越大, 转移截面和对融合截面加强的贡献也越大。 Q_{eff} 定义为:

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

其中 Q_{gg} 是基态 Q 值, E_c 是入射道和作为融合门庭态的转移反应出射道的库仑位垒差。

对于 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 系统的所有可能的转移道, Q_{eff} 值最大的是 α 转移道, Q_{eff} 是 5.14 MeV。其次是单个质子转移道 Q_{eff} 为 -2.38 MeV。在计算中仅考虑这两个转移道的耦合。在耦合道处理中考虑转移道后, 主要不确定性是转移道的形状因子 (form factor)。由于目前没有垒下转移反应的实验数据, 形状因子暂时作为可调参数。

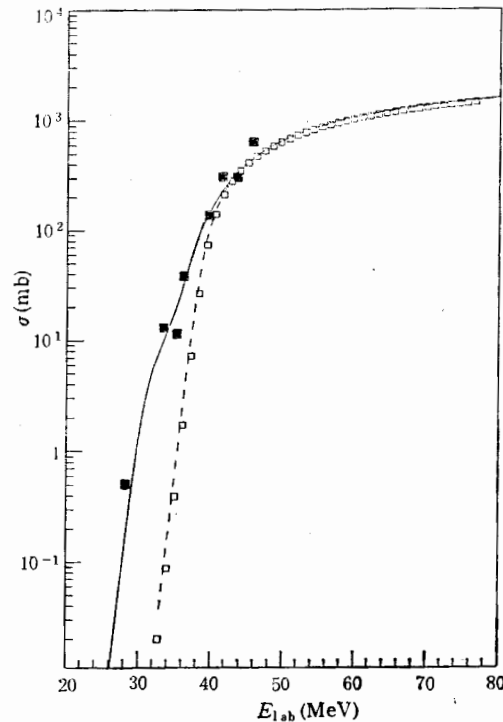


图4 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 激发函数与耦合道模型 CCFUS 计算的比较

■是实验值, □是一维势垒穿透模型预言值。虚线是不包括 α 等转移道的 CCFUS 计算结果, 实线是最后的理论拟合。

复合核蒸发过程使用 Hauser-Feshbach 统计理论描述。蒸发剩余核的截面可以使用 CASCADE 统计模型程序计算得到^[13]。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 α 粒子的蒸发。E1, M1 和 E2 型 γ 跃迁的约化跃迁率使用 Endt 的值^[4]。不同核在不同激发能和角动量区域的能级密度使用 Reisdorf^[15]的表达式计算, 能级密度参数取为 $A/9 \text{ MeV}^{-1}$ 。复合核的角动量分布从耦合道程序 (CCFUS) 计算中得到。

图 3 是 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产生的 8 个核素及同质异能态的激发函数与理论预言所作的比较。由图可见, 尽管在 CASCADE 程序的具体计算中大多数参数使用估计值, 但总体拟合还是比较好的。我们的实验数据与文献[3]的测量结果在高端能很好衔接。对于中子蒸发道, $^{103}\text{Ag}(2n)$, $^{102}\text{Ag}(3n)$ 模型预言与实验测量符合较好。而对于质子和中子的蒸发道 ($x\text{pyn}$), 特别是 α 蒸发道 ($x\alpha\text{yn}$), 如 $^{101}\text{Pd}(p3n)$, $^{99\text{m}}\text{Rh}(\alpha 2n/2p4n)$, $^{99\text{g}}\text{Rh}(\alpha 2n/2p4n)$, $^{96\text{g}}\text{Tc}(2\alpha n/4p5n)$ 实验测量都明显高于模型预言值, 这可能是由于破裂融合反应, 或直接转移反应的贡献所至。但 $^{100\text{g}}\text{Rh}(\alpha n/2p3n)$ 模型预言略高于实验测量值。 $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 实验测量远远高于模型预言, 这是由于拾取一中子的直接转移反应贡献的结果。

从 CASCADE 模型计算可知, 二中子加三中子蒸发道截面占总融合截面的 50% 至 60%。图 4 是从二中子和三中子蒸发道截面推得的融合截面与简单耦合道模型 CCFUS 的计算比较。虚线是不包括 α 等转移道的 CCFUS 计算结果, 实线是最后的理论拟合(转移道的耦合强度 F 取 1.5)。从图可见, α 转移道作为融合的门庭态使融合截面有很大的加强, 考虑 α 等的转移道后模型计算能很好地拟合实验值。

4 结 论

使用叠靶和离线 γ 技术在垒下 10MeV 至垒上 5MeV 的能区首次测量了 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产生的 8 个核素及同质异能态的激发函数。实验结果使用包括非弹性激发和 α 转移道的简单耦合道模型, 结合统计蒸发程序进行拟合。计算结果能较好地拟合强截面的中子蒸发道的激发函数。而对于弱的质子特别是 α 粒子蒸发道的截面, 实验测量明显高于模型计算结果。 α 转移道与入射道耦合作为融合反应的门庭态使垒下能区重离子融合截面有很大的加强, 实验测量与理论计算的比较表明, 对于 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应系统在垒下能区可能存在着很强的破裂融合和 α 等的转移反应截面。

感谢中国原子能院 HI-13 串列加速器国家实验室提供品质良好的束流, 感谢核工业总公司科学基金为开展本研究提供的资助。感谢中国原子能院的张焕乔, 刘祖华研究员在多方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] M. Beckerman, *Rep. Prog. Phys.*, **51**(1988)1047.
- [2] B. S. Tomar et al., *Z. Phys.*, **A343**(1992)223.
- [3] P. Misaelides et al., *Radiochim. Acta.*, **28**(1981)1.
- [4] L. C. Northcliffe et al., *At. Data Nucl. Data Tables*, **A7**(1970)233.
- [5] E. Browne et al., *Table of Radioactive Isotopes*, (1986).
- [6] P. R. S. Gomes et al., *Nucl. Phys.*, **A534**(1991)429.
- [7] J. Blocki et al., *Ann. of Phys.*, **105**(1977)427.
- [8] W. Reisdorf et al., *Nucl. Phys.*, **A444**(1985)154.
- [9] C. H. Dasso et al., *Comp. Phys. Comm.*, **46**(1987)187.
- [10] P. R. Christensen et al., *Phys. Lett.*, **65B**(1976)19.
- [11] S. Raman et al., *At. Data Nucl. Data Tables*, **36**(1987)1.
- [12] H. Sievers et al., *Nucl. Data Sheets*, **54**(1988)99.
- [13] F. Puhlhofer et al., *Nucl. Phys.*, **A280**(1977)267.
- [14] P. M. Endt et al., *At. Data Nucl. Data Tables*, **26**(1981)47.
- [15] W. Reisdorf et al., *Z. Phys.*, **A300**(1981)227.

Cross Sections of Evaporation Residues of $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ in the Vicinity of the Coulomb Barrier

Qian Xing Jiang Dongxing Lin Junsong

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

Liu Daming Li Ze

(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Received 17 May 1994

Abstract

Cross sections for 8 products from the fusion reaction $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ in the projectile energy range from 28.3 to 45.7 MeV have been obtained by off-line γ technique. The experimental results have been analysed in terms of the simplified coupled-channel model, including the coupling of the inelastic excitation and transfer channels, and statistical model for the compound nuclei. As a result, the excitation functions for the neutron emission channels are well reproduced by the CASCADE code. In the case of proton, alpha emission channels show higher cross sections than the CASCADE predictions. The transfer of alpha particles as doorways to fusion seems to be the main process which is responsible for the fusion enhancement. The experiment shows that the reaction system has large transfer cross section at sub-barrier energy.

Key words heavy-ion fusion at near- and sub-barrier energies, cross sections of evaporation residues, statistical evaporation model, coupled-channel model.