

基于双核模型对准裂变产物质量分布的研究*

贾 飞^{1)†} 徐珊珊¹⁾ 黄天衡^{1)‡} 袁小华^{1)‡} 张宏斌¹⁾ 李君清¹⁾ W. Scheid³⁾

1) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) (Institute for Theoretical Physics of Justus-Liebig University, Giessen 35392 Germany)

(2006 年 3 月 21 日收到, 2006 年 6 月 22 日收到修改稿)

在双核模型基础上引入一维的 Kramers 公式, 计算了 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 这三个反应准裂变碎片的质量分布, 得到了与实验比较符合的结果. 同时提取出了碎片质量分布随时间的演化关系, 为理解熔合与准裂变竞争过程提供了非常有用的信息. 由于准裂变在重离子熔合反应中起着重要作用, 理论计算与实验结果的比较是对现有熔合模型的重要检验.

关键词: 超重元素, 熔合反应, 准裂变产物, 质量产额

PACC: 2570J

1. 引言

双核模型可以很好地计算通过熔合反应合成超重元素的蒸发剩余截面^[1-6]. 为了进一步探索熔合反应的机理, 对其他实验可观测量的计算也是非常重要的, 比如, 伴随熔合过程的准裂变产物的质量和电荷分布. 本文的主要内容就是在双核模型理论框架下描述准裂变碎片的质量分布, 并且分析了质量分布随时间的演化过程.

在重离子碰撞中, 弹核越过库仑位垒后与靶核形成双核系统, 相对运动能量很快耗散殆尽. 双核之间可能有大量的核子交换, 不断形成新的双核系统. 核子交换的结果, 有可能弹核不断地全部转移到靶核而形成复合核, 此即双核模型描述的熔合过程. 也有可能是在熔合过程中, 双核由于库仑排斥作用, 一个核越过库仑位垒而与另一个核分开, 这种没有达到复合核而分裂的现象就是准裂变. 准裂变与复合核裂变的显著不同特征就是质量分布宽度大. 由于准裂变产物被立即发射, 准裂变概率的大小则会大大影响熔合概率. 因此, 复合核的形成过程是熔合与裂变的竞争过程. 特别对超重核的熔合过程, 为了充分理解超重核形成的动力学过程和形成机理, 正确认

识准裂变过程是非常重要的. 能否同时描述实验上合成超重核所观察到的熔合与准裂变产物也是对理论模型的检验.

由于两核之间的核核相互作用和库仑相互作用, 作用势 $V(A_1, A_2, R)$ 沿双核中心距离 R 方向会有一个口袋. 处于口袋底部的两个核以一定的概率越过口袋的位垒而相互逃逸. 双核系统越过位垒而分开的概率可用 Kramers 公式描述, 它由相互作用势袋底的刚度、位垒的高度及刚度决定, 还与局域核温度有关. 此逃逸(衰变)速率与用微观方法计算的双核间核子跃迁概率一起决定系统质量分布概率随时间演化过程的主方程. 不同于文献[7, 8], 我们用数值法求解主方程, 而不必对驱动势做任何近似, 而且核子转移过程、双核的分裂过程是与相对运动过程相耦合的. 因而和反应过程中能量、角动量耗散以及形变弛豫相耦合.

2. 理论模型

2.1. 主方程

Adamian 等^[2-4, 9]在双核模型基础上研究了超重元素合成时熔合与裂变的竞争, 得到了与实验比较

* 中国科学院“百人计划”, 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(批准号: KJCX2-SW-N02, KJCX2-SW-N07), 国家自然科学基金(批准号: 10505016, 10235020, 10235023)资助的课题.

† E-mail: jiafei@impcas.ac.cn

符合的结果.其蒸发剩余截面可以写为

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{CM}}) = \sum_{J=0}^{J_f} \sigma_c(E_{\text{CM}}, J) P_{\text{CN}} \times (E_{\text{CM}}, J) W_{\text{sur}}(E_{\text{CM}}, J), \quad (1)$$

其中 σ_c 是在碰撞过程中弹核克服库仑位垒与靶核接触形成双核系统的截面, P_{CN} 是双核系统通过核子转移形成复合核的融合概率, W_{sur} 是复合核的存活概率. 双核系统两核间可进行核子、角动量、能量等的转移和交换. 如果反应中始终保持两体过程, 设在 t 时刻, 碎片 1 的质量数为 A_1 和激发能为 E_1 的分布概率为 $P(A_1, E_1, t)$, 且满足主方程^[10-14]

$$\begin{aligned} \frac{dP(A_1, E_1, t)}{dt} = & \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1} [d_{A_1} P(A'_1, E'_1, t) \\ & - d_{A'_1} P(A_1, E_1, t)] \\ & - \Lambda_{A_1, E_1, t}^{\text{qf}}(\Theta) P(A_1, E_1, t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $W_{A_1 A'_1}$ 表示碎片 1 的质量数为 A_1 、内部激发能为 E_1 时 (A_1, E_1) 态向 (A'_1, E'_1) 态跃迁的概率. d_{A_1} 表示碎片在 (A_1, E_1) 宏观状态时包含的微观状态的维度, 求和对碎片 1 所能取的所有状态进行. 这里内部激发能 E_1 作为参数, 由入射道相对运动提供.

在相互作用核中核子的运动由下面的单粒子哈密顿量描述:

$$H(t) = H_0(t) + V(t), \quad (3)$$

$$H_0(t) = \sum_K \sum_V \varepsilon_{vK}(t) a_{vK}^+(t) a_{vK}(t), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V(t) = & \sum_{K, K'} \sum_{\alpha_K \beta_{K'}} u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) a_{\alpha_K}^+(t) a_{\beta_{K'}}(t) \\ = & \sum_{K, K'} V_{K, K'}(T), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) = & U_{KK'} \left\{ \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{\alpha_K}(t) - \varepsilon_{\beta_{K'}}(t)}{\Delta_{KK'}} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. - \delta_{\alpha_K \beta_{K'}} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$\varepsilon_{vK}(t)$ ($K=1, 2$) 表示碎片 K 的单粒子能级.

2.2. 反应系统驱动力

双核系统的总能量随着双核系统质量不对称度 $\eta = (A_1 - A_2) / (A_1 + A_2)$ 的变化而改变. 设 $U(A_1, A_2, R, J)$ 是双核系统中碎片 1 的核子数为 A_1 时双核系统的总能量, 则 $U(A_1, A_2, R, J)$ 随着 A_1 的变化曲线给出了核子转移驱动力, 即

$$U(A_1, A_2, R, J) = U_{\text{LD}}(A_1) + U_{\text{LD}}(A_2)$$

$$+ V(R, J) - [U_{\text{LD}}(A_{\text{tot}}) - V'_{\text{rot}}(J)], \quad (7)$$

$$V(R, J) = U_{\text{C}}(R) + U_{\text{N}}(R) + V_{\text{rot}}(R, J). \quad (8)$$

这里 $A_{\text{tot}} = A_1 + A_2$, $U_{\text{LD}}(A_1)$, $U_{\text{LD}}(A_2)$, $U_{\text{LD}}(A_{\text{tot}})$ 分别为双核系统中原子核 1、原子核 2 和复合核的结合能, 取值来自文献^[13, 14], 因而包括了壳修正和奇偶效应. U_{C} 和 U_{N} 分别为两核的库仑相互作用能和核相互作用能, V'_{rot} 为复合系统转动能. 库仑相互作用由下式给出:

$$\begin{aligned} U_{\text{C}}(R, \theta) = & \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} + \left(\frac{9}{20\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{R^3} \right) \\ & \times \sum_{i=1}^2 \mathcal{R}_i^2 \beta_2^{(i)} P_2(\cos \theta_i) \\ & + \left(\frac{3}{7\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{R^3} \right) \sum_{i=1}^2 \mathcal{R}_i^4 \beta_2^{(i)} P_2(\cos \theta_i)^2, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 θ_i 是第 i 个核的径向矢量和对称轴之间的夹角, 在两核相对取向为极对极时, $\theta_i = 0$. \mathcal{R}_i 为第 i 个变形核半径的径向分量. Z_1, Z_2 为弹靶的电荷数, R 为两核质心间的距离, $\beta_2^{(i)}$ 为第 i 个核的四极形变参数. 核相互作用势 U_{N} 则采用与动量和自旋无关的 Skyrme 类型的核子-核子相互作用双折叠势

$$\begin{aligned} U_{\text{N}}(R) = & C_0 \left\{ \frac{F_{\text{in}} - F_{\text{ex}}}{\rho_{00}} \left[\int \rho_1^2(r) \rho_2(r-R) dr \right. \right. \\ & \left. \left. + \int \rho_1(r) \rho_2^2(r-R) dr \right] \right. \\ & \left. + \int \rho_1(r) \rho_2(r-R) dr \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中采用零程 $\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ 有效相互作用. $F_{\text{in, ex}} = f_{\text{in, ex}} + f'_{\text{in, ex}} \frac{N_1 - Z_1}{A_1} \frac{N_2 - Z_2}{A_2}$, $N_{1,2}$ 和 $Z_{1,2}$ 分别是两核的中子数与质子数. 本文中参量的取值为 $C_0 = 300 \text{ MeV} \times \text{fm}^3$, $\rho_{00} = 0.17 \text{ fm}^{-3}$, $f_{\text{in}} = 0.09$, $f_{\text{ex}} = -2.59$, $f'_{\text{in}} = 0.42$, $f'_{\text{ex}} = 0.54$. ρ_1, ρ_2 采用 Woods-Saxon 密度分布函数, 表面弥散度的取值范围为 0.54—0.58 fm.

2.3. 准裂变产物的质量产额

双核系统准裂变碎片的发射速率可以由一维的 Kramers 公式^[15, 16]给出:

$$\begin{aligned} \Lambda_{(A_1, E_1, t)}^{\text{qf}}(\Theta) = & \frac{\omega}{2\pi \omega_{\text{Bqf}}} \left(\sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2\hbar} \right)^2 + (\omega_{\text{Bqf}})^2} - \frac{\Gamma}{2\hbar} \right) \\ & \times \exp \left(- \frac{B_{\text{qf}}(A_1)}{\Theta(A_1, E_1, t)} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 B_{qf} 为确定的双核组态的准裂变位垒高度, 则发射速率与此裂变位垒高度指数相关. $\Theta(A_1, E_1, t) = \sqrt{E^*/a}$ 为核温度, E^* 为系统局部激发能, 单粒子能级密度参数 $a = A/12 \text{ MeV}^{-1}$. ω_{qf}^B 和 ω 分别为在准裂变位垒顶部和底部的曲率刚度^[17], 我们对每个双核组态的曲率刚度都进行了谐振子形式的拟合, 则 ω_{qf}^B 和 ω 分别为相对应的谐振子频率. 宽度 $\Gamma = 2 \text{ MeV}$, 它相对应于 R 方向的摩擦系数.

那么, 准裂变产物的质量产额可由以下公式描述:

$$Y_A(t_0) = \Lambda_A^{\text{qf}} \int_0^{t_0} P_A(t) dt, \quad (12)$$

其中 t_0 为反应时间.

3. 结果与讨论

图 1 给出了碰撞系统 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 描述核子扩散的驱动势 U . 横坐标是类弹碎片质量数 A . 驱动势中考虑了双核的基态形变, 形变参数采用了实验值^[18], 原子核结合能取值来自文献 [19, 20], 则包含了结构效应、形变等. 图中实线和虚线分别为角动量等于 $0 \hbar$ 和 $70 \hbar$ 的情况. 箭头所指处是入射道. 可见要形成全融合核, 反应体系的激发能必须能够克服内部融合位垒. 而内部融合位垒由入射道驱动势值与驱动势最高点值之差确定. 从图中可以看出驱动势势能面的形状是比较复杂的, 壳效应、奇偶差、核形变使势能面有很大的起伏.

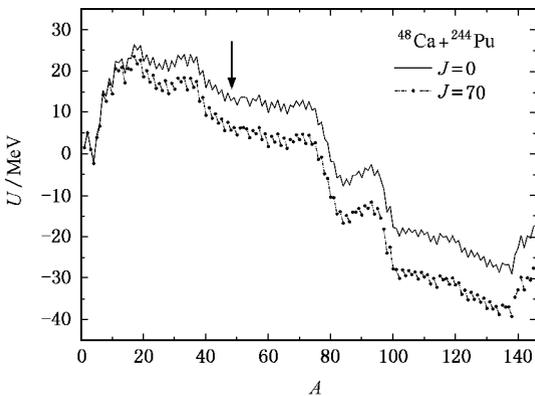


图 1 碰撞系统 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 的驱动势 U 与质量数 A 的关系

由 (11) 式可见, 双核系统的准裂变衰变速率指数依赖于准裂变位垒高度 B_{qf} . 反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 准裂变位垒 B_{qf} 随类弹碎片电荷数 Z

的变化关系由图 2 所示, 其中箭头所示为入射点, 实心点线和空心点线分别表示角动量为 $0 \hbar$ 和 $70 \hbar$ 的情况. 从图中可以看到随 Z 的增加, 双核的质量更趋于对称, 库仑相互作用增加, 准裂变位垒高度逐渐降低. 而且对于相同的 Z , 角动量大时由于离心作用准裂变位垒相对较低. 我们在主方程中引入 Kramers 公式来考虑融合与准裂变的竞争, 然而公式是在对 Fokker-Planck 方程做准稳态近似下推导出来的, 公式适用的条件是裂变位垒远高于核温度. 从图 2 可以看到, 当双核系统趋于质量对称方向时, 准裂变位垒会很低. 这时, 在应用 Kramers 公式计算准裂变速率时会有一个较大的近似, 其有效性可参考文献 [21].

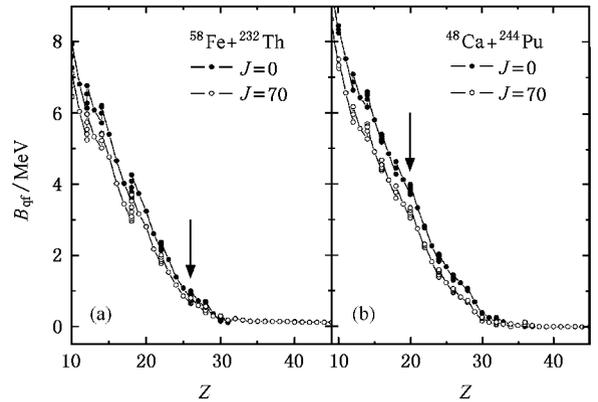


图 2 准裂变位垒 B_{qf} 随电荷数 Z 的变化关系 (a) 反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ (b) $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ (箭头所示为入射点)

由 (12) 式可见, 准裂变碎片质量产额不仅与准裂变衰变速率 Λ_A^{qf} 有关, 还与对应双核系统所占分布概率大小有关. 图 3 给出了 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个反应准裂变产物的质量分布情况, 入射能量(质心系)分别为 196 MeV 和 206 MeV . 实心方块为实验值^[22], 此实验值没有归一. 实心圆点线和空心圆点线分别是入射分波为 $0 \hbar$ 和 $70 \hbar$ 的结果, 箭头所指处为入射道. 图中仅给出了类弹碎片的质量产额. 可以看到在质量数 A 较小的区域准裂变产物产额基本为零, 因为在小质量区, 驱动势比较高, 小质量核的分布概率比较小, 准裂变位垒又相对较高. 在入射道附近没有实验值. 在大质量区 ($A > 70$) 我们计算的产额峰值与实验值是相符的. 但是, 理论计算的结果比实验分布窄很多, 这是因为我们计算得到的是原始准裂变产物的质量分布(没有考虑二次衰变), 而实验上探测到的是末态产物. 由于双核系统的转动惯量大, 所以角动量等于 $0 \hbar$ 和 70

h 的产额非常接近. $J = 70 h$ 时, 在质量较轻的区域, 由于角动量降低了准裂变位垒, 产额稍大一些, 并从系统中发射出去. A 较大时, 所剩产额则比 $J = 0 h$ 低. 因此, 这与不同角动量相对应的驱动势与准裂变位垒是相关的, 但角动量对质量分布的影响很小.

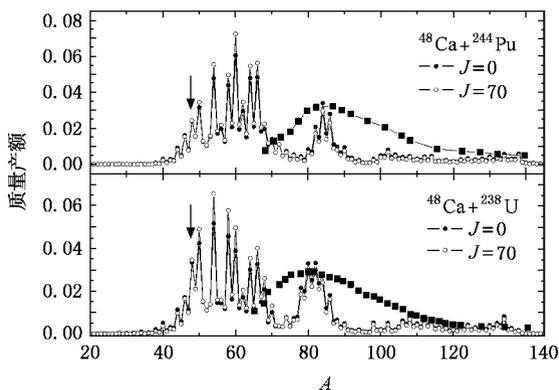


图3 准裂变产物的质量产额随质量数 A 的变化关系, 实心方块为实验值^[22], $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}112$ 相应复合核的激发能为 33.4 MeV, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{292}114$ 相应复合核的激发能为 42 MeV

碰撞系统 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 的质量分布由图 4 给出, 反应入射能(质心系)为 263 MeV. 图 4 与图 3 的主要特征基本相同. 在有实验值的区域, 准裂变碎片质量分布的峰尖对应于双核系统的类靶核在 ^{208}Pb 周围, 或双核中至少一个碎片为满壳或亚满壳的核: $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个系统产额的峰尖分别对应于 $^{82}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$ 和 $^{84}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$; 而 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 反应的峰尖则在 $^{78}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$, $^{80}\text{Ge} + ^{206}\text{Hg}$, $^{82}\text{Ge} + ^{204}\text{Hg}$, $^{84}\text{Se} + ^{202}\text{Pt}$ 这些组合附近. 从准裂变产物质量分布图上可以看出产额的峰值对应于驱动势的极小值(见图 1), 反映了核子转移过程壳结构的影响和奇偶效应. 另外, 图 4 与图 3 的一个区别是 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 这个碰撞系统类弹碎片质量分布的峰尖就在入射道附近, 而 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个系统类弹碎片质量分布的峰向大质量方向有一定移动, 这是由入射道准裂变位垒的不同造成的. $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 反应是弹靶质量不对称度较小的系统, 入射道的准裂变位垒较低仅有 $B_{\text{qf}} = 0.8$ MeV, 而 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个系统质量不对称度高, 入射道的准裂变位垒也比较高, 分别为 $B_{\text{qf}} = 3.7$ MeV 和 $B_{\text{qf}} = 3.8$ MeV. 因此, 入射道的准裂变位垒越高, 发射速率就越小, 双核系统就越不容易衰变, 那么在入射道附近的峰会很不明显, 甚至可能消失. 所以, 在通过熔合反应

合成超重元素时, 选择准裂变位垒较高的弹靶组合可能会更有利于超重元素的合成.

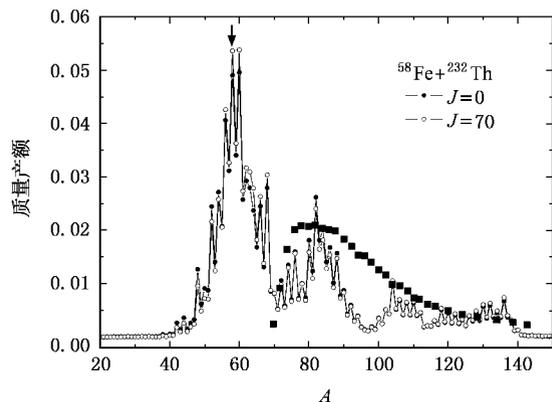


图4 反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 的质量产额, 相应复合核的激发能为 53 MeV, 实心方块为实验值^[22]

在实验上有很多关于准裂变、熔合裂变碎片的探测及反应时间的测量^[23-25], 但是, 对于反应的动力学过程, 人们仍然不是非常清楚. 图 5 给出了 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 这个反应准裂变产物质量分布随时间的演化关系, 所示反应时间以 10^{-22} s 为单位, 图中只显示了角动量等于 $0 h$ 的情况. 可以看到随着反应的进行, 碎片质量分布由入射道逐渐向两边展开, 而且时间越长, 质量对称方向的产额增加越明显. 经过长时间的能量、质量耗散后, 远离入射道的一些大质量的产物也会生成. 这说明质量对称度较大的裂变碎片不仅仅来自激发的复合核的裂变, 而且也会来自准裂变反应. 在反应时间达到 100×10^{-22} s 时, 准裂变产物质量分布已经基本达到平衡, 这与实验上提取出来的准裂变反应时间^[23-25]是一致的, 其比深度非弹性散射的反应时间要大一个数量级.

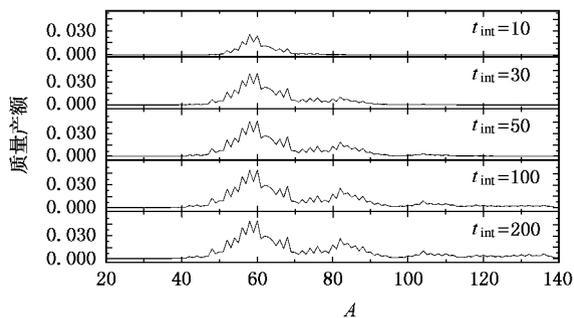


图5 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 该碰撞系统准裂变产物质量分布随时间的演化关系

$^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 反应系统中不同质量的类弹碎片的

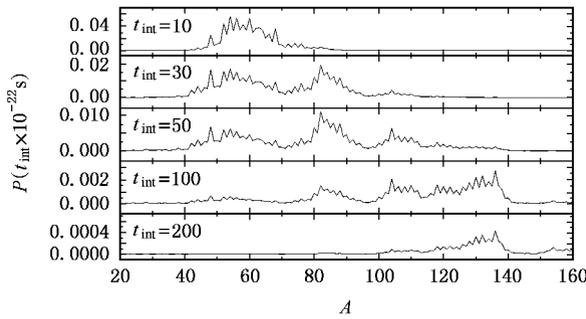


图 6 $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ 反应系统中不同质量核的分布概率及其随时间的演化

生成概率随时间的演化情况由图 6 给出. 在入射道, $t_{\text{int}} = 0$ s 时, $P(A_p) = 1$; 而在相互作用时间为 10×10^{-22} s 时, 在入射道保留下来的概率大约仅有 5%, 但是核子的转移和质量扩散并不非常明显, A 大于 80 的核生成概率仍几乎为零. 随着反应的进行, 当反应时间达到 30×10^{-22} s 和 50×10^{-22} s 时, 在 $A = 82$ 附近产生了一个较大的峰, 相对应于驱动势的一个极小值(见图 1). 随着时间的推移, $t_{\text{int}} = 100 \times 10^{-22}$ s 时, 双核系统已经很大程度地向质量对称方向演化, 概率最大的核的质量略小于 $A_{\text{tot}}/2$. 由于双

核系统的衰变, 在反应时间达到 200×10^{-22} s 时, 各核的分布概率最大也仅有 5×10^{-4} , 这说明所有的双核组态都已分裂并发射, 此时可以认为反应已经结束.

4. 结 论

在重离子熔合反应中, 根据双核模型观念, 弹核越过库仑位垒与靶核形成双核系统. 我们用数值法求解不对驱动势做任何近似的主方程, 并且将核子扩散过程与相对运动中能量、角动量、形变等弛豫过程相耦合. 用 Kramers 公式来描述双核系统中一个核越过位垒与另一个核分裂的衰变速率, 我们很好地描述了实验上测量到的准裂变碎片产额随类弹碎片质量的分布. 这个分布与驱动势的形状、准裂变位垒的大小密切相关. 准裂变发生时, 两核分裂, 核子交换停止. 准裂变肯定是影响重离子通过全熔合反应合成超重元素生成截面的一个重要因素. 准裂变事件并不是仅仅局限于双核系统在质量非常不对称时的衰变, 相对而言, 对称和近对称碎片主要来自准裂变过程, 熔合裂变事件要比准裂变产物少很多.

[1] Volkov V V 1987 in Proceedings of the International School Seminar on Heavy Ion Physics, D-787-68(JINR, Dubna, 1987) p 528
 [2] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 1997 *Nucl. Phys. A* **618** 176
 [3] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 1998 *Nucl. Phys. A* **633** 409
 [4] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W *et al* 2000 *Nucl. Phys. A* **678** 24
 [5] Jolos R V, Nasirov A K, Muminov A I 1999 *Eur. Phys. J. A* **4** 245
 [6] Cherepanov E A 1999 Report No.: JINR, E7-99-27
 [7] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 2003 *Phys. Rev. C* **68** 034601
 [8] Diaz-Torres A, Adamian G G, Antonenko N V *et al* 2001 *Phys. Rev. C* **64** 024604
 [9] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W *et al* 1997 *Nucl. Phys. A* **627** 361
 [10] Weidenmuller H A 1980 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **3** 49
 [11] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W 1976 *Z. Phys. A* **277** 299
 [12] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W 1976 *Z. Phys. A* **279** 145
 [13] Schuermann B, Noerenberg W, Simbel M 1978 *Z. Phys. A* **286**

263

[14] Li W F, Wang N, Li J F *et al* 2003 *Europhys Lett.* **64** 750
 [15] Strutinsky V M 1973 *Phys. Lett. B* **47** 121
 [16] Grange P, Li J Q, Weidenmuller H A 1983 *Phys. Rev. C* **27** 2063
 [17] Adamian G G, Antonenko N V, Jolos R V, 1995 *Nucl. Phys. A* **584** 205
 [18] Raman S, Nestor C W, Tikkanen P *et al* 2001 *At. Data Nucl. Data Tables* **78** 1
 [19] Audi G, Wapstra A H 1995 *Nucl. Phys. A* **595** 409
 [20] Moller P, Nix J R, Myers W D *et al* 1995 *At. Data Nucl. Data Tables* **59** 185
 [21] Gonchar I I, Kosenko G I 1991 *Sov. J. Nucl. Phys.* **53** 133
 [22] Itkis M G, Bogatchev A A, Itkis I M *et al* 2000 *7th International Conference on Clustering Aspect of Nuclear Structure and Dynamics* (World Scientific, Singapore, 2000) p386
 [23] Hinde D J, Hilscher K, Rossner H 1989 *Nucl. Phys. A* **502** 497c
 [24] Wu E J, Zheng J W, Xiao Z G *et al* 1999 *Chin. Phys. Lett.* **16** 499
 [25] Zheng J W, Wu E J, Zhang C *et al* 1999 *HEP & NP* **23** 946 (in Chinese)[郑纪文、邬恩九、张 纯等 1999 高能物理与核物理 **23** 946]

Study of mass distributions of quasifission products based on dinuclear system^{*}

Jia Fei^{1,2,†} Xu Hu-Shan¹⁾ Huang Tian-Heng^{1,2)} Yuan Xiao-Hua^{1,2)}
Zhang Hong-Bing¹⁾ Li Jun-Qing¹⁾ W. Scheid³⁾

1) *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

2) *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3) *Institute for Theoretical Physics of Justus – Liebig University, Giessen 35392, Germany*

(Received 21 March 2006 ; revised manuscript received 22 June 2006)

Abstract

In the concept of dinuclear system, the quasifission rate from Kramers formula has been incorporated in the master equation in order to study the competition between fusion and quasifission. Mass yields of quasifission products of the three reactions $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ and $^{58}\text{Fe} + ^{232}\text{Th}$ have been calculated, and the experimental data are reproduced very well, which is a critical test for the existing fusion model. Also we have shown the time evolution of the mass distributions of quasifission products, which provides valuable information of the process of competition between fusion and quasifission.

Keywords : superheavy nuclei, fusion reaction, quasifission products, mass yields

PACC : 2570J

^{*} Project supported by the “ Hundred Persons Project ” of Chinese Academy of Sciences, the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. KJCX2-SW-N02, KJCX2-SW-N07), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10505016, 10235020, 10235023).

[†] E-mail : jiafei@impcas.ac.cn