

文章编号: 1007-4627(2003)02-0111-05

## 重离子熔合反应形成超重核的截面研究\*

李文飞<sup>1,2</sup>, 李剑锋<sup>2</sup>, 徐珊珊<sup>2</sup>, 左 维<sup>1,2</sup>, 李君清<sup>1,2</sup>, 王 楠<sup>3</sup>, 赵恩广<sup>1,3</sup>

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000

2 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

3 中国科学院理论物理所, 北京 100080)

**摘 要:** 在双核系统框架下, 通过数值法解主方程计算了双核间的核子跃迁全熔合几率. 两碰撞核内部激发能由相对运动能损提供, 因此能够将核子转移过程与相对运动耦合起来. 对一些以 Pb 为靶的形成超重核的冷熔合反应, 计算了最佳激发能、形成双核系统的俘获截面、复合核形成几率及存活几率等, 所得到的形成超重核蒸发剩余截面与已知实验值符合较好.

**关键词:** 主方程; 超重核; 俘获截面; 全熔合几率; 存活几率

**中图分类号:** O571.6 **文献标识码:** A

### 1 引言

超重原子核的合成是当前国际上倍加注目的重离子物理前沿领域之一. 超重原子核的合成对探索原子核究竟能包含多少核子数和电荷数, 因而对进一步理解原子核内核子-核子相互作用及核结构的性质, 以及理解宇宙的组成都有重要的意义. 但超重核的合成是非常困难的, 因为合成截面非常小, 激发函数又非常窄, 因此在理论上理解超重核的性质及合成机制是非常重要的. 现今已发展了几种理论方法试图描述合成超重核的动力学机制<sup>[1-5]</sup>, 其中 Adamian 等人的双核模型得到的合成超重核的蒸发剩余截面与实验值符合得很好, 且是当前世界上唯一能给出与实验数据系统趋势相一致的模型. 双核模型假定在碰撞动能充分耗散后, 弹靶组成双核系统, 由轻核向重核转移核子而形成复合核. 处于激发态的复合核通过发射中子和裂变竞争退激, 形成稳定超重核. 其中核子转移是由以质量不对称坐标和两核中心之间的距离为集体变量的 Fokker-Planck(F-P)方程描述的. 但他们的 F-P 方程的解或是建立在对粒子转移驱动势做了抛物线近似上的解析解, 而驱动势实际形状一般距抛物线相差甚远; 或是采用 Kramers 类型的准稳态解, 这必须假

定 F-P 方程的解与时间无关, 其中对应集体变量的输运系数和质量确定存在很大的不确定性. 双核系统间的核子交换也并非在碰撞动能充分耗散后才进行, 弹核与靶核获得激发能后就会有核子转移, 相对运动与核子交换之间存在耦合, 但他们完全没有考虑碰撞系统的相对运动动力学过程. 为避免对粒子转移驱动势作任何近似, 我们用数值法解描述双核系统粒子转移的主方程. 弹核与靶核的内部激发能由相对运动动能损失提供, 相对运动动力学过程用偏转函数法处理, 考虑了双核的动力学形变, 在此基础上处理动能耗散与角动量的耗散, 并与核子交换相耦合.

### 2 双核模型

Adamian 等<sup>[6-9]</sup>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, 因此得到与实验比较符合的结果. 双核模型中定义蒸发剩余截面为

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{cm}}) = \sum_J \sigma_c(E_{\text{cm}}, J) P_{\text{CN}}(E_{\text{cm}}, J) \cdot W_{\text{sur}}(E_{\text{cm}}, J), \quad (1)$$

收稿日期: 2003-01-25; 修改日期: 2003-03-28

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175082, 10235020, 10047001); 国家重点研究规划资助项目(G2000077400); 中国科学院知识创新工程资助项目(KJXC2-SW-N02); 中国科学院百人计划资助项目; 科技部基础研究重大项目前期研究专项基金资助项目

作者简介: 李文飞(1976-), 男(汉族), 内蒙古四子王旗人, 博士研究生, 从事原子核实验和理论研究.

式中,  $\sigma_c$  为碰撞核以穿透几率  $T(E_{cm}, J)$  越过入射道位垒(库仑)形成双核系统的俘获截面:

$$\sigma_c(E_{cm}, J) = \pi\lambda^2(2J + 1)T(E_{cm}, J) \quad (2)$$

由于随角动量  $J$  的增加复合核的裂变位垒很快降为零, 角动量分波受存活几率  $W_{sur}$  的限制. 由存活几率所限制的能够完成重离子熔合反应的最大角动量一般为  $J_{max} \approx 10-20 \hbar$ , 并与质心系入射能  $E_{cm}$  有关. 在高于库仑位垒的重离子熔合反应中,  $J_{max}$  小于临界熔合角动量  $J_{crit}$ , 因为仅有极为有限的角动量分波对  $\sigma_{ER}(E_{cm})$  有贡献, 这使熔合截面受到进一步的限制. 对很小的角动量  $J$ ,  $P_{CN}(E_{cm}, J)$  和  $T(E_{cm}, J)$  的值与  $P_{CN}(E_{cm}, J=0) = P_{CN}(E_{cm})$  和  $T(E_{cm}, J=0) = T(E_{cm})$  的值没有多少区别. 对导致超重核的反应及靠近库仑位垒的  $E_{cm}$ , 取  $J_{max} \approx 10$ ,  $T(E_{cm}, J=0) = 0.5$ .

$$\sum_J \sigma_c(E_{cm}, J)W_{sur}(E_{cm}, J) \approx \sigma_c(E_{cm})W_{sur}(E_{cm}), \quad (3)$$

式中存活几率  $W_{sur}(E_{cm}) = W_{sur}(E_{cm}, J=0)$ , 而  $\sigma_c(E_{cm}) = \pi\lambda^2(J_{max} + 1)^2 T(E_{cm})$ , 则

$$\sigma_{ER}(E_{cm}) \approx \sigma_c(E_{cm})P_{CN}(E_{cm})W_{sur}(E_{cm}), \quad (4)$$

$P_{CN}$  为双核系统通过核子转移形成复合核的熔合几率. 入射核越过库仑位垒后与靶核形成双核组态, 相对运动动能转移到势能和激发能, 双核之间有能量、核子和角动量等的转移. 双核系统的演化主要表现为质量不对称自由度  $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2) = (A_1 - A_2)/A$  的扩散和相对运动坐标  $R$  (两核中心的距离) 的变化. 熔合几率  $P_{CN}$  给出双核系统越过对  $\eta$  的内部熔合位垒  $B_{\eta}^{int}$  并形成复合核的几率, 这部分我们拟用主方程描述.

(1) 式右端第 3 个因子是存活几率  $W_{sur}$ . 复合核形成后处于激发态, 主要通过裂变(熔合裂变)或发射 1 个中子退激发. 与  $P_{CN}$  相比,  $W_{sur}$  是个慢变化因子:

$$W_{sur}(1 \text{ 个中子发射}) \approx \frac{\Gamma_n}{\Gamma_n + \Gamma_l}, \quad (5)$$

式中  $\Gamma_n$  和  $\Gamma_l$  分别为发射中子和裂变的宽度.

### 3 描述双核系统质量转移的主方程

在碰撞过程中弹靶核相接触时, 有核子、角动

量和能量等在两核间进行转移、交换. 如果反应中始终保持两体过程, 碎片 1 和 2 的质量数分别是  $A_1$  和  $A_2$ , 总质量数  $A = A_1 + A_2$ . 设在  $t$  时刻碎片 1 的质量数为  $A_1$ , 激发能为  $E_1$  的分布几率为  $P(A_1, E_1, t)$ , 它满足主方程<sup>[10-14]</sup>

$$\frac{dP(A_1, E_1, t)}{dt} = \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1} [d_{A_1} P(A'_1, E'_1, t) - d_{A'_1} P(A_1, E_1, t)], \quad (6)$$

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  $E_1$  时向  $(A'_1, E'_1)$  态跃迁的几率;  $d_{A_1}$  表示碎片在  $(A_1, E_1)$  宏观状态时所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  $E_1$  取为参数, 由入射相对运动动力学提供. 跃迁几率  $W_{A_1 A'_1} = W_{A'_1 A_1}$ , 维度  $d_A$  由下面各式所描述的单粒子哈密顿量通过微观计算得到:

$$H(t) = H_0(t) + V(t), \quad (7)$$

$$H_0(t) = \sum_K \sum_{\nu} \epsilon_{\nu K}(t) a_{\nu K}^+(t) a_{\nu K}(t), \quad (8)$$

$$V(t) = \sum_{K, K'} \sum_{\alpha_K \beta_{K'}} u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) a_{\alpha_K}^+(t) a_{\beta_{K'}}(t) = \sum_{K, K'} V_{KK'}(t), \quad (9)$$

$$u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) = U_{KK'} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_{\alpha_K}(t) - \epsilon_{\beta_{K'}}(t)}{\Delta_{KK'}} \right)^2 \right] - \delta_{\alpha_K \beta_{K'}} \right\}, \quad (10)$$

相互作用时间  $t$  由反应系统碰撞核的相对运动确定,  $\epsilon_{\nu K}(t)$  ( $K=1, 2$ ) 表示碎块  $K$  在费米面两侧对称分布的价空间  $\Delta\epsilon_K$  中单粒子能级,

$$\Delta\epsilon_K = \sqrt{\frac{4\epsilon_K^*}{g_K}}, \quad \epsilon_K^* = \epsilon^* \frac{A_K}{A}, \quad g_K = \frac{A_K}{12}, \quad (11)$$

$\epsilon^*$  是系统局部激发能. 在价空间有价态  $N_K = \Delta\epsilon_K \cdot g_K$  个, 有价核子  $m_K = N_K/2$  个.  $g_K$  是费米面附近单粒子能级密度. 维度  $d(m_1, m_2) = \begin{pmatrix} N_1 \\ m_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_2 \\ m_2 \end{pmatrix}$ ,  $U_{KK'}$  为相互作用强度因子,  $\Delta_{KK'}$  为相互作用强度分布宽度. 当仅有能量跃迁和核子跃迁时, 跃迁几率可写成四项:

$$W(A_1, E_1, A'_1, E'_1) = \frac{\tau_{mem}(A_1, E_1, A'_1, E'_1; t)}{\hbar^2 d_{A_1} d_{A'_1}}.$$

$$\begin{aligned} & \{[\omega_{11}(A_1, E_1, E'_1) + \omega_{22}(A_1, E_1, E'_1)]\delta_{A'_1, A_1} + \\ & \omega_{12}(A_1, E_1, E'_1)\delta_{A'_1, A_1^{-1}} + \\ & \omega_{21}(A_1, E_1, E'_1)\delta_{A'_1, A_1+1}\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中

$$\tau_{\text{mem}}(A_K, E_K, t) = \hbar \left[ \sum_{KK'} \frac{2\pi}{\langle V_{KK'} V_{KK'}^* \rangle} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$\omega_{KK'}(A_1, E_1, E'_1) = d_{A_1} \langle V_{KK'} V_{KK'}^* \rangle, \quad (14)$$

$$\langle V_{KK'} V_{KK'}^* \rangle = \frac{1}{4} U_{KK'}^2 g_{KK'} \Delta_{KK'} \cdot \Delta \epsilon_K \cdot$$

$$\Delta \epsilon_{K'} \left[ \Delta_{KK'}^2 + \frac{1}{6} (\Delta \epsilon_K^2 + \Delta \epsilon_{K'}^2) \right]^{-1/2}. \quad (15)$$

#### 4 局域激发能及反应系统驱动势

(10)式中的局域激发能为

$$\epsilon^* = E^* - U(A_1) - \frac{(\ell - M)^2}{2J_{\text{rel}}} - \frac{M^2}{2J_{\text{in}}}, \quad (16)$$

式中  $\ell$  和  $J_{\text{rel}}$  分别为双核系统相对运动角动量和转动惯量,  $M$  和  $J_{\text{in}}$  分别为系统内禀角动量和内禀转动惯量,  $U(A_1)$  是当碎片 1 的核子数为  $A_1$  时双核系统的能量, 随着核子交换双核系统构成的改变而变化, 称为核子转移驱动势:

$$\begin{aligned} U(A_1) &= U_{\text{LD}}(A_1) + U_{\text{LD}}(A_2) - U_{\text{LD}}(A) + \\ & U_{\text{C}}(A_1) + U_{\text{N}}(A_1), \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $U_{\text{LD}}(A)$  为核子数为  $A$  的原子核的基态能, 并包括了壳修正和奇偶修正, 库仑能

$$U_{\text{C}}(A_1) = \frac{1.44 Z_1 Z_2}{R} \text{ (MeV)},$$

$$R = 0.5 + 1.36(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \text{ (fm)}, \quad (18)$$

$U_{\text{N}}$  为相接触的两碎片之间的核相互作用能, 取由 Morse 势参数化的双折叠势<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} U_{\text{N}}(Z_1, N_1) &= D \left\{ \exp \left[ -2\alpha \frac{R - R_0}{R_0} \right] - \right. \\ & \left. 2 \exp \left[ -\alpha \frac{R - R_0}{R_0} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

式中,  $D = 2\pi a_1 a_2 R_{12} (10.96 - 0.8 R_{12}) \text{ MeV}$  为势阱深度,  $R_{12} = R_1 R_2 / R_0$ ,  $R_0 = R_1 + R_2 = r_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$  为双核最接近距离,  $R_1$  和  $R_2$  分别为两碎片核半径,  $r_0 = 1.15$  为核半径参数;  $\alpha = 11.47 + 2.069 R_{12} - 17.32 a_1 a_2$  (无量纲), 为势阱宽度倒数, 而  $a_1$

和  $a_2$  为 0.54—0.59 fm, 为势弥散宽度系数. (16) 式中的  $E^*$  为相对运动能损所提供的双核系统内部激发能,  $M$  表示相对运动角动量耗散所提供的内禀自旋, 与相互作用时间一起, 都可以由经典的参数化的偏转函数方法得到<sup>[15]</sup>. 当碎片 1 (类弹核) 的质量全部转移到碎片 2 (类靶核) 时复合核形成, 如形成超重核, 形成几率为

$$P_{\text{CN}} = \sum_J \int_{A_{\text{BG}}}^0 P(A_1, E_1(J), t(J)) dA_1, \quad (20)$$

$A_{\text{BG}}$  为内部熔合位垒峰值处的碎片 1 的质量数, 一般只要过了驱动势  $U(A_1)$  的峰值, 就不可避免地形成复合核.

#### 5 数值法解主方程

假定在核子转移过程中, 只有单核子的跃迁是主要的, 双核子及多于双核子的一次性跃迁可忽略, 则(6)式中只有  $W_{A_1, (A_1-1)}$  和  $W_{A_1, (A_1+1)}$  两项, 即(6)式中对  $A'_1$  的求和只取  $A'_1 = A_1 \pm 1$ , 插分后变成只有三对角项的联立代数方程组.

该方程组的初始条件为

$$P(A_1 = A_p, E_1 = 0, t = 0) = 1$$

$$P(A_1 \neq A_p, E_1 = 0, t = 0) = 0$$

$$\text{边界条件: } P(A_1 < 0, E_1, t) = 0$$

$$P(A_1 > (A_p + A_1), E_1, t) = 0$$

则(6)式共有  $A = A_p + A_1$  维. 计算中时间步长取  $\Delta t = 0.05 \times 10^{-22} - 0.1 \times 10^{-22} \text{ s}$ . 一般在能损变化较慢的区域, 跃迁几率的变化也不太大, 时间步长可适当取得大一些.

#### 6 结果及分析

对一些以 Pb 为靶的 1 个中子发射冷熔合反应计算得到的超重核蒸发剩余截面(即超重核生成截面)在图 1 中给出. 由图可见, 我们的计算值在数量级上基本上与已知的实验值符合. 随着核电荷数的增加, 截面值指数下降. 各反应道所用的质心系轰击能  $E_{\text{cm}} = E_{\text{CN}}^* + Q$ ,  $E_{\text{CN}}^* = U(R_m, \eta) + B_{\text{in}}^*$  为复合核最佳激发能, 因而  $E_{\text{cm}}$  为最佳轰击能.  $U(R_m, \eta)$  是由(17)式确定的驱动势值,  $\eta$  为入射道不对称坐标,  $R_m$  是使  $U(R_m, \eta)$  取最小值时的双核质心距离.  $B_{\text{in}}^*$  为内部熔合位垒, 是双核系统通过核子跃迁

形成复合核所必须越过的位垒, 由入射点驱动势值与驱动势最高点值之差确定. 驱动势中考虑了双核的基态形变与结构效应<sup>[16, 17]</sup>, 驱动势的正确计算对确定内部熔合位垒, 并进一步确定最佳轰击能,

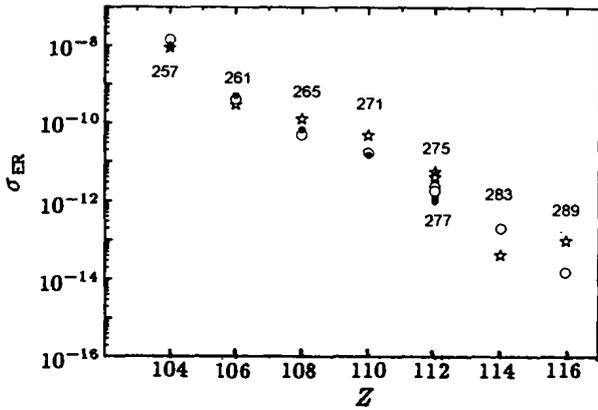


图 1 由冷熔合反应计算得到的产生电荷数为  $Z$  和质量数如图中所标的超重核的蒸发剩余截面  
☆为本工作的计算值, ○为文献[6]中的计算值, ●是文献[6]所引的实验值.

以及计算核子跃迁几率都是非常重要的. 计算中双核的基态形变取自文献[18].

所计算的复合核的最佳激发能  $E_{CN}^*$ 、熔合几率  $P_{CN}$ 、俘获截面  $\sigma_c$ 、存活几率  $W_{sur}$ 、蒸发剩余截面  $\sigma_{ER}^*$  及相应实验值在表 1 中给出. 这里计算得到的最佳激发能  $E_{CN}^*$  不同于李剑峰等<sup>[19]</sup> 的结果, 因为本文计算核-核相互作用时, 两核核中心间的距离  $R$  要求保证核-核相互作用能最低. 而文献[19]取  $R$  为两核半径之和加 0.3 fm.

对复合核存活几率的计算我们将另文发表, 其中中子分离能、裂变位垒高度及其随激发能的变化、在基态及鞍点态的能级密度参数选取以及能级密度公式的选取都对结果有明显的影响. 表中计算存活几率所用的中子分离能、裂变位垒高度取自文献[18], 对这些参数的选取还有待进一步推敲. 对更多的冷熔合反应道和以 Bi 为靶的反应道以及发射两个以上中子的热熔合反应正在计算中.

表 1 复合核的最佳激发能  $E_{CN}^*$ 、熔合几率  $P_{CN}$ 、俘获截面  $\sigma_c$ 、存活几率  $W_{sur}$ 、蒸发剩余截面  $\sigma_{ER}^*$  及相应实验值 (取自文献[6]中所引)

反应道	$E_{CN}^*/\text{MeV}$	$P_{CN}$	$\sigma_c/\text{mb}$	$W_{sur}$	$\sigma_{ER}^*$	实验值
$^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{257}104 + \text{ln}$	15.84	$6.0 \times 10^{-3}$	5.3	$5.3 \times 10^{-4}$	8.7 nb	10 nb $\pm 1.3$
$^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{261}106 + \text{ln}$	14.95	$3.8 \times 10^{-4}$	4.6	$2.9 \times 10^{-4}$	290 pb	0.5 nb $\pm 0.14$
$^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{265}108 + \text{ln}$	15.15	$6.6 \times 10^{-4}$	4.0	$8.1 \times 10^{-5}$	126 pb	65.8 pb $\pm 7.5$
$^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{271}110 + \text{ln}$	11.17	$3.4 \times 10^{-4}$	3.4	$6.7 \times 10^{-5}$	47.5 pb	15 pb $\pm 3$
$^{68}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{275}112 + \text{ln}$	11.16	$1.3 \times 10^{-4}$	3.0	$2.4 \times 10^{-5}$	5.5 pb	<1.2 pb
$^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{277}112 + \text{ln}$	10.82	$6.6 \times 10^{-4}$	3.0	$3.3 \times 10^{-5}$	4.0 pb	1.0 pb $\pm 0.3$
$^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{283}114 + \text{ln}$	12.55	$1.9 \times 10^{-4}$	2.5	$1.5 \times 10^{-5}$	42 fb	
$^{82}\text{Se} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{289}116 + \text{ln}$	14.51	$6.7 \times 10^{-4}$	1.9	$2.2 \times 10^{-5}$	97 fb	

参 考 文 献:

[1] Smolanczuk R. Production Mechanism of Superheavy Nuclei in Cold Fusion Reactions [J]. Phys Rev, 1999, C59: 2 634.  
 [2] Shen Caiwan, Kosenko Grigori, Abe Yasuhisa. Two-step Model of Fusion for the Synthesis of Superheavy Elements [J]. Phys Rev, 2002, 59: 061602(R).  
 [3] Fröbrich P. Fusion and Capture of Heavy Ions above the Barriers: Analysis of experimental data with the surface friction model [J]. Phys Rep, 1984, 116: 337.  
 [4] Maten J, Fröbrich P. Langevin Description of Heavy Ion Collisions with the Surface Friction Model [J]. Nucl Phys, 1992, A545: 854.  
 [5] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Model of Competition between Fusion and Quasi-fission in Reactions with Heavy Nuclei [J]. Nucl Phys, 1997, A618: 176.  
 [6] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Isotopic Dependence of Fusion Cross-sections in Reactions with Heavy Nuclei [J]. Nucl Phys, 2000, A678: 24.  
 [7] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, et al. Treatment

- of Competition between Complete Fusion and Quasifission in Collisions of Heavy Nuclei [J]. Nucl Phys, 1997, A627:361.
- [8] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, *et al.* Fusion Cross Sections for Superheavy Nuclei in the Dinuclear System Concept [J]. Nucl Phys, 1998, A633: 409.
- [9] Adamian G G, Antonenko N V, Cherepanov E A, *et al.* Dinuclear System Model for Dynamics and Structure [C]. A Talk Given at the Exon-conference at Baikal-lake, Siberia, in July 2001.
- [10] Weidenmuller H A. Transport Theories of Heavy-ion Reactions [J]. Prog Part Nucl Phys, 1980, 3, 49.
- [11] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W. Microscopic Transport Theory of Heavy-ion Collisions I. Basic Relations and Transport Coefficients for Symmetric Fragmentation [J]. Z Phys, 1976, A277, 299.
- [12] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W. Microscopic Transport Theory of Heavy-ion Collisions II. Transport Coefficients for Asymmetric Fragmentation and Generalized Einstein Relations [J]. Z Phys, 1976, A279, 145.
- [13] Schuermann B, Noerenberg W, Simbel M. Microscopic Transport Theory of Heavy-ion Collisions III. Effects of Fragment Shell Structure on Mass Transfer [J]. Z Phys, 1978, A286: 263.
- [14] Noerenberg W. Transport Phenomena in Multi-nucleon Transfer Reactions [J]. Phys Lett, 1974, B53: 289.
- [15] Smolanczuk R. Production Mechanism of Superheavy Nuclei in Cold Fusion Reactions [J]. Phys Rev, 1999, C59: 2 634.
- [16] Wang Nan, Zhao Enguang, Li Jianfeng, *et al.* Influence of Nuclear Deformation on the Potential Energy Surface in Dinuclear Model, Submitted to Chin Phys Lett, 2003.
- [17] Li Jianfeng, Xu Hushan, Li Wenfei, *et al.* Particle Exchange Potential Energy in Fusion Reactions [C]. CCAST-WL Workshop Series, 2002, 145, 45.
- [18] Möller P, Nix R. Nuclear Mass[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, 59: 2.
- [19] 李剑峰, 徐珊珊, 李文飞等. 双核系统核子转移驱动势与复合核的最佳激发能[J]. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 160.

## Formation Cross Sections of Super Heavy Nuclei by Heavy Ion Fusion Reactions \*

LI Wen-fei<sup>1,2</sup>, LI Jian-feng<sup>2</sup>, XU Hu-shan<sup>2</sup>, ZUO Wei<sup>1,2</sup>, LI Jun-qing<sup>1,2</sup>, WANG Nan<sup>3</sup>, ZHAO En-fuang<sup>1,3</sup>

(1 Center of Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou,  
Lanzhou 730000, China;

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

3 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In the concept of Dinuclear system (DNS) the complete fusion probability of two touch nuclei via nucleon transfer is described by numerically solving the Master-equation. The excitation energy of two colliding nuclei is supplied by the energy dissipation of their relative motion, thus the nucleon transfer process and the relative motion are coupled. For Pb-based cold fusion reactions to form super heavy nuclei, the optimal excitation energy, the capture cross-section to form a DNS, the compound nuclear formation probability, and the survival probability are calculated. The calculated super heavy nuclear evaporation residue cross-section are in agreement with known experimental data.

**Key words:** Master equation; super heavy nucleus; capture cross-section; complete fusion probability; survival probability

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10047001, 10175082, 102350220); Major Basic Research Development Program (G2000077400); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJJCX2-SW-N02); One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; Fund of Major Prophase Research Project of Fundamental Research of the Ministry of Science and Technology