

文章编号: 1007-4627(2008)04-0327-05

# 重离子反应中质子与中子转移对超重元素合成的影响<sup>\*</sup>

黄明辉<sup>1, 2</sup>, 甘再国<sup>1</sup>, 周小红<sup>1</sup>, 李君清<sup>1, #</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 研究了采用类弹碎片质量数为变量的一维(1D)主方程(ME)描述重离子熔合反应时的受限制条件, 建立了以类弹碎片中子和质子数为独立变量的二维(2D) ME, 并采用分步差分格式法数值解(2D) ME得到了熔合几率。新的方法适用于研究任何弹靶组合系统, 给出了与实验符合更好的结果, 为寻求合成超重核的反应道提供了更为宽阔的选择空间。同时也研究了弹靶的不同同位旋组合对复合核形成截面的影响。

**关键词:** 超重核; 熔合蒸发反应; 驱动势; 主方程

**中图分类号:** O571.6

**文献标识码:** A

## 1 引言

迄今为止, 超重元素都是采用以双幻核铅(或近双幻核铋)为靶的冷熔合反应<sup>[1]</sup>或者以双幻核<sup>48</sup>Ca轰击锕系靶的热熔合反应<sup>[2]</sup>合成的。这些反应道的弹靶核的中质比离反应道复合系统的中质比相差不远。目前有很多模型来描述这类熔合蒸发反应, 其中双核模型是理论上与实验结果符合较好的模型之一。该模型假设弹核越过库仑位垒后被靶核俘获形成双核系统(用俘获截面描述), 此双核系统通过核子转移形成复合核(用熔合几率描述), 处于激发态的复合核通过与裂变过程竞争的中子蒸发过程退激发到基态(用存活几率描述), 最终形成超重核。通常用位垒穿透法描述俘获几率和用统计理论描述存活几率, 其理论基础都比较成熟。对熔合几率的描述则存在好几种理论, 例如, 宏观动力学模型<sup>[3]</sup>、涨落-耗散模型<sup>[4]</sup>、共有核子模型<sup>[5]</sup>及双核(DNS)模型<sup>[6]</sup>等。各种模型的主要差别在于熔合几率的计算, 实质是对弹靶接触后向复合核演化的不同理解。双核模型强调, 在核子转移过程中, 接触的两个原子核仍然保持各自的原子核特性。核子的

转移一般由一维((1D)Fokker-Plank方程的解析解或以类弹核质量数为变量的数值解来描述。在双核模型中, 弹靶接触时相对径向动能已经全部耗散到两核的内禀态中, 使两核均处于激发态。就是这些内禀激发能引起两核之间的核子转移, 而每次转移一个核子的几率最大。在以类弹核质量数为变量的1D模型情况下, 所转移的核子是中子或是质子, 是由其转移能否给出较低的势能面决定的, 或由其转移后类靶核是否更接近复合系统的中质比来决定。我们发现这两种方法给出基本一致的结果<sup>[7]</sup>。这对弹靶核的中质比接近于反应道复合系统的中质比的情况是适用的。但是当弹靶核的中质比远离反应道复合系统的中质比时, 中子和质子的转移情况比较复杂, 用1D的主方程(ME)不能正确描述核子转移, 因此不能正确描述熔合过程。这种现象在采用非<sup>48</sup>Ca弹核轰击锕系靶的反应道中较为常见。为此, 我们建立了一个以类弹核的中子数和质子数为独立变量的二维(2D) ME, 并采用分步差分格式法数值解2D ME得到了熔合几率。对一些反应道的计算结果表明 2D ME给出了与实验符合更好的结果。

\* 收稿日期: 2008-02-27; 修改日期: 2008-03-27

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1047599, 10505016, 10775061); 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJXC2-SW-No17, KJXC-SYW-No2); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB815000)

作者简介: 黄明辉(1983-), 男(汉族), 湖北仙桃人, 博士研究生, 从事超重核合成研究; E-mail: hmh@impcas.ac.cn

# 通讯联系人: 李君清, E-mail: jqli@impcas.ac.cn

## 2 理论模型描述

在双核模型下, 质心系入射能为  $E_{cm}$  的弹核与靶核形成超重复合核的蒸发剩余截面为俘获截面  $\sigma_c(E_{cm}, J)$ 、融合几率  $P_{CN}(E_{cm}, J)$ 、存活几率  $W_{sur}(E_{cm}, J)$  的乘积对各入射角动量分波  $J$  的求和:

$$\sigma(E_{cm}) = \sum_{J=0}^{J=J_i} \sigma_c(E_{cm}, J) \times P_{CN}(E_{cm}, J) W_{sur}(E_{cm}, J), \quad (1)$$

式中,  $J_i=30$ , 为临界轨道角动量, 俘获截面和存活几率的详细计算与文献[8]中的方法相同。在碰撞过程中弹靶核相接触时, 有核子、角动量、能量等在两核间进行转移、交换。如反应中始终保持两体过程, 碎片1和2的中子质子数分别是  $(N_1, Z_1)$  和  $(N_2, Z_2)$ 。设在  $t$  时刻, 碎片1的局域激发能为  $E_1$  时的分布几率为  $P(N_1, Z_1, E_1, t)$ , 它满足2D ME:

$$\begin{aligned} \frac{dP(N_1, Z_1, E_1, t)}{dt} = & \sum_{N'_1} W_{N_1, Z_1, N'_1, Z_1} [d_{N_1, Z_1} P(N'_1, Z_1, E'_1, t) - \\ & d_{N'_1, Z_1} P(N_1, Z_1, E_1, t)] + \\ & \sum_{Z'_1} W_{N_1, Z_1, N_1, Z'_1} [d_{N_1, Z_1} P(N_1, Z'_1, E'_1, t) - \\ & d_{N_1, Z'_1} P(N_1, Z_1, E_1, t)] - \\ & [\Lambda_{N_1, Z_1, E_1, t}^{qf}(\Theta) + \Lambda_{N_1, Z_1, E_1, t}^{fis}(\Theta)] \times \\ & P(N_1, Z_1, E_1, t), \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $W_{N_1, Z_1, N'_1, Z_1}$  表示碎片1从态  $(N'_1, Z_1, E'_1)$ , 内部激发能为  $E'_1$  时向态  $(N_1, Z_1, E_1)$  跃迁的几率;  $d_{N_1, Z_1}$  表示碎片在  $(N'_1, Z_1, E'_1)$  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。这里局域激发能  $E_1$  取为参数, 是由相对运动动力学及驱动势所提供的局域激发能。准裂变速率  $\Lambda_{N_1, Z_1, E_1, t}^{qf}$  与裂变速率  $\Lambda_{N_1, Z_1, E_1, t}^{fis}$  (重的碎片) 由1D的Kramers公式<sup>[8, 9]</sup>给出。

在重离子反应过程中, 相对运动动能逐渐转化为两核的内部激发能, 使得两核费米面附近产生一对称的价空间  $\Delta\epsilon_K$ , 其内的核子可以激发, 发生核子转移:

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

$$g_K = \frac{A_K}{12}, \quad A_K = N_K + Z_K, \quad (3)$$

$\epsilon^*$  是双核系统的局域激发能, 而下角标  $K=1, 2$  分别代表类弹碎片和类靶碎片。局域激发能决定跃迁几率:

$$\epsilon^*(t) = E^* - U(N_1, Z_1; N_2, Z_2, R), \quad (4)$$

$E^*$  是由入射动能耗散到双核系统的激发能。在价空间有价态  $N_K = \Delta\epsilon_K \cdot g_K$  个, 有价核子  $m_K = N_K/2$ 。维度  $d(m_1, m_2) = \binom{N_1}{m_1} \binom{N_2}{m_2}$ 。相互作用时间由偏转函数法<sup>[10]</sup>给出。两核间的距离取使整个系统势能  $U$  最小时的值。系统势能表述为

$$\begin{aligned} U(N_1, Z_1; N_2, Z_2, R) = & B(N_1, Z_1) + \\ & B(N_2, Z_2) - [B(N, Z) + V'_{rot}(J)] + \\ & U_C(Z_1, Z_2, R) + U_N(N_1, Z_1; \\ & N_2, Z_2, R) + V_{rot}(J), \end{aligned} \quad (5)$$

这里,  $N = N_1 + N_2$ ,  $Z = Z_1 + Z_2$ ,  $B(N_1, Z_1)$ ,  $B(N_2, Z_2)$  和  $B(N, Z)$  分别对应两碎片与复合核的结合能, 采用文献[11]中给出的数据, 其中包括了壳修正与对关联的影响。库仑相互作用  $U_C(Z_1, Z_2, R)$  与核相互作用采用  $U_N(N_1, Z_1; N_2, Z_2, R)$  分别采用文献[12]中的公式及文献[13]中的双折叠势。  $V_{rot}$  为离心势。图1以等高线方式给出了反应道的  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}112^*$  (a) 与  $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{278}\text{Ds}^*$  (b) 的关于类弹碎片质子中子数的2D势能面(PES)。图中入射道由箭头标出。贯穿整个PES的粗线表示其谷底, 它实际上应该与两碎片的中质比最靠近复合核中质比的那些组态的PES一致。虚线表示拥有相同的质量数但不同中质比的类弹核组态的势能。图1(a)的入射道正好落在谷底, 因此核子的扩散将趋向于沿谷底进行。向入射点右上的扩散, 趋于向对称的双核系统扩散而趋于准裂变, 这里有很大的一个低位能区, 可容纳较大份额的分布几率。向入射点左下的扩散, 在  $Z \rightarrow 0$  附近的势能面比较低, 系统在这里达到复合核组态, 但中途要经过一个位能面比较高的势垒。在图1(b)中可看到入射点在位能比较高的地方。在以类弹核为变量的1D PES上, 这入射点就是位能最高点, 从入射点到复合核区不存在位垒, 分布几率可以比较容易地达到复合核区。但是类弹核分布几率并不会从入射点沿着等位线直接向  $Z \rightarrow 0$  附近和位能低的比较

对称的双核系统区域扩散，而是应该首先沿着垂直等位线的、势能面下降最陡的方向扩散到谷底，然后趋向于沿谷底向两边势能低的地方分流、扩散。在从谷底趋向 $Z \rightarrow 0$ 附近的复合核区时要越过一个位垒，就是内部熔合位垒，其最高点用 $(Z_{BG}, N_{BG})$ 标出。按照不返回假定，所有分布在 $(Z < Z_{BG}, N < N_{BG})$ 区域的分布几率都会贡献给熔合几率。显然1D ME是描述不了这种图像的。在1D情况下，入射点是位能面的最高点，分布几率将不受阻碍地趋向复合核组态。

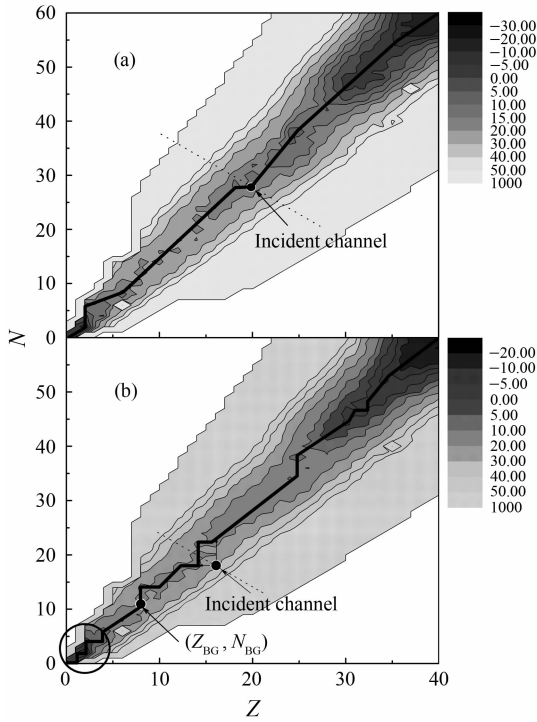


图1 反应道  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}112^*$  (a) 与  $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{278}\text{Ds}^*$  (b) 的 PES 等高图

$Z, N$  分别代表类弹碎片的质子及中子数，手动标记出的粗线代表谷底，虚线上的所有点拥有同样质量数和不同的中质比。

通过计算相对运动耗散能和驱动势能，由(4)式可得到双核系统两个核的内部激发能。而由文献[14]可知跃迁几率、维度都是在确定中子质子数的情况下由激发能确定的。因而可以通过分步差分格式法数值解方程(2)得到 $t$ 时刻中子数为 $N_K$ 、质子数为 $Z_K$ 、激发能为 $E_K$ 的碎片 $K$ 的分布几率 $P(Z_K, N_K, E_K, t)$ 。熔合几率由克服内部熔合位垒后临界点 $(N_{BG}, Z_{BG})$ 左边的部分决定：

$$P_{CN}(E_{cm}, J) = \int_{N_1=0}^{N_{BG}} \int_{Z_1=0}^{Z_{BG}} P(N_1, Z_1, E_1(J),$$

$$\tau_{int}(J)) dN_1 dZ_1. \tag{6}$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 入射点不在谷底的反应道

采用与文献[8]中相同的方式计算俘获截面和复合核存活几率，并且在计算熔合几率过程中引入了其中的位垒分布方法。图2给出了反应道  $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{273}\text{Ds} + 5n$  的熔合几率与蒸发剩余截面(ERCS)。其中，实线是通过解2D ME得到，虚线是通过解1D ME得到的结果，以下图类同。从图2(b)中可以看出，在激发能约为50 MeV处，2D ME给出的蒸发剩余截面为0.45 pb，与实验值[15] 0.4 pb符合得很好，而1D ME由于内部熔合位垒为0，给出了过高的熔合几率，因而给出的截面约为44 pb，高出了实验值2个量级。

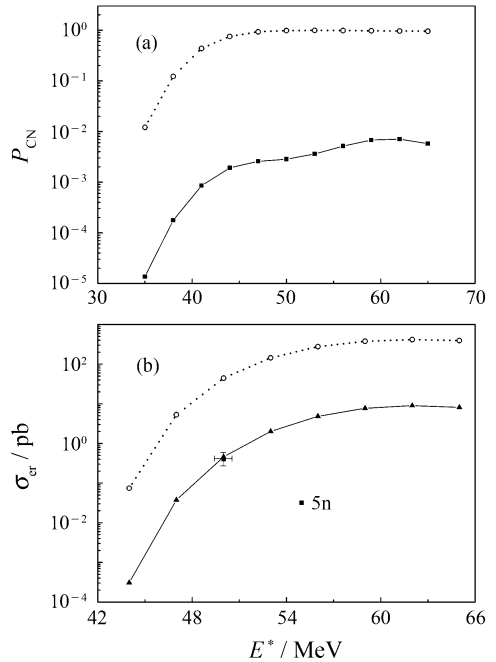


图2 反应道  $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{273}\text{Ds} + 5n$  角动量分波 $J=0$ 时的熔合几率(a)与其蒸发剩余截面(b)

#### 3.2 入射点在谷底的反应道

采用上述相同方法在图3中给出了反应道  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}112^*$  与  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{296}116^*$  的蒸发剩余截面。这两个反应道的入射道都落在驱动势能面的谷底，进一步的扩散倾向于在谷底进行。可以看出，2D ME与1D ME给出的结果差异不大，均与实验值[16]符合得较好。说明对这种反应1D ME是基

本适用的。

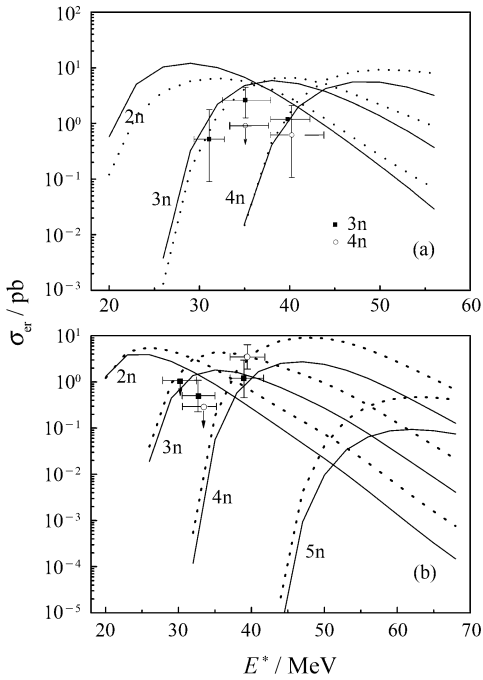


图3 反应道 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}\rightarrow^{286}112^*$ 与 $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}\rightarrow^{296}116^*$ 的蒸发剩余截面(实验数据来自文献[16])

### 3.3 不同同位旋组合的反应道对复合核生成截面的影响

通过反应道  $^{48}\text{S}+^{238}\text{Cm}$ ,  $^{48}\text{Ar}+^{238}\text{Pu}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ ,  $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{Th}$ 及  $^{48}\text{Cr}+^{238}\text{Ra}$ 的重离子熔合反应都形成同一个复合核  $^{286}112^*$ , 其熔合截面随激发能的关系见图4。因为这5个反应道都对对应同一个复合核, 对相同的激发能都对对应相同的存活几率, 故都对对应相同的蒸发剩余截面。反应道 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 的入射道在驱动势的谷底(势能为13.00 MeV),  $^{48}\text{Ar}+^{238}\text{Pu}$ 和 $^{48}\text{S}+^{238}\text{Cm}$ 的入射点的位置相在图1(a)入射道的虚线上(谷底线上方), 势能分别为16.56和35.48 MeV。  $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{Th}$ 和  $^{48}\text{Cr}+^{238}\text{Ra}$ 的入射点的位置在图1(a)入射道的虚线(谷底线下方), 势能分别为29.62 和58.94 MeV。可以看到, 不同的反应道给出的熔合截面在不同的能区相差很大, 最大熔合截面也有很大差别。总的趋势是入射道的势能越高, 可达到的熔合几率越大。但对反应道  $^{48}\text{S}+^{238}\text{Cm}$ 和  $^{48}\text{Cr}+^{238}\text{Ra}$ , 因库仑位垒很高, 获得一定的熔合几率需要很高的激发能。在激发能低于50MeV的区域通常对应的是熔合蒸发反应

2n—4n道。最佳激发能一般是在熔合蒸发反应3n道。对大于50 MeV的区域, 由于随激发能的增加存活几率会大大下降, 因此蒸发剩余截面大大下降, 因此偏离过远的入射道没有实用价值。本图为合成超重核的途径提供了较为丰富的信息, 尽管实际的弹靶选取还与材料的半衰期和获取难度等很多因素相关。

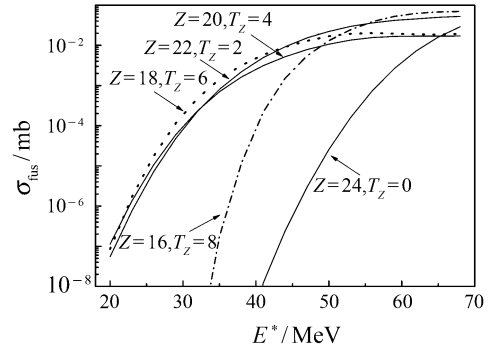


图4 采用入射道  $^{48}\text{S}+^{238}\text{Cm}$ ,  $^{48}\text{Ar}+^{238}\text{Pu}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ ,  $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{Th}$ 及  $^{48}\text{Cr}+^{238}\text{Ra}$ 合成复合核  $^{286}112^*$ 时的熔合截面, 分别对应于弹核质子数及其同位旋三分量为  $(Z=16, T_z=8)$ ,  $(Z=18, T_z=6)$ ,  $(Z=20, T_z=4)$ ,  $(Z=22, T_z=2)$ 和  $(Z=24, T_z=0)$ 的5条线。

## 4 总结

我们讨论了以类弹核质量数为变量的1D ME对研究重离子熔合反应截面的局限性, 建立了以类弹碎片的中子和质子数作为独立变量的2D ME, 采用分步差分格式法数值解2D ME得到熔合几率, 得到了更加合理、与实验数据符合更好的理论结果。由此研究了不同同位旋的弹靶组合条件对生成同样复合核的熔合几率的影响, 同时指出了1D ME的适用条件, 它只适用于弹靶核的中质比与复合系统中中质比相差不远, 而入射点落在2D PES谷底的情况。2D ME则适用于任何同位旋条件, 即适用于描述任何弹靶组合, 因而适用于研究超重核形成的同位旋依赖性, 可以在更广泛的区域寻找生成某一超重核的有利反应道。通过研究某一确定准裂变产物的产生几率, 估算出某一比靶核重的原子核的产额, 这个比靶核重的原子核很可能也是超重核, 则提供了一个不通过熔合反应合成超重核的新机制可能性的信息。

## 参考文献 (References):

- [1] Hofmann S, Münzenberg G. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 733.
- [2] Oganessian Yu. *Nucl Part Phys*, 2007, 34: 165; Hofmann S, Ackermann D, Antalic S, *et al.* *Eur Phys J*, 2007, A32: 251.
- [3] Jorholm S B, Swiatecki W J. *Nucl Phys*, 1982, A391: 471.
- [4] Aritomo Y, Wada T, Ohta M, *et al.* *Phys Rev*, 1999, C59: 796.
- [5] Zagrebaev V I. *Phys Rev*, 2001, C64: 034 606.
- [6] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. *Nucl Phys*, 1998, A633: 409.
- [7] Wang N, Zhao E G, Li J F, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 635.
- [8] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. *Phys Rev*, 2003, C68: 034 601.
- [9] Feng Z Q, Jin G M, Fu F, *et al.* *Nucl Phys*, 2006, A50: 771.
- [10] Wolschin G, Nöorenberg W. *Z Phys*, 1978, A284: 209.
- [11] Möller P, Nix J R, Myers W D, *et al.* *At Data Nucl Data Tables*, 1995, 59: 185.
- [12] Wong C Y. *Phys Rev Lett*, 1973, 31: 766.
- [13] Li Q F, Zuo W, Li W F, *et al.* *Eur Phys J*, 2005, A24: 223.
- [14] Li W F, Wang N, Li J F, *et al.* *Eur Phys Lett*, 2003, 64: 750.
- [15] Lazarev Y A, Lobanov Y U, Oganessian Y T, *et al.* *Phys Rev*, 1996, C54: 620.
- [16] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, *et al.* *Phys Rev*, 2004, C70: 064 609; Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, *et al.* *Phys Rev*, 2004, C69: 054 607.

## Effect of Proton and Neutron Transfer on Synthesizing Superheavy Elements in Heavy Ion Reactions<sup>\*</sup>

HUANG Ming-hui<sup>1, 2</sup>, GAN Zai-guo<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-hong<sup>1</sup>, LI Jun-qing<sup>1, #</sup>

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

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

**Abstract:** The limitation of the one dimensional master equation with the mass number of project-like fragment as the variable is discussed. A two-dimensional master equation with neutron and proton numbers of the project-like fragment as variables is set up, and solved numerically by means of a two step difference scheme to obtain fusion probability. The new equation is suitable for studying fusion reactions with any projectile-target combination, and can better fit the experimental data, so that it can provide a large probability to choose the reaction system for synthesizing a certain superheavy nucleus. The influence of projectile-target combinations with different isospins on the cross-sections of compound nuclei is studied.

**Key words:** superheavy nucleus; fusion-evaporation reaction; driving potential; master equation

\* **Received date:** 27 Feb. 2008; **Revised date:** 27 Mar. 2008

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(1047599, 10505016, 10775061); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No17, KJCX-SYW-No2); Major State Basic Research Development Program (2007CB815000)

# **Corresponding author:** Li Junqing, E-mail: jqli@impcas.ac.cn