

文章编号: 1007-4627(2013)03-0289-05

## 超重融合反应的系统学研究

王宁<sup>1</sup>, 赵凯<sup>2</sup>, 田俊龙<sup>3</sup>

(1. 广西师范大学, 广西 桂林 541004;  
2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;  
3. 安阳师范学院, 河南 安阳 455002)

**摘要:**通过对重离子融合反应的系统研究, 分别建立了计算俘获截面、复合核存活几率以及复合核形成几率的方法, 并给出了理论计算值的系统误差。对于“超重稳定岛”附近的超重核, 除了壳修正, 准裂变势垒高度也会影响超重核的形成几率。基于 Skyrme 能量密度泛函得到的准裂变势垒高度, 提出了描述复合核形成几率的解析表达式。对于“超重稳定岛”附近的超重核, 除了壳修正, 准裂变势垒高度也会影响超重核的形成几率。与此同时, 基于该方法预言了合成新的超重元素  $Z = 119$  和  $120$  的几个融合体系的蒸发剩余截面。对于融合反应  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ , 计算出来的最佳蒸发剩余截面大约为  $35 \text{ fb}$ 。

**关键词:** 超重核; 融合; 裂变; 准裂变; 壳修正

**中图分类号:** O572.2; O571.6      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.289

### 1 引言

近几十年来超重核合成一直是核物理界最具挑战性的前沿课题之一。超重核合成对于开拓高原子序数极限、探索超重元素的化学性质、检验原子核壳模型并完善原子核理论具有重要意义。原子核壳模型在描述原子核基态性质方面取得了巨大成功, 该模型早在半个多世纪前就预言在质子数约为 114, 中子数约为 184 附近会存在一批比较稳定的核素, 形成所谓的超重稳定岛。为了验证这一预言以及挑战原子序数极限, 核物理学家开展了大量的超重核相关的研究工作。截至目前, 超重核合成在实验上已经有了相当大的进展。目前实验上通过重离子融合反应已经成功地合成了一批超重核, 包括德国 GSI 以及日本 RIKEN 实验室采用冷融合方法先后合成了 107 至 113 号元素<sup>[1-2]</sup>; 俄罗斯的 DUBNA 采用热熔合方法合成了 112 至 118 号元素<sup>[3-4]</sup>; 中国科学院近代物理研究所正在尝试通过冷融合反应  $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$  来合成 110 号元素<sup>[5]</sup>, 并为合成新的超重核做准备。在核物理领域, 超重核的理论研究主要包括: 超重核结构与衰变性质以及超

重核合成机制等方面的研究。这几个方面的研究都存在着极大的挑战。在超重核结构研究方面, 一个首要的问题就是超重稳定岛是否真正存在? 如果存在, 其中心位置究竟在哪里? 人们发现采用不同的平均场理论以及不同的模型参数得到的超重稳定岛中心位置存在很大差异, 得到的超重区域的质子幻数  $Z = 114, 120$  和  $126$  以及中子幻数  $N = 172, 178$  和  $184$ 。这种分歧暗示了原子核结构模型中某些效应还没有考虑或者是考虑得还不够完善。超重核合成机制研究的困难之一在于其合成过程非常复杂, 反应机制不是很清楚。目前实验上合成超重核的唯一途径是通过重离子融合反应。超重核合成过程通常分 3 个阶段来描述: (1) 俘获阶段, 弹靶克服库仑势垒形成双核体系; (2) 复合核形成阶段, 双核体系逐渐向复合核演化, 同时体系有很大一部分几率发生准裂变; (3) 复合核衰变阶段, 处于激发态的复合核通过蒸发粒子或者裂变来退激。这 3 个阶段中每个阶段都存在一些尚未解决的问题, 从而对于准确地估计超重核残余截面并可靠地描述融合以及准裂变机制还存在困难。由于原子核结构信

收稿日期: 2012-10-16; 修改日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11275052, 11005003, 11005155)

作者简介: 王宁(1976-), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士, 从事重离子核物理理论研究; E-mail: wangning@gxnu.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>

息, 譬如超重核的质量和壳修正等会非常敏感地影响超重核形成截面, 因而在研究超重核反应机制方面, 同时需要建立和完善原子核结构模型。

在研究超重核合成机制方面, 目前已经存在几个广泛应用的理论模型: 双核模型<sup>[6-7]</sup>、两步模型<sup>[8]</sup>、扩散模型<sup>[9]</sup>及多维朗之万动力学模型<sup>[10]</sup>等。这些模型能够较好地描述已测的超重核蒸发剩余截面, 但是对于新的超重核蒸发剩余截面的预言存在明显的差别<sup>[7, 9, 11]</sup>。因此, 非常有必要对理论模型进行系统学检验。超重核蒸发剩余截面涉及到 3 个关键物理量: 俘获截面  $\sigma_{\text{cap}}$ 、复合核形成几率  $P_{\text{CN}}$  及复合核存活几率  $W_{\text{sur}}$ 。为了更可靠地描述超重核反应的蒸发剩余截面  $\sigma_{\text{ER}} = \sigma_{\text{cap}} P_{\text{CN}} W_{\text{sur}}$ , 我们将分别对这 3 个物理量进行检验。通常认为, 对于复合核电荷数  $Z_{\text{CN}} \leq 60$  的熔合体系, 当入射能量靠近库仑势垒时发生复合核裂变和准裂变的几率可以忽略。对这些区域的熔合反应进行系统研究, 有助于建立可靠的理论模型来计算俘获截面  $\sigma_{\text{cap}}$ , 而不受裂变和准裂变的影响。对于中重熔合体系, 如果弹靶质量不对称度  $\eta = \frac{A_t - A_p}{A_t + A_p}$  足够大, 并且入射能量接近库仑势垒, 则反应体系主要经历熔合-裂变过程, 而准裂变的影响相对比较弱。对于这类反应的系统研究, 有助于确定统计衰变模型中计算复合核存活几率  $W_{\text{sur}}$  所需的一些关键参量。俘获截面和复合核存活几率的计算方法及参数确定好以后, 可以进一步基于合成超重核的熔合反应的蒸发剩余截面来建立计算复合核形成几率  $P_{\text{CN}}$  的方法。超重体系的实验数据非常有限, 而轻的以及中重的熔合体系的实验数据比较多。通过如上方法一步一步确定理论模型及参数, 尽可能地降低 3 个物理量的不确定性, 从而通过较多的实验数据来提高计算超重核蒸发剩余截面的可靠性。

本文首先介绍基于 Skyrme 能量密度泛函计算重离子熔合反应的核-核相互作用势。Skyrme 能量密度泛函在描述一些静态物理量, 譬如原子核基态性质及熔合势垒等方面还是比较成功的。该相互作用势对于描述俘获截面以及准裂变几率起决定性作用。然后介绍用于描述熔合-裂变反应的统计衰变模型 HIVAP 中的一些关键参数的确定。最后结合改进的原子核质量公式, 介绍计算复合核形成几率的经验公式, 同时给出合成新的超重核的最佳弹靶组合及蒸发剩余截面。

<http://www.npr.ac.cn>

## 2 俘获截面的计算

在重离子熔合反应的俘获截面计算中, 首先基于 Skyrme 能量密度泛函计算重离子熔合反应的核-核相互作用势; 然后基于得到的势垒高度  $B_0$  来建立熔合势垒分布函数  $D(B)$ ; 最后结合势垒分布函数以及势垒穿透思想计算俘获截面。

对于熔合反应的核-核相互作用势  $V(R)$ , 采用入射道势来描述:

$$V(R) = E_{\text{tot}}(R) - E_1 - E_2, \quad (1)$$

其中:  $R$  表示两核质心距离;  $E_{\text{tot}}(R)$  表示核体系的总能量(该方法描述的是静态问题, 因此这里的总能量不包含熔合体系的质心动能);  $E_1$  和  $E_2$  分别表示弹靶各自的基态能量。  $E_{\text{tot}}(R)$ ,  $E_1$  和  $E_2$  采用相同的 Skyrme 能量密度泛函  $\mathcal{H}(\mathbf{r})$  结合扩展的托马斯-费米近似及密度冻结近似来计算:

$$E_{\text{tot}}(R) = \int \mathcal{H}[\rho_{1p}(\mathbf{r}) + \rho_{2p}(\mathbf{r} - \mathbf{R}), \rho_{1n}(\mathbf{r}) + \rho_{2n}(\mathbf{r} - \mathbf{R})] d\mathbf{r},$$

$$E_1 = \int \mathcal{H}[\rho_{1p}(\mathbf{r}), \rho_{1n}(\mathbf{r})] d\mathbf{r}, \quad (2)$$

$$E_2 = \int \mathcal{H}[\rho_{2p}(\mathbf{r}), \rho_{2n}(\mathbf{r})] d\mathbf{r}. \quad (3)$$

这里  $\rho_{1p}$ ,  $\rho_{2p}$ ,  $\rho_{1n}$  及  $\rho_{2n}$  分别表示弹靶质子、中子密度分布。弹靶的密度分布通过 Skyrme 能量密度泛函自洽得到<sup>[13]</sup>。图 1 给出了  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  的入射道核-核相互作用势。从核-核势可以得到势垒高度  $B_0$ 、位置  $R_0$ 、曲率  $\hbar\omega$  以及准裂变势垒高度  $B_{\text{qf}}$  (俘获谷的深度) 等有用信息。

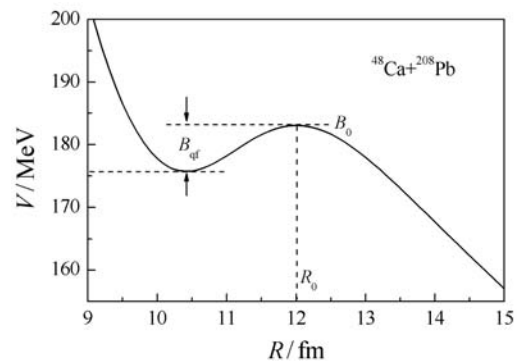


图 1  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  的入射道核-核相互作用势

考虑到原子核形变等其他自由度对两核相互作用自由度的耦合效应, 采用熔合势垒分布  $D(B)$  来描

述势垒高度。假设势垒分布函数  $D(B)$  由两个高斯函数  $D_1(B)$  和  $D_2(B)$  构成:

$$D_1(B) = \frac{1}{2\sqrt{g\pi}w_1} \exp\left[-\frac{(B-B_1)^2}{g(2w_1)^2}\right], \quad (4)$$

$$D_2(B) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}w_2} \exp\left[-\frac{(B-B_2)^2}{(2w_2)^2}\right], \quad (5)$$

其中:

$$B_1 = B_c + w_1; \quad (6)$$

$$B_2 = B_c + w_2; \quad (7)$$

$$w_1 = \frac{1}{4}(B_0 - B_c); \quad (8)$$

$$w_2 = \frac{1}{2}(B_0 - B_c); \quad (9)$$

$B_0$  是入射道势垒高度, 由前面提到的 Skyrme 能量密度泛函得到,  $B_c = 0.926B_0$ 。  $D_1(B)$  中的  $g$  表示截面增强因子, 体现了原子核结构效应及动力学效应对熔合截面的影响。概括而言, 弹靶的闭壳效应造成垒下截面的压低, 而丰中子效应通常会引起垒下截面增强。 $g$  值越大, 垒下截面越大。 $g$  的取值范围为  $0 < g \leq 2$ , 具体的  $g$  值需要通过一个经验公式<sup>[13-14]</sup>计算得到。

基于高斯分布  $D_1(B)$  和  $D_2(B)$ , 俘获截面写为

$$\sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}) = \min[\sigma_1(E_{\text{c.m.}}), \sigma_{\text{avr}}(E_{\text{c.m.}})], \quad (10)$$

其中:

$$\sigma_1(E_{\text{c.m.}}) = \int_0^\infty D_1(B) \sigma_{\text{fus}}^{\text{Wong}}(E_{\text{c.m.}}, B) dB;$$

$$\sigma_{\text{avr}}(E_{\text{c.m.}}) = \int_0^\infty \left[ \frac{D_1(B) + D_2(B)}{2} \right] \sigma_{\text{fus}}^{\text{Wong}}(E_{\text{c.m.}}, B) dB。$$

这里,  $\sigma_{\text{fus}}^{\text{Wong}}$  代表 Wong 公式<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{\text{fus}}^{\text{Wong}}(E_{\text{c.m.}}, B_0) = \frac{\hbar\omega R_{\text{fus}}^2}{2E_{\text{c.m.}}} \times \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2\pi}{\hbar\omega} (E_{\text{c.m.}} - B_0) \right] \right\},$$

$E_{\text{c.m.}}$  表示质心系入射能量。  $R_{\text{fus}}$  和  $\hbar\omega$  表示库仑势垒的位置和曲率, 由前面提到的入射道势得到。

### 3 复合核形成与存活几率

复合核存活几率  $W_{\text{sur}}$  由标准的统计-衰变模型 HIVAP 程序计算得到。 HIVAP 程序考虑了中子、质子、 $\alpha$  粒子、 $\gamma$  射线与裂变的竞争<sup>[12]</sup>。我们通过

对熔合-裂变反应的系统研究, 对能级密度参数与裂变位垒等敏感参数给出最佳的参数组合<sup>[16]</sup>。与此同时, 采用改进的宏观-微观质量 (Weizsäcker-Skyrme) 公式<sup>[17-18]</sup>来描述未知的超重核质量。该质量公式结合 Skyrme 能量密度泛函与宏观-微观思想, 考虑了原子核的镜像核效应与 Wigner 效应, 对 2149 个已知核的质量均方根偏差只有 336 keV, 远小于有限力程小液滴模型 (FRDM) 的结果 (656 keV)。同时能很好地描述超重核的  $\alpha$  衰变能<sup>[18-19]</sup>以及新测原子核的质量。

目前对于超重核形成机制的描述依然存在争议, 譬如双核模型认为复合核主要通过核子转移形成的, 而两步模型认为复合核形成过程中需要越过一个额外的内部势垒。我们认为复合核形成的动力学过程非常复杂, 要弄清楚相当困难。要准确地计算复合核形成几率  $P_{\text{CN}}$ , 只需要合理地描述准裂变与复合核形成之间的竞争。通常认为, 准裂变势垒高度越高, 准裂变几率越小, 也就是  $P_{\text{CN}}$  越大。另外,  $P_{\text{CN}}$  会随着熔合体系的激发能增大而增大。因此我们尝试采用一个非常简单的经验公式来描述复合核形成几率<sup>[11]</sup>,

$$P_{\text{CN}}(E^*) = \frac{1}{C} \exp(3B_{\text{qf}} + 0.3E^*), \quad (11)$$

其中:  $E^* = E_{\text{c.m.}} + Q$  复合核激发能 (单位为 MeV);  $C = \exp(50|\eta|)$ , 是由“热熔合”反应  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$  与  $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf}$  的蒸发剩余截面来确定。对于  $^{48}\text{Ca}$  诱发的热熔合反应  $|\eta| = \frac{|A_1 - A_2|}{A_1 + A_2} \approx 0.67$ 。由于该公式参数少, 能够通过有限的超重核实验数据较好地确定, 可以大大降低模型参数不确定性引起的系统误差。通过计算发现, 该公式能比较理想地系统再现超重熔合反应的蒸发剩余截面。

图 2 给出了  $^{48}\text{Ca}$  诱发的“热熔合”反应的蒸发剩余截面。三角符号和实心圆点分别表示 3 n 与 4 n 道的实验数据<sup>[4, 20]</sup>。竖直的虚线和实线分别表示入射道库仑势垒高度  $B_0$  与平均势垒高度  $B_m \approx 0.956B_0$ 。阴影给出了理论计算值的不确定度, 在入射能量高于库仑势垒区域, 其数值约为  $\sigma_{\text{ER}}$  的 4.4 倍。相应的  $\sigma_{\text{cap}}$ ,  $W_{\text{sur}}$  及  $P_{\text{CN}}$  的不确定度<sup>[16]</sup> 分别为各自平均值的 1.18, 1.85 和 2.0 倍。这里我们强调, 虽然计算复合核形成几率的经验公式中的参数只是由  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$  和  $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf}$  两个反应来确定的, 但是采用相同的模型参数, 其他“热熔合”反应譬如  $^{48}\text{Ca} + ^{247}\text{Bk}$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  等的蒸发剩余截面也能较好地再现, 这对

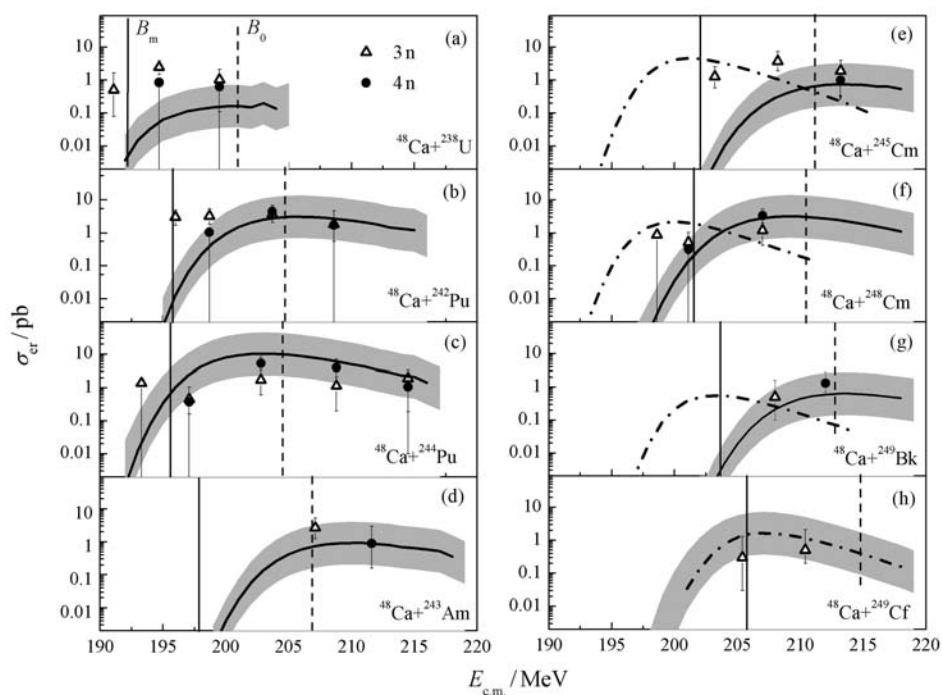


图 2  $^{48}\text{Ca}$  轰击的几个“热熔合”反应蒸发剩余截面

于预言新的超重核体系非常关键。

图 3 给出了该方法计算出来的合成新的超重元素  $Z = 119$  和  $120$  的几个熔合体系  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ ,  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$ ,  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$  和  $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$  的蒸发剩余截面。对于熔合反应  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk} \rightarrow ^{295}119 + 4n$ , 计

算出来的  $\sigma_{\text{ER}}$  在入射能量为  $B_0$  时约为  $35\text{ fb}$ 。对于合成  $120$  号元素的几个熔合体系, 其截面要小于相应的合成  $119$  号元素的值。对于  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$  与  $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$ , 蒸发剩余截面仅为几个  $\text{fb}$ , 超出目前实验测量设备的测量极限。

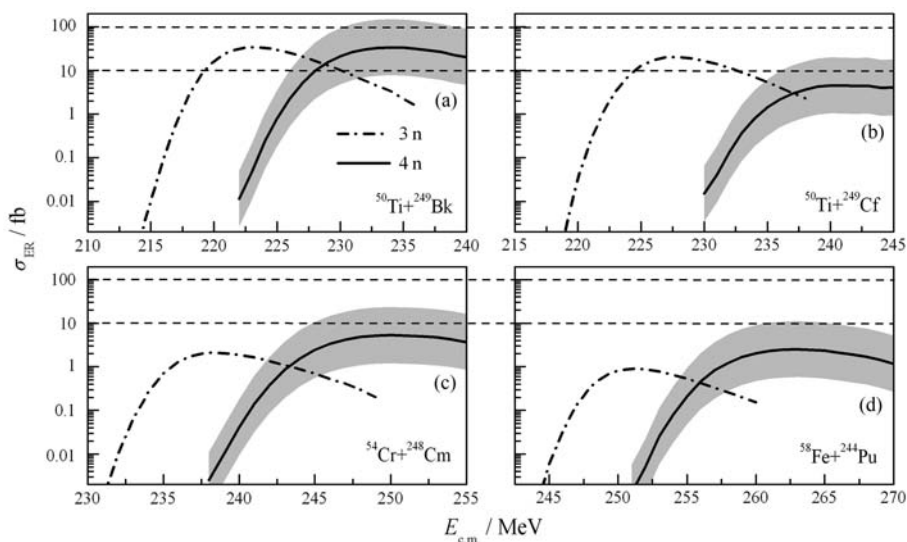


图 3 合成超重元素  $119$  和  $120$  的几个熔合体系的蒸发剩余截面

点划线和实线分别表示计算出来的  $3n$  和  $4n$  道的结果, 阴影代表理论计算值的不确定度。

## 4 总结与讨论

通过对重离子熔合反应的系统研究, 我们分别建

立了计算俘获截面、复合核存活几率以及复合核形成几率的方法, 并给出了理论计算值的系统误差。对于俘获截面, 原子核结构效应譬如壳效应、丰中子效应

和动力学效应都会对垒下截面产生较大的影响。双幻核引起的熔合反应, 由于闭壳效应使得原子核的形状基本保持球形, 而且难以发生动力学形变, 从而动力学势垒比较高, 造成俘获截面的垒下压低现象。丰中子效应则正好相反, 造成垒下俘获截面增强。原子核结构信息特别是原子核质量与壳修正对于准确计算复合核存活几率也非常关键。本工作采用改进的宏观-微观质量公式来描述未知超重核质量, 对于提高计算蒸发剩余截面的可靠性很有帮助。对于复合核形成几率, 采用一个非常简单的经验公式来描述。一系列“热熔合”反应的实验数据能够被合理地再现。基于该方法预言了合成新的超重元素  $Z = 119$  和  $120$  的几个熔合体系的蒸发剩余截面。对于熔合反应  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ , 计算出来的最佳蒸发剩余截面大约为  $35 \text{ fb}$ 。

#### 参考文献(References):

- [1] HOFMANN S, MNZENBERG G. *Rev Mod Phys*, 2000, **72**: 733.
- [2] MORITA K, MORIMOTO K, KAJI D, *et al.* *J Phys Soc Jpn*, 2004, **73**: 2593.
- [3] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* *Phys Rev C*, 2009, **74**: 044602.
- [4] OGANESSIAN Y T, ABDULLIN F S, BAILEY P D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2010, **104**: 142502.
- [5] ZHANG Z, GAN Z, MA L, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2012, **29**: 012502.
- [6] HUANG M, ZHANG Z, GAN Z, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **84**: 064619.
- [7] WANG N, ZHAO E, SCHEID W, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **85**: 041601(R).
- [8] SHEN C, KOSENKO G, ABE Y. *Phys Rev C*, 2002, **66**: 061602(R).
- [9] LIU Z, BAO J. *Phys Rev C*, 2011, **84**: 031602(R).
- [10] ZAGREBAEV V, GREINER W. *Phys Rev C*, 2008, **78**: 034610.
- [11] WANG N, TIAN J, SCHEID W. *Phys Rev C*, 2011, **84**: 061601(R).
- [12] REISDORF W, SCHÄDEL M. *Z Phys A*, 1992, **343**: 47.
- [13] LIU M, WANG N, LI Z, *et al.* *Nucl Phys A*, 2006, **768**: 80.
- [14] WANG N, LIU M, YANG Y. *Sci China G*, 2009, **52**: 1554.
- [15] WONG C Y. *Rev Lett*, 1973, **31**: 766.
- [16] WANG N, ZHAO K, SCHEID W, *et al.* *Phys Rev C*, 2008, **77**: 014603.
- [17] WANG N, LIU M, WU X. *Phys Rev C*, 2010, **81**: 044322.
- [18] LIU M, WANG N, DENG Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **84**: 014333.
- [19] ZHANG H, GAO Y, WANG N, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **85**: 014325.
- [20] TIAN J, WANG N, LI Z. *Chin Phys Lett*, 2007, **24**: 905.

## Systematic Study of Fusion Reactions Leading to Superheavy Nuclei

WANG Ning<sup>1, 1)</sup>, ZHAO Kai<sup>2</sup>, TIAN Junlong<sup>3</sup>

(1. Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. School of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455002, Henan, China)

**Abstract:** The fusion probability in “hot” fusion reactions leading to the synthesis of superheavy nuclei is investigated systematically. The quasi-fission barrier influences the formation of the superheavy nucleus around the “island of stability” in addition to the shell correction. Based on the quasi-fission barrier height obtained with the Skyrme energy-density functional, we propose an analytical expression for the description of the fusion probability, with which the measured evaporation residual cross sections can be reproduced acceptably well. Simultaneously, some special fusion reactions for synthesizing new elements 119 and 120 are studied. The predicted evaporation residual cross sections for  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$  are about  $35 \text{ fb}$  at energies around the entrance-channel Coulomb barrier. For the fusion reactions synthesizing element 120 with projectiles  $^{54}\text{Cr}$  and  $^{58}\text{Fe}$ , the cross sections fall to a few femtobarns which seems beyond the limit of the available facilities.

**Key words:** superheavy nuclei; fusion; fission; quasi-fission; shell correction

Received date: 16 Oct. 2012; Revised date: 11 Mar. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11275052, 11005003, 11005155)

1) E-mail: wangning@gxnu.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>