

文章编号: 1007-4627(2013)03-0294-05

生成超重核的熔合反应中的动力学形变效应

王楠¹, 彭金松², 赵恩广^{3,4}, 周善贵^{3,4}

(1. 深圳大学物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060;

2. 河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300;

3. 中国科学院理论物理研究所理论物理国家重点实验室, 北京 100190;

4. 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)

摘要: 利用包含动力学势能面的双核模型对超重核的生成机制中的一些问题进行了研究。对双核系统的粒子交换势能面进行的计算结果表明, 反应过程中原子核动力学形变对于粒子交换势能面的结构有显著的影响。进一步计算了生成超重核的熔合几率, 结果显示, 原子核的动力学形变导致内熔合位垒升高, 进而明显降低了生成超重核的熔合几率。

关键词: 超重核; 动力学形变; 双核模型

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.294

1 引言

近年来, 超重核的合成已经成为核物理研究的热点领域。在实验方面, 人们已经采用 Pb 或 Bi 做靶的冷熔合方法以及采用 ^{48}Ca 轰击锕系靶的热熔合方法合成了一系列的超重核^[1-4]。截至目前, 已成功合成了 118 号元素。在理论研究方面, 为了理解超重核的形成机制, 并对超重核生成的蒸发剩余截面进行理论计算, 人们提出了若干种理论模型。例如: 宏观动力学 (macroscopic dynamical model) 模型^[5], FBD (fusion-by-diffusion) 模型^[6-10], nuclear collectivization 模型^[11-12], 双核模型 (Di-Nuclear system model, 即 DNS 模型)^[13-16] 以及其它模型^[17]。理论方面的探索对于超重核的实验研究具有非常重要的意义。一方面, 随着合成的超重核的电荷数越来越大, 它们的生成截面也越来越小。例如: 118 号元素的蒸发剩余截面就只有大约 0.5 pb。合成电荷数更大的超重核的截面可能会变得更小, 合成实验变得更加困难。实验研究需要理论计算给出可能的超重核的生成截面以及最佳弹-靶组合、最佳入射能等信

息, 才有可能取得实验成功。另一方面, 人们虽然已经对熔合机制有了一定程度的理解和掌握, 但还有非常多的问题仍需要进一步深入研究和解决。这就需要人们进一步发展理论模型, 对熔合机制作更深入的研究。原子核的动力学形变就是反应机制中的一个重要方面。在对重离子核反应的研究中, 人们已经认识到原子核会具有动力学形变^[18-21]。因此, 在理论模型中考虑原子核的动力学形变是非常重要的, 也是十分必要的, 对于双核系统的激发能的计算也是重要的。文献 [21] 中, 发展了一个新的 DNS 模型。在该模型中, 采用包含两核形变以及质量不对称自由度 3 个变量的主方程研究超重核的熔合。在文献 [22] 中, 一种比较简便的考虑双核组态中原子核的动力学形变的模型 (Di-Nuclear System model with Dynamical Potential Energy Surface, 简称 DNS-DyPES 模型) 提出并被用来系统计算热熔合反应中超重元素的生成截面以及预测 119 及 120 号元素的生成截面。在本文中, 我们将在 DNS-DyPES 模型框架内对熔合过程中的原子核动力学形变效应进行研究。

收稿日期: 2012-10-25; 修改日期: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10975100, 10979066, 11275098, 11175252, 10979024, 11120101005); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2013CB834400); 中国科学院知识创新工程项目 (KJXC2-EW-N01, KJXC2-YW-N32); 广西自然科学基金资助项目 (2011GXNSFA018140)

作者简介: 王楠 (1975-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 从事重离子核物理理论研究; E-mail: wangnan@szu.edu.cn.

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

2 理论模型简介

在 DNS 模型中, 将复合核的形成看作双核体系沿质量不对称自由度方向的演化。当核子从较轻的碎块转移到较重的碎块时, 双核体系的质量不对称度增加。当质量不对称度 $\eta = \pm 1$ 时, 复合核形成。反之, 当核子从较重的碎块向较轻的碎块转移时, 双核体系的质量不对称度减小, 体系趋于对称, 双核系统发生准裂变的概率增加。生成超重核的过程一般可分为 3 个阶段: (1) 俘获过程, 指系统越过库仑位垒形成双核系统; (2) 熔合过程, 指两核经过核子转移形成复合核的过程; (3) 退激发过程, 指复合核通过蒸发中子而带走激发能的过程。因此, 超重核的蒸发剩余截面可以写为

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{c.m.}}) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E_{\text{c.m.}}} \sum_J (2J+1) T(E_{\text{c.m.}}, J) \times P_{\text{CN}}(E_{\text{c.m.}}, J) W_{\text{sur}}(E_{\text{c.m.}}, J), \quad (1)$$

这里: $E_{\text{c.m.}}$ 表示质心系的能量; $T(E_{\text{c.m.}}, J)$, P_{CN} 和 W_{sur} 分别表示位垒穿透几率、熔合几率及复合核的存活几率。对双核系统质量转移以及超重核熔合过程的描写可采用如下的主方程:

$$\frac{dP(A_1, t)}{dt} = \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1}(t) [d_{A_1}(t) P(A'_1, t) - d_{A'_1}(t) P(A_1, t)] - \Lambda_{A_1}^{\text{qf}}(t) P(A_1, t). \quad (2)$$

其中: $P(A_1, t)$ 表示某种双核组态的占据几率; d_{A_1} 表示某一宏观态的维度, 即微观状态数; $\Lambda_{A_1}^{\text{qf}}(t)$ 表示双核系统的准裂变速率; $W_{A_1 A'_1}$ 表示从双核系统 A_1 向 A'_1 变化的转移几率。在主方程中, 维度、准裂变速率和转移几率等均与体系激发能相关。双核系统的激发能可以写为

$$E_{\text{DNS}}^*(A_1, t) = E_{\text{total}} - E_{\text{DNS}}^0(A_1, t) - E_{\text{DNS}}^{\text{rot}}(t), \quad (3)$$

其中:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{c.m.}} + (M_{\text{T}} + M_{\text{P}})c^2; \quad (4)$$

$$E_{\text{DNS}}^0(A_1, t) = V_{\text{DNS}}(A_1, t) + (M_1 + M_2)c^2; \quad (5)$$

$$E_{\text{DNS}}^{\text{rot}}(t) = \frac{J(J+1)}{2 \mathcal{I}_{\text{DNS}}(A_1, t)}; \quad (6)$$

而式 (4), 式 (5) 和式 (6) 中, M_1 和 M_2 表示某一双核体系的两核质量, M_{P} 和 M_{T} 表示弹核和靶核的质量;

$V_{\text{DNS}}(A_1, t) = V_{\text{N}}(A_1, t) + V_{\text{C}}(A_1, t)$, $V_{\text{N}}(A_1, t)$ 及 $V_{\text{C}}(A_1, t)$ 分别是两核之间的核势、库仑势。双核系统的粒子交换势能面 (也称为驱动势) 可以写为

$$V_{\text{PES}}(A_1, t) \equiv V_{\text{DNS}}(A_1, t) + (M_1 + M_2 - M_{\text{T}} - M_{\text{P}})c^2. \quad (7)$$

在两核相互作用过程中, 原子核会发生动力学形变。因此, 粒子交换势能面也与时间相关。核势的计算采用双折叠势^[23], 库仑势采用 Wong 的公式^[24]。在本文中, 两核的相对取向为 tip-tip 取向。两核的动力学形变满足 $\frac{\delta\beta_1^2 C_1}{A_1} = \frac{\delta\beta_2^2 C_2}{A_2}$ ^[11], 其中 C_i ($i = 1$ 和 2) 是采用液滴模型计算的原子核的硬度系数^[25]。事实上, 原子核的壳修正能量也会随着原子核形变而变化^[26], 我们将在后续工作中对此做更深入的研究。定义 $\delta\beta_i \equiv \frac{\delta\beta_1 + \delta\beta_2}{2}$, 并且假设动力学形变以过阻尼方式发展^[18-20],

$$\delta\beta_i = \delta\beta_{\text{max}} \left(1 - e^{-t/\tau_{\text{def}}}\right), \quad (8)$$

其中: τ_{def} 是驰豫时间, 最大的动力学形变 $\delta\beta_{\text{max}}$ 可以通过求“内禀能量”的极小值得。双核系统的“内禀能量”定义为

$$E_{\text{int}}(A_1, \delta\beta) = V_{\text{N}}(A_1; \beta_1, \beta_2) + V_{\text{C}}(A_1; \beta_1, \beta_2) + \sum_{i=1,2} \frac{1}{2} C_i \delta\beta_i^2, \quad (9)$$

两核的四极形变 $\beta_i = \beta_i^0 + \delta\beta_i$ ($i = 1$ 和 2), 其中 β_i^0 和 $\delta\beta_i$ 分别为静态形变与动力学形变。

3 结果与讨论

图 1(a) 所示为双核体系内禀能量随动力学形变的变化关系, 图中虚线表示双核系统的最大动力学形变 $\delta\beta_{\text{max}}$ 。从图中可以看到, 在 $\delta\beta < \delta\beta_{\text{max}}$ 时, 内禀能量随动力学形变的增大而减小, 其原因在于, 随着原子核形变的增加, 两核之间的相互作用势显著地降低。当 $\delta\beta = \delta\beta_{\text{max}}$ 时, 内禀能量取得极小值。而在 $\delta\beta > \delta\beta_{\text{max}}$ 时, 内禀能量随动力学形变的增大而增大, 这是由于形变引起原子核能量升高而引起的。图 1(b) 所示为两核之间相互作用势随动力学形变的关系。从图中可看到, 两核相互作用势随形变的增加而近似线性地降低。当 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 的双核体系达到最大动力学形变 ($\delta\beta_{\text{max}} \approx 0.3$) 时, 两核之间的核势与库仑势之和大约为 145 MeV。

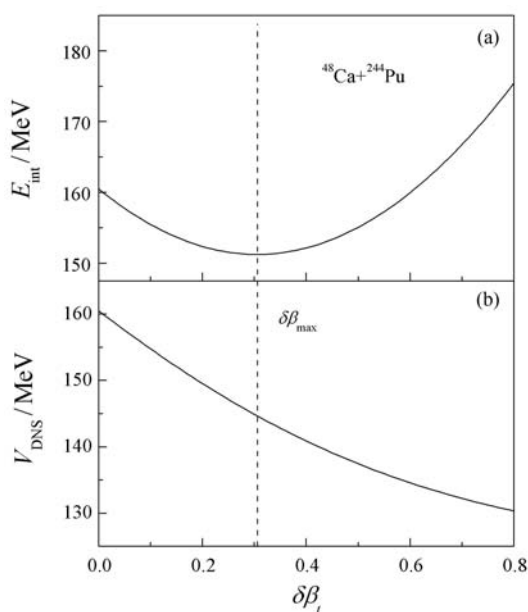


图 1 (a) 双核体系内禀能量与动力学形变的关系和(b) 两核之间相互作用势与动力学形变的关系

图 2 所示为 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应中两核的动力学形变随时间的变化关系, 虚线和实线分别代表 ^{48}Ca 以及 ^{244}Pu 的动力学形变。从图中可以看到, 最初的两核动力学形变均为零; 而后随反应过程的进行, 两核的动力学形变逐步发展, 至 $t = 120 \times 10^{-22}$ s 时, 动力学形变已趋于饱和, ^{48}Ca 以及 ^{244}Pu 的动力学形变分别为 0.18 和 0.42。较重的原子核相比于较轻的原子核具有更大的动力学形变。

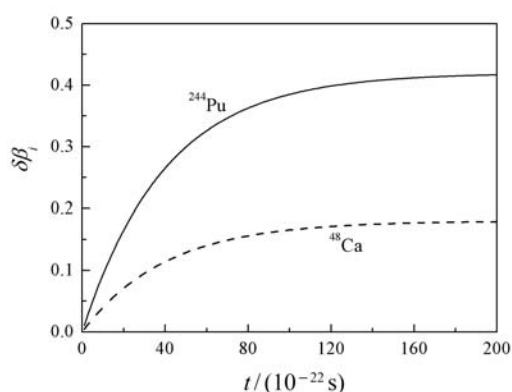


图 2 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应中两核的动力学形变随时间的变化关系

图 3 所示为 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应中的粒子交换势能面(驱动势), 实线表示 $t = 0$ 时的势能面, 虚线表示 $t = \infty$ 时的势能面。从图中可以看到, $t = 0$ 时和 $t = \infty$ 的粒子交换势能面的形状有很大的不同。随

着反应过程的进行, 由于动力学形变的发展, 双核体系的势能在逐步降低。例如, 入射道的势能从 $t = 0$ 时的 -0.808 MeV 降低到 $t = \infty$ 时的 -16.392 MeV。内熔合位垒 (Inner fusion barrier) 指入射点与 BG 点之间的位能差, 该位垒对于超重核的熔合几率有重要影响。 $t = 0$ 时的内熔合位垒为 $B_{in} = 15.37$ MeV。当动力学形变得充分发展, $t = \infty$ 时, 内熔合位垒为 $B_{in} = 26.8$ MeV。可以看到, 由于动力学形变的引入, 内熔合位垒具有较明显的升高。

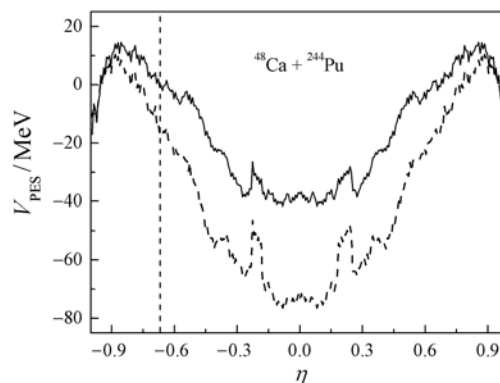


图 3 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应的粒子交换势能面
实线表示零时刻的势能面, 虚线表示 $t = \infty$ 时的势能面。

图 4 所示为 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应中 $J = 0$ 时的熔合几率随入射能的变化关系, 实线与虚线分别表示考虑动力学形变的结果与不考虑动力学形变的结果。从图中可以看到, 熔合几率随入射能的升高而增大。当入射能 $E_{c.m.} < 200$ MeV 时, 熔合几率随入射能增加较快; 当 $E_{c.m.} > 200$ MeV 之后, 其增长放缓。从考虑与不考虑动力学形变两种情况来看, 动力学形变的引入比较明显地压低了熔合几率, 当 $E_{c.m.} = 200$ MeV 时, 考虑

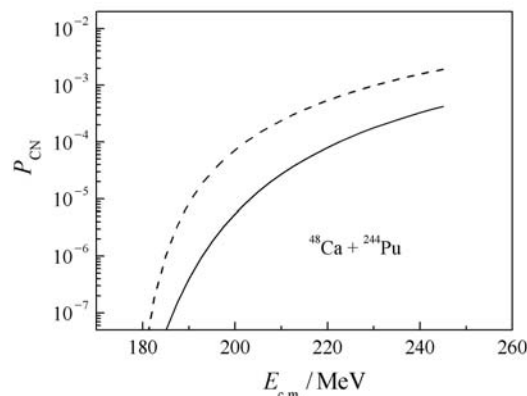


图 4 $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$ 反应中 $J = 0$ 时的熔合几率
实线与虚线分别表示考虑动力学形变的结果与不考虑动力学形变的结果。

动力学形变情况下的熔合几率比不考虑时的熔合几率小大约 1 个数量级。在更高入射能的情况下(例如 $E_{c.m.} = 220 \text{ MeV}$), 差距虽有所减小, 但也有大约 7 倍。可以看到, 动力学形变明显地影响着生成超重核的熔合几率。其原因可以从内熔合位垒等方面得到解释, 虽然考虑了动力学形变后的势能面的 BG 点高度降低了约 4 MeV, 但是由于内熔合位垒的升高(从 15.37 MeV 升高至 26.8 MeV), 熔合受到很强的抑制, 导致熔合几率降低。

4 总结

本文采用具有动力学势能面的 DNS 模型对超重核的生成机制中的一些问题进行了研究。首先, 对双核系统的粒子交换势能面进行了计算和分析, 结果显示反应过程中的原子核动力学形变对于粒子交换势能面的结构有显著的影响。进一步探索了动力学形变对熔合几率的影响。结果显示, 原子核的动力学形变导致内熔合位垒升高, 进而明显降低了生成超重核的熔合几率。

参考文献(References):

- [1] HOFMANN S, MÜNZENBERG 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. *J Phys G*, 2007, **34**: R165.
- [4] OGANESSIAN Y T, ABDULLIN F S, BAILEY P D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2010, **104**: 142502.
- [5] BJØRNHOLM S, SWIATECKI W. *Nucl Phys A*, 1982, **391**: 471.
- [6] LIU Z H, BAO J D. *Phys Rev C*, 2009, **80**: 054608.
- [7] SIWEK-WILCZYŃSKA K, CAP T, WILCZYŃSKI J. *Int J Mod Phys E*, 2010, **19**: 500.
- [8] SIWEK-WILCZYŃSKA K, CAP T, KOWAL M, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **86**: 014611.
- [9] LIU Z H, BAO J D. *Phys Rev C*, 2011, **83**: 044613.
- [10] SHEN C, KOSENKO G, ABE Y. *Phys Rev C*, 2002, **66**: 061602(R).
- [11] ZAGREBAEV V I. *Phys Rev C*, 2001, **64**: 034606.
- [12] ZAGREBAEV V I, GREINER W. *Phys Rev C*, 2008, **78**: 034610.
- [13] ADAMIAN G, ANTONENKO N, SCHEID W. *Nucl Phys A*, 1997, **618**: 176.
- [14] LI W, WANG N, LI J F, *et al.* *Europhys Lett*, 2003, **64**: 750.
- [15] LI W, WANG N, JIA F, *et al.* *J Phys G*, 2006, **32**: 1143.
- [16] GAN Z G, ZHOU X H, HUANG M H, *et al.* *Sci China: Phys Mech Astron*, 2011, **54**(s1): s61.
- [17] WANG N, TIAN J, SCHEID W, *Phys Rev C*, 2011, **84**: 061601(R).
- [18] RIEDEL C, WOLSCHIN G, NOERENBERG W. *Z Phys A*, 1979, **290**: 47.
- [19] RIEDEL C, NOERENBERG W. *Z Phys A*, 1979, **290**: 385.
- [20] WOLSCHIN G. *Phys Lett B*, 1979, **88**: 35.
- [21] HUANG M, ZHANG Z, GAN Z, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **84**: 064619.
- [22] WANG N, ZHAO E G, SCHEID W, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **85**: 041601(R).
- [23] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, JOLOS R V, *et al.* *Int J Mod Phys E*, 1996, **5**: 191.
- [24] WONG C Y. *Phys Rev Lett*, 1973, **31**: 766.
- [25] MYERS W D, SWIATECKI W J. *Nucl Phys*, 1966, **81**: 1.
- [26] GHERGHESCU R A. *Phys Rev C*, 2003, **67**: 014309.

Dynamical Deformation Effects in Fusion Reactions to Produce Superheavy Nuclei

WANG Nan^{1, 1)}, PENG Jinsong², ZHAO Enguang^{3, 4}, ZHOU Shangui^{3, 4}

(1. College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

2. Physics Department, Hechi University, Yizhou 546300, Guangxi, China;

3. State Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Some aspects in the fusion mechanism for the production of superheavy nuclei are investigated with the di-nuclear system model with dynamical potential energy surface. The calculation results about the potential energy surface indicate that the inclusion of nuclear dynamical deformation affects the structure of potential energy surface significantly. The investigation on the fusion probability to synthesize superheavy nuclei indicates that the fusion probability decreases significantly due to the increase of the inner fusion barrier for the inclusion of the nuclear dynamical deformation.

Key words: superheavy nuclei; nuclear dynamical deformation; di-nuclear system model

Received date: 25 Oct. 2012; **Revised date:** 15 Apr. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10975100, 10979066, 11275098, 11175252, 10979024, 11120101005); National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB834400); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-EW-N01, KJCX2-YW-N32); Natural Science Foundation of Guangxi Province(2011GXNSFA018140)

1) E-mail: wangnan@szu.edu.cn

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