

文章编号: 1007-4627(2003)02-0160-05

双核系统核子转移驱动势与复合核的最佳激发能*

李剑锋¹, 徐珊瑚¹, 李文飞¹, 左 维^{1,2}, 李君清^{1,2}, 王 楠³, 赵恩广^{2,3}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州, 730000;

2 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;

3 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 计算了以²⁰⁸Pb 为靶的一系列重离子熔合反应双核系统核子转移驱动势. 它制约由输运方程所支配的核子转移速率, 因而确定了双核系统形成复合核的几率. 并由此可确定形成复合核所必须的最低激发能, 即形成最稳定复合核的最佳激发能, 得到了与已知实验值基本符合的结果.

关键词: 超重核; 驱动势; 全熔合; 准裂变; 最佳激发能

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

多年来, 合成超重元素一直是核物理研究的一个热门课题. 迄今为止, 人们已经成功地合成了 100 号以上的新元素 100-112, 114, 116 等^[1-3]. 然而人们同时也发现, 随着超重核质子数继续增大, 产生截面呈指数下降, 达 pb 甚至 fb 量级. 因此理论上正确理解超重核合成机制, 为实验提供最佳弹靶组合及最佳入射动能是十分重要的. 基于这一目的, 人们已建立了几种研究超重元素合成的理论模型. 然而这些模型多建立在静力学基础上, 或仅仅部分地考虑了动力学效应. 由于超重核合成是一个动力学过程, 为了正确描述超重核合成机制, 预言超重核合成截面, 建立一个包含动力学因素的理论模型是必要的.

实验上发现, 在核-核碰撞中不同弹靶组合形成同一复合核的熔合截面随着弹核质量的增加而有越来越强的准裂变的抑制. Adamian 等^[4-7]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, 能够得到与实验比较符合的结果. 双核模型认为, 形成超重复合核要经历两个阶段: 首先弹核克服库仑位垒, 被靶核俘获形成双核系统; 然后双核系统在驱动势的影响下在弹核和靶核间转移核子, 当弹核完全转移到靶核时就形成了超重复合核. 处

于激发态的复合核通过蒸发中子或裂变退激. 因此, 弹靶的熔合过程会受到驱动势的影响. 本工作将对双核系统核子转移驱动势进行较详细的研究, 并由驱动势给出形成复合核的最佳激发能.

本文第一部分给出了描述双核系统质量转移的主方程, 第二部分对基于 Pb 靶的核子转移驱动势做了计算, 第三部分探讨了核形变对驱动势的影响, 并初步给出了基于 Pb 靶的超重复合核的最佳激发能, 最后是总结部分.

2 描述双核系统质量转移的主方程

在碰撞过程中弹核克服库仑位垒, 被靶核俘获形成双核系统, 并有核子、角动量、能量等在两核间进行转移和交换. 如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 的分布几率为 $P(A_1, E_1, t)$, 它满足主方程

$$\frac{dP(A_1, E_1, t)}{dt} = \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1} [d_{A_1} P(A'_1, E'_1, t) - d_{A'_1} P(A_1, E_1, t)], \quad (1)$$

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} 和 $d_{A'_1}$ 分别表示碎片 (A_1, E_1) 和 (A'_1, E'_1) 在宏观状态时所

收稿日期: 2003-01-25; 修改日期: 2003-03-21

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175082); 中国科学院知识创新工程重点方向性资助项目(KJXC2-N11); 中国科学院百人计划资助项目; 国家重点研究发展规划资助项目(G2000077400); 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: 李剑锋(1978-), 男(汉族), 江苏南通人, 硕士研究生, 从事核理论研究.

包含的微观状态的维度, 求和对碎片 1 的所有状态进行. E_1 为碰撞过程中双核系统之碎片 1 所获得的激发能. 跃迁几率

$$W_{A_1 A'_1} = W_{A'_1 A_1} = \frac{\tau_{\text{mem}}(A_1, E_1, A'_1, E'_1; t)}{\hbar^2 d_{A_1} d_{A'_1}} \cdot \sum_{i, i'} |\langle A'_1, E'_1, i' | V | A_1, E_1, i \rangle|^2 \quad (2)$$

可写成四项:

$$W(A_1, E_1, A'_1, E'_1) = \frac{\tau_{\text{mem}}(A_1, E_1, A'_1, E'_1; t)}{d_{A_1} d_{A'_1}} \cdot \{ [\omega_{11}(A_1, E_1, E'_1) + \omega_{22}(A_1, E_1, E'_1)] \delta_{A'_1, A_1} + \omega_{12}(A_1, E_1, E'_1) \delta_{A'_1, A_1-1} + \omega_{12}(A_1, E_1, E'_1) \delta_{A'_1, A_1+1} \}. \quad (3)$$

假定在 $A'_1 \approx A_1 \pm 1$, 即每次只有一个核子转移且 $W_{A_1 A'_1}$ 对 $A'_1 = A_1 \pm 1$ 对称时, 跃迁几率才不为零. 为了理解驱动势对核子转移的影响, 可以把 A'_1 和 A_1 处理为连续变量, 在 $A'_1 = A_1$ 附近将分布几率和跃迁几率做泰勒展开, 只取到 $(A'_1 - A_1)$ 的二次项. 化简后可得到 Fokker-Planck (F-P) 方程:

$$\frac{dP(Z_1, N_1, E_1, t)}{dt} = - \frac{\partial(V_N P(Z_1, N_1, E_1, t))}{\partial N_1} + D_{\text{NN}} \frac{\partial^2 P(Z_1, N_1, E_1, t)}{\partial N_1^2} - \frac{\partial(V_Z P(Z_1, N_1, E_1, t))}{\partial Z_1} + D_{\text{ZZ}} \frac{\partial^2 P(Z_1, N_1, E_1, t)}{\partial Z_1^2}, \quad (4)$$

式中, $P(Z_1, N_1, E_1, t)$ 为分布函数, D_{NN} 和 D_{ZZ} 分别为中子和质子扩散系数. 因为微观研究表明, D_{NN} 和 D_{ZZ} 是随质量不对称性的慢变化函数, 故取为与变量 N_1, Z_1 无关的常数. 取 $D_{\text{NZ}} = D_{\text{ZN}} = 0$, 因为在反应过程中同位旋守恒, 中子质子之间不转换. E_1 为碰撞过程中双核系统之碎片 1 所获得的激发能, 在(4)式中它作为参数处理^[8]. 弹核质子数为 Z_1 和中子数为 N_1 的宏观状态下的能级密度为

$$\rho(Z_1, N_1) \propto \exp\left[\frac{E_1 - U(Z_1, N_1)}{T}\right]. \quad (5)$$

由漂移系数定义可有

$$V(x, t) = D \frac{\partial}{\partial x} \ln \rho(x), \quad x = (Z_1, N_1), \quad (6)$$

则有

$$V_N(Z_1, N_1, t) = - \frac{D_{\text{NN}}}{T} \frac{\partial U(Z_1, N_1)}{\partial N_1}, \quad V_Z(Z_1, N_1, t) = - \frac{D_{\text{ZZ}}}{T} \frac{\partial U(Z_1, N_1)}{\partial Z_1}, \quad (7)$$

式中

$$U(Z_1, N_1) = V(Z_1, N_1) - \frac{(l-M)^2}{2J_{\text{rel}}} - \frac{M^2}{2J_{\text{int}}} \quad (8)$$

称为核子转移驱动势, 可见驱动势直接影响弹靶核子转移速率. (8)式中, l 和 J_{rel} 分别为双核系统相对运动角动量和转动惯量; M 和 J_{int} 分别为系统内禀角动量和内禀转动惯量;

$$V(Z_1, N_1) = V_{\text{LD}}(Z_1, N_1) + V_{\text{LD}}(Z_2, N_2) - V_{\text{LD}}(Z, N) + U_C(Z_1, N_1) + U_N(Z_1, N_1), \quad (9)$$

式中 V_{LD} 为液滴能, 其中包含了壳修正和对修正, U_C 为相接触的两碎片之间的库仑相互作用能:

$$U_C(Z_1, N_1) = \frac{1.44 Z_1 Z_2}{R} \text{ MeV}, \quad R = 0.5 + 1.36(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \text{ fm}, \quad (10)$$

U_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^[7]:

$$U_N(Z_1, N_1) = D \left\{ \exp\left[-2\alpha \frac{R - R_0}{R_0}\right] - 2 \exp\left[-\alpha \frac{R - R_0}{R_0}\right] \right\}, \quad (11)$$

式中, $D = 2\pi a_1 a_2 R_{12} (10.96 - 0.8R_{12}) \text{ MeV}$ 为势阱深度, $R_0 = R_1 + R_2 = r_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ 为双核最接近距离, $\alpha = 11.47 + 2.069R_{12} - 17.32a_1 a_2$ (无量纲) 为势阱宽度倒数, R_1 和 R_2 分别为两碎片核半径, $R_{12} = R_1 R_2 / R_0$, 核半径参数 $r_0 = 1.15$, 势弥散宽度系数 $a_1, a_2 = 0.54 - 0.59 \text{ fm}$.

3 双核系统相应于质量不对称性的驱动势

图 1 给出了碰撞系统 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势与质量不对称度 $\eta = (A_1 - A_2) / (A_1 + A_2)$ 的关系. 计算中没有考虑原子核的基态形变. 图中箭头所指处是入射点, 其质量不对称性度 $\eta = -0.496$. 由图可见, 双核系统若通过核子转移形成复合核(这时 $\eta = -1.0$), 必须越过一个 $B_{\text{ins}}^* = 20.25 \text{ MeV}$ 的位垒, 称为内部熔合位垒. 在经典近似下, 反应体系的激

发能必须能够克服内部熔合位垒时,才能够形成熔合核.若选取入射动能使得双核系统刚好克服内部熔合位垒 B_{in}^* ,则所形成的全熔合核的激发能是最低的,从而有更大的存活几率,因此将这一激发能称为最佳激发能 E_{CN}^* ,即为驱动势的峰值能量.对于碰撞系统 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$,由图可见 $E_{CN}^* = 32.23 \text{ MeV}$.由最佳激发能可进一步得到质心系最佳入射动能 $E_{cm} = E_{CN}^* - Q$.在计及核形变的情况下,上述能量要下降一些,详细讨论见第 4 部分.

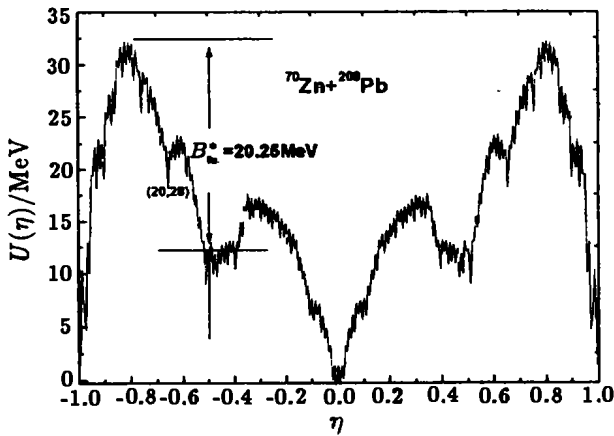


图 1 碰撞系统 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势

另外,由图 1 可见入射质量不对称性度 $|\eta|$ 越大的弹靶组合,需要克服的内部熔合位垒越小,因而越有利于形成全熔合核.特别是当 $|\eta|$ 选在内部熔合位垒的最高点 ($B_{in}^* = 0$) 或更大时,内部熔合位垒为零,入射弹核不需要克服内部熔合位垒就可被靶核吞掉形成复合核.问题是要能够找到合适的弹核与靶核材料,当然靶核首先必须是稳定核.由图可见驱动势能面的形状是比较复杂的;壳效应使势

能面有很大的起伏.图中 (20, 28) 相应于 $A_1 (Z_1 = 20, N_1 = 28) = 48, \eta = -0.655$,此时由于 A_1 是双满壳结构,从而使位能面降低很多.

图 2 给出的是形成复合核 ^{246}Fm 的驱动势随质量不对称性度的关系.从图 2 可以形象地看出,弹核越重,入射体系质量不对称性度 $|\eta|$ 越小,需要克服的内部熔合位垒越大,从而受准裂变的抑制越强,越难形成复合核.这与 A. C. Berriman 等人的实验结论是一致的.

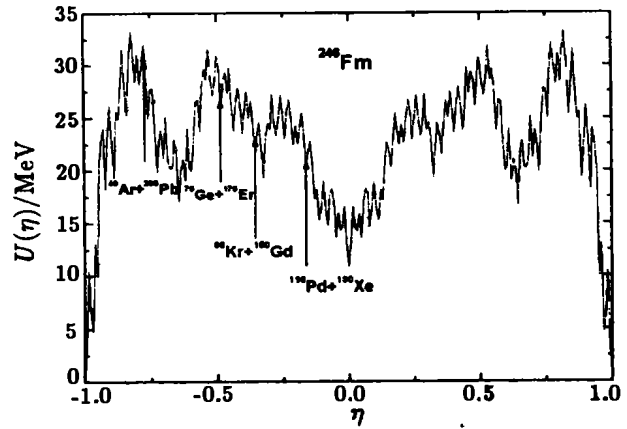


图 2 不同弹靶组合合成同一复合核 ^{246}Fm 的驱动势

图 3(a) 给出了碰撞系统 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 的对应于驱动势中峰值点处的双核系统 ($A_1 = A_{BC} = 25, A_2 = 237$) 的弹靶相互作用势与两核中心之间距离 R 的关系,图 3(b) 则对应于对称双核系统 ($A_1 = A_2 = 131$) 情况.为了简化结论,我们没有考虑双核的基态形变.我们发现:在 $A_1 = A_{BC}$ 点,熔合势垒内会出现一个袋,系统陷入口袋内,有足够的时间进行调整,从而易发生熔合反应.而在 $A_1 = (A_p + A_t) / 2$

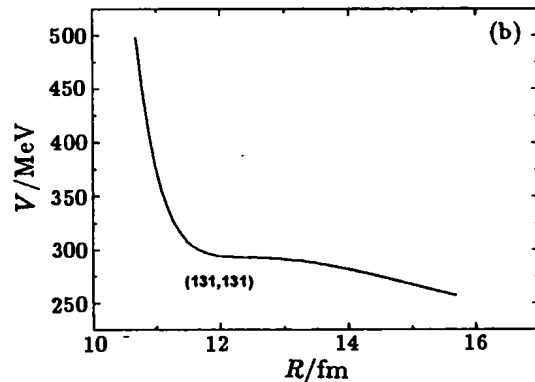
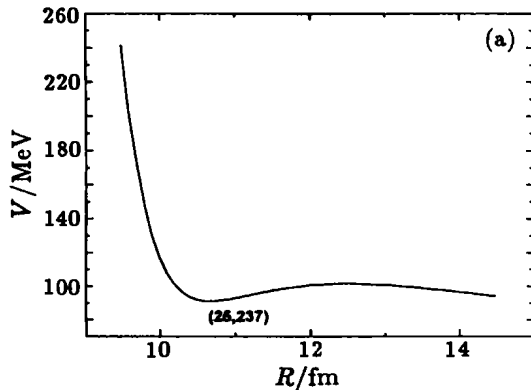


图 3 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 相对 $|\eta|$ 的驱动势中最高点和对称点的 $V(R)$ 与 R 的函数关系

点, 熔合势垒内会没有明显的袋, 双核系统从入射道的熔合谷直接进入出射道的裂变谷, 不再经过复合核阶段, 因而更易发生准裂变. 即入射体系弹靶质量越对称, 越容易发生准裂变. 这和 A. C. Berri-man 等人的实验结论是相符的.

4 核形变与最佳激发能

在双核模型中, 两个核都可能具有基态形变, 有些是长椭球状, 有些为扁椭球状. 假定核物质是不可压缩的, 形变中体积不变, 我们仅考虑四极形变, 则变形核的表面在球坐标中的表达式为

$$R(\theta) = R_0[1 + \beta_2 Y_{20}(\theta)],$$

其中, 球谐函数 $Y_{20} = \sqrt{5/4\pi}(3\cos^2\theta - 1)/2$, R_0 为同体积的球形核的半径. 此时双核间的库仑能和核能的表达式将是多重积分的形式, 必须做数值积分. 结果表明, 考虑基态形变后双核间的库仑能和核能都会下降, 此时双核系统的驱动势会整体下降. 与图 1 相比较, 图 4 给出的是考虑形变后的结果.

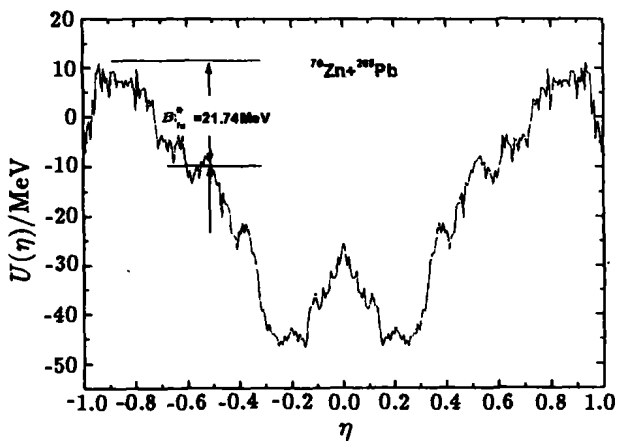


图 4 碰撞系统 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ 考虑形变后的驱动势

可见对 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ 系统, 形变使最佳激发能由 32.23 MeV 变为 11 MeV, 从而会使超重复合核有更大的存活几率.

表 1 给出了考虑核形变后基于 Pb 靶的最佳激发能, 其中最后一列是部分实验结果^[9]. 可见理论计算值与实验值符合较好.

表 1 考虑核形变后基于 Pb 靶的最佳激发能的计算结果及与实验结果的比较

| 反应系统 | $E_{\text{CN}}^{\text{th}}/\text{MeV}$ | $E_{\text{CN}}^{\text{exp}}/\text{MeV}$ |
|--|--|---|
| $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{293}118 + 1\text{n}$ | 14.7 | |
| $^{82}\text{Se} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{289}116 + 1\text{n}$ | 14.3 | |
| $^{74}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{281}114 + 1\text{n}$ | 12.0 | |
| $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{277}112 + 1\text{n}$ | 11.0 | 10.07 |
| $^{62}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{269}110 + 1\text{n}$ | 13.2 | 13.24 |
| $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{265}108 + 1\text{n}$ | 13.9 | 13.16 |
| $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{261}106 + 1\text{n}$ | 16.1 | 16.38 |
| $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{257}104 + 1\text{n}$ | 15.3 | 15.48 |
| $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{255}102 + 1\text{n}$ | 16.5 | 16.70 |

5 总结

总之, 本文基于双核模型图像, 简单地描述了超重复合核的形成过程, 给出了描述双核系统质量转移的主方程. 计算了基于 Pb 靶的核子转移驱动势, 并讨论了核形变对驱动势的影响. 结果表明, 核形变可以使驱动势整体减小并使最佳激发能降低, 从而提高超重复合核的存活几率. 另外, 由驱动势给出的最佳激发能与实验符合较好, 这为计算超重核截面奠定了可靠的理论基础. 进一步的工作正在进行之中.

参 考 文 献:

- [1] Hofmann S. New Elements-approaching $Z=114$ [J]. Rep Prog Phys, 1998, 61: 639.
- [2] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, et al. Synthesis of Superheavy Nuclei in the $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ Reaction; $^{288}114$ [J]. Phys Rev, 2000, C62: 041604.
- [3] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, et al. Observation of the Decay of $^{292}116$ [J]. Phys Rev, 2001, C63: 011301.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Model of Competition between Fusion and Quasifission in Reactions with Heavy Nuclei[J]. Nucl Phys, 1997, **A618**: 176.
- [8] Li J Q, Wolschin G. Induced Nuclear Fission Viewed as a Diffusion Process; Transients[J]. Phys Rev, 1983, **C27**: 590.
- [9] Robert Smolanczuk. Production Mechanism of Superheavy Nuclei in Cold Fusion Reactions [J]. Phys Rev, 1999, **C59**: 2 634.

Nucleon Transfer Driven Potential and the Optimum Excitation Energy of Compound Nucleus Formed in Dinuclear Systems*

LI Jian-feng¹, XU Hu-shan¹, LI Wen-fei¹, ZUO Wei^{1,2},
LI Jun-qing^{1,2}, WANG Nan³, ZHAO En-guang^{1,3}

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

2 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion*

Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: Particle transfer driven potentials in Di-nuclear System (DNS) in heavy ion collisions based on ²⁰⁸Pb target are calculated. The driven potential controls the particle transfer velocity in the process governed by the diffusion equation, and as a consequence determines the compound nuclear formation probability of DNS. The minimum excitation energy to form a compound nucleus, which is the optimum excitation energy to form the most stable compound nucleus, has been calculated, and the results are basically in agreement with the known experimental data.

Key words: super-heavy nucleus; driven potential; complete fusion; quasifission; optimum excitation energy

重要更正: 第 20 卷第 1 期文章“利用 SLEGS 开展夸克和胶子层次上的核物理研究”(作者石宗仁等)(第 21 页)图 3 中右下的箭头“←—”应为“—→”。

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10175082); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJ CX2-SW-N02); One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; Major State Basic Research Development Program in China(G2000077400); Fund of Major Prophase Research Project of Fundamental Research of the Ministry of Science and Technology