

双核系统核子交换势能面*

李剑峰 徐珊珊 李文飞 左维 李君清

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

王楠 赵恩广

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 实验证实,用重离子碰撞合成超重原子核时,准裂变对熔合的抑制是非常重要的.碰撞中双核系统间核子转移所形成的势能面称之为驱动势,它制约核子转移,因而决定熔合与准裂变的竞争.双核系统势能面还提供重离子碰撞合成超重原子核的最佳激发能和最佳弹靶组合的信息.

关键词 超重核 驱动势 最佳弹靶组合 最佳激发能

1 引言

自从原子核理论预言了超重元素稳定岛的存在以来,迄今人们已在实验室人工合成了 100 号元素以上的新元素 14 个,证实了这个理论预言的正确性^[1-4].这更进一步地激励了在实验上和理论上对超重元素的合成与性质的研究热情.由于超重元素的形成截面非常小,可低至 10^{-12} b 到 10^{-15} b,所测到的激发函数也非常窄,在理论上正确理解合成机制,从而对超重核形成截面给出可靠的预言,以找出实验上合成超重元素的最佳条件,最佳弹靶组合与最佳轰击能等,是非常重要的.现有的研究超重核形成截面的理论多建立在静力学基础之上,比较全面,但能与实验符合很好的熔合动力学模型尚未建立成功.

最近 Berriman^[5]等在实验上证实,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.实验提供了一个核-核碰撞在接触相的双核系统核子转移图像:弹核克服了库仑位垒和离心位垒,与靶核接触而形成双核系统,在弹靶之间开始大量的核子交换.由较轻的弹核向靶核有接连的核子转移,最后弹核可能被靶核吃掉而生成处于激发态的超重

全熔核.而由较重的靶核向弹核转移核子,则使系统达到不稳定的形状组态而导致准裂变.

Adamian 等人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^[6-9].在他们的工作中蒸发剩余截面被定义为^[10]:

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{cm}}) = \pi\lambda^2 \sum_{J=0}^{J_l} (2J+1) \times T(E_{\text{cm}}, J) P_{\text{cn}}(E_{\text{cm}}, J) W_{\text{sur}}(E_{\text{cm}}, J), \quad (1)$$

式中, λ 为碰撞核系统相对运动的德布洛依波长, E_{cm} 是质心系轰击能, $T(E_{\text{cm}}, J)$ 是第 J 个分波越过入射道位垒(库仑和离心)的穿透系数.由于角动量分波受存活几率 W_{sur} (一个中子发射) $\approx \Gamma_n/\Gamma_l$ 的限制,随角动量的增加复合核的裂变位垒很快为零, J_l 是复合核裂变位垒为零时的角动量,对导致超重核的反应,对靠近库仑位垒的 E_{cm} ,取 $J_l \approx 10$, $T(E_{\text{cm}}, J=0) = 0.5$. P_{cn} 为熔合几率.系统达到双核组态时,相对运动动能转换成势能和激发能,双核系统的演化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. P_{in} 是双核系统越过对 η 的内

2002-01-22 收稿

* 国家自然科学基金(10175082),中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJXC2-SW-N02),中国科学院百人计划经费,国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)及科技部基础研究重大项目前期研究专项基金资助

部熔合位垒 B_7^{fm} 并形成复合核的几率. 它或是由统计的方法得到^{6-8,10}, 或是由 Fokker-Planck 的高斯近似解, 或由 Kramers 类型的准稳态解⁹ 得到, 但 Adamian 等人没有用完全的动力学方法. 用统计方法或用 F-P 方程的高斯近似解都必须对双核系统相对于质量不对称性自由度的势能面作谐振子近似, 这点并非总能与实际情况符合, 因而带来比较大的误差. Kramers 类型的准稳态解和统计方法还假定 P_m 与时间无关, 也只是近似. 另外, 他们的工作没有考虑碰撞系统的相对运动动力学过程, 没有由动力学计算提供对应于不同角动量分波下允许核子交换的有效相互作用时间, 以及角动量耗散时复合系统的激发能. 他们的计算中, 激发能取自轰击能与反应 Q 值的代数和, 转动能被忽略掉了. 相互作用时间也是近似估计的. 因此, 该方法还有发展必要.

2 描述双核系统质量转移的 Fokker-Planck 方程

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, 2 的质量数分别是 A_1, A_2 , 总质量数 $A = A_1 + A_2$, 质子中子数分别为 Z_1, Z_2 和 N_1, N_2 . 设在 t 时刻碎片 1 的分布几率为 $P(Z_1, N_1, E_1, t)$, 它随时间的变化满足如下的 Fokker-Planck (F-P) 方程¹¹⁻¹⁵:

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

式中, 分布函数 $P(Z_1, N_1, E_1, t)$ 的中子和质子扩散系数 D_{NN}, D_{ZZ} 取为与变量 N_1, Z_1 无关的常数. 因为微观研究表明¹², 它们是随质量不对称性的慢变化函数. 因为在反应过程中同位旋守恒, 中子和质子之间不转换, 所以取 $D_{NZ} = D_{ZN} = 0$, E_1 为碰撞过程中双核系统中碎片 1 所获得的激发能, 在(2)式中它作为参数处理¹⁶. 类弹核(碎片 1)的能级密度为

$$\rho(Z_1, N_1) \propto \exp\left[\frac{E_1 - U(Z_1, N_1)}{T}\right], \quad (3)$$

由漂移系数定义

$$V(x, t) = D \frac{\partial}{\partial x} \ln \rho(x) \quad x = (Z_1, N_1), \quad (4)$$

$$\text{则: } V_N(Z_1, N_1, t) = - \frac{D_{NN}}{T} \frac{\partial U(Z_1, N_1)}{\partial N_1}, \quad (5)$$

$$V_Z(Z_1, N_1, t) = - \frac{D_{ZZ}}{T} \frac{\partial U(Z_1, N_1)}{\partial Z_1}, \quad (6)$$

分别为中子或质子数的平均值移动的速度, 它分别正比于 $U(Z_1, N_1)$ 对类弹核中子数和质子数的导数, 因此 $U(Z_1, N_1)$ 为中子和质子扩散的驱动势:

$$U(Z_1, N_1) = V(Z_1, N_1) - \frac{(l - M)^2}{2J_{rel}} - \frac{M^2}{2J_{int}}, \quad (7)$$

式中, l, J_{rel} 分别为双核系统相对运动角动量和转动惯量, M, J_{int} 分别为系统内禀角动量和内禀转动惯量.

$$\begin{aligned} V(Z_1, N_1) = & V_{LD}(Z_1, N_1) + V_{LD}(Z_2, N_2) - \\ & V_{LD}(Z, N) + U_c(Z_1, N_1) + \\ & U_N(Z_1, N_1), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 V_{LD} 为液滴能, 其中包含了壳修正和对修正¹⁷. U_c 为相接触的两碎片之间的库仑相互作用能:

$$U_c(Z_1, N_1) = \frac{1.44 Z_1 Z_2}{R} \text{MeV}, \quad (9)$$

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

U_N 为相接触的两碎片之间的核相互作用能, 若取作亲近势, 则有

$$U_N(Z_1, N_1) = \alpha_N \frac{A_1^{1/3} A_2^{1/3}}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}, \quad (10)$$

$$\alpha_N = -15.2 \text{MeV}.$$

若取出 Morse 势参数化的双折叠势⁹:

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

式中, $D = 2\pi a_1 a_2 R_{12} (10.96 - 0.8 R_{12}) \text{MeV}$ 为势阱深度, $R_0 = R_1 + R_2 = r_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ 为双核最接近距离, $\alpha = 11.47 + 2.069 R_{12} - 17.32 a_1 a_2$ (无量纲) 为势阱宽度倒数. R_1, 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 $a = 0.54 - 0.56 \text{fm}$. 这里两核半径及双核之间的距离都是随着质量数的变化而变化的, 因此不取作独立变量.

此驱动势 $U(Z_1, N_1)$ 大体上在 N_1/Z_1 等于复合系统的中质比 $(N_1 + N_2)/(Z_1 + Z_2)$ 处有个谷, 如果

相碰撞的两个核不等于这个复合系统的中质比,将发生质子和中子的扩散. 仅当驱动势是变量 $A_1 = \{Z_1, N_1\}$ 的一次方或二次方函数时动力学 F-P 方程才有高斯型的解析解, 否则只有数值解, 这时可能数值方法解相应的主方程更方便. 为了了解动力学解的性质, 我们首先研究驱动势的性质.

3 双核系统相应于质量不对称性的驱动势

图 1 中给出了碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势与质量不对称性坐标 $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ 的关系. 箭头所指处是初始入射系统的质量不对称性度 $\eta = -0.387$. 由图可见, 双核系统若通过核子转移形成复合核 (对应 $\eta = -1.0$), 得越过一个 $B_\eta^{\text{fus}} = 30.31\text{MeV}$ 的内部熔合位垒. 这可由激发能供给. 由入射点 ($A_1 = A_p = 92, A_2 = A_t = 208$) 起质量不对称性度向两边移动时, 对确定的类弹质量数 A_1 , 其质子数和中子数的选取可假定系统很快趋于中质比平衡, 即很快趋于总系统中质比来确定. 如果从入射点 $A_1 = A_p, A_1$ 每增加或减少一个核子, 由势能面较低来确定这个核子是中子或质子, 得到的驱动势与前者基本相同, 说明对称能在相互作用驱动势中起了很重要的作用, 本文的计算采用的是后一种方法.

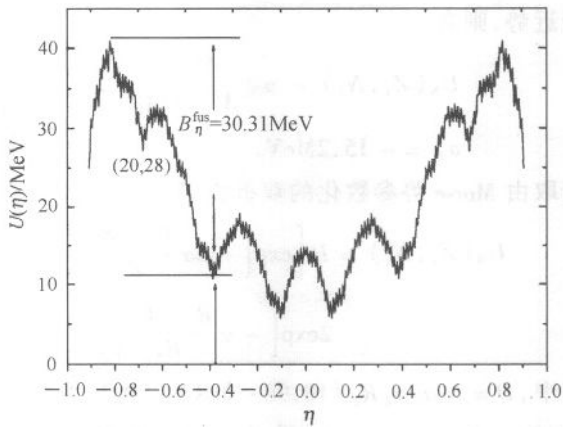


图 1 核相互作用取参数化折叠势时碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势

在冷熔合反应中确定系统最佳激发能, 因而确定最佳入射动能是非常重要的. 由驱动势可确定此值. 图中下面箭头所指入射点处的驱动势值 $U(\eta_i(Z_p, N_p))$ 是初始时刻双核系统两核接触时的能量, 为形成全熔核还必须克服内部熔合位垒 B_η^{fus} . 所以此反应道形成全熔核的最佳激发能为 $E_{\text{cm}}^* =$

$U(\eta_i(Z_p, N_p)) + B_\eta^{\text{fus}} \approx 40\text{MeV}$, 最佳入射动能 $E_{\text{cm}} = E_{\text{cm}}^* - Q$. 在计及核形变的情况下, 上述能量还要下降一些.

由图 1 可见, 入射质量不对称性度 $|\eta_i|$ 越大的弹靶组合, 需要克服的内部熔合位垒越小, 越有利于形成全熔核. 特别当 $|\eta_i|$ 选在内部熔合位垒的最高点 ($B_\eta^{\text{fus}} = 0$) 或更大时, 内部熔合位垒为零, 碰撞弹核将立即被靶核吞掉形成复合核. 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 $A_1 (Z_1 = 20, N_1 = 28) = 48, \eta = -0.68$, 此时由于 A_1 的双满壳而使位能面降低很多. 对势能面作谐振子近似以得到 F-P 方程的解析解显然会带来比较大的误差, 因此应该求数值精确解. 实际上, 数值求解主方程比之数值求解 F-P 方程更为方便.

图 2 给出了碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势与质量不对称性坐标 η 的关系, 但其中核相互作用用了亲近势公式 (10) 计算. 可见亲近势给出了过强的相互作用, 因而预言了过大的熔合位垒高度 $B_\eta^{\text{fus}} = 62.45\text{MeV}$ 并因此预言了过大的最佳轰击能.

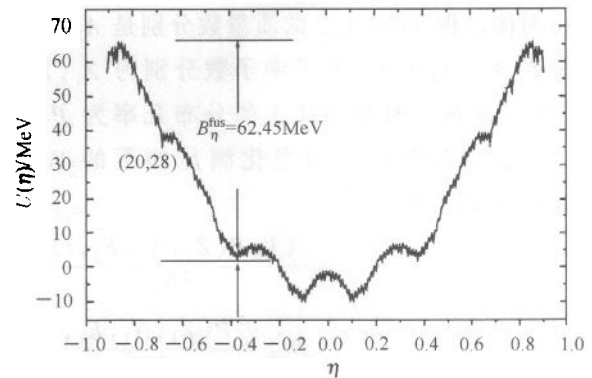


图 2 核相互作用取亲近势时碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势

图 3 中给出了势能面在可能的中子、质子区域的分布等高图. 箭头所指的地方是碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的入射点势能, 最左下方的点是全熔核势能, 它等于零, 因为由 (7), (8) 式, 势能是以全熔核能量为零点的. 沿固定中质比相当于从入射点到全熔核点的直线路径, 图中这两点之间的 5 个点是沿图 1 中的曲线选的. 可见它基本上是按固定中质比沿等位面的低谷走的, 并在谷中越过一个位垒. 低谷两面的位能逐渐升高, 丰质子边上升的更为陡峭. 实际计算的势能数值是越到边缘越高. 图中在两边边缘所显示的低位能是作图程序力图数据过渡光滑

化所致,不是真实计算结果.

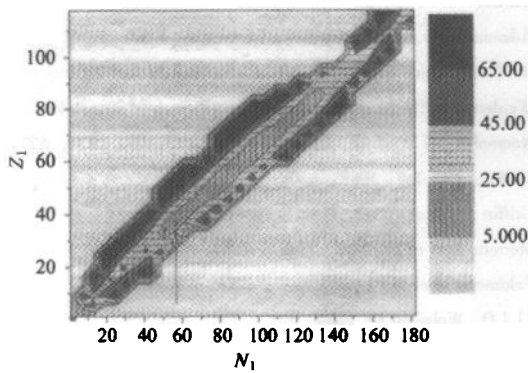


图 3 核相互作用取参数化折叠势时碰撞系统 $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 的驱动势

图 4 中给出了碰撞系统 $^{26}\text{Mg} + ^{243}\text{Am}$ 生成 107 号核素的驱动势与质量不对称性坐标 $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ 的关系. 箭头所指处是入射点的质量不对称性 $\eta = -0.81$. 可见如果选这个系统生成 107 号元素或核素, 内部熔合位垒为零. 只要入射离子能量能克服库仑与离心位垒与靶核接触, 可立刻形成复合核. 我所将在实验上研究 107 号新超重核素的合成及有关性质, 我们的计算表明 $^{26}\text{Mg} + ^{243}\text{Am}$ 是合成 107 号核素的最佳弹靶组合, 具有最大的熔合几率. 由图可见最佳激发能为 37MeV, 与 GSI 实验组应用程序所预言的一致.

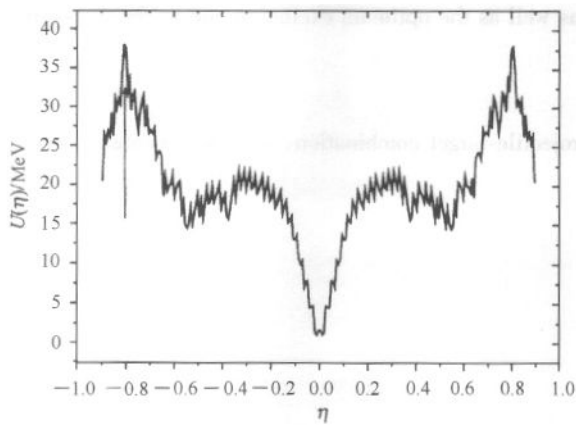


图 4 核相互作用取了参数化折叠势时碰撞系统 $^{26}\text{Mg} + ^{243}\text{Am}$ 的驱动势

解(1)式可得到碎片 1 的质量数取某一数值时的几率. 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

$$P_{\text{cn}} = \sum_J \int_{A_{\text{BC}}}^{\infty} P(A_1, E_1(J), t(J)) dA_1, \quad (12)$$

A_{BC} 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, 就不可避免地要形成复合核, 这一部分工作我们将另文发表.

4 讨论

两个重离子碰撞形成超重核的几率决定于弹核越过库仑位垒和离心位垒接近靶核形成双核系统的几率、双核系统通过核子转移越过内部熔合位垒形成全熔核而不发生准裂变的几率、以及处于激发态的全熔核通过蒸发中子和裂变而衰变的几率. 其中第二部分的核子转移应由解动力学的扩散输运 F-P 方程描述. 关于双核系统质量不对称自由度的势能面是核子转移的驱动势, 因此正确地计算驱动势是十分重要的, 它保证能正确计算由于核子扩散不致发生准裂变而形成全熔核的几率, 并提供最佳弹靶组合、最佳轰击能的信息. 我们的计算表明, 沿较低的能量逐一转移质子或中子, 确能保证核子转移沿等位面最低谷进行, 且基本沿复合系统中质比走. 亲近势给出了过大的内部熔合位垒高度, 因而预言了过大的最佳激发能. 而由 Morse 势参数化双折叠式计算的核核相互作用势预言的最佳激发能更接近已有的实验值, 但必须考虑核形变. 同时驱动势的形式可直观地提供碎片质量分布函数的形式. 我们的计算结果表明, 谐振子势近似解与真实势的解是相差颇远的, 数值解动力学方程是必须的. 对关于双核系统质量不对称自由度的势能面的描述是否正确, 在于由它所计算的复合核形成几率是否与实验结果相符合.

参考文献 (References)

- 1 Hofmann S. Rep. Prog. Phys., 1988, **61**:639—689
- 2 Oganessian Yu Ts et al. Nature, 1999, **400**:242—245
- 3 Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2000, **C62**:041604
- 4 Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2000, **C63**:011301
- 5 Berriman A C, Hinde D J, Dasgupta M et al. Nature, 2001, **413**:144
- 6 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Nucl. Phys., 2000, **A678**:24—38
- 7 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W et al. Nucl. Phys., 1997, **A627**:361—378
- 8 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W et al. Nucl. Phys., 1998, **A633**:409—420
- 9 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Nucl. Phys., 1997, **A618**:176—198
- 10 Adamian G G, Antonenko N V, Cherepanov E A et al. A talk given at the Exon-Conference at Baikal-lake (Siberia) in July 2001
- 11 Weidenmuller H A. Prog. Part. Nucl. Phys., 1980, **3**:49
- 12 Noerenberg W et al. Z. Phys., 1976, **A277**:299; 1976, **A279**:145; 1978, **A286**:263; 1982, **A308**:315
- 13 Griffin J J et al. Nucl. Phys., 1984, **A248**:145c
- 14 Morretto L G et al. Nucl. Phys., 1984, **A248**:173c
- 15 Feldmeier H et al. Nucl. Phys., 1984, **A248**:223c
- 16 Li J Q, Wolschin G. Phys. Rev., 1983, **C27**:590
- 17 Myers W D et al. LBL-Report, 1965, UCRL-11980

Potential Energy Surfaces for Nucleon Exchanging in Dinuclear Systems

LI Jian-Feng XU Hu-Shan LI Wen-Fei ZUO Wei LI Jun-Qing

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

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

WANG Nan ZHAO En-Guang

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

Abstract The experimental measurements have provided the evidence that the suppression of fusion cross-section caused by quasi-fission is very important for the synthesis of super-heavy nuclei by heavy ion collisions. The potential energy surface due to the nucleon transfer in the collision process is the driven potential, which governs the nucleon transfer, so that governs the competition between the fusion and quasi-fission. The dinuclear system potential energy surface also gives the information about the optimum projectile-target combination, as well as the optimum excitation energy for the synthesis of super-heavy nuclei by heavy ion collisions.

Key words super-heavy nucleus, driven potential, optimum projectile-target combination, optimum excitation energy

Received 22 January 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10175082), CAS Knowledge Innovation Project (KJ92-SW-N02), One Hundred Person Project of USA, Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and the fund of Major Prophase Research Project of fundamental research of the Ministry of Science and Technology.