

文章编号: 1007-4627(2003)02-0091-05

超重核合成截面计算中几个问题的探讨*

刘祖华

(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;
中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 讨论了超重核形成截面计算中的耦合道效应、壳效应的阻尼效应、能级密度的集体运动增强因子以及蒸发残余核的自旋分布等几个重要问题, 并给出相应的实验结果. 因这些因素都可能对截面有数量级的影响, 正确处理与否直接关系到超重核合成截面理论预言的可靠性.

关键词: 超重核合成; 耦合道效应; 壳效应的阻尼效应; 集体运动增强因子

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

因受到新实验结果的鼓舞, 近年来对超重核合成的兴趣大增. 合成新的超重元素也是我国核物理界追求的重大目标, 且这方面的研究工作已经起步. 合成超重核的实验需要理论的密切配合. 特别是在选择有利的反应系统、反应能量等方面需要作理论计算和预言. 虽然近年来作了大量的理论研究, 发表了大批文章, 对重核融合过程的复杂动力学作精确的定量分析仍然十分困难. 因而理论和实验两方面仍需要作更深入的研究. 本文将就超重核合成截面计算中几个值得关注的问题进行探讨.

两重核 A_1, A_2 熔合成处于激发态的复合核 C , 然后蒸发轻粒子 n, p, α 和发射 γ , 最后形成冷的蒸发余核 B , 这一过程可写成 $A_1 + A_2 \rightarrow C \rightarrow B + n, p, \alpha, \gamma$. 其截面为

$$\sigma_{ER}^{A_1+A_2 \rightarrow B}(E) \approx \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} \sum_{l=0}^l (2l+1) T(E, l) \cdot P_{CN}(A_1 + A_2 \rightarrow C; E, l) \cdot P_{ER}(C \rightarrow B; E^*, l), \quad (1)$$

其中, 下标 ER 表示蒸发残余, E 为质心能量, E^* 是复合核 C 的激发能, μ 为反应系统的约化质量, l 为入射道的轨道角动量, $T(E, l)$ 是碰撞核穿越入射道势垒的几率. 穿越入射道势垒后, 反应系统到达了核相接触的组态. 由此组态出发, 逐渐演化

为球形或接近球形的单一复合核 C , 其几率为 P_{CN} . 而 P_{ER} 描写复合核 C 在衰变过程中形成蒸发余核 B 的几率.

方程(1)是对复合核形成和衰变的一种近似描述. 在这一近似下, 整个反应过程分成三个独立的阶段: (1) 碰撞核从彼此相距无穷远到相互接触, $R_1 + R_2 \leq r \leq \infty$; (2) 形成单一的复合核 $A_1 + A_2 \rightarrow C$; (3) 复合核 C 衰变(冷却). 虽然这三个阶段为相互关联, 但分成相对独立的三个阶段的依据首先是各个阶段所经历的时标有很大差别. 第一阶段经历的时间约 10^{-21} s, 而最后阶段的中子发射的特征时间至少长两个数量级, 即约 10^{-19} s. 中间阶段, 即复合核形成阶段不是完全独立的过程, 它与初始和最后反应阶段密切相关, 特别是在这个阶段中, 预平衡轻粒子发射进一步使复合核形成阶段变得相当复杂. 然而, 这一阶段的开始和终结在组态空间中还是有较明确的定义, 因而在截面计算中, 用 P_{CN} 描写复合核形成阶段有其合理性.

2 俘获截面

俘获截面可写为

$$\sigma_c(E) \approx \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T(E, l). \quad (2)$$

收稿日期: 2002 - 12 - 24

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000077406); 国家自然科学基金资助项目(10275092, 10275095, 10235030)

作者简介: 刘祖华(1940—), 男(汉族), 浙江舟山人, 研究员, 从事原子核实验研究.

重离子熔合的位置穿透因子 $T(E, l)$ 不仅决定库仑位垒的高度和宽度, 而且强烈地依赖于相对运动和内部自由度的耦合, 导致垒下熔合截面显著增强。

俘获截面 $\sigma_c(E)$ 增加。除碰撞核的静态形变、转动和振动激发外, 相互趋近过程中还会发生核子转移及各种各样的动态形变, 包括颈形成等。与这些自由度的耦合也会使重离子垒下熔合截面增强。核子转移和动态形变对垒下熔合截面的影响至今尚未有精确的理论处理, 因而需要在实验和理论上进行进一步的研究。

总之, 在超重核合成截面计算中, 俘获截面的耦合道效应是需要认真考虑的重要方面。

图 1(a) 显示 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 的近垒和垒下熔合激发函数^[1]。 ^{232}Th 是个形变核, $\beta_2 = 0.22$ 。图中的虚线是一维量子力学位垒穿透(BMP)计算结果, 实线是 Wang 模型^[2] 计算结果。在这一计算中考虑了靶核 ^{232}Th 的静态形变。由图可见, 考虑靶核形变的 Wang 模型较满意地描写了实验结果。图 1(b) 是 Wang 模型预言值与 BMP 计算值之比, 即俘获截面增强因子。由图可见, 在垒下能区, 靶核形变引起的俘获几率增强 2 至 3 个数量级。

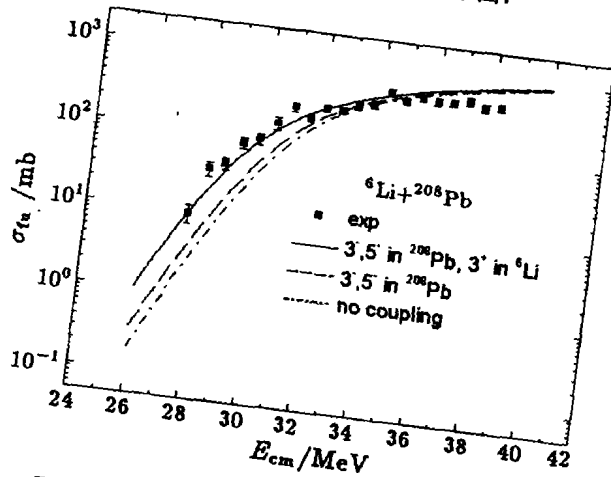
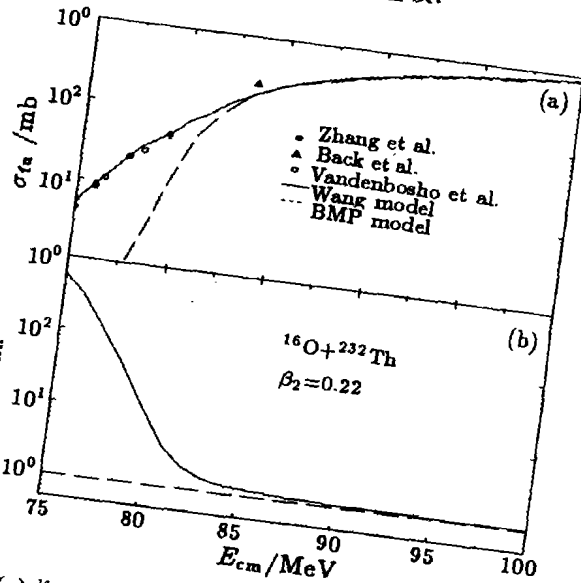


图 2 $^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ 近垒及垒下熔合反应激发函数

3 复合核形成阶段

形成单一复合核的截面, 或熔合截面为

$$\sigma_f(E) \approx \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T(E, l) P_{CN}(E, l) \quad (3)$$

对于质量很不对称的反应系统, $P_{CN} = 1$, 俘获截面等于熔合截面。而对于质量较对称的重碰撞核, 系统可能以很大几率未经历单一复合核而直接进入裂变出射道, 发生快裂变和准裂变, $P_{CN} < 1$ 。

对于垒下能区, 在接触点, 动能等于零, 系统反应之后的演变主要决定于多维位能面的特征。因此, 集体自由度的精确选择, 系统势能的演化以及解相关的输运方程是摆在复合核形成阶段的理论描述中的主要课题。虽然已提出了多种理论模型, 但对复合核形成过程作符合实验结果的描述还有距离。实验方面, 虽然提出准裂变和快裂变反应机制已有 20 多年, 由于难于明确区分准裂变和复合核裂变, 因此也需要进一步研究准裂变和快裂变反应机制。

靶核和弹核相互趋近的过程中, 它们的转动激发也会引起垒下熔合截面显著增强。图 2 最近的 $^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ 近垒熔合反应的实验结果中的点虚线是 BMP 计算结果, 虚线和实线是考虑了 ^{208}Pb 双声子激发和 ^{208}Pb 加 ^6Li 声耦合道模型计算结果。显然, ^6Li 和 ^{208}Pb 激发使 $^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ 垒下熔合截面增强了几个

运动与内部自由度的耦合使重离子熔合某种分布。位垒分布函数及穿透因子由熔合激发函数提取, 也可由弹性或准激发函数抽取。相对运动与内部自由度相互趋近的碰撞核面对的不是一维位垒, 由此导致有效熔合位垒降低,

4 复合核衰变几率计算中的几个重要问题

在冷却过程中, 复合核 $C(E^*, J)$ 的存活几率主要取决于中子蒸发和裂变的竞争.

4.1 壳效应对蒸发残余截面的影响

裂变位垒的穿透几率

$$T_{fis}(e, J) = \left(1 + \exp \left\{ - \frac{2\pi}{\hbar\omega_B [e - B_{fis}(E^*, J)]} \right\} \right)^{-1}, \quad (4)$$

其中, e 是裂变方向的动能, ω_B 是裂变位垒宽度, 而裂变位垒高度 B_{fis} 与系统的激发能 E^* 和总角动量 J 有关,

$$B_{fis}(E^*, J) = B_0(E^*) - \left(\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}_g} - \frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}_d} \right) J(J+1), \quad (5)$$

\mathcal{J}_g 和 \mathcal{J}_d 是裂变核在基态和鞍点处的转动惯量,

$$B_0(E^*) = B_{LD} - \delta W e^{-\gamma_D E^*}, \quad (6)$$

B_{LD} 为液滴位垒, 对于超重核 $B_{LD} \approx 0$. 而 δW 是基态时的壳修正, γ_D 是壳修正的阻尼参数. (6) 式表明壳修正随系统的激发能或温度的升高而迅速消失. 这点对于超重核的影响尤为重要. 图 3 是 $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ 反应形成 $4n$ 道的蒸发残余截面^[4], 其中虚线代表 $\gamma_D = 0.05$ 的计算结果, 实线代表 $\gamma_D = 0.061$ 的计算结果, 点线代表 $\gamma_D = 0.08 \text{ MeV}^{-1}$ 的计算结果. 由图可见 γ_D 从 $0.05 - 0.08 \text{ MeV}^{-1}$ 的变化导致蒸发残余截面数量级的改变. 因此 γ_D 的精确测定对超重核形成截面的估算非常重要.

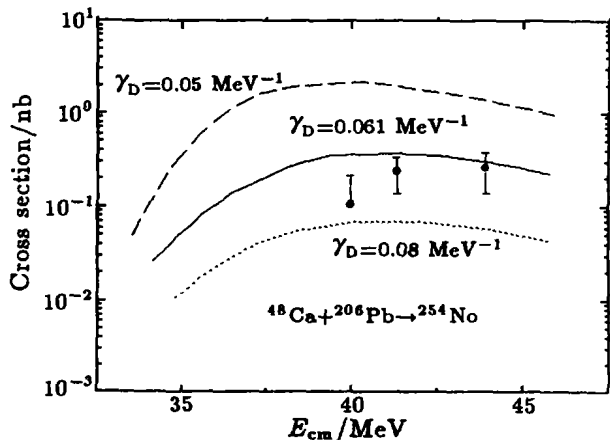


图 3 $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ 反应 $4n$ 道的蒸发残余截面

4.2 能级宽度的集体运动增强因子

能级密度可写成

$$\rho(E, J; \beta_2) = C \cdot K_{coll}(\beta_2) \frac{2J+1}{E^2} \exp \{ 2\sqrt{a[E - E_{coll}(J)]} \}, \quad (7)$$

C 为常数, a 是能级密度参数, E_{coll} 为转动或振动能, β_2 为四极形变. $K_{coll}(\beta_2)$ 为集体运动增强因子, 利用平滑函数 $\phi(\beta_2)$, 可统一写成

$$K_{coll}(\beta_2) = \frac{\mathcal{J}_\perp T}{\hbar^2} \phi(\beta_2) + K_{vib} [1 - \phi(\beta_2)], \quad (8)$$

其中 \mathcal{J}_\perp 是垂直于对称轴的转动惯量, T 为核温度, K_{vib} 是振动因子. 式中的第一项代表转动, 第二项为振动, 平滑函数

$$\phi(\beta_2) = \left\{ 1 + \exp \left(\frac{\beta_2^g - \beta_2}{\Delta\beta_2} \right) \right\}^{-1}, \quad (9)$$

$\beta_2^g \approx 0.15$, $\Delta\beta_2 \approx 0.04$ 为参数. 复合核的存活几率正比于 $\Gamma_n/\Gamma_l \approx \rho_B(E - E_n^{sep}, \beta_2^g)/\rho_C(E - B_{fis}, \beta_2^d)$. Γ_n, Γ_l 为中子蒸发和裂变的宽度, E_n^{sep} 中子分离能, β_2^g 和 β_2^d 分别为核处于基态和鞍点时的四极形变. 对于超重核, 由于基态形变与鞍点形变相接近, 因此对于形变复合核, $K_{coll}(\beta_2^g) \approx K_{coll}(\beta_2^d)$, 因此集体运动增强因子对存活几率 P_{ER} 几乎没有影响. 而对于球形核, $\Gamma_n/\Gamma_l \approx K_{vib}(\beta_2^g)/K_{coll}(\beta_2^d)$, 集体运动增强因子对 P_{ER} 有重要影响. 图 4 是 $^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$ 熔

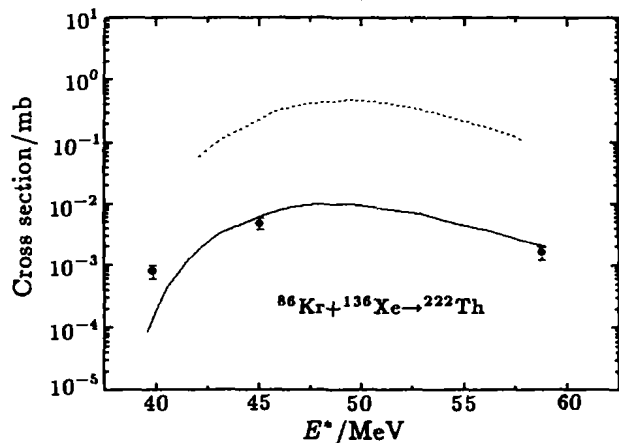


图 4 $^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$ 熔合反应中 $5n$ 道蒸发残余形成截面

合反应 $5n$ 蒸发残余形成截面^[4], 其中点线为 $\phi(\beta_2) = 1$, 即不考虑振动激发, 实线是 $\phi(\beta_2)$ (由 (9) 式计算), $K_{vib} = 10$, 即考虑振动激发的蒸发残余形成截面, 两者差别为 2 个多数量级. 因此, 如果熔合形

成的超重核为球形或近似球形, 考虑振动激发非常必要.

4.3 蒸发余核的自旋分布

最近, Reiter 等^[5]测量了 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 反应蒸发余核的自旋分布. 图 5 显示 $2n$ 道的结果. 这是重核形成机制非常重要的实验数据. 此结果表明蒸发残余截面的自旋分布比俘获截面的自旋分布窄得多. 事实上只有小于二分之一的低角动量入射道分波对蒸发残余截面有贡献, 而高角动量部分, 只贡献于快裂变和准裂变. 另一方面, 由于 $P_{\text{ER}}(C \rightarrow B; E^*, l)$ 依赖于角动量, 因此严格来说, 不能如通常做法那样, 将它从(1)式中提到分波求和号外.

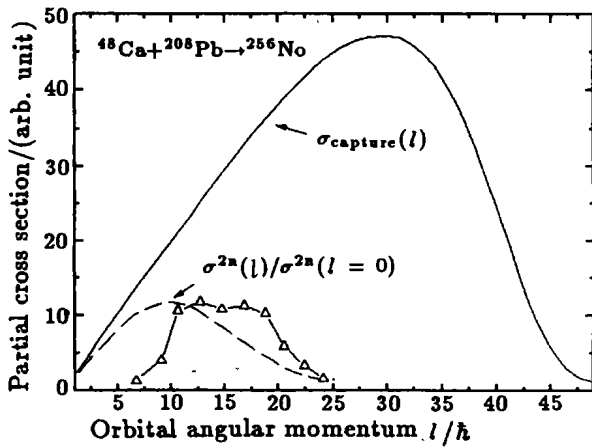


图 5 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 熔合反应中分波俘获截面(—)和 $2n$ 蒸发道产生核 ^{254}No 的自旋分布 $\sigma_c(l)/\sigma_c(l=0)$ (---), Δ 为实验数据

参 考 文 献:

[1] Zhang H Q, Xu J C, Liu Z H, *et al.* Anomalous Anisotropies of Fission Fragments for the $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$ Sub-barrier Fusion-fission Reaction [J]. *Phys Rev*, 1990, **C42**, 1 086.
 [2] Wang C Y. Interaction Barrier in Charged-particle Nuclear Reaction [J]. *Phys Rev Lett*, 1973, **31**, 766.
 [3] Wu Y W, Liu Z H, Lin C J, *et al.* Near Barrier Fusion Excitation Function of $^6\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ [J]. Submitted to *Phys Rev*,

5 讨论

以上我们讨论了重核和超重核形成截面计算中的耦合道效应、壳效应的阻尼效应、能级密度的集体运动增强因子以及蒸发余核的自旋分布, 并给出了相应的实验数据. 这些都是形成截面计算中非常重要的问题, 正确处理与否对理论预言的截面有数量级的影响.

超重核形成截面 $\sigma_{\text{ER}}^{+A_1 \rightarrow B}(E)$ 主要是三个因子, 即入射道的穿透因子 $T(E, l)$, 复合核形成几率 $P_{\text{CN}}(E, l)$ 和复合核的存活几率 $P_{\text{ER}}(E^*, l)$ 的乘积. 各种因素对超重核的形成是有利还是不利需作统盘考虑. 例如, 靶核形变使俘获截面增强 2 至 3 个数量级. 这主要是弹核对着靶核尖的方向, 使入射道位垒降低, $T(E, l)$ 增大. 然而近年来的实验研究表明, 弹核对着形变靶核尖的组态, 准裂变几率增加, 即 P_{CN} 减小. 因此采用形变靶核对超重核合成是否有利有待作进一步的研究. 同样, 如前所述, 入射道与其它内部自由度的耦合使垒下能区俘获截面增强几个量级, 自旋分布明显展宽. 然而, 由于只有低分波才对 P_{ER} 有贡献, 因而入射道的耦合道效应对超重核形成的影响也值得深入研究.

总之, 形成截面的理论计算结果对寻找超重核有指导意义. 然而由于反应过程非常复杂, 还有许多实验和理论问题需要进一步研究和探讨.

2002.
 [4] Zagrebaev V I, Aritomo, Itkis M G, *et al.* Synthesis of Super-heavy Nuclei; How accurately can we describe it and calculate the cross sections? [J]. *Phys Rev*, 2001, **C65**, 014607.
 [5] Reiter P, Khoo T L, Lauritsen T, *et al.* Entry Distribution, Fission Barrier, and Formation Mechanism, of ^{254}No [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**, 3 542.

Approach Synthesis of Superheavy Nuclei from Some Aspects of Cross Section Calculations*

LIU Zu-hua

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Several important aspects in the cross section calculations for the synthesis of superheavy nuclei have been inquired. They are the effects of the coupled-channels, the damping of shell correction energy, the collective enhancements in the level density and the spin distributions of evaporation residues. The channel coupling of relative motion with internal degrees of freedom will enhance significantly the capture cross section at sub-barrier energies. However, recent measurements of spin distributions for the survived compound nucleus show that only low partial waves contribute to the evaporation residues, which should at least partially cancel out the enhancement due to the effects of the channel coupling. The fission barriers are determined mainly by the shell correction energy in the case of superheavy nuclei. Therefore, it is especially important to determine as accurate as possible the damping parameter which describes the decrease of the shell effects influence. In addition, the collective enhancement factor in the level density also plays a very important role in the synthesis of heavy spherical nuclei.

Key words: synthesis of superheavy nuclei; channel coupling effect; damping of shell effect; collective enhancement factor

* Foundation item: Major State Basic Research Development Program (G2000077406); National Natural Science Foundation of China (10275092, 10275095, 10235030)