

文章编号: 1007-4627(2013)03-0284-05

用反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 合成 119 号元素的可能性研究

沈彩万¹, Yasuhisa Abe², David Boilley³

(1. 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000;

2. RCNP, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, 567-0047/Osaka, Japan;

3. GANIL, CEA/DSM-CNRS/IN2P3, BP 55027, F-14076 Caen cedex 5, France,
and Univ. of Caen, B.P. 5186, F-14032 Caen Cedex, France)

摘要: 利用最近发展起来的两步模型分析重离子核反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的熔合过程。在这个模型中, 熔合过程被分为前后独立的两个过程, 即粘连过程和形成过程。本课题组计算了对应的粘连概率和形成概率, 并结合适用于蒸发过程的统计蒸发模型, 计算了该反应合成 119 号超重元素的剩余截面, 即当 $E_{\text{lab}} = 250.2 \text{ MeV}$ 时, 得到最大剩余截面为 0.7 pb 。

关键词: 超重核; 热熔合; 粘连概率; 形成概率; 剩余截面

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.284

1 引言

人们对重元素的探索已经持续了几十年。在 Mayer 等^[1] 对非常稳定的幻数核进行成功解释之后, 理论预言, ^{208}Pb 之后的下一个幻数应该是 $Z = 114$ 和 $N = 184$, 并以此为中心形成核性质较为稳定的超重稳定岛。后来不同的理论还给出了不同的幻数, 如 $Z = 120$ 和 126 也被认为是下一个可能的幻数。实验家花了大量的时间和精力扩展元素周期表, 并试图达到理论预言的稳定岛。目前合成的最重的元素为 $Z = 118$ ^[2], 然而在这些合成的 $Z > 110$ 的元素中, 其寿命都非常短, 离人们所期望的稳定岛还有不少距离。

最近合成的超重元素都是通过所谓的热熔合方法实现的, 即用丰中子的 ^{48}Ca 为弹核轰击较重的锕系核, 通过蒸发中子而降低激发能, 从而获得超重原子核^[2-5]。最近, 更重的弹核, 如 ^{58}Fe ^[6], ^{54}Cr , ^{64}Ni 和 ^{50}Ti ^[7] 也被用于合成超重核, 但是到目前还未观测到超重核合成的迹象。这主要是由于在熔合过程中, 更重的弹核会导致更大的库仑势, 从而降低了复合核形成的可能性。实际上, 如果能获得很重的如 Es

和 Fm 这样的锕系核, 人们还是可以利用 ^{48}Ca 合成更重的超重元素。

在熔合过程中, 人们很早就知道重离子在克服库仑位垒的过程中, 相比轻离子会存在熔合阻止, 即实验测量的熔合截面比单纯由库仑势给出的结果要低^[8]。不同的模型试图解释熔合阻止现象, 例如在本文中将要使用的两步模型^[9]、双核模型^[10]、改进的量子分子动力学模型^[11] 以及另外两个模型^[12-13], 但目前还没有一个为人们一致认可的结果。两步模型认为, 熔合过程中重离子在克服库仑位垒后, 还需要克服另外一个由液滴能引起的位垒, 而该液滴能位垒仅在重离子反应中才存在。经过计算证实, 在重离子与靶核接触后, 液滴能在径向方向的确存在位垒^[14-16]。实际上, 两步模型也考虑了重离子克服库仑位垒的过程。本文将基于两步模型和统计蒸发模型, 探讨利用反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 合成超重元素 $Z = 119$ 的可能性。

2 两步模型

根据对熔合阻止机制的解释, 熔合过程被分为两个独立而又相互关联的过程: 其一是粘连过程, 即弹

收稿日期: 2012-10-20; 修改日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905021, 10979024, 11275068, 11375062)

作者简介: 沈彩万(1969-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: cwshen@hutc.zj.cn.

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

核经过加速后克服库仑位垒后与靶核相接触的过程; 其二是形成过程, 即弹核和靶核从相互接触开始, 克服液滴能位垒而形成复合核的过程。因此, 熔合概率和熔合截面可以分别表示为

$$P_{\text{fus}}(E_{\text{c.m.}}, J) = P_{\text{stick}}(E_{\text{c.m.}}, J)P_{\text{form}}(E_{\text{c.m.}}, J), \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum (2J+1)P_{\text{stick}}(E_{\text{c.m.}}, J)P_{\text{form}}(E_{\text{c.m.}}, J), \quad (2)$$

两式中: P_{stick} 为弹核越过库仑位垒的粘连概率; P_{form} 为弹靶相互接触后越过液滴能位垒而形成复合核的形成概率; J 为系统的角动量; λ 为弹核在质心系的德布罗意波长。在计算 P_{stick} 时, 采用了 Swiatecki 的经验公式^[12]:

$$P_{\text{stick}}(E_{\text{c.m.}}, J) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf} \left[\frac{1}{\sqrt{2}H} \times \left(E_{\text{c.m.}} - B_0 - \frac{J(J+1)\hbar^2}{2\mu R_B^2} \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

对于形成过程阶段, 采用了涨落耗散模型加以描述。对于粘连过程, 表面摩擦模型的计算表明, 在粘连过程中, 在弹核和靶核表面相接触时径向的相对动量分布呈高斯分布, 分布宽度与体系折合质量 μ 以及系统温度 T 相关, 即

$$g(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu T}} \exp\left(\frac{-p^2}{2\mu T}\right). \quad (4)$$

于是在形成过程的初始阶段, 体系径向相对动量亦满足此高斯分布。

在形成阶段, 采用双中心液滴模型描述弹核和靶核接触后形状的演化^[17]。在本文中, 采用 3 个参数描述此形状, 其一是双中心的相对距离 z (以复合核球形时的半径为度量单位), 质量非对称系数 α 以及颈部系数 ϵ 。由于理论计算表明, 在弹核和靶核接触后颈部的演化速度要远快于径向自由度和质量非对称自由度的演化速度, 因此为简单起见, 在形状进一步演化之前对颈部系数进行了平均化, 并将颈部系数固定为 0.1。为研究 z 方向和 α 方向在与角动量相关的能量曲面上的运动情况及其随时间的变化关系, 我们采用郎之万方程进行描述^[18], 即

$$\frac{dq_i}{dt} = (m^{-1})_{ij}p_j, \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial U^J}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} (m^{-1})_{jk}p_jp_k -$$

$$\gamma_{ij}(m^{-1})_{jk}p_k + g_{ij}R_j(t), \quad (5)$$

$$g_{ik}g_{jk} = \gamma_{ij}T^J,$$

这里重复指标意味着求和。在上式中, i, j 取 1 或者 2。 q_1, q_2 分别对应 z 和 α , 而 p_1, p_2 则为与 z, α 相对应的广义动量。 U^J 为双中心模型计算的液滴能与转动动能之和。 R_i 为高斯分布的随机力, 其满足

$$\langle R_i(t) \rangle = 0,$$

$$\langle R_i(t)R_j(t') \rangle = 2\delta_{ij}\delta(t-t').$$

g_{ij} 为摩擦张量 γ_{ij} 和温度 T 相关的随机力强度 (见式 (5) 第 3 行), 系统温度取复合核时候的值, 与激发能、壳修正能、转动动能和能级密度参数 a 相关, 即

$$T^J = \sqrt{\frac{E_{\text{c.m.}} + Q - E_{\text{shell}} - E_{\text{rot}}^J}{a}}.$$

在接触点的相对动量确定后, 由于存在涨落效应的影响, 因此每次系统演化的路径均不会一样, 部分可能演化成为复合核。图 1 给出了在接触点相对动量相同时不同的演化轨迹。在随机力的作用下, 部分能形成复合核, 而其它的则发生了准裂变。

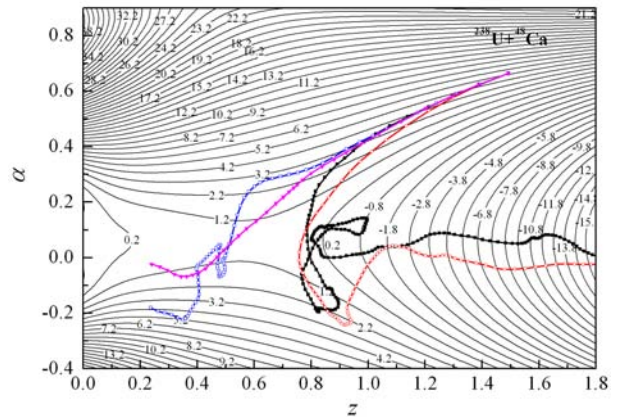


图 1 (在线彩图) 在弹核和靶核的相对初始动量相同条件下, 系统从接触点开始演化的轨迹
复合核状态对应着 $z=0, \alpha=0$ 。

假设有 N 个系统具有相同的径向相对动量 p , 且均处于弹核和靶核接触状态, 通过计算后有 N' 个系统进入了复核区域, 即 $z < z_{\text{crit}}, |\alpha| < \alpha_{\text{crit}}$, 则形成概率由下式给出,

$$P_{\text{form}}(E_{\text{c.m.}}, J) = \int \frac{N'_p J}{N} g(p) dp, \quad (6)$$

这里的 z_{crit} 和 α_{crit} 为预设的临界参数, 当双中心的距离和质量非对称系数小于一定值时, 即认为复合核形

成。在粘连概率和形成概率的计算完成后, 就可以利用式(2)计算体系的熔合截面。

在形成的复合核中, 大部分将克服裂变位垒而裂变成碎片。然而有一部分却可以通过蒸发中子和质子等轻粒子而降低激发能, 最后形成稳定的或者寿命相对较长的剩余核。在超重核合成中, 对仅蒸发中子而形成的剩余核感兴趣。为了计算剩余核的截面, 还需要进一步计算蒸发概率 P_{evap} 。在本文的研究中, 采用 HIVAP 程序^[19]计算蒸发概率, 并得到剩余截面为

$$\sigma_{\text{res}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum [(2J+1)P_{\text{stick}}(E_{\text{c.m.}}, J) \times P_{\text{form}}(E^*, J)P_{\text{evap}}(E^*, J)]。 \quad (7)$$

3 计算和讨论

在计算熔合概率与熔合截面之前, 要先利用式(3)和式(6)分别计算粘连概率和形成概率。在计算粘连概率的公式中^[12], 虽然其中的参数拟合了数十个反应, 但其中的一些参数在用到非常重的反应

之前应该重新拟合。我们对其中的参数 B_0 和 C 利用 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 的俘获截面的实验数据进行了重新拟合^[14], 结果为 $C = 0.055$, $B_{0,\text{new}} = B_{0,\text{old}} + 6.3$ 。在各分波下, 反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 粘连概率随 E^* 的变化关系如图 2(a) 所示, 即粘连概率随入射能的增大而增大, 随角动量的增大而减小。该结果是显然的, 因为入射能量越大, 弹核更容易克服库仑位垒; 而角动量越大, 则库仑位垒越高, 增大了弹核克服库仑位垒的难度。

在计算 P_{form} 时, z_{crit} 和 α_{crit} 被均被设置为 0.2。显然, 计算结果与该临界参数的大小有关, 但是当这两个参数小于一定值时, 形成概率并不敏感依赖于此参数。在式(6)中对动量 p 积分时, 用到了高斯-拉盖尔数值积分方法, 而且对每个确定动量 p , 模拟了 3×10^4 个反应。对于每个分波, 相应的形成概率与激发能的关系如图 2(b) 所示。根据式(1)和式(2), 图 2(c)和图 2(d)分别给出了各个分波的熔合概率和熔合截面。

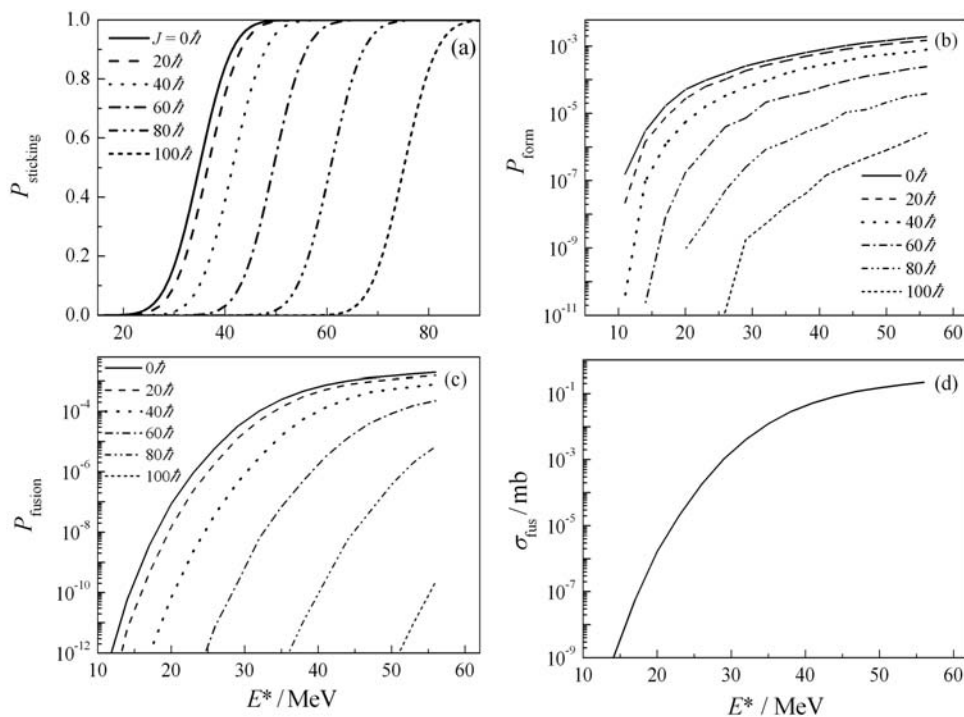


图 2 反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的熔合过程的计算结果
(a) 粘连概率; (b) 形成概率; (c) 熔合概率; (d) 熔合截面。

利用 HIVAP 程序, 计算了 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 熔合反应的蒸发概率以及蒸发数个中子后的剩余核的截面, 并显示在图 3 中。这里需要提及的是, 剩余截面对壳

修正能量非常敏感, 因为壳修正能量是裂变位垒中的最主要部分, 而且裂变位垒每增加 1 MeV, 则相应的剩余截面就会增大 1 个数量级。由于现在理论计

算的很大的壳修正能量^[20]并没有对应着非常稳定的超重核,因此在计算中,将壳修正能量进行了减弱。根据拟合 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 的剩余截面,该减弱因子设置为0.45。图3显示,在用 ^{48}Ca 轰击 ^{254}Es 时,蒸发4个中子后得到 $^{298}119$ 的可能性最大,剩余截面为0.7 pb,对应的入射能量 $E_{\text{c.m.}} = 218.7 \text{ MeV}$;蒸发3个中子后形成 $^{299}119$ 的剩余截面为0.38 pb,对应的入射能量 $E_{\text{c.m.}} = 210.4 \text{ MeV}$ 。该剩余截面已经达到了目前设备的探测能力,然而实验家面对的一个问题是如何获得靶核 ^{254}Es 。此核的半衰期为275.7 d,或许可以从反应堆中分离出来此物质,正如人们从反应堆中分离出 ^{249}Bk ,然后合成117号元素一样^[5]。

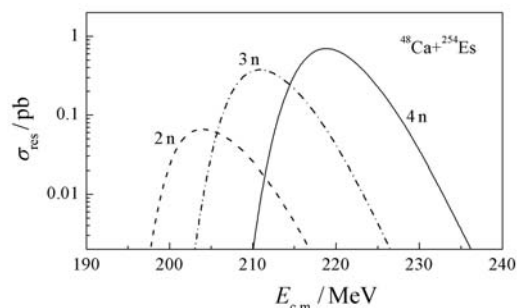


图3 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的中子蒸发剩余截面

虚线、点划线和实线分别对应着蒸发2个中子、3个中子和4个中子的情况。

4 结论

本文以两步模型为基础研究了反应 $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的熔合过程,再结合熔合蒸发模型,计算了此反应蒸发数个中子的剩余截面。结果显示,粘连概率和形成概率随入射能量和体系角动量的变化规律相似,即入射能量越高,粘连概率和形成概率越大,体系角动量越大,粘连概率和形成概率越低。用此反应合成超重核的截面不大,但已经达到了目前设备的探测水平。在蒸发4个中子后形成 $^{298}119$ 的可能性最大,对应的生成截面和质心系入射能量分别是0.7 pb和210.4 MeV,后者对应的实验室系能量为250.2 MeV。

致谢 本文得到湖州师范学院C3S2服务器的计算支持。

参考文献(References):

- [1] MAYER M G, JENSEN J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure[M]. New York: Wiley, 1955.
- [2] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**: 044602.
- [3] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* Phys Rev C, 2004, **70**: 064609.
- [4] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 021601.
- [5] OGANESSIAN Y T, ABDULLIN F Sh, BAILEY P D, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **104**: 142502.
- [6] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 024603.
- [7] ACKERMAN D. Report at the Workshop on the Synthesis and Properties of Superheavy Nucleus. Aug. 10-13, 2012, Lanzhou, China.
- [8] BJORNHOLM S, SWIATECKI W J. Nucl Phys A, 1982, **391**: 471.
- [9] SHEN C W, KOSENKO G, ABE Y. Phys Rev C, 2002, **66**: 061602R; BOURIQUET B. Eur Phys J A, 2004, **22**: 9; ABE Y. Phys Atom Nucl, 2006, **69**: 1101.
- [10] LI W, WANG N, LI J F, *et al.* Euro Phys Lett, 2003, **64**: 750.
- [11] WANG N, WU X Z, LI Z X, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**: 044604.
- [12] SWIATECKI W J, SIWEK-WILCZYNSKA K, WILCZYNSKI J. Phys Rev C, 2005, **71**: 014602.
- [13] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2006, **74**: 057602.
- [14] SHEN C W, ABE Y, BOILLEY D, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 66.
- [15] SHEN C W, BOILLEY D, LI Q F, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 054620.
- [16] ABE Y. Eur Phys J A, 2002, **13**: 143.
- [17] MARUHN J, GREINER W. Z Physik, 1972, **251**: 431.
- [18] WADA T, ABE Y, CARJAN N. Phys Rev Lett, 1993, **70**: 3538; ABE Y. Phys Rep, 1996, **275**: 49.
- [19] REISDORF W, SCHÄDEL M. Z Phys A, 1992, **343**: 47.
- [20] MÖLLER P, NIX J R, MYERS W D, *et al.* Atom Data Nucl Data Tables, 1995, **59**: 185.

Possible Way to Synthesize Element 119 with Reaction $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$

SHEN Caiwan^{1, 1)}, Yasuhisa Abe², David Boilley³

(1. School of Science, Huzhou Normal College, Huzhou 313000, Zhejiang, China;

2. RCNP, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, 567-0047/Osaka, Japan;

3. GANIL, CEA/DSM-CNRS/IN2P3, BP 55027, F-14076 Caen cedex 5, France,

and Univ. of Caen, B.P. 5186, F-14032 Caen Cedex, France)

Abstract: Two-step model is adopted to analyze the fusion process of heavy-ion reaction $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$. Based on this model, the fusion process is divided into two consecutive steps, i.e., the sticking step and the formation step, and corresponding sticking probability and formation probability are calculated. Combining the statistical evaporation model for the evaporation stage, the maximum evaporation residue cross section for reaction $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ is 0.7 pb at $4n$, $E_{\text{lab}} = 250.2$ MeV.

Key words: superheavy nuclei; hot fusion; sticking probability; formation probability; residue cross section

Received date: 20 Oct. 2012; **Revised date:** 20 Feb. 2013

Foundation item: National Nature Science Foundation of China(10905021, 10979024, 11275068, 11375062)

1) E-mail: cwshen@hutc.zj.cn

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