

文章编号: 1007-4627(2006)04-0405-04

关于重核强阻尼反应的研究*

吴锡真^{1,2}, 田俊龙¹, 李祝霞^{1,2}, 王宁¹, 赵凯¹, 张英逊¹, 欧立¹

(1 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

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)

摘要: 讨论了重核碰撞形成巨复合体系破裂的强阻尼反应产生超重核的问题。评述了两种主要的理论模型: 唯象的多维朗之万模型和本课题组发展的微观输运理论模型。概括阐述了微观输运理论研究反应 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$, $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 和 $^{244}\text{Pu}+^{244}\text{Pu}$ 等的主要结果。给出了反应中产生的超重碎块的几率与入射能的关系, 复合体系和超重碎块的衰变机制以及所形成的超重碎块的结合能和形状的分布。

关键词: 超重碎块; 重核碰撞巨复合体系; 多维朗之万模型; 微观输运理论

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** A

人们利用全熔合反应合成了从 107 号元素到 116 号元素的超重核^[1,2]。但是, 当继续应用这种反应机制合成原子序数更高的超重元素时, 碰到了越来越大的困难^[1,3]。一方面, 由于受所选用的弹核和靶核的中子数的限制, 因而利用全熔合反应很难达到超重岛的中心区域; 另一方面, 来自超重核合成截面随超重核原子序数增长而指数下降的限制, 使之不可能合成实验上可以探测得到的更重的超重核。这种全熔合机制在合成更重的超重核方面的局限性, 促使人们不得不再考虑和尝试别的反应途径。我们重新考虑了重核的强阻尼反应。20 世纪 80 年代, GSI 曾在实验上探讨过重核的强阻尼反应^[4,5]。当时用 7.5 MeV/u 的 ^{238}U 炮弹轰击 ^{238}U 靶, 通过测量反应产物的自发裂变事件, 没有找到半寿命在秒到月之间的超重核^[6-8]。当时在理论上对强阻尼反应的研究主要采用扩散模型^[9]和碎化理论框架下的量子涨落理论^[10,11]。

强阻尼反应是指在低能下(近垒或高于位垒)两个重的弹核和靶核碰撞后, 形成准分子型的复合体系(并非复合核)。由于核和库仑相互作用, 复合体系经历了复杂运动, 特别是大的能量和粒子数转移, 随库仑排斥体系很快又重新分离成两块(或少数三块)并伴随若干粒子发射, 分裂后的碎块还会

进一步发射粒子或裂变。这个复杂的过程被称为重核的强阻尼反应。

近期, 我们应用改进的量子分子动力学模型从微观上重新研究了 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$, $^{244}\text{Pu}+^{244}\text{Pu}$ 等强阻尼反应^[12]。稍后, Zagrebaev 和 Greiner 等^[13]用唯象的多维朗之万方程研究了 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$, $^{238}\text{U}+^{248}\text{Cm}$ 和 $^{232}\text{Th}+^{250}\text{Cf}$ 等低能碰撞, 研究给出了 $^{232}\text{Th}+^{250}\text{Cf}$ 在 $E_{\text{cm}}=800$ MeV 时反应产物的质量和电荷分布, 如图 1 所示。其中, 实线给出了产物的质量和电荷的初始分布, 而虚线给出经过粒子发射和裂变后的残存产物的质量和电荷分布。在初始碎片的质量分布中, 可以看到在质量数 $A=208$ 附近有一个明显的肩膀, 对初始电荷分布在 $Z=82$ 附近也有类似现象。这可能是由于双幻核 ^{208}Pb 的形成造成的。这个研究给出了 $Z>107$ 的核的残留截面约为 1 pb。这些结论是在 $E_{\text{cm}}=800$ MeV 得到的。已知 $^{232}\text{Th}+^{250}\text{Cf}$ 的 Bass 位垒约为 786 MeV, 所以入射能恰好是在位垒能量之上。受“热”熔合反应合成超重核思想的启发, 我们认为 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 等的强阻尼反应产生超重核最佳入射能不一定是位垒能量。因此, 研究超重碎块产额对入射能量的依赖关系是头等重要的事情。作为一个初步的探讨, 我们利用改进的量子分子动力学模型^[14,15]从微观上研究了

* 收稿日期: 2005-08-04

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10235030,10235020); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077400)

作者简介: 吴锡真(1940-), 男(汉族), 河北东光人, 研究员, 从事理论核物理及相关统计物理理论研究;

E-mail: lizwux@iris.ciae.ca.cn

入射能对初始超重($Z > 114$)碎片产额的影响, 结果

见图 2。

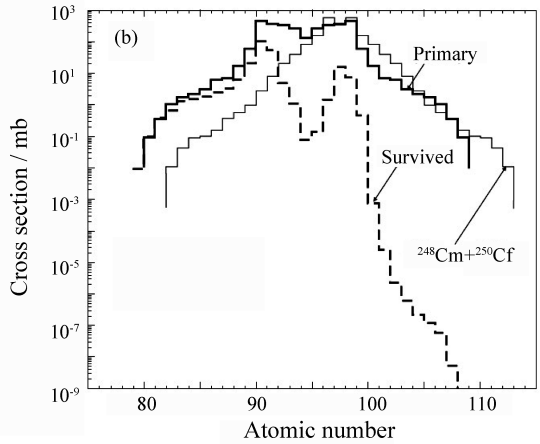
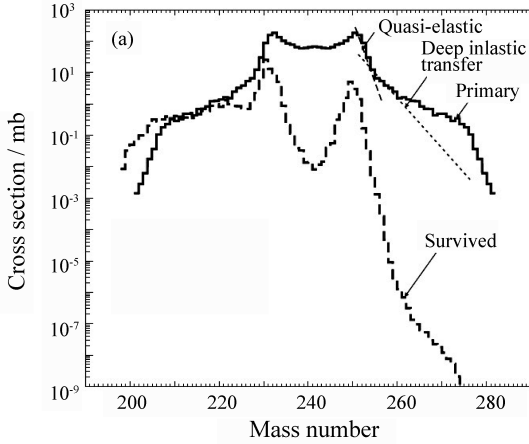


图 1 在入射能量 $E_{cm} = 800$ MeV 时, $^{232}\text{Th} + ^{250}\text{Cf}$ 碰撞产生的反应产物的初始(—)和残存(---)质量 (a) 和 电荷(b)分布^[13]

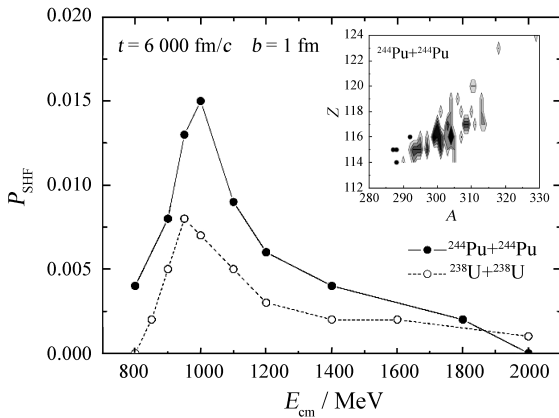


图 2 在反应 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 和 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 中, $Z \geq 114$ 的超重核碎块的产生几率与入射能量的关系

右上方的插图给出反应 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 在 $t = 6\ 000$ fm/c 时 $Z \geq 114$ 的超重核碎块的电荷和质量数的分布, 其中圆点表示同位素 $^{288}114$, $^{287,288}115$ 和 $^{292}116$ 的实验数据。

我们选取 3 个反应体系 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$, 质心系入射能量为 800—2 000 MeV, 覆盖了早年 GSI 对 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 反应进行研究的能量范围(7.5 A MeV 实验室系)。图中所给出的超重核产生几率是在 $t = 6\ 000$ fm/c 时观察到的 $Z \geq 114$ 的所有超重碎块之和。由图 2 可见, 超重核产生几率的大小明显与弹靶组成有关, 对 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 产生超重碎块的几率最高, 大约是 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 超重碎块产额的 2 倍; 而对 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 在各个能量下均没有观察到超重碎块的产生。在超重核产生几率与入射能量的关系上显示了明显的峰。对 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$, 这个峰出现在质心系入射能量为 $E_{cm} =$

1 000 MeV 处, 而对 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$, 则出现在 $E_{cm} = 950$ MeV 处。由于这是非常初步的研究, 尽管超重核产生几率的峰值对应的能量不一定非常准确, 但是超重核产生几率与能量依赖的这种呈峰行为是非常确定的。这一行为说明仔细选择入射能量对从实验上产生超重核的研究是至关重要的。我们注意到 20 世纪 70 年代末和 80 年代初 GSI 在实验上通过 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 研究超重核时所用入射能量比我们预计的低, 或许这也是难以发现超重核的原因之一。

在图 2 的插图中给出了反应 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 在 6 000 fm/c 时产生 $Z \geq 114$ 的超重碎块的质子数和核子数的分布, 并给出了已发现的超重核 $^{298}114$, $^{287, 288}115$ 和 $^{292}116$ 在质子数-核子数图中的位置。可以看出, 通过反应 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 得到的初级超重碎片的中子数-质子数之比比实验发现的 $^{298}114$, $^{287, 288}115$ 和 $^{292}116$ 的中子数-质子数之比要高, 即我们计算得到的超重碎块是非常丰中子的。因此, 通过重核碰撞形成的复合体系的碎裂产生超重核来逼近“超重岛”可能是一个可选择的途径。

由于强阻尼反应对超重核合成的重要性, 对强阻尼反应机制的研究日渐迫切, 该反应机制包括巨复合体系的形成, 衰变和初级碎片的退激和裂变。关于后者, 即初始碎片的退激和裂变, 可以采用标准的统计模型进行研究, 但是关于巨复合体系的形成和衰变过程的认识基本上还是一个空白。作为一个初步的研究, 我们计算了 $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ 体系在 $E_{cm} = 1\ 000$ MeV 和 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 体系在 $E_{cm} = 950$ MeV 时在不同碰撞参数 $b = 1$ 和 3 fm 下, 产生的 $Z > 114$

的超重体系的数目随时间的变化, 结果示于图 3。图中任一能量和任一碰撞参数下的超重体系的产额数目是用 500 个模拟事件得出的。计算中发现存在两个衰变阶段: 一是复合体系的快衰变阶段, 在这个阶段中大部分复合体系破裂成与初始核大小相近的两碎块, 偶尔也会破裂成一个大的超重碎块和另一个小的镗系碎块, 当然某些超重碎块也可以再破裂; 第二个衰变阶段是一个慢过程, 在这个过程中超重碎块发射轻带电粒子和中子, 也可能发生裂变。在计算中初步获得了这两个特征衰变阶段的衰变常数。当然这个衰变过程是非常复杂的, 由于计算能力的限制, 我们的动力学计算仅达到 6 000 fm/c, 此后的发射中子和裂变相互竞争是一个相对长的时间过程, 将借助统计理论来进行处理, 这方面的工作正在进行之中。对经过衰变得到的超重碎块的结合能和形状, 在已作的动力学计算中也做了初步统计, 得到的结论是: 超重碎块结合能的分布是很宽的, 某些碎块的结合能数值与用相对论平均场(RMF)和 Skyrme-Hartree-Fock 理论计算得到的结合能相近。这是很有意义的结果, 说明通过重核碰撞形成复合体系的碎裂有可能得到较低激发的超重碎块。计算中发现超重碎块的形状多为变形核, 绝大部分是大变形核, 还需要经历中子发射和裂变的竞争衰变过程。用统计理论处理这个过程的结果

参 考 文 献:

[1] Hofmann S, Münzenberg G. Rev Mod Phys, 2000, **72**: 33.
 [2] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2001, **C63**: 011 301(R); Phys Rev, 2004, **C69**: 021 601(R).
 [3] Oganessian Yu Ts, *et al.* Euro Phys J, 2002, **A13**: 135; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, 2002, **15**: 201.
 [4] Günter Herrmann. Nature, 1979, **280**: 543.
 [5] Seaborg G T, Loveland W, Morrissey D J, Science, 1979, **203**: 711.
 [6] Hildenbrand K D, Freiesleben H, Pühlhofer F, *et al.* Phys Rev Lett, 1977, **39**: 1 065.
 [7] Schädel M, Kratz J V, Ahrens H, *et al.* Phys Rev Lett, 1978, **41**: 469.
 [8] Schädel M, Brüchle W, Gäggeler H, *et al.* Phys Rev Lett, 1982, **48**: 852.

将在另外的文章中讨论。

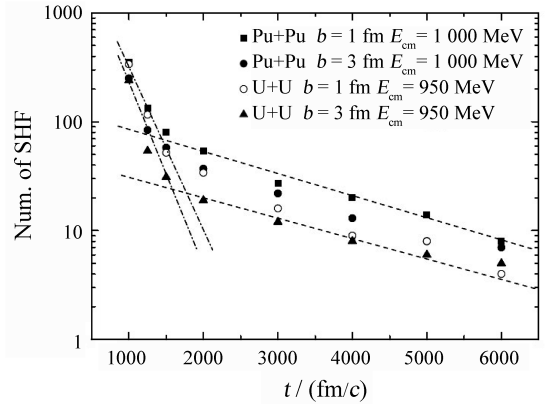


图 3 体系 $^{244}\text{Pu}+^{244}\text{Pu}$ 在 $E_{\text{cm}}=1\ 000\ \text{MeV}$ 和 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 在 $E_{\text{cm}}=950\ \text{MeV}$ 时, 在不同碰撞参数 $b=1$ 和 $3\ \text{fm}$ 下, 产生的 $Z>114$ 的超重体系的数目随时间的变化

总之, 通过重核碰撞形成复合体系的破裂反应是一个复杂的强阻尼过程, 利用微观输运理论对这一过程进行的理论研究是一个亟待开展的重要研究课题, 这可能开辟超重核研究的重要新方面。据悉 GSI 和国际上的其它大实验室正在开展这方面的实验研究。我国兰州重离子加速器实验室也将具有开展强阻尼反应的实验条件, 因此开展相关的理论研究具有重要意义, 应引起国内外同行们的关注。

[9] Riedel C, Norenberg W. Z Phys, 1979, **290**: 385; Gäggeler H, Trautmann N, Brüchle W, *et al.* Phys Rev Lett, 1980, **45**: 1 824.
 [10] Maruhn J A, Hahn J, Lustig H J, *et al.* Progress in Particle and Nuclear Physics, 1980, **4**: 257.
 [11] Maruhn J A, Hahn J, Lustig H J, *et al.* Progress in Particle and Nuclear Physics, 1980, **4**: 257.
 [12] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen. Modern Physics Letters, 2005, **A20**: 2 619.
 [13] Zagrebaev V Z, Oganessian Yu Ts, Itkis M G, *et al.* Phys Rev, 2006, **C73**: 031 602(R).
 [14] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen. Phys Rev, 2002, **C65**: 064 608; Phys Rev, 2004, **C69**: 034 608.
 [15] Wang Ning, Wu Xizhen, Li Zhuxia. Phys Rev, 2003, **C67**: 024 604.

Investigation on Strongly Damped Reactions for Very Heavy Nuclei^{*}

WU Xi-zhen^{1, 2}, TIAN Jun-long¹, LI Zhu-xia^{1, 2}, WANG Ning¹,

ZHAO Kai¹, ZHANG Yin-xun¹, OU Li¹

(1 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

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

Abstract: In this paper, the possibility of producing superheavy fragments through strongly damped reactions in very massive nuclear collisions is investigated. Two theoretical models, which are the phenomenologically multi-dimensional Langevin equation model and improved quantum molecular dynamics model developed recently by our group, are briefly reviewed. The dependence of the production probability of superheavy fragments on the incident energy, the decay mechanism of the composite systems and superheavy fragments, and the distributions of the binding energy and shapes of superheavy fragments are discussed for reactions of $^{244}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$, $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$, $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ based on the improved quantum molecular dynamics model.

Key words: superheavy fragment; giant composite system; phenomenologically multi-dimensional Langevin equation model; microscopic transport theory

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10235030, 10235020); State Key Development Program of Basic Research of China(G2000077400)