

文章编号: 1007-4627(2012)02-0133-06

变形核强阻尼碰撞中巨复合体系的形成和衰变

邓天煜¹, 田俊龙^{1,2}, 田博博¹, 付栋之¹

(1. 安阳师范学院物理与电气工程学院, 河南 安阳 455002;

2. 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 利用改进的量子分子动力学(ImQMD)模型研究了质心系入射能量为 980 MeV 时变形核²³⁸U + ²³⁸U 体系的 3 种不同碰撞模式(腹对腹、尖对腹和尖对尖)下强阻尼反应过程中初级超重碎块的产生几率和复合体系的寿命、形状和拉长取向等性质, 发现尖对腹碰撞模式有利于初级超重碎块的产生, 还发现这种碰撞模式产生的复合体系有最长的寿命。

关键词: ImQMD 模型; 变形核; 强阻尼反应; 碰撞模式

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A

1 引言

40 多年前, 物理学家根据幻数理论预言的“超重核稳定岛”的中心位置在 $Z = 114$ 或 120 , $N = 184$ ^[1-2]。自从人工首次合成新元素 Np 和 Pu 以来, 人们合成的超铀元素已达到 26 种: 93~118 号, 但绝大多数都是通过重离子全融合反应产生的, 当人们继续应用全融合反应合成超重核时碰到了巨大的困难。近年一些理论^[3-6]和实验^[7-8]把焦点转移到了重核的强阻尼反应, 因为它没有靶材料的限制, 生成的重核的激发能在激发能分布低能长尾上的核是有机会存活的, 这种方法对超重核的产生开辟了另一条途径。

强阻尼反应是指在低能(近垒)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的运动, 特别是大的能量和粒子数转移, 之后因库仑排斥体系很快又重新分裂成两块(或三块)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。在这个过程中, 由于炮弹的动能可以完全转化为体系的激发能和转动能, 因此, 这个过程被称为“强阻尼”或者“深度非弹性碰撞”^[9]。研究强阻尼反应目的有两个^[10-11]: (1) 产生超重核, 即强阻尼反应形成准分子型的复合体系的不对称两分裂,

可以产生一个轻碎块和一个重碎块(如果那个重碎块可以存活下来, 就产生了超重核); (2) 产生正电子, QED 理论预言, 如果两个重核碰撞形成的复合体系的核电荷数 $Z > 173$, 那么在这个复合体系小区域空间, 由于非常强的电场作用可以产生正电子, 而正电子的产生几率与复合体系的寿命正相关。因此, 研究重核强阻尼反应对超重核的产生及正电子的产生都有极其重要的意义。

实验上发现很多核有不同程度的变形, 尤其是重核^[12]。²³⁸U 实际上就是一个变形核, 而非球形核, 我们可以把它近似地看作椭球。在最初的研究中, 视²³⁸U 为球形核, 并对其部分研究^[5, 13-16], 其中包括用改进的量子分子动力学(ImQMD)模型对其强阻尼碰撞中巨复合体系的形成和衰变的研究, 发现质心系能量为 980 MeV 时复合体系有最长的寿命。现在考虑了变形²³⁸U 核, 为了研究方便, 在这里取 3 种特殊模式: 腹对腹(Belly-belly)、尖对腹(Belly-tip)和尖对尖(Tip-tip)碰撞模式, 它们分别如图 1 中的(a), (b)和(c)所示。在质心系入射能量为 980 MeV 和碰撞参数 $b = 0$ fm 条件下, 选取了 1 000 个随机事件对²³⁸U + ²³⁸U 体系的强阻尼碰撞反应中复合体系的形成和衰变情况进行了研究。由于篇幅所限, 本文所用到的 ImQMD 模型可

收稿日期: 2011-08-12; 修改日期: 2011-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11005003, 10975095, 11047108); 安阳师范学院本科生创新基金资助项目(ASXC12011-Z19)

作者简介: 邓天煜(1988—), 男, 四川阆中人, 本科, 从事核物理研究。

通讯联系人: 田俊龙, E-mail: tianjunlong@gmail.com

以参看文献[17—18]。

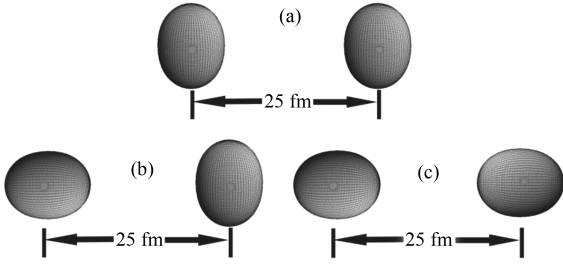


图 1 变形核的 3 种特殊碰撞模式

(a) Belly-belly 模式, (b) Belly-tip 模式, (c) Tip-tip 模式。

2 初始变形核的制备

实验上发现 ^{238}U 不是一个球形核,而是一个近似的椭球。当考虑 $\lambda=2$ 的情形时, ^{238}U 的表面在球坐标中可表示为^[19]

$$R(\theta, \varphi) = R_0 \left[1 + \sum_{\mu=-2}^2 \alpha_{2\mu} Y_{2\mu}(\theta, \varphi) \right], \quad (1)$$

式中: R_0 近似为同体积球形核的半径; $\alpha_{2\mu}$ 表示形变振幅。假定它的 3 个轴与直角坐标系中 x , y 和 z 轴重合,那么椭球的 3 个轴长与同体积半径的偏离为

$$\begin{aligned} \delta R_x &= R_x - R_0 = \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta R_0 \cos \left(\gamma - \frac{2}{3}\pi \right), \\ \delta R_y &= R_y - R_0 = \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta R_0 \cos \left(\gamma - \frac{4}{3}\pi \right), \\ \delta R_z &= R_z - R_0 = \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta R_0 \cos \gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

当取 $\gamma=0$ 时,椭球为关于 z 轴对称的旋转椭球,椭球的各半轴为

$$\begin{aligned} R_x &= R_y = R_0 \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta \right) = R_0 (1 - 0.316\beta), \\ R_z &= R_0 \left(1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta \right) = R_0 (1 + 0.631\beta). \end{aligned} \quad (3)$$

在 ImQMD 中,

$$R_0 = 1.25A^{1/3} \left[1 - 0.2 \left(\frac{A-2Z}{A} \right) \right].$$

对 ^{238}U 来说, $\beta=0.244$, $R_0=7.39$ fm。利用密度为硬椭球的分布来抽样给出变形核在直角坐标系的空位置,对其他任意角度变形核表面半径 $R(\theta)$ 只随 θ 的分布变化,

$$R(\theta) = R_0 [1 + \beta \cdot 0.316(3 \cos^2 \theta - 1)], \quad (4)$$

因此

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi, \\ y &= r \sin \theta \sin \phi, \\ z &= r \cos \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, r , θ 和 φ 的取值范围分别为 $[0, R(\theta)]$, $[0, \pi]$ 和 $[0, 2\pi]$ 。按照上述同样的方法,可以得出变形核在动量空间的动量分布。

3 变形核反应 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 在 3 种碰撞模式下产生超重初级碎块的研究

为了给出变形核强阻尼反应的直观认识,我们利用 ImQMD 模型从微观上研究了在质心系入射能量为 980 MeV 时,变形核 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 在尖对腹碰撞模式下一个典型对心碰撞事件的核子分布随时间的演化过程(见图 2)。从图 2 可以看出,大约在 $t=90$ fm/c 最初的时刻,两个相互作用核开始接触并且形成一个双核形状的复合体系;当 $t=300$ fm/c 附近时,复合体系变成了一个球形的单体复合体系;在 $t=1500$ fm/c 附近时,复合体系碎裂成一大一小两个碎块。我们把从弹靶接触形成复合体系到它重新裂成两块(或三块)的这段时间称为复合体系的寿命。因此,这个反应事件形成的复合体系的寿命约为 1 410 fm/c,是一个复合体系不对称裂变事件。然而,正是由于这种复合体系的不对称裂变才有可能产生初级超重碎块,以至于产生超重核。

为了研究产生初级超重碎块的几率和 3 种不同碰撞模式下哪种模式更有利于产生初级超重碎块,在图 3 中给出了在入射能量为 980 MeV 时,变形核 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 3 种不同碰撞模式对心碰撞产生的复合体系裂变后的初级碎块质量分布(a)和核电荷数分布(b)。由于我们只计算了 1 000 个反应事件,这导致误差棒较大。但从图 3(a)仍然可以看出腹对腹和尖对尖碰撞模式下碎块质量分布大致相同,而尖对腹模式与它们差别较明显。在质量数为 150~250 之间,腹对腹和尖对尖的几率曲线比较平缓,而尖对腹的几率在 150~180 和 300~350 区域内明显大于前两者,并且在所观察的 0~2 000 fm/c 的 1 000 个事件内,尖对腹模式下产生比前两者更重碎块的几率更大。从图 3(b)可以看出,腹对腹和尖对尖碰撞模式下碎块核电荷数分布大致一致,产生的碎块核电荷数在 60~90 的几率较大,而尖对腹明显与

它们差别较大，其产生的碎块核电荷数在 60~70 的几率很大，并且在 $Z > 114$ 的区域内的几率大于

前两者，能产生比前两者更大的碎块，这将有有利于产生超重碎块。

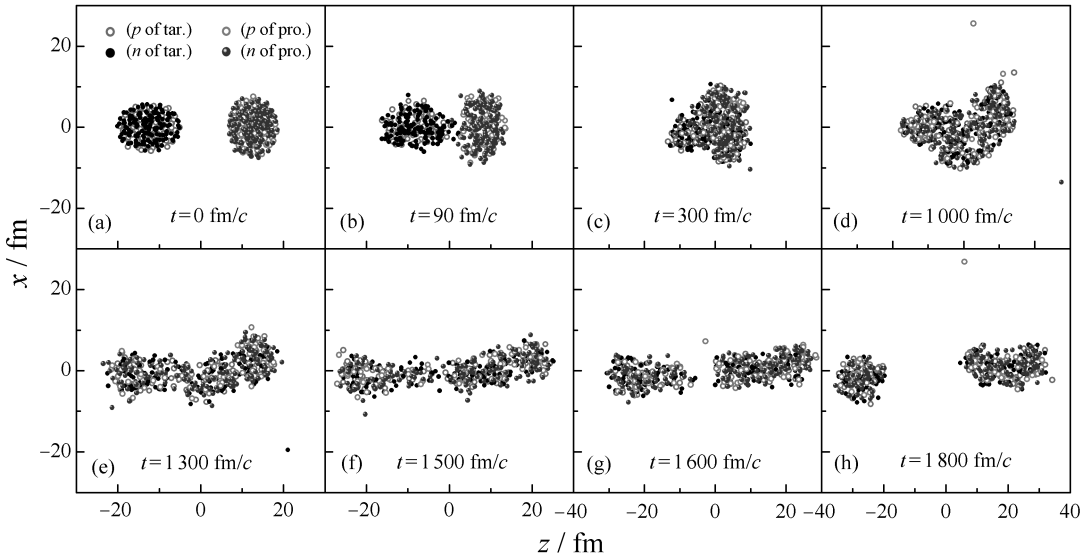


图 2 Belly-tip 碰撞模式下一个对心碰撞事件的核子分布随时间演化图

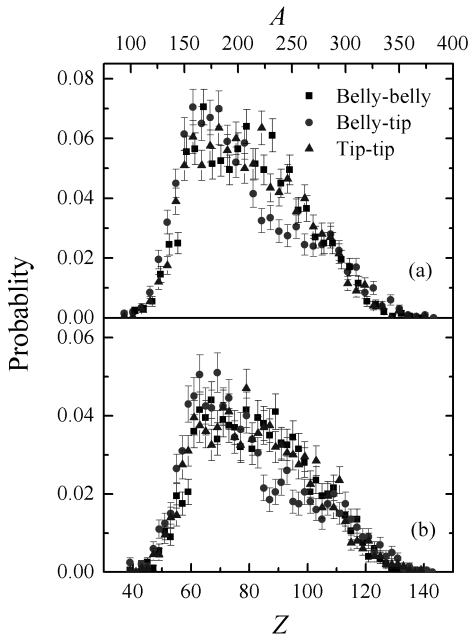


图 3 Belly-belly, Belly-tip 和 Tip-tip 3 种碰撞模式下碎块质量分布 (a) 与核电荷数分布 (b)

从以上数据分析可得出结论，在腹对腹、尖对腹、尖对尖 3 种碰撞模式下，尖对腹碰撞模式更有利于产生初级超重碎块。初级超重碎块还不是超重核，之后我们将嫁接统计衰变模型使其退激到基态，本文只论述第一个阶段，即复合体系的碎裂产生初级超重碎块。

4 强阻尼反应中复合体系的性质

在变形核 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 的碰撞过程中，弹核和靶核的接触会产生一个瞬时的复合体系，对这个碰撞过程的研究可以估计正电子的产生几率。我们将用 ImQMD 模型对变形核的 3 种不同碰撞模式形成的复合体系的寿命、形状、拉长取向等进行研究。

图 4 给出了在入射能量为 980 MeV 和碰撞参数 $b=0$ 时，变形核反应 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 形成复合体系的

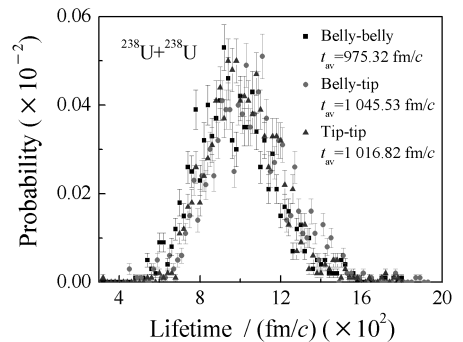


图 4 入射能量 980 MeV 和 $b=0$ fm 时的 3 种碰撞模式下复合体系寿命分布

寿命分布。从图 4 可以看出，腹对腹、尖对腹、尖对尖 3 种碰撞模式时，复合体系寿命的分布范围基本都是 400~1 600 fm/c，其中绝大多数反应事件形成的复合体系寿命在 600~1 400 fm/c 之间。另外，

从图中可以看出,与其他二者相比,尖对腹模式下能产生复合体系的寿命比其他二者复合体系的寿命更长的事件。为了研究复合体系寿命的平均大小,经过统计我们得出腹对腹、尖对腹和尖对尖 3 种不同碰撞模式在入射能量为 980 MeV 和 $b=0$ fm 时形成的复合体系的平均寿命依次为 $t_{av} = 975.32, 1\ 045.53$ 和 $1\ 016.82$ fm/c, 其中尖对腹的平均寿命最大,这表明在强阻尼反应中尖对腹碰撞模式有利于正负电子对的产生。然而,在 3 种不同碰撞模式下形成的复合体系寿命为什么不同呢?这是由于质子单粒子势表面上库仑位垒^[14]在 3 种模式下高度不同,Belly-tip 模式下的库仑位垒最高,使复合体系形状变得最紧密,从而有利于复合体系的存活。

为了得出入射能量为 980 MeV 时 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 在 3 种不同碰撞模式下形成复合体系形状的时间演化,我们计算了反应体系的四极矩随时间的演化,四极矩由公式

$$Q_{zz} = \sum_i [2z(i)^2 - x(i)^2 - y(i)^2]$$

计算得出。这里的 i 取遍反应体系中的所有核子, $x(i), y(i)$ 和 $z(i)$ 分别是第 i 个核子在坐标空间的 3 个坐标值。

图 5 给出了在入射能量 980 MeV 和 $b=0$ 时变形核体系 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 在 3 种不同形式碰撞下形成复合体系的四极矩 Q_{zz} 在整个过程中随时间的演化。3 种不同模式碰撞下的四极矩 Q_{zz} 很快($t=200$ fm/c)减小到近似于零;对腹对腹模式, $Q_{zz} \approx 0$ 将持续到大约 500 fm/c,之后又进一步随时间演化而变为负值;对尖对腹模式, $Q_{zz} \approx 0$ 将持续到大约 1 000 fm/c,之后又缓慢地变大;对尖对尖模式, $Q_{zz} \approx 0$ 将持续到大约 600 fm/c,之后又迅速增大。 $Q_{zz} \approx 0$ 表明在这段时间里的复合体系形状比较接近球形。 $Q_{zz} > 0$ 意味着复合体系的形状是一个长椭球,而且复合体系的拉长轴沿着束流方向(z 轴)。 $Q_{zz} < 0$ 表明复合体系的形状是一个扁椭球,而且复合体系的拉长轴垂直于束流方向。为什么 3 种不同模式下 $Q_{zz} \approx 0$ 的持续时间不同呢?这与前面提到的复合体系寿命紧密相关,复合体系保持球形的时间越长, $Q_{zz} \approx 0$ 的持续时间就越长,复合体系平均寿命也就越长。因此研究重核强阻尼反应形成复合体系拉长取向对于研究这种反应的机制是很重要的。

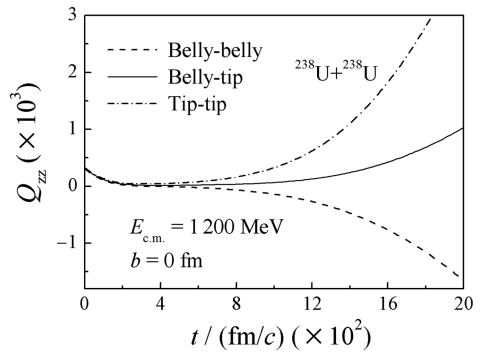


图 5 变形核体系 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 在 3 种不同形式碰撞下形成复合体系的四极矩 Q_{zz} 在整个过程中随时间的演化

为便于研究,我们计算了 3 种形式下复合体系的拉长取向与束流方向的夹角。在质心坐标系中,考虑到复合体系的分裂总是沿着复合体系的拉长轴,因此在计算中选择复合体系刚好裂变为两个碎块的质心连线在 xoz 平面的投影和 $yoze$ 平面的投影分别与 z 轴的夹角 θ_{xoz} 和 θ_{yoze} 为方位角。在 ImQMD 中,根据碎块质心坐标相减(大碎块坐标减去次最大碎块的质心坐标)得出 $\Delta X, \Delta Y$ 和 ΔZ ,再由 $\theta_{xoz} = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Z}\right), \theta_{yoze} = \arctan\left(\frac{\Delta Y}{\Delta Z}\right)$ 求出夹角 θ_{xoz} 和 θ_{yoze} 。在坐标相减的过程中大碎块和次最大碎块由于空间象限不同,会出现正负的情况,这导致 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 90^\circ$ 中相对应的度数时两个碎块的质心连线其实是一个方向。

图 6 分别给出了入射能量 980 MeV 和 $b=0$ fm 时,腹对腹(Belly-belly)、尖对腹(Belly-tip)、尖对尖(Tip-tip)3 种碰撞模式下形成复合体系拉长取向与束流方向的夹角 θ_{xoz} (a) 和 θ_{yoze} (b) 分布。可以看出,在图 6(a) 中尖对尖撞模式下 θ 分布的峰值基本在 0° 和 180° 附近,最小值基本分布在 90° 附近,说明这种模式绝大多数事件的复合体系的拉长取向沿着束流方向。尖对腹在 xoz 平面的 θ 分布比较平坦,说明复合体系的拉长取向在 xoz 平面的分布基本上各向同性的,这是因为这个复合体系的核子动量分布在 xoz 平面内达到了一个瞬时的热力学平衡,导致了复合体系此时在 xoz 平面基本达到了平衡。腹对腹在 xoz 平面的 θ 分布的峰值在 90° 附近,最小值基本分布在 0° 和 180° 附近,这表明复合体系的拉长取向垂直于束流方向。

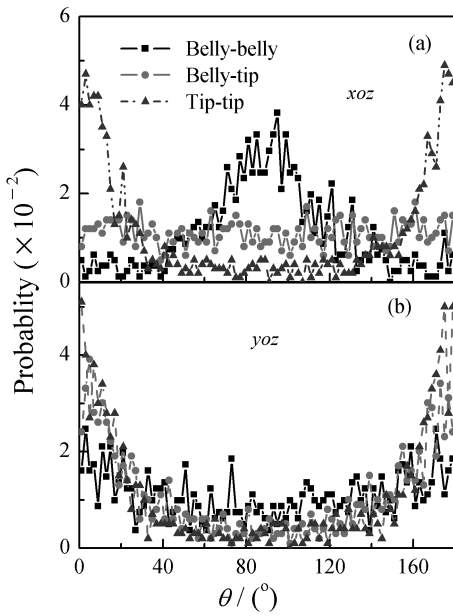


图 6 3 种模式下复合体系拉长取向与束流方向的夹角 θ 的分布

5 总结

用 ImQMD 模型对变形核 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 在强阻尼碰撞中巨复合体系的形成和衰变进行了研究。首先描述了变形初始核的制备, 并给出了尖对腹碰撞模式下一个对心碰撞事件的时间演化图, 使读者对强阻尼反应有一个直观认识。其次, 通过对反应产生的初级碎块的研究发现, 在腹对腹 (Belly-belly)、尖对腹 (Belly-tip)、尖对尖 (Tip-tip) 3 种碰撞模式下, 尖对腹碰撞模式更有利于产生初级超重碎块; 对反应过程中复合体系寿命的研究发现, 尖对腹碰撞模式下复合体系的平均寿命比其他情况下的平均寿命更长。复合体系平均寿命的长短与其形状相关, 因此研究了复合体系的四极矩随时间的演化, 发现尖对腹碰撞模式形成的复合体系保持球形位型的时间最长。此外, 还研究了 3 种模式下复合体系拉长取向与束流方向的夹角 θ 的分布, 发现尖对腹碰撞模式在反应平面内方位角分布几乎各向同性。

致谢 作者衷心感谢与中国原子能科学研究院李祝霞和吴锡真老师的有益讨论。

参考文献 (References):

[1] MOLLER P, NIX J R. J Phys G, 1994, **20**: 1681.

[2] OGANESSIAN Y T. EUR Phys J A, 2002, **13**: 135.
 [3] ZAGREBAEV V I, OGANESSIAN Y T, ITKIS M G C, *et al.* Phys Rev C, 2006, **73**: 031602(R).
 [4] ZAGREBAEV V I, GREINER W. J Phys G, 2007, **34**: 2265.
 [5] TIAN J L, WU X Z, LI Z X, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 064603.
 [6] ZHAO K, WU X Z, LI Z X. Phys Rev C, 2009, **80**: 054607.
 [7] HEINZ S, MITTIG W, VILLARI A C. GSI Sci Rep, 2006, 136.
 [8] GOLABEK C, VILLARI A C, HEINZ S. Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 2235.
 [9] HERRMANN G. Nature, 1979, **280**: 543.
 [10] REINHART J, MÜLLER U, GREINER W. Z Phys A, 1981, **303**: 173.
 [11] GREINER W. Quantum Electrodynamics of Strong Fields. New York: Plenum, 1983, 288.
 [12] HU Jiming, YANG Bojun, ZHENG Cunkai. Theoretical Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1993, 74 (in Chinese).
 (胡济民, 杨伯君, 郑春开. 原子核理论. 北京: 原子能出版社, 1993, 74.)
 [13] TIAN J L, WU X Z, LI Z X, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, **10**: 2796.
 [14] WANG N, LI Z X, WU X Z, *et al.* Mod Phys Lett A, 2005, **20**: 2619.
 [15] TIAN J L. Study of the Transport Theory in Heavy Ions Fusion and Strongly Damped Reaction [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2007, 72–74 (in Chinese).
 (田俊龙. 重离子融合反应和强阻尼反应的输运理论研究 [D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007, 72–74.)
 [16] GOLABEK C, SIMENEL C. Phys Rev Lett, 2009, **103**: 042701.
 [17] WANG N. The Improved Quantum Molecular Dynamical Model and Its Application in Nuclear Reactions at Low Energy [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003, 7–48 (in Chinese).
 (王宁. 量子分子动力学模型的发展及其在低能核反应中的应用 [D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003, 7–48.)
 [18] WANG N, LI Z X, WU X Z, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 034608.
 [19] LU Xiting. Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 2000, 211 (in Chinese).
 (卢希庭. 原子核物理. 北京: 原子能出版社, 2000, 211.)

Giant Composite System Formation and Decay in Strongly Damped Collisions with Deformed Nuclei

DENG Tian-yu¹, TIAN Jun-long^{1, 2}, TIAN Bo-bo¹, FU Dong-zhi¹

(1. *School of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455002, Henan, China;*

2. *Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Three different collision modes (Belly-belly, Belly-tip and Tip-tip) of the deformed uranium nucleus ^{238}U bombarding the deformed ^{238}U in strongly damped reaction at the incident energy 980 MeV has been investigated based on the improved quantum molecular dynamics (ImQMD) model. The formation and properties of the formed composite system during the reaction process were carefully studied including the lifetime, the shape configuration and the angular distribution of primary fragment. It was found that the Belly-tip mode is suitable for producing the super-heavy fragments, and the composite system has the longest lifetime in this mode.

Key words: ImQMD model; deformed nucleus; strongly damped collision; collision mode

Received date: 12 Aug. 2011; **Revised date:** 7 Sep. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11005003, 10975095, 11047108); Innovation Fund of Undergraduate at Anyang Normal University(ASCX12011-Z19)

Corresponding author: TIAN Jun-long, E-mail: tianjunlong@gmail.com