

文章编号: 1007-4627(2009)01-0008-05

基于ImIQMD模型对近垒重系统准裂变反应的研究*

赵旭林^{1,2}, 靳根明^{1,3}, 冯兆庆¹, 付 芬^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 兰州重离子加速器国家实验室理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用改进的同位旋相关的量子分子动力学(ImIQMD)模型程序, 对能量在库仑位垒附近的⁴⁸Ca+²⁰⁸Pb反应系统进行了模拟。计算得到的俘获截面、准裂变截面和碎片分布及其发生的时间分布等结果与实验数据符合较好。同时还得到了准裂变过程中发射第三个较大碎片的截面, 并简单讨论了它们的发射机制。

关键词: ImIQMD模型; 准裂变; 产生截面; 碎片分布

中图分类号: O571.4

文献标识码: A

1 引言

自从20世纪60年代初以来, 超重元素合成和研究一直是核物理学的一个热门研究领域。即使目前已经合成到118号元素, 在这一研究领域仍有许多重要的问题有待解决, 例如超重元素合成的反应机制问题就是其中的一个关键问题^[1]。长期以来, 重系统的熔合蒸发反应机制被认为是超重元素合成的基本反应机制, 无论是理论上或是实验上对它都进行了深入研究。但是, 随着合成目标核Z的增加, 在现有最重的靶核情况下, 入射弹核的Z也随之增加, 即反应系统变得越来越重, 由于准裂变反应道的竞争, 其熔合反应几率也随之降低, 使得熔合蒸发的几率就更小。为了更有效地合成超重元素目标核, 有必要对准裂变反应道的竞争进行更深入的理论研究。另一方面, 对非常重的反应系统, 例如U+U反应系统, 能否利用其准裂变合成超重元素也是值得研究的课题^[2]。

对熔合反应进行描述的理论模型有很多, 例如双核系统模型^[3-5]、宏观动力学模型^[6-8]、涨落-耗散模型^[9]和核子集体化模型^[10]等。但是, 这些模型用来对准裂变的描述, 特别是对准裂变的动力学过程的描述较少。近年来发展的“改进的同位旋相关的量子分子动力学”(ImIQMD)模型也开始用于超

重核合成反应的动力学过程的研究^[11-13], 不仅可以给出与实验全熔合截面数据符合较好的结果, 而且对整个碰撞过程也可进行较好的模拟。因此, 本文试图利用ImIQMD模型对重系统的碰撞过程中的准裂变过程进行模拟, 希望在此基础上得到反应中的准裂变截面及准裂变过程中第三个较大碎片的发射几率及其与碰撞过程中颈部形成的关系。本文首先对ImIQMD模型进行简单的介绍, 然后给出模拟结果, 随后对准裂变过程中发射的第三个较大碎片的机制进行简单讨论, 最后给出简单结论。

2 ImIQMD模型简介^[1, 2, 14-17]

在同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型的基础上, 考虑壳效应修正和其他方面的改进, 发展成为ImIQMD模型。具体改进如下:

(1) **作用势** 从Skyrme相互作用中直接得到的表面项代替原来的Yukawa项, 并引入表面对称项和有效质量项。作用势的具体形式如下:

$$U_{\text{loc}} = \frac{\alpha}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} + \frac{\beta}{1+\gamma} \sum_i \left(\sum_{j \neq i} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{g_{\text{sur}}}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \left[\frac{3}{2L} - \left(\frac{r_i - r_j}{2L} \right)^2 \right] \frac{\rho_{ij}}{\rho_0}$$

* 收稿日期: 2008-04-14

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475100)

作者简介: 赵旭林(1983-), 男(汉族), 福建安溪人, 硕士研究生, 从事核物理研究; E-mail: zhaoxulin05@impcas.ac.cn

$$g_{\tau} \sum_i \left(\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right)^{\eta} + \frac{C_{\text{sym}}}{2} \sum_i \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} t_{iz} t_{jz} \times \\ \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \left\{ 1 - k_{\text{sym}} \left[\frac{3}{2L} - \left(\frac{r_i - r_j}{2L} \right)^2 \right] \right\},$$

其中, α, β 和 γ 为势参数, ρ_0 为基态时的饱和密度, t_{iz} 为粒子同位旋自由度的第三分量(对中子和质子各等于1和-1), Z_i 为粒子的电荷数, g_{τ} , g_{sur} 和 C_{sym} 分别为有效质量项系数、表面项系数和对称能强度系数, L 为高斯波包宽度, k_{sym} 为对称压缩系数,

$$\rho_{ij} = \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(r_i - r_j)^2}{4L} \right].$$

(2) **Pauli 阻塞** 采用相空间占有率约束的方

法改善核子的费米子属性。

(3) **波包宽度** 波包宽度随体系大小有所变化, 原来没有随体系大小的依赖性。

(4) **核结构方面** 引进壳修正, 连接函数等方法,

$$U_{\text{shell}} = \frac{1+x}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_{\text{shell}}}{1 + \exp \left[(r_i - R_0)/a \right]},$$

式中, r_i 是在质心系下的径向坐标, N , R_0 和 a 分别为系统核子数、核半径和核表面弥散宽度, x 是对核表面弥散的修正, E_{shell} 是壳修正能。

(5) **ImIQMD势参数** 采用了拟合最新实验数据得到新的势参数(见表1), 稳定性也得到改善。

表1 ImIQMD模型采用的参数^[1, 12]

α/MeV	β/MeV	γ	ρ_0/fm^{-3}	η	g_{τ}/MeV	$g_{\text{sur}}/(\text{MeV} \cdot \text{fm}^2)$	$C_{\text{sym}}/\text{MeV}$	$K_{\text{sym}}/\text{fm}^2$
-356	303	7/6	0.165	2/3	7.0	12.5	32.0	0.08

3 模拟结果

我们对 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 反应系统进行了模拟, 演化时间为800 fm/c, b 取1.0—5.0 fm, Δb 取1.0 fm, 能量在170—198 MeV, 间隔4 MeV。

3.1 初始化

^{208}Pb 和 ^{48}Ca 的稳定性被控制到800 fm/c左右。图1反映了 R_{rms} 和平均结合能 B_{ave} 的演化。从图中可以看出, 当演化到800 fm/c时, 弹核和靶核的半径没有大的变化, 即仍然处于稳定状态, 因此可以说在模拟过程中, 不会由于核本身的振荡引起核子或核碎片的发射。

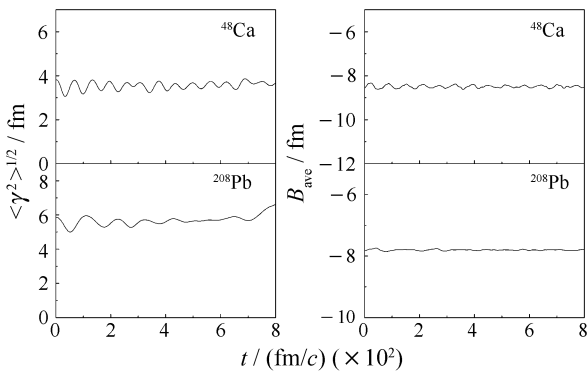


图1 ^{48}Ca 和 ^{208}Pb 的初始化

3.2 俘获截面

图2给出了计算得到的俘获截面及其与实验数据的比较, 其中Exp. 1数据来自文献[18], Exp. 2数据来自于文献[19]。俘获截面定义为靶核与弹核在碰撞过程中结合在一起的截面, 没有再考虑随后的发展。当然, 随着时间的演化, 弹核和靶核可能再分开(准裂变), 也可能形成复合核。实验截面是熔合裂变截面(对于重系统而言, 熔合蒸发截面与熔合裂变截面相比只占非常小的份额, 因此常以熔合裂变截面表示系统的熔合截面)。从图可以看出, 模拟得到的俘获截面与实验数据基本符合, 说明模拟过程是比较好的。

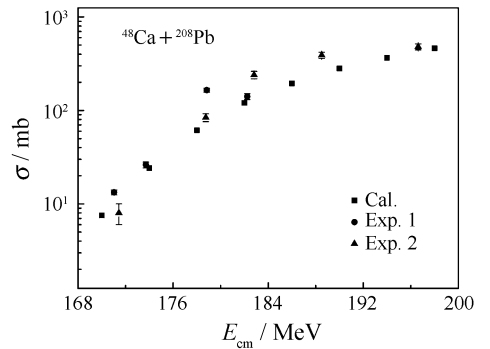


图2 模拟得到的俘获截面及其与实验数据的比较

3.3 准裂变截面

在重系统的碰撞过程中，准裂变的竞争是非常重要的。为了较好地研究 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 准裂变的竞争，我们将弹核被俘获后的一段时间内，例如500 fm/c，系统又发生了分裂的过程作为准裂变。当然在此过程中，由于弹核与靶核接触时间较长，会发生核子和能量的交换，出射的两个(或三个)碎片的质量和动能与入射系统有所不同。图3给出了模拟得到的准裂变截面。随着入射能量的升高，准裂变截面成指数上升趋势，并逐渐趋于饱和。与系统的俘获截面相比，大约是它的10%。

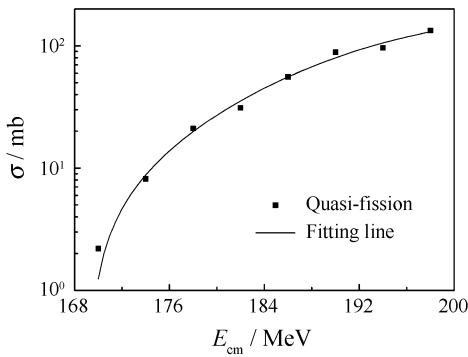


图3 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 准裂变截面

3.4 准裂变反应中的碎片分布

模拟计算的准裂变碎片的质量分布如图4，图5是文献[20]的结果。从图中可知，准裂变碎片的质量在弹核和靶核附近分别成峰，随着质量数向中间扩展，分布几率迅速下降。这与实验结果基本一致。我们将质量数在50—110的碎片分布提取出来给在图6中，同时也给出了用DNS(dinuclear system model)模型的计算结果^[1]和实验结果^[19]。可以看出，利用ImIQMD模型模拟得到的结果与实验数

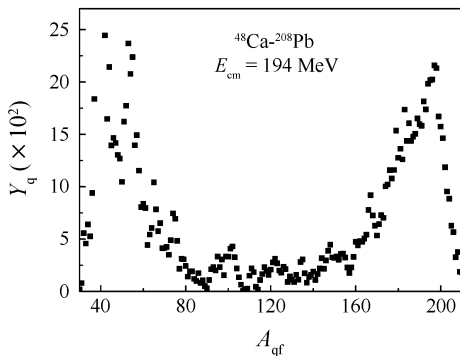


图4 本文模拟的准裂变碎片质量分布

据要比利用DNS模型计算的结果符合好得多。

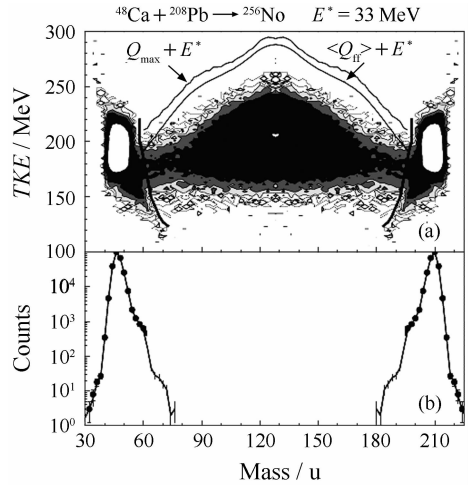


图5 文献[20]的准裂变碎片分布
(a)模拟结果，(b)实验结果。

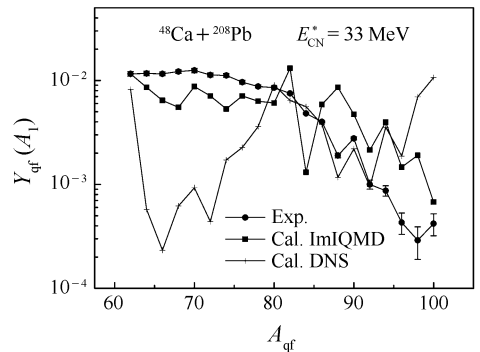


图6 准裂变碎片分布

3.5 准裂变过程中发射的第三碎片(A₃)截面

由于反应系统很重，在准裂变过程中弹核与靶核俘获后可能形成一个核子交换的通道，称之为颈部。随后分别以弹核和靶核为基础形成准裂变碎片时，颈部的部分核子会形成较小的独立碎片。另外，

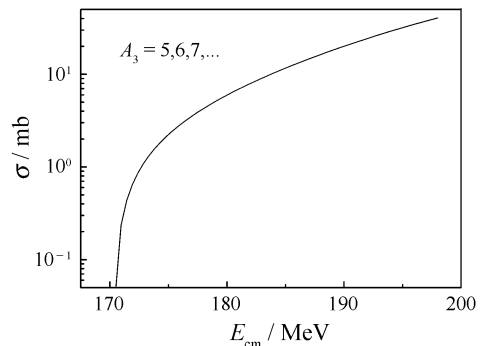


图7 第三大碎片发射截面

由于能量的耗散使得弹核和靶核激发也可能发射小的碎片, 这些小的碎片就称为准裂变时发射的第三个碎片。图7给出了准裂变过程中发射的质量数大于5的第三个较大碎片的截面分布。目前还没有关于这方面实验数据的报道。第三大碎片的发射机制将在随后进行进一步探讨。

3.6 准裂变发射时间及准裂变中质心距离的演化

图8统计了准裂变事件产生的时间。由图可见, 准裂变产生于弹靶核俘获之后(~ 300 fm/c), 准裂变事件产生时间与其发射碎片的质量密切相关, 发射碎片质量越接近靶(弹)核质量, 则发生准裂变的时间越早; 核子数的弛豫越强, 发射时间越长, 但最长也不超过300 fm/c。

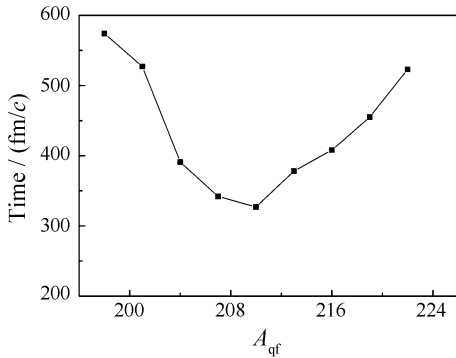


图8 准裂变发生的时间

4 第三大碎片的发射过程

根据模拟的情况可知, 在准裂变发生期间, 第三个较大碎片的形成有两种情况: 一种是由弹核和靶核俘获后, 由于核子的转移而受到激发, 其部分核子由于激发能较高, 可能直接分离出去而形成较大的核子集团; 另一种是在准裂变时, 类弹核和类靶核在颈部进行分裂的时候遗留下来, 成为独立的核子集团。这里, 我们称前者为“周边发射”(见图9(a)), 称后者为“中间发射(或者颈部发射)”(见图9(b))。可见“中间发射”与颈部的关系是紧密的。第三大碎片的发射主要不是稳定性引起的。首先, 虽然稳定性不足可以导致脱离, 但一般只是核子逐个脱离, 不会突然分裂一大块出去; 其次, 我们的初始化将稳定性控制到800 fm/c, 而这些发射在200—300 fm/c就发生了。

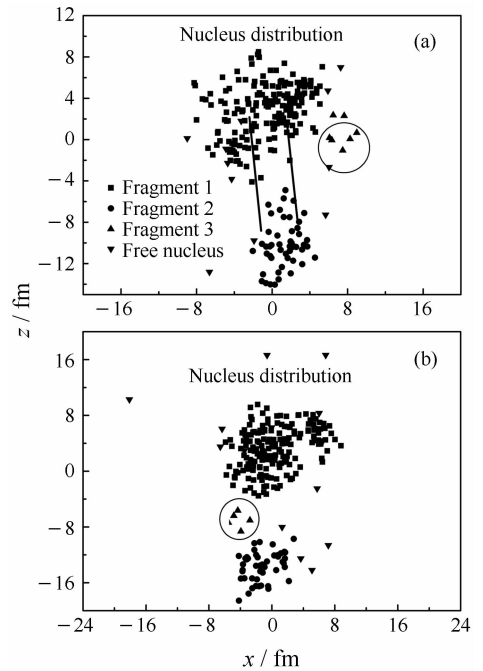


图9 核子分布

(a) 周边发射, (b) 中间发射。

5 结论

本文利用ImIQMD模型对近垒 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 的俘获截面、准裂变截面及其碎片质量分布和反应时间进行了模拟, 得到了与实验数据符合较好的结果。同时对准裂变过程中发射的第三个较大碎片也进行了计算, 并对其发射机制进行了简单分析。模拟结果表明, 由于ImIQMD在许多方面都进行了更为精确、合理的计算, 因此对低能区的反应动力学可以进行较成功的描述。特别是可以对重反应系统中的准裂变进行合理的描述, 这对研究准裂变与全融合反应的竞争是很有益处的。

研究准裂变反应中第三大碎片发射的意义在于它们可以提供关于颈部行为的信息。统计表明, 在本文研究的反应体系之中, 它们大量出现。对于它们出现的原因, 我们认为, “中间发射”是颈部行为直接引起的。这些都还需要实验的进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] Feng Zhaoqing. Studies on Heavy-ion Fusion Reactions near Coulomb Barrier and Synthesis of Superheavy Nuclei (Doctoral Thesis). Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese).

- (冯兆庆, 近垒重离子熔合反应及超重核合成研究(博士学位论文). 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2007.)
- [2] Feng Zhaoqing, Zhang Fengshou, Jin Genming, *et al.* Nucl Phys, 2005, A750: 232.
- [3] Volkov V V. Nuclear Reactions of Deep Inelastic Transfers. Moscow, Energoizdat, 1982.
- [4] Antonenko N V, Cherepanov E A, Nasirov A K, *et al.* Phys Lett, 1993, B319: 425; Antonenko N V, Cherepanov E A, Nasirov A K, *et al.* Phys Rev, 1995, C51: 2 635.
- [5] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, *et al.* Nucl Phys, 1997, A627: 361.
- [6] Swiatecki W J. Prog Part. Nucl. Phys, 1980, 4: 383; Swiatecki W J. Phys Scripta, 1981, 24: 113.
- [7] Bjornholm S, Swiatecki W J. Nucl Phys, 1982, A391: 471.
- [8] Blocki J P, Feldmeier H, Swiatecki W J. Nucl Phys, 1986, A459: 145.
- [9] Aritomo Y, Wada T, Ohta M, *et al.* Phys Rev, 1999, C59: 796.
- [10] Zagrebaev V I. Phys Rev, 2001, C64: 034 606; Zagrebaev V I, Aritomo Y. Phys Rev, 2001, C65: 014 607.
- [11] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen. Phys Rev, 2002, C65: 064 608.
- [12] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen, *et al.* Modern Physics Letters, 2005, A20: 2 619.
- [13] Feng Zhaoqing, Jin Genming, Zhang Fengshou, *et al.* HEP & NP, 2005, 29(12): 1 157(in Chinese).
(冯兆庆, 靳根明, 张丰收等. 高能物理与核物理, 2005, 29(12): 1 157.)
- [14] Feng Zhaoqing, Jin Genming, Fu Fen, *et al.* Chin Phys Lett, 2005, 22(4): 846.
- [15] Feng Zhaoqing, Jin Genming, Zhang Fengshou, *et al.* Chin Phys Lett, 2005, 22(12): 3 040.
- [16] Feng Zhaoqing, Jin Genming, Fu Fen, *et al.* Nucl Phys, 2006, A771: 50.
- [17] Chen Liewen. Studies on Isospin Effects in Heavy Ion Collisions at Intermediate Energies and Asymmetric Nuclear Matter Equation of State (Doctoral Thesis). Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000 (in Chinese).
(陈列文. 中能重离子碰撞中的同位旋效应及非对称核物质状态方程研究(博士学位论文). 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2000.)
- [18] Pacheco A J, Fernandez Niello J O, DiGregorio D E, *et al.* Phys Rev, 1992, C45: 2 861.
- [19] Prokhorova E V, Cherepanov E A, Itkis M G, *et al.* Phys Rev, 2003, C9: 21.
- [20] Itkisa M G, Benoitb B, Bogacheva A A, *et al.* Nucl Phys, 2004, A734: 29.

ImIQMD Simulation of Quas-fission Reaction of Heavy-system near Coulomb Barrier*

ZHAO Xu-lin^{1,2,1)}, JIN Gen-ming^{1,3}, FENG Zhao-qing¹, Fu Fen^{1,2}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

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

Abstract: Based on the improved isospin dependent quantum molecular dynamics (ImIQMD) model, the reaction of $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ at energies near the Coulomb barrier was investigated systematically. The capture cross section, the quasi-fission cross section, the mass distribution of the quasi-fission fragments and the time for quasi-fission happened were obtained. According to the comparison with experimental data, the calculated capture cross sections and the fragment distributions of the quasi-fission were reasonable. Additionally, we got the cross sections of the third largest fragment, and the emission mechanism was also discussed briefly.

Key words: ImIQMD model; quasi-fission; cross section; fragment distribution

* Received date: 14 Apr. 2008

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10475100)

1) E-mail: zhaoxulin05@impcas.ac.cn