

# $^{40,48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 融合反应的动力学模型研究\*

赵凯<sup>1</sup> 李祝霞<sup>1,2,3;1)</sup> 吴锡真<sup>1,2</sup> 王宁<sup>3</sup> 张英逊<sup>1</sup> 田俊龙<sup>1</sup> 张焕乔<sup>1</sup> 刘祖华<sup>1</sup>

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 兰州 730000)

3 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘要** 应用改进的量子分子动力学模型,在严格挑选初始核考虑弹靶结构效应的基础上,研究了近垒和垒上融合反应 $^{40,48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ . 研究表明:4个反应的理论计算截面与实验值很好符合;丰中子反应 $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ 的垒下融合截面比其他3个反应有明显增强的现象.为了理解丰中子反应 $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ 与 $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$ 相比垒下融合截面增强,而 $^{48}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ 垒下融合截面没有明显增强的原因,进一步分析了4个反应的融合位垒,中子转移与融合位垒的关系、中子转移与 $Q$ 值的关系,结果表明:正反应 $Q$ 值会引起核子(特别是中子)转移的增强,从而导致动力学融合位垒的下降和垒下融合截面增强.

**关键词** 量子分子动力学模型 融合截面 动力学位垒 核子转移 反应 $Q$ 值

## 1 引言

由于合成超重核研究的深入和放射性核束物理的发展,关于丰中子核反应机制的研究受到人们越来越广泛的重视.文献[1]应用改进的量子分子动力学模型研究了 $^{40}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 等核反应,揭示了在反应过程中由于中子流导致了颈部的形成,颈部的形成使反应的真实位垒(即动力学位垒)比通常的静态位垒降低,这种位垒降低效应对丰中子靶 $^{96}\text{Zr}$ 参与的核反应在入射能量低于静态位垒时最明显,这样就解释了丰中子核反应 $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ 比非丰中子核反应 $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$ 的垒下融合截面增强的现象.这一点在文献[2]的评述中予以了肯定,但是正如文献[1]本身和文献[2,3]所指出的,由于 $^{48}\text{Ca}$ 强的壳结构(虽然比 $^{40}\text{Ca}$ 多出8个中子,但核半径不比 $^{40}\text{Ca}$ 大),使其八极振动明显比 $^{40}\text{Ca}$ 弱,这与从 $^{90}\text{Zr}$ 增加中子到 $^{96}\text{Zr}$ 八极振动增强的趋势相反.因此在 $^{48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 反应中是否仍存在由于过剩中子导致垒下融合截面增强现象(相对反应 $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$ ),这在理论上(特别是在动力学理论上)是一个很值得研究的问题.最近的实验研究结果表明没有观察到 $^{48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 反应的垒下融合截面增强现

象<sup>[4]</sup>.因此我们有必要从反应机制上再重新细致地研究 $^{40,48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 4个核反应.作为研究这个问题的第一步,即研究弹靶结构效应对融合反应机制影响的第一步,我们通过严格考虑初始条件和选取初始核,尽可能好地再现弹靶原子核的结构效应.我们在改进的量子分子动力学模型基础上,对 $^{40,48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 4个核反应进行了研究,分析了过剩中子导致的中子转移增强(相对非丰中子反应 $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$ )和垒下融合截面增加现象,并且研究由于强的弹核壳效应对中子转移增强的抑制,从而导致 $^{48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 融合截面增强被抑制的现象.这些研究和分析加深了我们对丰中子核反应机制的理解.

## 2 理论模型

我们采用改进的量子分子动力学模型(ImQMD-II)可以从微观角度描述核的输运过程(详细介绍见文献[5]).

模型中每个核子由一个高斯波包描述:

$$\phi_i(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/4}} \cdot \exp\left[\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{4\sigma_r^2} + \frac{i\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}}{\hbar}\right], \quad (1)$$

2005-03-28 收稿

\*国家自然科学基金(10235030, 10235020)资助

1) E-mail: lizwux@iris.ciae.ac.cn

其中  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{p}_i$  分别为第  $i$  个粒子在坐标空间和动量空间中的波包中心的坐标和动量.

经过 Wigner 变换, 我们可以得到  $N$  个可区分核子的单体相空间分布函数:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \sum_i \exp\left[-\frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_i}{2\sigma_r^2} - \frac{\mathbf{p}-\mathbf{p}_i}{2\sigma_p^2}\right], \quad (2)$$

其中  $\sigma_r$  和  $\sigma_p$  分别为坐标空间与动量空间的波包宽度, 两者满足最小测不准关系:

$$\sigma_r \sigma_p = \frac{\hbar}{2}. \quad (3)$$

对相空间分布函数进行积分, 可以得到体系的密度分布函数与动量分布函数:

$$\rho(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) d\mathbf{p} = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/2}} \sum_i \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i)^2}{2\sigma_r^2}\right],$$

$$g(\mathbf{p}) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) d\mathbf{r} = \frac{1}{(2\pi\sigma_p^2)^{3/2}} \sum_i \exp\left[-\frac{(\mathbf{p}-\mathbf{p}_i)^2}{2\sigma_p^2}\right]. \quad (4)$$

模型中的每个核子在体系自身产生的平均场中自洽地运动, 满足正则运动方程:

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (5)$$

其中, 体系的哈密顿量包括动能项与有效相互作用势能项:

$$H = T + U, \quad (6)$$

其中  $T = \sum_i \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m}$ , 有效相互作用势能项包括短程相互作用与库仑相互作用:

$$U = U_{\text{loc}} + U_{\text{coul}}. \quad (7)$$

短程相互作用势能由 Skyrme 相互作用推导出来, 短程相互作用与库仑相互作用可由密度形式表述为

$$\begin{aligned} U_{\text{loc}} = & \frac{\alpha}{2} \sum_{i,j \neq i} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \sum_i \left( \sum_{j \neq i} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right)^\gamma + \\ & \frac{g_0}{2} \sum_{i,j \neq i} f_s \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} + g_\tau \sum_i \left( \sum_{j \neq i} \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right)^\eta + \\ & \frac{C_s}{2} \sum_{i,j \neq i} t_i t_j \frac{\rho_{ij}}{\rho_0} (1 - \kappa_s f_s), \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\rho_{ij} = \frac{1}{(4\pi\sigma_r^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r_{ij}^2}{4\sigma_r^2}\right), \quad t_i = \begin{cases} 1, & \text{proton} \\ -1, & \text{neutron} \end{cases},$$

$$f_s = \frac{3}{2\sigma_r^2} - \left(\frac{r_{ij}}{2\sigma_r^2}\right)^2, \quad \sigma_r = (0.16A^{1/3} + 0.49)\text{fm},$$

$$\begin{aligned} U_{\text{coul}} = & \frac{1}{2} \int \rho_p(\mathbf{r}) \frac{e^2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \rho_p(\mathbf{r}') d\mathbf{r} d\mathbf{r}' - \\ & \frac{3e^2}{4} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} \int \rho_p^{4/3} d\mathbf{R}, \end{aligned} \quad (9)$$

本工作中所用的核力参数见文献[5].

改进后的量子分子动力学模型 (ImQMD-II) 通过引入表面能项、对称能项、相空间占有数约束和  $\rho\tau$  修正项后, 改进了基态核的稳定性, 系统地再现了从 O 到 Pb 等大量基态核的方均根半径与结合能等属性, 在除核力外没有引入可调参数的情况下, 很好地再现了许多融合反应包括丰中子融合反应的融合截面、融合位垒等核反应特征(详细内容见文献[1, 6]).

### 3 结果与分析

#### 3.1 融合截面的计算

为了考虑弹核与靶核的结构效应, 我们严格挑选了  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  等弹核与靶核, 使结合能与方均根半径在 2000fm/c 时间内均保持稳定, 即在 2000fm/c 时间内与实验值<sup>[7]</sup>相比  $^{40}\text{Ca}$  与  $^{48}\text{Ca}$  的方均根半径最大相对偏差不超过 10%, 结合能最大相对偏差不超过 6% (如图 1 所示),  $^{90}\text{Zr}$  与  $^{96}\text{Zr}$  方均根半径最大相对偏差不超过 5%, 结合能最大相对偏差不超过 2% (如图 2 所示). 维持长时间稳定的初始核可以保证核内核子具有合理的相空间分布, 避免因不合理分布所引发的核子发射.

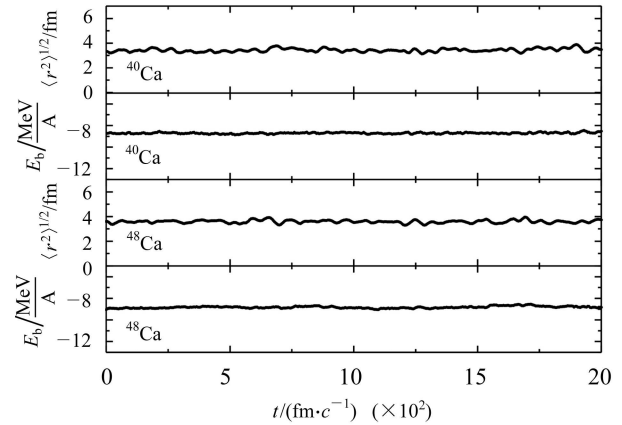


图 1 基态核  $^{40,48}\text{Ca}$  的方均根半径与结合能在 2000fm·c<sup>-1</sup> 内的演化状况

在反应过程中, 我们将弹核与靶核放置在初始距离为 30fm 的位置, 对每个入射能量, 在每个碰撞参数下进行了近 300 个反应事件的研究. 关于融合事件的辨认, 我们考虑了核反应体系的表面振动与转动效应. 所以在反应过程中当弹核与靶核的质心距离接近到较

大核的方均根半径时, 还不能认为体系已经融合, 而是将反应体系继续演化一段时间(约500fm/c), 使融合体系已经完成了反应过程, 弹核与靶核的质子持续保持重合的状态, 若在此过程中出射核子数小于或等于6个, 这样的反应事件, 我们认为属于融合事件<sup>[1]</sup>.

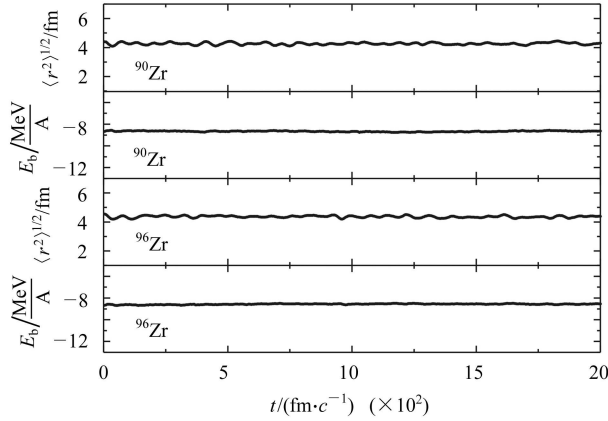


图2 基态核 $^{90,96}\text{Zr}$ 的方均根半径与结合能在 $2000\text{fm} \cdot \text{c}^{-1}$ 内的演化状况

在不同的反应能量与碰撞参数下, 由融合事件的数目可以得到融合几率 $g_{\text{fus}}(E, b)$ , 进而得到在不同反应能量下的融合截面(详细内容见文献[6]):

$$\sigma_{\text{fus}}(E) = 2\pi \int_0^{b_{\text{max}}} g_{\text{fus}}(E, b) b db = 2\pi \sum_0^{b_{\text{max}}} g_{\text{fus}}(E, b) b \Delta b. \quad (10)$$

采用ImQMD-II模型, 我们模拟了4种反应体系 $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 在近垒至垒上的不同能量下多个碰撞参数的反应过程, 由表达式(10)计算出4种反应的融合截面, 并与实验数据<sup>[4, 8]</sup>进行了比较, 其结果示于图3. 其中横坐标的质心能量 $E_{\text{cm}}$ 被 $V_b$ 除,  $V_b$ 取自于文献[9]提供的Bass融合位垒.

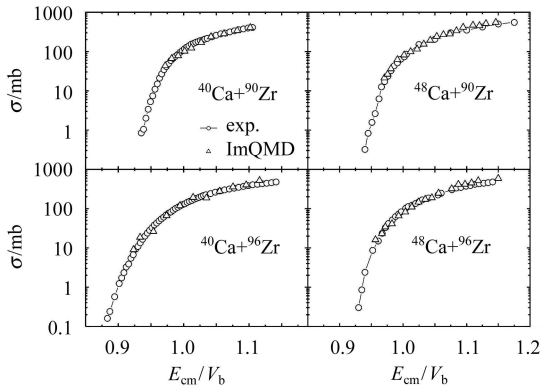


图3 4种反应体系 $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 融合截面的理论值与实验值的比较

由图3可以看出, 理论很好地再现了4个反应的实验结果, 这些计算均是在没有可调参数的情况下取得

的. 结果显示了反应体系 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 在垒下比其他3个体系的融合截面明显增大. 为了进一步分析丰中子核反应 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 的垒下截面的增强和丰中子核反应 $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 垒下截面增强被抑制现象, 我们需要从动力学角度分析4种反应的位垒下降以及中子转移等问题.

### 3.2 动力学位垒

在我们的模型中, 入射道核-核相互作用势可以通过如下表达式得到<sup>[6]</sup>:

$$V_b(R) = E(R) - E_1 - E_2, \quad (11)$$

其中 $R$ 为弹核与靶核之间的质心距离,  $E(R)$ 为相互作用体系的总能量,  $E_1$ 和 $E_2$ 分别为弹核与靶核的能量. 通过Thomas-Fermi近似, 上述能量可以用密度泛函的形式表示出来<sup>[6]</sup>.

由于表达式(11)中 $E(R)$ ,  $E_1$ 和 $E_2$ 表示每一时刻的能量, 所以 $V_b(R)$ 是弹核与靶核质心距离(或时间)的动力学函数. 我们研究和比较了 $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 融合反应的动力学位垒, 发现在近垒和垒上它们有相似的行为. 现以4种反应体系的质心能量在位垒以上5MeV的结果为例, 给出随弹核与靶核质心距离变化的动力学位垒, 如图4所示. 由图可见 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 反应的位垒高度明显比其他3个反应的位垒高度低, 且宽度也较窄. 这使 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 体系在位垒附近最容易跨过(或穿透)位垒, 使融合几率增大. 所以, 与其他3个反应相比,  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 在位垒附近及垒下的融合截面会增强.

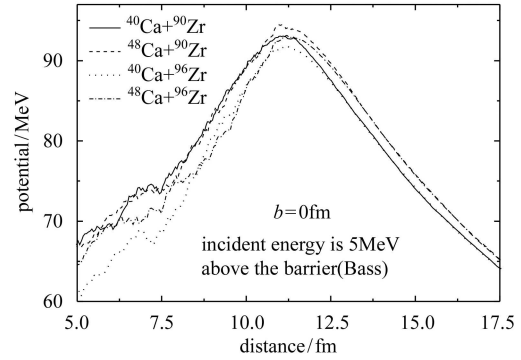


图4 4种反应体系在位垒以上5MeV对心碰撞时的动力学融合位垒

为了理解丰中子反应 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 位垒明显下降, 而丰中子反应 $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 位垒没有明显下降的原因, 现在讨论一下中子转移对位垒高度的影响. 我们在表1和表2分别给出了4种体系在位垒以下3MeV对心碰撞中当接近位垒时在不融合事件和融合事件中由靶核到弹核(表中from T to P)与由弹核到靶核(表中from

表 1 位垒(Bass)以下 3MeV 时, 4 种反应体系的不融合事件中中子不同方向转移事件的几率(%)

	Neutron (from T to P)	Neutron (from P to T)
$^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	5.86	19.25
$^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	13.94	16.83
$^{48}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	9.48	31.47
$^{48}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	8.30	32.75

表 2 位垒(Bass)以下 3MeV 时, 4 种反应体系的融合事件中中子不同方向转移事件的几率(%)

	Neutron (from T to P)	Neutron (from P to T)
$^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	16.05	8.64
$^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	11.11	0
$^{48}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	12.50	20.83
$^{48}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	11.76	13.73

P to T) 中子转移事件的几率. 在不融合事件中, 由弹核(Ca)到靶核(Zr)转移中子的事件几率高于相反方

向转移中子事件的几率, 但其中  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  反应中两者的差别最小. 而在融合事件中, 只有  $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  由弹核(Ca)到靶核(Zr)转移中子事件的几率高于由靶核向弹核转移中子事件的几率, 而在  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  反应中前者的几率明显小于后者. 图 5 给出了 4 种反应体系在中子转移方向不同和数目不同时 Bass 融合位垒的变化. 4 种反应体系当中子由弹核向靶核转移时融合位垒高度会增加、位垒宽度会增大, 而相反方向转移时位垒高度和宽度均会减小. 由于  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  中由靶核  $^{96}\text{Zr}$  到弹核  $^{40}\text{Ca}$  转移中子的几率最大, 从而导致了位垒的下降. 与此相反, 在  $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  反应中, 更多的中子由弹核  $^{48}\text{Ca}$  向靶核  $^{90,96}\text{Zr}$  转移, 融合位垒不会下降. 中子的这种转移效应导致的结果正如图 4 所示,  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  的融合位垒降低, 而  $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  的融合位垒没有降低.

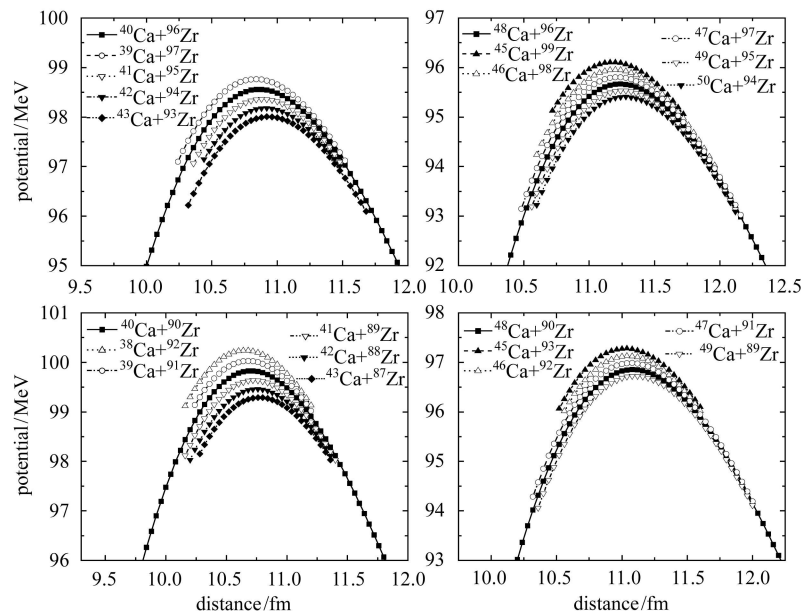


图 5 对于 4 种反应体系  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ , 当体系的中子数与质子数保持不变时, 随着弹核与靶核内中子数的变化引起的融合位垒(Bass)的差异

因此, 在  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  的丰中子反应中, 原子核中的过剩中子并不总能引起位垒的降低, 其中还依赖于中子转移的方向与中子转移的数目.

### 3.3 核子的转移与 $Q$ 值的关系

人们发现具有不同  $Q$  值的中子转移反应对融合过程的影响也是不同的<sup>[2, 3]</sup>, 所以通过动力学理论模型分析不同的中子转移过程与反应  $Q$  值的关系以及它对融合截面的影响也是十分必要的.

当弹核与靶核逐渐接近时, 由于两者之间单粒子势(垒)的降低, 弹核(或靶核)内的少数核子可以跨过

或贯穿单粒子势(垒)而进入靶核(或弹核), 由于不同方向和不同种类的核子转移对反应体系的融合位垒的影响不同, 所以这些少数核子的转移对体系的进一步演化起了十分重要的作用.

我们比较了 4 种反应体系  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  在位垒以下 3MeV 对心碰撞时, 在整个反应过程中没有核子发射的事件中不同核子转移的几率, 由表 3 可以看出不同方向和不同种类的核子转移的事件的几率是不同的. 其中 Pick-up 表示核子由靶到弹的转移, 而 Stripping 则表示由弹到靶的转移. 由表可见, 对反应  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  中子由 Zr 到 Ca 的转移(特别是 1n 转移)的

表3 4种反应体系中不同的核子转移事件在所有反应事件中的几率(%)

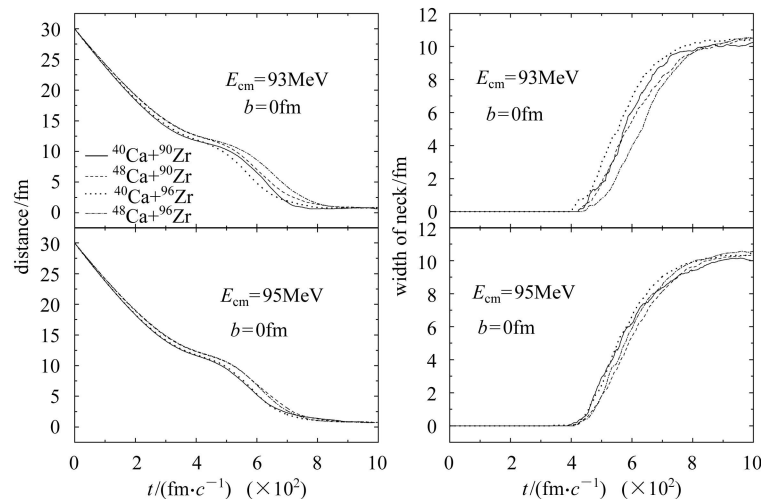
		$^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	$^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	$^{48}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	$^{48}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$
Pick-up	1n	2.19	5.00	2.14	2.86
	2n	0.31	1.07	0.71	0
	3n	0	0.36	0	0
Stripping	1p	2.81	1.43	0	2.50
	2p	0.62	0	0	0
Pick-up	1p	0.31	0	1.79	0.36

几率最大. 而其他反应, 包括丰中子反应 $^{48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 中子转移几率较小. 将中子转移与相应反应 $Q$ 值相比较是很有意义的, 表4给出了4种反应体系中核子转移对应的 $Q$ 值. 我们发现只有反应 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 中子由Zr向Ca的转移反应 $Q$ 值为正, 而其他3个反应相应中子转移反应 $Q$ 值为负, 说明只有反应 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 中子由Zr向Ca的转移反应容易进行. 因而导致动力学位垒降低和垒下融合截面增强.

表4 4种反应体系中不同核子转移反应的 $Q$ 值(MeV)

		$^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	$^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$	$^{48}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$	$^{48}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$
Pick-up	1n	-3.608	0.510	-6.825	-2.707
	2n	-1.438	5.528	-9.784	-2.818
	3n	-5.858	5.240	-18.625	-7.527
Stripping	1p	0.159	-0.872	-10.655	-8.358
	2p	1.234	2.541	-16.458	-11.823
Pick-up	1p	-3.944	-10.406	1.277	-1.837

我们还比较了4种反应体系在质心能量为93和95MeV时的对心碰撞下, 弹核与靶核之间的质心距离和颈部的大小随时间的变化过程, 结果如图6所示. 能量越低, 4种反应体系的行为差异也越明显. 我们特别注意到 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 反应的两核质心距离随时间减小最快, 同时颈部成长也最快. 分析其原因, 归于中子转移起了重要的作用. 因此在丰中子核反应中, 如果中子转移的 $Q$ 值是正值, 中子转移易于进行, 颈部成长快, 动力学位垒降低, 导致垒下融合截面增强.

图6 4种反应体系 $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 在质心能量分别为93和95MeV时对心碰撞下的两核质心距离与颈部大小随时间的变化

## 4 总结

为了研究壳结构效应和丰中子流对融合过程的影响, 我们采用了改进的量子分子动力学模型, 再现了上述4个体系的融合过程并深入分析了在核反应中丰中子的动力学效应. 严格挑选出在2000fm/c内始终保持稳定的初始核, 模拟 $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$ 在近垒及位垒以上多个入射能量和多个碰撞参数下的融合过程, 计算出了4种反应体系的融合截面, 得到的理论结果与实验数据符合得很好. 在进一步分析比较4种反应体系的动力学位垒时, 我们发现中子流效应不但引起颈

部的成长, 而且中子不同方向的转移也会引起反应体系融合位垒下降或升高的程度不同,  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 反应中中子由Zr向Ca的转移占有优势, 这使得 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 的融合位垒高度在4个反应中下降的最多、宽度最窄, 有利于反应体系跨过(或穿透)位垒而使融合截面增强. 同时还发现核子发生转移的几率与 $Q$ 值是有关的, 正 $Q$ 值对应的核子转移事件几率较大, 而负 $Q$ 值对应核子转移事件的几率较小. 在4个反应中, 只有 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ 中子由Zr向Ca转移的 $Q$ 值为正值, 从而使这种转移反应几率增大, 使融合位垒降低, 增大了融合几率, 出现了融合截面增强的现象.

## 参考文献(References)

- 1 WANG Ning, WU Xi-Zhen, LI Zhu-Xia. Phys. Rev., 2003, **C67**: 024604
- 2 Newton J O, Butt R D, Dasgupta M et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 024605
- 3 Zagrebaev V I. Phys. Rev., 2003, **C67**: 061601
- 4 ZHANG Huan-Qiao, LIU Zu-Hua et al. Progress of Theoretical Physics, 2004, **150**: 31
- 5 ZHAO Kai. The Study of Dynamical Mechanism in Low Energy Fusion Reaction by Quantum Molecular Dynamics Model. Beijing: China Institute of Atomic Energy, P.H.D Thesis, 2005, 6(in Chinese)
- (赵凯. 采用量子分子动力学模型研究低能核融合反应的动力学机制. 北京: 中国原子能科学研究院, 博士论文, 2005, 6)
- 6 WANG Ning, LI Zhu-Xia, WU Xi-Zhen et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034608
- 7 NING Ping-Zhi, LI Lei, MIN De-Fen. Fundamental Nuclear Physics. Beijing: Higher Education Press, 2003(in Chinese) (宁平治, 李磊, 闵德芬. 原子核物理基础. 北京: 高等教育出版社, 2003)
- 8 Timmers, Ackermann D, Beghini S et al. Nucl. Phys., 1998, **A633**: 421
- 9 Reiner Bass, Nuclear Reactions with Heavy Ions. New York: Berlin Heidelberg, 1980

Dynamic Model Study of Fusion Reactions for  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}^*$ 

ZHAO Kai<sup>1</sup> LI Zhu-Xia<sup>1,2,3;1)</sup> WU Xi-Zhen<sup>1,2</sup> WANG Ning<sup>3</sup> ZHANG Ying-Xun<sup>1</sup>  
 TIAN Jun-Long<sup>1</sup> ZHANG Huan-Qiao<sup>1</sup> LIU Zu-Hua<sup>1</sup>

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)

3 (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract** Based on the Improved Quantum Molecular Dynamics Model the fusion reactions of  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  are studied by making a more rigorous treatment of the initial condition. The study shows that: (1) the calculated fusion cross sections for all four reactions of  $^{40,48}\text{Ca}+^{90,96}\text{Zr}$  are in good agreement with experiment data; (2) the sub-barrier fusion for the neutron-rich reaction  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  is substantially enhanced as compared with the other three reactions. In order to understand the reason why the sub-barrier fusion of the neutron-rich reaction  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  is enhanced as compared with the non-neutron-rich reaction  $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  and that of the neutron-rich reaction  $^{48}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$  is not enhanced, the further investigations are carried out, those are: the dynamic fusion barriers for four reactions, the relation between dynamic fusion barrier and nucleon transfer and the relation between nucleon transfer and corresponding reaction  $Q$  value. It has been found that positive  $Q$  value leads to the strong nucleon transfer which reduces the dynamic fusion barrier and enhances the sub-barrier fusion cross section.

**Key words** Quantum Molecular Dynamics Model, fusion cross section, dynamic barrier, nucleon transfer, reaction  $Q$  value

Received 28 March 2005

\*Supported by National Science Foundation of China (10235030, 10235020)

1) E-mail: lizwux@iris.ciae.ac.cn