

文章编号: 1007-4627(2014) 03-0350-09

重离子碰撞中熔合位垒的研究

祝龙¹, 苏军¹, 谢文杰¹, 郭琛琛¹, 张冬红¹, 张丰收^{1, 2, 3}

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;

2. 北京市辐射中心, 北京 100875;

3. 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心, 兰州 730000)

摘要: 熔合位垒的研究对熔合反应以及超重核合成有重要的意义。在改进的同位旋相关的量子分子动力学 (ImIQMD) 模型框架下, 提取了熔合反应体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ 和 $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ 的熔合位垒。研究了壳修正能对熔合位垒的影响、动力学位垒的能量依赖性、同位旋效应以及形变核的方向效应。计算发现壳修正能降低了熔合反应的位垒。在研究动力学位垒的能量依赖性时, 发现位垒高度和位垒半径表现出相反的能量依赖行为。在动力学反应中, 当两个核距离接近时, 缺中子体系的库仑势同样表现出一定的能量依赖性。对于丰中子体系, 由于中子屏蔽作用, 库仑势基本没有能量依赖性。

关键词: 熔合位垒; 壳效应; 同位旋依赖; 能量依赖; 方向效应; 超重核

中图分类号: O572.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.03.350

1 引言

在低能核反应中, 通过熔合反应产生复合核是一个非常非常重要的研究领域。熔合反应是超重核合成的主要过程^[1-2]。熔合位垒是研究熔合反应的核心。近年来对熔合位垒的研究引起了人们很大的兴趣^[3-13]。

超重核的存在是因为壳效应使得裂变位垒升高。Strutinsky 提出了一个考虑壳效应的方法^[14-15]。在超重核合成中, 壳效应的重要性得到了人们的重复强调^[16]。人们发现对于特定的反应, 壳修正能提高或者是降低熔合位垒^[17]。

对动力学位垒的能量依赖性已经做了大量的研究^[18-21]。但是这些工作的入射能量大多在库仑位垒附近。这些工作都指出, 动力学位垒低于静态位垒, 并随着入射能量的升高而升高, 最后接近静态位垒。这是由于在动力学演化中由于脖子的产生, 以及一些动力学形变使得动力学位垒相比静态位垒低。最近有工作指出^[22], 在更大的入射能量范围内有一些新的现象产生, 比如在某些入射能量下动力学位

垒高出静态位垒, 在改进的同位旋相关的量子分子动力学 (ImIQMD) 模型框架下, 已经看到类似的现象^[23]。

超重核研究的一个重要目标就是走进稳定岛。近年来, 大量的超重核被合成, 然而距离稳定岛还没有足够的中子数, 采用放射性核束是合成丰中子核的一个重要途径。所以熔合位垒的同位旋效应是值得研究的。最近有很多工作发现^[24-26], 对于丰中子弹核, 其熔合截面在垒下提高, 垒下熔合截面的升高主要由于其熔合位垒降低。通过理论计算发现丰中子反应体系的熔合位垒相比缺中子要低。对核核相互作用势的同位旋效应的研究, 已做了大量的工作^[27]。

耦合道模型已经被广泛地用于研究库仑位垒附近的熔合反应机制^[28-30]。核子转移、低振动和转动态的激发、脖子的形成以及静态形变的耦合会使得垒下熔合截面有很大的提高。对于形变体系, 其静态形变效应是垒下截面升高的主要原因。所以研究形变反应体系的熔合位垒的方向效应是很有必要的。

收稿日期: 2013-09-13; 修改日期: 2013-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(11025524, 11161130520); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(G2010CB832903)

作者简介: 祝龙(1988-), 男, 甘肃定西人, 博士生, 从事重离子核物理研究; E-mail: zhulong@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张丰收, E-mail: fszhang@bnu.edu.cn.

量子分子动力学(QMD)模型, 作为半经典的动力学模型, 已经成功地应用于中能重离子碰撞的研究^[31-32]. 在将其改进后, 在低能区人们同样做了很多研究^[33-35].

在本工作中, 我们采用ImIQMD模型研究重离子碰撞中熔合位垒的壳修正效应、能量依赖性、同位旋效应以及形变核的方向效应. 第二部分简单介绍了ImIQMD模型. 第三部分分别讨论了熔合位垒的一些效应. 第四部分做了总结.

2 ImIQMD模型

在ImIQMD中, $\mathbf{r}_i(t)$ 和 $\mathbf{p}_i(t)$ 分别是第*i*个核子在坐标和动量空间的波包中心,

$$\psi_i(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi L)^{3/4}} \times \exp\left\{-\frac{[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)]^2}{4L}\right\} \cdot \exp\left[\frac{i\mathbf{p}_i(t) \cdot \mathbf{r}}{\hbar}\right]. \quad (1)$$

式中: L 是高斯波包宽度的平方. 通过Wigner变换可以得到Wigner密度, 即

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \sum_i f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t), \quad (2)$$

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \times \exp\left\{-\frac{[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)]^2}{2L} - \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i(t))^2 \cdot 2L}{\hbar^2}\right\}. \quad (3)$$

从而进一步得到坐标空间和动量空间的密度分布, 即

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

$$g(\mathbf{p}, t) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{r} = \sum_i \left(\frac{2L}{\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i(t))^2 \cdot 2L}{\hbar^2}\right]. \quad (5)$$

在ImIQMD中, 一个非常大的改进就是考虑了壳效应. 通过双中心壳模型得到壳修正能^[36-37], 并将其与动力学模型结合起来. 在ImIQMD中壳修正

QMD是半经典的模型, 其演化方程是经典的牛顿方程, 即

$$\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}. \quad (6)$$

哈密顿量由动能和势能两部分组成, 其可以写为

$$H = T + U, \quad (7)$$

$$T = \sum_i \frac{p_i^2}{2m}. \quad (8)$$

势能 U 由库仑势 U_{Coul} 和局域相互作用势 U_{loc} 组成, 即

$$U = U_{\text{Coul}} + U_{\text{loc}}. \quad (9)$$

其中:

$$U_{\text{Coul}} = \frac{e^2}{4} \times \sum_{i,j,i \neq j} \frac{(1-t_{z_i})(1-t_{z_j})[1 - \text{erfc}(r_{ij}/\sqrt{4L})]}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, \quad (10)$$

$$U_{\text{loc}} = \int V_{\text{loc}}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (11)$$

以上两式中, t_{z_i} 为第*i*个粒子的同位旋自由度的第三分量, 对中子和质子分别等于1和-1. $V_{\text{loc}}(\mathbf{r})$ 是势能密度, 由Skyrme有效相互作用势给出, 可写为

$$V_{\text{loc}} = \frac{\alpha}{2} \frac{\rho^2}{\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \frac{\rho^{\gamma+1}}{\rho_0^\gamma} + \frac{g_{\text{sur}}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + g_\tau \frac{\rho^{8/3}}{\rho_0^{5/3}} + \frac{C_s}{2\rho_0} [\rho^2 - k_s (\nabla\rho)^2] \delta^2. \quad (12)$$

上式中依次是两体项、三体项、表面能项、有效质量项、以及对称能项(包括体积对称能 $C_s/2\rho_0\rho^2\delta^2$ 和表面对称能项 $-C_s/2\rho_0k_s(\nabla\rho)^2\delta^2$). 其中 $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ 是同位旋不对称度. 表1给出了公式(12)的势参数.

表1 计算中采用的势参数

α/MeV	β/MeV	γ	$g_{\text{sur}}/\text{MeV}\cdot\text{fm}^2$	g_τ/MeV	C_s/MeV	κ_s/fm^2	ρ_0/fm^{-3}
-298.7	220	7/6	20.0	9.7	32.0	0.08	0.165

势可以写为

$$U_{\text{shell}}^{(n/p)} = -\sum_i \int \frac{C_0 E_{\text{shell}}^{(n/p)}(R) [\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^{(n/p)}]^2}{\exp[(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^{(n/p)})^2/C_1]} d\mathbf{r}, \quad (13)$$

在该式中, $E_{\text{shell}}^{n/p}(R)$ 是由双中心壳模型计算得到的壳修正能。 R 和 $r_i^{(n/p)}$ 分别是两碰撞核的距离和第 i 个中子或质子的位置。参数 $C_0 = 0.0012 \text{ fm}^{-3}$, $C_1 = 6.42 \text{ fm}^2$ 。在 ImIQMD 模型中, 核核相互作用势的定义如下:

$$V(R) = E_{\text{pt}}[\rho(t)](R) - E_{\text{P}}[\rho_{\text{T}}(t)] - E_{\text{t}}[\rho_{\text{P}}(t)]. \quad (14)$$

在该式中, R 是两碰撞核的中心距离; E_{pt} , E_{P} 和 E_{t} 分别是体系的总能量、弹核的总能量以及靶核的总能量。这些量都是与体系的密度分布有关, 它们都是由势能和动能组成。

动能由 Thomas-Fermi 近似得到, 即

$$\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \left(\frac{3\pi^2 \rho_i}{2} \right)^{2/3}, \quad (15)$$

其中: ρ_i 是相互作用密度, 可写为

$$\rho_i = \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \sum_j \exp \left[-\frac{(r_i - r_j)^2}{4L} \right]. \quad (16)$$

在使用 ImIQMD 计算时, 当两个反应核质心距离小于 2 fm 时, 并且蒸发核子数少于 2 个时, 认为两反应核发生了熔合。

3 结果和讨论

在该部分将对熔合反应动力学位垒的壳修正效

应、能量依赖性、同位旋效应、以及形变体系的方向效应进行描述。

3.1 壳效应

在低能重离子熔合反应中, 壳效应起着非常重要的作用。图 1(a) 和 (b) 给出了两个反应体系 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$ 的中子能级演化图。 $R_n = (R - R_f)/(R_t - R_f)$ 是约化距离, 其中 $R_t = R^t + R^p$ 是两核表面接触时的距离, $R_f = R^c - R^p$ 是最终的距离。 R^c , R^t 和 R^p 分别为复合核、靶核以及弹核的半径。约化距离为 0 代表两个核形成了一个复合核。复合核的中子满壳位置在图中被对应的满壳中子数标出, 从图 1(a) 和 (b) 可以看出在两个核距离比较远时, 其总体系的能级为两反应核能级简单的叠加; 当两核距离接近时, 能级出现相互交叉。从图中还可以看出在演化过程中, 有些能级升高, 有些能级降低, 最后形成复合核的能级。在这两个体系中, ^{208}Pb 是个双幻核, 而 ^{204}Pb 中子不是满壳。图 1(c) 给出了两个体系的中子壳修正和质子壳修正。从该图可以看出两个体系的质子壳修正能很接近, 而中子壳修正能相差比较大。这是因为两个反应体系都是相同元素, 而 ^{208}Pb 和 ^{204}Pb 相差四个中子。对两个体系, 因为都是球形核, 并忽略质量不对称度的不同, 所以可以得出结论: 中子壳修正能的差距主要由于 ^{208}Pb 是中子满壳, 而 ^{204}Pb 不是。在 ImIQMD 中, 通过提取壳修正能, 并将其作为平均场的一项, 用于核子的演化, 会看到其对熔合位垒的影响。

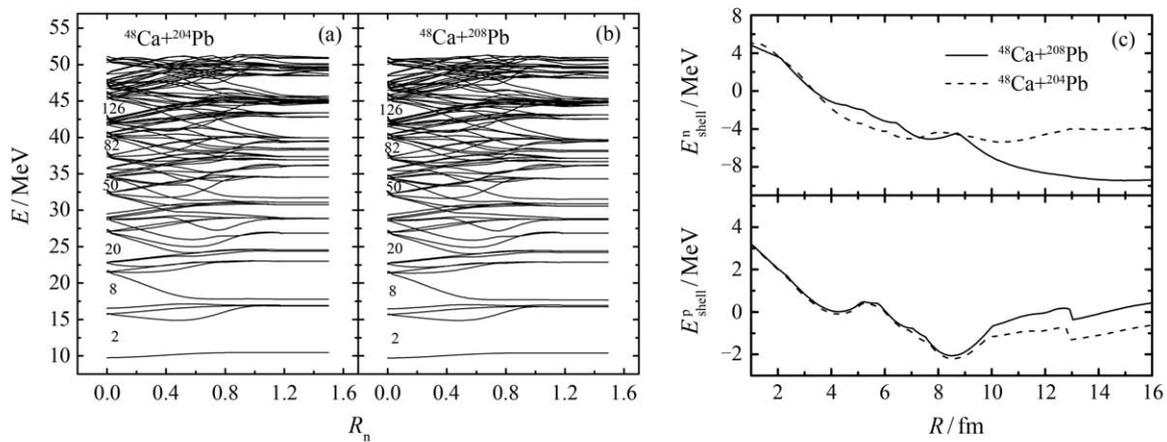


图 1 反应体系 $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$ 的中子能级演化图 (a) 及反应体系 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 的中子能级演化图 (b) 和两个反应体系的质子和中子壳修正 (c)

图 2 给出了壳修正对于两个反应体系 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ 的动力学位垒的影响。对于体系 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 在不考虑壳修正时, 位垒高度 $V_B = 160.93 \text{ MeV}$, 在考虑壳修正效应后, 位垒高度变为 $V_B = 155.50 \text{ MeV}$, 位垒高度降低了 5.4 MeV 。对于体系 $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ 在不考虑壳修正效应时, $V_B = 160.30 \text{ MeV}$, 在考虑壳修正后, $V_B = 159.0 \text{ MeV}$, 位垒降低了 1.3 MeV 。可以看出壳修正使得这两个体系的动力学位垒降低, 对于体系 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 更明显。体系 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 在对应的位垒半径附近其壳修正能是 $E_{\text{shell}} = -9.4 \text{ MeV}$, 体系 $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ 在其位垒半径附近的壳修正能 $E_{\text{shell}} = -5.4 \text{ MeV}$ 。可以看出, 对于这两个体系的壳修正能都为负, 然而对于双幻核体系其绝对值更大, 所以对动力学位垒的影响更明显。

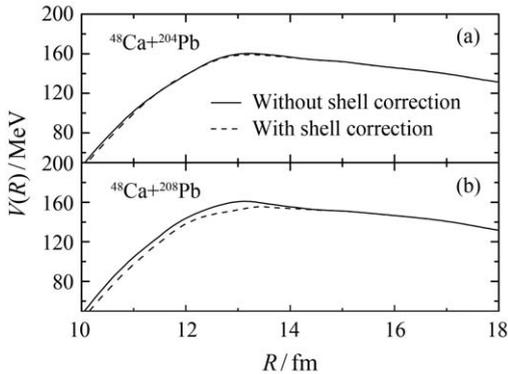


图 2 壳修正对反应体系 $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 在 $E_{c.m.} = 200 \text{ MeV}$ 的动力学位垒的影响

对于形变体系 $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ 发现壳修正同样表现出方向效应。从图 3 可以看出在对腰碰撞时, 壳修正使得熔合位垒有一定的降低。在不考虑壳修正时 $V_B = 62.06 \text{ MeV}$, 在考虑壳修正后, 位垒高度降低为 $V_B = 61.84 \text{ MeV}$, 位垒降低了 0.22 MeV 。然而在对头碰撞时, 位垒的高度以及位垒位置基本相同, 只在位垒以内对相互作用势产生了影响。从图 3 的内插图可以看出对头碰撞与对腰碰撞的壳修正能的差别。两个方向的壳修正能都为负, 但是对腰碰撞的壳修正能的绝对值更大。由于壳修正能的差距, 可以看出其对动力学位垒的影响程度也不同。在对头碰撞时, 壳效应对位垒高度基本没有影响, 只对位垒以内的势产生了影响, 而对腰碰撞时, 壳修正使得动力学位垒有降低。

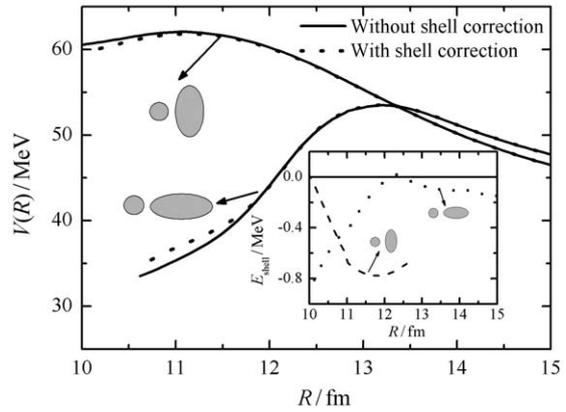


图 3 体系 $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ 在 $E_{c.m.} = 90 \text{ MeV}$ 在不同入射方向的壳修正以及对动力学位垒的影响

3.2 能量依赖性

在用动力学模型计算熔合反应位垒时发现, 熔合位垒与入射能量有关。这是因为在反应进行过程中, 原子核会发生形变, 以及脖子的产生都会使动力学位垒相比静态位垒降低。人们很早就发现, 动力学位垒随着入射能量的增加而增加, 并且接近静态位垒。然而在更高的入射能量下, 发现动力学位垒会高出静态位垒。能量再高时又会低于静态位垒, 并且非常接近静态位垒。图 4 给出了反应 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 的不同能量下动力学位垒跟静态位垒的比较。从图可以看出, 当入射能量为 80 MeV 和 100 MeV 时动力学位垒高度分别为 $V_B = 49.60 \text{ MeV}$ 和 $V_B = 51.72 \text{ MeV}$ 低于静态位垒 $V_B^S = 53.26 \text{ MeV}$, 然而当入射能量增加到 160 MeV 时, 其动力学位垒 $V_B = 53.71 \text{ MeV}$ 高于静态位垒。

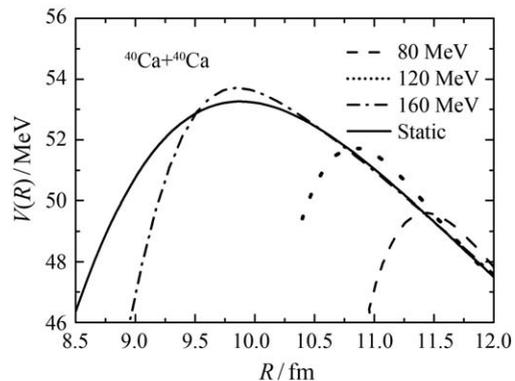


图 4 在不同入射能量下的 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 的动力学位垒 实线代表静态位垒。

图 5(a) 给出了动力学位垒高度随着入射能量的变化关系。横虚线代表静态位垒的高度。可以看出

在能量较低时, 位垒高度随着入射能量的增加而增高, 并且在 $E_{c.m.} > 130$ MeV 高出静态位垒。随着能量的继续升高, 在 $E_{c.m.} = 150$ MeV 时达到最大值。随着能量的继续升高, 动态位垒高度开始下降, 直到 $E_{c.m.} > 180$ MeV 时, 动态位垒回落到静态位垒之下, 并保持基本不变。这是因为在 高能时, 原子核在反应过程中演化时间短, 其密度分布基本接近初始状态, 所以位垒高度接近静态位垒, 随着能量增大, 其位垒高度基本保持不变。图 5(b) 给出了动力学位垒半径随入射能量的变化关系, 并与静态位垒半径做了比较。横虚线代表静态位垒半径的大小。从图 5(b) 可以看出, 在入射能量较低时, 动力学位垒半径随着入射能量的增加而降低。在 $E_{c.m.} > 150$ MeV 时其位垒半径低于静态位垒半径 $R_B^S = 9.9$ fm, 随着能量的继续升高, 位垒半径回到静态位垒半径线之上。比较图 5(a) 和 (b) 可以看出动力学位垒半径与位垒高度随着入射能量的变化有相反的行为。

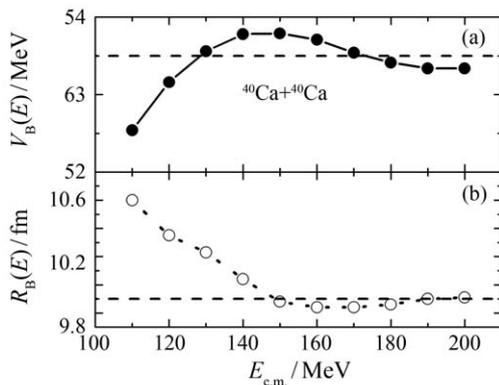


图 5 反应体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 的位垒高度与入射能量的依赖关系 (a) 及位垒半径与入射能量的依赖关系 (b)

图 6(a) 是反应体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 在两个不同入射能量下的核势 (V_N) 和总势能 (V_T)。其中库仑势 (V_C) 的贡献由实线给出。虚线和点线分别代表不同的入射能量 $E_{c.m.} = 55$ 和 65 MeV。从图 6(a) 可以看出体系 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 的库仑势和核势对总熔合位垒的贡献, 并且可以看出熔合位垒的能量依赖性来自核势的能量依赖性。库仑势在两碰撞核的距离较远时 ($R > 9$ fm) 没有能量依赖性, 所以只用一条实线给出。这是因为在两核距离较远时, 两核可以看成点电荷, 库仑势不随入射能量的改变而改变。然而当两个碰撞核的距离小于 8 fm 时, 库仑势表现出了很大的能量依

赖性, 如图 6(a) 的内插图所示。这是因为在两个核很接近时, 不能再被认为是点电荷, 其质子密度分布会影响库仑势, 所以表现出能量依赖性。图 6(b) 给出的是体系 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ 的核势和总势能的能量依赖性。虚线和点线分别代表不同的入射能量 $E_{c.m.} = 52$ 和 62 MeV。同理在两碰撞核的距离较远时 ($R > 9.5$ fm), 库仑势在不同能量下重合。在两核距离比较接近时 ($R < 8$ fm), 库仑势表现出了微小的能量依赖性, 如图 6(b) 的内插图所示。然而体系 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ 的库仑势在两核距离比较接近时的能量依赖性相比体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 小得多。这可能是因为对于丰中子体系, 由于中子皮的屏蔽作用, 会使得库仑势的能量依赖性减弱。

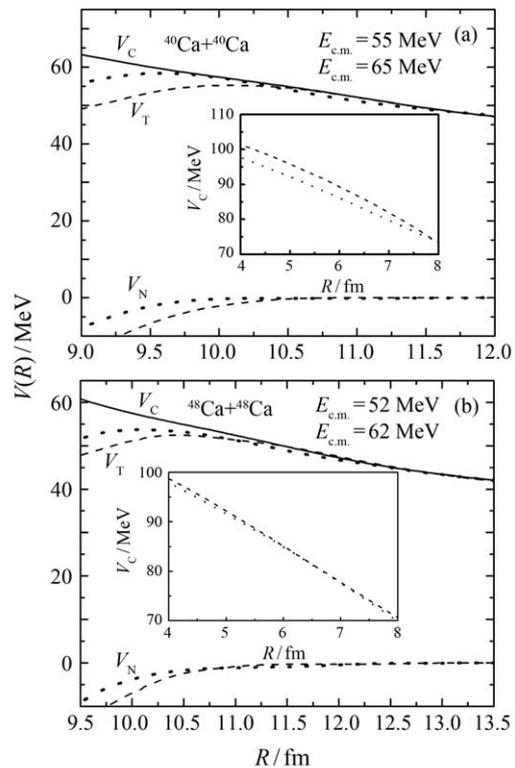


图 6 在不同入射能量下反应体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ (a) 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ (b) 的核势 (V_N) 和总势能 (V_T)。图 (a) 中虚线和点线分别代表 $E_{c.m.} = 55$ 和 65 MeV。图 (b) 中虚线和点线分别代表 $E_{c.m.} = 52$ 和 62 MeV。实线给出的是库仑势 (V_C)。插图给出的是在两核距离小于 8 fm 时, 两不同能量下的库仑势。

3.3 同位旋效应

图 7 给出了 $^A\text{Ca}+^A\text{Ca}$ ($A = 40, 42, 46, 48$) 的一组同位素的静态位垒。从图中可以看出对于丰中子体系, 其静态位垒明显要比缺中子体系低, 位垒半径相

比缺中子体系要大。这是因为对丰中子体系，核力在相对较远的位置就开始起作用，从而导致位垒半径大，对应位垒高度比较低。

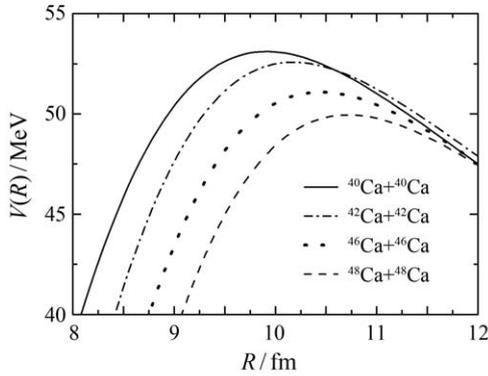


图 7 对称的同位旋体系 $^A\text{Ca}+^A\text{Ca}$ ($A = 40, 42, 46, 48$) 的静态位垒

图 8 给出了静态位垒高度和位垒半径随中质比的变化关系。体系 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$, $^{42}\text{Ca}+^{42}\text{Ca}$, $^{46}\text{Ca}+^{46}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ 的静态位垒高度分别为 $V_B^S = 53.1, 52.57, 51.08$ 和 49.94 MeV. 对应的位垒半径分别为 $R_B^S = 9.92, 10.16, 10.46$ 和 10.7 fm. 可以看出随着中质比的升高位垒高度线性降低, 对应的

位垒半径线性升高。

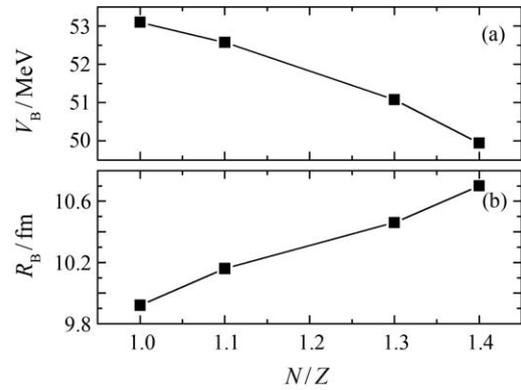


图 8 静态位垒高度和位垒半径随中质比的变化关系 (a) 对称的同位旋体系 $^A\text{Ca}+^A\text{Ca}$ ($A = 40, 42, 46, 48$) 的静态位垒高度与中质比的依赖关系; (b) 静态位垒半径与中质比的依赖关系。

图 9 给出了体系 $^{27}\text{Al}+^{197}\text{Au}$ 和 $^{31}\text{Al}+^{197}\text{Au}$ 在不同入射能量下、不同碰撞参数的熔合概率的比较。从图中可以看出随着碰撞参数的增加, 熔合概率降低。在入射能量为 $E_{c.m.} = 110$ 和 120 MeV 时, 对心碰撞时两个体系的熔合概率相差比较大。而在 $E_{c.m.} = 130$ 和 140 MeV, 碰撞参数为 $b = 3$ fm 时,

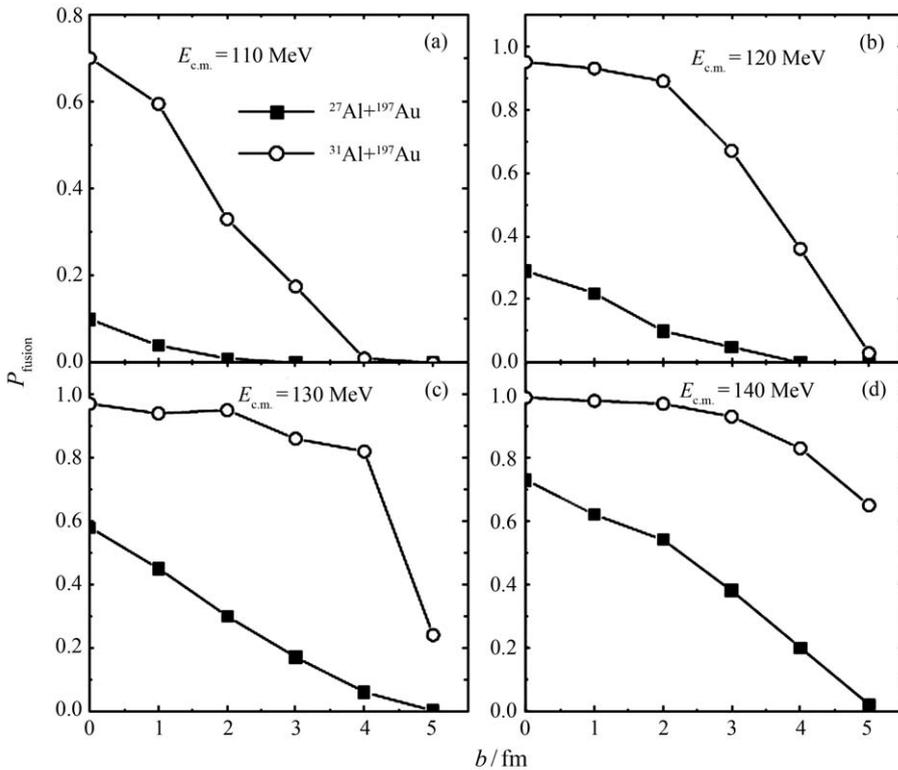


图 9 体系 $^{27}\text{Al}+^{197}\text{Au}$ 和 $^{31}\text{Al}+^{197}\text{Au}$ 在入射能量为 110, 120, 130, 140 MeV 时不同碰撞参数的熔合概率

两个体系的熔合概率相差较大。同样可以看出在入射能量为 $E_{c.m.} = 110$ 和 120 MeV 时, 在大碰撞参数 $b = 5$ fm 时两个体系的熔合截面相等。然而随着能量的增大, 在碰撞参数 $b = 5$ fm 时, 两体系的熔合截面相差变大。对于丰中子体系 $^{31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$, 可以看出熔合概率整体有很大的升高。这是由于对于丰中子体系, 熔合位垒相对较低, 从而提升了熔合概率。对于丰中子体系俘获过程更容易发生。

3.4 变形核的方向效应

反应体系 $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 中, 核 ^{154}Sm 是一个形变

核, 其形变系数 $\beta_2 = 0.341$ 。在 ImIQMD 模拟中, 初始化出一个形变的轴对称核。然后研究其对熔合位垒的影响。图 10 给出了在不同能量下, 不同的碰撞形态下的动力学位垒。可以看出在每个入射能量下, 对腰碰撞的动力学位垒明显高于对头碰撞的动力学位垒。由于对头碰撞使得动力学位垒降低, 从而影响垒下俘获截面的升高。从图 10(a) 可以看出在 $E_{c.m.} = 65$ MeV 时, 对腰碰撞的势垒基本消失。所以在入射能量比较低时, 对腰碰撞很难发生, 主要俘获事件发生在对头碰撞的情况下。

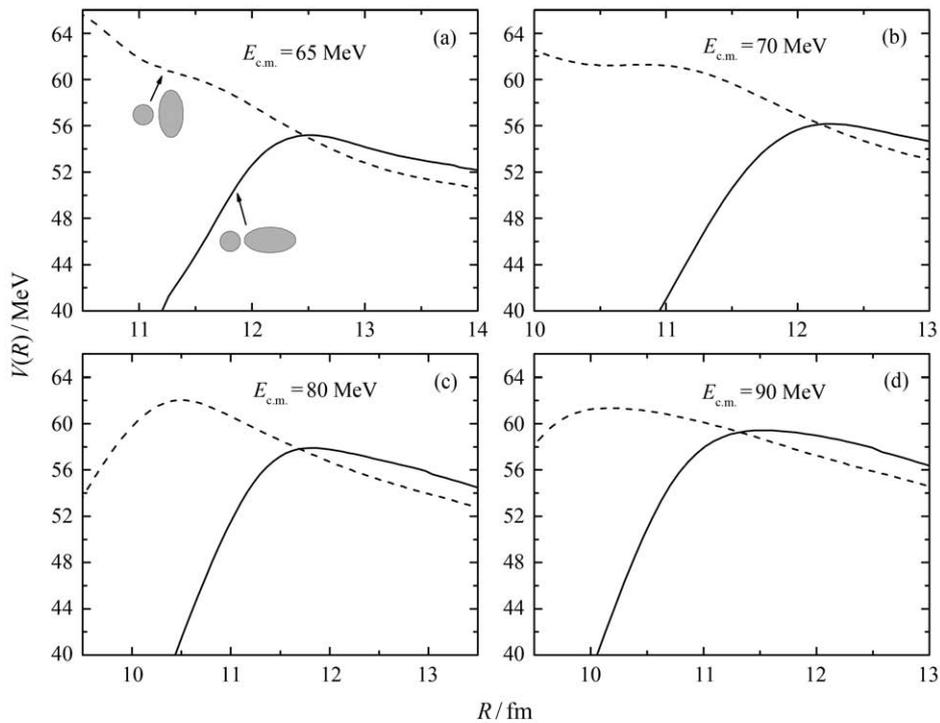


图 10 反应体系 $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 在不同的入射能量下, 对头碰撞和对腰碰撞的熔合位垒比较

4 结论

本文首先介绍了 ImIQMD 模型, 以及主要改进, 即壳修正的考虑。比较系统的介绍了熔合反应动力学位垒的一些基本效应。研究表明, 壳修正对熔合位垒会产生影响, 尤其对于双幻核体系。如果壳修正能为负, 那么会一定程度的降低熔合位垒。

同时研究了动力学位垒的入射能量依赖性。发现在较大的能量范围内, 熔合位垒高度随能量的变化显示出较复杂的行为, 而且位垒半径与位垒高度表现出了相反的行为。

关于库仑势的能量依赖性, 发现对于丰中子体系, 由于中子皮的屏蔽, 使得其能量依赖性变弱。研究了熔合位垒的同位旋依赖性。对于丰中子体系, 其熔合位垒明显低于缺中子体系。

最后, 对形变体系的方向效应做了描述, 静态形变是位垒分布的主要成因。通过两种入射形态的比较, 发现在对腰碰撞时, 位垒高度明显高于对头碰撞, 并且在低入射能量时, 对腰碰撞的势垒袋消失。所以在低入射能量时, 熔合事件主要在对头碰撞下产生。这就解释了垒下熔合截面升高的主要原因。总之, 熔合位垒的研究对熔合反应以及超重核合成有重

要的意义。

参考文献:

- [1] ARMBRUSTER P. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 1985, **35**: 135; 2000, **50**: 411.
- [2] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* *Phys Rev C*, 2000, **62**: 041604.
- [3] MYERS W D, ŚWIĄTECKI W J. *Phys Rev C*, 2000, **62**: 044610.
- [4] WONG C Y. *Phys Rev Lett*, 1973, **31**: 766.
- [5] KELLER J G, SCHMIDT K H, HESSBERGER F P, *et al.* *Nucl Phys A*, 1986, **452**: 173.
- [6] ROWLEY N, SATCHLER G R, STELSON P H. *Phys Lett B*, 1991, **254**: 25.
- [7] TIMMERS H, ACKERMANN D, BEGHINI S, *et al.* *Nucl Phys A*, 1998, **633**: 421.
- [8] PURI R K, GUPTA R K. *Phys Rev C*, 1992, **45**: 1837.
- [9] NEWTON J O. *Phys Rev C*, 2004, **70**: 024605.
- [10] WANG N, LI Z X, SCHEID W. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2007, **34**: 1935.
- [11] GHODSI O N, GHARAEI R, LARI F. *Phys Rev C*, 2012, **86**: 024615.
- [12] SINGH Manjeet. *Nucl Phys A*, 2013, **897**: 179.
- [13] SINGH Manjeet. *Nucl Phys A*, 2013, **897**: 198.
- [14] STRUTINSKY V M. *Nucl Phys A*, 1967, **95**: 420.
- [15] STRUTINSKY V M. *Nucl Phys A*, 1968, **122**: 1.
- [16] OGANESSIAN Y T. in *Proceedings of International Conference[C] //Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei*. Sanibel Island, World Scientific, USA, 1997.
- [17] GHERGHESCU R A, GREINER W, MÜNZENBERG G. *Phys Rev C*, 2003, **68**: 054314.
- [18] FENG Z Q, JIN G M, ZHANG F S. *Nucl Phys A*, 2008, **802**: 91.
- [19] BIAN B A, ZHANG F S, ZHOU H Y. *Nucl Phys A*, 2009, **829**: 1.
- [20] KONDRATYEV V N, BONASERA A, IWAMOTO A. *Phys Rev C*, 2000, **61**: 044613.
- [21] UMAR A S, OBERACKER V E, MARUHN J A, *et al.* *Phys Rev C*, 2010, **81**: 064607.
- [22] WASHIYAMA K, LACROIX D. *Phys Rev C*, 2008, **78**: 024610.
- [23] ZHU L, SU J, XIE W J, ZHANG F S. *Nucl Phys A*, 2013, **915**: 90.
- [24] JIANG C L, SHAPIR A D, BEENE J R, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 012701.
- [25] HINDE D J, DASGUPTA M, HERRALD N, *et al.* *Phys Rev C*, 2007, **75**: 054603.
- [26] LIANG J F. *Phys Rev C*, 2007, **75**: 054607.
- [27] PURI R K, DHIMAN N K. *Eur Phys J A*, 2005, **23**: 429.
- [28] HAGINO K, ROWLEY N, KRUPPA A T. *Comput Phys Commun*, 1999, **123**: 143.
- [29] BALANTEKIN A B, TAKIGAWA N. *Rev Mod Phys*, 1998, **70**: 77.
- [30] REISDORF W. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 1994, **20**: 1297.
- [31] CHEN Liewen, ZHANG Fengshou, JIN Genming. *Phys Rev C*, 1998, **58**: 2283.
- [32] CHEN Liewen, ZHANG Fengshou, JIN Genming, *et al.* *Phys Lett B*, 1999, **459**: 21.
- [33] FENG Z Q, ZHANG F S, JIN G M, *et al.* *Nucl Phys A*, 2005, **750**: 232.
- [34] BIAN Baoan, ZHANG Fengshou, ZHOU Hongyu. *Phys Lett B*, 1999, **459**: 21.
- [35] BIAN Baoan, ZHANG Fengshou, ZHOU Hongyu. *Eur Phys J A*, 2010, **43**: 67.
- [36] GHERGHESCU R A, SKALSKI J, PATYK Z, *et al.* *Nucl Phys A*, 1999, **651**: 237.
- [37] GHERGHESCU R A. *Phys Rev C*, 2003, **67**: 014309.

Fusion Barriers in Heavy Ion Collisions

ZHU Long¹, SU Jun¹, XIE Wenjie¹, GUO Chenchen¹,
ZHANG Donghong¹, ZHANG Fengshou^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education,
College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China;

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

Abstract: Study of fusion barrier is very important for people to better understand fusion reactions. In this paper the Improved Isospin-dependent Quantum Molecular Dynamics(ImIQMD) model is introduced firstly. Then the shell correction effects, energy dependence, isospin effects and orientation effects of fusion barrier are studied. The fusion barriers for the fusion reactions $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$ and $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ are extracted. The negative shell correction energies lower potential barriers of a certain reaction. A complex phenomenon of energy dependence is observed. It is also found that incident energy dependence of the barrier radius and barrier height shows opposite behaviors. The Coulomb potential shows weak energy dependence when distance of two colliding nuclei is lower than the touching distance. The isospin effects of the potential barrier are investigated. The orientation effects of the potential barrier are also discussed for the system $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$.

Key words: potential barrier; shell correction; isospin effect; incident energy dependence; orientation effect

Received date: 3 Sep. 2013; **Revised date:** 16 Oct. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11025524, 11161130520); National Basic Research Program of China(973 Program)(2010CB832903)

Corresponding author: ZHANG Fengshou, E-mail: fszhang@bnu.edu.cn.

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