

重离子熔合势垒的动力学模型研究*

田俊龙^{1,2} 吴锡真^{1,3;1)} 李祝霞^{1,3,4} 王宁⁴ 刘福虎²

1 (中国原子能科学研究院 北京 102431)

2 (山西师范大学现代物理研究所 临汾 041004)

3 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

4 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 在改进的量子分子动力学模型基础上系统地研究了超重核合成中的入射道静态势和动力学势。从入射道静态势给出了质量不对称度与静态势垒高度以及质量不对称度与接触点驱动势的关系。动力学势垒高度是能量依赖的,随着入射能量的增加而增加,最终趋近于密度冻结势垒高度;动力学势垒高度随着入射能量的降低而降低,它的最低值接近于绝热势垒高度。在冷熔合反应中,动力学势垒的最低值所对应的入射能量可能是合成超重元素最佳入射能的选择。

关键词 量子分子动力学模型 超重元素 入射道静态势 动力学势垒

1 引言

超重元素的合成是当今核物理研究的重要前沿领域之一,而与超重元素合成直接相关的是对熔合机制的研究。在描述重离子熔合反应中,入射道炮弹和靶核之间的相互作用势扮演了一个非常重要的角色。如果知道了核-核势垒的高度和宽度,我们就可以用 WKB 方法估算出不同核反应的熔合截面^[1]。目前,已合成的超重核,都是用全熔合反应生成的。在冷熔合反应中,为了减少复合核裂变的几率,激发能要尽可能地小,这与弹靶组合的选取以及入射能量有很大的关系。所以选择一个最佳的碰撞体系和合适的入射能量,是实验所必须的。

V. Yu. Denisov 和 W. Nörenberg 建议把熔合过程看作量子力学碰撞过程的一部分,这里的入射道特征对散射解来说是非常重要的^[2],在这个模型中接触点附近的准束缚态被认为是熔合反应中具有决定性的第一步,和振动散射的门态类似^[3,4]。俘获态

的存在主要依赖于入射道势的性质,实验数据进一步确认在入射道势的接触点附近存在势谷,这个势谷的存在是形成准束缚态的一个源,它不仅有利于复合核形成而且对复合核的稳定性也起着非常重要的作用。如果势谷较深,那么就可能有多个准束缚态存在,复合核形成的几率也就更大;反过来,如果势谷较浅,可能较少或者没有准束缚态存在,复合核形成的几率也就很小。由于两个重核的熔合在很大程度上决定于碰撞的前阶段,同时“熔合窗”的实验数据中发现入射道势低谷的存在对熔合反应是至关重要的^[2],所以精确而系统的研究两碰撞核之间的相互作用势是必要的。

经典理论认为由于库仑位垒的存在,入射粒子只有在入射能量达到或超过库仑位垒时,才有可能与靶核发生熔合反应。而量子理论认为由于位垒贯穿几率的存在,即使入射能量低于库仑位垒时,弹核也有可能穿过库仑位垒与靶核发生熔合反应。许多实验都给出了垒下熔合截面比位垒贯穿模型的计算

2003-11-03 收稿

* 国家自然科学基金(10175093, 10175089, 10235030, 10235020)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

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

结果大得多^[5]. 于是人们不禁会问在位垒附近的熔合过程(对较轻系统)或者俘获过程(对重系统)到底是势垒贯穿(tunneling)还是势垒翻越(pass over)过程?

为了初步理解上述问题并获得较真实的熔合机制的信息,一个自洽的微观动力学模型是非常需要的. 量子分子动力学模型(QMD)是一个半经典的微观动力学输运模型,它在高能重离子碰撞以及熔合反应中有相当广泛的应用,并获得很大成功. 它能提供反应过程中各种重要的动力学信息,揭示微观机制. 我们把 QMD 模型加以改进,使它能够用于近垒熔合反应的研究^[6]. 基于这种改进的 QMD 模型,系统地研究了弹靶熔合的入射道相互作用势,探索了自洽的动力学势的计算方法,观察了由于密度分布自洽改变导致的动力学势垒降低.

2 理论基础

2.1 改进的 QMD 模型简介^[6]

在 QMD 模型中,每个核子用高斯波包来描述,

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

其中, $\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i$ 分别是第 i 个粒子在坐标和动量空间中的波包中心. 通过 Wigner 变换我们将量子力学的波函数转化成经典的 N -体相空间核子密度分布函数

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

由核子相空间分布函数可以得到系统的密度分布和动量分布:

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

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

其中 σ_r, σ_p 分别是波包在坐标和动量空间的宽度,它们满足最小测不准关系

$$\sigma_r \cdot \sigma_p = \frac{\hbar}{2}, \quad (5)$$

和文献[6]一样,这里也采用了依赖于体系大小的波包宽度 $\sigma_r = 0.16A^{1/3} + 0.49\text{fm}$.

在 QMD 模型中,核子在自洽产生的平均场中运动, $\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i$ 的时间演化基于正则方程

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

其中 H 是系统的哈密顿量,包括动能、Skyrme 相互作用势能以及库仑相互作用势能:

$$H = T + U = T + U_{\text{loc}} + U_{\text{coul}}, \quad (7)$$

其中,

$$T = \sum_i \frac{P_i^2}{2m}, \quad (8)$$

$$U_{\text{loc}} = \frac{\alpha}{2} \sum_i \left\langle \frac{\rho}{\rho_0} \right\rangle_i + \frac{\beta}{\gamma + 1} \sum_i \left\langle \frac{\rho^\gamma}{\rho_0^\gamma} \right\rangle_i + g_\tau \sum_i \left\langle \frac{\rho}{\rho_0} \right\rangle_i^{2/3} + \frac{g_0}{2\rho_0} \int (\nabla \rho)^2 d\mathbf{r} + \frac{c_s}{2} \int \frac{(\rho_p - \rho_n)^2}{\rho_0} d\mathbf{r}, \quad (9)$$

第 1, 2 项分别是吸引项(两体项)和排斥项(三体项),第 3 项是小的修正项,第 4, 5 项分别是表面能项和对称能项. 库仑势能由下面的表达式给出:

$$U_{\text{coul}} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \int \rho_i(\mathbf{r}) \frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \rho_j(\mathbf{r}') d\mathbf{r} d\mathbf{r}'. \quad (10)$$

我们把改进的量子分子动力学模型(ImQMD)与常规 QMD 模型相比,主要的改进有:(1)用从 Skyrme 相互作用自洽得到的表面能项代替 Yukawa 项,使基态核的密度分布变得更加合理;(2)采用相空间占有数约束方法改善核的费米子属性;(3)引入随体系大小变化的波包宽度;(4)引入有效质量项、表面对称能项等. 本工作采用的参数列在表 1.

表 1 模型采用的势参数

α	β	γ	g_0	g_τ	c_s	ρ_0
/MeV	/MeV		/(MeV·fm ²)	/MeV	/MeV	/fm ⁻³
-310.0	258.0	7/6	19.8	9.5	32.0	0.165

2.2 核-核相互作用势

核-核相互作用势比较复杂,实验上通过精确测量熔合反应以及准弹性散射的激发函数来提取位

垒分布,再由位垒分布获取核-核相互作用势的知识.理论上人们可以通过各种模型来计算核-核相互作用势,常用的有 Bass 势^[1,7]、宏观微观势^[8]、亲近势^[9]、以及半微观势^[2]等.所有这些模型,除宏观微观势外,在计算核-核相互作用势的过程中,假设核的密度分布在碰撞中和碰撞前完全相同(突然近似或冻结近似).其实,这个条件是很难满足的,但是由于核力是短程力,核子所受核内平均场的作用比受到另一核的核力作用大得多,而库仑场又是一个变化缓慢的场,因此当两核的密度重叠很少时,可以认为两核的密度分布基本上和两核分开时相同.所以,严格地讲,这种以两核质心距离来表示的相互作用势,只适用于两核密度无重叠或仅有少量重叠的情况.这在较轻体系的熔合反应中可近似满足.

如果要把作用势用到两核密度重叠比较大的情况,像重核熔合特别是熔合形成超重核时,就一定要考虑核的密度分布受到另一个核的影响问题.如果质心系能量在库仑位垒附近时,那么,在接触位垒时两核的相对运动动能已经基本上都转化为体系的内部激发能,相对运动速度变得很慢,有相当长的碰撞时间(这个条件在低能重离子核反应中常常能得到满足),则可采用绝热近似.所谓绝热近似是指在给定的两核质心的距离下,两核的密度都将调整到能量的最低点.两个核真正感受到的核-核相互作用势到底是接近于绝热近似还是更接近于突然近似是人们经常争论的问题.

用我们改进的量子分子动力学模型不仅可以给出静态核-核势,还可以给出在反应过程中两个核真正感受到的势——动力学势.在本文中,用 ImQMD 模型计算了一系列反应体系的静态位垒,发现从对称体系到不对称体系垒高逐渐降低,俘获势阱的宽度与深度也越来越大.因此,越不对称的弹靶组合反应体系,越有利于熔合反应的发生,有利于复合核的形成.本文还给出了在不同入射能量下的动力学势,以及影响动力学势垒的一些因素.我们发现动力学势垒既不同于绝热近似也不同于突然近似.因为两个核真正感受到的核-核相互作用势不仅与反应体系有关还和入射能量的情况有关.

入射道核-核势作为两核之间距离 R 的函数,在我们的模型中是通过下面的表达式微观计算得出的:

$$V(R) = E_{12}(R) - E_1 - E_2, \quad (11)$$

其中, R 是两核质心之间的距离; $E_{12}(R)$ 是相互作

用体系的总能量; E_1, E_2 分别是炮弹和靶核的能量.它们可以用能量密度泛函 $\mathcal{H}[\rho(\mathbf{r})]$ 表述如下:

$$E_{12}(R) = \int \mathcal{H}[\rho_1(\mathbf{r}) + \rho_2(\mathbf{r})] d^3r, \quad (12)$$

$$E_1 = \int \mathcal{H}[\rho_1(\mathbf{r})] d^3r, \quad (13)$$

$$E_2 = \int \mathcal{H}[\rho_2(\mathbf{r})] d^3r, \quad (14)$$

$\rho_1(\mathbf{r}), \rho_2(\mathbf{r})$ 分别是弹核和靶核中的核子密度分布函数.

在 ImQMD 模型中,为了把能量用统一的密度分布函数 $\rho(\mathbf{r})$ 来描述,我们采用了众所周知的 Thomas-Fermi 近似

$$\tau(\mathbf{r}) = \frac{3}{5} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} \rho^{5/3}, \quad (15)$$

这样,动能也可以用 $\rho(\mathbf{r})$ 来描述.由(12), (13), (14)式我们就可以得到总能量 E_{12} 和 E_1, E_2 . 在计算 E_{12} 时积分取遍靶核和炮弹中的所有核子,而在计算 E_1 和 E_2 时,积分分别取遍炮弹和靶核中的核子. $V(R)$ 是时间的函数,因为 ρ_1 和 ρ_2 是随时间演化的.只有在计算静态核-核势的时候,认为炮弹和靶核的密度分布在整个反应过程中,始终保持初始核的密度分布不变.因此,静态核-核势没有考虑熔合过程中的动力学效应.

库仑势垒是核力和库仑力相互竞争的结果.从图1可以看出库仑排斥力 $V_C(R)$ 随着两核质心距离的减小而增大.在核力力程范围内,随着距离的减小,核力 $V_N(R)$ 先减小后增大.因此,核-核相互作用势 $V(R) = V_N(R) + V_C(R)$ 的形状在两核的接触点附近有一个势垒.我们把熔合路径中两核所经历的最大核-核势定义为势垒的高度,用 V_b 表示,简称“垒高”(图1中的1处).核-核相互作用势 $V(R)$ 的形状在接触点之后有一个“低谷”(图1中的2处).有理由认为这个“低谷”对形成复合体系或“类分子态”是非常重要的.如果它较深就可能有多于一个准束缚态存在,系统陷入其内有足够长的时间进行调整,从而形成复合体系.熔合势垒与“低谷”的存在决定于核势与库仑势的竞争, V. Yu. Denisov 把这个“低谷”称作“俘获势阱”^[10].俘获势阱的存在是形成准束缚态的一个源,它不仅有利于复合核形成,而且对复合体系的稳定性也起着非常重要的作用.我们定义俘获势阱的深度 h 是垒高与势阱最低点的差,俘获势阱的宽度 w 是势垒最高点与势阱最低点的水平距离(见图1中所示).

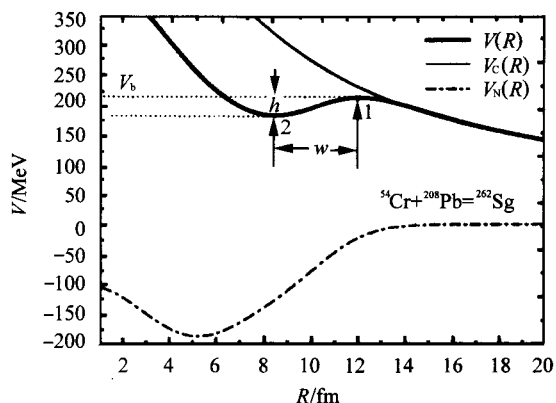


图 1 $V(R)$, $V_C(R)$, $V_N(R)$
随两核质心距离 R 的变化

3 结果和分析

3.1 入射道静态核-核相互作用势

在计算静态核-核相互作用势时我们假设核的密度分布在碰撞中和碰撞前完全相同. 一般来说, 当两核接近时, 它们之间的相互作用势的变化与核表面之间的距离有很大的关系. 如果两核相距在 10fm 之外, 那么只有库仑相互作用; 在 2—3fm 时核力开始起作用, 由于吸引的核力和排斥的库仑力相互竞争出现了库仑势垒和俘获势阱; 如果两个核进一步接近, 发生重叠, 而各自的密度保持不变, 相重叠区域就会出现很强的挤压, 大大提高体系的能量, 变成很强的排斥相互作用. 所以 ImQMD 计算出的静态核-核势会出现图 1 中那样的形状, 随着距离的减小先增大后减小, 再增大.

图 2 是用不同的模型对同一个反应体系 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$

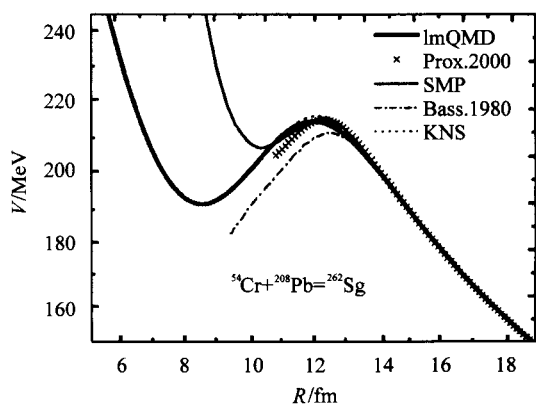


图 2 不同的模型对反应体系 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 给出的
静态核-核相互作用势

计算得出的静态核-核势. 从图 2 可以看出不同的模型计算的库仑势垒是不同的. 从图中几个不同模型的计算结果可以看出在远处, 也就是说, 只有库仑相互作用时计算结果是完全重合的, 差别就在核力起作用的地方. 这导致了不同模型估算出的垒高也有不同程度的差别, 尤其是对于两个重核或至少有一个是重核的反应体系, 像反应体系 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 的垒高就有近 5MeV 的差别. 我们的计算结果与被广泛使用的亲近势、KNS 和 SMP 非常接近.

为了更进一步理解核-核相互作用势, 图 3 画出了核-核相互作用势中有效相互作用各项所起的作用. 其他数值较小的各修正项在图中没有给出. 从图 3 可以看出表面项的变化最大. 由图 3(a) 还可以看出, 在两核接触之前, 表面能项是零; 接触之后表面能项先减小后增大, 即表面能项从零开始先负后正. 为什么会这样? 体系的表面能项是通过表达式 $U_{\text{sur}} = U_{\text{sur}12} - U_{\text{sur}1} - U_{\text{sur}2}$ 计算得出的, 而单个

系统的表面能是通过表达式 $U_{\text{sur}} = \frac{g_0}{2} \int (\nabla \rho)^2 d\mathbf{r}$ 给出的. 在两个核接触之前 $U_{\text{sur}12} = U_{\text{sur}1} + U_{\text{sur}2}$; 两核在接触时由于表面弥散使颈部的密度叠加, 密度的梯度减小 $U_{\text{sur}12} < U_{\text{sur}1} + U_{\text{sur}2}$, 因而, 此时表面能项会出现负值; 两核进一步接触发生重叠, 直到重叠区的密度变成原来的 2 倍, 密度的梯度变大, $U_{\text{sur}12} > U_{\text{sur}1} + U_{\text{sur}2}$, 此时表面能项又会从负变为正值. 由图 3(b) 还显示出, 表面系数越大, 表面能项越早起作用而且它的势谷越深, 结果导致了核-核相互作用势的势谷越深、势垒越低. 库仑势垒和俘获势阱是所有各项共同作用的结果, 但是表面项对它的影响非常大.

图 4 是从合成相同复合核 ^{262}Sg 的 18 个反应体系中取出的 3 个反应体系 $^{131}\text{I} + ^{131}\text{I}$, $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 和 $^{32}\text{S} + ^{230}\text{Th}$ 对心碰撞的静态核-核势, 从图 4 可以看出, ImQMD 模拟得出的静态核-核势与亲近势的结果符合^[9]得很好(亲近势是人们较认可的唯象势). 从我们的计算发现对于不同的反应体系, 它们静态核-核势垒的高度与俘获势阱的深度是不同的. 图 4 中对于完全对称的体系 $^{131}\text{I} + ^{131}\text{I}$, 它的静态核-核势垒的高度可达到 300MeV, 而且俘获势阱的深度最浅, 只有 14 个 MeV; 对于不对称体系 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$, 它的静态核-核势垒高为 214MeV, 俘获势阱的深度为 23MeV; 对于更不对称体系 $^{32}\text{S} + ^{230}\text{Th}$, 它的静态核-核势垒高只有 160 个 MeV, 俘获势阱的深度达 26MeV. 从以上 3 个反应

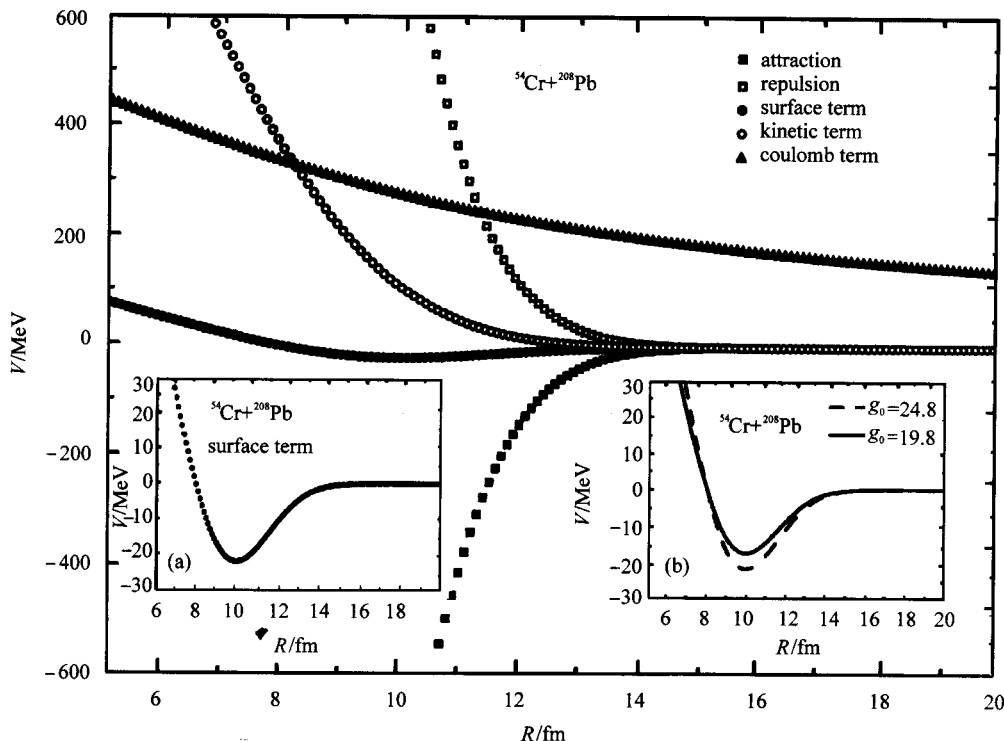


图 3 静态核-核相互作用势中有效核力各项所起的作用

实方块和空方块分别代表吸引项(两体项)和排斥项(三体项),黑点和圈分别是表面项和动能项,实三角代表库仑能项.插图中(a)是放大的表面项,(b)比较了表面项系数分别取 19.8 和 24.8MeV·fm² 时的表面项.

体系的分析得知:从对称体系¹³¹I + ¹³¹I 到不对称体系⁵⁴Cr + ²⁰⁸Pb 再到³²S + ²³⁰Th 垒高逐渐降低,俘获势阱的宽度与深度也越来越大.我们知道,垒高越低两核就越容易克服库仑排斥而到达接触点 R_{12} ; 而俘获势阱越宽越深,此时存在的准束缚态越多,越容易俘获,复合核的形成几率也就越大.所以越不对称的反应体系,越有利于熔合反应的发生.

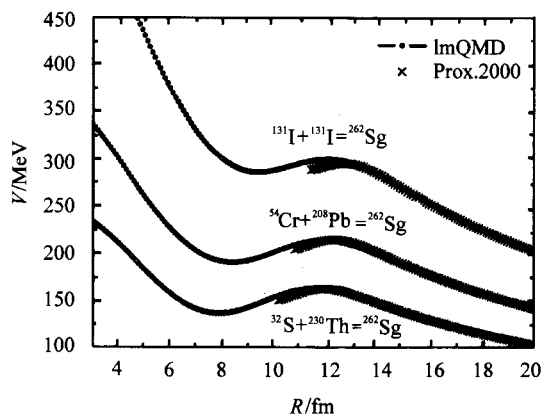


图 4 三个反应体¹³¹I + ¹³¹I, ⁵⁴Cr + ²⁰⁸Pb 和 ³²S + ²³⁰Th 的静态核-核势

关于体系的不对称性我们用质量不对称度 $\eta =$

$(A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ 来表示.当炮弹和靶核完全对称时 $\eta = 0$;当炮弹和靶核非常不对称时 $A_1 \ll A_2$ 或 $A_1 \gg A_2$, $|\eta|$ 接近于 1.

在熔合反应中驱动力^[11-13]扮演了一个非常重要的角色,和文献[11]中一样,在接触点 R_{12} 处的驱动力这里是这样定义的:

$$V_d(R_{12}) = B_1 + B_2 + V(R_{12}) - B_{CN}, \quad (16)$$

$$R_{12} = R_1 + R_2 = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}), \quad (17)$$

其中, B_1 和 B_2 是靶核和炮弹的结合能, B_{CN} 是复合核的结合能; $V(R_{12})$ 两核在接触点 R_{12} 时的静态核-核相互作用势, $r_0 = 1.2\text{fm}$. 我们用 ImQMD 模型计算了 18 个反应体系:

¹³¹I + ¹³¹I, ¹¹⁶Ag + ¹⁴⁶Pr, ¹⁰²Nb + ¹⁶⁰Tb, ⁹²Br + ¹⁷⁰Lu, ⁷⁷Ga + ¹⁸⁵Re, ⁷⁰Cu + ¹⁹²Ir, ⁶⁵Co + ¹⁹⁷Au, ⁵⁴Cr + ²⁰⁸Pb, ⁵¹V + ²¹¹Bi, ⁴⁴Sc + ²¹⁸At, ³⁷K + ²²⁵Fr, ³²S + ²³⁰Th, ²⁷Si + ²³⁵U, ²²Mg + ²⁴⁰Pu, ¹⁸Ne + ²⁴⁴Cm, ¹⁴O + ²⁴⁸Cf, ¹²C + ²⁵⁰Fm 和 ⁸Be + ²⁵⁴No. 其两核接触点的质心距离 R_{12} 分别为 12.19, 12.17, 12.12, 12.07, 11.95, 11.87, 11.80, 11.65, 11.59, 11.46, 11.30, 11.16, 11.01, 10.82, 10.64, 10.43, 10.31 和 10.00fm.

图 5 是我们得到的计算结果,分别得出质量不

对称度与静态势垒高的关系以及质量不对称度与接触点驱动势的关系. 由质量不对称度与静态势垒高的关系, 如图 5(a) 所示, 我们可以看出对称体系的质量不对称度 $\eta=0$ 时对应的垒高 V_b 最大, 即对称体系不宜用于合成超重元素. 当然, 增加炮弹的入射能量能够使它克服核-核势垒, 但它所形成的复合体系的激发能会很高, 容易发生裂变. 因为超重元素合成的困难之一就在于形成的复合核高度激发而导致高裂变几率, 因此, 实验上要求复合体系的激发能要尽可能地小. 随着 η 的绝对值的增大, 所对应的垒高逐渐减小, 克服核-核势垒所需要的入射能量减小, 它所形成的复合核的激发能也会比较低, 所以我们得出结论, 越不对称的反应体系, 越有利于融合反应的发生. 但是超重元素的合成一般是用中等质量的弹核去轰击一个重的稳定靶核形成复合核蒸发中子后而形成的. 超重元素的原子序数都比较大, 如果弹核太小就不能满足要求, 因为自然界存在的最重元素是 92 号元素铀, 即使用它作为靶核要合

明所对应的体系能够提供用于克服核-核势垒的能力越强. 而双核模型认为驱动势最大点为内部熔合位垒^[14,15], 只要跨过这个位垒就可以形成复合核. 双核模型认为从接触位型到复合核的形成颈部是固定不变的, 炮弹和靶核原来的结构基本保持不变, 复合系统是由于轻核中的核子或核子团通过颈部流到重核中而形成的^[15]. 核子转移是一个动态过程, 轻核中的核子通过颈部向重核中转移, 重核中的核子也会通过颈部向轻核中转移. 如果轻核(A_1)向重核(A_2)转移的核子数大于重核向轻核转移的核子数, 那么体系的质量不对称度 η 会变大, 反之, η 会变小. 只要跨过这个内部熔合位垒, η 就会越来越大直到复合核的形成. 由这两点我们给出, 驱动势最大所对应的体系是合成超重元素最佳弹靶组合的因素之一.

3.2 入射道动力学核-核相互作用势

上述所有的计算都是静态核-核势, 而不是两个相互作用核真正感受到的势. 在模拟核反应过程中, 弹核和靶核的密度分布在平均场的作用下随时间动态演化, 两核之间的相互作用势不仅依赖于反应体系, 还依赖于入射能量和碰撞参数. 而静态核-核势不能把依赖于入射能量的情况表示出来, 所以需要动力学势来描述.

在计算入射道动力学核-核相互作用势时, 炮弹和靶核每一时刻的密度分布是通过表达式(3)得出的, 求和取遍了炮弹和靶核中的所有粒子. 当两碰撞核彼此接触的时候, 炮弹和靶核的密度分布在平均场的作用下随时间而改变. 我们把能够克服库仑势垒到达接触点的熔合事件记录下来, 所求得的入射道动力学核-核势就是这些事件的平均值. 在入射道动力学核-核相互作用势的计算中, 由于势垒最高点对应于炮弹和靶核刚好接触的位型附近, 即颈部刚好形成的位型. 这时弹核和靶核基本上还保持原来的个性, 可能只有少量的核子交换. 所以, 我们近似认为接触前后, 体系的波包宽度并不改变.

图 6 给出了反应体系 $^{86}\text{Kr} + ^{100}\text{Mo}$ 对心碰撞的静态核-核势和接近势以及在不同入射能量下的动力学势. 从图 6 很明显的可以看出, 动力学势垒高随入射能量的不同而不同, 而且动力学势垒要比静态势垒低很多. 对于 $^{86}\text{Kr} + ^{100}\text{Mo}$ 反应, 在碰撞参数 $b=0$ 时, 它的静态势垒高是 175.4MeV; 图中的细实线、粗实线、虚线、点画线、点线、点点画线分别是入射能量为 153.9, 163.9, 173.9, 183.9, 203.9 和

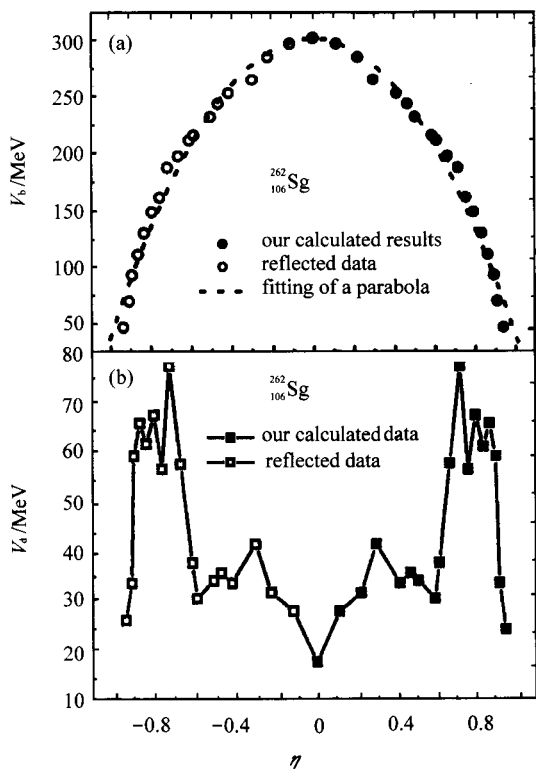


图 5 静态势垒高度 V_b (a)和接触点的驱动势(b)与质量不对称度 η 的关系

成超重元素, 弹核仍然不能太小, 因此体系的质量不对称度 η 也不能太大. 为了给出一个最佳的质量不对称度 η , 我们在图 5(b)中给出了质量不对称度 η 与接触点驱动势的关系. 接触点的驱动势越大, 说

223.9MeV时的动力学势,它们对应的动力学垒高分别为154.7, 153.6, 157.1, 160.7, 163.7和164.3MeV,比静态势垒低10—20个MeV左右.可以看出动力学垒高随着入射能量的增加而增加,当入射能量升高到一定程度,得到的动力学位垒变化很慢,越来越接近于静态位垒.当入射能量降低到一定程度,动力学垒高随着入射能量的降低观察到动力学势垒的最低值,能量再降,动力学势垒升高,像入射能量为163.9MeV对应的动力学垒高为153.6MeV,入射能量再降低10个MeV,对应的动力学垒高(154.7MeV)反而上升了.我们把入射能量在163.9MeV附近所对应的动力学垒高称为最

低动力学势垒.而双中心壳模型(TCSM)计算的绝热势垒高为153.5MeV.可见,这个最低的动力学势垒非常接近绝热势垒.从图6的分析可以得出下述结论:(1)动力学势垒低于静态势垒.(2)动力学势垒是能量依赖的.在库仑势垒附近,动力学垒高随着入射能量的增加而增加,当入射能量升高到一定程度,得到的动力学势垒变化很慢,越来越接近于静态位垒;动力学垒高随着入射能量的降低观察到动力学势垒的最低值,能量再降,动力学势垒升高.这个最低的动力学势垒接近绝热势垒.在冷熔合反应中,我们认为动力学势垒的最低值所对应的入射能量可能是合成超重元素最佳入射能量的选择.

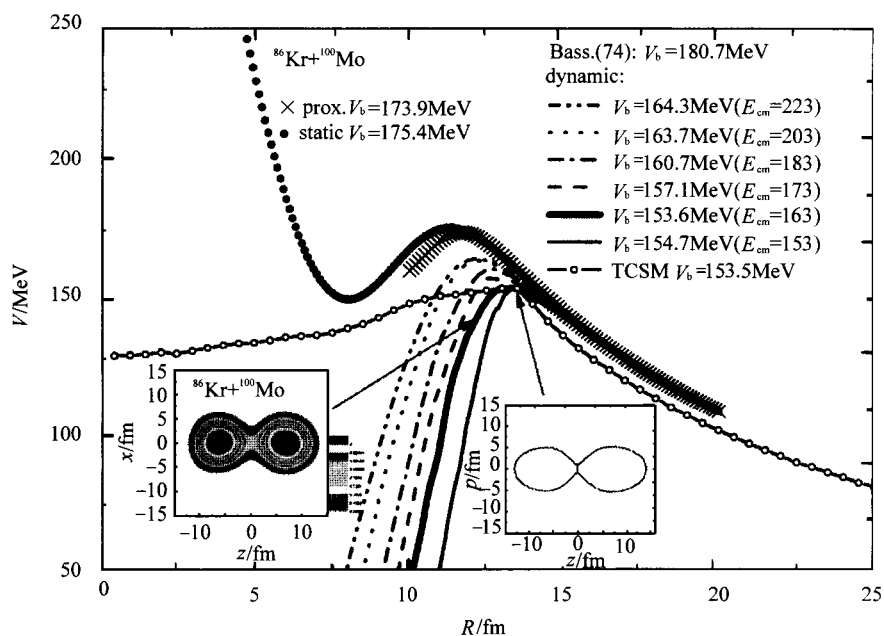


图6 反应体系 $^{86}\text{Kr} + ^{100}\text{Mo}$ 对心碰撞的动力学势垒和静态核-核势以及接近势

在熔合势垒的计算中,近年多用 Bass 势等密度冻结势,势垒比较高.动力学势垒是熔合体系真正感受的势垒,比静力学势垒低.因此,相对静力学垒是势垒贯穿的过程,从动力学势垒来看可能是势垒翻越的过程(这里指垒附近情况),这可能是许多实验给出的垒下熔合截面比势垒贯穿模型的计算结果大得多的原因之一.

和静态核-核势相比为什么动力学势垒会降低?究其原因,主要有以下3点:核的形变,颈部的形成及核子转移.如果碰撞时,相对速度不是很大,两核会调整它们的运动轨道来降低体系的能量,不至于产生密度重叠的情况.实际上,在接触位型时两核相距很近,在核引力和库仑斥力的作用下,两核

的核子重新调整,弹核与靶核中的一些核子相互交换,这些核子的调整导致核密度分布的改变,其宏观效果可能表现为核的形变及颈部的形成.颈部的形成可能是动力学势垒降低的一个主要原因.在我们研究颈部的动力学行为时发现在颈部形成的初始阶段,颈部的 N/Z 比(中子质子比)要明显的高于初始核的 N/Z 比.由于颈部的中子数相对较多,促使反应中动态位垒降低.所以,这些核子重新调整的结果大大降低了体系的能量使动力学势垒低于静态势垒.

4 总结

用改进的 QMD 模型研究了超重核合成中的入射道静态势和动力学势,分析了有效核力各项对

核-核相互作用势的贡献. 在静态势的研究中主要突出了两点: 熔合势垒和俘获势阱. 从这两点出发研究了合成相同复合核 ^{262}Sg 的 18 个反应体系的静态势, 发现从对称体系到不对称体系垒高逐渐降低, 俘获势阱的宽度与深度也越来越大. 通过研究动力学势垒的能量依赖关系获得: 在库仑势垒附近, 动力学垒高随着入射能量的增加而上升, 当入射能量升高

到一定程度, 得到的动力学势垒变化很慢, 越来越接近于静力学势垒; 动力学垒高随着入射能量的降低观察到动力学势垒的最低值, 接近绝热势垒. 在冷熔合反应中, 我们认为这个最低的动力学势垒所对应的入射能量可能是合成超重元素最佳入射能量的选择. 有关动力学势垒以及颈部动力学微观机制方面的进一步研究正在进行中.

参考文献 (References)

- 1 Bass R. Nuclear Reactions with Heavy Ion. Springer-Verlag, Berlin, 1980. 283
- 2 Denisov V Y, Norenberg W. Eur. Phys. J., 2002. **A15**: 375
- 3 Feshbach H. Reflection on the PILAC Workshop. in: John & Sons. Theoretical Nuclear Physics: Nuclear Reactions. New York: AIP Conf. Proc., 1992. 247
- 4 Mahaux C, Weidenmuller H A. Shell-Model Approach to Nuclear Reactions. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1969. 20
- 5 Skorka S J, Schomburg W K, Borges A M et al. Effect of Neutron Transfer and Inelastic Scattering in Sub-barrier Fusion. in: Furuno K and Kishimoto T. Heavy Ion Fusion Reactions. TSUKUBA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1985. 3
- 6 WANG Ning, WU XiZhen, LI ZhuXia. Phys. Rev., 2002, **C65**: 064608; Phys. Rev., 2003, **C67**: 024604
- 7 Bass R. Nucl. Phys., 1974, **A213**: 45
- 8 Kroppe, Nix, Sierk. Atomic Data. Nucl. Data, 1993, **59**: 185
- 9 Myers W D, Swiatecki W J. Phys. Rev., 2000, **C62**: 044610
- 10 Denisov V Y. Phys. Lett., 2002, **B526**: 315
- 11 Giardina G, Agostino P D, Fazio G et al. Pramana-J. Phys., 1999, **53**: 409
- 12 Zagrebaev V I. Journal of Nuclear and Radiochemical Science, 2002, **3**: 13
- 13 Cherepanov E A. Pramana-J. Phys., 1999, **53**: 619
- 14 Diaz-Torres A, Adamian G G, Antonenko NV. Phys. Lett., 2000, **B481**: 228
- 15 Volkov V V. Acta Physica Polonica, 1999, **B30**: 1517

Study on Fusion Potential Barrier in Heavy Ion Reactions Based on the Dynamical Model*

TIAN Jun-Long^{1,2} WU Xi-Zhen^{1,3,1)} LI Zhu-Xia^{1,3,4} WANG Ning⁴ LIU Fu-Hu²

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Institute of Modern Physics, Shanxi Teachers University, Linfen 041004, China)

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

4 (Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract Based on an improved quantum molecular dynamics model the static and dynamic potential in the entrance channel of synthesis of superheavy nuclei are studied. The dependence of the static potential (and driving potential) on mass-asymmetry is obtained. From this study we find out that the mass-symmetric system seems to be difficult to fuse and the fusing system with the largest driving potential could be the optimal choice of the projectile-target combination. By comparing the static potential barrier with the dynamic one we find that the latter one is lower than former one obviously, and that the dynamical potential barrier is entrance energy dependent. The maximum and minimum of dynamic potential barriers approach to the diabatic (sudden approximation) and the adiabatic static potential barriers, respectively.

Key words QMD model, superheavy element, entrance-channel static potential, dynamic barrier

Received 3 November 2003

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (10175093, 10175089, 10235030, 10235020) and Major State Basic Research Development Program (G2000077400)

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