

# 重离子全熔合反应中的能量相关位垒

刘国兴 郑记文 陈克良

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 本工作采用能量相关的位垒穿透模型分析了<sup>12</sup>C、<sup>14</sup>N、<sup>16</sup>O、<sup>32</sup>S、<sup>36</sup>Cl 和 <sup>40</sup>Ar 等重离子全熔合激发函数数据, 提取了势函数  $E_1, V_1, E_2, V_2, R_0$  和  $\hbar\omega$ . 数据分析表明, 能量相关的位垒穿透模型能够满意地复现全熔合截面随能量变化的行为.

**关键词** 核形状演化的宏观模型, 能量相关位垒, 全熔合反应.

## 1 引言

当轰击能量超过库仑位垒时, 已经积累了相当多的重离子全熔合反应激发函数数据. 为了解释全熔合截面随能量变化的行为, 提出了许多理论模型. 其中以突然近似为基础的一维位垒穿透模型, 位垒高度是能量不相关的, 这个模型广泛地用来描述库仑位垒以上能区的全熔合激发函数, 并取得了很大的成功. 在 80 年代, 重离子全熔合激发函数研究中一个特别引人注意的问题是所谓垒下全熔合反应. 迄今已经测量了很多体系的垒下全熔合截面. 实验发现, 垒下能区的全熔合截面明显地大于位垒模型计算值, 这种偏离随体系变重而增大, 并且与碰撞核的结构有关. 其原因是多方面的, 包括量子效应、核形状零点振动、核表面涨落及碰撞对形成颈部等动力学效应. 还有碰撞对集体蒸发, 入射道与各种非弹性散射道, 转移反应道耦合等. 为了研究集体激发对熔合反应的影响, 采用耦合道计算复现垒下能量的全熔合截面, 获得了相当的成功. 但是, 它的主要缺点是, 掩盖了位垒以上能量的全熔合过程的动力学细节.

在研究大量反应体系的全熔合激发函数时, 只要灵活地选择相互作用势参数, 一维位垒穿透模型是可以采用的, 但是寻找一个势的普适函数描述所有体系的全熔合激发函数是很困难的. Ramamurthy 等人<sup>[1]</sup>把重离子碰撞中核形

状演化的宏观模型用于垒下熔合反应. 阐明了反应体系形成颈部对垒下熔合过程的影响. 提出使用能量相关的位垒穿透模型计算全熔合激发函数.

## 2 能量相关位垒的理论基础

Swiatecki<sup>[2]</sup> 发展起来的描述重离子碰撞核形状演化的宏观模型, 阐明了重离子全熔合反应的宏观特征, 导出了复合核形成的额外推动、额外推动能及对全熔合过程的动力学限制等.

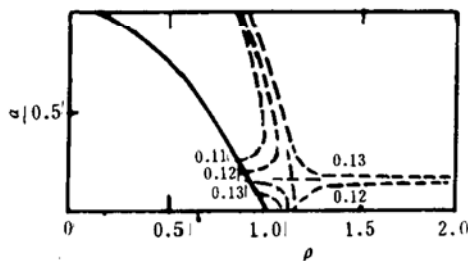


图 1 在相对分离  $\rho$  和颈部厚度  $\alpha$  二维空间中, 反应体系的形变势能等高图<sup>[2]</sup>

为了解释全熔合激发函数, 尤其是垒下能量全熔合激发函数的行为, Ramamurthy 等把这个描述核形状演化的宏观模型应用于垒下全熔合过程, 并考虑了反应体系形成颈部对垒下全熔合过程的影响. 使用三个参数表征核形状: 两个碰撞核的相对分离  $\rho = r / (R_1 + R_2)$ , 颈部厚度  $\alpha$  和

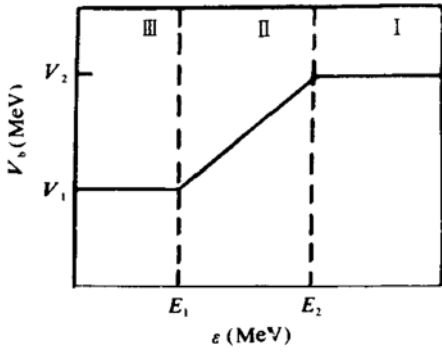


图 2 熔合位垒作为质心系能量的函数

非对称性参数  $\Delta = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$ ,  $R_1$  和  $R_2$  分别是两个碰撞核半径,  $r$  是它们的中心距离. 如图 1 所示, 在相对分离  $\rho$  和颈部厚度  $a$  两维空间中反应体系的形变势能等高图上<sup>[2]</sup>存在着由粒子分开的两个低势能区域: 一个相当于熔合的组合体系, 一个相当于在无限远处分离碎片形状. 在形变势能等高图上有两个明显的谷: 一个是连结形状的液滴模型裂变谷, 一个是非连结形状的熔合谷. 这两个谷各由在相对分离参数  $\rho=1$  附近的垒脊所分开. 在核碰撞过程中体系进入熔合谷, 由于两个核是不相连接的, 没有相互作用. 相对运动动能连续地转化为势能. 如果带给体系的能量足以构成接触形状, 相对于颈部自由度, 体系就变的不稳定了, 使碰撞轨道突然转向裂变谷, 组合体在裂变谷中的运动是高阻尼的. 产生全熔合的必要条件是体系越过条件鞍点. 如果轰击能量不足以使体系达到接触形状, 体系在转点处先形成颈部, 然后由于量子力学隧道效应进入裂变谷, 一经进入裂变谷, 由于存在势能梯度体系被驱使成为紧靠形状. 从形变势能等高图看出, 体系从熔合谷进入裂变谷有几条路径并且有各自的穿透几率. 对于更低的轰击能量, 体系是沿相对分离自由度隧道地进入裂变谷. 这样轰击能量分为三个不同区域(如图 2 所示): 在 I 区, 较高的轰击能量足以使体系达到接触形状, 体系沿相对分离  $\rho$  坐标运动足够快, 发生了全熔合反应; 在 II 区, 轰击能量小于使体系达到接触形状所需要的能

量, 但是足以使它在转点处隧道地穿透垒脊进入裂变谷, 发生全熔合反应. 所以, 在这个区域, 体系实际上是面对着势能等高图中垒脊, 这样就导致一个明显的能量相关位垒, 其高度随轰击能量减少而减少, 这个高度的最小值即是绝热位垒, 它相应于核完全弛豫了的形状. I 区范围大小通常取决于弹靶组合; 在 III 区, 轰击能量小于使体系进入裂变谷所需要的能量, 在这个区域体系隧道地穿透位垒进入裂变谷发生熔合反应.

所以, 在重离子碰撞核形状演化的宏观模型中加一个颈部自由度导致作为轰击能量函数的熔合位垒.

### 3 由测量的全熔合反应激发函数提取势参数

根据图 2 给出的熔合位垒作为质心系能量的函数, 能量相关的熔合位垒可以写成如下形式<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned}
 V_b &= V_2 & \epsilon > E_2 \\
 V_b &= m\epsilon + C & E_1 < \epsilon < E_2 \\
 V_b &= V_1 & \epsilon < E_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

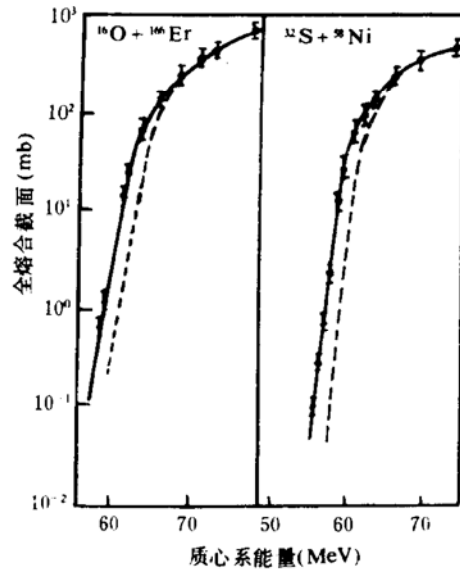


图 3 由能量相关位垒穿透模型计算的全熔合激发函数与实验值的比较

$\epsilon = E_{cm} - E_R$ ,  $E_R$  是转动能,  $E_R = l(l+1)\hbar^2/2\mu R_0^2$ ,  $\mu$  是体系的约化质量. 采用位垒穿透模型计算的全熔合截面为

$$\sigma_{fu}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \quad (2)$$

$k = (2\mu E_{cm})^{1/2}/\hbar$  是反应的波数,  $T_l$  是穿透系数, 可表示为

$$T_l = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{2\pi(V_b - E + E_R)}{\hbar\omega}\right]} \quad (3)$$

我们共有六个参数:  $E_1, V_1, E_2, V_2, R_0$  和  $\hbar\omega$ . 开始可以根据熔合位垒系统学选择  $V_2$  和计算值, 所以也可以由亲近势确定  $V_2$  和  $R_0$ , 调整其余四个参数:  $E_1, E_2, V_1$  和  $\hbar\omega$  使  $\chi^2$  最小, 获得计

算的全熔合截面与测量值最佳符合. 表 1 给出了  $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}, ^{14}\text{N}, ^{32}\text{S}$  和  $^{40}\text{Ar}$  重离子引起的若干反应体系, 由测量的全熔合激发函数提取的势参数. 对于某些反应, 例如  $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  反应, 即使计算的全熔合截面与测量值符合相当好, 由于实验的误差较小, 结果导致  $\chi^2$  值较大. 图 3 给出了  $^{16}\text{O} + ^{166}\text{Er}$  和  $^{32}\text{S} + ^{58}\text{Ni}$  反应根据能量相关位垒穿透模型计算的激发函数与实验值的比较. 虚线是用能量不相关位垒穿透模型计算的.

由此可见, 建立在核形状演化宏观理论基础上的能量相关的位垒穿透模型能够满意地描述重离子全熔合截面随能量变化的行为.

表 1 由测量的全熔合激发函数提取的势参数

反应体系	$E_{cm}$	$E_1$	$V_1$	$E_2$	$V_2$	$R_0$	$\hbar\omega$	$\chi^2$	文献
$^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$	54.0~99.6	63.0	63.4	84.0	71.4	10.6	4.8	2.05	[4]
$^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$	53.9~99.5	58.0	58.3	76.0	63.7	10.8	4.9	2.42	[4]
$^{14}\text{N} + ^{207}\text{Pb}$	63.4~102	67.0	67.3	85.0	72.8	11.0	5.0	1.72	[4]
$^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$	54.4~68.1	55.0	52.8	64.0	68.0	10.4	4.0	6.94	[5]
$^{16}\text{O} + ^{166}\text{Er}$	58.8~102	61.0	62.0	68.4	64.0	10.6	4.9	1.04	[6]
$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	70.0~94.7	73.4	73.9	79.0	74.8	11.2	5.2	3.36	[7]
$^{32}\text{S} + ^{58}\text{Ni}$	56.0~77.2	59.0	59.5	72.0	61.2	9.6	4.1	1.92	[8]
$^{32}\text{S} + ^{92}\text{Zr}$	72.0~97.0	75.0	76.6	83.0	79.0	10.1	4.4	2.71	[9]
$^{35}\text{Cl} + ^{27}\text{Al}$	30.4~74.8	31.0	31.1	54.0	35.2	9.6	4.0	0.79	[10]
$^{40}\text{Ca} + ^{44}\text{Ca}$	46.6~67.8	49.0	51.0	66.0	54.6	9.5	3.9	0.99	[11]
$^{40}\text{Ar} + ^{154}\text{Sm}$	108.6~141	112.6	115.8	130.0	126.5	10.8	4.8	1.81	[12]

参 考 文 献

- Ramamurthy V S, et al. Phys. Rev., 1990, C41 : 2702
- Swiatecki W J, Phys. Scr., 1981, 24 : 113
- Mohanty A K, et al. Phys. Rev., 1992, C46 : 2012
- Liu Guoxing, et al. High Energy Phys. & Nucl. Phys., 1986, 10 : 597
- Wuosmaa A H, et al. Phys. Lett., 1991, B263 : 23
- Gil S, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65 : 3100
- Thompson I J, et al. Nucl. Phys., 1989, A505 : 84
- Stefanini A M, et al. Phys. Lett., 1985, 162B : 66
- Corradi L, et al. Z. Phys., 1990, A334 : 55
- Scobel W, et al. Phys. Rev., 1976, C14 : 1808
- Beckerman M, Phys. Rep., 1985, 120 : 145
- Reisdorf W, et al. Nucl. Phys., 1985, A438 : 212

## Energy-dependent Barrier in Heavy-ion Induced Fusion Reaction

Liu Guoxing Zheng Jiwen Chen Keliang

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

**Abstract** The complete fusion excitation function for several systems formed by  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{35}\text{Cl}$  and  $^{40}\text{Ar}$  ion with some targets have been analysed by an energy-dependent barrier penetration model. The potential parameters  $E_1$ ,  $V_1$ ,  $E_2$ ,  $V_2$ ,  $R_0$  and  $\hbar\omega$  have been extracted from the experimental data. It shows that the energy-dependent barrier penetration model can describe satisfactorily the behaviour of the change of the fusion cross section with the bombarding energy.

**Key Words** macroscopic model of nuclear shape evolution, energy-dependent barrier, complete fusion reaction.

(上接 16 页)

## Trends in Cluster Impact Fusion

Lin Senhao Shen Wenqing

(*Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

**Abstract** A brief introduction of latest development of cluster impact fusion (CIF) was presented. Beuhler, Friedler and Friedman from BNL reported to have observed (d,d) fusion when deuterated solid target of  $\text{TiD}$ ,  $(\text{C}_2\text{D})_n$  or  $\text{ZrD}_{1.65}$  were bombarded by  $(\text{D}_2\text{O})_n^+$  cluster with  $n$  values between 20 and 1000, accelerated to energies of 220~325 keV. The observed fusion rates correspond to cross sections some 25 orders of magnitude larger than the theoretical estimation. A group in Stanford Research Institute experimentally gave a confirmation on the credibility of CIF with different apparatus. In addition, the experiment results were explained theoretically by EMR model and shock-wave mechanism, respectively. However, Fallavier from Lyon reported that they observed no (d,d) fusion evidence under the conditions of 100keV  $(\text{D})_{200}^- \rightarrow \text{TiD}$  or  $>10\text{keV/u}$   $(\text{CD}_4)_{145}^+ \rightarrow (\text{C}_2\text{D}_4)_n$ .

It is expecting that the CIF will be strongly confirmed by experimental results and theoretical explanation with more accurate facilities in the near future.

**Key Words** cluster, fusion, cluster impact fusion.