

文章编号: 1007-4627(2014)01-0001-07

五参数哑铃模型中核融合反应的新奇不稳定性

孙乾¹, 上官丹骅², 包景东¹

(1. 北京师范大学物理系, 北京 100875;
2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 在原子核融合反应或裂变反应的动力学过程中, 颈部变量都起着非常重要的作用。通常情况下, 模型中变量的定义根据各种描述宏观形变的参数的不同而不同。为了进一步研究颈部增长在核融合反应中的作用, 通过引入弹核和靶核的形变参量来拓展哑铃模型。在此框架下, 计算了从两个接触核到生成一个复合核过程的核融合反应系统在不同形变下的势能曲面, 同时又对核融合反应体系的惯性张量和粘滞张量进行了计算, 这些物理量的计算都为以后的朗之万动力学研究打下了基础。计算结果表明, 在改进后的五参数哑铃模型之中, 颈部变量是不稳定度并在核反应中起重要作用。

关键词: 五参数哑铃模型; 核融合反应; 势能曲面

中图分类号: O571.42+3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.001

1 引言

原子核反应的理论和实验研究一直是前沿热点问题。在理论研究方面有多种描述原子核反应过程中体系形变的模型, 例如: 双核模型^[1-2]、双中心模型^[3-4]、 $\{c, h, \alpha\}$ 模型^[5]以及哑铃模型^[6]等等。

在广泛研究的模型中, 双核模型通过关注弹核和靶核之间的质量交换和输运来研究从双核体系到单核体系的动力学演化过程^[7]。基于该模型, 发现半径和质量不对称的耦合作用在对称形变中较弱, 但是随着不对称度的增加而变得更为重要^[8]。双核模型还解释了不同的弹核和靶核组合生成相同的超重核中出现的原子核的结构效应^[9]。双中心模型允许形状从一心形状到两心形状有一个连续性变化并通过光滑的颈部连接^[10]。扩散融合模型通过试验粒子越过鞍点的方法和研究二维朗之万方程中原子核颈部增长的动力学来计算复合核的融合概率^[11-14]。然而, 这些模型中形变参数相对地缺少足够的维度, 而有足够维度的形变参数能在势能曲面 (PES) 上产生新特征。因此, Moéller 等^[15-16]用五维参数来描述核形变, 并在其

裂变研究中计算了 PES。

三参数哑铃模型在缺少足够的计算能力的时期, 由于结构简单和易于分析而被广泛应用, 并且引入随机断裂在解释核裂变方面取得了成功。实验上已经证实, 弹核和靶核在融合前都可能存在非正球体的形变^[17], 这就暗示两个将要融合的子核可以以各种形变和形式碰撞。因此, 我们引入两个形变参数将经典的三参数哑铃模型扩展到五参数, 并在研究中结合双核模型和扩散模型的重要组成部分和思想。本文第 2 节将描述改进的五参数模型并展示其基本特征; 第 3 节计算 PES, 给出不同于其他模型的新不稳定性 and 形变对势能的影响; 第 4 节计算惯性张量和粘滞张量; 最后, 第 5 节对全文进行总结和讨论。

2 五参数哑铃模型

2.1 模型的基本介绍

改进后的哑铃模型用类圆锥体的颈部相连接的两个轴对称的椭球体来描述核融合或核裂变反应体系。由于我们引入了每个反应核自身的形变, 因此可以观

收稿日期: 2013-10-29; 修改日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11175021); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120003110025)

作者简介: 孙乾(1985-), 男, 山东青岛人, 在读博士, 从事理论物理研究; E-mail: sunqian@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 包景东, E-mail: jdbao@bnu.edu.cn.

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

察不同的碰撞类型(头对头、球对球、腰对腰)对核融合反应的影响。

模型的 5 个无量纲参量定义如下:

- (1) 颈部变量 $\nu = \tan\theta / \tan\theta_{\max}$;
- (2) 质心距变量 $\rho = r / (a_1 + a_2)$;
- (3) 不对称度变量 $D = (a_2 b_2^2 - a_1 b_1^2) / (a_2 b_2^2 + a_1 b_1^2)$;
- (4) 弹核形变量 $\beta_1 = b_1 / a_1$;
- (5) 靶核形变量 $\beta_2 = b_2 / a_2$.

如图 1 所示, 上述定义式中参量的含义如下: r 是两个融合反应的反应核或者两个裂变碎片的质心距; a_1 和 a_2 是两个碰撞核平行于对称轴的半长度; b_1 和 b_2 是两个碰撞核垂直于对称轴的半长度; 上述参量都以复合核的半径 R_0 为长度单位。另外, θ_{\max} 是两子核外部公切线和对称轴的夹角, 而 θ 是颈部边界和对称轴的夹角。

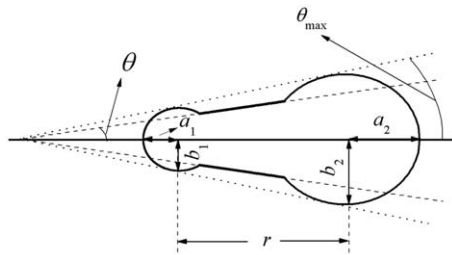


图 1 五参数哑铃模型的示意图

与 {c, h, α } 模型相似, 五参数哑铃模型参数有一个重要的等体积约束条件: 不论体系形状如何变化, 反应体系的总体积保持不变。

对称情形是模型的一种特殊情况, 因为弹核和靶核完全相同, 所以 $D = 0$ 和 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ 。因此五参数可以约化为 ν , ρ 和 β 3 个参数来表示。由于夹角的消失, 具体参数的定义稍有变化:

- (1) 颈部变量 $\nu = y/a$;
- (2) 质心距变量 $\rho = r/2a$;
- (3) 反应核形变量 $\beta = b/a$.

其中, y 是对称情况下颈部的半宽度。

2.2 模型参数的变化

五参数哑铃模型在不对称情况下, 参数不同的取值范围对应着不同的反应体系形变, 现综述如下:

- (1) 颈部变量 ν 的变化范围

$0 \leq \nu \leq 1$ 表示核反应体系的颈部从无(即没有颈部)到最大值(即颈部边界和外公切线重合)。

- (2) 质心距变量 ρ 的变化范围

1) $\rho = \rho_{\min} = |(a_2 - a_1) / (a_2 + a_1)| < 1$ 表示核反应体系处于复合核或单体核状态;

2) $\rho_{\min} < \rho < 1$ 表示两个反应核处于相互融合状态;

3) $\rho = 1$ 表示两个反应核处于接触态;

4) $\rho > 1$ 表示两个反应核处于相离状态。

- (3) 不对称度变量 D 的变化范围

$-1 < D < 1$ 表示两个反应核从“左大右小”到“左小右大”的变化。

- (4) 反应核形变参量 β_1 和 β_2 的变化

β_1 和 β_2 是分别描述弹核和靶核形变的参量, 有着相同的变化范围。因此, 我们可以通过不同的组合来表示不同的核反应碰撞类型:

1) $\beta_1 < 1$ 和 $\beta_2 < 1$ 表示两个反应核头对头碰撞;

2) $\beta_1 = 1$ 和 $\beta_2 = 1$ 表示两个反应核球对球碰撞;

3) $\beta_1 > 1$ 和 $\beta_2 > 1$ 表示两个反应核腰对腰碰撞。

在对称情况下, 参数的取值范围和相应的核反应体系形变与不对称情况类似, 但有三处取值因为参数定义的改变而稍有变化:

1) 颈部变量的极大值 $\nu_{\max} = \beta$;

2) 质心距变量的极小值 $\rho_{\min} = 0$;

3) 反应核的形变参量只有一个 β , 意味着两个反应核的形变完全一致。

如图 2 所示, 以球对球碰撞反应为例, 分别在对称和不对称情况下, 演示了改进的五参数哑铃模型的对核融合反应体系的描述。

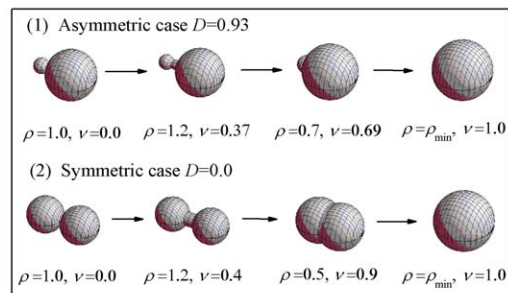


图 2 (在线彩图) 五参数哑铃模型演示球对球碰撞核融合反应

3 新奇不稳定性

为了得到和分析不稳定自由度(或者也可以称为运输自由度), 必须计算五参数哑铃模型下的集体坐

标的形变势能。本文采用液滴模型^[18-19]来计算两个中重核发生核熔合反应的形变势能。

3.1 势能的理论公式

本文研究的是核熔合反应过程中的第二阶段: 即两个接触态的反应核到形成一体的复合核的过程。对于这个过程来说, 核熔合和核裂变在一定程度上可以视为相反的过程, 与核裂变类似, 选择复合核作为基态核。又因为对于复合核来说, 球形核有最低的能量, 所以球形复合核的能量被作为基态能。反应核引入微小的形变时, 形变的复合核的能量被作为基态能。

形变势能的计算公式如下:

$$E(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5) = E_s - E_{s0} + E_c - E_{c0}, \quad (1)$$

其中: $q_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 代表对应的广义形变参数, 即本文模型的无量纲参数; E_{s0} 和 E_{c0} 是球形核的表面能和库仑能; E_s 和 E_c 是形变核的表面能和库仑能。

根据 Myers-Swiatecki 的公式^[20-22]:

$$E_{s0} = 17.944 \left[1 - 1.7826 \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 \right] A^{\frac{2}{3}}, \quad (2a)$$

$$E_{c0} = 0.7053 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}, \quad (2b)$$

$$E_s = \left(\frac{1}{4} \int_{z_1}^{z_4} \sqrt{4P_s^2 + \left(\frac{\partial P_s^2(z)}{\partial z} \right)^2} dz \right) E_{s0}, \quad (2c)$$

$$E_c = \left(\frac{15}{4} \int_{z_1}^{z_4} dz \int_{z_1}^z dz' \int_0^\pi d\phi \frac{P_s^2(z) P_s^2(z') \sin^2 \phi}{z - z' + l} \right) \times E_{c0}, \quad (2d)$$

$$l = \sqrt{(z - z')^2 + P_s^2(z) + P_s^2(z') - 2P_s(z)P_s(z') \cos \phi}, \quad (2e)$$

上述式 (2) 中, $P_s^2(z)$ 是核表面方程; σ 是原子核单位面积的表面能; R_0 , A , Z 和 N 分别是复合核的半径、质量数、质子数和中子数; ρ_0 是原子核的电荷密度; S 是原子核的表面积。

3.2 鞍点和不稳定性

一般情况下, 在鞍点附近, 势能仅对一个自由度是不稳定的, 而对其他自由度都是稳定的。本文计算

了以 ^{200}Po 为生成复合核的核反应在零角动量下的形变势能。

如图 3 至图 5 所示, 通过对不同参数下形变势能数值的分析, 发现本文模型下, 势能 (Potential energy) 随不对称度、反应核形变参量以及质心距变量的变化是稳定的。因为势能在不对称自由度上的稳定点是 $D = 0$, 所以势能随反应核形变参量的变化观察对称情况下的参数 β 即可。如图 6 所示, 发现反应势能随颈部变量 ν 的增长呈现不稳定的倒谐振子形式。所以, 五参数哑铃模型中, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应中, 颈部是新不稳定自由度 (或者可以称之为输运自

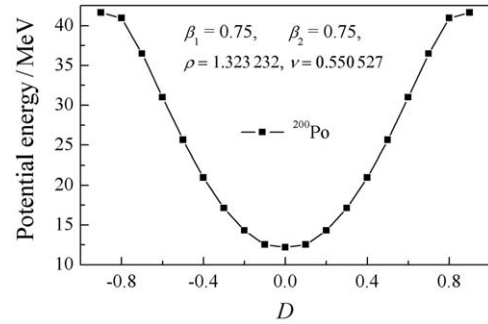


图 3 其它变量限定时, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应势能随不对称度变量 D 的变化

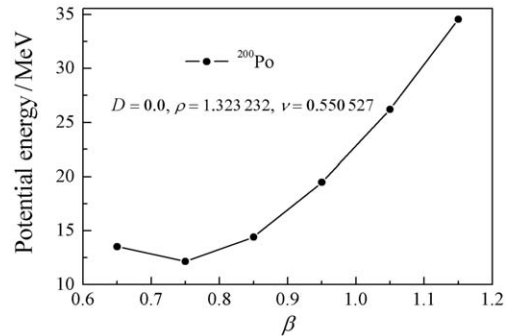


图 4 其它变量限定时, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应势能随反应核形变参量 β 的变化

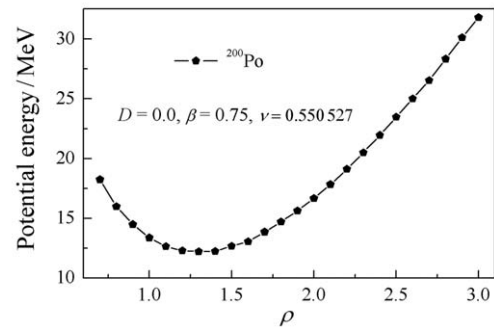


图 5 其它变量限定时, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应势能随质心距变量 ρ 的变化

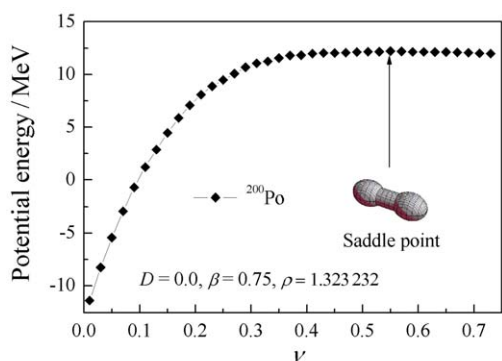


图 6 (在线彩图) 其它变量限时, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应势能随颈部变量 ν 的变化

由度), 势能上的鞍点位于 $D = 0, \beta_1 = \beta_2 = 0.75, \rho = 1.323\ 232, \nu = 0.550\ 527$.

3.3 新奇的不稳定方向的分析

在五参数哑铃模型中, 不稳定自由度是颈部变量 ν 而不是通常意义下质心距自由度。具体原因如下:

- (1) 库仑能和表面能的竞争;
- (2) 颈部变量不是直接定义颈部的大小, 而是定义为与颈部有关的夹角或半宽度的比值。

以 ^{200}Po 为生成核的核反应在鞍点附近的表面能和库仑能随颈部变量 ν 的变化如图 7 所示。根据式 (1) 和式 (2) 可知, 势能依赖于表面能和库仑能, 而表面能仅决定于核反应系统的表面积。在哑铃模型中, 原子核反应系统的表面积随颈部的增长有一个最大值, 导致表面能的变化如图 7 所示。液滴模型假设核子是均匀分布的。而哑铃模型在其它参数锁定时, 随着颈部变量 ν 的增加, 体积守恒条件使得整个核反应体系的大小量度在颈部方向上增加而在质心距方向上减少, 这导致库仑能的变化如图 7 所示。因此, 表面能

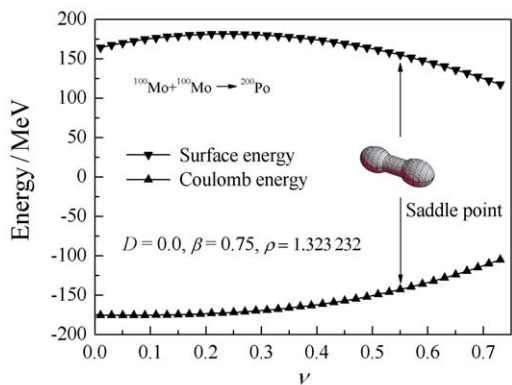


图 7 (在线彩图) 其它变量限时, 以 ^{200}Po 为生成核的核反应表面能和库仑能随颈部变量 ν 的变化

和库仑能彼此的竞争导致颈部成为不稳定自由度。

在其它模型中, 有的直接定义颈部的厚度, 例如, 在 $\{c, h, \alpha\}$ 模型中, 颈部变量 h 描述的是在给定长度的核的颈部的厚度; 有的不定义颈部, 例如在双核模型中, 双核系统演化的一个重要特征是在复合核形成过程中没有颈部且每个反应核保留自己的特性, 即在双核体系演化过程中, 所有的施核 (通常是弹核) 的核子通过壳传递的方式转给接受核 (通常是靶核)。然而, 本文模型中的颈部变量是能表示颈部大小变化的一个比值, 使得颈部变量和质心距变量在数值上相对来说独立仅仅通过等体积条件相联系。

总之, 在五参数哑铃模型中, 原子核融合反应可被更好地描述为弹核和靶核相碰撞接触后颈部的快速增长, 颈部的增长又使得整个核反应系统的长度减少即两个反应核靠近, 最终导致原子核反应体系越过鞍点后形成复合核。因此, 与其他模型^[23-24]不同, 颈部变量是我们模型中描述核反应的不稳定自由度。

3.4 形变对势能的影响

本文模型下的不稳定自由度是颈部变量 ν , 而颈部变量 ν 在对称和不对称情况下的定义又稍有不同。以 $^{96}\text{Zr} + ^{124}\text{Sn}$ 反应为例 (如图 8 所示), 在不对称度取值为 $D = 0.127\ 273$ 时, 计算的势能随颈部变量的变化仍是不稳定的。同时计算了反应核形变参量对势能变化的影响, 从图 8 可见, 腰对腰的核反应的位垒要比头对头反应的位垒高, 即相同条件下, 弹核和靶核腰对腰的碰撞反应相对于头对头的碰撞要克服更大的势能位垒, 也即头对头更易生成复合核, 这与前人研究工作^[25-26]相符合。

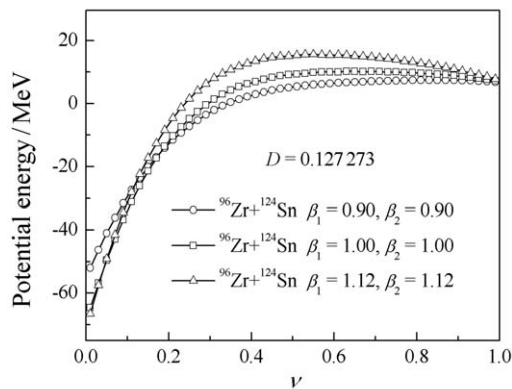


图 8 不对称情况下, $^{96}\text{Zr} + ^{124}\text{Sn}$ 的反应势能随颈部变量 ν 的变化以及反应核形变参量对势能的影响

4 惯性张量和粘滞张量

在五参数哑铃模型下, 分别对惯性张量和粘滞张量进行了计算。因为颈部变量的定义分两种情况, 所以分别计算了不对称度 $D=0$ 的 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$ 的反应和 $D=0.127273$ 的 $^{96}\text{Zr}+^{124}\text{Sn}$ 反应。下面给出了球对球 ($\beta_1=\beta_2=1.0$) 碰撞反应情况下的张量计算结果。

4.1 惯性张量

原子核的熔合反应是原子核体系的一种形变的动力学过程, 所以系统的集体运动的动能就显得尤为重要。原子核反应集体运动的动能方程可以如下表示:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{ij} M_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j. \quad (3)$$

从式 (3) 提取惯性张量 M_{ij} 。原子核的惯性能够反映原子核体系的集体运动动能的性质, 其集体动能依赖于原子核系统的形变随时间改变, 也依赖于有效的核子交换。采用无旋不可压缩流体的 Werner-Wheeler 方法^[27]来具体计算惯性张量。惯性张量的具体计算公式如下:

$$M_{ij} = \pi m n R_0^5 \int_{z_1}^{z_4} P_s^2(z) \times \left\{ \left[A_i(z, q_1, q_2, \dots, q_n) - \frac{\partial z_c}{\partial q_i} \right] \times \left[A_j(z, q_1, q_2, \dots, q_n) - \frac{\partial z_c}{\partial q_j} \right] + \frac{1}{2} B_i B_j \right\} dz, \quad (4)$$

$$A_i P_s^2(z) = \int_z^{z_4} \frac{\partial P_s^2(z')}{\partial q_i} dz', \quad (5)$$

$$B_i = -\frac{P_s(z)}{2} A_i'(z, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (6)$$

式 (4) 中, m 是一个核子的质量; n 是核子数密度; z_c 是原子核系统的质心。

由式 (4) 可知, 惯性张量 M_{ij} 是包含 25 个分量的对称张量, 能反映惯性张量颈部性质的就是其分量 $M_{\nu\nu}$ 。如图 9 和图 10 所示, 两个反应中的惯性张量分量 $M_{\nu\nu}$ 随着颈部变量的变化呈现不稳定的倒谱振子势。

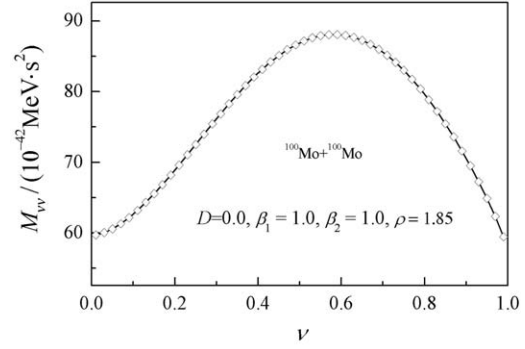


图 9 球对球碰撞的 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$ 反应下, 惯性张量分量 $M_{\nu\nu}$ 随颈部变量 ν 的变化

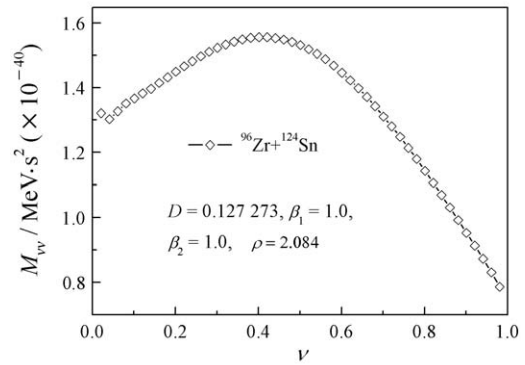


图 10 球对球碰撞的 $^{96}\text{Zr}+^{124}\text{Sn}$ 反应下, 惯性张量分量 $M_{\nu\nu}$ 随颈部变量 ν 的变化

4.2 粘滞张量

耗散也是研究原子核大振幅集体运动的动力学的重要因素, 其中粘滞张量的计算尤为重要。本文采用一体耗散模型^[28]计算粘滞张量, 在此模型中, 原子核能量的损失是由于核子和原子核体系壁的碰撞。原子核熔合系统被认为是一个移动的墙, 墙的移动代表集体运动和原子核的形变。核子和墙碰撞后获得的能量就是集体运动损失的能量, 因此存在粘滞性。所以耗散函数的具体表达式为

$$\gamma_{ij} = \frac{9}{16} r_0 m A^{\frac{4}{3}} v_f \int_{z_1}^{z_4} \frac{1}{\sqrt{4P_s^2 + \left(\frac{\partial P_s^2}{\partial z}\right)^2}} \times \left(\frac{\partial P_s^2}{\partial q_i} + \frac{\partial P_s^2}{\partial z} \frac{\partial z_c}{\partial q_i} \right) \left(\frac{\partial P_s^2}{\partial q_j} + \frac{\partial P_s^2}{\partial z} \frac{\partial z_c}{\partial q_j} \right) dz, \quad (7)$$

式 (7) 中, v_f 是费米速度。

由式 (7) 可知, 粘滞张量也是有 25 个分量的对称张量, 其描述颈部性质的是分量 $\gamma_{\nu\nu}$ 。如图 11 和图 12

所示,粘滞张量分量 $\gamma_{\nu\nu}$ 随着颈部变量的增长呈现不稳定的非单调变化。

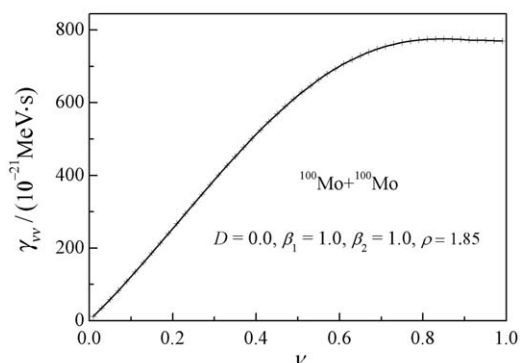


图 11 球对球碰撞的 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$ 反应下,粘滞张量分量 $\gamma_{\nu\nu}$ 随颈部变量 ν 的变化

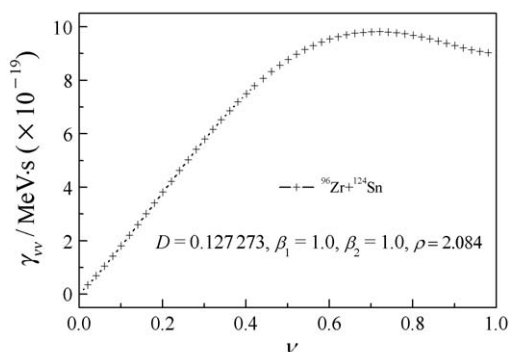


图 12 球对球碰撞的 $^{96}\text{Zr}+^{124}\text{Sn}$ 反应下,粘滞张量分量 $\gamma_{\nu\nu}$ 随颈部变量 ν 的变化

惯性张量和粘滞张量以及形变势能的计算为以后详尽的朗之万动力学研究打下了基础。

5 结论和讨论

本文提出了一个五参数哑铃模型来描述具有各种不同形变的中重核的核融合反应。在此模型下,我们采用液滴模型计算了不同形变下的 PES。发现了与其它模型不同的不稳定自由度:即两个反应核接触后生成的颈部变量。该新奇不稳定自由度产生的原因是:表面能和库仑能的竞争以及模型对颈部变量的定义是颈部夹角或颈部半宽度的比值。同时,我们计算和对比了反应核形变参量对势能影响,分析结果与前人的工作相符合。我们又根据不稳定自由度的两种定义情况分别计算了核融合反应系统动力学中的惯性张量和粘滞张量。上述物理量的计算为以后的朗之万动力学研究打下基础。

参考文献:

- [1] ANTONENKO N V, CHEREPANOV E A, NASIROV A K, *et al.* Phys Rev C, 1995, **51**: 2635.
- [2] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, SCHEID W. Nucl Phys A, 1997, **618**: 176.
- [3] MOSEL U, SCHMITT H W. Nucl Phys A, 1971, **165**: 73.
- [4] EICHLER J, WILLE U. Phys Rev Lett, 1974, **33**: 56.
- [5] BRACK M, DAMGAARD J, JENSEN A S, *et al.* Rev Mod Phys, 1972, **44**: 320.
- [6] SWIATECKI W J. Phys Scr, 1981, **24**: 113.
- [7] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, SCHEID W, *et al.* Nucl Phys A, 1998, **633**: 409.
- [8] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, JOLOS R V. Nucl Phys A, 1995, **584**: 205.
- [9] HINDE D J, THOMAS R G, RIETZ R D U, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **100**: 202701.
- [10] MUSTAFA M G, BAISDEN P A, CHANDRA H. Phys Rev C, 1982, **25**: 2524.
- [11] WANG C Y, JIA Y, BAO J D. Phys Rev C, 2008, **77**: 024603.
- [12] CAP T, SIWEK-WILCZYNSKA K, WILCZYNSKI J. Phys Rev C, 2011, **83**: 054602.
- [13] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2011, **83**: 044613.
- [14] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2010, **81**: 044606.
- [15] MÖLLER P, MADLAND D G, SIERK A J, *et al.* Nature, 2001, **409**: 785.
- [16] MÖLLER P, SIERK A J, ICHIKAWA T, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 064304.
- [17] LU X T. Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010: 14–16.
(卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 14–16.)
- [18] HIRSCH A S, BUJAK A, FINN J E, *et al.* Phys Rev C, 1984, **29**: 508.
- [19] POMORSKI K, DUDEK J. Phys Rev C, 2003, **67**: 044316.
- [20] MYERS W D, SWIATECKI W J. Ark Fys, 1967, **36**: 343.
- [21] SIERK A J, NIX J R. Phys Rev C, 1980, **21**: 982.
- [22] NIX J R. Nucl Phys A, 1989, **502**: 609.
- [23] JIA Y, BAO J D. Phys Rev C, 2007, **75**: 034601.
- [24] ANTONENKO N V, CHEREPANOV E A, NASIROV A K, *et al.* Phys Lett B, 1993, **319**, 425.
- [25] HINDE D J, DASGUPTA M, LEIGH J R, *et al.* Phys Rev Lett, 1995, **74**: 1295.
- [26] HINDE D J, DASGUPTA M, LEIGH J R. Phys Rev C, 1996, **53**: 1290.
- [27] DAVIES K T R, SIERK A J, NIX J R. Phys Rev C, 1976, **13**: 2285.

[28] SWIATECKI W J. Prog in Part and Nucl Phys, 1980, 4:

383.

Novel Unstable Degree of Nuclear Fusion or Fission in a Five-parameter Dumbbell Model

SUN Qian¹, SHANGGUAN Danhua², BAO Jingdong¹

(1. Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: The neck variable plays a key role in the dynamical processes of nuclear fusion or fission. Generally speaking, the definition for this variable is different for various parameterizations describing macroscopic nuclear shapes. In order to investigate the effects of increased neck in nuclear fusion, we extend the dumbbell parameterization by taking deformations of both the target and projectile into account. The potential energy surface (PES) with different shapes of nuclei is calculated, as well as the inertia mass and friction tensors. These calculations lay the foundation for Langevin dynamics. Analysis of the results shows that the neck variable in the proposed five-parameter dumbbell model is an unstable degree of freedom and play an important role in nuclear fusion.

Key words: five-parameter dumbbell model; nuclear fusion; potential energy surface

Received date: 29 Oct. 2013; **Revised date:** 25 Nov. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11175021); Specialized Research Foundation for Doctoral Program of Higher Education of China(20120003110025).

Corresponding author: BAO Jingdong, E-mail: jdbao@bnu.edu.cn.

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