

文章编号: 1007-4627(2013)03-0364-05

基于路径分析方法探究核耗散的形变关系

毛英臣, 宛素钰, 刘锐, 丁扬, 张敏玲, 吕游, 刘鑫

(辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁大连 116029)

摘要: 利用动力学加统计模型对 ^{200}Pb 系统的断前中子的发射进行了模拟。计算结果表明, 在核耗散的形变关系(DDND)确定的情况下, 断前中子多重性会随着能级密度坐标关系(DDLDP)的增强而减少, 且该规律主要由第一阶段内断前中子的发射决定。此外, 选定DDLDP而采用核耗散的不同形变关系也都很好地重现了实验数据。为了解释上述现象, 提出了研究热核退激的路径分析方法, 其主要内容是把核耗散看成是实验粒子在拉伸维度上的阻尼力, 而核裂变的动力学过程是该阻尼力和自由能产生的驱动力之间相互竞争的结果。利用该方法对 ^{200}Pb 系统的断前中子多重性进行了分析, 并指出在确定DDND时应考虑DDLDP。

关键词: 核耗散的形变关系; 能级密度参数的形变关系; 路径分析方法; 驱动力

中图分类号: O571.43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.364

1 引言

当前, 对超重元素的性质和合成机制的研究是非稳定原子核研究的焦点问题^[1], 这也是Science杂志在创刊125年提出的125个最具挑战性问题中的第44个难题^[2]。到目前为止, 人工合成的超(U)重元素已有26个, 主要是通过低能重离子熔合蒸发反应获得的。熔合蒸发反应本质上是一个阻尼反应过程, 其主要特征是反应过程中存在着核耗散现象。从描述核反应的微观机制上, 核耗散没有存在的必要, 这一概念被引入到各种理论是为了描述热核在动态演变过程中, 核内部(单粒子)自由度与集体(形变)自由度之间的耦合^[3]。鉴于微观理论在描述原子核这一复杂的量子多体系统的困难, 在各种宏观理论模型中, 核耗散才被广泛接受。在过去40多年里, 尽管针对核耗散展开了许多研究, 但是对其强弱程度却仍然没有定论^[4-6], 并且对核耗散的温度关系和形变关系也存在着争议。例如, Hofmann等^[7]根据量子输运理论给出了核耗散随着核温度的升高而增加的结论, 而基于Nörenberg^[8]的非绝热耗散动力学模型预言的核耗散却反比于核温度平方。对核耗散的形变关

系(DDND), 理论和实验也给出了相反的结论。例如, 大家普遍接受的一体耗散模型(OBD)指出, 核耗散随着一维拉伸自由度减弱的结论^[9], 而Fröbrich等^[10]拟合实验数据的标准参数设置的模型(SPS)却指出, 在形变增大到某一阈值后核耗散将逐渐增大。本文将基于对热核退激过程的路径分析, 来探究DDND, 以期在某些方面会促进对超重元素合成机制的深入研究。

2 理论模型

热核的退激过程由动力学加统计模型(CDSM)模型^[10]描述, 该模型将动力学的Langevin模型与传统的统计模型结合起来。在该模型的动力学分支, 为了计算断前轻粒子及 γ 射线的发射, 核裂变过程的数值模拟中采用了Monte Carlo技术。而在该模型的统计分支中, 裂变宽度考虑了动力学特征, 断前轻粒子的发射宽度则沿用传统方法来描述^[11]。

由于仅研究核耗散的形变(拉伸)关系, 故在本文的研究中, 用一维过阻尼Langevin方程来描述裂变过程:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{T}{M\beta(q)} \frac{\partial S(q)}{\partial q} + \sqrt{\frac{T}{M\beta(q)}} \Gamma(t), \quad (1)$$

收稿日期: 2012-10-30; 修改日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975068); 教育部博士点专项基金资助项目(20102136110002)

作者简介: 毛英臣(1977-), 男, 山东莱州人, 副教授, 博士, 从事原子核理论研究; E-mail:myc@lnnu.edu.cn.

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

其中: 拉伸自由度 $q = \frac{d}{2R_0}$, d 是对称裂变后两子核的质心距离, R_0 是复合核的半径; M 是惯量参数; T 是核温度; $\Gamma(t)$ 是 Langevin 力, 满足 $\langle \Gamma(t) \rangle = 0$ 与 $\langle \Gamma(t)\Gamma(t') \rangle = 2\delta_\epsilon(t-t')$; $\beta(q)$ 是形变相关的约化摩擦系数。本文采用了 SPS 和 OBD 两种核耗散形式, 其形变关系被展示在图 1 中, 具体表达式参见文献 [10]。

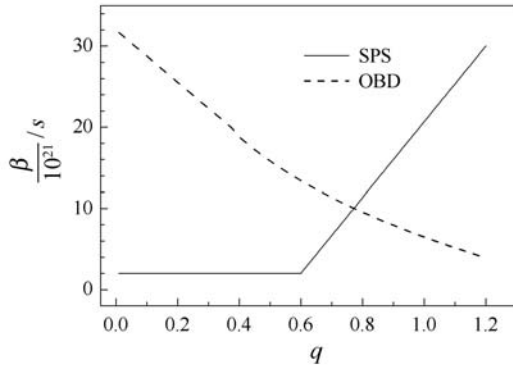


图 1 核摩擦 SPS 和 OBD 的形变关系

Langevin 方程的驱动力由自由能 $TS(q)$ 提供 [10], 其中熵 $S(q)$ 为

$$S(q) = 2\sqrt{a(q)[E_{\text{tot}}^* - V(q)]}, \quad (2)$$

这里系统的初始总激发能 $E_{\text{tot}}^* = E_{\text{c.m.}} + Q$, 而 $E_{\text{c.m.}}$ 和 Q 分别是熔合系统的质心系能量和反应 Q 值。根据液滴模型的结合能公式 [12], 在 $\{c, h, \alpha\}$ 参数坐标体系 [13] 下, $V(q)$ 可表述为

$$V(A, Z, \ell, q) = a_2(1 - b_3 I^2) A^{2/3} [B_s(q) - 1] + c_3 Z^2 A^{-1/3} [B_C(q) - 1] + c_r \ell^2 A^{-5/3} B_r(q), \quad (3)$$

其中: 同位旋参数 $I = \frac{N-Z}{A}$; $B_s(q)$, $B_C(q)$ 和 $B_r(q)$ 分别是形变相关的相对表面能、库仑能和转动能, 它们形变坐标相关的表达式参见文献 [10]; a_2 , b_3 , c_3 和 c_r 是与形变坐标无关的参数。能级密度参数 $a(q)$ 取如下形式:

$$a(q) = a_v A + a_s A^{2/3} B_s(q), \quad (4)$$

其中 a_v 和 a_s 分别是单粒子能级的体积和表面参数, 由于研究的需要, 本文选取了两套参数 [14-15]。图 2 给出了驱动势和能级密度参数的形变关系 (DDLDP)。这样, 驱动力 $K(q) = \frac{TdS(q)}{dq}$ 可进一步表示为

$$K(q) = -\frac{dV(q)}{dq} + \frac{da(q)}{dq} T^2. \quad (5)$$

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

计算开始时, 为了模拟轨道的采样, 轨道角动量取自熔合自旋分布函数,

$$\frac{d\sigma(\ell)}{d\ell} = \frac{2\pi}{k^2} \frac{2\ell+1}{1 + \exp\left(\frac{\ell-\ell_c}{\delta\ell}\right)}, \quad (6)$$

其中 ℓ_c 和 $\delta\ell$ 分别是轨道角动量及其弥散度。最后结果为所有分波的统计平均。

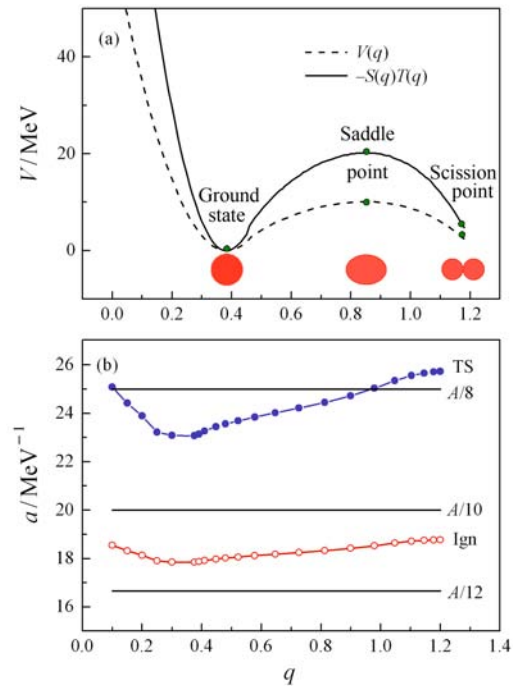


图 2 (在线彩图) ^{200}Pb 的 (a) 位能驱动势(虚线)和自由能驱动势(实线, 内部激发能为 100 MeV); (b) 两种 DDLDP, 并与常值 $A/8$, $A/10$ 以及 $A/12$ 相比较
实心圆是 TS 型 DDLDP [14], 而空心圆是 Ign 型 DDLDP [15]。

3 结果与讨论

为了研究核耗散的坐标关系, 以 $^{19}\text{F} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{200}\text{Pb}$ 系统为例进行了具体的计算, 且采用了断前中子多重性为研究探针。一般认为, 经熔合反应得到的复合核在其退激过程中, 断前粒子的发射主要来自于两个阶段, 即从复合核的准稳态到鞍点间的第一阶段和从鞍点到断点间的第二阶段。图 3 (a)、(c) 以及 (b)、(d) 给出了由 CDSM 模型分别采用 SPS 摩擦和 OBD 摩擦在上述两个阶段得到的断前中子多重性, 而 (e)、(f) 展示了裂变前总的断前中子多重性, 并与实验结果 [16-17] 进行了比较。由图 3 (e)、(f) 可知, 分别采用 SPS 摩擦和较弱的 DDLDP (Ign), 以及 OBD 摩擦和

较强的 DDLDP(TS) 都很好符合了实验结果。结合子图 (a) ~ (d)，需要指出的是相较于采用 OBD 摩擦，当采用 SPS 摩擦时，发射自第一阶段的断前中子要少于前者，而发射自第二阶段的断前中子则较前者为多，且上述现象并不依赖于计算所采用的 DDLDP。另外，由图 3 还可知，当采用相同核摩擦时，在误差

允许范围内，计算所采用的 DDLDP 越强，则断前中子多重性就越小，该结论在笔者之前的工作^[18]已有表述。但需特别指出的是，该规律基本上是由在第一阶段内的断前中子发射而决定，采用不同 DDLDP 对第二阶段断前中子的发射影响很小。

为了解释上述现象，笔者尝试提出了描述热核退

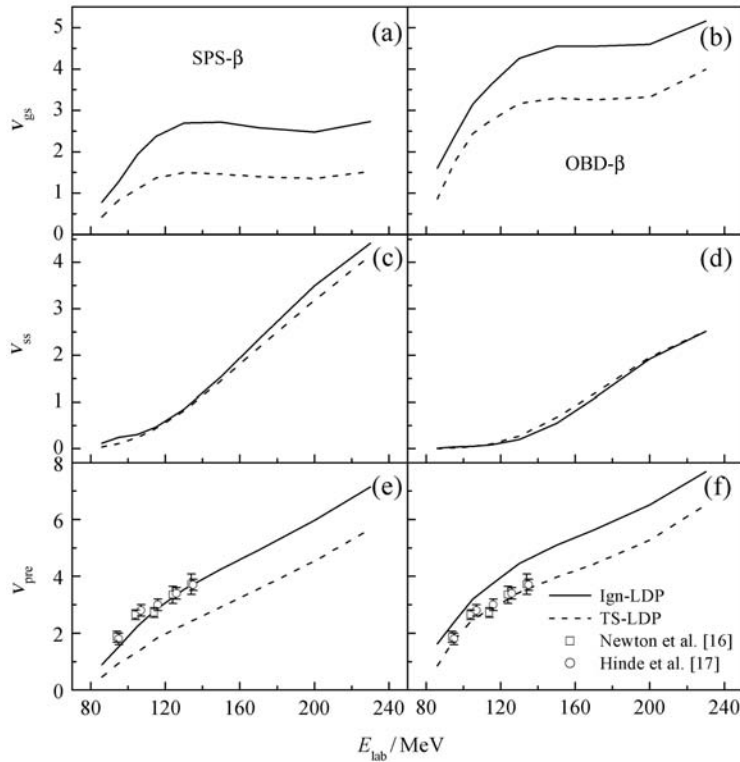


图 3 CDSM 模型计算的断前中子多重性与实验结果比较

利用 SPS 和 OBD 摩擦的计算结果，从上往下分别对应第一阶段、第二阶段以及裂变前的断前中子多重性；实线和虚线分别是采用 Ign 和 TS 类型 DDLDP 的计算结果；实验结果取自文献 [16-17]。

激的路径分析方法(PAM)，其物理思想源自于 Kramers 等^[19]的扩散模型。借鉴平均场思想将核耗散看成是实验粒子在一维拉伸方向上运动的阻尼力，而粒子运动的驱动力由核自由能(焓势)提供，这样就把核物质的扩散输运行为简化为实验粒子在一维裂变维度上的动力学问题，进而可通过分析实验粒子在裂变的两阶段路径内的运动学行为来研究 DDND。

图 4 展示了采用不同核摩擦和 DDLDP 时实验粒子所受到的驱动力。可以看出，在第一阶段内，由于表面能的作用，在较大范围内热核受到的驱动力较明显地表现为一种收缩力，而 DDLDP 越强，则这种收缩力就越易受到较强的单粒子运动的影响而较早地变为扩张力。由图 4 的内插图可知，这种情况发生的拉伸位置因 DDLDP 的类型而不同，当采用 TS 类

型的 DDLDP 时，发生在 q 为 0.74 处；而采用 Ign 类型的 DDLDP 时，则发生在 q 为 0.81 处。另外，采用相同核摩擦时，在转换点到鞍点(由图 2 (a)，²⁰⁰Pb 的鞍点在 0.86 处)间的相同位点处，较强 DDLDP 对应的扩张力也相对地更高。上述两方面原因造成了采用相同核摩擦时，DDLDP 越强则发射自第一阶段的断前中子就越少的结果。

由图 4 可知，当采用同类型的 DDLDP 时，在第一阶段的后一部分(0.77~0.86)内，尽管采用 OBD 摩擦得到的扩张力稍强于采用 SPS 摩擦，但从图 1 可知，在第一阶段的前一部分(0.38~0.77)内，OBD 摩擦要远强于 SPS 摩擦，故整体上采用 OBD 摩擦计算得到了更大的断前中子多重性。而在断前中子发射的第二阶段，一方面随着形变的增大，SPS 摩擦逐渐增强，

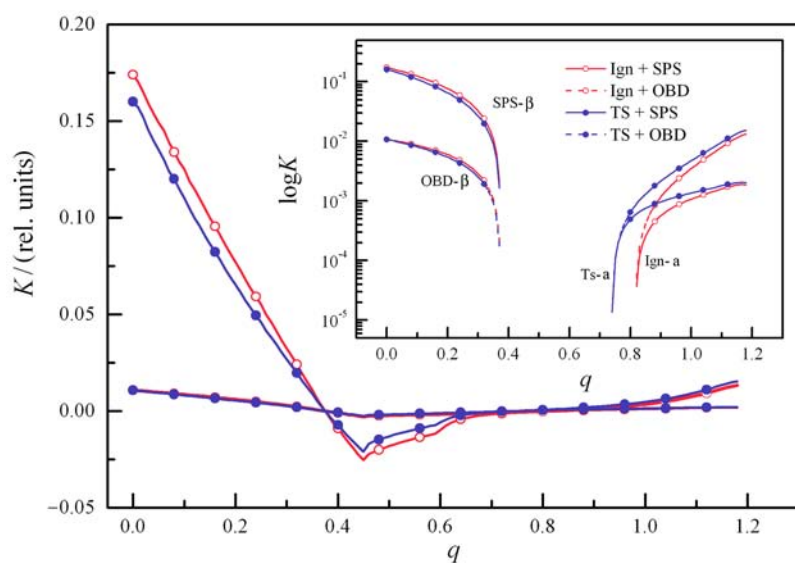


图4 (在线彩图) 驱动力的形变关系

实线和虚线分别是SPS和OBD摩擦的计算结果, 空心圆和实心圆分别表示采用Ign和TS类型DDLDP的计算结果。

而OBD摩擦则继续减弱; 另一方面采用OBD摩擦得到的扩张力要大于SPS摩擦, 且随着形变的增大, 这种差距同步增大。这两方面原因共同作用使得在第二阶段内采用SPS摩擦计算的断前中子多重性更大。

由上述讨论可知, 鞍点位置的确定在分析断前中子的发射时将是一个非常重要的问题, 这与包景东等^[20]的工作一致。

4 总结

本文用动力学加统计模型对²⁰⁰Pb系统的退激过程进行了模拟。计算结果表明, 在DDND确定的情况下, 断前中子多重性随着DDLDP的增强而减少, 且这种现象由第一阶段内断前中子的发射决定; 但是在选定同类型的DDLDP时, 采用OBD类型的核摩擦计算得到的断前中子多重性在第一阶段内要明显高于选用SPS类型核摩擦得到的计算值, 在第二阶段内则恰好相反, 这样总的效果是分别选取较弱(Ign)和较强(TS)形变关系的能级密度参数, 采用SPS和OBD都很好地重现了实验值。为了解释该现象, 笔者提出了研究热核退激的路径分析方法, 其主要思想是将核耗散看成是实验粒子在拉伸方向上运动的阻尼力, 而驱动力由核自由能提供, 这样就可通过对实验粒子在核裂变两阶段内的动力学行为的分析来研究DDND。本文用该方法对²⁰⁰Pb系统在核裂变两阶段内的断前中子多重性进行了直观的分析, 指出在确定DDND时

必需考虑研究系统的能级密度参数的坐标关系。

致谢 作者感谢北京师范大学物理学系包景东教授和东南大学物理系叶巍教授的有益讨论, 感谢辽宁师范大学物理与电子技术学院潘峰教授和戴连荣教授的帮助和支持。

参考文献(References):

- [1] OGANESSIAN Y. Nature, 2001, **413**: 122; HOFMANN S, MÜNZENBERG G. Rev Mod Phys, 2000, **72**: 733; SEIFE C, MILLER G, PENNISI E, *et al.* Science, 2005, **309**: 72; GAMBHIR Y K, BHAGWAT A, GUPTA M. Ann Phys, 2005, **320**: 429; ARMBRUSTER P. Annu Rev Nucl Part Sci, 2000, **50**: 411; XU Hushan, ZHOU Xiaohong, XIAO Guoqing, *et al.* Nuclear Physics Review, 2003, **20** (2): 76. (in Chinese) (徐珊瑚, 周小红, 肖国青, 等. 原子核物理评论, 2003, **20** (2): 76.)
- [2] What do we know? [C]//Science's Special Section, Science, 2005, **309**: 78.
- [3] KERMAN A K, KOONON S E. Ann Phys, 1976, **100**: 332.
- [4] HILSCHER D, GONTCHAR I I, ROSSNER H. Phys At Nucl, 1994, **57**: 1187.
- [5] JIA Ying, BAO Jingdong. Phys Rev C, 2007, **75**: 034601.
- [6] YE Wei. Phys Rev C, 2010, **81**: 011603, 054609; *ibid.*, 2012, **85**: 011601.
- [7] HOFMANN H, SIEMENS P J. Nucl Phys A, 1976, **257**: 165; HOFMANN H. Phys Rep, 1997, **284**: 137; HOFMANN H. The Physics of Warm nuclei: with Analogies to Mesoscopic Systems[M]. Oxford, OUP, 2008.

- [8] NÖRENBERG W. Nucl Phys A, 1983, **409**: 191c.
- [9] BLOCKI J, BONEH Y, NIX J R, *et al.* Ann Phys, 1978, **113**: 330; FELDMER H. Rep Prog Phys, 1987, **50**: 915.
- [10] FRÖBRICH P, GONTCHAR I I, MAVLITOV N D. Nucl Phys A, 1993, **556**: 281; GONTCHAR I I, MAVLITOV N D, FRÖBRICH P. Comput Phys Commun, 1997, **107**: 223; FRÖBRICH P, GONTCHAR I I. Phys Rep, 1998, **292**: 131.
- [11] BLANN M. Phys Rev C, 1980, **21**: 1770; LYNN J E. Theory of Neutron Resonance Reactions[M]. Oxford: Clarendon, 1968.
- [12] MYERS W D, SWIATECKI W J. Nucl Phys, 1966, **81**: 1.
- [13] BRACK M, DAMGAARD J, JENSEN A S, *et al.* Rev Mod Phys, 1972, **44**: 320.
- [14] IGNATYUK A V, ITKIS M G, OKOLOVICH W N, *et al.* Sov J Nucl Phys, 1975, **21**: 612.
- [15] TÖKE J, SWIATECKI W J. Nucl Phys A, 1981, **372**: 141.
- [16] NEWTON J O, HINDE D J, CHARITY R J, *et al.* Nucl Phys A, 1988, **483**: 126.
- [17] HINDE D J, CHARITY R J, FOOTE G S, *et al.* Phys Rev Lett, 1984, **52**: 986; Nucl Phys A, 1986, **452**: 550.
- [18] MAO Yingchen, GU Baiping. J Phys G, 2006, **32**: 2109.
- [19] KRAMERS H A. Physica, 1940, **VII4**: 284; GRANGÉ P, PAULI H C, WEIDENMÜLLER H A. Phys Lett B, 1980, **88**: 9; GRANGÉ P, WEIDENMÜLLER H A. Phys Lett B, 1980, **96**: 26; GRANGÉ P, LI Junqing, WEIDENMÜLLER H A. Phys Rev C, 1983, **27**: 2063.
- [20] BAO Jingdong, JIA Ying. Phys Rev C, 2004, **69**: 027602; JIA Ying, BAO Jingdong. Nuclear Physics Review, 2004, **21** (4): 385. (in Chinese) (包景东, 贾莹. 原子核物理评论, 2004, **21** (4): 385.)

Investigating Deformation Dependence of Nuclear Dissipation Based on Pathwise Analysis Method

MAO Yingchen¹⁾, WAN Suyu, LIU Rui, DING Yang, ZHANG Minling, LÜ You, LIU Xin

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Within a certain deformation dependence of nuclear dissipation (DDND), the simulation results about the deexcitation process of ^{200}Pb show that the pre-scission neutron multiplicities decrease with increasing deformation dependence of level density parameter (DDLDP). Moreover, this pattern is determined by the emission of pre-scission neutron in the first period of nuclear fission. On the other hand, all of the results from two kinds of different DDNDs can reproduce the experiment data perfectly with a certain DDLDP. In order to illustrate those phenomena, the pathwise analysis method (PAM) is presented in this paper. In the PAM, nuclear dissipation is treated as the damping force on the elongation dimension, whereas the fission dynamics process results from the competition between damping force and the driving force stemming from the nuclear free energy. The pre-scission neutron multiplicity in the deexcitation process of ^{200}Pb is analyzed, and the results point out that the DDLDP needs to be taken into account in studying the DDND.

Key words: deformation dependence of nuclear dissipation; deformation dependence of level density parameter; pathwise analysis method; driving force

Received date: 30 Oct. 2012; Revised date: 20 Apr. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10975068); Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20102136110002)

1) E-mail: myc@lnnu.edu.cn

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