

文章编号: 1007-4627(2004)04-0407-05

裂变位垒参数的推荐和裂变位垒参数库*

苏宗添¹, 王书暖¹, 冯仁发¹, 周建明¹, 史淑梅¹, 王 斌¹, 朱耀银²,
李支文², 黄忠甫³, 刘建峰⁴, 戴能雄⁵, 王豫生⁵, 张本爱⁶

(1 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2 吉林大学物理系, 吉林 长春 130023;

3 广西大学物理系, 广西 南宁 530004;

4 郑州大学物理系, 河南 郑州 450004;

5 韶关学院, 广东 韶关 512003;

6 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 通过分析和计算铀系核裂变截面和全套中子反应截面获取了一组铀系核的裂变位垒参数. 在此基础上, 广泛收集实验裂变位垒参数, 通过比对和评价, 推荐了本组的 129 个核素(¹⁰⁹Cd—²⁵⁵Fm) 的实验裂变位垒参数. 此外, 对收集的不同裂变位垒参数作了分析与评价, 推荐了 7 组实验和 1 组模型计算的裂变位垒参数, 并组建了“中国评价核参数库裂变位垒参数子库(CENPL-FBPL)”.
关键词: 裂变; 裂变位垒参数; 参数库
中图分类号: O571.44 **文献标识码:** A

1 引言

裂变位垒参数(FBP)包括位垒高度 V 、曲率 $\hbar\omega$, 以及裂变鞍点形变、分立能谱和态密度等参数. 许多核素又含双峰裂变位垒——内垒和外垒的 FBP. FBP 对于理论研究和应用研究两者都是重要的. 它们表征了核的裂变不稳定性. 在核反应统计模型计算中是关键性的输入参数. 在星体核合成的 r 过程的研究中, 需要精确的原子质量和 FBP. 本工作基于对铀系核裂变截面和全套中子反应数据的分析、计算和系统学的研究, 以及对实验 FBP 的广泛收集、比对和评价, 推荐了一组从 ¹⁰⁹Cd 到 ²⁵⁵Fm 共计 129 个核素的 FBP, 其中包括某些缺中子核素及短寿命核素的 FBP. 在广泛收集各种裂变位垒参数的基础上, 推荐和组建了“中国评价核参数库裂变位垒参数子库(CENPL-FBPL)”. 目前, 它包括 7 组实验 FBP 和 1 组模型计算的 FBP. 前者是由符合测量的裂变截面或裂变几率等实验数据获取的, 后者是选用一定模型理论计算得到的 FBP, 它们各有特

点.

2 FBP 的推荐

本组推荐的 FBP 来自两方面: (1) 通过对铀系核的中子反应 ($E_n \leq 20$ MeV) 裂变截面 $\sigma_{n,F}$ 和全套中子反应数据的分析、计算和系统学研究获取的; (2) 对不同作者用不同方法获取的实验 FBP 进行比对和评价后推荐的. 前者, 应用的模型为^[1]: Hauser-Feshbach(HF) 理论 ($E_n \leq 5$ MeV) 或激子模型 ($E_n \geq 4$ MeV), 光学模型, 裂变道取双峰裂变位垒, 包括分离能谱^[2] 和增强的常温-费米气模型能级密度描述的裂变鞍点态密度. 因为

$$\sigma_{n,F} = \sigma_{n,f} + \sigma_{n,2nf} + \sigma_{n,3nf} + \dots,$$

所以, 对于中子在靶核 (Z, A) 上引起的裂变反应, 随着 E_n 的增加它实际上可能会包括复合核 ($Z, A+1$)、相应剩余核 (Z, A) 核、($Z, A-1$) 核和 ($Z, A-$

收稿日期: 2004-08-16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19445005); 中国工程物理研究院基金资助项目(97021); CODATA 中国委员会项目; 国际原子能机构研究资助项目(7431/RB)

作者简介: 苏宗添(1940-), 男(汉族), 天津人, 研究员, 从事低能核反应模型理论、模型参数及核数据库的研究;

E-mail: zdsu@iris.ciae.ac.cn

2)核等的裂变. 当用核反应统计理论符合、分析和计算它的呈阶梯形裂变截面的激发函数时, 上述系列同位素的 FBP 能够被抽取. 抽取的某一核的 FBP 又会在系列邻近同位素的 $\sigma_{n,F}$ 的分析和计算中被应用和受检验. 这一方法是以裂变截面的实验数据为依据的, 但在系列同位素的 $\sigma_{n,F}$ 的计算中, 可以弥补部分能区实验数据的不足. 对于实验数据空缺的核, 需对各种反应截面和模型计算中输入的模型参数(也包括 FBP)作系统学的研究和推荐^[3]. 经过对大量实验裂变截面的符合与分析, 同时也与其

它作者的 FBP 进行比对和分析, 推荐了本组铀系核的实验位垒高度 V_1 (内垒)和 V_2 (外垒). 在实际计算和比对中发现铀系核的位垒曲率 $\hbar\omega$ 有强的系统性: 对核的奇偶性有较强的依赖, 而在同类核中对质量数 A 不敏感. 依据我们的分析结果, 参照 Ohsawa^[4]推荐的其它组的结果, 分别就偶-偶核、奇-A 核和奇-奇核的内垒和外垒的位垒曲率 $\hbar\omega_1$ 和 $\hbar\omega_2$ 的系统学值作了推荐. 表 1 列出了本组、Ohsawa 及其它组的位垒曲率值.

本组其它的 FBP 来自不同作者, 采用不同方

表 1 铀系核裂变位垒曲率参数 $\hbar\omega_1$ 和 $\hbar\omega_2$ 的系统学值的推荐

	偶偶核		奇 A 核		奇奇核	
	内垒 $\hbar\omega_1$	外垒 $\hbar\omega_2$	内垒 $\hbar\omega_1$	外垒 $\hbar\omega_2$	内垒 $\hbar\omega_1$	外垒 $\hbar\omega_2$
本组	1.0	0.65	0.80	0.53	0.60	0.42
Ohsawa ^[4]	1.0	0.7	0.8	0.55	0.6	0.42
其它组	0.8—1.1	0.5—0.75	0.7—0.9	0.45—0.65	0.5—0.7	0.4—0.53

法获取的实验 FBP, 并通过比对和评价后推荐的. 这些实验 FBP, 除已包括在 FBPL 中的另外 6 组及相关文献中的实验 FBP 外, 还收集了其它文献中的 FBP, 也包括一些常作比对的理论分析的 FBP. 所有收集的 FBP 和相关的参考文献都收入在《FBP_recom.》文件中.

基于上述的工作, 核区为 ^{109}Cd — ^{255}Fm 的 129 个核素(其中 $Z < 90$ 的核素 45 个, $Z \geq 90$ 的核素 84 个)的一组实验 FBP 被推荐. 还需指出, 该组 FBP 中包括了由重离子反应测量的 16 个缺中子核素及短寿命核素(例如 ^{188}Pb 等)的位垒高度和曲率^[5], 而且位垒曲率与我们分析铀系核 $\sigma_{n,F}$ 得到的系统学值是一致的.

3 FBPL 的构建

为满足各方面研究的需要, 将我们收集及推荐的实验 FBP 和国际原子能机构(IAEA)为核模型计算推荐的 FBP, 经评价和推荐后组建成中国评价核参数库裂变位垒参数子库(CENPL-FBPL). 目前的 FBPL 共收集 7 组实验 FBP 和 1 组模型计算的 FBP. 除本组推荐的实验 FBP 外, 还包括另外 6 组, 并组建成《CENPL_FBP_EXP》数据文件. 模型计算的 FBP 是 IAEA 在 2002 年推荐的 Mamdouh

等^[6]的 FBP. 他们用推广的 Thomas-Fermi 及 Strutinsky 积分(ETFISI)方法计算了 2 301 个核素的位垒高度 V 和鞍点形变参数(sdp). 后者包括伸长参数 c (当 $c < 1$ 、等于 1 或 > 1 , 分别相应于扁椭球、球形或长椭球), 与核表面的“颈”有关的 h 参数及量度左右不对称的参数 α (对于对称形状 $\alpha = 0$). 编纂了有相同格式的数据文件《Mamdouh_FBP ETFISI》. 这两个数据文件连同《FBP_recom.》文件及说明文件《CENPL_FBP · README》组成 CENPL-FBPL. 各组 FBP 的基本推荐情况列在表 2 中, 这里不再赘述. 下面只是简单地比较它们的差异和指出应用时需注意之处.

首先, 表 2 中 7 组实验 FBP 大都是应用一定模型直接符合实验测量的裂变截面或裂变几率获取的. 其中, Maslov^[7], Lynn^[2] 和本组都是通过 HF 统计理论分析和计算裂变截面获取的, 但对粒子发射道和裂变道选用的能级密度公式不同. Maslov 选用推广超流模型, 而在低激发能采用常温模型, 并给出了鞍点形变对称性(SY). Lynn 和本组用常温-费米气模型能级密度, 但对裂变道作了修正. 这 3 组 FBP 都考虑了鞍点分离能谱, 这对于低能中子裂变反应截面的计算是重要的. 其它的实验 FBP 组是分别采用不同的模型分析得到的.

表 2 FBPL 中各组 FBP 的基本状况

作者组	年代	覆盖核区(核素数)		位垒参数	位垒参数获取方法	
		Z < 90	Z ≥ 90			
本组	2004	¹⁰⁹ Cd - ²³⁰ Ac (45)	²²⁰ Th - ²⁵⁵ Fm (84)	V, $\hbar\omega$ *	$\sigma_{n,F}$ HF 计算, 评价推荐	
实	Maslov		²³⁰ Th - ²⁴⁹ Cm (45)	V, $\hbar\omega, SY$	$\sigma_{n,F}$ HF 计算	
	Smirenkin	1993	²⁰⁰ Tl - ²²⁸ Ac (28)	²²⁷ Th - ²⁵³ Cf (71)	V	$\sigma_{n,F}$ 的分析, 评价推荐
验	Ohsawa	1988		²³² Pa - ²⁵³ Cf (24)	V, $\hbar\omega$ *	$\sigma_{n,F}$ 半经典分析
	Back	1974		²²⁹ Th - ²⁵³ Cf (46)	V, $\hbar\omega$	测量裂变几率和分析
类	Lynn	1974		²²⁹ Th - ²⁵⁵ Cf (50)	V, $\hbar\omega$	$\sigma_{n,F}$ 简化的 HF 计算
	Maslov-Smirenkin	2002	¹⁹⁶ Hg - ²²⁸ Ac (32)	²³⁰ Th - ²⁴⁹ Cm (45)	V	2 组 FBP 的组合
理论类	Mamdouh	1998	²²³ Pt - ²⁷³ Ac (533)	Z: 90-120 (1768)	V, sdp	ETFSI 方法

其次, Smirenkin^[8]及本组的部分 FBP 是在收集不同作者采用不同方法获取的实验 FBP, 并通过比对和评价后推荐的. 其中依据相同实验的部分, 推荐的 FBP 大致相近, 或参照新的数据本组作了修订. 本组较 Smirenkin 多 30 个核素的 FBP 是新收集、评价和推荐的实验 FBP. Maslov-Smirenkin 组的数据是 2002 年 IAEA 推荐的实验 FBP. 实际上该组数据是由 Smirenkin^[8]推荐的 28 个前锕系核单峰 FBP 和 Maslov^[7]推荐的 45 个锕系核的双峰 FBP, 以及 4 个 Hg 同位素的单峰 FBP 组成. 我们核对和订正后, 按本库的格式收入.

第三, 我们对 FBPL 中的各组参数作了初步比对: 从覆盖的核素而言, 在实验 FBP 组中, 本组推荐的核素最多, 而且还推荐了某些缺中子核素及短寿命核素的 FBP. 实验 FBP 与 Mamdouh 的模型计算比较, 前者仅分布在邻近稳定线的很窄区域. 例如 U 同位素, 实验 FBP 仅有 11 个 A=231-241 的同位素的数据; 而后者包括了 A=230-280 共 51 个同位素的数据. 对于 Pu 同位素, 前者仅有 12 个 A=235-246 的同位素的数据; 后者包括了 A=232-300 共 69 个核的数据. 从分布来看, Mamdouh 的数据更多的向丰中子核区延伸.

就其数据而言, 图 1 和图 2 分别给出了 U 和 Pu 同位素的各组位垒高度 V₁ (内垒) 和 V₂ (外垒) 的比较, 其中, Maslov-Smirenkin 与 Maslov 是同一数据, 故只取 1 组, 而 Mamdouh 的数据仅取了可比较的部分. 由于所依据的实验数据不相同, 获取 FBP 的模型各异, 所以各组推荐的 FBP 会有一些的差异. 各实验 FBP 的差别相对较小, 而与模型计算相比, 则有较大的分歧, 尤其是 V₂. 这可能来

自两方面的原因: 从模型计算来说, 外垒与较大变形有关, 有更多的因素影响位垒高度的计算. 对于实验 FBP, 符合的实验数据大多数对较低的位垒不

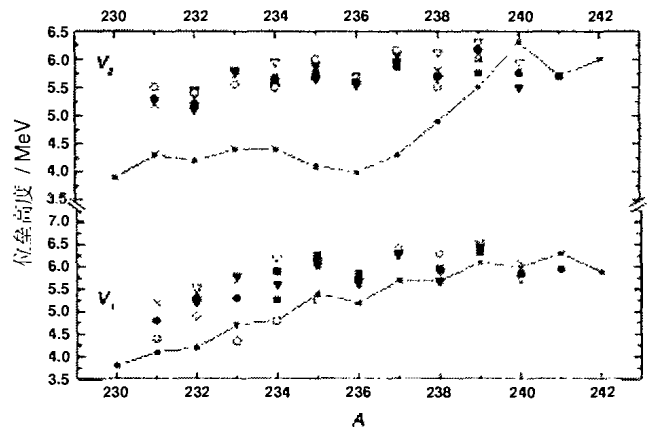


图 1 U 同位素各组裂变位垒高度的比较

● 本组, ○ Maslov, × Smirenkin, ■ Ohsawa, ▼ Lynn, ▽ Back et al., - * - Mamdouh.

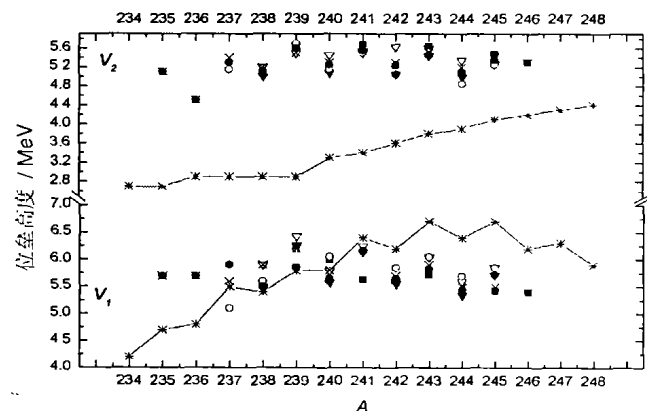


图 2 Pu 同位素各组裂变位垒高度的比较

● 本组, ○ Maslov, × Smirenkin, ■ Ohsawa, ▼ Lynn, ▽ Back et al., - * - Mamdouh.

敏感, 而 U 和 Pu 同位素的外垒通常为较低的位置. 此外, 从图上还可以看出位垒高度随质量数的变化有明显的奇偶性.

位垒曲率主要影响近阈能量区域的裂变反应截面的计算. 在 FBPL 的几组位垒参数中, Ohsawa^[4] 和本组推荐的位垒曲率是系统学值, 表 1 显示这两组位垒曲率几乎相同, 而与其它组的位垒曲率参数相比, 它们也是合理的. 此外, Smirenkin^[8] 和 Mamdouh^[6] 的数据中无位垒曲率.

4 结论

历经了近 30 年的数据积累, 10 余年几度数据文件的编纂和更新, 本组在 2004 年推荐出更新的 CENPL-FBPL. 它增补了本组最新推荐的、覆盖较广的核素和有一定特点的实验 FBP, 也收入了 IAEA 在 2002 年新推荐的两组 FBP, 其中模型计算的 FBP 能覆盖相当广的核素, 并能延伸至高度“丰”中子的丰中子核区. 目前的 FBPL 包括了由 7 组实验 FBP 组成的《CENPL_FBP_EXP》文件, 模型计算 FBP 的《Mamdouh_FBP_ETFSI》文件,

《FBP_recom.》文件及说明文件《CENPL_FBP_README》. 由于文章篇幅所限, 不能公布上述数据, 但可通过 E-mail 索取. 组建的 FBPL 包括了在不同时期的作者采用不同方法获取的特点不同的 FBP, 以满足多方面研究的需要. 建库的目的是为了实现数据资源共享, 期盼本库和推荐的数据能被广泛应用, 并在应用中受检验.

最后尚需指出:

Back 等^[9] 通过测量和分析由直接反应引起的裂变反应的裂变几率分布得到 46 个锕系核双峰 FBP. 他们的工作^[9, 10] 积累了较完整的锕系核裂变位垒实验结果, 在《FBP_recom.》文件中汇集了有关实验 FBP 及相关的文献.

FBP 是模型相关的. 因为裂变位垒的引入其本身就属一种模型描述, FBP 是位垒模型参数化的表述. 通过符合测量的裂变截面或裂变几率抽取的 FBP 不仅直接与实验测量数据有关, 也依赖于选用的模型.

应用核反应统计模型计算裂变截面时应特别注意, 位垒参数与鞍点态密度之间有很强的依赖性.

参 考 文 献:

- [1] Su Zongdi, Zhang Jingshang, Shi Xiangjun, *et al.* Chinese Journal of Nuclear Physics, 1979, 1(1): 81(in Chinese).
- [2] Lynn J E. Systematics for Neutron Reactions of the Actinide Nuclei, AERE-R7468, Oxford, AERE Harwell, 1974, 1-97.
- [3] Su Zong-di, Shi Xiangjun. Sci and Tec of Atomic Energy, 1983, 5(4): 549(in Chinese).
- [4] Ohsawa T. Theoretical Methods for the Calculations of fast Neutron Fission Cross Section, In Schmidt J J. Proc of an Advisory Group Meeting, Vienna, IAEA-NDS, 1988, 134-147.
- [5] Wang Shunuan. Commu of Nucl Data Progress, 2001, 26: 15.
- [6] Mamdouh A, Pearson J M, Rayet M, *et al.* Nucl Phys, 1998, A644: 389; Mamdouh A, Pearson J M, Rayet M, *et al.* Nucl Phys, 2001, A679: 337.
- [7] Maslov V M. Fission Level Densities, In: Oblozinsky P, ed. Handbook for Calculations of Nuclear Reaction Data. Vienna, IAEA-NDS, 1998, 81-89.
- [8] Smirenkin G N. Preparation of Evaluated Data for Fission Barrier Parameter Library for Isotopes with $Z=82-98$, IAEA Report; INDC (CCP)-359, Vienna, IAEA-NDS, 1993. 1-31.
- [9] Back B B, Hansen O, Britt H C, *et al.* Phys Rev, 1974, C9: 1924; Back B B, Britt H C, Hansen O, *et al.* 1974, C10: 1948.
- [10] Britt H C. Physics and Chemistry of Fission(Proc Simp, Jülich, 1979), IAEA, Vienna 1980, 1: 3.

Recommendation of Fission Barrier Parameters and Fission Barrier Parameter Library*

SU Zong-di¹, WANG Shu-nuan¹, FENG Ren-fa¹, ZHOU Jian-ming¹, SHI Shu-mei¹, WANG Bin¹, ZHU Yao-yin²,
LI Zhi-wen², HUANG Zhong-fu³, LIU Jian-feng⁴, DAI Neng-xiong⁵,
WANG Yu-sheng⁵, ZHANG Ben-ai⁶

(1 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2 *Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China;*

3 *Department of Physics, Guangxi University, Nanning 530004, China;*

4 *Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450004, China;*

5 *Department of Physics, Shaoguan University, Shaoguan 512003, Guangdong, China;*

6 *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

Abstract: The fission barrier parameters for actinide nuclei were obtained by analysis and calculations of fission cross-sections and complete neutron reaction cross sections. A lot of experimental fission barrier parameters from different authors were collected. A set of fission barrier parameters for 129 nuclei ranging from ¹⁰⁹Cd to ²⁵⁵Fm were recommended after performing comparisons, evaluations and systematics extrapolations for these extracted fission barrier parameters in model calculations of fission cross-sections and collected fission data. In additions, a fission barrier parameter library, Chinese Evaluated Nuclear Parameter Library-Fission Barrier Parameter Library(CENPL-FBPL), was constructed, which consists of seven sets of experimental fission barrier parameters and a set of ones from model calculations.

Key words: fission; fission barrier parameter; parameter library

(上接第 386 页)

Mean Last Passage Time and Nuclear Fission Rate**

JIA Ying, BAO Jing-dong

(*Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The mean last passage time is introduced to instead of the mean first passage time for studying the decay of an induced-fissioning system. The stationary fission rate determined by the inverse of mean last passage time across the saddle point is agreement with the resulting rate of Langevin simulation and better than that of mean first passage time arriving at the scission point.

Key words: thermal nuclear fission; Langevin simulation; mean last passage time

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (19445005); Foundation of China Academy of Engineering Physics (97021); Chinese National Committee for CODATA; Research Item of the IAEA(7431/RB)

** **Foundation item:** National Natural Foundation of China (10075007, 10235020); Project of Trans-century Training Program Foundation for the Talents, Ministry of Education of China