

# 断前粒子发射的同位素效应\*

叶巍

(东南大学物理系 南京 210096)

**摘要** 用推广的裂变扩散模型研究了  $^{28}\text{Si} + ^{164,167,170}\text{Er} \rightarrow ^{192,195,198}\text{Pb}$  反应中测量的断前中子、质子和  $\alpha$  粒子多重性的激发函数. 发现扩散模型能很好地拟合这些轻粒子多重性随裂变系统激发能和 Pb 同位素的变化趋势. 表明断前粒子发射存在一个同位素效应. 进而在一个考虑了裂变过程中摩擦效应的统计模型的框架内, 在 In 和 Er 这两个元素的同位素链中, 考察了同位素效应与裂变碎片质量不对称性和裂变系统尺度的关系. 计算结果表明: 同位素效应的存在不依赖于裂变系统的大小和不对称性. 此外, 当裂变系统具有高的中质比时, 轻带电粒子发射将不再敏感于裂变延迟时间的长短, 而中子发射则非常敏感. 这个结果暗示对那些特别丰中子的裂变系统, 轻带电粒子(质子和  $\alpha$  粒子)的多重性对于研究热核裂变过程中的摩擦强度不是一个好的探针.

**关键词** 同位素效应 断前粒子多重性 裂变扩散模型 丰中子裂变系统 探针

## 1 引言

自从在  $^{158}\text{Er}$  核的断前中子发射的激发函数中发现实验中测量的中子多重性高于标准统计模型的预计以来<sup>[1]</sup>, 实验方面人们对各种重裂变系统进行了测量, 使用的探针主要是中子、轻带电粒子和  $\gamma$  射线多重性<sup>[2-4]</sup>. 理论上认为标准统计模型在解释断前粒子增强发射现象上的失败是因为它没有考虑裂变过程中从复合核态到鞍点态以及随后到断点态的耗散, 因此必须用考虑了该耗散的统计模型或者直接用扩散模型来解释这个现象. 最早是 Kramers<sup>[5]</sup> 在 Fokker-Planck 方程的框架内将核的裂变视作布朗粒子通过一个位垒的扩散过程, 引进粘滞系数作为参数, 它把裂变自由度与热浴相耦合. 由于粘滞性的影响, 需要一段暂态时间, 裂变系统才能建立起稳定的通过裂变位垒的几率流, 这导致了裂变宽度要小于统计模型的估计值, 同时系统也需要时间从鞍点演化到断点, 这些都增加了断前粒子发射的几率. 虽然扩散模型能系统地解释各种系统裂变前粒子增强发射的现象, 但是用该模型来解释粒子发射随裂变系统同位素的变化却很少<sup>[6]</sup>. Eremin<sup>[7]</sup> 等曾用 Lange-

vin 方程对一个相当重的裂变系统 Cf 在对称裂变的情况下进行了理论研究, 发现裂变前的轻粒子发射对这个重的裂变系统的同位素有一定的依赖性, 但缺乏与对应实验结果的比较. 本文将对该同位素效应进行详细地研究. 首先用 Smoluchowski 方程研究实验中测量的  $^{192,195,198}\text{Pb}$  核在裂变前蒸发的轻粒子多重性随轰击能和 Pb 同位素的变化. 然后用一个考虑了裂变过程中摩擦效应的统计模型来研究该效应同裂变系统的尺度以及裂变不对称性的关系.

## 2 模型计算和讨论

### 2.1 Smoluchowski 方程的计算

裂变扩散过程可以用 Fokker-Planck, Langevin 或 Smoluchowski 方程来描述. 在一般情况下, Fokker-Planck 和 Langevin 方程的解析求解很困难. 在大摩擦条件下, Fokker-Planck 方程可以简化为 Smoluchowski 方程, 后者可以用 van Kampen<sup>[8]</sup> 技术解析求解. 本文中用到的同时考虑了中子、质子和  $\alpha$  粒子发射的 Smoluchowski 方程如下<sup>[9]</sup>:

2002-03-20 收稿

\* 东南大学基金(9207021099)资助

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \theta \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial x} P(x,t) + \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right) - \sum_{i=n,p,\alpha} \lambda_i P(x,t) \right] \quad (1)$$

这里  $P(x,t)$  代表系统在形变坐标  $x$  和时刻  $t$  时的几率.  $U = V/T$ , 其中  $T$  是系统的温度,  $V$  是系统的势函数.  $\theta = T/(\mu\beta)$ ,  $\mu$  是系统的约化质量,  $\beta$  是摩擦系数. (1) 式右边第二项是轻粒子的发射,  $\lambda_i = \Gamma_i/\hbar$ , 其中  $\Gamma_i$  ( $i = n, p, \alpha$ ) 是轻粒子的发射宽度, 用细致平衡原理的方法来计算<sup>[10]</sup>. 时间相关的裂变宽度定义为

$$\Gamma_i(t) = \hbar \lambda_i(t) = \hbar J(t)/\pi \rho_i(t) \quad (2)$$

其中  $J(t)$  是通过鞍点的几率流,  $\rho_i(t)$  是系统在鞍点左边的几率.

在 10MeV 左右的重离子反应中, 复合系统有较高的激发能, 裂变和轻粒子发射相竞争, 在它放出了轻粒子以后生成的子核仍有足够的能量通过发射轻粒子退激, 最后以裂变结束. 通过这种方式形成一个衰变链, 这个衰变链可以用一套耦合方程来描述.

$$\frac{d}{dt} P_s(t) = \sum_{i=n,p,\alpha} \lambda_{i,s-1} P_{s-1} - \left[ \sum_{i=n,p,\alpha} \lambda_{i,s} + \lambda_{f,s}(t) \right] P_s(t) \quad (3)$$

这里  $P_s$  是第  $s$  代某个子核的存在几率. 方程右边第一项是源项, 表示它通过第  $(s-1)$  代某个子核发射粒子而产生. 第二项是第  $s$  代某个子核通过裂变及发射粒子的衰变率.  $t=0$  时, 只有母核存在, 其存在几率为 1, 其他子核的存在几率为 0.

对  $^{28}\text{Si} + ^{164,167,170}\text{Er} \rightarrow ^{192,195,198}\text{Pb}$  反应<sup>[11]</sup> 中测量的断前中子、质子和  $\alpha$  粒子多重性进行了计算. 在计算中, 平均裂变角动量取为  $55\hbar$ , 这个值是该反应最大熔合角动量的  $2/3$ <sup>[12]</sup>, 粘滞系数取为  $5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ , 激发能由反应的轰击能及其  $Q$  值确定, 能级密度参数取为  $A/8$ , 这里  $A$  是裂变核的质量数. 裂变位垒用转动有限力程模型<sup>[13]</sup> 来计算, 轻粒子的结合能用液滴模型<sup>[14]</sup> 的值. 角动量对衰变系统裂变位垒的影响用程序 barfit<sup>[13]</sup> 来计算, 计算中考虑了粒子发射的影响. 粒子发射不但通过转动能的形式带走了一部分激发能, 而且改变了子核的角动量. 作为一个初步的近似, 假定一个中子或质子带走  $1\hbar$  的角动量, 而  $\alpha$  粒子则带走  $2\hbar$  的角动量. 计算结果见表 1. 从表中可以看出, 中子多重性的计算值比实验值小, 而质子和  $\alpha$  粒子多重性则比实验值要高. 计算结果再现了实验中测量的裂变前质子和  $\alpha$  粒子的多重性随轰击能和裂变系统尺度的变化趋势. 正如所预期

表 1 测量的  $^{28}\text{Si} + ^{164,167,170}\text{Er} \rightarrow ^{192,195,198}\text{Pb}$  反应裂变前发射的轻粒子多重性以及理论计算值

轰击能/MeV	$M_n$		$M_p$		$M_\alpha$		
	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.	
155.5	$^{192}\text{Pb}$	—	0.550	0.035	0.505	0.020	0.200
	$^{195}\text{Pb}$	—	1.003	0.015	0.033	0.015	0.166
	$^{198}\text{Pb}$	—	1.899	0.008	0.030	0.007	0.018
162.5	$^{192}\text{Pb}$	—	0.722	0.045	0.081	0.035	0.034
	$^{195}\text{Pb}$	—	1.278	0.023	0.057	0.025	0.031
	$^{198}\text{Pb}$	$3 \pm 0.3$	2.500	0.015	0.048	0.015	0.030
170.0	$^{192}\text{Pb}$	—	0.906	0.068	0.119	0.045	0.052
	$^{195}\text{Pb}$	—	1.518	0.038	0.083	0.037	0.046
	$^{198}\text{Pb}$	—	2.725	—	0.067	—	0.044
177.5	$^{192}\text{Pb}$	—	1.130	0.071	0.173	0.060	0.079
	$^{195}\text{Pb}$	—	1.787	0.050	0.121	0.053	0.067
	$^{198}\text{Pb}$	—	2.926	0.035	0.093	0.045	0.062
185.0	$^{192}\text{Pb}$	—	1.323	0.107	0.225	0.074	0.106
	$^{195}\text{Pb}$	—	1.994	—	0.158	—	0.089
	$^{198}\text{Pb}$	—	3.054	0.045	0.118	0.050	0.079

注: 符号 ‘—’ 表示无该实验数据. 除了中子外, 因质子和  $\alpha$  粒子测量值的误差不大, 因此在表中没有表示出来.

的, 入射能量的增加会增加粒子的发射, 这是因为在高激发能的情况下, 轻粒子能更有效的与裂变进行竞争的缘故. 图 1(a) 展示的 Pb 裂变系统的首次裂变几率随轰击能的增加而降低就说明了这一点. 另外, 从表 1 中还可以看出, 对于相同的人射能量, 随着同位素质量的增加,  $^{198}\text{Pb}$  核发射的中子要显然的多于  $^{195}\text{Pb}$  核, 而后者比  $^{192}\text{Pb}$  核蒸发的要多. 但是对质子和  $\alpha$  粒子的发射, 情形与中子发射随 Pb 同位素的变化正好相反, 而且变化趋势不受系统激发能的影响. 由于形成核  $^{192}\text{Pb}$ ,  $^{195}\text{Pb}$  和  $^{198}\text{Pb}$  反应的人射粒

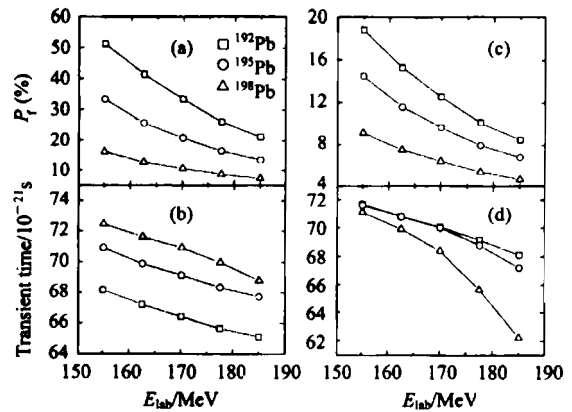


图 1  $^{192,195,198}\text{Pb}$  核的首次裂变几率  $P_f$  和暂态时间  $t_w$  在 (a, b) 角动量  $L = 55\hbar$  和 (c, d) 固定 Pb 同位素的裂变位垒  $V_f = 4\text{MeV}$  两种情况下随轰击能的变化

子和入射能量都相同,因此相应的激发能也会随着同位素质量的增加而增加,但系统的平均裂变角动量却几乎没有变化.高激发能有利于粒子发射,因此有利于 $^{198}\text{Pb}$ 核蒸发更多的轻带电粒子.因此实验中观察到的随Pb同位素质量的增加,发射质子和 $\alpha$ 粒子的能力却降低的现象表明一定存在其他制约轻粒子发射的因素.可能的因素是随着Pb核尺度的增加,中子的结合能降低,而质子和 $\alpha$ 粒子的结合能则增加.对 $^{198}\text{Pb}$ 核而言,这个变化有利于中子的蒸发,但不利于轻带电粒子的发射.因此对这里讨论的Pb同位素,轻粒子结合能因同位素产生的变化所带来的影响超过了系统激发能的变化所带来的影响.从表1中可以看出,扩散模型的计算能很好地解释实验中发现的断前粒子发射的同位素效应.虽然中子和轻带电粒子随Pb同位素的变化有相反的趋势,但是总体来说重一些的系统发射轻粒子的能力要强于轻一些的系统.图1(a)中展示的Pb核的首次裂变几率随着裂变系统同位素的增加而降低就说明了这一点.这是因为核的首次裂变几率与中、质子和 $\alpha$ 粒子都有关的缘故.

我们还研究了 $^{192}\text{Pb}$ 、 $^{195}\text{Pb}$ 和 $^{198}\text{Pb}$ 核的首次裂变几率和暂态时间随同位素的变化.通过比较图1(a)和(c),可以看出Pb系统的首次裂变几率随同位素的变化趋势没有因裂变位垒随同位素发生变化而改变.但是暂态时间的变化趋势却产生了变化.即在对Pb同位素取相同的裂变位垒的情况下,Pb系统的暂态时间将随着同位素质量的增加而变短,而且这个差异会随着系统激发能的增加而增加,见图1(b).但是如果在计算中考虑裂变位垒的同位素效应后,在 $L = 55\hbar$ 时, $^{192}\text{Pb}$ 、 $^{195}\text{Pb}$ 和 $^{198}\text{Pb}$ 核的裂变位垒依次增加约0.6MeV.位垒的增加会延长暂态时间,见图1(d).这与图1(b)中展示的情形正好相反.这说明对不同的Pb系统,其暂态时间的变化趋势正是因同位素效应引起的.这里的计算表明,在处理断前粒子发射时同位素效应必须被包括.

最后需要指出的是,上面的扩散模型计算虽然能符合实验中测量的Pb系统发射的轻粒子多重性随同位素和轰击能的变化趋势,但是定量的结果仍不太理想.这个事实可能意味着对热转动核裂变过程中发射的轻粒子需要进行一些更加细致的处理,即详细地考察粒子在整个裂变途径上的发射,正如文献[15]中所建议的.

## 2.2 统计模型的计算

由于目前的研究系统是对重的裂变系统,因此

有必要考察断前粒子发射的同位素效应与裂变系统尺度的关系.此外,当前的扩散模型并没有考虑裂变的质量不对称自由度,因此它们的结果也局限于对称裂变的情形,这要求我们必须研究同位素效应与裂变碎片质量不对称性的关系.进而,轻带电粒子(质子和 $\alpha$ 粒子)曾被用来研究重的 $^{111,114}$ 热核裂变中耗散的强度.同重系统相比较,在中重和轻的裂变系统中,轻带电粒子发射是一个比较重要的衰变道,因此除中子和 $\gamma$ 射线外,它们也被广泛地用来研究该质量区域的摩擦强度 $^{16}$ .由于同位素效应可能会对各种轻粒子作为裂变中耗散强度的探针的敏感性产生影响,再加上目前对各种轻粒子作为探针的适用范围的研究还比较少以及考虑到当前实验上涉及的某一元素的同位素的个数不多,不便于此类问题的研究.因此有必要采用理论的方法通过系统地考察断前粒子发射随同位素的变化来研究轻带电粒子多重性作为热核裂变过程中摩擦强度探针的有效范围.

因为包括质量不对称自由度的扩散模型目前仍没有被发展起来,因此在本文中我们使用一个包括裂变过程中耗散效应的统计模型 $^{17}$ 来研究前面提出的问题.由于摩擦的影响,裂变系统需要一段暂态时间才能达到它的准稳态值.这段时间的长短与摩擦的大小有很大的关系,因此它可以作为核摩擦强度的一个指示.在当前的统计模型中我们用一个阶跃函数来模拟核摩擦的影响.即在一段时间内,即裂变延迟时间内,裂变的几率是0,之后它的值就取标准统计模型的值.

在下面的计算中,对轻系统,选择元素In的一个同位素链(从 $^{99}\text{In}$ 到 $^{131}\text{In}$ )作为考察对象.对中重的系统,则选择元素Er的一个同位素链(从 $^{145}\text{Er}$ 到 $^{173}\text{Er}$ ).对这两个同位素链,计算中要用到的主要参数见表2.需要说明的是,在当前的计算条件下,对于被考察的In和Er这两个同位素链上的每一个核,它们的阈温度 $T_{\text{thresh}}$ 与温度相关的裂变位垒 $E_{\text{bar}}(T)$ 的比值大于0.26.这意味着按照耗散裂变的系统学 $^{18}$ ,对于同位素链上的每一个核,当它们裂变时,都会存在裂变延迟.

表2 计算中用到的一些参数

元素	反应系统	$E^*/\text{MeV}$	$L_{\text{bar}}/\hbar$	$a$	$a_s/a_f$
In	Kr + Al	200	80	A/10	1.0
Er	O + Nd	160	80	A/10	1.0

注:表中给出了裂变系统的激发能( $E^*$ )、最大熔合角动量( $L_{\text{bar}}$ )、能级密度参数( $a$ )以及它在平衡基态与鞍点处的比值( $a_s/a_f$ ).

本文在分别取裂变延迟时间为 0, 5 zs ( $1 \text{ zs} = 1 \times 10^{-21} \text{ s}$ ) 和 20zs 的情况下对上面的这两个同位素链发射的轻粒子多重性进行了计算. 由于篇幅的限制, 这里我们只报道计算的结果. 计算发现当考虑了裂变延迟时间后, 粒子发射随同位素的变化速度要快于没有裂变延迟的情况. 这表明同位素效应在轻和中重的裂变系统中也存在, 从而表明它是一个普遍的效应. 我们发现即使对于非对称裂变的情形, 同位素效应也仍然存在. 对这里讨论的质量区域, 虽然随着裂变系统尺度的增加, 裂变位垒会升高. 对元素 In 和 Er 每增加两个中子, 系统的裂变位垒大约分别升高 0.6MeV 和 0.4MeV. 由于裂变位垒的增加会有利于所有轻粒子的发射, 这里面当然也包括质子和  $\alpha$  粒子. 因此这个因素不能解释中子和轻带电粒子发射为何随同位素呈相反的变化趋势. 真正的原因是当裂变系统拥有更大的中质比时, 中子的结合能会减小, 而轻带电粒子的则会增加. 对 In 同位素, 大约是每增加 2 个中子, 中子结合能降低 0.5MeV, 质子和  $\alpha$  粒子分别升高 0.8MeV 和 0.6MeV. Er 同位素的情况类似于 In, 差异只是在粒子结合能变化的大小上. 总之, 结合能上的变化会有利于中子, 不利于质子和  $\alpha$  粒子的发射. 上面对 In 的这些结论也可以从图 2 中看出来.

因为粒子多重性在有无裂变延迟情况下的差值是量度热核裂变中摩擦强度的一个好的量, 因此对 In 同位素, 我们在图 2 中展示了这个差值随同位素的变化. 从图中可以看出, 裂变系统随着同位素的增加, 断前中子发射增强, 而且裂变延迟的时间越长, 增强的就越厉害. 这意味着对于丰中子的裂变系统, 中子多重性非常敏感于裂变延迟时间的长度, 因此它是研究裂变过程中摩擦强度的一个好的工具. 然而质子和  $\alpha$  粒子的发射则减少, 特别是到当裂变系统中的中质比增加到一定的程度以后, 用不同裂变延迟时间计算出的质子和  $\alpha$  粒子多重性几乎一样. 对 In 发射质子和  $\alpha$  粒子的情况, 这个值分别是 113 和 115. 对 Er 该值是 163 和 165. 因此对这两个同位素链的考察同时表明对那些特别丰中子的裂变系统, 轻带电粒子的发射不敏感于裂变延迟的时间尺度, 也就是说, 它们对于研究那些中质比较大裂变系统过程中的摩擦强度不再是一个好的探

针. 换句话说, 对于那些缺中子的系统, 它们则是一个好的工具.

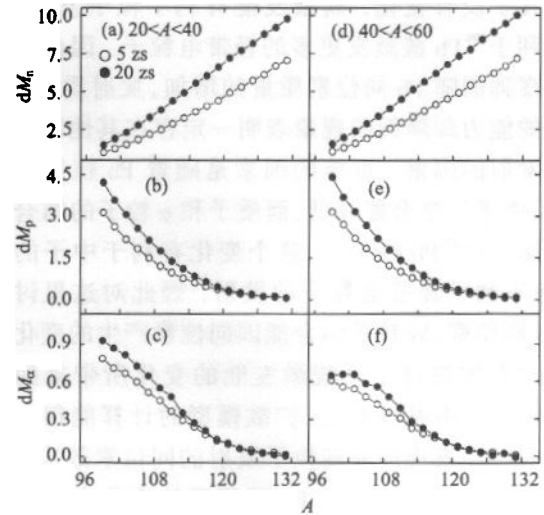


图 2 对 In 同位素在两种不同的裂变情况下  $20 < A < 40$  (左边) 和  $40 < A < 60$  (右边), 在有无裂变延迟时, 断前中子(a,b)、质子(b,e)和  $\alpha$  粒子(c,f)多重性的差值随同位素的变化

### 3 总结

总之, 我们首先用裂变扩散模型研究了  $^{28}\text{Si} + ^{164, 167, 170}\text{Er} \rightarrow ^{192, 195, 198}\text{Pb}$  反应中测量的断前中子、质子和  $\alpha$  粒子发射随轰击能和 Pb 同位素的变化. 发现扩散模型能很好地解释实验观测, 即随着 Pb 同位素质量的增加, 断前质子和  $\alpha$  粒子发射会减少, 从而表明断前粒子发射存在一个同位素效应. 进而在一个包括裂变过程中摩擦效应的统计模型的框架内, 对 In 和 Er 这两个同位素链系统考察了同位素效应对裂变系统尺度和裂变碎片质量不对称性的依赖关系. 计算结果表明: 同位素效应不依赖于裂变系统的大小, 从而表明它是一个普遍的效应; 在非对称裂变的情况下, 该效应也存在; 当裂变系统具有高的中质比时, 轻带电粒子发射不再敏感于裂变延迟时间的长短, 而中子发射则非常敏感. 这个结果暗示对那些特别丰中子的裂变系统, 轻带电粒子(质子和  $\alpha$  粒子)的多重性对于研究热核裂变过程中的摩擦强度不是一个好的探针.

## 参考文献 (References)

- 1 Gavron A et al. Phys. Rev., 1987, **C35**:579—590
- 2 Hinde D J et al. Phys. Rev. 1992, **C45**:1229—1259
- 3 Paul P, Thoennessen M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, **44**: 65—108
- 4 Lestone J P. Phys. Rev. Lett. 1991, **67**:1078—1081
- 5 Kramers H A. Physica, 1940, **7**:284
- 6 Frobrich P, Gontchar II. Phys. Rep: 1998, **292**:131—237
- 7 Eremin N V. Phys. Lett., 1995, **B353**:432—437
- 8 Kampen N G. J. Stat. Phys., 1977, **17**:71
- 9 LU Z D et al. Z. Phys., 1986, **A323**:477—484; Phys. Rev., 1990, **C42**:707—710; YE W et al. Z. Phys., 1997, **A359**:385—389
- 10 Delagrange H et al. Z. Phys., 1990, **A323**:437—449
- 11 Lestone J P. Nucl. Phys., 1993, **A559**:277—316
- 12 Bass R. Nucl. Phys., 1974, **A231**:45—63
- 13 Sierk A. Phys. Rev., 1986, **C33**:2039—2051
- 14 Myers W D, Swiatecki W J. Nucl. Phys., 1966, **A81**:1—23
- 15 Pomorski K et al. Nucl. Phys., 1996, **A605**:87—119; Nucl. Phys., 2000, **A679**:25—53
- 16 Fiored L et al. Nucl. Phys., 1997, **A620**:71—80; Nakagawa T et al., Nucl. Phys., 1995, **A583**:149—152; Brown C M et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:064612 - 1 - 064612 - 16; Phys. Rev., 2000, **C61**:054611 - 1 - 11; Kaplan M et al. Nucl. Phys., 2001, **A686**:109—128
- 17 Charity R J. Nucl. Phys., 1988, **A483**:371—405
- 18 Thoennessen M, Bertsch G F. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:4303—4306

## Isotopic Effects in Precission Particle Emission

YE Wei

(Department of Physics, Southeast of University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Excitation functions of neutron, proton and  $\alpha$ -particle emission prior to scission measured in the reactions  $^{28}\text{Si} + ^{164,167,170}\text{Er} \rightarrow ^{192,195,198}\text{Pb}$  are studied using an extensive fission diffusion model and it is found that the model can well describe the trend of particle multiplicities of Pb isotopes measured experimentally as a function of the bombarding energy, which indicates the existence of isotope effects in precission particle emission. Moreover, the dependencies of isotope effect on asymmetric fission and fissioning system size are also studied within the framework of a statistical model modified to include the effects of dissipation in fission by systematically investigating precission particle evaporation of a light In isotope chain and a medium heavy Er isotope chain. Calculations show that in these regions the isotope effect exists, meaning that the isotope effect of precission particle emission is a general effect. Furthermore this effect appears also in the case of asymmetric fission and it will be enhanced with increasing fission delay time. A new finding is that as the neutron-to-proton ratio of fissioning nuclei increases to a certain extent the precission proton and  $\alpha$ -particle emissions are no longer sensitive to the fission delay time scales. This means that for those neutron-rich fissioning systems proton and  $\alpha$ -particle multiplicities will not be good probes for the study of nuclear friction in the fission of hot nuclei.

**Key words** isotope effect, precission particle multiplicity, fissioning diffusion model, neutron-rich fissioning system, probe