

# 一种测量缓发中子有效份额 $\beta_{\text{eff}}$ 的方法

朱庆福, 史永谦, 罗皇达, 张巍, 刘宏伟, 攸国顺, 周琦, 陈桂美

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

**摘要:** 本工作通过实验与理论计算相结合, 给出了测定缓发中子有效份额  $\beta_{\text{eff}}$  的新方法。用实验方法确定反应堆临界状态, 并测量次临界状态时以  $\beta_{\text{eff}}$  为单位的次临界反应性, 应用理论程序计算临界时的中子有效增殖因数  $k_{\text{eff}}$ , 确定  $k_{\text{eff}}$  的计算偏差, 然后理论计算次临界状态下的  $k_{\text{eff}}$ , 并用确定  $k_{\text{eff}}$  的计算偏差对次临界状态下计算的  $k_{\text{eff}}$  进行修正, 给出次临界状态的反应性。将实验测量结果与理论计算结果相比较, 从而给出  $\beta_{\text{eff}}$ 。这种方法由于是实验确定的反应堆状态, 因此, 按实验结果计算的  $k_{\text{eff}}$  与理论描述反应堆状态的计算模型关系不大。分析表明,  $\beta_{\text{eff}}$  测量结果的精度高于以往测量方法的精度。

**关键词:** 缓发中子有效份额  $\beta_{\text{eff}}$ ; 以  $\beta_{\text{eff}}$  为单位的次临界反应性; 绝对反应性

中图分类号: TL326

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)06-0650-04

## A Measurement Method for Effective Delayed Neutron Fraction

ZHU Qing-fu, SHI Yong-qian, LUO Huang-da, ZHANG Wei,

LIU Hong-wei, YOU Guo-shun, ZHOU Qi, CHEN Gui-mei

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-45, Beijing 102413, China)

**Abstract:** A method was presented for measurement of effective delayed neutron fraction  $\beta_{\text{eff}}$  by coupling experiment with theoretical calculation. In the experiment the reactor critical status was defined, and the subcritical reactivity under subcritical status, by using  $\beta_{\text{eff}}$  as unit, was measured. With theoretical calculations, effective multiplication factor  $k_{\text{eff}}$  under critical status was calculated, and the deviation of the calculated results was evaluated. Then,  $k_{\text{eff}}$  under subcritical status was calculated and also revised with the deviation as same to critical status. So the reactivity under subcritical status was evaluated. Comparing the experimental result with the calculated result,  $\beta_{\text{eff}}$  was defined. Since the reactor status was defined by experiments, the calculated  $k_{\text{eff}}$  under the status was little dependent on the theoretical models which described the reactor status. The results show that the accuracy of the measured  $\beta_{\text{eff}}$  is higher than previous measurements.

**Key words:** effective delayed neutron fraction  $\beta_{\text{eff}}$ ; subcritical reactivity in  $\beta_{\text{eff}}$ ; absolute reactivity

缓发中子引起裂变的平均数与瞬发中子和缓发中子引起裂变的总平均数之比为缓发中子有效份额  $\beta_{\text{eff}}$ 。 $\beta_{\text{eff}}$  是反应堆中子学动态参数之一。在反应堆物理分析中,为了将缓发中子在对裂变反应数的贡献上等价为瞬发中子,需用  $\beta_{\text{eff}}$  代替实际的缓发中子份额  $\beta$ 。 $\beta_{\text{eff}}$  与  $\beta$  不一致,出现这种差别的原因是:1) 由于可裂变同位素在裂变时发射出不同数目的缓发中子;2) 由于所有缓发中子发射时的能量均低于瞬发中子发射时的能量(以  $^{235}\text{U}$  为例,各缓发中子组的平均能量为 250~670 keV,瞬发中子平均能量约为 2 MeV)。这样,对于可裂变同位素在裂变时发射出不同数目的缓发中子则需进行某种平均,不同能量的中子对链式反应的实际贡献也不同。缓发中子产生的快裂变的几率小,且它的泄漏几率也小,这样,它们对链式反应的影响与平均的瞬发中子不同,因此, $\beta_{\text{eff}}$  是反映缓发中子和瞬发中子差别的物理参数。

20 世纪 70、80 年代,反应堆物理学对  $\beta_{\text{eff}}$  给予了很大重视,主要是因为,在快堆中,测得的反应堆中心的反应性一直偏大<sup>[1]</sup>。不同作者认为,偏大的原因极有可能是  $\beta_{\text{eff}}$  的误差所致,因此, $\beta_{\text{eff}}$  通常由计算给出。近年来,多采用 Keepin 给出的缓发中子产额数据<sup>[1]</sup>。对  $\beta_{\text{eff}}$  经大量研究和验证,认为 Keepin 的数据可能太小,特别是  $^{238}\text{U}$  的缓发中子数据。但 Keepin 相对组的缓发中子产额和半衰期还是可接受的。值得关注的是,不同作者的实验产额数据差别可达 10% 或更大。目前,尚无法准确给定反应堆究竟采用何种  $\beta_{\text{eff}}$ ,为此, $\beta_{\text{eff}}$  的测量引起了极大重视,同时也提出了不少测量方法,如均匀中毒法、非均匀中毒法、局部中毒法、替换法、统计权重法、铀源价值分布法<sup>[2-3]</sup>、统计法<sup>[4]</sup> 等。其中,中毒法、局部中毒法、替换法、统计权重法均属于动态实验与静态实验(理论计算)相结合的方法,其它方法是用动态实验得到与  $\beta_{\text{eff}}$  相关的参数,再测量包含  $\beta_{\text{eff}}$  参数在内的其它参数而得到  $\beta_{\text{eff}}$ 。

在上述方法中,除统计法外,均采用动态实验与静态理论计算相结合的技术。实验时要进行内容繁多的相关参数测量,而静态理论计算又存在计算方法和模型带来的不确定性。统计方法虽不依靠理论计算,但在测量反应堆裂变

率时涉及许多参数,这些参数的不确定性也会给  $\beta_{\text{eff}}$  带来较大误差。因此,以上方法确定的  $\beta_{\text{eff}}$  的误差大都在 5% 左右。

本文提出一种实验与理论相结合的方法,回避了理论计算不准确为  $\beta_{\text{eff}}$  带来的误差。

## 1 原理

根据实验测量次临界反应堆得到的瞬发中子衰减常数  $\alpha$ ,即可得到以  $\beta_{\text{eff}}$  为单位的该次临界反应堆的反应性  $\rho$ :

$$-\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} = \frac{\alpha_c - \alpha}{\alpha_c} \quad (1)$$

其中: $\alpha_c$  为反应堆缓发临界时的瞬发中子衰减常数。

反应堆在不同次临界状态时的  $\alpha_i$  与探测器的平均中子计数率  $\bar{N}_i$  的关系为:

$$\alpha_i = \alpha_c + \frac{A}{\bar{N}_i} \quad (2)$$

式中: $A$  为常数, $s^{-2}$ 。

对实验方法测量出的  $\alpha_i$  和对应的  $\bar{N}_i$ ,由最小二乘法拟合即可得到  $\alpha_c$ ,再由式(1)得到以  $\beta_{\text{eff}}$  为单位的次临界反应性。

如由理论计算出  $\alpha_i$  对应的次临界反应堆中子有效增殖因数  $k_{\text{eff},i}$ ,则由式(1), $\beta_{\text{eff}}$  为:

$$\beta_{\text{eff}} = -\frac{\rho_i}{\alpha_c - \alpha_i} = \frac{k_{\text{eff},i} - 1}{k_{\text{eff},i}} \frac{\alpha_c - \alpha_i}{\alpha_c} \quad (3)$$

该方法表面看依赖于理论计算  $k_{\text{eff},i}$  的准确度,但由下面的分析可知,这种依赖是可忽略的。最初的临界状态由实验精确确定,临界状态的  $k_{\text{eff},i}$  计算值应为 1。如果该  $k_{\text{eff},i}$  不为 1,则存在一偏差  $\Delta$ ,且该偏差是由计算方法、模型、核数据等引进,即为  $k_{\text{eff},i} \pm \Delta$ 。因此,在式(3)中,计算次临界度为  $i$  时的  $k_{\text{eff},i}$  同样存在  $\Delta$ 。由于  $\Delta$  可由计算实验确定的临界状态的值严格给出,因此,可消除理论计算次临界状态下的  $k_{\text{eff},i}$  的偏差。

从式(3)还可看出, $\alpha_i$  不同,对应次临界反应堆的  $k_{\text{eff},i}$  也不同,但  $\beta_{\text{eff}}$  相同。同样,也可由不同的次临界度得到几个本应相等的  $\beta_{\text{eff}}$ ,但由于次临界测量误差的存在,可得到一平均的  $\beta_{\text{eff}}$  和误差。

## 2 实验测量及数据处理

实验测量在铀溶液临界装置上进行<sup>[5-6]</sup>。实验测量时,铀溶液临界装置的<sup>235</sup>U溶液浓度为68 g/L,装置活性区外有水反射层。活性区内加入不同量的铀溶液,可达到临界和不同的次临界状态<sup>[7]</sup>。具体实施步骤如下。

1) 在不同的次临界液位下测量 $\alpha_i$ 。

实验用 Rossi- $\alpha$  方法测量 $\alpha_i$ ,表1列出不同溶液液位时测量的 $\alpha_i$ 和对应的中子计数率 $N$ 。

表1 溶液液位与对应测量的 $\alpha_i$ 和中子计数率  
Table 1  $\alpha_i$  and neutron count rate with different solution heights

溶液液位/mm	$N/s^{-1}$	$\alpha_i/s^{-1}$
219.78	466.62	429.99
216.25	284.47	554.55
212.82	199.68	685.98
209.34	151.52	847.06
205.78	119.45	1 006.96

2) 由表1中数据并利用式(2)得到 $\alpha_c$ 为 $227.5 s^{-1}$ 。图1为临界及不同次临界状态的 $\alpha_i$ 。

3) 由 $\alpha_i$ 与铀溶液临界装置溶液液位的关系可确定 $\alpha_c$ 对应的溶液液位为224.31 mm,即临界液位。

4) 确定理论计算的偏差 $\Delta_c$ 。

临界时的 $k_{eff}$ 应等于1,但由于存在误差,实际计算的 $k_{eff}=1\pm\Delta_c$ ,则 $\Delta_c$ 为:

$$\Delta_c = 1 \pm k_{eff}$$

利用程序计算临界液位为224.31 mm时的 $k_{eff}=0.992\ 238$ ,则可确定 $\Delta_c=1-0.992\ 238=0.007\ 762$ 。

5) 理论计算反应性和测量给出的以 $\beta_{eff}$ 为单位的反应性。

表2列出反应性计算值和对应的 $\beta_{eff}$ 。

对表2列出的 $\beta_{eff}$ 取平均,则 $\beta_{eff}$ 的平均值为 $0.007\ 686\ 8\pm 0.000\ 417\ 2$ 。

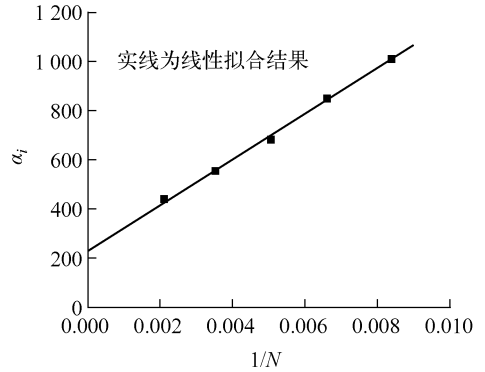


图1 临界及不同次临界状态的瞬发中子衰减常数 $\alpha_i$   
Fig.1  $\alpha_i$  with different critical and sub-critical states

## 3 讨论

本工作得到的 $\beta_{eff}$ 平均值的误差约为5%,主要是由 Rossi- $\alpha$  法测量 $\alpha_i$ 的误差所致。如果对每次临界状态增加重复测量次数或延长测量时间,即可减小 Rossi- $\alpha$  法的测量误差。一般情况下, $\alpha_i$ 的测量误差约为2%~3%,而理论计算经过修正后的 $k_{eff}$ 误差小于0.01%。在本实验中,临界液位为224.31 mm时,理论计算的 $k_{eff}$ 为0.992 238, $\Delta_c=0.007\ 762$ , $k_{eff}$ 修正后的误差小于0.01%。因此,在精确测量 $\alpha_i$ 后, $\beta_{eff,i}$ 平均值的误差应为3%~4%。这样的误差对于以前的测量方法而言,测量精度已提高了很多,对于 $\beta_{eff}$ 已足矣。

表2 溶液液位与对应的反应性和 $\beta_{eff}$

Table 2 Reactivity and  $\beta_{eff}$  with different solution heights

溶液液位/mm	$k_{eff}+0.007\ 762^{1)}$	反应性		$\beta_{eff}$
		以 $\beta_{eff}$ 为单位	理论计算	
219.78	0.993 817	0.006 221 46	0.890 066	0.006 989 89
216.25	0.988 857	0.011 268 6	1.437 58	0.007 838 56
212.82	0.984 863	0.015 369 7	2.015 29	0.007 626 55
209.34	0.978 754	0.217 072	2.723 34	0.007 970 79
205.78	0.973 295	0.274 377	3.426 20	0.008 008 21

注:1) 理论计算

另外,该方法测量的  $\alpha_i$  是在反应堆的次临界度小于  $5\beta_{\text{eff}}$  时测量的,不存在空间效应,从而提高了  $\beta_{\text{eff}}$  测量精度。

值得指出的是,应用 MCNP 程序计算  $k_{\text{eff}}$  时,不论计算多少粒子还是多少代,得到的计算结果总有起伏,这归因于 MCNP 程序本身。MCNP 程序输入相同的数据, $k_{\text{eff}}$  结果的统计不确定度在万分之几到千分之几,而  $\beta_{\text{eff}}$  也在这个范围,因此,无法用 MCNP 程序确定  $k_{\text{eff}}$  的偏差。后来改用确定论程序计算  $k_{\text{eff}}$ ,输入相同的数据, $k_{\text{eff}}$  结果的不确定性由收敛判据给出,其计算不确定度可为万分之一。而计算结果的偏差主要由计算方法、模型、核数据决定,在临界状态附近,对于简单的堆芯布置(如在临界状态附近,只用液位改变次临界度),计算不同次临界度的  $k_{\text{eff},i}$  的偏差是一致的。

#### 参考文献:

[1] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 北京:北京大学出版社,2007:28-30.

[2] 史永谦. 铜中子源价值分布方法测量缓发中子有效份额  $\beta_{\text{eff}}$  [R]. 北京:中国原子能科学研究院,1999.

[3] FISCHER E A. Integral measurements of the effective delayed neutron fractions in the fast critical assembly[J]. Nuclear Science and Engineer-

ing, 1997, 62: 105-116.

- [4] 钱纪生,陈志模,谭日林. 用零概率法-固体径迹法测定  $\beta_{\text{eff}}$  和  $l$  [J]. 核技术,1982,5(1):53-54.  
QIAN Jisheng, CHEN Zhimo, TAN Rilun. Determination of  $\beta_{\text{eff}}$  and  $l$  using zero probability method with solid state track detectors[J]. Nuclear Techniques, 1982, 5(1): 53-54 (in Chinese).
- [5] 史永谦,林生活,姚世贵,等. 铀溶液核临界实验装置[J]. 核动力工程,2002,23(3):72-76.  
SHI Yongqian, LIN Shenghuo, YAO Shigui, et al. Nuclear criticality safety experimental facility for nitride uranium solution[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(3): 72-76 (in Chinese).
- [6] ZHU Qingfu, SHI Yongqian, WANG Jinrong. Critical experiment study on uranyl nitrate solution experiment facility[C] // The 13th International Conference on Nuclear Engineering. Beijing: Atomic Energy Press, 2005.
- [7] 朱庆福,史永谦,沈雷生,等. 铀溶液核临界安全实验装置首次物理启动[J]. 原子能科学技术, 2005,39(4):293-295.  
ZHU Qingfu, SHI Yongqian, SHEN Leisheng, et al. First start-up of nuclear criticality safety experiment facility for uranyl nitrate solution[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(4): 293-295 (in Chinese).