

核临界安全中的源倍增法研究

朱庆福, 史永谦, 胡定胜

(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: 文章对核临界安全研究中通常采用的现场测量技术——源倍增法进行研究。从有源扩散理论出发, 导出了与 k_{eff} 不同的有源次临界中子有效增殖因子 k_s 的表达式, 并在次临界系统上进行了验证研究。验证实验研究证实了所导出的 k_s 的正确性。源倍增法测量的参数实际上是次临界系统在外源作用下的有源次临界中子有效增殖因子 k_s , 而不是以往的中子有效增殖因子 k_{eff} , 这就解决了长期困扰人们的有关源倍增法测量的参数问题。文章讨论了 k_s 与 k_{eff} 间的差别和关系以及它们对核临界安全的影响。

关键词: 核临界安全; 源倍增法; 有源次临界中子有效增殖因子 k_s ; 中子有效增殖因子 k_{eff}

中图分类号: TL364 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)02-0097-04

Research on Neutron Source Multiplication Method in Nuclear Critical Safety

ZHU Qing-fu, SHI Yong-qian, HU Ding-sheng

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

Abstract: The paper concerns in the neutron source multiplication method research in nuclear critical safety. Based on the neutron diffusion equation with external neutron source the effective sub-critical multiplication factor k_s is deduced, and k_s is different to the effective neutron multiplication factor k_{eff} in the case of sub-critical system with external neutron source. The verification experiment on the sub-critical system indicates that the parameter measured with neutron source multiplication method is k_s , and k_s is related to the external neutron source position in sub-critical system and external neutron source spectrum. The relation between k_s and k_{eff} and the effect of them on nuclear critical safety is discussed in the paper.

Key words: nuclear critical safety; neutron source multiplication method; effective sub-critical neutron multiplication factor k_s with an external neutron source; effective neutron multiplication factor k_{eff}

源倍增法是就地测量技术通常采用的方法, 次临界源倍增实验以判断核临界系统的临

界参数或测量次临界系统的次临界度为目的。在国家标准 GB 15146. 7-94《反应堆外易裂变材

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-09-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (TG1999022602)

作者简介: 朱庆福(1973—), 男, 河北献县人, 助理研究员, 反应堆物理专业

料的核临界安全次临界中子增殖就地测量安全规定》中,次临界源倍增实验作为就地测量的基本测量验证方法。欲在次临界实验系统中维持稳定的中子注量率分布,系统中必须有一恒定的外中子源。次临界源倍增实验的基本物理思想是:在一系列逐步变化的次临界系统中,在一定强度的外中子源作用下,系统的中子注量率水平随逐步变化的次临界度而变化,它反映了系统反应性或中子增殖因子的变化。当系统负反应性趋于零时,系统的中子注量率水平则趋于无穷大,这意味着系统达到临界,相应于系统的有效中子增殖因子 $k_{\text{eff}} = 1$ 。根据这一思想,人们试图用源倍增法来测量系统的 k_{eff} 或负反应性,并经某些近似导出系统的中子计数 N 与 k_{eff} 的关系^[1] $N = \frac{SL}{1 - k_{\text{eff}}}$ 以及中子增殖倍数 M_{OBS} 与 k_{eff} 的关系^[2] $M_{\text{OBS}} = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 - k_{\text{eff}}}$ 。

1985年,在美国新墨西哥召开的次临界反应性测量国际讨论会上,E. D. Clayton^[3]发现,有源次临界热中子装置的 M_{OBS} 测量值比用 $M_{\text{OBS}} = 1/(1 - k_{\text{eff}})$ 计算的大, k_{eff} 由计算给出,²⁵²Cf中子源位于装置中心。这意味着,通过测出的 M_{OBS} 算得的 k_{eff} 值比计算给出的 k_{eff} 值大。当时的解释是,²⁵²Cf中子源位于装置中心,中心处的中子通量密度高,使得中子泄漏较小。会议就此展开了讨论并产生了争议。1998年,我们在核燃料储存临界安全实验研究^[4]中也发现,用中子源倍增法测量的 k_{eff} 与理论计算值差别较大。当时认为,实验值偏大的原因是外中子源的中子经慢化后对核燃料引起的一次裂变增加了中子的有效倍增。2001年出版的《核临界安全》一书^[2]中也提到,即使经过种种努力,次临界实验中所测得的系统的中子增殖倍数与系统负反应性的关系仍很复杂,其中仍含有或多或少的难以相当准确了解的因素。

本文从有源输运方程出发,结合源倍增法的定义,研究源倍增法测量参数有源次临界增殖因子 k_s 的表达式,以及它与参数 k_{eff} 间的关系。在有源次临界实验装置上研究 k_s 与外源强度、位置和能谱间的关系,讨论 k_s 和 k_{eff} 对临界安全的影响。

1 源倍增理论^[7-9]

对于一个有外中子源的由易裂变核及其它材料组成的核系统,稳态时系统内的中子通量密度 (r, E, Ω) (或功率)分布由中子输运方程决定,用矩阵形式可表示为:

$$M \phi = F \phi + S \quad (1)$$

其中: M 为输运算符(包括泄漏和吸收); F 为增殖算子; S 为外中子源, $S = S_0(r, E, \Omega)$, 其中, S_0 为源强(s^{-1}), (r, E, Ω) 是外源的空间、能谱分布,满足归一化条件, $\iiint r, E, \Omega) d r d E d \Omega = 1$ 。

为与无外源的输运方程相区别,式(1)中的中子通量密度用 ϕ 表示,为有源中子输运方程中的中子通量密度。

为表示该系统的增殖特性,引入有源次临界中子有效增殖因子 k_s , 定义为:

$$k_s = \frac{F \phi}{F \phi + S} \quad (2)$$

k_s 表示裂变中子与总中子(裂变中子和外源中子)之比。由此可得:

$$\frac{1}{k_s} = 1 + \frac{S}{F \phi} = 1 + \frac{S_0}{W} \quad (3)$$

式中:“ \int ”表示对所有变量(空间、能量和角度)的积分; W 为单位时间内有源次临界系统内发生的裂变次数; S_0 为每次裂变产生的平均中子数。

一个次临界系统相对于“替换系统”的中子增殖倍数定义^[2]为:

$$M_{\text{OBS}} = \frac{N}{N_0} \quad (4)$$

式中: N 为在外中子源作用下次临界增殖系统中中子通量密度分布稳定后中子探测器测得的次临界系统的计数率,它包括裂变中子和外源中子的贡献; N_0 为无增殖核材料的“替换系统”在外中子源作用下测得的替换系统稳定后的计数率,它仅是外源中子的贡献,即:

$$N_0 = S$$

或

$$N_0 = A S = A S_0 \quad (5)$$

式中: A 是常数,与探测器效率、位置等有关。

$N = (F \phi + S)$, 若测量 N 和测量 N_0 使用同一台探测器,且测量条件相同时,则有:

$$N = A (F \phi + S) =$$

$$A F_1 + A S = A F_1 + N_0 \quad (6)$$

$$A F_1 = N - N_0 \quad (7)$$

从式(2)参数 k_s 的定义,有:

$$k_s = \frac{F_1}{F_1 + S} = \frac{N - N_0}{N} = 1 - \frac{N_0}{N} \quad (8)$$

这时,由式(4)定义的中子增殖倍数 M_{OBS} 为:

$$M_{OBS} = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 - k_s} \quad (9)$$

式(8)是用源倍增法测量有源次临界增殖因子 k_s 的计算公式。 k_s 与表征系统中的材料性质、数量和分布等参数相关的中子有效增殖因子 k_{eff} 间的关系可从稳态无外中子源时系统的中子输运方程和共扼方程导出,有:

$$\phi^* = \frac{s^*}{f^*} = \frac{1 - \frac{1}{k_{eff}}}{1 - \frac{1}{k_s}} \quad (10)$$

式中: $\phi^* = \frac{s^*}{f^*}$ 为外源中子价值,它表示 1 个外源中子相当于 ϕ^* 个裂变中子。

2 有源次临界系统上的验证研究

核临界安全的就地测量技术——源倍增法的研究在铀溶液临界装置上进行。由于源倍增法测量 k_s 时需要一个合适的替代有核燃料的

系统,铀溶液临界装置^[6]是一最佳选择。铀溶液临界装置的核燃料是硝酸铀酰溶液,它可用水作为替代;中子源放在硝酸铀酰溶液内有困难,中子源只能放在系统外,然后可借助慢化剂来改变中子能谱。在这个次临界系统上,用源倍增法测量了 k_s ,并利用由反应性-周期性测量的有效中子增殖因子 $k_{eff,exp}$ 以式(10)计算外源中子价值。表 1 列出了中子源在铀溶液次临界系统外用源倍增法测量的 k_s 和用反应性-周期法测量的 $k_{eff,exp}$,以及用式(10)计算的 ϕ^* 。

3 讨论

由表 1 可看出,用源倍增法测量的是有源次临界中子有效增殖因子 k_s ,而不是中子有效增殖因子 k_{eff} 。正如理论预言的那样, k_s 与外中子源的位置和能谱有关。 k_s 和 k_{eff} 之间的关系由外源中子价值 ϕ^* 来关联。若只考虑外中子源位置,外中子源处于次临界系统之外,宏观上外源中子的价值则小于裂变中子价值,即 $\phi^* < 1$,从表 1 可看出, $k_s < k_{eff}$;外中子源处于次临界系统之内,外源中子价值大于裂变中子价值,即 $\phi^* > 1$,在表 1 中为 $k_s > k_{eff}$ 。这一结果解答了 1985 年关于 k_{eff} 的争议和 1998 年核燃料储存实验中测量值偏大的问题。就外源的中子能谱

表 1 中子源位于铀溶液次临界系统外的测量结果

Table 1 Experimental results outsidess of uranium system with external neutron source

堆芯状况	液位高度/mm	k_s	$k_{eff,exp}$	1)	ϕ^*	$k_{eff,cal}^2)$
77.11 g/L ²³⁵ U 溶液,有水反射层	118.75	0.513 6	0.831 8	0.318 2	0.214	0.728 0
	143.50	0.671 1	0.885 5	0.214 4	0.264	0.836 7
	161.89	0.815 3	0.925 4	0.110 1	0.356	0.903 7
	174.26	0.893 5	0.952 2	0.058 7	0.421	0.939 9
	182.57	0.939 8	0.970 3	0.030 5	0.478	0.963 3
	188.27	0.968 9	0.982 7	0.013 8	0.550	0.979 5
	192.15	0.987 0	0.991 1	0.004 1	0.685	0.988 7
63.74 g/L ²³⁵ U 溶液,无水反射层	193.64	0.993 8	0.994 3	0.000 5	0.922	0.991 8
	191.53	0.462 0	0.897 2	0.435 2	0.098	0.865 9
	223.93	0.706 8	0.950 3	0.243 5	0.126	0.942 1
	233.65	0.795 3	0.966 3	0.171 0	0.136	0.964 7
	241.89	0.876 4	0.979 8	0.103 4	0.146	0.979 8
	247.49	0.931 7	0.989 0	0.057 3	0.152	0.989 0
	251.49	0.972 2	0.995 5	0.023 3	0.157	0.995 9

注:1) $= k_{eff,exp} - k_s$

2) MCNP 程序理论计算值

而言,中子源位于次临界系统之外、且系统有反射层时,外源中子经反射层慢化进入系统的作用比无慢化进入系统其对裂变材料的作用大,即有水反射层时的外源中子价值大于无水反射层时的中子价值,所以,表1中有水反射层时的 ϕ^* 大于无水反射层的 ϕ^* 。 k_s 与 k_{eff} 之差随系统的次临界度而变化,次临界度越深,差别越大,当系统接近临界时,外源中子对实验系统的影响将变得较小, k_s 与 k_{eff} 趋于一致。

当系统处于深次临界时,表1列出的 k_{eff} 的误差相当大。因为在超临界下测量的单位溶液高度的反应性只适用于临界附近,在深次临界时,单位溶液高度的反应性值较大,用超临界下测量的单位溶液高度的反应性值计算深次临界的 k_{eff} 显然是偏大的,但可从表中数据看出它的趋向。 k_s 与 k_{eff} 的这种差别由式(3)予以反映:实验系统次临界度越深,系统在单位时间内产生的中子数 W 越少,而中子源 S_0 总是不变的(反映在 N_0 上略有变化),式中的第2项则会相应增大,导致外中子源对系统的影响增大,因而测量到的 k_s 值就会相应减小。

通过以上分析可知,在核临界安全分析评价中,按照国家标准应用现场测量(就地检验)技术源倍增法测得的 k_s 来判断安全时,要注意中子源的位置。如果中子源位于核燃料之内,测量出的 $k_s > k_{\text{eff}}$,以 k_s 来衡量安全性是保守的;如果中子源位于核燃料之外,测量出的 $k_s < k_{\text{eff}}$,以它来衡量安全性是不保守的。

参考文献:

- [1] 罗璋琳,罗安仁. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社,2001. 10~13.
Luo Zhang-lin, Luo An-ren. Experimental Physics of Reactor[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001. 10~13.
- [2] 阮可强. 核临界安全[M]. 北京:原子能出版社,2001. 35~70.
Ruan Ke-qiang. Nuclear Critical Safety[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001. 35~70.
- [3] Clayton ED. Neutron Source Multiplication Method[A]. Proceedings of Workshop on Subcritical Reactivity Measurements [C]. New Mexico, USA: Oka Ridge National Laboratory 1985. 3~37, 26~29.
- [4] 史永谦,林生活,赵品台,等. 核燃料储存临界安全实验研究[J]. 核科学与工程,1998,(2):180~184.
Shi Yong-qian, Lin Sheng-huo, Zhao Pin-tai, et al. Critical Safety Research of Nuclear Fuel Storage[J]. Nuclear Science and Engineering, 1998, (2):180~184.
- [5] 史永谦,朱庆福,胡定胜,等. 核临界安全测量技术——源倍增方法的某些问题[J]. 核动力工程,2004,25(2):101~105.
Shi Yong-qian, Zhu Qing-Fu, Hu Ding-sheng, et al. Some Problems of Neutron Multiplication Method for Site Measurement Technology in Nuclear Critical Safety[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(2):101~105.
- [6] 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 Yong-qian, Lin Sheng-huo, Yao Shi-gui, et al. Nuclear Critical Safety Experimental Facility for Nitride Uranium Solution[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(3):72~76.
- [7] 史永谦,夏普,李义国,等. 加速器驱动洁净核能系统物理及技术基础研究成果选编[C]. 北京:中国核工业音像出版社,2002. 83.
Shi Yong-qian, Xia Pu, Li Yi-guo, et al. Selected Works of Basic Research on the Physics and Technology of Accelerator Driven Clean Nuclear Power System [C]. Beijing: China Nuclear Industry Audio and Visual Publishing House, 2002. 83.
- [8] 朱庆福,史永谦,李义国,等. 跳源法在ADS中子学研究中的应用[J]. 原子能科学技术,2003,37(3):246~250.
Zhu Qing-fu, Shi Yong-qian, Li Yi-guo, et al. Source-jerk Method for Application on ADS Neutronics Study [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(3):246~250.
- [9] 夏普,史永谦,李义国,等. 外推-周期法测量ADS模拟装置的次临界度[J]. 原子能科学技术,2003,37(4):294~297.
Xia Pu, Shi Yong-qian, Li Yi-guo, et al. Subcriticality Measurement With Extrapolation-period Method on ADS Model Facility [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(4):294~297.