

跳源法在 ADS 中子学研究中的应用

朱庆福, 史永谦, 李义国, 夏 普, 郑伍钦, 朱国盛

(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: 简要介绍了跳源法在 ADS 中子学研究中测量次临界度的原理、外源驱动的次临界中子学的实验装置、堆芯布置及中子源驱动系统。主要研究了²⁵²Cf 中子源在堆芯不同轴向位置、模拟质子束管和散裂中子靶件处不同缓冲区材料对 k_{eff} 的影响。实验结果与其它实验方法的结果进行了比较, 符合较好。

关键词: 跳源法; ADS; 有效增殖系数; ²⁵²Cf 中子源

中图分类号: TL375.51; TL411.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)03-0246-04

Source-jerk Method for Application on ADS Neutronics Study

ZHU Qing-fu, SHI Yong-qian, LI Yi-guo,

XIA Pu, ZHENG Wu-qing, ZHU Guo-sheng

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

Abstract: The paper is concerned in the source-jerk method used to measure the sub-criticality, and the sub-critical experiment facility, which is used for the study on the neutronics of ADS, driven by external neutron source ²⁵²Cf. The effects of the location of neutron source and material buffer where is at the location of the pipe of proton beam and target of fission-product dispersion on the sub-criticality of reactor are studied by source-jerk method.

Key words: source-jerk method; ADS; effective multiplication factor; ²⁵²Cf neutron source

ADS (accelerator driven sub-critical system), 即加速器驱动次临界系统是嬗变放射性核废物、有效利用核资源及产出核能的新一代核能系统^[1~4], 我国已将其列入国家重点基础研究规划项目。该系统包括中能强流质子加速器、外源中子产生器和次临界反应堆。根据项目要求, 在目前现有条件下, 需建立一次临界装置, 在该装置上研究次临界中子学问题。

在外源驱动的次临界装置内, 质子束管和散裂中子靶件的引入不仅使堆芯结构变得复

杂, 而且导致在质子束管和散裂中子靶件处形成很大的中子注量率峰, 次临界装置由此获得高功率密度, 在外中子源驱动下维持链式反应。

装置的功率水平与源的特性(源的能谱和位置)和次临界水平(即 $1 - k_{\text{eff}}$) 有关。当中子有效增殖系数 k_{eff} 为 0.98 时, 在维持相同的输出功率水平下, k_{eff} 变化 1%, 加速器束流强度的变化则为 50%^[5]。由于装置缓冲区是慢化散裂中子及与堆芯耦合的部件, 缓冲区材料影响

收稿日期: 2002-09-10; 修回日期: 2002-12-07

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(G19990226)

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

装置的 k_{eff} , 因此, 用跳源法准确测量 k_{eff} 是 ADS 的次临界装置的重要研究课题之一。

本工作将简要介绍跳源法的原理、外源驱动的次临界实验装置、堆芯布置及中子源驱动系统。主要研究中子源在堆芯不同轴向位置、模拟质子束管和散裂中子靶件处的不同缓冲区材料对 k_{eff} 的影响。

1 实验原理^[6,7]

跳源法是测量次临界装置中子有效增殖系数 k_{eff} 的一经典方法。它基本上不需要附加其它实验设备, 能测量大反应性而又不存在安全问题, 且实验周期较短。从点堆动力学模型出发, 动态方程具有如下形式:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i - \lambda_i N \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

式中: N 为堆中子数; λ 为反应性; C_i 为第 i 组缓发中子先驱核数; λ_i 为缓发中子的总份额; λ_i 为第 i 组缓发中子的份额; λ_i 为第 i 组缓发中子衰变常量, s^{-1} ; λ 为代时间, s 。

由式(1)和(2)推导整理可得:

$$\frac{1}{N_0} \frac{dN}{dt} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{N_0} \int_0^t N(t) dt \quad (3)$$

式中: $\lambda_i = \frac{\lambda_i}{\beta_i}$; λ_{eff} 为缓发中子有效份额 ($= \sum_{i=1}^6 \beta_i \lambda_i$); β_i 为第 i 组缓发中子的有效份额; N_0 为中子探测器的平均计数率。

根据式(3), 只要测出中子源在次临界装置内稳定足够长时间后中子探测器的平均计数率 N_0 与跳源后积分中子计数 $\int_0^t N(t) dt$, 即可求出次临界装置的反应性 (λ_{eff} 为单位)。若次临界装置的 λ_{eff} 已知, 则可从测得的反应性求出 ADS 次临界装置的 k_{eff} 值。

2 ADS 模拟实验装置^[8]

ADS 实验装置主要包括次临界堆芯、控制

系统及稳态外中子源系统 3 个部分。图 1 为其方块图。

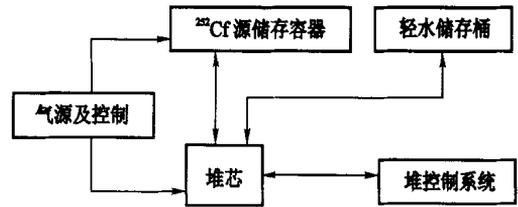


图 1 ADS 模拟实验装置方块图

Fig. 1 Sketch of experiment facility for ADS

次临界堆芯包括堆芯容器、核燃料、堆芯结构材料、慢化剂和反射层。图 2 为堆芯照片。

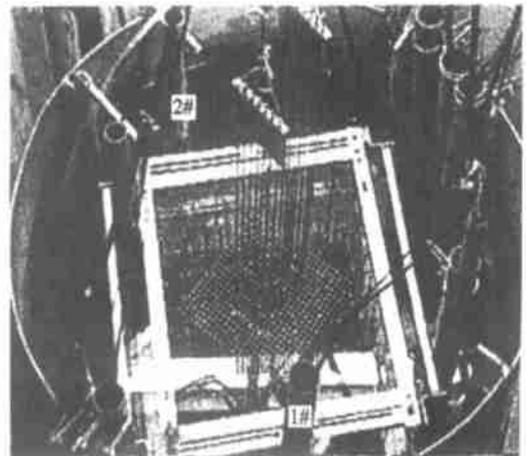


图 2 堆芯照片

Fig. 2 A photo of reactor core

次临界堆芯的慢化剂和反射层均为轻水, 活性区周围的水反射层均大于 150 mm, 可认为是无限厚反射层。堆芯的氢原子核数 N_H 与 ^{235}U 原子核数 N_5 之比 $N_H/N_5 = 270$ 。在活性区周围水反射层外布置了用于实验装置启动和实验装置参数测量的氦-3 计数管以及用于实验装置功率监督和测量的 补偿电离室。使用的燃料元件总长 455 mm, 包壳为直径 6 mm、壁厚 1 mm 的铝管, 铝管内充填富集度为 20% 的 U_3O_8 粉末 22.5 g, 燃料元件活性长为 400 mm。在堆芯结构的框架内可装 90 个元件盒, 排列成 9×10 的长方形。实验时, 燃料元件可排成方形或准圆形。

从堆芯中央抽出 4 根燃料元件放入不同的缓冲区模拟质子束管与次临界装置的耦合部

件。缓冲区材料分别是水、铅和不锈钢。缓冲区的尺寸均为 $\phi 25 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$ 。

3 ^{252}Cf 中子源驱动系统^[9]

^{252}Cf 中子源外形尺寸为 $\phi 2.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 约为 50 g, 源强约为 $2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。实验时, 由中子源驱动系统(俗称“跑兔”系统)将 ^{252}Cf 中子源从源储存容器引入次临界装置内, 将源从储存容器内驱动入堆芯的驱动时间小于 0.2 s; 从次临界堆芯引出中子源的时间小于 0.1 s。

4 实验结果与讨论

表 1 列出了探测器在次临界装置内不同位置处的测量结果。如图 2 所示, 1 # 探测器布放在堆芯的西北方, 2 # 探测器在堆芯的正南方,

中子源位于堆芯中心。 $k_{\text{eff}} = 0.008$ 。

由表 1 可看出, 不同位置处的测量结果在误差范围内一致, 表明次临界装置较小, 空间效应不明显。

表 2 列出了 ^{252}Cf 中子源在活性区中心轴向不同位置处的测量结果。1 # 和 2 # 探测器布放位置同于表 1。

由表 2 结果可看出, k_{eff} 测量值在误差范围内符合, 说明决定实验装置安全性的 k_{eff} 与外源的位置无关, 但外源位置对装置的功率输出有影响。

表 3 列出了 ^{252}Cf 中子源在活性区中心底部, 中子源外为铅、不锈钢和水缓冲区时, 堆芯内不同核燃料元件布置下的 k_{eff} 。作为比较, 表 3 同时列出了外推-周期法的测量结果^[10]。

表 1 探测器处于不同位置的测量结果

Table 1 Measured data from two detectors localized different direction

缓冲区材料	堆芯元件布置根数	探测器编号	$- / k_{\text{eff}}$	k_{eff}
不锈钢	436	1	$6.23 \pm 0.33 (n=3)$	$0.953 \pm 0.003 (n=3)$
		2	$5.84 \pm 0.28 (n=3)$	$0.955 \pm 0.003 (n=3)$
			(6.04 ± 0.27)	(0.954 ± 0.002)

注: 括号内数值分别为 1 # 和 2 # 探测器 6 次测量结果的平均值及实验标准偏差

表 2 中子源在活性区中心轴向不同位置的测量结果

Table 2 Measured data for neutron source localized at various axis direction

缓冲区材料	堆芯元件布置根数	中子源位置	$- / k_{\text{eff}}$	k_{eff}
不锈钢	436	中心中部	6.04 ± 0.27	0.954 ± 0.002
不锈钢	436	中心底部	6.64 ± 0.85	0.950 ± 0.005

注: 表中数据为 1 # 和 2 # 探测器 6 次测量结果的平均值及实验标准偏差

表 3 缓冲区不同时的 k_{eff} 值与外推-周期法的测量结果

Table 3 Measured data for different buffer material

缓冲区材料	堆芯元件布置根数	跳源法		外推-周期法 k_{eff}	相对偏差 ¹⁾ / %
		$- / k_{\text{eff}}$	k_{eff}		
铅	436	5.48 ± 0.12	0.958 ± 0.001	0.957	0.16
不锈钢	436	6.64 ± 0.85	0.950 ± 0.005	0.947	0.29
水	436	5.16 ± 0.05	0.960 ± 0.001	0.962	- 0.15
	397	7.65 ± 0.15	0.942 ± 0.002	0.946	- 0.34
	326	11.7 ± 0.36	0.914 ± 0.003	0.916	- 0.21

注: 1) 相对偏差 = $\frac{|k_{\text{eff, 跳源}} - k_{\text{eff, 外推}}|}{k_{\text{eff, 外推}}}$

表 3 结果表明:在相同堆芯布置下,中心以水为缓冲区时 k_{eff} 最大,铅次之,不锈钢最小。

从表 3 还可看出:本方法与外推-周期法的测量值的最大相对偏差为 - 0.34%,相互符合良好。

本方法测量值的最大相对偏差约为 0.5%,按 k_{eff} 变化 1%、加速器束流强度相应变化 50% 要求, k_{eff} 的不确定度为 0.5%,束流的不确定度则为 25%。在 ADS 稳态运行时,束流的最大值变化限于 10%~20%,也就是说,本方法测量的 k_{eff} 值的精度尚不能满足要求,有待提高。

提高精度的主要途径是使跳源信号与启动积分计数的触发信号保持同步,以提高积分计数的测量精度。跳源后,堆芯内的中子计数按 $e^{-\lambda t}$ 衰减,跳源后的初始中子计数很高,直接影响积分计数多少。若跳源信号与启动积分计数的触发信号不同步,而有 Δt 的偏差,积分中子计数 $N = \int_0^t N_0 e^{-\lambda t} dt$ 则将漏计或多计 $N_0 \Delta t$ 个中子。跳源时的中子计数 N_0 可达到 10^5 s^{-1} 水平,假设 Δt 为 100 ms,那么, $N_0 \Delta t$ 将达到 10^4 量级,从而导致积分中子计数过大或过小,使测量结果的精度受到严重影响。很显然,改善跳源信号与启动积分计数的同步将显著提高测量结果的精度。

5 结论

实际上,ADS 的停止运行可通过快速切断质子束流来完成,这相当于跳源法中的快速跳源,因此,本方法可用于 ADS 在低功率运行下的 k_{eff} 测量。

参考文献:

[1] 丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱

动放射性洁净核能系统[A]. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京:原子能出版社,2000. 3~16.

- [2] 赵志祥,丁大钊,刘桂生,等. 加速器驱动次临界堆堆芯物理概念研究[A]. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京:原子能出版社,2000. 17~27.
- [3] 罗璋琳. 关于 ADS 系统中次临界堆对加速器可靠性的要求及其原理验证研究[A]. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京:原子能出版社,2000. 184~195.
- [4] Salvatores M. The Neutronics of a Source-driven Multiplying Medium and Its Experiment Validation at Masurca[A]. Physor '96, International Conference on the Physics of Reactors[C]. Mito, Ibaraki, Japan:[s.l.],1996. E210.
- [5] 罗璋琳,史永谦,薛小刚,等. ADS 堆芯物理问题研究[A]. 第八届反应堆数值计算和粒子输运学术会议论文集[C]. 深圳:中国核学会计算物理学会反应堆数值计算和粒子输运专业委员会,2000. 260~270.
- [6] 罗璋琳. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社,1987. 65~147.
- [7] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 北京:原子能出版社,1996. 135~186.
- [8] 史永谦,夏普,李义国,等. ADS 反应堆物理研究中的堆芯布置及控制系统[A]. 加速器驱动放射性洁净核能系统物理及技术基础研究成果选编(2000~2001)[C]. 北京:中国核工业音像出版社,2002. 83~89.
- [9] 史永谦,林生活,李义国,等. ADS 反应堆物理研究中的稳态外源系统[A]. 加速器驱动放射性洁净核能系统物理及技术基础研究成果选编(2000~2001)[C]. 北京:中国核工业音像出版社,2002. 90~95.
- [10] 夏普,朱庆福,史永谦,等. 外推-周期法测量 ADS 模拟装置的次临界度[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.