

强脉冲源法测量次临界系统 中子学时间常数的分析

白云 应阳君 张本爱 彭先觉
(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 讨论了在现有源强及测试条件下,用强脉冲源法测量次临界系统中子学时间常数本征值的可行性,并在此基础上对用 γ 强度谱诊断时间常数进行了研究。数值计算表明,这种新的测试方法能够得到很好的结果。

关键词 次临界, 脉冲源, 时间增殖常数

中图分类号 TL32

次临界度是标识核材料系统动力学行为的重要物理特征量。它对于反应堆核安全分析、核材料加工存储以及加速器驱动次临界系统研究等多方面的应用都有重要意义。通常,用 K_{eff} 或 α 本征值来描述核反应堆系统的次临界度^[1]。在实际应用中,一个重要的问题就是如何确定反应堆的次临界度。从实验上确定它,可以通过几种不同的方法来实现。例如,测量由稳态源放出的中子的增殖或者用 Rossi- α 法、棒振荡法等。还有一个更为简便的方法是通过测定反应堆对短中子脉冲的响应定出系统的次临界度,这时,就要求必须有足够高的源强和高灵敏度的探测器以保证能测到稳定的衰减段信号演化。

本文依据现有 DPF(Dense plasma focus)源源强和实测探测器的可测下限,用粒子输运计算的离散纵标法(S_N 方法)研究了强脉冲源法测量次临界系统时间常数的可行性,对 DPF 外源强度的下限值提出了要求,并对强脉冲信号过后系统内中子能达到稳定分布所需要的增殖代数进行了计算与讨论。

1 测试原理及探测系统简述

1.1 测试原理

用脉冲中子源法测量时间常数,是将一个瞬时中子脉冲入射到次临界反应堆中后,通过测定反应堆中子泄漏的瞬态特性来定出反应堆的这一重要参数^[2]。假设在 $t=0$ 时刻有一中子脉冲注入一次临界反应堆,采用单速扩散理论近似,脉冲源过后,系统的中子通量应满足方程 (1),并服从脉冲源的初始条件 $\phi(r,0)=\phi(r)$ 。

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{\partial \phi(\vec{r},t)}{\partial t} = DV^2 \phi(\vec{r},t) - \Sigma_a \phi(\vec{r},t) + \nu \Sigma_f \phi(\vec{r},t) \quad (1)$$

其中, V 为中子速度; D 为扩散系数; Σ_a 为宏观吸收截面; Σ_f 为宏观裂变截面; ν 为每次裂变产生的中子数。

在源停止一段时间后,此装置内的中子通量将趋近渐近形式,即通量将按照指数规律衰减:

$$\phi(r,t) \approx A_1 \psi_1(r) e^{-\nu[\Sigma_a - \nu \Sigma_f + DB_g^2]t} \quad (2)$$

其中 $\psi_1(r)$ 为此装置几何条件下的基模分布, B_g 为基模分布的本征值又称几何曲率。对于快速脉冲,中子通量或者功率的时间特性取决于瞬发中子动态行为,如果探测器上的响应信号 $R(r,t) \sim \phi(r,t)$,即具有相同的时间行为,那么不难得到时间常数:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = V[\nu \Sigma_f - \Sigma_a - DB^2] \quad (3)$$

当然,在实际应用中,还要对扩散理论忽略的能量和输运效应等进行细致的考察分析。

1.2 探测系统简述

假定 DPF 脉冲源源强参数为脉冲底宽~100 ns,源强 10^{11} (n/p) 作为算例考虑,选取半径 6.3 cm 的金属钨裸球系统进行分析,将 (3) 式中忽略的能量和输运效应计入,我们用 S_N 程序,截面参数取 24 群近似,角度离散段数取 4,计算出装置无外源时的时间本征值为 $-5.3 (\mu s^{-1})$,计算研究中还假定 DPF

外源距探测器 1m, 装置在外源和探测器之间, 即与二者相距均为 0.5m, γ 探测器可测下限为 10^8 (γ)/ μs^{-1} 。

2 计算结果及分析

若外源中子总数为 S_n (即源强), 外源离装置心的距离为 L , Pu 球系统半径为 r , 则系统可直接接收到的外源中子总数为:

$$N = S_n \times (1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L}\right)^2}) / 2, \text{ 在本文讨论的测试系统}$$

中, N 为 3.38×10^8 。首先考虑使用 DPF 氙氙源的情况, 将外源中子按照能量为 2.45MeV、脉宽 100 ns 的分布源形式加入进行计算。

2.1 中子泄漏强度谱

在这个瞬时强中子源射入次临界反应堆后, 我们用中子探测器测量泄漏出系统的中子强度谱的变化如图 1 所示。

对图 1 所得的流量谱用 (3) 式的方法处理后, 可得系统的中子学时间常数。由于脉冲中子进入次临界系统后, 最初要受到瞬发中子谐波的影响不能形成稳定的分布^[3], 在经过一段弛豫时间后, 才能稳定地以瞬发时间常数为 α_0 的模式衰减。数值计算结果表明, 系统中子流量谱在经过 0.072 μs 的弛豫时间后稳定在该模式下的分布, 称为本征分布, 结果如图 2 所示。下面我们对系统达到稳定分布所需的反应代数进行讨论。

已知系统每代反应时间为 $\tau = 1/n\sigma v$, 其中 n 为系统单位体积核子数, 按照裂变谱平均能量取 2 MeV 计, σ 为 2 MeV 中子与 ^{239}Pu 反应总截面, 取 6.2 b, v 为系统中子平均速度, 取为 1950 cm/ μs 。本文讨论系统环的密度取为 $\rho = 15.7 \text{ g/cm}^3$ 。不难算出系统每代反应时间为 0.002 μs , 因此脉冲中子注入系统

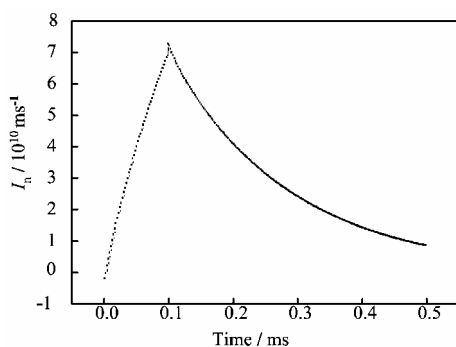


图 1 加强脉冲中子外源的次临界系统中子强度谱

Fig. 1 Neutron flux spectrum of the dense pulsed source

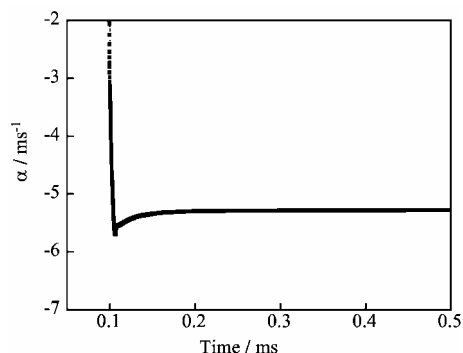


图 2 中子强度谱处理的动态增殖常数

Fig. 2 The α eigenvalue gained by neutron flux spectrum

后, 达到与系统性质相同的稳定的本征分布需要经过 60 代左右。

2.2 泄漏 γ 强度

为了从实验上测量次临界系统的时间衰减特性, 另一种测试方法是通过测量泄漏 γ 强度随时间的变化, 由此来诊断出时间常数。按照目前测试距离和探测器的灵敏度水平, 要求泄漏出系统的 γ 强度下限值约为 10^8 (γ)/ μs 时, 探测器是可测的。为了论证这种实验方法的可行性, 我们把实际的 DPF 氙氙源强按照 10^{11} (n/p) 引入次临界系统, 采用 2.1 中计算的条件, 进行了中子、 γ 耦合输运计算, 所得的泄漏 γ 强度随时间变化如图 3 所示。

由以上计算结果可以看出, 当源强为 10^{11} (n/p) 时, 直至 1.1 μs 出壳 γ 谱强度均高于探测器可测下限, 这种由 γ 强度谱衰减特性诊断次临界系统时间常数的方法理论上是可行的。考虑到这样的系统, 源强大小与系统的强度谱基本呈线性关系, 如果源强参数为 10^{10} (n/p), 则系统出壳强度下降一个量级, 此时, 达到可测下限的范围为 0.6 μs 之前信号均可满足测试要求。如果源强为 10^9 (n/p), 则只有 0.2 μs 之前的信号可以满足测试要求。所以要测到稳定的衰减信号, DPF 氙氙源强必须 $\geq 10^9$ (n/p)。对图 3 结果用 (3) 式标定 α 的方法处理, γ 强度谱达到稳定分布经过的弛豫时间比中子流量谱达到稳定的弛豫时间约晚 20 ns (如图 4 所示), 处理得到的时间常数在数值上与中子流量谱所得结果一致。

2.3 对外源强度的讨论

如果外源选用氙氙源, 中子能量按照 14.1MeV 计算, 这时系统的中子和 γ 强度见图 5。由于氙氙源中子的能量高, 每次裂变产生的中子数多, 所以氙氙源输出系统强度谱较氙氙源强。但是, 氙氙源与氙氙源达到稳定分布所需的反应代数基本相同。

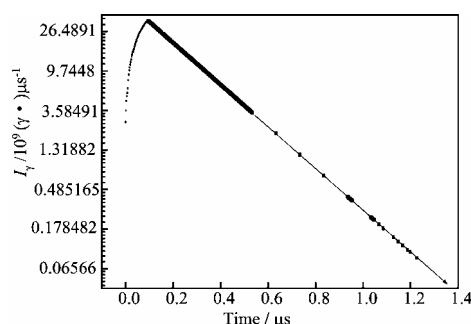
图 3 加强脉冲源的系统 γ 强度谱

Fig. 3 The gamma flux spectrum of dense pulsed source

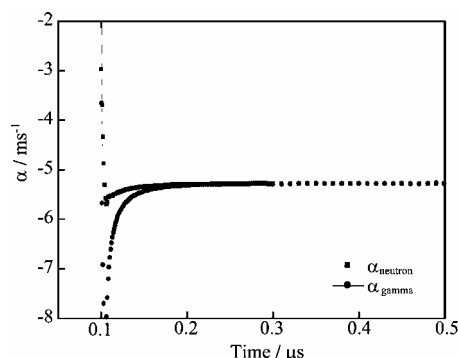
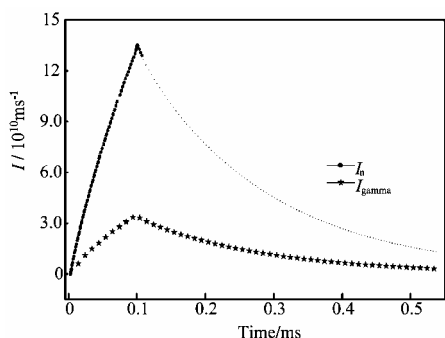
图 4 γ 强度谱处理的动态增殖常数Fig. 4 The α eigenvalue gained by gamma flux spectrum图 5 加强 DPF 氘氚脉冲中子源的次临界系统中子和 γ 强度谱

Fig. 5 The neutron and gamma flux spectra of pulsed DT neutron source

从以上结果可以看出, DPF 氘氚外源强度 $\geq 10^9$ (n/p) 时, 中子和 γ 强度谱均可得到好的测试结果。对于 DPF 氘氚源来讲 1.45 μs 之前系统的 γ 强度谱均高于探测器的可测下限。如果认为 0.2 μs 之前有可测信号可以满足测试要求的话, 要测到稳定的衰减信号, DPF 氘氚源源强必须 $\geq 3 \times 10^8$ (n/p)。

3 结论

用 S_N 方法对强脉冲源经过次临界系统后产生的中子和 γ 强度谱进行了模拟计算, 并用系统的泄漏谱处理得到了时间增殖常数。结果表明: (1) 在现有测试条件下, 用强脉冲源法测量时间常数本征值的方法可行。(2) 在本文讨论的系统条件下, 外源中子经过约 60 代反应时间可以达到与系统性质相同的稳定分布。(3) DPF 氘氚源和氘源均可用于这种测试方法, 但要测到 $\geq 10^8$ ($\gamma/\mu\text{s}$) 的可测信号, DPF 氘氚源源强需 $\geq 10^9$ (n/p) 而氘源源强需 $\geq 3 \times 10^8$ (n/p)。(4) 论证了强脉冲源法测量时间常数本征值是可行的, 但采用这种方法进行实际测量还需进一步研究屏蔽装置安放及其它可能引起测试布局变化的因素的影响。

参考文献

- 1 贝尔 G I, 格拉斯登 S. 核反应堆理论. 北京: 原子能出版社, 1979. 378—381
Bell G I, Glasstone S. The theory of nuclear reactor. Beijing: Atomic Energy Press, 1979. 378—381
- 2 Stacey W M. Nuclear reactor physics. Wiley-Interscience Publication, 2001. 154—155
- 3 杜德斯塔特 J J, 汉密尔顿 L J. 核反应堆分析. 北京: 原子能出版社, 1980. 150—156
Duderstadt J J, Hamilton L J. Nuclear reactor analysis. Beijing: Atomic Energy Press, 1980. 150—156

Methods of measuring α eigenvalue of a subcritical system by a strong pulsed neutron source

BAI Yun YING Yangjun ZHANG Ben'ai PENG Xianjue

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

Abstract In this paper, the feasibility of measuring α eigenvalue for a subcritical reactor in the present experiment condition by the pulsed neutron method is discussed. A new experiment method of measuring γ intensity in the subcritical system to gain α eigenvalue is raised and the validity of this method has been proved. The limitation of using the DPF DD and DPF DT neutron source is also discussed.

Key words Subcriticality, Pulsed source, Time multiplication constant

CLC TL32