

文章编号: 1007-4627(2012)01-0114-03

CFBR- II 堆脉冲状态反应性温度系数测量

高辉, 刘晓波, 蒋勇, 范晓强

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 反应性温度系数是脉冲堆重要参数之一, 采用一种特殊的方法测量了脉冲状态反应性温度系数。把脉冲的全过程分为峰和坪两个过程, 根据 Fuchs-Hansen 模型知道脉冲峰过程反应性减小量为系统初始超瞬发反应性的 2 倍, 采用脉冲波形去坪的方法分离出峰过程贡献的温升, 由此得到 CFBR- II 堆的脉冲反应性温度系数 $\alpha_T = -0.00202 \text{ } \$/\text{K}$ 。

关键词: 反应性温度系数; CFBR- II; Fuchs-Hansen 模型

中图分类号: TL326 **文献标志码:** A

1 引言

CFBR- II 是一座可以在超瞬发临界爆发脉冲的快中子脉冲堆^[1], 其活性区近似为球形, 核燃料为高浓缩金属铀。脉冲运行时, 堆功率按照增殖常数约 $0.02 \mu\text{s}^{-1}$ 的指数函数迅速上升, 反应性控制部件来不及运作。但是温度随着堆功率的上升也迅速升高, 并导致反应性降低, 从而使脉冲堆的功率迅速下降而实现关闭, 这就是热膨胀自熄灭机制。温度效应是最先起作用的停堆因素, 因此反应性温度系数的准确测量对脉冲堆的控制与安全至关重要。

反应性温度系数定义为堆内单位平均温度的变化引起的反应性变化, 即

$$\alpha_T = \frac{\Delta\rho}{\Delta T}, \quad (1)$$

这里的温度是指堆芯的平均温度。由于实验上得到平均温度比较困难, 一般采用堆芯典型位置的温度来代替平均温度。

从文献[2]可知, 稳态和脉冲状态下堆体热膨胀过程有很大的差异。赵小林等^[3]根据单群微扰理论对 CFBR- II 堆温度效应进行了理论分析, 认为稳态和脉冲反应性温度系数均为负值, 稳态反应性温度系数取决于堆体结构、材料以及换热条件, 与运行功率无关; 脉冲反应性温度系数取决于堆体的结构和材料, 在整个脉冲过程中近似为常数。本文从 Fuchs-Hansen 模型^[4]出发, 采用去坪的方法分离

出峰产额贡献的温升, 并得到峰产额对应的反应性变化, 从而得到了脉冲反应性温度系数。

2 测量原理和方法

赵小林等^[3]采用“稳定功率法”测量了 CFBR- II 堆的稳态反应性温度系数为 $-0.0036 \text{ } \$/\text{K}$ ($1 \text{ } \$$ 为 $1\beta_{\text{eff}}$)。而脉冲过程持续的时间很短, 半高宽大约 $200 \mu\text{s}$, 稳态的测量方法对脉冲状态已不适用, 因此采用一种特殊的方法测量了脉冲反应性温度系数。

CFBR- II 堆爆发的脉冲波形如图 1 所示, 脉冲全过程由峰和坪两部分组成。峰过程可以由 Fuchs-hansen 模型描述, 如式(2)所示:

$$\dot{F}_p(t) \approx \frac{2\rho_0^2 e^{a_0(t-t_{\text{max}})}}{b_f \Delta [1 + e^{a_0(t-t_{\text{max}})}]^2}. \quad (2)$$

而坪过程是由缓发中子引起的功率相对稳定的过程, 其功率水平比峰功率低约 3 个量级, 但持续时间长, 截坪与控制系统的运作有关。

脉冲过程反应性的降低是由裂变放能导致热膨胀引起的, 而温度变化与裂变产额成正比关系^[4], 因此可以通过峰和坪的产额比得到峰和坪的温度变化比, 即

$$\frac{\Delta T_p}{\Delta T} = \frac{F_p}{F}, \quad (3)$$

收稿日期: 2011-05-18; 修改日期: 2011-06-15

基金项目: 中国工程物理研究院科技发展基金(2010B0103010)

作者简介: 高辉(1979—), 男, 山东枣庄人, 助研, 博士, 从事反应堆物理研究; E-mail: freegaohui@yahoo.com.cn

式中的总产额 F 可以通过实验测量全波形数值积分得到, 峰产额 F_p 可以根据拟合的理论曲线得到, 而总的温升 ΔT 由热电偶测量得到, 因此就得到了去除坪后的峰温升 ΔT_p 。

由文献[5]可知, 脉冲峰引起的反应性变化为系统初始超瞬发反应性的 2 倍, 即

$$\Delta\rho = 2\rho_0. \quad (4)$$

初始超瞬发反应性 ρ_0 通过脉冲前沿的周期测量得到。峰过程的温升与反应性的变化均已得到, 因此根据反应性温度系数的定义得到:

$$\alpha_T = \frac{2\rho_0}{\Delta T_p}. \quad (5)$$

综上所述, 分别测量得到初始超瞬发反应性、总温升和峰产额所占的份额便可得到脉冲状态的反应性温度系数。

3 测量结果

在不同的超瞬发反应性条件下爆发了一系列的脉冲。温度测量采用热电偶传感器, 放在活性区球心位置。由于测量温度的热电偶时间响应远慢于脉冲过程, 因此无法得到瞬时温度的动态变化过程。但是活性区的冷却较慢, 因此用热电偶可以测到最大温升。通过产额的比例关系得到峰产额引起的温升。

图 1 给出了脉冲波形测量系统[6]多探测器搭接组成的全波形图像, 峰探测器采用塑料闪烁体配光

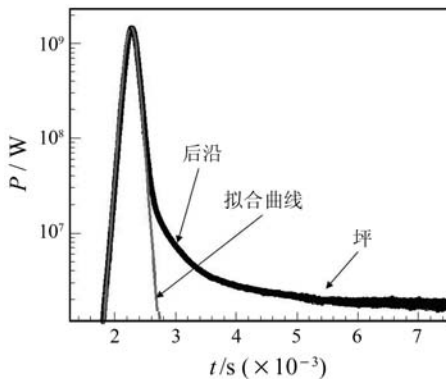


图 1 脉冲全波形

电管, 坪探测器采用 ^{10}B 电离室。在脉冲峰附近主要是瞬发中子的作用, 进入脉冲后沿和坪阶段后缓发中子作用已经显现出来。拟合曲线就是公式(2), 而拟合曲线外剩余的部分就是后沿和坪。对实验测量

的全波形进行数值积分, 从而得到脉冲总产额。把图 1 的拟合曲线放大且在性坐标下显示, 就是图 2。式(2)的拟合相关性比较好, 所以在峰功率和低于峰功率一个量级的范围内式(2)可以很好地描述脉冲峰。对脉冲峰的拟合确定了 $\dot{F}_p(t)$, 对其积分就得到了峰产额。得到总产额和峰产额后, 由式(3)就得到了脉冲峰引起的温升。

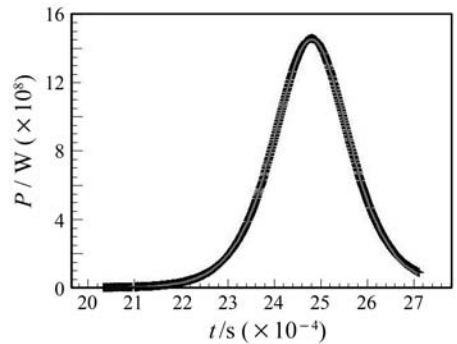


图 2 脉冲峰

爆发脉冲初期(堆功率在 1 MW 以下), 由于裂变变数较少, 热反馈效应不明显, 堆系统的反应性和周期可近似为常数。初始反应性可由前沿探测器测量得到的初始周期根据下面的公式[5]得到:

$$\rho_0 = \frac{1}{\alpha_c T_c}, \quad (7)$$

式中 α_c 为缓发临界瞬发中子衰减常数。前沿探测器采用的是快响应的塑料闪烁体配光电倍增管组成的探测系统。图 3 给出了脉冲初期的功率上升曲线, 采用 e 指数函数拟合便可得到初始周期 T_c , 因此得到了脉冲的初始超瞬发反应性。

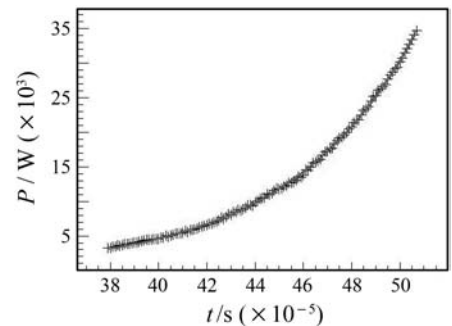


图 3 脉冲前沿

分别得到了超瞬发反应性和对应的峰温升, 采用最小二乘法进行线性拟合得到脉冲反应性温度系数为 0.002 02 $\$/\text{K}$ 。图 4 给出了脉冲反应性温度

系数的拟合图像。图中纵坐标表示反应性的减少，因此反应性温度系数应为负值，即 $\alpha_T = -0.00202$ $\$/K$ 。

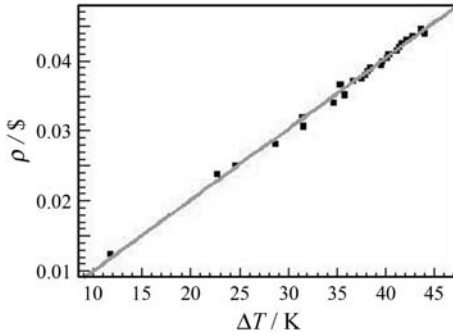


图 4 脉冲温度系数

4 讨论

由 Fuchs-Hansen 模型出发，把爆发脉冲整个过程分为峰和坪两个阶段，由峰和坪两个过程的产额比得出了由峰贡献的温升，而峰过程引起的反应性的降低为初始反应性的 2 倍。因此得到了 CFBR-II 堆的脉冲反应性温度系数为 -0.00202 $\$/K$ 。而“稳定功率法”测得稳态温度系数为 -0.0036 $\$/K$ 。稳态和脉冲两种状态的过程有较大差异，稳态运行是达到热平衡的静态，而脉冲运行是近似为绝热的动态过程。

Godiva-II^[5] 的稳态反应性温度系数为 0.0031 $\$/K$ ，而脉冲反应性温度系数为 0.0023 $\$/K$ ，CFBR-II 与 Godiva-II 同以高浓缩金属铀为堆芯，两者反应性温度系数比较接近。Godiva-II 的脉冲测量是首先建立温升与产额的关系，然后根据关闭系数而推导出来的，需要知道脉冲产额的绝对值。而本文的方法，不需要知道脉冲产额绝对值，而是直接建立温升与反应性的关系，从而减少了产额测量带来的不确定度。

参考文献 (References):

- [1] YANG Chengde, GONG Shuliang. Trends in Nuclear Physics, 1995, **12**(4): 58(in Chinese).
(杨成德, 龚书良. 核物理动态, 1995, **12**(4): 58.)
- [2] WIMETT T F. Dynamics of Annular Fuel in Fast Burst Reactor //1987 Report SAND87-0098, Sandia National Labs. 1987, **1**: 19-33.
- [3] ZHAO Xiaolin, FAN Xiaoqiang. Nuclear Power Engineering, 2008, **29**(5): 29(in Chinese).
(赵小林, 范晓强. 核动力工程, 2008, **29**(5): 29.)
- [4] SHABALIN E P. Fast Pulsed and Burst Reactors. New York: Pergamon Press. 1979, 13-41.
- [5] WIMETT T F, WHITE R H. Nucl Sci Eng, 1960, **8**: 691.
- [6] LIU Xiaobo, FAN Xiaoqiang, JIANG Yong, et al. Nuclear Power Engineering, 2007, **28**(Sup): 30(in Chinese).
(刘晓波, 范晓强, 蒋勇, 等. 核动力工程, 2007, **28**(增刊): 30.)

Measurement of Reactivity Temperature Coefficient of CFBR-II in Burst State

GAO Hui¹⁾, LIU Xiao-bo, JIANG Yong, FAN Xiao-qiang

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Reactivity temperature coefficient is one of important parameters of burst reactor. The methods of measuring the coefficient were introduced and analyzed. The whole process of burst is split into “peak” process and “tail” process. Reactivity reduction is twice as large as initial excess reactivity in “peak” process from Fuchs-Hansen model. Increment of temperature induced by “peak” process was got through removing “tail”. So we deduced reactivity temperature coefficient of CFBR-II $\alpha_T = -0.00202$ $\$/K$.

Key words: reactivity temperature coefficient; CFBR-II; Fuchs-Hansen model

Received date: 18 May 2011; Revised date: 15 Jun. 2011

Foundation item: Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2010B0103010)

1) E-mail: freegaohui@yahoo.com.cn