

基于活化法及 MCNP 程序的临界装置功率刻度

杨永木, 穆克亮, 黄礼渊, 牛江

(中国核动力研究设计院 反应堆工程研究所, 四川 成都 610041)

摘要:介绍了临界装置功率刻度的方法,在不同功率台阶下利用活化法测量临界装置的中子注量率分布及归一点的绝对中子注量率,并利用经修改编译的 MCNP 程序对临界装置的中子注量率分布进行校核计算。基于中子注量率测量及计算结果通过裂变率法计算不同功率台阶下临界装置的功率,同时外推到堆芯最大热中子注量率为 $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的功率,实现了临界装置的功率刻度。

关键词:中子注量率; MCNP 程序; 裂变率法; 功率刻度

中图分类号: TL326

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)S0-0111-03

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. S0. 0111

Power Confirming for Critical Facility Based on Activation Method and MCNP Code

YANG Yong-mu, MU Ke-liang, HUANG Li-yuan, NIU Jiang

(Reactor Engineering Research Sub-institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The method for power confirming was introduced. Neutron fluence rate distribution and absolute neutron fluence rate of one point for critical facility under different powers were measured by activation method. Neutron fluence rate distribution was calculated with compiled MCNP code. The power of critical facility was calculated with fission rate method based on neutron fluence rate. The power was extrapolated while the max thermal neutron fluence rate was $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The power confirming for critical facility was completed.

Key words: neutron fluence rate; MCNP code; fission rate method; power confirming

反应堆投入正式运行前须进行功率刻度。反应堆的功率测量方法可分为两类:热工方法和反应堆物理方法。热工方法适用于大型反应堆,通过测量反应堆冷却剂的进、出口的温度差和流量给出反应堆的功率,即直接测量反应堆核燃料裂变释放出的热量。物理方法是测量反

应堆的核燃料裂变率,即由每次裂变释放的能量给出反应堆的功率,反应堆物理方法不仅适用于大型反应堆也适用于小型反应堆^[1]。本工作利用反应堆物理方法测量临界装置的中子注量率分布及归一点的绝对中子注量率,以此为基础计算临界装置的功率。

1 临界装置核功率刻度的方法

1.1 慢化剂内中子注量率分布测量及校核计算

为了刻度临界装置的核功率,需先测量堆芯内的中子注量率分布,通常采用活化法。选择某一测量点作为相对中子注量率分布的归一点,得到各测量点的中子注量率分布及堆芯内慢化剂水中平均中子注量率与归一点中子注量率之比 $\frac{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}{\Phi_{\text{归一点}}}$ 。

利用 MCNP 程序进行中子注量率分布校核计算,MCNP 程序是一大型多功能通用蒙特卡罗程序,具有很强的几何描述能力,可用于计算中子注量率分布。

1.2 绝对中子注量率测量及反应堆功率刻度

完成中子注量率相对分布测量后,还需对归一点处的中子注量率进行绝对测量。通常采用金活化箔来进行测量。

反应堆的核功率 P 为:

$$P = \Phi_0 \frac{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}{\Phi_{\text{归一点}}} \left(\frac{\bar{\Phi}_f}{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}} \right) N_f \sigma_f g_f(T) p_0 (1 + \eta)$$

式中: Φ_0 为绝对中子注量率; N_f 为反应堆活性区内裂变物质 ^{235}U 总核子数; σ_f 为 ^{235}U 的热中子裂变截面; $g_f(T)$ 为 ^{235}U 在麦克斯韦能区的 $\sigma(E)$ 偏离 $1/v$ 截面的修正因子; p_0 为 1 次裂变所释放出的能量; $\frac{\bar{\Phi}_f}{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}$ 为整个活性区内燃料芯体与临近水隙内中子注量率之比的平均值; η 为相对于 ^{235}U 裂变,燃料芯体内 ^{238}U 裂变对功率贡献的份额^[2-5]。

在实验测量得到活性区中子注量率相对分布及归一点的活化箔活性的基础上,利用式(1)可得到反应堆的功率。

2 实验装置简介

2.1 临界装置

临界装置采用水作慢化剂。正常运行时功率很低,主要用于做反应堆临界物理实验。临界装置实验堆芯及探测器布置示意图示于图 1。堆桶内装有去离子水,堆芯内布置有燃料元件、控制棒等。堆芯四周布置有临界装置的 4 个探测器各两套。其中,功率测量装置测得的电信号输送到主控室内功率测量装置二次仪表上,指示值(以 A 为单位)反映了临界装置的功率。

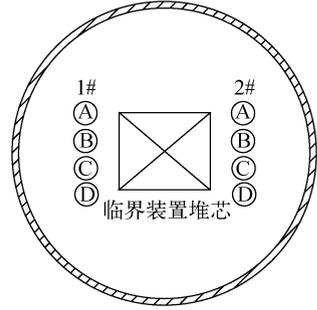


图 1 实验堆芯及探测器布置示意图

Fig. 1 Location of reactor core and detector

2.2 中子注量率相对分布和绝对测量系统

中子注量率相对分布测量系统,即 NaI 活化测量系统,由 NaI 探测器、高压电源、低压电源等组成。中子注量率绝对测量系统即绝对活化测量系统,由 N 型 HPGe(高纯锗)探测器、制冷系统、数字谱仪及计算机等组成。

3 中子注量率测量及校核计算

3.1 中子注量率分布及中子注量率绝对测量

在不同的功率台阶下进行临界装置的功率刻度,临界装置上的功率测量装置反映了临界装置的功率,测量的功率测量装置指示值依次为 0.80×10^{-11} 、 0.40×10^{-10} 、 0.80×10^{-10} 、 0.40×10^{-9} 和 0.80×10^{-9} A。

根据中子注量率分布测量结果, $\frac{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}{\Phi_{\text{归一点}}} = 0.3$ 。在反应堆归一点处照射纯金箔片完毕后取出,利用中子注量率绝对测量系统进行绝对中子注量率测量。根据测量结果,临界装置上的功率测量装置指示值为 0.80×10^{-9} A 时,对应的绝对中子注量率为 $3.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 基于 MCNP 的中子注量率分布计算

利用 MCNP4C 进行中子注量率分布计算时,出现“bad trouble in subroutine chgm of imcn value of mdas is too small”错误提示,导致无法运行,主要原因是程序动态分配的内存空间不够。因此,必须对 MCNP 的源程序进行修改并编译连接成可执行程序。

首先,从 MCNP 安装包中分离出适应用户机器环境(一般为 Windows 环境和 Unix 环境)的可编译源程序。其次,进行修改编译平台的配置,以 Windows XP 为操作系统,编译处理的

MCNP 所需的 MCNPCI.D 等文件。由于 MCNP 源程序主体是用标准的 Fortran 语言写成,辅助程序用 C 语言写出,为了能对 MCNP 程序进行修改编译,需安装 Fortran 和 C 的编译器,本文选用 Digital Visual Fortran 的 6.0 版和 Microsoft Visual C++ 的 6.0 版。然后,利用 Fortran 和 C++ 对产生配置编译文件^[6]。最后,编译源程序,修改运行产生的 setdas.for 文件,即可生成新的 mcnp.exe 文件。此 mcnp.exe 文件改正了 MCNP4C 版中的 mcnp.exe 运行出现的错误。

利用修改后的 MCNP 程序对临界装置建模,采用 F4:n 卡进行中子注量率分布计算。中子注量率探测片布置在燃料间的水隙内。穿过 1 个栅元的平均注量率,用 F4 计数,则:

$$F4 = \iiint_{V,t} \Phi_i(r, E, t) dE dt \frac{dV}{V}$$

其中: $\Phi_i(r, E, t)$ 为粒子通量, $\Phi_i(r, E, t) = vN(r, E, t)$, v 为粒子速度, N 为粒子密度。

$$\text{经计算, } \frac{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}{\bar{\Phi}_{\text{归一点}}} = 0.3, \frac{\bar{\Phi}_i}{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}} = 0.8.$$

4 功率刻度

根据临界装置中子注量率分布的测量结果,经 MCNP 程序验证,得到全堆所有组件水隙内中子注量的平均值与归一点处的中子注量的比值 $\frac{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}}{\bar{\Phi}_{\text{归一点}}} = 0.3$ 。燃料区内的中子注量率与其周围水隙内的中子注量率比值无法利用实验测量的方法获得,利用 MCNP 程序计算得到 $\frac{\bar{\Phi}_i}{\bar{\Phi}_{\text{水隙}}} = 0.8$ 。

由核设计参数计算得到临界装置堆芯内裂变物质 ^{235}U 的总核子数。另外, ^{235}U 的热中子裂变截面 $\sigma_f = 5.83 \times 10^{-26} \text{ m}^2$ 。 ^{235}U 在麦克斯韦能区的 $\sigma(E)$ 偏离 $1/v$ 截面的修正因子 $g_f = 0.96$ 。相对于 ^{235}U 裂变,燃料芯体内 ^{238}U 裂变对功率贡献的份额取 $\eta = 0.01$ 。

根据上文各参数的计算结果,利用式(1)可计算出中子注量率对应的临界装置功率,得到最大热中子注量率为 $\Phi_0 = 1.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时临界装置的功率测量装置指示值为 $2.56 \times$

10^{-9} A , 功率为 12 W。

5 结论

利用活化法进行临界装置的中子注量率分布测量及绝对中子注量率测量,采用修改和编译后的 MCNP 程序对中子注量率分布进行校核计算并对燃料与水隙中子注量率比值进行计算,基于中子注量率参数利用裂变率方法进行临界装置功率计算,完成了临界装置上的功率测量装置指示值(以 A 为单位)与临界装置中子注量率及临界装置的功率(以 W 为单位)的对应,实现了对临界装置的功率刻度,对临界装置的安全运行有重要意义。

参考文献:

- [1] 史永谦. 核反应堆中子学实验技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2011: 284-285.
- [2] WESTCOTT C H. Effective cross section values for well-moderated thermal reactor spectra, CRRP-960[R]. Chalk River, Canada: Atomic Energy of Canada Ltd., 1960.
- [3] JACKS G M. A study of thermal and resonance neutron flux detectors, DP-608[R]. Aiken: Savannah River Laboratory, 1961.
- [4] BAUMANN N P. Resonance integrals and self-shielding factors for detector foils, DP-817[R]. Aiken: Savannah River Laboratory, 1963.
- [5] 邓勇军, 李润东, 刘永康, 等. 确定反应堆核功率刻度中修正系数的新方法[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(11): 1 322-1 327.
DENG Yongjun, LI Rundong, LIU Yongkang, et al. New method in obtaining correction factor of power confirming[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(11): 1 322-1 327 (in Chinese).
- [6] 程晶晶, 邱蕾, 潘伏, 等. MCNP 源程序修改及应用[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2007, 21(3): 97-100.
CHENG Pinjing, QIU Lei, PAN Yi, et al. Modification and application of MCNP4c source code[J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2007, 21(3): 97-100 (in Chinese).