

# 球形浓缩铀装置的 中子价值和裂变率分布测量

郑春, 李建胜, 王强, 代少丰

(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:**为得到 Rossi- $\alpha$  测量临界装置的瞬发中子衰减常数的空间修正因子, 利用<sup>252</sup>Cf 中子源测量带贫化铀反射层的球形浓缩铀临界装置(CFBR-II)的中子价值空间分布, 同时用浓缩铀裂变电离室测量该装置的裂变率空间分布, 得到该装置的空间修正因子为 1.096。

**关键词:**临界装置; 中子价值; 裂变率; 瞬发中子衰减常数

中图分类号: TL375.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)03-0280-03

## Neutron Importance and Fission Rate in Enriched Uranium Metal Sphere

ZHENG Chun, LI Jian-sheng, WANG Qiang, DAI Shao-feng

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-210, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** To properly account for spatial effects in the point reactor kinetics description of Rossi- $\alpha$  measurement, the spatial distribution of the neutron importance in depleted-uranium-reflected uranium metal sphere(CFBR-II) was measured using <sup>252</sup>Cf neutron source. The spatial distribution of the fission rate from enriched uranium fission chamber is presented too. The spatial-effects factor obtained from these measurements is 1.096.

**Key words:** critical assembly; neutron importance; fission rate; prompt neutron decay constant

### 1 原理

临界装置是在低功率下运行的能够维持可控自持链式裂变反应的装置。在临界装置上能直接测定临界质量和功率(裂变率)分布等参数。测量临界装置的裂变率分布和中子价值的空间分布,一方面可用以进行反应堆物理特性研究、检验计算方法和程序、发展和完善实验技术等,另一方面,又可用以考虑在 Rossi- $\alpha$  测量中子

堆动力学描述而导致的空间效应,获得用于修正 Rossi- $\alpha$  测量中相关幅度的空间动态因子  $R^{[1]}$ :

$$R = \frac{\int F(r) dr \int F(r) I^2(r) dr}{\left[ \int F(r) I(r) dr \right]^2} \quad (1)$$

式中:  $r$  为空间坐标;  $F(r)$  为  $r$  处裂变率,  $F(r) = \int \Sigma_f(r, E) \phi(r, E) dE$ ,  $E$  为中子能量,

$\Sigma_i(r, E)$  为宏观裂变截面,  $\phi$  为中子注量函数;  $I(r)$  为  $r$  处的中子价值,  $I(r) = \int \chi(r, E) \cdot \phi^+(r, E) dE$ ,  $\chi(r, E)$  为裂变中子的能量和空间分布,  $\phi^+$  为中子注量共轭函数。

显然,在次临界系统中,只有依靠恒定的外源才能维持稳定中子场,即:

$$\hat{L}\phi + Q = 0 \quad (2)$$

式中:  $\hat{L}$  为中子输运算符;  $Q$  为外源强度。

通常,无中子入射的自由表面条件为:

$$\phi(r_s, E, n_s \cdot \Omega < 0) = 0 \quad (3)$$

式中:  $r_s$  为表面中子的空间坐标;  $n_s$  为表面垂直方向矢量;  $\Omega$  为中子运动方向。

考虑有源的非齐次共轭方程:

$$\hat{L}^+ \phi^+ + Q^+ = 0 \quad (4)$$

满足自由表面上出射共轭中子注量为 0 的初始条件。

不难看出,共轭函数的物理意义是由伴源  $Q^+$  决定的。假设:

$$Q^+(r, E, \Omega) = \Sigma_d(r, E) \quad (5)$$

式中:  $\Sigma_d$  为探测器的宏观反应截面。

用  $\phi^+$ 、 $\phi$  分别与中子注量方程和共轭方程作内积:

$$\begin{aligned} (\phi^+, \hat{L}\phi) + (\phi^+, Q) &= 0 \\ (\phi, \hat{L}^+ \phi^+) + (\phi, Q^+) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

上两式相减,得:

$$(\phi^+, Q) = (\phi, Q^+) \quad (7)$$

选择中子源为单位单能点源:

$$Q(r, E, \Omega) = \delta(r - r_0) \delta(E - E_0) \delta(\Omega - \Omega_0) \quad (8)$$

于是得到:

$$\begin{aligned} \phi^+(r_0, E_0, \Omega_0) &= (\phi, \Sigma_d) = \\ &\int_{r_d} dr \int dE \int d\Omega \Sigma_d(r, E) \phi(r, E, \Omega) \end{aligned} \quad (9)$$

式(8)、(9)中:  $r_0$ 、 $E_0$ 、 $\Omega_0$  分别为中子源中子的位置、能量和运动方向;  $\delta$  为狄拉克函数;  $r_d$  为探测器空间坐标。

在这种情况下,  $\phi^+(r_0, E_0, \Omega_0)$  正比于探测器对单位点源的响应,即共轭函数  $\phi^+(r, E, \Omega)$  是位于系统  $r$  处的 1 个能量为  $E$ 、运动方向为  $\Omega$  的中子及其后代对探测器(该探测器的宏观截面为  $\Sigma_d$ ) 作出贡献的“价值”的度量。因此,中子注量的共轭函数也称为价值函数。价值函数  $\phi^+$

的这一物理意义与它的边界条件是一致的。显然,位于边界上、运动方向向外的中子对里面的探测器响应无贡献,因而,价值为 0。当  $Q^+$  选为  $\Sigma_d$  时,  $\phi^+$  是无量纲的。

如果在次临界系统中  $r$  处放置一裂变谱中子源,则价值的空间分布  $I(r)$  正比于该中子源的计数率。

## 2 实验装置和测量系统

实验在快中子脉冲堆 CFBR-II 上进行。CFBR-II 主要由 3 个部分组成:上、下半球(均包括浓缩铀活性区、贫化铀和黄铜反射层)和上下半球之间的 1 个不锈钢托盘,托盘内有各种孔道,可布置探测器和辐照样品。

中子价值分布采用两组长计数器测量,每组探测器包括两支北京核仪器厂产 SZJ-1 型  $BF_3$  正比计数管。 $BF_3$  正比计数管位于一定结构的石蜡桶内,构成 Hanson 长中子计数器,它与前置放大器、高压电源、主放大器和定标器组成测量系统。两组探测器的前端面距离堆中心(不锈钢托盘中心)180 cm。强度为  $1.41 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  的  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变中子源放在孔道内不同位置,调整系统的反应性为微次缓发临界状态,测量 4 个次临界系统的中子价值随空间的变化。这 4 个系统分别处于次缓发临界  $0.54\beta_{\text{eff}}$ 、 $0.94\beta_{\text{eff}}$ 、 $1.34\beta_{\text{eff}}$  和  $2.04\beta_{\text{eff}}$ 。假设用  $BF_3$  正比计数管测量的相对计数率正比于  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变中子(Maxwellian 中子能谱)的相对价值。中子源密封在  $\phi 7.8 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$  的铝盒内,固定在一不锈钢管上,用电机传动到孔道内不同位置。

裂变率分布采用浓缩铀裂变电离室(北京核仪器厂生产的 LB-123P 型裂变电离室)测

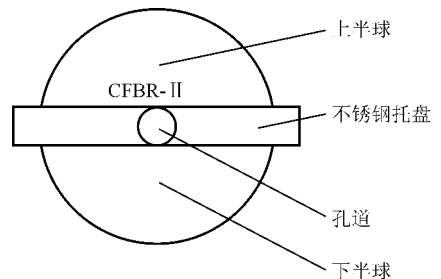


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experiment assembly

量,外形尺寸为  $\phi 4.5 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ , 内充  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$  Ar 气,工作电压  $100 \sim 200 \text{ V}$ , 约  $1 \text{ mg } ^{235}\text{U}$ 。裂变电离室尾部接  $1 \text{ m}$  的铠装电缆,由内芯、氧化铝和外金属皮组成,后端为 Q9BNC 头。采用 FH1047A 电荷灵敏前置放大器、XF01 线性放大器、多道分析器测量幅度谱,用幅度甄别扣除  $\alpha$  粒子信号。

### 3 实验结果

实验测量结果表明:由于正比计数管距离堆芯  $1.8 \text{ m}$ ,且体积较小( $\phi 27 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ),所以,正比计数管的位置对相对中子价值基本上无影响,这与理论预估一致。两套探测器系统在不同位置处测量的中子相对价值是一致的。中子价值是一系统参数,不应受探测器参数的影响。另一方面,在测量的范围内装置次临界深度对中子价值也无影响,4 个不同次临界状态下的不同位置的相对中子价值是一致的。图 2 中的相对中子价值是两套探测系统和 4 个次临界状态的算术平均值。

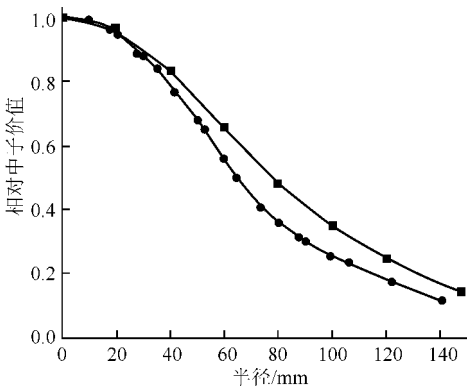


图 2 浓缩铀临界装置的相对中子价值分布

Fig. 2 Relative neutron importance vs. radius for enriched uranium sphere critical assemblies

■——CFBR-II; ●——FLATTOP 装置<sup>[1]</sup>

裂变率空间分布采用浓缩铀裂变电离室测量,  $^{235}\text{U}$  富集度大于  $90\%$ 。  $^{235}\text{U}$  的裂变平均截面约为  $^{238}\text{U}$  的 10 倍,裂变室中  $^{238}\text{U}$  的裂变率贡献约为  $1\%$ ,影响不大。测量时,装置以某一稳定的功率运行,裂变电离室处于不同的位置,记录每一位置下的裂变室的计数率,归一到中心为 1。测量结果示于图 3。

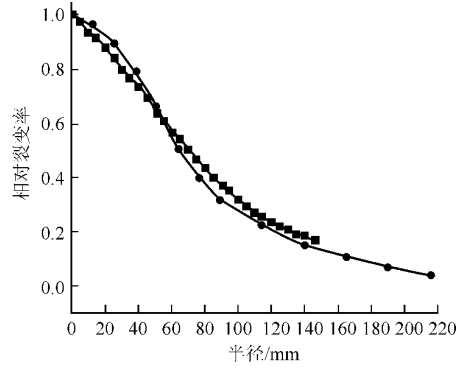


图 3 浓缩铀临界装置的裂变率的相对分布

Fig. 3 Relative fission rate vs. radius for enriched uranium sphere critical assemblies  
■——CFBR-II; ●——FLATTOP 装置<sup>[1]</sup>

### 4 结论

在贫化铀反射层内测量的是  $^{235}\text{U}$  的裂变率。计算时,应采用浓缩铀的裂变率。根据 CFBR-II 的中子能谱<sup>[2]</sup>,计算得到  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  的截面分别为  $1.4349 \times 10^{-24}$  和  $0.1578 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。根据测量的中子价值和裂变率分布,由式(1)可得 Rossi- $\alpha$  测量方法的空间修正因子  $R = 1.096$ 。FLATTOP<sup>[1]</sup> 的裂变率和中子价值的空间分布与 CFBR-II 的一致,其空间修正因子  $R = 1.163$ 。测量的裂变率和中子价值分布与 FLATTOP 的分布趋势基本一致,但空间修正因子相差较大,这主要在于 CFBR-II 的测量在不锈钢托盘内的孔道内进行,而 FLATTOP 装置无不锈钢托盘,活性区和反射层是一个整球,测量在浓缩铀和天然铀内进行。因此,从图 2 和 3 可看出,FLATTOP 的裂变率和中子价值比 CFBR-II 的下降更快些。

### 参考文献:

- [1] MIHALCZO J T. Neutron importance and fission density in uranium-235-enriched uranium and plutonium metal spheres[J]. Nucl Sci Eng, 1975, 56:271-290.
- [2] 郑春,吴建华,李建胜,等. 活化法测量 CFBR-II 堆中子注量和中子能谱[J]. 核动力工程, 2004, 25(1):93-96.  
ZHENG Chun, WU Jianhua, LI Jiansheng, et al. Neutron spectra and fluence of CFBR-II reactor measured by foils activation technique[J]. Nucl Power Eng, 2004, 25(1):93-96(in Chinese).