

文章编号: 0258-0926(2014)04-0001-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.04.0001

# 启动物理实验中 PNS 的堆外探测器响应 和外推临界研究

韩 嵩, 石秀安, 付学峰

中核核能技术研究院有限公司, 广东深圳, 518026

摘要: 使用 MCNP5 对启动物理实验中一次中子源 (PNS) 在堆外源量程探测器 (SRD) 响应进行模拟计算, 分析堆芯有效倍增因子  $k_{\text{eff}}$ 、带源有效倍增因子  $k_s$  和探测器计数  $C$  之间的关系。通过对 SRD 响应系数  $a$  的预测, 得到优于传统的  $1/C$  外推预测临界法的  $a'/C$  外推预测临界法, 使硼稀释过程中的外推曲线线性度更好。计算结果表明, 接近临界时  $a'/C$  值与  $1-k_{\text{eff}}$  线更加吻合。

关键词: MCNP5; PNS; SRD; 外推预测临界

中图分类号: TL32 文献标志码: A

## 0 引 言

在反应堆物理启动过程中, 要求严格监测堆芯中子通量密度水平, 以防止反应堆堆芯发生意外临界。反应堆首炉堆芯中引入的自发裂变一次中子源 (PNS)  $^{252}\text{Cf}$ , 可诱发堆芯的可裂变核素 (如  $^{235}\text{U}$ ) 发生中子裂变, 释放与堆芯反应性水平相对应的裂变中子并输运到堆外, 被堆外源量程中子探测器 (SRD) 探测到, 实现对堆芯中子通量密度水平和堆芯反应性水平的实时监测。

本文使用蒙特卡罗程序 MCNP5 进行固定源计算和临界计算, 对中广核 CPR1000 反应堆首次启动过程中的 PNS 在堆外 SRD 处的响应特性进行研究。通过改变 PNS 的位置以及堆芯物理状态, 包括控制棒棒位、冷却剂中硼浓度, 计算分析堆芯反应性、PNS 诱发裂变与 SRD 处中子通量水平三者之间的关系。

## 1 PNS 在 SRD 处的响应

PNS 诱发堆芯核裂变材料的再裂变, 将中子注量率水平与堆芯靠近 PNS 的局部反应性耦合起来。堆芯总中子数  $N_c$  与 PNS 提供的外中子源  $S_0$  的关系式为:

$$N_c = S_0 + k_{s1}S_0 + k_{s2}k_{s1}S_0 + \dots + \prod_{i=1}^{\infty} k_{si}S_0$$

$$= \frac{1}{1-k_s} S_0 \quad (1)$$

式中,  $k_{si}$  为逐级裂变有效倍增因子;  $k_s$  为平均外源裂变有效倍增因子。除去外中子源, 单纯由堆芯其他裂变材料释放的裂变中子数  $N_f$  为:

$$N_f = N_c - S_0 = \frac{k_s}{1-k_s} S_0 \quad (2)$$

$k_s$  的物理定义是由特定性质的  $S_0$  引发的堆芯裂变中子而反映出来的堆芯有效倍增特性<sup>[1]</sup>。 $k_s$  可被认为是广义的堆芯有效倍增因子, 与堆芯有效倍增因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 具有类似的物理意义<sup>[2]</sup>, 当且仅当  $S_0$  与无源情况下的堆芯裂变中子源严格一致 (包括中子谱、空间分布) 的情况下,  $k_{\text{eff}}$  才与  $k_s$  等效。然而, 往往在  $k_{\text{eff}}$  接近 1 时, 由  $S_0$  引发的逐级裂变中子  $\prod_{i=1}^l k_{si}S_0$  逐渐扩散到整个堆芯, 且  $N_f$  远大于  $S_0$ ,  $k_s$  与  $k_{\text{eff}}$  趋于相等, 即当  $k_s \rightarrow 1$ :

$$k_{\text{eff}} \cong k_s \quad (3)$$

$k_s$  反映的是  $S_0$  引起的堆芯反应性, 而从堆芯释放的  $N_c$  到 SRD 处的中子通量密度 ( $C$ ), 同样是一个信息传递的过程, 可简单表示为:

$$C = aN_c = a \frac{1}{1-k_s} S_0 \quad (4)$$

式中,  $a$  定义为响应系数。在 SRD 位置已定的情况下,  $a$  的变化主要取决于  $N_c$  在堆芯的空间分布以及能谱的变化。在堆芯装料结束到达临界过程中,  $N_c$  的空间分布从深度次临界到逼近临界的变化复杂, 很难给出  $a$  的理论解。在反应堆物理启动过程中, 主要采用的  $1/C$  外推临界法监测  $k_s$ , 既而间接监测  $k_{eff}$ , 即:

$$\frac{1}{C} = \frac{1 - k_s}{aS_0} \approx \frac{1 - k_{eff}}{aS_0} \quad (5)$$

$1/C$  外推临界法的有效性是建立在 2 个假设条件下的:  $k_s$  与  $k_{eff}$  在低次临界度条件下相对一致。只要  $S_0$  不是特别远离堆芯有效增殖区; 在堆芯从次临界到接近临界过程中  $a$  变化较小。条件比较容易满足, 条件用于保证  $1/C$  与  $\frac{1 - k_{eff}}{S_0}$  有相对稳定的线性关系。

然而, 当  $S_0$  靠近堆芯边界时, 由泄漏引起的  $a$  变化较大,  $1/C$  外推临界法很可能不再适用, 需要对外推法进行修正调整。由式 (5) 可得:

$$k_{eff} = 1 - \frac{1}{S_0} \frac{a}{C} \quad (6)$$

由式 (6) 可知,  $k_{eff}$  与  $a/C$  呈线性关系。如果能够相对准确的给出  $a$  随  $k_{eff}$  的变化关系, 便可通过  $a/C$  准确预测  $k_{eff}$ 。

本研究以 CPR1000 反应堆为研究对象, 通过 MC 方法模拟计算, 研究堆芯中  $k_{eff}$ 、 $k_s$  和  $C$  三者之间的关系, 并给出  $a$  的变化趋势和合理的预测。

### 1.1 堆芯描述

CPR1000 反应堆堆芯由 157 个  $17 \times 17$  燃料组件组成, 冷态堆芯活性段高度为 365.8 cm。棒束控制组件分为停堆棒组 (SA、SB、SC 和 SD)、功率补偿棒组 (G1、G2、N1 和 N2) 和温度调节棒组 (R), 图 1 给出了堆芯控制棒组件的布置。一次中子源棒内装有自发裂变核素  $^{252}\text{Cf}$  芯块; 芯块高度约 18 mm。由于其体积很小, 相对于整个堆芯系统可认为是 1 个点源。反应堆压力容器外, 2 个 SRD 通道位于周向  $90^\circ$  和  $270^\circ$  方向上, 如图 1。

反应堆首炉堆芯物理启动前, 堆芯状态为: 堆芯压力 15.5 MPa 堆芯温度  $293^\circ\text{C}$  硼浓度  $2400 \times 10^{-6}$ , 控制棒全部插入堆芯 (ARI)。反应堆首炉堆芯物理启动中, 达临界过程的步骤主要包括:

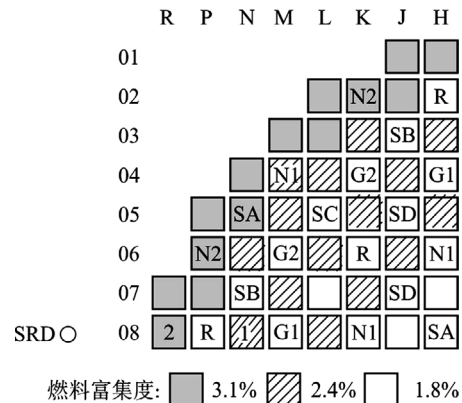


图 1 堆芯控制棒组件和中子源组件布置

Fig. 1 CR and PNS Assemblies Layout

提出控制棒组, 提棒顺序为 SB、SC、SD、SA、G2、G1、N2、N1、R; 硼稀释到接近临界; 重新提出 R 棒, 达到临界。在整个达临界过程中, 始终采用  $1/C$  外推临界法监督反应堆反应性, 并预测临界点。

### 1.2 计算模型

建立  $1/4$  堆芯的 MCNP5 计算模型, 核截面库取自 ENDF/B-VI。MCNP 计算为 2 类, 一类是有源计算, 用于计算 SRD 所在测量孔道的轴向中子注量率分布和  $k_s$ ; 另一类是临界计算, 用于计算整个堆芯的  $k_{eff}$ 。

有源计算中, 通过在 SRD 所在测量孔道位置轴向设置数 10 个计数体, 以便统计轴向中子通量密度分布, 并且根据 MCNP5 输出中的粒子平衡表<sup>[3]</sup>, 计算出  $k_s$ , 即:

$$k_s = \frac{1}{1 + N_{n,xn} + N_{fiss}} \quad (7)$$

式中,  $N_{n,xn}$  为  $(n, xn)$  反应产生的模拟中子数;  $N_{fiss}$  为裂变反应产生的模拟中子数, 二者均归一到 1 个外源中子。

### 1.3 计算结果与分析

硼稀释是达临界过程的一个重要步骤, 堆芯硼浓度会从停堆硼浓度  $2400 \times 10^{-6}$  稀释到接近临界的硼浓度,  $k_{eff}$  一般在 0.995 左右。而后剩余的反应性由提 R 棒达到临界。在硼稀释过程中即时绘制  $1/C$  图, 用以监督和推预测临界。为了比较分析, PNS 被分别放在图 1 中的 1 号和 2 号组件处, 分别对应  $k_{s1}$  和  $k_{s2}$ ,  $C_1$  和  $C_2$ 。1 号组件位置为传统 M310 机型的 PNS 所在径向位置。2 号组件位置是三代堆 EPR 拟布置的径向位置。

图 2 给出了  $k_{s1}$ 、 $k_{s2}$  和  $k_{eff}$  随硼浓度的变化。相比  $k_{s2}$ 、 $k_{s1}$  更加靠近  $k_{eff}$ ，且具有更好的线性度。图 3 给出了归一化的  $1/C_1$ 、 $1-k_{s1}$ 、 $1/C_2$ 、 $1-k_{s2}$  和  $1-k_{eff}$  随硼浓度的变化。以上变量分别归一到硼浓度为  $2400 \times 10^{-6}$  时各自值。图中显示， $k_{eff}$  和  $1-k_{s1}$  重合，均具有非常好的线性度。 $1/C_1$  与  $1-k_{s1}$  相比有明显的差别，在硼浓度从  $2400 \times 10^{-6}$  到  $1400 \times 10^{-6}$  过程中  $1/C_1$  逐渐偏离  $k_{s1}$ ，在  $1400 \times 10^{-6}$  到  $1270 \times 10^{-6}$  之间明显失去线性度，但有回归到  $1-k_{eff}$  和  $1-k_{s1}$  的趋势。 $1-k_{s2}$  也有先背离  $1-k_{eff}$  而后回归  $1-k_{eff}$  的明显趋势， $1/C_2$  曲线背离  $1-k_{eff}$  最恶劣，且在硼浓度达到  $1300 \times 10^{-6}$  之后严重失去线性度。产生此现象的原因是，在堆芯接近临界的过程中，PNS 引起的堆芯通量分布形状有明显变化。不同硼浓度下 SRD 孔道的中子注量率轴向分布可以间接反映堆芯注量率分布的变化。因此，与  $1/C_1$  相比， $1/C_2$  具有更差的外推预测临界能力。

针对硼稀释过程中  $1/C$  在接近临界失去线性度，尤其如  $1/C_2$  外推预测临界很差的情况，本文

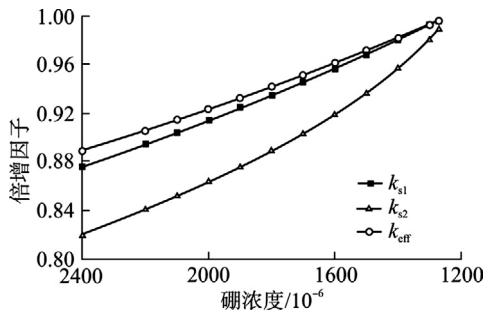


图 2 硼浓度  $k_{s1}$ 、 $k_{s2}$  和  $k_{eff}$   
Fig. 2 Boron Concentration  $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$  and  $k_{eff}$

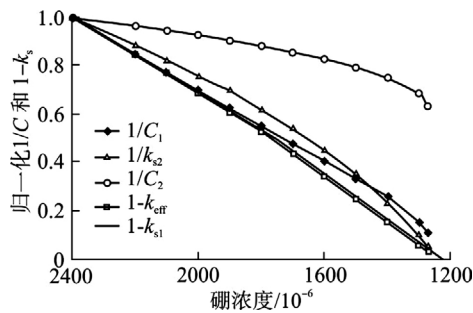


图 3 硼浓度归一化的  $1/C_1$ 、 $1-k_{s1}$ 、 $1/C_2$ 、 $1-k_{s2}$  和  $1-k_{eff}$   
Fig. 3 Boron Concentration Normalized  $1/C_1$ 、 $1-k_{s1}$ 、 $1/C_2$ 、 $1-k_{s2}$  and  $1-k_{eff}$

通过合理的预测  $a$  的近似值  $a'$ ，并绘制  $a'/C$  曲线，代替  $1/C$  曲线作外推预测临界。 $a'/C$  保证了当  $1/C$  为 0 时， $a'/C$  同样为 0，确保了其对临界点预测的零偏差性。通过实际计算得到的  $\alpha$  曲线发现， $1/C^k$  与  $a$  具有相似的形状，而通过预设幂指数  $k$  以改善  $a'/C$  线性度。

图 4 给出了不同  $k$  值对应的归一化  $a'/C_2$  (即  $1/C_2^{k+1}$ ) 和归一化的  $1-k_{eff}$  曲线。可以看出，尽管  $1/C_2^{6.0}$  曲线的线性度稍差，但在接近临界阶段与  $1-k_{eff}$  曲线吻合的很好。由此可得，当 PNS 在 2 号组件位置时，可以绘制  $k=6$  时的  $1/C^{k+1}$  曲线，作外推预测临界。

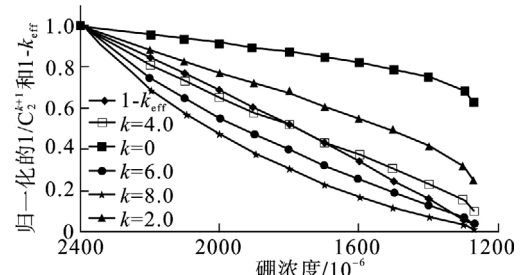


图 4 硼浓度归一化的  $1/C_2^{k+1}$  和  $1-k_{eff}$

Fig. 4 Boron Concentration Normalized  $1/C_2^{k+1}$  and  $1-k_{eff}$

## 2 总 结

通过对达临界过程的模拟计算发现，点源 PNS 越靠近堆芯外围，其对应的  $k_s$  与  $k_{eff}$  差别越大。硼稀释过程中，当 PNS 放置在最外围组件时，由于传递系数  $a$  变化较大，导致  $1/C$  曲线失去线性度，严重背离  $1-k_{eff}$ ，作外推预测临界效果很差。理论上， $a'/C$  曲线可与  $1-k_{eff}$  完全吻合。文中通过朴素的经验法预测得到近似于  $a$  的  $a'$  函数  $1/C_2^k$ ，绘制  $a'/C$  曲线，可以得到很好的外推预测临界效果。其中幂指数  $k$  可通过模拟计算得到优化值。

### 参考文献：

- [1] Slessarev I, Tchistiakov A. IAEA ADS BENCHMARK Result and Analysis [R]. TCM Meeting, Madrid, 1997.
- [2] Clayton E D. Neutron Source Multiplication Method. Proceedings of Workshop on Sub-critical Reactivity Measurements[C]. Oka Ridge National Laboratory, USA, 1985.
- [3] MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5[M]. Los Alamos National Laboratory, USA, LA-UR-03-1987.

# Study on Characteristics of Ex-core Detector Response on Primary Neutron Source and Criticality Extrapolation Method during Start-up Experiment

Han Song, Shi Xiu'an, Fu Xuefeng

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen ,Guangdong, 518026, China

**Abstract:** MCNP5 was used to simulate the ex-core source range detector (SRD) response to the primary source (PNS) at the stage of reactor start-up experiment. The relationship among  $k_{\text{eff}}$ ,  $k_s$  and the detector counts  $C$  has been analyzed. Through the prediction of SRD response factor  $a$ , traditional criticality extrapolation method  $1/C$  is optimized by  $a'/C$  in order to obtain a more linear extrapolated curve in the boron dilution process. The result shows that  $a'/C$  gives a better match with  $1-k_{\text{eff}}$  as soon as the core approaches to critical.

**Key words:** MCNP5, PNS, SRD, Criticality extrapolation

作者简介：

韩 嵩 (1980—), 男, 高级工程师。2010年毕业于意大利都灵理工大学核能科学与工程专业, 获博士学位。现主要从事反应堆工程设计工作。

石秀安 (1981—), 男, 高级工程师。2008年毕业于清华大学核能科学与工程专业, 获博士学位。现主要从事反应堆工程设计工作。

付学峰 (1976—), 男, 高级工程师。2008年毕业于上海交通大学核能科学与工程专业, 获硕士学位。现主要从事反应堆堆芯核设计与研发工作。

(责任编辑: 杨洁蕾)