

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0197-03; doi: 10.13832/j. jnpe. 2014. S2. 0197

# 燃料棒性能分析软件 FUPAC 中燃料棒 径向功率密度分布模型研发

涂晓兰, 柴晓明, 尹强, 刘东, 芦韡

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

**摘要:** 本文提出中子学-热力学部分因素分离方法 (PPS), 解决 APS 在模拟  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 、IFBA 等时存在的问题。为了使 PPS 方法更具工程实用性, 对影响径向功率密度分布的因素进行敏感性分析, 确定影响径向功率密度分布的关键参数, 形成燃料棒热力学性能分析软件 FUPAC 中的径向功率密度分布模型。应用实测数据以及中子输运程序 KYLIN-1 精确计算结果, 对本文提出的方法进行验证, 结果表明: 本文提出的方法具有较高精度, 适用于  $\text{UO}_2$  燃料、 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  燃料以及 IFBA 等燃料棒的分析。

**关键词:** 径向功率密度分布; APS; PPS;  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  燃料棒; IFBA 燃料棒

中图分类号: TL349 文献标志码: A

## Research and Development of Radial Power Density Distribution Model for FUPAC

Tu XiaoLan, Chai XiaoMing, Yin Qiang, Liu Dong, Lu Wei

Science Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** This paper presents Part Parameters Separation (PPS) method. The method solves the APS problem effectively. To improve the practicability in using PPS method, the sensitivity affecting the radial power distribution is analyzed in this paper to determine the key parameters. On this basis, this paper establishes the radial power density distribution model, which is used in Fuel Rod Performance Analysis Code (FUPAC). The model is validated with the measured data and the KYLIN-1 calculated results. The results show that the model has a high precision and a wide range of engineering practicality, and it is suitable for various types of fuels, such as  $\text{UO}_2$  fuel,  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  fuel and IFBA fuel.

**Key words:** Radial power density distribution, APS, PPS,  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  fuel rod, IFBA fuel rod

### 0 引言

在进行核反应堆内燃料棒性能分析模拟过程中, 燃料棒径向功率分布 (由中子学计算得到) 通过影响燃料棒内温度分布以及冷却剂的温度而影响燃料棒的截面信息, 进而反过来影响燃料棒的径向功率分布。因此, 在燃料棒性能分析过程中, 堆芯中子学计算与燃料棒热力学性能分析是一个耦合的过程, 需要调用中子学输运计算程序和燃料棒热力学性能分析程序迭代运算。由于中子学输运计算相对较为耗时, 因此直接采用耦合程序在工程应用方面的实用性较差, 国际上通常

进行简化处理, 将中子学计算过程与燃料棒热力学性能分析过程分离 (即“中子学-热力学分析分离方式”)。COPERNIC<sup>[1]</sup>程序是采用这种方式的国际知名燃料棒热力学性能分析程序之一。

COPERNIC 等软件当前采用中子学-热力学全部因素分离方法 (APS), 但是在分离因素中没有考虑  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  以及 IFBA 等情况。参照 APS 的思路, 如果要考虑  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  和 IFBA 等燃料棒, 利用插值重构燃料棒径向功率分布的变量将非常多, 且计算复杂, 精度不一定高。

本研究基于中子学-热力学分析分离方式的

思路,建立燃料棒中子学-热力学分析中部分因素分离(PPS)方式,并提出针对这种方式的相关方法体系,以解决已有分离方式不能适用于 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 燃料棒和IFBA燃料棒的缺点。

## 1 径向功率密度分布的计算方法分析

影响径向功率密度分布的参数可分为两部分:

燃料棒固有属性参数(不随着燃料棒的分析结果的不同改变,如燃料棒初始富集度、钆质量百分比、初始半径);燃料棒的瞬时属性参数(随着燃料棒的分析结果的不同而不同,如燃耗深度、半径、冷却剂密度、燃料密度分布、燃料温度分布)。PPS在使用燃料棒热力学程序进行分析前,先使用先进中子学程序计算给定固定属性情况下不同瞬时属性下的燃料棒径向功率分布结果,然后用燃料棒热力学性能分析程序,根据实际瞬态属性来插值得到真实的燃料棒径向功率分布。

采用PPS进行燃料棒性能分析时,需要针对不同固定属性的燃料棒进行中子学计算,虽然在热力学分析前增加了中子学计算的工作量,但是带来两个好处:由于反应堆堆芯中具有不同固定属性的燃料棒类型较少,只需要为数不多的燃料棒中子学计算即可,对分析计算时间影响不大;

核电厂反应堆堆芯中,燃料棒的固定属性类型一般不会因换料而发生变化,只需计算一次固定属性的燃料棒的中子学问题,后续换料不需要重新计算,中子学计算对燃料棒的热力学分析影响很小。采用PPS后,由于对固定属性不进行插值,因此可以有效地分析 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 及IFBA的燃料棒性能。

燃料棒性能分析计算过程中,若同时考虑所有变量,仍会形成维度很大的功率密度表,增加插值的难度,影响程序的计算速度。为了形成有效的PPS方法,需对瞬态属性变量进行敏感性分析,舍去一些对径向功率密度不敏感的参数,在保证计算精度的前提下提高计算效率。

## 2 燃料棒属性参数的敏感性分析

燃料棒的瞬态属性参数有:燃耗、燃料半径、冷却剂密度、燃料温度、燃料密度、冷却剂温度。采用中子输运程序KYLIN-1<sup>[2]</sup>对各瞬态属性参数单独进行敏感性分析。首先对这些因素选取基准值(表1),然后分析各因素在燃料棒性能分析

表1 参数基准值  
Table 1 Parameter Reference Value

序号	参数	取值
1	燃料半径/cm	0.4096
2	$^{235}\text{U}$ 富集度/%	4.5
3	钆质量分数/%	0
4	ZrB <sub>2</sub> 涂层厚度/cm	0
5	距径比	1.32632
6	燃耗/ $\text{MW}\cdot\text{d}\cdot\text{t}^{-1}(\text{U})$	60000
7	冷却剂密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.7046
8	燃料密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	10.42

过程中变化的范围,根据变化范围判定因素的敏感性。

### 2.1 燃料棒半径及距径比对功率分布的敏感性

燃料棒的极限变化不会超过10%。选取芯块初始半径为0.4096 cm,分别计算其变化4%和10%时的径向功率密度分布。计算结果最大相对偏差为2%,对径向功率密度分布影响较小。因此,不考虑燃料半径和距径比的变化。

### 2.2 冷却剂密度对功率分布的敏感性

冷却剂密度的变化范围一般为0.6~0.8  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。选取两端点进行比较,功率分布的相对偏差小于1%,不用考虑冷却剂密度的变化。

### 2.3 燃料温度对功率分布的敏感性

燃料温度随半径变化较大,温度分布与线功率和功率密度分布相关。选取不同线功率点,通过手动迭代FUPAC程序和KYLIN-1程序,计算相应的温度分布和径向功率密度分布。

功率分布的最大相对偏差为1.8%,可不考虑燃料温度的变化。

### 2.4 燃耗深度对功率分布的敏感性

燃耗在燃料棒性能分析过程中变化较大。选取燃耗为10000  $\text{MW}\cdot\text{d}/\text{t}(\text{U})$ 及50000  $\text{MW}\cdot\text{d}/\text{t}(\text{U})$ 进行比较发现,功率分布最大相对偏差达42%。

### 2.5 燃料密度对功率分布的敏感性

燃料密度随燃耗变化的过程中,径向每一环的密度会不一致。任选一组燃料密度分布计算的径向功率密度分布与其平均密度计算的值比较发现,最大相对偏差达7.8%。

对于 $\text{UO}_2$ 和IFBA燃料,计算的径向功率密度与其平均密度存在如下拟合关系式:

$$f(i) = \left( \frac{\rho_i}{\bar{\rho}} \right)^{0.9} \bar{f}(i) \quad (1)$$

式中,  $f(i)$  为径向功率密度,  $\text{W}/\text{cm}^3$ ;  $\bar{f}(i)$  为径向平均功率密度,  $\text{W}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_i$  为燃料棒径向密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\bar{\rho}$  为燃料棒平均密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

对于  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  燃料, 拟合关系式如下:

$$f(i) = \left( \frac{\rho_i}{\bar{\rho}} \right)^{0.85} \bar{f}(i) \quad (2)$$

## 2.6 敏感性分析小结

综上所述, 燃料和燃料密度对径向功率密度分布影响较大。分析计算中, 首先将富集度、钷质量百分比、 $\text{ZrB}_2$  涂层、燃料半径、冷却剂密度、径向环数等初始状态输入到 KYLIN-1 程序, KYLIN-1 程序根据初始状态计算出对应的径向功率密度分布表, 然后由燃料棒性能分析程序根据计算的实际燃料棒和平均燃料棒密度进行插值, 再根据实际燃料棒密度分布分别应用式(1)或者式(2)进行加权处理。

## 3 模型验证

对于  $\text{UO}_2$  燃料, 将计算结果与文献[1]中的实测结果进行对比。由图 1 可见, 本研究计算的径向功率密度分布与实测结果非常吻合。

对于  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  燃料, 插值计算结果与 KYLIN-1 程序计算结果非常吻合(图 2), 最大相对偏差小于 1%。对于 IFBA 燃料, 插值计算结果与 KYLIN-1 程序计算结果对比, 如图 3 所示, 最大相对偏差小于 1%。

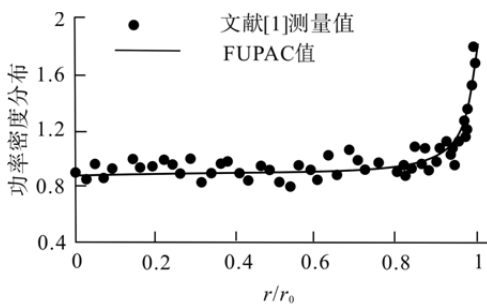


图1  $\text{UO}_2$ 燃料径向功率密度分布比较  
Fig. 1 Comparison of  $\text{UO}_2$  Fuel Radial Power Density Distributions  
燃料 26200 MW d/t (U); 富集度 3.2%

## 4 结论

对已有的 APS 分离方法进行改进, 提出 PPS 分离方法。通过分析燃料棒中子学-热力学分离的瞬态属性对燃料棒功率密度分布的敏感性, 提前

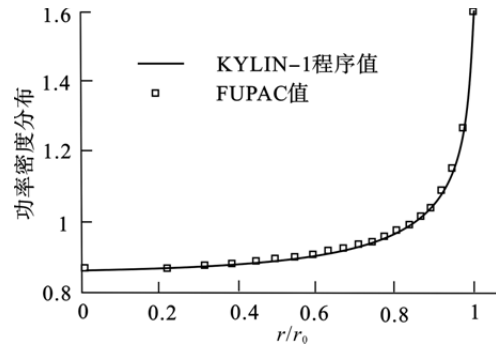


图2  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 燃料径向功率密度分布比较  
Fig. 2 Comparison of  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  Fuel Radial Power Density Distributions  
燃料 1600 MW d/t (U); 富集度 3%;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  质量分数 8%

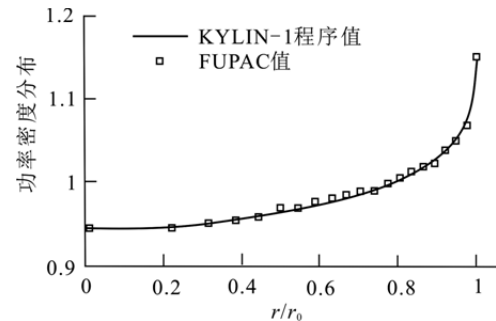


图3 IFBA燃料径向功率密度分布比较  
Fig. 3 Comparison of IFBA fuel radial power density distributions  
燃料 2250 MW d/t (U); 富集度 4.5%;  $\text{ZrB}_2$  厚度为 0.001 cm

预制富集度、钷质量百分比、 $\text{ZrB}_2$  涂层、燃料半径、冷却剂密度等变量, 由反应堆物理程序 KYLIN-1 精确计算生成功率密度分布表, FUPAC 软件根据燃料棒和燃料密度等进行插值计算得到径向功率密度分布。通过与实测结果以及 KYLIN-1 程序结果进行对比验证, 证明了所提出方法的正确性。该方法适用于  $\text{UO}_2$  燃料、 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  燃料以及 IFBA 燃料棒, 具有通用性, 且对富集度、钷质量百分比、燃料棒半径没有范围限制。

## 参考文献:

- [1] Jacoud J L, Vesco Ph. Description and qualification of the Copernic/ Transuranus ( Update Of May 2000 ) Fuel Rod Design Code[R]. 2000.
- [2] 柴晓明, 马永强, 王育威, 等. 堆芯中子学程序系统 SARCS-4.0 的开发及初步验证[J]. 核动力工程, 2013, 34, S1: 24.

(责任编辑: 左成元)