



## 六边形套管型燃料堆芯核设计专用程序试验验证

王连杰, 魏彦琴, 黄世恩, 娄磊, 马永强, 操节宝

### Experimental Verification of Special Nuclear Design Code for Hexagonal Casing Type Fuel Reactor

Wang Lianjie, Wei Yanqin, Huang Shien, Lou Lei, Ma Yongqiang, and Cao Jiebao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.01.0242>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 六边形套管型燃料堆芯临界物理试验方案设计研究

Design and Study of Critical Physical Test Scheme for Core with Hexagonal Jacketed Fuel

核动力工程. 2021, 42(5): 256–260

#### 板型燃料元件反应堆瞬态热工水力分析程序的开发与验证

Development and Verification of Thermal–Hydraulic Transient Analysis Code in Plate–Type Fuel Nuclear Reactor

核动力工程. 2019, 40(5): 18–22

#### 模块式小堆控制棒导向组件设计分析

Design and Analysis of Control Rod Guide Assembly for China Small Modular Reactor

核动力工程. 2018, 39(4): 97–100

#### 吊篮下挂分体式堆内构件设计研究

Design and Research of a Novel RVI with Separated Barrel Hang in Middle of RPV for ACP100

核动力工程. 2019, 40(6): 178–182

#### ARCS-4程序系统临界物理模拟实验验证

Validation of Neutronic Code SARCS-4 by Mock-up Critical Physics Experiments

核动力工程. 2018, 39(3): 166–170

#### 先进中子学栅格计算程序KYLIN-II共振计算基准验证

Benchmark Validation of Resonance Calculation in Advanced Neutronics Lattice Code KYLIN-II

核动力工程. 2019, 40(5): 187–191



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)01-0242-04; doi:10.13832/j.jnpe.2022.01.0242

# 六边形套管型燃料堆芯核设计 专用程序试验验证

王连杰, 魏彦琴, 黄世恩, 娄磊, 马永强, 操节宝

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, 610213

**摘要:** 采用六边形套管型燃料堆芯 (HCTFR) 7 个零功率物理试验方案的试验数据对核设计程序 (CELL+CPLEV2) 的计算精度进行工程验证。验证结果表明, 7 个临界试验方案的临界棒位有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 计算偏差均在  $\pm 0.8\%$  以内, 与试验结果符合较好, 控制棒价值和停堆深度计算偏差也都在可接受范围内, 表明 CELL+CPLEV2 程序具有较高的计算精度和可靠性, 可用于 HCTFR 的核设计。

**关键词:** 六边形套管型燃料堆芯 (HCTFR); 临界物理试验; 核设计程序; 试验验证

**中图分类号:** TL329 **文献标志码:** A

## Experimental Verification of Special Nuclear Design Code for Hexagonal Casing Type Fuel Reactor

Wang Lianjie, Wei Yanqin, Huang Shien, Lou Lei, Ma Yongqiang, Cao Jiebao

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Based on the experimental data of seven Zero Power physical test schemes of Hexagonal Casing Type Fuel Reactor (HCTFR), the calculation accuracy of the nuclear design codes CELL and CPLEV2 was engineering verified. According to the verification calculation results, the calculation deviations of the critical rod position effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) of the seven critical test schemes are all within  $\pm 0.8\%$ , which is in good agreement with the experimental results. The value of control rods and the calculation deviation of shutdown depth are also in the acceptable range, indicating that CELL+CPLEV2 has high calculation accuracy and reliability and can be used in HCTFR core design.

**Key words:** Hexagonal Casing Type Fuel Reactor (HCTFR), Critical physical experiment, Nuclear design code, Experimental validation

### 0 前言

六边形套管型燃料堆芯 (HCTFR) 核设计采用专用计算程序 (CELL+CPLEV2), 堆芯方案、孔道布置方案、燃料组件、控制棒组件等均不同于以往堆芯, 因此有必要开展堆芯临界物理试验, 以检验 CELL+CPLEV2 应用于 HCTFR 核设计的计算精度和可靠性。HCTFR 临界物理试验内容包括临界质量测量、临界棒位测量、停堆深度测

量、控制棒微分和积分价值测量等。HCTFR 临界物理试验共设计了 11 个临界物理试验方案<sup>[1]</sup>, 包含 6 个临界质量测量试验方案和 5 个零功率物理试验方案。试验开展期间, 由于其中 3 个方案后备反应性较大, 补充了 2 个后备反应性较小的零功率物理试验方案。

本文根据临界物理试验内容, 在临界质量测量试验结果验证分析<sup>[2]</sup>的基础上, 对 7 个零功率

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-11-02

作者简介: 王连杰 (1983—), 男, 研究员级高级工程师, 现从事反应堆物理设计研究工作, E-mail: mcd2264@126.com

物理试验方案进行计算和偏差分析，验证 CELL+CPLEV2 的计算精度和可靠性。

## 1 试验方案简介

HCTFR 核设计具有组件类型多样、堆芯布置灵活多变的特点。临界物理试验方案的设置充分考虑了堆芯布置的灵活性，共包含 5 种类型的零功率试验堆芯，具体涉及 7 个临界装载方案，涵盖了核设计涉及的所有组件类型，如燃料组件、铍组件、铝组件、靶件、控制棒、不同类型的辐照考验孔道等。表 1 给出了各临界装载方案使用的组件类型和数量。

表 1 各临界装载方案使用的组件类型和数量

Tab. 1 Types and Quantities of Assemblies Used in Each Critical Loading Scheme

| 方案 | 燃料组件/盒 | 靶件/盒 | 铍组件/盒 | 铝组件/盒 | 孔道(填充物) | 控制棒/根 |
|----|--------|------|-------|-------|---------|-------|
| 1  | 20     | —    | 47    | —     | —       | 12    |
| 2  | 20     | 4    | 43    | —     | —       | 12    |
| 3  | 20     | —    | 47    | 71    | —       | 12    |
| 4  | 16     | —    | 25    | 71    | —       | 12    |
| 5  | 20     | —    | 37    | 67    | 2(轻水)   | 12    |
| 6  | 20     | —    | 37    | 67    | 2(空气)   | 12    |
| 7  | 16     | —    | 25    | 60    | 2(轻水)   | 12    |

“—”表示未使用该类型组件或无孔道

## 2 计算程序和模型

### 2.1 计算程序

HCTFR 核设计采用 CELL+CPLEV2，包括截面参数计算程序 CELL 和堆芯核设计计算程序 CPLEV2。

CELL 是分层圆环组件少群截面参数计算程序，采用 WIMS/D-4 格式 69 群截面库。该程序在完成共振能区的有效吸收截面和温度内插热群截面计算之后，再进行各核素的少群微观或宏观截面参数计算。CELL 采用碰撞几率方法求解多群中子积分输运方程，对非燃料栅元采用超栅元计算模型。本文用 CELL 计算燃料组件、铍组件、铝组件等少群参数，作为 CPLEV2 的输入参数。

CPLEV2 是基于细网有限差分方法的三维少群燃料管理程序，同时具备堆芯燃料管理计算功

能和考验回路计算功能。CPLEV2 能够进行堆芯倒换料计算，给出随燃耗变化的径向和轴向功率峰因子、堆芯功率密度分布、中子注量率分布、重要核素的剩余量、控制棒的微分和积分价值、瞬发中子寿命以及有效缓发中子份额等参数。CPLEV2 具备多回路计算功能，能够给出考验回路中辐照考验组件的精细功率分布和注量率分布以及各燃耗时刻考验燃料组件的燃耗等参数。本文采用 CELL+CPLEV2 进行临界物理试验方案的临界棒位有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ )、控制棒价值、停堆深度等参数计算。

### 2.2 计算模型

在 HCTFR 临界质量测量试验结果验证分析中，进行了燃料组件栅元计算模型、活性区内铍组件栅元计算模型、活性区外铍组件栅元计算模型、铝组件栅元计算模型和堆芯计算模型的初步验证，并提出了近活性区铝组件计算模型，计算结果与试验值符合较好<sup>[2]</sup>。

本文沿用临界质量测量试验结果验证分析提出的栅元计算模型和堆芯计算模型<sup>[2]</sup>，并在此基础上增加了靶件、控制棒和孔道栅元计算模型。

## 3 试验结果验证分析

### 3.1 临界棒位 $k_{\text{eff}}$

堆芯临界棒位的  $k_{\text{eff}}$  计算结果见表 2。由表 2 可以看到，方案 1~7 的计算偏差都在  $\pm 0.8\%$  以内，与试验结果符合较好，表明核设计程序计算各种类型的堆芯布置方案的临界棒位都具有较高的计算精度。

表 2 堆芯临界棒位  $k_{\text{eff}}$  验证计算结果

Tab. 2  $k_{\text{eff}}$  Verification Calculation Results of Critical Core Rod Position

| 方案 | 计算值     | 相对偏差/% |
|----|---------|--------|
| 1  | 1.00207 | 0.2    |
| 2  | 0.99674 | -0.3   |
| 3  | 1.00780 | 0.8    |
| 4  | 1.00357 | 0.4    |
| 5  | 1.00414 | 0.4    |
| 6  | 1.00278 | 0.3    |
| 7  | 0.99979 | 0      |

### 3.2 控制棒积分价值

表 3 给出了不同方案的具有代表性的控制棒单棒及棒组的冷态积分价值校核计算结果。由表 3 可以看到，除了方案 7 的 B2 棒和 B 棒组校核偏差略大于 20%，其他情况下的控制棒积分价值校核计算偏差都在±20% 以内。

表 3 控制棒积分价值校核计算结果

Tab. 3 Checking Calculation Results of Integral Value of Control Rods

| 方案 | 被测棒 | 测量区间/%  | 试验值/<br>pcm | 计算值/<br>pcm | 相对偏差/% |
|----|-----|---------|-------------|-------------|--------|
| 1  | B1棒 | 0~33.5  | 3626        | 3572        | -1.5   |
|    | B2棒 | 0~33.6  | 3626        | 3580        | -1.3   |
|    | B棒组 | 0~20.35 | 3736        | 3896        | 4.3    |
|    | C1棒 | 0~35.8  | 3650        | 3565        | -2.3   |
|    | C2棒 | 0~34.8  | 3658        | 3456        | -5.5   |
|    | C棒组 | 0~20.25 | 3652        | 3567        | -2.3   |
| 2  | B1棒 | 0~100   | 4910        | 5387        | 9.7    |
|    | B2棒 | 0~100   | 4937        | 5387        | 9.1    |
|    | B棒组 | 0~100   | 10688       | 11753       | 10.0   |
|    | C1棒 | 0~100   | 6646        | 6990        | 5.2    |
|    | C2棒 | 0~100   | 6571        | 6985        | 6.3    |
|    | C棒组 | 0~59.6  | 11753       | 11592       | -1.4   |
| 4  | B1棒 | 0~100   | 4260        | 4634        | 8.8    |
|    | B2棒 | 0~100   | 4157        | 4631        | 11.4   |
|    | B棒组 | 0~100   | 8625        | 9349        | 8.4    |
|    | C1棒 | 0~100   | 6467        | 6509        | 0.7    |
|    | C2棒 | 0~100   | 6564        | 6516        | -0.7   |
|    | C棒组 | 0~100   | 12374       | 12579       | 1.7    |
| 7  | B1棒 | 0~100   | 3979        | 4685        | 17.8   |
|    | B2棒 | 0~100   | 3862        | 4682        | 21.2   |
|    | B棒组 | 0~100   | 7792        | 9390        | 20.5   |
|    | C1棒 | 0~100   | 7471        | 6587        | -11.8  |
|    | C2棒 | 0~100   | 7558        | 6590        | -12.8  |
|    | C棒组 | 0~100   | 12365       | 12612       | 2.0    |

1 pcm=10<sup>-5</sup>

### 3.3 控制棒微分价值

图 1~图 6 给出了不同方案代表性棒组的冷态微分价值曲线。可以看到，除了方案 2 的计算值偏大外，其他情况下的控制棒微分价值曲线计算值均与试验值符合较好。

### 3.4 停堆深度

表 4 给出了各方案冷态停堆深度校核计算结

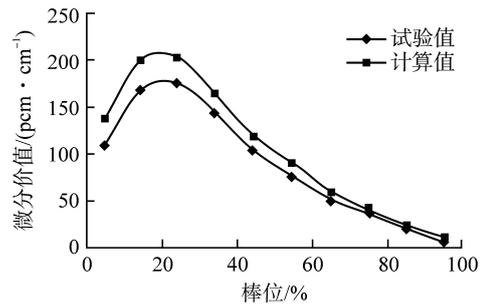


图 1 B 棒组微分价值曲线 (方案 2)

Fig. 1 Differential Worth Curve of B Rod Group (Scheme 2)

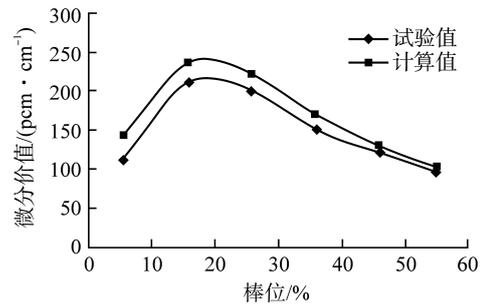


图 2 C 棒组微分价值曲线 (方案 2)

Fig. 2 Differential Worth Curve of C Rod Group (Scheme 2)

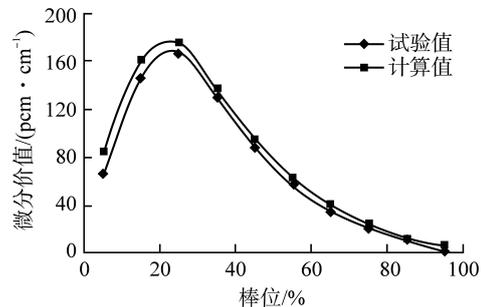


图 3 B 棒组微分价值曲线 (方案 4)

Fig. 3 Differential Worth Curve of B Rod Group (Scheme 4)

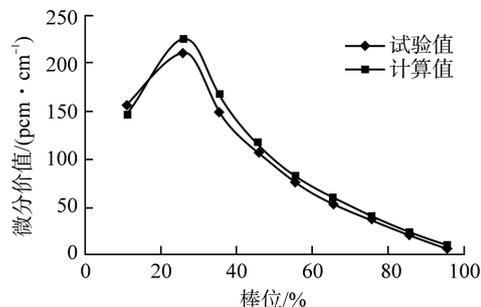


图 4 C 棒组微分价值曲线 (方案 4)

Fig. 4 Differential Worth Curve of C Rod Group (Scheme 4)

果。由表 4 可以看到，所有方案的计算偏差均在±20% 以内，与试验值符合良好。

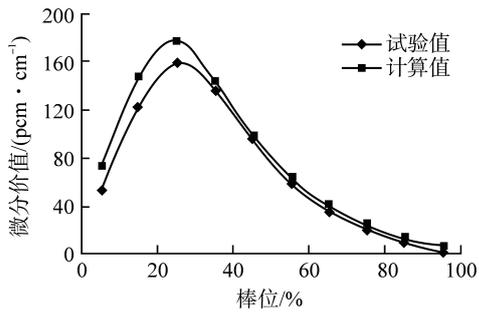


图5 B棒组微分价值曲线(方案7)

Fig. 5 Differential Worth Curve of B Rod Group (Scheme 7)

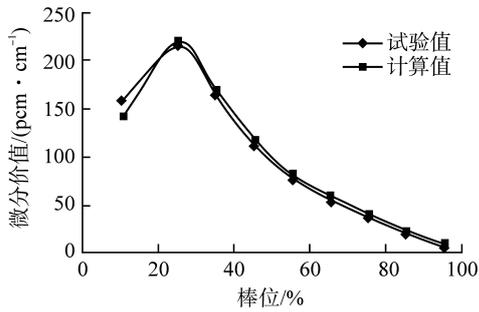


图6 C棒组微分价值曲线(方案7)

Fig. 6 Differential Worth Curve of C Rod Group (Scheme 7)

### 4 结论

本文采用HCTFR临界物理试验结果对CELL+CPLEV2进行验证计算,计算结果表明,所有临

表4 停堆深度校核计算结果

Tab. 4 Checking Calculation Results of Shutdown Depth

| 方案 | 测量值/pcm | 计算值/pcm | 相对偏差/% |
|----|---------|---------|--------|
| 1  | -17748  | -18953  | 6.8    |
| 2  | -25176  | -24952  | -0.9   |
| 3  | -16070  | -13598  | -15.4  |
| 4  | -27694  | -23532  | -15.0  |
| 5  | -17904  | -16004  | -10.6  |
| 6  | -17797  | -16331  | -8.2   |
| 7  | -26193  | -24550  | -6.3   |

界试验方案的临界棒位 $k_{eff}$ 计算偏差均在 $\pm 0.8\%$ 以内,与试验结果符合较好,控制棒价值和停堆深度计算偏差也都在可接受范围内,表明HCTFR的CELL+CPLEV2具有较高的计算精度和可靠性,可用于HCTFR核设计。

#### 参考文献:

- [1] 姜磊,王连杰,魏彦琴,等.六边形套管型燃料堆芯临界物理试验方案设计研究[J].核动力工程,2021,42(5):256-260.
- [2] 魏彦琴,黄世恩,王连杰,等.六边形套管型燃料堆芯临界质量测量试验结果验证分析[J].核动力工程,2022,43(1):238-241.

(责任编辑:杨灵芳)