

# Study on the Influence of Positioning Lattice on Thermal Hydraulic Characteristics of Fuel Rod

Cheng Lai, Jinchuan Bai, Cong Jin, Zhangnan Xu, Liang Yuan

Suzhou Thermal Research Institute, Shenzhen Guangdong

Email: baijinchuan@cgnpc.com.cn

Received: Sep. 28<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 13<sup>th</sup>, 2018; published: Oct. 20<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Based on the ontology test of Benchmark, it was studied that how the positioning lattice spacing influenced on the critical heat flux and its occurrence point as well as the thermal hydraulic parameters of the critical passage. The results show that as the distance between the positioning lattice increases, the critical point moves upstream of the next positioning lattice, the critical heat flux increases, and the exit mass velocity of the critical passage decreases.

## Keywords

Benchmark Test, Positioning Lattice, Critical Heat Flux

---

# 定位格架对燃料棒热工水力特性影响的研究

赖 诚, 白金川, 金 聪, 徐樟楠, 袁 亮

苏州热工研究院有限公司, 广东 深圳

Email: baijinchuan@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2018年9月28日; 录用日期: 2018年10月13日; 发布日期: 2018年10月20日

---

## 摘 要

根据临界热流密度Benchmark本体试验, 研究定位格架间距对临界热流密度大小和发生点以及发生临界通道的热工水力参数的影响。分析结果表明, 随着定位格架间距的增大, 临界点向下一个定位格架上游移动, 临界热流密度增大, 发生临界通道的出口质量流速减小。

## 关键词

Benchmark试验, 定位格架, 临界热流密度

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

定位格架是压水堆燃料组件的关键部件之一, 它除了在结构上起支撑和定位之外, 还能改善反应堆内流体的热工水力特性, 提高反应堆的安全性。燃料组件的临界热流密度(CHF)综合反映了反应堆燃料组件内冷却剂的流动和传热特性, 直接影响到组件的安全裕量和最小临界热流密度比(MDNBR)。由于定位格架交混长度[1]的存在, 定位格架间距的不同改变了 MDNBR 的大小和发生点, 从而关系到燃料组件的安全性。

本文在临界热流密度 Benchmark  $5 \times 5$  试验本体的基础上, 对沿轴向方向等间距设置 13 个定位格架的工况进行分析。通过改变定位格架间距, 计算分析定位格架间距对 MDNBR 点的位置以及发生临界的通道热工水力参数的影响。

## 2. 燃料组件结构

在压水堆燃料组件中, 定位格架沿轴向长度等间距排列。定位格架的存在提高了冷却剂的传热系数, 但同时增加了当地压降。如图 1、表 1 所示, 基于临界热流密度 BENCHMARK  $5 \times 5$  实验本体结构[2], 分析的子通道划分如图所示。该组件由 25 根棒束, 总长度 3658 mm, 36 个子通道, 其中角通道 4 个, 边通道 16 个。在组件的入口和出口处设置非交混格架, 沿轴向长度方向等间距排列交混格架和简单支撑格架。

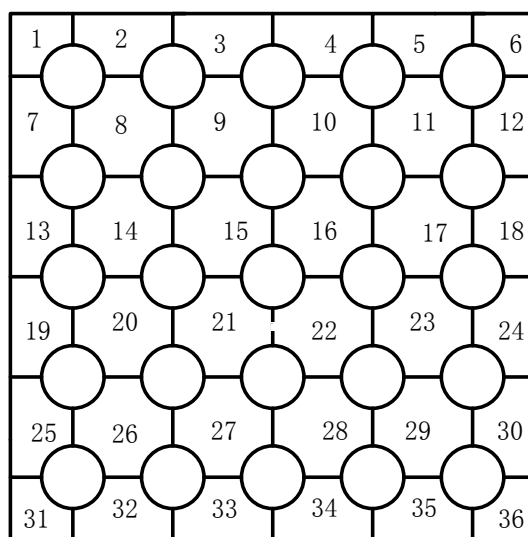
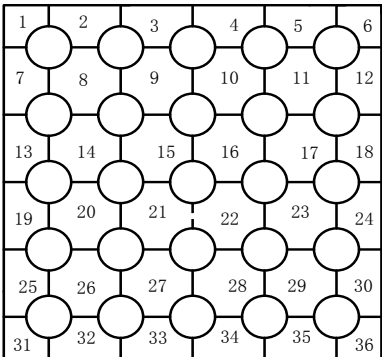
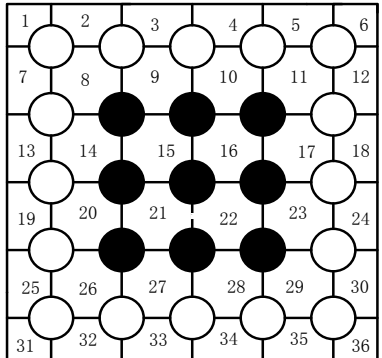


Figure 1.  $5 \times 5$  Component Subchannel Partition

图 1.  $5 \times 5$  组件子通道划分

**Table 1.**  $5 \times 5$  component parameters  
**表 1.**  $5 \times 5$  格架参数

组件类型						
加热棒数	25					
棒间距(mm)	12.6					
轴向加热长度(mm)	3658					
流道内宽(mm)	64.9					
径向功率分布						
轴向功率分布	余弦分布					
定位格架数	13					
定位格架间距(mm)	254	264	274	284	294	304

### 3. 计算方法

#### 3.1. 子通道划分

将图 1 所示的燃料组件截面示意图划分为四种典型类型的子通道：角子通道、边子通道和两种中心通道，如图 2 所示。沿轴向将燃料组件划分为 100 个节点，不考虑流体所受定位格架的流动压降，只考虑其形阻压降。燃料组件的轴向功率分布采用余弦分布，径向功率分布如图 3 所示，其中心燃料棒相对功率份额与边通道燃料棒相对功率份额之比 C/P 为 1:0.85。

#### 3.2. 计算模型

##### 3.2.1. 子通道程序

为了便于采用子通道概念分析燃料组件中的冷却剂流动机理，本文作以下假设：

- 1) 沸腾时，各子通道内的流体为一维两相可分离的滑移流模型。

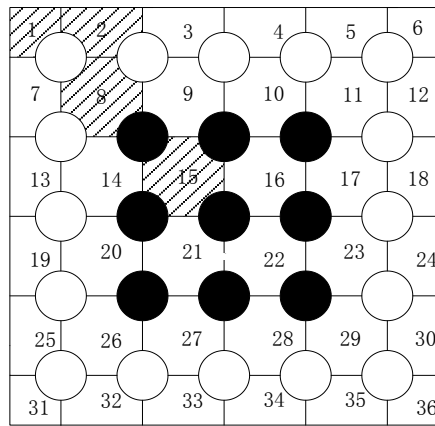


Figure 2. Subchannel distribution diagram  
图 2. 子通道分布图

0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
0.85	1	1	1	0.85
0.85	1	1	1	0.85
0.85	1	1	1	0.85
0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

Figure 3. Radial power distribution diagram  
图 3. 径向功率分布示意图

- 2) 空泡份额为焓，压力，质量流率，轴向位置 and 时间的函数。
- 3) 相邻子通道间的紊流交混不会引起流量的再分配。
- 4) 紊流交混可以叠加在能引起流量再分配的横流上。
- 5) 忽略声速传递的影响。
- 6) 在子通道内，横流速度远小于轴向速度。

基于以上假设和流动的三大定律，可以得到燃料组件的冷却剂流动的守恒方程[3]如下：  
连续性方程：

$$A_i \frac{\partial \rho_{m,i}}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} = -\sum_j (w_{ij} + w'_{ij})$$

能量守恒方程：

$$\frac{m_i}{u''} \frac{\partial h_i}{\partial t} + m_i \frac{\partial h_i}{\partial x} = q' - \sum_j w'_{ij} (h_i - h_j) - \sum_j c (t_i - t_j) + h_i \sum_j w_{ij} - \sum_j h^* w_{ij}$$

轴向动量守恒方程：

$$\frac{1}{A_i} \frac{\partial m_i}{\partial t} - 2u_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} = a' + \frac{2u_i \sum_j w_{ij} - \sum_j u^* w_{ij}}{A_i}$$

$$a' = \left( \frac{m_i}{A_i} \right)^2 \left( \frac{v_i f \phi}{2D} + \frac{Kv'_i}{2\Delta x} + A_i \frac{\partial (v'_i/A_i)}{\partial x} + \rho_i g \cos \theta \right) - f_T \frac{\sum_j w'_{ij} (u_i - u_j)}{A_i}$$

横向动量守恒方程:

$$\frac{\partial w_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial w_{ij} u_i}{\partial x} = \frac{s}{l} c w_{ij} + \frac{s}{l} (P_i - P_j)$$

### 3.2.2. 计算流程图

子通道程序的计算流程图如图 4 所示。

### 3.3. 临界热流密度(CHF)关系式

本文选用了两个参数范围较广且广泛应用于压水堆安全分析的临界热流密关系式 B&W-2 和 W-3 关系式来预测临界热流密度 Benchmark 5 × 5 试验, 并比较两关系式与试验的结果, 然后分析定位格架间距对临界发生点位置以及热工水力参数的影响。表 2 列出了 B&W-2 [4]和 W-3 [5]的关系式和其适用范围。

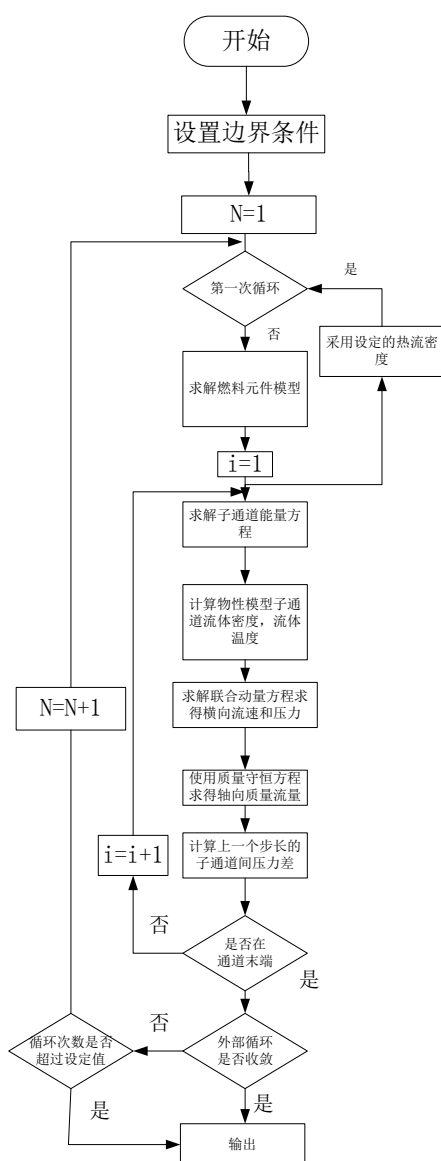


Figure 4. The subchannel program calculates the flow chart  
图 4. 子通道程序计算流程图

**Table 2.** Critical heat flux formula  
**表 2.** 临界热流密度公式

关系式	表达式	数据基础
B&W-2 关系式	$q''_{CHF,EU} = 3.155 \times 10^{-3} (1.155 - 16.025 D_e)$ $\times \left[ 3.702 \times 10^7 (4.3604 \times 10^{-4} G)^B \right. \\ \left. - 48.21 G H_{fg} \right] / \left[ 12.71 (2.252 \times 10^{-3} G)^4 \right]$ $A = 0.712 + 3.006 \times 10^{-5} (p - 13790)$ $B = 0.834 + 9.93 \times 10^{-5} (p - 13790)$	$L_b = 1.83 \text{ m}$ $D_e = 0.0051 \sim 0.0127 \text{ m}$ $p = 13800 \sim 16550 \text{ kPa}$ $G = 1020 \sim 5425 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $x = -0.03 \sim 0.2$
W-3 关系式	$q''_{CHF,EU} = 3.14 \times 10^6 \left\{ (2.022 - 6.238 \times 10^{-8} p) \right. \\ \left. + (0.1722 - 1.43 \times 10^{-8} p) \times \exp \left[ (18.177 - 5.987 \times 10^{-7} p) x_e \right] \right\}$ $\times \left[ (0.1484 - 1.596 x_e + 0.1729 x_e  x_e ) \times \frac{0.2049 G}{10^6} + 1.037 \right]$ $\times (1.157 - 0.869 x_e) [0.2664 + 0.8357 \exp(-124 D_e)]$ $\times [0.8258 + 0.341 \times 10^{-6} (h_{fs} - h_{f,in})]$	$L_b = 0.254 \sim 3.668 \text{ m}$ $D_e = 0.00508 \sim 0.0178 \text{ m}$ $p = 6895 \sim 15860 \text{ kPa}$ $G = (4.9 \sim 24.5) \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ $x = -0.03 \sim 0.2$

## 4. 计算结果与讨论

本文通过临界热流密度关系式的比较, 选用合适的计算关系式分析定位格架间距对 5 × 5 燃料组件的临界发生点位置和该点热工水力参数的影响。

### 4.1. 临界热流密度计算方法比较

图 5 给出了临界热流密度 Benchmark 5 × 5 试验的数据与 B&W-2 和 W-3 公式所计算的 CHF 值的对比。从图 3 可以看到在临界热流密度 Benchmark 5 × 5 的试验中 W-3 公式与试验结果符合较好, 而 B&W-2 在某些工况下的计算结果不可靠。

### 4.2. 定位格架间距对组件临界点的影响

在临界热流密度 Benchmark 5 × 5 试验的条件下, 由图 5 确定采用 W-3 关系式分析沿轴向长度分布 13 个定位格架的工况进行定位格架间距对组件临界热流密度发生点和发生临界的通道热工水力参数的影响。

由图 6 给出了沿轴向分布 13 个定位格架工况在改变定位格架间距时, 组件临界热流密度发生点和临

界热流密度大小的模拟结果。图 6 显示当间距比较小时，临界发生点位于定位格架下游处且临界热流密度较小，随着定位格架间距的变大，轴向流体交混越来越充分临界发生点向下一个定位格架上游靠近且临界热流密度大致保持不变。

图 7 是发生临界的通道质量流速随定位格架位置的变化结果。图 8 可以看出临界通道的质量流速沿轴向高度逐渐减少，随着格架间距的增大，出口质量流速逐渐变小。结合图 9，临界通道空泡份额沿轴向的变化可以知道，由于空泡产生前，通道中冷却剂由单相变为两相，摩擦系数将增加，这时出现一定的交混，因此在空泡起始处质量流密度发生突变。

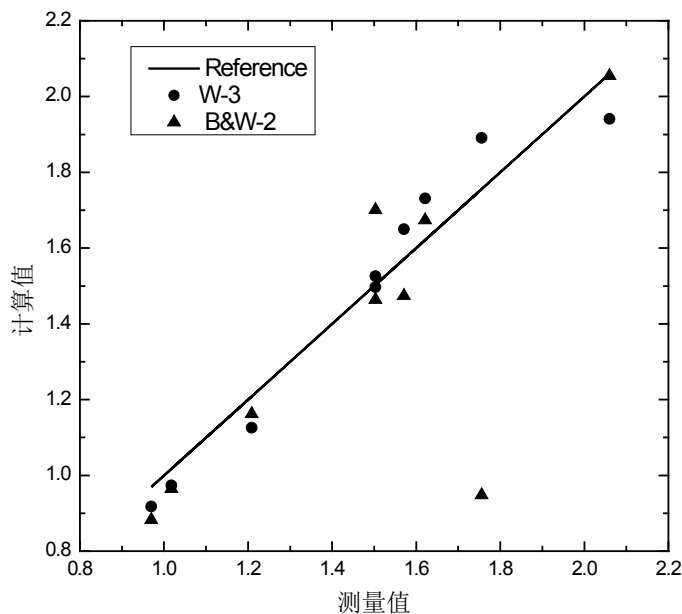


Figure 5. Comparison between the calculated value and the test value of the critical heat flux relation

图 5. 临界热流密度关系式计算值与试验值对比图

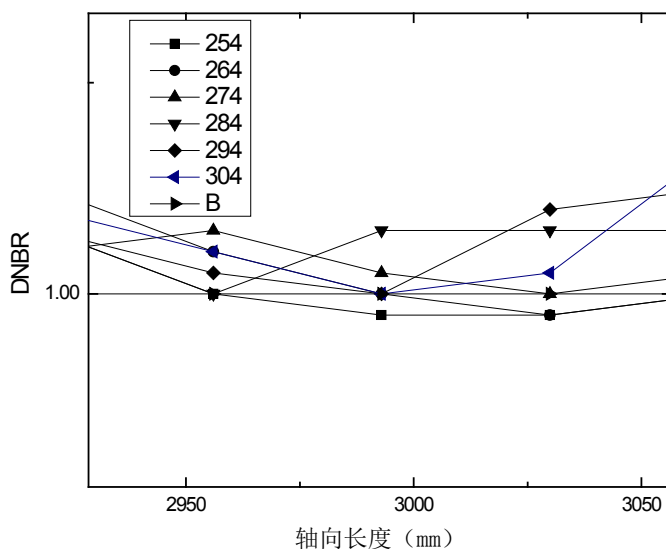


Figure 6. MDNBR distribution under spacing change

图 6. 格架间距变化下的 MDNBR 分布

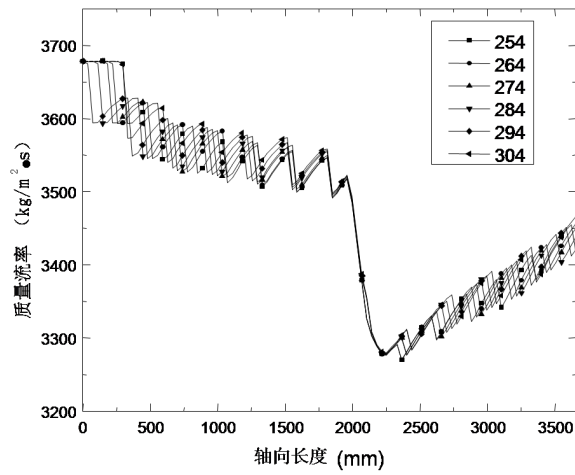


Figure 7. Mass flow rate under spacing change  
 图 7. 格架间距变化下的临界通道轴向质量流速

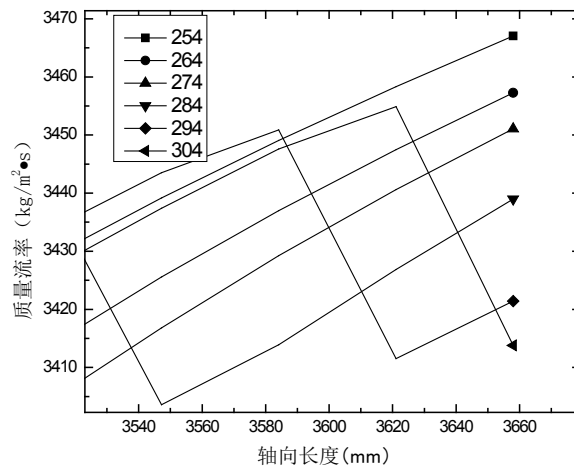


Figure 8. Critical exit mass velocity under spacing change  
 图 8. 格架间距变化下临界通道出口质量流速

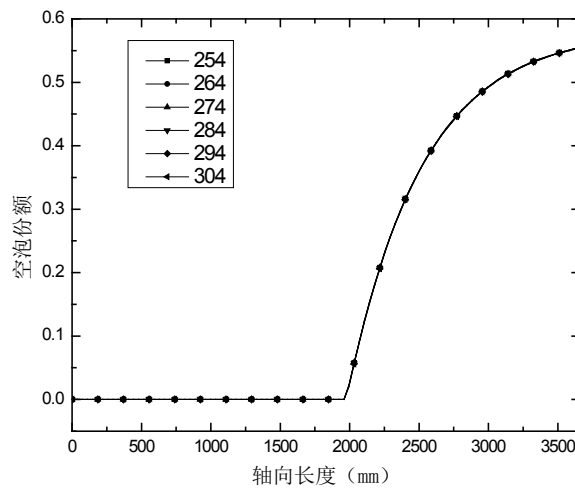


Figure 9. Critical exit bubble under spacing change  
 图 9. 格架间距变化下临界通道空泡份额轴向分布



## 5. 结论

本文以临界热流密度 Benchmark 试验本体为研究对象, 首先比较临界热流密度关系式 B&W-2 和 W-3, 并选用 W-3 关系式分析定位格架间距对  $5 \times 5$  燃料组件临界热流密度的影响, 结论如下:

- 1) 定位格架的存在加强了流体的交混。随着定位格架间距的增大, 交混越充分, 使得临界热流密度变大, 同时临界点向下一个定位格架的上游移动。
- 2) 当定位格架的间距大于定位格架的交混长度时, 组件临界热流密度和临界点的位置基本保持不变。
- 3) 随着定位格架间距的增大, 发生临界的通道的质量流速沿轴线高度方向逐渐减小, 且出口质量流速也相应变小。

## 参考文献

- [1] 张龙根, 何玉枝, 朱炳艺. 压水堆燃料组件定位格架的交混长度[J]. 原子能科学技术, 1982, 16(3): 272.
- [2] Rubin, A.J. (2011) OECD/NRC Benchmark Based on NUPEC PWR Subchannel and Bundle Test (PSBT)-Analysis Using Subchannel Code CTF and System Code Trace. Pennsylvania State University, State College.
- [3] Jackson, J.W. and Cobra N.E. (1981) IIIc/MIT-2: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Element. Todreas. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Cambridge.
- [4] 张金玲, 郭玉君, 秋穗正, 等. 反应堆临界热流密度的计算[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(5): 118-123.
- [5] 于平安, 朱瑞安, 喻真烷, 等. 核反应堆热工分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)