

Evaluation Study of the PWR DNB Model in the RETRAN-3D Code

Jiange Liu¹, Yisong Hu¹, Jinhong Zhang², Xiaohua Jiang¹

¹China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

Email: kk12357890@126.com

Received: Apr. 9th, 2016; accepted: Apr. 21st, 2016; published: Apr. 27th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

The paper separately chooses four critical heat flux correlations in the RETRAN-3D code which is used for Pressurized Water Reactor (PWR) Departure Nucleate Boiling (DNB) calculation. Based on the international 5×5 pressurized water reactor fuel assembly critical heat flux experimental data used for input thermal parameters, 35 total experimental cases with widely pressure range of high, middle, low pressure are calculated to obtain the Minimum DNBR (MDNBR) results. The results of RETRAN-3D code are compared with the basically exactly value from sub-channel code FLICAIII-F. The calculation accuracy of the W-3, B&W-2, MacBeth and Bowring formula in a wide range of pressure is specially analyzed. The results show that, the accuracy of the W-3 formula in a wide range of pressure is better than the other three formulas, and its results are most close to the sub-channel code results in the high and middle pressure range. It is acceptable for B&W-2 formula in the high and middle pressure range, but the deviation in the high pressure is big and especially bigger in low pressure. The MacBeth formula is proper for low pressure, not for high and middle pressure range. The Bowring formula can be used in high and middle pressure range, not in low pressure. The final conclusion is that, during the PWR core MDNBR calculation using RETRAN-3D code in the relatively wide pressure range, the preference critical heat flux model is W-3 formula.

Keywords

RETRAN-3D Code, W-3 Formula, B&W-2 Formula, MacBeth Formula, Bowring Formula

RETRAN-3D程序PWR DNB模型评价研究

刘建阁¹, 胡艺嵩¹, 张金红², 蒋晓华¹

¹中广核研究院, 广东 深圳

²中科院应用物理研究所, 上海

Email: kk12357890@126.com

收稿日期: 2016年4月9日; 录用日期: 2016年4月21日; 发布日期: 2016年4月27日

摘 要

分别选用RETRAN-3D程序中用于计算压水堆(PWR)偏离泡核沸腾(DNB)的四个临界热流密度关系式模型、以国际5×5压水堆燃料组件临界热流密度实验数据为输入热工参数, 计算了高、中、低压力范围内共35个实验工况的最小偏离泡核沸腾比(MDNBR), 并以子通道程序FLICAIII-F的计算结果为参考基准对RETRAN-3D程序的计算结果进行了评价研究, 重点分析了W-3公式、B&W-2公式、MacBeth公式和Bowring公式在较宽压力范围内的计算准确性, 结果表明: W-3公式在高、中、低压力范围内计算准确度较其余三个公式好, 且在高、中压力范围内与子通道分析结果最为接近; B & W-2公式相对比较适合中、高压范围内的计算, 但在高压下偏差稍大, 而在低压下偏差更大; MacBeth公式适合低压范围内计算, 在中、高压下偏差较大; Bowring公式适合在高、中压范围内计算, 在低压下误差较大。综上分析可得出: 在用RETRAN-3D程序计算压水堆在较宽压力瞬变范围内的堆芯MDNBR值时, 优选公式为W-3公式。

关键词

RETRAN-3D程序, W-3公式, B&W-2公式, MacBeth公式, Bowring公式

1. 引言

压水堆运行与安全分析中, 堆芯最小偏离泡核沸腾比(MDNBR)值是判断燃料组件是否发生沸腾临界的关键参数, 为了准确计算瞬态过程中堆芯MDNBR情况, 系统分析程序(如: RELAP5、RETRAN、THEMIS等)已经被植入各种临界热流密度表格或关系式, 从而比较燃料表面的实际热流密度与临界热流密度的偏离状态。对于系统程序而言, 由于早期计算机资源和数值算法的局限性, 不可能采用类似子通道程序的模拟方法, 而是将各种不利因素惩罚至一个单独的热通道上来进行MDNBR计算, 这种方法尽管不如子通道模拟的准确和现实, 但却可相对较为保守地捕捉堆芯MDNBR的趋势和大小, 并在一定程度上得到认可, 如RETRAN程序[1]-[5]。在这些文献中仅根据运行工况选择其中关系式进行MDNBR计算, 对每个关系式在较宽压力范围内的适用性并没有详细的研究, 也没发现后续更深的量化研究报告。

由于RETRAN-3D程序提供了多个可选的临界热流密度(CHF)计算关系式[6]-[8], 用于压水堆的关系式有: W-3关系式、B&W-2关系式、MacBeth关系式、Bowring关系式; 用于沸水堆的关系式有: Barnett关系式、Janssen-Levy关系式、MacBeth关系式、Bowring关系式。这些关系式依据局部实验数据(如: 8 mm管径、均匀加热、基于圆管等)进行拟合, 在程序中使用时需要根据燃料组件情况引入适当的修正因子(如: 非均匀加热、当量直径、棒束流动等), 同时关系式进行了外推延伸以拓展范围和便于数值计算, 进而增加了选定关系式的难度。因此, 有必要结合燃料组件临界热流密度基准实验确定出关系式的适用范围。

基于此, 本文根据RETRAN-3D用户手册模型以及相关参考文献, 梳理了RETRAN-3D程序中适用于PWR的CHF关系式所依赖的相关实验数据基础, 选择国际经合组织核能研究机构下压水堆燃料组件典型CHF实验工况数据, 用程序中的四个关系式(W-3、B&W-2、MacBeth、Bowring)进行MDNBR预测值计算, 并与子通道程序FLICAIII-F的计算结果进行比较, 研究高压(14~17 MPa)、中压(9~14 MPa)、低

压(4~5MPa)范围内各个关系式的计算准确性。

2. 适用于 PWR 的 CHF 关系式实验数据基础

RETRAN-3D 程序中用于 PWR 的 CHF 计算关系式是: W-3、B&W-2、MacBeth、Bowring。这四个关系式的函数表达形式和依据实验数据基础见表 1 所示,公式的具体表达式见表中相关的参考文献。每个关系式均有自身适用范围,而程序为了拓展应用范围,通过施加修正因子的方法进行处理,因此每个公式的使用范围在程序中已经被延伸,这反而使得关系式在较宽压力、流量范围内的精度受限。

3. PSBT 5 × 5 压水堆燃料组件实验介绍

国际经合组织核能研究机构压水堆子通道和棒束实验(PSBT)系列中 5 × 5 矩形棒束型燃料组件实验装置的尺寸、轴向与径向功率分布类型详见文献[11] [12],实验装置主要参数见表 2 所示。挑选出 35 个

Table 1. CHF correlation and its experimental data base

表 1. CHF 关系式及实验数据基础

CHF 关系式名称	函数形式	实验数据范围
W-3 关系式[9] [10]	$q = f(p, G, x, h)$ 临界热流密度 q 是压力 p 、质量流速 G 、含汽率 x 、焓值 h 的综合函数,对于含定位格架棒束,需要将上式乘以相关修正因子	$p = (6.895 \sim 16.55) \text{ MPa}$ $G = (1360 \sim 6782) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $X = -0.25 \sim +0.15$ $D = (0.0051 \sim 0.01778) \text{ m}$ $L = (0.254 \sim 3.668) \text{ m}$
B&W-2 关系式[6]	$q = f(p, G, x, h)$ 临界热流密度 q 是压力 p 、质量流速 G 、含汽率 x 、焓值 h 的综合函数	$p = (13.790 \sim 16.547) \text{ MPa}$ $G = (8.78 \sim 46.8) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $x = -0.03 \sim +0.2$ $d = (0.00508 \sim 0.0127) \text{ m}$ $L = 1.8288 \text{ m}$
MacBeth 关系式[10]	$q = f_1(p, G, x, h), (x < 0)$ $q = f_2(p, G, x, h), (x > 0)$ 临界热流密度 q 是压力 p 、质量流速 G 、含汽率 x 、焓值 h 的综合函数	$X < 0$ 时: $p = (0.1 \sim 13.8) \text{ MPa}$ $G = (13.6 \sim 841.0) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $d = (0.003 \sim 0.01) \text{ m}$ $L = 0.15 \sim 3.12 \text{ m}$ $x > 0$ 时: $p = (0.103) \text{ MPa}$ $G = (14.0 \sim 5750.0) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $d = (0.001 \sim 0.0239) \text{ m}$ $L = 0.0254 \sim 0.86 \text{ m}$
Bowring 关系式[10]	$q = f(p, d, G, x, h)$ 临界热流密度 q 是压力 p 、当量直径 d 、质量流速 G 、含汽率 x 、焓值 h 的综合函数	$p = (0.2 \sim 19.0) \text{ MPa}$ $G = (136.0 \sim 18600.0) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $d = (0.002 \sim 0.045) \text{ m}$ $L = (0.15 \sim 3.7) \text{ m}$

Table 2. PSBT rod-bundle configurations for calculation

表 2. 用于计算的 PSBT 棒束布置参数

参数	数据		
	B5	B6	B7
组件类型	B5	B6	B7
棒束阵列与加热棒数量	5×5, 25	5×5, 25	5×5, 24
加热棒外径(mm)	9.50	9.50	9.50
加热棒中心距(mm)	12.60	12.60	12.60
流道内部宽度(mm)	64.9	64.9	64.9
轴向加热长度(mm)	3658	3658	3658
径向功率分布类型	A	A	B
轴向功率分布类型	均匀分布	余弦分布	余弦分布
交混/非交混/定位格架数目	7/2/8	7/2/8	7/2/8

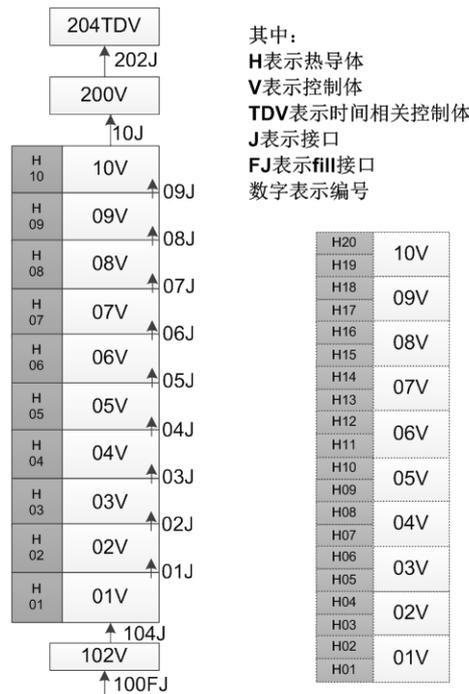
用于敏感性研究的实验工况，其中，B5、B6和B7组件计算工况分别为12个、11个、12个，系统压力范围：4.0~17.0 MPa，质量流量范围：1.0~12.0 kg/s，加热功率范围 1.0~4.0 MW，入口水温范围 100~310℃。

4. 程序建模

针对 B5、B6、B7 较宽压力范围内的各个实验工况分别采用 RETRAN-3D 程序和子通道分析程序 FLICAIII-F 进行建模。这两个程序的主要特点和建模节点方案如下所述。

RETRAN-3D 程序是 CSA 公司为美国电力研究院(EPRI)开发的、用于轻水堆事故瞬态分析的最佳估算程序，主要在美国核电工业界使用，可以进行安全分析报告中的非破口类事故分析，同时支持核电业主的执照申请相关分析工作。针对 PSBT 实验燃料组件，采用平均通道法进行 RETRAN-3D 程序建模，计算节点方案如下图 1 所示，以燃料棒为中心进行流道划分，轴向划分为 10 个控制体，入口采用定流量和温度边界条件、出口采用定压力边界条件，并通过调用辅助 DNB 模型来构造用于计算组件 MDNBR 的虚拟热通道模型[6]。虚拟热通道不参与流动与换热过程计算，只对所构造的热通道进行 MDNBR 计算，其轴向功率分布与该组件的平均通道发热元件的轴向功率分布相同，这里将虚拟热通道轴向热导体数目增加至平均通道的 1 倍，从而获得较为准确的加热表面 MDNBR 值。

FLICAIII-F 子通道分析程序是经过法国核安全当局审查认可的压水堆堆芯燃料组件专用 DNBR 计算工具，FLICAIII-F 程序中可供选择的 DNBR 计算关系式有：WRB-1、W3 和 FC 关系式。其中的 FC 关系式是法马通公司在 AFA-2G、AFA-3G、AFA-XL、含或不含中间交混格架的 AFA-3G 等 17×17 燃料组件上取得的 1572 个临界热流密度试验数据的基础上开发的。本文在采用 FLICAIII-F 计算 DNBR 时，采用计算范围相对较宽的 FCMG 关系式，该关系式的适用范围为：压力范围为 2.07~17.06 MPa，质量流速范围为 930.0~4790.0 kg/m²·s，含汽率范围为-0.22~0.44。建模节点如图 2 所示，计算时以流体流动中心作为



(a) 热工水力计算节点 (b) 用于计算 DNBR 的虚拟热通道

Figure 1. Curve: calculation nodes diagram of RETRAN-3D code for fuel assembly (A, B, C)

图 1. RETRAN-3D 程序燃料组件计算节点图(A、B、C)

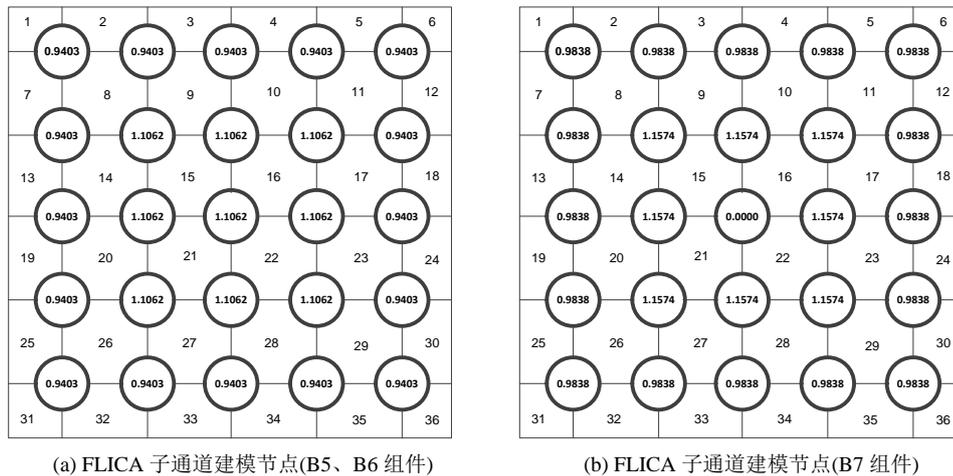


Figure 2. Curve: calculation sub-channels diagram of FLICAIIII-F code for fuel assembly (A, B, C)
图 2. FLICAIIII-F 程序子通道计算通道图(A、B、C)

基准进行流动流道划分，径向划分为 36 个流道，每个流道的轴向划分为 83 个节点。

5. 计算结果与分析

对上述 35 个工况分别采用 RETRAN-3D 程序的四种不同临界热流密度计算公式进行稳态计算，并采用理论热平衡方法求解实验组件出口温度，查 35 个计算工况的输出结果文件并与理论推导结果发现：RETRAN-3D 程序计算值与理论分析值结果相一致，三个组件、35 个工况下、RETRAN-3D 程序与子通道程序计算得到燃料组件出口温度与理论分析值绝对误差最大值为 1.8°C ，表明本文计算结果是可信的。

基于此，针对三个类型组件分别采用 RETRAN-3D 程序的四个不同临界热流密度关系式计算虚拟热通道的 MDNBR 值，同时，采用子通道程序 FLICAIIII-F 对三个组件进行 MDNBR 计算并作为相对准确值，具体 MDNBR 值计算结果见表 3、表 4、表 5 所示。可见，不同公式在不同工况下计算得到的 MDNBR 值与子通道分析计算结果是存在偏差的。

为便于比较各个工况下 MDNBR 值的相对偏离程度，将 RETRAN-3D 程序的计算值除以子通道程序的计算值，从而获得相对偏离度(归一化值)，见图 3 所示。相对偏离度与 1.0 越接近，则表明该公式在该工况下与子通道分析结果越接近，计算值相对越准确。从相对偏离度对比图并结合表 3、表 4、表 5 中 MDNBR 实际计算值可以看出，W-3 公式在高、中、低压范围内计算准确度较其余三个公式好，且在高、中压力范围内与子通道分析结果最为接近；B&W-2 公式相对比较适合中、高压范围内的计算，但在高压下偏差稍大，而在低压下偏差更大；MacBeth 公式适合低压范围内计算，在中、高压下偏差相对较大；Bowring 公式适合在高、中压范围内计算，在低压下误差较大。

将 35 个工况同一公式下的相对偏离度进行统计分析获取均值和标准方差，均值越接近 1.0、标准方差越小，则表明该公式在较宽压力范围的预测值越佳、公式普适性越好。计算结果为：

- (1) W-3 公式计算出的相对偏离度均值为 1.08，标准方差为 27.0%；
- (2) B&W-2 公式计算出相对偏离度均值为 0.99，标准方差为 86.4%；
- (3) MacBeth 公式计算出相对偏离度均值为 1.83，标准方差为 81.9%；
- (4) Bowring 公式计算出相对偏离度均值为 1.06，标准方差为 68.1%。

由此可见，W-3 公式在高、中、低压范围内计算准确度和普适性较好，其次为 Bowring 公式、MacBeth 公式、B&W-2 公式。

Table 3. MDNBR results comparison for B5 assembly
表 3. B5 组件 MDNBR 计算结果比较

计算工况号	RETRAN-3D W-3 公式	RETRAN-3D B&W-2 公式	RETRAN-3D MacBeth 公式	RETRAN-3D Bowring 公式	FLICAIII-F FCMG 公式
1	1.597	2.547	5.295	0.434	1.714
2	1.322	2.358	5.219	0.440	1.594
3	1.929	2.386	4.675	0.903	1.896
4	1.651	2.155	4.491	0.453	1.774
5	1.289	1.195	5.016	0.570	1.593
6	1.648	1.069	6.254	1.082	1.823
7	3.373	1.366	5.190	2.692	2.040
8	3.144	0.472	4.993	2.185	1.911
9	7.988	8.816	7.683	11.525	4.151
10	2.705	0.537	1.804	3.896	2.634
11	2.662	0.017	1.596	3.846	2.551
12	6.890	16.821	5.084	19.557	6.573

Table 4. MDNBR results comparison for B6 assembly
表 4. B6 组件 MDNBR 计算结果比较

计算工况号	RETRAN-3D W-3 公式	RETRAN-3D B&W-2 公式	RETRAN-3D MacBeth 公式	RETRAN-3D Bowring 公式	FLICAIII-F FCMG 公式
13	2.011	2.377	4.011	1.159	1.820
14	1.759	2.286	3.904	0.527	1.674
15	2.853	2.948	4.917	2.502	2.447
16	2.698	2.807	4.875	2.113	2.299
17	2.558	2.480	3.724	2.347	2.039
18	2.465	2.307	3.677	2.186	1.931
19	2.798	1.805	4.045	2.932	2.009
20	5.929	8.505	5.551	8.221	6.201
21	5.738	8.251	5.529	8.221	5.603
22	5.079	12.040	3.896	14.060	8.002
23	5.020	12.124	3.849	14.272	7.664

Table 5. MDNBR results comparison for B7 assembly
表 5. B7 组件 MDNBR 计算结果比较

计算工况号	RETRAN-3D W-3 公式	RETRAN-3D B&W-2 公式	RETRAN-3D MacBeth 公式	RETRAN-3D Bowring 公式	FLICAIII-F FCMG 公式
24	1.772	2.221	3.775	0.586	1.797
25	1.540	2.142	3.688	0.381	1.664
26	1.987	2.443	4.268	0.744	2.051
27	1.719	2.311	4.235	0.574	1.901
28	1.523	1.746	3.039	0.472	1.580
29	1.821	1.651	3.012	1.373	1.788
30	2.712	2.324	3.731	2.823	2.196
31	2.517	-2.402	3.677	2.453	1.912
32	5.385	7.594	5.130	7.434	4.586
33	5.242	7.369	5.125	7.438	4.178
34	1.587	-0.701	1.466	2.265	2.037
35	1.534	-4.088	1.314	2.244	1.917

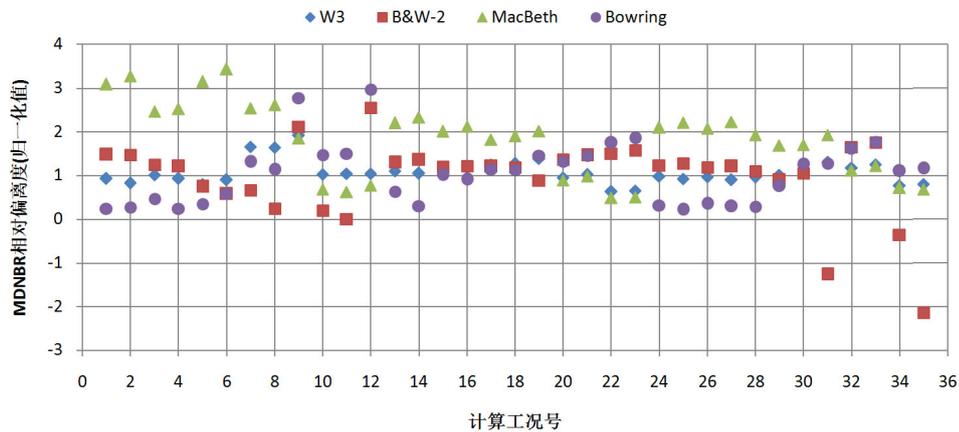


Figure 3. Curve: comparison of MDNBR relative departure degree
图 3. MDNBR 相对偏离度比较

6. 结论

针对 RETRAN-3D 程序中计算压水堆 MDNBR 时因存在多个关系式(W-3 公式、B&W-2 公式、MacBeth 公式和 Bowring 公式)而造成的用户选择难度问题, 本文从压水堆燃料组件临界热流密度实验工况中选出的 35 组高、中、低压力实验数据, 采用 RETRAN-3D 系统程序的虚拟热通道模型详细计算了各个工况的 MDNBR 值, 并与子通道程序 FLICAIII-F 进行了对比分析, 结果表明:

(1) 不同临界热流密度公式在不同压力工况下计算得到的 MDNBR 值与子通道分析计算结果是存在明显偏差的;

(2) 四个公式在 MDNBR 具体计算值方面, W-3 公式在高、中、低压力范围内计算准确度相对最好, B&W-2 公式在高、中压力范围内计算准确度相对较好, MacBeth 公式在低压范围内计算准确度相对较好, Bowring 公式在高、中压力范围内计算准确度相对较好;

(3) 在较宽压力的普适性方面, W-3 公式普适性最好, 其次为 Bowring 公式、MacBeth 公式、B&W-2 公式;

(4) 综上所述可得出结论: 在压水堆中计算较宽压力瞬变下的燃料组件 MDNBR 时, 优选临界热流密度关系式为 W-3 公式。

本文结论对于采用 RETRAN-3D 程序研究压水堆系统瞬态特性并期望获取堆芯热通道的 MDNBR 值, 准确选择合适的临界热流密度计算公式具有实质性的指导意义, 同时本文论证结论表明: 在传统的众多用于 PWR 临界热流密度计算公式里, W-3 公式具有较高的准确性和普适性。

参考文献 (References)

- [1] 杨顺海. 秦山核电厂各种控制棒弹棒事故的审核计算[J]. 原子能科学技术, 1993, 27(4): 320-323.
- [2] 张金玲, 郭玉君, 秋穗正, 苏光辉, 贾斗南, 喻真烷. 反应堆临界热流密度的计算方法研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(5): 118-123.
- [3] 彭敏俊. 船用核动力装置双恒定运行方案控制策略研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(6): 717-721.
- [4] 黄洪文, 刘汉刚, 钱达志, 徐显启. 池式研究堆高功率全厂断电事故分析[J]. 核动力工程, 2012, 33(4): 13-16.
- [5] 黄洪文, 刘汉刚, 徐显启, 钱达志. 研究堆自然循环阀直径的选择与实验验证[J]. 核动力工程, 2012, 33(S1): 115-118.
- [6] EPRI (2012) RETRAN-3D—A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Volume 1: Theory and Numerics Manual (Revision 7). EPRI, Palo Alto.

- [7] EPRI (2012) RETRAN-3D—A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Volume 3: User's Manual (Revision 7). EPRI, Palo Alto.
- [8] 刘建阁, 朱建敏, 陈军, 傅先刚. RETRAN-3D 和 RELAP5 程序壁面换热模型比较研究[J]. 核科学与技术, 2015, 3(3): 60-69.
- [9] 俞冀阳, 贾宝山. 反应堆热工水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 166-167.
- [10] 鲁钟琪. 两相流与沸腾换热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 249-260.
- [11] Rubin, A., Schoedel, A. and Avramova, M. (2010) OECD/NRC Benchmark Based on NUPEC PWR Sub-Channel and Bundle Tests (PSBT): Volume I: Experimental Database and Final Problem Specifications. Research Report, US NRC and OECD Nuclear Energy Agency, Knoxville.
- [12] Salko, R.K., Blyth, T., Dances, C., Mageganz, J. and Avramova, M. (2014) CASL Consortium for Advanced Simulation of LWRs:L3:PHI.VCS.P9.02CTF Validation. Research Report (CASL-U-2014-0169-000), Oak Ridge National Laboratory and Pennsylvania State University, Knoxville, 8-12.