



·蒙特卡罗方法及其应用·

压水堆核电站燃料组件弯曲对堆芯中子学的影响分析计算*

陈思延, 潘 晖, 陈 俊, 赵常有, 郑君萧, 王 超, 卢皓亮, 韩 嵩

(中广核研究院有限公司, 深圳 518000)

摘 要: 在压水堆核电站中, 由于燃料组件装配的压紧力、冷却剂流动、辐射蠕变、燃耗等因素会导致燃料组件的弯曲, 燃料组件的弯曲对组件间的水隙分布产生影响, 从而影响中子的慢化行为及堆芯的传热性能, 进而对反应堆堆芯的运行参数造成影响。本文分析了组件弯曲的成因及机理、影响及后果(包括对堆芯功率分布、径向功率倾斜、焓升因子、热点因子等参数的影响), 并使用蒙特卡罗软件 JMCT, 对组件弯曲的确定论计算程序的正确性进行了验证。最后通过确定论的计算程序模块, 对 CPR1000 核电站的组件弯曲情况进行了模拟分析, 计算结果表明: 在某一燃耗下, 随着水隙增加或减小, 燃料组件功率会随之增加或减小, 使堆芯的功率分布发生倾斜, 影响核电站的安全运行。

关键词: 组件弯曲; 堆芯中子学参数; 蒙特卡罗程序; 确定论程序

中图分类号: TL352.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210312

Analysis and calculation on core neutronics affected by the assembly bowing in pressurized water reactor nuclear power plant

Chen Siyan, Pan Hui, Chen Jun, Zhao Changyou, Zheng Junxiao, Wang Chao, Lu Haoliang, Han Song

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In a pressurized water reactor nuclear power plant, the compression force of the fuel assembly, coolant flow, radiation creep, burnup and other factors will cause the bowing of the fuel assembly. The bowing of the fuel assembly affects the distribution of the water gap between the assemblies. It affects the slowing behavior of neutrons and the heat transfer performance of the core, which in turn affects the operating parameters of the reactor core. This paper discusses the cause and mechanism, influence and consequences of assembly bowing (including the influence on core power distribution, core radial power tilt, nuclear enthalpy rise hot channel factor, heat flux hot channel factor and other parameters), and uses Monte Carlo software JMCT to verify the correctness of the calculation program of component bowing PCM. Finally, through the deterministic calculation program, a simulation analysis of the assemblies bowing of the CPR1000 nuclear power plant is carried out. The calculation results show that: at certain fuel consumption, as the water gap increases or decreases, the fuel assembly power will increase or decrease, the power distribution of the core will tilt, affecting the safe operation of nuclear power plants.

Key words: fuel assembly bowing; core neutronics; Monte-Carlo code; deterministic code

在压水堆核电站的运行和换料过程中, 由于装配压紧力、冷却剂流动、辐照蠕变、燃耗等因素, 燃料组件可能发生弯曲。燃料组件间水隙的定义是堆芯处于热态下, 两个相邻燃料组件的格架外围之间或格架外围与相邻堆芯挡板之间的横向距离。相邻两个燃料组件格架之间的距离是固定的, 组件弯曲会对其自身四周的水隙产生挤压, 导致组件四周的水隙分布不均, 从而影响中子的慢化行为及堆芯的传热性能, 对反应堆堆芯的运行参数造成影响。对于压水堆核电站而言, 组件弯曲是一个多物理相互作用的复杂组合。

S.Lambert 等人认为采用传统的堆叠方法模拟组件弯曲, 会产生比实际偏移更大的虚假组件弯曲效果, 因此使

* 收稿日期: 2021-07-23; 修订日期: 2021-11-20
联系方式: 陈思延, chensiyang@cgnc.com.cn。

用蒙特卡罗方法新引入了一种由一系列旋转圆柱段组成的模型,对C形和S形的组件进行了弯曲模拟,这种建模方法可以更加紧密地模拟出燃料棒的形状排列,对于细小的变形,蒙特卡罗方法可以获得准确的模拟结果^[1]。而Y.Wang等人则认为,使用一种通过通量梯度变化近似的评估方案,将比蒙特卡罗方法更好地模拟在钠冷快堆中的组件弯曲^[2]。目前对于使用蒙特卡罗方法与确定论方法在对组件弯曲的建模上各有优势,常采用蒙特卡罗方法对传统的确定论方法进行辅佐验证。本文使用堆芯计算程序PCM^[3]对堆芯内的组件弯曲现象进行计算,使用蒙特卡罗软件JMCT^[4],对PCM软件的结果进行验证。通过确定论与蒙特卡罗方法相结合,试图探究燃料组件弯曲后,反应堆内堆芯中子学参数的变化,力求从设计层面降低或规避组件弯曲对堆芯参数的影响。

1 组件弯曲理论分析

1.1 组件弯曲的成因

导致组件弯曲的原因主要有:①制造过程中的误差、骨架组装和燃料棒拉棒引起的变形;②导向管和燃料棒的不同生长、格架弹簧的松弛;③组件与相邻组件间的干涉;④组件的辐照蠕变动效应;⑤堆芯内冷却剂的流动;⑥燃耗不均^[5]。图1展示了常见的几种燃料组件弯曲类型。

1.2 组件弯曲的影响

在压水堆核电站中,反应堆堆芯的水铀比会影响堆芯的核性能和堆芯的传热效果。组件弯曲对反应堆堆芯的直接影响体现在水铀比的变化。水铀比对堆芯的影响主要在于单位体积内氢原子数与铀-235的核数之比 N_H/N_5 (简称氢5比)对堆芯能谱产生的效应,堆芯能谱产生的效应变化可用 k_{eff} 有效增殖系数,其表示某时刻堆中裂变反应过程总数和前一代裂变过程总数比。

在低浓度铀为燃料的压水堆中,氢5比会影响堆中中子的慢化程度,因而导致反应堆中子增殖特性也发生相应的变化。一般而言,压水堆核电站的氢5比设计在欠慢化阶段,如图2所示,燃料组件单侧的水隙增加导致位于该侧的氢5比增加,中子的慢化作用增强,反应堆有效增殖系数 k_{eff} 增强,位于该侧水隙部分的燃料组件反应性增加,堆芯的局部功率升高,堆芯在径向方向上功率分布发生倾斜。与此相关的两个参数被监控:堆芯象限功率倾斜(TILT)及组件相对功率偏差^[6]。

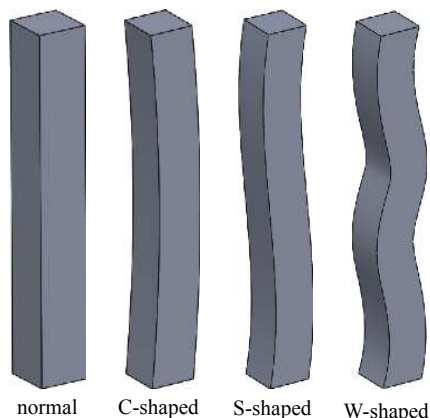


Fig. 1 Types of the fuel assembly bowing

图1 燃料组件弯曲类型

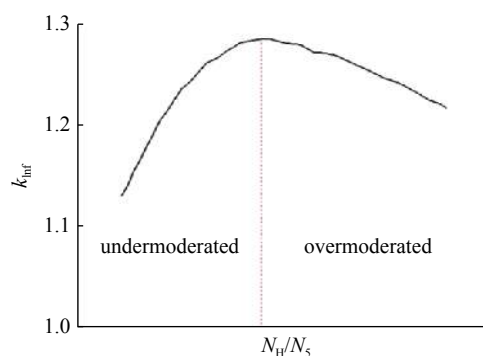


Fig. 2 Effect of the ratio N_H/N_5 on reactor neutron multiplication

图2 氢5比对反应堆中子增殖特性的影响

随着燃料组件燃耗的提高、组件功率密度和燃耗水平的提高,组件弯曲对堆芯的安全运行会造成较大影响。其中组件弯曲在堆芯中子学上的影响主要体现在堆芯的功率分布、 F_{DH} (焓升因子)、 F_Q (热点因子)和 T_{ILT} (堆芯功率倾斜,表示堆芯功率在各象限内的分布情况)等因素。一般在压水堆核电站中,在设计阶段对堆芯的功率倾斜、焓升因子 F_{DH} 及热点因子 F_Q 等参数均有设计限值,在核电站的运行过程中,这些参数超限将对堆芯的安全运行产生隐患。此外组件弯曲还会对堆芯内的热工水力学参数造成影响,如会影响对内的偏离泡核沸腾状态,使得偏离泡核沸腾比(D_{NBR})增加,影响堆芯的安全。此外,燃料组件的弯曲还可能对堆芯内的装卸料造成困难,严重时将会发生格架挂钩,导致组件的损坏。或因组件弯曲与格架相接触,使得燃料组件发生破损。控制棒不能顺利下插,落棒时间超差。

一旦发生燃料组件集体性的弯曲过大,除对弯曲的原因及影响进行调查需耗费核电厂大量的人力和财力外,增加运行过程中的试验项目、降功率运行、负荷跟踪限制等以及可能来自核安全当局的其他要求也会给核电厂的

经济性带来很大的影响^[7]。

2 计算程序

目前对组件弯曲的分析计算主要采用两种方式：第一种方式是通过建立实验堆模拟组件弯曲现象，并采用相应的数学模型辅助验证，即为确定论的计算方法^[8]；第二种方式是通过蒙特卡罗软件 JMCT 模拟组件的弯曲现象，通过随机产生的粒子对堆芯内的组件弯曲现象进行模拟，一般用于组件弯曲对堆芯造成的影响在核电站运行过程中难以测量，没有实际的运行或实验数据作为标准值进行比较时，采用蒙特卡罗程序对组件弯曲的计算结果作为标准值^[9]。在本文中 PCM 软件为确定论计算软件，从堆芯计算软件的底层结构出发，对燃料组件的弯曲进行功率重构计算。PCM 软件是中广核研究院有限公司自主开发的先进压水堆堆芯计算软件^[10]。该软件是核设计过程中需使用的重要软件，其主要功能是针对压水堆堆芯进行各种工况下的模拟，给出反应堆循环长度等经济性相关分析结论，对部分事故进行评估并提供中子学参数供下游安全分析使用。PCM 软件中包含了一个组件弯曲的计算模块，在改变组件间的水隙大小后，可模拟组件弯曲对堆芯的影响。本文中为了验证 PCM 软件计算的正确性，使用了蒙特卡罗软件 JMCT 对组件弯曲进行对比验证。

本文选用了中物院高性能数值模拟软件中心粒子输运团队研发的蒙特卡罗粒子输运模拟软件 JMCT 作为验证对比软件，该软件支持中子输运、光子输运与中子-光子耦合输运模式，适用于对固定源、系统临界本征值以及输运-燃耗耦合计算问题的模拟。

3 计算算例选取

在对 PCM 软件进行验证的阶段，本报告使用了蒙特卡罗软件 JMCT 对燃料组件进行弯曲模拟验证，通过大量验证对比算例，模拟了燃料组件间水隙增加和减少等多种工况。限于篇幅，本文仅展示其中的 3×3 组件弯曲模拟情况验证，在使用 PCM 软件和蒙特卡罗软件 JMCT 时的计算结果。该模型在组件弯曲的模拟计算中是一种具有代表性的验证算例。

在对全堆芯的实际工程模拟计算中，本文选用了 CPR1000 核电站的堆芯组件进行模拟，通过定向选取的水隙数据及电厂实际提供的组件弯曲测量数据，对实际的组件弯曲工况进行模拟验证，从堆芯的中子学参数分析组件弯曲对堆芯运行的影响。

3.1 3×3 组件验证算例

该算例基于目前压水堆常用组件 AFA3GAA，构造了不同类型的多组件问题进行计算。该算例采用 PCM 软件和蒙特卡罗软件 JMCT 建模进行计算，主要比较中心组件在不同水隙工况下的归一化燃料棒和组件功率分布，分析在 3×3 组件中心组件水隙发生变化后的堆芯状态变化。总共构造了两种不同富集度下的两个算例，分别为 1.80% 富集度无 Gd 棒组件和 4.45% 富集度无 Gd 棒组件。每个算例均含有 9 个同类型的组件，几何结构为 3×3 布置，算例选取了位于中心处的组件，通过变化每行每列水隙的大小评估中心组件棒功率的分布变化(具体见图 3)。

3.2 全堆芯计算算例

在工程应用阶段对全堆芯进行组件弯曲模拟计算中，本文选用了 CPR1000 核电站堆芯作为计算模型，该堆芯装载 157 个燃料组件，所使用的燃料组件类型为 AFA3G AA，根据其提供的组件运行经验报告，该堆芯也同样存在燃料组件弯曲的情况。在对该堆芯在正常水隙下的进行计算时，不存在明显的功率象限倾斜，具体堆芯装载图如图 4 所示。

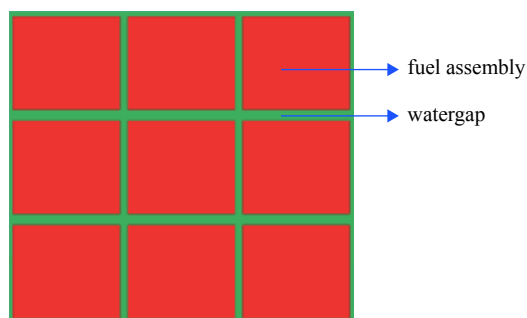


Fig. 3 Validation model of the 3×3 assemblies bowing

图 3 3×3 组件弯曲验证模型

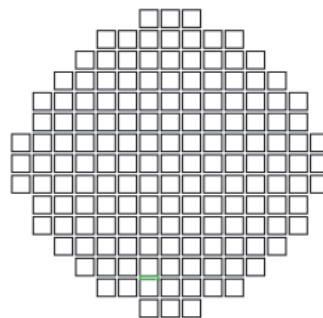


Fig. 4 Diagram of the core loading

图 4 堆芯装载图

对全堆芯的组件弯曲计算以某核电厂的平衡循环为例,分析了燃料组件在弯曲状态下在整个寿期过程中(包含寿期初和寿期末两种寿期状态), F_Q 、 F_{DH} 和 T_{ILT} 等参数的变化。

组件弯曲导致的水隙变化可以控制在某个集合范围内,组件弯曲对这个范围外的组件功率变化影响较小,因此对于全堆的组件弯曲计算可以脱耦替换为局部的矩阵分析。虽然全堆的组件弯曲会影响堆芯内的能谱分布,通过构造全堆模型将会使得计算更加真实。

采用某几个典型的算例便可覆盖可能变化的能谱情况,可以代表全堆偏移的情况。基于内外围组件脱耦假设,构造二维不对称方案。在同一算例里同时验证内外围组件偏移情况。

基于以上脱耦假设和电厂反馈的常用组件间水隙4 mm,构造了以下2个算例,可覆盖全堆水隙变化的情况。

Case1: 堆芯H列右侧水隙同时扩大4 mm。相邻格架之间的距离是固定的,堆芯左侧水隙减少4 mm。计算分析组件弯曲对棒功率分布的影响,观察堆芯的中子学参数变化情况。

Case2: 堆芯中单个组件四周水隙扩大4 mm。本文选取G10组件,将其四周的水隙向外扩大4 mm。以观察单个组件向四周弯曲时,堆芯功率分布的变化和组件内参数的影响。

4 对比结果分析

4.1 3×3 组件对比验证结果

表1统计了3×3组件水隙变化不同倍数下棒功率的变化情况,蒙特卡罗软件JMCT与PCM软件计算结果偏差控制在3%以内,两款软件都能准确地模拟出组件弯曲前后棒功率变化水平。以1.5064 mm作为组件间的基态水隙,当组件间水隙扩大9倍(13.5576 mm)时,靠近水隙变化侧的棒功率升高,这与前文所述随着组件间的水隙增加,组件间水轴比增加,中子的慢化作用增强,反应堆中子增殖特性 K_{∞} 增强,位于该侧水隙部分的燃料棒反应性增加,堆芯局部功率升高相符。远离水隙变化中间位置燃料棒,其功率随着组件弯曲而减小。堆芯功率向着水隙增加的方向偏移。此外,组件弯曲前后的棒功率偏差与组件富集度有关。随着组件富集度的提高,组件弯曲对棒功率分布的影响愈发明显。

表 1 3×3 组件中心组件弯曲前后棒功率对比表

Table 1 Comparison of the rod power before and after bowing of the center assembly in a 3×3 assemblies group

enrichment	magnification of watergap	discrepancy of power after bowing (PCM)	discrepancy of power after bowing (JMCT)	difference between PCM and JMCT
1.80%	9	29.38%	31.88%	-2.50%
4.45%	9	44.93%	47.49%	-2.56%

组件弯曲对组件内的功率分布影响主要体现在组件边缘和角棒上。其中对边棒的影响约在10%~17%,对位于角位置上的棒功率,水隙造成的功率偏差可达30%~40%。相对于水隙变化对边上棒功率的影响,组件弯曲对位于四角上的棒功率影响较大。

4.2 全堆水隙计算结果

对于全堆组件的水隙验证模型,依次采用蒙特卡罗程序和PCM进行计算,比较两个组件水隙变化前后相应棒功率、堆芯中组件 F_{DH} 、 F_Q 的变化值和 T_{ILT} 的偏移量。使用蒙特卡罗软件JMCT和PCM软件计算的棒功率分布如表2所示。

表 2 组件弯曲 PCM 与蒙特卡罗软件对比表

Table 2 Comparison of the PCM and JMCT on the assembly bowing

	power discrepancy of H08 assembly (PCM)	power discrepancy of H08 assembly (JMCT)	difference between PCM and JMCT
case1	1.70%	3.40%	2.80%
case2	5.60%	6.60%	-2.30%

蒙特卡罗软件JMCT的计算结果存在统计涨落误差,且蒙特卡罗程序与确定论程序的计算结果存在一定的偏差。PCM与蒙特卡罗软件JMCT的角棒偏差为7.3%以内,边棒偏差为1.25%,综上认为偏差可接受,PCM的计算精度可达到开展全堆组件弯曲分析的要求。

从Case1的计算结果可以看出,在对H列组件水隙向右偏移后,右侧的组件功率升高0.32%~0.39%,如图5所

示。由于水隙是均匀变化,位于H列左侧的组件功率则同样下降 0.32%~0.39%,由此带来堆芯右侧组件功率的上升和堆芯左侧组件功率的下降,如图 6 所示。

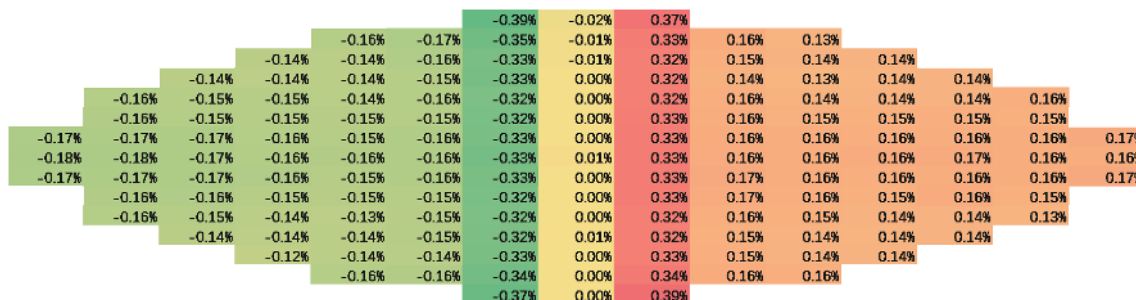


Fig. 5 Power deviation after the watergap of rank H changed

图 5 单排水隙变化后组件功率偏差

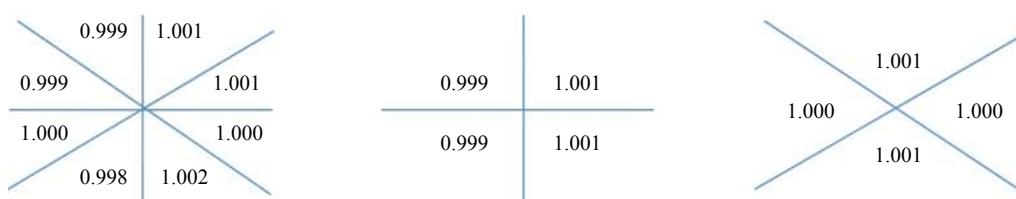


Fig. 6 Core power tilt after the watergap of rank H changed

图 6 单排水隙变化后堆芯功率倾斜(TILT)

堆芯功率发生倾斜, T_{ILT} 呈现右侧高, 左侧低的状态。相对于对称位置, 处于水隙增加处的组件, 其组件功率、 F_Q 、 F_{DH} 等参数也呈现增加趋势, 如 D_{08} 位置的组件, 最大 F_{DH} 从弯曲前的 1.3584 增加至 1.3606, F_Q 从 1.6811 增加至 1.6855, 但未超出设计限值。

选取堆芯中间位置的 H_{08} 组件对组件内部的棒功率分布进行分析, 相关计算结果如图 7 所示。计算结果表明, 在 H 列组件整体偏移后, H_{08} 内部的棒功率分布产生了较为明显的变化, 靠近水隙增大侧的棒功率升高 1.34%, 水隙减小侧的棒功率降低 1.45%。

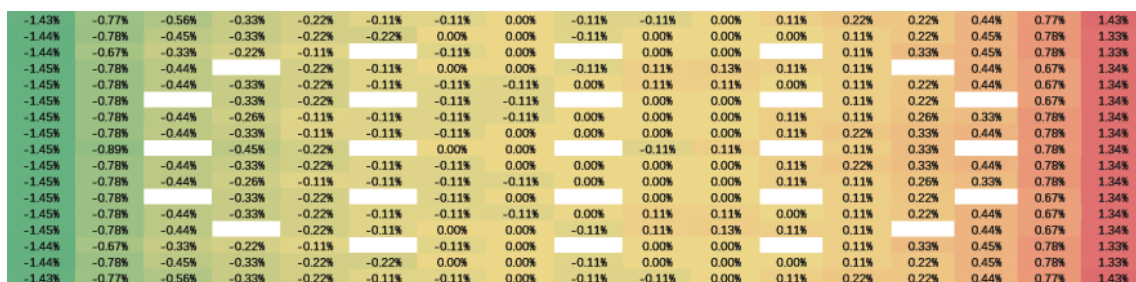


Fig. 7 Power distribution of fuel rod in H08 after the watergap of rank H changed

图 7 单排水隙变化后 H08 组件燃料棒功率变化

对 Case2 进行分析, 为了防止在燃料组件弯曲后 F_{DH} 会超出限值, 选用在燃料组件未发生弯曲的基态时 F_{DH} 最高 D_{08} 组件进行分析计算。将 D_{08} 位置处的组件四周水隙增加 4 mm 后。可以看出 D_{08} 位置处组件功率有明显上升, F_{08} 和 B_{08} 、 D_{06} 和 D_{10} 位置处组件, 由于受到 E_{08} 和 C_{08} 、 D_{07} 和 D_{09} 组件的挤压, 组件间水隙减少, 其功率降低。 D_{08} 处的 F_{DH} 从弯曲前的 1.2788 增加至弯曲后的 1.3656, F_Q 从弯曲前的 1.6811 增加至弯曲后的 1.6926, 但仍符合安全评价规则。此时, 堆芯的功率分布稍向右倾斜。

单独对处于水隙增加中间位置的 D_{08} 组件进行分析, 在四周水隙均匀扩大后, 各个方向上的功率都呈现增加的状态, 其中位于边角处的燃料棒受水隙增加的影响最为明显。

5 结 论

本文使用蒙特卡罗软件 JMCT, 通过 3x3 组件弯曲前后组件功率和棒功率的分布计算, 验证了 PCM 软件的正确性。在全堆水隙的计算中, 进行了单排水隙、单组件水隙变化情况的模拟, 计算结果表明: 在某一燃耗下, 随着水隙的增加或减小, 燃料组件功率会随之增加或减小, 使堆芯的功率分布发生倾斜, 影响核电站的安全运行。

参考文献:

- [1] Lambert S, Campioni G, Faucher V, et al. Modeling the consequences of fuel assembly bowing on PWR core neutronics using a Monte-Carlo code[J]. *Annals of Nuclear Energy, Elsevier Masson*, 2019, 134: 330-341.
- [2] Wang Y, Chen J, Wei L. A method for calculating the assembly bowing reactivity coefficients in sodium fast reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 155: 108176.
- [3] 卢皓亮, 陈俊, 王军令, 等. 自主化堆芯核设计软件COCO验证与确认[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(8): 1459-1463. (Lu Haoliang, Chen Jun, Wang Junling, et al. Verification and validation of self-reliant core nuclear design code COCO[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(8): 1459-1463)
- [4] 李刚, 张宝印, 邓力, 等. 蒙特卡罗粒子输运程序JMCT研制[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(1): 158-162. (Li Gang, Zhang Baoying, Deng Li, et al. Development of Monte Carlo particle transport code JMCT. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(1): 158-162)
- [5] 李朋洲, 李琦. 压水堆燃料组件研发中的力学问题[J]. *核动力工程*, 2015, 36(5): 136-139. (Li Pengzhou, Li Qi. Mechanic problems in PWR fuel assembly research and development[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2015, 36(5): 136-139)
- [6] 沈增耀. 压水堆核电厂核岛设计. 总论[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 15-16. (Shen Zengyao. Design of nuclear island for pressurized water reactor nuclear power plant[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010: 15-16)
- [7] 李伟才, 肖忠. 压水堆燃料组件弯曲变形机理及规避措施[J]. *核动力工程*, 2008, 29(2): 55-57. (Li Weicai, Xiao Zhong. Mechanism of fuel assembly bowing in PWR and preventive measures[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(2): 55-57)
- [8] Grimm P, Jatuff F, Murphy M. Experimental validation of channel bowing effects on pin power distributions in a Westinghouse SVEA-96+ Assembly[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2006, 43(3): 223-230.
- [9] Plaschy M, Jatuff F, Grimm P, et al. Comparisons of deterministic neutronic calculations with Monte Carlo results for an advanced BWR fuel assembly with hafnium control blades[J]. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2006, 43(11): 1298-1310.
- [10] 王超, 杨拯龔, 彭思涛, 等. 自主PCM核设计软件包的自动化验证[J]. *核动力工程*, 2018, 39(S2): 46-49. (Wang Chao, Yang Shuoyan, Peng Sitao, et al. Automated validation of CGN nuclear software package PCM[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(S2): 46-49)