



·蒙特卡罗方法及其应用·

PCM 软件包燃料组件弯曲模型的开发及验证*

厉井钢, 王超, 陈俊, 彭靖含

(中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 燃料组件在反应堆内受压紧力等作用会发生弯曲, 该弯曲会显著改变反应堆局部位置的中子慢化。基于中广核核设计软件包 PCM 中的组件中子截面计算软件 PINE 和堆芯核设计软件 COCO, 开发了专门的燃料组件弯曲模型, 以分析燃料组件弯曲对堆芯局部功率分布的影响, 并和蒙特卡罗软件 JMCT 做了对比验证计算。计算结果表明, PCM 软件包燃料组件弯曲模型的计算结果与 JMCT 吻合良好, 该软件包可以用于燃料组件弯曲的分析计算。燃料组件的弯曲对于堆芯的局部功率分布有显著的影响, 需要在设计中予以特别关注。

关键词: 燃料组件弯曲; 堆芯功率分布; PCM 软件包; 水隙; 中子截面

中图分类号: TL329

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210378

Development and verification of fuel assembly bowing model in software package PCM

Li Jinggang, Wang Chao, Chen Jun, Peng Jinghan

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

Abstract: The fuel assemblies bow with different stresses in the PWR reactor core and this phenomenon can significantly affect the local neutron moderation in the reactor core. Based on the CGN's in-house software package PCM, which is composed of the fuel assembly neutron cross section software PINE and the core design software COCO, this study developed a specific model for fuel assembly bowing to analyze the impact on local power distribution, and compared the results with that of the Monto Carlo code JMCT. The study shows that the results of fuel assembly bowing model in PCM have good consistency with those of JMCT, and that PCM is valid in fuel assembly bowing analysis. The fuel assembly bowing has a significant impact on core local power distribution. This phenomenon shall be specially considered in the PWR reactor design.

Key words: fuel assembly bowing; core power distribution; PCM; water gap; neutron cross section

在反应堆内, 燃料组件由于受到压紧力等多种力的作用以及辐照燃耗的影响, 整个燃料组件会偏离正常的竖直状态, 形成不同程度的弯曲。燃料组件的弯曲形状多种多样, 主要有“C”型、“S”型等。燃料组件的弯曲如果过大, 会给反应堆的安全运行带来一系列的问题, 如影响燃料组件的堆内装卸料, 严重时将发生格架挂钩导致组件损坏; 导致燃料组件格架间产生磨蚀, 造成组件破损; 影响控制棒组件的下插, 使得控制棒组件的落棒时间可能超差等^[1]。

燃料组件弯曲会改变燃料组件间的水隙分布, 而燃料组件间水隙分布的变化一方面影响冷却剂的局部冷却能力, 另一方面将使得堆芯局部的中子慢化发生改变, 进而影响堆芯局部功率分布。当燃料组件间的水隙增大时, 冷却剂的局部冷却能力上升, 同时中子的慢化变好, 靠近水隙附近的燃料棒功率会增大, 功率峰因子相应增大, 堆芯的安全裕量将受到影响。当燃料组件间的水隙减小时, 中子的慢化将变差, 靠近水隙附近的燃料棒功率会减小, 同时冷却剂的局部冷却能力下降, 同样也会影响堆芯的安全裕量。因此, 准确分析由于燃料组件弯曲引起的堆芯功率分布变化, 对反应堆的安全运行非常重要^[2-7]。本文以中广核核设计软件包 PCM 为基础, 开发了专门的模型来模拟燃料组件的弯曲, 并通过和蒙特卡罗软件 JMCT 的对比计算, 验证了 PCM 软件包燃料组件弯曲模型的准确性。

* 收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1902004)

联系方式: 厉井钢, lijinggang@cgnpc.com.cn。

1 计算软件

中广核 PCM 软件包主要包括组件中子截面计算软件 PINE 和堆芯核设计软件 COCO。PCM 软件包历时十余年开发,经过了大量的验证和确认,计算功能和精度已满足工程设计的要求,正逐步应用于压水堆的反应堆堆芯设计计算^[8-9]。

JMCT 软件是由北京应用物理与计算数学研究所研发的高分辨率粒子输运蒙特卡罗计算软件,经过多年的持续开发和验证,已成为国际知名的蒙特卡罗计算软件^[10]。

1.1 PINE 软件

PINE 软件的主要功能是针对压水堆燃料组件进行二维输运-燃耗计算,为下游堆芯计算提供均匀化的组件中子截面。

PINE 软件采用国际原子能机构(IAEA)WLUP 项目发布的 69 群截面数据库;采用等价原理方法进行无限栅格的共振计算;采用改进中子流方法计算 Dancoff 因子;主输运计算采用特征线方法(MOC 方法);采用 B1 近似模型对组件能谱进行修正。

PINE 软件计算均匀化组件中子截面时,需要根据相应的状态参数制定多参数中子截面表。对于正常无弯曲的燃料组件,PINE 软件制作多参数中子截面表采用的状态参数有燃耗(B_u)、硼浓度(C_b)、氘浓度(X_c)、慢化剂密度(D_w)、燃料有效温度(T_f)、历史效应因子(λ),即组件中子截面可表示成

$$\Sigma = f(B_u, C_b, X_c, D_w, T_f, \lambda) \quad (1)$$

对于弯曲的燃料组件,PINE 软件多参数中子截面表的制作需要考虑燃料组件间水隙改变的影响。

1.2 COCO 软件

根据 PINE 软件计算得到的组件中子截面,COCO 软件采用半解析节块法求解中子扩散方程,以得到堆芯临界硼浓度、控制棒价值以及堆芯功率分布等关键参数。

COCO 软件采用单通道方法计算节块内的慢化剂密度,利用燃料温度库插值来获得节块内的燃料温度;通过读取 PINE 软件生成的多参数中子截面表,并利用公式(1)中的堆芯状态参数(如燃耗、硼浓度等),插值得到节块内的各种中子截面。

1.3 JMCT 软件

JMCT 软件以反应堆堆芯及屏蔽计算为目标,可用于反应堆堆芯功率分布的计算。JMCT 软件采用先进的数据体系结构,分段并行产生随机数,使随机数周期能够支撑数百亿粒子历史的模拟。

JMCT 软件具有强大的复杂几何处理能力,可以精确模拟燃料组件的几何,对能量、方向近似少,并采用连续点截面进行输运计算,当样本数足够多时,可以逼近解析解,因此可以用来作为 PCM 软件包燃料组件弯曲模型的基准验证工具。

2 燃料组件弯曲模型

燃料组件发生弯曲时,主要改变的是燃料组件间的水隙。PCM 软件包对燃料组件间水隙改变的模拟,通过对 PINE 软件和 COCO 软件分别开发相应的模型来实现。

2.1 组件燃料弯曲模型

对于压水堆燃料组件,在燃料组件径向(x 方向和 y 方向)边缘位置通常留有一定量的水隙,见图 1 中的燃料组件外圈黑色边框所示(以 d_x 和 d_y 表征)。

在进行燃料组件的二维主输运计算时,PINE 软件需要考虑上述水隙对计算结果的影响。

在燃料组件没有弯曲时,各个组件的 d_x 和 d_y 通常是相等的,为节省计算时间,PINE 软件一般采用 1/8 对称边界条件的方式计算组件均匀化参数。

当燃料组件发生弯曲以后, d_x 和 d_y 将发生变化,且 d_x 和 d_y 的变化量通常不相等,这时候继续采用 1/8 对称边界条件计算组件均匀化参数,将不能反映燃料组件弯曲的实际状

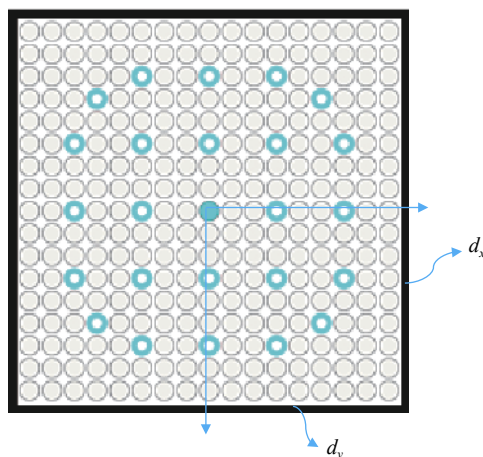


Fig. 1 Fuel assembly and boundary water gap

图 1 燃料组件及边缘水隙分布

况。一种可能的计算方式是二维主输运计算时不考虑对称性,并以 d_x 和 d_y 分别为自变量两两变化制作相应的中子截面多参数表。这样的方式尽管可以较为真实地反映组件边缘不同方向的不同水隙,但同时将使得软件的计算代价大大增加。在本研究中,采用一种简化的方法制作 x 方向和 y 方向边缘水隙不同时中子截面多参数表,主要计算过程如下。

假定对于 x 或 y 方向,边缘水隙为 d_x 或 d_y 时与其紧邻的 1/8 组件径向横截面积为 S_x 或 S_y , 1/8 对称边界条件下计算得到的中子截面为 Σ_x 或 Σ_y 。

x 和 y 方向组件边缘水隙分别为 d_x 和 d_y 时的组件中子截面 $\Sigma_{x,y}$ 可采用面积权重法计算得到,即

$$\Sigma_{x,y} = \frac{(\Sigma_x S_x + \Sigma_y S_y)}{S_x + S_y} \quad (2)$$

基于上述分析,先用 PINE 软件的 1/8 对称边界条件模型(即假定 d_x 和 d_y 相等)计算得到一系列不同水隙的组件中子截面,再根据公式(2)计算得到 x 方向和 y 方向水隙不同时的组件中子截面。

PINE 软件通过上述近似化二维水隙问题为一维问题,显著简化了中子截面多参数表的制作。即对于燃料组件弯曲情况,组件中子截面可表示为

$$\Sigma = f(B_u, C_b, X_e, D_w, T_f, \lambda, d) \quad (3)$$

式中: d 表征 1/8 对称边界条件下燃料组件边缘处的水隙。

2.2 堆芯燃料弯曲模型

COCO 软件采用节块法进行堆芯计算,把堆芯根据燃料组件的位置划分成一系列的节块(通常每个组件在径向划分成 4 个节块,见图 2(a)所示)。在计算燃料组件弯曲问题时,由于各个组件边缘的水隙可能各不相同,因此 COCO 软件需要对不同组件的节块水隙分布分别进行恰当考虑,以考虑不同组件的可能错位效应,图 2(b)给出了中心组件发生弯曲时所对应节块水隙分布的示意图。

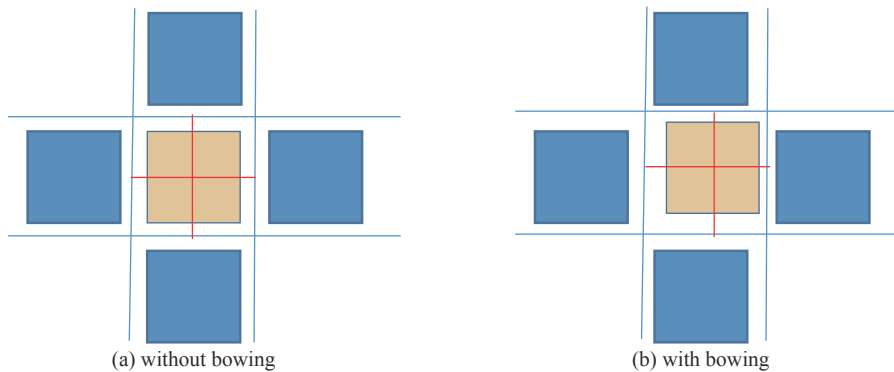


Fig. 2 Radial modeling of fuel assembly node

图 2 燃料组件节块划分的径向模拟

COCO 软件根据 PINE 软件提供的多参数中子截面表,再结合公式(2)及该节块所对应的状态参数及水隙划分,得到该节块的中子截面,进而求解中子扩散方程得到相应的堆芯中子学参数。

3 计算验证

根据第 2.1 节和第 2.2 节描述的方法,PCM 软件包开发了专门的燃料组件弯曲模型,并分别对 PINE 软件和 COCO 软件做了验证。

3.1 PINE 软件验证

为验证 PINE 软件的燃料弯曲模型,针对 ^{235}U 富集度为 4.45% 的压水堆燃料组件,采用 PINE 软件在 1/8 对称边界条件下分别进行正常水隙和水隙增大两种工况的建模计算。燃料组件的主要参数见表 1 所示。

由于 JMCT 软件可以精确模拟各种复杂几何下的中子行为特性,因此采用和 JMCT 软件对比分析的方式来验证 PINE 软件计算结果。图 3 给出了 PINE 软件和 JMCT 软件上述两种工况下燃料组件中燃料棒功率分布的比较。可以看出: 1/8 对称边界条件下不同水隙 PINE 软件与 JMCT 软件的燃料棒功率分布吻合较好,正常水隙时两个软件的最大偏差为 1.98%,水隙增大工况下两个软件的最大偏差为 1.81%。同时,随着燃料组件边缘位置的水隙

表 1 燃料组件主要参数
Table 1 Fuel assembly main parameters

enrichment/%	assembly configuration	normal water gap/mm	increased water gap/mm
4.45	17×17	0.76	3.80

(a) normal gap

(b) increased water gap

Fig. 3 Fuel rod power distribution (1/8 symmetry)

图 3 燃料棒功率分布的比较(1/8 对称)

变大,燃料组件边缘位置附近的燃料棒功率显著增大。

此外,为验证第 2.1 节中 x 方向和 y 方向边缘水隙不同时公式(2)的计算精度,采用 PINE 软件分别计算了 3 种工况下的组件均匀化中子截面,Case 1 中 x 方向和 y 方向组件边缘的水隙均为 0.76 mm,Case 2 中 x 方向和 y 方向组件边缘的水隙均为 7.6 mm(增大到 10 倍水隙),Case 3 中 x 方向组件边缘的水隙为 7.6 mm, y 方向组件边缘的水隙为 0.76 mm。Case 1 和 Case 2 采用 1/8 对称边界条件计算组件均匀化中子截面,Case 3 采用实际边缘水隙条件计算组件均匀化中子截面。表 2 给出了这三种工况下组件均匀化中子截面的比较,其中“Results from Eq.(2)”指的是根据 Case 1 和 Case 2 的组件均匀化中子截面并结合公式(2)得到的计算结果,“Difference”指的是“Results from Eq.(2)”与 Case 3 得到的组件均匀化中子截面的相对偏差。从表 2 中可以看出,采用公式(2)计算得到的组件均匀化中子截面,与 Case 3 采用实际边缘水隙条件精确计算得到的组件均匀化中子截面偏差很小,可以满足工程设计的需要。

表 2 燃料组件均匀化中子截面的比较

Table 2 Homogeneous neutron cross section of fuel assembly

	fast group transport cross section/cm ⁻¹	thermal group transport cross section/cm ⁻¹	fast group absorption cross section/cm ⁻¹	thermal group absorption cross section/cm ⁻¹	fast group fission cross section/cm ⁻¹	thermal group fission cross section/cm ⁻¹
case 1	2.37744×10 ⁻¹	8.80051×10 ⁻¹	9.99930×10 ⁻³	1.04927×10 ⁻¹	3.24601×10 ⁻³	7.22189×10 ⁻²
Case 2	2.35261×10 ⁻¹	9.07776×10 ⁻¹	9.48205×10 ⁻³	9.92312×10 ⁻²	3.06870×10 ⁻³	6.71697×10 ⁻²
case 3	2.36489×10 ⁻¹	8.94271×10 ⁻¹	9.73666×10 ⁻³	1.02015×10 ⁻¹	3.15638×10 ⁻³	6.96360×10 ⁻²
results from Eq.(2)	2.36460×10 ⁻¹	8.94392×10 ⁻¹	9.73174×10 ⁻³	1.01981×10 ⁻¹	3.15429×10 ⁻³	6.96071×10 ⁻²
difference	0.012%	-0.014%	0.051%	0.034%	0.066%	0.042%

3.2 COCO 软件验证

针对某百万千瓦压水堆机组的首循环(见图 4 所示),采用与 JMCT 软件计算结果比较的方法,验证 COCO 软件组件弯曲工况下的堆芯计算模型。计算中通过增大该压水堆堆芯第 K 列位置燃料组件左侧水隙来模拟燃料组件的弯曲,其余位置仍然为正常水隙,并分别比较了水隙变化前后两个软件计算得到的 K03 组件左上角区域 1/4 燃料棒功率分布的差异(见图 5 和图 6 所示)。

从图 5(b)和图 6(b)中可以看出,水隙改变前后, JMCT 软件和 COCO 软件对于燃料棒功率的模拟总体上吻合较好,正常水隙时两个软件的最大偏差为 3.42%,水隙增大工况下两个软件的最大偏差为 2.97%,COCO 软件与 JMCT 软件的偏差没有随水隙的变化而发生明显的改变,这证明了 COCO 软件可以较好地模拟燃料组件的弯曲现象。同时,从图 5(a)和图 6(a)中也可以看出,水隙变大后, K03 左边缘位置燃料棒的功率显著增大(最大增加约 10%),这说明燃料组件的弯曲及水隙的改变对局部位置燃料棒的功率分布有显著的影响,需要引起重视。

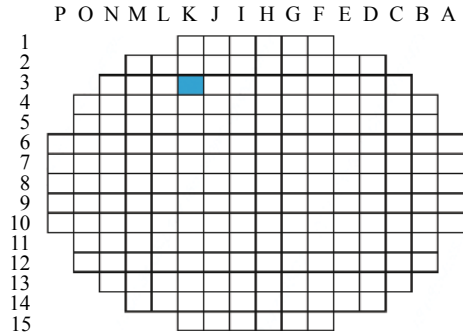
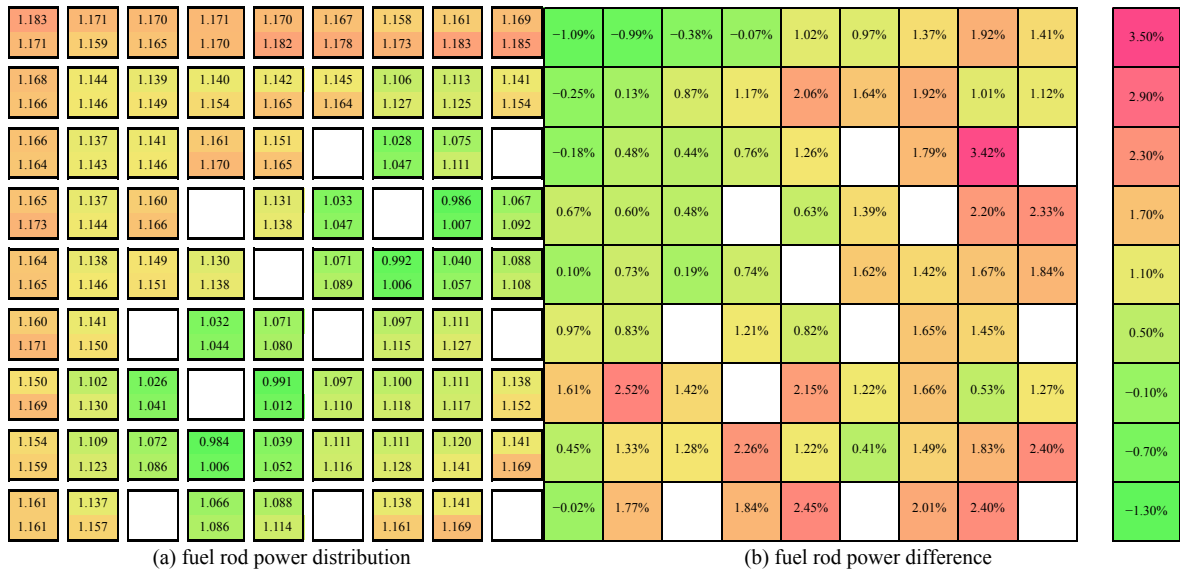


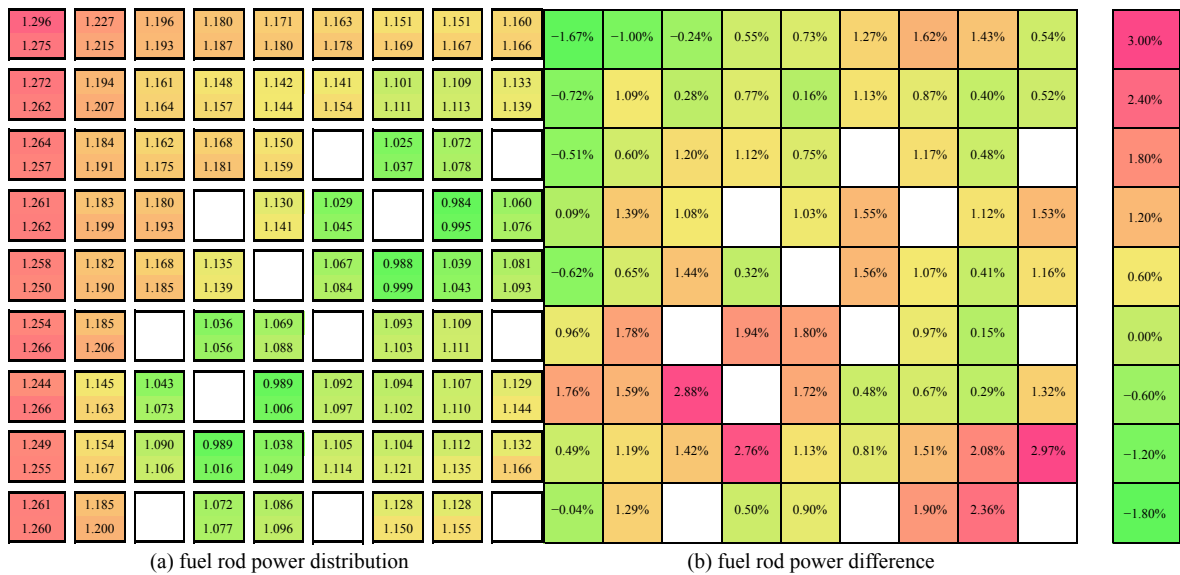
Fig. 4 Core configuration
图 4 堆芯布置分布图



(a) the first value in the square is the calculation results from COCO and the second value is from JMCT;
(b) shows the difference defined as $(JMCT - COCO)/COCO$

Fig. 5 Fuel rod power distribution at K03 under normal water gap

图 5 正常水隙下 K03 位置组件左上角 1/4 区域燃料棒功率分布对比



(a) the first value in the square is the calculation results from COCO and the second value is from JMCT;
(b) shows the difference defined as $(JMCT - COCO)/COCO$

Fig. 6 Fuel rod power distribution at K03 under increased water gap

图 6 水隙增大后 K03 位置组件左上角 1/4 区域燃料棒功率分布对比

4 结 论

在压水堆核电站中,燃料组件的弯曲由于会影响燃料组件的装卸料操作以及控制棒组件的插入,正在受到越来越广泛的关注。同时,燃料组件的弯曲会影响反应堆中局部位置的中子慢化。本文在 PCM 软件包的基础上通过增加相应的水隙计算功能开发了专门的燃料组件弯曲模型,并通过与蒙特卡罗软件 JMCT 计算结果的对比,验证了 PCM 软件包可以准确模拟燃料组件弯曲的中子学行为特性。

通过计算分析可知,燃料组件的弯曲对于堆芯的局部功率分布有显著的影响,在燃料组件发生弯曲的局部位位置燃料棒的功率最大增加可以达到 10%,这需要在相应的设计分析中予以特别关注。

参考文献:

- [1] 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 fuel assembly bowing preventive measures[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(2): 55-57)
- [2] Franzen A. Evaluation of fuel assembly bow penalty peaking factors for Ringhals 3 – Based on a cycle specific core water gap distribution[D]. Uppsala Universitet, 2017.
- [3] Rochman D, Mala P, Ferroukhi H, et al. Bowing effects on power and burn-up distributions for simplified full PWR and BWR cores[C]//International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. 2017.
- [4] Chionis D, Dokhane A, Belblidia L, et al. Development and verification of a methodology for neutron noise response to fuel assembly vibrations[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 147: 17669-107683.
- [5] Yamamoto A, Endo T, Nagano H, et al. A simple treatment of increased gap due to fuel assembly bowing through correction of cross sections[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019.
- [6] Franceschini F, Fetterman R, Little D. Modification of the ANC nodal code for analysis of PWR assembly bow[C]//Proc PHYSOR. 2008.
- [7] Fetterman R, Franceschini F. Analysis of PWR assembly bow[C]//Proc PHYSOR. 2008.
- [8] 卢皓亮,莫锟,李文淮,等.自主化堆芯三维核设计软件COCO研发[J].原子能科学技术,2013,47(s1):327-330. (Lu Haoliang, Mo Kun, Li Wenhui, et al. Development of self-reliant three-dimensional core nuclear design code COCO[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(s1): 327-330)
- [9] 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):1460-1463. (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): 1460-1463)
- [10] 邓力,雷炜,李刚,等.高分辨率粒子输运MC软件JMCT开发[J].核动力工程,2014,35(S2):221-223. (Deng Li, Lei Wei, Li Gang, et al. Development of high resolution particle transport Monte Carlo code JMCT[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(S2): 221-223)