

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

CF₂燃料组件主要堆内辐照性能

李云 李华 张林 蒲曾坪 焦拥军 张坤 黄春兰

Major in-pile performance of CF₂ fuel assembly

Li Yun, Li Hua, Zhang Lin, Pu Zengping, Jiao Yongjun, Zhang Kun, Huang Chunlan

引用本文:

李云, 李华, 张林, 蒲曾坪, 焦拥军, 张坤, 黄春兰. CF₂燃料组件主要堆内辐照性能[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 106002. doi: 10.11884/HPLPB202032.200159

Li Yun, Li Hua, Zhang Lin, Pu Zengping, Jiao Yongjun, Zhang Kun, Huang Chunlan. Major in-pile performance of CF₂ fuel assembly[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 106002. doi: 10.11884/HPLPB202032.200159

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200159>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超临界水堆燃料组件选型论证研究

Design consideration and performance analysis of supercritical water reactor fuel assembly

强激光与粒子束. 2017, 29: 016023 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160411>

超临界水冷堆混合慢化燃料组件设计

Design of mixed moderators' fuel assembly in SCWR

强激光与粒子束. 2017, 29: 056004 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160205>

堆内黄玉改色装置设计

Design of in-pile topaz color-alteration device

强激光与粒子束. 2019, 31: 019002 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180293>

HPR1000堆芯装载50%MOX组件的燃料管理方案

Fuel loading pattern with 50% MOX fuel in HPR1000 core

强激光与粒子束. 2017, 29: 036010 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160376>

铅冷快堆M²LFR-1000堆芯燃料管理方案设计

In-core fuel management strategy design of lead-cooled fast reactor M²LFR-1000

强激光与粒子束. 2018, 30: 096003 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.180083>

大型压水堆装载50%MOX燃料方案压力容器辐照安全计算

Neutron flux calculation of reactor pressure vessel for MOX fuel core

强激光与粒子束. 2017, 29: 036008 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160179>



·核科学与工程·

CF₂ 燃料组件主要堆内辐照性能

李 云, 李 华, 张 林, 蒲曾坪, 焦拥军, 张 坤, 黄春兰

(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 610041)

摘 要: 结合辐照考验方案, 评价了 CF₂ 先导燃料组件的机械性能及燃料棒的热力性能, 结果表明各项性能均满足准则要求。结合辐照后池边检查结果, 对 CF₂ 燃料组件的主要堆内辐照性能进行了研究, 包括燃料组件及燃料棒生长和弯曲、定位格架生长等各项燃耗相关性能。结果表明, 在燃耗达到 44 500 MWd/tU 的情况下 CF₂ 燃料组件主要辐照性能均达到了预期水平, 满足反应堆的使用要求。CF₂ 燃料组件后续可批量应用于华龙一号。

关键词: CF₂; 燃料组件; 评价; 辐照; 性能

中图分类号: TL329

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200159

Major in-pile performance of CF₂ fuel assembly

Li Yun, Li Hua, Zhang Lin, Pu Zengping, Jiao Yongjun, Zhang Kun, Huang Chunlan

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The mechanical performance of CF₂ lead fuel assembly and the thermal-mechanical performance of the fuel rod are evaluated considering the irradiation condition of the irradiation program and the criteria are fulfilled. The major in-pile performance of CF₂ fuel assembly are studied on the basis of the poolside examination results, including the burnup dependent parameters such as the growth of fuel assembly and fuel rod, the bow of fuel assembly and fuel rod, the growth of grid, etc. The results show that the major in-pile performance of the CF₂ fuel assembly has reached the expectations, and the fuel has fulfilled the requirements of the reactor system.

Key words: CF₂; fuel assembly; evaluation; in-pile irradiation; performance

为保障我国华龙一号三代核电技术顺利出口, 中核集团在国内首次自主研发了适用于大型商业核电站的 CF₂ 燃料组件, 拥有了具有完全自主知识产权的燃料组件^[1-2]。根据相关法规标准要求, 燃料组件作为反应堆的关键部件, 在其批量应用之前, 必须开展燃料组件堆内辐照性能的研究, 确保其具有反应堆系统所要求的满意性能。本文介绍了 CF₂ 燃料组件辐照考验方案及相关验证情况, 并结合辐照后的池边检查结果, 对其主要辐照性能进行了研究。根据辐照后检查结果, CF₂ 燃料组件的实际辐照性能达到预期, 具有满意的性能, 后续可开展 CF₂ 燃料组件的批量应用。

1 CF₂ 燃料组件简介

CF₂ 燃料组件设计燃耗为 44 000 MWd/tU, 定位于满足出口项目首炉装料需求, 采用成熟的 17×17 栅元布置, 由骨架、上管座及 264 根燃料棒组成。骨架上设置了 2 层端部格架、6 层搅混格架及 3 层跨间搅混格架, 具有良好的热工性能。为保持与现有反应堆的兼容性, 其轮廓及相关接口尺寸与现役燃料组件保持一致。主要设计特征包括上管座连接板上 1/4 对称布置长条形流水孔, 采用长方形滤孔的下管座防异物板, 具有较低压降及过滤较小直径异物的能力, 内套管与导向管胀接形成导向管的缓冲段, 工艺简单同时结构可靠, 燃料棒包壳采用成熟的国产再结晶 Zr-4 合金。

2 辐照考验方案

2.1 入堆方案设计

根据 HAD003/10《核燃料组件采购、设计和制造中的质量保证》可知, “对于与以前所用设计相比有重大设计

变更(例如棒栅距、棒径或结构材料变更)的燃料组件设计,除要求的设计审查外,通常还要求进行原型燃料组件或先导燃料组件的鉴定试验”。CF₂燃料组件结构形式及材料选择与堆内现有燃料组件存在差异,必须进行CF₂燃料组件的辐照性能试验,获取其堆内实际运行性能,为其后续批量应用提供支持。

4组全尺寸CF₂先导燃料组件装入秦山第二核电厂2号反应堆中进行辐照试验,从第10循环开始一直持续到第12循环,共经历3个循环辐照后出堆^[3-4]。CF₂先导燃料组件采用与同批换料组件相同的富集度3.7%。辐照考验方案设计采取了一系列措施使得对电厂运行的影响以及可能的风险和损失最小化。4组CF₂先导燃料组件在堆芯内对称布置,即使CF₂先导燃料组件出现燃料棒破损,需要紧急换料的情况下受影响的燃料组件数量有限。CF₂先导燃料组件在3个循环中均布置于不含控制棒组件的通道,降低了其装入堆芯后对反应堆安全性的影响。装入CF₂先导燃料组件后也未对反应堆的运行设置任何额外的限制。

秦山第二核电厂2号反应堆运行参数见表1。CF₂先导燃料组件的辐照考验历史见表2。

表 1 堆芯运行参数

Table 1 Core operation parameters

average linear power density/(W/cm)	core pressure/MPa	coolant average temperature/°C	coolant average flow velocity/(m/s)
160.9	15.5	310	4.34

表 2 CF₂ 先导燃料组件辐照历史

Table 2 Irradiation history of CF₂ lead fuel assembly

cycle	cycle length/d	cycle burnup/(MWd/tU)	fuel assembly burnup/(MWd/tU)
10 th cycle	335	11 200	8400
11 th cycle	486	16 700	27 200
12 th cycle	486	16 600	44 500

2.2 入堆性能分析

为确保4组CF₂先导燃料组件的辐照安全,结合燃料管理设计方案,对其进行了机械性能分析及燃料棒热力性能分析。机械性能分析主要包括燃料组件与堆芯上、下板最小间隙、相邻燃料组件间最小间隙、格架弹簧夹持功能、压紧系统性能、燃料棒最大磨蚀深度、导向管应力分析和稳定性等^[5-6]。燃料棒热力性能分析主要包括燃料芯块温度、包壳温度、包壳应变等。主要的分析结果见表3。分析结果表明,在燃耗为44 000 MWd/tU的情况下,CF₂先导燃料组件的相关性能满足设计准则要求。

表 3 CF₂ 燃料组件主要性能评价结果

Table 3 Main evaluation results for CF₂ fuel assembly

	gap between FA and core cavity/mm	gap between fuel rod and top nozzle/mm	gap between neighboring fuel assemblies/ mm	axial hold down force/N	fretting of fuel rod cladding/ μ m	fuel temperature/°C	cladding temperature in steady state/°C	cladding temperature in transient state/°C	cladding strain/%
value	1.25	9.38	0.49	942	5.5	1959	370	389	0.91
criterion	>0	>0	>0	>0	≤ 57	<2590	<400	<425	<1%

2.3 先导燃料组件制造

为避免出现由于制造因素引起燃料破损,该4组先导燃料组件的生产均经过严格的质量控制程序,与堆内现有燃料组件具有相同的质量水平。装入的燃料芯块均经过挑选,避免出现由于芯块掉块等缺陷引起燃料破损。为便于与辐照后的相关数据进行对比,对燃料组件出厂状态的高度等外形尺寸进行了测量和记录。

2.4 燃料组件池边检查

每循环未停堆换料期间,均对CF₂先导燃料组件进行了池边检查^[7]:(1)外观检查。燃料组件辐照后的外观是辐照稳定性和完整性最直接的体现。外观检查主要采用水下摄像头检查燃料组件整体明显变形情况、组件及定位格架条带可见缺陷和损伤、燃料棒表面状况、沉积物附着等;(2)尺寸测量采用图像法测量组件高度、弯曲及扭

转程度、上下管座间距、棒间距等与组件辐照性能直接相关参数。

3 主要辐照后检查结果及性能分析

3.1 外观

寿期末燃料组件典型外观见图 1。4 组 CF₂ 先导燃料组件整体无可见变形;螺钉连接处、定位格架外条带焊接部位和下管座滤板等未见异常,各零部件完好无缺。燃料组件表面无明显沉积物和水垢,燃料棒表面呈灰黑色。燃料棒间、格架条带与燃料棒之间、上/下管座内腔等可见部位未见异物。定位格架外条带及燃料棒表面无磨蚀、擦挂痕迹,条带焊缝处无撕裂、翻边及其它可见损伤和变形。受燃料棒辐照生长及定位格架夹持力下降等因素影响,燃料棒下端与下管座间隙变小。

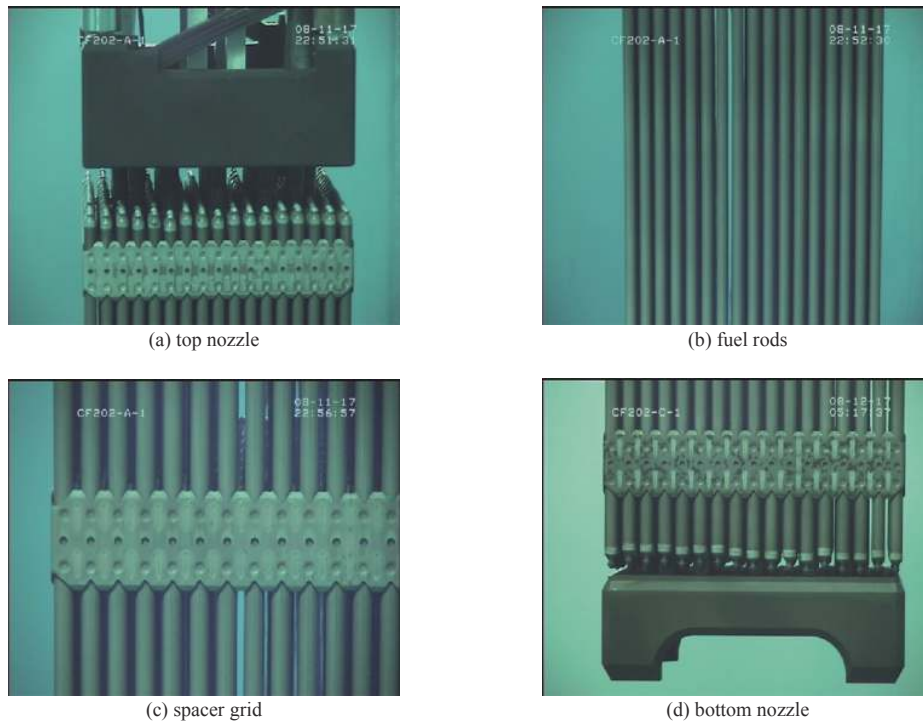


Fig. 1 Typical appearance of CF₂ fuel assembly

图 1 CF₂ 燃料组件典型外观

3.2 燃料组件生长

燃料组件的高度将由于锆-4 合金导向管的辐照生长而增加。燃料组件的辐照生长应处在一个合适的范围,过大的辐照生长可能引起燃料组件与反应堆堆腔的轴向干涉而影响组件的结构完整性。燃料组件过小的辐照生长不利于补偿压紧系统因辐照松弛引起的压紧力减小^[8]。图 2 给出了 CF₂ 燃料组件辐照生长率与燃耗关系曲线(归一化处理)。CF₂ 先导燃料组件的辐照生长处在预期范围内,生长率小于分析模型预测的辐照生长率上界值,在寿期末与堆腔之间仍有至少 4.4 mm 的轴向间隙,不会发生轴向干涉。

3.3 燃料棒生长

燃料棒包壳采用再结晶 Zr-4 合金。在堆内运行环境中燃料棒长度会增加。包壳受辐照而自由生长,另外当芯块与包壳接触后,包壳受到芯块-包壳轴向相互作用,包壳将沿轴向生长。包壳生长带来燃料棒内部容纳裂变气体空间体积的增加,但如果生长量过大,将引起燃料棒与上管座/下管座轴向干涉,危及燃料棒的结构完整性。图 3 给出了燃料棒包壳生长率随快中子注量的变化情况(归一化处理)。燃料棒生长率符合预期,生长率实测平均值小于模型预测的最佳估算值,实测最大值小于模型预测的上界值。寿期末燃料棒与上管座/下管座至少仍有 26 mm 的轴向间隙,不会发生轴向干涉。

3.4 燃料组件弯曲

随着燃耗增加,由于横向流、中子通量梯度、导向管辐照生长不均匀等各种综合因素,燃料组件将逐渐发生弯曲变形。过大的燃料组件弯曲变形将引起控制棒不能完全插入堆芯,危及反应堆的安全,同时也将增加装卸料过程中发生勾挂的风险^[9-10]。CF₂ 燃料组件弯曲度随燃耗变化的关系曲线见图 4(归一化处理)。4 组燃料组件的弯曲

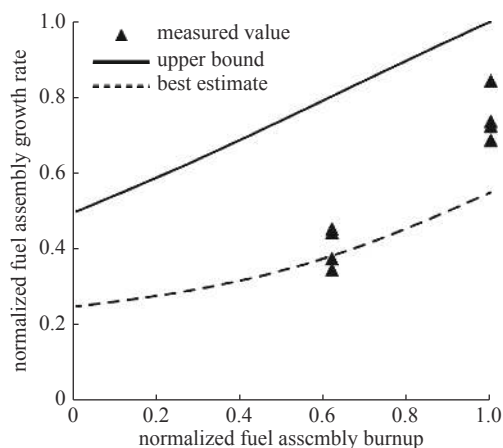
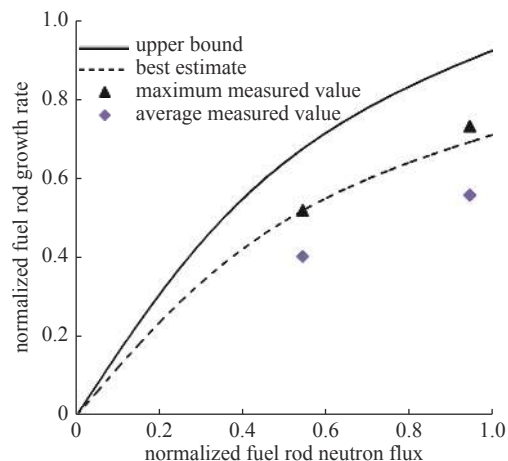
Fig. 2 Growth rate of CF₂ fuel assembly图 2 CF₂ 燃料组件辐照生长率

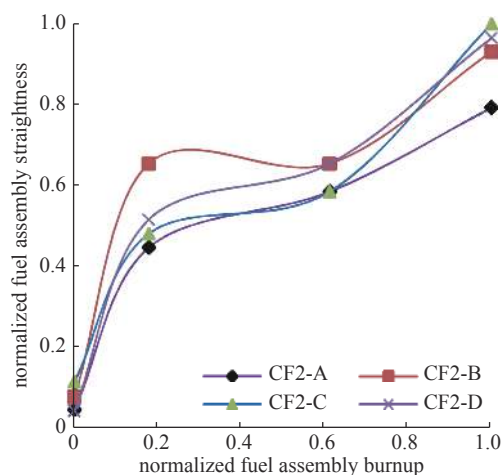
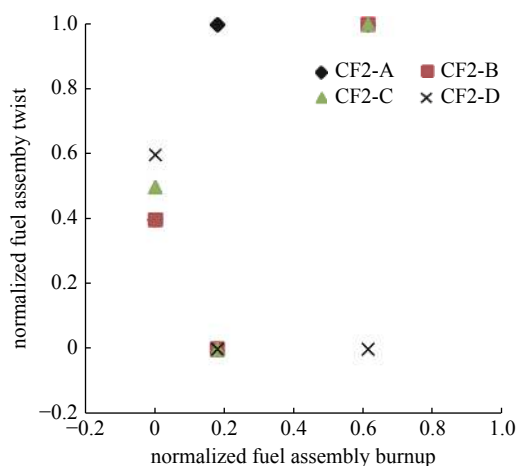
Fig. 3 Growth rate of fuel rod

图 3 燃料棒生长率

变形量随着燃耗的增加均有所增加。经过 3 个循环后,最大弯曲变形量为 2.8 mm。根据以往经验,燃料组件弯曲变形量小于 10 mm 的情况下不会引起不可接受的负面效应。CF₂ 燃料组件具有良好的抗弯曲性能,不会引起控制棒落棒不畅或装卸料操作困难。

3.5 燃料组件扭转

燃料组件过大的周向扭转变形可能导致堆内构件中定位燃料组件的销钉不能正常插入燃料组件上管座相应销孔内,甚至控制棒落棒通道不对中导致控制棒插入困难,影响装料操作或者引起燃料组件损坏。图 5 给出了 CF₂ 燃料组件上管座相对于下管座的扭转度(归一化处理)。四组 CF₂ 燃料组件的扭转度很小,均未超过 0.1°,且未呈现与燃耗相关的趋势。这与预期相符,因为燃料组件在堆内并不承受明显的周向扭转载荷。

Fig. 4 Bowing of CF₂ fuel assembly图 4 CF₂ 燃料组件弯曲度Fig. 5 Twist of CF₂ fuel assembly图 5 CF₂ 燃料组件扭转度

3.6 燃料棒弯曲

燃料棒弯曲现象主要与定位格架的夹持力有关,通常两跨定位格架之间燃料棒的辐照生长量大于对应范围导向管的生长量,过大的格架夹持力将限制燃料棒与定位格架之间的轴向相对滑动,从而引起燃料棒弯曲。燃料棒弯曲将使棒间距偏离名义范围,引起流道闭合率增加,带来偏离泡核沸腾(DNB)惩罚的负面效果。

通过池边检查测量获取了棒间距的数据,经进一步处理得到对应的流道闭合率。图 6 给出了 CF₂ 燃料组件流道闭合率(归一化处理)。CF₂ 燃料组件实际的流道闭合率远小于堆芯热工水力设计所采用的保守流道闭合率极值曲线,CF₂ 燃料棒弯曲处于较低水平。

3.7 定位格架横向生长

定位格架横向尺寸将随着快中子的辐照效应增加,引起相邻燃料组件之间间隙减小甚至闭合。为了确保燃料

组件能顺利装入和卸出堆芯,燃料组件之间必须保持一定间隙,避免相互之间发生勾挂。

图 7 给出了定位格架随快中子注量的横向生长率(归一化处理)。随着快中子注量的增加,CF₂ 定位格架横向生长率不断增加。在寿期末,格架生长率仍远小于组件间间隙闭合对应的格架生长率,不会引起装卸料困难。在实际装卸料过程中也未出现异常情况。池边外观检查结果表明,格架外条带及导向翼无勾挂引起的损伤。

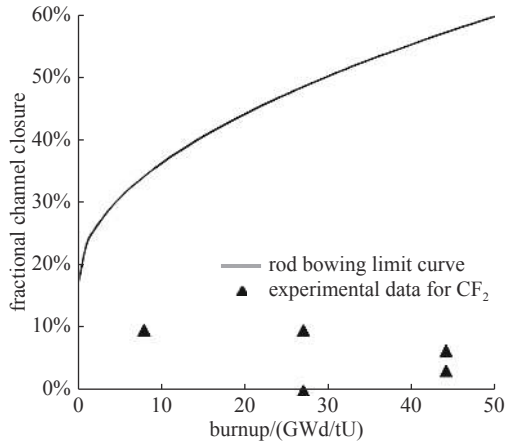


Fig. 6 Fractional channel closure of CF₂ fuel assembly

图 6 CF₂ 燃料组件流道闭合率

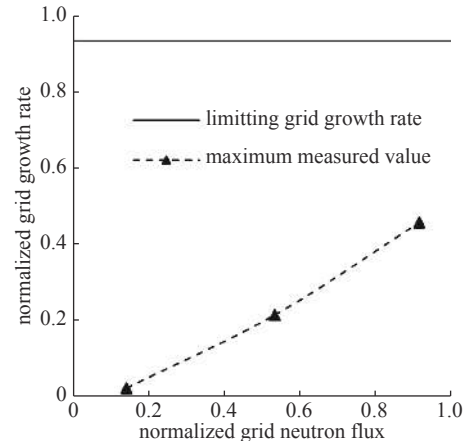


Fig. 7 Growth rate of spacer grid

图 7 定位格架横向生长率

4 结 论

结合辐照方案以及实际的辐照考验试验,本文对 CF₂ 先导燃料组件辐照性能进行了研究。结果表明,在燃耗达 44 500 MWd/tU 的情况下 CF₂ 先导燃料组件各项主要辐照性能均满足设计要求。CF₂ 燃料组件具有令人满意的辐照性能,后续可批量应用于出口项目首炉堆芯,也可应用于采用年换料制的换料堆芯。考虑到辐照经验的重要性,CF₂ 燃料组件后续仍有必要进一步积累更多辐照性能数据。

参考文献:

- [1] 李云. 华龙一号核电机组燃料组件研发[J]. 核动力工程, 2019, 40(S1): 19-22. (Li Yun. Development of HPR1000 fuel assembly[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(S1): 19-22)
- [2] 焦拥军. “华龙一号”燃料组件设计研究及验证[J]. 中国核电, 2017, 10(4): 478-482. (Jiao Yongjun. R&D and validation of HPR1000 fuel assembly[J]. China Nuclear Power, 2017, 10(4): 478-482)
- [3] 廖鸿宽. 国产自主化燃料组件入堆辐照燃料管理策略研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(2): 19-22. (Liao Hongkuan. Study of management strategy for in-core irradiated fuel assembly by self-reliance[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(2): 19-22)
- [4] 茹俊. 压水堆燃料组件辐照考验技术研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(z1): 175-177. (Ru Jun. Technical research on PWR fuel assembly in-pile test[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(z1): 175-177)
- [5] IAEA. Review of fuel failures in water cooled reactors[R]. NF-T-2.1, 2010.
- [6] 茹俊. 压水堆燃料组件安全运行保障措施分析[J]. 核动力工程, 2017, 38(6): 175-179. (Ru Jun. Analysis of measures for safe operation of PWR fuel assemblies[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(6): 175-179)
- [7] 任亮. 压水堆燃料组件池边检查技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 91-95. (Ren Liang. Pool side inspection technology for PWR fuel assembly[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(18): 91-95)
- [8] 肖忠. AFA3G燃料组件和燃料棒的辐照生长[J]. 核动力工程, 2002, 23(1): 60-62. (Xiao Zhong. Irradiation growth of AFA3G fuel assembly and fuel rod[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(1): 60-62)
- [9] 李伟才. 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. Mechanism of fuel assembly bowing in PWR and preventive measures[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(2): 55-57)
- [10] Kyu-Tae K I M. In-reactor performance of an advanced PWR fuel PLUS7 for OPR1000s in Korea[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2008, 45(8): 836-849.