

压水堆燃料组件池边检查技术研究进展

任亮,李国云,江林志,张显鹏,邝刘伟,唐洪奎,张海生

中国核动力研究设计院,成都 610041

摘要 燃料组件池边检查是核电站燃料组件首要且必不可少的重要检测项目。基于压水堆燃料组件水下检查引出池边检查技术特点,分析了当前池边检查技术的国内外研究现状,介绍了燃料组件水下外观、尺寸测量、涡流氧化膜测量等池边检查技术。池边检查技术可以准确可靠地得到压水堆内燃料组件辐照后表面状态、辐照伸长、包壳氧化程度等辐照信息数据,为压水堆燃料组件堆内辐照稳定性和完整性等评价提供必要依据。

关键词 压水堆燃料组件;辐照;池边检查技术

中图分类号 TL292

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.18.015

Poolside inspection technology for pressurized water reactor fuel assemblies

REN Liang, LI Guoyun, JIANG Linzhi, ZHANG Xianpeng, KUANG Liuwei, TANG Hongkui, ZHANG Haisheng

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China

Abstract Fuel assemblies poolside inspection (PSI) is an important test in nuclear power plants. In this paper, PSI technology is introduced, including its principle, inspection contents, and various methods. The research status at home and abroad is summarized. PSI technology usually includes visual inspection, dimension measurement and oxide film measurement. It is an important method for irradiation effect research, and has been successfully used for surface inspection, irradiation growth and oxide layer thickness test of fuel assembly, providing necessary basis for evaluation of irradiation stability and integrity of pressurized water reactor fuel assembly.

Keywords pressurized water reactor fuel assembly; irradiation; poolside inspection technology

压水堆是目前采用比较广泛的核反应堆形式,燃料组件是反应堆的核心部件。核电站在高燃耗、长循环水化学改变、低泄漏时高的功率峰因子等条件下,容易造成燃料棒破损,为了查明已破损燃料棒的破损原因,核发达国家通常采用在核电站乏燃料保存水池进行池边检查^[1-6],完成水下外观检查、尺寸测量、涡流检测和超声检漏等检验工作,然后再将燃料棒运到热室进行破坏性检验。因此,开展燃料棒池边检查工作为核电站燃料棒辐照后全面检验必不可少的检测项目,其检测的准确性事关全面检测结果的可靠性。

池边检查(PSI),或称水下检查,即用水做放射性屏蔽,

对辐照后燃料组件进行各项检查,是辐照后检查(PIE)的重要组成部分。池边检查技术是辐照效应研究的重要方法,是燃料组件研发工作中不可或缺的手段。池边检查技术主要由啜吸泄漏检查技术、外观检查技术、尺寸测量技术、涡流氧化膜测量技术、超声检漏技术及组件拆装技术组成。池边检测技术不仅是损伤件检测的重要技术方法,也是辐照效应研究的重要方法,是燃料组件研发工作中不可或缺的手段^[7-14]。

本文针对核电站保存水池非破损燃料组件的检测技术特点,综述外观检查技术、尺寸测量技术、涡流氧化膜测量技术的研究应用。

收稿日期:2014-12-28;修回日期:2015-05-31

作者简介:任亮,助理研究员,研究方向为核材料辐照后检验及无损检测,电子邮箱:450720076@qq.com

引用格式:任亮,李国云,江林志,等.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.

1 压水堆核电站的燃料组件池边检查

1.1 国内研究现状

国内压水堆核电站的燃料组件池边检查目前总体上以例行检查为主,检测项目较少,建立的水下检查技术和经验还不完整。从考察辐照效应目的的破损检查、形变测量、氧化膜测量、组件拆装^[15]等国内已具备初步条件,但均不完善,没有系统开展过相应工作。目前,中核核电运行管理有限公司秦山一期、二期,田湾、大亚湾核电站在用的燃料组件池边检查设备相对单一和分散,未形成整体检查能力。

秦山一期核电站作为中国自主核电技术的先驱,2006年李卓群等^[16]完成了过若干燃料组件的水下检查、拆装与修复工作,申请了“辐照后破损燃料组件修复工艺及其专用设备”发明专利。主要工具和台架均为自行设计制造,燃料组件啜吸检查系统由北京核工程研究设计院研制,燃料组件水下拆装系统由上海核工程研究设计院设计研制。根据组件特点,该系统采用组件倾翻、拆下管座方式,在燃料棒拆卸过程的同时还进行了涡流无损探伤(图1)。



图1 水下组件倾翻装置

Fig. 1 Tilting device for fuel assemblies

秦山二期核电站采用非接触式燃料组件超声形变测量系统检测燃料组件辐照弯扭变形^[17],该装置由核动力运行研究所和秦山二期共同开发。秦山第二核电厂从102大修开始,每次换料大修,均选取部分有代表性的燃料组件对其进行辐照变形测试和数据分析,为堆芯装料提供了燃料组件变形数据支持^[18,19]。检测精度0.5 mm,可保证大修期间装卸料的操作安全。秦山二期核电厂已利用辐照变形超声测试系统对431组已辐照燃料组件进行了辐照变形测量。该测量装置不足之处在于不能进行纵、横向测量,比如组件长度、燃料棒直径、棒间距等。

田湾核电站,针对六角形燃料组件,万志坚等^[20]和焦万均、先登飞等^[21-27]联合设计开发了非接触式激光投影测量装置用于检测燃料组件整体形变,申请了发明专利。该测量装置对物体外形轮廓及变形量的测量,通常采用位移传感器逐点测出物体相对于某几个基准平面或基准曲面的相对位移。但该测量方法所需要的测试时间较长,不适合大尺寸物体的变形测量。

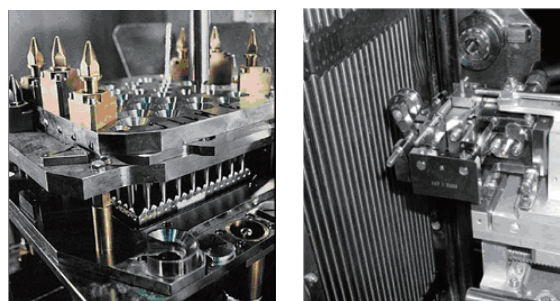
高永明等^[28]设计开发了新型综合形变视频测量系统检测燃料组件辐照后形变。该系统采用英国联合斯特林提供的抗辐射水下摄像系统,结合图形分析软件和自行设计的检查台架,测量组件整体形变,组件整体形变测量精度0.5 mm。采用法国ECHO330超声检测仪,在燃料组件破损检查中确定组件中破损燃料棒的位置,有较高可靠性。

中国核动力研究设计院通过引进韩国池边检查设备,在秦山二期核电站成功应用于燃料组件水下外观、尺寸测量及包壳氧化膜厚度测量。首次掌握了目前国际上较先进的池边检查技术,实现为大型商用核电站提供完整的池边检查服务,该技术的成功应用将大大推进国内先进燃料组件的研发进程,保障核电厂的安全运营。

1.2 国外研究现状

国外核技术发达国家例如法国AREVA、美国西屋、西班牙ENUSA、日本三菱、韩国KNF等均有多年的池边检查技术经验,对燃料组件的发展和核电厂安全给予了持续的支持。

法国AREVA在该领域技术最成熟。德国Siemens-KWU的池边检查业务在FramatomeANP的整合中纳入AREVA旗下。水下综合尺寸测量台架BIPIC可进行燃料组件整体形变测量,也可用于安装外围燃料棒氧化膜测厚装置、直径测量装置和辅助外观检查摄像头。燃料组件超声检测ECHO330装置利用超声波在燃料棒包壳内有水和无水时的衰减差异原理进行破损判断。氧化膜涡流测厚装置SEBRA可以插入组件内部,实现所有燃料棒氧化膜厚度的测量^[29](图2)。



(a) 组件拆装

(b) 尺寸测量

图2 燃料组件池边检查系统

Fig. 2 Poolside inspection system for fuel assemblies

西班牙核燃料制造商ENUSA和核技术研究单位TEC-NATOM联合研发了池边检查系统,并有多年成功应用的经验。尺寸测量系统SICOM-DIM可实现组件长度、弯扭曲度、定位格架宽度的测量。单根燃料棒检查系统SICOM-ROD可实现燃料棒直径测量和氧化膜厚度测量。

韩国核燃料公司KNF在法国和西班牙技术支持下成功开发了自己的池边检查设备,并已有10余年应用经验。组件检查系统为一大型可拆卸式水下检查台架,可实现组件外观检查、尺寸测量,安装超声检测系统,结合专用工具可实现组件上管座拆除与复装。

美国是核电技术大国,但近30年的发展停滞期直接影响

了燃料组件池边检查业务的开展。多年来,西屋、通用、B&W、CE等核技术提供商均以研发设计和换料设备相关技术出口为主要业务,在美国国内电厂的燃料组件池边检查工作已经非常有限。

俄罗斯的池边检查技术较为成熟,并在本国和东欧国家开展检查工作,以检查VVER系列六角形结构燃料组件为主。

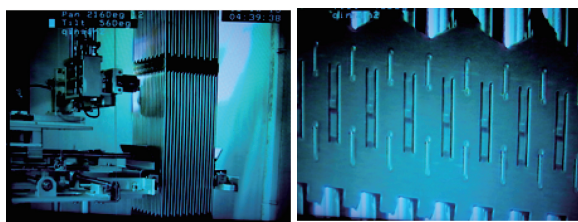
日本三菱曾进行过燃料组件水下图像法形变测量,但未见有其他项目开展。

其他国家如印度、巴基斯坦、阿根廷等国也进行过一些池边检查工作,大多集中在研究堆和重水堆燃料元件。

2 池边检查技术

2.1 水下外观检查技术研究

燃料组件辐照后的外观是组件辐照稳定性和完整性检查最直接、重要的内容,可以判断燃料组件辐照后腐蚀状况和明显的变形现象等。水下外观检查技术主要研究采用水下摄像头在保存水池水下,通过调整摄像头角度检查燃料组件整体明显变形、组件可见缺陷和损伤、燃料棒表面状况、沉积物附着情况等。组件水下外观检查典型照片见图3。



(a) 组件整体检查 (b) 组件格架检查

图3 燃料组件水下外观检查

Fig. 3 Underwater visual inspection

2.2 水下尺寸测量技术研究

燃料组件辐照后形变是组件辐照稳定性和完整性检查最直接、重要的内容。水下尺寸测量技术主要研究用图像法测量组件高度、弯扭、上下管座肩距、棒间距;采用差动变压器LVDT接触式测量燃料棒直径和定位格架宽度。通过燃料组件水下尺寸测量技术研究,可以判断燃料组件是否可以安全回堆或储存。

2.2.1 图像法测量技术

图像法测量技术是基于视频图像与标定相结合的方法,通过标定将组件实际位置与编码器值对应,利用水下摄像头对燃料组件进行图像采集,经由图像处理系统得到组件定位格架的位置图像并将其转换成视频数字信号,在计算机上计算得到测量结果的技术。

1) 组件高度。组件高度测量的目的是评价组件辐照后的生长情况,主要研究组件总高、下管座底面至上管座底面的距离及下管座底面至各层格架的距离的变化情况。测量时,先用标尺校准编码器值,然后用吊车将燃料组件吊运至摄像头前,从上至下对组件聚焦图像并录像,计算得到组件

高度^[30](图4)。

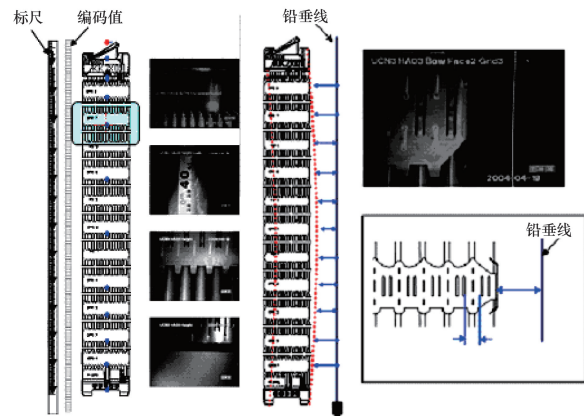


图4 组件高度测量及弯曲度测量

Fig. 4 Length and bow measurement of fuel assemblies

2) 组件弯曲度。燃料组件弯曲可能因反应堆组件相互间干扰而导致组件破损,弯曲度测量技术主要针对燃料组件的弯曲量,并给出发生最大弯曲的方位,是评价燃料组件的辐照弯曲特性的重要指标。组件弯曲度定义为铅垂线距组件上下管座的距离,与铅垂线距组件各层定位格架中心连线的距离差值的最大值。按此测量方法得到组件4个面的弯曲度,取最大弯曲度为组件的弯曲度。测量时,将摄像头聚焦到组件上管座基准位置和铅垂线;从录像上得到上下管座及各定位格架基准位置距铅垂线的像素值;计算得到组件各测量面的弯曲度,最大弯曲度即为燃料组件弯曲度(图4)。

3) 组件扭曲度。燃料组件扭曲度定义为组件上下管座的相对扭转程度,用于评价燃料组件由于辐照引起的扭转,组件扭曲可能因反应堆组件相互间干扰而导致组件破损。

测量时,首先通过标尺校核得到摄像头在横向上的像素值与摄像头角度的关系,然后使两条铅垂线及上管座均出现在图像视野范围内。左右移动摄像头至两条铅垂线重合且正对上管座观察面时开始录像,最后通过图像处理软件计算组件的扭曲度^[30],测量原理见图5。

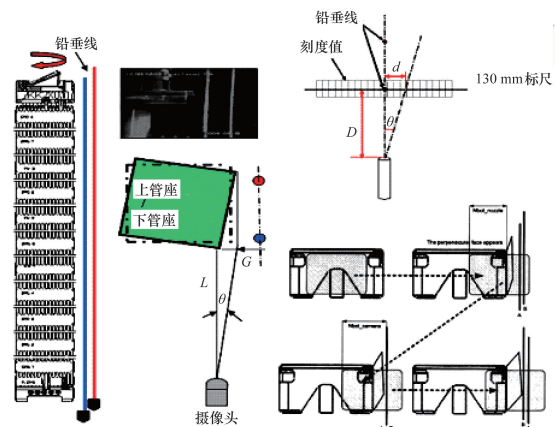


图5 组件扭曲度测量原理

Fig. 5 Principle for twist measurement of fuel assemblies

4) 组件燃料棒与上、下管座的间隙。燃料组件燃料棒与上、下管座的间隙测量的目的是评价燃料棒辐照增长情况,该技术主要研究测量燃料组件外围一圈燃料棒与上、下管座的间隙,每根燃料棒的上端塞顶点至上管座底面的距离值、下端塞底点至下管座部件顶面距离。

测量时,通过吊车调整燃料组件位置,使组件上管座和燃料棒部分出现在观测范围内;摄像头左右移动并录像;用测量软件得到对应面各燃料棒至上管座下底面像素值并输入燃料棒长度设计值;计算得到组件外围燃料棒距上管座下底面肩距值。

5) 燃料棒间距。燃料棒间距测量的目的是评价辐照后燃料棒的弯曲变形程度,该技术主要是研究燃料组件外围一圈燃料棒的间距,给出相邻两根燃料棒在燃料组件轴向每一跨高度位置的棒间距离。

测量时,通过吊车调整燃料组件位置,使第1、2两层定位格架间燃料棒在摄像头观测范围内;从录像信息,利用测量软件得到燃料棒在各层跨距间的像素值,经过计算得到燃料棒的间距。

2.2.2 LVDT 测量技术

差动变压式传感器(LVDT)测量技术是利用电磁感应的原理,将被测位移量的变化转换成变压器线圈的互感系数的变化,再由测量电路转换成电压的变化量输出,实现由非电量到电量的转换的测量技术。

1) 燃料棒直径。燃料棒直径测量技术主要是研究燃料组件外围燃料棒的直径。测量时,首先将直径测量LVDT探头安装在工作平台上;安装直径测量标准棒,用标准棒对设备进行校准;然后进入测量界面,输入燃料组件相关参数;将LVDT探头接触燃料棒表面,从上至下进行测量;测量完成后,燃料棒测量区域的平均直径将自动计算完成。

2) 定位格架宽度。燃料组件定位格架宽度测量技术主要研究测量燃料组件所有格架的横向外形尺寸。测量时,首先将LVDT探头及格架定位装置安装在工作平台上;然后用标准格架对LVDT进行校准并保存标定数据(图6);最后对燃料组件定位格架宽度进行测量(图7),其中红色圈出部分为LVDT探头。

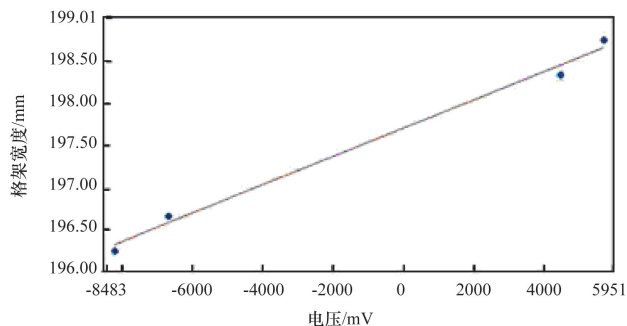
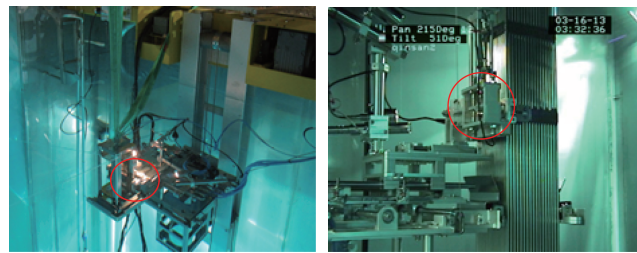


图6 标准定位格架宽度校准

Fig. 6 Standard grid width calibration



(a) 标准定位格架水下校核

(b) 定位格架宽度测量

图7 燃料组件定位格架宽度测量

Fig. 7 Grid width measurement

2.3 涡流氧化膜测量技术

燃料包壳水侧腐蚀,特别是氧化膜增厚是限制燃料组件寿命的重要因素。涡流氧化膜测量技术采用笔式涡流探头,利用涡流线圈提高效应原理进行包壳管外表面氧化膜厚度测量。

测量时,首先对涡流测厚仪进行参数设置及标定;然后用标准厚度膜片校核标准棒;依次测量组件各跨距位置燃料棒氧化膜厚度并保存测量数据;测量对比棒上氧化膜厚度,计算每段测量平均值并进行复核^[21],氧化膜厚度测量见图8。

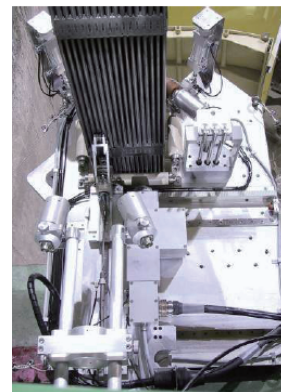


图8 氧化膜厚度测量

Fig. 8 Oxide film thickness measurement

3 结论

燃料组件池边检查技术是新燃料研发的常规检测手段,在20多年的发展中不断革新和改进,目前是国际上应用最普遍的现场快速检测技术。中国作为核技术发展的后起之秀,如何更好地引进、吸收并应用国外先进检查技术,进而创新研发出适应于中国自主品牌燃料组件的池边检查技术,实现中国池边检查技术的跨越式发展。

目前,中国核动力研究设计院已经将压水堆燃料组件池边检查技术成功应用于中核核电运行管理有限公司秦山二期核电站燃料组件检测项目中,检测数据与文献数据一致。中国广核集团在5年时间里累计投入巨资建立了池边检测装置研发平台,具备了检测装置研发能力。

参考文献 (References)

- [1] Rao N, Basu S. Poolside inspection facility for PWR fuel assemblies[J]. Iaea Tecdoc 1050, 1998, 40(2): 71-80.
- [2] Tsuda T, Yamaguchi Y, Kosaka Y, et al. PIE results and new techniques applied for 55 GWd/t high burnup fuel of PWR[J]. Iaea Tecdoc 1635, 2003, 21(2): 34-42.
- [3] Deng J X, Deng F. The setting of sipping test devices for irradiated fuel in nuclear power plant[J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2002, 6(12): 13-16.
- [4] Shin J, Kim J, Kwon J. Poolside examination techniques applied for development of an advanced PWR fuel, PLUS7[J]. Icone Eighteenth, 2010, 7(1): 113-121.
- [5] Kim J, Kwon J, Shin J. KNFC experience in fuel repair and poolside examination[J]. Pacific Basin Nuclear Conference Tirteenth, 2002, 4(2): 55-62.
- [6] Park J. KNFC fuel service technology development[J]. Smirt Eighteenth, 2005, 1(12): 25-33.
- [7] 刘勤, 马凤鸣, 刘鸣. 差动变压式传感器位移测量系统设计[J]. 天津工程师范学院学报, 2005, 3(15): 21-27.
Liu Qin, Ma Fengming, Liu Ming. Design of a measuring system using differential transformer sensor[J]. Tianjin University of Technology, 2005, 3(15): 21-27.
- [8] 丁捷, 朱丽兵. 燃料棒更换装置的三维建模和运动仿真[J]. 核技术, 2010, 33(2):4-13.
Ding Jie, Zhu Libing. 3-D modeling and motion simulation of fuel rod-replacing equipment[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(2): 4-13.
- [9] 张丽琴, 钟志民, 李劲松, 等. 燃料组件控制棒包壳在役超声涡流自动检测[J]. 无损检测, 2005, 27(1): 22-28.
Zhang Liqin, Zhong Zhimin, Li Jinsong, et al. In-service ultrasonic and eddy current auto-inspecting of RCCA cladding[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(1): 22-28.
- [10] 屈国普, 凌球, 郭兰英, 等. 一种用于退役核燃料元件包壳的破裂检测技术[J]. 核技术, 2005, 28(6): 111-116.
Qu Guopu, Ling Qiu, Guo Lanying, et al. A safety check-up method for decommissioned reactor fuel element cladding[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(6): 111-116.
- [11] 曹殿鹏, 霍小东. VVER燃料组件变形对象限功率倾斜的影响[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(增1): 15-19.
Cao Dianpeng, Huo Xiaodong. Effect of VVER fuel assembly deformation on quadrant power tilt[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(Suppl 1): 15-19.
- [12] 肖岷. 压水堆核电站燃料管理燃料制造与燃料运行[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 86-92.
Xiao Min. Pressurized water reactor nuclear power plant fuel management, fuel fabrication and fuel run[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009: 86-92.
- [13] 李伟才, 肖中. 压水堆燃料组件弯曲变形机理及规避措施[J]. 核动力工程, 2004, 2(2): 49-55.
Li Weicai, Xiao Zhong. Mechanism of fuel assembly bowing in PWR and preventive measures[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 2(2): 49-55.
- [14] 邓凌献, 樊秀梅, 朱华, 等. 池边啜吸检测系统的研制[C]//中国核学会核能动力学理事会换届暨第七届学术年会论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2002: 25-29.
Deng Xunxian, Fan Xiumei, Zhu Hua, et al. Development of the pool sipping detection system[C]//Chinese Nuclear Society Nuclear Society Council General Dynamics and Seventh Annual Conference Proceedings. Beijing: China Atomic Energy Press, 2002: 25-29.
- [15] 沈秋平, 陈志清, 徐道平, 等. 燃料组件修复装置的设计[J]. 核技术, 2010, 33(2): 148-151.
Shen Qiuping, Chen Zhiqing, Xu Daoping, et al. Design of the fuel subassembly repairing device[J]. Nuclear Technology, 2010, 33(2): 148-151.
- [16] 李卓群, 薛新才, 郑宏练, 等. 辐照后破损燃料组件修复工艺及其专用设备: 中国, 200610087598.8[P]. 2006-06-16.
Li Zhuoqun, Xue Xincan, Zheng Honglian, et al. Damaged irradiated fuel assemblies repair technology and special equipment: China, 200610087598.8[P]. 2006-06-16.
- [17] 张兴田. AFA2G 17×17型燃料组件辐照变形超声测试系统研制及在线测试[M]. 北京: 原子能出版社, 2006.
Zhang Xingtian. Development of deformation ultrasonic testing system for AFA2G 17×17 irradiated fuel assemblies and online testing[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2006.
- [18] 何明智. 秦山第二核电站燃料组件运行经验[J]. 中国核电, 2009, 2(4): 354-362.
He Mingzhi. Fuelassembly operation experience in Qinshan II[J]. China Nuclear Power, 2009, 2(4): 354-362.
- [19] 叶国栋, 潘泽飞, 张兴田. 中核集团秦山第二核电站燃料管理持续改进[C]//中国核学会2009年学术年会论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2009: 37-44.
Ye Guodong, Pan Zefei, Zhang Xingtian. Continuous improvement of Qinshan nuclear power plant fuel management[C]//Chinese Nuclear Society 2009 Annual Conference Proceedings. Beijing: China Atomic Energy Press, 2009: 37-44.
- [20] 王志坚, 唐月明, 杨波, 等. 压水堆核电站辐照后燃料组件变形检测方法及其实现装置: 中国, 200810172214.1[P]. 2008-10-31.
Wan Zhijian, Tang Yueming, Yang Bo, et al. The deformation detection methods for irradiated PWR fuel assemblies and its implementation device: China, 200810172214.1[P]. 2008-10-31.
- [21] 焦万均, 韩震宇, 先登飞, 等. 模拟核燃料组件变形检测系统原理及实现[J]. 计量与测试技术, 2006, 11(33): 30-31.
Jiao Wanjun, Han Zhenyu, Xian Dengfei, et al. The principle & realization measuring simulative fuel assemblies' distortion[J]. Measurement and Testing Technology, 2006, 11(33): 30-31.
- [22] 先登飞, 韩震宇, 陈万良, 等. 用激光扫描投影法检测核燃料模拟组件变形[J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 184-186.
Xian Dengfei, Han Zhenyu, Chen Wanliang, et al. Measuring simulated nucleus fuel modules' distortions with laser scan and projection method[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(3): 184-186.
- [23] 先登飞. 核燃料组件变形检测系统样机研制[D]. 成都: 四川大学, 2006.
Xian Dengfei. Development of nuclear fuel assembly deformation detection system prototype[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [24] 刘赫. 核燃料组件变形尺寸测量系统设计[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Liu He. Design on nuclear fuel assembly deformation measurement system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [25] 刘敬露, 王颖, 先登飞. 浅谈核燃料组件变形的评价[J]. 机电工程技术, 2008, 37(1):110-117.
Liu Jinglu, Wang Yin, Xian Dengfei. Evaluation to the nuclear fuel assembly distortion[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2008, 37(1): 110-117.
- [26] 邓昌义. 核燃料组件检查仪技术改造研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Deng Changyi. Study on transformation of a nuclear fuel assembly tester[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [27] 刘敬露. 核燃料组件变形的评价及其实现[D]. 成都: 四川大学, 2006.
Liu Jinglu. Evaluation of nuclear fuel assembly deformation and its implementation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [28] 高永明, 李声, 李丽丹. 燃料组件水下非接触变形测量方法[J]. 核动力工程, 2010, 4(31): 87-90.
Gao Yongming, Li Sheng, Li Lidan. A method for survey of underwater non-contact deformation of fuel assemblies[J]. Nuclear Engineering, 2010, 4(31): 87-90.
- [29] Zwicky H U, Wiktor C G, Schrire D. Spent fuel performance assessment and research[J]. Iaea Tecdoc 1343, 2003, 2(11): 76-84.
- [30] Shin J. Equipment operation and maintenance manual for poolside examination system[C]. Korea: Korea Nuclear Factory, 2012.
- [31] Otomo S, Seki T, Kataoka K, et al. Poolside fuel inspection experience and development at NFI[J]. Smirt eighteen, 2005, 14(3): 38-44.

(责任编辑 刘志远)