

# 辐照后板材厚度测量方法改进

任亮, 江林志, 郭成明, 尹春艳, 余飞杨

中国核动力研究设计院, 成都 610041

**摘要** 在分析影响现有辐照后板材厚度测量不确定度高的原因基础上, 进行了大量的对比测量试验, 得到了相关测量数据, 提出了一系列改进措施, 对原有热室内辐照后板材厚度测量方法进行了改进。通过设计专用测量夹具, 将原有机械手拖动测量方式改为夹具导向式测量, 有效地解决了板材厚度测量时竖直侧立问题, 标准试块固定问题及电感测微仪测头与板材接触力问题, 使测量数据不确定度降低了 1 个数量级, 大大降低了人员接受剂量、劳动强度及设备使用时间, 取得了明显的经济效益和社会效益, 填补了国内辐照后板材厚度精确测量在核能研究与应用领域的空白, 所改进的测试方法有很好的应用前景。

**关键词** 辐照后板材; 厚度测量; 不确定度

**中图分类号** TL292 **文献标识码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.34.011

## Improvement of Thickness Measurement of Post Irradiation Sheet

REN Liang, JIANG Linzhi, GUO Chengming, YIN Chunyan, YU Feiyang

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China

**Abstract** The high uncertainty in the thickness measurement of post irradiation sheet was analyzed, and based on the analysis, a large number of measurement tests were taken, a series of improvements were proposed. The manipulator driving measurement was replaced with the action-oriented measurement, which has effectively solved the problems concerning the stick side determination, the standard block fixing and the control of the head contact forces. The measurement uncertainty was reduced by one order of magnitude. The radiation dose, the labor tension and the time were likewise reduced with very significant economic and social benefits.

**Keywords** post irradiation sheet; thickness measurement; uncertainty

### 0 引言

辐照后检验是验证反应堆结构元件和燃料组件的有关设计、制造工艺以及元件在堆内运行参数合理性的必要手段, 辐照后板材作为反应堆结构材料, 充分了解其各项性能就显得尤为重要。无损检测是辐照后检验的重要组成部分, 是研究堆内结构部件在辐照条件下行为规律的前提与基础, 尺寸测量是无损检测的关键流程, 板材厚度测量是尺寸测量的重要环节<sup>[1-3]</sup>。

辐照后板材由于带有较强的放射性, 需要在热室内进行测量。热室是进行高放射性试验和操作的屏蔽试验室, 它和周围环境隔绝, 以防止射线辐射和放射性污染。前墙上装有铅玻璃或高密度液体的窥视窗, 并装有机械手可进行远距离

操作(图 1)。电感测微仪测量部分安装于热室壳体内<sup>[4]</sup>, 控制部分安装于热室前区, 板材的夹持与拖动采用机械手完成(图 2)。

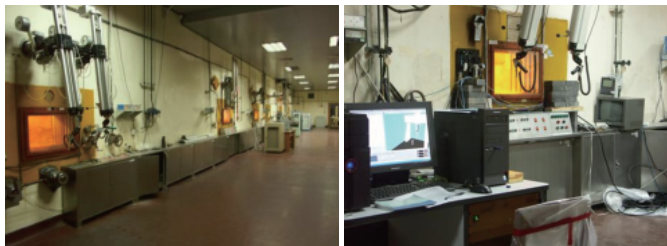
目前, 国内只有中国核动力研究设计院和中国原子能研究院采用过电感测微仪在热室内对辐照后元件进行尺寸测量, 国外多采用电感测微仪在水下进行棒元件的尺寸测量。

不确定度是指由于测量误差的存在, 对被测量值的不能肯定的程度, 即测量结果的可信赖程度。测量不确定度是目前国际上公认的对于误差分析中的最新理解和阐述。根据计量标准的要求<sup>[4-5]</sup>, 本文采用标准不确定度(A类评定)对测量方法改进前后的数据进行评定, 相关计算公式如下。

$$(1) \text{平均值: } \bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n$$

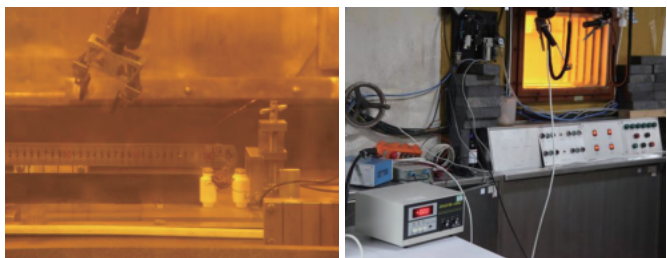
收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2012-10-15

作者简介: 任亮, 助理研究员, 研究方向为核材料辐照后无损检测, 电子信箱: renliang366@gmail.com



(a) 热室前区 (b) 检查热室  
(a) Front area of hot cell (b) Hot cell

图 1 中国核动力研究设计院热室  
Fig. 1 Hot cell of NPIC



(a) 热室内测量部分 (b) 热室外控制部分  
(a) Measurement section (b) Control section  
in hot cell outside of hot cell

图 2 热室电感测微仪  
Fig. 2 LVDT of hot Cell

(2) 残差平方和:  $\sum V_k^2 = (X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2$

(3) 标准不确定度:  $U(x) = [\sum V_k^2 / (n-1)]^{0.5}$

其中,  $X_i$  为第  $i$  个测量值,  $n$  为测量值数量。

本文采用夹具导向式测量方法对原有测量方法进行改进,包括改进了板材竖直侧立方式和标准块固定方式及电感测微仪测头与板材接触力,以期降低测量人员的劳动强度和受照剂量,节省了工作时间和科研成本。

### 1 原测量方法

采用机械手夹持板材使其保持侧立状态,将电感测微仪的两个测头接触板材表面并保持一定力度进行测量。这种方法要求机械手操作人员夹紧板材并使其绝对垂直于测量平面放置,而电感测微仪测头要求紧贴板材又不能力度过大。事实上,由于切割引起的板材边沿毛刺导致板材厚度测量时无法绝对侧立放置,以及电感测微仪测头无法适度贴紧板材的问题始终存在。

从测量后的厚度尺寸数据来看,测量数值波动大,与标准值相差较大。随着板材侧立角度的增加,测量值呈递增趋势(表 1)。板材边沿毛刺导致在厚度测量时板材无法绝对侧立放置,测量数据的不确定度偏高(表 2),不能真实反映板材实际厚度。因此需要进行反复测量验证,从而增加了人员的工作时间和受照剂量。

表 1 板材不同侧立角度下的厚度测量结果

Table 1 Result on thickness measurement of sheet in different side elevation angles

测量点	板材厚度测量/mm		
	侧立角度 1	侧立角度 2	侧立角度 3
1	3.088	3.102	3.112
2	3.091	3.099	3.120
3	3.095	3.098	3.123
4	3.086	3.100	3.124
5	3.086	3.097	3.119
6	3.087	3.096	3.123
7	3.084	3.098	3.127
8	3.080	3.103	3.115
9	3.091	3.103	3.112
10	3.094	3.099	3.132
11	3.087	3.097	3.126
12	3.086	3.094	3.117
13	3.085	3.096	3.115
14	3.089	3.101	3.120
15	3.093	3.093	3.119
16	3.076	3.101	3.117
17	3.080	3.104	3.121
18	3.086	3.099	3.126
19	3.084	3.100	3.119
20	3.085	3.096	3.123
备注	侧立角度 3>角度 2>角度 1		

表 2 测量方法改进前厚度测量结果

Table 2 Result of thickness measurement before improvement

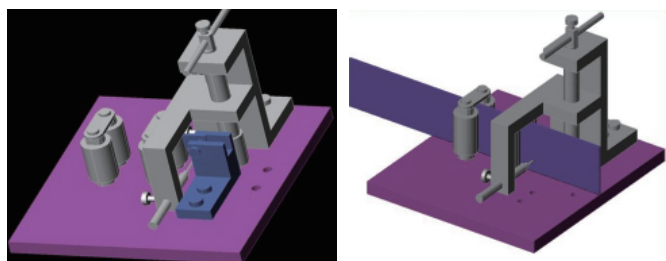
测量点	板材厚度测量/mm				标准不确定度 /mm
	第 1 条线	第 2 条线	第 3 条线	第 4 条线	
1	3.098	3.088	3.123	3.103	0.003—0.020
2	3.140	3.099	3.210	3.150	
3	3.086	3.100	3.096	3.094	
4	3.150	3.135	3.074	3.120	
5	3.086	3.097	3.093	3.092	
6	3.096	3.096	3.087	3.093	
7	3.099	3.088	3.086	3.091	
8	3.095	3.124	3.097	3.105	
9	3.098	3.103	3.102	3.101	
10	3.213	3.154	3.187	3.185	
11	3.100	3.109	3.089	3.099	
12	3.086	3.112	3.103	3.100	
13	3.085	3.113	3.103	3.100	
14	3.189	3.176	3.168	3.178	
15	3.099	3.093	3.102	3.098	
16	3.076	3.101	3.090	3.089	
17	3.098	3.104	3.099	3.100	
18	3.146	3.123	3.136	3.135	
19	3.097	3.100	3.082	3.093	
20	3.089	3.096	3.096	3.094	

## 2 测量方法改进

### 2.1 设计专用夹具

专用夹具主要有包括板材固定、导向与保持竖直侧立, 电感测微仪测头上下移动及标准块热室内校验三大功能。

夹具中部设计了 4 根导向柱, 通过导向柱约束薄板, 使其即不会左右晃动又能前后移动, 能够稳定保持竖直侧立状态, 考虑到板材边缘切割毛刺的影响, 在导向柱上、下沿均做了台阶处理, 使板材导入时, 边缘位于台阶空腔段, 避免测量时测头接触到毛刺, 影响测量准确度; 右后方为机械式螺杆调节装置, 通过调节螺杆旋转匝数实现电感测微仪测头上下精确位移, 利用测头固定旋钮调节测头接触力; 设计独立式标准块专用夹具, 用于对比测量校标, 校验完成后可单独取下移走而不会对测量工作造成影响。专用夹具设计效果如图 3 所示。



(a) 标准块校验 (b) 板材厚度测量  
(a) Check for standard block (b) Thickness measurement of sheet

图 3 专用夹具设计效果图

Fig. 3 Effect diagram of special fixture design

### 2.2 改进测量方式

使用专用夹具后, 板材通过导向柱, 竖直侧立与平直走向得以很好的控制。测量时将电感测微仪测头固定在专用夹具上, 调节好测头接触力, 通过标准厚度试块对设备进行校验, 校验结束后移走标准块夹具; 用机械手夹持板材通过导向柱至电感测微仪测头位置, 调节旋钮使电感测微仪测头适度贴紧板材, 调节夹具顶部螺杆使测头移动到板材指定测量位置; 最后用机械手水平推动板材匀速通过导向柱, 用机械手调节夹具顶部螺杆使测头沿板材上下移动, 完成整个测量区域内厚度测量。

## 3 改进前后比较

通过对测量方法的改进, 将原有拖动式测量方法改为导向式测量, 有效降低了机械手操作难度, 使板材保持侧立状态更易控制, 测点选择更均匀, 测量不确定度降低了 1 个数量级, 提高了工作效率, 有效地降低了操作人员接受剂量、劳动强度和设备磨损。

### 3.1 测量不确定度

通过对测量方法改进前后各 20 个测量点的测量数据不确定度进行统计分析发现, 测量方法改进后测量不确定度比改进前降低了 1 个数量级, 具体数据如表 3 所示。

表 3 测量方法改进前后数据对比

Table 3 Data obtained before and after improvement

测量方法	测量点	板材厚度尺寸测量/mm				标准不确定度/mm
		测量次数			平均值	
		1	2	3		
改进前	1	3.299	3.295	3.287	3.294	0.004—0.020
	2	3.270	3.290	3.270	3.277	
	3	3.287	3.276	3.292	3.285	
	4	3.279	3.270	3.263	3.271	
	5	3.240	3.238	3.246	3.241	
	6	3.239	3.246	3.241	3.242	
	7	3.234	3.229	3.232	3.232	
	8	3.215	3.198	3.192	3.202	
	9	3.201	3.197	3.205	3.201	
	10	3.213	3.225	3.186	3.202	
	11	3.194	3.195	3.191	3.191	
	12	3.177	3.186	3.188	3.184	
	13	3.165	3.170	3.172	3.169	
	14	3.149	3.153	3.146	3.149	
	15	3.138	3.145	3.134	3.139	
	16	3.137	3.146	3.135	3.139	
	17	3.125	3.118	3.128	3.124	
	18	3.128	3.119	3.115	3.121	
	19	3.121	3.106	3.122	3.112	
	20	3.105	3.099	3.106	3.103	
改进后	1	3.299	3.295	3.287	3.294	0.001—0.008
	2	3.275	3.287	3.273	3.278	
	3	3.271	3.270	3.269	3.270	
	4	3.267	3.262	3.260	3.263	
	5	3.242	3.240	3.248	3.248	
	6	3.239	3.246	3.241	3.242	
	7	3.234	3.229	3.232	3.232	
	8	3.215	3.216	3.214	3.215	
	9	3.208	3.214	3.207	3.210	
	10	3.203	3.202	3.204	3.203	
	11	3.194	3.192	3.191	3.192	
	12	3.177	3.186	3.188	3.184	
	13	3.165	3.170	3.172	3.169	
	14	3.158	3.153	3.162	3.158	
	15	3.149	3.145	3.152	3.149	
	16	3.137	3.146	3.135	3.139	
	17	3.127	3.133	3.128	3.129	
	18	3.128	3.119	3.115	3.121	
	19	3.113	3.108	3.109	3.110	
	20	3.105	3.099	3.106	3.103	

### 3.2 社会及经济效益

#### 3.2.1 社会效益

热室操作前区的辐射水平为 5.12 $\mu$ Sv/h, 改进前以每测量

1 组数据需重复测量 3 次来计算,测量 100 组数据为例,在人员接受剂量、劳动强度和机器磨损时间 3 个主要方面进行了比较,如表 4 所示。从表中数据看出,测量方法改进后人员接受剂量、劳动强度及机器磨损时间分别降低 66.4%。

表 4 板材侧立状态保持的方法改进前后  
对人员和设备的影响

Table 4 Effect on persons and equipment before  
and after improvement

工作内容	人员接受 剂量/ $\mu\text{Sv}$	人员劳动 强度/d	机器磨损 时间/d
改进前	512	12.5	12.5
改进后	171	4.2	4.2

### 3.2.2 经济效益

在试验过程中,热室通风、照明系统必须全部运行,测量方法改进后测量效率提高,大大缩短了测量时间,可使热室通风、照明系统的运行时间相应减少,同时减少了测量前后防护用品及去污工作产生的放射性废物处理费用,测量 100 组数据可节省成本 5000 元以上。

## 4 结论

提高辐照后板材厚度测量精度是核能研究与应用领域的重要命题之一。本文在分析影响现有辐照后板材厚度测量不确定度的基础上,改进了尺寸测量方法。通过对测量方法的改进,将原有拖动式测量方法改为导向式测量,有效降低了机械手操作难度,使板材保持侧立状态更易控制,测点选择更均匀,使数据测量不确定度降低 1 个数量级,有很强的

经济效益和社会效益,为中国新型燃料组件的应用提供了辐照后测量数据,有利于分析新型燃料组件辐照性能的影响规律,所改进的测试方法有很好的应用前景。

### 参考文献 (References)

- [1] 王树人, 韩传斌, 潘旦光, 等. 秦山核电厂压水堆试验燃料组件辐照后检验[J]. 核科学与工程, 1994(3): 235-242.  
Wang Shuren, Han Chuanbin, Pan Danguang, et al. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1994(3): 235-242.
- [2] 冯明全, 王云惠, 顾剑涛, 等. HFETR 铀组件辐照后检验及性能评价[J]. 中国核科技报告, 2003(2): 121-127.  
Feng Mingquan, Wang Yunhui, Gu Jiantao, et al. China Nuclear Science and Technology Report, 2003(2): 121-127.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1331—2011 电感测微仪校准规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1331—2011 Calibration specification for inductive micrometers [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2011.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2011 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1059.1—2011 Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2011.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1001—2011 通用计量术语及定义[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1001—2011 General terms in metrology and their definitions [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2011.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·

## “第一届全国软土工程学术会议”征文



“第一届全国软土工程学术会议”将于 2013 年 11 月 15—17 日在上海市召开。本次会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和软土工程专业委员会共同主办。

征稿范围:软土强度与变形特性;软土特性测试技术;软土基础工程理论设计与施工;软土地下工程理论设计与施工;软土地区重大工程实践;软土工程的其他问题

全文截稿日期:2012 年 4 月 30 日。

通信地址:上海市四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系(200092)。

电子信箱:softsoilcom@163.com。

大会网站:<http://geonjut.42137.east-icp.cn/show.asp?id=706>。