

板形核燃料元件无损检测技术

何凤岐

(中国核动力研究设计院, 成都 610041)

摘要 为硅化铀板形核燃料元件生产建立了一套无损检测技术, 即软 γ 射线图象显示、 α 计数法测表面污染、宽频超声检测结合质量、相敏涡流测厚、智能水隙检测和组件外形尺寸形状位置公差等。介绍了这些无损检测技术的原理和技术性能指标, 以及无损检测在质量保证体系中的作用与控制。

关键词 射线检验 超声检验 涡流检验 反应堆 燃料组件

NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES FOR PLATE-TYPE NUCLEAR FUEL ELEMENT

He Fengqi

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu)

Abstract A series of nondestructive testing (NDT) techniques and equipment for plate-type uranium silicide fuel elements have been developed, such as ^{150}Tm soft γ radioscopy, uranium surface contamination measurement, broad-band ultrasonic bonding quality examination, phase sensitive eddy current cladding measurement, water-gap autoscanning measurement and external comprehensive dimension examination system. The principles and performances of the techniques and equipment as well as the function of NDT in quality assurance are briefly described.

Keywords Radiographic testing Ultrasonic testing Eddy current testing Reactor Fuel element

近十年来,国际上重点开展了降低材料辐射反应堆(MTR)铀浓缩度的研究。目前采用20%浓度的硅化铀弥散型核燃料的板形元件是最先进的。中国核动力研究设计院已研制成功并已出口,由于低浓铀元件含铀密度高且结构紧凑,因此,需要研究发展一系列相应的质量控制无损检测新技术。

1 板形元件质量控制与无损检测

典型的MTR板形元件由23块燃料板、两块侧板、管嘴和提手等组成(图1)。燃料板采用焊接包装热轧和冷轧制成。铝包壳与硅化铀芯体的总厚只有1.27mm,对各层厚度及总厚、芯体形状、尺寸、位置、包壳与芯体结合质量、表面污染和平整度等都有严格的要求。组件有22个水隙,需要全扫描检测,组件的外形尺寸和形位公差也须精确测量和评价。

板形元件有近百个性能参数,它们中有些可以靠生产工艺来保障,但许多参数,特别是成品板和元件的性能参数都需经严格的无损检测与评价。质量检验方法有破坏性的物理和化学方法,也有非破坏

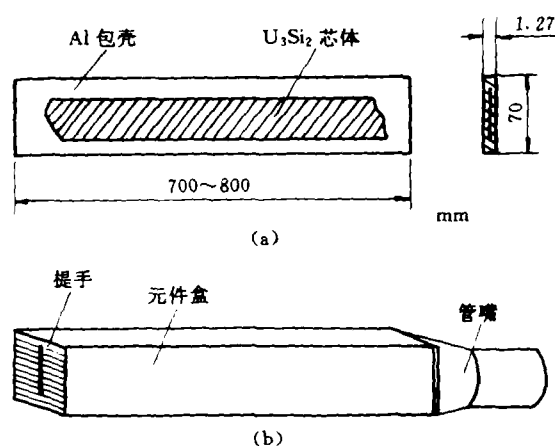


图1 MTR板形核燃料元件示意图
(a)核燃料元件板 (b)核燃料组件

检验方法。由于无损检测具有无损、快速、准确、多参数及可动态在线检验和实时信息反馈等优点,因此它在质量控制中应用范围不断增大。为了更合理选择检测方案和设置监测点,首先要科学地编制QC-NDT流程图。图2表示了 U_3Si_2 -Al板形元件生产

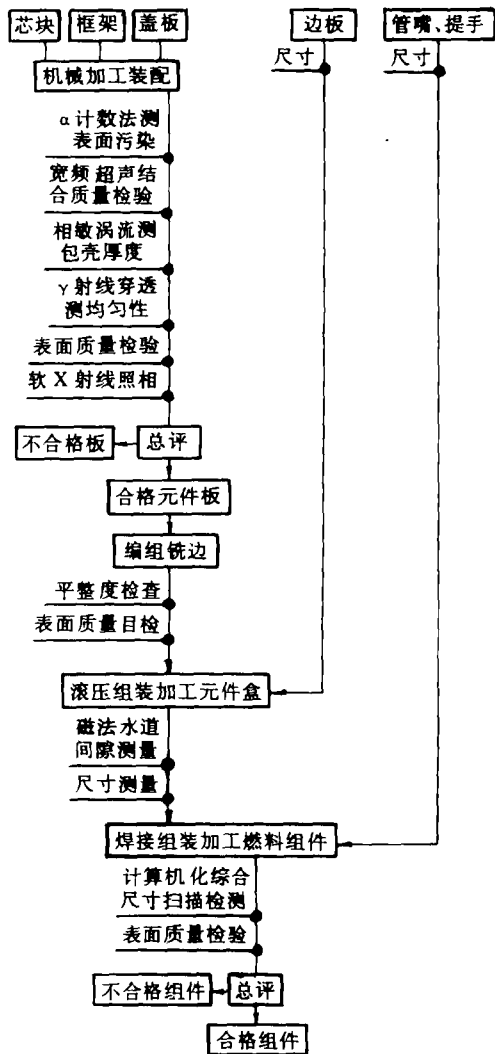


图2 MTR板型核燃料元件质量检验流程示意图

中QC-NDT“质量树”的流程图,参考原子能机构资料^[1]和国外先进经验设置了工艺过程中无损检测监测点。本着可靠、准确、自动、智能、数字图象化和易操作的原则建立了一套QC-NDT技术,质量监测点设置如图2所示。

2 无损检测新技术

2.1 芯体尺寸、形状与位置的软γ射线透视图象法检验^[2]

MTR反应堆燃料元件板由含铀密度为2.9~3.9g/cm³硅化铀弥散型芯体和铝包壳组成。轧制后芯体的宽度、长度和形状都有严格要求,并需位于板的正中,以前采用X射线照相、打标记划线及铣切等工艺完成。为了提高效率保证精度,我们研制成功¹⁷⁶Tm软γ射线实时透视图象系统,它由高安全性软γ射线源机、图象增强器、摄像机、监视器和录象机等组成(图3)。利用这套仪器可不需附加防护,

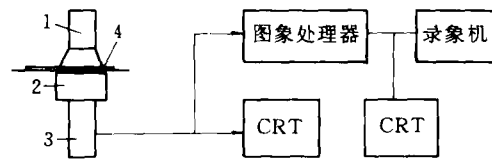


图3 ¹⁷⁶Tm实时透视图象系统

1. ¹⁷⁶Tm机
2. 图象增强器
3. 摄像机
4. 元件板及模板

即可在实验室或车间完成检验操作。元件板在移动中可清楚地观察到芯体缺欠、形状和位置。为快速准确地评价芯体尺寸、形状和位置,特设计了一块钨丝模板。

2.2 燃料芯体均匀度的γ射线扫描检验^[3]

元件板中的铀燃料必须在一定公差范围内均匀分布,为此建立了γ射线扫描系统。它由¹³⁷Cs γ射线源、NaI探头、剂量仪表、步进电机扫描器和记录仪等组成。利用专用标准参考试块标定仪器,根据记录曲线评价每块燃料元件板。

2.3 元件板表面污染检测^[4]

由于元件板中含有高密度²³⁵U核燃料不断放射出很强的β和γ射线,采用常规表面污染仪表无法测量表面微量的铀污染。为排除β和γ射线的干扰,研究建立了大面积α射线正比计数器探头,探头覆盖整个元件板表面,只接收表面铀发射出的α射线。由于探头对β和γ射线不敏感,且芯体中放射的α射线已全部被包壳吸收,所以探头α计数只正比于表面铀污染量。检测仪器内设微机,实现了实时计数、处理、分类及打印等功能。

2.4 宽频超声扫描检验包壳-芯体结合质量^[5]

板形元件包壳与芯体、包壳与边框之间的结合质量是非常重要的。由于包壳厚度只有0.38mm和铝包壳与含高密度铀芯体间明显的声阻抗差异,必须采用高分辨力宽频超声水浸探伤技术。计算机化宽频超声图象系统应包括宽频超声水浸探伤仪、高阻尼宽频探头、x-y扫描装置、接口电路和微机图象化系统(图4)。采用专用试块标定仪器后,可全扫描燃料元件板并给出C型显示。

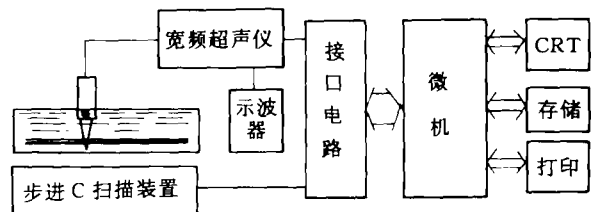
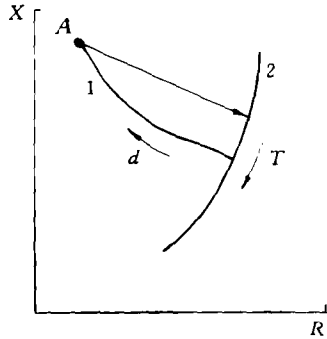


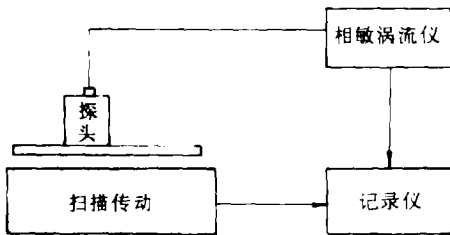
图4 宽频超声结合质量扫描检测系统

2.5 包壳-芯体-包壳厚度测量

包壳厚度是利用相敏涡流中探头-包壳间隙信号与包壳厚度信号相位差来测量的,克服了自动扫描检测中探头提高效应的影响(图5),并利用两块标准试块在扫描检测元件板时自动校准。



(a) 动态测厚时探头阻抗图



(b) 测厚扫描装置

图5 相敏涡流包壳测厚原理及方框图

A——探头空载阻抗点

1. 间隙 d 变化曲线 2. 厚度 T 变化曲线

元件板总厚可以采用千分卡尺或磁阻探头扫描测量。总厚与包壳之差即为芯体厚度。

2.6 组件水道间隙扫描检测

标准核燃料组件有22个冷却水通道,其宽度均应满足 $2.1 \pm 0.1\text{mm}$ 。为自动扫描检测每个水道宽度,专门设计了磁敏间隙探头、插入步进扫描器、智能数据处理器和标准间隙标定试块(图6)。利用这套自动计量系统每通道扫三条线共取210点,整个组件取4000多点,检测仪器自动给出超差信号和打印记录。

2.7 组件外形尺寸、形状和位置公差自动检测

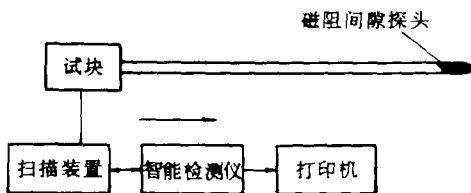


图6 磁阻法水道间隙自动检测系统

对任何核反应堆燃料组件的外形尺寸和形状都必须测量和严格控制。板形元件组件外形几何参数包括截面尺寸、形状、表面平整度、板间垂直度、元件盒与管嘴同轴度等。为实现这些参数测量我们研制了智能化综合尺寸测量系统,它包括12个微动位移测量探头(精度为 $\pm 0.001\text{mm}$)、多通道数字位移计、步进扫描台架和计算机数据采集处理图象化和绘图系统(图7)。每个组件扫描检测约70个截面,经计算机快速处理实时给出所有外形尺寸参数和截面形状,自动给出数据表格、超差数值与位置及整体质量彩色示意图。该系统还可评价管嘴加工质量。

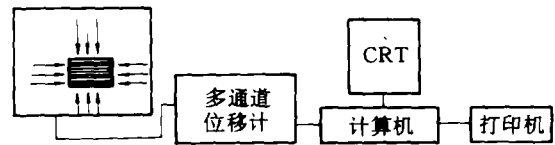


图7 计算机图象化综合尺寸检测

3 无损检测在QA体系中的控制与管理

质量保证(QA)是先进的质量管理体系,它既与生产密切相关,又具有严肃的独立性。无损检测是QA体系中重要的质量控制手段,为保证无损检测环节的质量,需要对其进行严格控制管理。核工业总公司根据国际原子能机构(IAEA)的考核大纲对无损检测人员进行培训,成立了核材料元件无损检测中心,专门编写了培训教学大纲、专业教材和考核试题。只有经过培训考核并授于资格证书的无损检测人员才能从事核材料元件无损检测工作。生产中采用的无损检测技术与设备都需经法定部门鉴定和批准方可使用。对无损检测既强调按标准规定评价产品质量的严肃性,同时也强调接受QA部门质询和检查的必要性。

4 结论

(1) 为新型核燃料元件建立的无损检测体系,完全符合国际原子能机构质量保证的要求,体现了先进的质量管理科学性。经受了生产实践的考验,得到国内外专家肯定和好评。

(2) 无损检测在核工业中不仅是对产品的最终评价手段,而且在生产过程中可及时反馈质量信息,为生产工艺的改进和稳定起重要作用。

(3) 软 γ 射线透视实时图象检验,大面积 α 计数法测核元件表面污染、相敏涡流测包壳厚度、磁阻法自动扫描测水道间隙和微机化多探头综合尺寸形

(下转第64页)

钢瓶焊缝外径 $D=324\text{mm}$, 则一条环焊缝检测图象的幅数 N 为

$$N = \frac{\pi D}{L_{\text{eff}}} = \frac{3.1416 \times 324}{68} = 15(\text{幅})$$

3.9.9 焊缝的透照厚度比 K 值校核

$$\theta = \tan^{-1} \frac{0.5L_{\text{eff}}}{L_1} = \tan^{-1} \frac{0.5 \times 68}{400} = 4.86^\circ$$

$$K = \frac{T'}{T} = \frac{1}{\cos\theta} = 1.004 < 1.1$$

符合 JB4730-94 标准的要求。

4 检测结果评价

4.1 图象质量

按以上工艺对钢瓶环焊缝进行连续检测时, 图象中的象质计可清晰地显示出第 13~14 号钢丝, 图象分辨力达到 $2.0 \sim 2.2\text{lp/mm}$, 图象质量达到 LD108-1998《气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测》专业标准规定的要求。

4.2 焊缝缺陷检出符合性

为了进一步考核 X 射线实时成象检验的准确性, 随机抽取 30 只钢瓶同时进行 X 射线实时成象检验和胶片照相检验, 比较的结果是两者符合率为 99.3%, 底片上的气孔、点渣、条渣、未焊透、未熔合及裂纹等焊接缺陷在图象上均能发现, 只有一处特例, 即一段约 30mm 长的细微未焊透影象与显示器扫描线平行时难于发现, 瓶体稍作倾斜后再成象就可发现。为了提高焊缝缺陷检出率, 可从提高系统设备的分辨力来解决。

4.3 检测图象与照相底片的对比

X 射线实时成象检测图象质量可与胶片照相底片相媲美, 因图象放大后, 影象更清晰, 在显示屏上

(上接第 54 页)

位公差测量等新技术, 不仅在板形元件生产中得到成功应用, 而且可应用于其它核元件及部件的自动化精密测量与评价。

参加板形核元件无损检测技术研究的还有张志毅、邢传辉、李淑兰、龚薇、李慧丰、罗金海和王兆月等同志, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Nuclear Fuel Quality Assurance. UNDP/IAEA. Vienna:1991.
- 2 He Fengqi. Portable radioscope system with ^{252}Cm source for NDT of the nuclear fuel elements. Proc. of 13th WCNDT, Brazil:1992. 30-33

可以正、负象随意翻转, 观察起来眼睛不会象观察底片那么疲劳, 检测图象无类似底片上伪缺陷现象存在, 更无底片报废的情况发生。

如一幅图象检测长度为 88mm (有效检测长度为 68mm), 则三幅图象的检测长度相当于一张 $240\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的底片 (有效检测长度为 204mm); 检测三幅图象只需 30s, 并且即时可看到检测结果, 而拍一张底片连暗室处理至少要 60min 后才能看到结果。

一张 650MB 容量的 CD 光盘可储存 3 000 幅图象, 相当于 1 000 张底片; 一张优质光盘目前市场价格不超过 50 元, 如果一张底片连冲洗药品费的成本按 5 元计算, 则实时成象的检测成本仅是胶片照相成本的 1%, 其经济效益不言而喻。

5 应用现状

X 射线实时成象是一项新兴的无损检测技术, 国内在钢瓶制造行业中首先试用。在总结国内五家钢瓶制造厂几年来试用该技术实践经验的基础上, 1998 年 3 月原国家劳动部批准并发布了 LD108-1998《气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测》专业标准, 使 X 射线实时成象检测方法纳入标准化轨道, 标志着该技术从试用阶段已逐步走向实际应用阶段。随着 X 射线实时成象检测技术的不断成熟和发展, 相信会有更多的单位应用该技术。

参 考 文 献

- 1 LD108-1998 气瓶对接焊缝 X 射线实时成象检测

收稿日期:1997-11-20

- 3 王兆月. 检测板型元件轴均匀性的等效标准板. 核材料会议论文集, 成都:四川科技出版社, 1991.
- 4 李淑兰, 何凤岐, 王庆恒. $\text{U}_2\text{Si}_2\text{-Al}$ 板型燃料元件表面轴污染量检测技术. 北京:中国核情报中心原子能出版社, 1993.
- 5 He Fengqi. Computerized ultrasonic testing of MLC capacitors by impulse count method and image processing technique. Proc of 12th WCNDT, Amsterdam:1989. 1599-1601
- 6 张志毅. 覆盖层厚度测量. 涡流检测教材. 成都:核材料元件无损检测中心, 1991.
- 7 何凤岐等. 板型燃料组件综合尺寸自动化检测技术研究. 核材料会议论文集, 成都:四川科技出版社, 1991.

收稿日期:1997-12-12