燃料棒氧化膜厚度涡流检测技术的应用实例

陈哲豪

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i2.7593

[摘要] 核电站燃料组件是重要的一回路边界,它是防止放射性外逸的第一道屏障。燃料棒作为一个重要的设备,其状态影响着核安全稳定运行。为保障核电安全稳定运行,使用涡流检测技术对燃料棒进行预防性无损检测测厚检查,旨在提前发现缺陷,并采取预防性处理措施。为了测试燃料棒氧化膜厚度,仪器必须远程操作。每个燃料组件共有264根燃料元件棒,燃料元件尺寸长度3852毫米,外径9.5毫米,燃料包壳壁厚0.57毫米。燃料包壳在入堆的前后,都需要进行适当的无损检测。

[关键词] 测厚; 涡流检测; 燃料棒; 氧化膜

中图分类号: TP61+4.3 **文献标识码:** A

Application example of eddy current detection technology of fuel rod oxide film thickness

Zhehao Chen

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD

[Abstract] The fuel assembly of a nuclear power plant is an important circuit boundary, which is the first barrier to prevent radioactive leakage. As an important equipment, the state of fuel rods affects the safe and stable operation of nuclear power. To ensure the safe and stable operation of nuclear power, eddy current testing technology is used for preventive non-destructive testing and thickness inspection of fuel rods, aiming to detect defects in advance and take preventive measures. In order to test the thickness of the oxide film on fuel rods, the instrument must be operated remotely. Each fuel assembly has a total of 264 fuel element rods, with a fuel element length of 3852 millimeters, an outer diameter of 9.5 millimeters, and a fuel cladding wall thickness of 0.57 millimeters. The fuel cladding needs to undergo appropriate non-destructive testing before and after entering the reactor.

[Key words] thickness measurement; eddy current detection; fuel rod; oxide film

引言

燃料元件在被辐照之前,进行无损检测目的主要是为了确定燃料包壳和金属涂层的覆盖粘合面的结合程度。燃料元件在被辐照之后,进行无损检测的目的主要是为了验证辐照过后,燃料包壳外层的金属涂层的完整性。对燃料元件棒进行涡流检测,提前发现燃料元件相关问题,进而采取预防性更换措施,保证核电站设备安全稳定运行很有必要。

1 燃料组件介绍

燃料组件棒在结构上由燃料芯块、燃料包壳、压紧弹簧、上端塞和下端塞等几个重要结构组成。在每根燃料元件棒上共设计271块燃料芯块,这些芯块一些叠放在0.57毫米壁厚的包壳中,两端是焊封的上端塞和下端塞,端塞间的活性芯块长度为3657.6毫米。燃料元件包壳的上端塞上有一个结构设计气孔,为了便于在制造阶段过程中通过气孔向包壳内填充压力为2.0MPa的氦气,填充完成后将此气孔焊接密封。填充氦气的目的

是为了降低核电厂燃料组件在入堆后外界反应堆冷却剂系统的压力对组件形成的压应力^[1]。

2 失效模式

运行过程中燃料组件可能会发生燃料包壳热膨胀、燃料芯块致密化、芯块肿胀、释放裂变气体等风险。此外,制造和安装期间产生的缺陷也会在使用阶段继续扩展。在2008年至2019年期间12台冷却器总共发生7次传热管穿孔导致天然气泄漏事件。因此,对燃料元件棒进行涡流检测,提前发现燃料元件相关问题,进而采取预防性更换措施,保证核电站设备安全稳定运行很有必要。

2.1 失效机理

2.1.1 燃料包壳热膨胀

核电站在运行期间,燃料包壳及内部的芯块环境存在高温以及大的温度梯度,有可能出现“扯铃”形变,这种形变会造成芯块端部与燃料元件包壳之间发生接触,进而造成接触点产生

了局部应力,集中应力的长期存在可能会导致包壳出现变形或者裂缝。

2.1.2 燃料芯块致密化

因为制造工艺,燃料芯块中存在着较多的细孔,在核电厂运行过程中,这些细孔会慢慢消失,整体体积的变小导致了芯块密度变小,形成了芯块致密化,同时也会导致芯块和燃料包壳之间的空间间隙变大,在核电厂运行过程中,因外部因素产生压力,存在这燃料包壳形变或者破裂的可能性。

2.1.3 芯块肿胀

芯块肿胀是因为运行过程中裂变反应的产物导致的,同时燃料包壳受压力影响可能产生蠕变造成直径变小,这两种失效机理导致燃料芯块和燃料包壳之间的间隙变小,存在这燃料包壳形变或者破裂的可能性。

2.1.4 燃料组件释放裂变气体

核电厂运行过程中,伴随着燃料棒不断产生裂变气体,这些气体大部分会停留在芯块内,一小部分可能会释放到燃料芯块和燃料包壳之间,内部压力也随之升高。核电厂运行过程必须限制这种现象,设计过程中采取直径更小的燃料棒,并且在燃料包壳顶部预留有足够的空间包容这些裂变产生的气体。否则压力的升高会造成燃料包壳的向外蠕变导致包壳形变或者损坏。

3 燃料组件进行涡流检测的必要性

燃料包壳在入堆的前后,都需要进行适当的无损检测。燃料元件在被辐照之前,进行无损检测目的主要是为了确定燃料包壳和金属涂层的覆盖粘合面的结合程度。燃料元件在被辐照之后,进行无损检测的目的主要是为了验证辐照过后,燃料包壳外层的金属涂层的完整性。

在核电运行过程中,为了做到核安全万无一失。对于燃料组件的无损检测是非常必要的。燃料包壳和金属涂层的覆盖粘合面如果失效就会发生包覆材料的不完整及不连续性甚至是产生裂纹。一旦涂层完整性缺失就有包覆层的碎片进入水池,有可能会造成燃料水池的流动性下降^[2]。

4 涡流测厚技术原理

涡流测厚技术作为工业无损检测的常用检测方法,目前在核电、火电和军工行业多有应用,已成为核电厂燃料组件常用的无损检测方法。涡流传感器通过使基本材料的表面受到感应循环电流,从而在基体材料中感应出涡流。这种感应电流产生磁场,并且根据基地的表面特性,磁通量将根据表面材料的导电性而增加或减少。探头产生的磁场排斥材料中的初级场,从而减少磁通量和流过表面的电流。当材料表面存在氧化层或表面缺陷时,二次感应磁场会发生变化。这会改变探测线圈的阻抗,而探测线圈可用来估计辐照核燃料棒或板中的氧化物或缺陷厚度。

5 检测设备

实际检测中使用的设备主要有:多频涡流仪、涡流探头、检测设备。

5.1 多频涡流仪

检验时多频涡流仪,能够在线圈中产生频率范围为10kHz~

3000kHz的正弦波,可同时激发4个或4个以上检测频率,能够以差分 and 绝对两种模式工作,并可在0~360°范围内调整相位角,主要通过相位幅值进行调制。涡流仪器每12个月需要通过官方认证的计量中心校准一次,且在维护或维修后也需校准。

5.2 涡流探头

对辐照过后的燃料组件进行涡流检测,需考虑长期高温及辐照对奥氏体不锈钢的影响,在燃料包壳表面会产生一层的 α 铁素体层。可以通过一个频率为15kHz的绝对式扫描线圈涡流接触式探头贴近燃料包壳表面,激励产生引起涡流,该涡流探头能检测的包覆层厚度的检测范围在0.6到19微米之间。

在核电站燃料棒氧化膜测厚实际检测过程中,探头需要紧贴燃料组件,探头所显示的和燃料组件基体金属层的间距就是氧化膜的厚度,通过涡流仪器分析计算,可以涡流检测的阻抗信号转化为电信号,从而判断氧化膜的厚度。

5.2.1 涡流测厚探头通过夹紧机械装置,运动传感器等进行左右和上下的运动

(1) 涡流探头利用丝杆和固定柱进行上下运动。(2) 涡流探头利用丝杆和横向固定柱进行左右运动。(3) 涡流探头利用丝杆和齿轮进行紧贴和旋转运动。

5.3 推拔器

涡流探头安装在推拔器上,通过推拔器的作用保证探头推拔是在匀速状态下进行,这样可以保证采集信号的质量,排除人工手拉探头情况下人员因素对结果的干扰。推拔器拉探头的速率可以设定。该速度下既可保证检测速度,又可保证信号质量。

6 燃料棒氧化膜厚度涡流检测技术在核电站应用的实施流程介绍

6.1 燃料棒氧化膜厚度涡流检测在核电站实际应用的主要流程为

(1) 设备安装拆包及氧化膜设备组装:保证线缆整理及捆绑整洁有序,易松动部件应用螺纹胶水和工具二次固定。(2) 设备组装后的调试:测试基础的机械功能。(3) 设备功能性试验:测试设备的各项检测功能。(4) 检查并核实设备下水前条件:环境温度、湿度、水温 and 燃料组件操作的可行性。(5) 检测前工作:根据涡流深度渗透公式计算出基本频率。再使用标定管进行工艺试验确定检测频率等最佳参数。(6) 检测前准备:由于燃料棒检查是在燃料水池进行的水下检查,燃料水池为放射性区域,将放射性设备和非放射性设备的模块进行分区域打包,避免人员接触放射性物质。设备下水检查前需要对设备进行充分的功能性试验,检查探头的辐照氧化程度,尽量更新新探头,保证设备下水一次性完成所有燃料棒的检查工作。测试设备的全套功能,保证设备安全、可靠后方可开始检查。(7) 设备吊装至燃料水池并安装至贮存格架:设备吊运绑扎牢固,落位格架需与计划完全一致,否则无法开展检查工作。(8) 氧化膜设备测厚模块的数据标定:确定设备灵敏度满足检测要求,每次开始、结束采集工作和工作连续不超过四小时,进行一次标定,以确保检测系统性能满足要求。幅值偏差不得超过 $\pm 10\%$,如果偏差超出上述范围,

则应找出偏差的原因并进行改正, 必须对整套检测系统重新进行调整直至标定合格, 而且必须将上次标定或标定校验以后所检测的燃料棒进行重新检测。(9) 组件编号确认: 确定上下限位: 确认燃料组件编号, 确认组件的4面位置, 确定检测技术要求需覆盖的上下限位。(10) 开始正式数据采集: 采集计划逐根燃料棒进行采集, 保证数据记录完整, 信号编号唯一且与燃料棒号一一对应。(11) 数据记录: 达到记录标准的显示, 都需正确记录, 记录应包含以下参数: 位置、幅值、相位角、显示的通道。(12) 数据分析及复检: 分析数据文件、给出检查结果, 如必要, 进行复检。出现以下情况的数据认定为无效数据, 需重新检测: 检测系统的标定不符合检验程序要求, 即错误的频率、采样率等; 任何可能影响检测结果的因检测系统故障引起的通道损坏; 由于探头或延长电缆等原因引起的过高的噪声信号; 探头断线、产生严重电火花或短路等; 燃料棒的标识不正确; 燃料棒的检测范围不完整。(13) 结果评定: 本例中要测量壁厚。对分析人员的要求较高。标准的信号显示都需要经过两名分析人员的分析, 如果两名分析人员结论一致, 则作为最终结论。如果两名分析人员结论不一致, 则需经过第三名人员分析。评定人员均需获得民用核安全无损检测涡流检测资格证。(14) 设备吊运并拆除: 拆除过程中需要关注燃料水池的设备残水处理和设备出水时候的环境辐射剂量率。

6.2 燃料棒氧化膜厚度涡流检测在核电站实际应用的主要关注点为

(1) 设备安装时带好乳胶手套, 拆装的小件物品收集防止丢失。(2) 连接线缆, 线缆排布要求设备运动时无互相干扰、无扭曲缠绕。(3) 信号标定时, 要求设备已在水中浸泡至少4个小时。(4) 人员注意系好安全带, 换勾时注意保持设备稳定。(5) 设备刚刚入水时, 先停止下落, 检查设备的气密性是否正常。(6) 一组燃料组件吊装至设备后, 先核对组件编号一致。(7) 氧化膜厚度测量在组件下降时检查。

7 燃料棒氧化膜厚度涡流检测技术在核电站应用的影响分析

7.1 影响因素分析

燃料组件出堆后的辐照强度与温度处于实时变化, 其辐照强度与温度数值暂无有效的测量手段(辐照强度有理论计算值, 温度无理论计算和实测数据), 而且不同组件不同循环辐照强度存在差异, 故难以在外部精准模拟现场工况进行试验验证。一般相机、传感器等敏感部件的极限工作辐照强度在 $2.5 \times 10^4 \text{Gy/h}$,

因此, 应用环境已超过辐照敏感部件的极限工作辐照强度^[3]。

7.2 对检测数据的干扰

在氧化膜厚度测量方面, 涡流检测对温度有一定的敏感性或外部强辐照会对电信号造成干扰, 并结合设备经验, 机组停机时间短的情况下的可能会对氧化膜厚度测量的准确性产生影响。

7.3 燃料组件氧化膜测厚在辐照环境下应用需关注风险

(1) 超强辐照下, 加速密封部件失效, 密封腔体(电机腔体、气缸)进水。若气缸进水, 推出模块无法收回, 影响组件提出。电机腔体进水, 可能导致电机、编码器、接头的损坏, 需要整体进行更换。(2) 非金属材料老化脱落, 可能导致设备运动部件卡塞损坏, 若落入组件中。(3) 过量辐照下, 极可能导致部分限位开关失效, 导致设备机械部件的运转状态无法有效反馈至控制系统, 增加设备机械部件、测量探头与组件的碰撞风险, 造成组件或设备损坏。(4) 在检查结果准确性的影响上, 氧化膜厚度测量精度的影响无法评估。

8 结论

(1) 核电厂燃料棒涡流检查的成功实施表面, 通过涡流检测技术对燃料包壳包覆层厚度进行验证是可行的, 为下一代技术更新奠定了坚实应用基础。(2) 本次应用证明在其他行业已经成熟应用的涡流检测, 在其他金属板材管材或其他金属涂层的厚度检测同样适用, 并且存在较大应用前景。考虑到燃料棒失效后的事故后果和经济损失, 预防性的定期检测是有必要的。(3) 通过涡流测厚技术, 在核电站运行过程中, 提供了一种相比于其他方法所无法代替的无需人工靠近和不用破坏原材料的无损检测方法, 对于燃料棒在辐照前和辐照后都可以实际应用, 避免了价格昂贵的破坏检测。目前已经可以证明远程的燃料棒涡流检测技术是有效的, 特别是对于近距离人工不能接触到的检查环境。

[参考文献]

[1] 许可北, 周俊华. 涡流检测国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[2] 《美国无损检测手册·电磁卷》中译本已正式出版[J]. 无损检测, 2000, (12): 534.

[3] 李小亭, 沈功田. 压力容器无损检测——涡流检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(8): 411-416.

作者简介:

陈哲豪(1991--), 男, 汉族, 浙江湖州人, 大学本科, 中广核核电运营有限公司, 工程师, 研究方向: 无损检测。