

反应堆压力容器主螺栓超声波检测技术

马官兵, 肖学柱, 袁书现

(中广核检测技术有限公司, 苏州 215004)

摘要:反应堆压力容器主螺栓作为核设备的重要部件, RSEM 标准要求役前及在役阶段对其进行超声波检查。该检测是个多系统配合的过程, 它必须依赖专用超声波检查系统、机械扫查器和控制系统的统一协作才能完成。介绍了反应堆压力容器主螺栓超声波检测的部位、探头的选用、仪器的选用以及扫查方式、标定及校核、采集系统和分析系统。

关键词:反应堆压力容器主螺栓; 超声波检测; 探头; 采集与分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)10-0770-03

Ultrasonic Testing Technique for Closure Stud of Reactor Pressure Vessel

MA Guan-Bin, XIAO Xue-Zhu, YUAN Shu-Xian

(CGNPC Inspection Technology Corporation, Suzhou 215004, China)

Abstract: As an important component of nuclear devices, reactor pressure vessel closure studs need to be examined during pre-and in-service inspection according to RSEM. The inspection equipment is a complicated system including mechanical devices, controlling devices and UT inspection devices. This paper focuses on introducing the scope of the reactor pressure vessel closure studs by UT, selection of probes, scanning pattern, and the calibration & verification, used equipments, acquisition and analysis system.

Keywords: Reactor pressure vessel closure stud; Ultrasonic testing; Probe; Acquisition and analysis

反应堆压力容器是核电厂和核动力装置中最重要的设备, 反应堆压力容器的质量是保证核电设备和核动力装置正常安全运行的关键。反应堆压力容器主螺栓是连接压力容器壳体和顶盖的重要部件, 为防止核放射性物质的外逸、保障反应堆压力容器正常工作有着十分重要的作用。在核电厂和核动力装置的检验规范和大纲中, 对反应堆压力容器主螺栓提出了无损检测的强制性要求, 并指定分别在投入使用前和运行一定时间内对主螺栓实施役前检查和在役检查。

法国标准《核电厂核岛机械设备在役检查规则》RSEM 规定, 对反应堆压力容器主螺栓的无损检测主要采用超声波和涡流检测技术。笔者重点介绍了对核反应堆压力容器主螺栓实施检测的超声波技术。

1 检测部位^[1]

反应堆压力容器主螺栓材料为 40NCDV7-03, 规格为 M155 mm×4 mm, 检验范围包括螺栓的螺纹区及上、下螺纹区之间的光杆区, 具体检测部位见图 1。反应堆压力容器主螺栓超声波检测的目的是探测螺纹部位是否有明显的由腐蚀或者撕裂等引起的金属损伤, 邻近螺栓螺纹根部以及光杆的外表面或光杆与螺纹连接区外层金属中是否存在裂纹。

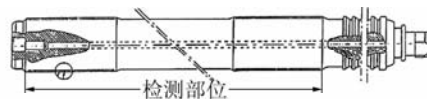


图 1 反应堆压力容器主螺栓的检测部位

2 主螺栓超声波检测装备

核反应堆压力容器主螺栓超声波检测采用自动化超声波检测技术, 检测仪器分为机械、电气控制以

作者简介:马官兵(1982—),男,助理工程师,从事核电承压设备的无损检测与技术研究。

及超声波信号采集等装置,并具有专门的超声波数据分析软件,可实现对超声波数据的精确分析。

2.1 检测仪器的机械和电气控制装置

反应堆压力容器主螺栓的超声波检测设备由两部分组成,即机械运动(SUIP 扫查器)和电气控制(SIROCO INSIDE)。机械运动部分由驱动单元和扫查单元组成:驱动单元直接放置在受检螺栓的顶端,用于驱动扫查单元;扫查单元装有超声探头,超声探头插入封头螺栓的中心孔中,在驱动单元的驱动下,对主螺栓进行扫查检测。电气控制部分(SIROCO INSIDE)用以控制驱动单元完成探头在螺栓中心孔内的运动,控制软件的界面见图 2。通过设置一定的路径和扫查方式,实现对主螺栓的检验。机械运动和电气控制部分的定位精度可达 0.5 mm。

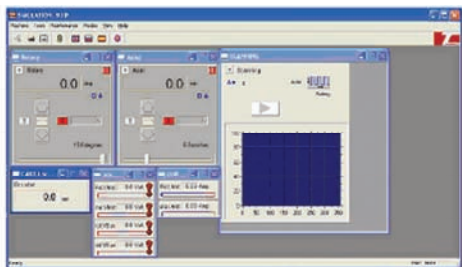


图 2 电气控制部分控制面板

2.2 超声波采集系统^[2]

超声波采集装置采用 MIDAS 数据采集系统。MIDAS 数据采集系统是采用客户机/服务器结构的自动化超声波数据采集和数据分析系统;系统主要由 MIDAS 硬件超声波板卡、MIDAS 硬件控制部分(服务器)以及 MIDAS 软件(客户端)三部分组成。其中 MIDAS 硬件系统由脉冲发生器/接收器模块(PR)、采集模块(AM)及用网络同 AM 链接的计算机系统组成。整个系统按照功能可以分成标定、计划、采集和评价四个模块。其中标定模块主要包括探头设置、A/D 转换和信号处理三个子模块的控制实现;计划模块主要包括被检对象设定、扫查轴设定、数据记录参数设定、扫查轨迹设定等子模块功能;采集模块可以在数据采集过程中实时监测所记录和存储的扫查区域的超声信号,实现在主界面上选择 A,B,C,D 扫描;数据评价模块结合 A,B,C,D 扫描,可实现三维立体数据重建,并能对采集的超声波数据进行详细准确的数据评价,从而实现对显示信号相关性的判定,MIDAS 数据采集界面见图 3。

2.3 超声波数据分析软件

采用 MASERA-NT 数据分析软件,其主要功

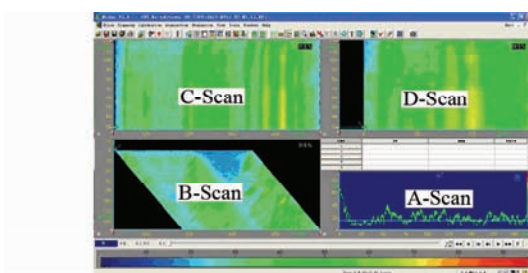


图 3 超声波采集软件界面

能是对超声波检测数据进行分析、定量和测量。此软件具有良好的兼容性,可实现对 SUMIAD, MIDAS, TOMOSCAN 和 RDTIFF 等多种系统采集的文件进行准确的分析。基本功能包括 A,B,C,D 扫描、数据循环和声线跟踪分析,还可增加 SAFT、信号处理运算、自适应分析和三维数据重建等;并可以针对某些行业用户的特殊检测需求,增加相应的专业化分析和图形处理的专用数据分析软件。此软件基于中心轴对称、空间重建理论,应用笛卡尔坐标系或圆柱参考坐标系,可对采集的超声波数据进行超声波检测过程重建;数据重建过程完毕后,通过一系列的辅助窗口,可以完成以下分析功能:显示某一个通道的完整/全部数据;可同时打开多个通道的数据,以便于不同通道采集的信号之间的对比。对某一关注区域进行放大或缩小,从而采用尺寸测量工具对显示信号进行精确的尺寸和位置测量,测量结果可直接生成相应的数据分析报告。

3 超声波检测技术

反应堆压力容器主螺栓超声波检测技术要考虑较多的因素,主要包括超声波探头、检测方向、扫查运动方式、检测的标定、灵敏度的选择以及缺陷的检测与定量等。

3.1 探头的选择与扫查方式

反应堆压力容器主螺栓采用组合式探头,由两个 45°探头组成,探头频率为 2.5 MHz,探头采用特殊的设计与螺栓内孔壁充分接触,以保证耦合效果,采用去离子水作为耦合剂。

采用轴向扫查,周向步进的矩形扫查。对扫查步进要求不能太大,以免漏掉缺陷,RSEM 标准规定要可以记录 ≥ 0.5 mm 的刻槽的信号显示,所以要保证探头的主声束至少扫过 0.5 mm 的刻槽 3 次,这样才能不会漏掉标准规定的记录要求。但步进也不能太小,以免影响检测的效率。对超声采集速度的选择要考虑所支持的超声波采集的硬件。

3.2 标定

标定分为在标定螺栓和转移试块中进行,包含基准灵敏度标定和检查过程中的灵敏度校核标定。基准灵敏度的标定是在标定螺栓上进行。在检查过程中,要求对整个超声系统稳定性进行检验,以确定其灵敏度的有效性,每次检查开始前和每次检查结束后,均需对每一个探头进行灵敏度的校核。此次标定在转移标定试块上进行,即将每一个探头灵敏度转移到二次标定试块的反射体的灵敏度上。

按照标准 RSEM 规定:标定螺栓的螺纹和光杆上应加工槽深为 0.5~2 mm 的刻槽,刻槽所在的平面垂直于螺栓的轴线,全尺寸标定螺栓与被检螺栓的材料及加工方法应该一致。在标定螺栓的上、下两段螺纹区域内各有一组加工成与螺纹平行、并位于螺纹根部的刻槽,它们的深度分别 0.5, 1 和 2 mm。另有两组类似的刻槽位于光杆段的平整表面上,它们与螺栓的轴线垂直,深度也分别是 0.5, 1 和 2 mm。为了更加方便地进行标定,考虑到螺栓检验的螺纹相对于中间的光杆上下对称,在刻槽的过程中也制作了上下对称的刻槽,故在进行标定时,只需标定上部螺纹与光杆的刻槽,或者只需标定下部螺纹的刻槽与光杆刻槽即可,这样既保证了设备的有效性,又提高了标定的效率。

转移试块采用特殊的有弧面的试块,类似于校验斜探头灵敏度的 V2 试块。这样可以保证带有楔块的探头能够充分地接触。以 50 mm 的弧面为反射面找到最大回波,记录下其增益值,用以确定标定的漂移。法国标准 RCC-M 规定:如果校验时测得的漂移值不 $\geq \pm 2$ dB 以内,则可认为该次校验结果正常;如在 ± 2 dB 以外,则自前次校验后所检验的全部螺栓须重新检验。标定需在每轮开始检验前和检验结束后进行。

3.3 灵敏度设置

检验灵敏度调节时,尽量把信噪比调大。调节增益,使 V2 试块上 50 mm 弧面的最大反射回波幅值 >45 dB;将噪声水平调节到 10~20 dB 之间,此时的增益值即为检验灵敏度。如果螺栓的螺纹回波幅值 >60 dB,则需要降低增益,使螺纹回波最大幅



(上接第 752 页)

- [4] 刘启跃,王文健,周仲荣. 高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 11-14.
- [5] 芦君,张国光,张庆吉. 管道漏磁检测中速度效应的补

值在 30~60 dB 之间。调整好检验灵敏度后,将探头置于标定螺栓中心孔中,观察 0.5, 1 和 2 mm 深的刻槽信号,并记录下其幅值。对于标定螺栓螺纹区内 0.5 mm 深的人工切槽所产生的信号,都应当可以与本底噪声信号明显区分开。

3.4 检测实施

将螺栓周向设为步进轴 X 轴,螺栓的永久标识号设为 X 轴的零点,逆时针方向旋转为正(从螺栓顶部往下看);将螺栓的轴向设为扫描轴 Y 轴,螺栓下端面设为 Y 轴的零点,垂直向上的方向为 Y 轴正向;探头连接好置于螺栓中心孔中,使探头上端面与螺栓上端面位于同一水平面,旋转探头使组合探头声束轴线与 X 轴的零点对齐;探头沿螺栓中心孔向下运动,当探头架下端面与螺栓底部端塞接触时,记录下此时 Y 轴坐标 $L(L>0)$,此坐标设为检查时 Y 轴的下限位,其上限位为下面的探头对螺栓上部螺纹扫描时螺纹信号消失的位置。X 轴的上下限位为 $0^\circ \sim 363^\circ$ (为了保证充分的覆盖,多扫 3°),设定 X 轴运动速度 $\leq 15^\circ/\text{s}$,设定 Y 轴运动速度 $\leq 25 \text{ mm/s}$ 。根据扫描计划,启动 SIROCO INSIDE 和 MIDAS 采集软件,实施对主螺栓的扫描。

4 结语

反应堆压力容器主螺栓的超声波检测技术是一种自动化程度较高的检测技术。检测技术具体体现在机械和控制的系统、超声波探头参数的选择、扫描的方式、缺陷的检测和定量、信号的采集和分析等方面。在综合考虑这些因素的情况下,才能完成有效的反应堆压力容器主螺栓超声波检测。该检测技术已在国内核电站反应堆压力容器主螺栓的役前检查中得到了很好的应用。

参考文献:

- [1] 法国标准 RSE-M 核电厂核岛机械设备在役检查规则[S].
- [2] 李明,陈怀东,肖学柱,等. 核电站反应堆压力容器超声检查技术及装备研究[C]. 电力系统第十一届无损检测学术会议论文集. 青海西宁:中国电机工程学会火力发电分会, 2009: 71-82.
- [3] 补偿方法[J]. 沈阳化工学院学报, 2009, 23(4): 363-365.
- [6] Yong Li, Guiyun Tian, Steve Ward. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed [J]. NDT&E International, 2006, 39(5): 367-373.