

反应堆压力容器顶盖贯穿件及其焊缝的无损检测

丁建国

(秦山核电公司, 浙江海盐 314300)

摘要: 对反应堆压力容器顶盖贯穿件及其焊缝无损检测的必要性、检测范围、检测方法、检测技术要求进行分析论述, 介绍了检验的实施, 分析了检测方法中存在的不足, 提出了改进建议。

关键词: 贯穿件; 焊缝; 无损检测

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4423 (2006) 06-56-03

1 检测的必要性

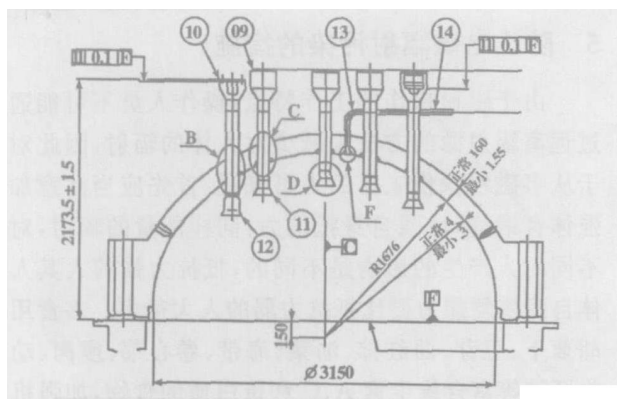
反应堆压力容器是核反应堆的重要部件, 其顶盖上装有控制棒驱动机构管座、温度测量管管座和放气管管座。管座贯穿容器顶盖的部分由 Inconel 600 制成, 通过冷装工艺穿过顶盖后在封头内表面处和封头焊接在一起。1991年9月, 法国首次发现驱动机构和热电偶(温度测量)管座出现裂纹, 发生一回路水泄漏。此事引起 IAEA 和其他核电国家的高度重视。法玛通公司为此展开了调查和试验研究, 发现其他压水堆也有类似的问题。在法国共检查了44座反应堆, 发现管座有裂纹的有33座, 占75%; 检查管座3213个, 有裂纹的108个, 占3.36%。可以看出, 压力容器顶盖管座出现裂纹的情况比较多。研究结果表明, 产生裂纹的原因是应力腐蚀, 首要因素是 Inconel 600 合金材料抗应力腐蚀性能较差。秦山核电厂的压力容器顶盖管座材料也是 Inconel 600, 按照 ASME 规范, 顶盖管座贯穿件本身不需要做在役检查, 贯穿件与顶盖内表面的焊缝只要求做目视检查。因此, 以前根据 ASME 规范要求对这些管座及焊缝只进行目视检查而从未做过体积检查。但是从国外核电厂检查的结果表明, 采用 Inconel 600 这种材料做成的贯穿件及其焊缝产生应力腐蚀裂纹的可能性很大。为了确保核电厂的安全、稳定运行, 有必要对这些顶盖贯穿件及其焊缝进行全面检查, 这也为公司对更换顶盖的必要性和紧迫性的决策提供可靠依据。

2 检测范围的确定

由于压力容器顶盖贯穿件及其焊缝结构复杂,

属于高放射区域, 人员无法接近, 因此必须制定详细的检查范围、检查方法及技术要求, 以保证检测方案安全、合理、可行、可靠。

秦山核电厂反应堆压力容器顶盖是内径 1576 mm、壁厚 160 mm 的半球体, 放置在三个均分圆周角的支撑台上(指检查时的状态), 顶盖高 1686 mm, 在顶盖上以顶盖轴线为轴心, 以 1048.5 mm 为半径的圆筒范围内贯穿安装有 37 个驱动机构贯穿件, 2 个温度测量管贯穿件和 1 个排气管贯穿件(见图 1)。驱动管贯穿件内径 $\varnothing 70$ mm, 壁厚 17.5 mm; 温度测量管贯穿件内径 $\varnothing 94$ mm, 壁厚 20.5 mm; 排气管贯穿件内径 $\varnothing 21$ mm, 壁厚 6.5 mm。在顶盖内部, 驱动管和测温管贯穿件长分布在 280 mm 和 350 mm 之间, 下端紧密套装一个下大上小的喇叭状导向装置。贯穿件通过冷装工艺穿过顶盖, 在封头内表面处和封头焊接在一起(见图 2、图 3)。顶盖材料为 SA 533 钢锻件, 贯穿件为 Inconel 600, 焊接材料为 EN ICrFe-1。



11- 驱动机构管座; 12- 温度测量管管座; 13- 排气管

图1 顶盖及管座图

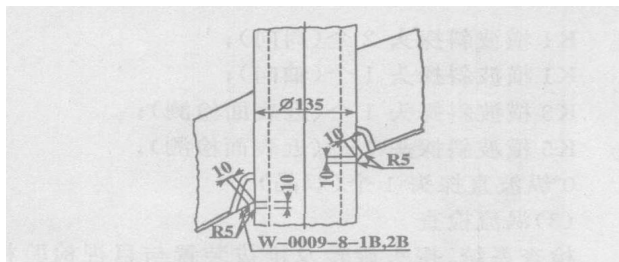


图 2 温度测量管贯穿件及焊缝结构图

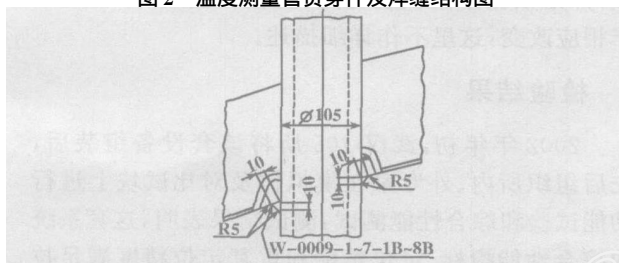


图 3 驱动机构贯穿件及焊缝结构图

反应堆在运行过程中受温度、压力、热膨胀等诸多因素的影响,加上 Inconel 600 本身有应力腐蚀的倾向,因此与顶盖相接触的贯穿件部分容易诱发应力腐蚀裂纹;同时焊缝及热影响区也可能存在残余应力诱发应力腐蚀开裂。

根据国外核电站的经验反馈,反应堆压力容器顶盖贯穿件产生裂纹的部位包括贯穿件母材本身及贯穿件与顶盖球冠焊接的焊缝及热影响区(见图 4),因此,必须对上述部位进行全面检查。

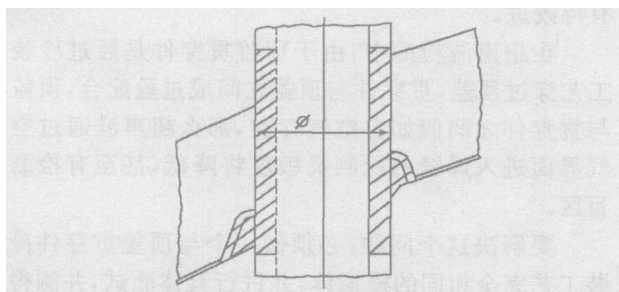


图 4 检测范围示意图

具体的检查范围为所有管座的焊缝底部到顶盖上部的整个管壁区域以及除放气管外所有接管焊缝及热影响区。

3 检测方法的确定

目前,无损检测方法有射线检测、超声波检测、涡流检测、磁粉检测、表面渗透检测和目视检测等 6 种方法,选择何种检测方法进行检测是搞好本次检测的关键。由于射线检测该结构无法贴胶片以及磁粉检测和表面渗透检测无法实行远距离操作,所以

只有采用超声波检测、涡流检测和目视检测 3 种检测方法。

以上 3 种检测方法中,目视检查是检查内表面缺陷的,涡流检查是检查近表面缺陷的,而超声波检查是检查具有一定深度的缺陷的。这 3 种方法的结合可对顶盖贯穿件及其焊缝进行较完整的检查。

4 检查的技术要求

(1) 由于该检查区域为高放射区域,所以要求采用全自动检查装置实施检查。

(2) 采用自动检查装置进行超声检查时,要求采用去离子水为耦合剂。

(3) 自动检查装置要求定位准确,不允许出现由于装置定位偏差而擦伤 39 根接管下部喇叭口。

(4) 检查装置在贯穿件圆周方向上的定位误差,不允许大于 5 度;轴向偏差不允许大于 3 mm。

(5) 检查所使用的摄像头要求有足够的变焦范围,变焦范围应在 12:1 以上,摄像头的分辨率应大于 460 水平扫描线,在检查过程中能够清晰地进行观察,并应具有自动调焦和手动调焦及 360 度旋转等功能。

(6) 检查装置要求具有拆装方便、去污容易、轻便等特性。

(7) 涡流检测在检查接管管壁时应检测出大于等于 10% 的壁厚减薄和宽度或深度大于等于 0.5 mm 的缺陷。

(8) 用超声波检查焊缝时应避免检测盲区,探头角度应采用两种以上角度(夹角大于等于 15 度)进行探测。

(9) 模拟试块应在以下两个区域刻上四个线切割槽:

- a 焊缝与管壁熔合区两个(径向轴向各一个)
- b 焊缝与顶盖内表面熔合区两个(径向轴向各一个)

线切割槽的尺寸为:

长: 25 mm; 宽: 小于 1.5 mm; 深: 1 mm。

(10) 要求超声能够检测出直径为 $\varnothing 2$ mm、深度为 1 mm 的缺陷,要求在信噪比大于 6 dB 时能够检测出模拟试块上的四个线切割槽,并进行位置、尺寸测量和记录。

(11) 缺陷的定位、定量要求能够测出缺陷的长、宽、高、埋藏深度、到标识点的 X、Y 轴的位置等 6 个

参数,其重复测量误差应不大于 $\pm 1\text{ mm}$ 。

(12) 超声检查时每次探头移动的轨迹至少应有晶片直径的50%复叠区,其探头移动速度应不超过 150 mm/s 。

(13) 目视检查区域应有不小于 540 lx 的光照度,不应有使检查表面产生反光等影响检查的不良因素。

(14) 检查所采用的机械系统、数据采集和分析系统等整个检查系统在实施现场检查前应进行功能联动试验,并在模拟体上进行模拟检查。

5 检验实施

检测设备是武汉105所根据我公司的委托,按照我们所确定的检测范围、检测方法和技术要求所研制的一套远距离全自动超声、涡流和闭路电视检查系统。它主要由机械装置、气动装置、电气控制、超声系统、涡流系统、闭路电视系统和部分专用设备工具组成。

(1) 目视检验

目视检验装置主要包括控制柜和机械装置,中间通过电缆连接。控制柜和机械装置各为一体化设计,系统的联机主要为系统的连接。机械装置与控制柜的连接通过电缆连接,电缆包括:电机电缆、编码器电缆、控制电缆、图像视频电缆、镜头控制电缆,控制柜与机械装置电气的连接通过各自的接插件一对一连接。摄像头的视频信号接字幕控制卡的输入,字幕控制卡的输出接录像机的输入,同时录像机的输出接监视器的输入。

开始检查前,要对系统进行调试,调试的内容包括电机调试、视频图像调试及控制系统调试,以保证系统各部件都能按指令完成检查所需的各种动作。

(2) 超声波检查

检查系统与探头旋转及推拔装置与目视检验相似,只是探头及信号接收设备作相应改变。

由于被检区域有三个界面和三种金属材质,且焊缝区域晶粒粗大,声散射强,被检查面又是圆弧面。针对这一特殊的被检部件材质和结构,以及根据声波垂直入射缺陷反射面能产生最大的回波信号的特点,采用了折射角为 $0^\circ/45^\circ/60^\circ/80^\circ$ 4种不同角度以及工作频率为 5 MHz 的组合探头,大大提高了检测速度。

控制棒驱动机构贯穿件管壁及贯穿件焊缝的超声检测探头由以下6个探头组合而成。

K1 横波斜探头 2个(周向);

K1 横波斜探头 1个(轴向);

K3 横波斜探头 1个(近表面检测);

K5 横波斜探头 1个(近表面检测);

0 纵波直探头 1个(双晶)

(3) 涡流检查

检查系统、探头旋转及推拔装置与目视检验相似,只是数据采集设置、探头及信号接收、分析设备作相应改变,这里不作详细描述。

6 检验结果

2002年年初,武汉105所将该套设备组装后,先后组织所内、外专家在模拟体及对比试块上进行功能试验和综合性能测试,测试结果表明,这套系统的综合性能指标、定位精度和重复定位精度满足技术要求。2002年7月,秦山核电厂进行换料大修,该套系统运抵现场。首先进行了验证性试验,当各项技术指标达到要求后对顶盖贯穿件实施检查。经过一个多星期的检查,顺利地完成了检测任务,超声波、涡流及目视三项检查都达到了预期的检测效果。

检查结果表明,秦山压力容器顶盖贯穿件及其焊缝目前尚没出现有超过技术指标的缺陷。

7 存在的问题

应该指出,这套检测系统在超声波检测方面还有待改进。

在超声波检测中,由于顶盖贯穿件是通过冷装工艺穿过顶盖,贯穿件与顶盖之间成过盈配合,顶盖与贯穿件之间假如有空气存在,那么超声波通过空气界面进入焊缝的检测灵敏度将降低,甚至有检测盲区。

要解决这个问题,必须做一个与顶盖贯穿件冷装工艺完全相同的模拟体,并进行具体测试,并测得相应的数据,考虑适当的补偿,只有这样,才能做到更准确地检测。

8 结论

对秦山核电厂压力容器顶盖贯穿件及其焊缝通过超声波、涡流、目视三种方法的检查结果表明:秦山核电厂压力容器顶盖贯穿件及其焊缝目前尚无超标缺陷存在。根据国外经验,顶盖贯穿件裂纹的扩展速率小于 4 mm/年 ,这样,秦山核电厂压力容器顶盖可在近3年内能保证不发生泄漏,为公司进行顶盖及其相关部件的更换计划提供了依据。