

核电站控制棒驱动机构下部焊缝渗透检查技术

魏士明

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12414

[摘要] 目前压水堆核电站在役机组控制棒驱动机构下部焊缝自动渗透检查技术国内无相关能力,因此开发一套完整的控制棒驱动机构远程控制渗透检查技术具有重大意义,从而为其他远程渗透检查技术提供参考。基于此,本文主要介绍了控制棒驱动机构下部焊缝自动无损检测装置的结构、渗透检查方法、后处理装置等,并说明了检查设备工作流程和注意事项。

[关键词] 压水堆核电站; 控制棒驱动机构; 渗透检测

中图分类号: TL48 **文献标识码:** A

Penetration inspection technology of lower weld of control rod drive mechanism

Shiming Wei

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD

[Abstract] The automated penetrant inspection technology for lower weld seams of control rod drive mechanisms in operational pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants currently lacks domestic technical capabilities in China. Developing a comprehensive remotely-controlled penetrant inspection system for control rod drive mechanisms holds significant importance, as it will provide reference for other remote penetrant inspection technologies. This paper primarily introduces the structure of the automated non-destructive testing device for lower weld seams of control rod drive mechanisms, the penetrant inspection methodology, and post-processing equipment. It also elaborates on the operational workflow of the inspection system and highlights key precautions during implementation.

[Key words] Pressurized Water Reactor (PWR) nuclear power plant; Control Rod Drive Mechanism; Penetrant Inspection

引言

由于反应堆压力容器在运行过程中长期在高温、高压及高放射性环境中,使得压水堆核电机组控制棒驱动机构(简称CRDM)容易出现焊缝泄漏的故障。目前,针对在役机组CRDM密封焊泄漏故障采取的维修主要是CRDM切割再更换及密封焊缝堆焊修复两种技术。CRDM上部焊缝维修过程中因空间满足要求人工可以实施渗透检查,但下部焊缝因空间受限人员无法到达,必须研发自动无损检测方法。国内外暂无下部焊缝自动渗透检测技术,本文主要介绍了一套新研发的压水堆核电站控制棒驱动机构下部焊缝渗透检测装置,为后续其他受限空间实施渗透检测提供借鉴意义。

1 控制棒驱动机构及自动化空间状况

1.1 控制棒驱动机构

控制棒驱动机构是反应堆控制和保护系统的伺服机构。其功能是根据反应堆控制和保护系统的指令,驱动控制棒组件在堆芯内上、下运动,保持控制棒组件在指令高度或断电落棒,完

成反应堆启动、调节功率、保持功率、安全停堆和事故停堆。它的耐压壳是反应堆一回路系统压力边界的组成部分^[1]。

在CPR1000堆型的核电站中,每台机组的反应堆压力容器顶盖上方装有61根控制棒驱动机构。控制棒驱动机构由驱动杆部件、钩爪部件、耐压壳部件、线圈部件、棒位探测器等部件组成,其中,耐压壳属于承压边界,整个耐压壳由棒行程套管和密封壳两部分组成,耐压壳上有上、中、下共3道密封焊缝,从上至下分别连接端塞、棒行程套管、密封壳、管座4个零件,构成3处可拆密封结构,整个机构竖直安装在反应堆压力容器顶盖的管座上。

1.2 控制棒驱动机构下部焊缝的空间状况

CPR1000堆型核电厂每台机组相邻控制棒驱动机构中心轴线之间的距离为304.11mm,耐压壳之间的最小间隙为101mm,位于控制棒驱动机构耐压壳下部区域。反应堆压力容器顶盖结构复杂,在进行控制棒驱动机构耐压壳密封焊缝更换切割操作前,需对堆顶结构进行最大化拆除,仅保留反应堆压力容器顶盖本

体(包含管座)、通风罩支承、控制棒驱动机构耐压壳部件(内含钩爪部件)、热电偶柱阴法兰等。

2 控制棒驱动机构下部焊缝渗透检测

2.1 渗透检测简介

渗透检测是基于液体的毛细作用(或毛细现象)和固体染料在一定条件下的发光现象^[2]。渗透检测的工作原理是:工件表面被施涂含有荧光染料或着色燃料的渗透剂后,在毛细作用下,经过一段时间,渗透剂可以渗入表面开口缺陷中,去除工件表面多余的渗透剂,经干燥后,再在工件表面施涂显像剂,同样在毛细作用下,显像剂将吸引缺陷中的渗透剂,即渗透剂回渗到显像剂中,在一定的光源下(黑光或白光),缺陷处的渗透剂痕迹被显示(黄绿色荧光或鲜艳红色),从而检测出缺陷的形貌及分布状态。渗透剂操作的基本步骤是渗透—去除—显像—检查—记录。

2.2 控制棒驱动机构下部焊缝渗透检验的装置

CPR1000堆型的反应堆压力容器顶盖控制棒驱动机构的更换操作空间十分狭窄,考虑到操作空间、工具的耐辐照性、人员辐照剂量限制等问题,在役机组控制棒驱动机构更换的全过程必须使用远程控制方法实施。

控制棒驱动机构下部焊缝渗透检验的设备与自动焊接设备^[3]相匹配,根据控制棒驱动机构操作的要求,CRDM下部焊缝渗透检查设备有两种作业模式,(1)Ω焊缝修复或更换前的自动检测作业;(2)Ω焊缝修复或更换后的自动检测工作。控制棒驱动机构下部焊缝渗透检验的设备包括周向定位机构、抱紧装置、升降装置、检测机构(包含喷涂装置、擦拭装置、显像装置和观察装置)等。

周向定位机构主要用于自动检测设备的中心定位,由导向机构和抱紧机构组成。其中因检测底管和检测焊缝的导向位置不同前检测装置和后检测装置的导向机构形状不同,但两者的导向机构均由安装板和尼龙导向瓦组成,组装后能与工作台升降机构利用蝶形螺母方便的连接和更换。

抱紧机构通过连杆安装在工作台的下方,它由气缸驱动,气缸连接齿条,齿条啮合与驱动连杆同轴的齿轮转动,从而摆动废液收集盒,实现对底管的抱紧和打开。

升降机构检测焊缝或底管坡口时工作台需要在竖直位置上进行位置的调节由工作台升降机构(以下简称升降机构)完成。前检测装置和后检测装置共用一套升降机构,前检测装置升降机构下方安装封堵定位块,后检测装置安装尼龙环定位垫。升降机构主要由升降机架,两套导向轴组件,两套电机丝杆升降组件和机架筒内的6组导向轮组件组成。

2.3 渗透检测类型选择

根据渗透剂去除方法,渗透检测分为水洗型、后乳化型和溶剂去除型三大类。根据调研其他远程控制自动化渗透检测装置,一般采用的是水洗型渗透检测方法,原因是水洗型渗透检测方法去除表面多余的渗透剂可以直接用水清除,操作简单方便,但水洗型渗透检测法的灵敏度相对较低,对表面浅而宽的缺陷容易漏检,原因是利用水进行冲洗时比较容易造成过清洗,例如,清

洗时间过长、水温偏高或水压过大,都可能会将缺陷中的渗透剂清洗掉,降低缺陷的检出率。

后乳化型渗透法的渗透剂不能直接用水从工件表面洗掉,必须增加一道乳化工序,即工件表面上多余的渗透剂要用乳化剂“乳化”后方能用水洗掉,其余与水洗型渗透检测工序完全一样。后乳化型渗透法因渗透剂中不含乳化剂,有利于渗透剂渗入表面开口缺陷中去,因此后乳化型渗透法的灵敏度相对水洗型渗透法较高,但要严格控制乳化时间,这对于远程控制系统来说比较困难。

溶剂去除型渗透法多采用水基湿式显像剂即溶剂悬浮显像剂显像,具有较高的检验灵敏度。无论是水洗型还是后乳化型渗透法都需使用大量的水冲洗渗透剂,冲洗过程中的残水会流到反应堆压力容器上方,残水很难清理干净,可能导致对设备产生腐蚀。溶剂去除型渗透法的渗透剂、清洗剂和显像剂一般装在喷罐中使用,使用的数量可控制,相对较少,清理方便。综合考虑,使用溶剂去除型渗透法作为自动化渗透检验类型。

2.4 喷涂装置

控制棒驱动机构下部焊缝是“Ω”形状,人工操作一般使用毛刷将渗透剂喷涂在焊缝上,但机械装置无法做到将渗透液均匀涂抹到焊缝上。考虑通过微孔仪将渗透液和显像剂雾化,雾化后可均匀喷涂到焊缝结构上。微孔雾化仪内置超声波雾化芯片,能够将检测液雾化后均匀喷在待检测表面。微孔雾化仪通过可调节滑块安装在旋转工作台上,调节滑块能够调节雾化仪至待检测表面的距离,保证喷涂效果。微孔雾化仪配有不同规格和角度的雾化流道,根据焊接前后检测位置的不同装配不同的流道,确保将检测液喷涂到指定位置。微孔雾化仪也可安装于专用的手持长杆工具,进行人工操作。超声波雾化芯片的振动频率与颗粒直径成反比,振动频率越高,颗粒越小。前期经过大量测试研究,使用雾化水的雾化器孔径和频率,显像剂雾化效果可满足要求。但渗透剂含有油性物质,雾化量效果不好,无法满足要求,通过调整雾化器的孔径和频率最终可实现将渗透剂雾化,并且雾化量满足要求。超声波雾化器是利用高频震动会破坏渗透剂的表面张力,形成细小的气溶颗粒,渗透剂雾化后是否对性能产生影响,利用不锈钢镀铬B型试块对比进行了测试,测试结果满足要求。

2.5 擦拭装置

根据手动擦拭使用的是布或者吸水纸擦拭,前期设计出类似手指的结构,在前端规定干净的布进行擦拭测试,因焊缝结构原因在焊缝坡口位置有残留渗透剂无法擦拭干净,由于擦拭装置无法如手指可以随意调整角度。通过对比分析测试最终选择使用海绵了。海绵具备吸水性好、形状易修剪等优点,根据焊缝和坡口的形状裁剪与之相匹配的擦拭形状。另外擦拭装置在运动过程中要缓慢,速度不能太快,否则还是存在清理不干净的情况。擦拭一次后需更换新的擦拭块,需在新的擦拭块上喷涂清洗剂,再次进行擦拭,这样渗透剂清理才满足要求。

2.6 显像装置

渗透剂使用擦拭装置清理完成后,需要自然干燥几分钟后等待表面干燥后再喷涂显像剂。如前文所述,使用雾化器雾化显像剂效果较好,在喷涂过程中要使用环境摄像头时刻观察喷涂显像剂的厚度,如喷涂显像剂较厚可能将缺陷显示模糊,如喷涂较薄,缺陷显像不出来,容易漏检。

2.7 观察装置

VT检测模块机械部分由检测头(相机、镜头)和支架组成。其中前检测装置和后检测装置的支架不同,前检测装置的检测头支架具有移动功能。前检测装置的检测头支架通过微型电机带动齿条向底管推动支架,通过工作台升降机构向下移动将反射镜送入底管坡口的沟槽内检测待检面。后检测装置的检测头支架安装在可调节滑座上,通过在模拟体上的测试调整好支架在工作台上的位置后固定。检测探头和反射镜的安装充分考虑了检查稳定性,防止检测液雾化后对镜头和镜片的污染影响检测效果。

2.8 废液收集装置

废液收集装置包括擦拭模块、废液收集盒和废液防护罩,用于清除PT检测过程产生的废液和防止污染周围CRDM部件。其中,废液收集盒同时也是抱紧机构的执行零件,负责收集从工作台中心孔散落的检测液。防护罩由透明软质聚氯乙烯制成,包裹在工作台四周,用安装压板固定,防止检测液飞溅污染。

擦拭模块是由气缸驱动擦拭块,使擦拭块接触待擦拭表面,由工作台的旋转带动擦拭块清洁坡口或焊缝表面。擦拭模块设置两组,其中一组清洁渗透剂专用。擦拭块由不掉毛的清洁布包裹弹性多孔材料组成,可以针对焊接前后擦拭表面的不同形状(包括沟槽)保证待擦拭面全部可达,不遗漏。擦拭块从设备上拆除后可连接专用长杆工具,进行人工擦拭。

3 检测设备工作过程

CRDM焊接前后状态,对导向筒管座坡口以及焊后 Ω 焊缝自动无损检测(PT/VT)装置作业操作流程说明如下。

(1)用吊车将该设备吊运至反应堆顶盖上方,利用导向装置将设备穿入待检测CRDM管座或热电偶柱,使导向装置落在耐压壳上;(2)通过摄像头图像观察,控制工作台升降机构,将工作台移动到焊缝合适位置,闭合抱紧机构,使设备紧固在导向筒上,

稳定定位;(3)打开清洗剂喷头开关,对焊缝处喷涂清洗剂,同时正反方向旋转工作台,清洗剂喷涂均匀后,调整擦拭装置角度使擦拭块充分接触焊缝,再次旋转工作台将清洗剂擦拭干净,擦拭干净后把擦拭装置连杆调回原状态;(4)打开渗透剂喷头开关,对焊缝处喷涂着色渗透剂,同时正反方向旋转工作台反复喷涂渗透剂,渗透剂喷涂均匀,保持渗透物块处于浸润状态,静置一段时间;(5)调整擦拭装置角度使擦拭块充分接触焊缝,旋转工作台将渗透剂擦拭干净,擦拭干净后把擦拭装置连杆调回原状态;(6)打开显像剂喷头开关,对焊缝处喷涂显像剂,同时正反方向旋转工作台,控制旋转工作台的旋转速度和药剂喷涂时间,使显影剂喷涂均匀。调节摄像头位置、角度和焦距,观察待检区域,如发现裂纹,记录并保存,可通过图像处理分析系统判断裂纹大小,同时操作人员可将裂纹与刻度盘对比进行验证;(7)重复步骤(3),调整擦拭装置角度,将显像剂擦拭干净;(8)检测过程完毕后,操作打开定位块,吊出设备,处理废液,更换耗材,拆卸设备,装箱存放;(9)最终清洁:操作人员可手持带加长杆的擦拭块,对残留试剂(如果有)进行彻底清洁。

4 结语

压水堆核电站在役机组控制棒驱动机构下部焊缝自动渗透检查技术首次采用溶剂去除型检查方法,为自动渗透检测提供借鉴意义。检查设备包括多个子模块装置,要确保每个装置之间匹配良好,检测设备工作前要按照设备调试导则文件进行调试,检测装置工作期间要时刻关注设备状态,确认每个步骤满足要求。

[参考文献]

[1]喻杰.压水堆核电站控制棒驱动机构的现状与发展[J].科技创新导报,2017,14(22):83-85.

[2]陈志强,李小亭,张万岭.焊缝根部缺陷的综合检测[J].无损检测,2010,32(04):286-288.

[3]左智成,李杰,孙士杰,等.压水堆核电站在役机组更换控制棒驱动机构自动焊工艺研究[J].电焊机,2019,49(12):81-85.

作者简介:

魏士明(1987--),男,汉族,河南省商丘市人,大学本科,工程师,研究方向:在役检查,无损检测。