

ASME 规范对核设备制造和运行期间的无损检验要求对比

葛 亮, 蔡家藩, 聂 勇, 梁 平

(核动力运行研究所, 武汉 430223)

摘 要: 对比分析了美国机械工程师协会(ASME)规范对核设备在制造和运行阶段中, 在检验范围、检验技术和验收准则等方面的无损检验要求, 对存在的差异进行了归纳总结。

关键词: ASME; 核设备; 无损检验; 在役检查

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)03-0085-06

Differences of NDT Technology Requirement between Manufacture and Operation Period of Nuclear Equipment in ASME Code

GE Liang, CAI Jia-fan, NIE Yong, LIANG Ping

(Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430223, China)

Abstract: This paper takes the ASME code as an example to describe the requirement of NDT for nuclear equipment in Manufacture and Operation Periods, and to analyze and compare the corresponding requirements of inspection scope, technique and acceptance standard in this two period, as well as, the sum-up the difference.

Key words: ASME; Nuclear equipment; NDT; In-service inspection

美国机械工程师协会(ASME)颁布的《锅炉及压力容器规范》(以下简称 ASME 规范或规范)系列规范, 至今已扩展至 11 卷 28 册。其中第Ⅲ卷《核设施部件建造规则》、第Ⅺ卷《核电厂部件在役检查规则》与第Ⅱ卷《材料》、第Ⅴ卷《无损检验》、第ⅤⅢ卷《压力容器建造规则》、第Ⅸ卷《焊接和钎焊评定》等综合起来, 组成了核电厂设备的材料、设计、制造、焊接、检测、运行等方面的一套完整的规范与标准体系^[1]。

由于核设备包带有或可能带有强烈的放射性物质, 同时设备大多长期处在高温、高压、高辐照环境下运行; 因此, 为保障核设备的完整性及可用性, 防止核事故的发生, 在核电建造的全过程, 即设计、设备制造、安装、运行、退役等过程都需要进行无损检验。

ASME 规范对核电建造各阶段的无损检验均

有明确要求。这些要求主要包括对无损检验人员、设备、验收、检验方法和技术的要求, 以及对被检设备和部件的检验范围、检验时机和检验频度的要求等。其中: ASME 规范第Ⅲ卷《核设施部件建造规则》主要规定了核设备制造过程中及役前检查中的无损检验要求; 第Ⅴ卷《无损检验》主要规定了核设备材料和焊缝的无损检验方法; 第Ⅺ卷《核电厂部件在役检查规则》主要规定了核设备役前以及役中的无损检验要求。这些要求形成了一套完整的核电设备无损检验体系, 切实有效地提高了核设备的可靠性和安全性, 保障了核反应系统的安全运行。

1 概述

目前, 国内采用 ASME 规范设计的核电机组有秦山核电一厂的 CP300 堆型, 三门、海洋核电站的 AP1000 堆型等。以上这些堆型在设备制造、役前及在役检查阶段, 均按照 ASME 规范的要求实施无损检验。有些采用其他规范设计的核电站, 如秦山核电二厂 1、2 号机组的 CP600 堆型, 在制造阶段也

收稿日期: 2015-08-18

作者简介: 葛 亮(1986—), 男, 学士, 工程师, 主要从事无损检测技术研究和工程应用工作。

采用 ASME 规范实施无损检验。

近年来,国内采用 ASME 规范进行无损检验的核电机组越来越多,因此有必要对规范中的无损检验要求进行梳理,对不同阶段中的无损检验要求进行对比,以便更好地理解和使用规范。

笔者从核设备制造和运行中的无损检验的目的出发,概括性地描述了 ASME 规范第Ⅲ卷《核设施部件建造规则》和第Ⅺ卷《核电厂部件在役检查规则》,在设备制造、役前及在役检查中的无损检验要求和应用;并对不同阶段中 ASME 规范对无损检验的技术要求,就检验范围、检验技术和验收等方面进行了简要对比和分析。

2 制造中的无损检验要求

为保障核设备在制造过程中的安全运行,几乎要对所有材料、零部件等按规定进行无损检验,以证明所生产的设备符合使用要求。无损检验,包括原材料验收,工艺控制,零部件,焊接接头以及水压试验之后的最终质量验收。ASME 规范第Ⅲ卷《核设施部件建造规则》对设备制造过程中的无损检验要求做出了明确规定^[1]。

2.1 整体结构

ASME 规范第Ⅲ卷按照三个层次对部件和结构进行分类,并对各类部件分别做出无损检验要求。

第一个层次,按照安全级别和作用将被检设备分为 7 个类别,分别为核安全 1 级部件、2 级部件、3 级部件、MC 级部件、支承件、堆芯支承结构以及高温使用的核 1 级部件,各部件要求对应第Ⅲ卷第一册中的 NB 分卷至 NH 分卷,其中前 6 类均规定了无损检验的要求。

第二个层次,将各级部件分为焊缝检测和原材料检测两大类,对应各分卷中的第 5000 章“检测”和第 2500 节“材料的检测和补修”。

第三个层次,分别对焊缝和原材料进行分类。焊缝按照焊缝系数和焊缝类型分为容器的 A 类、B 类、C 类、D 类焊缝,管道、阀门焊缝以及角焊缝等。原材料按照加工工艺分为板材、锻件、棒材以及管材等。

对各类检查部件和结构,ASME 规范第Ⅲ卷相应章节规定了无损检验方法要求、检验时机要求、检验人员要求;对于不同的检验方法还规定了相应的检验技术、显示评定和验收准则等要求。图 1 为 ASME 第Ⅲ卷中无损检验结构体系。

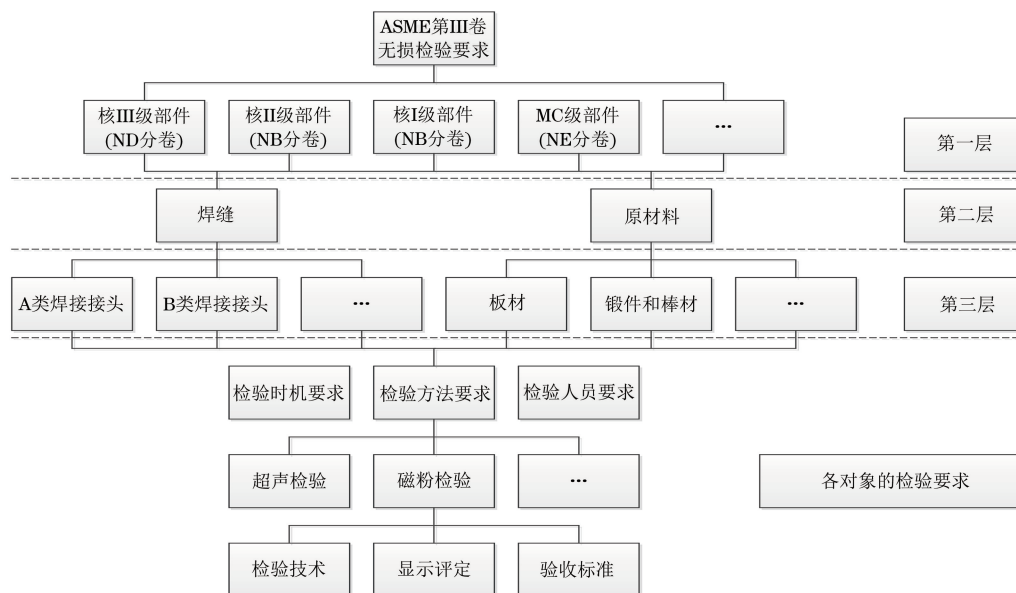


图 1 ASME 第Ⅲ卷无损检验结构体系

2.2 检验要求

以第Ⅲ卷第一册的 NB-5000“检测”(核一级部件焊缝的检验要求)为例进行说明,该章对不同类型焊缝的检验范围、检验方法和验收准则等方面做出了规定,并对所使用检验技术、检验时机和执行检验的人员提出了要求。

制造和役前检查中的无损检验方法和技术,一

般应按照第Ⅴ卷《无损检验》的要求进行。另外,相应各方法的检验程序,也应按照第Ⅴ卷的要求进行编写。但对于役前检查中的超声检验需参照第Ⅺ卷的要求执行。

对于容器的 A 类、B 类、C 类焊接接头以及管道、泵上和阀门上的环焊缝及纵焊缝,一般应使用射线、超声、磁粉或液体渗透方法实施检验。对于容器的 D

类焊接接头和其他焊接接头,一般需使用磁粉或液体渗透法实施检验;对于有些焊接接头也提出了体积检验的要求。各类焊缝的检验范围主要包括焊缝坡口表面、焊缝和相邻母材以及堆焊层等。

各类焊缝无损检验时机,一般在中间热处理或最终热处理之后,除非热处理后的状态无法满足检验条件要求;或对于一些部件在热处理后,会使用其他同类型的检验方法进行补充等情况。如容器焊缝若在热处理后进行超声检验,则射线检验可在热处理前进行。另外,规范还要求容器焊缝在水压试验后,应进行所有要求的体积检查。

在验收准则方面,设备制造过程中和设备安装后的役前检验略有不同。在设备制造过程中,任何具有裂纹、未熔合或未焊透特征的危害性缺陷均拒绝验收,其他类型的缺陷验收与否一般与其尺寸、长度或数量有关。

在检验人员要求方面,ASME 第Ⅲ卷规定在设备制造阶段无损检验人员必须通过培训和考核,并取得相应的资格证书才能从事无损检验工作。无损检验人员的培训、考核和取证必须满足 SNT-TC-1A《无损检测人员资格鉴定和认证推荐实施细则》的推荐导则的要求。

3 运行中的无损检验要求

为保障核设备在服役中的可靠性,必须根据设

计部门或规范规定的周期和方法及制造部门提交的具体部件的检验细则对指定设备进行可靠的无损检验。ASME 规范第Ⅱ卷《核电厂部件在役检查规则》对服役前及在役检查的无损检验要求做出了明确规定。

3.1 整体结构

ASME 规范第Ⅱ卷包含三册,分别规定了压水堆、高温气冷堆和液态金属冷却堆的在役检查规则。该卷对后两种堆型的在役检查要求尚未完善,主要是针对压水堆核电厂的在役检查。

与第Ⅲ卷类似,ASME 规范第Ⅱ卷按照部件的系统和作用将其进行分类,不同级别部件的检验要求也不相同。类别包括核一级、二级、三级部件、MC 和 CC 级金属内衬设备以及各部件的支承件等,对应 IWB 分卷至 IWL 分卷。在各分卷之前为通用要求 IWA 分卷,在各分卷之后为强制性和非强制性附录。

第Ⅱ卷对各分卷中不同类型的检验部件和区域进行了分类,如 B-A 类为反应堆压力容器承压焊缝,B-J 类为管道焊缝。针对各类检查部件和结构,ASME 规范第Ⅱ卷相应章节规定了无损检验方法要求、检验计划要求和检验人员要求。对于不同的检验方法还规定了相应的检验技术、显示评定和验收准则等。图 2 为 ASME 第Ⅱ卷中无损检验结构体系。

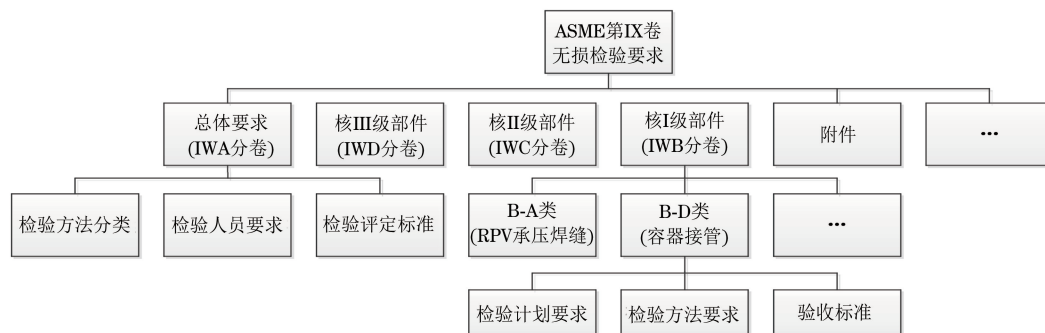


图 2 ASME 第Ⅱ卷无损检验结构体系

3.2 检验要求

第Ⅱ卷定义了役前和在役检查中的各种检验方法,明确了无损检验人员的考核、设备服役中的检查计划以及检验评定等方面的要求。

无损检验方法按照检验的目的和区域的不同分为目视检验、表面检验和体积检验三大类。目视检验主要针对部件表面的不连续和缺陷、承压设备的泄漏痕迹以及机械结构的形变和完整性等;表面检验用于显示表面存在不连续,主要包括磁粉、液体渗

透、涡流等几种方法;体积检验用于显示整个材料体积内存在的不连续,主要采用射线和超声方法。其中,超声方法在附件 I 中做出了规定;当涡流方法作为表面检验时,其检验要求在附件 IV 中做出了规定;其他检验方法采用 ASME 规范第 V 卷《无损检验》的检验要求。

由于设备服役期间的无损检验一般安排在换料大修期间进行,规范以大修周期为节点,在 IWA 分卷中对检验计划提出了总的检验要求,在各分卷中对各

部件的无损检验提出了具体要求,如检查进度要求,检查比例要求,检验方法要求和检查间隔要求等。

在验收准则方面,第Ⅺ卷规定,对于表面方法或射线检验发现的缺陷,验收准则一般与缺陷长度相关;对于超声检验发现的缺陷,验收准则一般与深度位置、长度和高度相关;对于层状缺陷,验收准则一般与面积相关。为了对无损检验中发现的缺陷进行有效评价,第Ⅺ卷对缺陷的尺寸和形状进行了归一化处理,对相邻缺陷的合并原则做出了明确规定,对各检验部件的验收准则均做出了明确要求。

在检验人员要求方面,第Ⅺ卷要求无损检验人员应按 ANSI/ASNT CP-189《无损检验人员考核和发证》准备的书面试卷进行考核并取证。对于附录 V Ⅲ中规定的需要进行验证的项目,检验人员还需通过相应的验证。

4 ASME 第Ⅲ卷和第Ⅺ卷的无损检验要求对比分析

ASME 第Ⅲ卷规定了核设备制造中的无损检验要求,第Ⅺ卷规定了核设备在役前和在役检查中的无损检验要求,同时对设备安装后的役前检查要求也做出了规定。由于检验目的、检验条件的不同,相对应无损检验的检验要求也有所不同。

4.1 检验范围

设备制造过程中,第Ⅲ卷要求在设备的原材料热处理后、焊缝坡口加工完成后,焊接热处理后,水压试验后等多个环节均应实施相应的无损检验。当设备在出厂时,往往已经过各种方法的多次检验。同时,第Ⅲ卷对所有核级部件均提出了相应的无损检验要求,覆盖范围很广。

在设备安装后或设备服役期间,由于检验目的和检验条件的限制,第Ⅺ卷要求的无损检验范围总体来说比第Ⅲ卷的要小。对于母材和设备安装后不可达的部位一般不实施检验,对于一些管道和设备焊缝按照检查计划的要求抽取一定的比例进行检验。但针对设备服役中会产生的缺陷,第Ⅺ卷相对于第Ⅲ卷也增加了一些检验项目,如设备或结构的变形、泄漏和状态的检验,这些检验一般以目视方法为主。

4.2 检验技术

在检验方法方面,第Ⅲ卷以无损检验的原理对检验方法进行划分,如射线、超声、液体渗透等。第Ⅺ卷在此基础上,对各检验方法按照检验目的和区域的不同,分为了目视、表面和体积检验等,对各检验方法进行归类;并以这三种大的检验方法分别对

各部件提出检验要求,如对稳压器接管与筒体连接焊缝提出了体积检验要求;在具体执行过程中,可根据实际情况实施射线检验或超声检验。另外,对于体积检验来说,第Ⅲ卷更偏向于使用射线检验技术,而第Ⅺ卷更偏向于使用超声检验技术。

在役前和在役检查中,由于条件限制,大多被检部件只能从一个方向接近,且检验方法往往会受到限制,例如反应堆压力容器(以下简称 RPV)筒体承压焊缝,一般仅从内表面进行超声和目视检验;而在设备制造中,对该焊缝一般从内、外表面采用多种检验方法进行检测。相应的,一些部件在制造过程中,第Ⅲ卷要求使用磁粉或液体渗透进行检测,Ⅺ卷中则降低了要求,仅需使用目视检验方法。

另一方面,因检查目的不同,对在役检查来说主要是为了检测服役中可能会产生的缺陷,因此 ASME 第Ⅺ卷,对有些检验部位相对于第Ⅲ卷的检验技术做出了新的规定或要求,例如主设备的内圆角区,在在役检查中针对该区域可能会出现裂纹等危险性缺陷,提出了明确的检验要求。

另外,第Ⅺ卷对一些相对重要的检验部件的超声检验方法,提出了能力验证要求,例如 RPV 相关部件和管道的超声检验。实施这些部件役前和在役检查的检验技术、检验人员和检验设备必须满足附录 VIII 考核要求。

国内从 2009 年开始,NNSA(国家核安全局)已对核电站的役前和在役检查技术提出了能力验证的要求;而各检验服务单位的检验程序,为了满足验证的要求,所使用的检验技术和测量方法可能与 ASME 规范存在一定差异。

例如,目前通过能力验证的 RPV 超声检验程序中,对于缺陷的自身高度测量均采用尖端衍射信号技术进行测量。缺陷长度测量方式有所不同,存在-6,-12 dB 和背景噪声测量法等几种方法,而制造阶段一般采用-6 dB 法进行长度测量。

由于役前检查阶段所使用的缺陷长度测量技术与制造阶段的不同,有可能造成同样一个缺陷两个阶段测量的长度不一致,进而会造成不同的结果。为了避免此类情况的发生,在役前检查发现的缺陷,如果按照 ASME Ⅲ卷验收,应采用与制造厂一样的缺陷长度测量方式,重新分析数据,再按照制造验收标准进行验收。

4.3 验收准则

ASME 规范第Ⅲ卷,对设备制造过程中的缺陷

显示验收准则做出了规定,第Ⅺ卷对役前和在役检查的验收准则做出了规定。考虑到设备安装后和服役期间的条件与设备制造过程中有所不同,各阶段的验收准则有所不同。一般来说,设备制造中的缺陷验收准则要严于役前检查,役前检查要严于在役检查或与在役检查相当。第Ⅲ卷中规定,所有危害性缺陷显示均拒绝验收,且需对发现超过验收准则缺陷的区域进行返修。第Ⅺ卷中规定,役前和在役检查中发现的危害性缺陷显示,一般超过一定尺寸才拒绝验收;对于超标显示还需进一步通过断裂力学进行缺陷扩展分析,若分析结果表明缺陷不影响设备在役期的安全性和可用性,则仅需跟踪检查,无需返修处理。

5 应用实例

以压水堆型核 RPV 筒体环焊缝检验为例,分别介绍设备制造和在役检查中对该焊缝的超声检验方法、技术要求和验收准则。

5.1 检验部件概述

RPV 的筒体内径为 4 000 mm 左右,壁厚为 210 mm 左右,整个筒体母材采用低合金钢,考虑到耐腐蚀等特殊要求,在内壁要求堆焊一层 6 mm 左右的不锈钢堆焊层。RPV 的外形和焊缝位置,见图 3。按照 ASME 第Ⅲ卷和第Ⅺ卷要求,均需对该焊缝实施超声检验。

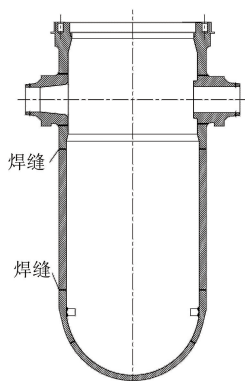


图 3 RPV 结构示意图

5.2 制造中的检查

按照 ASME 第Ⅲ卷要求,该焊缝的检查区域为焊缝金属加上焊缝边缘两侧 13 mm 的母材范围。

该焊缝超声检查的检验技术、检验人员和检验设备应按照 ASME 规范第 V 卷《无损检验》的要求执行。一般采用手动检查方式,使用 45°,60°,70°横波以及直探头从焊缝内外两面,每个面进行平行于焊缝和垂直于焊缝四个方向分别对焊缝实施全体积

检验;45°,60°,70°横波用于焊缝的检测,直探头用于检测各探头声束经过的区域、层状缺陷以及判断缺陷性质。

设备制造中,对该焊缝中发现的缺陷记录和验收准则如下:

记录回波幅度超过 20% DAC(距离-波幅曲线)的所有缺陷,并确定所有这些缺陷的形状、性质和位置。其中核安全 1 级部件容器筒体焊缝的验收准则如下:

(1) 显示波幅超过 DAC 曲线,且长度超过下列规定值的缺陷均不得验收:① 对于焊缝厚度 t 小于 19 mm,显示波幅大于 100% DAC 且长度大于 6 mm。② 对于焊缝厚度 t 为 19~57 mm,显示波幅大于 100% DAC 且长度大于 $t/3$ mm。③ 对于焊缝厚度 t 大于 57 mm,显示波幅大于 100% DAC 且长度大于 19 mm。如焊缝为两种不同厚度,厚度 t 取小值。

(2) 确定显示特征为裂纹、未熔合和未焊透,不论其长度如何均不得验收。

5.3 在役检查

按照 ASME 第Ⅺ卷要求,该焊缝的检查区域为焊缝金属加上焊缝边缘两侧 1/2 壁厚的母材范围。

该焊缝超声检查的检验技术、检验人员和检验设备需通过 ASME 第Ⅺ卷附录 VⅢ要求的能力验证。由于核电站的特殊性,在役检查时不可从外侧接近,通常在役检查时从内侧采用远距离自动超声检验技术,一般分为探测和缺陷定量两步进行检测:

第一步为探测:使用 45°、60°横波、70°双晶/多晶纵波和直探头在垂直于焊缝和平行于焊缝四个方向,对检验区域进行全体积扫查。45°、60°横波探头用于检测焊缝中深度大于 20 mm 的区域,70°双晶/多晶纵波探头用于检测焊缝近表面区域,直探头用于检测各探头声束经过的区域、层状缺陷以及判断缺陷性质。一般参考 ASME 规范第Ⅺ卷强制性附录Ⅲ的要求执行。

第二步为定量:根据检测得到的缺陷位置和方向。使用 45°纵波探头对缺陷区域进行更为精密的扫查,进而确定缺陷的高度和长度尺寸。

在役检查中,对该焊缝中发现的缺陷的记录和验收准则如下:① 如果被怀疑是缺陷显示,不论幅度大小均要记录。② 如果不能确定是几何结构还是冶金因素形成的显示,其回波幅度大于或等于 20% DAC 时应记录。③ 如果被判定为几何结构或冶金结构显示时,在役前检查时,记录大于或等于

20%DAC 幅值的结构显示;在役检查时,记录大于或等于 50%DAC 幅值的结构显示。

役前/在役检查时,缺陷记录数据包括自身高度测量和长度测量值,根据高度和长度的比值关系进

行验收,其中 RPV 筒体环焊缝的验收准则见表 1。

表 1 中 t 为焊缝的标称壁厚;埋藏缺陷显示的总深度取 $2a$; $Y=s/a$,如果 Y 小于 0.4,内部缺陷显示按表面缺陷显示处理;如果 Y 大于 1.0,则 Y 取 1.0。

表 1 RPV 筒体环焊缝允许的平面缺陷

%

长高比 a/l	壁厚等于或小于 64 mm		壁厚 102~305 mm		壁厚等于或大于 406 mm	
	表面缺陷显示	埋藏缺陷显示	表面缺陷显示	埋藏缺陷显示	表面缺陷显示	埋藏缺陷显示
	a/t	a/t	a/t	a/t	a/t	a/t
0.00	3.1	3.4Y	1.9	2.0Y	1.4	1.5Y
0.05	3.3	3.8Y	2.0	2.2Y	1.5	1.7Y
0.10	3.6	4.3Y	2.2	2.5Y	1.7	1.9Y
0.15	4.1	4.9Y	2.5	2.9Y	1.9	2.1Y
0.20	4.7	5.7Y	2.8	3.3Y	2.1	2.5Y
0.25	5.5	6.6Y	3.3	3.8Y	2.5	2.8Y
0.30	6.4	7.8Y	3.8	4.4Y	2.9	3.3Y
0.35	7.4	9.0Y	4.4	5.1Y	3.3	3.8Y
0.40	8.3	10.5Y	5.0	5.8Y	3.8	4.3Y
0.45	8.5	12.3Y	5.1	6.7Y	3.9	4.9Y
0.50	8.7	14.3Y	5.2	7.6Y	4.0	5.6Y

6 结论

ASME 规范第Ⅲ卷和第Ⅺ卷均提出了核设备无损检验的要求,共同构成了核电设备的无损检验体系。从规范适用的工程阶段上来说,在设备制造阶段使用第Ⅲ卷的无损检验要求,在此后的役前、在役阶段一般使用第Ⅺ卷的无损检验要求。由于检验条件和检验目的不同,在无损检验要求上也存在一些差异。

一般来说,设备制造阶段相对于在役检查期间

的检验范围覆盖面更广,检验手段更为全面,验收准则更为严格。但在实际检验中,由于两卷对检验人员、检验设备和检验技术的要求并不完全相同,甚至在有些需要进行能力验证的检查项目中,第Ⅺ卷对各方面要求更为严格。因此制造阶段和役前阶段对相同部件的无损检验结果有时会存在一定差异。

参考文献:

- [1] 朱从斌,葛林涛,朱坤. 核岛主设备制造和役前检查阶段无损检测技术差异[J]. 无损检测, 2015, 37(9): 50-54.

全国无损检测标准化技术委员会 2015 年会在江苏省常州市举行

全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)2015 年会(第七届第一次全体会议)于 2015 年 12 月 12~15 日在江苏省常州市举行。签到的与会代表共 97 人,分别来自 78 个单位。在张文琴副主任委员主持下,举行了会议开幕式。张文琴副主任委员向代表们通报了第七届全国无损检测标准化技术委员会组成方案;沈功田任主任委员,张文琴、于岗、许遵言、倪培君、史亦韦任副主任委员,金宇飞任秘书长,罗云东、香勇、丁杰、赵成、章怡明、孔凡琴任副秘书长。

常州超声电子有限公司潘振新董事长代表会议承办单位致辞欢迎各位代表,并介绍了公司的整体情况以及在超声检测仪器和探头等产品领域的特色。罗云东副秘书长报告了 2015 年工作总结,金宇飞秘书长报告了第六届全国无损检测标准化技术委员会工作报告、曾祥照组长报告了 WG1 数字成像工作组工作报告。在委员们的提议下,秘书处建立了无损检测标委会微信群。会议对 3 项行业标准(JB/T 6061—2007、JB/T 6062—2007、JB/T 10658—2006)进行了

复审。由于已经发布了 GB/T 26951—2011、GB/T 26952—2011、GB/T 26953—2011、GB/T 26954—2011 这 4 项国家标准,并且其完全涵盖了复审的 3 项行业标准,会议一致同意向标准化有关管理部门提出关于废止 3 项行业标准的建议。会议讨论并通过了 2016 年度工作计划。随后依次审查了 5 项国家标准送审稿和 1 项行业标准送审稿。在香勇副秘书长主持下,会议审查了《无损检测 超声显微检测方法》等 1 项国家标准送审稿。在倪培君副主任委员主持下,会议审查了《无损检测 X 射线数字成像检测 导则》、《无损检测 X 射线数字成像检测 系统特性》、《无损检测 X 射线数字成像检测 检测方法》等 3 项国家标准送审稿。在徐国珍委员主持下,会议审查了《无损检测 X 射线应力测定方法》、《无损检测 工业射线照相底片光学密度的测定方法》等 1 项国家标准送审稿和 1 项机械行业标准送审稿。

无损检测标准化技术委员会秘书处
2015 年 12 月