

核电站安全端异种金属焊缝超声检查技术

陈怀东, 肖学柱, 李明, 刘金宏

(中广核检测技术有限公司苏州分公司, 苏州 215004)

摘要:安全端异种金属焊缝在寿命期内的结构完整性对于核电站的安全运行来说是至关重要的。奥氏体粗晶材料的存在以及焊缝几何结构的复杂性使得异种金属焊缝的检查非常具有挑战性。概述了核电站异种金属焊缝超声检查相关的内容, 包括检查的技术要求、国际检查技术特点、检查技术的局限性、针对缺陷检查的可靠性以及检查资格认证等方面。国际上开展的系列理论和实验研究表明, 针对异种金属焊缝检查的可靠性有待继续提高, 对焊缝和预堆边材料中缺陷的准确检查和可靠评价目前还存在一定困难, 需要在新方法和新技术的应用方面继续进行深入研究。

关键词:核电站; 异种金属焊缝; 超声检查; 检查认证

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)11-0862-06

Review of Research on Ultrasonic Examination Technology of Safe-end Dissimilar Metal Weld of NPP

CHEN Huai-Dong, XIAO Xue-Zhu, LI Ming, LIU Jin-Hong

(Suzhou Branch, CGNPC Inspection Technology Company (CITEC), Suzhou 215004, China)

Abstract: The structural integrity of safe end dissimilar metal weld (DMW) during the lifetime is of significance to the safety operation of nuclear power plant. The austenitic coarse grain material and complex geometry configuration of DMW weld make the examination of dissimilar metal weld very challenging. In this paper the ultrasonic examination technique of dissimilar metal weld is reviewed and summarized, including code inspection requirement, technique characteristic of the abroad vendor, limitation of inspection technique, reliability and inspection qualification etc. The series of theoretical and experimental research showed that the inspection reliability of dissimilar metal weld could be improved continually and it seems a little difficult for accurate examination and reliable evaluation for defect located at position between the weld and buttering, which require further thorough theoretical research and application of new method and technique.

Keywords: Nuclear power plant; Dissimilar metal weld; Ultrasonic examination; Inspection qualification

异种金属焊缝(DMW)是压水堆核电站(PWR)和沸水堆核电站(BWR)连接铁素体容器管嘴和奥氏体管道系统的典型特征应用。异种金属焊缝在寿命期内的结构完整性对于核电站的安全运行来说是至关重要的^[1-3]。安全端管嘴侧焊缝是多种不同材料构成的异种金属焊缝, 采用多层多道焊焊接工艺。因此该部位的组织结构复杂, 存在较粗大的柱状晶; 焊接过程中比较容易产生冶金和组织缺陷, 这种缺

陷在长期高温、高压和辐照的条件下可能成为疲劳、晶间腐蚀等问题的源发地。因此为保障管嘴材料不受电化学因素的作用和防止一回路介质的腐蚀, 在管嘴压力容器侧内壁还堆焊有奥氏体钢堆焊层, 由于该基体(铁素体)、预堆边(Inconel 合金或不锈钢)和堆焊层(Inconel 合金或不锈钢)三者之间热膨胀系数不一致, 因此在管嘴预堆边位置发生早期失效的可能性远大于容器其余位置。

1 异种金属焊缝的检查要求

无损检测是保证核电站部件安全和结构完整性

收稿日期: 2009-08-01

作者简介: 陈怀东(1976—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事核电站在役检查。

的重要手段。役前检查(PSI)在核电站装料前进行,同样在设计寿命期间内的部件修补或替换及在部件重新投入使用前都应进行检查。在运行期内,每个电站在确定的时间间隔内要遵循程序实施在役检查。这套程序大体上包括对核 1,2 和 3 级部件以及它们的附属装置进行定期的目视、表面和体积性检查,检查的级别取决于部件的分类。异种金属焊缝的表面检查要求和同种金属焊缝一样。然而,体积性检查因为复杂的微观结构和不同的材料要求专门的检查程序。

美国联邦法规 10 CFR 50.55a, 将 ASME 规范第 XI 卷中对 1,2 和 3 级承压部件和与之相连的附件的在役检查要求强制使用在 LWR 上。这些部件的检查、修补或替换在分段 IWB、IWC 和 IWD 中都有覆盖^[4]。第 XI 卷“在役检查规则”规定了在役检查的最低要求。PWR 在役检查的要求是以 10 年检查间隔来适应 40 年的运营时间,和不连续评价及修补规则一样。第 XI 卷于 1970 年初被正式接受,其对很多国家的在役检查规范也产生了相当大的影响。每种部件类别的检查区域选择基于以下因素:① 环境状况,包括可导致 RPV 材料脆化的辐照。② 运行间歇,如系统起停,易导致循环应力造成的疲劳。③ 部件结构设计要结合高应力区域,如容器接管、管道与泵、阀间对接焊缝的结构不连续性。④ 异种金属焊缝材料特性,比如说奥氏体不锈钢和铁素体钢焊缝受到使用中外加的热应力的作用。

ASME 规范第 XI 卷介绍的是普通在役老化问题,针对提供最低在役检查要求。同样地,第 XI 卷检查仅仅针对一小部分在设计基准阶段就假定存在老化机制(主要为热疲劳)的重要部件。因此,规范并没有列出在电站运行期间会发生老化的每一个区域或每一种机制类型。在这种情况下,美国核能管理委员会(NRC)强制要求扩大检查作为规范要求的补充,并加入一些协议、协定如晶间应力腐蚀裂纹协调计划,或接受许可承诺如遵循 RG1.150。依照 10 CFR 50.55a(g)(6)(ii)要求,NRC 强制扩大了对一些系统和部件的检验程序,这些系统和部件完整性的保证被认为是必须的。这些都加入到检验方法内,同时还有易受这些老化机制影响的系统和部位。

已发现的由应力腐蚀裂纹、热疲劳、侵蚀腐蚀引起的老化(降级),引发了基于 ASME XI 或相近规范的检查程序效率和基于设计应力选择特殊检查区域的哪些规定的关注。于是,针对早期裂纹的无损检

查系统的 ISI 程序得到扩展。异种金属焊缝包含在检验类别 B-F 中。在 1989 版 ASME Section XI 附录前异种金属焊缝被归入 B-J 或 B-F。在 1989 版 ASME Section XI,检验类别 B-F 重新组织并命名为“承压容器管嘴异种金属焊缝”(Pressure Retaining DMWs in Vessel Nozzles)。这些重新修订的类别包括反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器和一级热交换器的异种金属焊缝。在检查类别 B-F 里,检查要求包括内部 1/3 体积检查或者外表面检查,这取决于部件尺寸。所有的 RPV 管嘴连接异种金属焊缝都要求检验。目前的役前检查和在役检查要求包括:管道焊缝内部 1/3 体积、焊缝边缘起 6 mm 距离的邻近基体金属,以及焊缝外表面和邻近 13 mm 宽度的基体金属。ASME 规范 Section XI 要求对承压容器接管直径 ≥ 12192 mm 的异种金属焊缝每 10 年做一次体积检查,所有的接管至容器焊缝都必须在第一次大修检查做 100% 体积检查。

在法国,对 PWR 电站在役检查(ISI)程序要求在 RSEM 规范中公布,包括相关技术、性能验证程序和缺陷评价程序^[5]。与 ASME 规范实施的主要区别在于核一级管道 ISI 检验程序执行的部位和目的。比如对于异种金属焊缝的检查上,RSEM 规定对于有安全端的奥氏体合金钢的对接焊缝,要求采用两种体积检验方法(超声波检验和 X 射线照相检验)。超声波检验必须包括熔合金属边缘两侧各 30 mm 的宽度。另外,该方法还应包括检验与内壁奥氏体不锈钢堆焊层相熔接的铁素体基体金属,特别是在三种金属交接区域(基体金属/预堆边/堆焊层)。

德国 KTA 3201.4 规范详细指出了 ISI 的要求,管嘴检查不仅包括焊缝区域,还包括其他易产生高应力的材料部位。

WWER 异种金属焊缝的 ISI 检查依据所在国家立法要求,本质上基于设计文件和俄罗斯的规范标准。检查内容包括所有焊缝(包括焊接热影响区)和基体金属的目视、渗透、超声以及弯头部位测厚检查。WWER 异种金属焊缝每 4 年(运行 30 000 h)进行一次检查。对 ISI 结果的评估一般遵循设计标准,这种方法非常保守。

在役检查中的典型无损检测方法包括:超声检查、射线检查、表面检查(渗透或磁粉检查)、涡流检查、目视检查(目视、内窥镜或视频等)和特殊方法(如测温)。

取决于部件的具体情况(如厚度、直径、材料和可达性等),可能有一些特殊的检查执行时要求使用一种或多种方法的组合。如异种金属焊缝检查时可采用超声、涡流和目视等体积和表面检查方法。

对 PWR 电站,反应堆压力容器的异种金属焊缝位于容器和保温屏障之间,从焊缝外表面不易检测到。于是,这些焊缝通常采用体积型检查,从内表面采用远程检查系统进行,以代替外表面检查。

为适应业主方面日益增加的利用远程目视检查替代体积性检查的需要,远程目视检查方法和检查结果在 NUREG/CR-6860 上刊登。基于常规目视检查结果的分析,包括美国 V. C. Summer 异种金属焊缝(图 1)裂纹的图像,得出结论:尽管这些技术能检验出低于 $20\ \mu\text{m}$ 的开口裂纹,在核电站部件中还是常常可能错过非常重要的裂纹。目视检查系统的分辨率、放大率及可用扫查速度等因素目前有待深入研究^[6,14]。

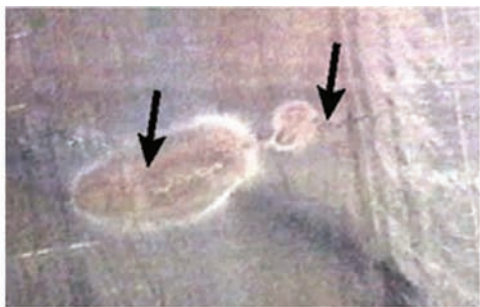


图 1 管嘴至主管道焊缝远程目视检查发现的 PWSC

2 国际上异种金属焊缝超声检查技术

压水堆核电站反应堆压力容器异种金属焊缝的超声检查技术大体上可分为水浸聚焦检查和接触式检查两大类,其中接触式检查又可分为常规探头检查和相控阵探头检查,代表上述各自的检查技术分别有法国 Areva ANP 公司、美国 Westinghouse 公司和德国 IntelligeNDT 公司。

2.1 法国 AREVA ANP 公司

针对核电站 RPV 的检查,Areva ANP 公司使用水浸聚焦检查技术。用水浸聚焦探头检测的优点是不存在盲区,能够有效提高缺陷评定的精度。而且这种探头以水作为耦合介质,探头与容器壁保持一定的距离,可以克服包括几何间隙和堆焊层的表面状态的问题。

水浸聚焦方式检查时,超声波的频率主要受奥氏体不锈钢堆焊层的影响,因为低频超声波对奥氏

体材料有较好的穿透性,所以超声波的频率一般不高于 2 MHz(实际应用中一般采用 1 MHz)。对厚壁管道检查时需要增大探头直径以获得所要求的特性,聚焦距离越大,探头的直径就要越大;且每个探头只能聚焦扫描壁厚的一个深度区域,通常需多个探头组合共同完成整个壁厚范围内的扫查。

2.2 美国 Westinghouse 公司

美国 Westinghouse 公司采用接触式双晶纵波探头对异种金属焊缝实施扫查。此探头原理图如图 2 所示,图 3 为采用该种技术实施检查时对于不同检查深度范围上探头角度的选择建议。

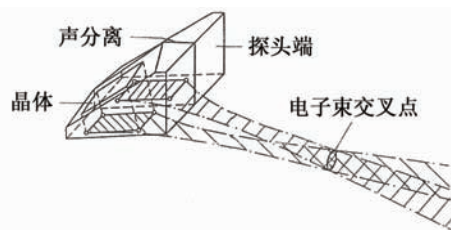


图 2 双晶纵波(TRL)探头示意图

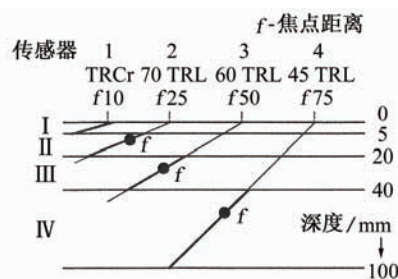


图 3 不同深度上探头角度的选择建议

在 ASME 第 XI 卷在役检查规范中,对于管径 $> 100\ \text{mm}$ 的异种金属焊缝的检查范围是:管道焊缝内部 $1/3$ 体积、焊缝边缘起 $6\ \text{mm}$ 距离的邻近基体金属,以及焊缝外表面和邻近 $13\ \text{mm}$ 宽度的基体金属。

2.3 德国 IntelligeNDT 公司

德国 IntelligeNDT 公司是国际在役检查领域较早使用相控阵检查技术针对 RPV 实施检查的单位。相控阵技术不同于常规方法把超声波发射到工件中,而是有限的控制超声能量的聚焦和角度偏转。相控阵能做实现如下扫查:① 线形、扇形和横向扫查。② 动态深度聚焦。③ 线形和扇形 TOFD(图 4)。

超声相控阵技术是一种先进的超声检测技术,它的显著优点和作用将在航空、核能、机械、电力、石化和铁道等领域充分发挥出来,创造巨大的社会效益和经济效益。与传统超声检测技术相比,超声相控阵技术的优点是:① 采用电子方法控制声束聚焦

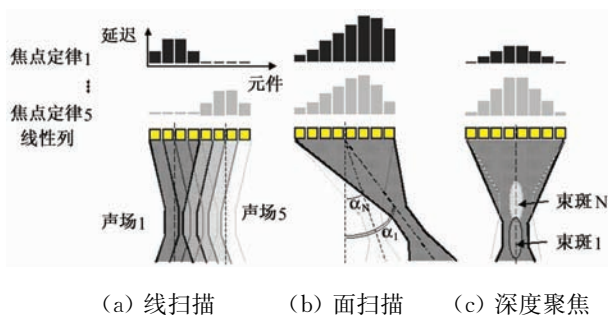


图4 相控阵扫描方式

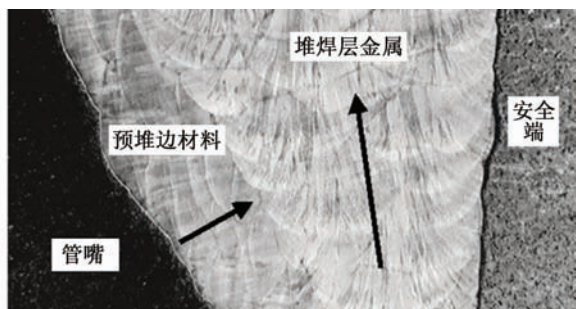
和扫描,可以在不移动或少移动探头的情况下进行快捷的扫描,提高检测速度。② 具有良好的声束可达性,能对复杂几何形状的工件进行探查。③ 通过优化控制焦点尺寸、焦区深度和声束方向,可使检测分辨率、信噪比和灵敏度等性能得到提高。

在许多超声检测场合,由于被检对象的几何形状复杂,使得传统的单探头超声检测非常困难,因为无法控制声束方向,需要不断更换探头位置从各个方向扫描,而这又往往受到限制,无法实现。相控阵超声技术的突出优点是可灵活控制声束在空间各方向、各区域扫描,在不移动或少移动探头的情况下就可以方便地实现对复杂形状工件的扫描检测^[8]。

3 检查局限性

由于其晶粒度的变化、柱状晶微观结构以及几何状况如焊缝形状、组织结构,异种金属焊缝的无损检测十分困难。现场检查时通常只有一侧检验是可达的。图5显示的是一个包含不同金属材料的管嘴-安全端焊缝^[14]。除了对焊缝中每一种材料的单独检查存在问题外,还有由于材料声学特性的不同,不同材料的结合使超声检查变得更加复杂。超声声束的横向变化能显著降低检验的可靠性,超声声束在一种不可预知的情况下产生声束衰减、方向改变,这干扰了裂纹的检出能力以及其特征。

从采取在役检查(ISI)进行监督角度来说,对

图5 管嘴至安全端异种金属焊缝宏观组织结构
(箭头指示方向为焊接路径)

RPV管嘴从容器内部和外部检验的可达性是非常重要的。比如在PWR机组情况下,可以利用远程控制装置从容器的内部检验管嘴。由外部检验取决于混凝土生物屏障的特殊构造、RPV支持结构以及其他部件等因素。然而,对PWR堆型和WVER-440堆型而言,RPV异种金属焊缝位于容器和混凝土生物屏障之间,从外表面对异种金属焊缝进行表面和体积检查是难于实现的。

PWSCC裂纹检查和尺寸测量对于异种金属焊缝的超声检查而言是一个重要的挑战。沸水堆电站管道中发现的晶间应力腐蚀裂纹(IGSCC)问题表明,横波技术对检测异种金属焊缝中的裂纹并不可靠。因此NRC发布Notice No 90-30——异种金属焊缝超声检查方法。在该公告中,强烈推荐使用折射纵波对异种钢焊缝进行检查。PWR电站的异种钢焊缝有类似的冶金学特性,如各向异性晶粒结构和性能,但是这对于IGSCC检查方法并不通用。

4 检查可靠性

在PWR和BWR电站,很多问题随着对异种金属焊缝的检查显现出来,无损检测漏检的缺陷在接下来的运行期间容易发展为泄漏^[8]。缺陷的破坏性检查取样提供了很多有价值的信息诸如缺陷类型、形状、路径或大小等。用超声检查方法和用破坏性检查方法对裂纹的位置和大小判定的比较,可用于对在役检查可靠性的评价。缺陷破坏性检查的结果表明超声检查异种金属焊缝的方法需要改进。美国对Alloy 600和182异种金属焊缝的无损检测评价认为,如果位置可达、表面状况足够好缺陷的检查和大小是可靠的。对瑞典Ringhals核电站4号机组异种金属焊缝检查出的缺陷显示,最终评价时判定为三处近表面平面缺陷和一处表面平面缺陷。所有四处缺陷舟形取样后消除。破坏性检查表明,其中两条裂纹并不大,且所有裂纹都是表面开裂。金相检查也表明一些裂纹存在显著的分支结构,尖端和中间部分非常紧致和内表面相连。2003年在Belgium NPP Tihange 2反应堆压力容器两条一回路Inconel合金安全端焊缝涡流检查发现的低幅值显示并未使用超声检查进行确认。

多年来,为测量或评估无损检测的性能,国际间进行了一系列联合对比试验(Round Robin Trials, RRT)研究,如钢结构件检查程序(PISC)以及类似的国际实践。国际无损检测机构关注最多的问题就

是异种金属焊缝的检查。PISC III Action 3 已经证实了检验的困难。PISC III 检验能力程序包括检验性能测试的一系列联合对比试验,其中包括代表性的就是不锈钢管道和普通碳钢管嘴对接安全端焊缝的试块检查试验。1991 年 3 月 Action No 3(管嘴及异种钢焊缝)完成了 4 个安全端的 RRT 实验,该试验描述了在役检查中一些最难的技术现状。在这次试验中,日本-意大利 BWR 组合的管嘴安全端焊缝试块、美国 BWR 组合的 2 个管嘴-安全端焊缝试块以及一个西班牙安全端试块在 13 个国家开展检验,其中的第 25 号试块模拟了一个压水堆的异种金属焊缝,允许从外表面和内表面进行检查,包括从外表面检查的接触式探头和内表面检查的水浸聚焦探头。水浸聚焦探头检查的良好性能在该试验中得以体现。同时,也进行了高质量的射线检查,检查发现超声难以发现的缺陷用射线方法同样难以发现。PISC III 的该项 RRT 试验对安全端的检查结论归纳如下^[9]:

(1) 这些对安全端试块检查缺陷和的缺陷测长的工作有点令人沮丧,并未达到真正性能展示工作所要求的有效性水平。但是,有一些程序还是展现了有效性所要求的水平。

(2) 对焊缝和预堆边材料中缺陷的检查和评价目前还存在困难。

(3) 熔合区附近(焊缝、预堆边)的缺陷,在工业条件下,利用高灵敏度、低记录水平的机械化检查能达到非常高效的结果。在某种情况下,高灵敏度手动检查同样能得到好的结果,且较低的缺陷误报率。

(4) 对 $<5\%$ 厚度范围的缺陷检查不好确定。

(5) 要得到有效的结果,记录必须在较低水平(接近噪声水平)。

采用水浸技术从内表面进行检查表现了高的能力,这一点在 PISC III 项目的异种金属焊缝检测工作中做了简要的论述^[10]。如上所述,PISC 研究还指出了记录水平的重要性。采用 50% 距离波幅曲线技术(DAC)的记录水平结果很差,然而,采用 $10\sim 25\%$ 记录水平的程序和采用噪声水平记录标准结果表现良好。PISC III 研究同样认为, $<2\text{ mm}$ 的缺陷显示目前的技术水平还无法检出。

上述的这些经验,强调了开发和实施基于性能展示的资格认证方法的需要,用来对无损检测系统的有效性进行评价。这些要求现在已经被许多国家采用,有的以规范的形式、导则的形式,或者作为个

别电站的执照许可条件等。一些国家仍需要过渡周期,但在不久的将来,这些要求将完全发挥效力。

5 检查资格认证

ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 中的“Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems”章节,对进行超声检测性能展示的、用来检测和定量缺陷的人员、程序、设备等提出了详细的要求。附录 VIII 目前包括了对管道焊缝、容器焊缝、容器基体金属-堆焊层界面、容器管嘴焊缝和内半径浇灌面、螺栓螺母、异种钢焊缝等采用管道外表面检查方法。为了面对 Appendix VIII 规定的要求带来的挑战,美国成立了“主动能力验证”(PDI)委员会,来建立一个统一的体系以满足这些新的要求。对美国 PWR 异种金属焊缝的检验活动得到的评价结论认为,为证实检验技术能力需要准备带 PWSCC 缺陷的模拟体。

法国 RSEM 规范中也采用了相类似的方法,采用三种类型的能力示范和资格认证,即一个常规的、一个普通的和一个特殊的(对于聚焦检查的情况)。当缺陷在部件中已检查出,采用特殊的资格认证方法;当缺陷判断可能有但还未检查出时,采用普通的资格认证方法。

2004 年,Framatome ANP 完成了 PWR 管嘴安全端异种钢焊缝由容器内部表面自动超声检查的资格认证,称为 Supplement 14。Supplement 14 是 Supplement 2(碳钢管道)和 Supplement 10(异种金属焊缝)的结合。对超声检查技术的参数做了一些修正,包括程序改版和超声探头的参数变化等。这些修改使得缺陷的检出能力和测长能力得到提高。Framatome ANP 通过的 Supplement 14 的认证中,对缺陷检查和长度测量的超声检查程序没有附带任何限制。此外,缺陷的高度测量能力可选择接受标准为管道平均厚度的均方根的 10% (RMSP)。尽管 Appendix VIII Supplement 14 缺陷尺寸为 3.175 mm 的 RMS 标准还未能满足,缺陷测长为 10% RMSP 以内被认为是可以接受的选择。基于资格认证活动中的经验教训,可以得出以下结论^[14]:

(1) Supplement 14 认证中认同了现有的检查程序和技术的局限性。通过对这些局限性以及重要资源应用的详细评价,认证工作顺利完成。

(2) 检测对轴向取向的缺陷有限制,缺陷的检出在特定的管道和焊接几何形状下非常清楚,但当

在一个比较粗糙的表面(如现场焊缝)进行扫查时,缺陷检查结果不重现。

(3) 检测的难点和焊接结构、冶炼方法、缺陷形态、部件几何形状、声束在复杂几何形状中的传播等的变化有关,包括各向异性、各向同性材料。

为了在欧洲范围建立一套无损检测资格认证程序的通用原则,欧洲国家的机构联合到一起成立了欧洲检查认证网络(ENIQ)^[11]。ENIQ 制定了资格认证的方法。在欧盟层面上,核能管理机构工作组创建了一个特殊部门,目的是建立一个 NDT 资格认证方面公共管理机构的共识^[12]。在 ENIQ 框架下,检查资格认证定义为“利用所有必要提供可靠确认的方法,以及一套用于系统评估的检查系统,以保证能在真实检查条件下达到需要的性能”。ENIQ 资格认证方法在欧洲很多国家得到广泛的采用,IAEA 文件“WWER 核电站在役检查系统认证方法”即是采用了和 ENIQ 相似的方法^[13]。

6 结语

(1) RSEM 规范和 ASME 规范对异种金属焊缝的检查要求存在区别。

(2) 奥氏体粗晶材料的存在以及焊缝几何结构的复杂性使得异种金属焊缝的检查非常具有挑战性。

(3) 异种金属焊缝的检查技术不统一,国际检查单位所使用的技术各有侧重。

(4) 异种金属焊缝检查的可靠性有待提高,对焊缝和预堆边材料中缺陷的准确检查和可靠评价目前还存在困难。

(5) 国际上已经开展了对异种金属焊缝的检查资格认证活动,我国目前尚未实施。

参考文献:

[1] Pherigo G L, Pherigo A L. Manufacturing Qualification Specimens for Dissimilar Metal Weldments[C]// 2nd International Conference on NDE in Relation to

(上接第 861 页)

of nondestructive evaluation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1999, 18(2): 39—57.

[3] 李锦,林玉书. 平面相控阵的尺寸对声波聚焦效果的影响[J]. 应用声学, 2004, 23(3): 23—28.

[4] 李衍,李明东. 超声波阵列探头的结构和特性[J]. 无损探伤, 2005, 29(6): 1—5.

[5] Hyun Lee Joon, Woo Choi Sang. A parametric study

Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans: [s. n.], 2000.

[2] IAEA. Assessment and Management of Ageing of Major NPP Components Important to Safety: Primary Piping in PWRs[R]. Vienna: IAEA-TECDOC-1361, 2003.

[3] ASME Boiler and Pressure vessel Code, Section II - Material Specifications, Part A-Ferrous Materials[S].

[4] ASME Boiler and Pressure vessel Code, Section XI, Rules for ISI of NPP Components[S].

[5] RSE-M Code Surveillance and ISI rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S].

[6] NUREG/CR-6860 An Assessment of Visual Testing[S].

[7] Casula O. A flexible phased array transducer for contact examination of component with complex geometry [C]// 16th WCNDT. Canada: [s. n.], 2004.

[8] IAEA TECDOC 1400, Improvement of ISI in Nuclear Power Plants[S].

[9] Non-Destructive Examination Practice and Results, State of Art and PISC III Results, Proceedings of the Joint CEC OECD IAEA Specialists Meeting held at Petten on 8—10 March 1994, EUR 15906 EN, NEA/CSNI/R(94)23.

[10] Dombert P. Main Results of PISC III Action 3: Nozzles and Dissimilar Welds, Determining Material Characterization: Residual Stress and Integrity with NDE[C]// Pressure Vessel and Piping Conference, [s. l.]: [s. n.], 1994.

[11] EUR 17299 EN European methodology for qualification, Second issue[S].

[12] EUR 16802 EN Common Position of European Regulators on Qualification of NDT Systems for Pre and ISI of Light Water Reactor Components[S].

[13] IAEA-EBP-WWER-11 Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER Nuclear Power Plants, March[S].

[14] EUR 22469 EN General review of dissimilar metal welds in piping systems of pressurized water reactors including WWER designs[S].

of ultrasonic beam profiles for a linear phased array transducer[J]. IEEE Transactions On Ultrasonic, Ferroelectrics And Frequency Control, 2000, 47(3): 644—650.

[6] Azar L, Shi Y, Wooh S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays[J]. NDT&E International, 2000 (33): 189—198.

[7] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1993.