

DOI: 10.11973/wsjc201805003

核电厂超声检测技术的应用

蔡家藩, 聂 勇, 周礼峰, 葛 亮

(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430223)

摘要: 阐述了超声检测技术在核电厂核设备检测中的应用, 主要包括反应堆压力容器筒体焊缝及接管焊缝、反应堆压力容器主螺栓、燃料组件、控制棒束组件、蒸汽发生器筒体焊缝及接管焊缝、稳压器筒体焊缝、蒸汽发生器/稳压器人孔螺栓、主泵焊缝、主管道焊缝、核辅助管道焊缝和汽轮机叶片等的超声检测; 说明了缺陷自身高度测量以及超声检测技术的能力验证方法。

关键词: 核电厂; 超声检测; 自动检测; 相控阵; 焊缝

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)05-0010-07

Application of Ultrasonic Testing Technology in Nuclear Power Plant

CAI Jiafan, NIE Yong, ZHOU Lifeng, GE Liang

(China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: The application of ultrasonic testing technology in the nuclear equipment testing of nuclear power plants is expounded. The main applications of the ultrasonic testing equipment include nuclear reactor seam welds and takeover welds, reactor pressure vessel main bolts, fuel assemblies, control rod assemblies, steam generator barrel welding and take over welds, pressure vessel barrel welds, steam generator/stabilizer manhole bolts, main pump welds, main pipe welds, nuclear auxiliary pipe welds and steam turbine blades. The defect height measurement and ability verification method of ultrasonic inspection technology is also described.

Key words: nuclear power plant; ultrasonic testing; automatic testing; phased array; weld

核电厂役前检查是设备安装后、运行前实施的检查, 检查结果主要作为后续检查的参考点; 在役检查是核电厂运行期间, 定期对设备进行的检查, 以判断设备中是否存在缺陷, 或者缺陷是否可以接受。核电厂役前检查和在役检查期间, 超声检测技术的应用相当广泛。核电厂超声检测的主要应用有反应堆压力容器筒体焊缝及接管焊缝、反应堆压力容器主螺栓、燃料组件、控制棒束组件、蒸汽发生器筒体焊缝及接管焊缝、稳压器筒体焊缝、蒸汽发生器/稳压器人孔螺栓、主泵焊缝、主管道焊缝、核辅助管道焊缝和汽轮机叶片叶根等。

收稿日期: 2018-02-11

作者简介: 蔡家藩(1973—), 男, 高级工程师(研究员级), 主要从事核设备无损检测技术及检查装备开发, 核设备无损检测工程技术服工作

通信作者: 蔡家藩, caijf@cnpo.com

1 超声检测主要特点及应用

1.1 核电厂超声检测的主要特点

核电厂设备或部件的超声检测一般采用手动超声检测技术和自动超声检测技术, 手动超声检测技术又分为常规手动超声以及相控阵手动超声检测技术。

核电厂最厚的被检焊缝约为 300 mm, 最薄部件的壁厚约为 0.5 mm, 被检对象的材料主要有碳钢、低合金钢、锻件不锈钢和离心铸造不锈钢等。超声检测技术需要根据具体的被检测对象进行检测方案的设计, 综合考虑的因素包括: 核电厂在役检查规范和核电厂在役检查大纲的检验要求; 被检部件的可能缺陷产生形式、损伤机理和缺陷类型; 被检部件的规格、结构及材料特征; 被检部件所处环境、可达性限制。

1.2 厚壁容器焊缝的自动超声检测

核岛一回路主设备反应堆压力容器、稳压器、蒸汽发生器部件均采用锻件焊接制造, 其筒体材料为

锻造低合金钢,焊缝厚度一般可达到100~300 mm,考虑到耐腐蚀性能等特殊要求,在内壁堆焊6~8 mm的不锈钢堆焊层,这类焊缝统称为厚壁容器焊缝。反应堆压力容器厚壁焊缝一般采用从内壁接近的方式进行自动超声检测;其他主设备焊缝一般采用外壁接近方式进行自动或手动超声检测。

1.2.1 反应堆压力容器筒体及接管焊缝的超声检测

受可达性和辐射环境的影响,超声探头只能从反应堆压力容器筒体和接管内壁接近,通过专用的自动检查装置实施自动检查。典型反应堆压力容器上筒体结构和接管焊缝位置示意如图1所示,典型反应堆压力容器检查机械系统外观如图2所示。

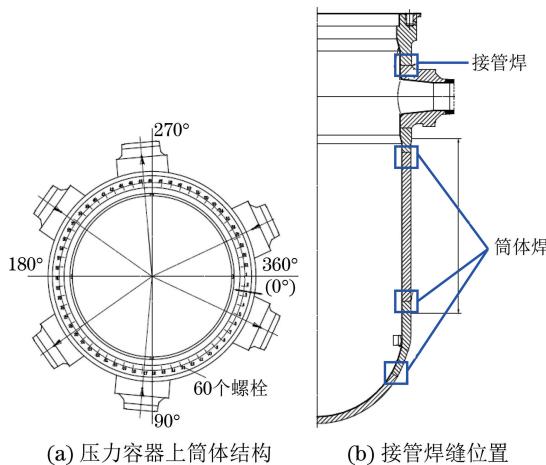


图1 典型反应堆压力容器上筒体结构和接管焊缝位置示意

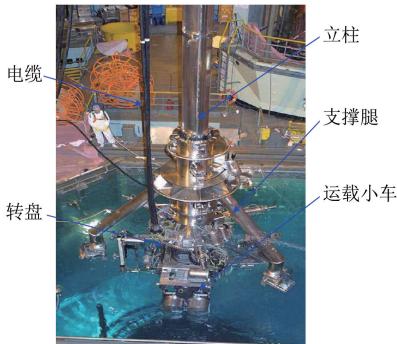


图2 典型反应堆压力容器检查机械系统外观

对于反应堆压力容器筒体的超声检测,需要从筒体内表面焊缝实施轴向和周向扫查。一般使用角度分别为 $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$,频率为2 MHz的探头进行检测,在发现缺陷后则使用 $45^\circ, 4$ MHz的纵波探头对缺陷进行定量(即缺陷高度和长度测量)检测。同时,由于焊缝内表面存在不锈钢堆焊层,因此在确定检查技术和进行缺陷信号分析的过程中,需要特别注意堆焊层对超声检测带来的不利影响。堆

焊层对超声检测的不利影响主要表现为:不锈钢堆焊层为粗大的柱状晶粒,超声波衰减较大,会造成检验灵敏度下降;超声波在堆焊层内部和结合面上会发生声束偏转,造成缺陷定位偏差;由于堆焊层的影响,容易形成伪缺陷显示^[1]。消除和减弱上述影响因素的措施如下所述。

(1) 采用堆焊工艺和表面状况与被检工件相似的对比试块,以克服不锈钢堆焊层对检测灵敏度的影响。

(2) 采用合理的探头角度,通常使用 45° 探头对缺陷进行准确定位和定量检测。

(3) 采用多种探头及观察被检工件表面状况等方法,来判别由堆焊层引起的伪缺陷信号。

对于反应堆压力容器接管焊缝的超声检测,一般在接管内部进行轴向扫查,在筒体侧实施径向和切向扫查。对于接管侧扫查一般使用 $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ 的纵波探头,典型反应堆压力容器接管焊缝接管侧扫查示意如图3所示。由于接管焊缝结构为马鞍面,因此在检验时需注意对显示信号的位置进行修正。

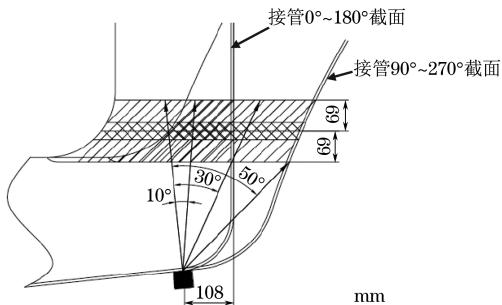


图3 典型反应堆压力容器接管焊缝接管侧扫查示意

1.2.2 蒸汽发生器及稳压器筒体焊缝自动超声检测

对于蒸汽发生器及稳压器筒体焊缝的超声检测,需从筒体外表面对焊缝采用手动或自动方式实施轴向和周向扫查(见图4)。对于这些焊缝的检验,一般使用 $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 探头,其中 70° 或小晶片的 60° 探头用于检测近表面区域。实际检测时,在上述设备的焊缝周边存在部分结构性遮挡物,而



图4 蒸汽发生器筒体焊缝自动扫查现场

导致部分区域检测不可达,如接管支座、保温支承和变径区等,为了减少不可达区域,可以适当改变探头角度。

1.3 奥氏体不锈钢管道焊缝自动超声检测

奥氏体不锈钢广泛应用于核电厂,如一回路主

管道、核辅助管道均采用奥氏体不锈钢。奥氏体不锈钢管道焊缝为粗晶材料,其超声波检验一般从频率、波型、聚焦、频带宽度和晶片收发等方面进行参数优选,以达到最优的检验效果。不锈钢管道超声检测探头参数选择原则见表1。

表1 不锈钢管道超声检测探头参数选择原则

探头参数	奥氏体不锈钢管道焊缝壁厚(检测深度)			
	$t \leq 10 \text{ mm}$	$10 \text{ mm} < t \leq 30 \text{ mm}$	$30 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$	$t > 50 \text{ mm}$
波型	横波/双晶纵波	横波/双晶纵波	双晶纵波	双晶纵波
探头频率/MHz	4~10	2~4	1.5~2	0.75~2
单个晶片尺寸/mm ²	40~150	150~400	300~600	500~1 000
角度/(°)	60~70	45~70	45~60	35~60
焦距(深度)/mm	≈ 10	≈ 20	≈ 40	$\approx t$

探头参数的具体选择还需考虑受检部件的结构、焊缝形式、材料衰减特性等因素。探头所搭配的楔块弧面尺寸应能确保扫查时有效贴合。为了提高探头的纵向分辨率和信噪比,对于奥氏体不锈钢焊缝的检测应选用宽频窄脉冲探头。

在现场条件许可的情况下,采用自动超声检测技术对不锈钢管道进行焊缝超声检测具有较好的检验效果,借助自动超声成像技术可以减小较高的背景噪声及散射信号所带来的干扰,从而提高检验结果的可靠性。图5为不锈钢管道焊缝超声检测现场。



图5 不锈钢管道焊缝超声检测现场

1.4 超薄壁管材的超声检测

超薄壁管材被广泛应用于核电堆芯及换热器等部件中。超薄壁管材的直径范围一般为6~20 mm,壁厚最小可达0.45 mm,如燃料棒包壳管、控制棒包壳管和蒸汽发生器传热管等。

1.4.1 超薄壁管材的出厂检测

对于超薄壁管材的出厂检测,主要采用超声检测方法。其不仅用于检测管材缺陷,同时还用于高精度测量管材外形尺寸和壁厚。要求的最小缺陷检测灵敏度,以及外形、壁厚测量精度通常需要达到微米级。

采用周向和轴向偏转的方式对管材进行水浸聚

焦超声波检测。为了获得最佳的检测灵敏度,要求超声波入射到管材内的折射角为45°左右(见图6)。

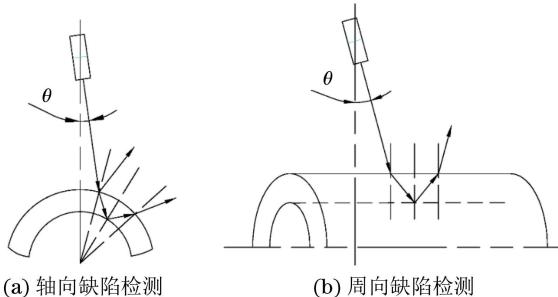


图6 管材缺陷的检测示意

超薄壁管材的壁厚 t 较小,可采用共振法进行壁厚测量。利用宽带高频探头在管壁内部形成共振波,分析共振波频率 f 和超声波传播速度 v ,则可计算出被检管材的壁厚。

采用双直探头测量时,探头声束会偏离被检管材中心,声束轴线会偏离旋转中心;水中温度的变化会导致声速不稳定以及两探头的中心距偏移;甚至超声波采集系统的数模转换等因素会导致外径测量的偏差远大于误差要求,因此可以采用离散信号独立周期分析方法来降低由机械运动导致的偏差。在标定过程中,对不同周期信号进行置信区间统计,可以使超声采集系统数模转换时产生的误差影响降低至可接受范围。

采用自动化的检测设备才能保证对超薄壁管材高测量精度的要求。针对超薄壁管材的超声检测,国内外现有的检测系统均采用高速旋转头承载着若干个不同功能的点聚焦/线聚焦探头,在直流电机的驱动下高速旋转,配合被检管材的轴向匀速行进,来实现小管径管材的全体积超声波检验。为了保障检测

效率,高速旋转头的转速至少应达到 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。超薄壁管材出厂检测系统外观如图7所示。



图7 超薄壁管材出厂检测系统外观

1.4.2 反应堆控制棒束组件的超声检测应用

核电站反应堆控制棒束组件(Rod Cluster Control Assembly,以下简称RCCA)也是一种薄壁管,在服役一定的时间后,控制棒包壳上可能形成肿胀、磨损及裂纹等几种典型缺陷。

在现场实际应用过程中,肿胀缺陷一般处于控制棒组件的尖部区域,缺陷轴向长度范围为30~80 mm,多发生在服役时间较长的黑棒上,灰棒上未检测出此类缺陷;磨损缺陷一般处于控制棒的板状区域,形貌特征有边缘磨损、月牙状磨损及盔状磨损;裂纹缺陷一般处于控制棒组件的尖部区域,沿轴向方向伸展,轴向长度范围为30~80 mm,发生在服役时间较长的黑棒上,灰棒上未检测出此类缺陷。RCCA典型缺陷的超声信号如图8所示。

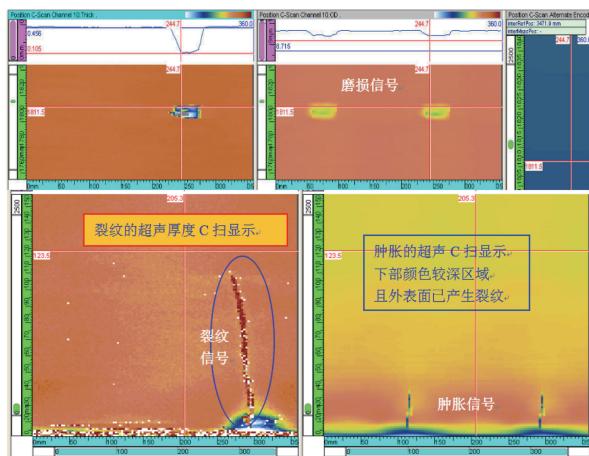


图8 RCCA典型缺陷的超声信号

1.5 相控阵超声检测技术

基于相控阵超声检测技术的多种优势,相控阵超声检测技术已经逐渐用于核电厂的役前及在役检查中,如奥氏体不锈钢管道的环焊缝检测、核电枞树型汽轮机叶片根部检测、接管内圆角区检测等。

1.5.1 奥氏体不锈钢焊缝的相控阵超声检测

核电厂奥氏体不锈钢管道内径范围为101.6~787.4 mm,壁厚范围为10~90 mm。根据ASME XI卷《核电厂部件在役检查规则》的相关规定,焊缝的检验区域为焊缝内壁1/3壁厚范围以及焊缝边沿两侧各6.4 mm的热影响区。

奥氏体不锈钢管道焊缝的相控阵超声检测一般采用二维双晶面阵纵波探头。扇扫显示界面中能直观显示平面缺陷的特征,并可观察出缺陷端点信号在不同声束角度区间的动态变化规律,能精确测量缺陷的高度和长度。

在检测时,当缺陷信号呈现端点信号特征时,即可判定为平面缺陷(如裂纹)。平面缺陷的显示特征如图9所示,该显示在扇扫界面中有明显的上、下端点衍射信号。对于有外表面开口倾向的显示,可使用爬波探头进行辅助判断。该显示深度在10 mm内,且爬波探头90°时还有向上延伸的趋势,可判断为外表面开口型缺陷(见图10)。对于没有明显端点信号的缺陷,必要时可以利用多角度探头辅助判断其缺陷性质。

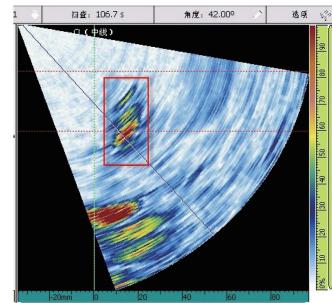


图9 平面缺陷的显示特征

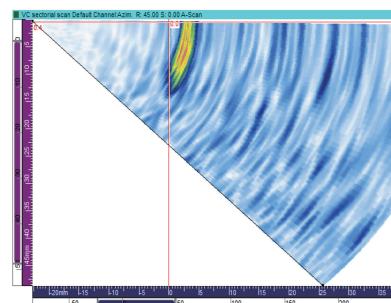


图10 外表面开口缺陷爬波特征

对于深度较深的缺陷,应优先选择在小角度区域进行定量检测;对于深度较浅($\leq 15\text{ mm}$)的缺陷,则应优先选择在大角度区域进行定量检测。

针对不同深度的缺陷,其端点信号应优先使用表2中相应的角度范围进行缺陷高度测量。从试验效果来看,在缺陷检测及定量上,相控阵超声检测技

术比常规超声检测技术具有明显优势。

表 2 缺陷高度测量对应的声束角度区间

缺陷端点深度/mm	缺陷高度测量的探头角度/(°)
0~15	50~70
15~40	40~50
>40	30~40

1.5.2 枫树型汽轮机叶片根部超声相控阵检测技术

在汽轮机运行过程中,叶片根部受到的应力主要有离心拉应力、蒸汽弯应力和偏心弯应力。通过计算机模拟进行叶片的应力分析,结果如图 11 所示。由图 11 可知:根部第一齿(靠近叶片)处应力最大,第四齿(远离叶片)处应力最小;第一齿两端(进气侧和出气侧)的应力最大。因此,汽轮机转动过程中,第一齿处最易产生缺陷,尤其在进气侧和出气侧的位置。为了最大限度地保证叶片的安全运行,需对叶片第一齿实现全覆盖检测,进气侧与出气侧是重点关注区域。

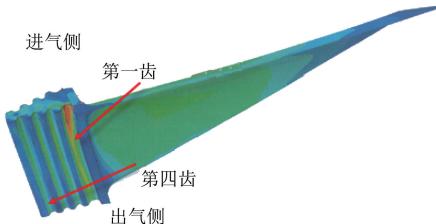


图 11 汽轮机叶片的应力分析

由于叶片为复杂的空间曲面结构,为了保证探头与检测面的耦合,需要将探头设计得足够小。对于横波探头,为了获得高的纵/横波转换效率(透射系数 $\alpha = T/L$, T 为横波振幅, L 为纵波振幅),需要为其设计合适的斜楔块(倾角约 36°)。由于相邻叶片之间的空隙狭窄,不同的扫查区域还需考虑探头的放置空间。

国内某核电厂汽轮机转子的若干叶片根部存在缺陷,对叶片的进气口肩台上第一齿内弧侧采用横波进行检测,缺陷信号如图 12 所示,并将其与完好的同级叶片进行比较,可发现明显的显示信号。借助三维结构模型分析可知,该缺陷处于进气口第一齿(距离肩台检测面 28 mm,距离进气端面约 5 mm)上。

为了进一步确认检测结果的准确性,将该叶片从转子上拆下,通过打磨处理后进行渗透检测,得到明显的裂纹显示(见图 13)。裂纹深约 3 mm,并在齿根方向延伸。

1.6 反应堆压力容器顶盖贯穿件超声检测技术

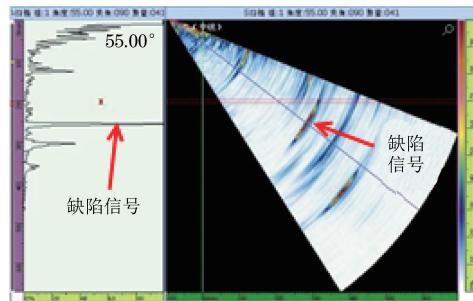


图 12 叶片缺陷检测结果



图 13 打磨处理后的裂纹显示

应用

反应堆压力容器顶盖为半球形结构,内表面堆有不锈钢堆焊层。顶盖上方布置两种类型的贯穿件,分别为控制棒驱动机构(CRDM)贯穿件和排气管贯穿件。贯穿件材料通常为 Inconel-600 合金、Inconel-690 合金等。根据检验规范的要求,超声检测区域为 CRDM 贯穿件本体,以及与贯穿件本体相连的 J 型焊缝熔合面。

反应堆压力容器顶盖贯穿件的狭窄空间布局、焊缝的曲面结构以及其所处的高放射性环境,决定了顶盖贯穿件在役检查的技术难度较大。对其的检测,一方面应实现自动化检测,并保障从顶盖内部接近的可达性和选择探头贴合效果良好的检查装置;另一方面则必须选择满足缺陷定量检测要求的检测技术。

针对贯穿件本体,一般采用超声衍射时差法(TOFD),该技术逐步替代传统的横波检测技术,广泛应用于顶盖贯穿件的在役检查中。其主要优点为:① 对平面型显示敏感;② 基于尖端衍射波的缺陷测高方法具有较高的定量精度,定量精度一般可达到 ± 2 mm。贯穿件本体 TOFD 典型信号如图 14 所示。

顶盖自动化检查装置根据功能进行分类,可分为定位平台和扫查器两个模块。定位平台用于运载扫查器到不同的贯穿件位置。目前主要有两种类型的定位平台,即基于多轴联动的机械手和全向运动小车。扫查器用于携带检测探头并执行对检测区域

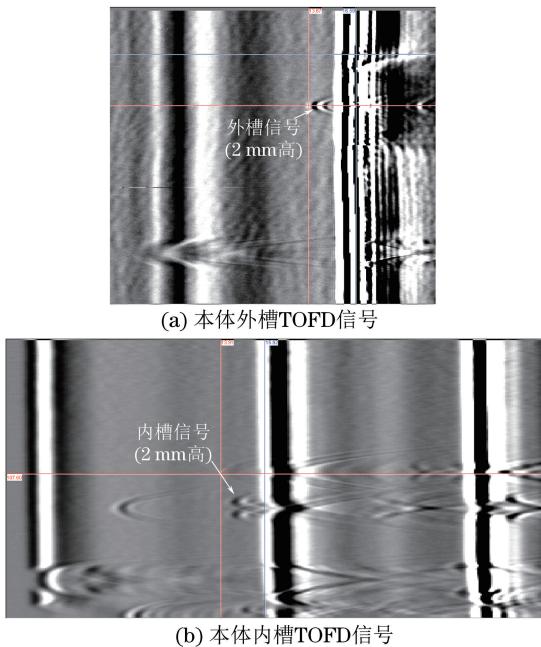


图 14 贯穿件本体 TOFD 典型信号

的自动扫查。针对不同类型贯穿件的扫查,通常需设计满足其结构尺寸特征的扫查器。

1.7 反应堆压力容器主螺栓超声检测技术的应用

反应堆压力容器主螺栓在服役过程中,要求对螺栓实施定期全体积超声检测,并重点检查螺纹根部区域。为了提高检测可达性及检测能力,国内主要核电厂一般采用自动超声检测法,从螺栓中心孔内部对其实施检查。

一般使用水浸或接触式 45° 横波探头,探头声束方向为轴向,机械装置驱动探头在螺栓中心孔内旋转,并在轴向方向上连续运动,以螺旋式的扫查方式对螺栓进行超声检测。反应堆压力容器主螺栓超声检测系统示意如图 15 所示。



图 15 反应堆压力容器主螺栓超声检测系统示意

1.8 缺陷自身高度测量技术

核电厂役前/在役检查期间,为了满足缺陷评定分析的要求,通常要求测量缺陷的位置、自身高度、长度等信息。基于缺陷的评定分析,要求用超声检测方法对缺陷进行定量检测,并给出缺陷沿壁厚方

向的自身高度。

从目前国内外的实践来看,尖端衍射信号测量法是目前设备和管道焊缝比较通用而有效的一种缺陷自身高度的测量方法。尖端衍射测量法是根据惠更斯原理,超声波入射到缺陷(如裂纹)时,在裂纹上下尖端会形成次波源而产生衍射(称为衍射波)来实现检测的;端点衍射波测量法是通过测量裂纹端点衍射回波的传播时间差来求得裂纹自身高度的。尖端衍射信号测量法示意如图 16 所示。

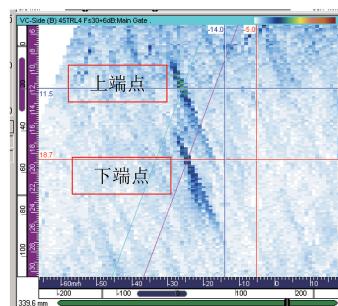


图 16 尖端衍射信号测量法示意(B 扫)

目前的研究结果表明,只要缺陷形状和取向适当,探头选择合适,缺陷自身高度测量精度就较高。为了提高对较小缺陷自身高度的测量精度,在信噪比满足要求的条件下,尽量选用较高频率的探头,如采用纵波频率为 4 MHz 的探头,并选用宽带窄脉冲,对主设备和核级管道焊缝而言,由于探头参数本身的限制,通常仅能够较准确地测量不小于 3 mm 的缺陷自身高度。

对于反应堆压力容器检查的堆焊层下缺陷的自身高度测量技术,采用 70° 纵波双晶斜探头检测,再用 45° 纵波双晶斜探头进行高度核实。如果探头的信噪比足够,对于自身高度小于 3 mm 的较小缺陷,虽然不能进行自身高度测量,但是对这类缺陷仍然具有较好的检出率。对于非常薄的部件,如果采用较高频率的探头,也可以对较小自身高度的缺陷进行测量。

对某类型反应堆压力容器接管焊缝检测时,使用了 4 MHz 单晶斜探头对某缺陷进行测量,缺陷高度为 5 mm(见图 17);对某类型反应堆压力容器接管安全端异种金属焊缝检测时,使用了 4 MHz 双晶斜探头对某缺陷进行测量,缺陷高度为 35 mm(见图 18)。

1.9 超声检测技术的能力验证

在核安全设备在役检查规范中,已经明确提出了需要对部分检验对象的无损检测技术进行能力验证。无损检测技术能力验证也称为无损检测技术鉴定,是针对某项无损检测技术采用合适的论证和考

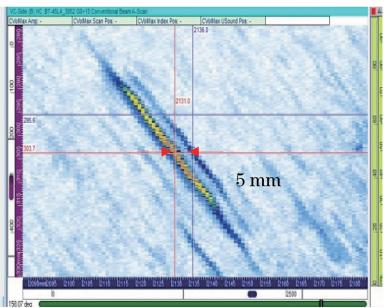


图 17 反应堆压力容器接管焊缝平面型缺陷高度测量(B 扫)

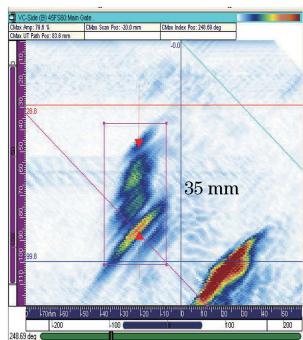


图 18 反应堆压力容器接管安全端焊缝平面型缺陷高度测量(B 扫)

核方法,证明其检验规程、操作人员和检验设备组成的检验系统,符合相关检验技术要求,并能够达到满意的检验结果。

通常无损检测技术能力验证包括两部分内容,即技术论证和实践测试考核。技术论证是指对某项无损检测技术的应用经验、试验研究成果以及理论分析结果等多方面进行的评价。实践测试考核(明测或盲测)是指在具有代表性的测试试块上进行的测试考核,测试试块必须能够代表相应被检工件的特点。明测是在操作人员知道测试试件的部分缺陷信息的情况下所进行的测试考核,此项测试主要考核检测规程和检测设备的合理性和有效性;而盲测是在操作人员不知道测试试块的任何缺陷信息的情况下而进行的测试考核,主要是考核操作人员的操作技能。

(上接第 5 页)

- [3] 唐莺,潘孟春,罗飞路,等.管道腐蚀检测中的脉冲漏磁检测技术[J].计算机测量与控制,2010,18(1):38-39,43.
- [4] 熊龙辉,王平,齐婧,等.高速漏磁检测中钢轨磁化强度的研究[J].无损检测,2013,35(11):2-6,10.
- [5] JOHN W W, TIAN G Y. Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterization[J]. NDT&E International,2007,40(4):275-283.
- [6] SOPHIAN A, TIAN G Y, ZAIRI S. Pulsed magnetic

在美国,无损检测技术能力验证主要采用盲测试件进行实践测试考核评价,即对检测规程、检测设备和操作人员组成的系统一起进行盲测考核。而在欧洲和其他部分国家,通常采用实践测试考核和技术论证相结合的方法实施无损检测能力验证,一般首先进行检测技术(检测规程和检测设备)的技术论证,然后进行检测规程和检测设备的明测考核,最后再进行操作人员的盲测考核。

我国的能力验证体系也渐趋完善,由国家核安全局组织无损检测技术能力验证,已于 2015 年 9 月颁布《核电厂在役检查无损检验技术能力验证实施办法(试行)》。

2 超声检测技术展望

(1) 新型检测技术的开发和普及,如相控阵超声波检测技术、全矩阵超声信号采集和分析技术等。以相控阵为例,其在美国已大范围使用,且关键部件的相控阵检测技术均已通过能力验证,而国内仍在小范围内使用,核电厂相控阵超声技术有待进一步推广应用。

(2) 在役检查机器人的研究与应用。核电厂在役检查期间的作业环境涉及高空、高辐照、密闭空间、水下等复杂环境,超声检测机器人的开发及应用可以降低检测人员的安全风险和辐照风险,同时也可有效提高超声检测技术的可靠性。

(3) 检测数据智能分析软件开发。随着自动超声检测技术的推广,检测数据的在线或离线分析占用了检测人员越来越多的精力。开发超声数据智能分析软件可减少分析人员工作量,同时和人工分析相结合,也可以有效降低漏检和减少误判。

参考文献:

- [1] 许远欢,葛亮,付千发,等.核设备不锈钢堆焊层对超声检测的影响[J].无损检测,2013,35(8):18-21.
- [2] 王海英,王海英,王海英,等.脉冲漏磁检测技术在管道裂纹检测中的应用[J].无损检测,2012,34(2):10-13.
- [3] flux leakage techniques for crack detection and characterization[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 125(2):186-191.
- [4] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,2008:290-291.
- [5] 费骏翥,左宪章,田贵云,等.脉冲漏磁检测中的涡流效应[J].无损检测,2012,34(2):5-10.
- [6] 吴德会,游德海,柳振凉,等.交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J].仪器仪表学报,2014, 35(2):327-336.