

奥氏体不锈钢小径管焊缝超声波相控阵检测 技术应用及分析

刘桂刚

中核运维技术有限公司 浙江杭州 311200

摘要：针对奥氏体不锈钢小径管焊缝的失效机理和裂纹缺陷特点，研究制定了专用超声波相控阵检测技术，并确定了验收标准及裂纹判断方法，选取35条焊缝进行现场试验验证。结果表明：超声波相控阵不合格焊缝与内表面液体渗透检测结果基本一致；超声波相控阵与射线检测约50%焊缝结果一致，超声波相控阵和射线检测均存在裂纹漏检。通过理论、试验结果及试验数据统计分析，得出超声波相控阵技术能够有效检测出役致裂纹；超声波相控阵技术在单侧扫查时，对探头对侧焊缝区域裂纹缺陷检出率低，容易发生漏检；超声波相控阵技术对于高度较小的裂纹，容易误判缺陷性质；射线检测对役致裂纹的检出率低，从检测结果统计分析可得出，检出率低于超声波相控阵技术。

关键词：奥氏体不锈钢；超声波相控阵；小径管；焊缝裂纹

Application and analysis of ultrasonic phased array detection technology for austenitic stainless steel small diameter tube weld

LIU Guigang

China Nuclear Operation and Maintenance Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, Zhejiang, China

Abstract: Aiming at the failure mechanism and crack defect characteristics of austenitic stainless steel small diameter pipe welds, a special ultrasonic phased array detection technology was developed, and the acceptance criteria and crack judgment method were determined. The field test was verified by 35 welds. The test results show that the ultrasonic phased array unqualified weld is basically consistent with the liquid surface penetration test on the inner surface. Ultrasonic phased array and ray detection are consistent with about 50% weld results, and ultrasonic phased array and ray detection have crack miss detection. Through theoretical analysis, experimental results analysis and statistical analysis of experimental data, it is concluded that ultrasonic phased array technology can effectively detect cracks caused by service; ultrasonic phased array technology detects crack defects in the opposite side of the probe during one-side scanning. Low rate is easy to miss detection. Ultrasonic phased array technology is easy to misjudge the defect properties for small cracks; the detection rate of ray-induced cracks is low. From the statistical analysis of the test results, the detection rate is lower than the ultrasonic phased array technology.

Keywords: austenitic stainless steel; ultrasonic phased array; small diameter pipe; weld crack

1 序言

核电厂在役阶段管道焊缝失效案例中，绝大部分为小径管焊缝失效，失效原因有设计、安装缺陷、振动、热冲击及腐蚀等。如某电厂2GME587YP管道根部焊缝泄漏导致非计划停机、3RIS129VP管道焊缝泄漏影响大修工期，给电厂安全运行带来威胁、造成巨大的经济损失。

目前，小径管焊缝的体积检查普遍采用射线检测，对于其焊缝的焊接缺陷（如未焊透、夹渣及气孔）检测效果好，但其对役致裂纹缺陷不敏感。且射线检测时占用大修主线路径，使厂房无法开展其他工作。因此，研究制定奥氏体不锈钢小径管焊缝的先进超声波检测技术，提高役致裂纹缺陷检测的有效性，减少射线检测工作量，对提高核电厂运行安全性、经济性具有重大意义^[1]。

对于传统超声波检测来说，1个探头采用1个或2个晶片，只能生成一个特定角度的声束。超声波相控阵检测技术的主要特点是多晶片探头中各晶片的激励、振幅和延时均由计算机控制，压电复合晶片受激励后能产生超声聚焦波束，声束参数如角度、焦距和焦点尺寸等均可通过软件调整，可以一次性使用范围内连续角度声束进行扫查。相比传统常规超声波检测技术，超声波相控阵检测信号图像直观便于分析判断，检测数据可保存离线分析，检测结果可靠性高，在检测速度上有明显的优越性^[2]。

2 试验方案及试验结果

2.1 试验对象信息

2017年6月至2018年5月，某电厂1-4号机组ADG、AHP系统疏水器及旁路疏水阀下游管道焊缝，频繁发生开裂泄漏，共计有16起。管道材质为0Cr18Ni9钢，焊缝规格为 $\phi 88.9\text{mm} \times 7.62\text{mm}$ 、 $\phi 60.3\text{mm} \times 5.54\text{mm}$ ，坡口形式为V形，坡口角度 60° ，组对间隙 $1\sim 5\text{mm}$ 。截取1ADG154VV下游管段共4条焊缝，在实验室进行分析后，综合失效分析，得出结论如下。

1) 管道材料成分、室温力学性能满足标准要求，金相组织为奥氏体等轴晶。

2) 部分焊缝存在内在明显余高和错边现象。

3) 失效模式为疲劳开裂，疲劳裂纹启裂于管道内壁焊趾处（见图1），沿焊缝熔合线扩展。

4) 在距离焊趾较远处的母材上，也发现数条微小裂纹（见图2），说明引起焊缝疲劳开裂的热应力较大。

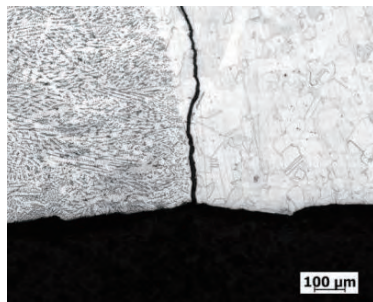


图1 焊趾处裂纹

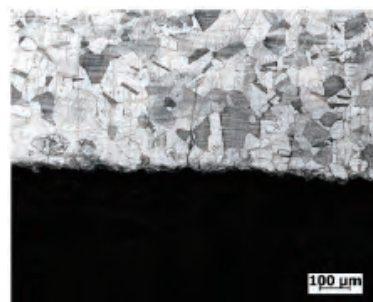


图2 母材裂纹

2.2 试验方案

选取35条AHP、ADG疏水管道焊缝进行试验验证，通过专用超声波相控阵检测技术与射线检测技术进行对比，并抽取二者结果不一致焊缝进行焊缝内表面液体渗透检测，以此论证超声波相控阵检测技术的优越性和可靠性。

(1) 超声波相控阵检测技术参数 过低频率声束波长长，分辨力降低；而过高的频率，声束能量衰减大，合适的频率能够获得较好的缺陷分辨力。该技术选用4MHz横波探头、一维线性相控阵探头，晶片尺寸为 $0.5\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，晶片数量为16个，晶片间距为 0.5mm 。由于壁厚较小，受焊缝余高的影响，选择主声束角度 $35^\circ \sim 75^\circ$ ，为了一次波覆盖范围尽可能大，采用带曲面的楔块，以保证良好的耦合效果。

在双侧扫查时，探头（含楔块）前沿分别位于两侧焊缝熔合线（靠近探头侧）边缘，探头声束方向垂直于焊缝，探头沿着焊缝移动一周，并采集数据；单侧扫查时，补充距可达侧焊缝熔合线（靠近探头侧） $5\sim 10\text{mm}$ 位置扫查一周。

对于奥氏体不锈钢小径管焊缝检测，目前国外标准普遍的做法是将相控阵检测放在超声波检测

内,相控阵的检测要求有专门的章节来规范,但验收还是常规A型脉冲反射的超声波标准,如美国的ASME V—2019《锅炉及压力容器规范》、挪威船级社的DNV-CG-0051—2022《无损检测》等。相比国外标准,国内已有专门的超声波相控阵检测标准,如GB/T 32563—2016《相控阵超声检测方法》、DL/T 1718—2017《火力发电厂焊接接头相控阵超声检测技术规格》、NB/T 47013.15—2021《承压设备无损检测 第15部分:相控阵超声检测》等,但DL/T 1718—2017明确不适用于粗晶材料和奥氏体焊接接头的检测;GB/T 32563—2016和NB/T 47013.15—2021明确粗晶焊接接头在考虑材料声学特性的影响下,可参考执行。GB/T 32563—2016无缺陷验收,建议合同双方商定或参考有关常规超声波标准;NB/T 47013.15—2021对制造安装和在用焊接接头提出了不同的验收标准,更加科学合理,验收中明确凡判定为裂纹、未熔合、根部未焊透及密集性的缺陷显示均评为不合格,体积型缺陷按照波幅及缺陷长度进行评定。相控阵的缺陷定性相对常规超声波具有很大的优势,但对少数回波幅值超过基准灵敏度缺陷且仍不能确定缺陷性质的,应补充检测,如射线检测。

(2) 射线检测技术参数 射线检测依据NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测》,放射源采用铱192源,双壁双影椭圆透照。验收标准参照DL/T 1118—2009《核电厂常规岛焊接技术规程》,不允许存在类似于未熔合、裂纹、未焊透缺陷,其他缺陷根据缺陷尺寸按照缺陷表验收。

(3) 试验结果 对35条焊缝同时进行超声波相控阵检测及射线检测,并选取超声波相控阵检测不合格且射线检测合格的4条焊缝,进行液体渗透检测验证,试验结果见表1。

表1 试验结果

超声波相控阵检测结果	射线检测结果	数量	液体渗透检测验证结果
合格	合格	8	—
合格	不合格(裂纹)	1	—
不合格(裂纹)	合格	16	抽取4条焊缝,进行内表面渗透检测,结果3条焊缝存在裂纹显示,1条焊缝未发现裂纹显示
不合格(裂纹)	不合格(裂纹)	10	—
总数量		35	—

3 超声波相控阵检测结果分析

3.1 裂纹判定方法分析

由于非平面型缺陷缺少具体量化的验收标准,故在验收时,仅对缺陷性质为裂纹的信号判定为不合格,结合疏水管焊缝缺陷的特点,以下2种情况判断为裂纹缺陷。

1) 存在明显上下端点信号。根据惠更斯原理,当传播路径上的障碍物远小于波长时(如裂纹尖端),在裂纹上下尖端会产生衍射现象而形成次波源,而体积型显示因包络圆滑,没有明显的尖端而不会形成尖端衍射信号^[3]。尖端衍射信号测量法,是比较通用而有效的一种缺陷自身高度的测量方法,同时也是判断缺陷性质的有效方法。如果能观察到某个显示存在上下端点信号,即可确认为平面型显示(裂纹)^[2]。

上下端点信号如图3所示。由图3可知,该显示在扇扫界面中有明显的上下端点衍射信号,且该显示的端点及韧带信号在扇扫界面中深度方向呈线性分布。当探头移动时,随着探测角度增大,缺陷端点信号深度基本不变(动态特征),可判定该显示为平面型缺陷。

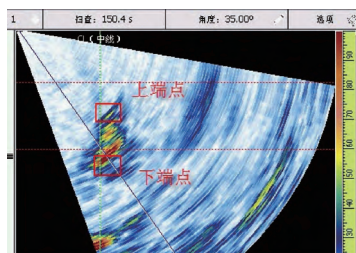


图3 上下端点信号

2) 无明显端点信号,深度位于焊缝内表面。当裂纹自身高度较小时,无明显端点信号。焊缝余高及焊趾部位反射回波可能产生干扰信号,其深度也位于焊缝内表面,通过幅值、动态波形进行综合判断,并使用0°探头进行确认,如果是平面型缺陷,0°探头的反射信号较弱甚至难以捕捉。根据被检测对象失效分析,裂纹从内表面萌生,因此无上下端点信号,但深度位于焊缝内表面,且无法排除为裂纹的缺陷,保守判定为裂纹。

由于使用波长,横波在钢中的传播速度为3100m/s,计算所使用声束的波长为0.76mm。当裂纹自身高度小于一定值时,裂纹的上下端点信号几近重叠,此时裂纹显示的信号静态特征与体积型显

示类似,如信号包络较圆滑,最大幅值点单一存在且一般处于信号中心区域,从而难以判断缺陷性质。一般而言,当裂纹自身高度大于两倍波长时,在信噪比足够和观察角度合适的前提下,裂纹上下端点能够有效区分,即对于使用检测技术,但裂纹高度 $<1.5\text{mm}$ 时,可能无明显端点信号,难以判断缺陷性质。

通过分析,对明显上下端点信号裂纹缺陷,定性准确;较小裂纹缺陷性质判断困难,有误判的可能性。

3.2 相控阵检测有效性分析

(1) 液体渗透检测验证结果对比 针对超声波相控阵检测不合格而射线检测合格的16条焊缝,抽取4条焊缝截取后进行焊缝内表面液体渗透检测。抽取的4条焊缝为AHPJ0709-02 M3、M4、M6、M8,该4条焊缝超声波相控阵检测与液体渗透检测结果对比见表2。

表2 超声波相控阵检测与液体渗透检测结果对比

检查方法	焊缝	Y/mm	X/mm	长度/mm	深度/mm	缺陷高度/mm	类型
超声波相控阵检测	M8	-6.48	2~85	83	5.5~7.6	2.1	面积型
液体渗透检测	M8	探头侧熔合线	-5~85	90	—	—	线性
超声波相控阵检测	M6	1.69	266~284	18	5.5~7.6	2.1	面积型
液体渗透检测	M6	探头侧熔合线	220~284	64	线性	—	线性
超声波相控阵检测	M4	-4.32	107~155	48	5.14-7.6	2.4	面积型
液体渗透检测	M4	探头侧熔合线	110~160	50	线性	—	线性
超声波相控阵检测	M3	-8.26	155~171	16	7.6	1	面积型
液体渗透检测	M3	—	—	—	—	—	无缺陷

注: X表示管道轴向距离, Y表示管道径向距离。

通过对表2数据进行分析可知, M4、M6、M8焊缝检测到明显的线性显示, 线性显示的周向位置与超声波相控阵检测裂纹显示检测的结果一致; 在缺陷的长度上, M4、M8焊缝的液体渗透检测结果与超声波相控阵检测结果一致。

M6焊缝液体渗透可检测出X为220~266mm内的缺陷, 超声波相控阵检测未检出。通过超声波相控阵检测信号的C扫信号图可发现, 220~266mm内存在显示信号(见图4), 由于幅值较低, 没有明显的端点信号, 所以未判定为裂纹信号, 误判缺陷性质。液体渗透检测检测显示在X为220mm附近痕迹较淡(见图5), 可判断裂纹缺陷从X为266mm侧萌生后扩展到X为220mm处, 故该处裂纹高度较小。

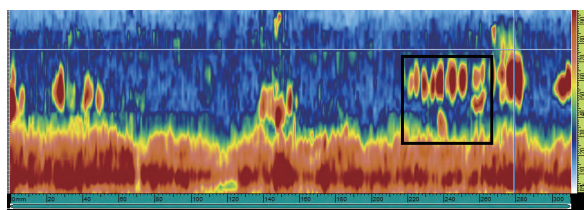


图4 M6焊缝C扫信号图



图5 M6缝PT检测显示照片

M4、M6、M8焊缝可以观察到明显的上下端点信号, 且裂纹缺陷的动态特征(见图6), 从信号上判断可确定为裂纹显示, 与液体渗透检测结果相符, 可得出超声波相控阵检测技术有效; 通过M6焊缝部分长度漏判分析, 验证了对于高度较小裂纹, 易误判缺陷性质。

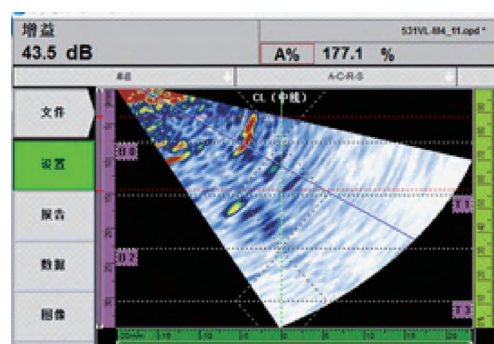


图6 AHPJ0709-02M4 S扫信号图

M3焊缝超声波相控阵检测结果显示存在一个高度较小的裂纹($h=1\text{mm}$),裂纹无明显上下端点信号,处于探头侧母材侧内表面(见图7)。液体渗透检测未发现线性显示,分析有两种可能。

1) 结合同类焊缝金相分析的情况,可能为热影响区母材上的微裂纹,由于裂纹开口非常小,所以液体渗透检测未能有效检测出该微裂纹。

2) 可能为焊缝底波或焊趾结构信号,因保守判断,而误判了缺陷性质。

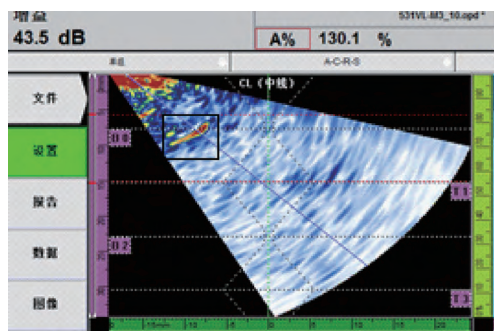


图7 AHPJ0709-02M3 S扫信号图

通过与液体渗透检测结果的对比分析,可得出超声波相控阵检测技术对裂纹的检出效果比射线检测效果好,检出率高,在对裂纹的周向定位、长度定位上准确;对于高度较小的裂纹,容易发生误判。

(2) 超声波相控阵检测准确性统计分析 由于是在自然缺陷焊缝上进行的检测,每条焊缝其实际是否存在缺陷,以及存在的缺陷数量、长度等,无法直接准确给出,但可以结合超声波相控阵检测、射线检测结果,失效的原理特点进行判断焊缝是否存在裂纹缺陷,在统计分析超声波相控阵检测有效性时以焊缝为单位进行分析,不具体到缺陷数量。

1) 超声波相控阵检测合格、射线检测不合格焊缝分析。AHP225/227/228TY W33焊缝超声波相控阵检测合格、射线检测不合格。该焊缝尺寸为 $\phi 60.3\text{mm} \times 5.54\text{mm}$,采用双壁双影垂直透照技术,共透照3次,3张底片上均发现裂纹,3张底片上的裂纹为同一条裂纹,其中2号片上长度为35mm,裂纹所在的位置在超声波探头对侧的焊缝熔合线附近。

可判断AHP225/227/228TY W33真实存在裂纹,超声波相控阵检测漏检。

2) 超声波相控阵检测不合格、射线检测合格焊缝分析。超声波相控阵检测不合格、射线检测合格

焊缝共16条,按照以下原则判断后再进行统计分析,具体分析结果见表3。

第一,液体渗透内表面检测不合格,或者失效机理及其下游焊缝检测结果判断其理论上存在裂纹且超声波相控阵检测有明显上下端点和动态特征焊缝,统计为不合格,共计11条。

第二,失效机理不符合,或者超声波相控阵检测无明显端点信号的,认为可能不合格,共计5条。

表3 超声波相控阵检测不合格、射线检测合格焊缝结果统计判断

序号	系统	疏水器号	图样号	规格/mm	焊缝	判断结果
1	AHP	002PU	FQ-JSG-HK-J0709-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M3	可能
2	AHP	002PU	FQ-JSG-HK-J0709-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M4	不合格
3	AHP	002PU	FQ-JSG-HK-J0709-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M6	不合格
4	AHP	002PU	FQ-JSG-HK-J0709-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M8	不合格
5	AHP	006PU	FQ-JSG-HK-J0710-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M1	不合格
6	AHP	006PU	FQ-JSG-HK-J0710-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M2	不合格
7	AHP	006PU	FQ-JSG-HK-J0710-02	$\phi 88.9 \times 7.62$	M3	不合格
8	AHP	009PU	FQ-JSG-HK-J0710-04	$\phi 88.9 \times 7.62$	M2	不合格
9	AHP	009PU	FQ-JSG-HK-J0710-04	$\phi 88.9 \times 7.62$	M4	可能
10	AHP	101PU	FQ-JSG-HK-AHP220/223/224TY	$\phi 60.3 \times 5.54$	W41	可能
11	AHP	301PU	FQ-JSG-HK-AHP286/289/314TY	$\phi 60.3 \times 5.54$	W43	不合格
12	AHP	301PU	FQ-JSG-HK-AHP286/289/314TY	$\phi 60.3 \times 5.54$	W26	可能
13	ADG	141PU	FQ-JSG-HK-J0609-03	$\phi 88.9 \times 7.62$	M4	可能
14	ADG	151PU	FQ-JSG-HK-J0609-06	$\phi 88.9 \times 7.62$	M3	不合格
15	ADG	151PU	FQ-JSG-HK-J0609-06	$\phi 88.9 \times 7.62$	M4	不合格
16	ADG	151PU	FQ-JSG-HK-J0609-06	$\phi 88.9 \times 7.62$	M6	不合格

分3类对超声波相控阵检测结果有效性统计分析:①超声波相控阵检测有效性分析统计和射线检测结果一致的焊缝数量共有18条,认为其检测结果均正确。②超声波相控阵检测合格、射线检测不合格的焊缝共有1条,以射线检测结果为准,焊缝实际存在缺陷。③超声波相控阵检测不合格、射线检测合格焊缝共有16条,结合失效原理特点及检测结果,11条焊缝存在缺陷,5条焊缝可能存在缺陷。

超声波相控阵检测有效性分析统计见表4。由表4可知,35条焊缝进行超声波相控阵检测,结果准确的29条,结果准确率至少83%。

经过统计分析，35条焊缝进行超声波相控阵检测，存在裂纹缺陷的焊缝22条，超声波相控阵检测检出21条焊缝，漏检1条，不合格焊缝检出率95%。

表4 超声波相控阵检测有效性分析统计

超声波相控阵检测结果	射线检测结果	数量/条	超声波相控阵检测结果有效性分析
合格	合格	8	准确，超声波相控阵检测和射线检测结果一致，判断焊缝实际无裂纹
合格	不合格	1	漏检
不合格	合格	16	11条焊缝判断超声波相控阵检测结果准确，焊缝实际存在裂纹；有5条焊缝可能有裂纹
不合格	不合格	10	准确，超声波相控阵检测和射线检测结果一致，判断焊缝实际存在裂纹
总数量		35	准确：8+11+10=29（条） 实际存在缺陷：1+11+10=22（条）

(3) 单侧扫查检测局限性分析

1) 理论分析。由于奥氏体不锈钢焊缝晶粒粗大、存在各向异性的柱状晶，采用超声波进行检测时，有明显的声散射，导致检测信噪比低，声束定位误差大，因此应尽可能避免使用穿过焊缝中心的声束的检测结果来评定缺陷^[4]。

小径管焊缝通常一端为直管段，另一端为阀门、法兰等设备接管，或者弯头、三通等管件，现场使用超声波相控阵检测时，通常只能进行单侧扫查^[5]。在单侧扫查时，对于探头对侧焊缝（包括焊缝、熔合线及母材热影区）缺陷检测，声波需经过焊缝区域（见图8），信噪比低，声束扭曲等，对缺陷的检出和判定带来困难，影响检测有效性。

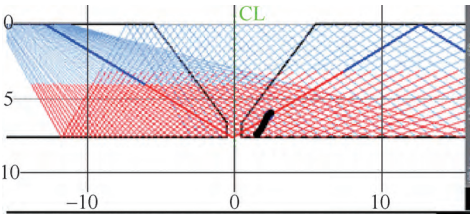


图8 探头对侧焊缝扫查示意

2) 射线检测结果对比分析。相控阵超声波检测合格的9条焊缝中，经过与射线检测结果对比，确认AHP225/227/228TY W33焊缝发生缺陷漏检，且裂纹所在的位置在超声波探头对侧的焊缝熔合线附近，即相控阵超声波检测单侧扫查漏检裂纹。

3) 检测数据统计分析。在相控阵超声波检测中，建立焊缝模型，以 $\phi 88.9\text{mm} \times 7.62\text{mm}$ 规格的焊缝为例，焊缝的外表面宽度设置11mm左右，外表面的中心作为焊缝的中心线，即y轴的零点，当缺陷

Y值为负时，缺陷位于靠探头侧焊缝区域；当Y值为正时，位于探头对侧焊缝区域。

通过对相控阵超声波检测不合格的26条焊缝缺陷Y轴位置进行统计，有7条焊缝缺陷Y值 >0 ，19条焊缝Y值 <0 ，即相控阵超声波检测出的缺陷主要为探头侧缺陷。

通过理论分析、射线检测结果对比、实际检测数据统计，可得出相控阵超声波检测单侧扫查对探头对侧缺陷不易检出，容易发生探头对侧缺陷漏检。

4 射线检测结果分析

4.1 裂纹检出局限性理论分析

射线检测对裂纹等面状缺陷的敏感性较低，除了与射线透照的能量、焦距曝光时间等基本参数有关外，射线束与面状缺陷的夹角是关键因素。射线束方向与裂纹方向平行，得到的裂纹影像是一条黑线，检出率高；随着透照角度逐渐增加，黑线变宽黑度变小，检出率降低，角度更大时失去裂纹影像特点^[5]。

疏水管道焊缝的裂纹缺陷，从焊趾部位起裂，沿焊缝熔合线扩展，按照双壁双影透照技术，沿熔合线扩展的裂纹与射线束均存在一定夹角^[6]，且不同周向位置夹角不同，故从原理上分析，射线检测对裂纹缺陷的检出存在局限性^[7]。

4.2 射线检测有效性统计分析

根据表4分析，可对射线检测结果有效性进行统计分析，具体见表5。

经过统计分析，35条焊缝进行射线检测，结果准确的至少19条，准确率54%。存在裂纹缺陷的焊缝22条，射线检测检出11条焊缝，不合格焊缝检出率50%。

表5 射线检测结果有效性统计分析

超声波相控阵检测结果	射线检测结果	数量/条	射线检测结果有效性分析
合格	合格	8	准确，二者结果一致，判断焊缝实际无裂纹
合格	不合格	1	准确
不合格	合格	16	11条焊缝存在漏检。11条焊缝可判断超声波相控阵检测结果准确，焊缝实际存在裂纹，有5条焊缝可能存在裂纹
不合格	不合格	10	准确：二者结果一致，判断焊缝实际存在裂纹
总数量		35	准确：8+1+10=19（条）

5 结论及建议

5.1 结论

对于规格为 $\phi 88.9\text{mm} \times 7.62\text{mm}$ 、 $\phi 60.3\text{mm} \times 5.54\text{mm}$ 的奥氏体不锈钢对接焊缝,得出以下结论。

1) 超声波相控阵检测技术能够有效检测出役致裂纹。

2) 超声波相控阵检测技术在单侧扫查时,探头对侧焊缝区域裂纹缺陷检出率低,容易发生漏检。

3) 超声波相控阵检测技术对于高度较小的裂纹,容易误判缺陷性质。

4) 射线检测对役致裂纹的检出率低,检出率低于超声波相控阵检测技术。

5.2 建议

1) 对于66.6~100mm壁厚的奥氏体不锈钢焊缝役致裂纹缺陷检测,以超声波相控阵检测为主要检测手段,以减少大修工期。

2) 当现场条件限制超声波相控阵检测只能进行单侧扫查时,可通过去除焊缝余高增加扫查面积,或采用纵波探头补充检测,提高对探头对侧裂纹缺陷的检出率。

3) 在对超声波相控阵检测结果有疑问时,补充进行射线检测,以提高检测结果的可靠性。

4) 对高度较小裂纹的超声波相控阵检测工艺优化及信号特征进一步研究分析,以便有效地在裂纹发展前期发现和判断。

6 展望

在不锈钢管道壁厚焊缝、承插焊缝、设备焊缝等检测上,超声波相控阵检测技术同样具有推广和应用价值。目前,我国核电行业超声波相控阵检测技术应用还处于起步阶段,随着具体检测工艺开发应用和进一步可靠性验证,相应相控阵检测技术标准的发布,其未来应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 程怒涛, 杨涛, 叶欣延, 等. 核岛大壁厚马鞍形接管焊缝射线检测技术[J]. 无损探伤, 2021, 45 (6): 44-48.
- [2] 李衍. 超声相控阵技术 第一部分: 基本概念[J]. 无损检测, 2007, 31 (4): 24-25.
- [3] 电力行业电站金属材料标准化技术委员会. 火力发电厂焊接接头相控阵超声检测技术规程: DL/T 1718—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [4] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [5] 邱振昌. 奥氏体不锈钢对接焊缝的相控阵超声检测技术研究[J]. 市场监管与质量技术研究, 2022, 5 (5): 10-12.
- [6] 何慈武. 小径薄壁管座角焊缝超声波相控阵检测方法的仿真应用研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
- [7] 杨敬, 吴斌, 焦敬品, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声阵列检测方法[J]. 焊接学报, 2022, 43 (2): 1-10, 113.

MW 20240227

(上接第129页)

- SAF2507双相不锈钢焊接接头性能的影响[J]. 压力容器, 2016, 33 (12): 7-12.
- [7] 寇晓培, 张钰柱, 翠兰, 等. 2507双相不锈钢在海水脱硫不同阶段的腐蚀钝化行为[J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (7): 115-126.
- [8] 张兴洪. C、Si、Cr、Mo含量对2507铸造双相不锈钢组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [9] 李玉, 刘光明, 李富天, 等. 2507双相不锈钢在酸性高氯环境下的腐蚀行为[J]. 中国表面工程, 2024, 37 (2): 45-50.
- [10] DAVISON R M, REDMOND J D. A guide to using duplex stainless steels[J]. Materials & Design, 1991, 12 (4): 187-192.
- [11] ZHOU H J, XUE F, CHANG H, et al. Effect

of Mo on microstructural characteristics and coarsening kinetics of Γ' precipitates in Co-Al-W-Ta-Ti alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34 (5): 799-805.

- [12] 吕迎玺, 董志, 臧旭. 弯曲应力对经济型双相不锈钢LDX2101应力腐蚀影响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30 (2): 172-176.
- [13] 夏高令, 杨银辉, 李赵中. 热输入对22%Cr超低Ni双相不锈钢焊接热影响区组织和耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (8): 202-210.
- [14] 栗宏伟, 赵志毅, 薛润东. 热输入对SAF2507超级双相不锈钢焊接接头显微组织及硬度的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43 (2): 20-26, 114.

MW 20240320