

# 不锈钢管道对接焊缝焊接热裂纹 超声波检测技术

袁光华, 常楠, 周路生, 张国丰

(国核电站运行服务技术公司, 上海 200233)

**摘要:** 由于安装制造工艺的原因, 核电站辅助系统奥氏体不锈钢对接焊缝极易产生焊接热裂纹, 此类热裂纹具有长度短、高度小、多集中于焊缝表面和近表面区域等特征, 同时又由于奥氏体材料自身的影响, 依据标准采用的体积性检测方法不能获得较好的检测效果。笔者针对特定对象, 介绍了核辅助系统奥氏体不锈钢对接焊缝焊接热裂纹超声波检测技术及验证结果, 为此类焊接热裂纹检测技术提供了参考。

**关键词:** 奥氏体不锈钢; 管道焊缝; 超声波检测; 焊接热裂纹

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)12-0001-04

## Ultrasonic Techniques of Hot Cracks for Austenitic Stainless Steel Pipe Weld

YUAN Guang-Hua, CHANG Nan, ZHOU Lu-Sheng, ZHANG Guo-Feng

(State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Because of welding technology, hot cracks are easily found in the austenitic stainless steel pipe weld, and these hot cracks characters are that they always have the short length, little through wall size and most of them always appear in the surface and near surface areas of the weld. Also, because of the reason of the austenitic stainless steel material, volume inspection techniques in accordance to code can not get a good result. This paper introduces the investigative ultrasonic techniques of hot cracks for austenitic stainless steel pipe weld, including the verification of the techniques and giving some reference to the inspection techniques of such hot cracks.

**Keywords:** Austenitic stainless steel; Pipe weld; Ultrasonic testing; Hot crack

核电站核辅助系统存在一定数量的奥氏体不锈钢对接焊缝。由于焊缝安装制造工艺原因, 极易产生焊接热裂纹。此类缺陷除表面开口类型能被渗透检测发现外, 其余埋藏性缺陷使用体积性检测方法无法进行有效检测。为了掌握缺陷基本情况, 为核辅助管道疲劳计算及寿命评估提供依据, 必须开发针对性检测技术。笔者介绍的超声波检测技术主要针对管径  $\phi 273$  mm, 厚度 30 mm 的奥氏体不锈钢管道对接焊缝, 其他规格的核辅助系统对接焊缝检测技术可以此为参考。

收稿日期: 2013-03-05

作者简介: 袁光华(1979—), 男, 工程师, 学士, 主要从事核电超声检测技术研究及应用。

## 1 不锈钢管道对接焊缝焊接热裂纹特征及超声波检测难点

根据对核辅助系统不锈钢焊缝解剖试验及缺陷统计, 此类焊接热裂纹的主要特征为以下四点:

(1) 长度 多数缺陷长度为 2~3 mm, 最长的为 8 mm 左右。

(2) 高度 绝大多数单个缺陷的高度小于 3 mm。

(3) 深度 大多数缺陷位于距焊缝外表面 3 mm 以内, 部分位于 3~6 mm 范围内, 少数缺陷位于 6 mm 以下和氩弧焊打底层以上区域。

(4) 方向 除火口裂纹外, 多数缺陷的走向为沿焊道方向(周向)和 45°斜向两个方向, 少数缺陷为轴向方向。

考虑此类焊接热裂纹的主要特征、焊缝材料及焊接工艺,超声波检测难点主要为以下三点:

(1) 由于焊接热裂纹具有形貌不规则、开口小、长度短、自身高度小等特点,超声波检测时存在信号幅度低、噪声大、分辨力差等问题。

(2) 粗大的奥氏体晶粒形成高强度的草状回波,导致声能衰减严重、穿透力差,从而降低了检验信号的信噪比和缺陷的分辨力。

(3) 晶粒的各向异性,即焊缝熔合区与焊缝中心区的晶粒成长方向的不一致将导致部分检验探头产生高强度的几何形状信号和声束偏转。

## 2 超声波检测技术

### 2.1 参考反射体确定

根据 RCCM 规范有关要求以及核辅助系统不锈钢管道对接焊缝中焊接热裂纹的特征,采用如下参考反射体。

(1) 横通孔 根据 RCCM 规范 MC2000 相关要求,在参考试块上加工直径为  $\phi 2$  mm 的横通孔<sup>[1]</sup>。考虑到近表面区域,增加了深度为 2.5 mm 的  $\phi 2$  mm 横通孔。横通孔主要用于检测灵敏度的调节。

(2) 电火花槽 根据表面开口缺陷特征,在试块表面加工不同规格、不同方向的电火花槽,目的在于开发检测技术的能力验证。

(3) 平底孔 根据内部缺陷特征,在试块焊缝侧面加工不同深度、不同方向的  $\phi 2$  mm 平底孔,用于开发技术仪器调节及技术能力验证。

参考试块如图 1 所示。



图 1 不锈钢参考反射体试块

### 2.2 检测区域划分

由于不锈钢管道对接焊缝焊接热裂纹超声波检测存在的检测难点,根据不锈钢材料超声检测的通常做法,将检测对象沿厚度方向分为三个不同区域:表面近表面区域(0~9 mm)、中部区域(5~

16 mm)、下部区域(10~30 mm)。针对不同区域采用不同聚焦范围的检测探头,以提高检测信噪比,同时实现检测范围全覆盖。

### 2.3 表面近表面超声波检测技术

根据实际检测经验反馈,针对表面近表面区域,表面波探头及常规大角度超声探头均不能取得较好的检测效果。综合考虑后决定采用超声爬波的检测技术。

#### 2.3.1 超声爬波探头

超声爬波探头的类型有单晶爬波探头、双晶并列式爬波探头和双晶串列式爬波探头等。通过对爬波探头的类型、晶片频率、晶片尺寸、阻抗匹配、焦点距离等参数的优化与组合,最终研制出了适合奥氏体不锈钢管道焊缝表面、近表面缺陷检测的双晶并列式爬波探头,其规格为 2 mm×6 mm×13 mm TRCr2F15。

#### 2.3.2 超声爬波测高技术

试验发现爬波探头所接收到的表面、近表面缺陷回波信号中包含了许多缺陷特征信息,包括缺陷最大回波处深度、缺陷的上端点反射信号和缺陷下端点反射信号。图 2 缺陷上端点、最大波幅处以及下端点超声波反射,图 3 为对应显示的 A 扫信号。

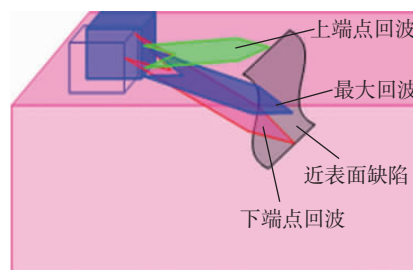


图 2 爬波测高技术示意

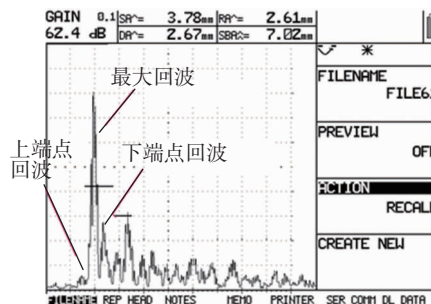


图 3 爬波测高波形显示

利用来自缺陷本身的上下端点反射波确定缺陷的自身高度与利用端点衍射波法测量缺陷高度技术存在一定的差异。由于爬波在近表面传播过程中可

以看成是一系列与表面平行的波组成,因此近表面缺陷的端点反射波幅度远大于端点衍射波幅度(特别是垂直于焊缝表面的缺陷),且其端点反射信号较端点衍射信号更易分辨。

### 2.3.3 超声爬波探头性能

经试验测试,超声爬波探头性能主要如下:

- (1) 有效覆盖深度:0~9mm。
- (2) 信噪比 参考试块上表面近表面区域(0~9 mm)内所有参考反射体信噪比大于24 dB。
- (3) 检测能力 能有效检测出自身高度大于1.0 mm的平面性缺陷。
- (4) 测高能力 可对自身高度2 mm以上的缺陷进行高度测量,其测高精度优于 $\pm 1$  mm。

## 2.4 不锈钢焊缝中下部区域超声波检测技术

### 2.4.1 中部区域检测技术及探头选择

中部区域(5~16 mm)超声波检测技术采用2.5 MHz 60°双晶纵波斜探头,尺寸为2 mm×8 mm×16 mm。双晶纵波斜探头采用一发一收的工作模式,利用收发晶片声束交叉形成菱形区域而达到聚焦效果,从而大幅提高其焦距范围内信号的强度、分辨力和信噪比。同时,由于发射和接收分开,降低了楔块与接触面耦合不良引起的界面干扰信号。

### 2.4.2 下部区域检测技术及探头选择

对于下部区域的检测,通常采用45°探头。但是经过试验证明,由于核辅助管道焊缝中晶粒成长方向的原因,导致45°的超声波穿透焊缝的能力比较差,在界面上产生较强的声束偏转,形成较强的几何结构信号,干扰缺陷的判别,如图4所示。

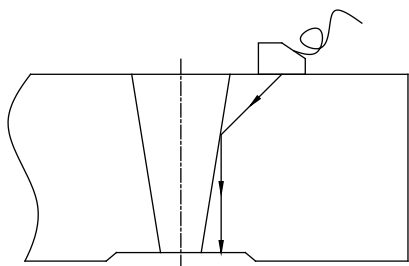


图4 45°探头几何结构信号干扰示意

通过试验发现,这种几何结构信号的强度在 $\phi 2$  mm-5 dB~ $\phi 2$  mm+4 dB之间,信号的显示深度在19~26 mm,其位置及当量信息对于不锈钢焊缝下部区域缺陷信号的判断造成强烈干扰。图5为焊接试件几何结构信号波形。

为了排除下部区域几何结构信号的干扰,先后

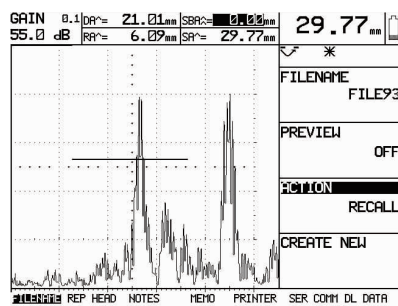


图5 焊接试件几何结构信号

试验了37°和50°等种不同角度的双晶纵波探头。经过试验,发现37°探头同样具有较强的几何信号,而50°探头的类似几何信号则比较弱,基本不影响缺陷信号的判定。在此基础上,进行探头参数的进一步优化,最终确定采用探头的规格为1.5P8×14A50F30,该双晶纵波聚焦探头具有较强的穿透焊缝的能力,由于焊缝界面引起声束偏转而形成的几何结构信号的强度在标准要求的记录灵敏度附近(标准记录灵敏度为 $\phi 2$  mm-14 dB),基本不影响缺陷判断。

### 2.4.3 中下部区域测高技术及探头选择

根据超声波理论以及试验发现,双晶纵波探头检测裂纹类或平面性缺陷时,所接收到的缺陷信号中包含缺陷最大回波处信号、缺陷的上端点尖端衍射信号和下端点尖端衍射信号。利用上下端点尖端衍射信号可以实现缺陷自身高度的测量。

经试验测试,中下部区域检测探头性能要求为:

- (1) 有效覆盖深度 中部区域探头(5~16 mm)、下部区域探头(10~30 mm)。
- (2) 信噪比 满足使参考试块中下部区域内所有参考反射体信噪比大于15 dB。
- (3) 测高能力 可对自身高度4 mm以上的缺陷进行高度测量。

## 3 检测技术性能验证

### 3.1 验证解剖试验及结果

为验证爬波检测技术是否能有效检测出不锈钢焊缝表面、近表面中存在的焊接热裂纹,并验证对近表面缺陷进行定深和测高的精度,先后进行了两次性能验证解剖试验。首先为技术开发阶段的解剖,其次为在技术开发验收阶段的解剖。其检验与解剖结果具体见表1。

图6为在性能验证过程中,打磨一定深度后进行PT检验验证,PT检验结果表明超声爬波对于缺



表 1 超声爬波检测结果与解剖结果对比

阶段	缺陷 序号	周向位置/mm		轴向位置/mm		缺陷深度/mm		缺陷性质
		UT	解剖	UT	解剖	UT	解剖	
试验 阶段	7	90°+191	90°+191	265	260	1.05~4.50	0.7/4.5	在焊缝区域存在多个断 续性、密集性的线性缺陷
	8	90°+205	90°+205	260	265	0.76~4.40	0.5/4.5	
验证 阶段	3	0°+108	0°+108	239	260	0.9/1.47/3.63	0.8/3.2	点状缺陷
	5	90°+90	90°+90	265	265	0.5/2.07/4.10	0.8/4.16	埋藏性、密集性缺陷
	18	270°+175	270°+175	262	262	/2.05/3.47	0.7/3.48	表面开口性、密集型缺陷

陷检出及长度检验的准确性。

图 7 为在性能验证过程中,打磨至接近超声检验结果的下断点位置进行的金相检验,金相检验结果表明超声爬波对于下断点位置检测的准确性。

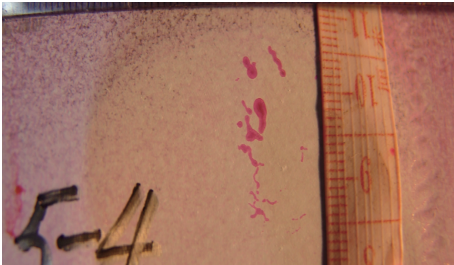


图 6 5 号缺陷解剖过程中 PT 照片



图 7 5 号缺陷沿长度方向的金相拼图

3.2 中下部区域检测探头性能验证

试验及课题验收过程中,采用双晶纵波聚焦探头对焊接试件进行了检测,并对其中部分缺陷进行解剖,以验证双晶纵波探头的性能。图 8 为焊接试件上某焊接热裂纹波形。

图 8 中焊接热裂纹的缺陷参数为:缺陷当量为  $\phi 2\text{mm}-8\text{ dB}$ ,缺陷深度为 19.10 mm,缺陷高度为 4.01 mm。

根据双晶纵波探头的检测结果,对焊接试件进行了解剖,解剖采用沿焊缝剖面线切割的方式进行。经解剖证明,检测到的缺陷为热裂纹,缺陷埋藏深度为 19 mm,高度为 4 mm,解剖结果与检测结果一致。图 9 为解剖结果 PT 显示。

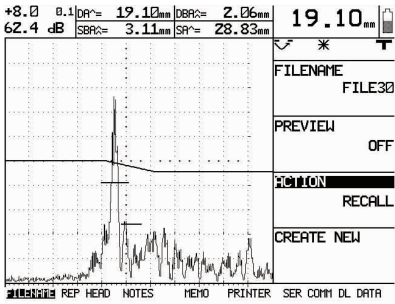


图 8 中下部区域焊接热裂纹波形显示

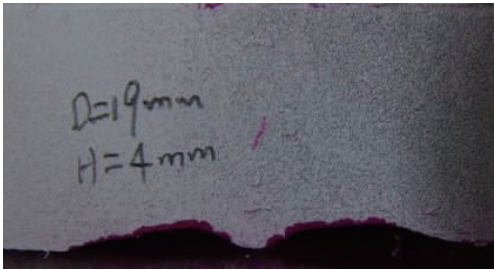


图 9 中下部区域焊接热裂纹解剖 PT 显示

4 结语

超声波爬波检测技术有效地解决了核电站核辅助系统不锈钢对接焊缝焊接热裂纹的检测问题,为核辅助管道疲劳计算及寿命评估提供了可靠依据。同时,虽然介绍的检测技术针对特定的对象,但提及的针对表面近表面区域的超声爬波检测技术以及奥氏体材料焊缝中结构信号产生机理及解决方法,对于其他奥氏体钢焊缝及异种钢焊缝的检查都具有一定的借鉴作用。

参考文献:

[1] RCC-M 压水堆核岛机械设备设计和建造规则[S].