

反应堆压力容器接管-安全端异种钢焊缝 直射纵波超声检测方法

尹 芹

(东方锅炉股份有限公司, 自贡 643001)

摘 要:反应堆压力容器(RPV)接管-安全端对接接头属奥氏体-铁素体异种钢焊缝,因晶粒粗大的原因实施超声检测难度大。针对现有斜射纵波检测方法对面状缺陷检测能力不足的情况,结合焊缝具体结构特点提出了一种以安全端端面为探伤面的超声直射纵波检测方法。试验研究结果表明,该方法对垂直于焊缝表面的面状缺陷检测效果较好。该方法可与斜射纵波检测方法组合使用,在 RPV 制造阶段有推广应用价值。

关键词:核电站;反应堆压力容器;异种钢焊缝;超声波检测;奥氏体

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)03-0179-05

Straight Wave UT Technical for Dissimilar Weld of Tube to Safe-End in Reactor Pressure Vessel

YIN Qin

(Dongfang Boiler Company Ltd, Zigong 643001, China)

Abstract: Tube to Safe-End joint in Reactor Pressure Vessel(RPV) belongs to Austenite-Ferrite type Dissimilar Weld. It is difficult to perform UT because of its coarse grain structure. Considering deficient detectivity of planar defect by angle longitudinal wave technical, a straight longitudinal wave technical which takes Safe-end as scanning surface is put forward based on Joint structure. Experiment and research indicate it has good detectivity of planar defect which is vertical to the weld surface. This technical may be applied in manufacture stage of RPV Combining with angle longitudinal wave technical.

Keywords: Nuclear plant; RPV; Dissimilar steel weld; Ultrasonic testing; Austenite

接管-安全端对接焊缝(以下简称接-安焊缝)是反应堆压力容器和主管道之间的异种钢(铁素体-奥氏体)过渡接头,填充材料为奥氏体,具体按技术路线可分镍基合金和 18-8 型超低碳不锈钢两种。对这类焊缝进行超声检测的困难主要在于超声波传播时在奥氏体晶界面发生严重的散射以及波型转换,引起超声波衰减严重,信噪比显著下降;其次晶粒各向异性,引起声束弯曲,造成定位不准。

由于核电站所要求的高可靠性,促使人们从 20 世纪 70 年代就开始认真地研究奥氏体焊缝的超声检测问题^[1]。国际焊接学会(IIW)于 20 世纪 80 年

代还成立了专门的工作组,通过系统的研究,发布了《奥氏体焊缝超声检测手册》^[2]。近年来,相关组织也陆续发布了一些奥氏体焊缝超声检测的标准^[3-4],完善了奥氏体焊缝的斜射纵波检测工艺。

即便如此,该焊缝实际的检测效果仍存在不令人满意的地方,特别是用纵波斜探头检测有一定埋藏深度且垂直于焊缝表面的面状缺陷时,由于来自缺陷端部的衍射信号较弱,往往会被晶界噪声湮没而造成缺陷的漏检。

为此,笔者结合某型号 1 000 MW 反应堆压力容器的接-安焊缝(厚度 100 mm)的具体结构,提出了一种以安全端端面为探伤面的超声直射纵波检测方法。该方法对垂直于焊缝表面的面状缺陷有较好的检出能力。

收稿日期:2009-04-02

作者简介:尹 芹(1973—),男,高级工程师,长期从事锅炉、压力容器和核承压设备无损检测工作。

1 接-安焊缝的焊接工艺和焊缝组织

1.1 接-安焊缝的结构与工艺参数

(1) 母材 接管材质为 16MND5, Mn-Mo-Ni 低合金高强度钢;安全端材质为 Z2CND18. 12N2 奥氏体不锈钢;外径 $\phi 1\ 130$ mm, 厚 100 mm。

(2) 焊材 隔离层材料牌号为 EQ 309L, 规格为 $\phi 1.2$ mm, 即 24Cr-12Ni 不锈钢;焊缝材料牌号为 EQ 308L, 规格为 $\phi 4$ mm, 即 20Cr-10Ni 不锈钢。

(3) 坡口型式 U 型全焊透坡口带背面清根(图 1)。

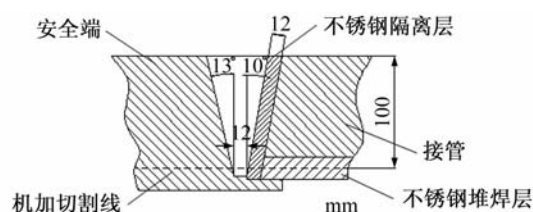


图 1 焊缝坡口

(4) 焊接方法 隔离层为热丝 TIG 焊;焊缝为丝极埋弧自动焊。

(5) 热处理 去应力热处理。

1.2 焊缝组织

焊缝宏观组织如图 2 所示。图中显示隔离层每层高约 3 mm, 柱状晶粒基本上垂直于接管坡口;奥氏体焊缝焊道较宽, 约 10 mm, 每层 3~4 mm 高, 晶粒在每条焊道内基本形成扇形结构, 偶有延伸穿过焊道的情况。



图 2 焊缝宏观组织

2 试验方案

2.1 直射纵波检测布置

反应堆压力容器安全端端面离焊缝较近, 故以安全端的端面作为探伤面, 对焊缝进行直射纵波检测, 具体布置如图 3 所示。

这种布置方式的优点有① 超声声束与预期危

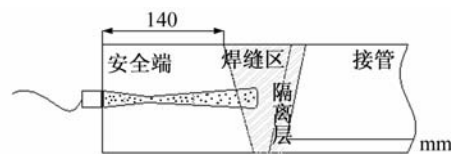


图 3 直探头检测示意图

害性缺陷垂直, 有利于其检出。② 直探头波型单一, 探头发射能量全部以纵波形式存在, 而纵波斜探头同时发射纵波和横波, 其中横波成分全部转换成了噪声, 从而降低了信噪比。

2.2 试块制作

试块尺寸和焊接工艺与实际工件完全一致。为模拟与焊缝表面垂直的裂纹类面状缺陷, 在焊缝中加工平底孔作为参考反射体(图 4)。图中 A 孔位于不锈钢侧焊缝熔合线; B 孔离不锈钢侧焊缝熔合线水平距离 20 mm; C 孔位于焊缝与隔离层熔合线, 离不锈钢侧焊缝熔合线水平距离 35 mm。

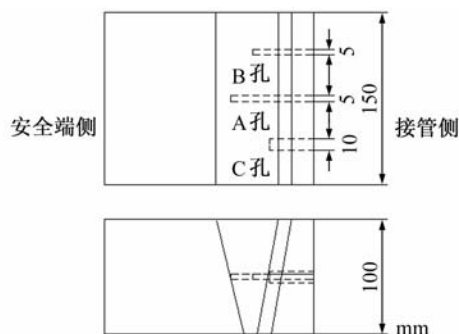


图 4 平底孔对比试块

2.3 探伤仪

USIP-11 型(KK 公司)。该型超探仪 dB 值小表示波幅高。

2.4 探头选择

采用表 1 所列纵波直探头的参数。

表 1 纵波直探头参数

序号	探头型号	晶片尺寸/mm	频率/MHz	序号	探头型号	晶片尺寸/mm	频率/MHz
1	K1SM	$\phi 28$	1	4	2.5Z20N	$\phi 20$	2.5
2	B2S	$\phi 24$	2	5	B4S	$\phi 24$	4
3	SLF2-25	$\phi 28$	2.25				

2.5 表面准备

安全面端面已机加平整, $R_a \leq 3.2 \mu\text{m}$ 。

2.6 耦合剂

浆糊, 牌号 ZG-F(KK 公司), 其硫和卤素含量符合核电制造规范对超声耦合剂清洁度的要求。

3 试验数据

(1) 材料声速 焊缝声速为 5 590 m/s;安全端(Z2CND18.12N2)为 5 790 m/s;接管(16MND5)为 5 920 m/s。

(2) 材质衰减情况如表 2 所示。

表 2 材质衰减系数测试值 dB/mm

探头 型号	焊缝材质 衰减系数	安全端材质 衰减系数	接管材质 衰减系数
K1SM	0.33	0.01	0.004
B2S	0.50	0.04	
SLF2-25	0.51	0.04	
2.5Z20N	0.65	0.1	
B4S	不可测	1.4	0.04

(3) 平底孔回波与噪声强度如表 3 所示。

表 3 各种探头对 ABC 孔的信号强度以及噪声值

探头 型号	A 孔幅度 S_A /dB	B 孔幅度 S_B /dB	C 孔幅度 S_C /dB	噪声 $N_{\max}^{1)}/\text{dB}$
K1SM	46	52	48	58
B2S	38	47	45	57
SLF2-25	35	44.5	44	56
2.5Z20N	20	32	30	40
B4S	52	—	—	62

注:1) 噪声 N_{\max} 为该灵敏度下的最大噪声幅值。

4 试验结果分析

根据表 3 测试结果,计算各位置的检测能力如表 4 和图 5 所示(以平底孔当量值表示)。

由表 4 和图 5 的试验结果看出,焊缝中缺陷的检测能力与探头直接相关。为分析探头参数对检测

表 4 各位置可检测平底孔当量(信噪比 12 dB)

探头	A 孔处	B 孔处	C 孔处
K1SM	$\phi 5$	$\phi 7.1$	$\phi 11.2$
B2S	$\phi 3.3$	$\phi 5.6$	$\phi 10$
SLF2-25	$\phi 3$	$\phi 5$	$\phi 10$
2.5Z20N	$\phi 3.2$	$\phi 6.3$	$\phi 11.2$
B4S	$\phi 5.6$	—	—

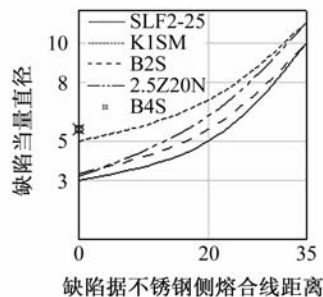


图 5 各位置不同直探头检测能力(信噪比 12 dB)

能力的影响,根据声场理论将试验所用探头的声束形状及计算值列于图 6 和表 5 中(按惯例,仍以 6 dB 声束表征探头有效声场)。

从表 4 和图 5 的试验结果可以看出,2~2.5 MHz 的纵波直探头检测效果较好,1 MHz 探头虽然材质衰减系数更小,但却并不能取得比 2 MHz 更好的检测效果。因为低频率虽然穿透力更强,但宽声束覆盖了更多的焊缝晶粒,声束截面积相应变大(图 5),造成缺陷反射回波的能量在整个声束中所占的比例下降,也就是说信噪比降低了。

因此认为,焊缝的检测效果由一对相互制约的参数——材质衰减系数和声束宽度(截面积)共同决定。

从表 5 所列数据可以看出,SLF2-25 探头在焊缝中的材质衰减系数与 B2S 相当,略低于 2.5Z20N,

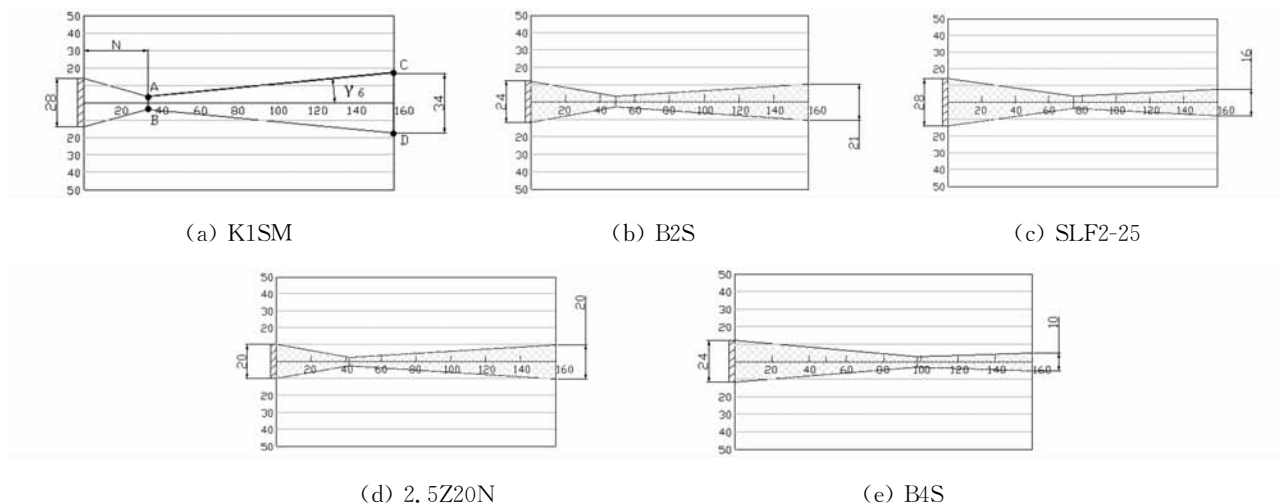


图 6 各探头的声束形状

表 5 探头声束参数计算值

探头 型号	晶片直径 D/mm	探头频率 f/MHz	近场长度 $N^{(1)}$	6 dB 声束半扩 散角 ²⁾ $\gamma_6/(\circ)$	自然聚焦 点尺寸 ³⁾ AB	160 mm 声程处 6 dB 声束直径 CD/mm	160 mm 声程处 6 dB 声束面积 $D_{6\text{ dB}}/\text{mm}^2$	衰减系数 $\bar{\alpha}/$ ($\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}$)
K1SM	$\phi 28$	1	33.2	6.2	7.19	34	907	0.33
B2S	$\phi 24$	2	49	3.6	6.163	21	346	0.50
SLF2-25	$\phi 28$	2.25	74.8	2.76	7.19	16	201	0.51
2.5Z20N	$\phi 20$	2.5	42	3.48	5.136	20	314	0.65
B4S	$\phi 24$	4	98	1.8	6.163	10	79	不可测

注: 1) $N \approx D^2/4\lambda$; 2) $\gamma_6 = \arcsin 0.514\lambda/D \approx \lambda D$; 3) $AB = 0.256D$.

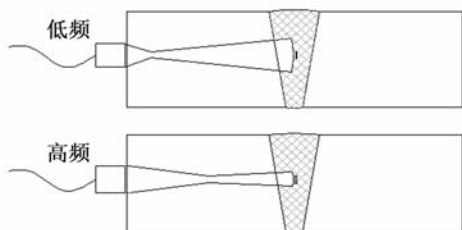


图 7 宽声束、窄声束示意图

但其声束面积仅分别相当于它们的 58% 和 64%；K1SM 的材质衰减系数为 SLF2-25 的 0.66 倍，但其声束面积为 SLF2-25 的 4.5 倍。综合影响的结果是在焊缝宽度范围内，SLF2-25 能取得更好的检测效果。

5 提高检测灵敏度的途径

为了进一步提高奥氏体焊缝的超声检测效果,应千方百计地降低焊缝的衰减量,尽量减少焊缝区有效声束覆盖面积。

5.1 采用窄间隙焊

若采用窄间隙焊,焊缝宽度减小为 14mm,材质衰减的影响也随之大幅减小,根据前述试验结果,预期的探伤灵敏度如图 8 所示。

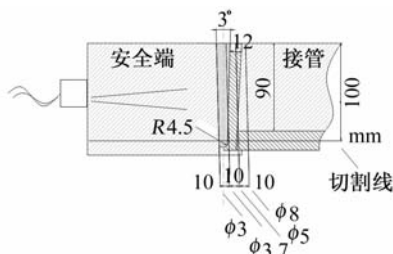


图 8 窄间隙焊等检测灵敏度线($S/N=12$ dB)

图8所示焊缝的绝大部分区域预期能达到 $\phi 3.7\text{ mm}$ 平底孔当量的检测灵敏度,隔离层一般能达到 $\phi 5\text{ mm}$ 平底孔当量,远远优于ASME第Ⅺ卷对焊缝役前和在役检测验收准则(IWB-3514.2)^[6]的要求。

可见,如果采用窄间隙焊,直探头的检测效果就会大幅提升,从而达到一个比较理想的状态。值得一提的是,某技术交流会(苏州)上,法国核电专家介绍欧洲新一代先进压水堆(EPR)结构时提到其RPV 接-安焊缝已经采用窄间隙焊,这对超声检测来说是一个好消息。

5.2 采用直径 40 mm, 2.25 MHz 的直探头

计算表明,若采用直径 40 mm,2.25 MHz 的直探头,声程 160 mm 处的 6 dB 声束直径可以减少到 11 mm,这时探头声束在该检测距离下形成了自然聚焦,声束直径达到该频率该检测距离下的极小值。

分析认为,透镜聚焦探头不可取,原因是聚焦只能在近场区形成,需要远远 $>40\text{ mm}$ 的聚焦探头才能有效减小检测区域内的声束宽度;同时由于曲率的原因,在聚焦探头与钢的界面之间会产生振荡波,影响检测效果。

试验表明,宽频带窄脉冲直探头无助于信噪比的提高,原因是宽频带窄脉冲声束穿透能力提高的同时,声束宽度也在变大。笔者曾采用 K1SC (1MHz, $\phi 24$, 复合材料压电晶片, 频带宽度 80%)、K2SC (2MHz, 其它参数同 K1SC) 宽频带窄脉冲探头参与试验, 未见信噪比有所改善。

5.3 侧壁干涉效应的影响与对应措施

上述试验反映的是焊缝中间部位的检测能力,如果缺陷靠近表面,影响又如何呢?

纵波探伤时,若探头靠近侧壁,纵波沿侧壁传播时将产生严重的波型转换,导致强度衰减,噪声增加,致使探伤灵敏度急剧下降。为解决这一问题,采用纵波斜探头在内外表面进行补充检验。

以 6 dB 声束宽度计算侧壁影响区域, 计算 SLF2-25 探头的侧壁效应影响区域如图 9 所示。

纵波斜探头探伤试验表明,受侧壁影响的这部分区域由于深度不大,采用 45° 和 60° 的纵波斜探头均能取得较好的检测效果,其中 45° 探头对 20 mm

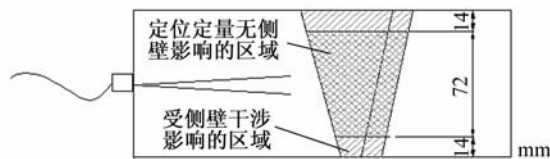


图9 SLF2-25 探头侧壁影响示意图

深的 $\phi 2 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 横孔的信噪比能达到 20 dB, 而 60° 探头对 10 mm 深的 $\phi 2 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 横孔的信噪比能达到 17 dB, 对表面 2 mm 线切割槽的信噪比在 20 dB 以上。

以上情况表明纵波斜探头和直探头两种检测方式若能组合使用, 检测效果更令人满意。

6 结论

(1) 根据接-安焊缝的具体结构特点, 在 RPV 制造阶段采用以安全端端面为探伤面的直射纵波检测方法能取得较好的检测效果, 解决了斜射纵波法对垂直于焊缝表面的面状缺陷检测能力不足的问题。直射纵波和斜射纵波检测方法可组合使用, 互为补充。

(2) 适合的检测频率为 2~2.5 MHz。

(3) 影响信噪比的关键因素是声束宽度, 推荐采用能在检测区形成自然聚焦的大晶片直探头。

(4) 窄间隙焊缝检测效果提升极为显著, 采用窄间隙焊是提高异种钢焊缝超声波可探性的最有效措施。

参考文献:

- [1] 李衍, 冯兆国. 不锈钢焊缝的超声检测——现状与进展[J]. 无损探伤, 2005, 29(6): 1-6.
- [2] American Welding Society. Handbook on the Ultrasonic Examination of Austenitic Welds[M]. USA: American Welding Society, 1985.
- [3] ISO 22825:2006 Non-destructive testing of welds — Ultrasonic method — Testing of welds in austenitic steels and nickel based alloys[S].
- [4] ND IS 2424:2004 オーストナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験方法[S].
- [5] Ginzel E. Beam Width Analysis[DB/OL]. [2001-09-06] <http://www.ndt.net>.
- [6] ASME Section XI. Rules for In-service Inspection of Nuclear power Plant Components[S].

第九届中国机械工程学会无损检测分会年会征文及赞助商名录

经中国机械工程学会无损检测分会委员会讨论协商决定: 第九届中国机械工程学会无损检测分会年会将于 2010 年 9 月 14-17 日在上海光大会展中心举办(2010 年 9 月 13 日报到注册)。本次会议主题为: “发挥科技创新, 促进经济发展。提高产量质量, 为国民经济服务”。欢迎各系统、各工业领域的无损检测研究人员、用户、厂商和技术人员踊跃报名参加会议, 并进行大会论文交流。

征文内容: 基础和应用研究; 设备的设计和研究; 检验和检测方法的应用; 法规和标准; 培训、教育、资格鉴定和认证; 材料性能; 安全性和可靠性; 生物医学的应用; 其他。

论文摘要截止日期: 2010 年 3 月 31 日

论文全文递交日期: 2010 年 4 月 1-6 月 30 日

摘要及论文递交 E-mail 地址: chsndt2008@163.com; chsndt@sh163.net

联系人: 朱亚青, 王莹赞

联系电话: 021-65550277

论文格式请参照《无损检测》杂志要求。凡投稿并进行会议论文交流的第一作者, 将获赠 2010 年上

海世博会门票一张。

本次会议受到以下赞助商的大力支持:

金牌赞助商:



山东济宁模具厂
www.jnmjc-ndt.com



美柯达
www.marktec.com.cn



嘉盛科技
www.jadeshine.com



汕头市超声仪器研究所有限公司
www.siui.com

银牌赞助商:



南通市探神精密仪器有限公司
www.topsonic.cn



上海宏达检测设备有限公司
www.hd-ndt.com

(中国机械工程学会无损检测分会)