

无损检测技术基础知识

(NDT: Non-destructive testing)

华北电力科学研究院有限责任公司

- 概述
- 锅炉的无损检测要求
- 锅炉射线检测
- 锅炉超声波检测
- 锅炉磁粉检测
- 锅炉渗透检测
- 无损检测的质量控制

第一章 概述

一. 无损检测的定义及分类

1、定义

在**不损坏试件**的前提下，以物理或化学方法为手段，借助先进的技术和设备器材，对试件的内部及表面的结构，性质，状态进行检查和测试的方法。

2、方法分类

五大常规方法：

射线检测（RT-Radiographic Testing）

超声检测（UT-Ultrasonic Testing）

磁粉检测（MT-Magnetic Testing）

渗透检测（PT-Penetrant Testing）

涡流检测（ET-Eddy Current Testing）

发展较快的新技术

数字射线检测（CR、DR）

衍射时差法超声检测（TOFD）

相控阵超声检测（PA）

RT: 在德国物理学家伦琴发现X射线后发展起来的;

UT: 在声纳技术和雷达技术的基础上开发出来的;

MT、ET: 建立在电磁学理论的基础上;

PT : 得益于物理化学的进展;

CR、DR : 得益于微电子技术的发展。

TOFD : 在超声衍射理论基础上结合软件技术发展而来;

PA : 在超声理论、相控阵雷达技术基础上结合计算机技术发展而来。

3、发展的三个阶段

✓ 无损探伤 (Non-destructive Inspection)
早期阶段，探测和发现缺陷。

✓ 无损检测 (Non-destructive Testing)
当前阶段，不仅仅发现缺陷，还包括探测缺陷的一些信息，如位置、形状、尺寸、性质等。

✓ 无损评价 (Non-destructive Evaluation)
即将进入或正在进入的新的发展阶段，更广泛，更深刻的内容。发现缺陷，探测缺陷的详细数据，还要求获取更全面，更准确的，综合的信息对试件或产品的质量 and 性能给出全面，准确的评价。

二. 无损检测的目的

- 1、保证产品质量
- 2、保障使用安全
- 3、改进制造工艺
- 4、降低生产成本

发现缺陷、反馈检测结果以改进工艺和控制运行，促进加工过程和使用过程的控制、降低成本和避免事故。

三. 无损检测的应用特点

- 1、无损检测要与破坏性检测相配合
- 2、正确选用实施无损检测的时机
- 3、正确选用最适当的无损检测方法
- 4、综合运用各种无损检测方法

四. 标准：电站设备无损检测常用标准

通用的方法标准、某类部件的方法标准

DL/T 820-2002 管道焊接接头超声波检验技术规程

DL/T 821-2002 钢制承压管道对接焊接接头射线检验技术规程

DL/T 694-2012 高温紧固螺栓超声波检验技术导则

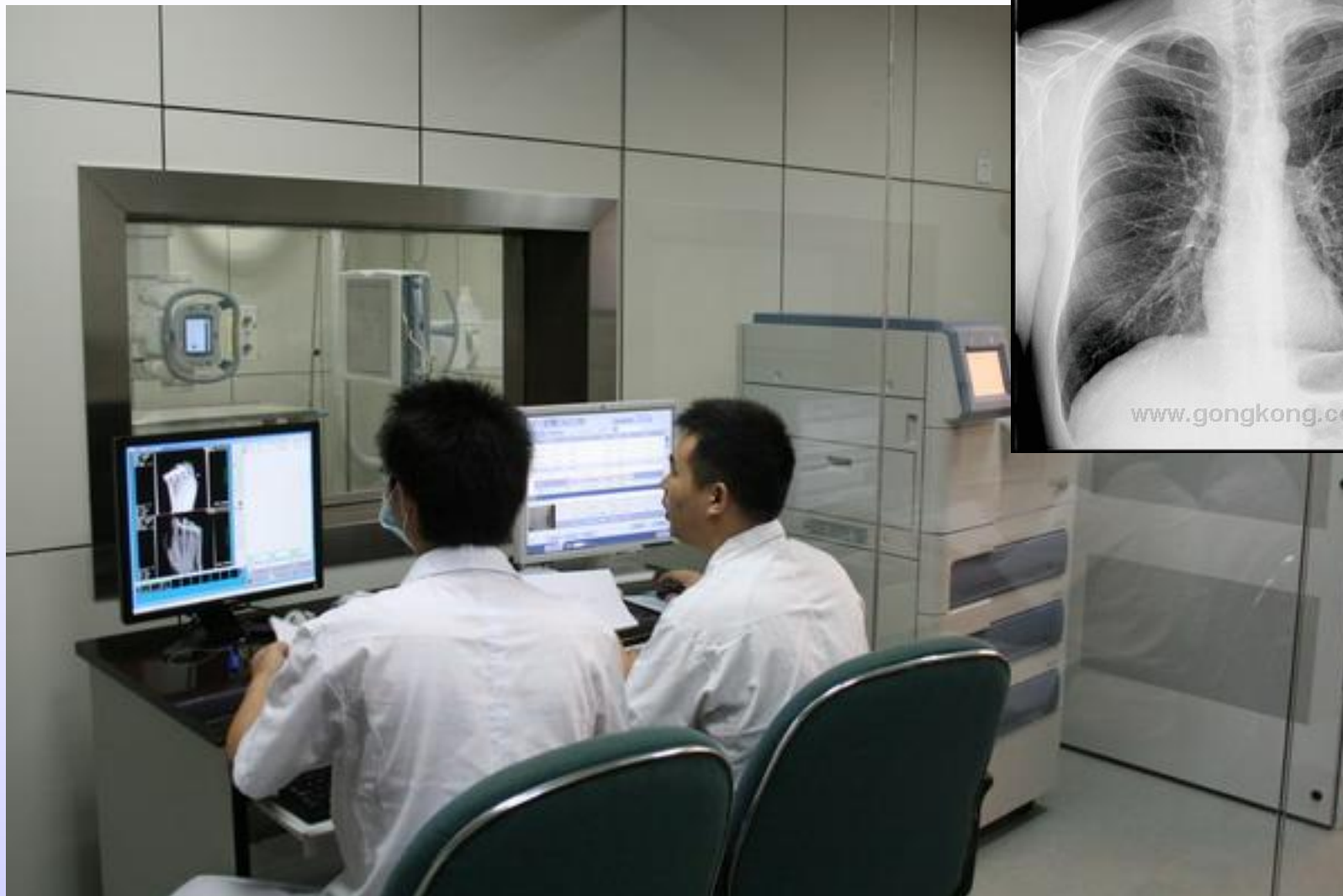
DL/T 297-2011 汽轮发电机合金轴瓦超声波检测

JB/T 10326-2002 在役发电机护环超声波检验技术标准

JB/T 4730-2005 承压设备无损检测

JB/T1581-1996 汽轮机、汽轮发电机转子和主轴锻件超声波探伤方法

.....



医学射线透视



玻璃管周向平靶机



DL-T2000+型



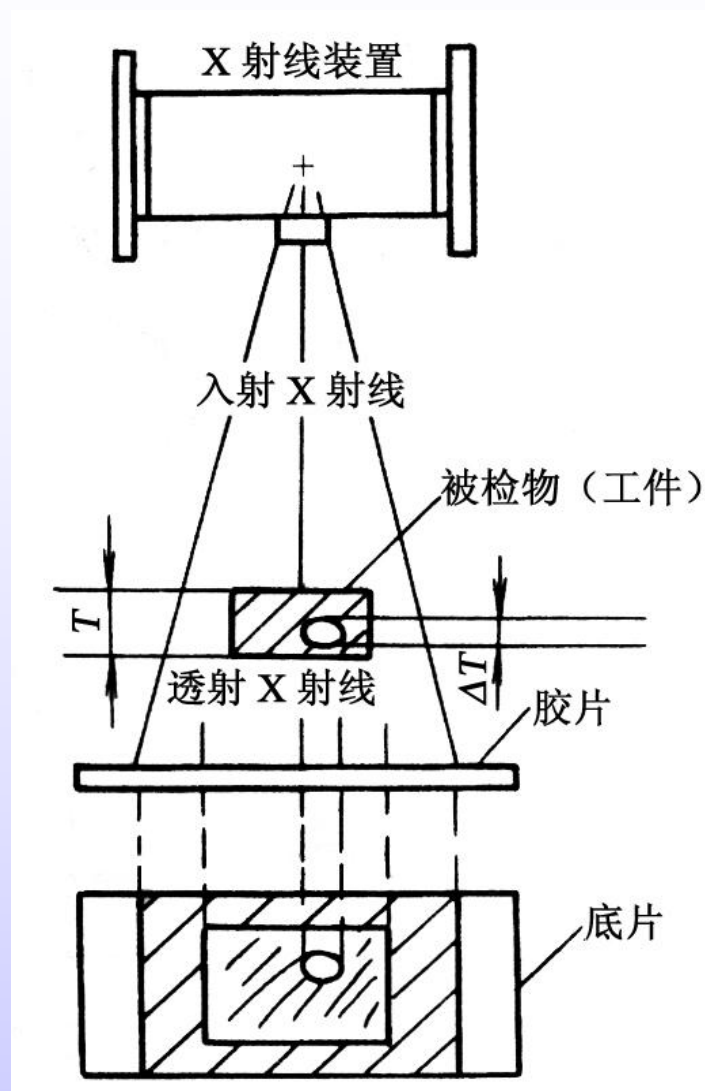
工业射线检测

2022/1/4

一. 射线照相法原理

用X射线或 γ 射线穿透试件，以胶片作为记录信息的器材的无损检测方法。

射线检测最主要是探测试件内部的宏观几何缺陷。



二. 电站设备的射线检测

1、执行标准

DL/T 821-2002钢制承压管道对接焊接接头射线
检验技术规程

JB/T4730.2-2005 承压设备无损检测 第2部分：
射线检测

2、射线检测工艺要点

射源： X射线、 γ 射线

1) X射线的应用特点

X射线**主要优点**： X射线**能量可改变**，因此对各种厚度的试件均可获得高灵敏度图像； X射线机可用**开关切断**，故**较易实施射线防护**；曝光时间短，一般为几分钟。

X射线**局限性**： 需电源，体积较大，现场使用不便，检测成本和维修费用均较大。

设备： **便携式**，160—320**KV**，穿透钢—45**mm**

移动式，200—450KV，穿透钢—100mm

高能X射线**加速器**： 4—32MeV，穿透钢—400mm

2) γ 射线的应用特点

γ 射线**主要优点**：射源**尺寸小**，可用于X射线机无法接近的现场；**不需电源**；运行费用低。

γ 射线**局限性**：探伤**灵敏度低**，尤其对薄钢试件（如5mm以下）；曝光时间长。

γ 射线的成像质量比X射线差得多。

影响射线照相的三大要素：对比度、清晰度、颗粒度， γ 射线均不如X射线。

对裂纹倾向大的材料焊缝检测应慎用 γ 射线。

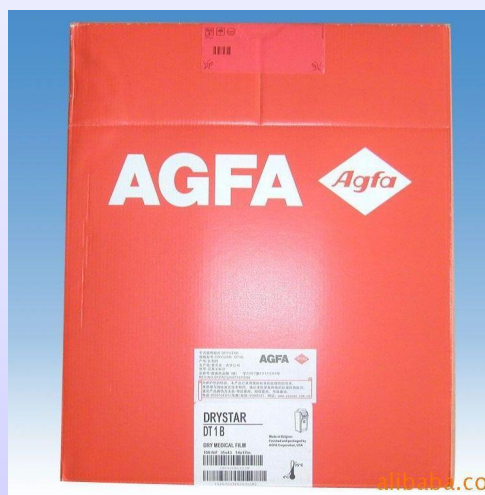
3) 胶片应用特点

胶片影响成像对比度和颗粒度进而影响灵敏度。

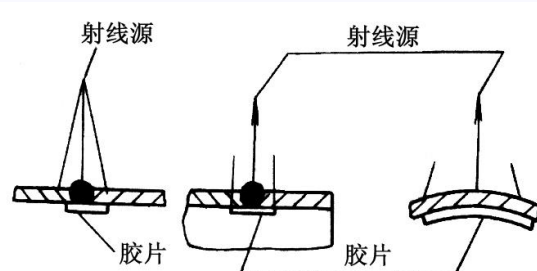
依据成像特性，胶片分成四类，T1、T2、T3、T4。

T1为最高类别，T4为最低类别。

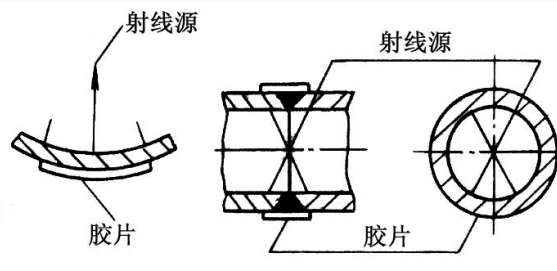
采用 γ 射线对裂纹敏感性大的材料进行射线检测时，应采用高类别的胶片。



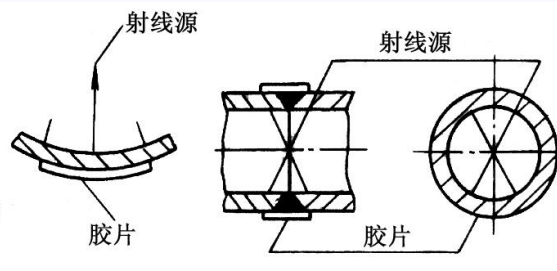
4) 透照方式选择



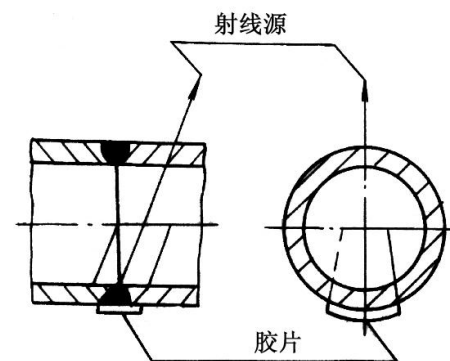
(a) 纵缝透照法



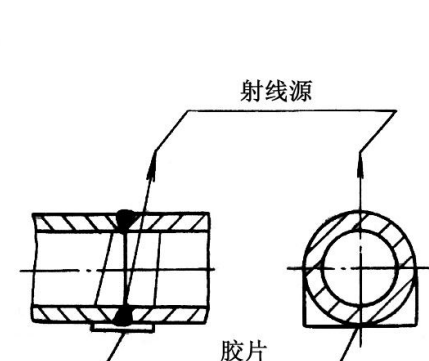
(b) 环缝外透法



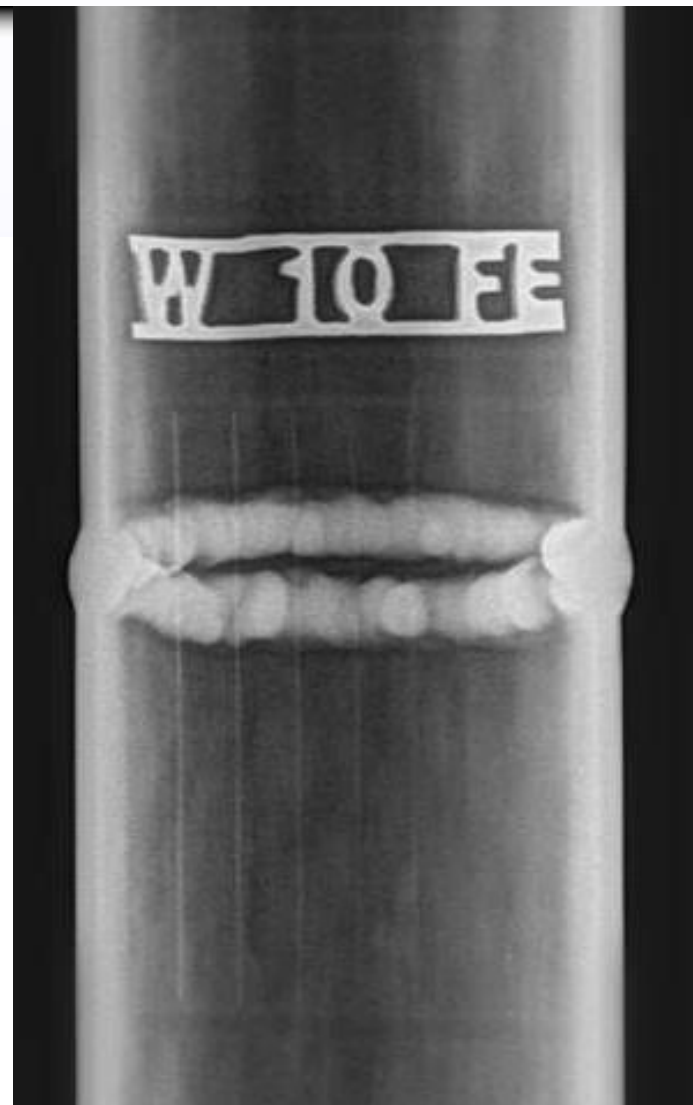
(c) 环缝内透法



(d) 双壁单影法



(e) 双壁双影法





5) 底片质量要求

□底片上定位和识别标记——齐全、影像显示完整、位置正确；

□底片评定范围内的黑度 D ——应符合下列规定：

A 级： $1.5 \leq D \leq 4.0$ AB级： $2.0 \leq D \leq 4.0$ ； B 级
 $2.3 \leq D \leq 4.0$

□底片的像质计灵敏度满足标准要求；

□底片评定范围内不应存在干扰缺陷影像识别的水迹、划痕、斑纹等伪缺陷影像。

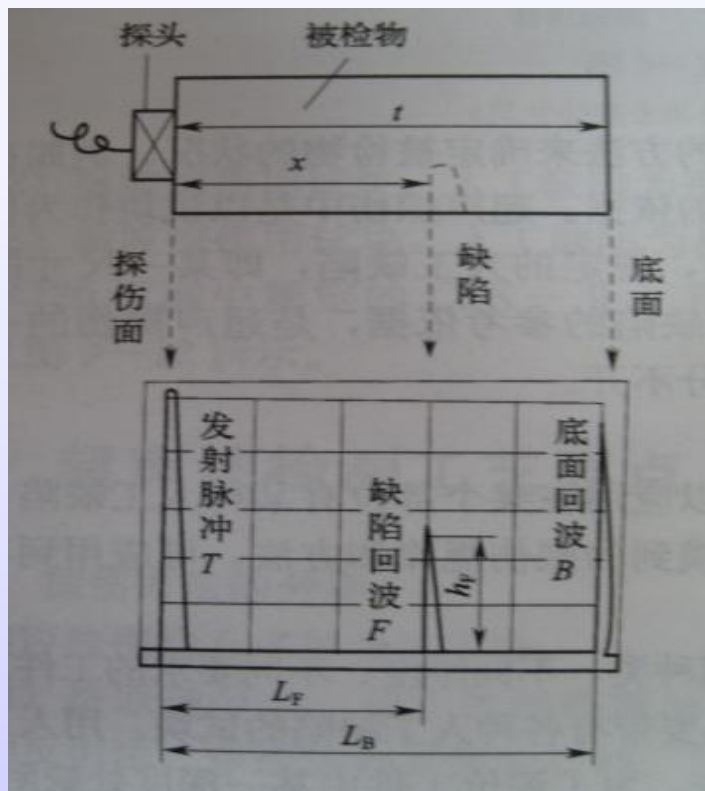
6) 射线照相法的特点

- a) 检测结果有直接记录-底片；
- b) 可以获得缺陷的投影图像，缺陷定性定量准确；
- c) 对体积型缺陷检出率高，而面积型缺陷的检出率受到多种因素影响；
- d) 适于检测厚度较薄的工件而不适合较厚的工件；
- e) 适宜检测对接焊缝，检测角焊缝效果较差，不适宜检测板材、棒材、锻件；
- f) 有些试件结构和现场条件不适合射线照相；
- g) 对缺陷在工件中厚度方向的位置、尺寸（高度）的确定比较困难；
- h) 检测成本高、射线照相检测速度慢；
- i) 射线对人体有害。

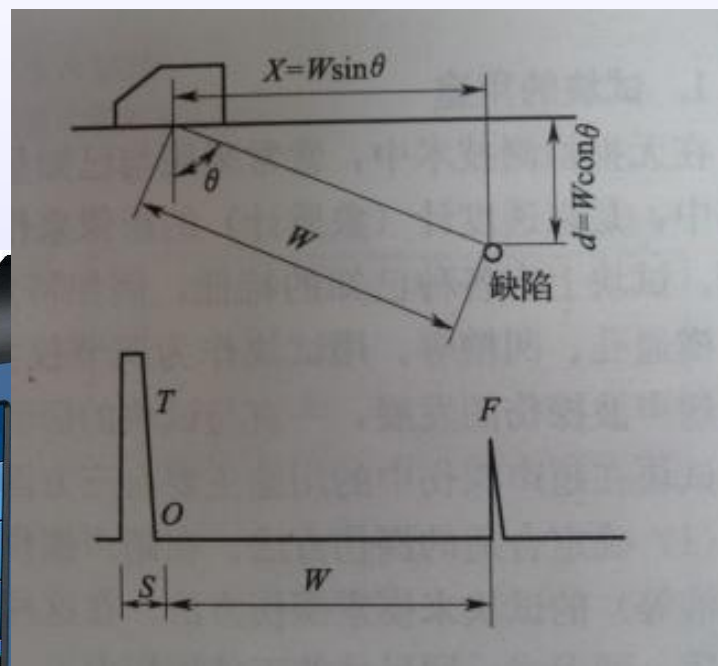
超声波检测常规方法——A型脉冲反射超声波检测

一. 超声波检测的原理

垂直探伤法



斜射探伤法



二. 电站设备的超声检测

1、执行标准

DL/T 820-2002 管道**焊接接头**超声波检验技术规程

DL/T 694-2012 高温紧固**螺栓**超声波检验技术导则

DL/T 297-2011 汽轮发电机合金**轴瓦**超声波检测

DL/T 714-2000 汽轮机**叶片**超声波检验技术导则

DL/T 717-2000 汽轮发电机组**转子中心孔**检验技术导则

JB/T 10326-2002 在役发电机**护环**超声波检验技术标准

JB/T 4730.3-2005 承压设备无损检测 超声检测

JB/T 9630.2-1999 汽轮机**铸钢件**的超声波探伤及质量分级方法

.....

2、适用范围

锅炉、压力容器及管道用原材料、零部件、焊缝

汽轮机发电机等零部件的检测

.....

三. 超声检测

1. 超声检测工艺要素

- 1) 探伤**方法**的选择(纵波、横波、表面波、爬波、导波)；
- 2) 仪器、**探头**的选择(种类、频率、晶片尺寸、折射角)；
- 3) **试块**的选择(标准试块, 反射体种类: 平底孔、横孔、槽; 参考试块: 人工缺陷和自然缺陷)
- 4) 探伤**灵敏度**的选择(扫查, 缺陷定量)
- 5) 耦合剂选择(水、油、浆糊)
- 6) 探伤方向(与缺陷尽量垂直)和扫查面的选择(焊缝: 一面两侧和两面四侧, 足够大的宽度)
- 7) **探伤时机**的选择(有冷裂纹倾向的焊缝: 焊后24小时; 锻件: 粗加工后)

2、对接焊缝、角焊缝超声检测

1) JB/T4730.3-2005标准适用的厚度范围

适用于母材厚度为8mm - 400mm全熔化焊对接接头

DL/T 820-2002标准适用于电力行业制作、安装和检修设备时铁素体类钢制承压管道单面焊接双面成型的中厚壁管、中小径薄壁管焊接接头的手工A型脉冲反射法超声波检验。（4mm以上）

2) 超声检测技术等级

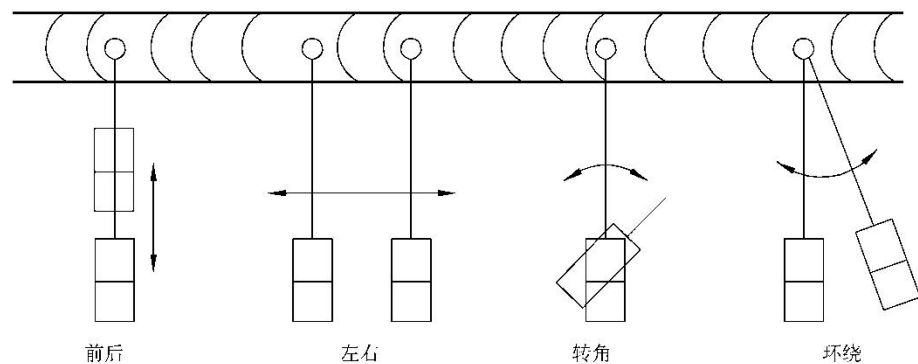
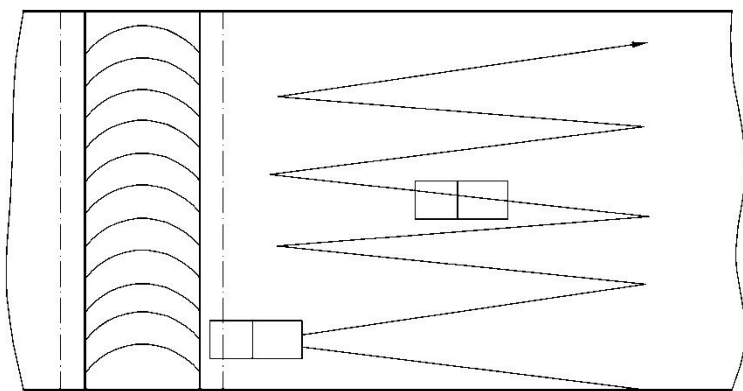
超声检测技术等级分为A、B、C三个技术等级

选择应符合制造、安装、在用等有关规范、标准及设计图样规定。

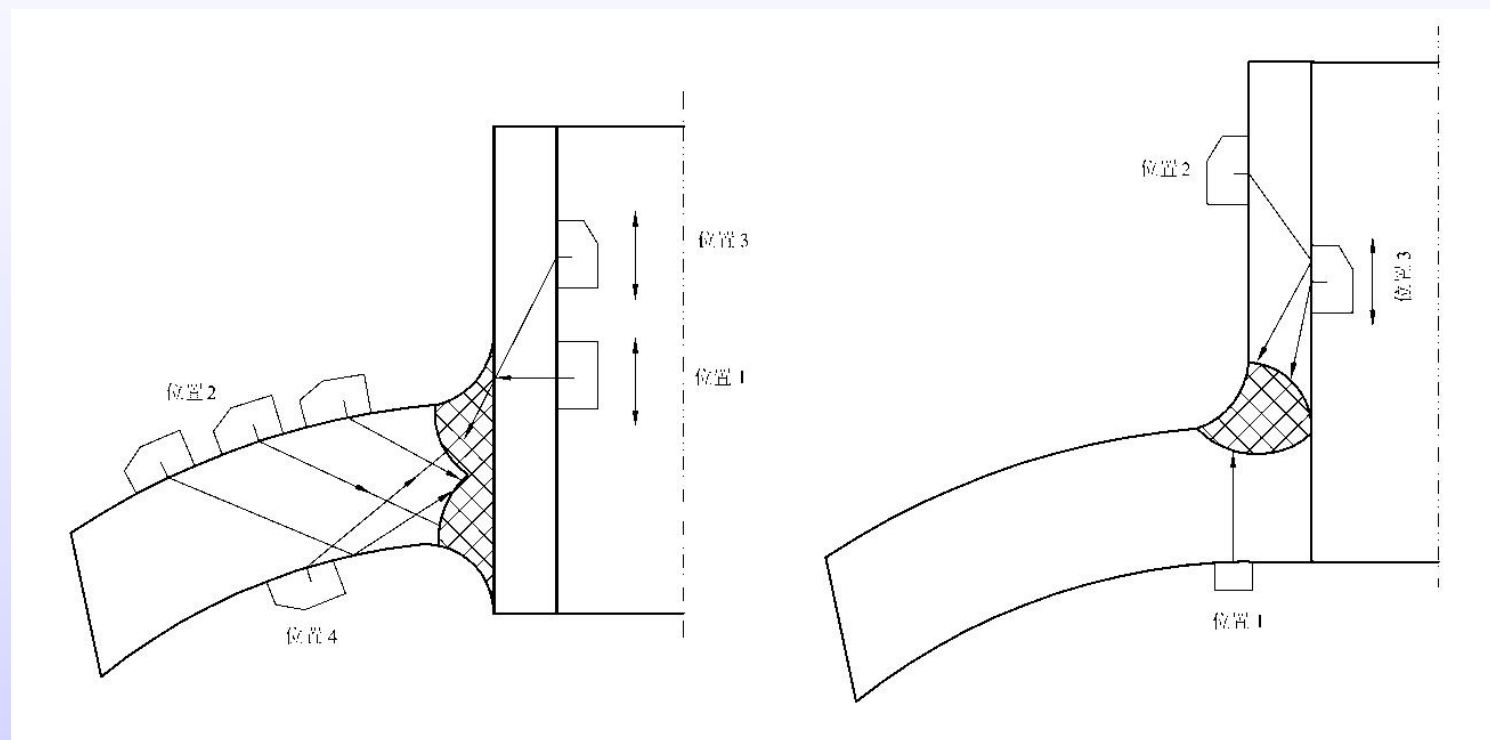
3) 探头的扫查方式

对接焊缝的扫查方式:

锯齿型扫查、 45° 的斜向扫查；另外还有前后、左右、转角、环绕四种基本扫查方式。



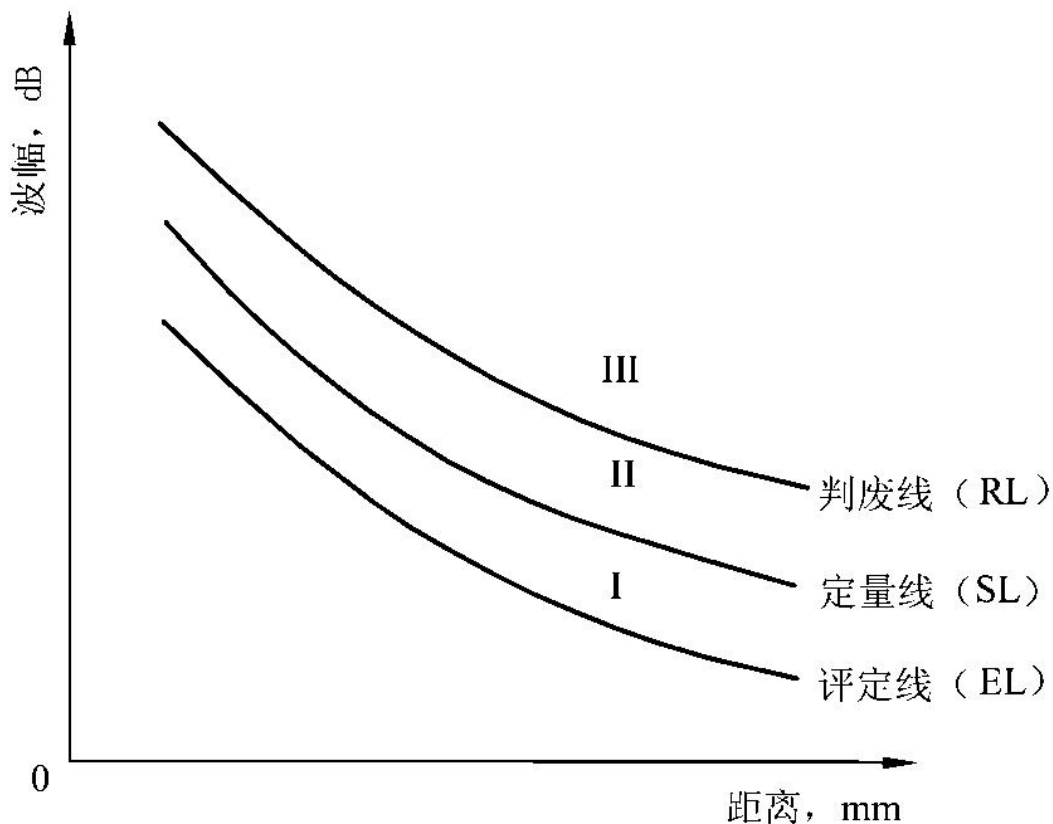
角焊缝的扫查方式： 前后移动探头为主。



4) 缺陷的评定

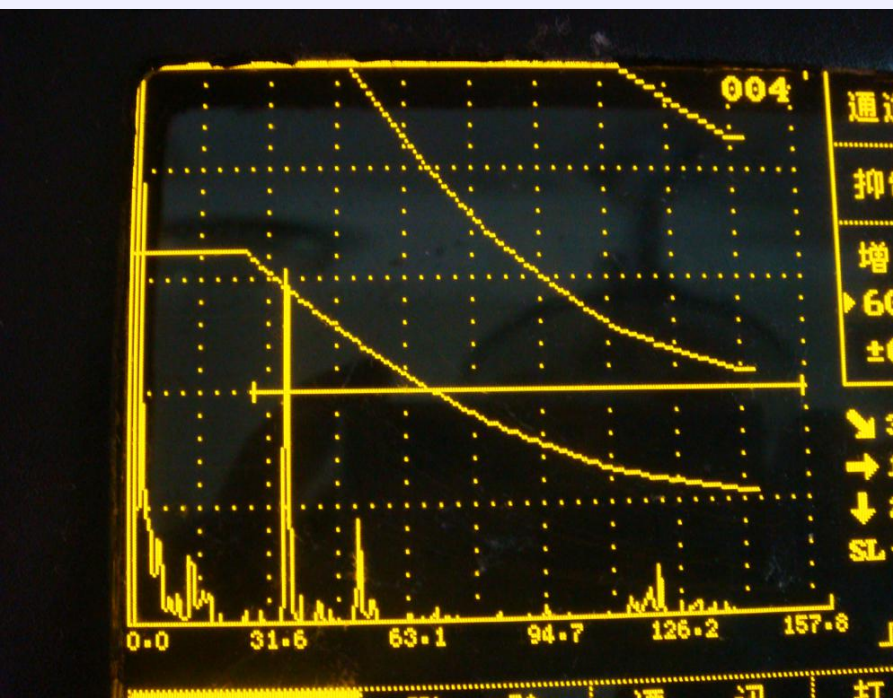
a) 定性：裂纹、未熔合等危害性缺陷评定为IV级；

b) 定量：波幅
波幅+长度



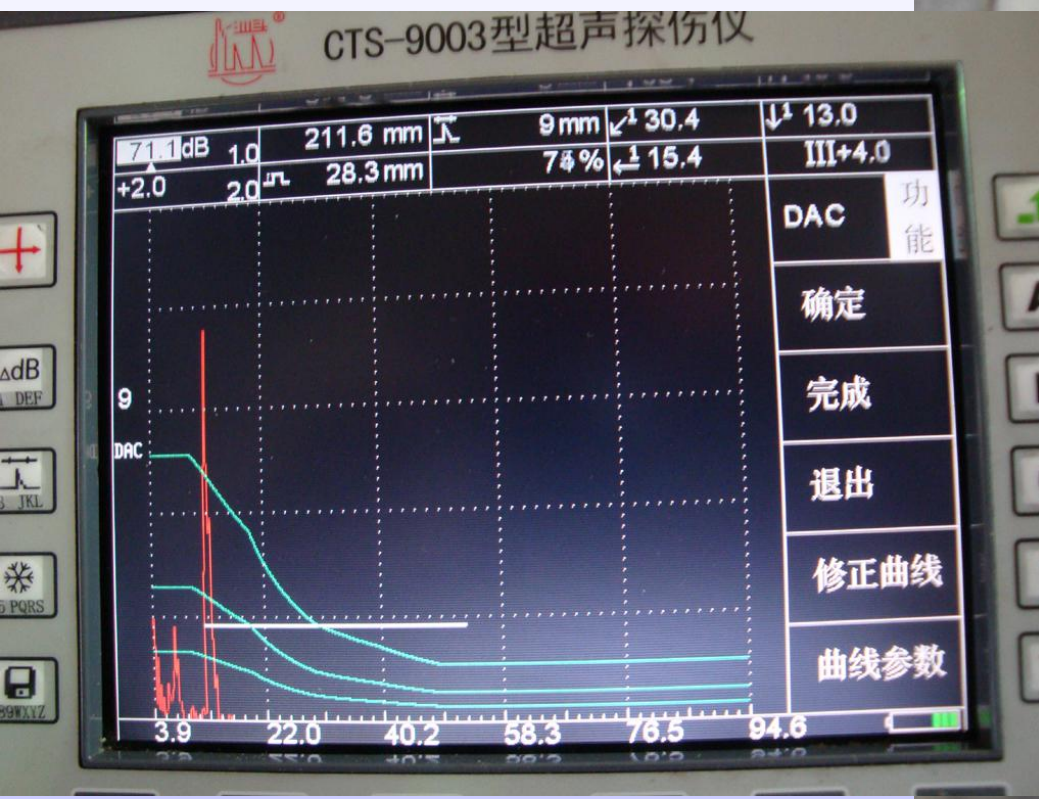
a) 定性

- ❖ 材质：A335P91
- ❖ 焊接方法：氩弧打底，手工填充盖面。
- ❖ 超声检验判定为裂纹，

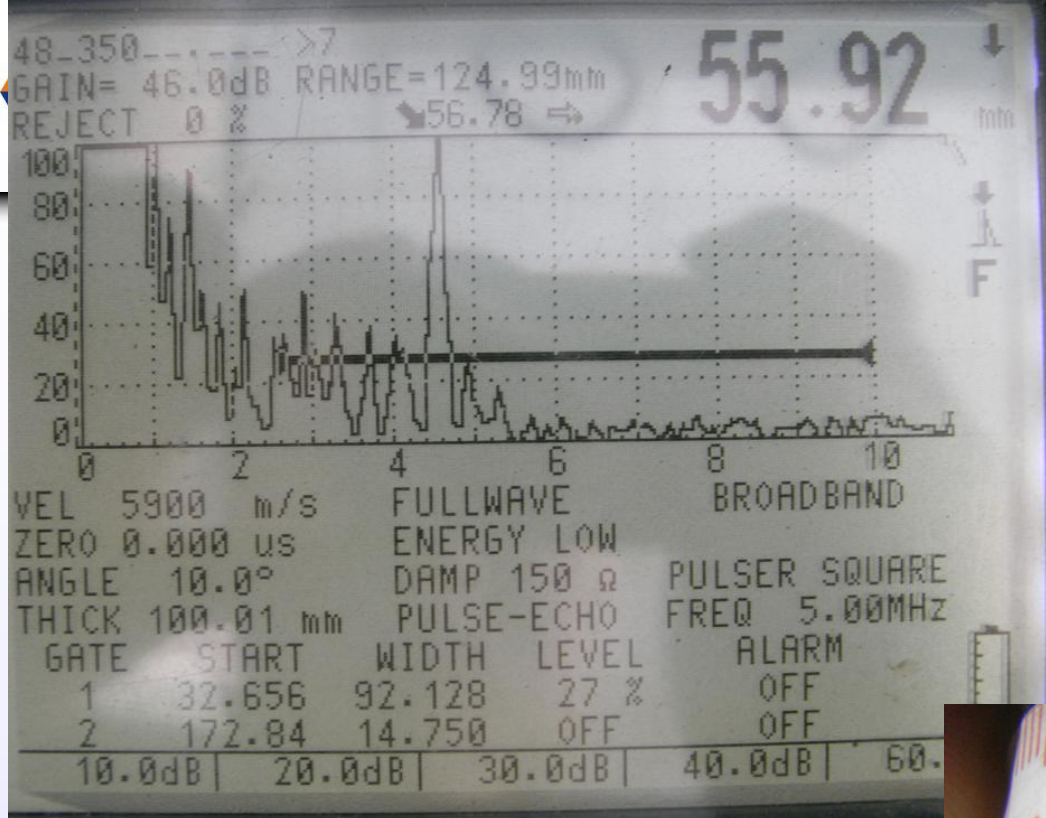


b) 定量 ----波幅

- ❖ 说明：某厂三号机热段规格：ID883X46 A335P92
- ❖ 焊接方法：氩弧打底，手工填充盖面。
- ❖ 超声检验判定为裂纹，







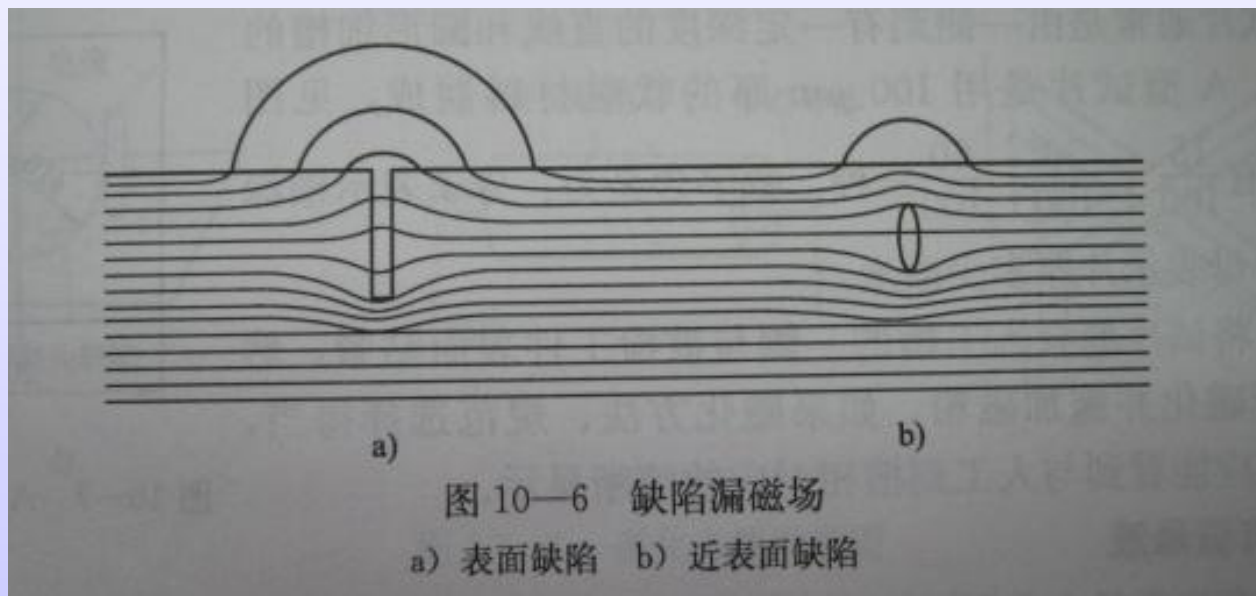
螺栓超声波检测



第四章 磁粉检测

一. 磁粉检测的原理

试件中的裂纹造成的不连续性使得磁力线畸变，由于裂纹中空气介质的磁导率远远低于试件的磁导率，使磁力线受阻，一部分磁力线挤到缺陷的底部，一部分穿过裂纹，一部分排挤出工件的表面后进入工件。如果这是在工件上撒上磁粉，漏磁场就会吸附磁粉，形成与缺陷形状相近的磁粉堆积，从而显示缺陷。



二. 电站设备的磁粉检测

1、执行标准

JB/T4730.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测

GB/T 9444-2007 铸钢件磁粉检测

JB/T 9630.1-1999 汽轮机铸钢件的磁粉探伤及质量
分级方法

JB/T 8468-1996 锻钢件磁粉检验方法

2、适用范围

适用于**铁磁性材料**制承压设备的原材料、零部件和焊接接头表面、近表面缺陷的检测，不适用于奥氏体不锈钢和其它非铁磁性材料的检测。

应用范围广。

3、磁粉检测

1) 磁化方法

线圈法、磁轭法、轴向通电法、触头法、中心导体法、旋转磁场磁化法



便携式磁粉检测仪

2) 磁粉探伤方法分类

按检验时机分为连续法和剩磁法

按使用的电流种类可分为交流法、直流法

按施加磁粉的方法分类可分为湿法和干法

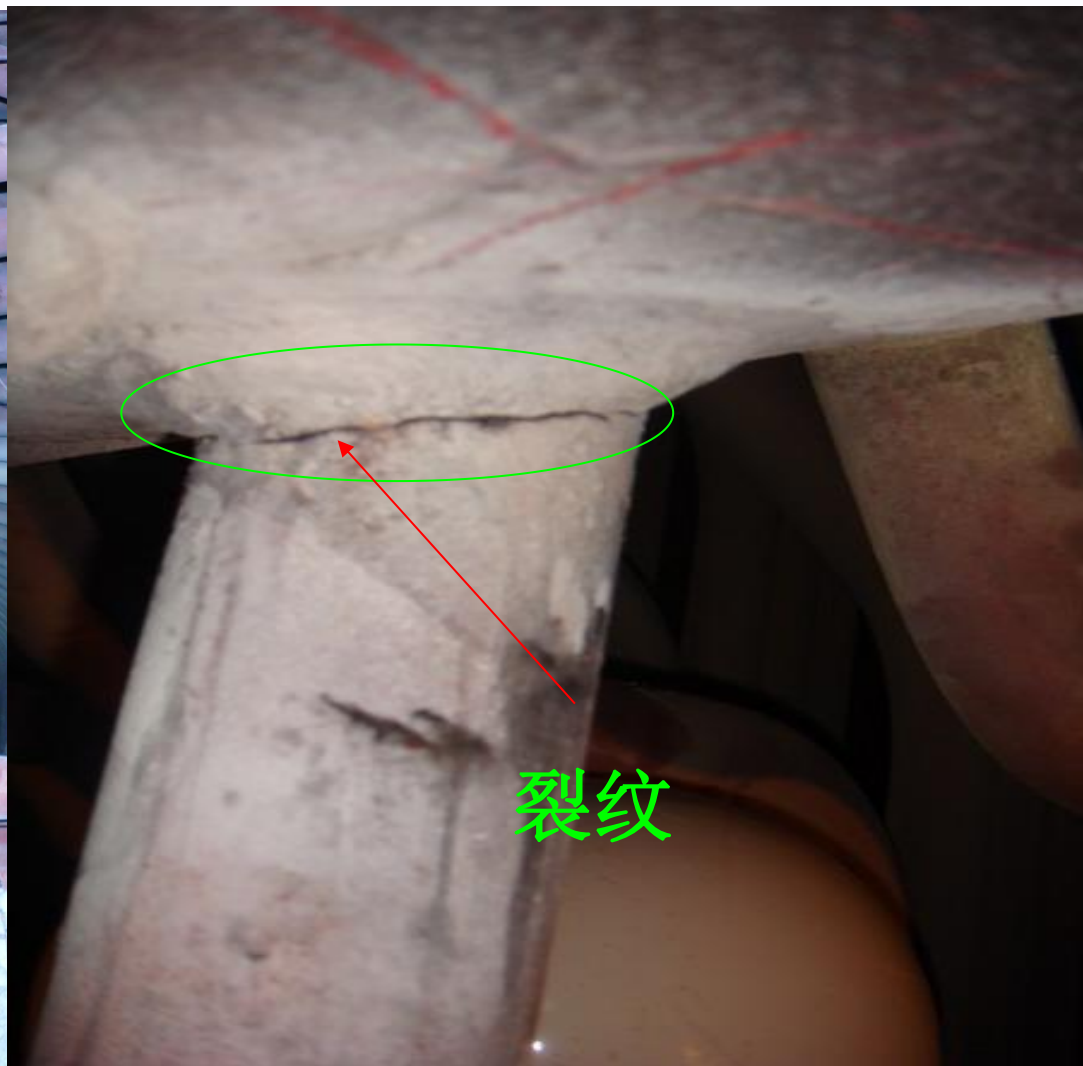
电站设备常用检测方法：磁轭磁化、连续法、交流电、湿法；

部分**薄壁**设备采用：直流电磁化。

一般不采用的检测方法：剩磁法，干法。



图三 管座角焊缝管座侧热影响区开裂



某厂中压主汽门阀体缺陷

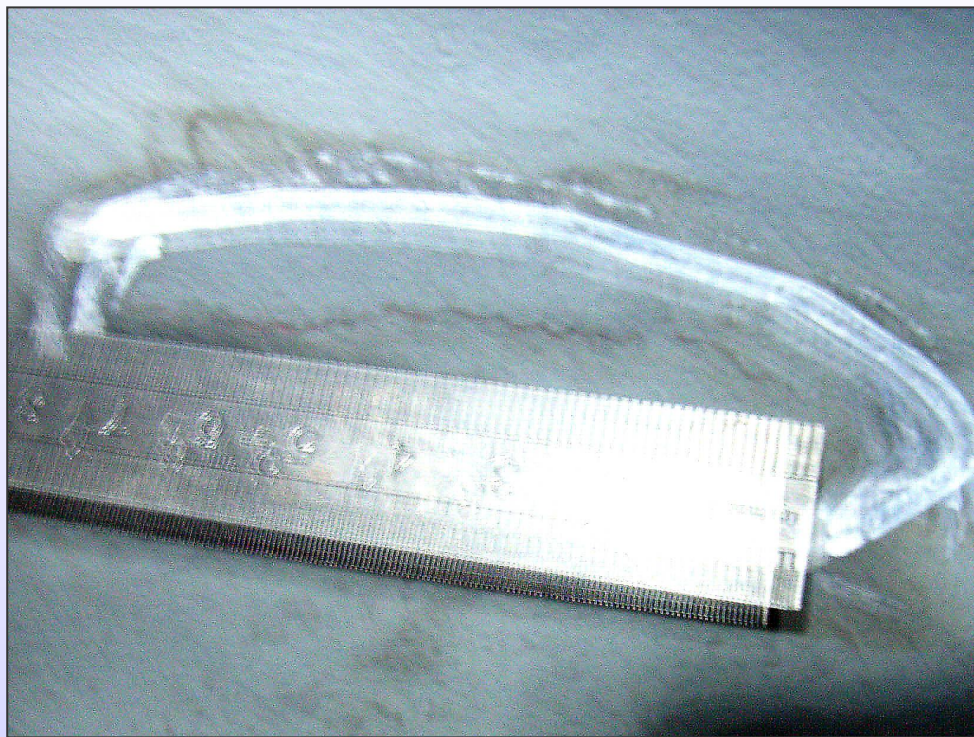


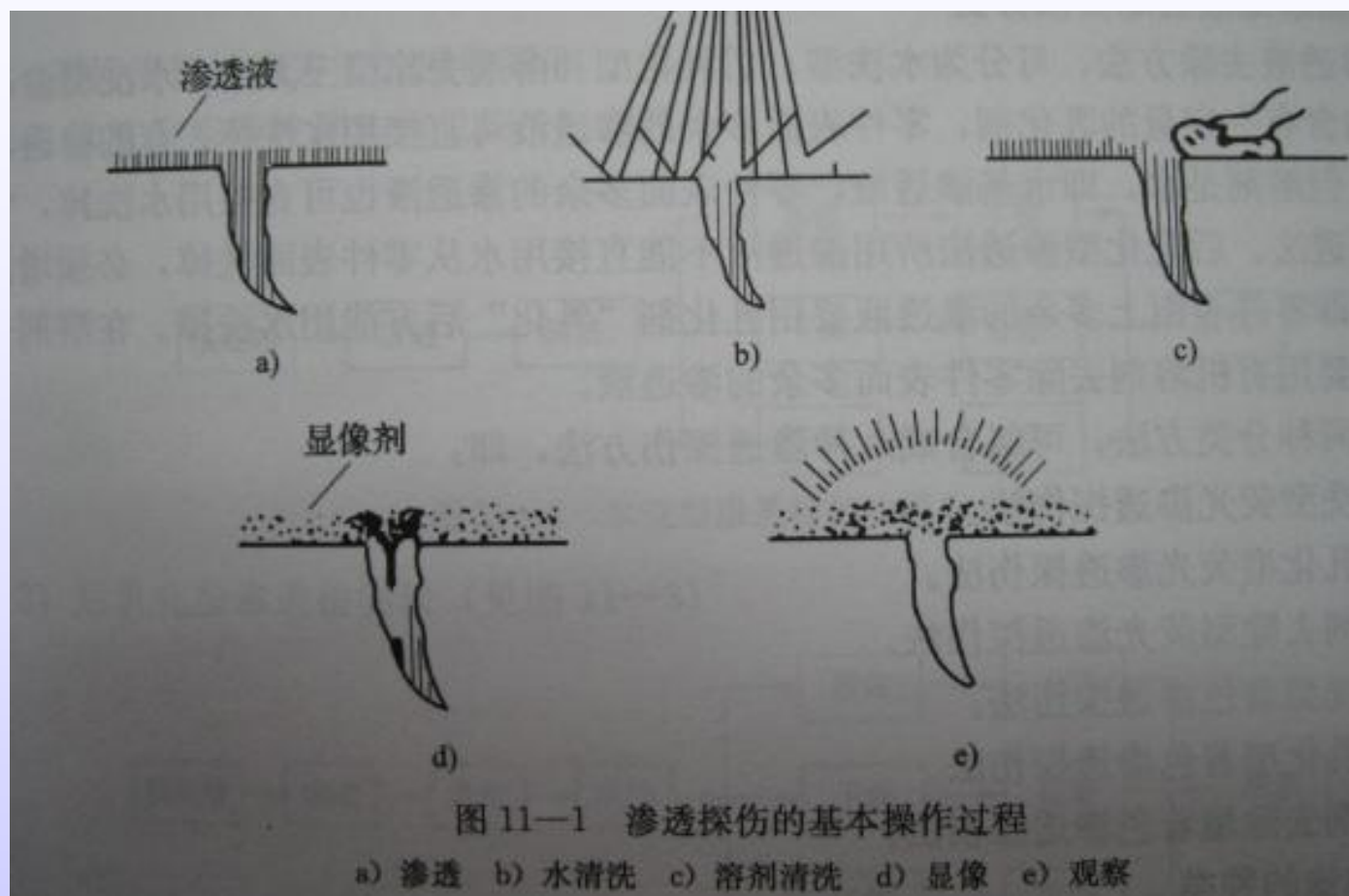
图3—1 条形磁痕显示长75mm

第五章 渗透检测

一. 渗透检测的原理

零件表面被施涂含有荧光染料或着色染料的渗透液后，在毛细管的作用下，经过一段时间，渗透液可渗透到表面开口的缺陷中，经去除零件表面多余的渗透液后；再在零件表面施涂显象剂，同样在毛细管的作用下，显象剂将吸引缺陷中保留的渗透液，渗透液回渗到显象剂中；在一定光源下，缺陷处的渗透液痕迹被显示，从而测出缺陷的形貌和分布状态。

渗透探伤基本操作过程：渗透、清洗、显象、观察



二. 电站设备的渗透检测

1、执行标准

JB/T4730.5 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测

GB/T 9443-2007 铸钢件渗透检测

JB/T 9218-2007 无损检测渗透检测

2、适用范围

适用于非多孔性金属材料或非金属材料；
只可检出开口型缺陷。

对铁磁性材料的检测低于磁粉检测方法。

护环、发电机风叶、轴瓦；
叶片、叶根、焊缝等等

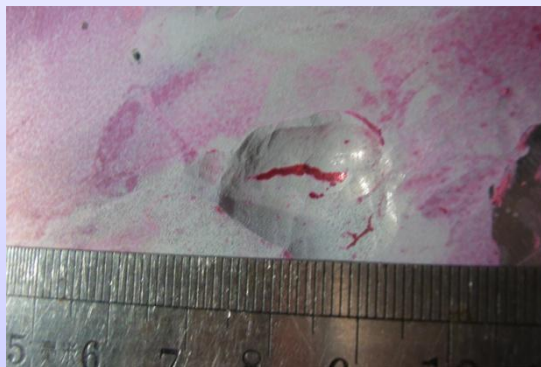
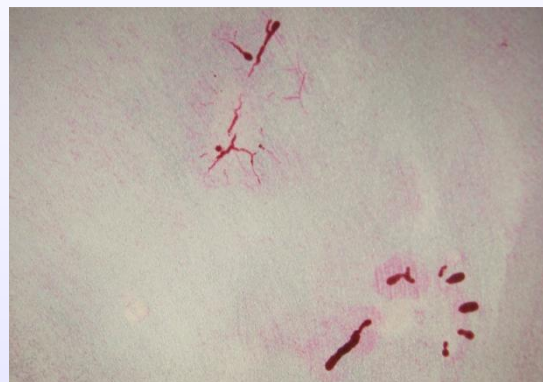
3、渗透探伤工艺要点

- (1) 预处理质量;
- (2) 渗透时间;
- (3) 渗透温度;
- (4) 清洗方法;
- (5) 显象时间。

4、渗透探伤注意事项

- (1) 预处理时要在试件上造成充分润湿条件
- (2) 确定适当的渗透时间
- (3) 清洗时只需除去覆着在试件上的渗透液，不要过度清洗
- (4) 干式显象前进行干燥时，要有合适的干燥温度

某厂护环PT检测 缺陷检测与消缺过程中的PT照片：



无损检测新技术

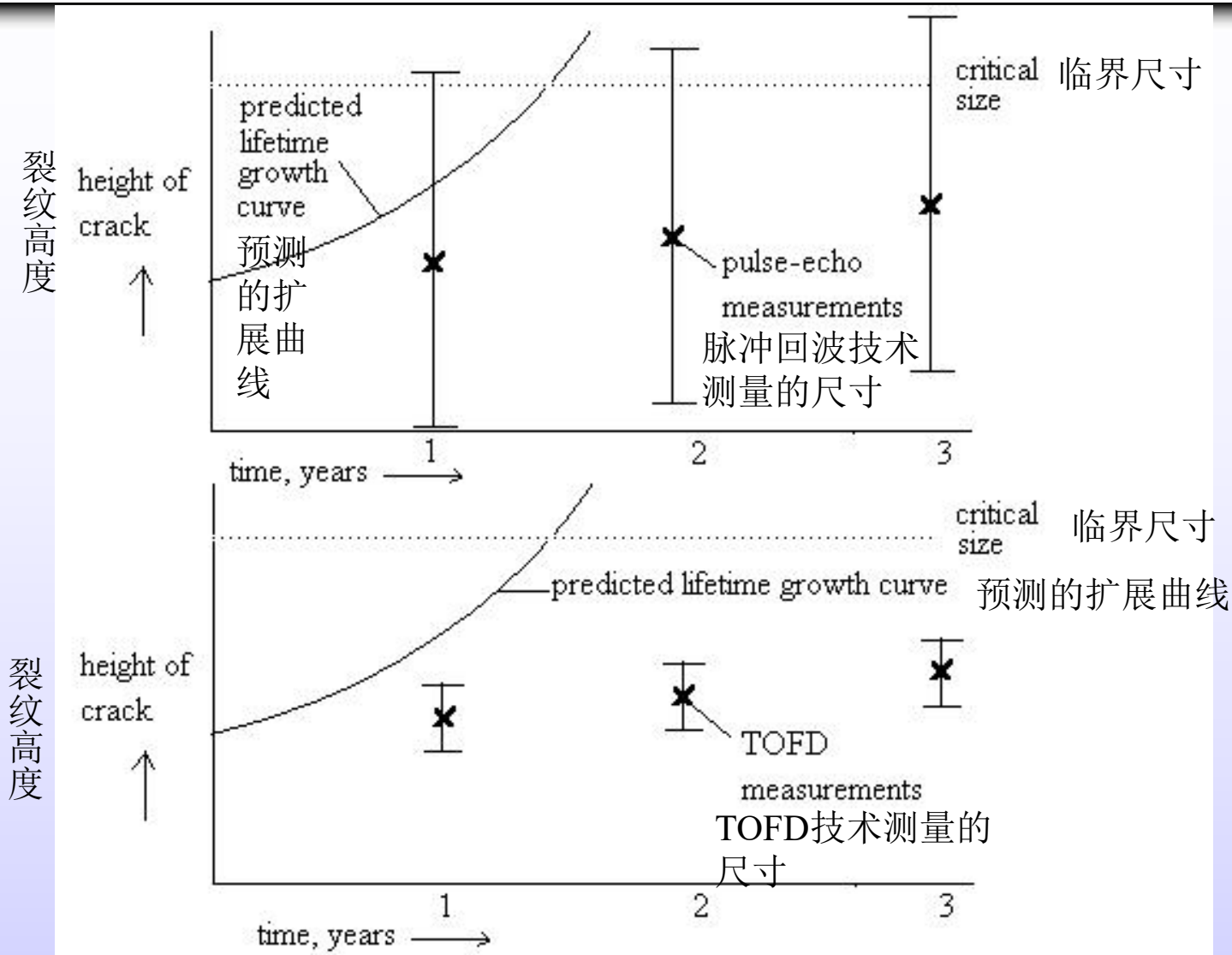
- 1、衍射时差法超声检测 (TOFD)
- 2、相控阵超声检测 (PA)

- ◆ 衍射时差法超声波检测 (Time of Flight Diffraction):
一般采用一发一收两个探头工作模式, 通过接收缺陷端点的衍射波或反射波信号探测和定量缺陷的一种超声检测方法。

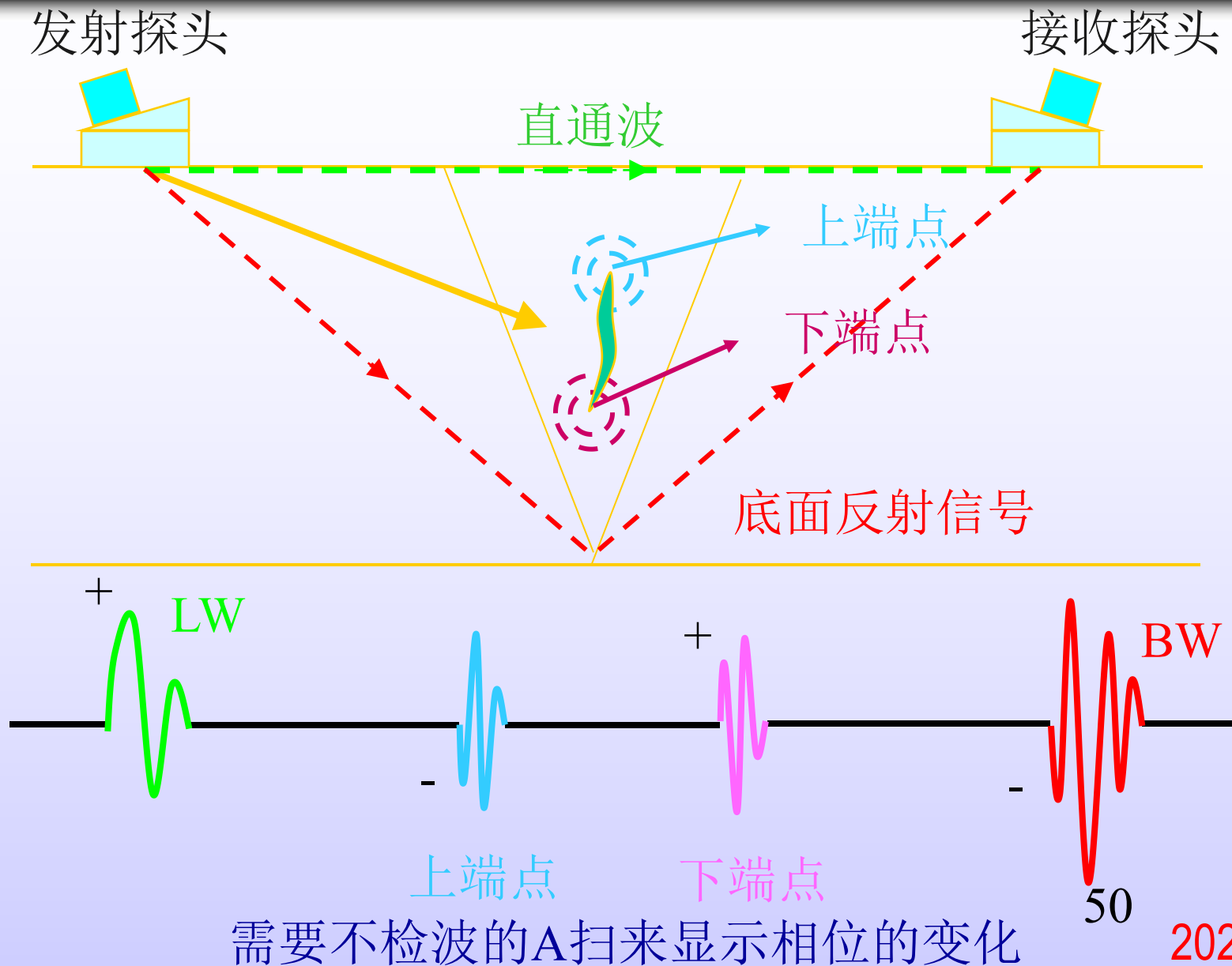
TOFD能精确定量:

高度测量精度为正负1毫米,
监测裂纹扩展能力为正负0.3毫米;

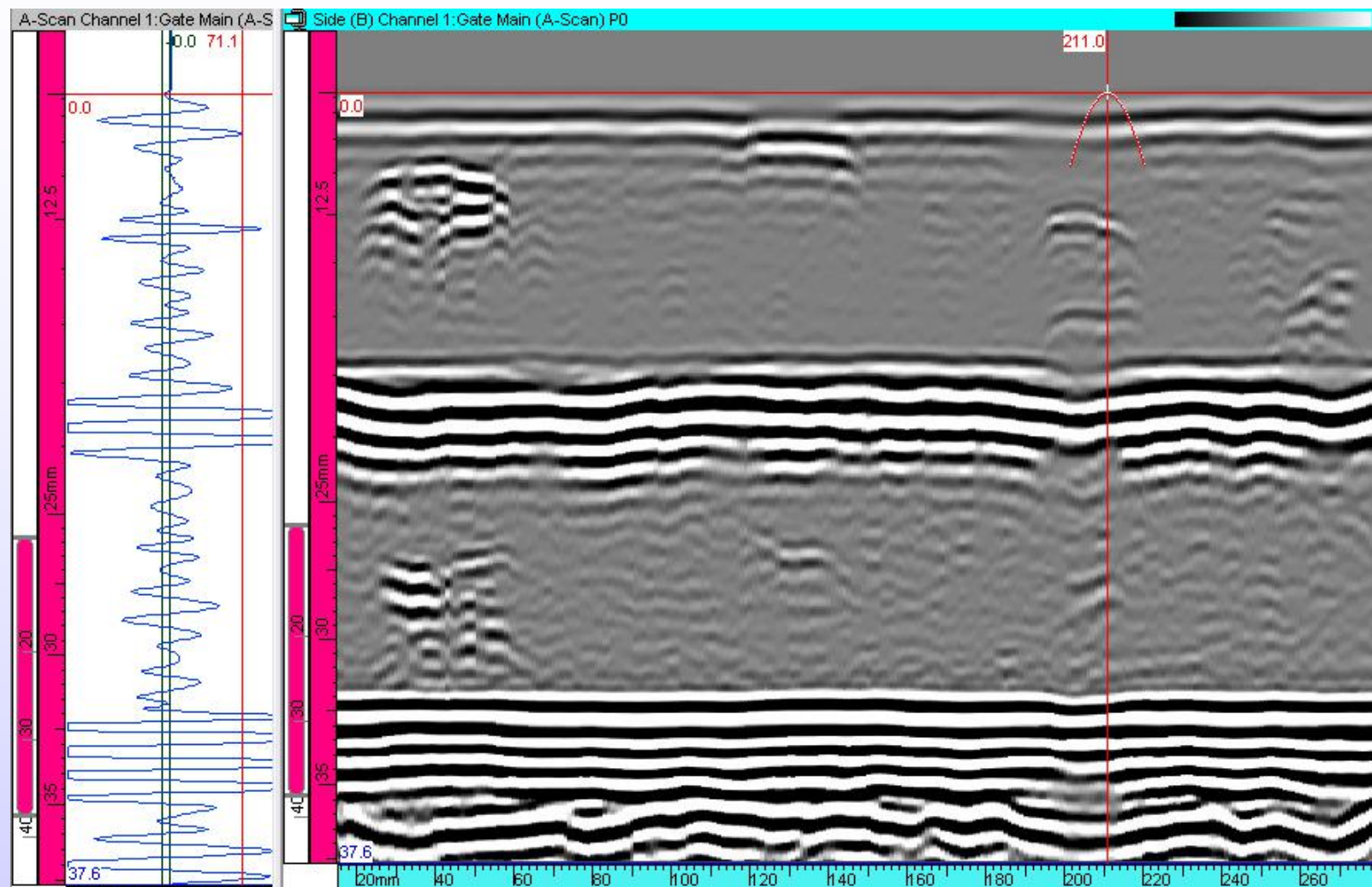
精确定量的重要性



典型设置



TOFD典型成像



⑩ TOFD的主要优点在于:

- 1.高度测量精度为正负1毫米,监测裂纹扩展能力为正负0.3毫米;
- 2.有效探测各向缺陷;
- 3.对通过检查数据提供永久的数字记录;
- 4.对大小缺陷都很敏感。

⑩ TOFD的主要缺点在于:

- 1.选择需要记录的缺陷时没有简单的幅值判据;
- 2.所有的TOFD检查数据都要进行分析以便选择需记录的缺陷;
- 3.不太适用于检查表面的缺陷,因为它有可能被直通波掩盖,且探测表面附近的缺陷的高度方向的精度会下降;

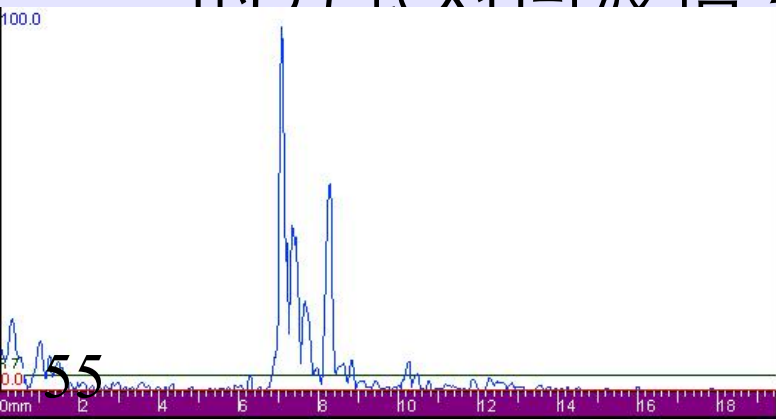
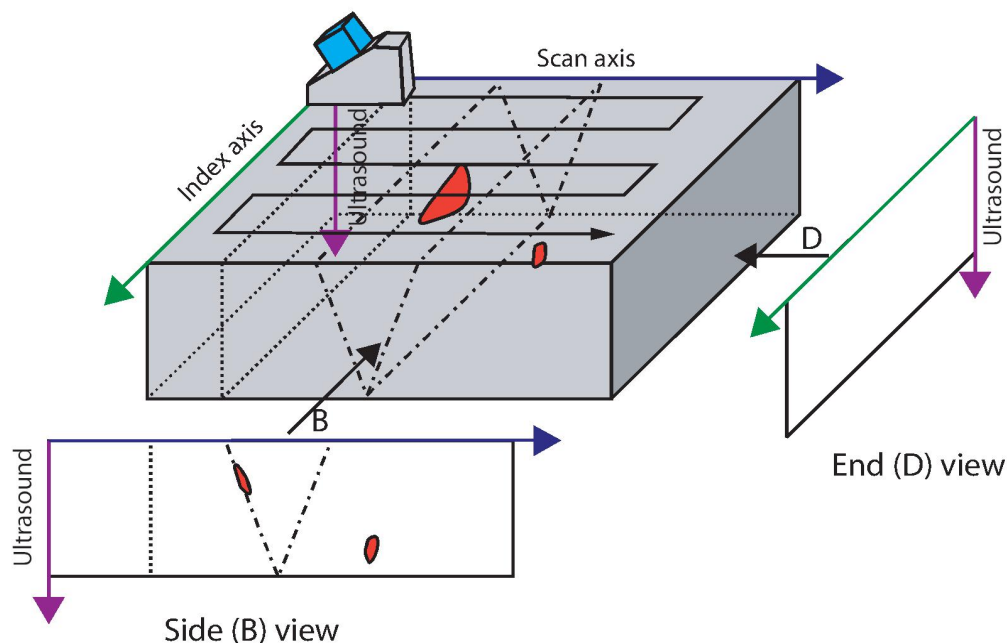
- 4.底面的小缺陷可能会隐藏在盲区内；
- 5.将TOFD作为唯一的检测手段存在一定的风险。
可在同一个扫查架上固定自动脉冲反射或相控阵探头探测TOFD的检测盲区，同时使用数据采集系统和分析软件使数据可视化。

相控阵技术优势

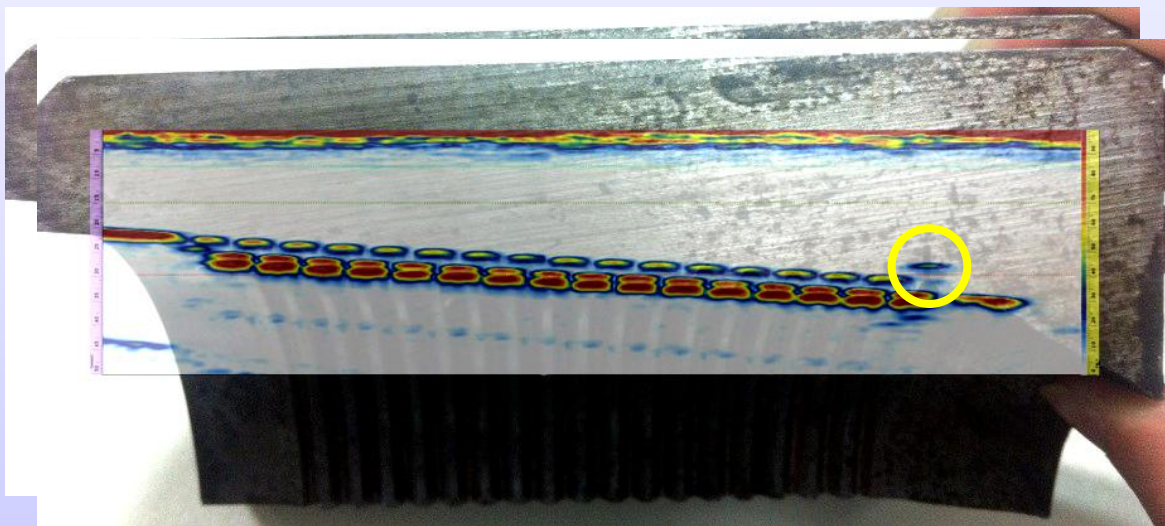
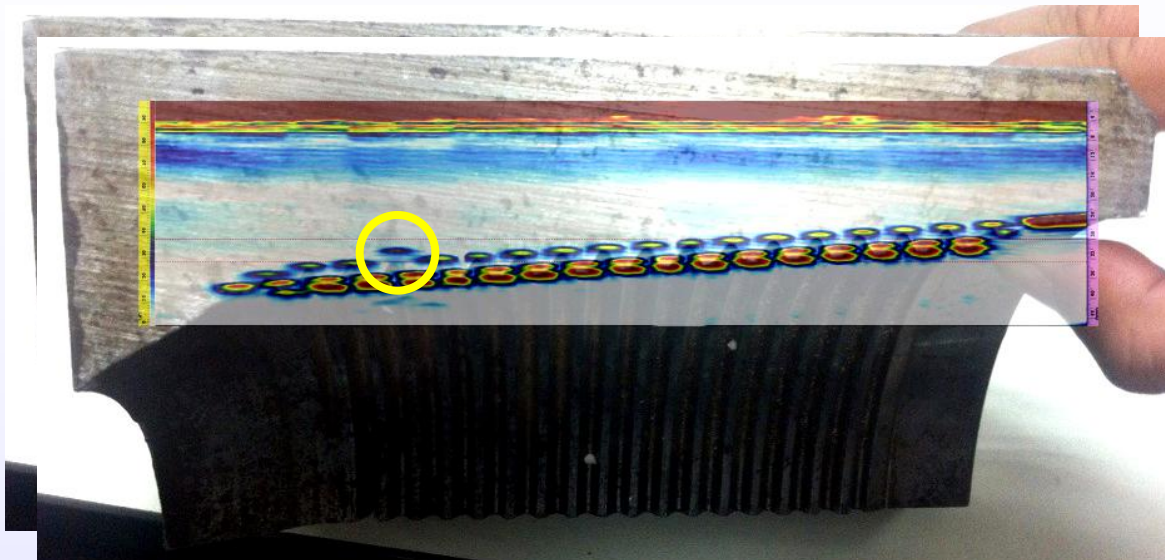
1) 检测结果可多角度成像

相控阵超声检测一个重要用途就是**超声成像**。

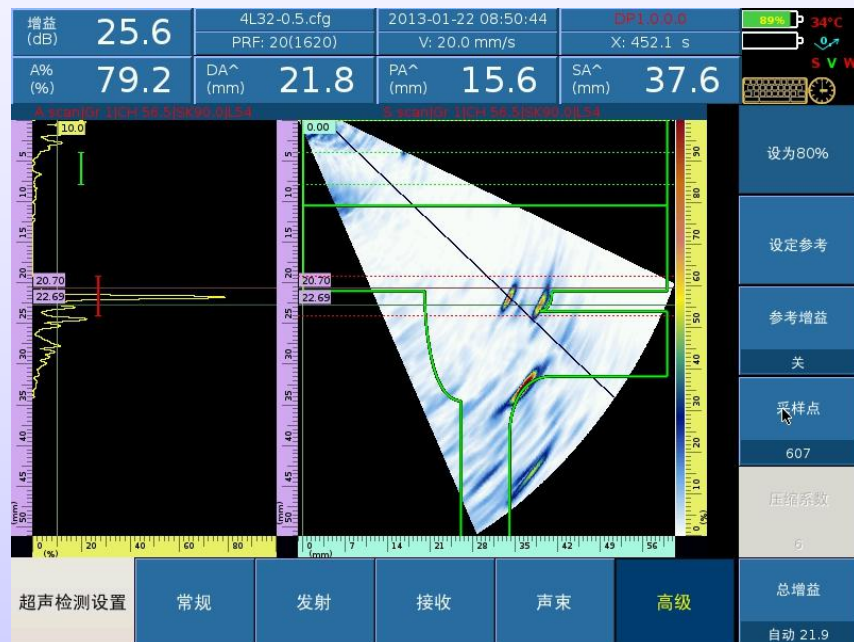
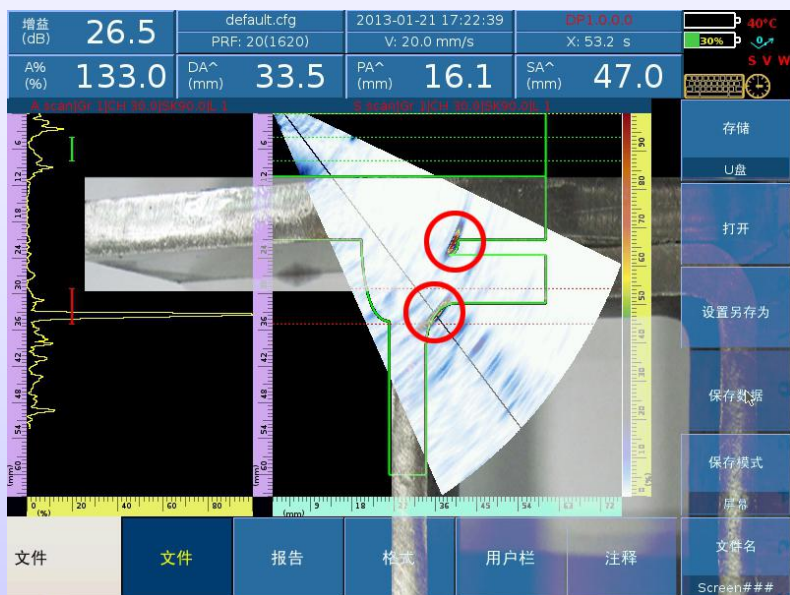
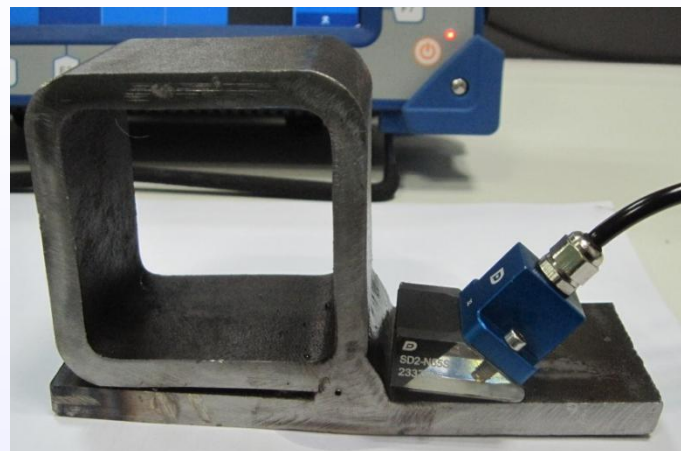
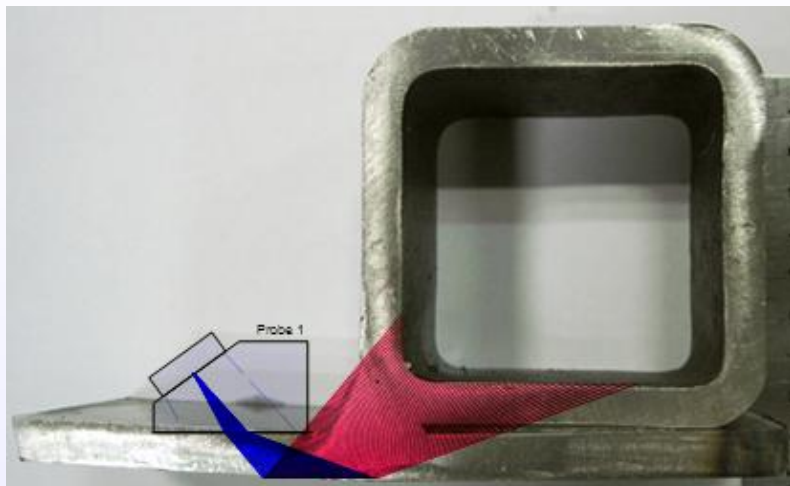
这得益于它很好的声束扫描特性，通过电子控制的方式进行发射，声束覆盖相当范围的区域，从而对回波信号进行多角度成像。



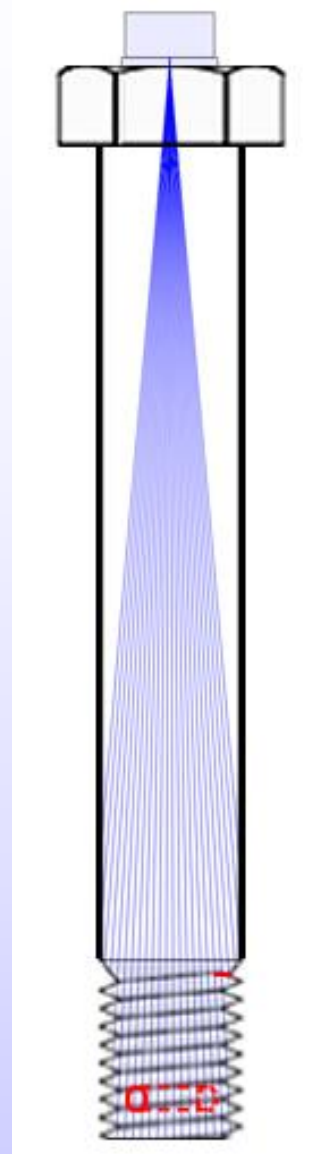
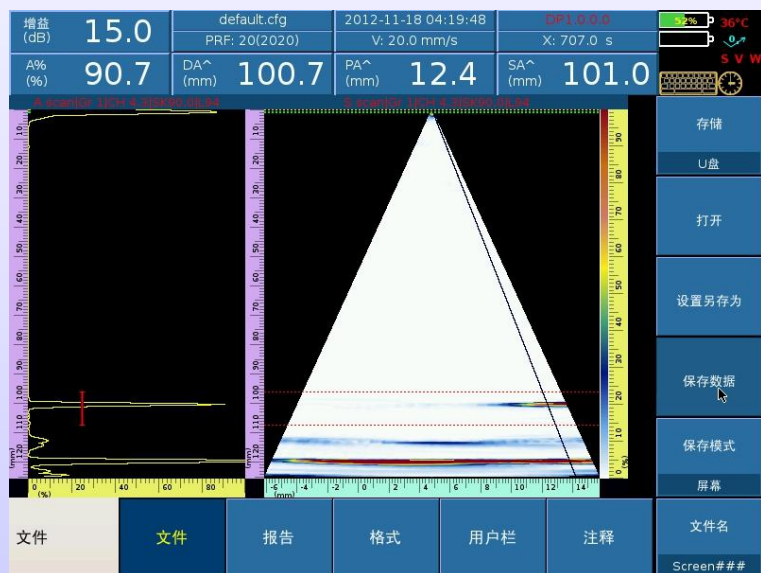
1) 检测结果可多角度成像



1) 检测结果可多角度成像



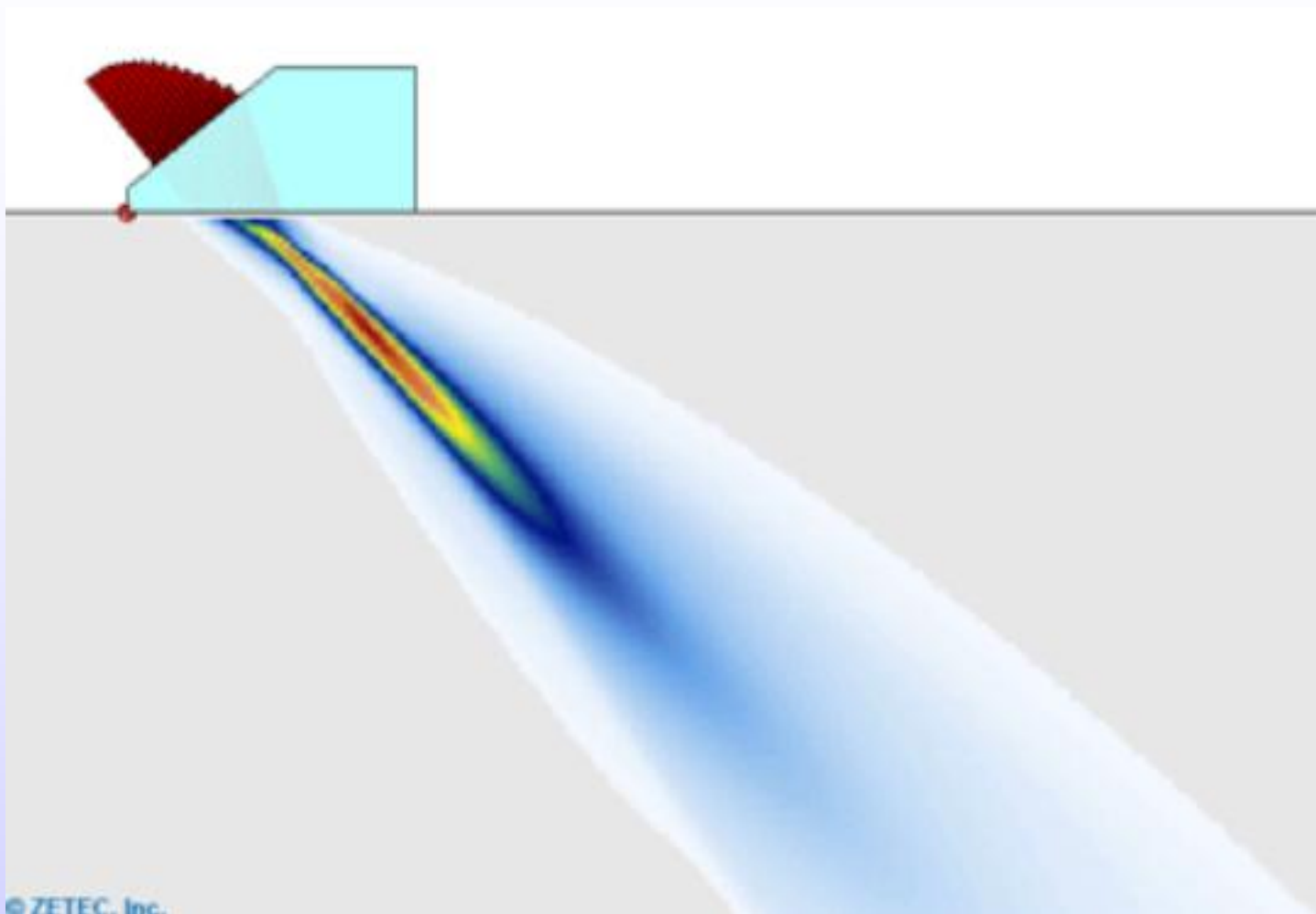
1) 检测结果可多角度成像



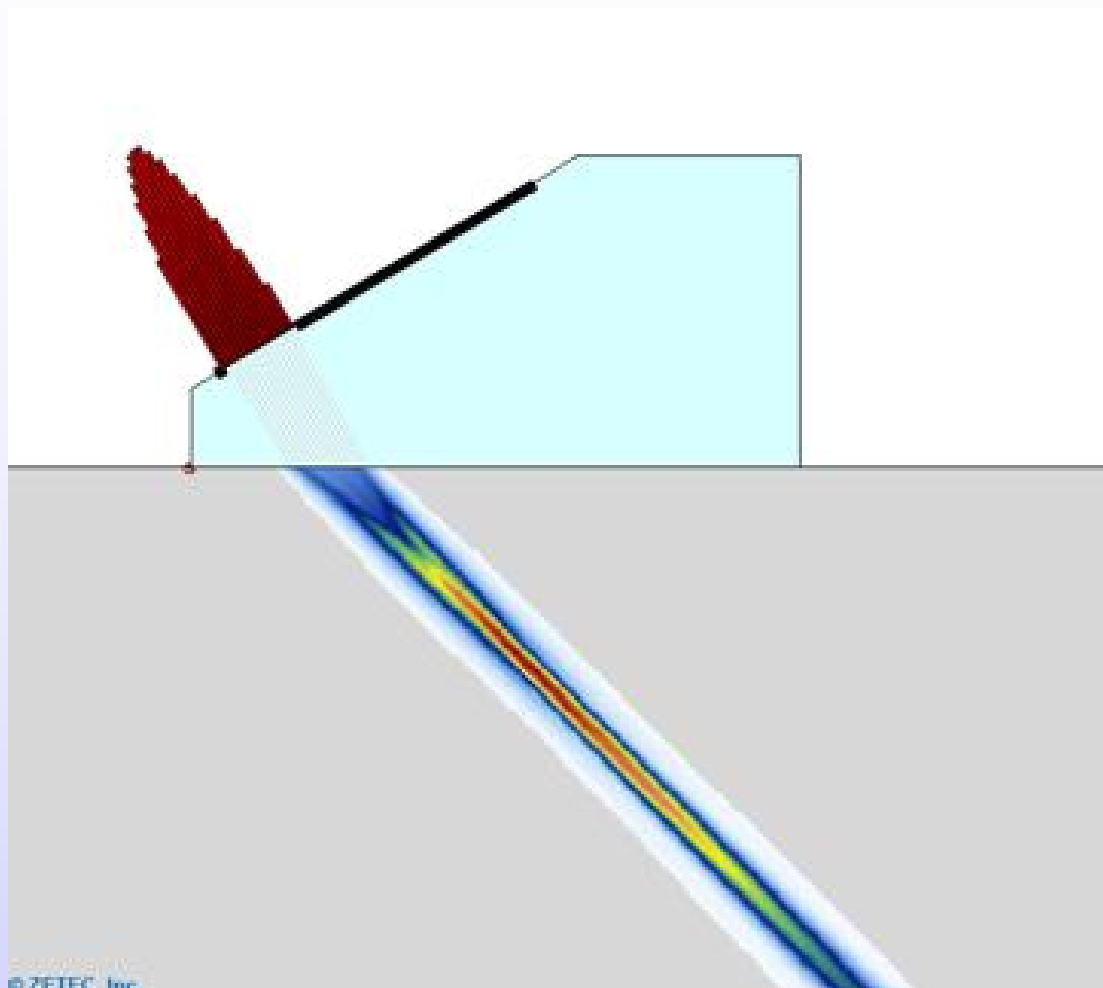
2) 可灵活控制声束

在许多超声检测场合，由于被检测对象的几何形状复杂，传统单探头超声检测非常困难；由于探头无法控制声束，往往需要不断更换探头位置从各个方向扫查，而扫查往往受到限制，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**实现对复杂工件检测**。

2) 可灵活控制声束



2) 可灵活控制声束

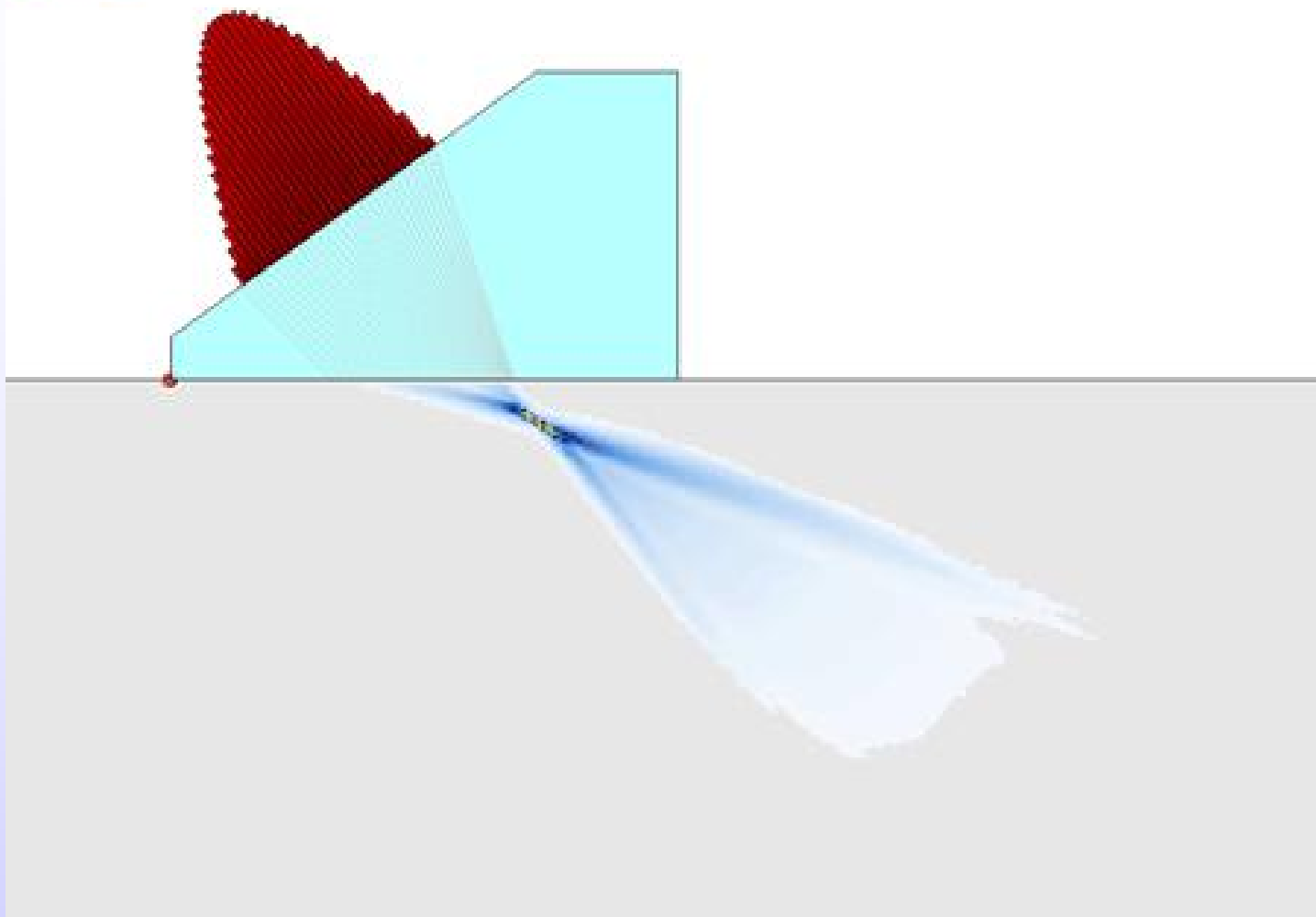


3) 可控制聚焦

相控阵超声技术可以形成**聚焦声束，从而改善检测灵敏度和分辨力**。超声检测中常使用聚焦探头以提高检测的分辨力和灵敏度，这和相控阵聚焦的效果是一样的，但是，聚焦探头的焦点是固定的，而相控阵超声聚焦可以做到灵活改变焦点位置，焦点尺寸、焦点深度，在大范围内都能获得最佳的检测灵敏度和分辨力的提高。

2) 可控聚焦

© ZETEC, Inc.



- ◆ 原材料检测：坯件、棒材、锻件；
- ◆ 航空、电力、核工业、石化管线；
目前脉冲回波检测的检测领域；
- ◆ 研究：任何想要的！（但不是全能的）

大容量机组的枞树型叶根检测
管座角焊缝



2022/1/4

电站小径管焊缝检测存在的问题

1) 小径管焊缝数量大、工期紧、检测时间有限
射线检测底片直观，可追溯性好，在小径管焊缝检测中被广泛应用。

但是射线检测有电离辐射，一定距离内无法共同作业，会对工期有影响。

	条件	制造厂	工地
蒸规	$\geq 9.8\text{MPa}$	100%	25%
DL 612、438、869	$\geq 9.8\text{MPa}$	100% (RT $\geq 50\%$)	50%
	超、超超临界	100% (RT $\geq 50\%$)	100% (RT $\geq 50\%$)

电站小径管焊缝检测存在的问题

2) 小径管常规超声检测的局限性

- a) 壁厚薄，使用的是声场近场区，并且波型转换多，导致定量和信号识别都困难；
- b) 曲率大，声场产生畸变，不利于检测；
- c) 没有数据记录，可追溯性差；
- d) 检测结果受检测人员的水平、情绪和现场工况影响大。
- e) 管排间距小，检测空间有限，很多情况下检测难以有效实施。

电站小径管焊缝检测存在的问题

3) 小径管RT检测的局限性

- a) 管排间距较小，大多数时候只能透照一次，有效检测范围小；
- b) 透照厚度比大，底片影像黑度差较大，有效评定范围小；
- c) 受裂纹检出角的限制，对裂纹不敏感；
- d) 射线检测有辐射伤害，无法与其他工种同时作业，需要占用工期。
- 超临界机组以及超超临界机组中，小径厚壁管大量使用，其对接焊缝RT检测有效检测范围更低，给锅炉安全运行留下隐患



检测管径范围:
21mm~115mm外径



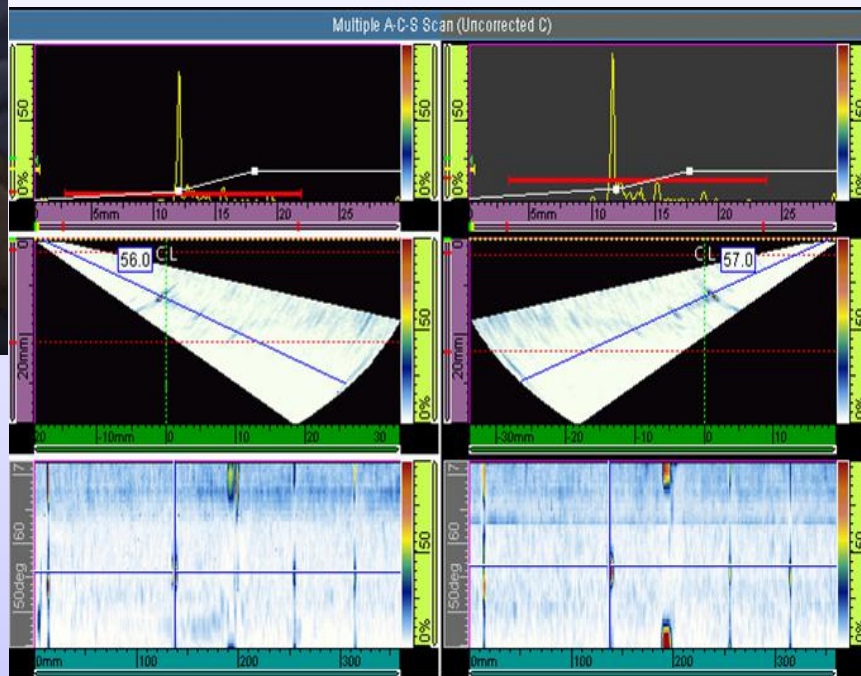


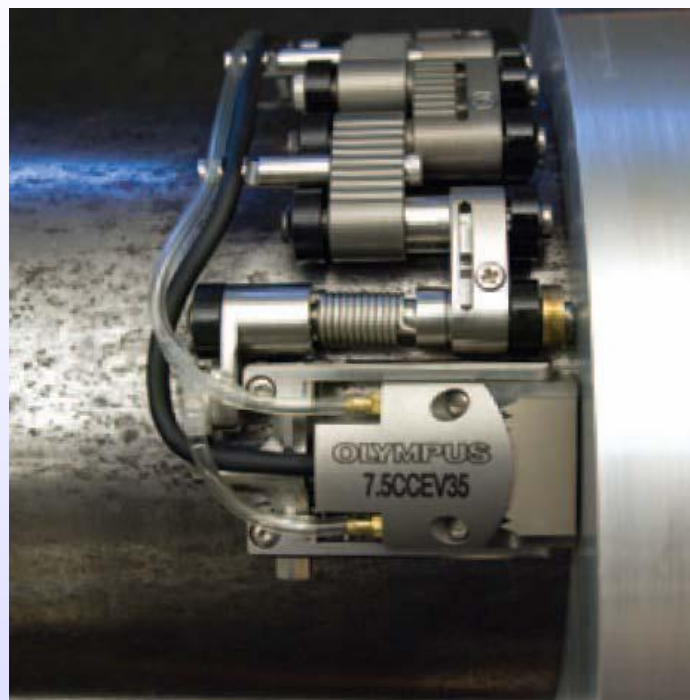
能通过狭窄的管
排间距，最小为
12mm



检测速度快

数据实时显示





可调的扫查架

❖ 超薄相控阵探头

弧形晶片增加聚焦和发现小缺陷的能力

超薄

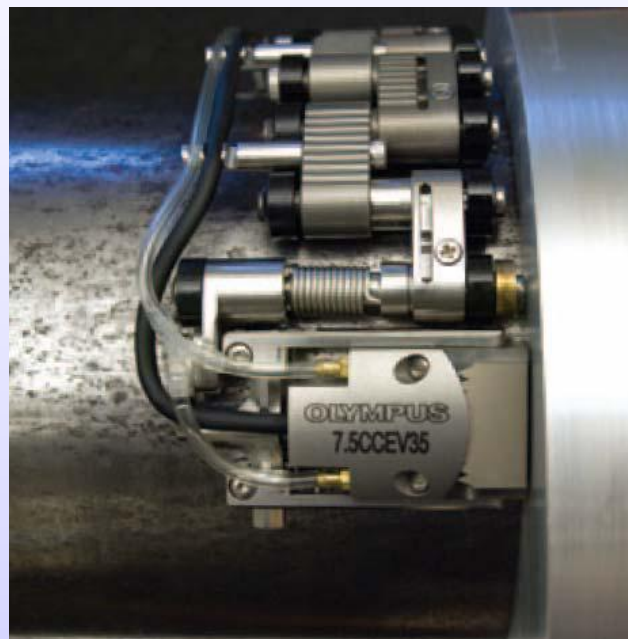
16个晶片



❖ 单面双侧检测焊缝



- ❖ 能够从焊缝单侧管道与其他部件连接的焊缝（如管座角焊缝）



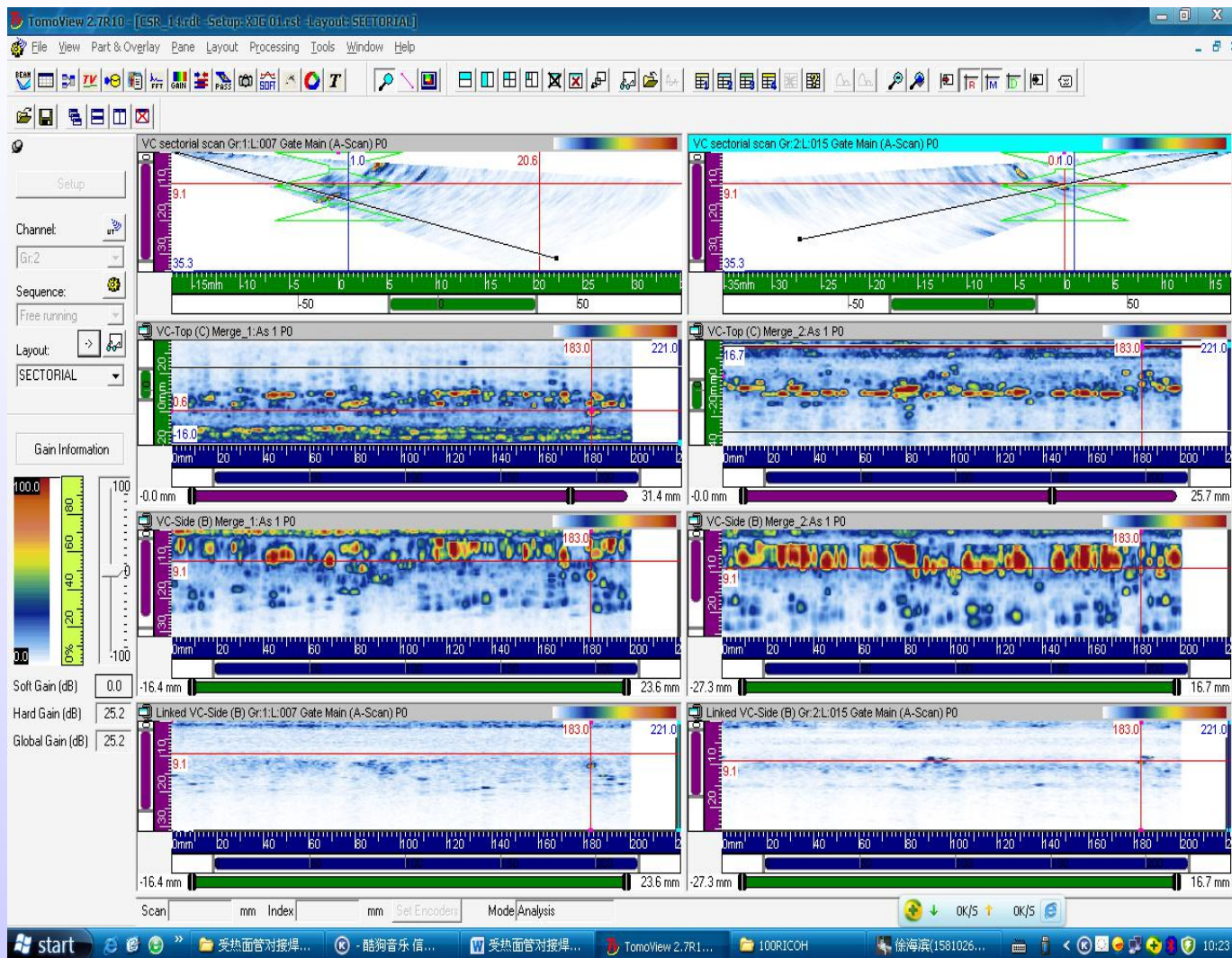
管座角焊缝检测



疏水管座相控阵检测

- 检测结果
- 所有数据均实时存储，并可采用专用软件进行分析；
- 小径管相控阵超声波检测系统能替代射线实现对小径管的检测

- 检测数据可在仪器上，也可采用专用软件在电脑上进行分析

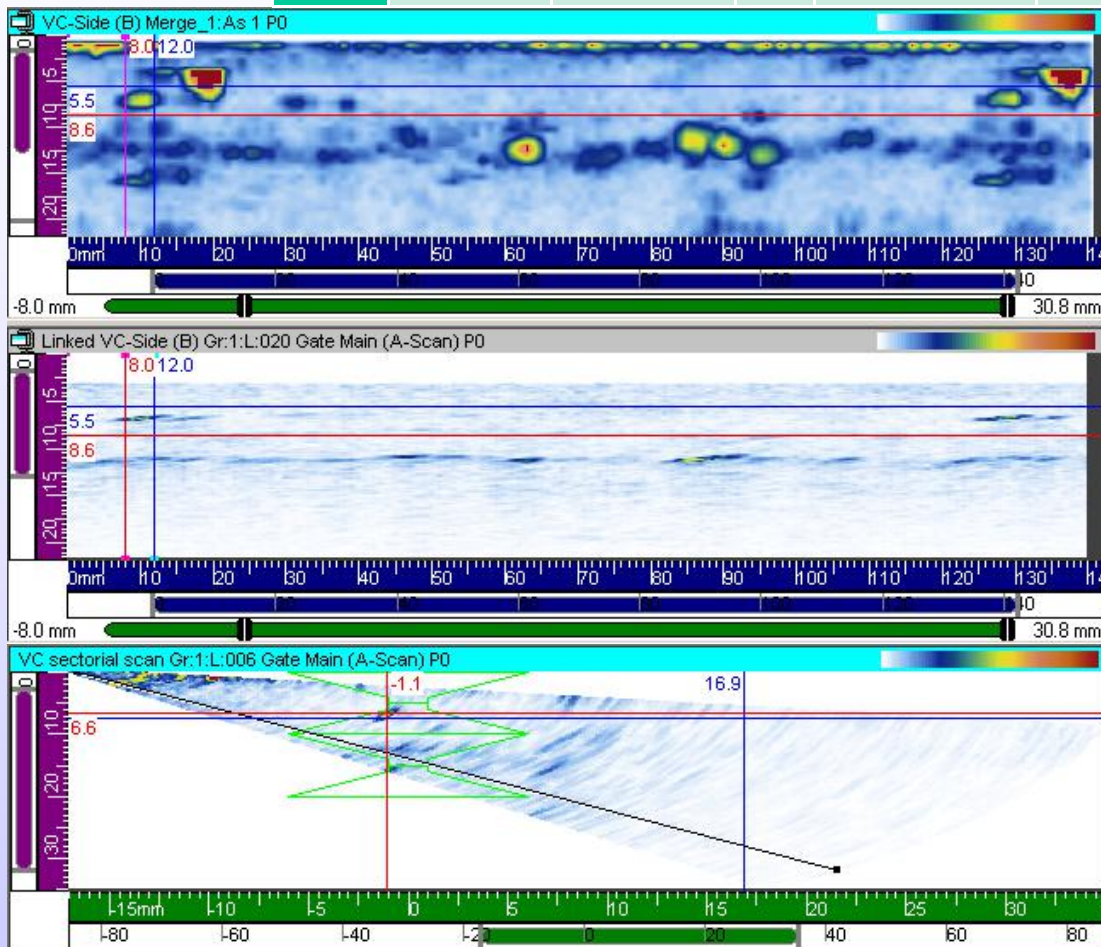


3、数据分析

部分典型缺陷数据分析

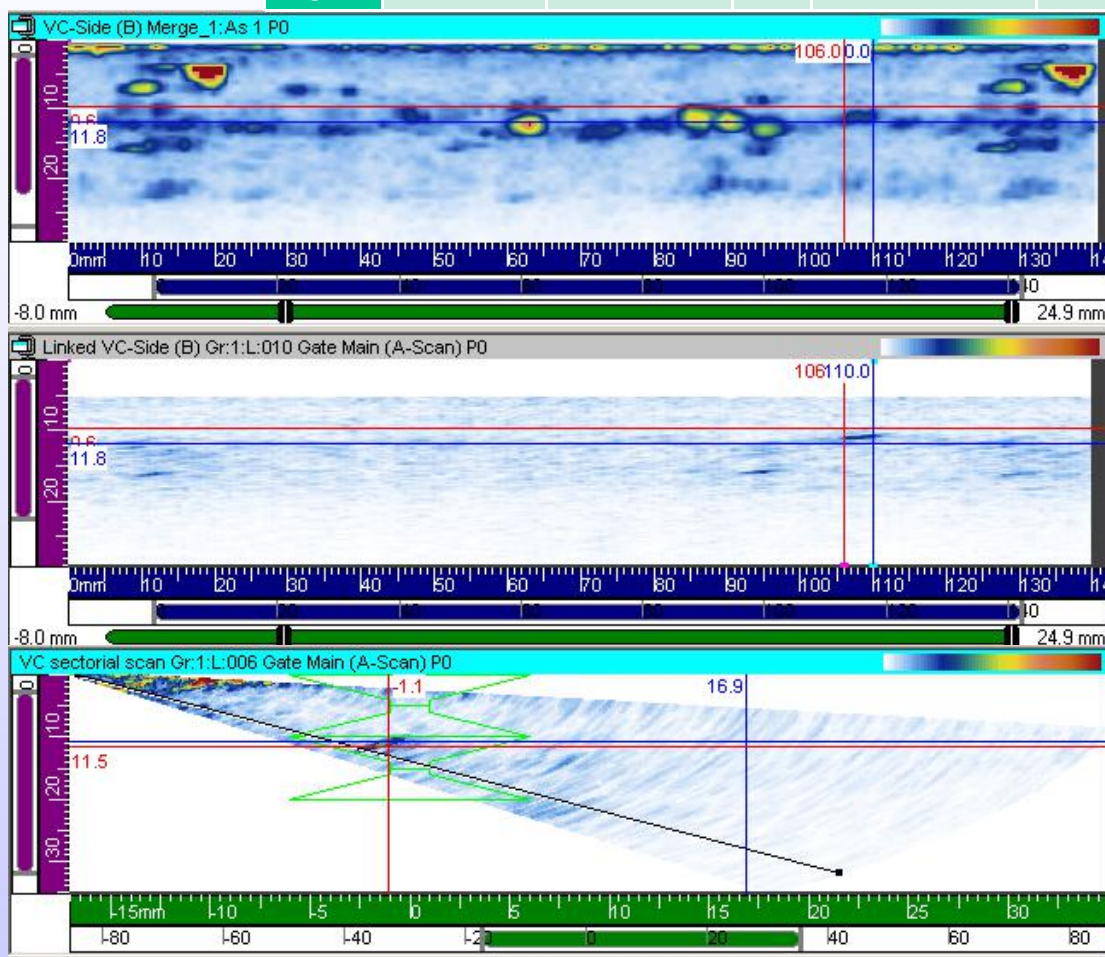
1) 数据分析1

组别	缺陷编号	起止点/长度 (mm)		起止点/高度 (mm)		性质	位置
G1	f1	8--12	4	3.4—2.5	0.9	未熔合	本侧



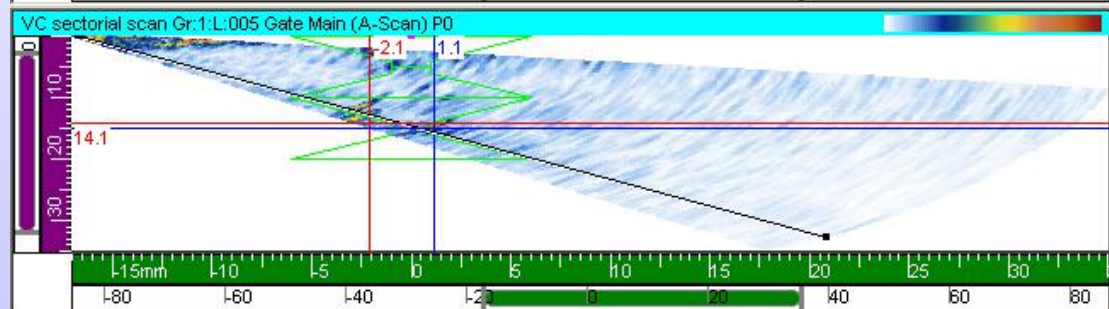
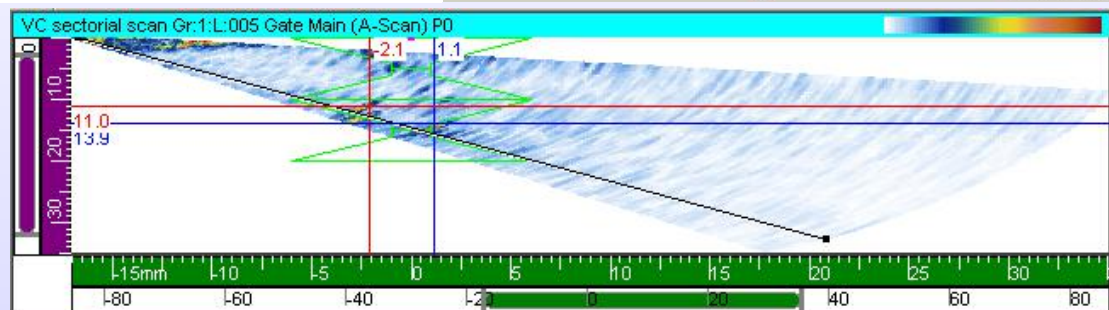
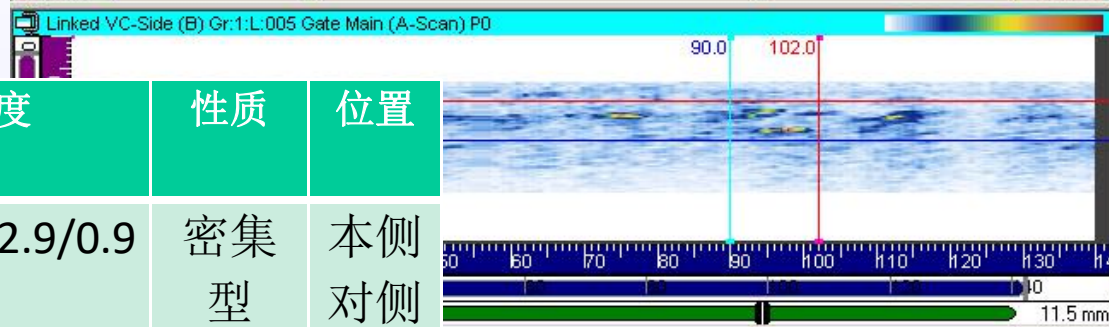
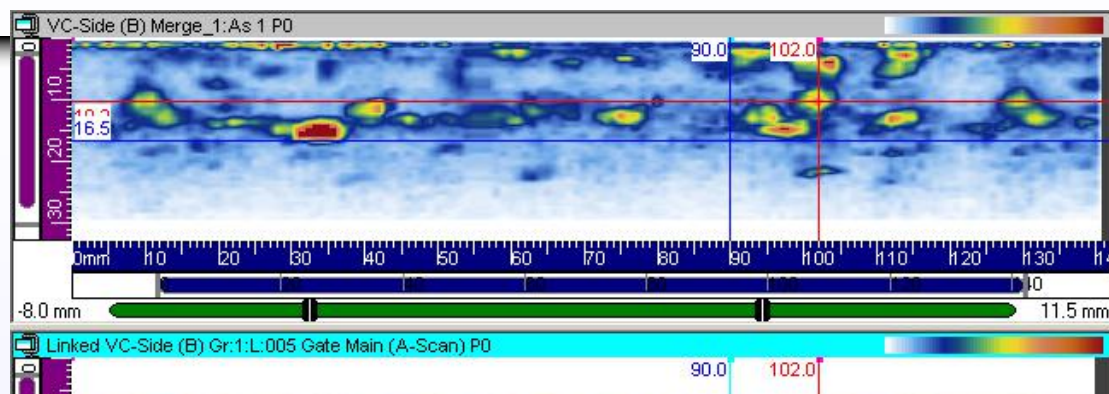
1) 数据分析1

组别	缺陷编号	起止点/长度 (mm)		起止点/高度 (mm)		性质	位置
G1	f2	106--110	4	0.6—1.5	0.9	气孔	本侧



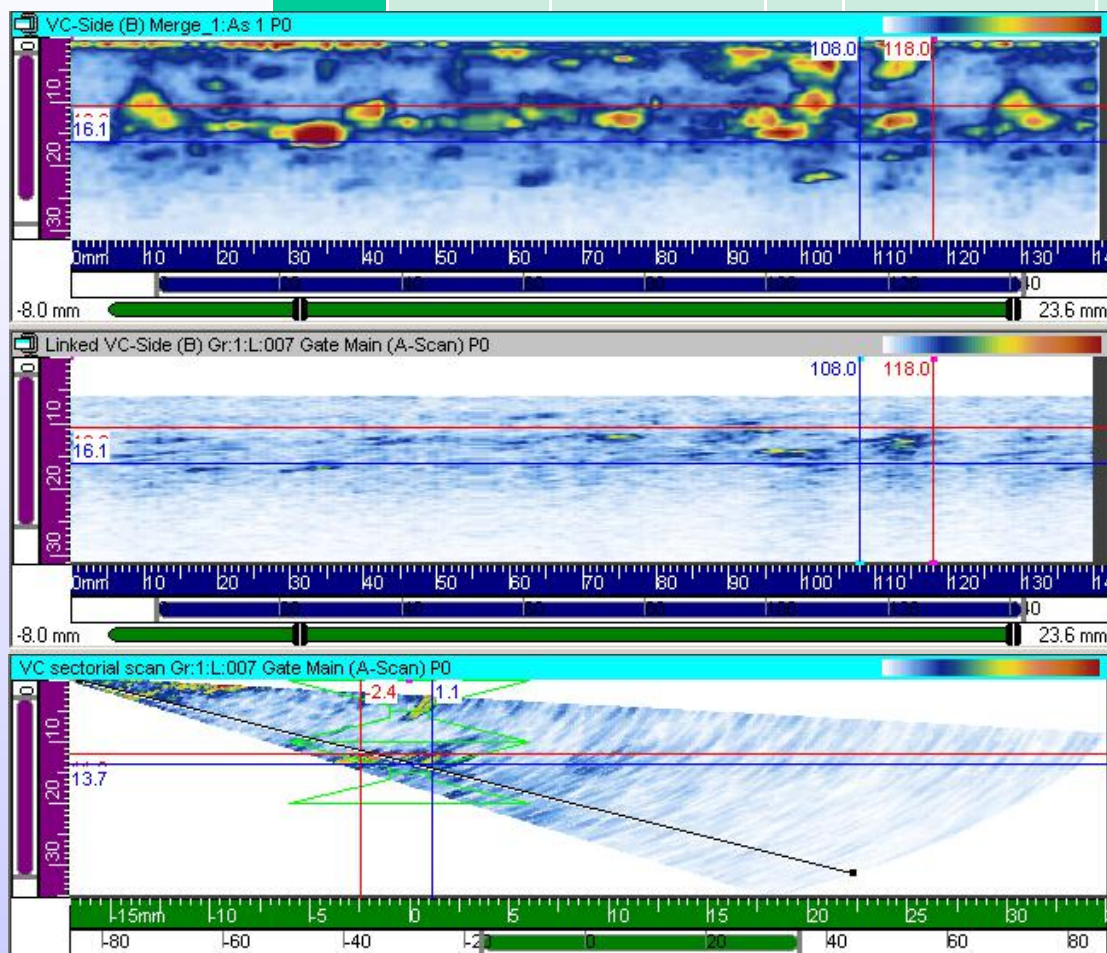
2) 数据分析2

组别	缺陷编号	起止点/长度 (mm)		起止点/高度 (mm)		性质	位置
G1	f2	90--102	12	1.0—3.9	2.9/0.9	密集型	本侧 对侧



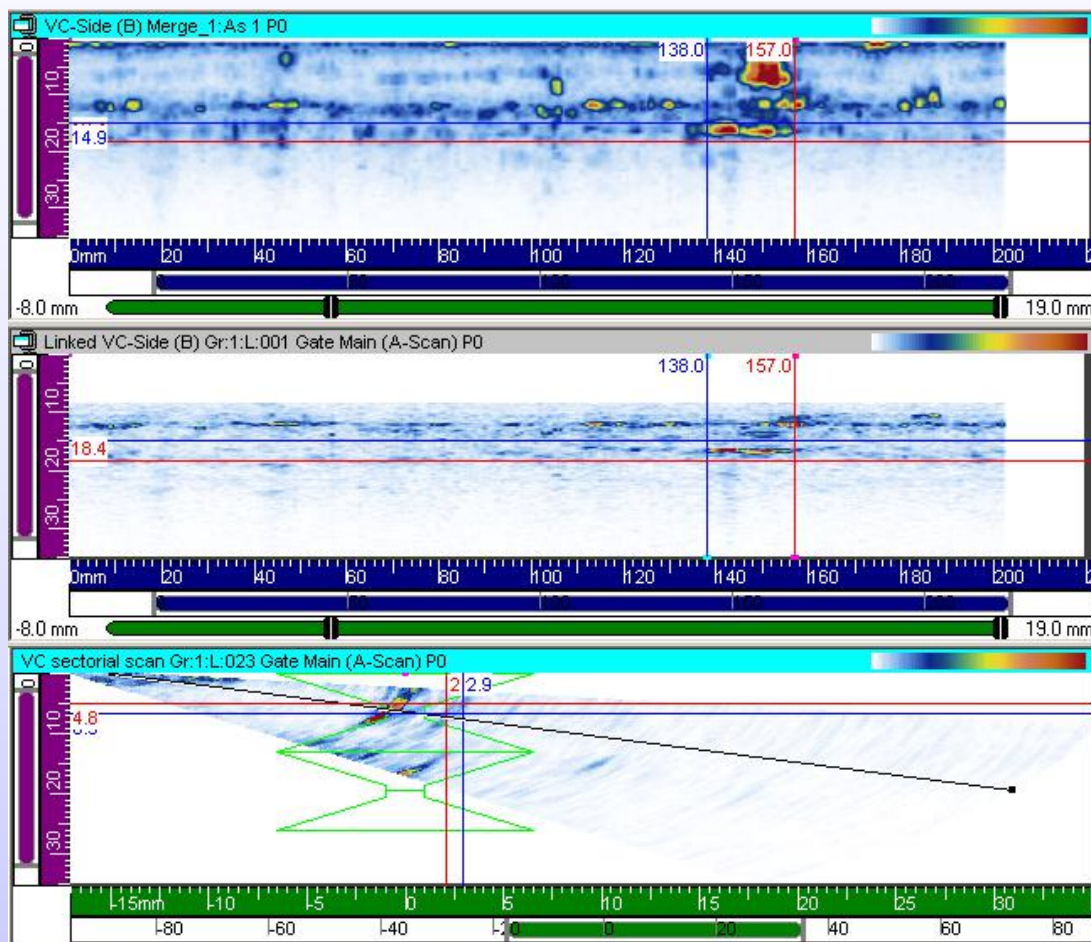
2) 数据分析2

组别	缺陷编号	起止点/长度 (mm)		起止点/高度 (mm)		性质	位置
G1	f3	108--118	10	1.8—3.7	1.9	密集型	本侧



3) 数据分析3

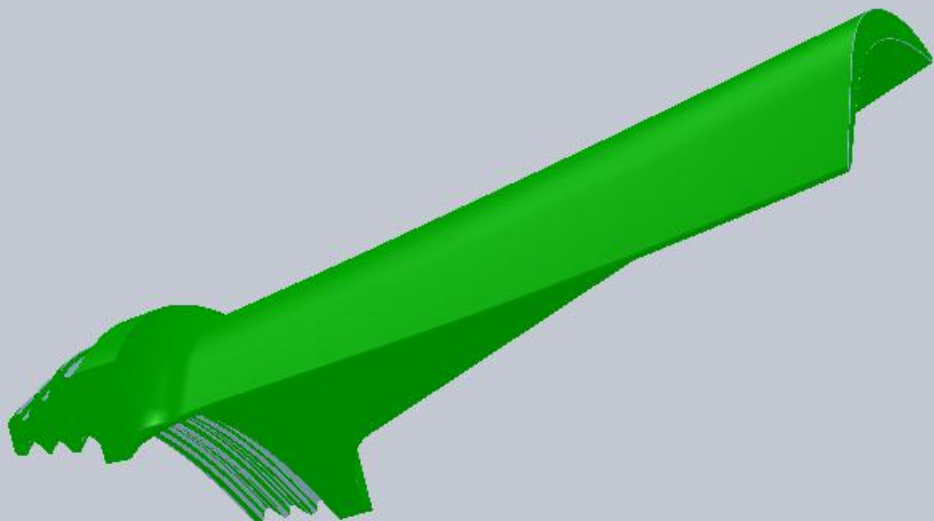
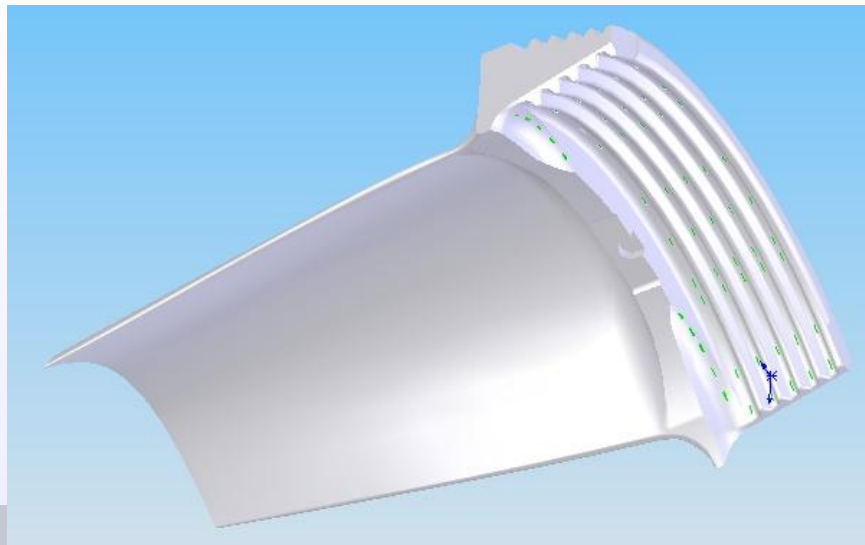
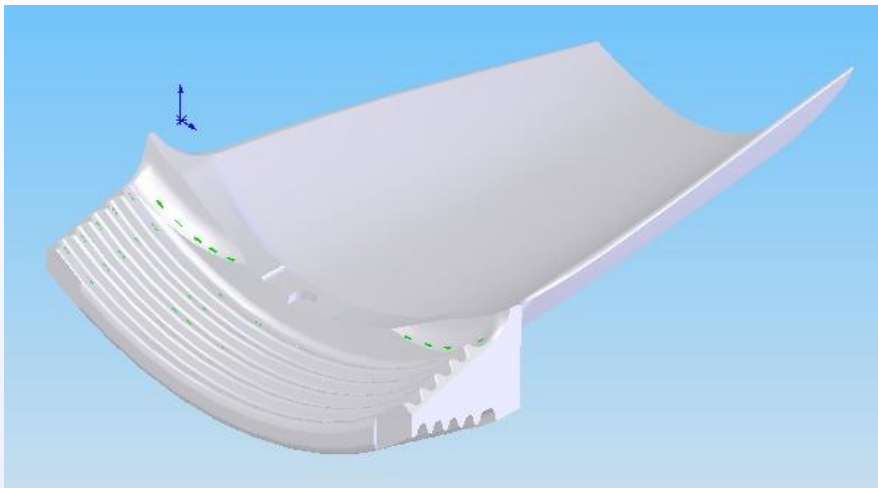
组别	缺陷编号	起止点/长度 (mm)		起止点/高度 (mm)		性质	位置
G1	f1	138--157	19	4.8--6.5	1.7	未焊透	



枞树型叶根相控阵检测

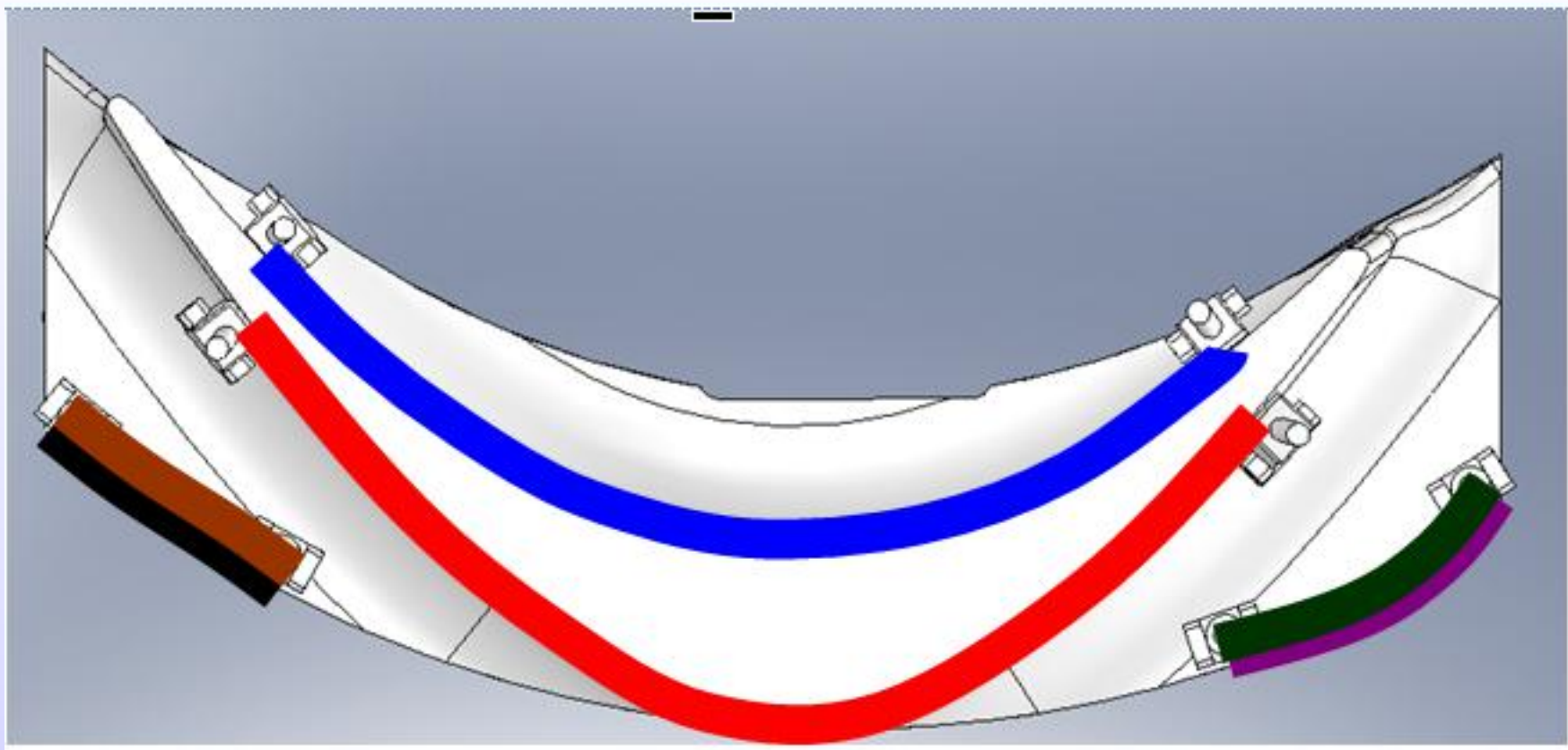


3.2 叶片数据化分析

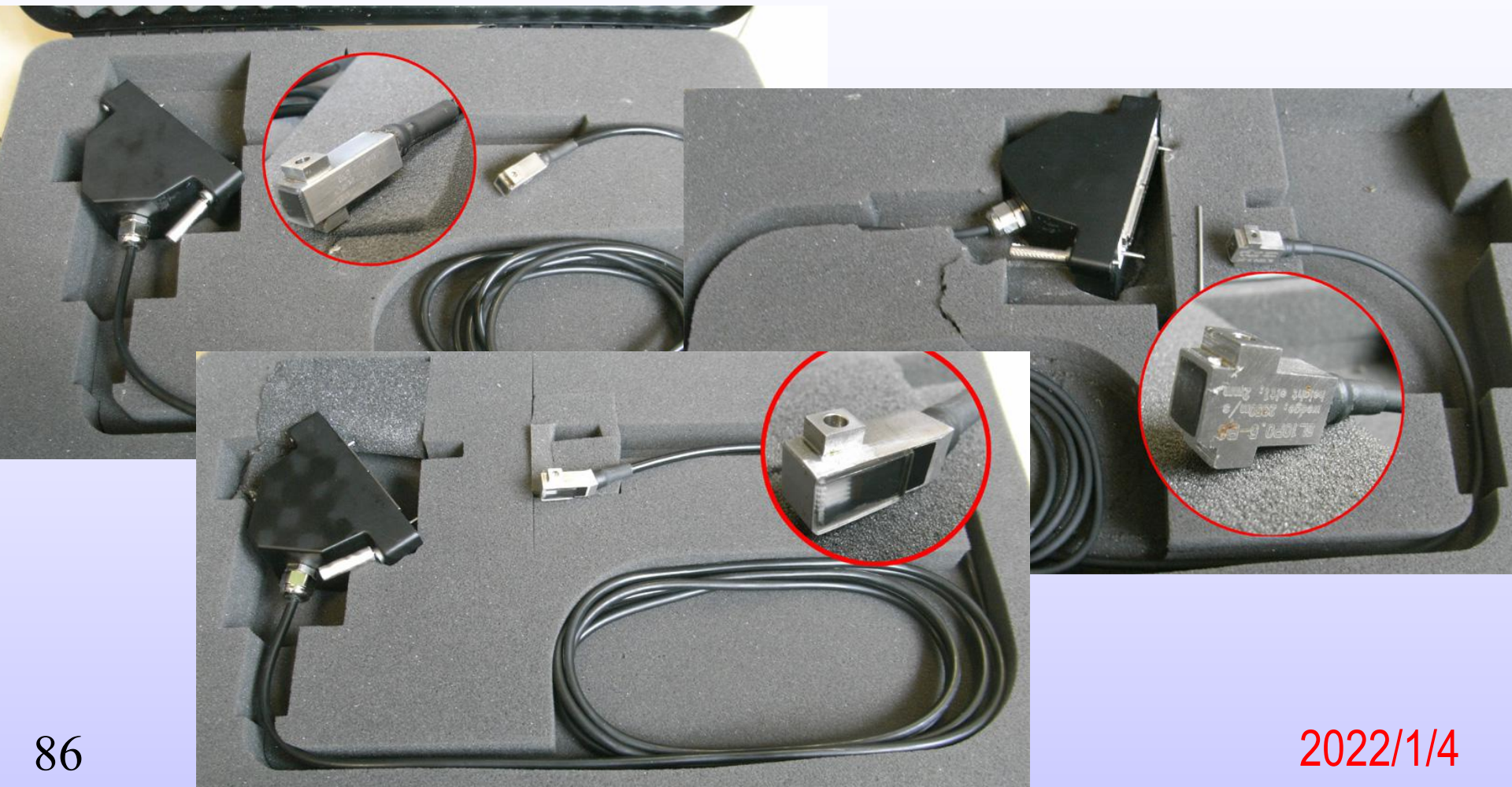


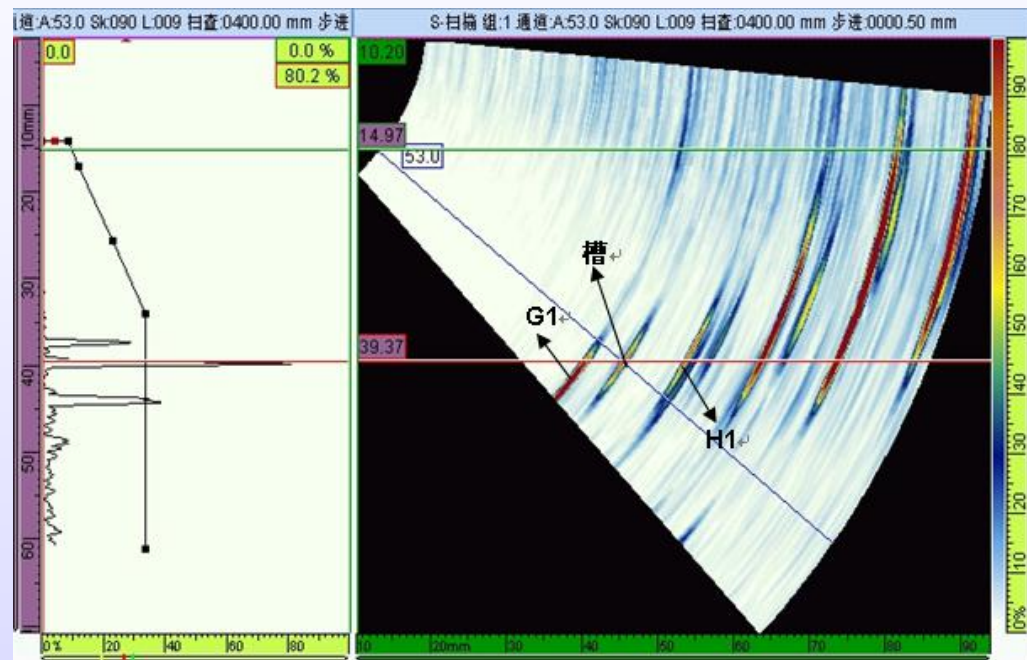
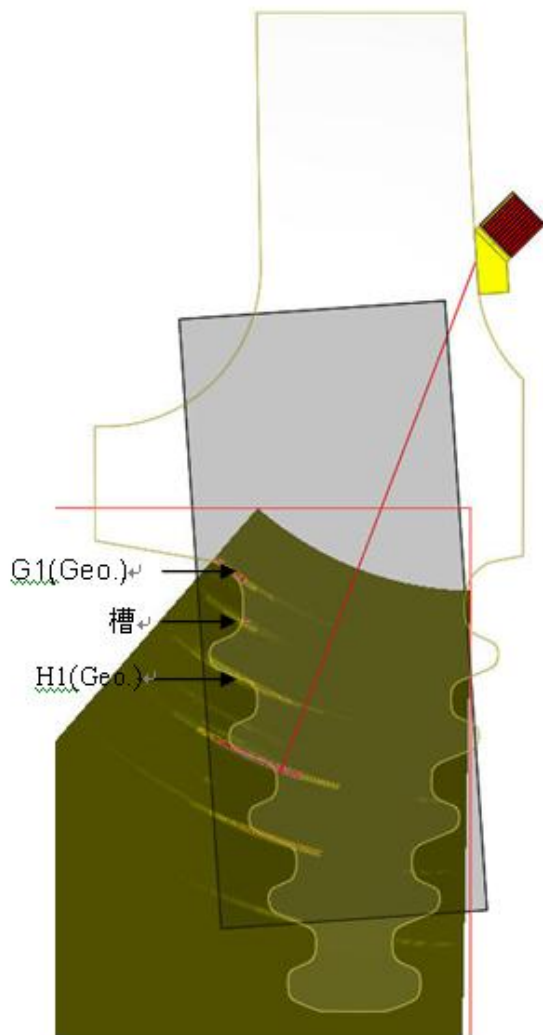
逆向

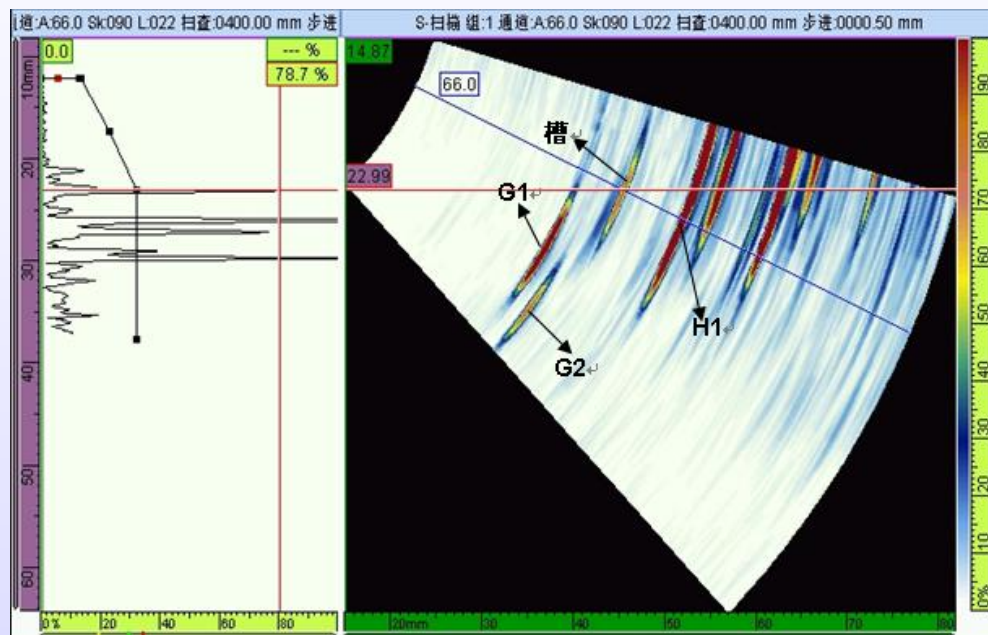
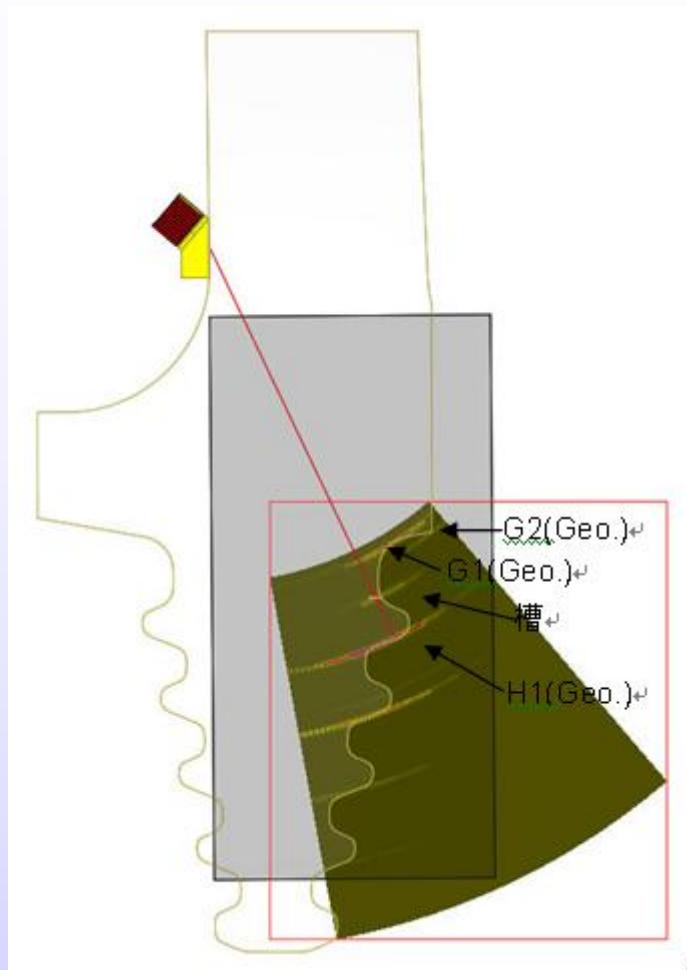
3.4 叶根检测序列

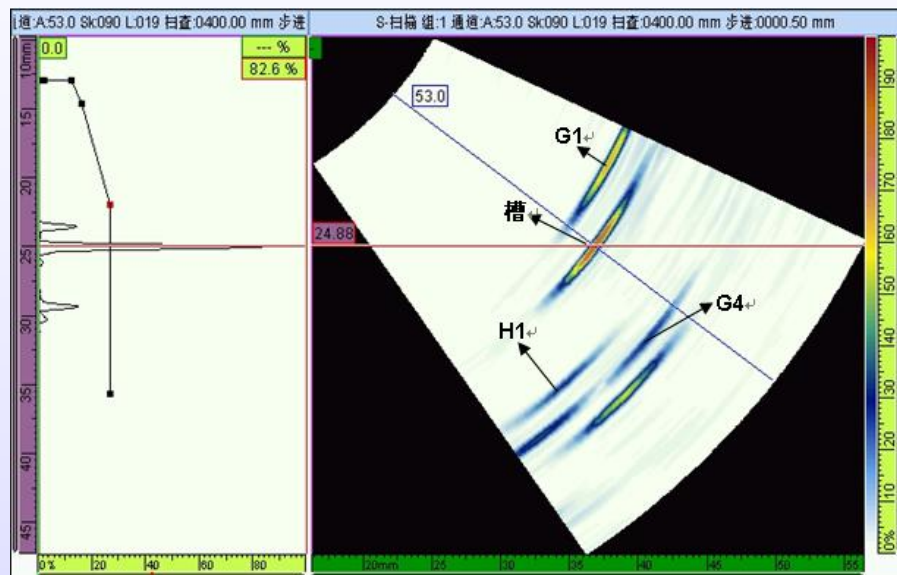
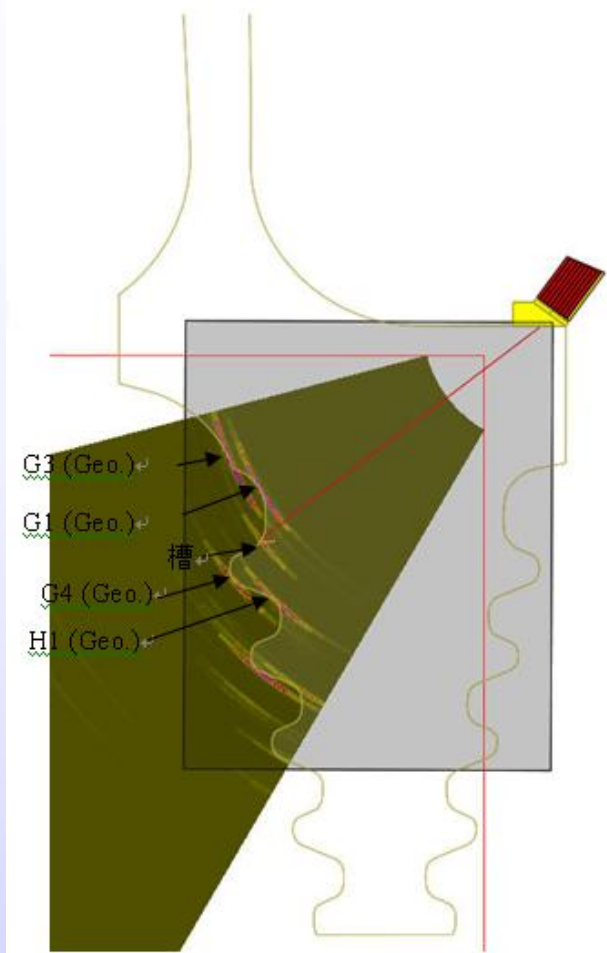


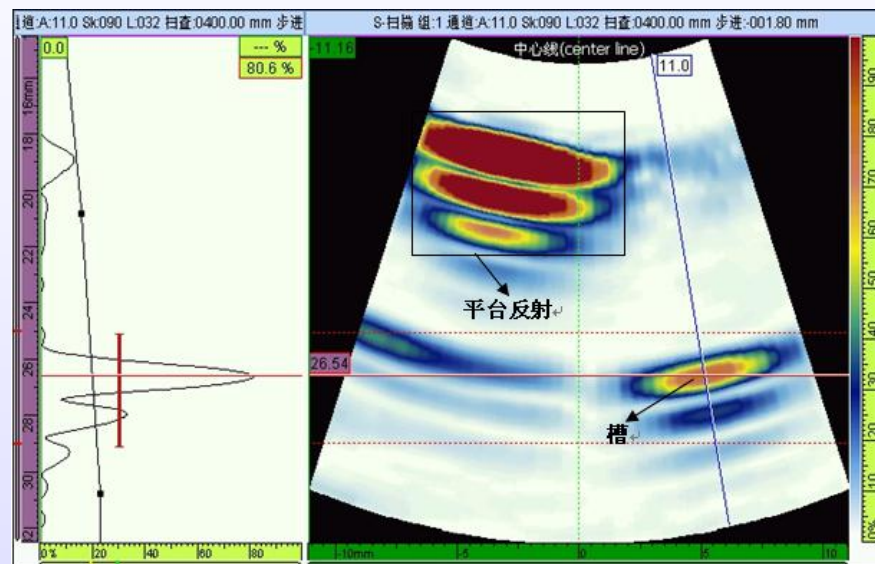
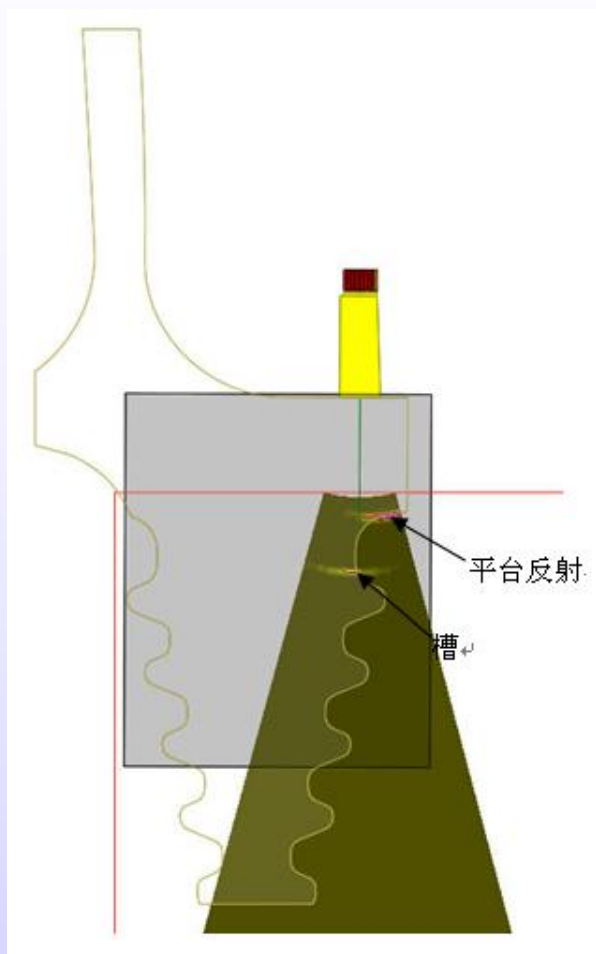
❖ 定制的探头

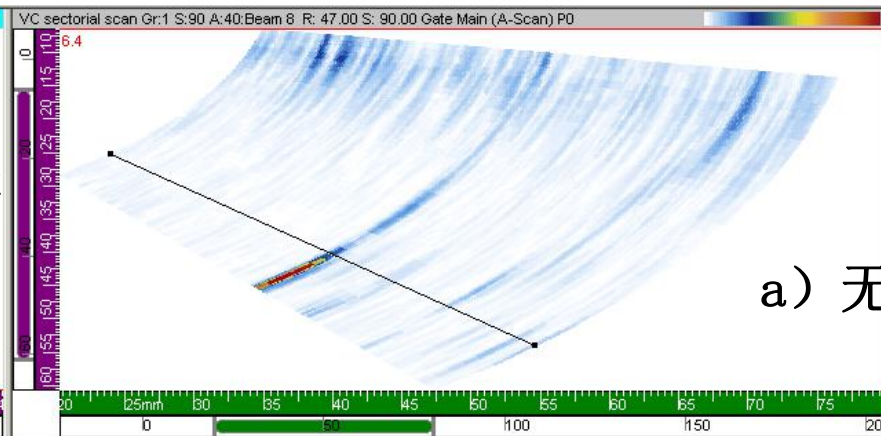
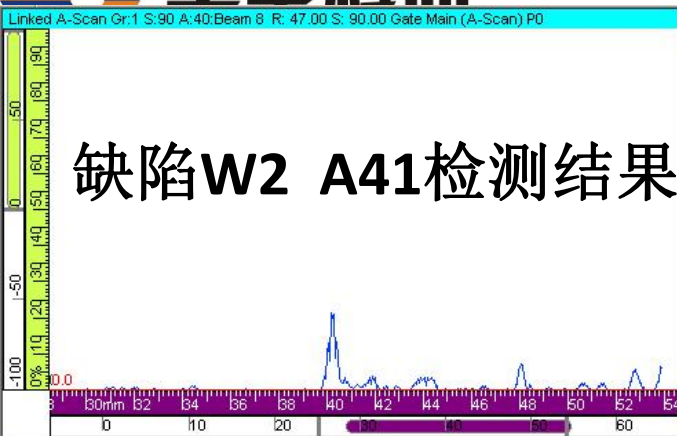




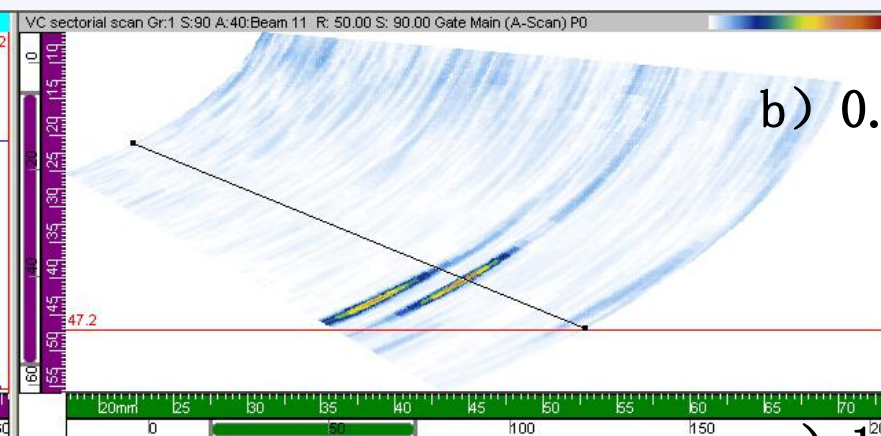
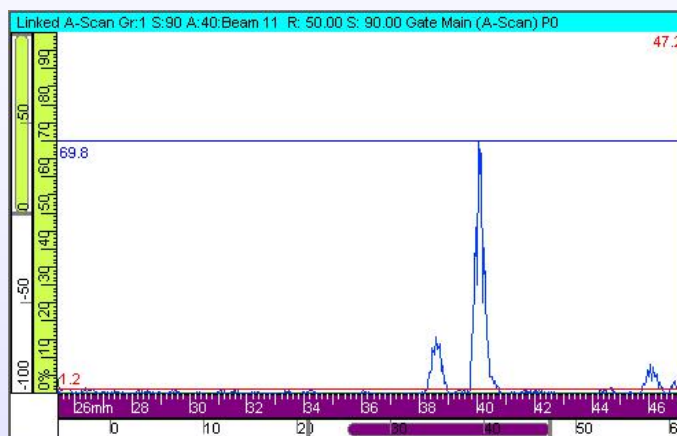




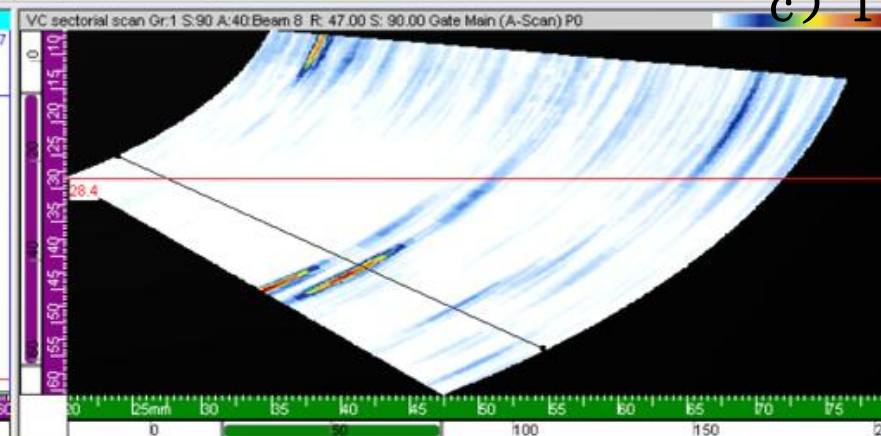
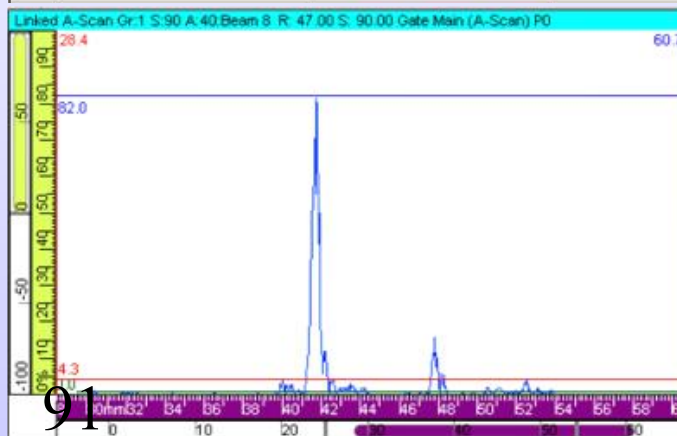




a) 无缺陷测图

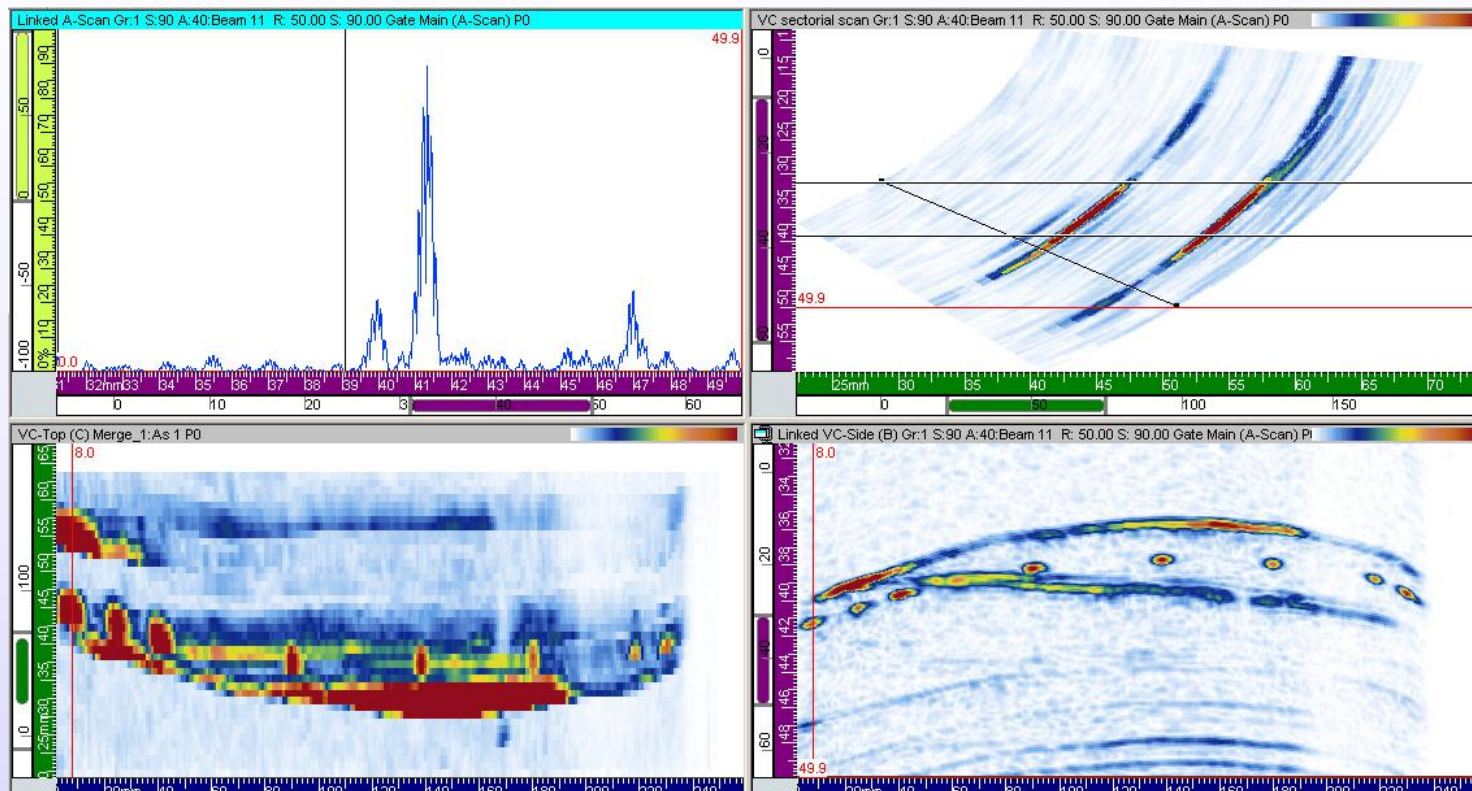


b) $0.5 \times 5\text{mm}$ 槽测图

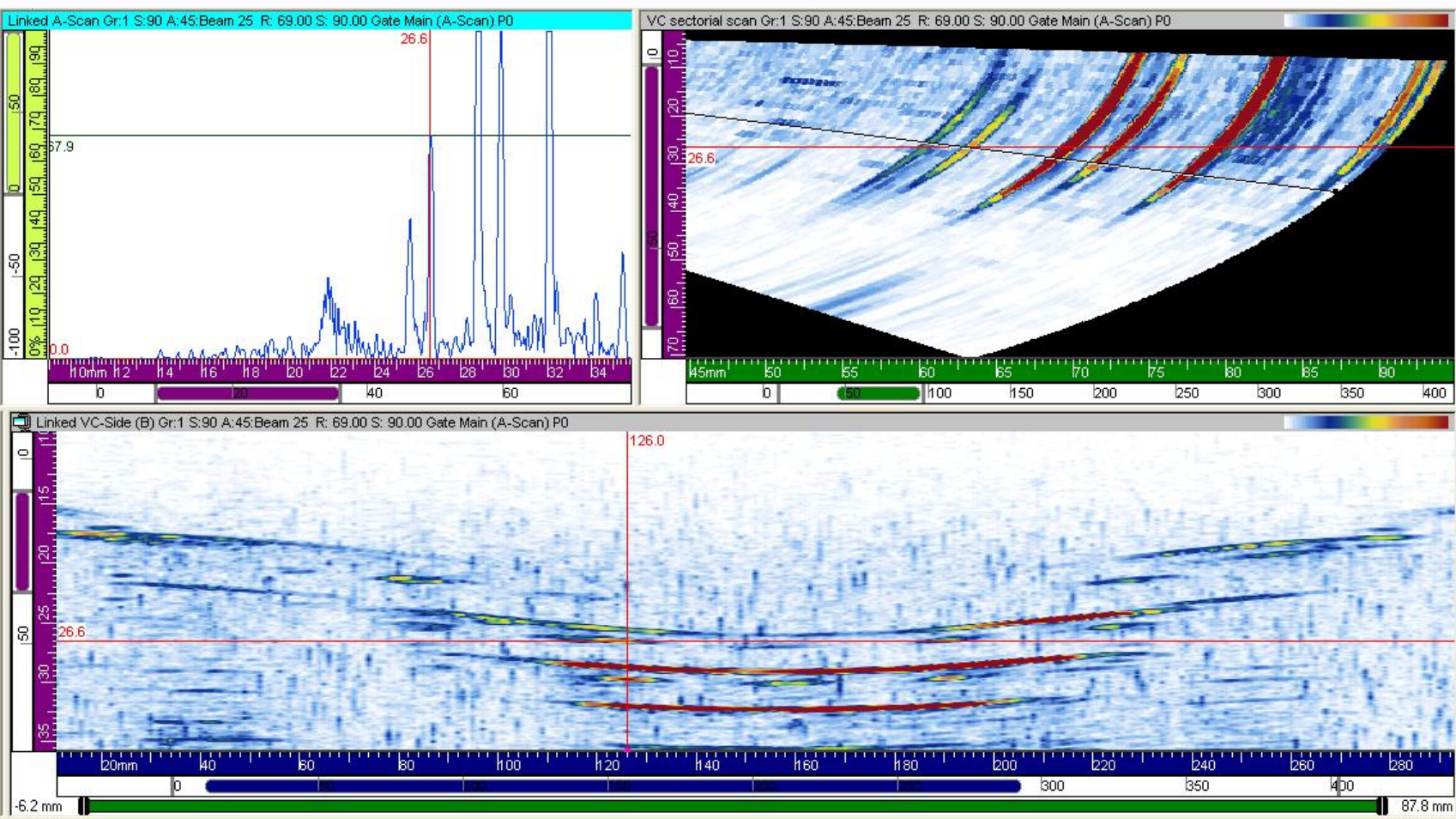


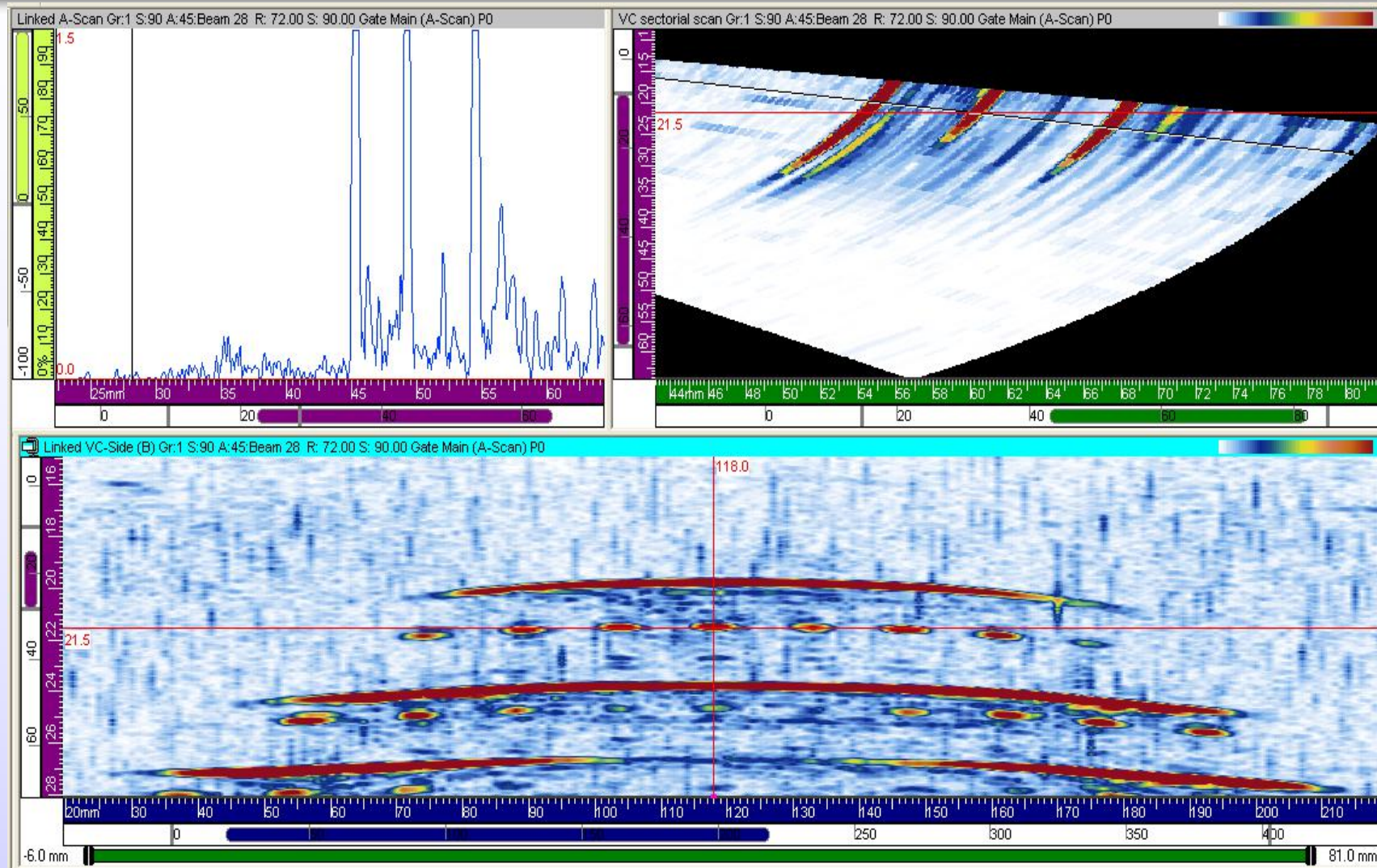
c) $1 \times 5\text{mm}$ 槽检测图

❖ 自动检测



探头在内弧的自动检测 (W2----W9)





相控阵检测技术的前景

机组运行参数越来越高、设备质量要求越来越严格，对检测的要求也提高了，常规检测方法一定程度已不能适应需求；同时现场从节约工期考虑对检测效率的要求也提高了，这些都给相控阵技术的发展提供了机会。

谢谢大家