



# 管道环焊缝数字化无损检测技术

中国石油天然气管道科学研究院

2020年4月



# 目 录

第一部分 AUT检测技术

第二部分 PAUT检测技术

第三部分 DR检测技术

第四部分 全聚焦/IWEX检测技术



## 一、全自动超声 (AUT) 检测技术



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 1、发展过程

相控阵技术最早应用于军用雷达，现在医院里采用的B超也是基于相控阵技术，加拿大、美国、英国等多家无损检测公司首先将相控阵技术引入到工业无损检测领域，目前已应用于不同无损检测领域，包括电厂、石化、航空航天、长输管线等等。

- AUT只用于长输管道；
- 国内于2001年首先引入相控阵系统-PipeWIZARD全自动超声检测系统，成功应用于国家重点工程-西气东输；
- 在西三西0.8设计系数段，由于AUT和RT的检测结果不一致，使得对AUT的应用产生质疑；
- 2015年6月召开了AUT应用技术研讨会，主要是GB/T50369怎么执行；
- 中俄东线开始大规模使用AUT，制定了详细的质量管理体系。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 2、全自动超声检测 (AUT) 原理

管道环焊缝相控阵超声检测 (AUT) 设备主要应用于大口径长输管道环焊缝焊接质量检测，在特定的检测工艺条件下，也可用于半自动焊焊缝检测。

相控阵超声检测技术是利用超声阵元的电控偏转特性和电控聚焦特性，通过硬件电路和软件编程的协调控制，动态的改变相控探头所发出的超声波束的偏角以及聚焦深度，从而使波束覆盖整个焊缝熔合面，完成管道环焊缝的检测。

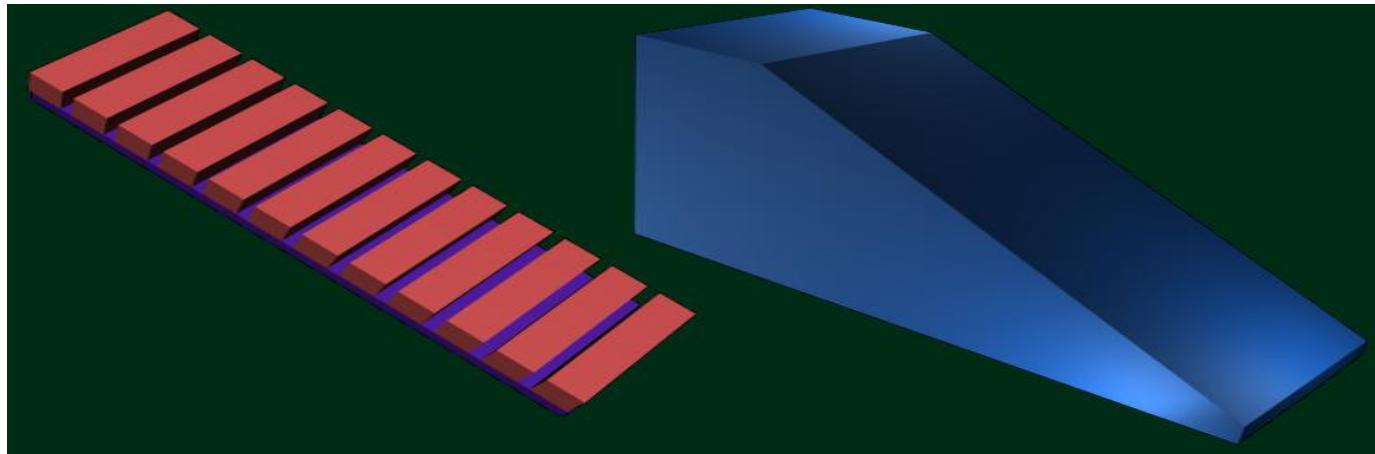
相控阵超声检测系统可以用一对相控阵探头来实现不同壁厚、不同管径、不同坡口形式的管道焊缝的检测任务。当所检测的管道直径和壁厚发生改变时，只需要调整相应的晶阵阵元控制方式即可满足检测要求。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 相控阵探头

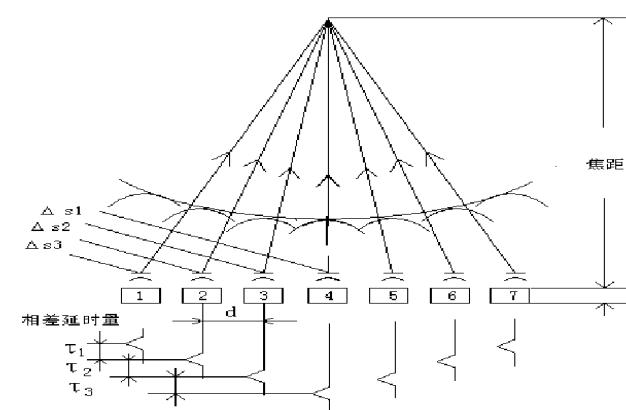
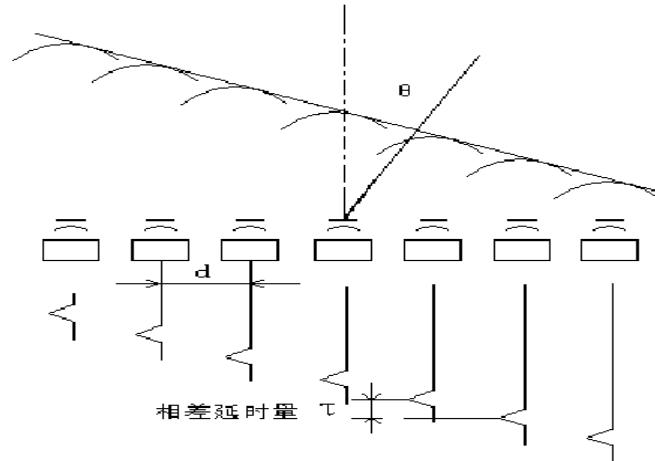
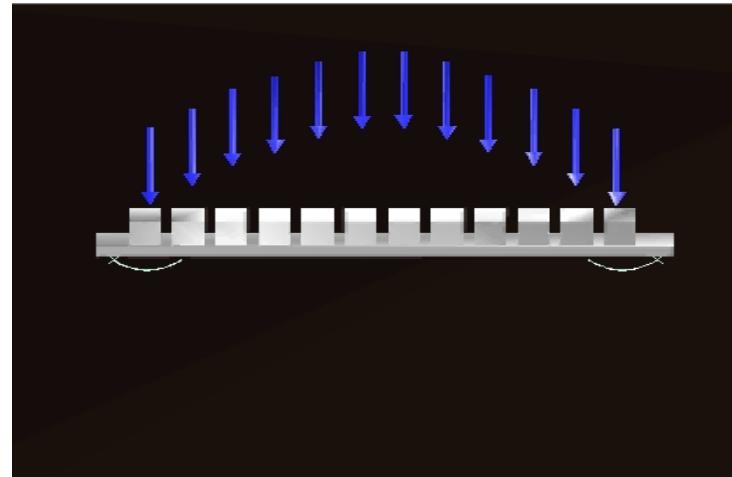
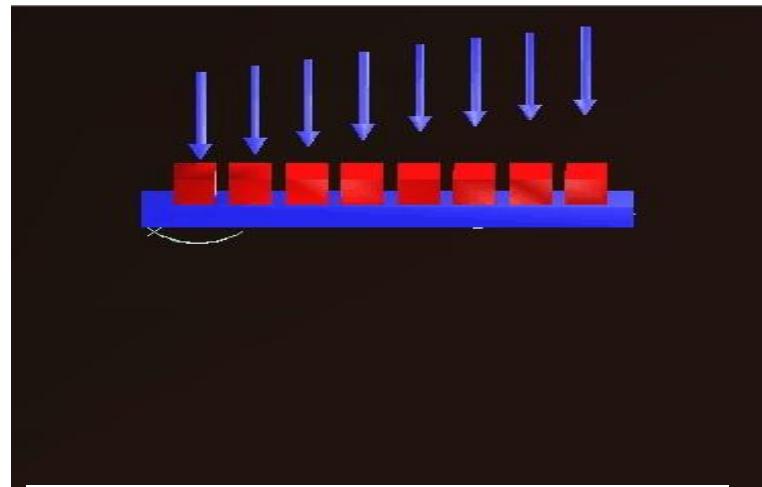
- 每一个晶片都可以视为一个普通的超声探头；
- 每一个晶片被激发，都可以产生一个垂直晶阵面的超声波束；
- 当所有晶片都激发后，会形成一个合成的超声波束
- **相控阵扫查**是通过软件，动态改变相控换能器中各个晶阵的发射时序，来控制合成超声波束的指向和焦点位置，从而实现超声波束的动态偏转和动态聚焦。





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

相控阵电子偏转聚焦特性：

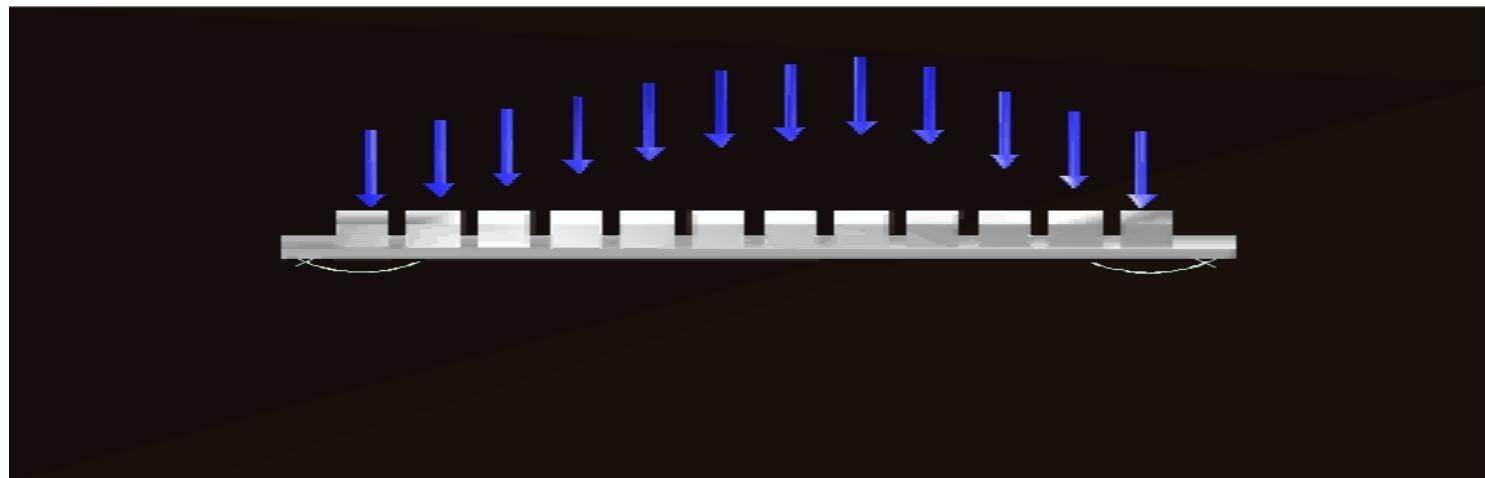




# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 偏转聚焦：

各个晶阵的触发脉冲时序是偏转与聚焦的叠加，此时相控探头发出的超声波束的合成波阵面是一个曲面，不仅实现了聚焦，而且具有一定的方向性。



偏转聚焦特性



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 3 技术简介

### 3.1 常规超声与相控阵区别

常规超声探头：

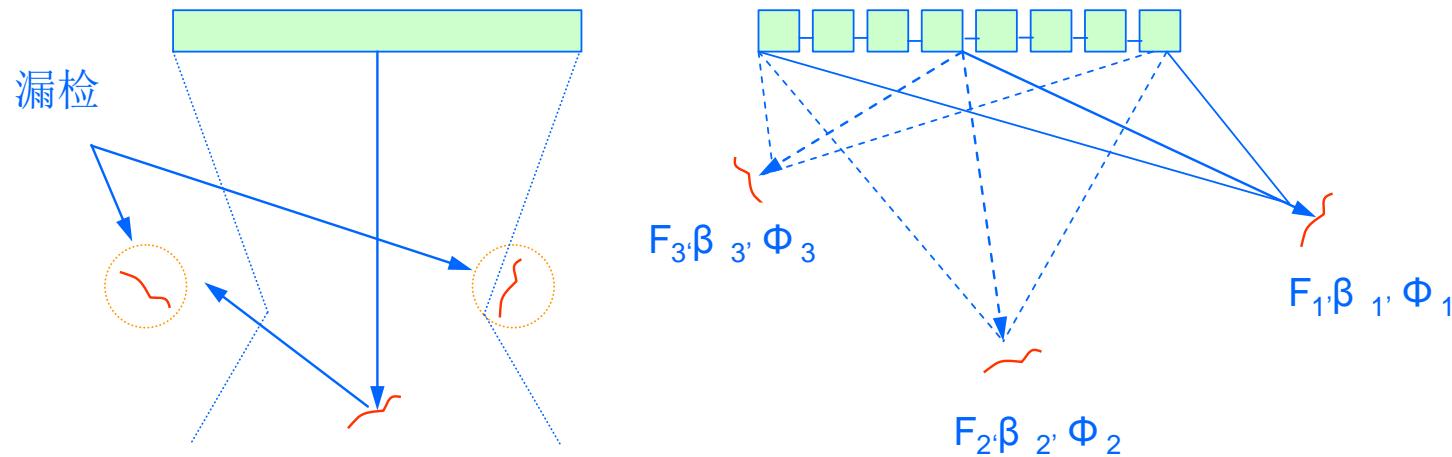
- 单晶探头
- 超声场以单一折射角沿声束轴线传播
- 焦点位置不可调。

相控阵探头：

- 一维线性阵列相控阵探头，将一个长方形晶片被切割成许多个小晶片，每个小晶片均可视为一个线状波源，各晶片的激励（延时）均由计算机控制，
- 声束参数如角度、焦距和焦点尺寸等均可通过软件调整。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术



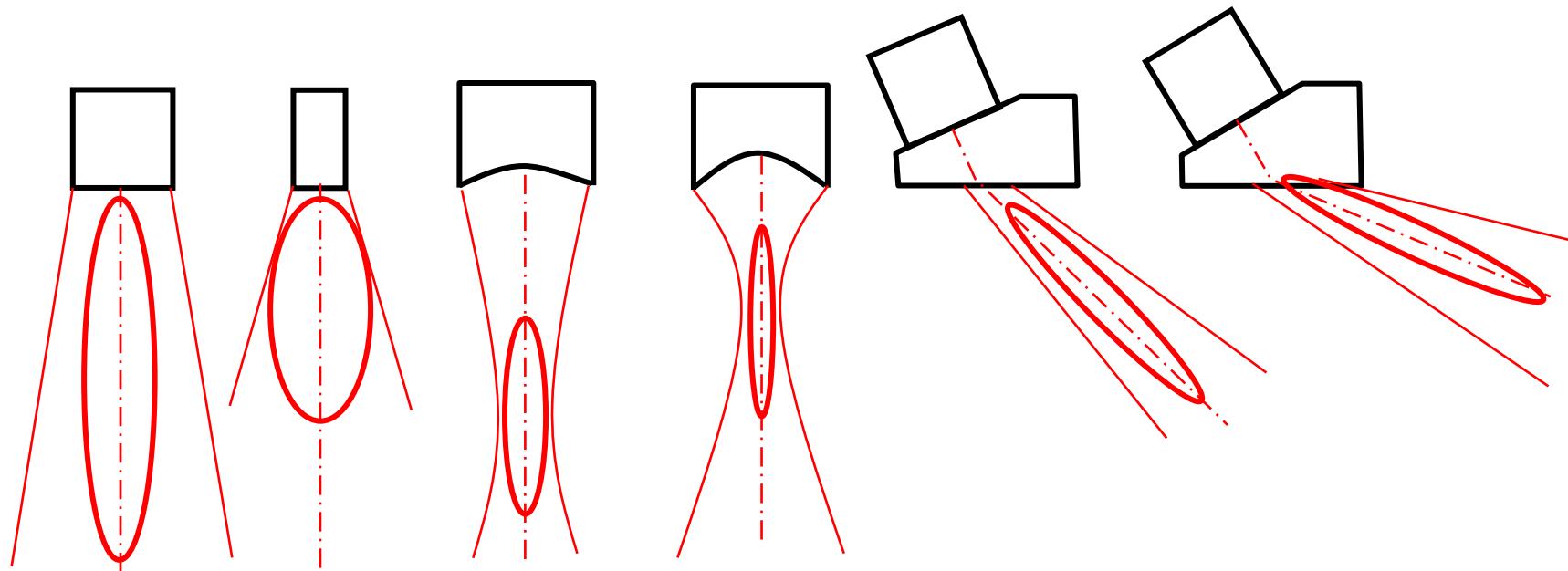
常规单晶探头由于声束角度有限，对方向不利的裂纹或远离声束轴线位置的裂纹，漏检率很高。

超声检测时，缺陷反射能量的大小取决于：缺陷的尺寸、方位、类型。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 常规超声探头

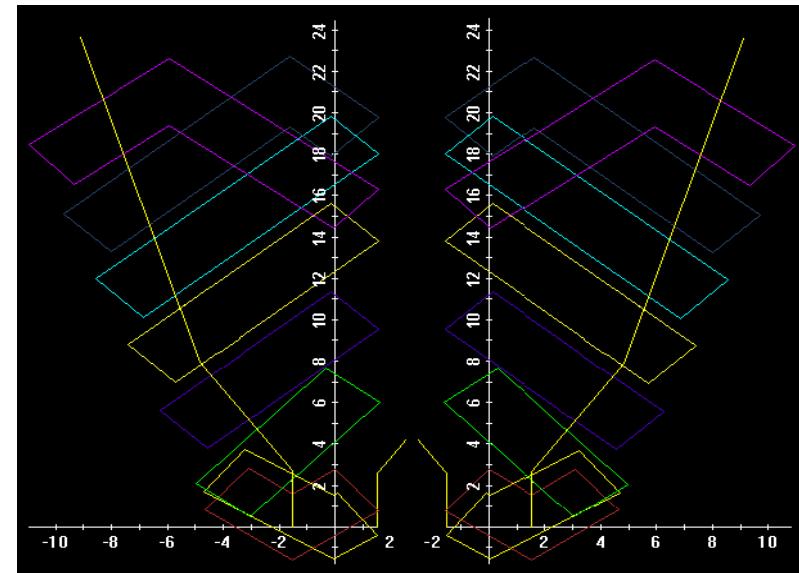
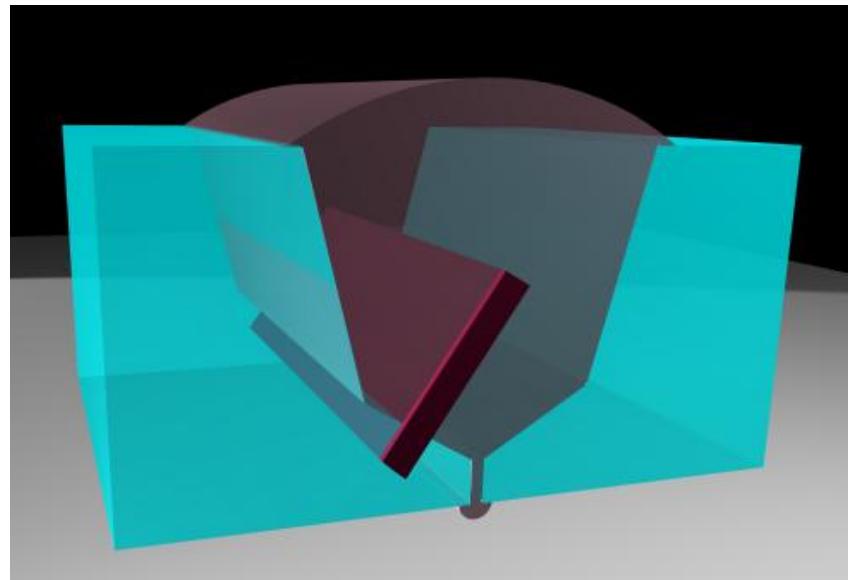




# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

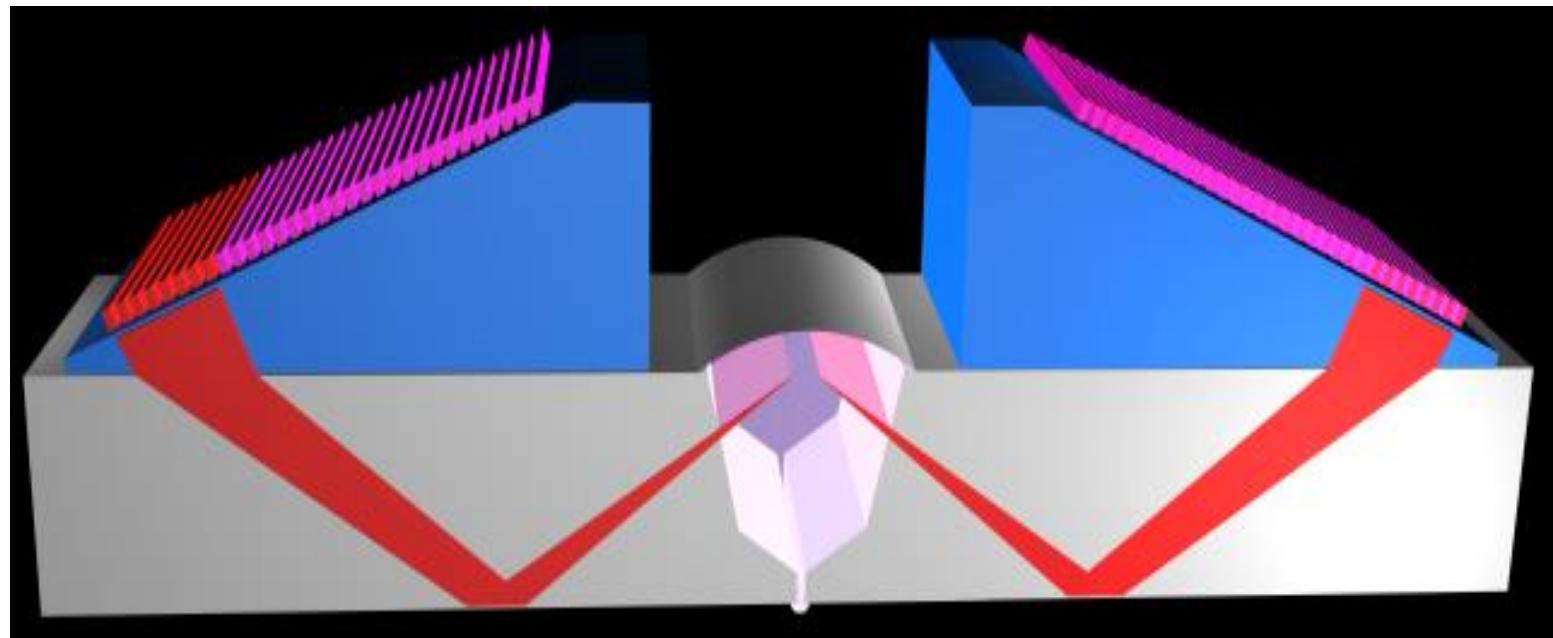
## 3.2 焊缝分区检测

- 将焊缝坡口分成若干个分层；
- 针对每个分层用一组特定的相控阵晶片产生超声波束进行扫查；
- 各分层中实际上需要关心的焊缝区的信息，在分层中设定了一个检测窗口，系统会将此区域的回波信息采集回来进行处理；
- 所有分层的检测窗口可覆盖整个焊缝截面。





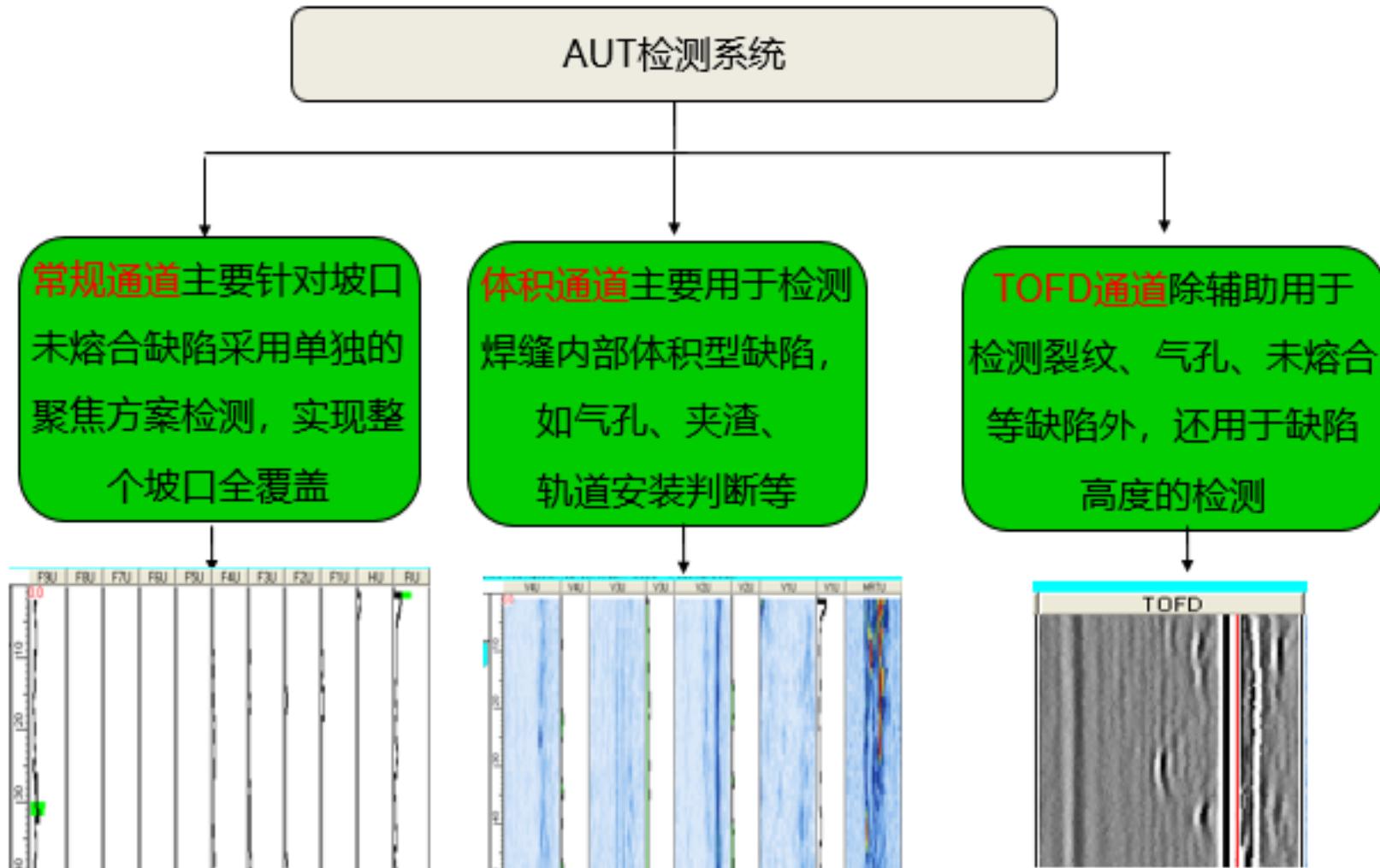
# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术



分层扫查示意图



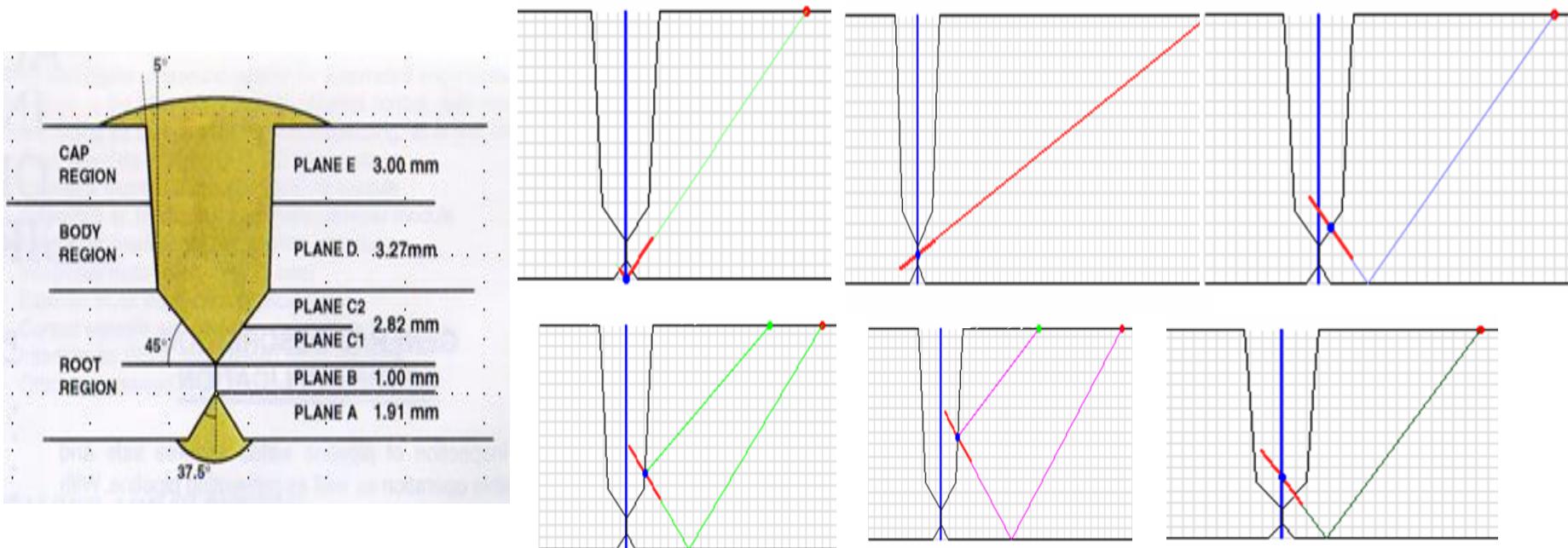
# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

AUT检测主要针对焊缝坡口未熔合缺陷，利用分区扫查法对焊缝的不同分区设置不同的延时聚焦方案，同时辅以体积通道和TOFD通道，实现整个焊缝的全覆，对任意分区的检测灵敏度均达到标准要求。AUT检测不仅能够测量缺陷的长度，还能测量缺陷的高度，能及时根据检测结果指导自动焊的施工，调整焊接参数，避免相同位置连续出现相同的缺陷。



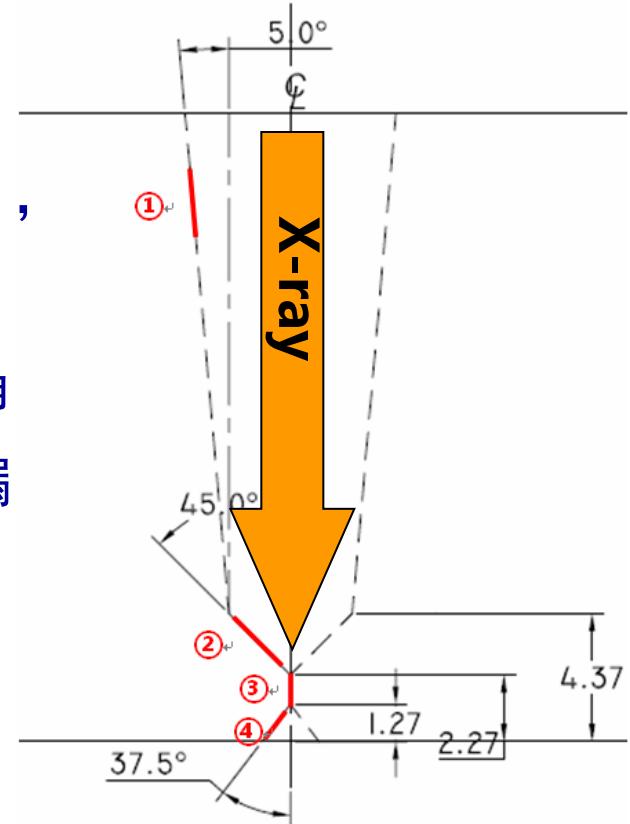


# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## RT检测未熔合缺陷能力分析:

### RT检测自动焊焊缝:

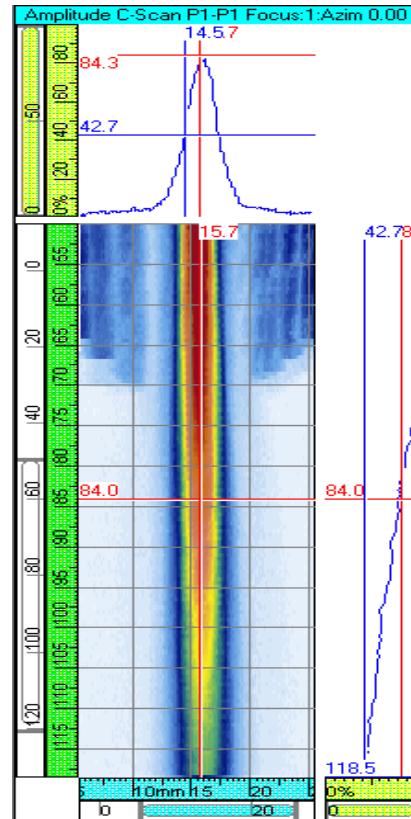
- 当射线方向与未熔合缺陷方向一致（①和③），对比度最大，检出率最高。
- 当射线方向与未熔合角度大于15° 时，随着角度的增大，对比度显著降低，检出率低，易漏检（②和④）。



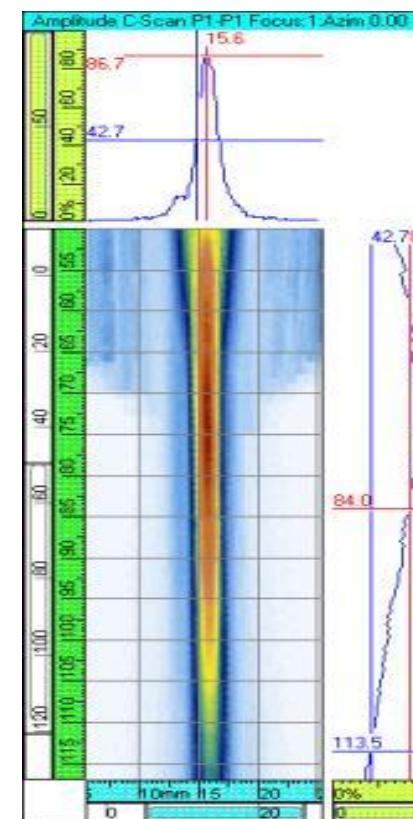


# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

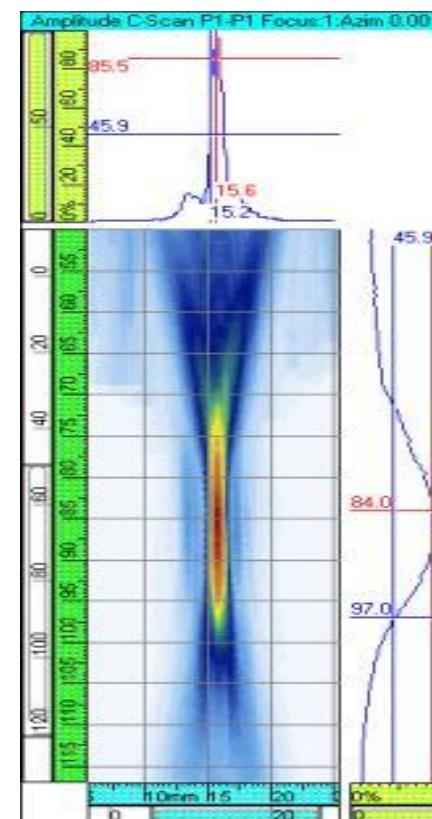
晶片数量: 10  
孔径: 10 x 10mm



晶片数量: 16  
孔径: 16 x 10mm



晶片数量: 32  
孔径: 32 x 10mm

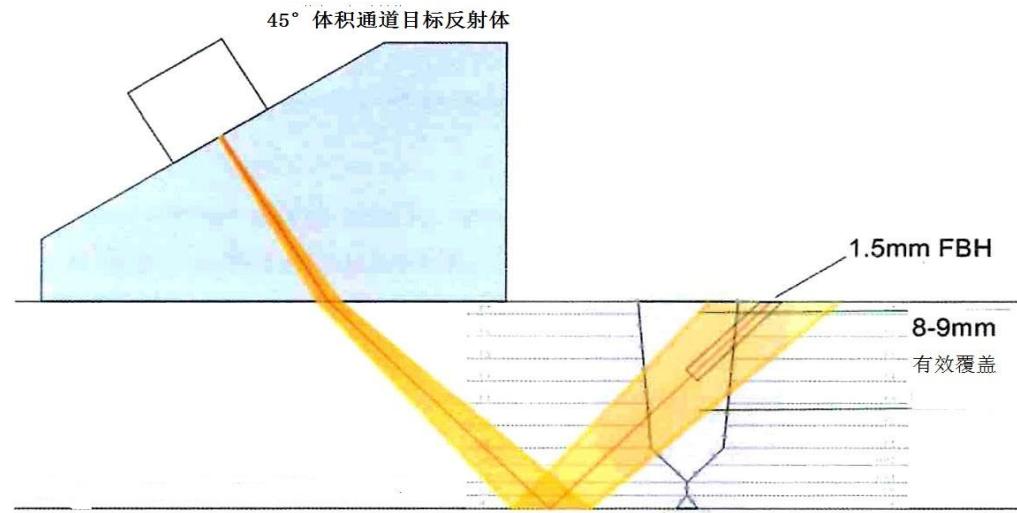


相控阵波束聚焦焦点对比图

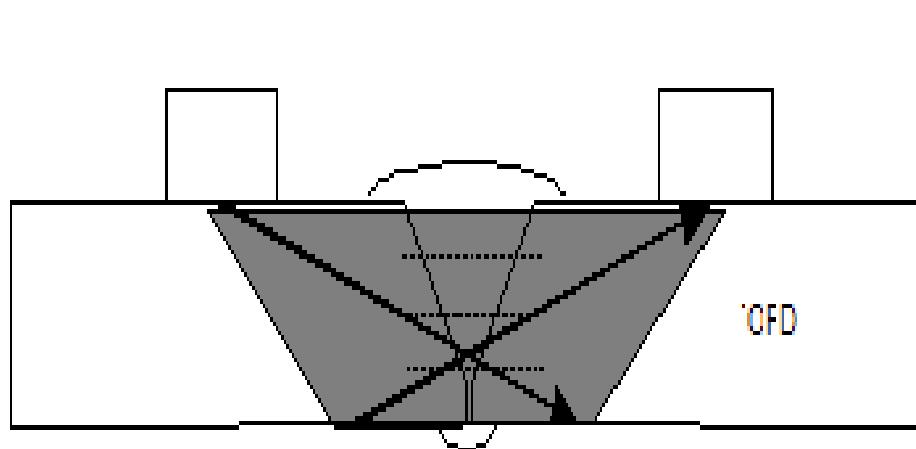


# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 体积通道检测



## TOFD通道检测：

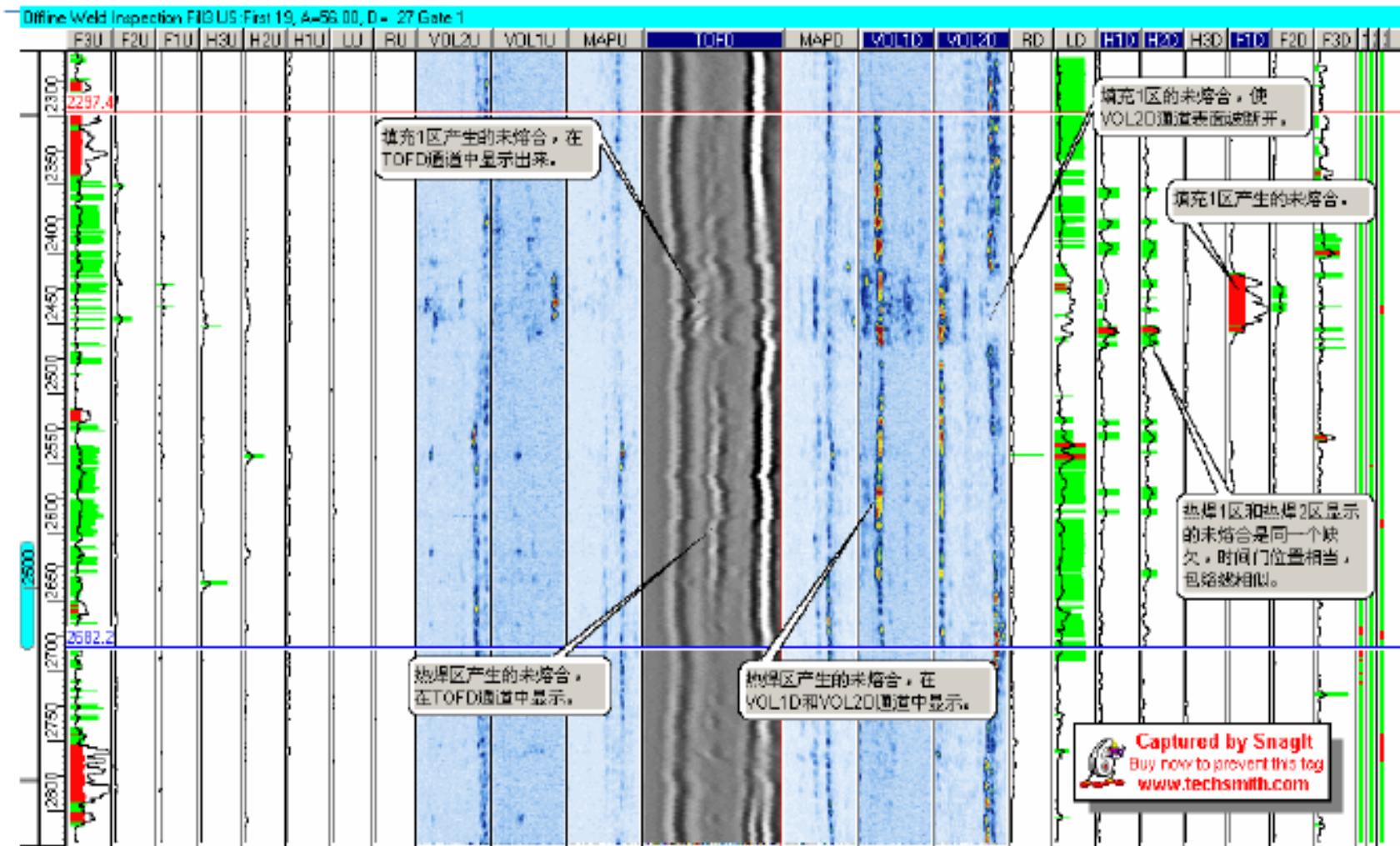


- (1) 提高缺陷定位精度；
- (2) 能够容易识别错边；
- (3) 用于在几何反射信号中区分真实缺陷的辅助手段。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 3.3 典型输出显示---双门限带状图

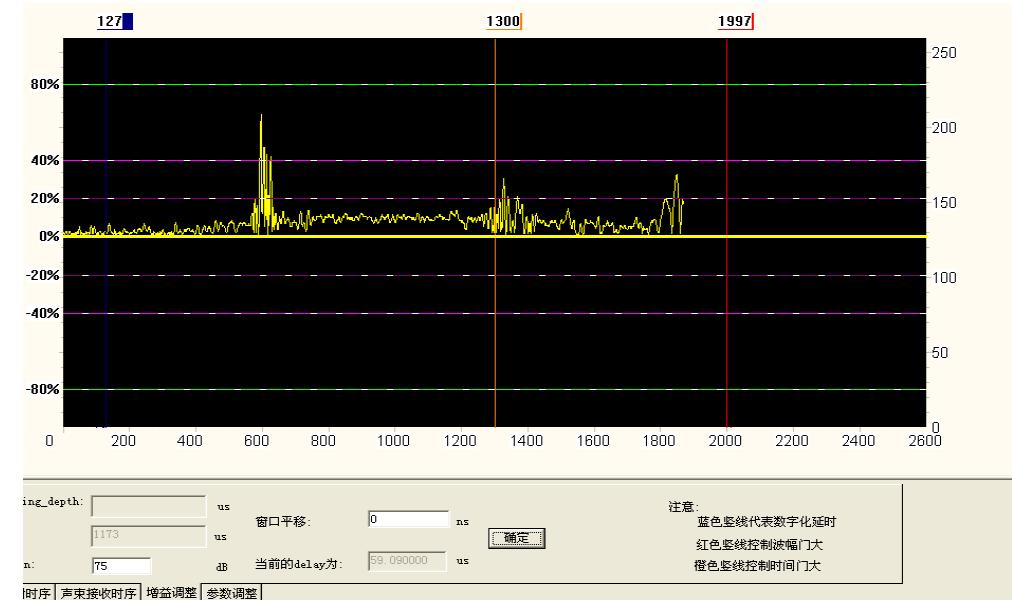




# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

双门带状图显示让焊缝看起来好象是从中间“剖开”一样：

- ◆ 每条带状图代表一个分区
- ◆ “双门” 是指 TOF (渡越时间) 门 (20%) 和波幅门 (5%)
- ◆ 评定阈值设为 40% (ASTM E-1961)，前提是2mm平底孔的反射为80%。





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

带状图 (检测结果) 包括以下几个部分:

- (1) 带状图通道: 主要针对焊缝坡口未熔合缺陷 (自动焊最主要缺陷)
- (2) 体积通道 (含根部B扫): 主要关注坡口内部的体积型缺陷;
- (3) TOFD通道: 辅助双门带状图显示, 对裂纹敏感;
- (4) 耦合通道: 检测工件表面与探头耦合状态, 是其他通道显示的基础
- (5) 横向通道: 可以附加横向探头用来检测横向缺陷。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

AUT分区检测中，关于带状图中色块的定义：

波幅20%～40% 显示为绿色；

波幅40%～70% 显示为红色；

波幅70%～99%显示为黄色；

99%以上 显示为红色。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

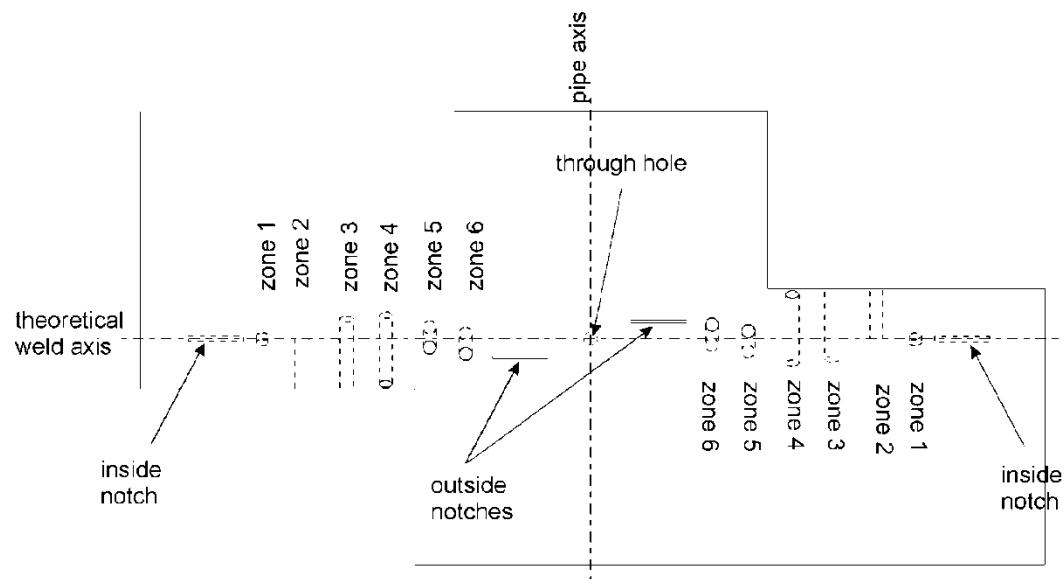
## 3.4 校准试块设计

校准试块用于调整扫查灵敏度，确定缺陷位置。

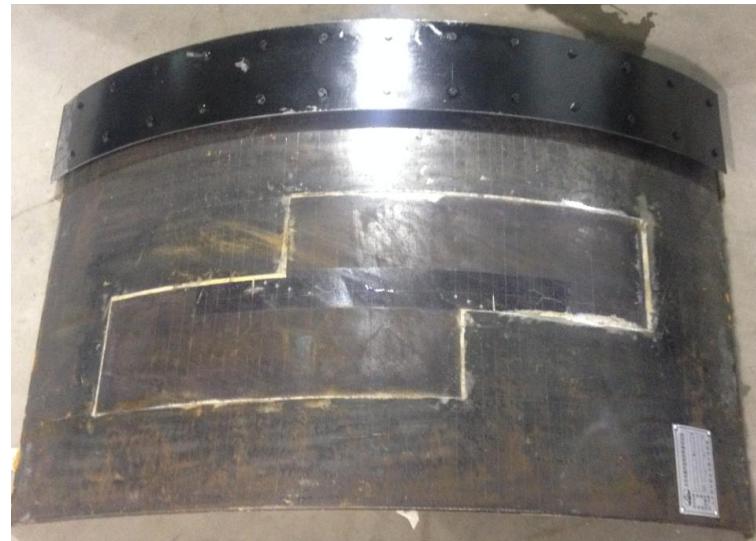
- (1) 分区扫查法使用专用试块进行校准；
- (2) 每一个分区都应有自己的反射体（槽或平底孔）；
- (3) 中心通孔来定门的位置；



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术



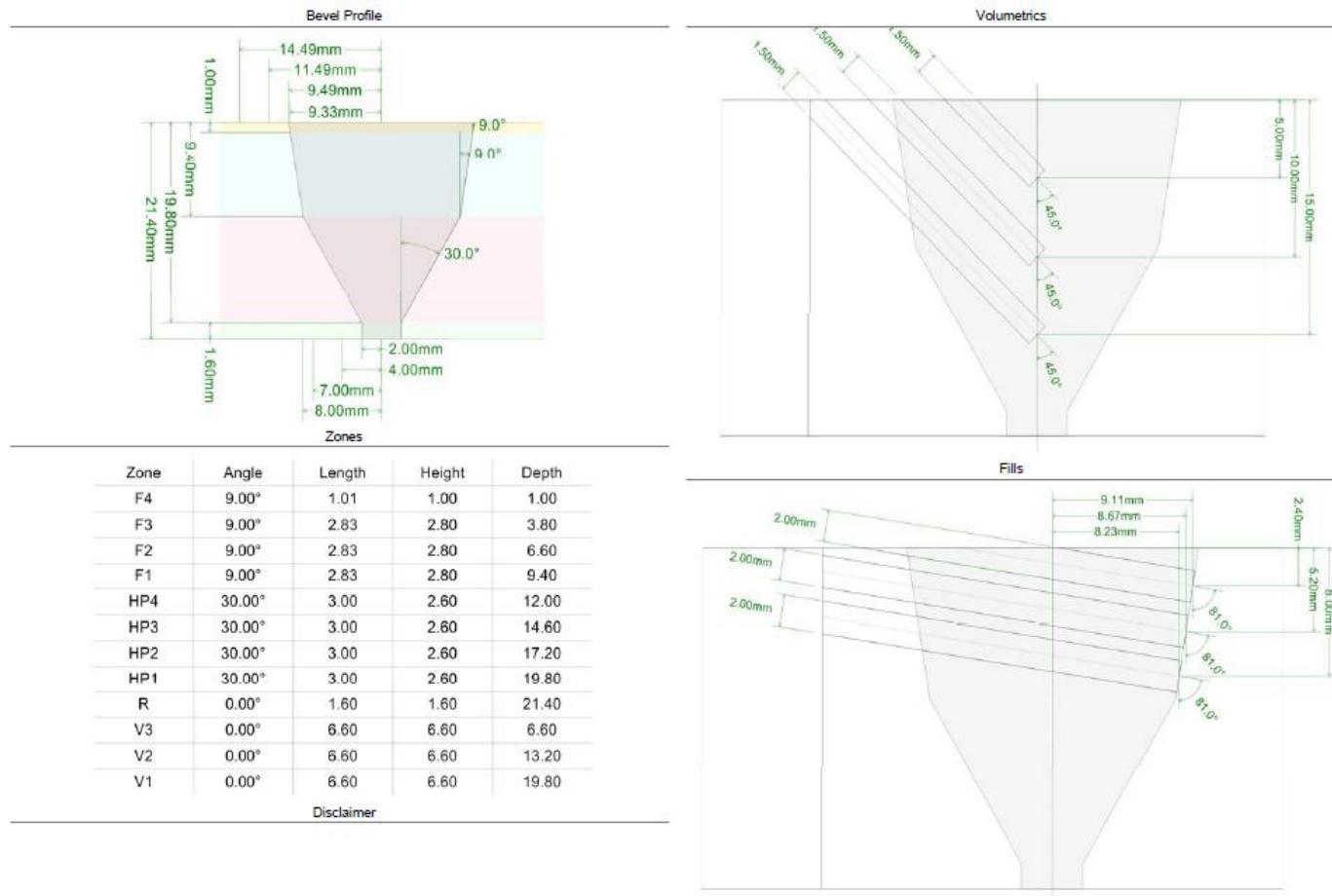
D1422x21.4 CRC 校准试块



顺序一般为:上游根部、钝边、热焊、填充、体积、盖面、横向槽、TOFD(内)、中心通孔、TOFD(外)、横向、下游盖面、体积、填充、热焊、钝边、根部



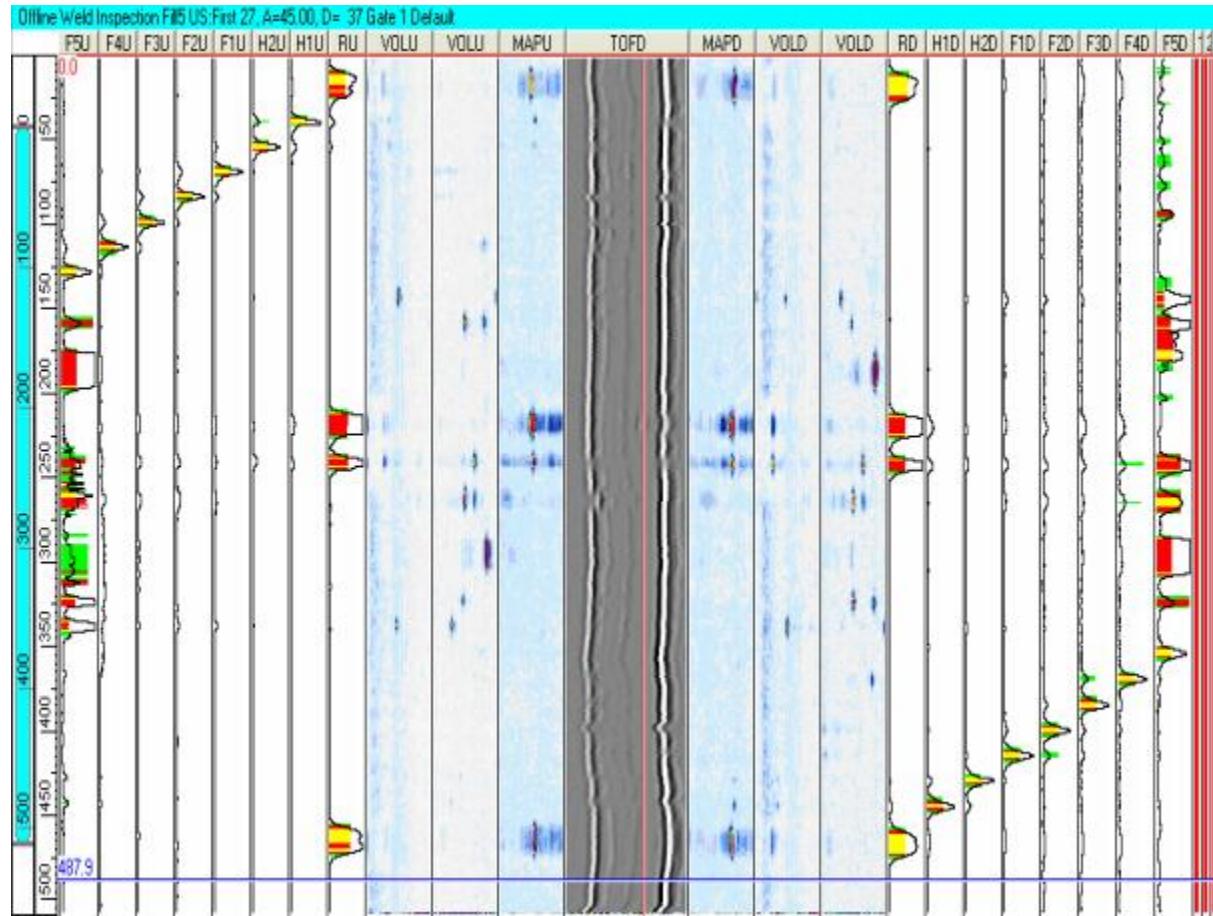
# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 校准扫查图的输出显示



- (1) 主反射体
- (2) 覆盖
- (3) 中心通孔



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

**特点：**

- (1) AUT对全自动焊未熔合缺陷具有很高的检测能力，能够及时的根据检测结果反馈指导自动焊施工；
- (2) 设置得当的AUT可对管道环焊缝进行最敏感和最完整的检测；
- (3) 在长输管道环焊缝的超声检测技术中，AUT是重复性最好、争议最少的检测技术。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 4、质量控制措施—AUT工艺评定

### A U T 质量控制体系





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## AUT工艺评定

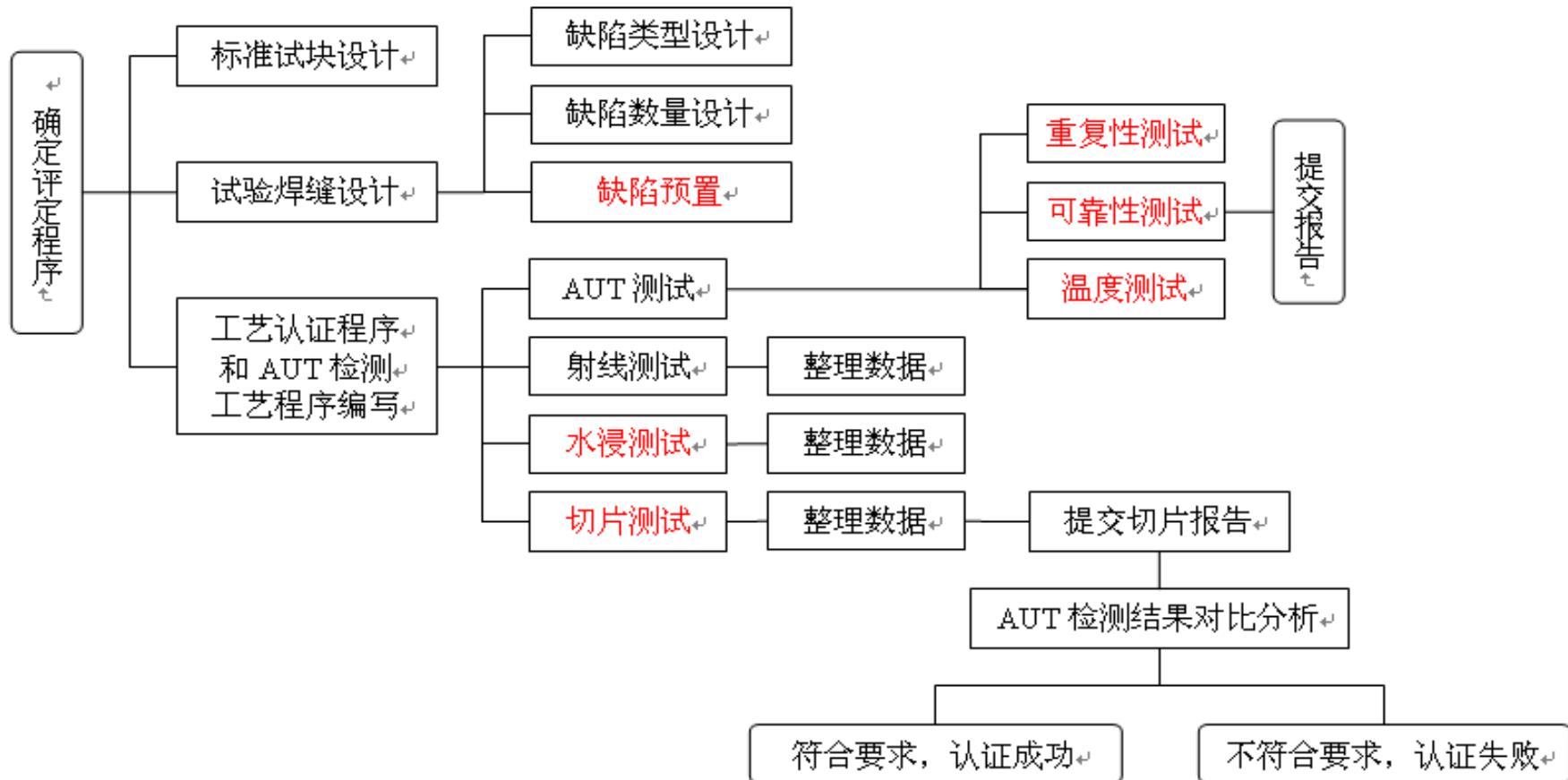
为了保障AUT检测的可靠性，提供科学的检出率依据，国际上2010年开始AUT工艺评定，中俄东线是国内陆上石油管道第一次遵照国际惯例开展的AUT工艺评定，关键质量控制点有以下几个：

- 提供一套科学的测试流程：通过这套程序能够对检测公司的AUT检测能力进行科学的评估；
- 设计加工一套人工缺陷焊缝：从统计学角度，这些加工的缺陷能够覆盖施工现场出现的各种缺欠情况；
- 对第三方测试能力进行验证：通过对加工缺欠的解剖和金相成像，验证加工的人工缺欠满足设计要求。
- 要有可考核的定量指标。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

**评定流程：**严格按以下工艺评定程序实施。



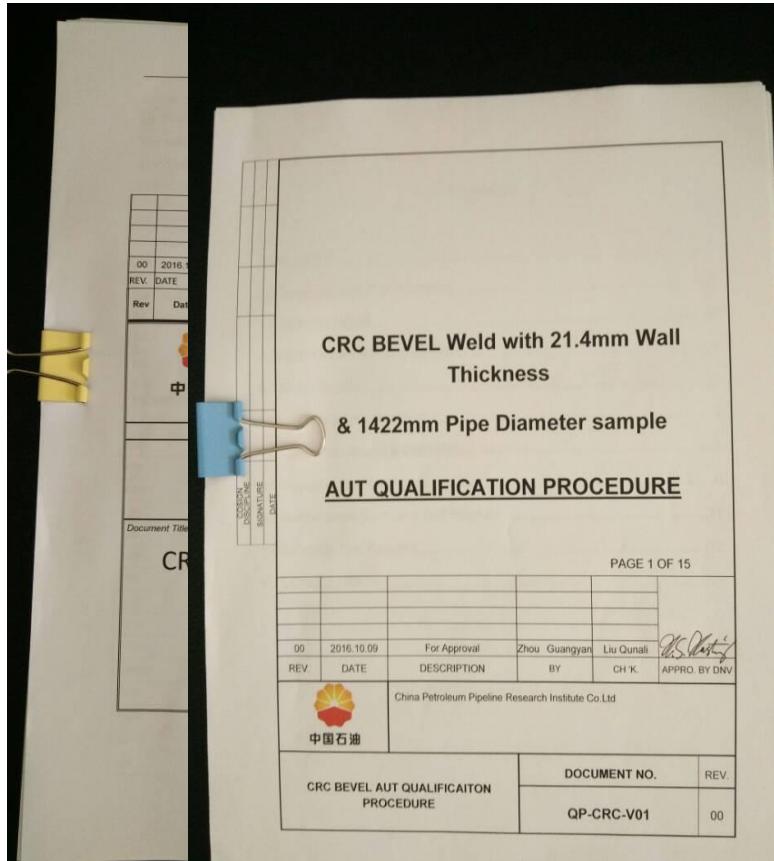


# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

- **缺陷预制：**要进行成功的评定必须制作含有足够数量人工缺陷的试验焊缝，并且缺陷的设计要有代表性，人工缺陷的质量是评定成败的关键，我们预制了120个缺陷；
- **重复性测试：**通过对不同位置校准试块、对轨道偏置条件下测试焊缝的多次扫查，验证AUT检测的稳定性和一致性；
- **可靠性测试：**通过多种方法对比测试，对AUT缺陷检出能力进行定量分析评价，验证AUT检测工艺的可靠性；
- **温度灵敏度测试：**在校准试块与测试焊缝存在一定温差情况下进行AUT测试，有效保障在试块与焊缝存在温差或焊缝阳面和阴面温差较大情况下，AUT检测结果的一致性；
- **水浸测试：**用于对AUT工艺进行对比评价，消除耦合及聚焦方案的影响。在实验室条件下，水浸超声的缺陷检出率接近100%，是工艺评定的必备设备。



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术



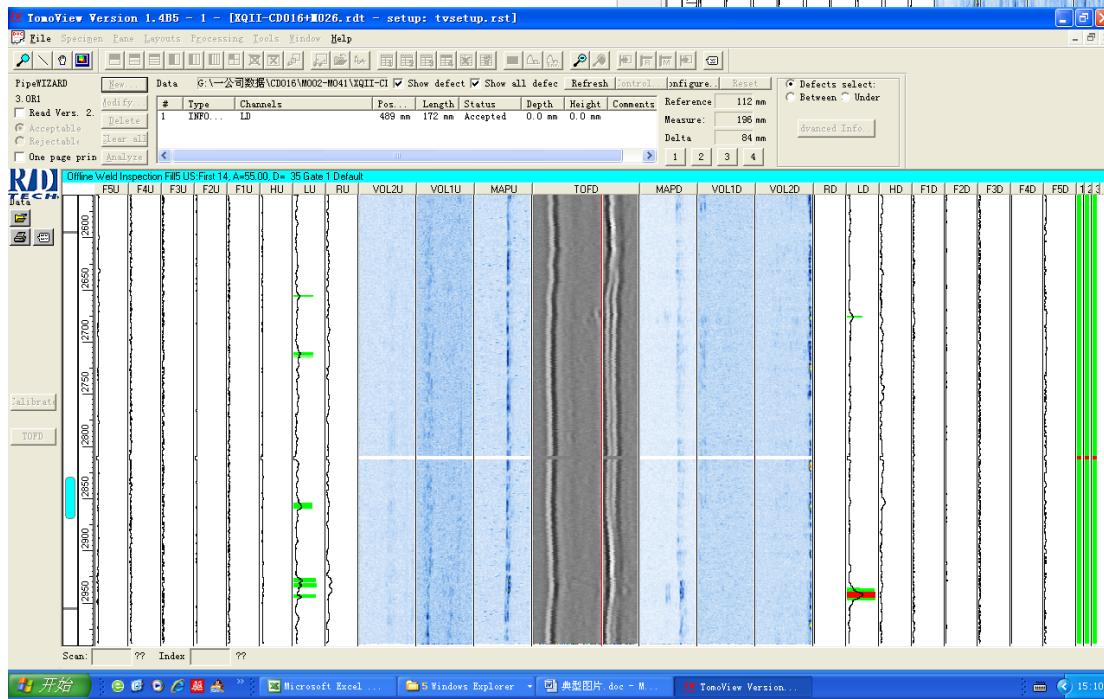
AUT工艺评定程序及认证文件



# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 4、现场存在的问题

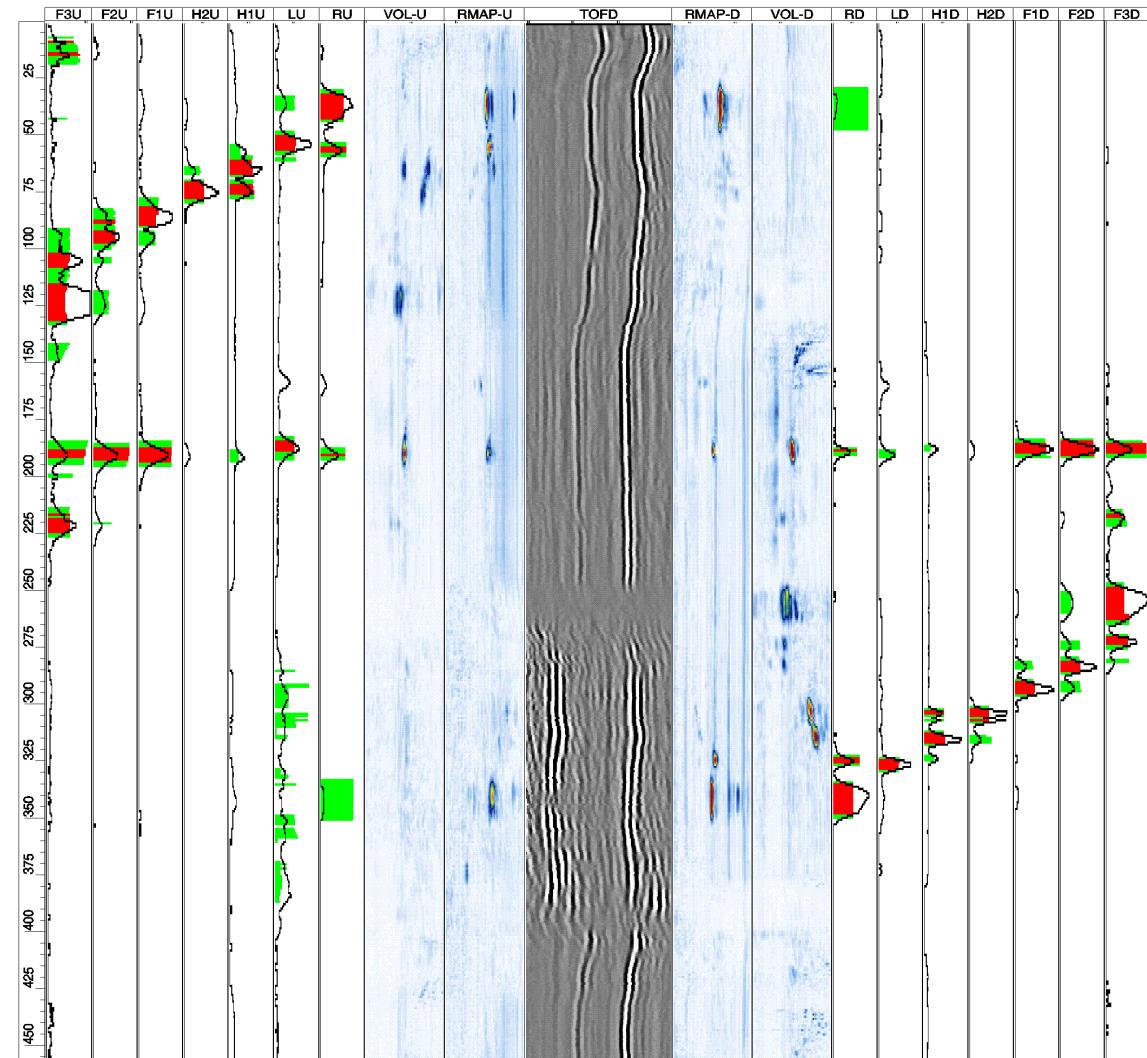
### 4.1 耦合或数据丢失





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 4.2 未按规定校入校出



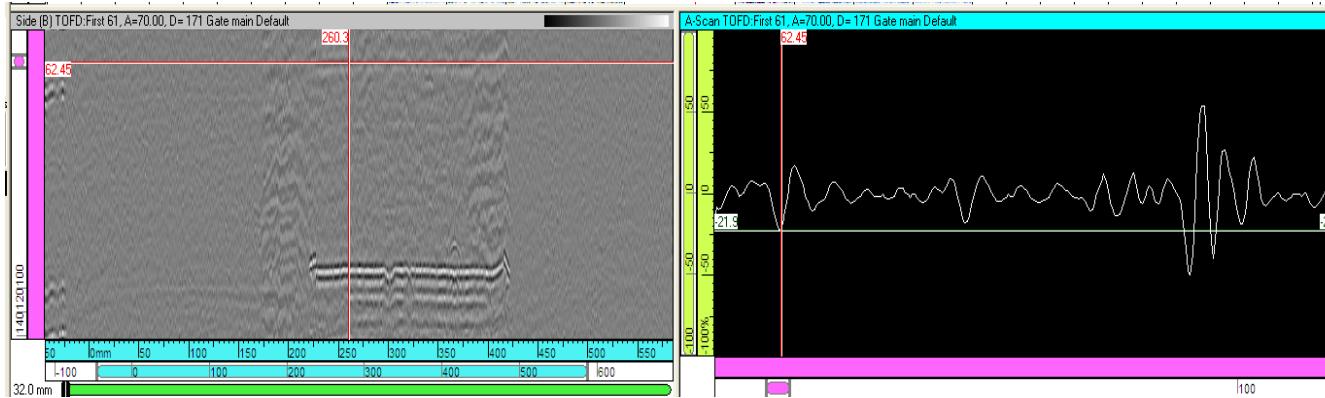


# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

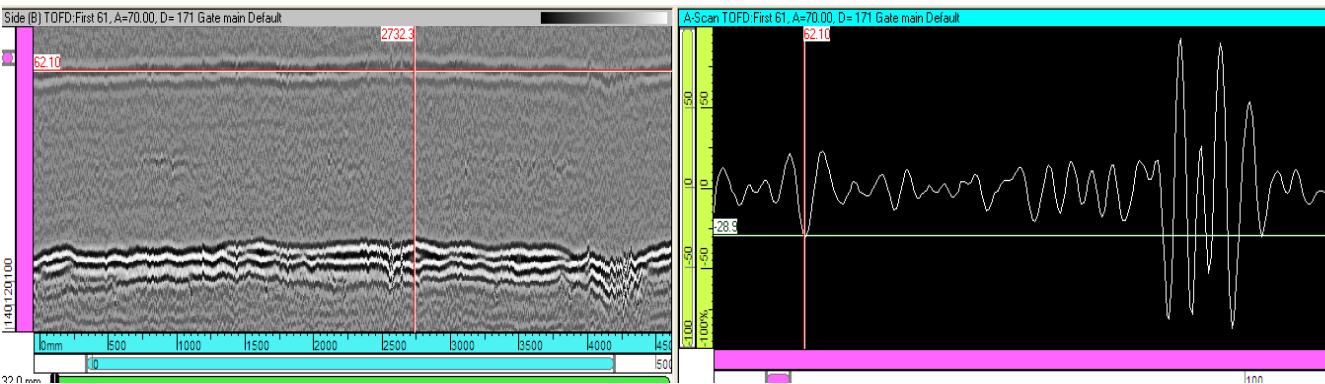
## 4.3 数据不合格的问题

检测/校入/校出TOFD直通波幅值低于40%

21%



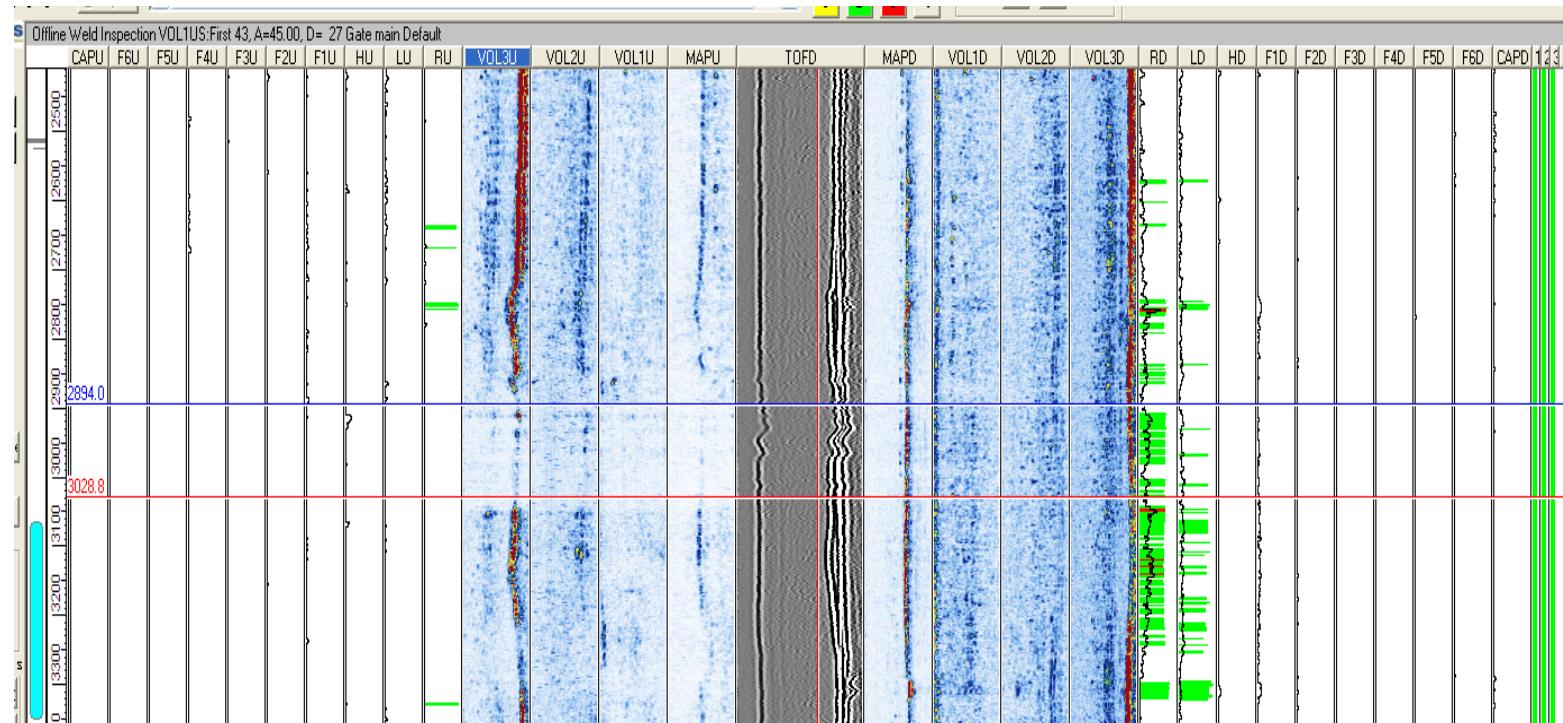
28%





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

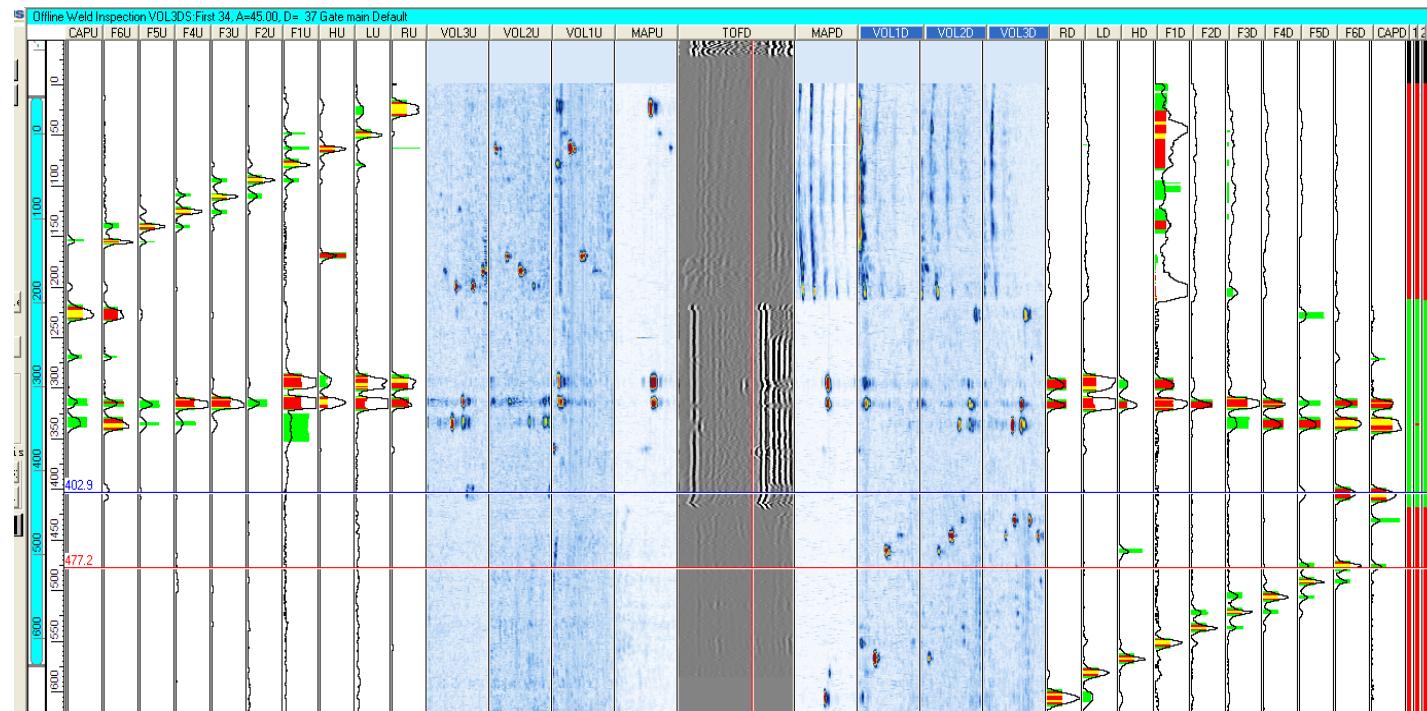
丢失B扫，影响复评





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

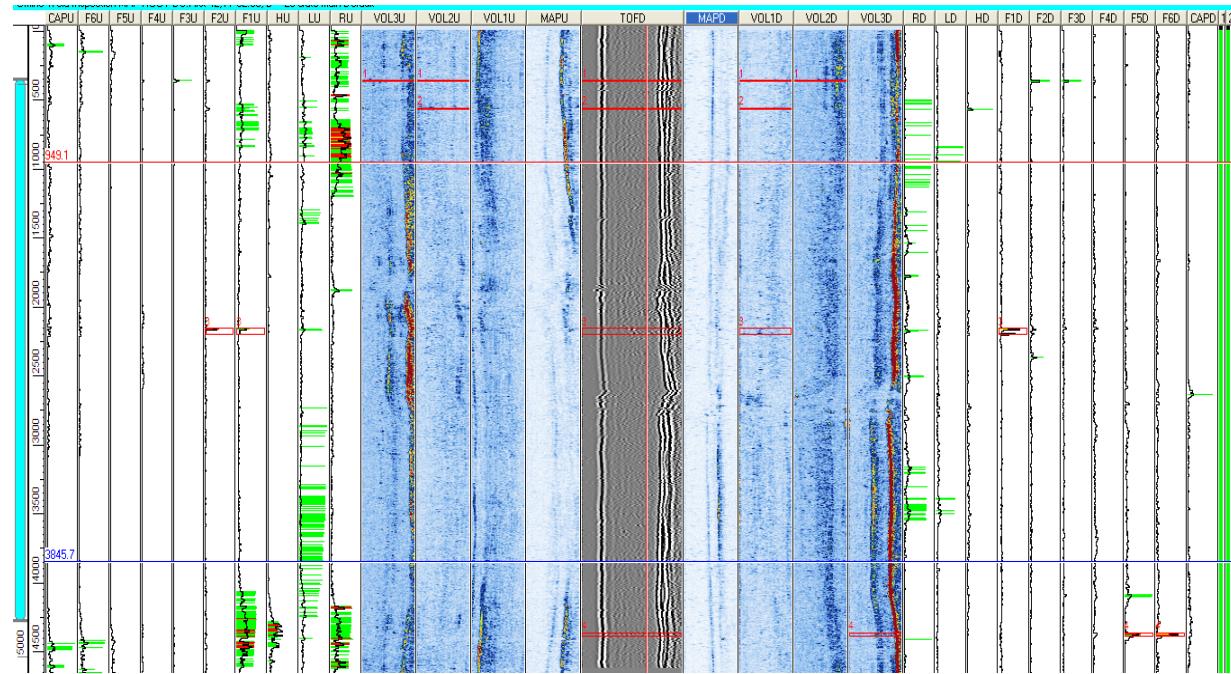
体积通道丢失，影响评定





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

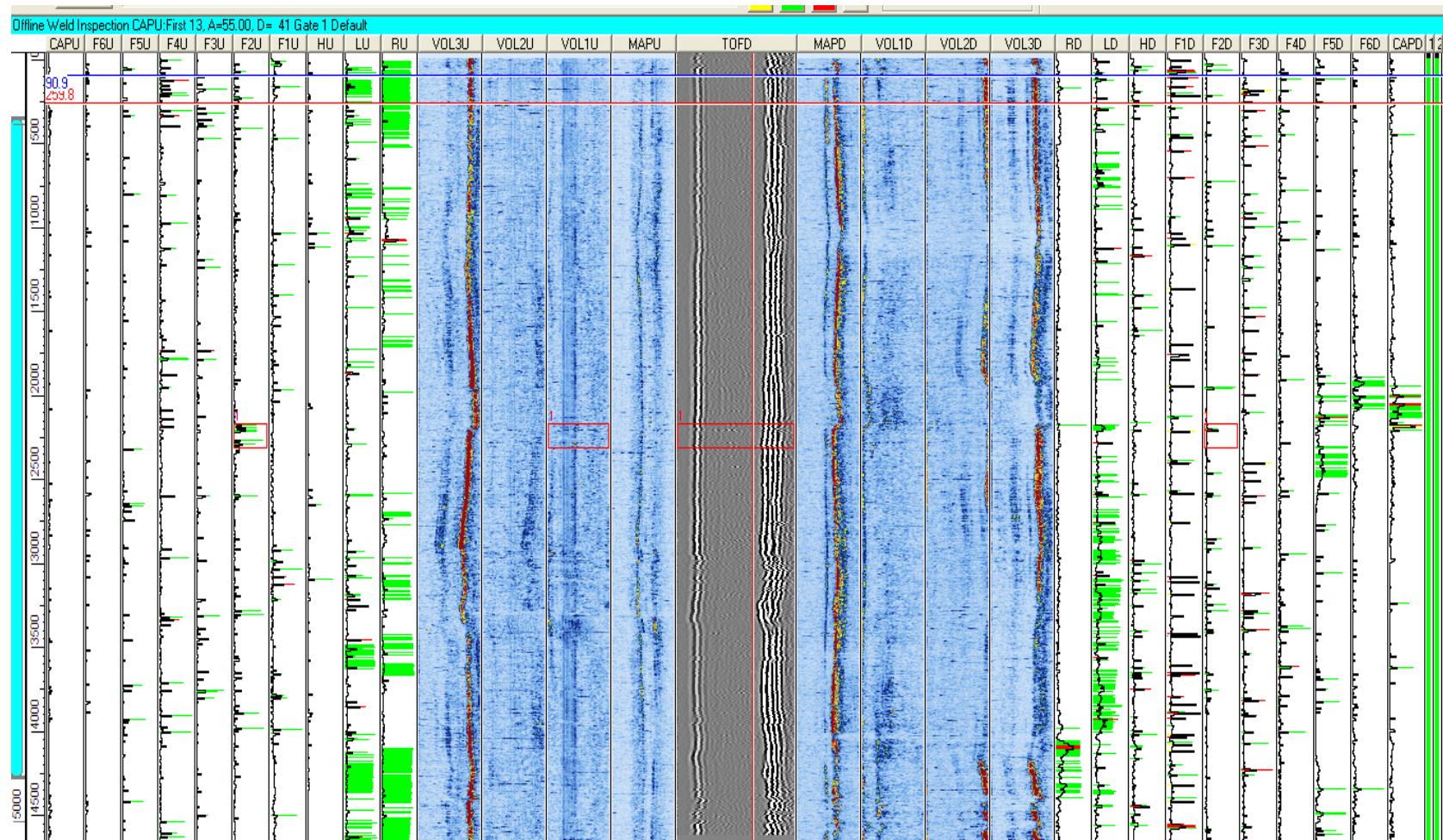
轨道偏移严重，影响有效评定





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

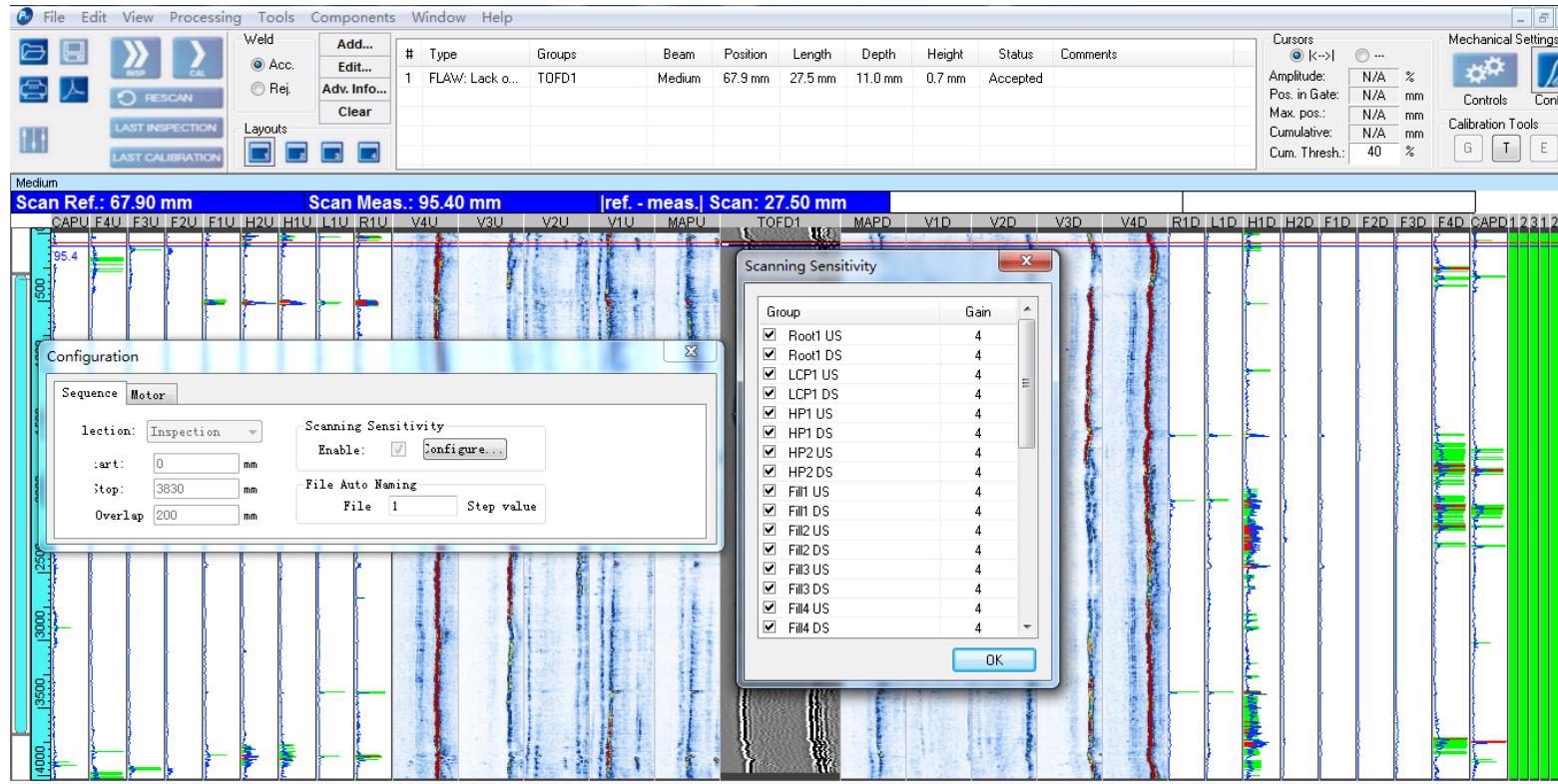
由于设备原因导致扫查数据噪声高





# 一、全自动超声 (AUT) 检测技术

## 4.4 后台问题 (增益、时间等)





## 二、相控阵（PAUT）检测技术



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 全自动超声检测（Automatic Ultrasonic Test, AUT）：

- 用于环焊缝检测的、具有自动扫查装置的超声检测系统；
- AUT以分区扫查为主、以TOFD和体积通道检测为辅；
- AUT检测系统分为两种，一种是相控阵系统，一种是多探头系统，国内使用的均是相控阵系统。

### 相控阵超声检测（Phased Array Ultrasonic Test, PAUT）：

- 专指便携式相控阵检测设备；
- 以扇扫为主要成像方式。

在国内尽管均是采用相控阵技术，但成像方式不一样、执行的标准不一样、应用的领域也不一样。



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 1、相控阵发展史

- More than 50 years
- medical field ( baby. heart. liver. Brain .....)



医用相控阵B超设备



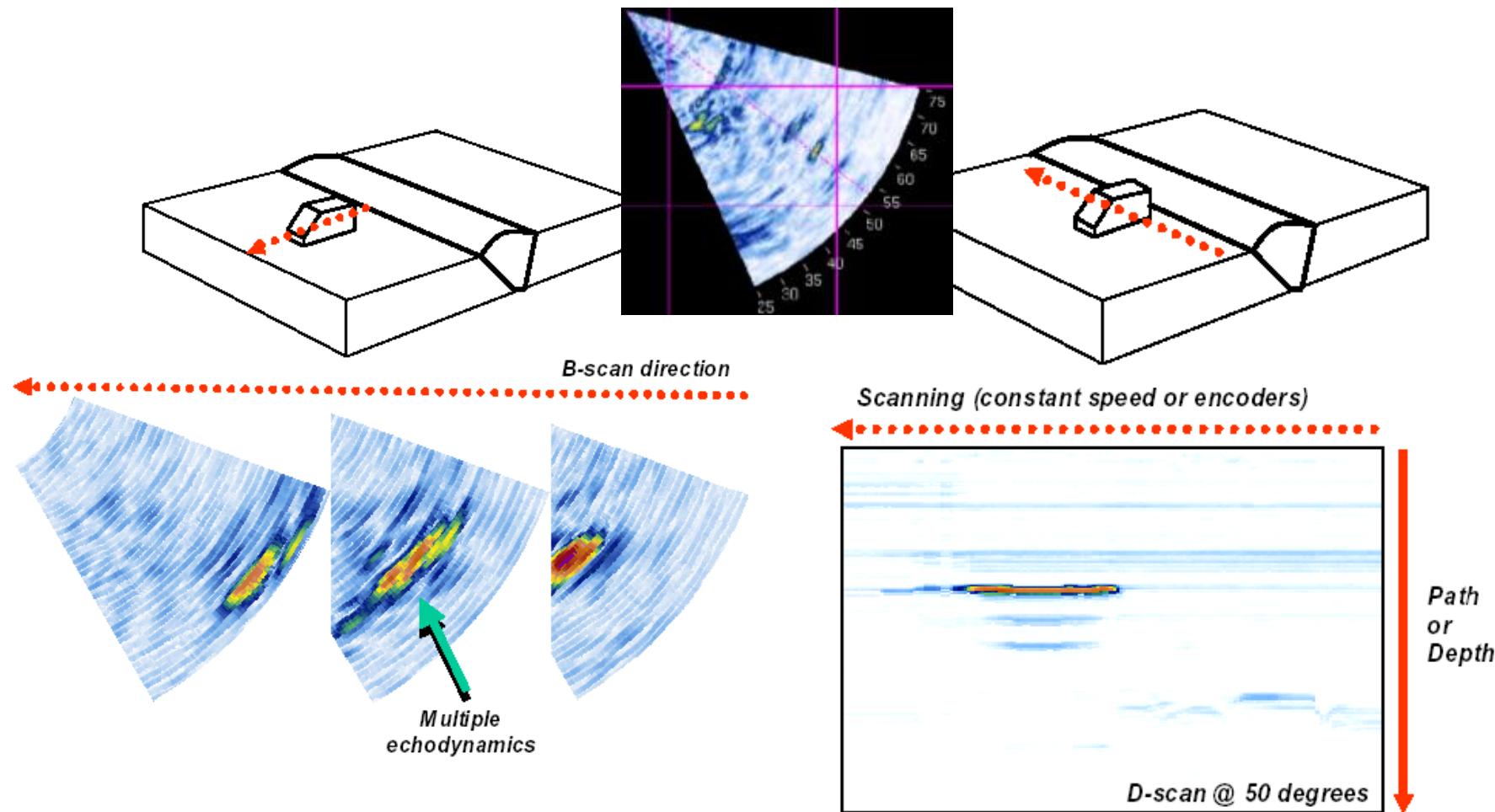
## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 2 PAUT (phased Array Ultrasonic Test ) 技术简介

- 是一种相控阵超声检测技术
- 对待检部位进行逐角度的扫查，即S扫查（扇扫）。
- 显示方式：A scan B scan C scan Dscan



## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

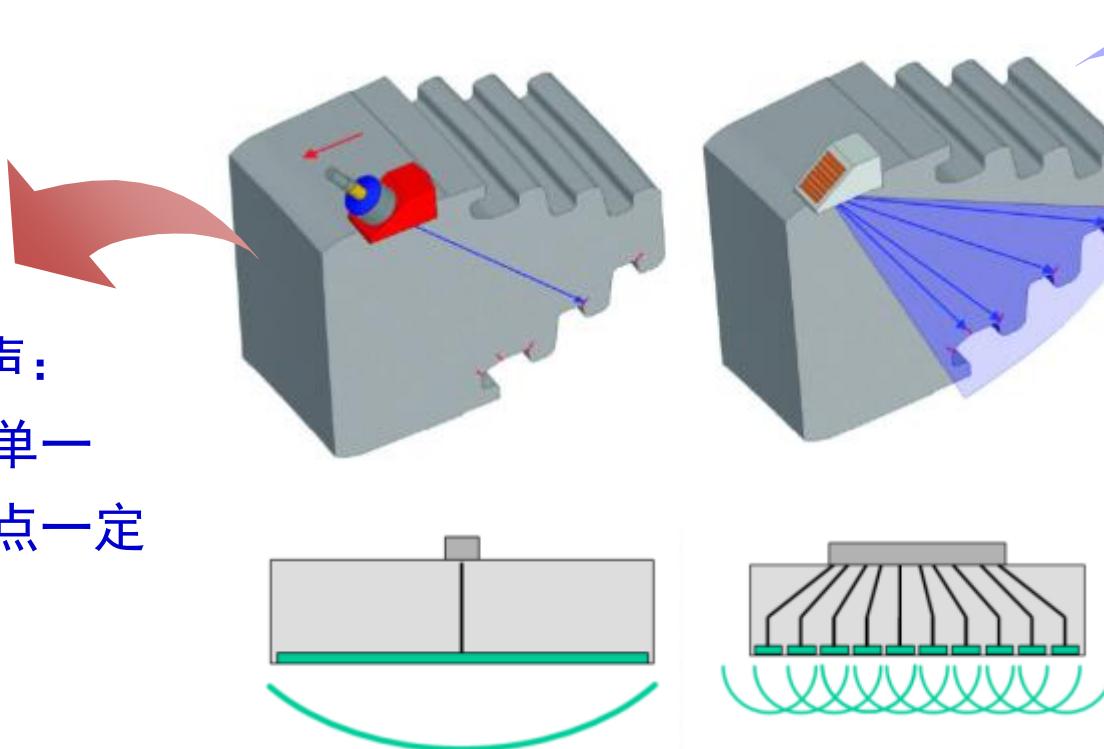




## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

常规超声：

- 角度单一
- 聚焦点一定



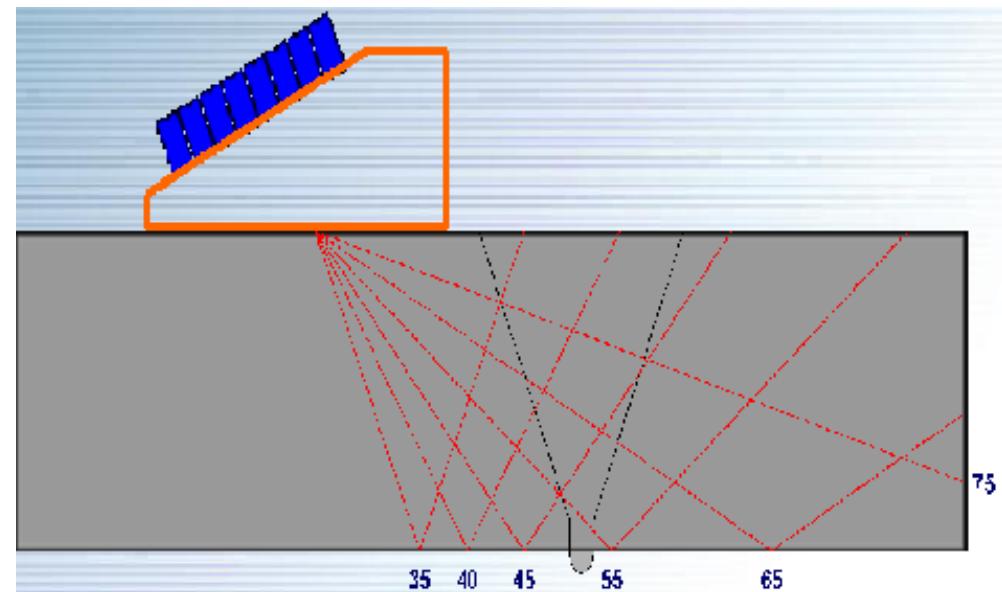
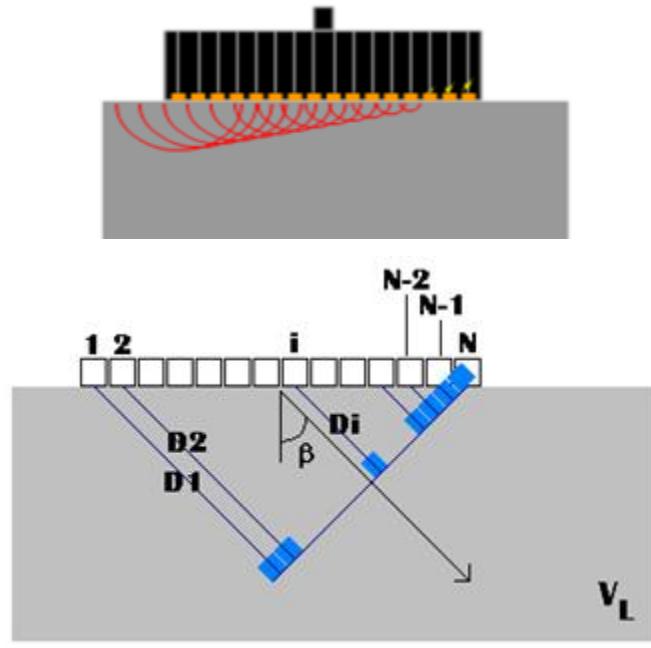
相控阵超声：

- 复杂几何外形
  - 大壁厚
  - 扫查空间大
- ==>相控阵多晶片探头和电子聚焦来实现



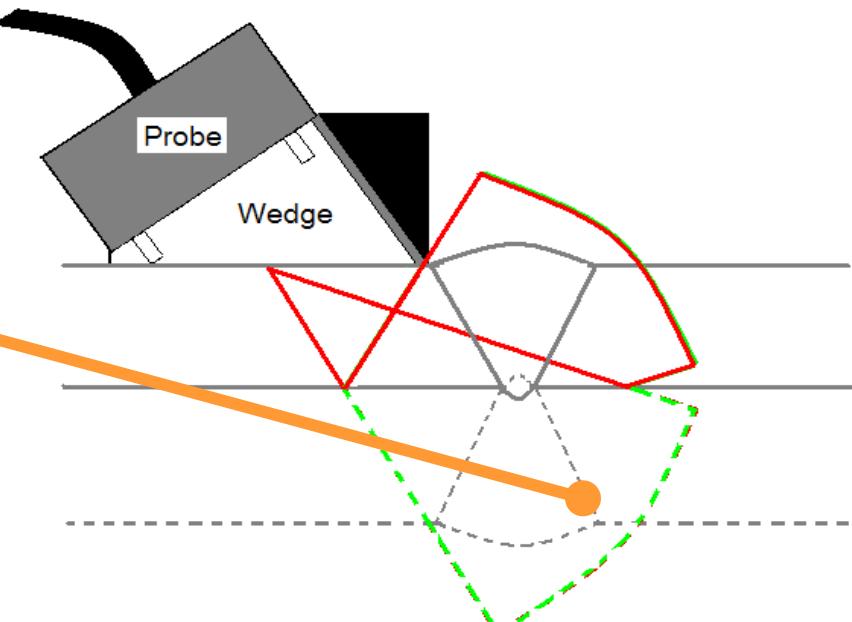
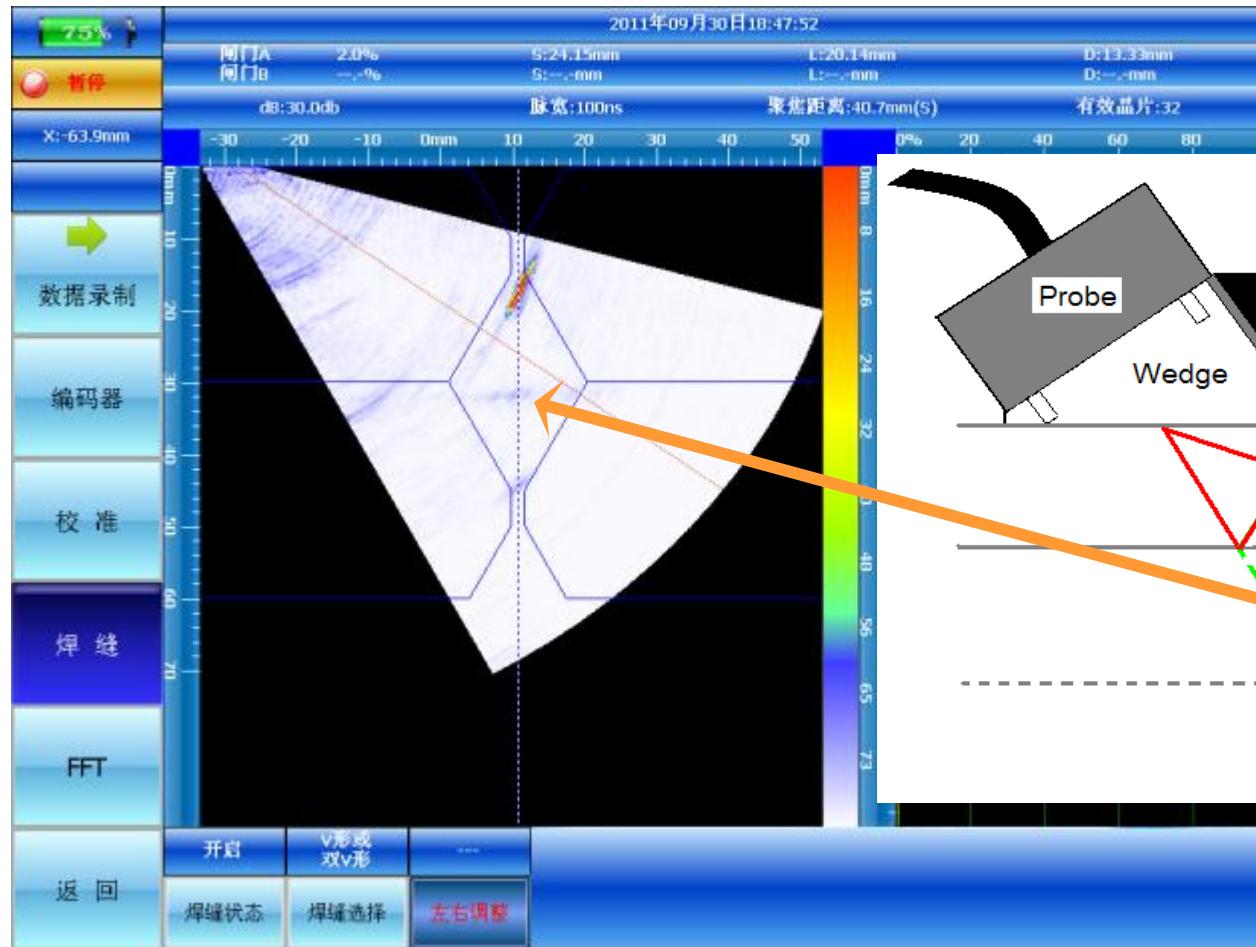
## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

### 检测原理





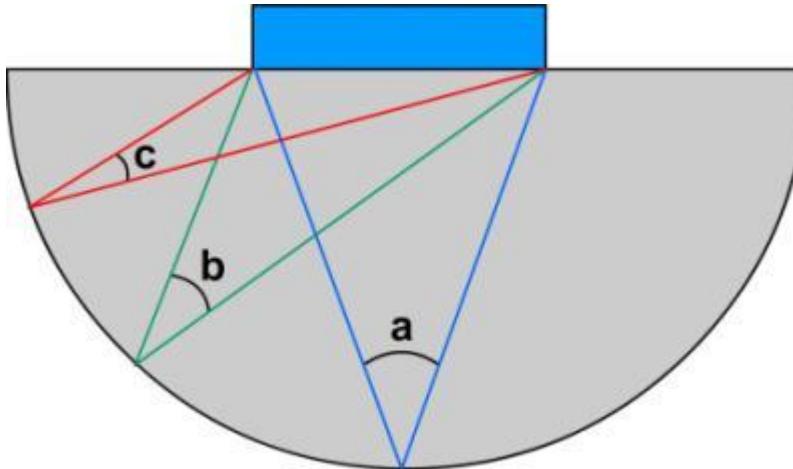
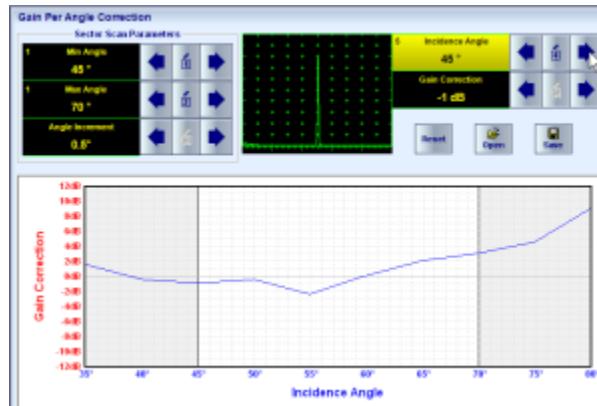
## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术





## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

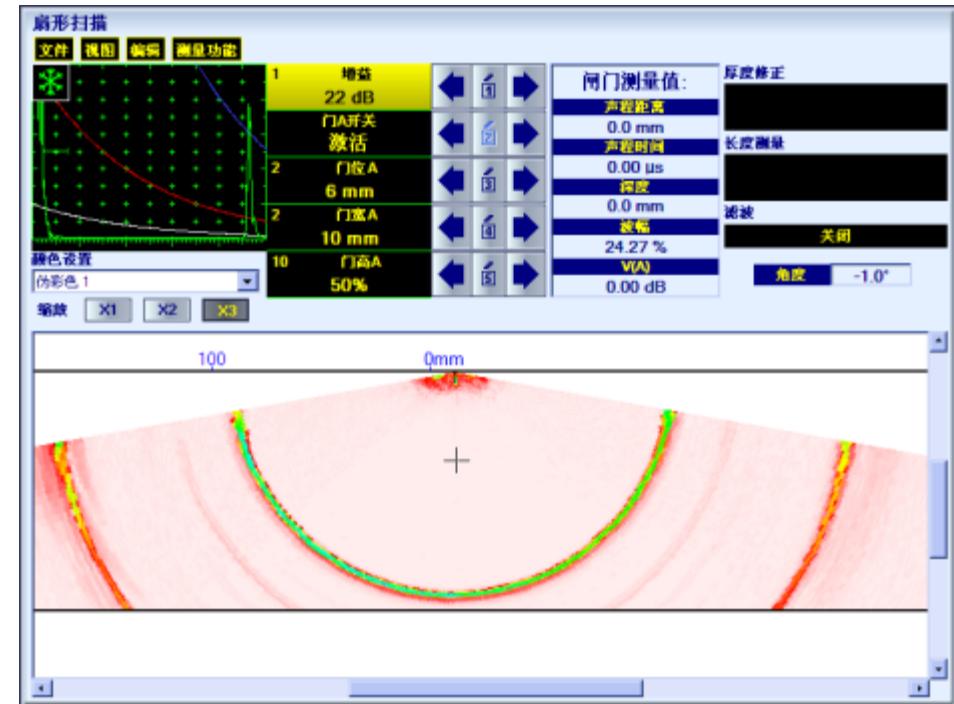
### PAUT角度增益补偿



扇形覆盖区域中能量分布具有非均匀性

对线阵探头中的晶片进行单独补偿，使晶片的灵敏度达到一致：

相控阵探头晶片的不均匀性（出现偏差）；  
在每个聚焦法则中，楔块声束路径/损耗都是不同的。

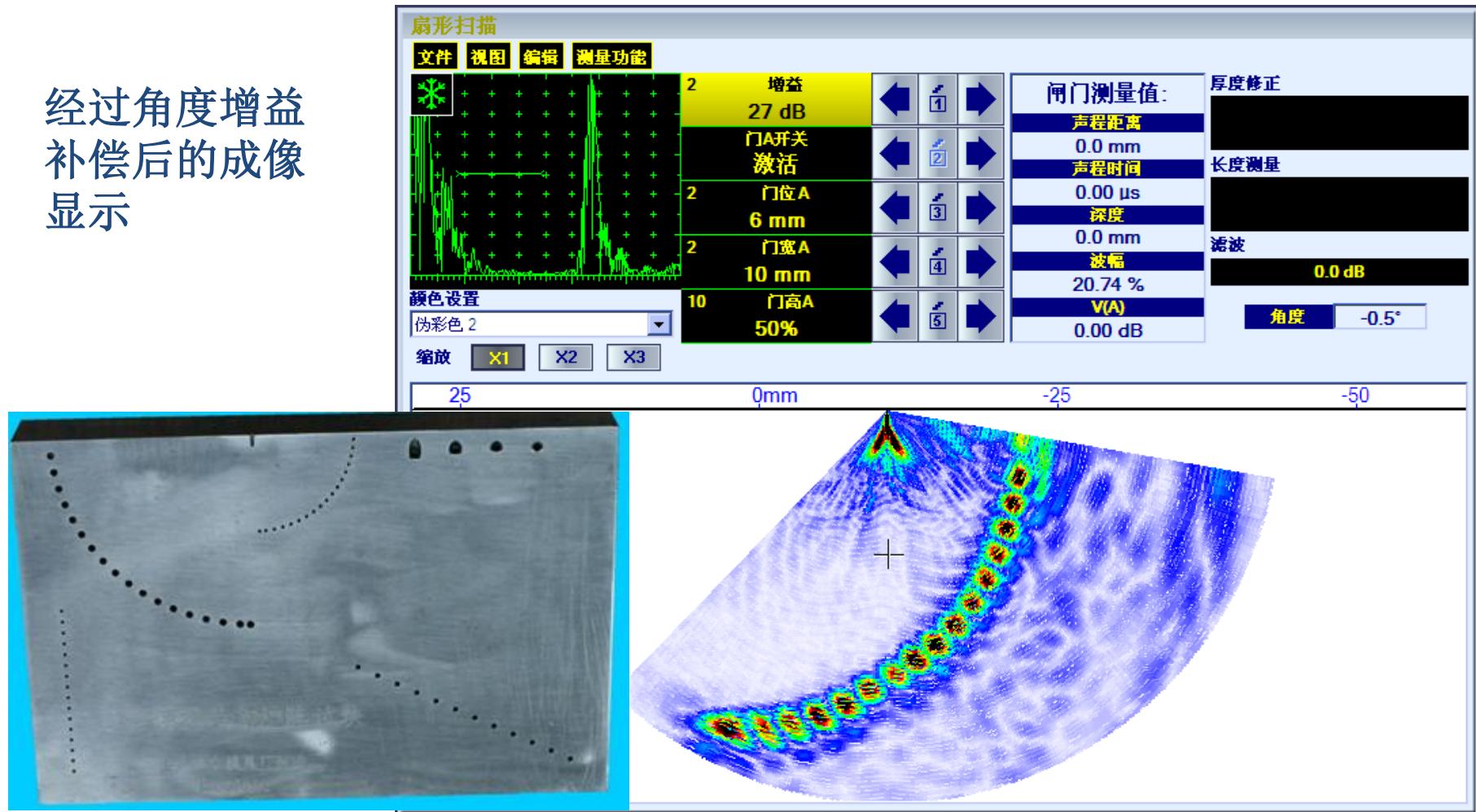


通过角度增益补偿技术获取等量化数据



## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

经过角度增益  
补偿后的成像  
显示

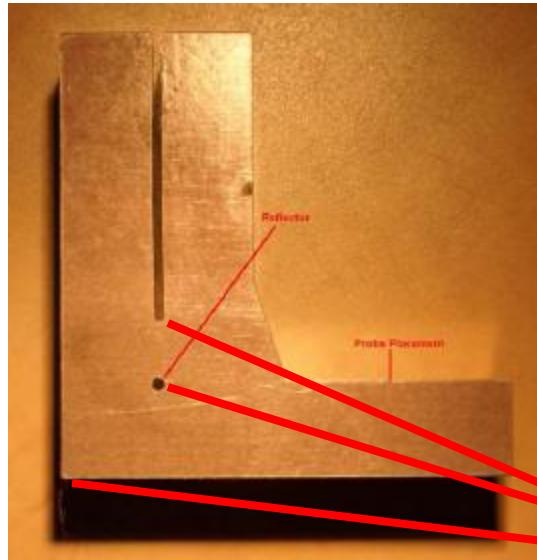




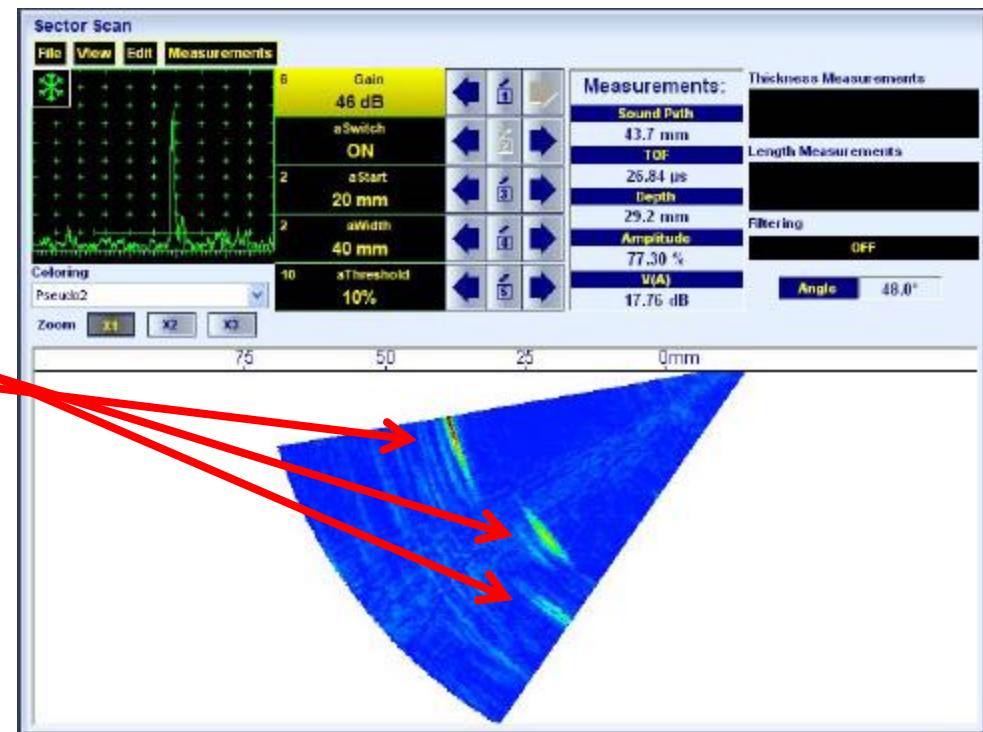
## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

### PAUT检测应用

传统工业相控阵扇形扫查成像模式:



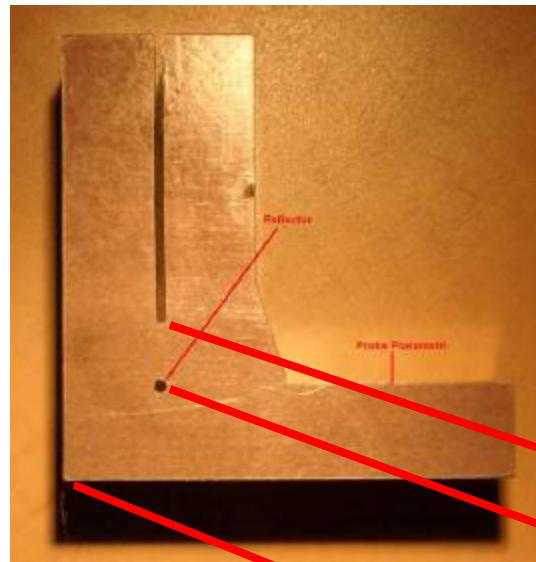
真实缺陷位置与成像结果不一致



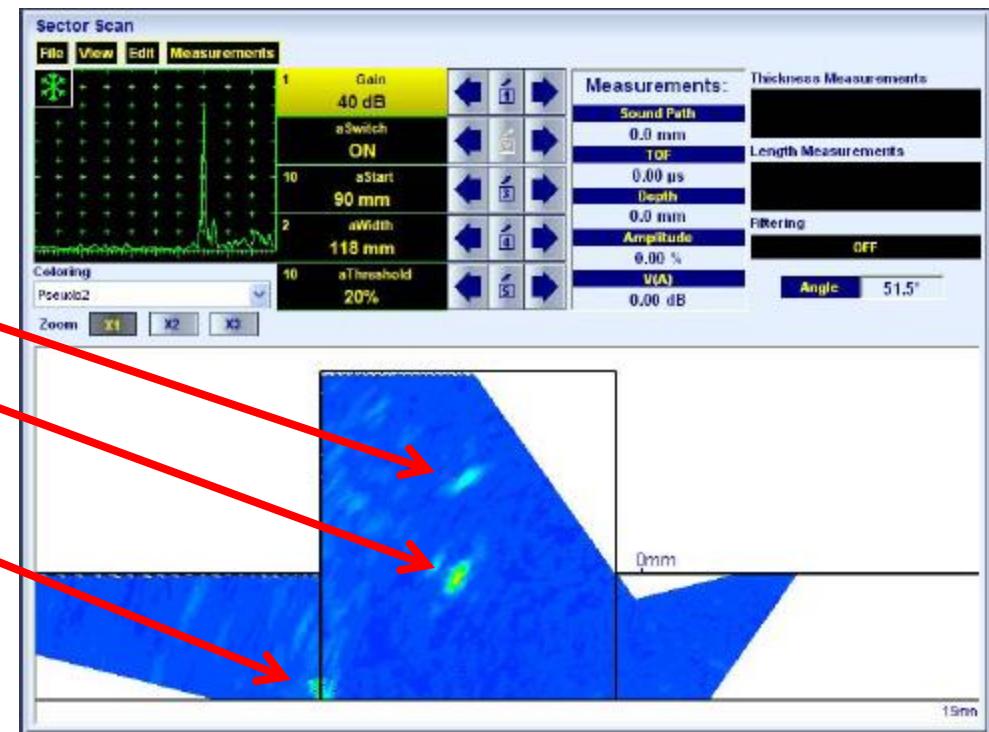


## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

新一代相控阵扇形扫查成像模式:



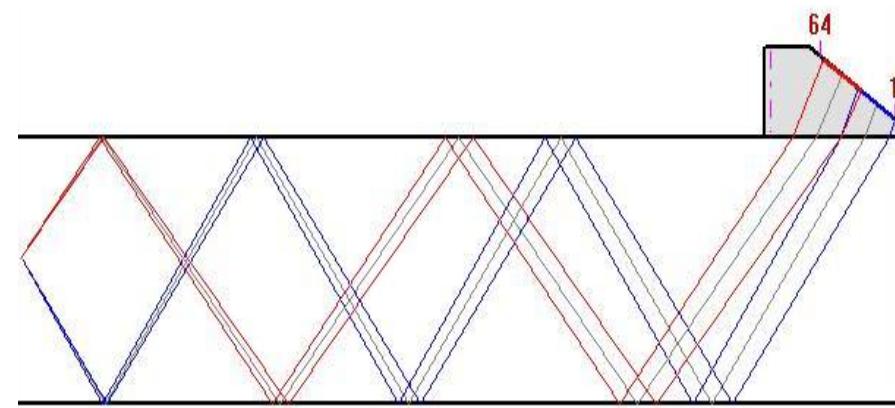
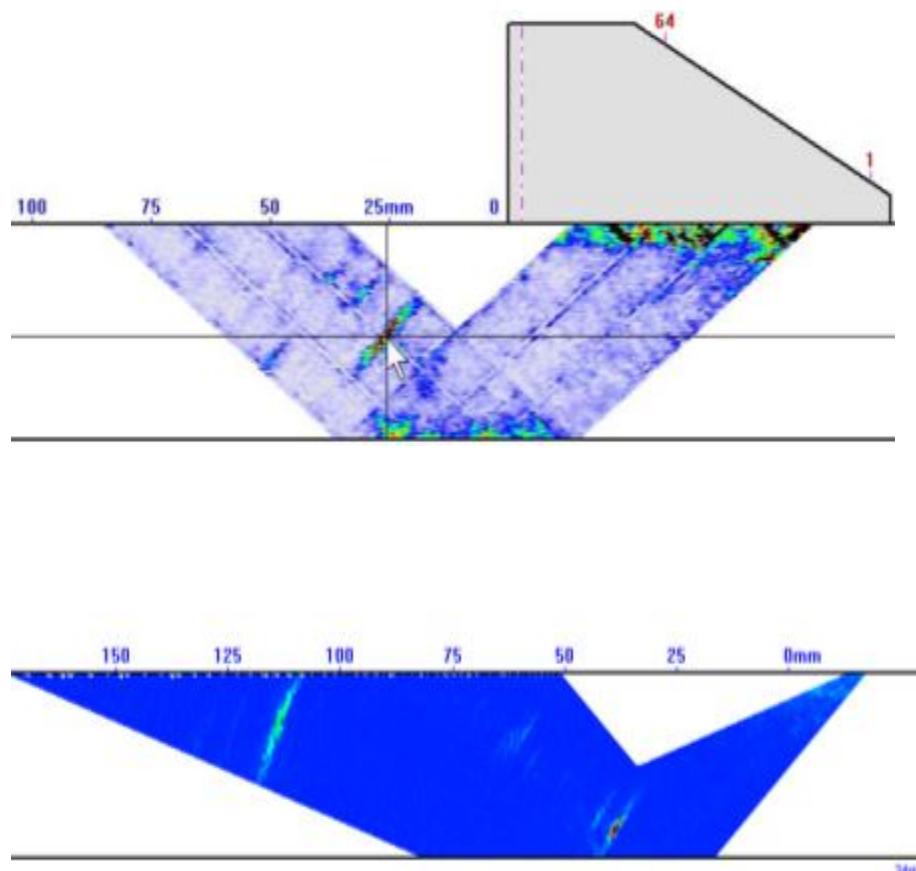
真实几何结构成像技术





## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

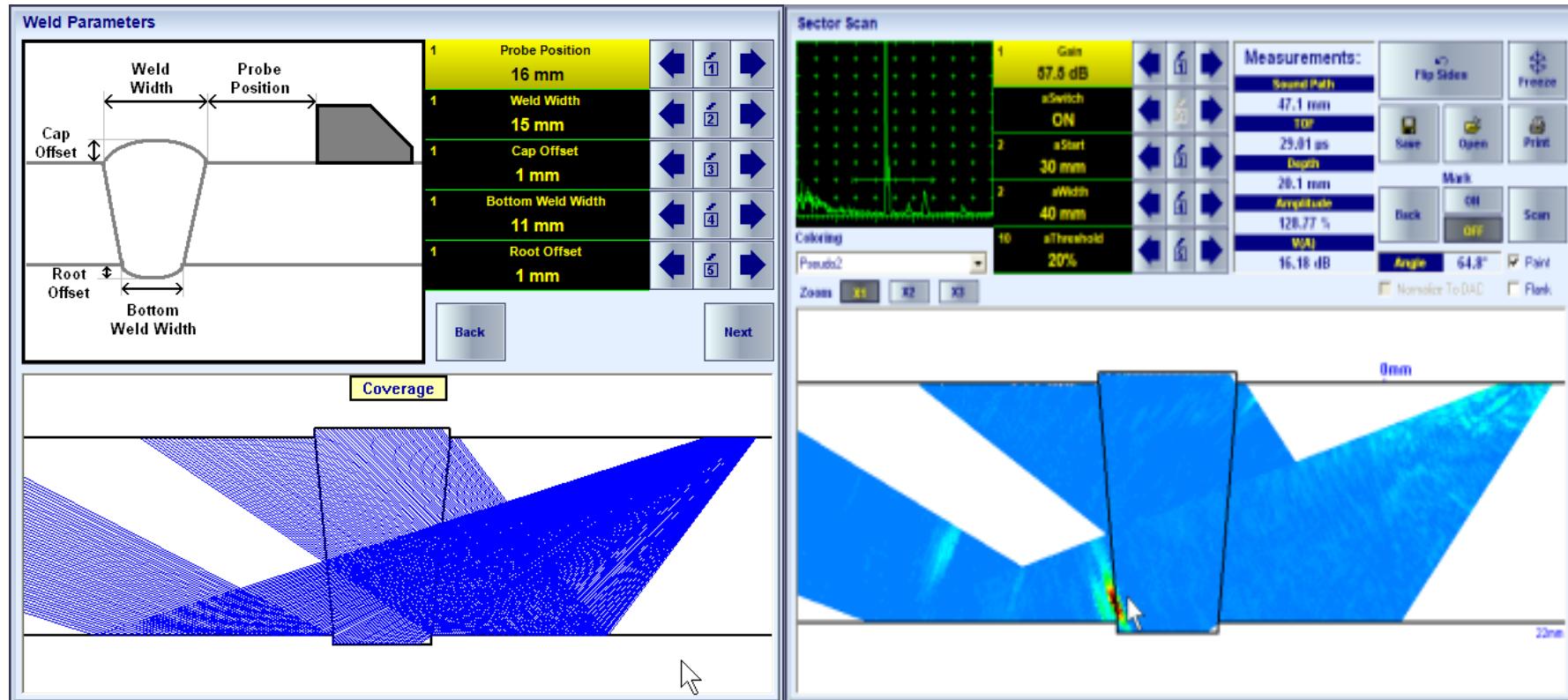
线性扫查/扇形扫查/串列扫查:





## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

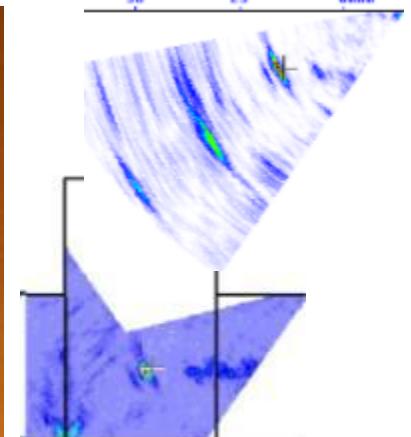
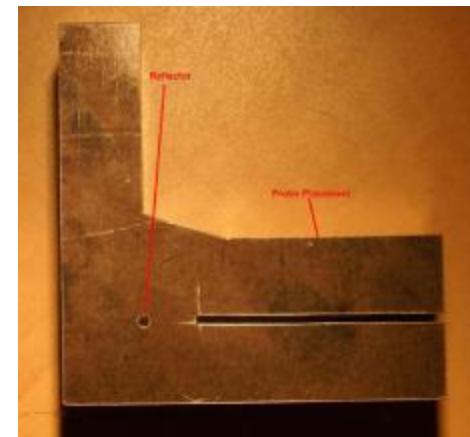
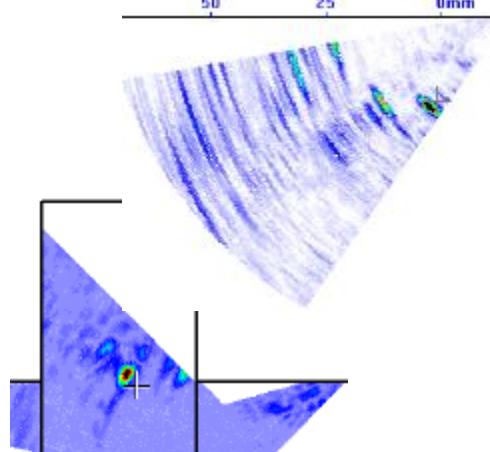
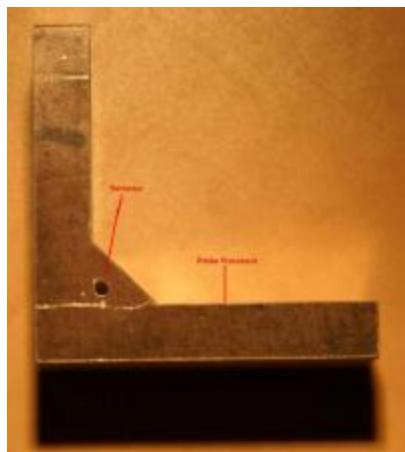
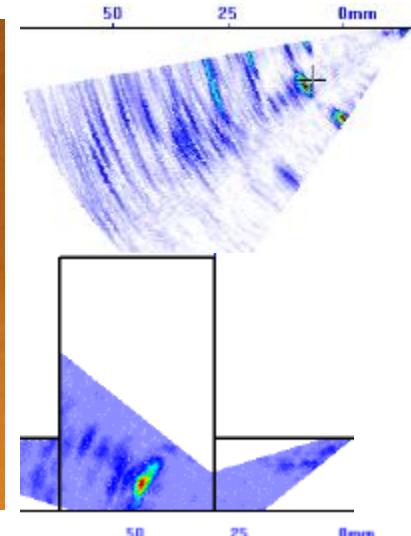
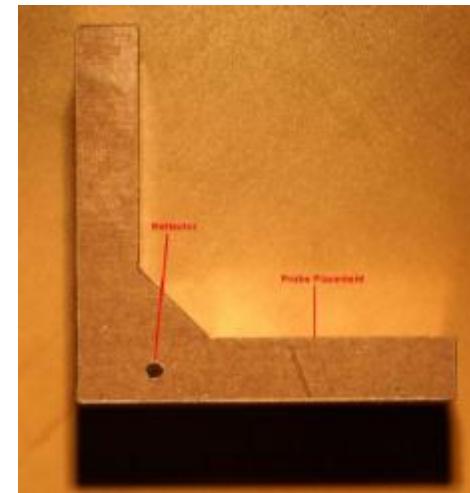
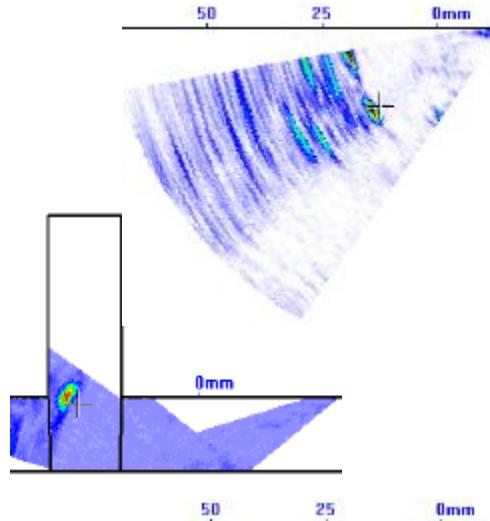
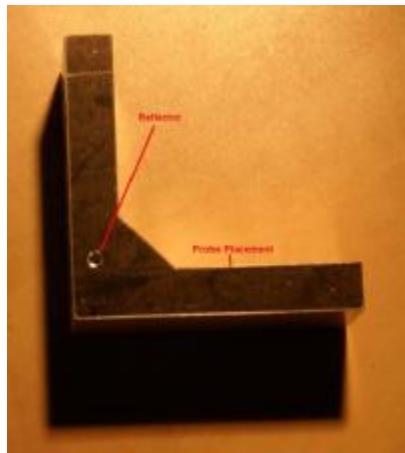
检测图像中加入坡口:





## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

T型接头（新一代相控阵真实几何结构成像技术与传统相控阵成像技术对比）：

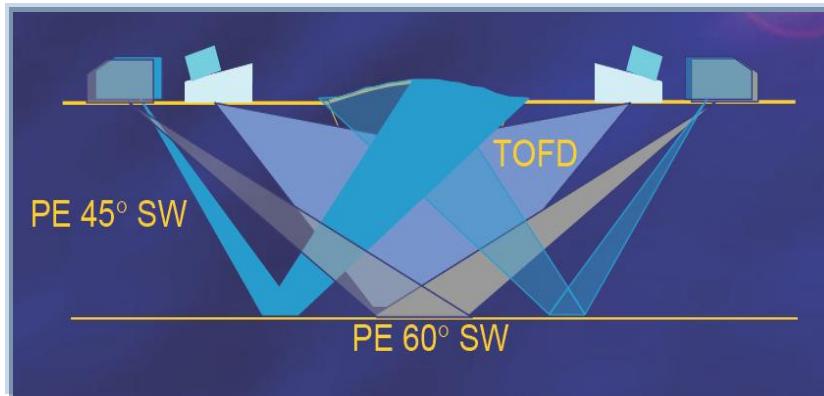




## 二、相控阵检测（PAUT）技术

技术优势：

- 成像直观；
- 检测效率高；
- 可以存储检测记录；
- 可检测大壁厚焊缝，弥补了TOFD检测存在上下表面盲区的不足；
- 同时实现A扫描、TOFD灰度图像B扫描和相控阵S扫描；
- 适用范围宽，可用于不同壁厚焊缝检测。



PAUT检测原理



现场试验



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

PAUT检测特点：

- ( 1 ) PAUT检出率高；
- ( 2 ) PAUT校准过程受人为因素影响较大；
- ( 3 ) PAUT结果评判复杂，对评判人员要求较高；
- ( 4 ) 高度误差偏大。

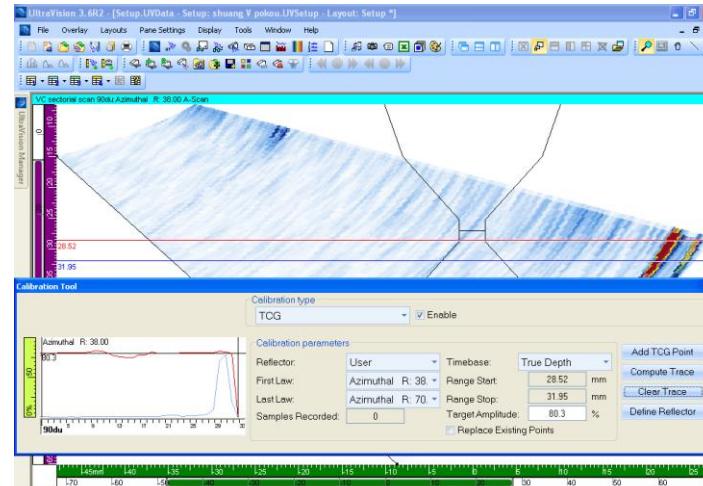


## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 3、质量控制

#### PAUT设备校准及工艺验证

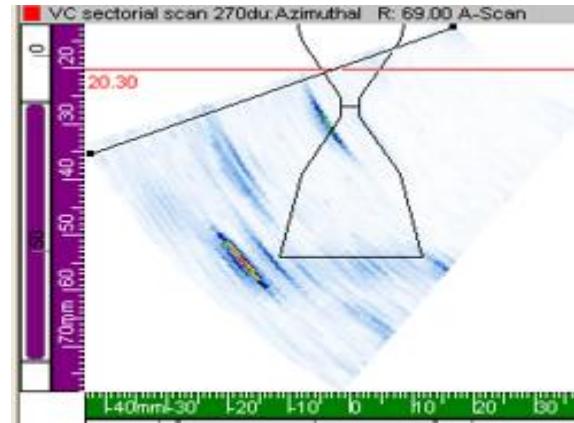
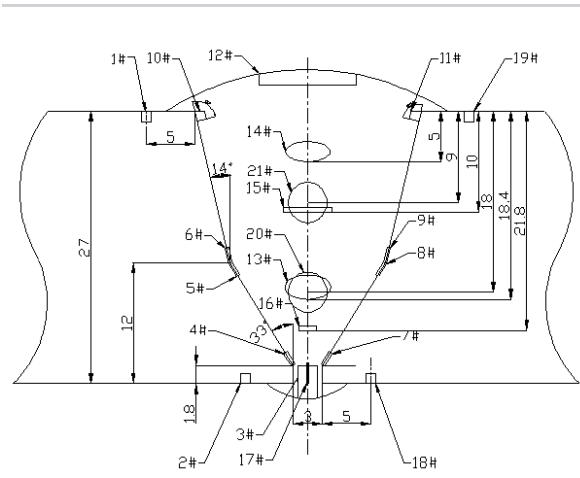
首先采用标准试块和对比试块对PAUT设备进行ACG和TCG校准，按CDP-G-0GP-0P-153-2018-1《油气管道工程相控阵检测技术规定》执行，设备TCG校准过程如图所示。



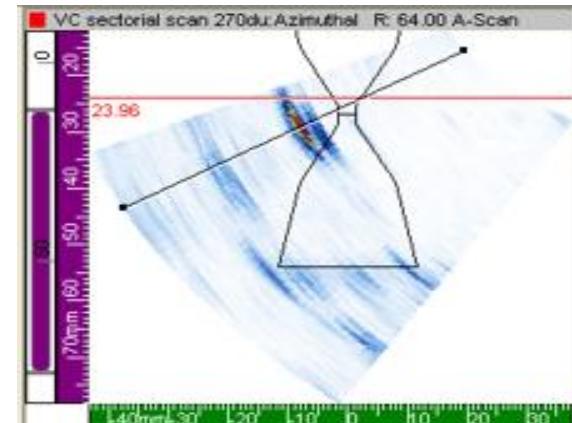
PAUT设备校准过程



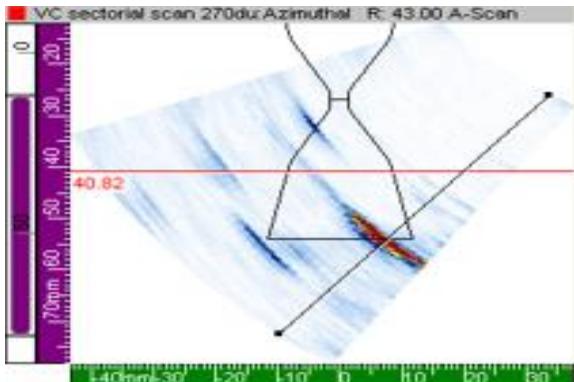
## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术



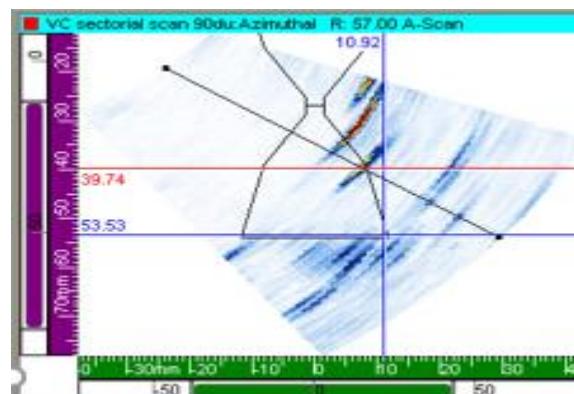
1#反射体



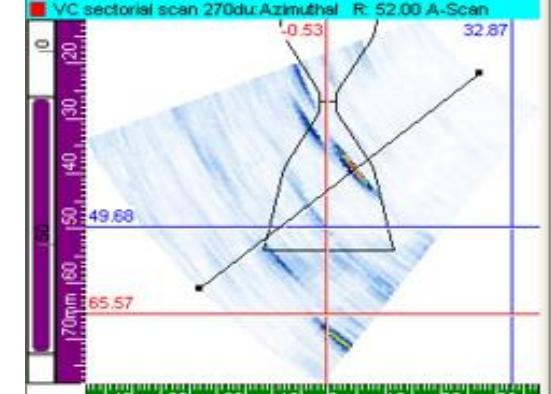
2#反射体



10#反射体



8#坡口未熔合缺陷

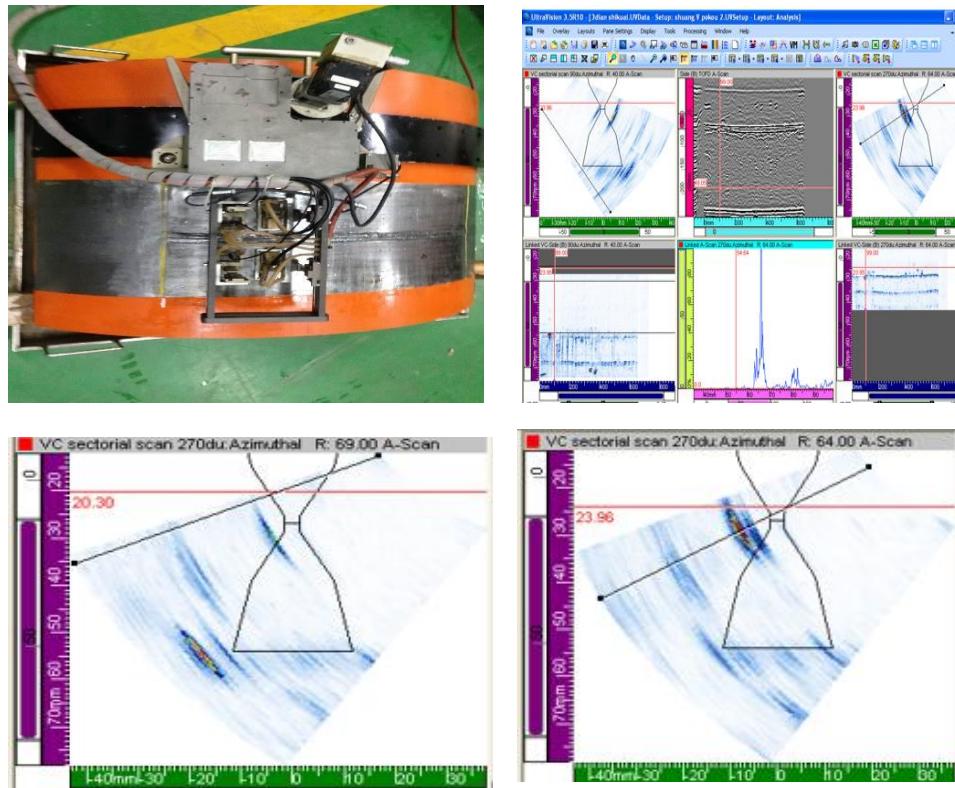


14#夹渣



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

PAUT设备校准完成后，采用模拟试块进行工艺验证，确认能够检测到模拟试块中所有反射体及模拟缺陷。



模拟试块工艺验证试验



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 模拟试块检测结果

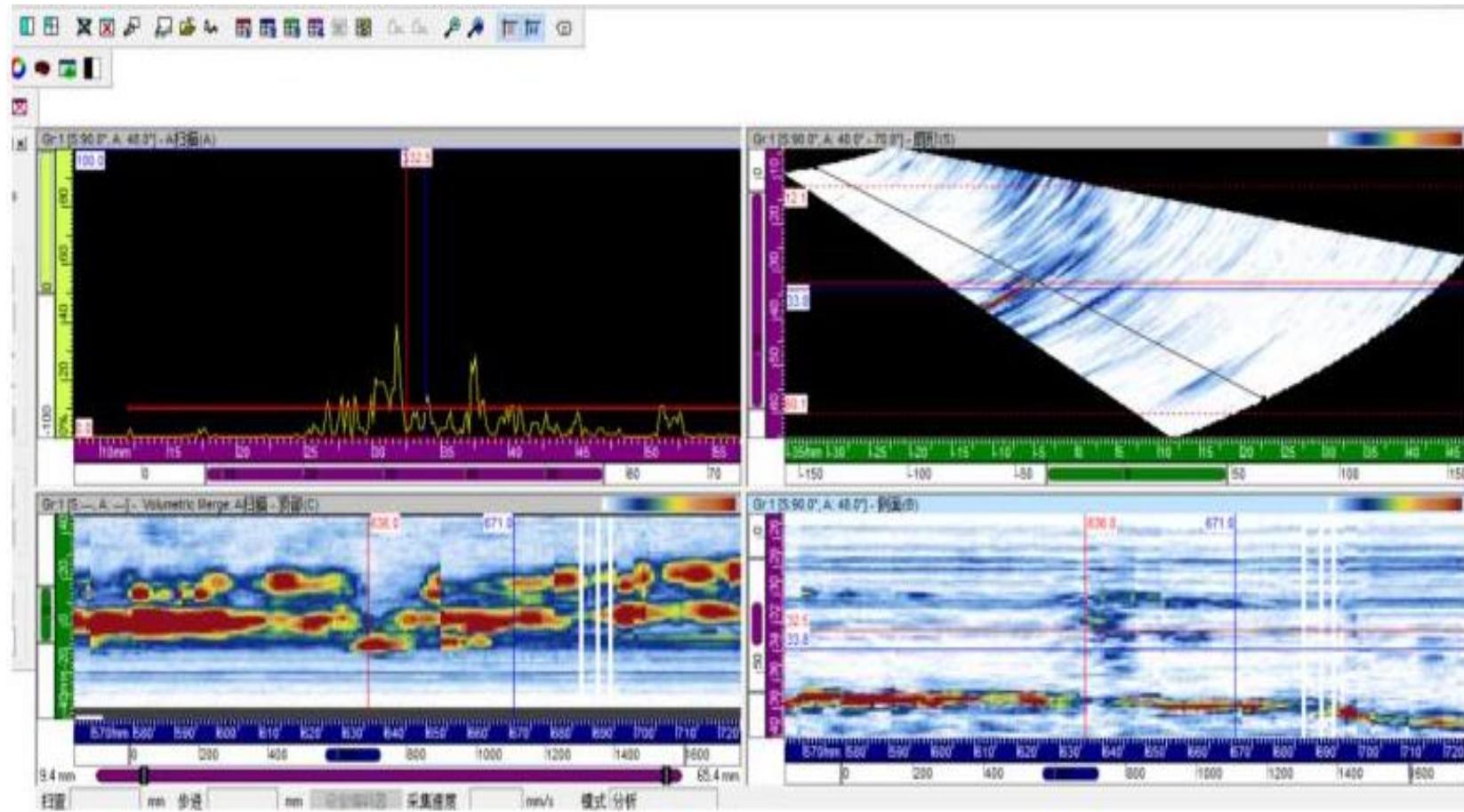
缺陷	位置	波幅	高度	深度	长度	备注
1#	58-75	92	3.1	3.1	17	外表面槽, 5mm
2#	91-107	89	2.4	27	16	内表面槽, 5mm
3#	115-134	68	2.1	27	19	根部槽
4#	148-160	51.6	3.9	21.8	12	未熔合
5#	178-192	52	4.5	12.9	14	未熔合
6#	208-225	40	4.1	6.8	17	未熔合
7#	236-251	53	3.6	22	15	未熔合
8#	268-283	49.6	3.9	13.1	15	未熔合
9#	297-313	48.9	3.8	7.2	16	未熔合
10#	325-343	95	3.5	3.5	18	外表面槽
11#	356-375	56	3.4	3.4	19	外表面槽
12#	391-398	48.8	1.8	1.8	7	外横槽
13#	506-519	45	2.6	16.5	13	夹渣
14#	430-441	95	4.2	17.3	11	夹渣
15#	456-468	92.7	2.6	16.8	12	层间未熔
16#	481-500	66.9	3.5	20.1	19	层间未熔
17#	512-529	91.2	1.9	27	17	内裂纹
18#	538-556	56	1.2	25.8	18	内表面槽, 5mm
19#	567-584	95	1.7	1.7	17	外表面槽, 5mm
20#	596-643	95.2	5.2	19.6	47	长横孔
21#	0-45	89.1	5.1	11.3	45	长横孔



## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

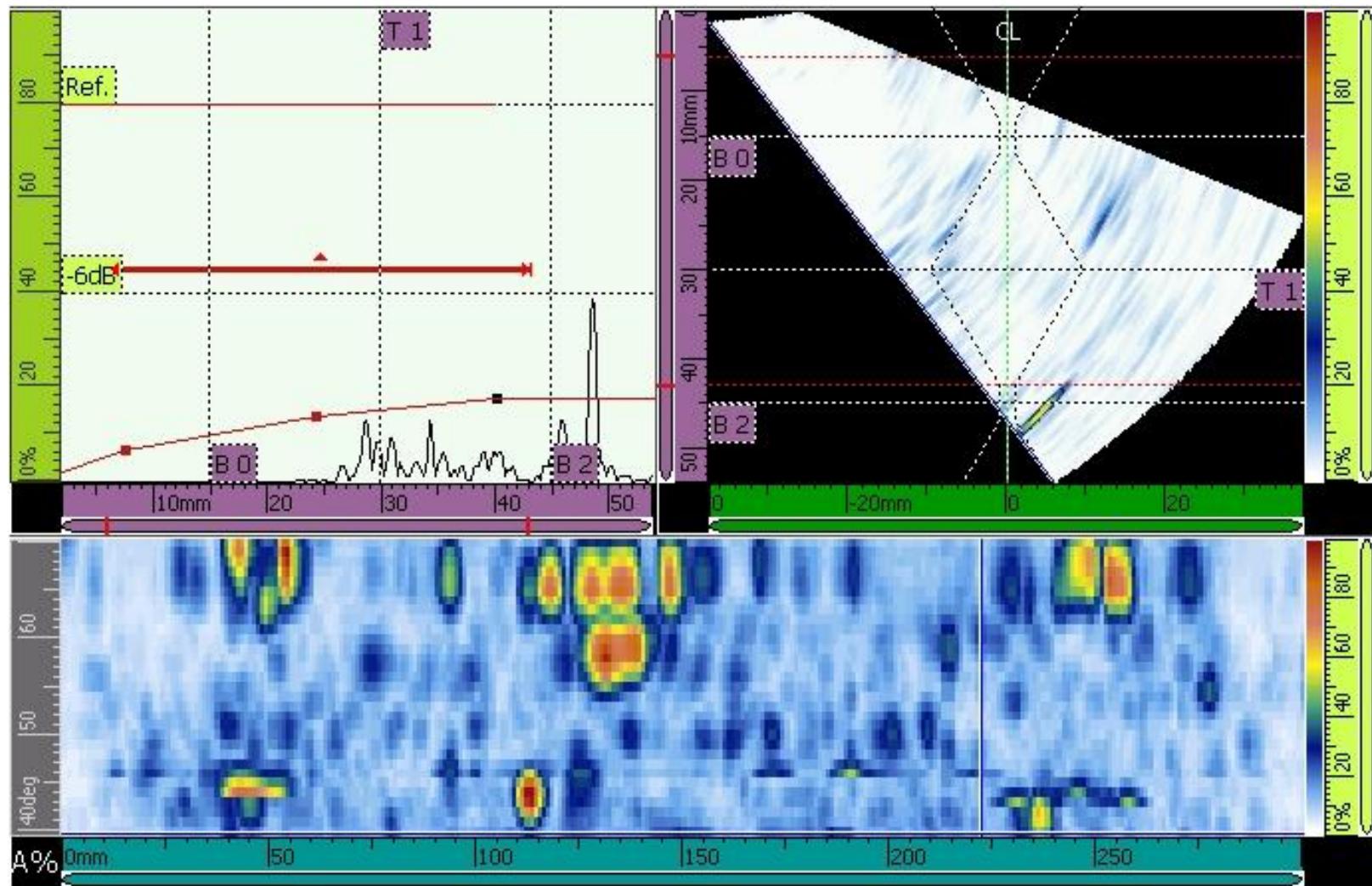
### 3、存在的问题

(1) 检测结果评判难度大、受人为因素影响大



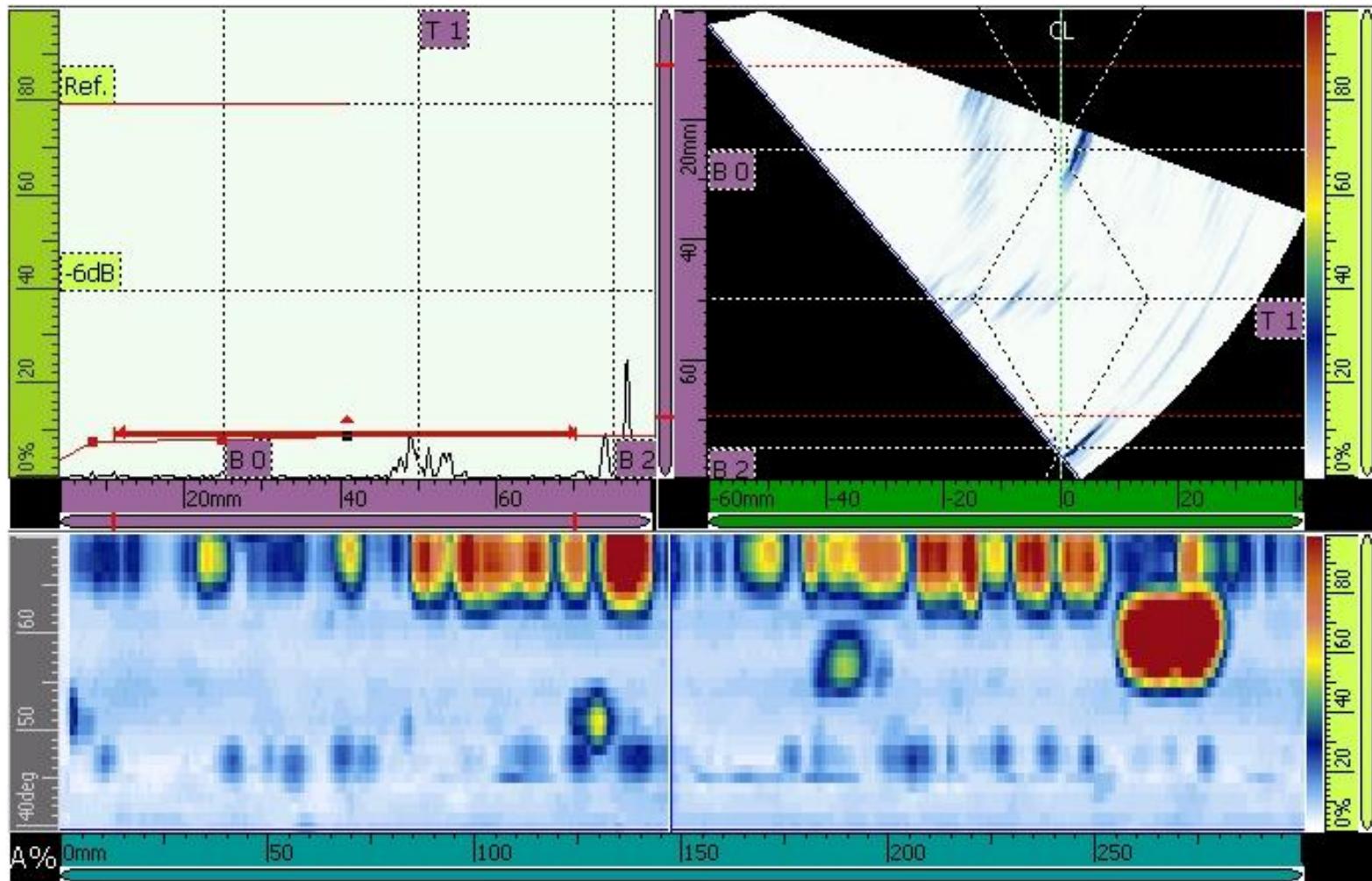


## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术



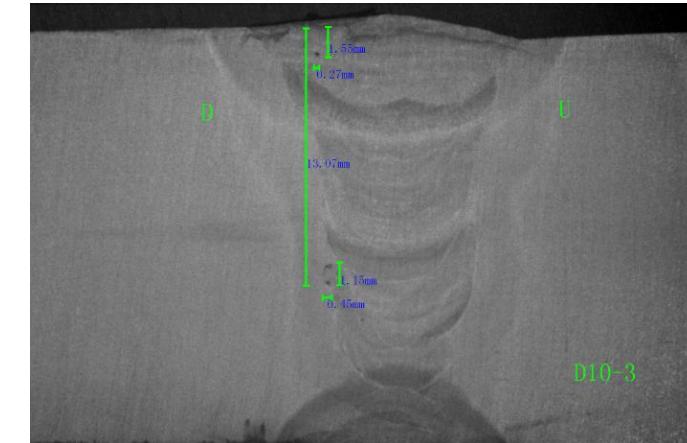
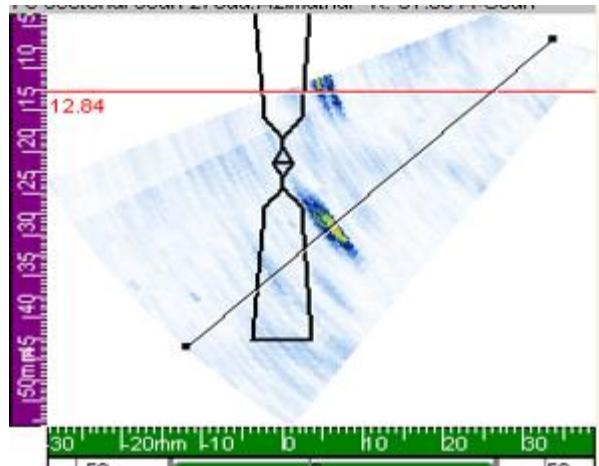


## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

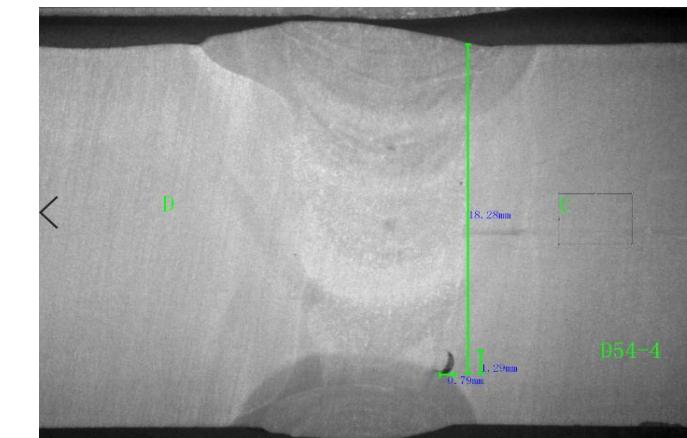
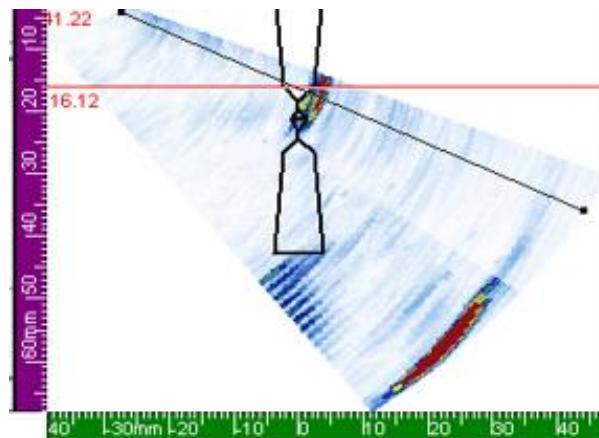




## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术



填充区F2未熔合



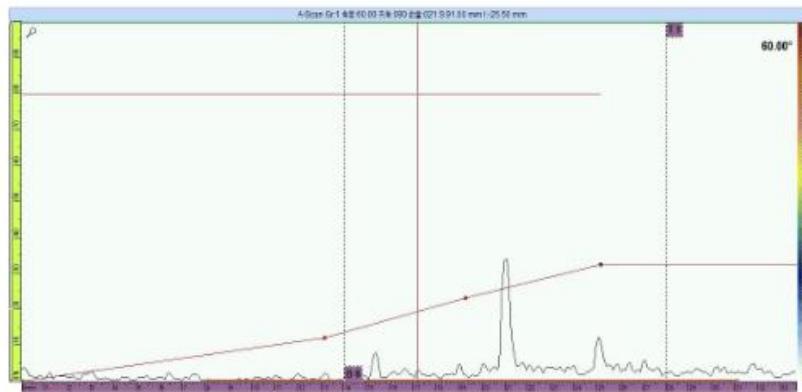
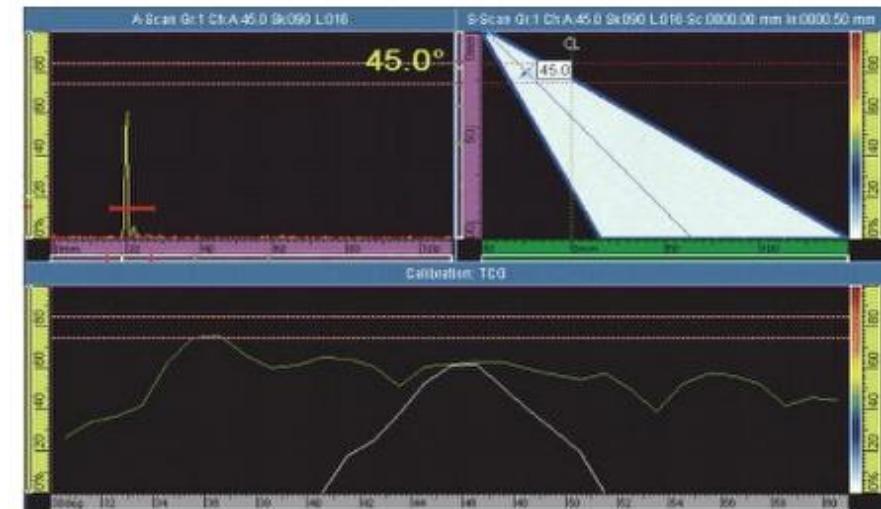
热焊区未熔合



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### （2）检测结果的可重复性较差

声速、楔块、ACG、TCG校准的好坏没有定量指标要求。

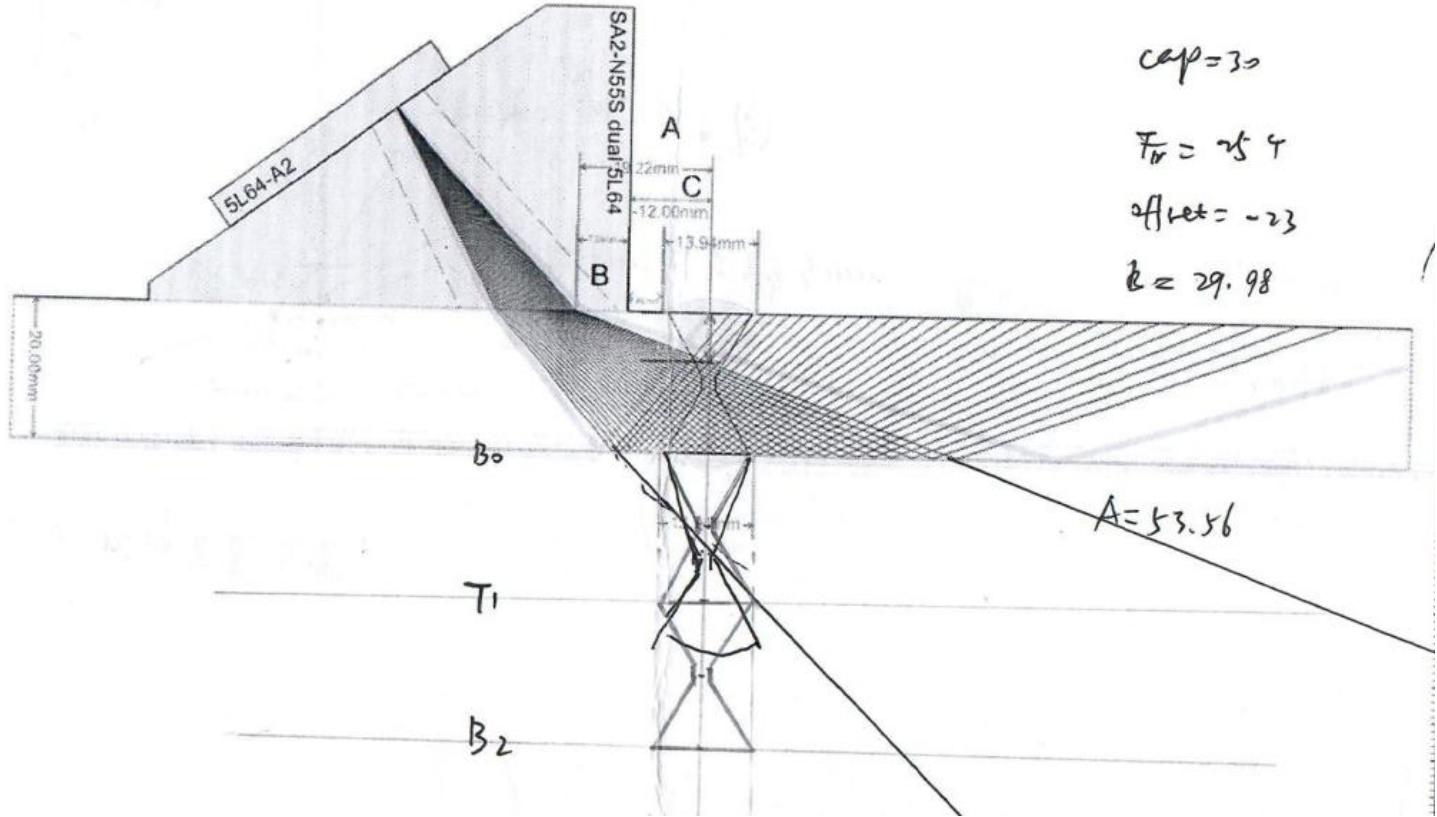




## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

### (3) 有时检测工艺严谨性稍差

当一个工艺方案不能完全覆盖焊缝时, 需多个方案组合。

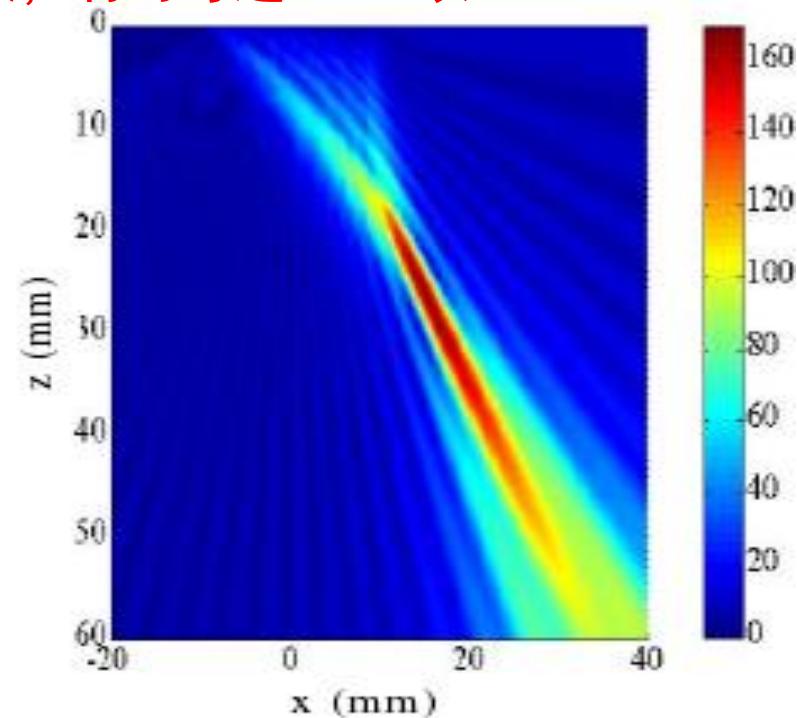
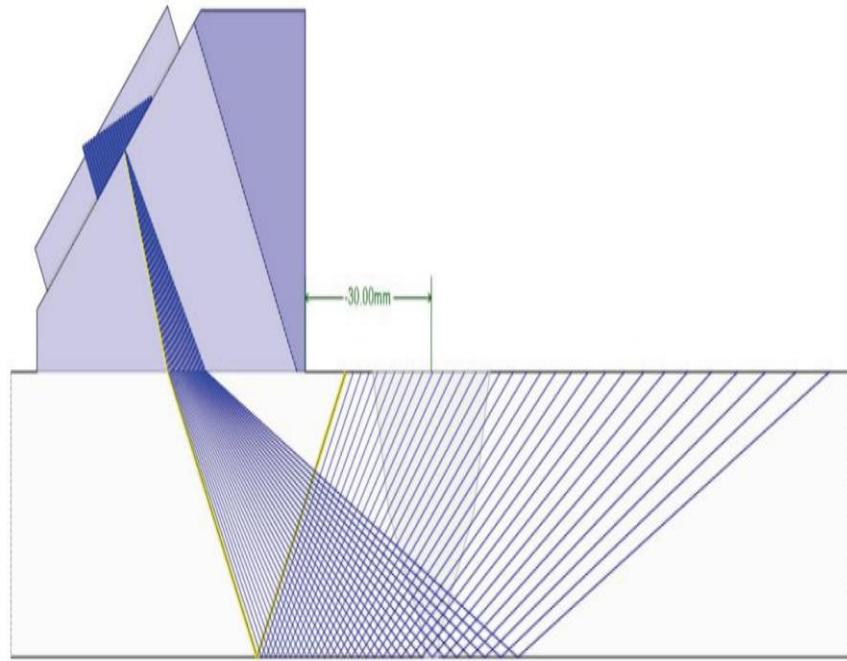




## 二、相控阵检测 (PAUT) 技术

### (4) 测高误差

PAUT测高误差普遍偏大，有时可达6-7mm以上。



PAUT和AUT聚焦对比（随着声程的增大，PAUT声束相对发散）



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

PAUT+TOFD检测缺陷高度测量方法：

1、TOFD能够发现的采用TOFD方法测量；

2、PAUT测量缺陷高度方法

（1）-6dB法，适合测量大缺陷；

（2）-20dB法，国内一般不用；

（3）尖端衍射法，只能测量上下表面开口缺陷/裂纹；

（4）color code：适合测量小缺陷；

（5）通过PAUT工艺评定进行缺陷高度校正，这是国外工程比较推荐的做法。



## 二、相控阵检测（PAUT）技术

### 小结：

- (1) PAUT检出率高；
- (2) PAUT校准过程受人为因素影响较大；
- (3) PAUT结果评判复杂，对评判人员要求较高；
- (4) 高度误差偏大。



### 三、DR数字成像检测技术

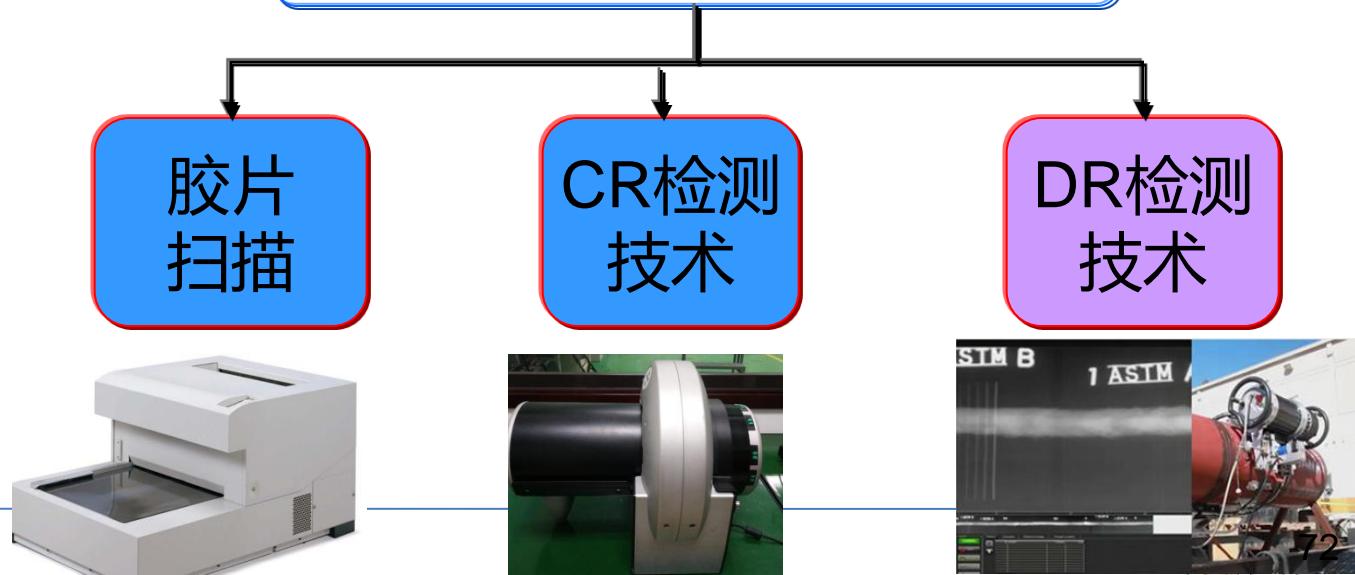


## 三、数字成像 - DR检测技术

### 长输管道数字成像技术分类

- (1) **传统胶片数字化扫描**: 胶片经扫描仪扫描转化成数字信号, 数字信号处理后转化为数字图像——间接数字化。
- (2) **CR检测技术**: IP板 (代提胶片) 经扫描转化数字信号, 再经计算机重建转化成数字图像——间接数字化。
- (3) **DR检测技术**: 探测器作为X射线接收转换装置, 直接读出组成一幅射线数字图像——直接数字化。

### 射线检测数字化技术种类

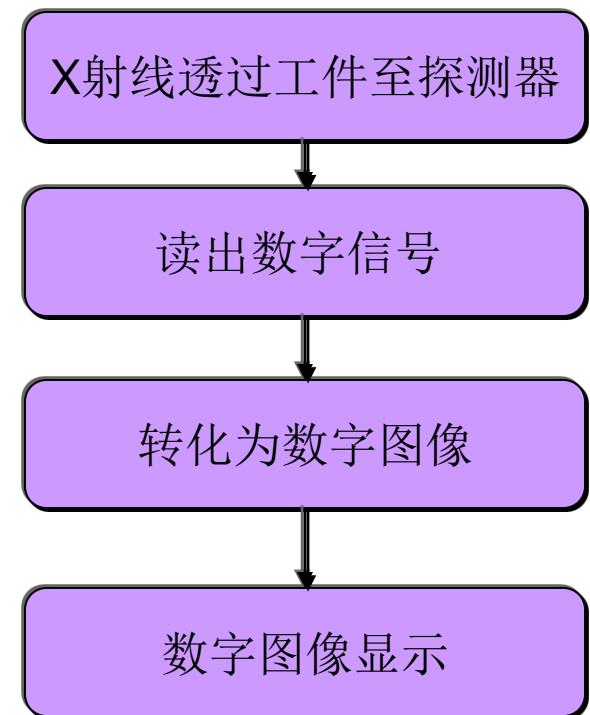




### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 1、DR ( DR(Direct/Digital Radiography)检测技术原理

DR检测以X射线机为射线源，以线阵列或平板探测器替代传统胶片作为X射线接收转换装置，X射线透过待检工件后衰减，探测器首先将入射X射线光子转换为电荷，然后读出每个像元的数字信号，所有像元的数字信号组成一幅射线数字图像，通过图像处理软件在计算机上进行显示。检测原理如图所示。





### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 2、技术简介

DR数字射线检测系统主要有X射线源、爬行器、平板探测器、工装夹具及计算机系统等。





### 三、数字成像 - DR检测技术

**X射线源**：采用恒电位、小焦点射线机，恒电位可保证射线源的稳定性，得到恒定的检测图像，小焦点可以降低几何不清晰度，保证图像质量。

**平板探测器**：根据静态扫查或动态连续扫查方式的不同进行选择，动态成像系统要求的帧频速度比较高，理论上需要在30fps以上才能实现动态连续扫查，不产生模糊拖尾现象。

**爬行器**：与传统胶片爬行器基本相同。

**计算机系统**：用于对系统的远距离控制及图像的采集、存储、分析、显示。



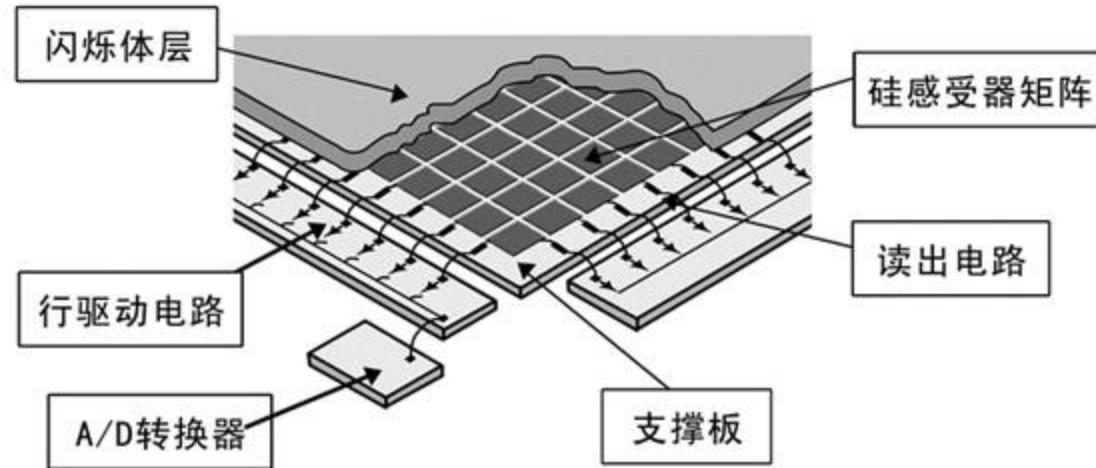
### 三、数字成像 - DR检测技术

由探测单元面阵列构成的探测器称为面阵探测器，目前探测器类型主要有非晶硅探测器、CMOS探测器，常用的像素尺寸为 $127\mu\text{m}$ 、 $143\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 等，其A/D转换为数一般都可达到12bit/14bit/16bit。



### 三、数字成像 - DR检测技术

非晶硅探测器由闪烁体、非晶硅层（光电二极管阵列）、TFT阵列（薄膜晶体管阵列，在非晶硅探测器中作为开关控制电信号传送）、读出电路构成。



非晶硅平板探测器





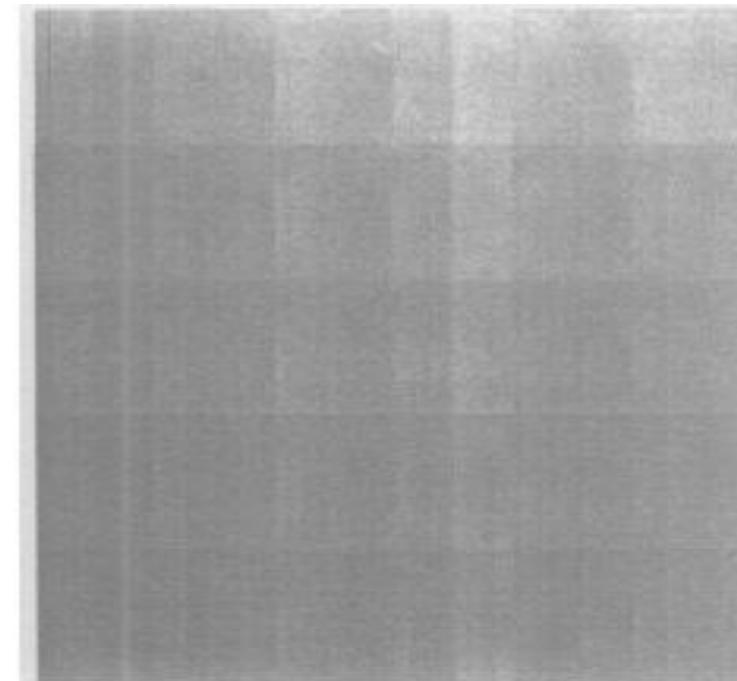
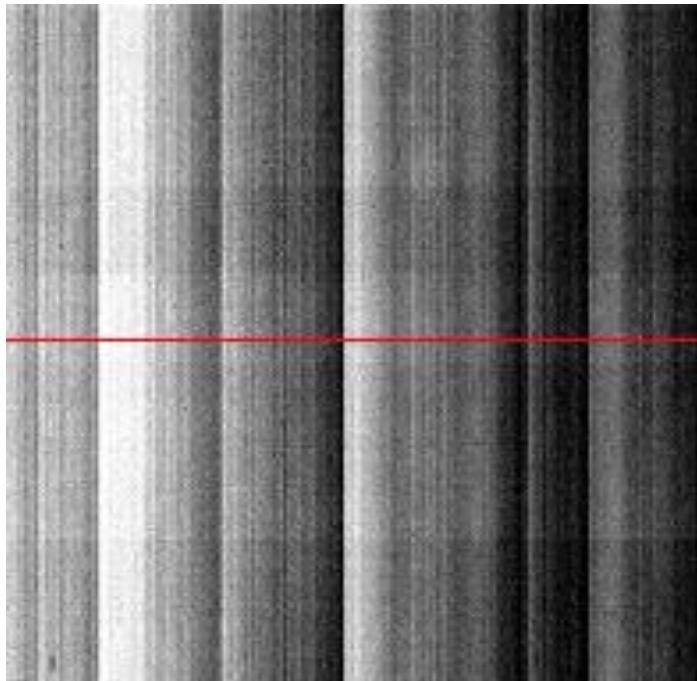
## 三、数字成像 - DR检测技术

	探测器 1	探测器 2	探测器 3	探测器 4	探测器 5	探测器 6
像素面积/mm <sup>2</sup>	195*244 <sup>2</sup>	284*406 <sup>2</sup>	284*406 <sup>2</sup>	205*205 <sup>2</sup>	410*410 <sup>2</sup>	410*410 <sup>2</sup>
有源像素矩阵	1408*1888 <sup>2</sup>	2240*3200 <sup>2</sup>	2240*3200 <sup>2</sup>	512*512 <sup>2</sup>	1024*1024 <sup>2</sup>	2048 * 2048 <sup>2</sup>
像素大小	127 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>	127 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>	127 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>	400 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>	400 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>	200 $10^{-3}$ m <sup>2</sup>
几何分辨率	4 Lp/mm <sup>2</sup>	4 Lp/mm <sup>2</sup>	4 Lp/mm <sup>2</sup>	1.2 Lp/mm <sup>2</sup>	1.2 Lp/mm <sup>2</sup>	2.4 Lp/mm <sup>2</sup>
模数转换	12 Bit <sup>2</sup>	12 Bit <sup>2</sup>	14 Bit <sup>2</sup>	16 Bit <sup>2</sup>	16 Bit <sup>2</sup>	16 Bit <sup>2</sup>
能量范围	40 - 150 kV <sup>2</sup>	25 - 160 kV <sup>2</sup>	25- 160 kV <sup>2</sup>	20- 160 kV <sup>2</sup>	20 - 450 kV <sup>2</sup>	20 - 450 kV <sup>2</sup>
闪烁器	CsJ <sup>2</sup>	Lanex <sup>2</sup>	CsJ <sup>2</sup>	Lanex Fast <sup>2</sup>	Lanex Fast <sup>2</sup>	CsJ <sup>2</sup>
动态范围	1000 :1 <sup>2</sup>	1000 :1 <sup>2</sup>	2200 :1 <sup>2</sup>	14000:1 <sup>2</sup>	14000 :1 <sup>2</sup>	12000 :1 <sup>2</sup>
灵敏度 (量子效率)	高 <sup>2</sup>	高 <sup>2</sup>	高 <sup>2</sup>	中 <sup>2</sup>	中 <sup>2</sup>	高 <sup>2</sup>
影象延迟 (Geisterbilder)	高 <sup>2</sup>	中 <sup>2</sup>	高 <sup>2</sup>	低 <sup>2</sup>	低 <sup>2</sup>	中 <sup>2</sup>
n 集成输出时间	2s + (n*50ms) <sup>2</sup>	3,4s + (n*3400ms) <sup>2</sup>	1,7s + (n*1700ms) <sup>2</sup>	134ms+(n*134 ms) <sup>2</sup>	134ms+(n*134 ms) <sup>2</sup>	267ms+(n*267 ms) <sup>2</sup>
每帧到 PC 的读出时间	50ms <sup>2</sup>	3400ms <sup>2</sup>	1700ms <sup>2</sup>	134ms <sup>2</sup>	134ms <sup>2</sup>	267ms <sup>2</sup>
探测器的机械尺寸	266,7*317,5 mm <sup>2</sup>	500*366*46 mm <sup>2</sup>	500*366*46 mm <sup>2</sup>	330*320*63 mm <sup>2</sup>	330*320*63 mm <sup>2</sup>	330*320*63 mm <sup>2</sup>



### 三、数字成像 - DR检测技术

由于电子器件响应的不一致性（光电二极管的响应不一致，以及行间与列间读出电子系统的轻微变化都会导致各像素的放大程度不同），会造成图像的不均匀，检测前必须进行校准。





### 三、数字成像 - DR检测技术

#### CMOS探测器





### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 国内技术现状：

四川迪派瑞公司2007年研制的X射线数字成像检测设备为静态成像，在江津-纳溪集输气管道工程、山东日照中石化储油站抢险工程、长福北区孝感线高压燃气管道整体迁改工程中得到了应用。

此外，管道科学研究院、丹东华日电气等单位也先后研制出了DR设备。





### 三、数字成像 - DR检测技术

在中俄东线以前，国内X射线数字成像技术还没有在管道工程中大规模应用，仅在以下工程中进行了工业试验和小规模试用：

- 1) 大唐煤制天然气管道北京段（古北口—高丽营）  
Φ1016管道 中心透照/双壁单影 检测焊口<10个；
- 2) 江津-纳溪集输气管道工程  
Φ813管道 中心透照/双壁单影 检测焊口>400个；
- 3) 深圳天然气管道受损抢修工程  
Φ610管道 双壁单影 检测焊口：34个；
- 4) 长福北区孝感线高压燃气管道整体迁改工程  
Φ457管道 双壁单影 检测焊口：603个。

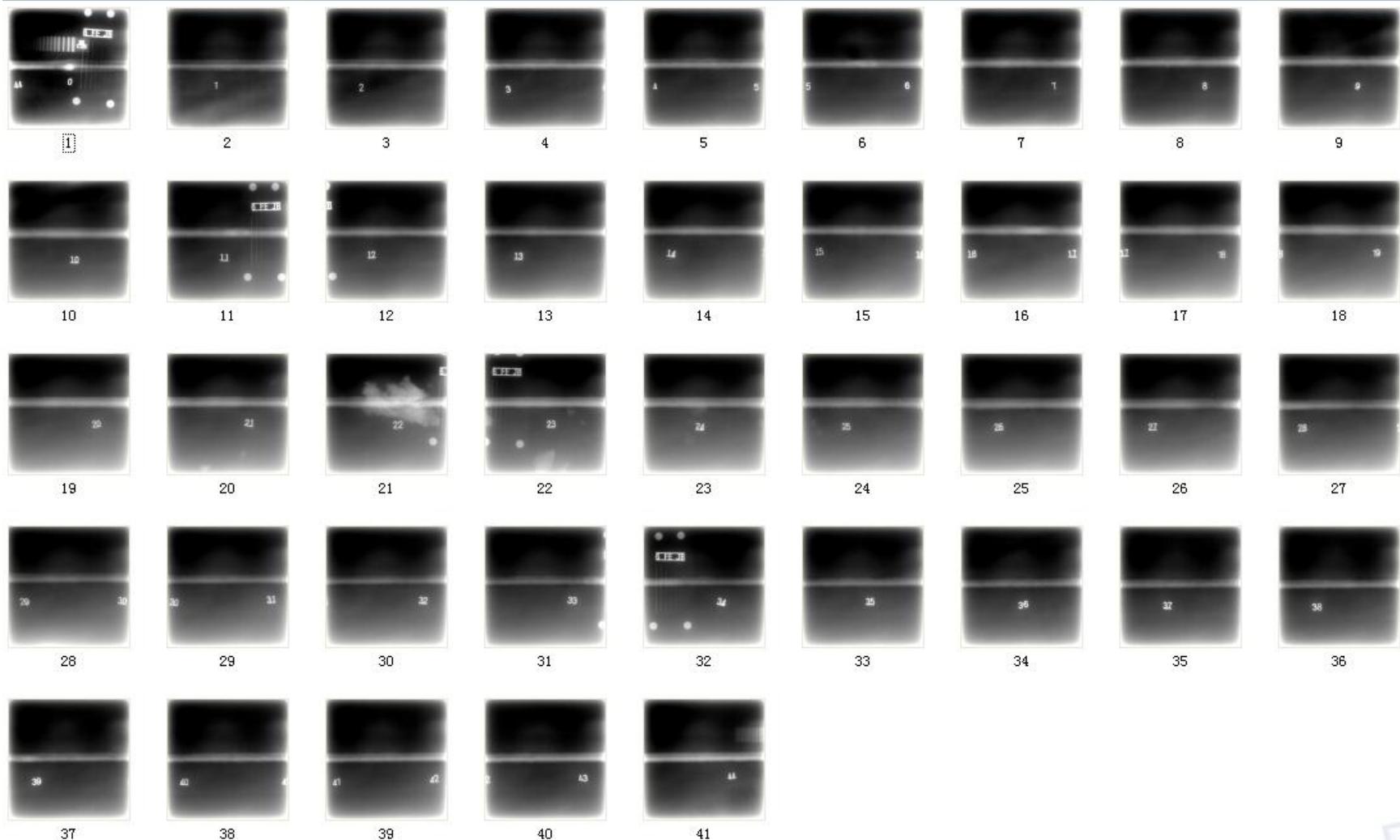


### 三、数字成像 - DR检测技术





### 三、数字成像 - DR检测技术

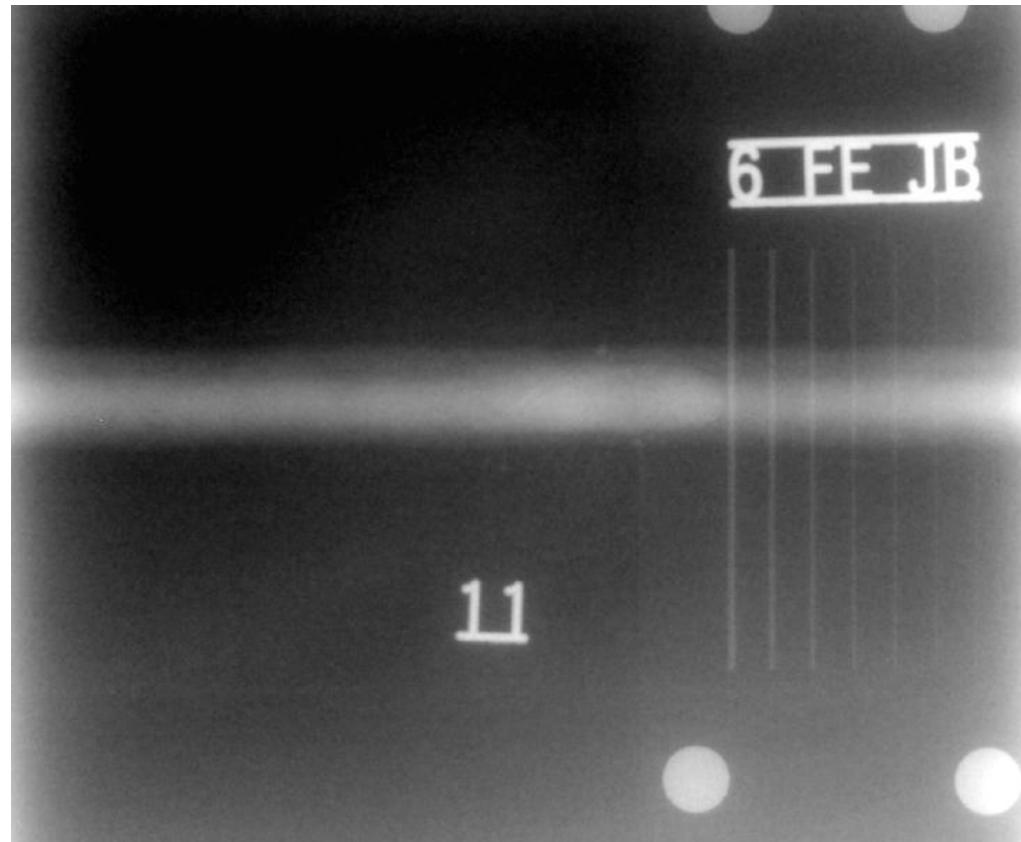


一道1422焊缝的DR静态成像



### 三、数字成像 - DR检测技术

以1422X21.4mm管道环焊缝为例，DR静态检测时间约为4.5-15.5min, 数据结果现场直接显示。

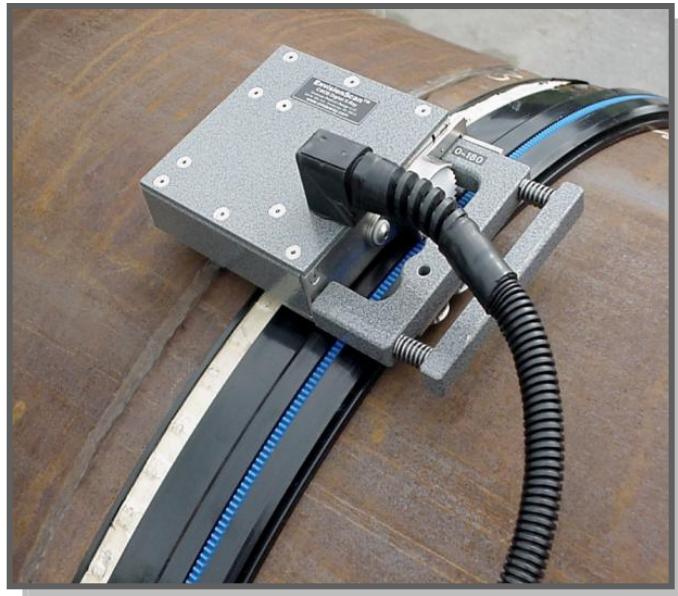




### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 国外DR发展历程

国外根据不同需求，研发出不同的装备形式，目前已经发展到动态连续扫查。DR设备研发及工业化应用主要有**RTD**、**SPS**两家公司，负责欧洲、加拿大、美国绝大部分数字射线检测。国外DR设备主要分为以下三类：



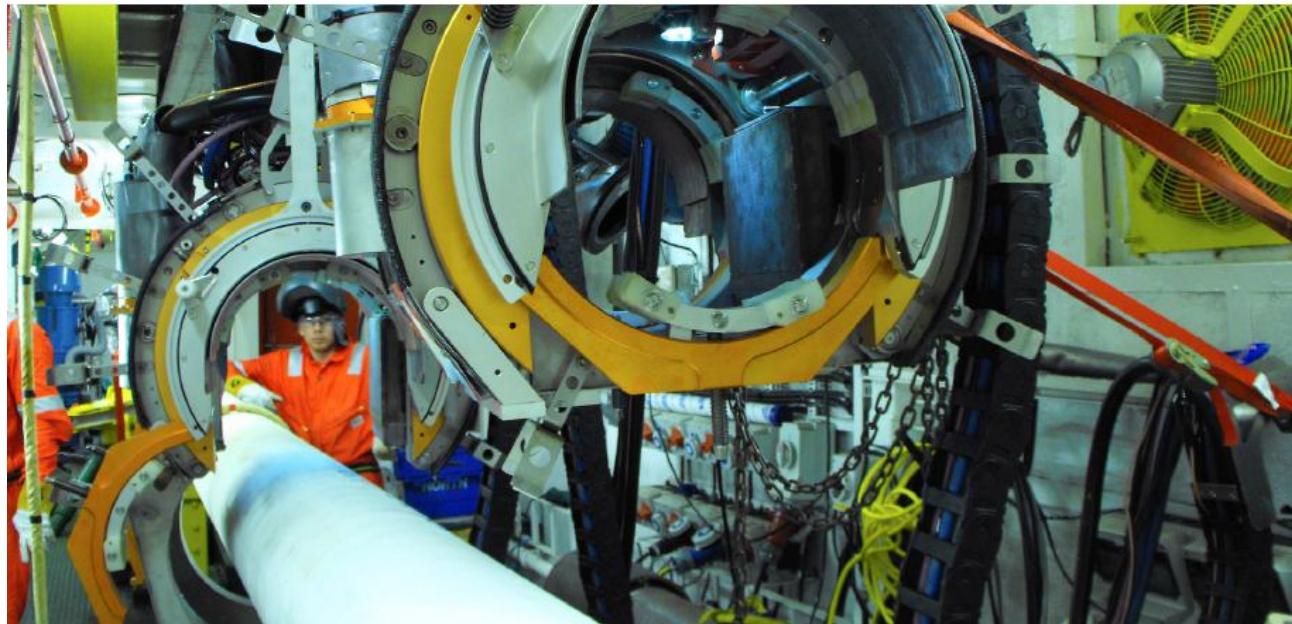
实验室应用



GW2、GW4试验设备（美国）



### 三、数字成像 - DR检测技术

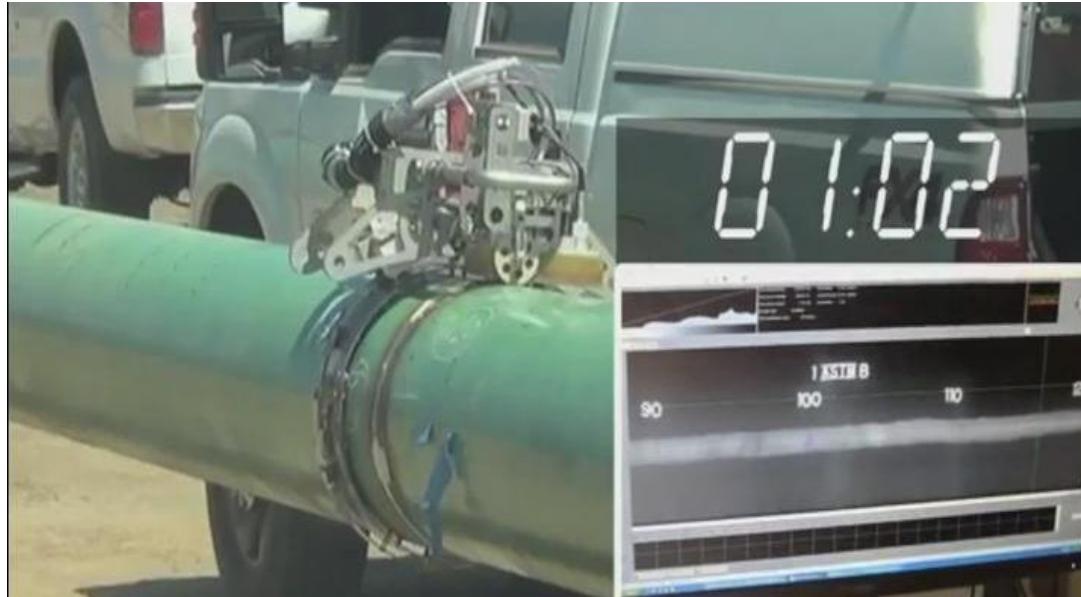


海洋管道应用





### 三、数字成像 - DR检测技术

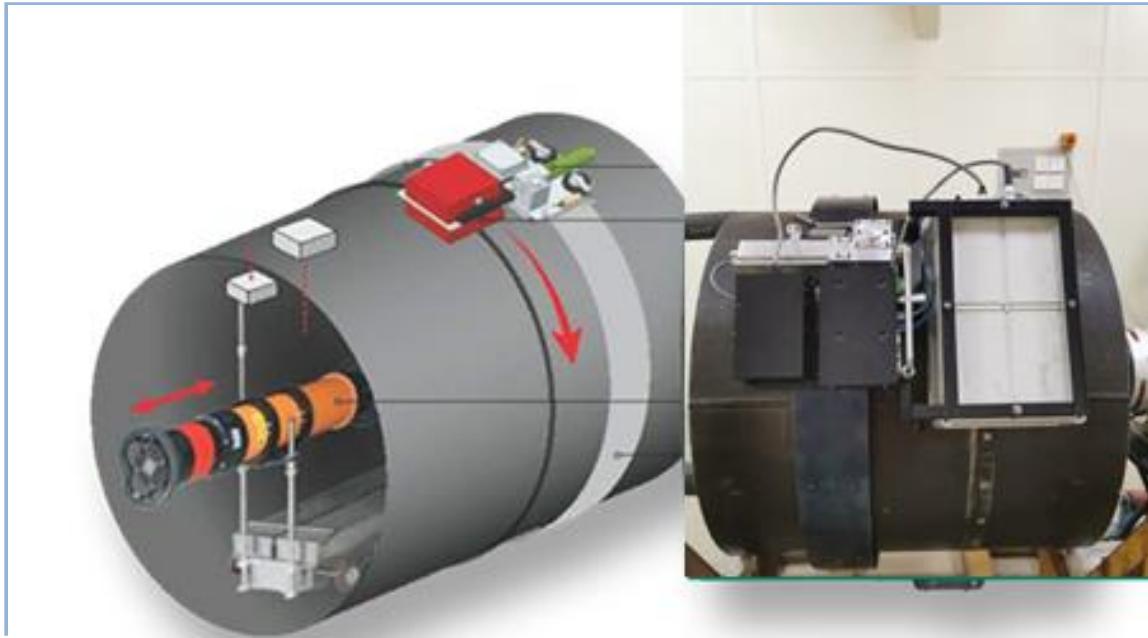


陆地管道应用





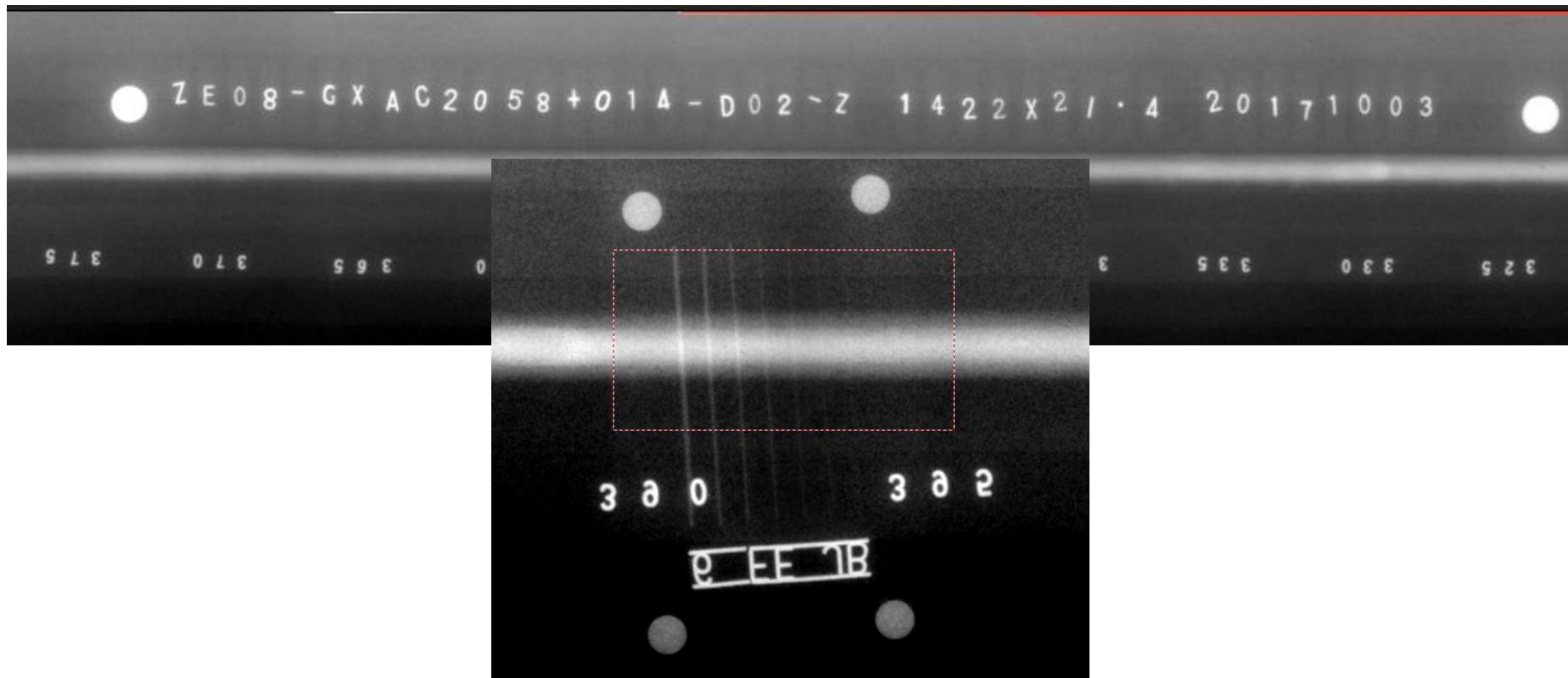
### 三、数字成像 - DR检测技术





## 三、数字成像 - DR检测技术

DR动态连续检测速度一般为20mm/s，检测过程与AUT检测相似，设备控制和数据处理均在工程车中进行，以1422X21.4mm管道环焊缝为例，每道口的检测时间为4min，数据结果实时显示。





## 三、数字成像 - DR检测技术

### 3、质量控制 - 设备校验

国内外目前均没有针对长输油气管道使用DR设备校验的标准，因此在参照现有标准的同时，结合了俄气公司、挪威船级社（DNV）和核电行业对DR设备质量控制的相关技术要求，制定了《中俄东线DR设备校验程序》。



### 中俄东线 DR 设备校验程序

中国石油天然气管道科学研究院有限公司  
2018年3月

**中国石油天然气管道科学研究院有限公司无损检测技术中心**  
NDT Center of China Petroleum Pipeline Research Institute Co., Ltd.

#### 中俄东线 DR 设备校验程序

**1、目的**  
为保障 DR 检测的质量，特制定一整套完整的设备校验和校验程序。

**2、适用范围**  
本程序适用于长输管道环缝及 X 射线数字成像检测（DR）设备的性能验证。

**3、职责**  
中国石油天然气管道科学研究院有限公司受中俄东线天然气管道工程项目部委托，负责 DR 检测设备的检测与校验，检测和校验必须满足本程序的要求。

**4、引用标准**  
GB/T35394 无损检测 X 射线数字成像检测 系统特性  
SY/T 4109 石油天然气管道无损检测

**5、校验工具及材料**  
为保障本程序的顺利进行，至少需要以下校验工具及材料。

序号	工具及材料	数量
1	双晶探头	2
2	单晶探头	2
3	阶梯试块	1
4	1422 半用试块	1 套
5	DR 评估软件	1 套
6	D4 镜片	2 套
7	存储读取软件	1 套

**6、设备校验程序**

**6.1 DR 设备校验项目**

依据 GB/T35394-2017《无损检测 X 射线数字成像检测 系统特性》的要求，长输管道环缝适用 DR 设备校验应至少包括以下校验项目：

- 1) 灵敏度；
- 2) 线性范围；
- 3) 基本空间分辨率；



### 三、数字成像 - DR检测技术

校验内容除相关标准规定的坏像素、线性范围、基本空间分辨率、信噪比、对比度灵敏度外，增加了DR系统成像均匀度、缺陷检出率和可靠性测试。

序号	校验项目	校验内容
1	设备技术参数	包括坏像素、线性范围、基本空间分辨率、信噪比、对比度灵敏度，均应满足GB/T35394、SY/T 4109 和NB/T 47013.11 的要求；
2	系统成像均匀度	设备在环焊缝所有位置（规定了29个位置）的分辨率和灵敏度测试均应达到标准要求；
3	缺陷检出率	测试焊缝中埋藏30个人工缺陷，DR结果与胶片结果应一致；
4	长度误差测试	不同长度的单丝放在环焊缝12点、3点、6点、9点，对DR设备的测量误差进行标定，作为现场使用时的测量参照；
5	成像面板不均匀性标定测试	检验DR成像是否有影响评定的横竖条纹。



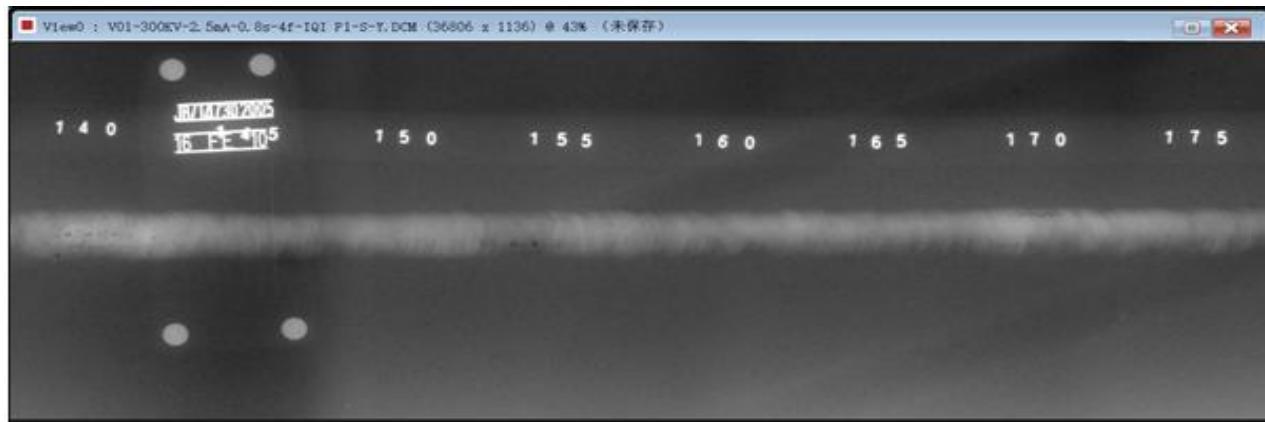
### 三、数字成像 - DR检测技术



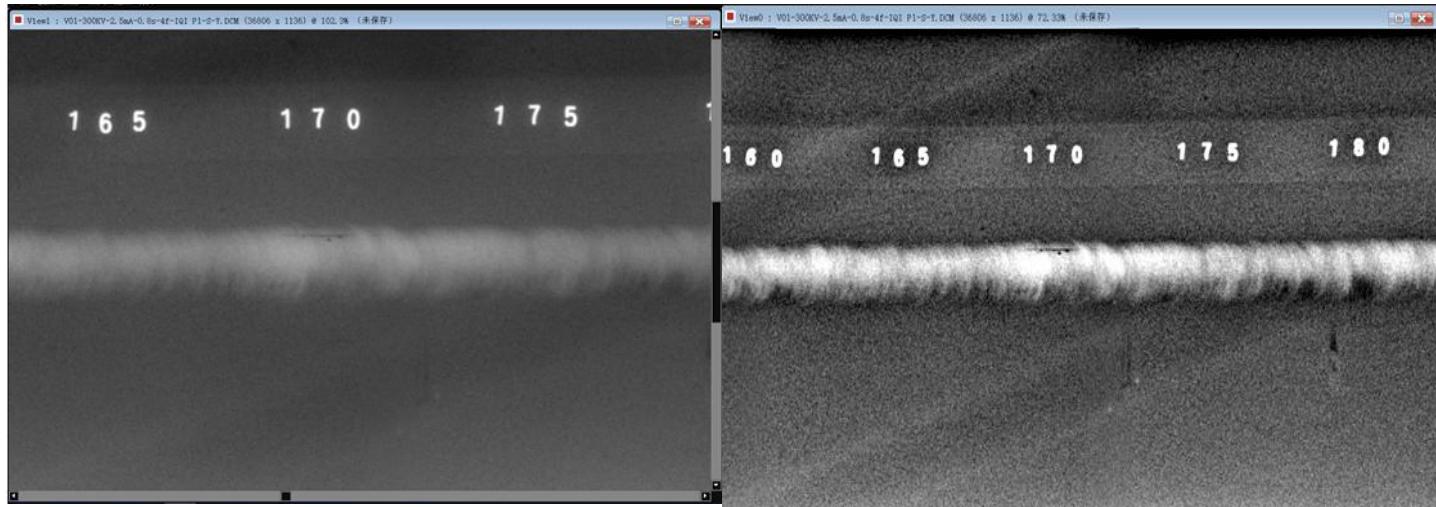
DR检测人工缺陷焊缝



## 三、数字成像 - DR检测技术



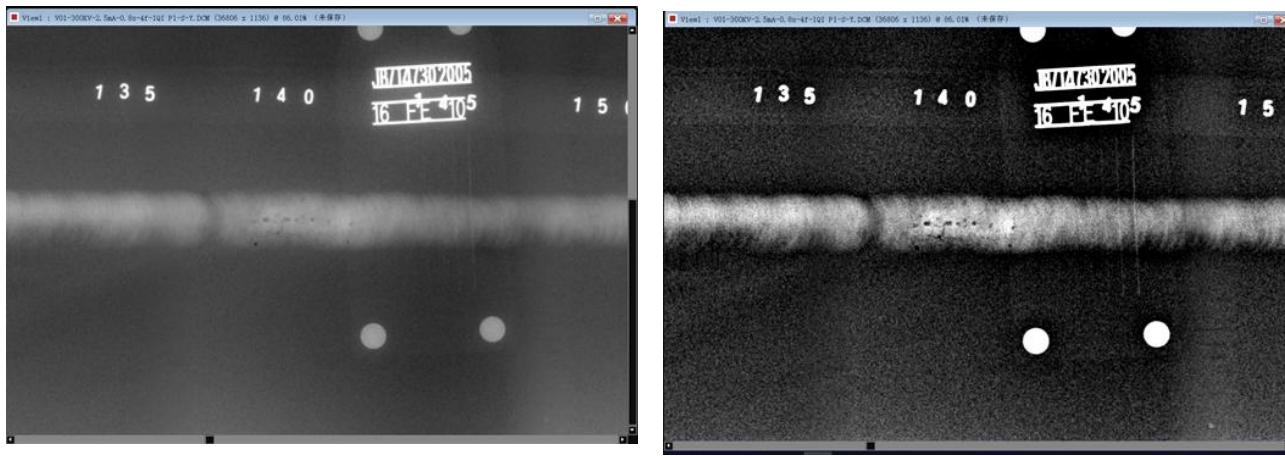
拼接后图像



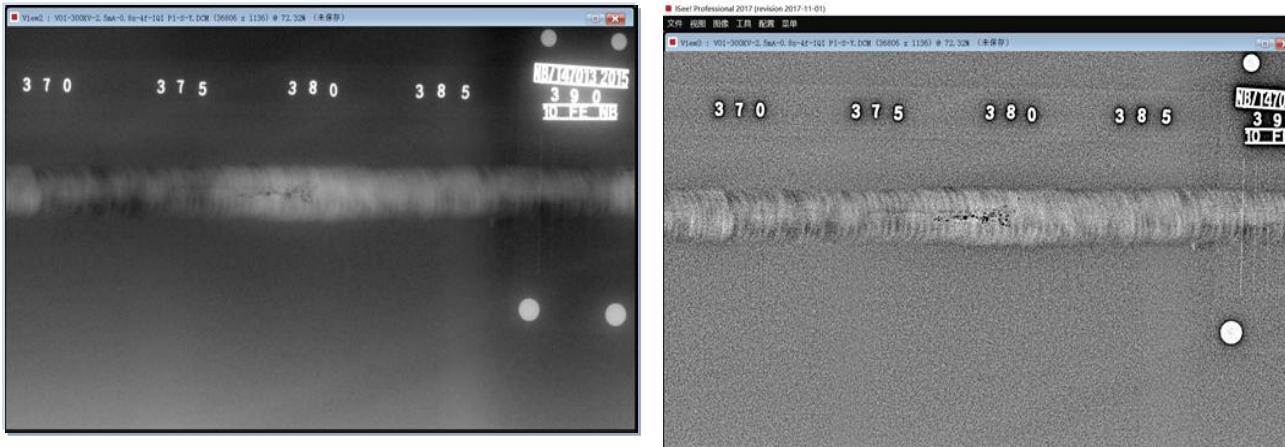
未熔合



## 三、数字成像 - DR检测技术



裂纹



密气



### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 4、现场存在的问题

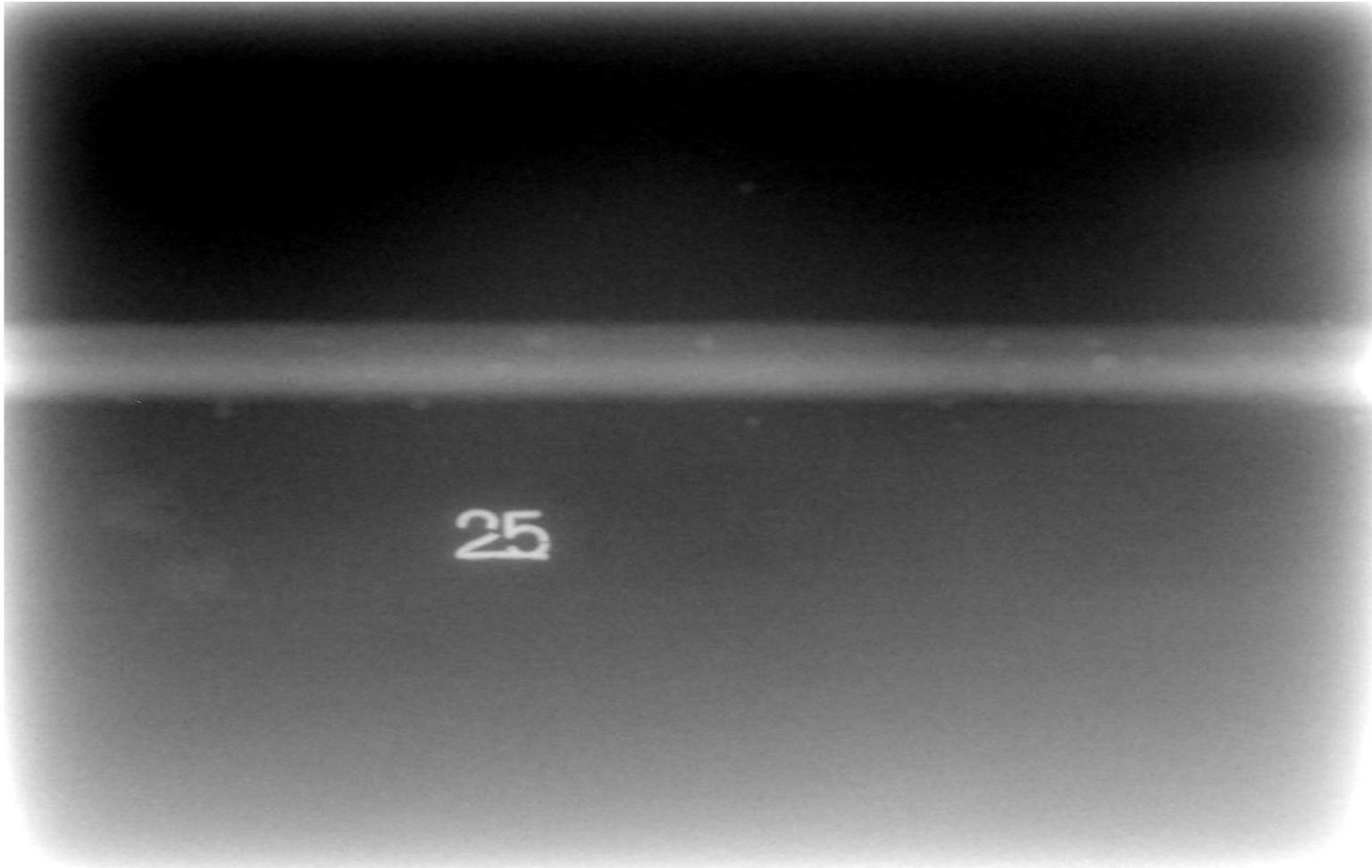
##### 4. 1 成像板





### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 4.2 图像校准





## 三、数字成像 - DR检测技术

### 4.3 工艺参数和工装变化

- 现场工艺参数尤其曝光时间（扫查速度）影响DR的成像质量，对这些参数的定量确定有一个过程，需通过制定相关的质量控制措施进行完善。
- 在DR设备成像过程中，探测器由于自身重量和机械结构原因，在环焊缝的0点、3点、6点和9点位置距焊缝表面距离发生改变，导致成像质量存在差异。



### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 4.4 最小透照次数

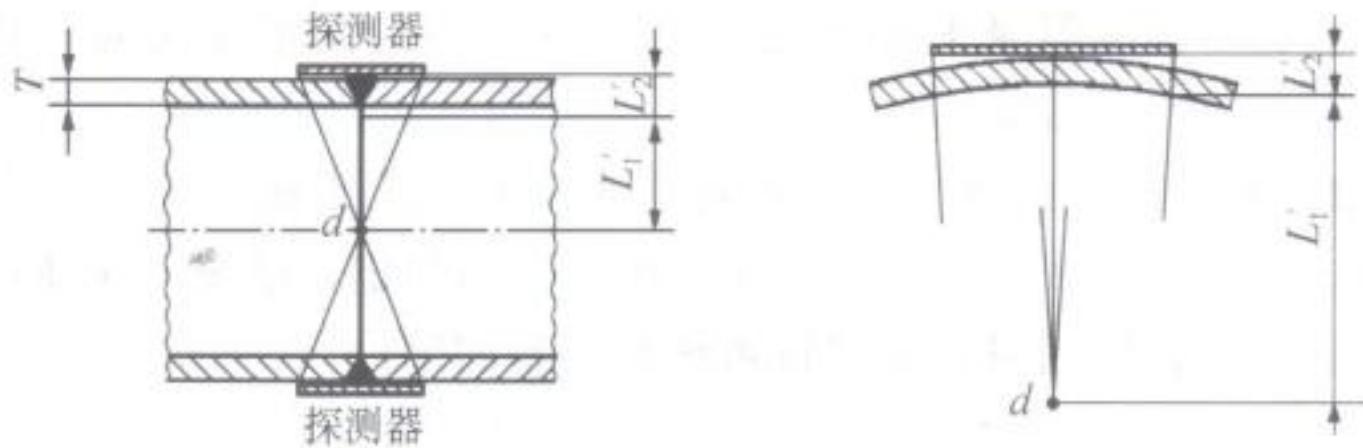


图 5.5.1-2 中心透照平面成像

$d$ —有效焦点尺寸； $T$ —公称厚度； $L'_1$ —X射线机焦点到透照部位边缘源侧表面连线的垂直距离； $L'_2$ —透照部位边缘源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离



### 三、数字成像 - DR检测技术

2 中心透照及双壁单影投照平面成像时,  $L'_1$  应根据公式 (5.6.1-2) 计算:

$$L'_1 \geq 10d \cdot L'_2 T^{-1/3} \quad (5.6.1-2)$$

式中  $L'_1$  ——X射线机焦点到有效透照部位端点源侧表面连线的垂直距离 (mm);

$L'_2$  ——有效透照部位端点源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离 (mm);

$T$  ——公称壁厚 (mm)。



### 三、数字成像 - DR检测技术

#### 4.5 合理的对比

序号	检测单位	DR厂家	进场时间	对比试验 焊口数	单口曝光时间 (s)	DR缺陷检出率
1	四川佳诚	迪派锐	2018.03.01	551	960	84.3%
2	徐州东方	新思维	2018.03.01	61	480	98.4%
		布鲁泰克	2018.10.3	21	660	95.2%
3	大庆三维	新思维	2018.03.13	113	480	68.1%
4	廊坊北检	丹东华日	2018.03.25	39	540	84.8%
5	郑州华龙	D/P Tech	2018.05.25	271	270	98.2%
6	辽河澳维	丹东华日	2018.07.10	447	540	97.9%



### 三、数字成像 - DR检测技术

焊口编号	DR检出缺欠				RT检出缺欠			
	位置 ( mm )	性质	尺寸 ( mm )	级别	位置 ( mm )	性质	尺寸 ( mm )	级别
ZE06T01-AD059-020-Z-G105	4410-4435	未熔合	22	III	4440	未熔合	15	III
ZE06T01-AC002-089-Z-G414	3400-3430	未熔合	总长9	II	3360-3470	未熔合	总长35	III
ZE06T01-AC002-094-Z-G414	2100-2215	未熔合	总长35	III	2135-2150	未熔合	总长17	II
ZE06T01-AC002-098-Z-G414	1990-2015	未熔合	总长12	II	1760-2060	未熔合	总长45	III
ZE06T01-AC002-105-Z-G414	3250	未熔合	28	IV	3245	未熔合	10	II
ZE06T01-AD061-007-G105	2640	圆形缺欠	6点	II	2700	圆形缺欠	3点	I
ZE06T01-AD011-068-Z-G113	2310-2445	未熔合	总长36	III	2400-2470	未熔合	总长22	II
ZE06T01-AD011-069-Z-G113	4400-30	未熔合	总长29	III	4465-20	未熔合	总长23	II
ZE06T01-AD011-072-Z-G113	1685-1740	未熔合	总长18	II	1610-1760	未熔合	总长61	IV
ZE06T01-AD011-093-Z-G113	1500	圆形缺欠	9点	II	1525	圆形缺欠	4点	II



## 四、全聚焦/IWEX成像技术



## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### 4.1 全聚焦检测技术

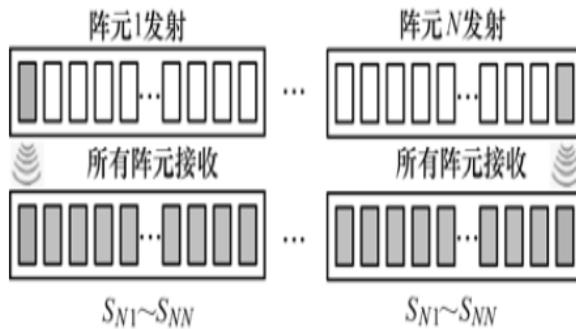
#### 国内外技术现状：

- ◆全聚焦成像技术是由英国Bristo大学的Caroline Holmes 等在2005 年首次提出，近几年很多国外学者提出了各种算法，加快了全聚焦成像算法的处理速度，有些研究提高了空间分辨率和缺陷检测能力；
- ◆全聚焦成像技术也初步被国外商业开发，法国M2M、日蚀、汕超等，实现了全矩阵数据采集并通过计算机进行成像；
- ◆国内高校及研究所对超声相控阵全聚焦成像技术的研究起步较晚，北京航空航天大学、天津大学等学者提出改进的全聚焦成像算法及三维成像方法，广东汕头超声电子股份有限公司实现了进行了全矩阵数据采集及三维成像，并形成相应产品；
- ◆国内外相控阵全聚焦采集设备在工业领域应用较少。



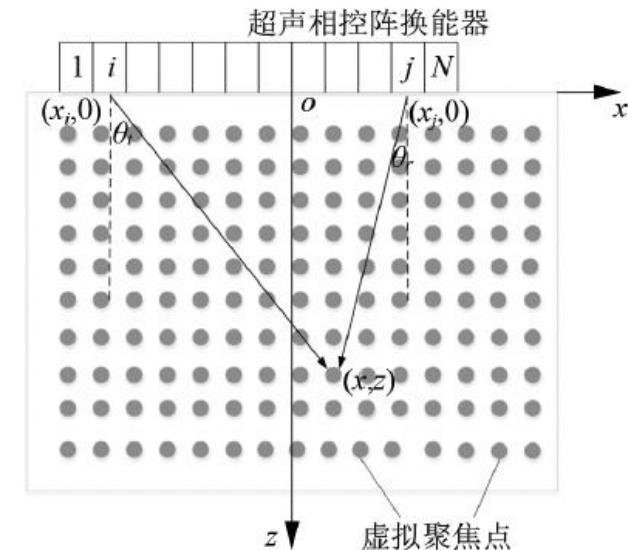
## 四、全聚焦/IWEX检测技术

◆相控阵全聚焦成像原理：基于**全矩阵数据采集 ( Full Matrix Capture )**  
进行超声成像，在成像区域每个位置进行聚焦。



$T \backslash R$	1	2	...	$j$	...	$N$
1	$S_{11}$	$S_{12}$	...	$S_{1j}$	...	$S_{1N}$
2	$S_{21}$	$S_{22}$	...	$S_{2j}$	...	$S_{2N}$
...	...	...	...	...	...	...
$i$	$S_{i1}$	$S_{i2}$	...	$S_{ij}$	...	$S_{iN}$
...	...	...	...	...	...	...
$N$	$S_{N1}$	$S_{N2}$	...	$S_{Nj}$	...	$S_{NN}$

全矩阵采集



全聚焦成像算法原理图

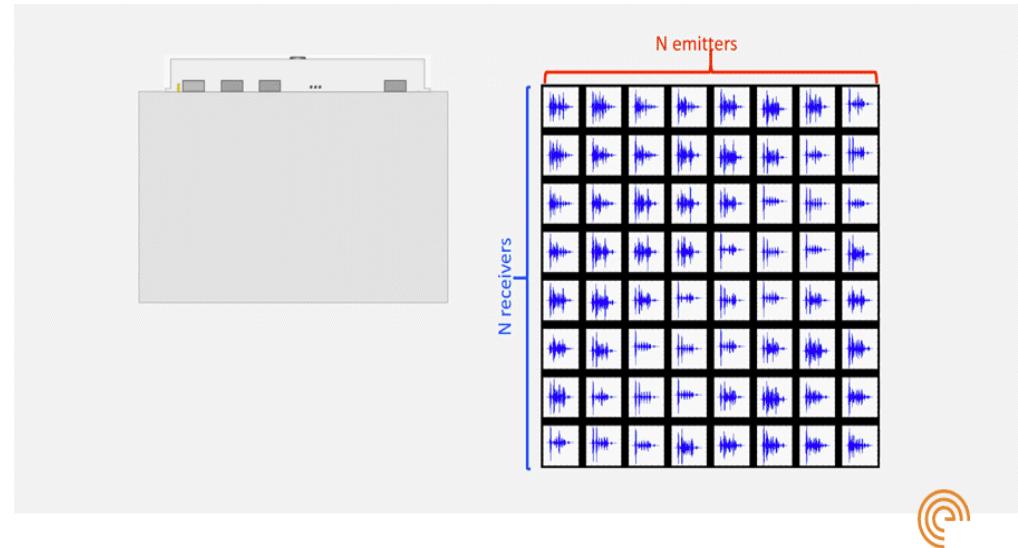


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

全聚焦成像算法原理：



全矩阵采集

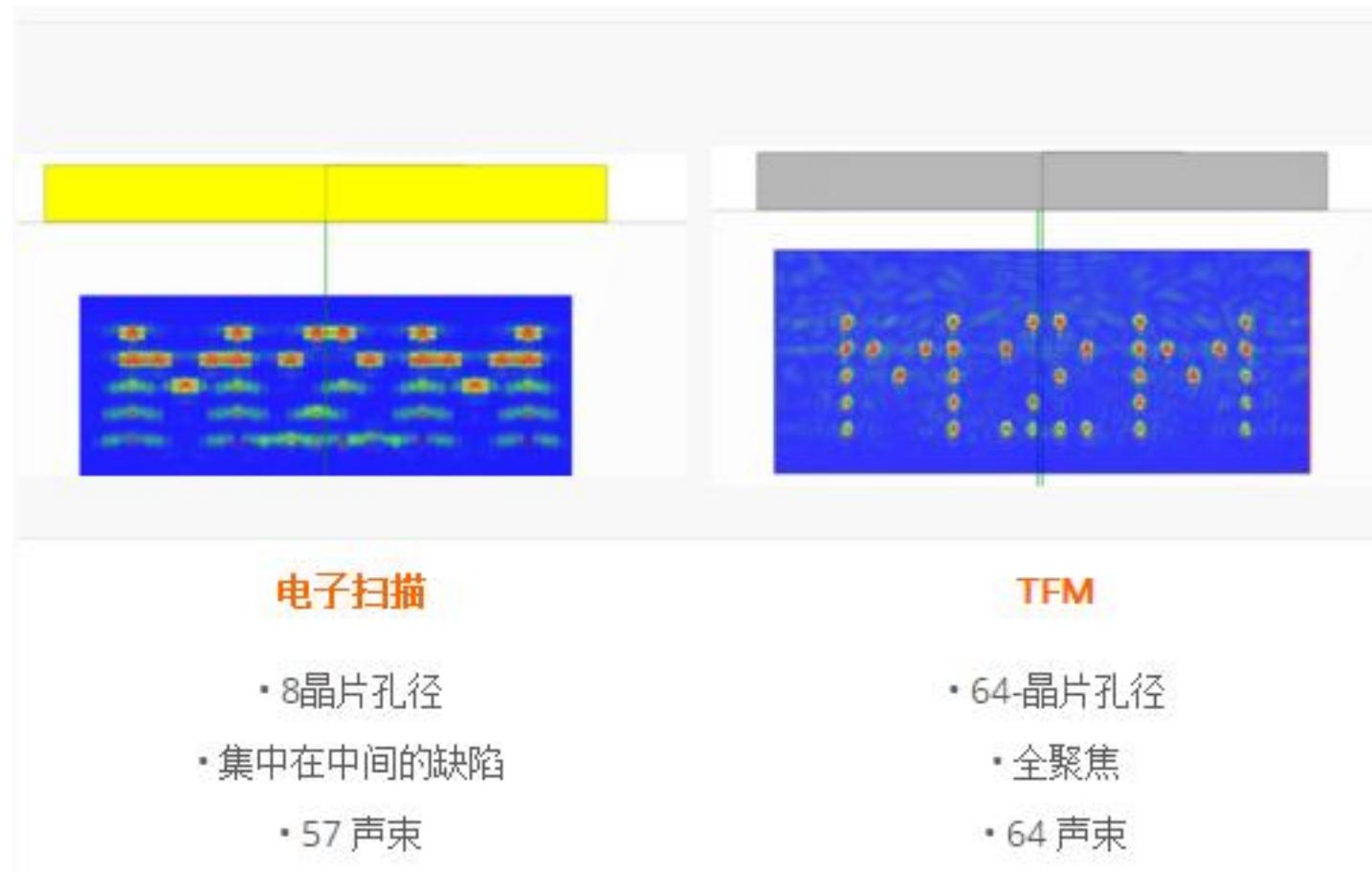


全聚焦算法：波型重建



## 四、全聚焦/IWEX检测技术

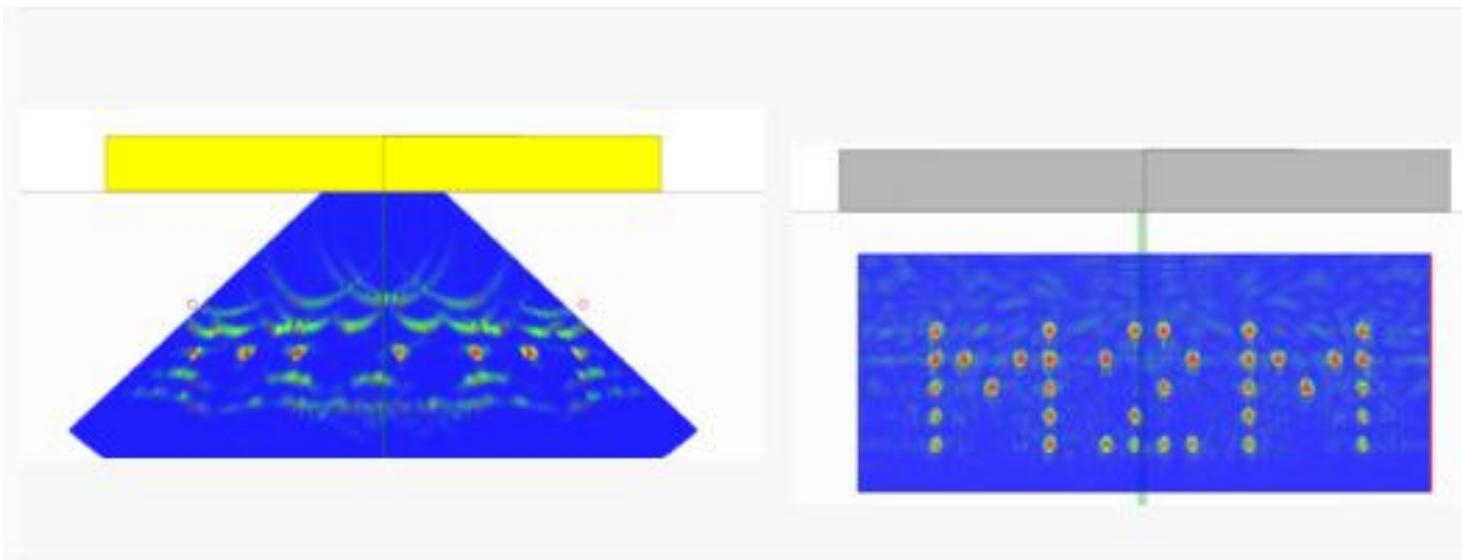
超声相控阵全聚焦技术与常规相控阵技术对比：



线性扫描与全聚焦对比图



## 四、全聚焦/IWEX检测技术



扇形扫描

- 64-晶片孔径
- 集中在中间的缺陷
- 扇区在-55°和55°之间，110次声束
- 聚焦点的最佳分辨率

TFM

- 64-晶片孔径
- 全聚焦
- 64 声束
- 全局最佳分辨率

扇形扫描与全聚焦对比图

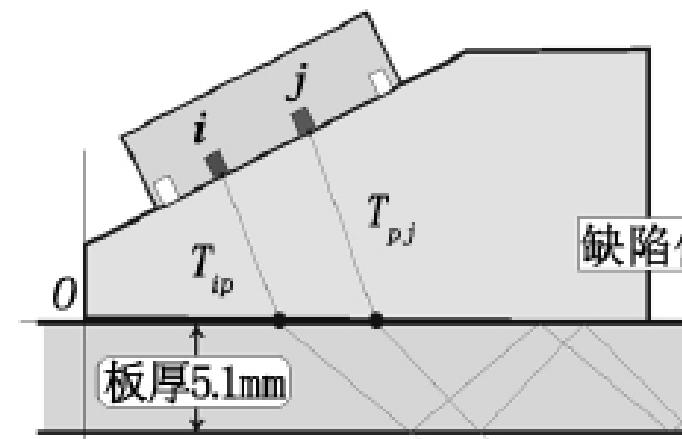
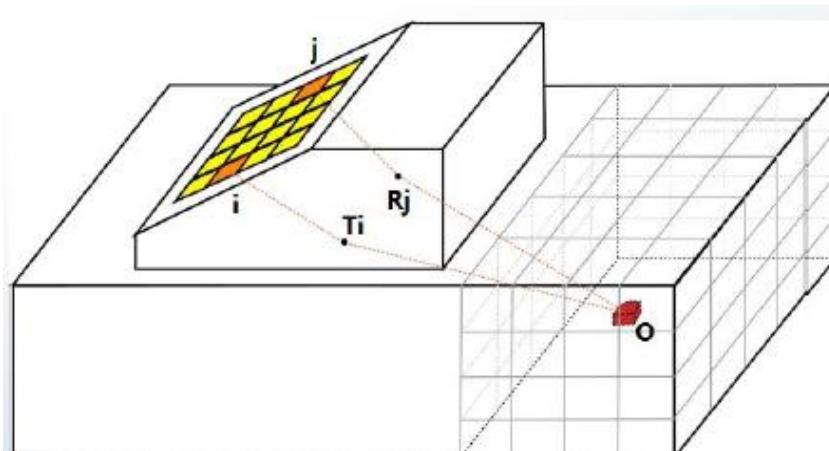


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

◆全聚焦成像检测有两种方式：

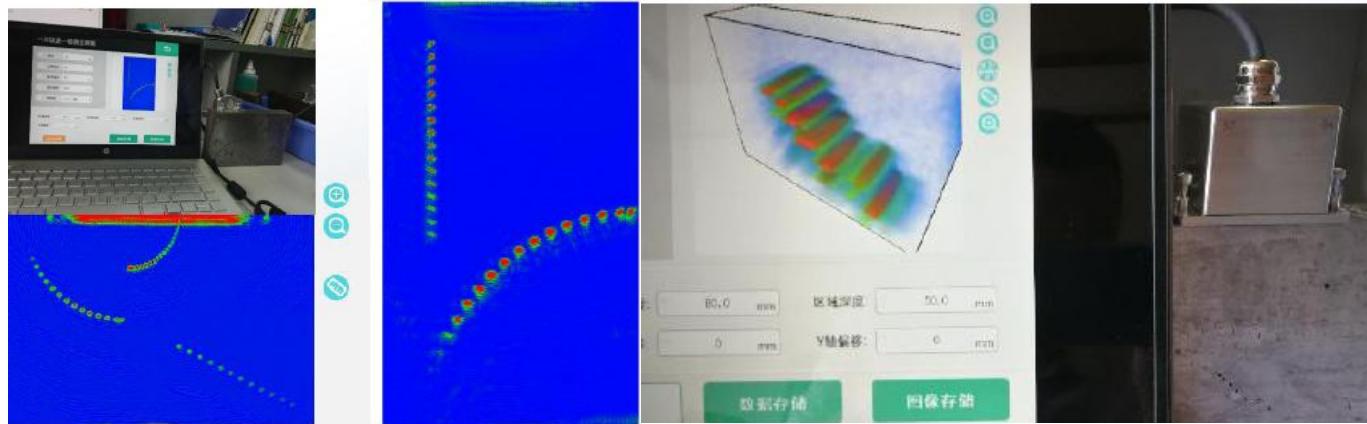
(1) 基于面阵相控阵探头进行检测，但该方法聚焦偏转法则复杂，数据量庞大；

(2) 基于线阵相控阵探头检测实现二维成像，采用断层扫描的方法实现三维成像，该方法是目前研究的重点之一。

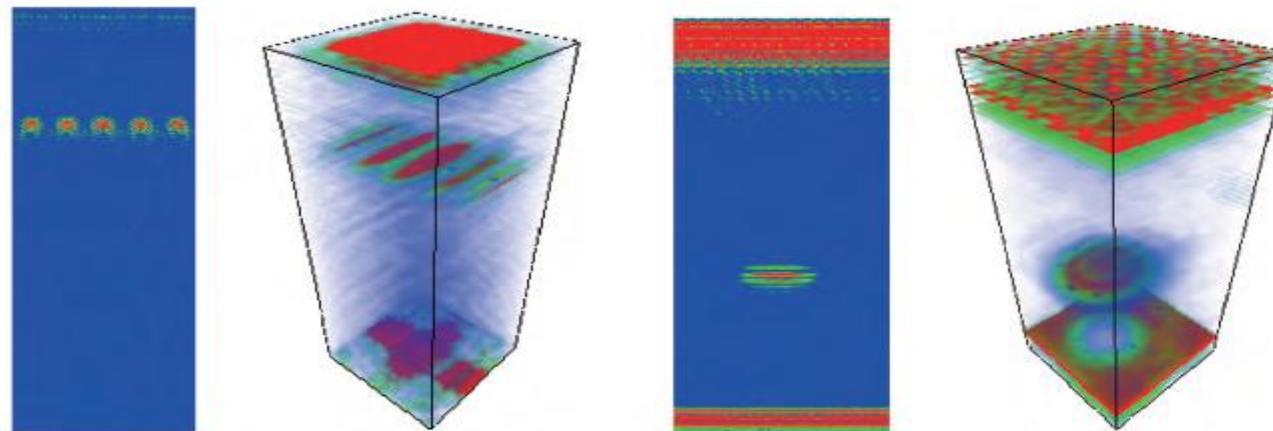




## 四、全聚焦/IWEX检测技术



全聚焦技术检测相控阵标准试块



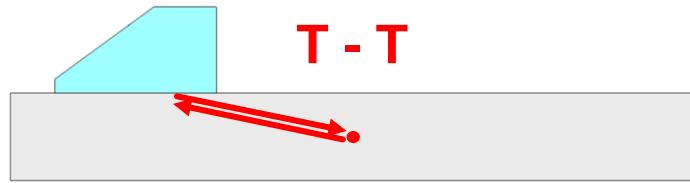
通孔和平底孔检测二维成像与三维成像对比图



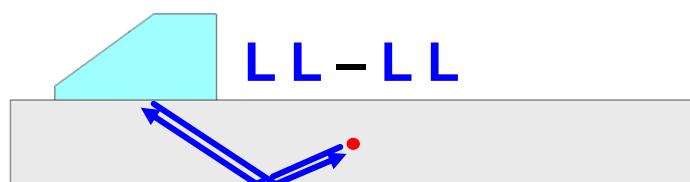
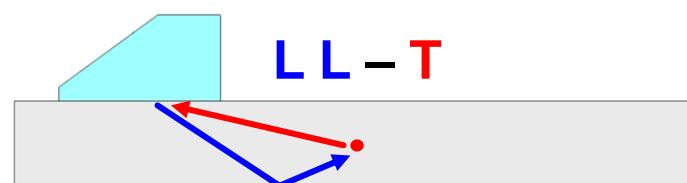
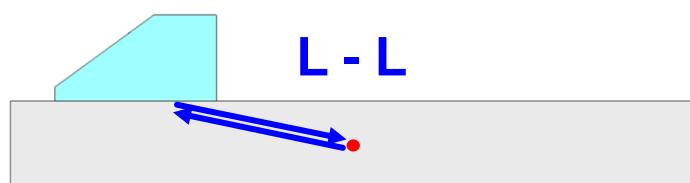
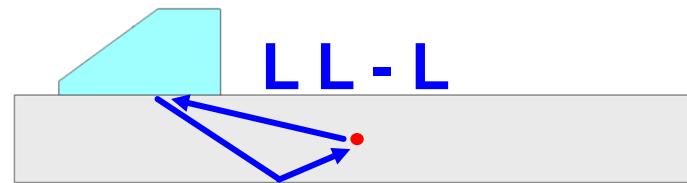
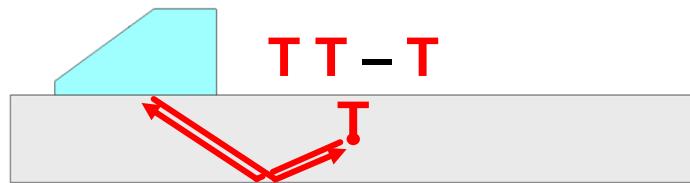
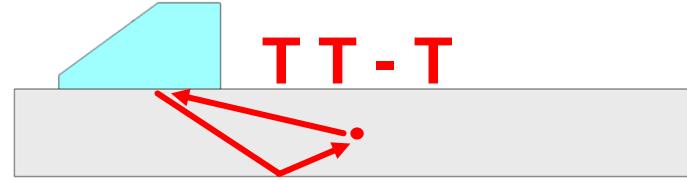
## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### 全聚焦检测方式

Direct path – Pulse-echo



Indirect path – Pulse-echo





## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### 全聚焦试验

#### (1) 实验1-人工缺陷焊缝检测

探头：LM-5MHz 楔块：LM-55SW

检测方法：TFM 分辨率：512×512

激发孔径：64 步进偏移：±10mm

全聚焦区域：水平位置起始-12mm，水平宽度24mm，深度

编码采集方式：AUT自动扫查装置编码记录，两探头双侧同时检测

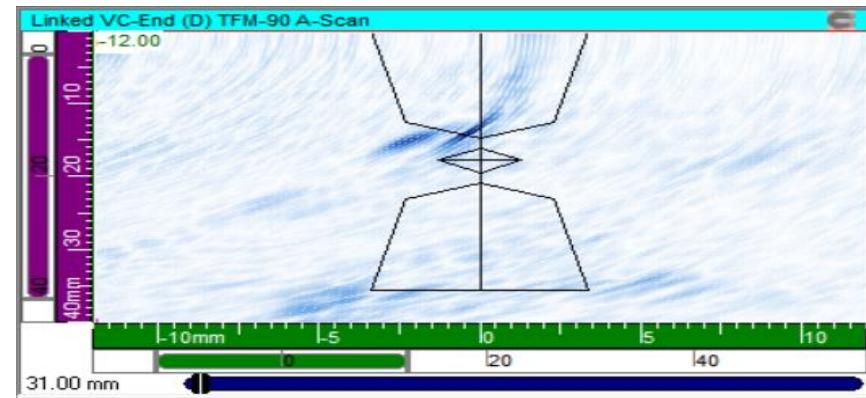




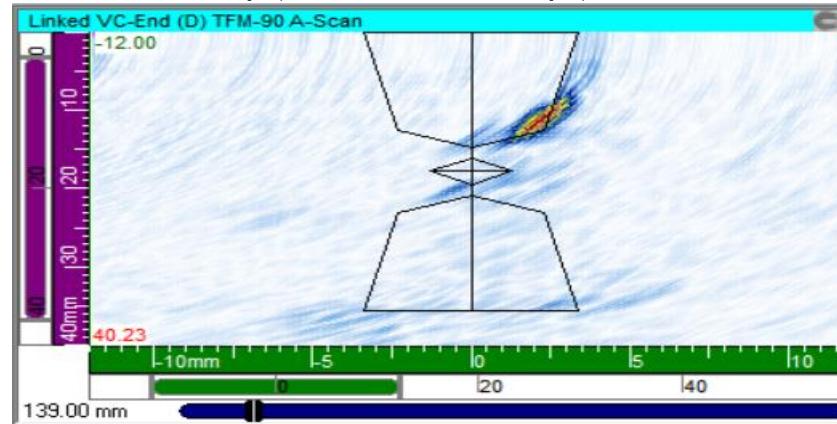
## 四、全聚焦/IWEX检测技术

TFM检测结果如下，基础增益36dB。

D1 此增益下最大幅值28.4%，缺陷长26mm,缺陷深14.5mm,缺陷高2.3mm



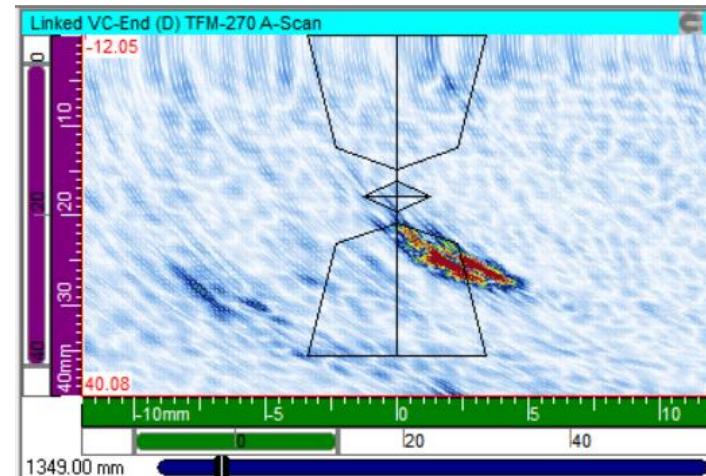
D2 此增益下最大幅值100%，缺陷长27mm,缺陷深11mm,缺陷高4.6mm



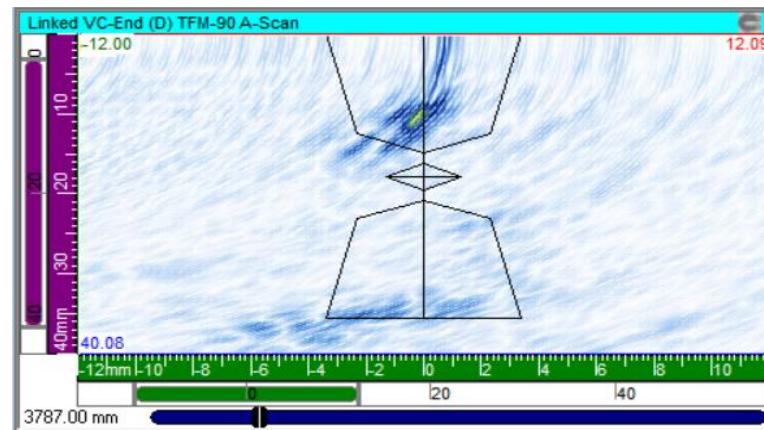


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

D12 此增益下最大幅值100% , 缺陷长31mm,缺陷深9.5mm,缺陷高4.5mm



D32 此增益下最大幅值58% , 缺陷长24mm,缺陷深10.6mm,缺陷高2.4mm





## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### (2) 实验2-CRC试块TFM检测报告

探头：LM-5MHz 楔块：LM-55SW

检测方法：TFM 分辨率：512×512

激发孔径：64 步进偏移：-10mm

全聚焦区域：水平位置起始-10mm，水平宽度20mm，深度位置起始0mm，深度40mm

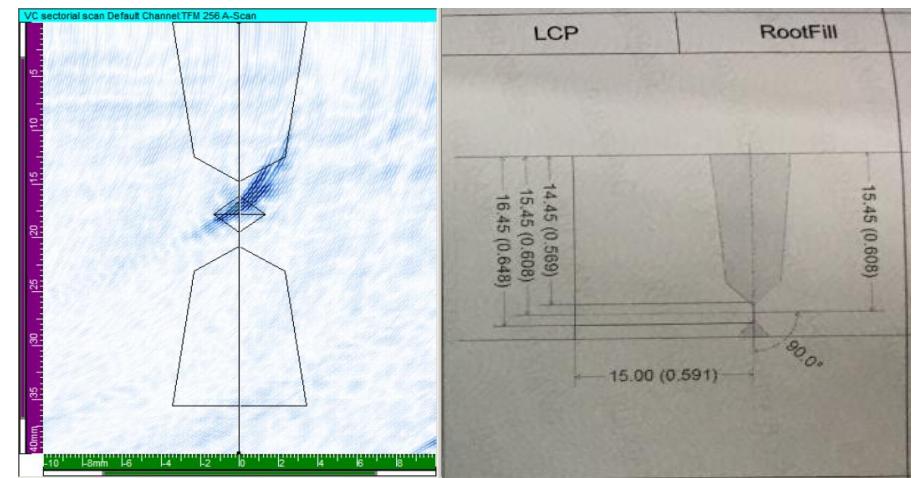
编码采集方式：迷你编码器手动编码记录，单侧单面扫查



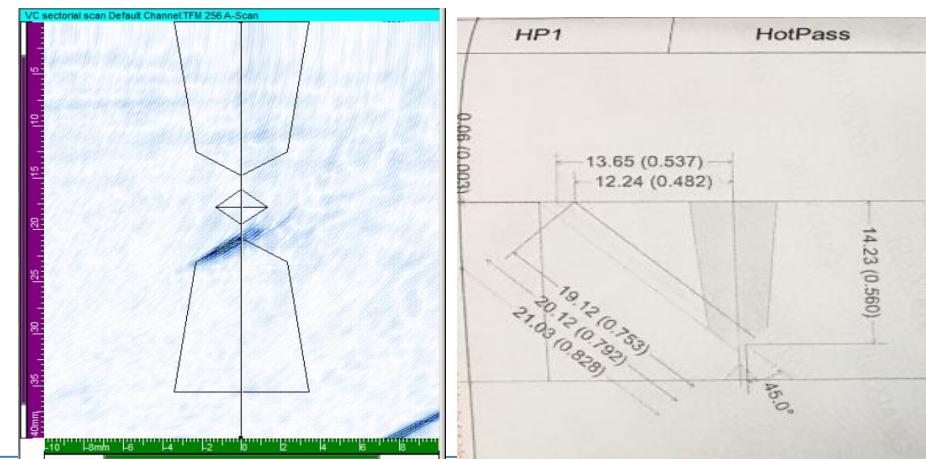


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

LCP 信噪比约为22.3dB,此增益下最大幅值39%



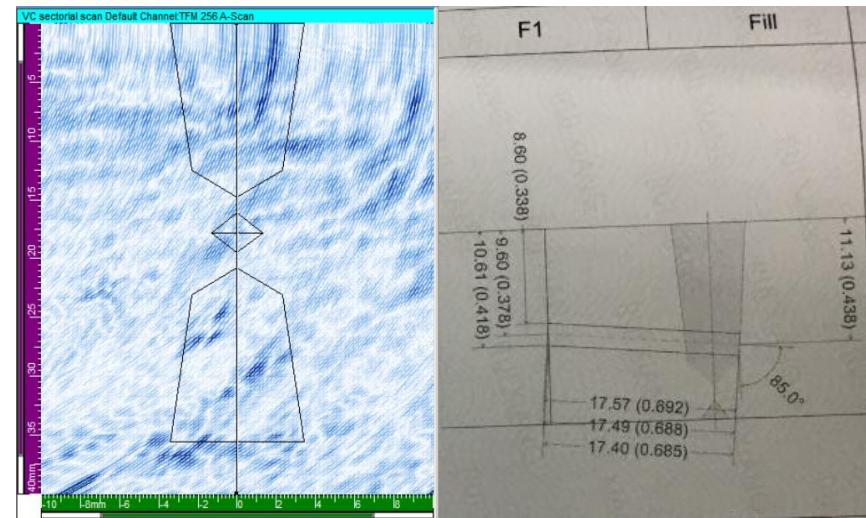
HP1 信噪比约为21.8dB , 此增益下最大幅值37%



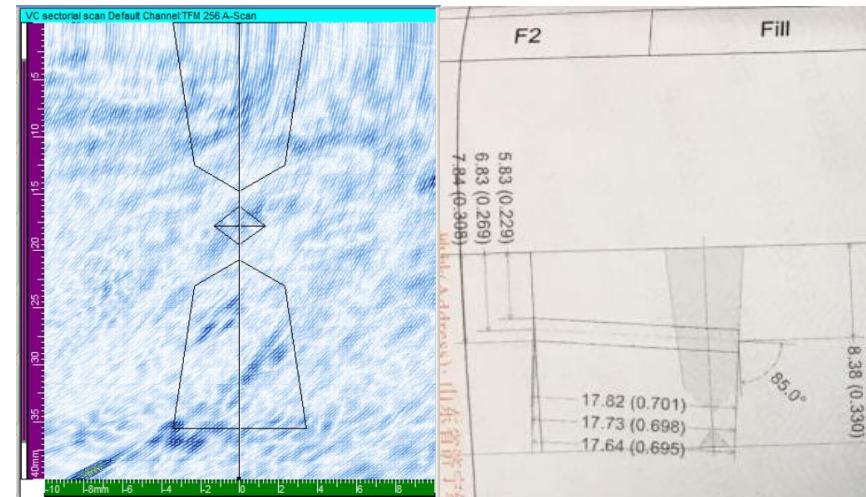


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

F1 ( 45dB ) 未见明显信号



F2 ( 45dB ) 未见明显信号





## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### (3) 实验3-V型试块TFM检测报告

探头：LM-5MHz 楔块：LM-55SW

检测方法：TFM 分辨率：512×512

激发孔径：64 步进偏移：-12m

全聚焦区域：水平位置起始-15mm，水平宽度30mm，深度位置起始0mm，深度40mm

编码采集方式：便携式编码器手动记录编码，单侧单面扫查

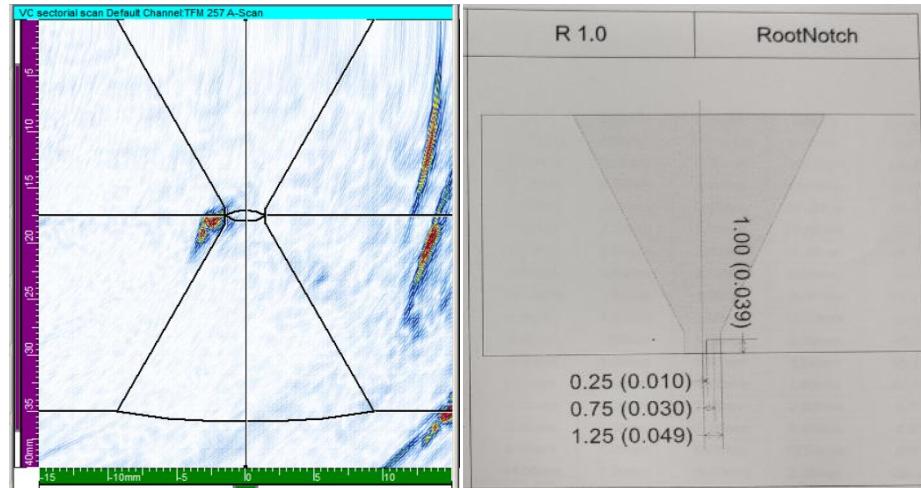




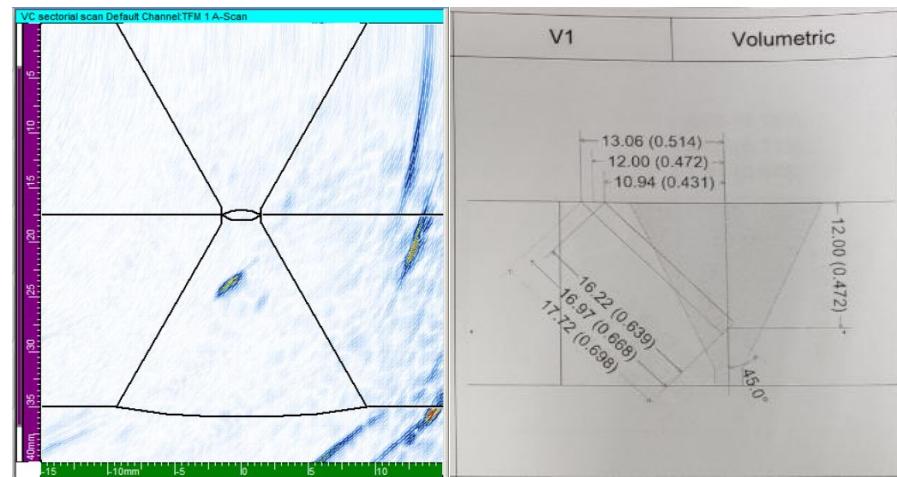
## 四、全聚焦/IWEX检测技术

TFM检测结果如下图所示，基础增益36dB。

R1.0 此增益下最大幅值为100%



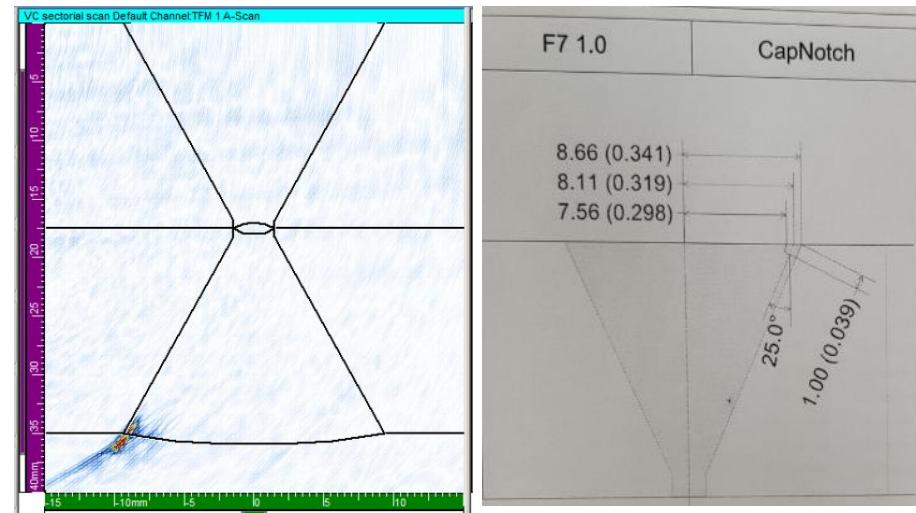
V1 此增益下最大幅值为49%



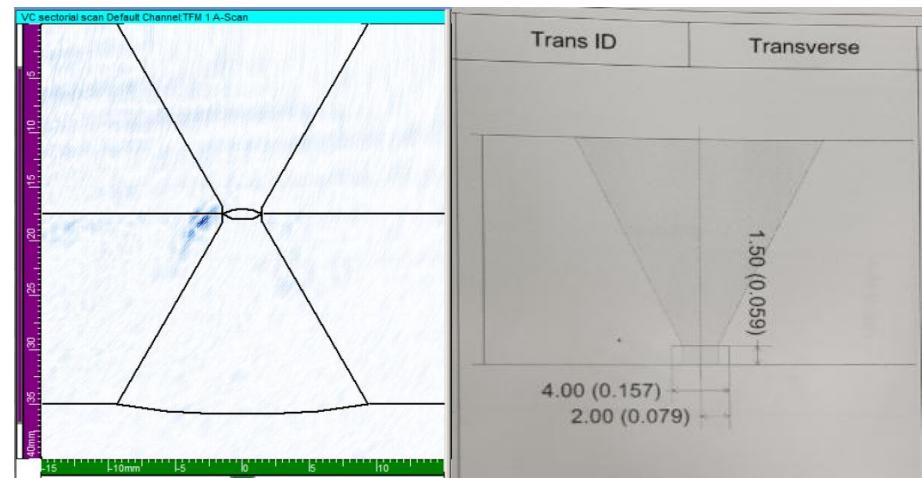


## 四、全聚焦/IWEX检测技术

F7 1.0 此增益下最大幅值为100%



Trans ID 此增益下最大幅值为21%





## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### 小结：

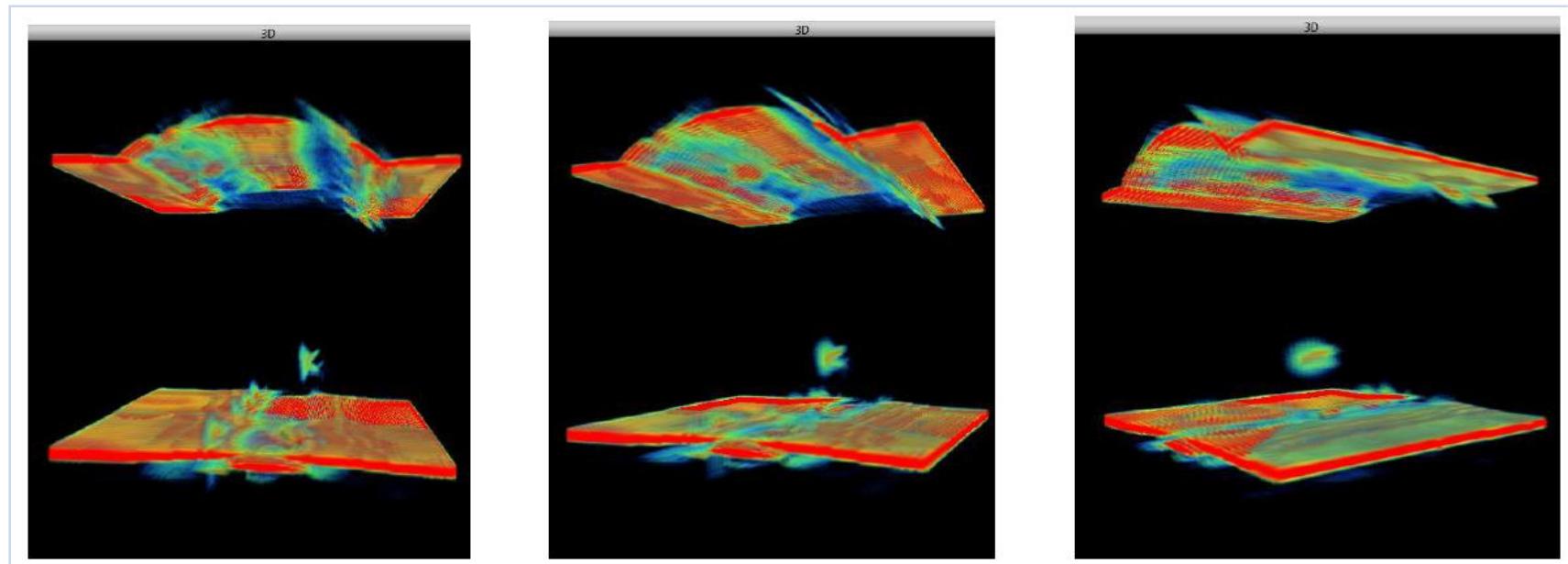
- (1) 全聚焦检测对试块、轨道安装的要求没有AUT那么严格；**不针对特定坡口形式，可以实现一定范围的焊缝检测全覆盖；**
- (2) 不同的全聚焦方案对特定焊接工艺缺陷的检出率是不一样的；
- (3) 不同厂家的TFM设备采用的全聚焦方案不同；
- (4) TFM普遍对腐蚀性缺陷检出率较高；
- (5) TFM技术还有待完善，**全聚焦成像技术需要大量的数据后处理，由于聚焦方案非常多，焊缝检测速度非常慢。目前实现实时检测比较困难，可考虑用于对焊口存疑位置进行验证。**



## 四、全聚焦/IWEX检测技术

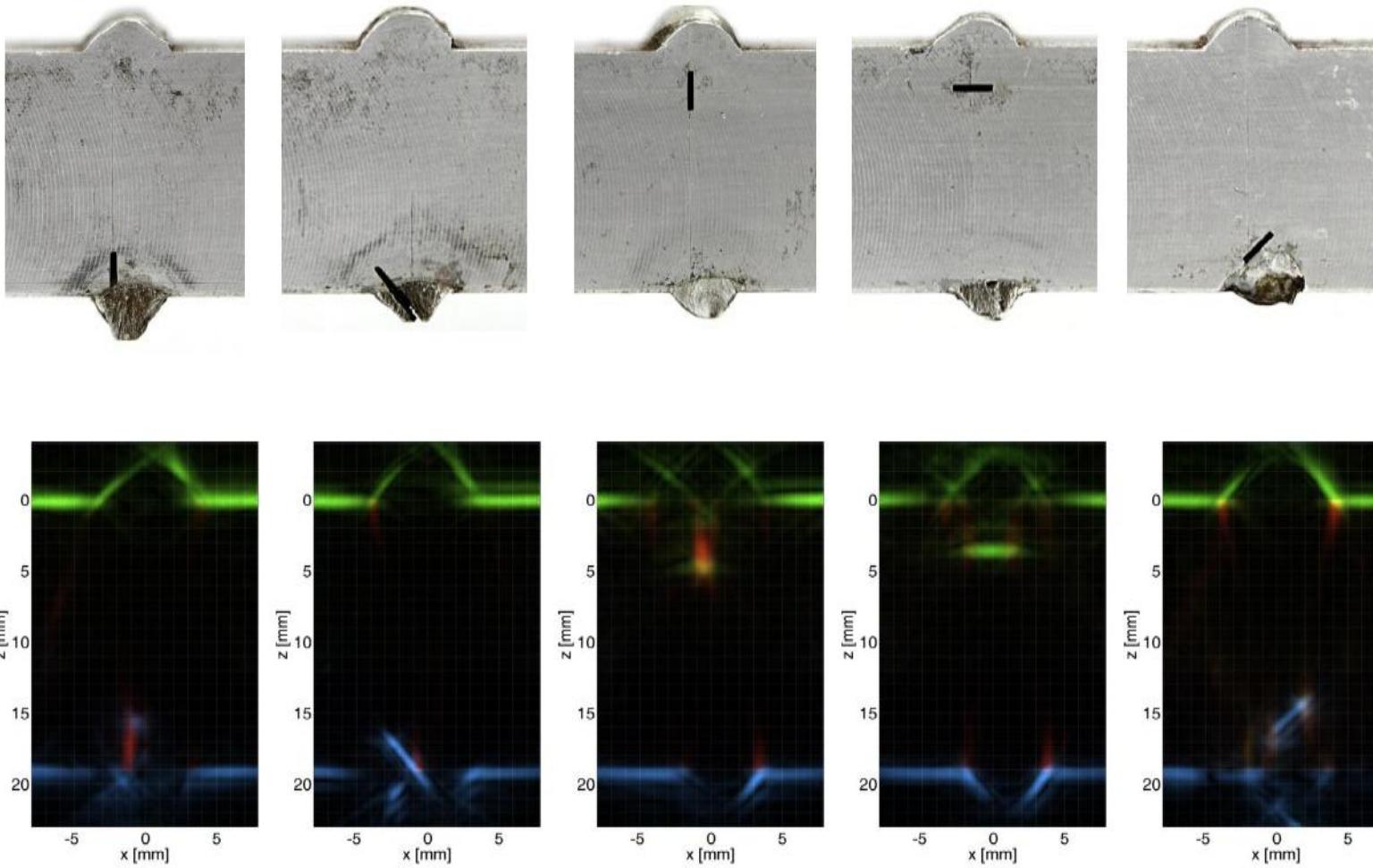
### 4. 2 IWEX (反向波磁场外推) 检测技术

传统的相控阵超声技术，只能对检测区域的某一深度形成线聚焦，即只有在焦点附近具有较好的检测分辨率，IWEX (Inverse Wave field Extrapolation) 在整个检测区域都能够达到点点聚焦效果，速度快，对坡口形式不敏感，会成为相控阵超声检测未来的发展方向。



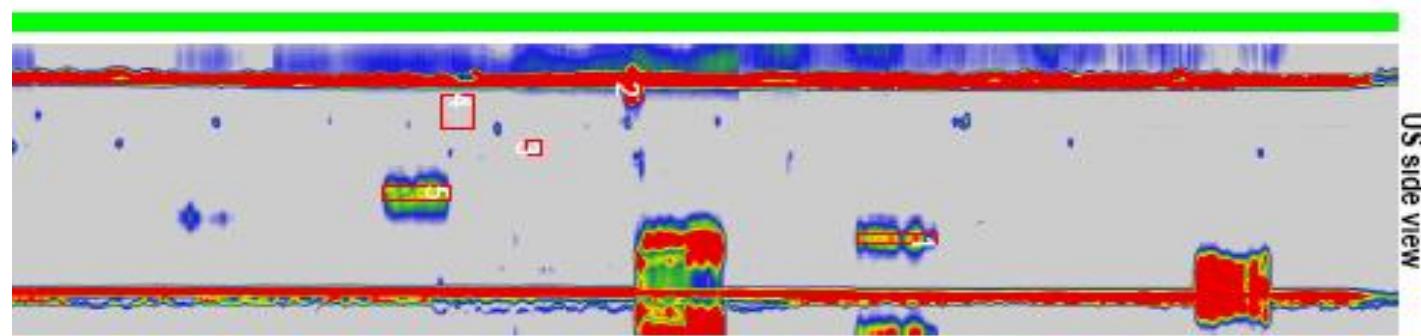
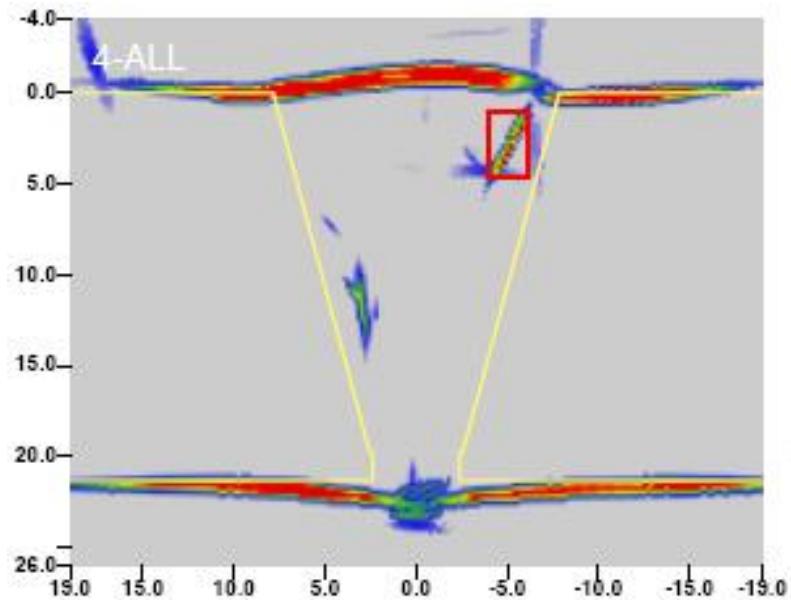
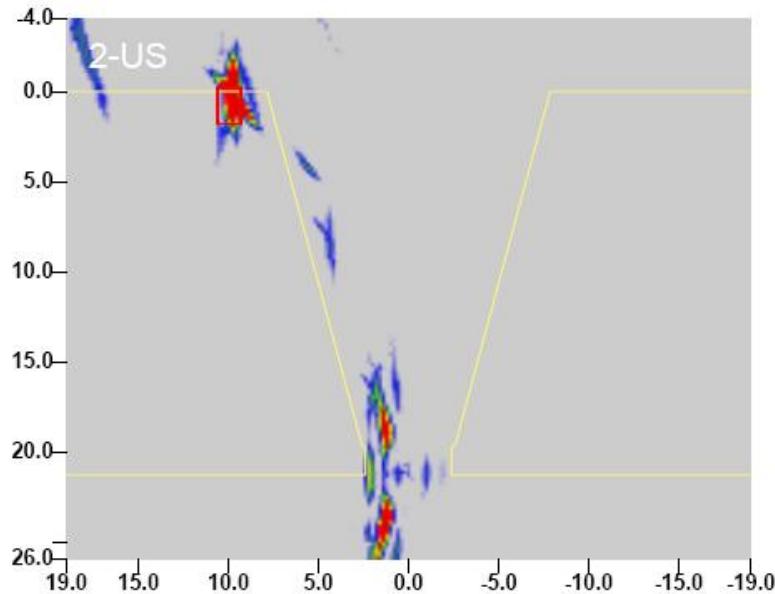


## 四、全聚焦/IWEX检测技术



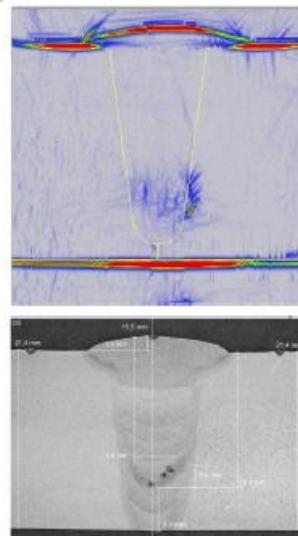
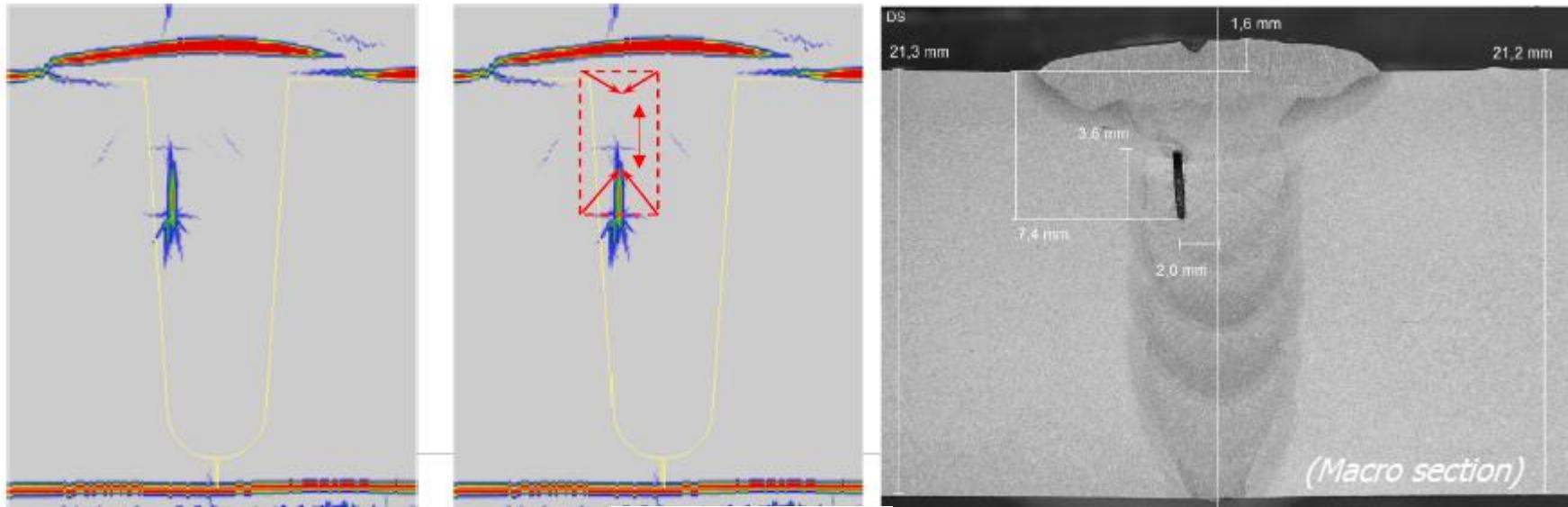


## 四、全聚焦/IWEX检测技术





## 四、全聚焦/IWEX检测技术





## 四、全聚焦/IWEX检测技术

### 小结：

- (1) IWEX是RTD独有的一项技术，是AUT的补充；
- (2) 该技术对坡口角度不敏感，不需要针对项目的特定试块，但依然需要参考试块进行标定；
- (3) 尚未进行工业应用；
- (4) 与目前的AUT检测技术相比，该设备在缺欠准确定量方面较为困难。



汇报结束

谢谢！