

---

# 无损检测技术简介

胡振龙

中国特种设备检测研究院

2014年7月      洛阳

[13439613941@126.com](mailto:13439613941@126.com)

[18910756379@163.com](mailto:18910756379@163.com)



## 无损检测定义

无损检测 **NDT** (**Non-destructive testing**)，就是利用声、光、磁和电等特性，在不损害或不影响被检对象使用性能的前提下，检测其是否存在缺陷或不均匀性，给出缺陷的大小、位置、性质和数量等信息，进而判定其所处技术状态（如合格与否、剩余寿命等）的所有技术手段的总称。

个人理解，无损检测分为三步：

1. 用一种合适的能量与被检测对象发生相互作用
2. 用灵敏的传感器检拾反馈的能量
3. 判断是否存在异常



---

无损检测技术

超声检测 (UT)

射线检测 (RT、CR、DR、CT)

磁粉检测 (MT)

渗透检测 (PT)

涡流检测 (ET)

声发射检测 (AET)

高/频导波

超声衍射时差法检测 (TOFD)

磁记忆 (MMT)

相控阵

电磁超声





光	声	电	磁	力
目视检测 (VT)	超声检测 (UT)	常规涡流检测 (ECT)	磁粉检测 (MT)	渗透检测 (PT)
红外检测	TOFD	远场涡流	磁记忆	泄漏检测
内窥镜检测	导波	电阻法	漏磁检测 (MFL)	声振检测
射线检测 (RT)	声发射检测 (AET)	脉冲涡流		
激光全息	相控阵			
激光散斑	声超声			
	电磁超声			





# 目视检测

- 人们用视觉所进行的检测都称为目视检测
- 目视检测是一种表面检测方法，其应用范围相当广泛，不但能检测工件的几何尺寸、结构完整、形状缺陷等，而且还能检测工件表面上的缺陷和其他细节。但是受到人眼分辨能力和仪器分辨率的限制，目视检验不能发现表面上非常细微的缺陷。在观察过程中由于受到表面照度、颜色的影响容易发生遗漏现象。



# 渗透探伤的基本原理

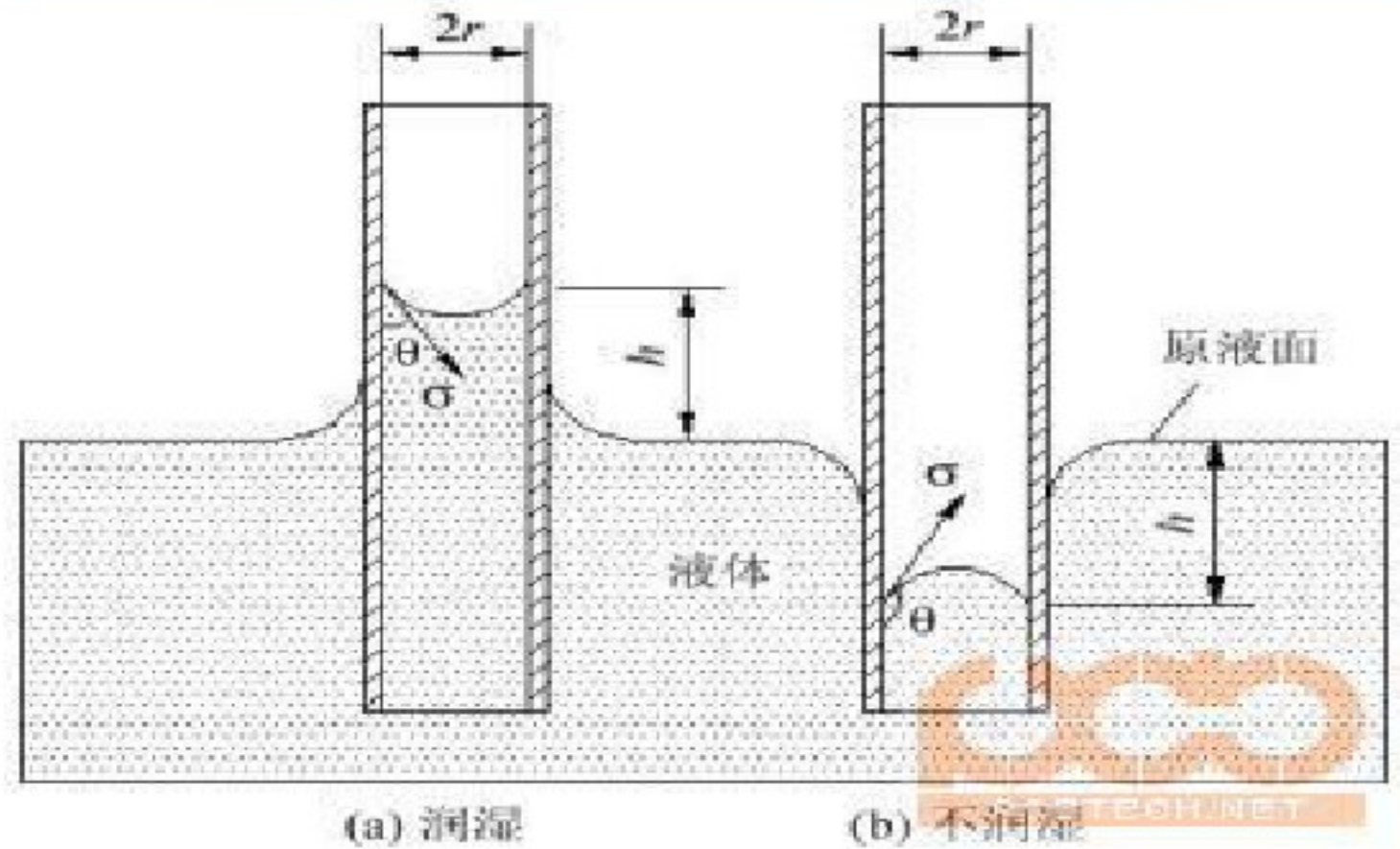
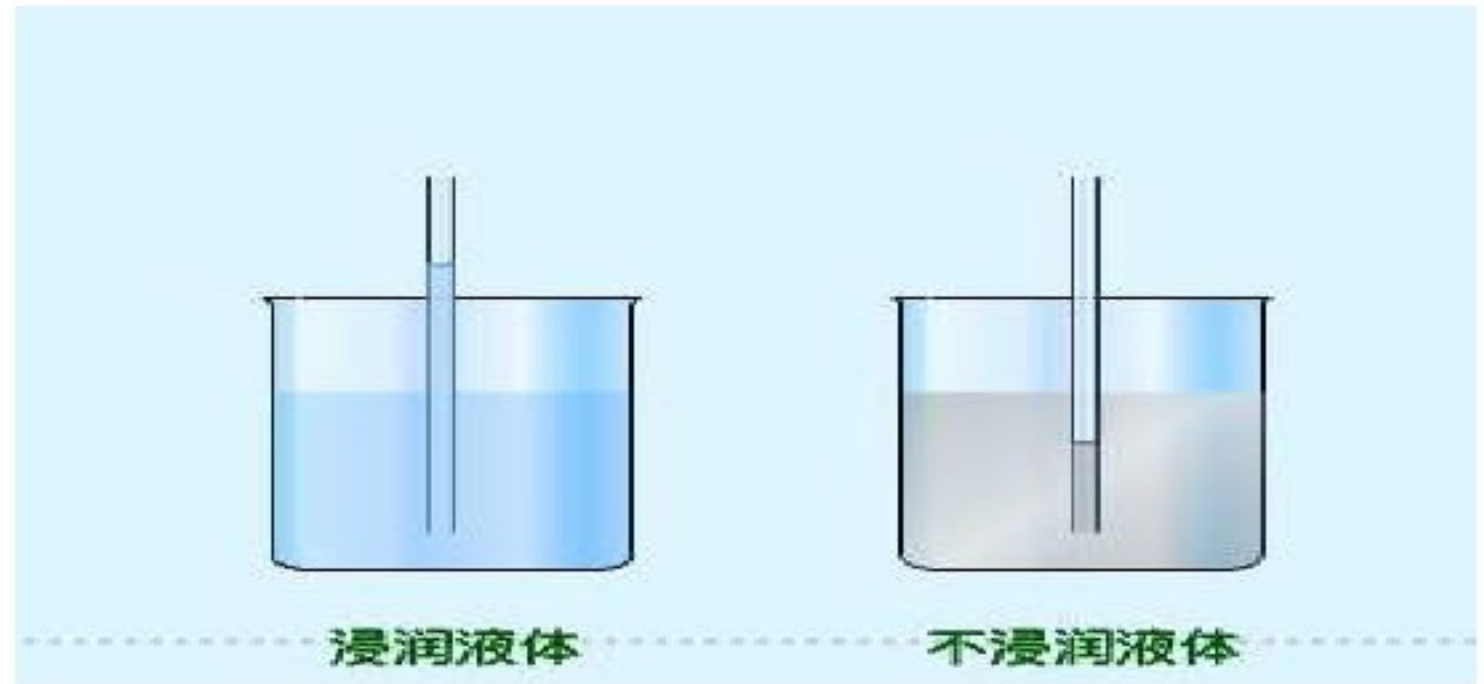
---

渗透检测：利用一种毛细显像作用原理为基础的  
检查表面开口缺陷的无损检测方法。

两个物理现象：润湿与浸润



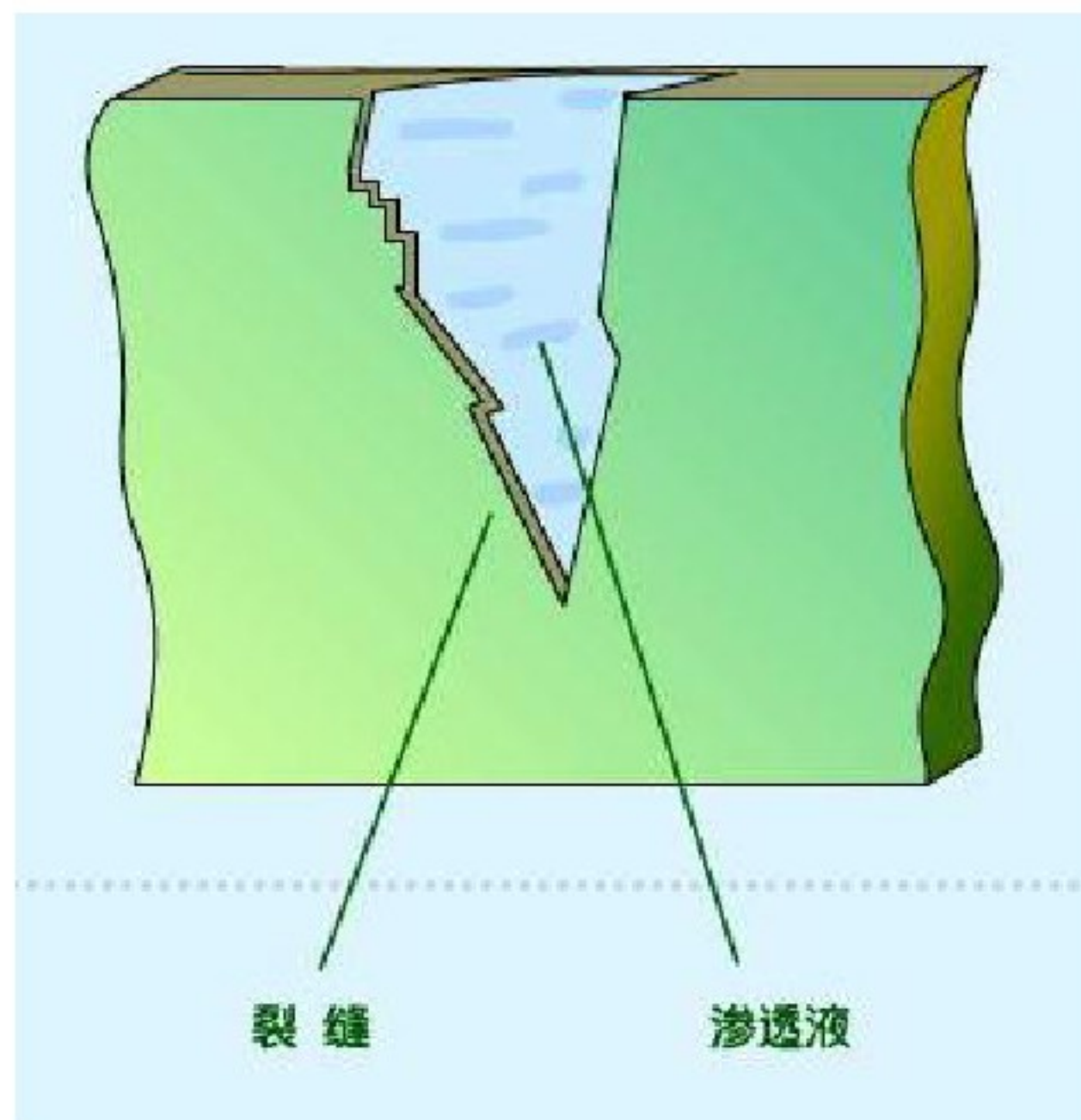






可将零件表面的开口缺陷看作是毛细管或毛管。由所采用的液体，都是能润湿零件的，因此渗透液在毛细管作用下能渗入缺陷中去，使缺陷附近的表面有所不同。

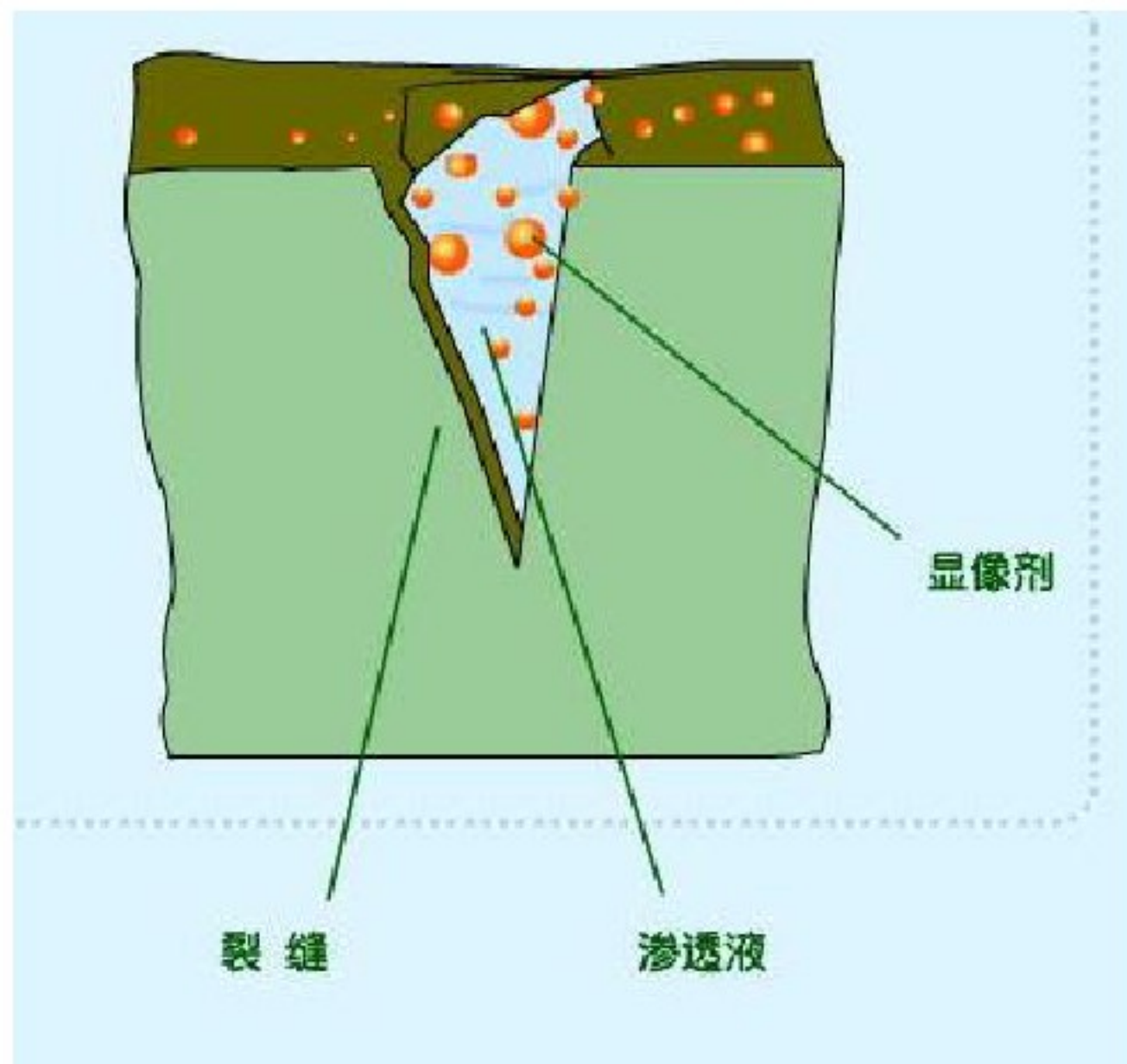
此时可以直接进行观察，而如果使用显像剂进行显像，灵敏度会大大提高。



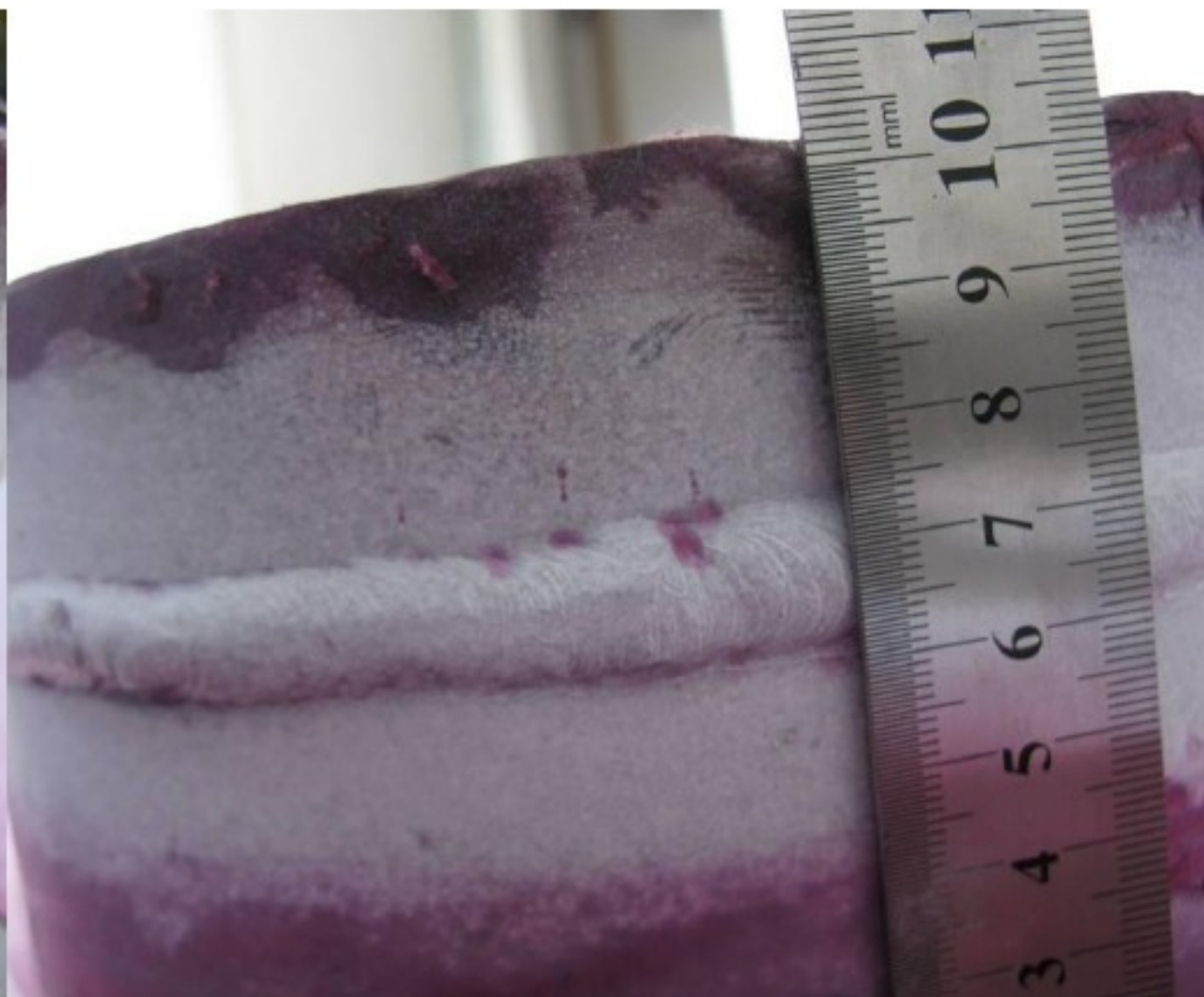
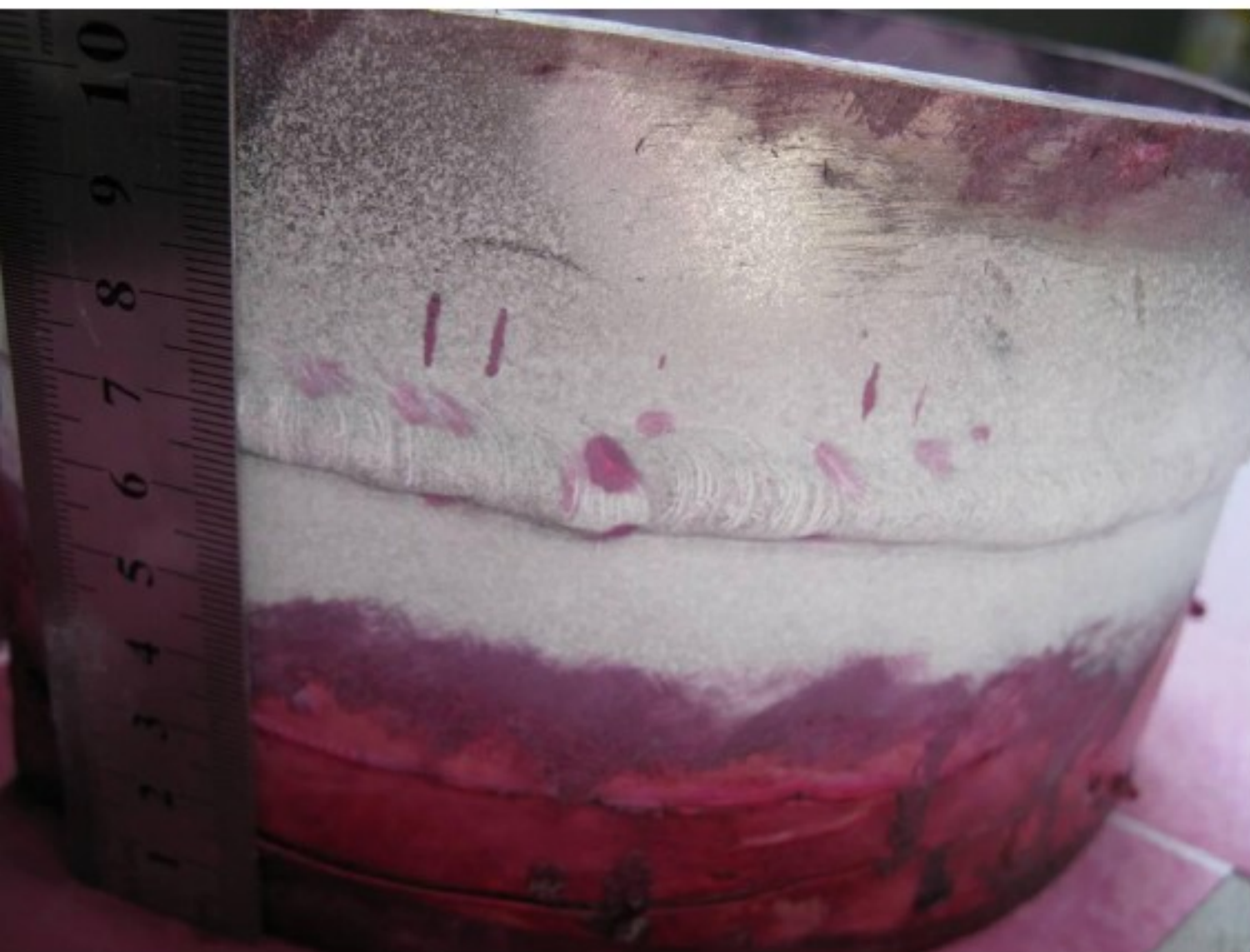
# 一、渗透探伤的基本原理

显像过程也是利用渗透的作用原理。

显像剂是一种细微粉末，显像剂微粉之间可形成很多半径很小的毛细管，这种粉末又能被渗透液所润湿，所以当清洗完零件表面多余的渗透液后，给零件的表面敷散一层显像剂，根据上述的毛细现象，缺陷中的渗透液就容易被吸出，形成一个放大的缺陷显示。







中国特种设备检测研究院



# 磁粉检测

## 原理

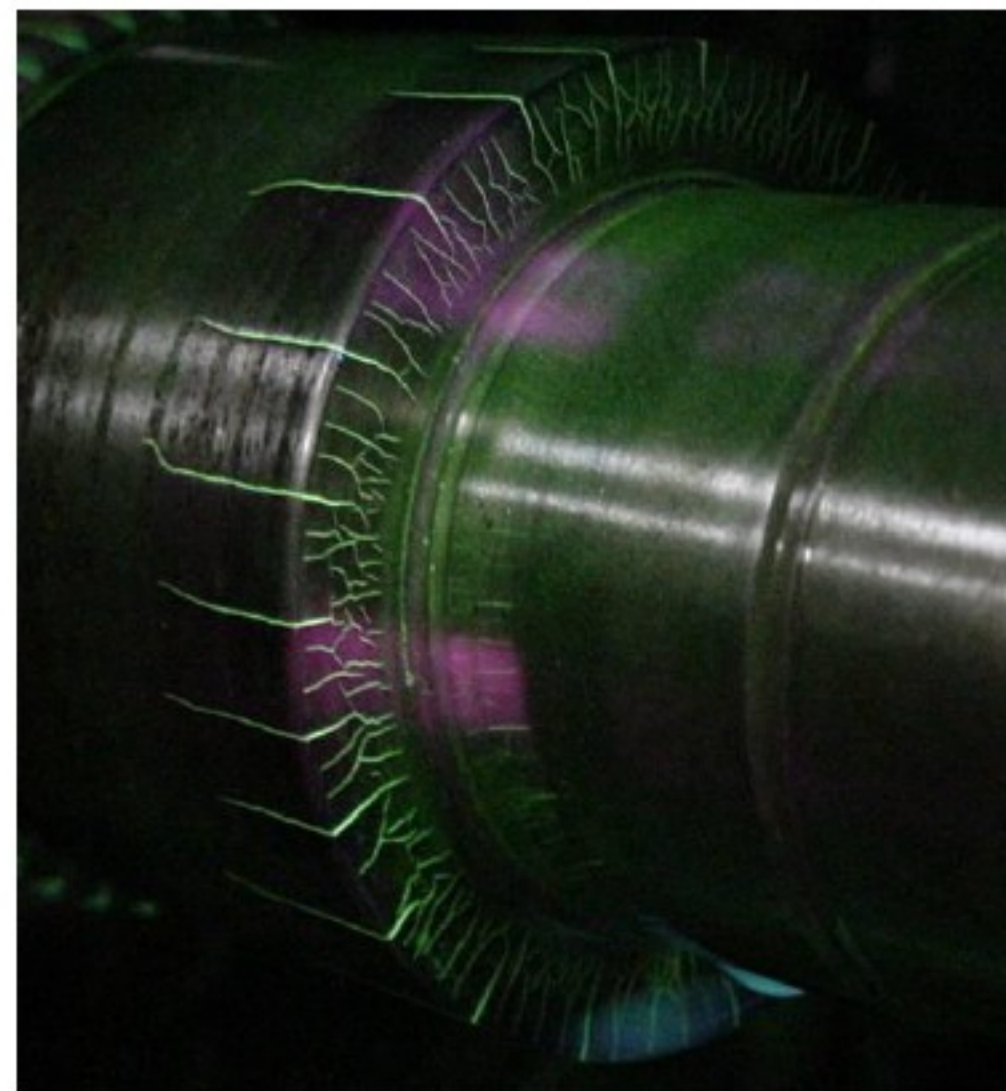
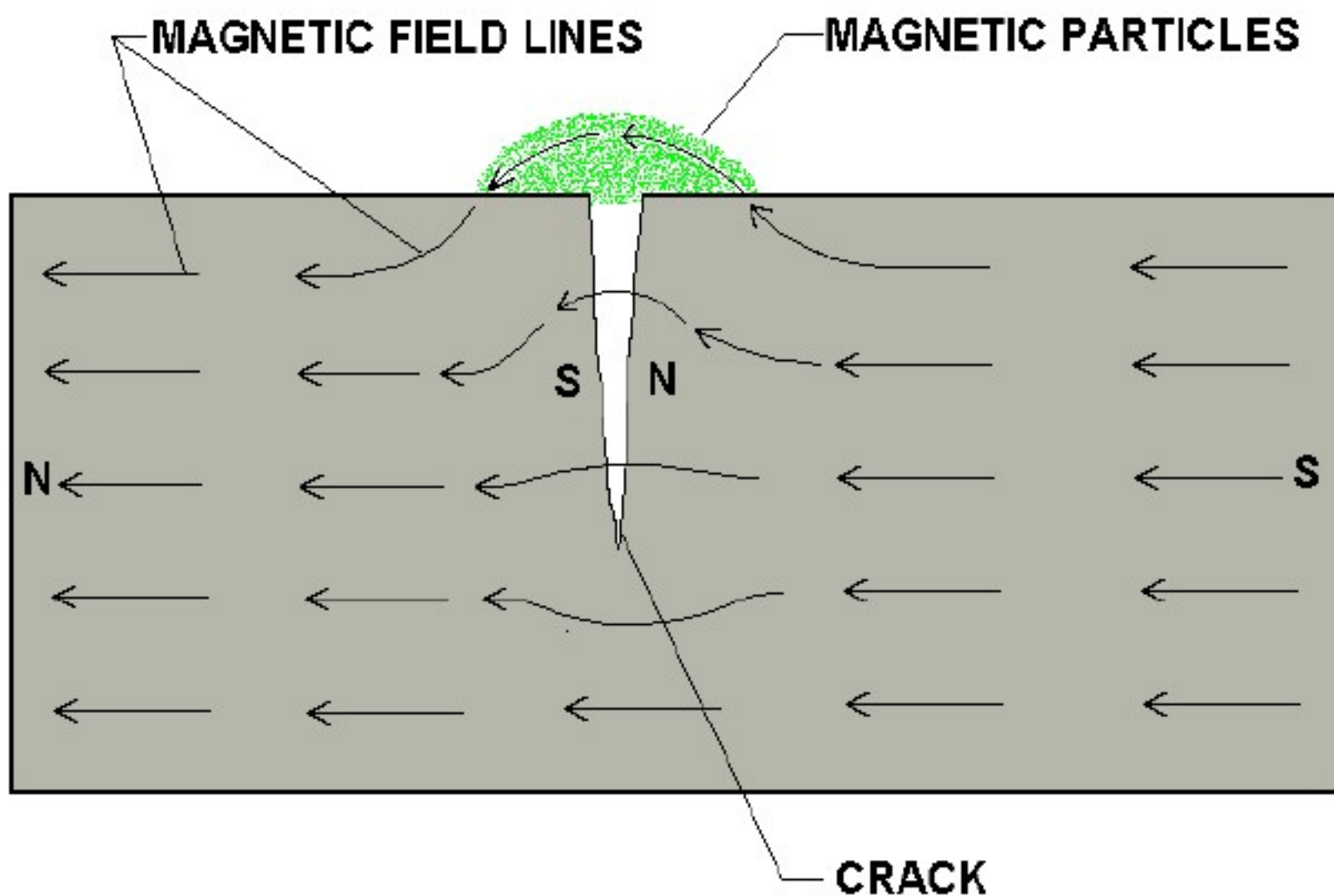
铁磁性材料工件被磁化后，由于不连续性的存在，使工件表面和近表面的磁力线发生局部畸变而产生漏磁场，吸附施加在工件表面的磁粉，在合适的光照下形成目视可见的磁痕，从而显示出不连续性的位置、大小、形状和严重程度。

## 特点

- 磁粉检测只能用于检测铁磁性材料的表面或近表面的缺陷，由于不连续的磁痕堆集于被检测表面上，所以能直观地显示出不连续的形状、位置和尺寸，并可大致确定其性质。
- 磁粉检测的灵敏度可检出的不连续宽度可达到**0.1 $\mu\text{m}$** 。综合使用多种磁化方法，磁粉检测几乎不受工件大小和几何形状的影响，能检测出工件各个方向的缺陷。



# 磁粉检测





# 磁粉检测（荧光）



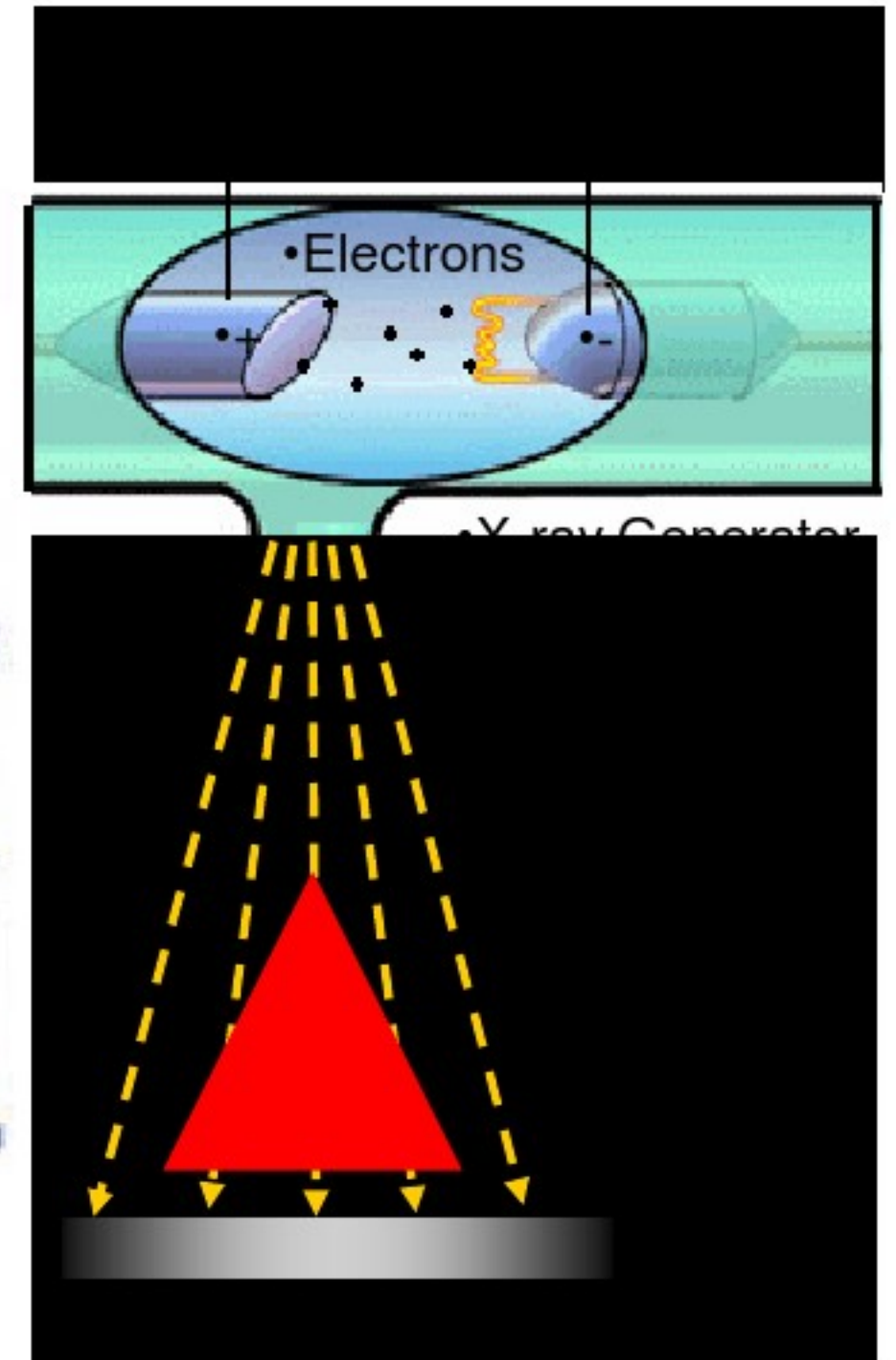
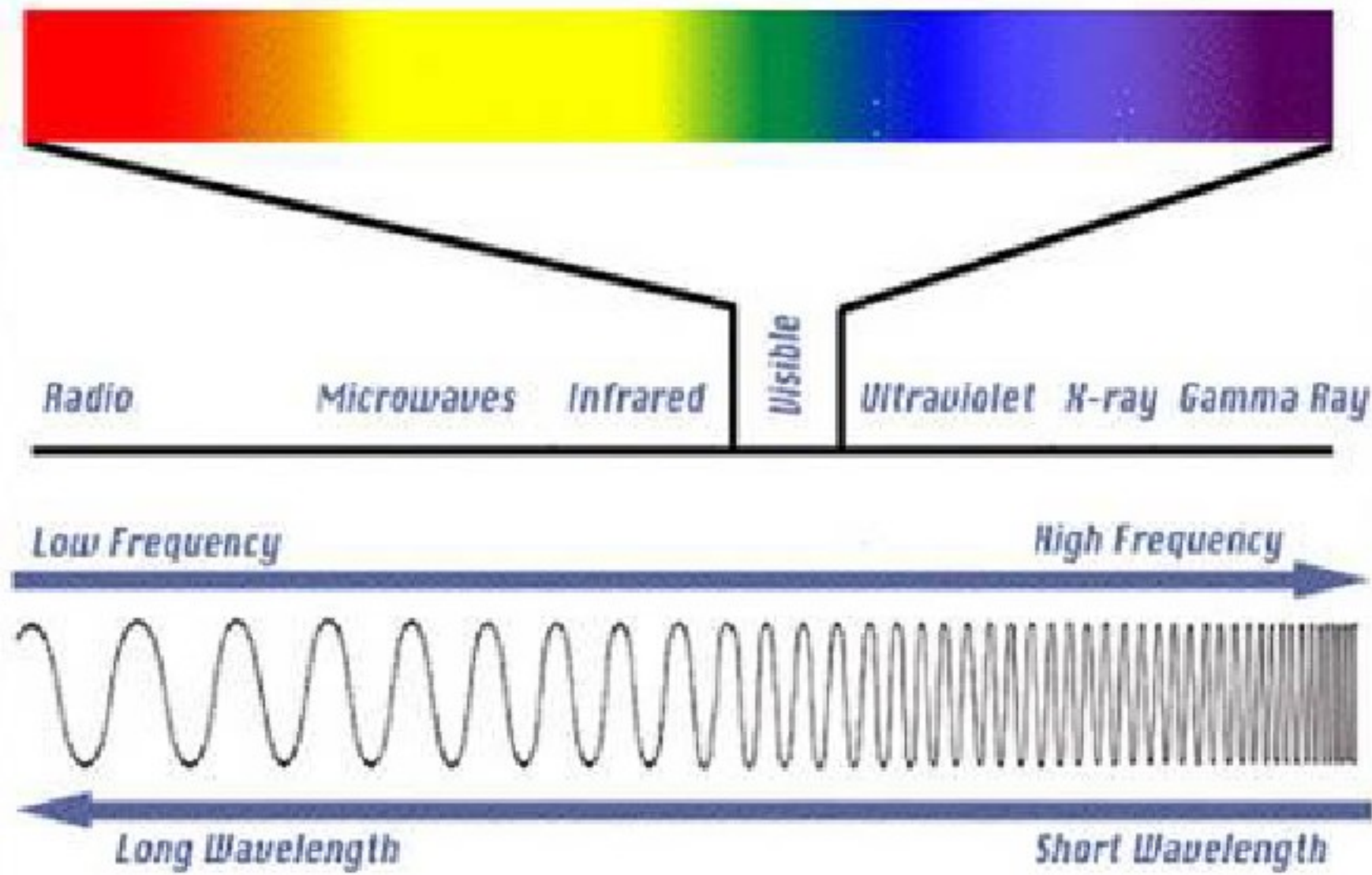


# 射线检测

X射线与自然光并没有本质的区别，都是电磁波，只是X射线的光量子的能量远大于可见光。它能够穿透可见光不能穿透的物体，而且在穿透物体的同时将和物质发生复杂的物理和化学作用，可以使原子发生电离，使某些物质发出荧光，还可以使某些物质产生光化学反应。如果工件局部区域存在缺陷，它将改变物体对射线的衰减，引起透射射线强度的变化，这样，采用一定的检测方法，比如利用胶片感光，来检测透射线强度，就可以判断工件中是否存在缺陷以及缺陷的位置、大小。

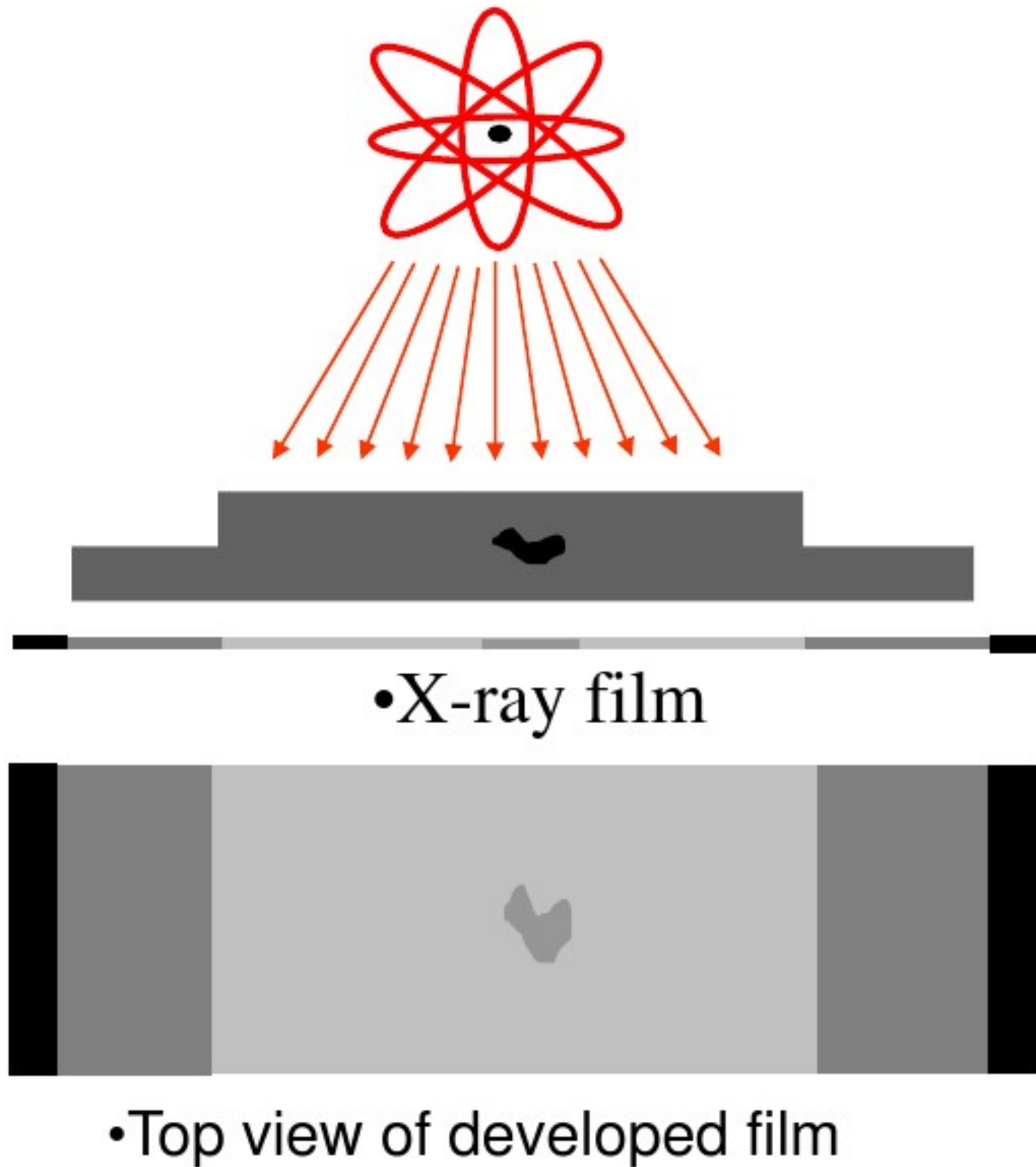


# 射线检测





# 底片成像原理

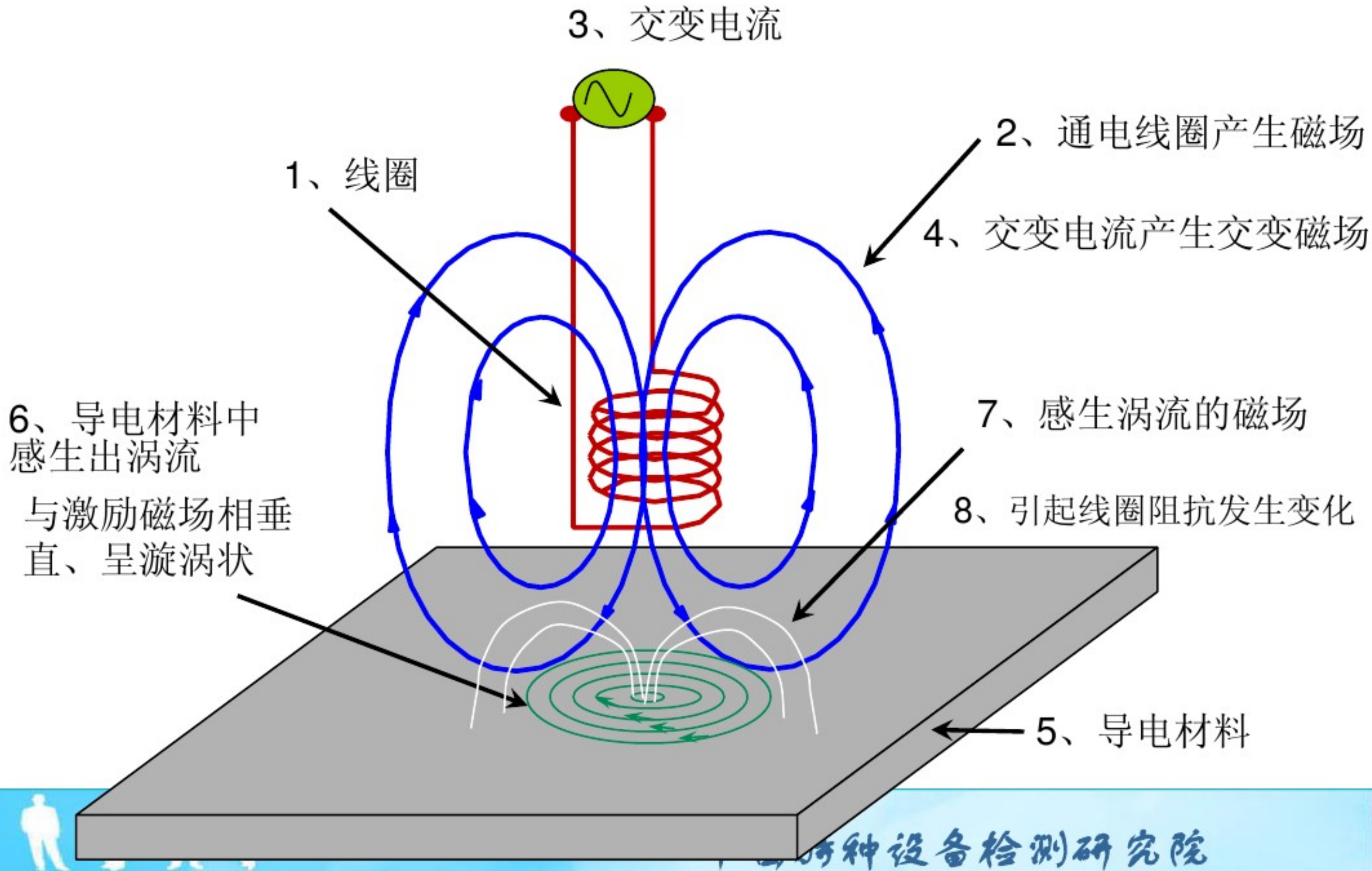


•= less exposure  
•= more exposure





# 涡流检测原理



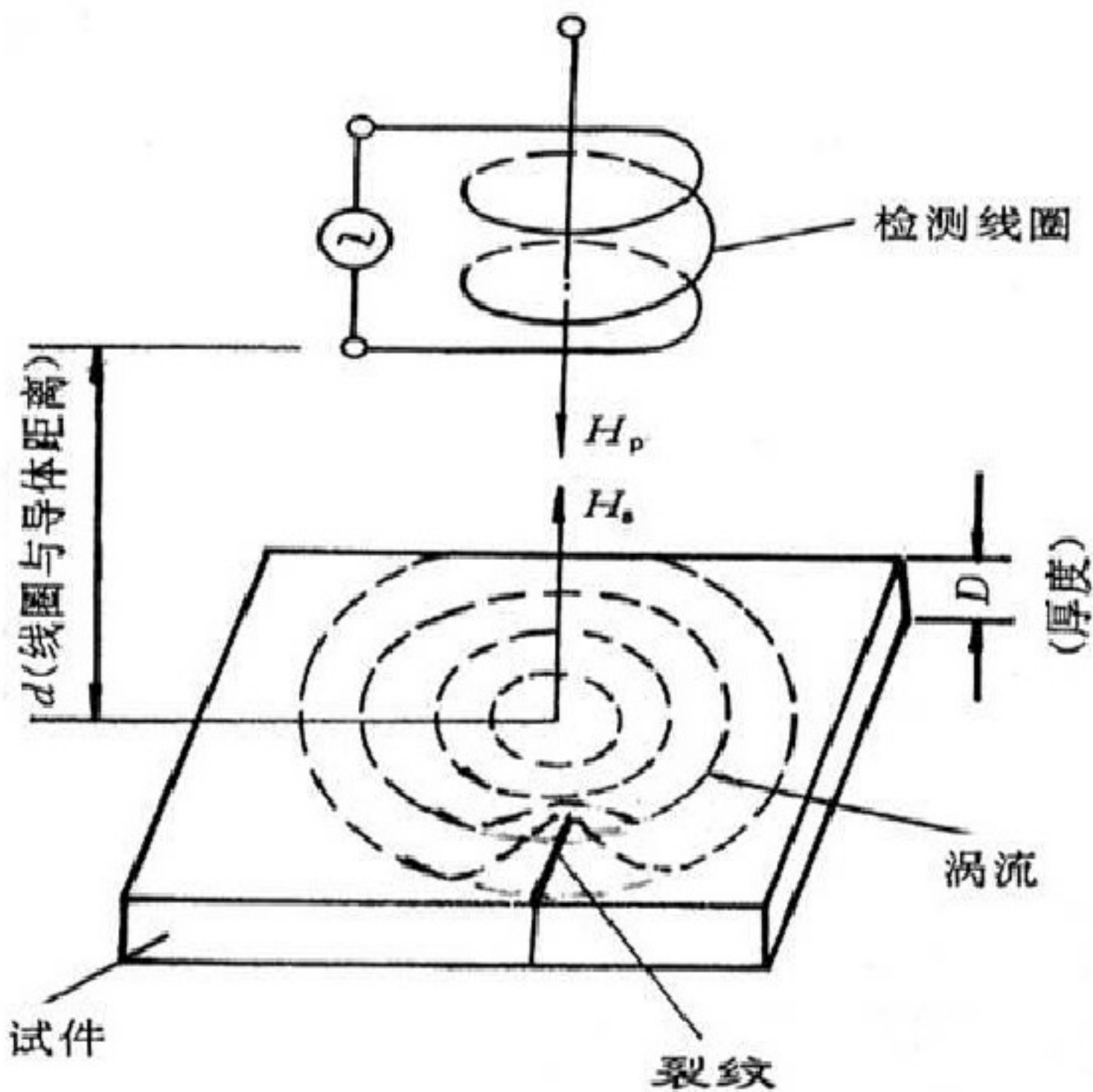
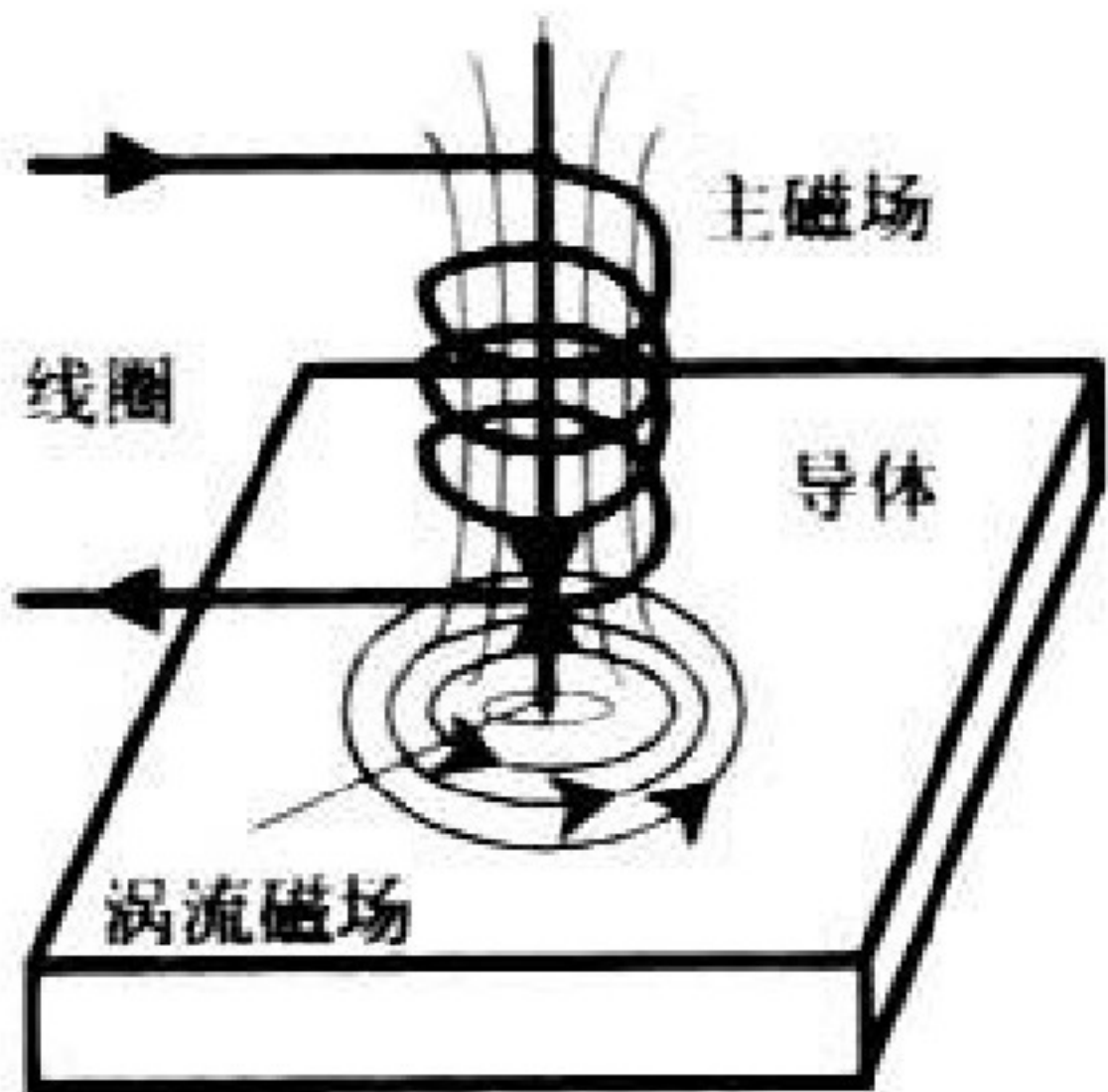


图1 磁场线圈与涡流磁场



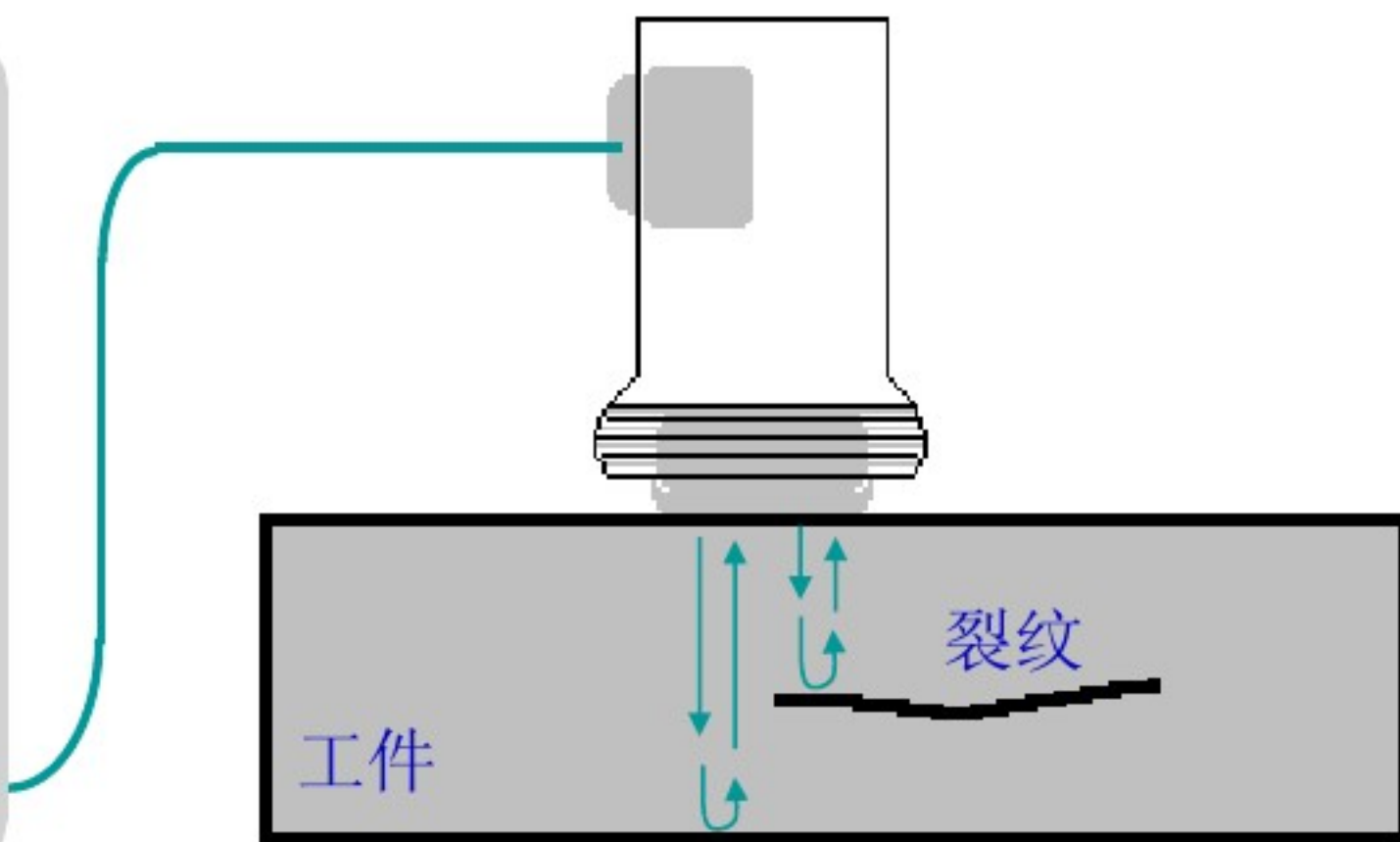
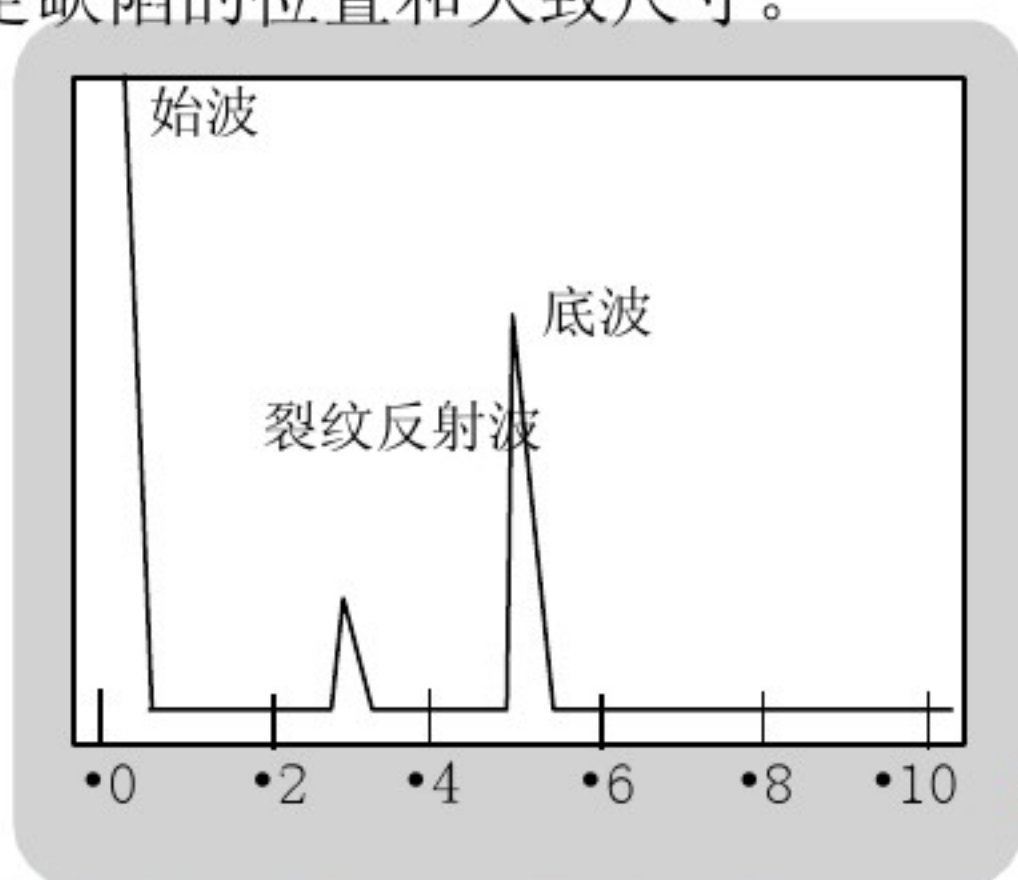


# 涡流检测



# 超声检测

• 超声波是频率高于20千赫的机械波。在超声检测中常用的频率为0.5~10兆赫。这种机械波在材料中能以一定的速度和方向传播，遇到声阻抗不同的异质界面（如缺陷或被测物件的底面等）就会产生反射。这种反射现象可被用来进行超声波检测，最常用的是脉冲回波探伤法，探伤时，脉冲振荡器发出的电压加在探头上（用压电陶瓷或石英晶片制成的探测元件），探头发出的超声波脉冲通过声耦合介质（如机油或水等）进入材料并在其中传播，遇到缺陷后，部分反射能量沿原途径返回探头，探头又将其转变为电脉冲，经仪器放大而显示在示波管的荧光屏上。根据缺陷反射波在荧光屏上的位置和幅度（与参考试块中人工缺陷的反射波幅度作比较），即可测定缺陷的位置和大致尺寸。





(3) 模拟显示  
 特点,保留了传统超声检测仪模拟显示迅速、细腻的优点。

(4) 人工智能仪  
 在这里,人工智能包括专家系统和神经网络。人工智能来取代检测人员对缺陷作出识别目前成熟。

器件,其中又以压电片的使用最为广泛。

### 1. 压电换能器超声探头

压电换能器探头由压电片、楔块、阻尼块,头部分组成,有的尚有匹配线圈用来与压电片成共振,以获得最大输出功率,典型结构如 3.5-15 所示。

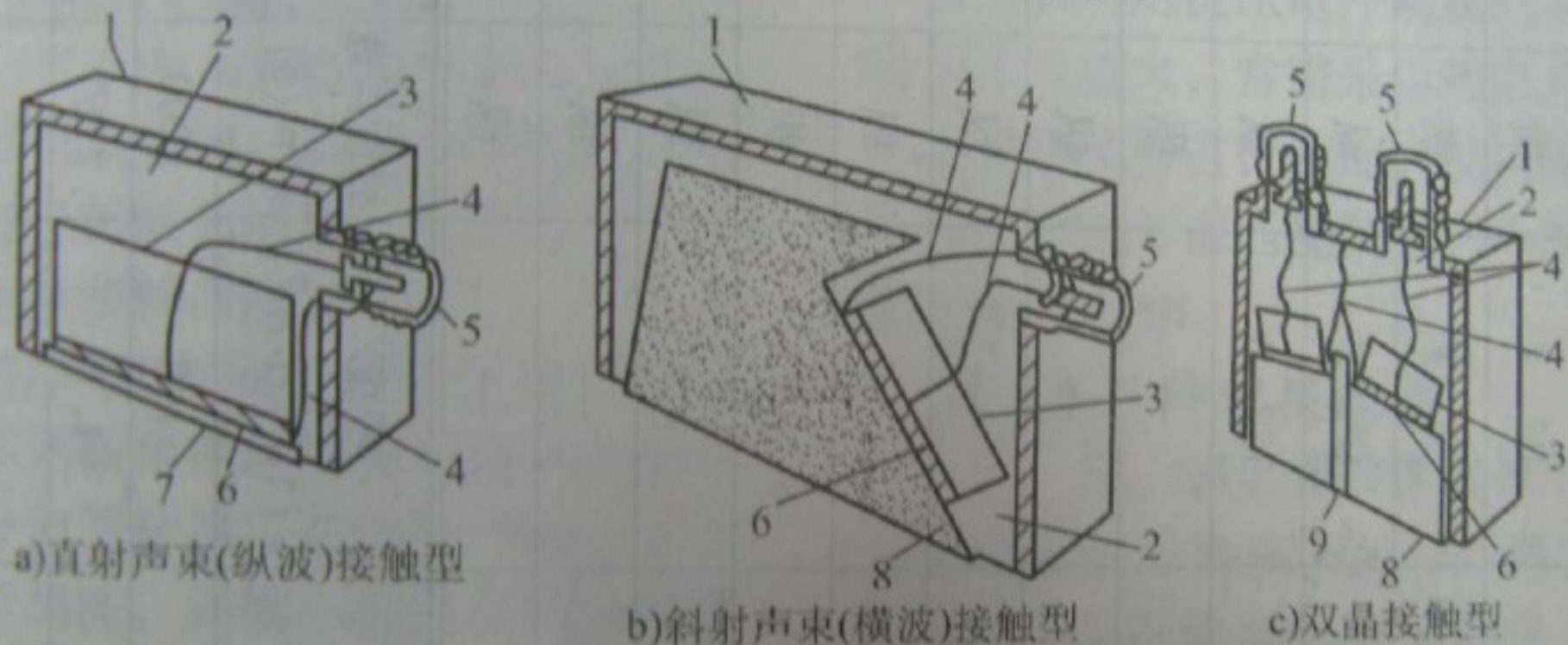


图 3.5-15 接触型压电换能器探头典型结构示意图

1—外壳 2—环氧树脂 3—背衬材料 4—电连接 5—同轴连接器 6—压电元件  
 7—耐磨面板 8—塑料斜楔 9—声屏蔽

(1) 压电片 压电片受电信号激励可产生振发射声波(逆压电效应);当超声波作用于压电片时,晶片受迫振动引起的形变可转换成相应的电信号(正压电效应)。前者为超声波的发射,后者

为接收。为得到较高的效率,应使压电片在其共振频率下工作,此时片的厚度约为  $1/2$  波长。常用压电片材料及主要性能列于表 3.5-8。

表 3.5-8 中的一些术语说明如下:

# 厚壁加带堆焊氢反应器超声检测

- A. 焊接接头内部缺陷的超声检测：
  1. **K1斜探头**
  2. **K2斜探头**
  3. **直探头**
- B. 焊缝及焊缝两侧各250mm范围内，堆焊层内缺陷的超声检测：
  4. **直探头**
  5. **K1纵波**
- C. 焊缝及焊缝两侧各250mm范围内，堆焊层界面缺陷的超声检测：
  6. **K1纵波**
- D. 焊缝及焊缝两侧各250mm范围内，堆焊层未结合缺陷的超声检测：
  7. **直探头**





# 超声探头

## 扫查方向示意图

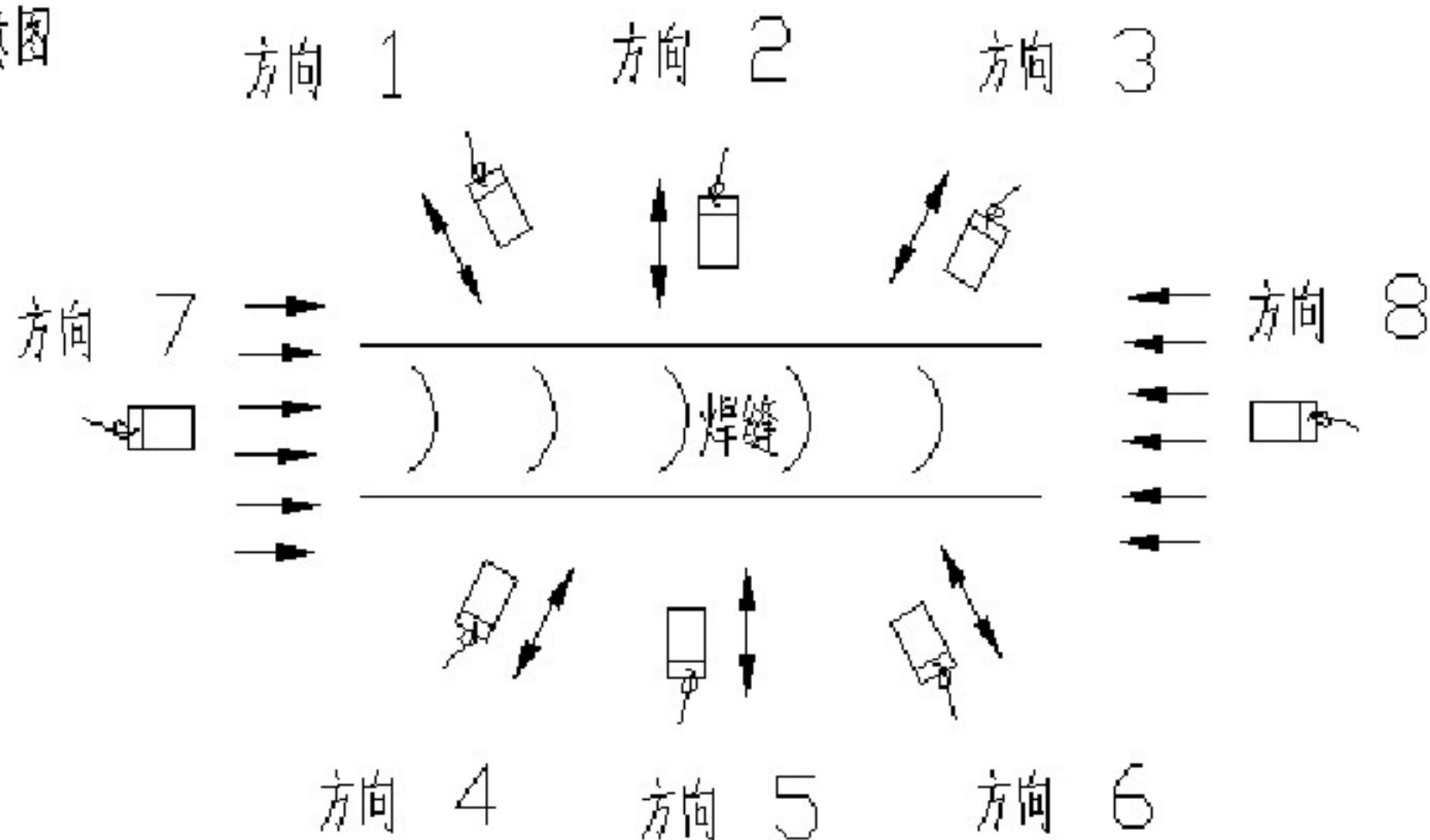


表1 常用无损检测方法的特点

序号	检测方法	优点	局限性
1	射线检测	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.检测结果可用底片直接记录。</li> <li>2.可以获得缺陷的投影图像,缺陷定性定量准确。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.体积型缺陷检出率很高,而面积型缺陷的检出率受到多种因素影响。</li> <li>2.适宜检验厚度较薄的工件而不适宜较厚的工件。</li> <li>3.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。</li> <li>4.有些试件结构和现场条件不适合射线照相。</li> <li>5.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。</li> <li>6.检测成本高。</li> <li>7.射线照相检测速度慢。</li> <li>8.射线对人体有伤害。</li> </ol>
2	超声检测	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.面积型缺陷的检出率较高,而体积型缺陷的检出率较低。</li> <li>2.适宜检验厚度较大的工件,不适宜检验较薄的工件。</li> <li>3.应用范围广,可用于各种试件。</li> <li>4.检测成本低、速度快,仪器体积小、重量轻,现场使用较方便</li> <li>5.对缺陷在工件厚度方向上的定位较准确。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.无法得到缺陷直观图像,定性困难,定量精度不高。</li> <li>2.检测结果无直接见证记录。</li> <li>3.材质、晶粒度对检测有影响。</li> <li>4.工件不规则的外形和一些结构会影响检测。</li> <li>5.探头扫查面的平整度和粗糙度对超声检测有一定影响。</li> </ol>





3	磁粉检测	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.适宜铁磁材料检测,不能用于非铁磁材料检验。</li> <li>2.可以检出表面和近表面缺陷,不能用于检查内部缺陷。</li> <li>3.检测灵敏度很高,可以发现极细小的裂纹以及其他缺陷。</li> <li>4.检测成本低,速度快。</li> </ol>	<p>工件的形状和尺寸有时对检测有影响,因其难以磁化而无法检测。</p>
4	渗透检测	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.渗透检测可以用于除了疏松多孔性材料外任何种类的材料。</li> <li>2.形状复杂的部件也可用渗透检测,并一次操作就可大致做到全面检测。</li> <li>3.同时存在几个方面的缺陷,用一次检测操作就可完成检测。</li> <li>4.不需要大型的设各,可不用水、电。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.试件表面光洁度影响大,检测结果往往容易受操作人员水平的影响。</li> <li>2.可以检出表面开口缺陷,但对埋藏缺陷或闭合型表面缺陷无法检出。</li> <li>3.检测工序多,速度慢。</li> <li>4.检测灵敏度比磁粉检测低。</li> <li>5.材料较贵、成本较高。</li> <li>6.有些材料易燃、有毒。</li> </ol>
5	涡流检测	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.适用于各种导电材质的试件检测,包括各种钢、钛、镍、铝、铜及其合金。</li> <li>2.可以检出表面和近表面缺陷。</li> <li>3.探测结果以电信号输出,容易实现自动化检测。</li> <li>4.由于采用非接触式检测,所以检测速度很快。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.形状复杂的试件很难应用。因此一般只用其检测管材、板材等轧制型材。</li> <li>2.不能显示出缺陷图形,因此无法从显示信号判断出缺陷性质。</li> <li>3.各种干扰检测的因素较多,容易引起杂乱信号。</li> <li>4.由于集肤效应,埋藏较深的缺陷无法检出。</li> <li>5.不能用于不导电的材料。</li> </ol>



表3 制造过程中常用无损检测方法的选择

序号	检测对象	内部缺陷	表面缺陷	
1	原材料检测	1.板材	UT	
		2.锻件和棒材	UT	MT (PT)
		3.管材	UT (RT)	MT (PT)
		4.螺栓	UT	MT (PT)
2	焊接检测	1.坡口部位	UT	PT (MT)
		2.清根部位		PT (MT)
		3.对接焊缝	RT (UT)	MT (PT)
		4.角焊缝和 T 型焊缝	UT (RT)	PT (MT)
		5.工卡具焊疤		MT (PT)
		6.爆炸复合层	UT	
		7.堆焊复合层堆焊前		MT (PT)
		8.堆焊复合层堆焊后	UT	PT
		9.水压试验后		MT





表4 常用无损检测方法和检测对象的适应性

	检测对象	内部缺陷检测方法		表面近表面缺陷检测方法			
		RT	UT	MT	PT	ET	
试件分类	锻件 铸件	× ●	● ○	● ●	● ○	△ △	
	压延件 (管、板、型材)	×	●	●	○	●	
	焊缝	●	●	●	●	×	
缺陷分类	内部缺陷	分层	×	●	—	—	—
		疏松	×	○	—	—	—
		气孔	●	○	—	—	—
		缩孔	●	○	—	—	—
	表面缺陷	未焊透	●	●	—	—	—
		未熔合	△	●	—	—	—
		夹渣	●	○	—	—	—
		裂纹	○	○	—	—	—
	白点	×	○	—	—	—	
	表面裂纹	△	△	●	●	●	
	表面针孔	○	×	△	●	△	
	折叠	—	—	○	○	○	
	断口白点	×	×	●	●	—	

注：● 很适用；○ 适用；△ 有附加条件适用；× 不适用；— 不相关。



# TOFD技术概念

- TOFD技术,即Time of flight diffraction technique, 超声波衍射时差检测技术.
- 概念:  
一种依靠超声波与缺陷端部相互作用发出的衍射波来检出缺陷并对缺陷进行定量的检测技术.
- 发展条件:  
因其原理与传统检测方式有很多不同, 弥补了传统方法的不足之处.





# TOFD技术的发展历史背景

- 1. TOFD即衍射时差法是由上个世纪七十年代由国际原子能中心的哈韦尔（英国原子能权威人士—UKKAEA）提议下发展而来。
- 2. TOFD最初的发展仅仅是作为定量工具，最初的想法是：使用常规技术探测到缺陷后使用TOFD进行精确的定量和监测在线设备裂纹的扩展（例如检测压力容器）。
- 3. 很多年以来TOFD一直在实验室里，各国做过大量实验直到八十年代才为业界所认同；在这些实验中，用事实证明了TOFD在可靠性和精度方面都是非常好的技术。
- 4. 利用TOFD技术探伤沿焊缝进行扫查基本能发现焊缝所有缺陷，收集扫查数据组成B扫或D扫图像比单纯看A扫更容易判断缺陷的尺寸和性质。





# TOFD技术的优势

- 1) TOFD技术的可靠性好。由于其主要是利用衍射波进行检测，而衍射信号不受声束影响，任何方向的缺陷都能有效的发现，使该技术具有很高的缺陷检出率。国外研究机构的缺陷检出率的试验得出的评价是：手工UT，50-70%；TOFD，70-90%；机械扫查UT+TOFD，80-95%。由此可见，TOFD检测技术比常规手工UT的检测可靠性要高得多。
- 2) TOFD技术的定量精度高。采用衍射时差技术对缺陷定量，精度远远高于常规手工超声波检测。一般认为，对线性缺陷或面积型缺陷，TOFD定量误差小于1mm。对裂纹和未熔合缺陷高度测量误差通常只有零点几毫米。





# TOFD技术的优势

- 3) TOFD检测简单快捷，最常用的非平行扫查只需一人即可以操作，探头只需沿焊缝两侧移动即可，不需做锯齿扫查，检测效率高，操作成本低
- 4) TOFD检测系统配有自动或半自动扫查装置，能够确定缺陷与探头的相对位置，信号通过处理可以转换为TOFD图像。图像的信息量显示比A扫描显示大得多，在A型显示中，屏幕只能显示一条A扫信号，而TOFD图像显示的是一条焊缝检测的大量A扫信号的集合。与A型信号的波形显示相比，包含丰富信息的TOFD图像更有利于缺陷的识别和分析。



# TOFD技术的优势

- 5) 当今使用的TOFD检测系统都是高性能数字化仪器，完全克服了模拟超声探伤仪和简单数字超声波探伤仪记录信号能力差的特点，不仅能全过程记录信号，长久保存数据，而且能够高速进行大批量信号处理。
- 6) TOFD技术除了用于检测外，还可用于缺陷扩展的监控，是有效且能精确测量出裂纹增长的方法之一。
- 7) TOFD能对缺陷深度位置进行精确定位，对缺陷自身高度进行定量。
- 8) 由于缺陷衍射信号与角度无关，检测可靠性和精度不受角度影响。
- 9) 根据衍射信号传播时差确定衍射点位置，缺陷定量定位不依靠信号振幅。





# TOFD技术的优势

## • TOFD技术与射线技术比较的优势

- 1) TOFD检测结果与射线检测结果都是以二维图像显示，不同的是TOFD能对缺陷的深度和自身高度进行精确测量，而射线只能得到缺陷的俯视图信息，对于判断缺陷危害性程度的重要指标，厚度方向的长度，射线是很困难的
- 2) TOFD技术可探测的厚度大，对厚板探伤的效果比较明显，但射线对厚板的穿透能力非常有限
- 3) TOFD技术检测缺陷的能力非常强，特殊的探伤方式使其具有相当高的检出率，约90%左右，而相比之下，射线检测的检出率稍低，大约75%，在实际工作中，我们也发现有TOFD检测出来的缺陷，X射线未能发现的情况，这给质量控制带来了极大的隐患。





# TOFD技术的优势

## • TOFD技术与射线技术比较的优势

- 4) TOFD技术所采集的是数据信息，能够进行多方位分析，甚至可以对缺陷进行立体复原。这是因为TOFD技术是将扫查中所有的原始信号都进行了保存，在脱机分析中我们可以利用计算机对这些原始信号进行各种各样的分析，以得出更加精确的缺陷判断结果；而射线检测只能将射线底片置于观片灯前进行分析，不可以再进一步利用软件对缺陷进行更加全面的分析。
- 5) TOFD检测操作简单，扫查速度快，检测效率高；而射线检测过程繁琐，耗时长，效率低下。





# TOFD技术的优势

## •TOFD技术与射线技术比较的优势

- 6) TOFD技术是利用超声波进行探伤，对检测时的工作环境没有特殊的要求。超声波检测是一种环保的检测方式，对使用人员没有任何伤害，所以在工作场合不需要特殊的安全保护措施；而射线检测因其放射的危害性受到国家政策的严格控制，现场只能单工种工作，降低了检测工作效率，阻碍了整个工程进度。
- 7) TOFD检测成本低，重复成本少；而射线检测，建造暗室需要较高的投入，平时工作中的耗材成本重复发生，综合成本相对较高



# TOFD技术的国内发展情况

- 1. 20世纪90年代，我国开始引进TOFD检测技术，最早应用的单位有核动力研究所和中国一重。
- 2. 2000年左右在西气东输中进行了大量应用。
- 3. 2004年一重与中国特检院合作编订国内第一个TOFD企业标准，并对神华煤液化工程中世界上最大的加氢反应器（壁厚340mm）进行TOFD检测。
- 4. 2005年，国内研发出第一台TOFD专用检测设备。
- 5. 2007年通过全国特种设备无损考委会培训和考核的共60人。
- 6. 2008年JB/T 4730—2005中TOFD检测标准出台。

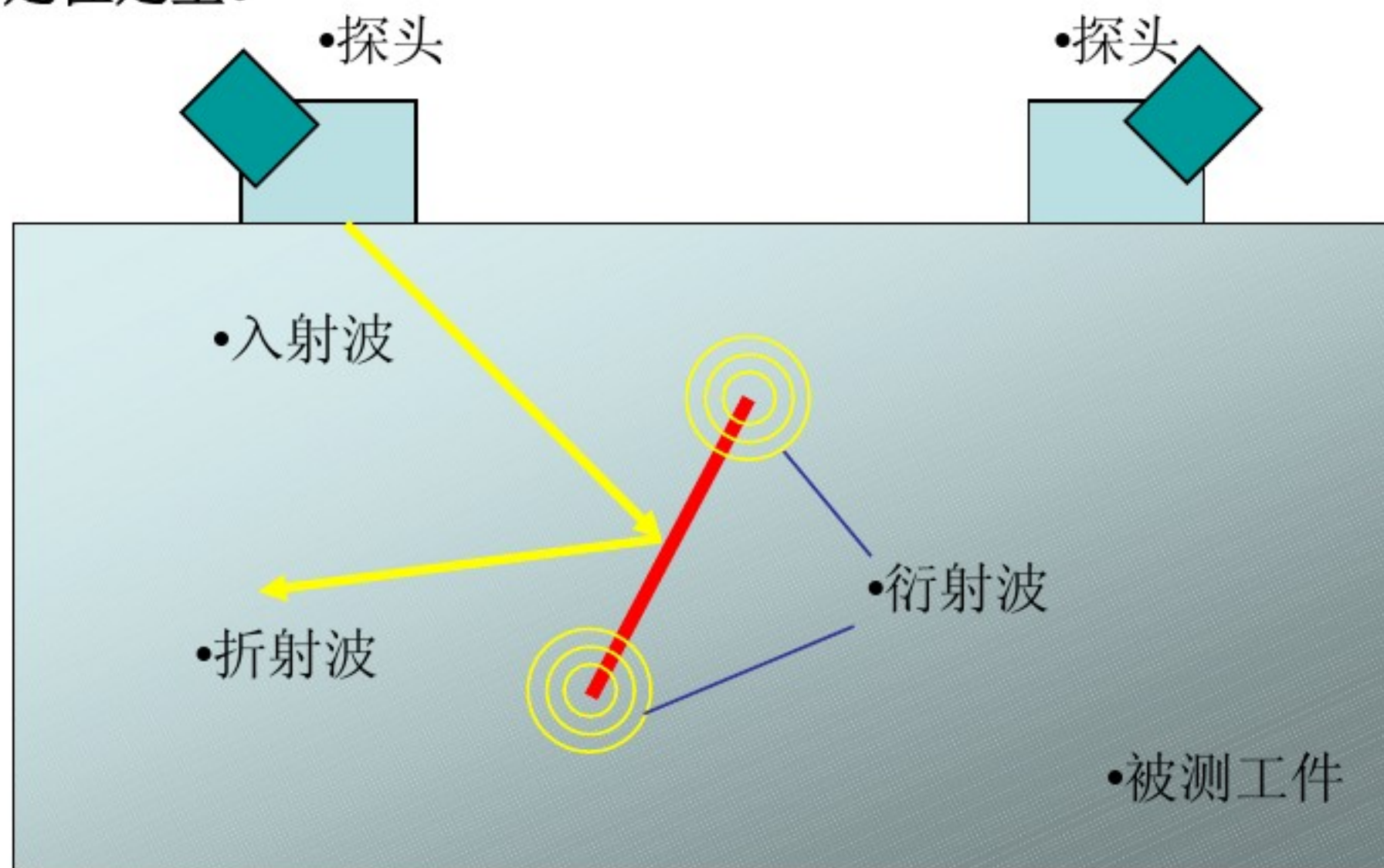




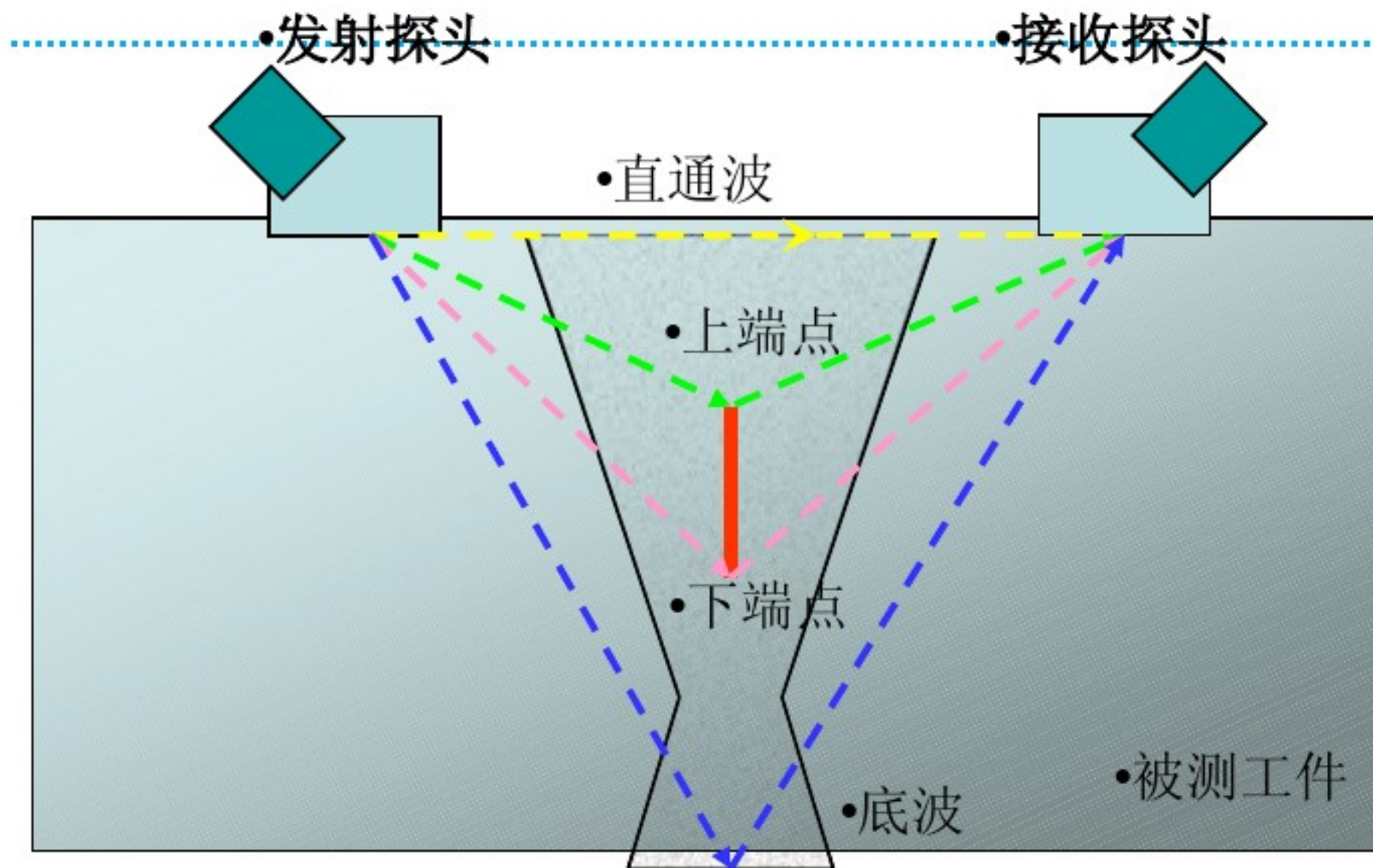
# TOFD原理

## 1. 波形衍射

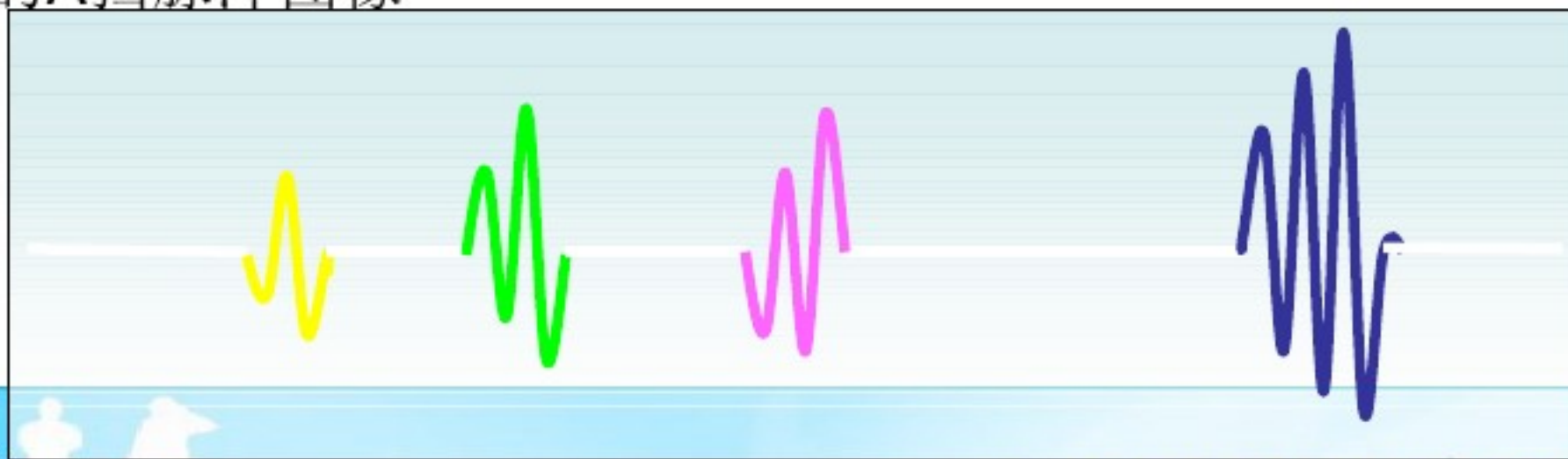
- 当超声波作用于一条长裂纹缺陷时，在裂纹缝隙产生衍射，
- 另外在裂纹表面还会产生反射。
- TOFD**就是利用声束在裂纹两个端点或端角产生的衍射波来
- 对缺陷进行定位定量。



# •TOFD扫查焊缝



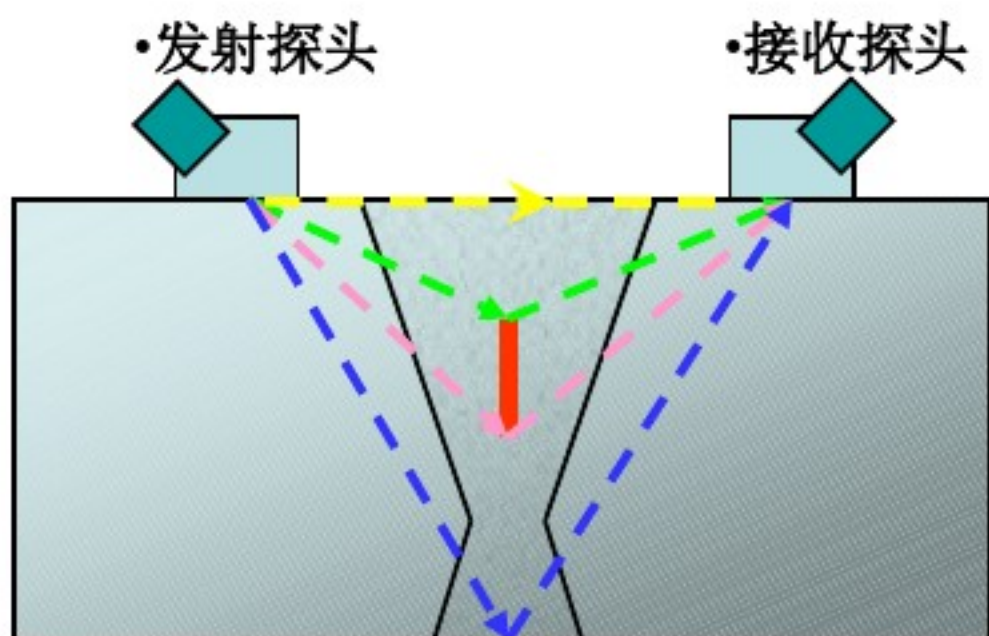
## •形成的A扫脉冲图像



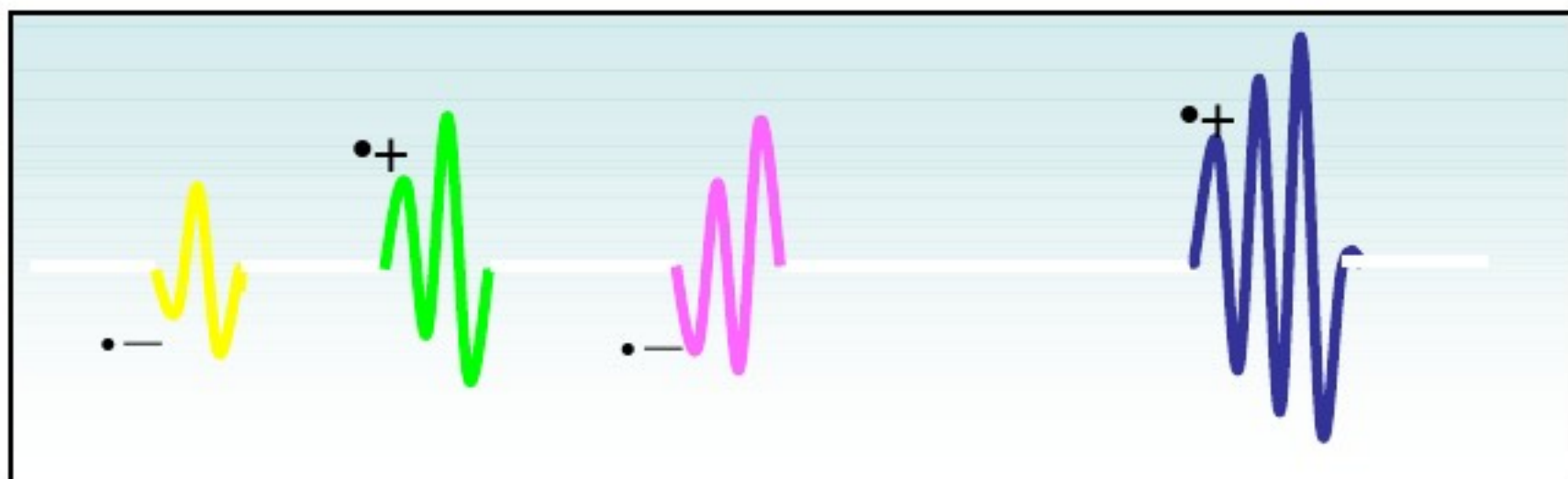


### •3. 波形的相位关系

- 当超声波束由一个高阻抗的介质传播到一个低阻抗介质中时，
- 在界面经过反射后波束相位发生改变，如果波束在遇到界面前
- 是负向周期则在界面反射后转变为正向周期。



- 如下图，波束经过上端点和底面时，在异质界面反射和相位发生转变，因此波形相位相似。而波束经过下端点时相当于波束在底缺陷底部环绕，相位不发生转变与直通波相位相似。



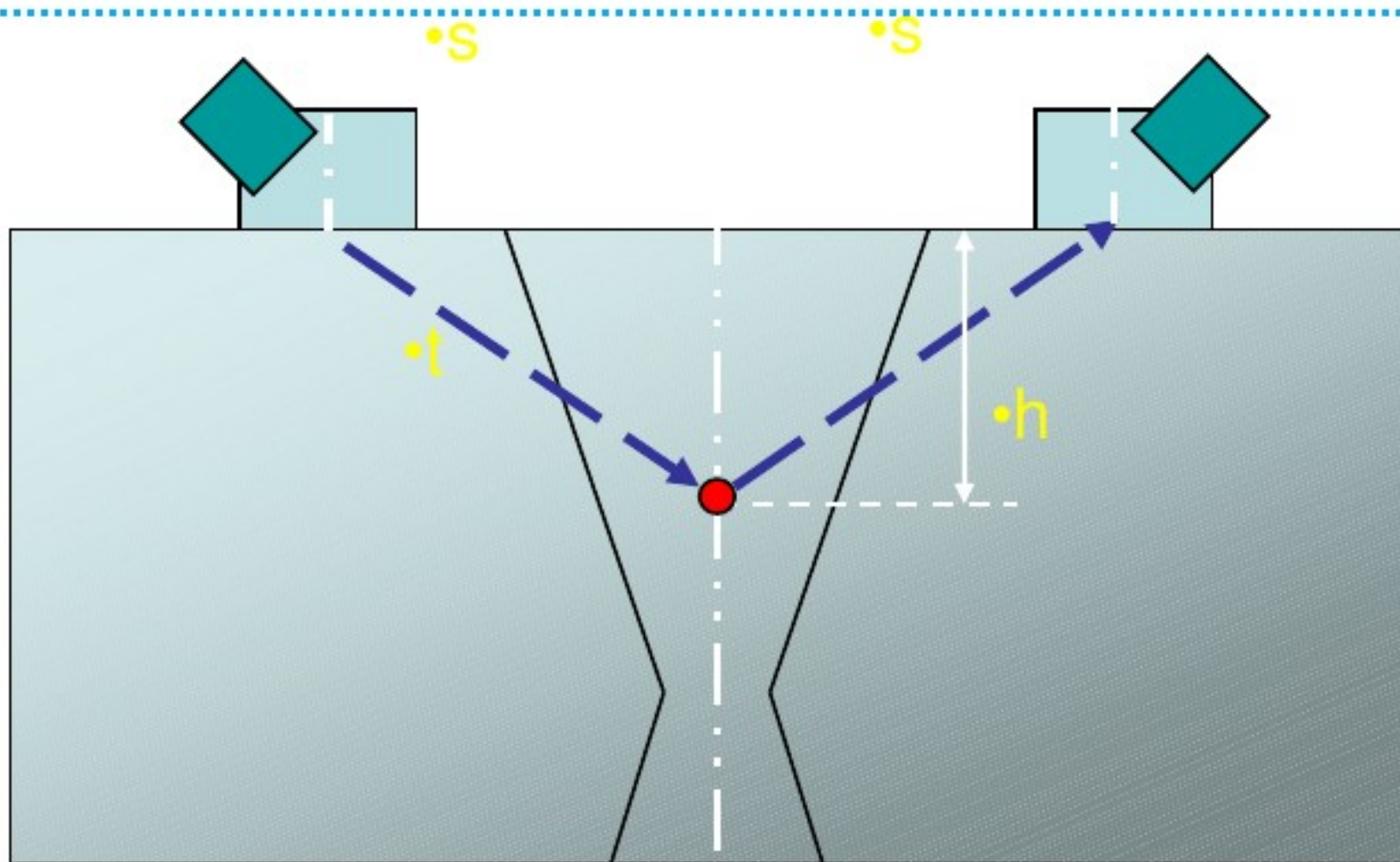
•根据理论和实验证明，如果两个衍射信号的相位相反，则在两个信号间一定存在一个连续不间断的缺陷。因此识别相位变化对于评定缺陷尺寸非常重要。利用上、下端点的时间差来计算缺陷深度和自身高度是TOFD探伤最重要的部分

- \*注在一些特殊情况下，例如气孔，小夹渣之类的缺陷
- 由于几何尺寸太小不会产生两个分离的端点信号





#### •4. 深度计算公式



- 如上图所示，两探头的信号是对称的，则
- 在两探头之间的信号时间  $t$  可以用下式计算

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{(s^2 + h^2)}}{c}$$

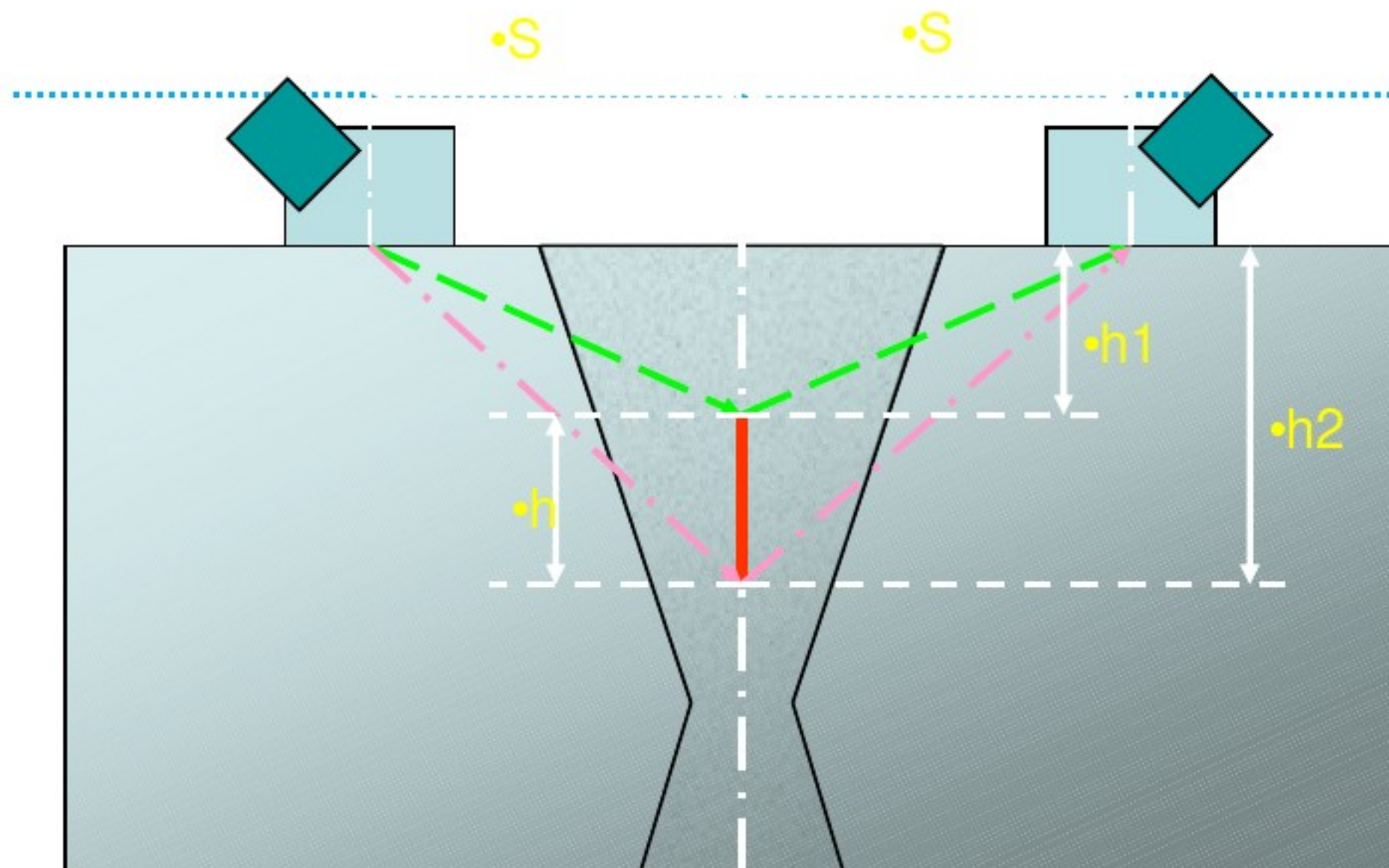
- $s$  = 两探头中心距的一半
- $h$  = 反射信号的深度
- $c$  = 声速

- 由于时间可以由仪器自行测出，
- 因此由左式可计算出缺陷深度

$$h = \sqrt{\left(\frac{c \cdot t}{2}\right)^2 - s^2}$$



## •5.缺陷自身高度计算



- 根据刚才的公式，计算出缺陷的上端点深度和下端点深度
- 两者之差即为缺陷自身高度，如下式

$$\bullet h = h_1 - h_2$$

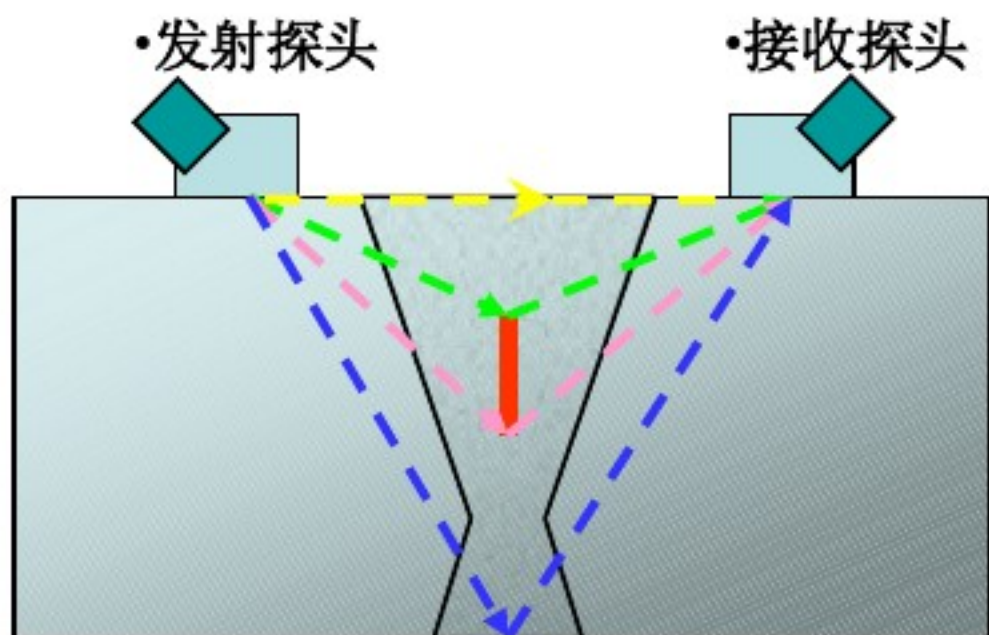
•h1=上端点深度

h2=下端点深度



# •TOFD扫描成像

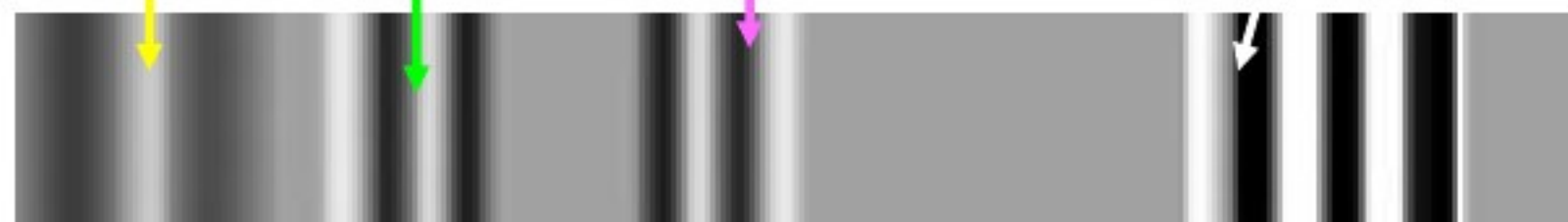
•TOFD的成像并非缺陷的实际图像显示，而是通过扫描时探头所接收到的A扫图形转换为黑白两色的灰度图，为了能有更清晰的图像因此要求至少256级的灰度分辨率



•A扫图像



•D扫图像



•直通波

•上端点

•下端点

•底波

•利用灰阶度来表示振幅，当回波处于0位时用中间灰色表示，当波形向正半周变化时向100%灰度（白色）渐变，当波形向负半周变化时向-100%灰度（黑色）渐变

•+100%

•0%

•-100%

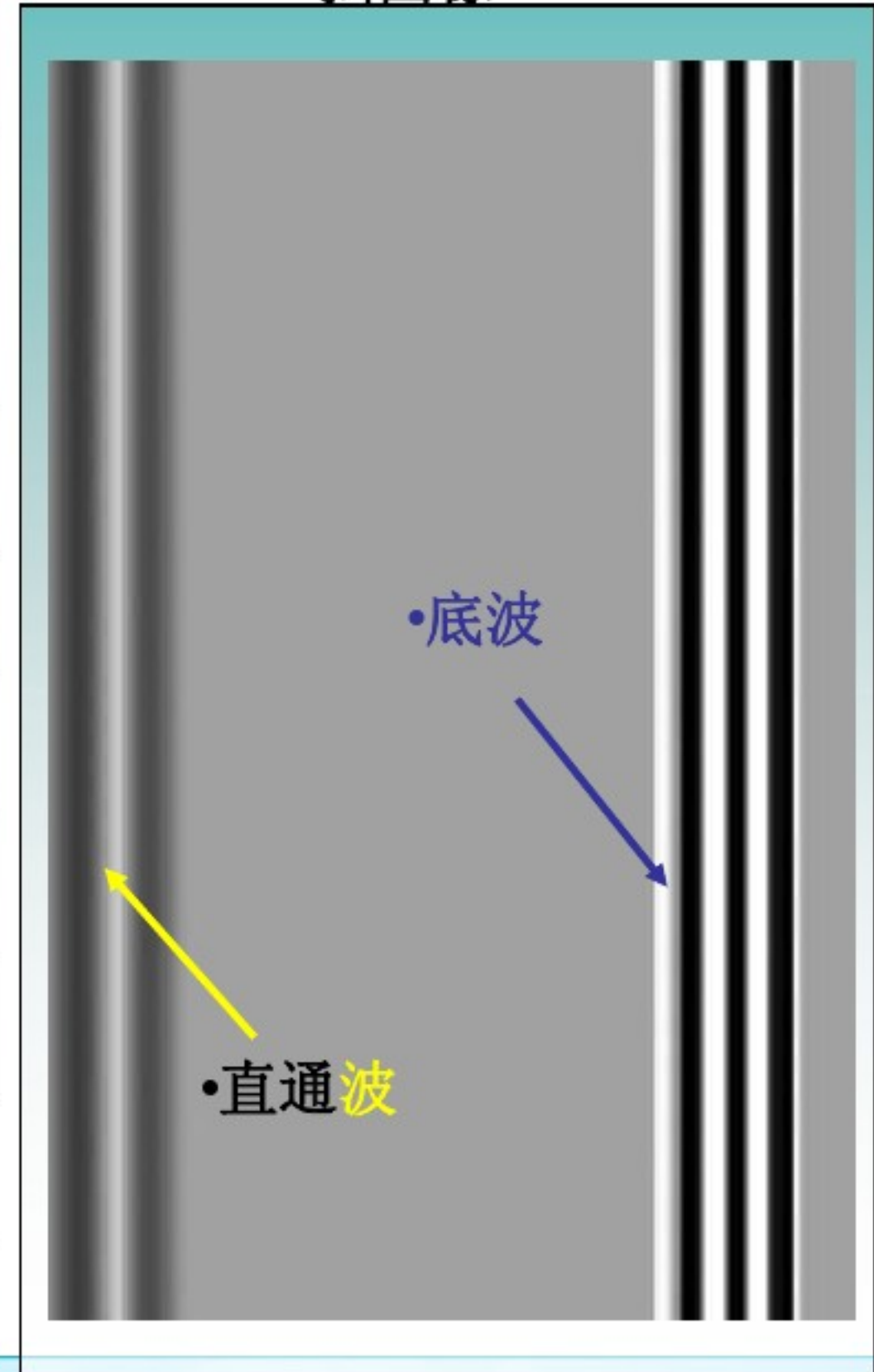
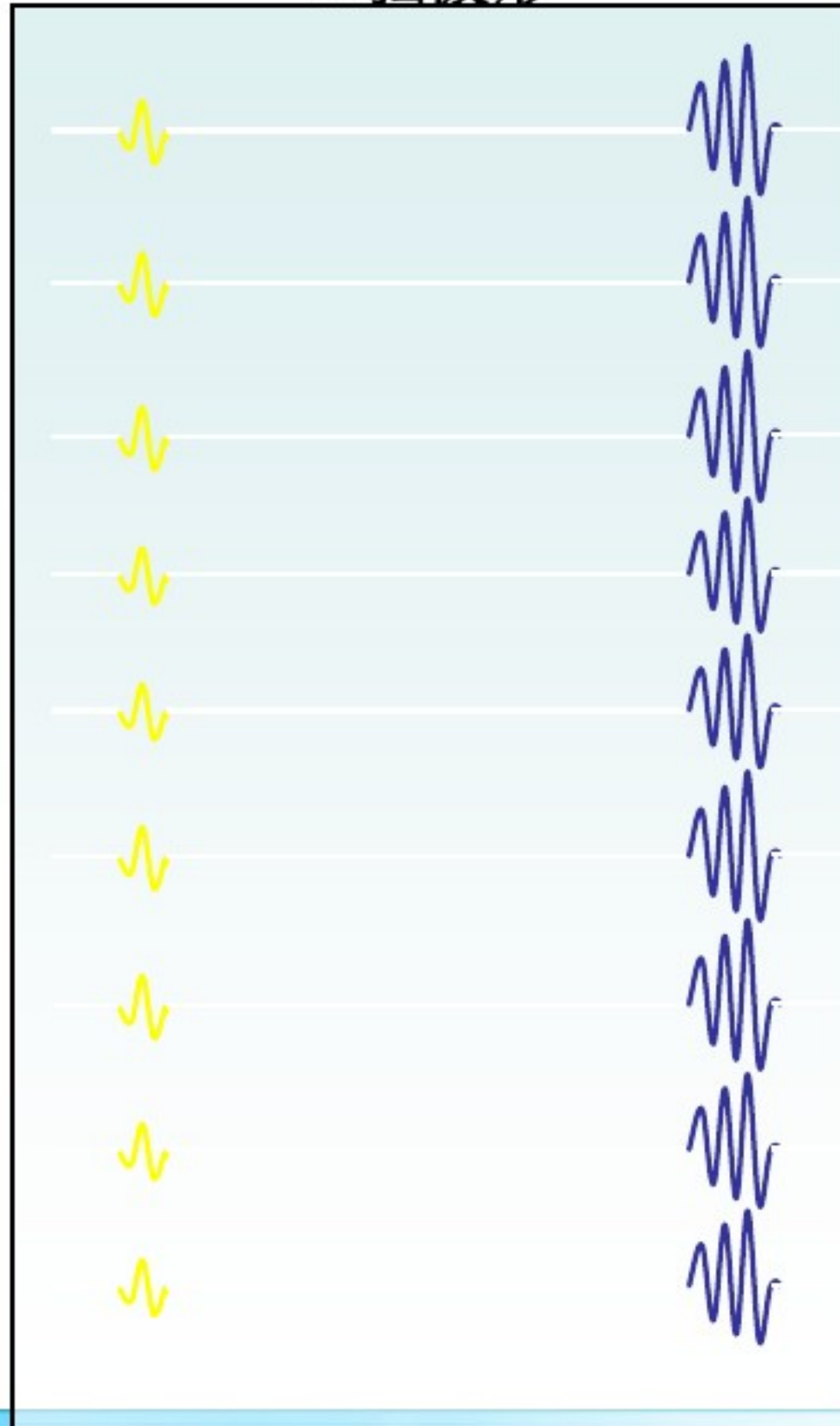
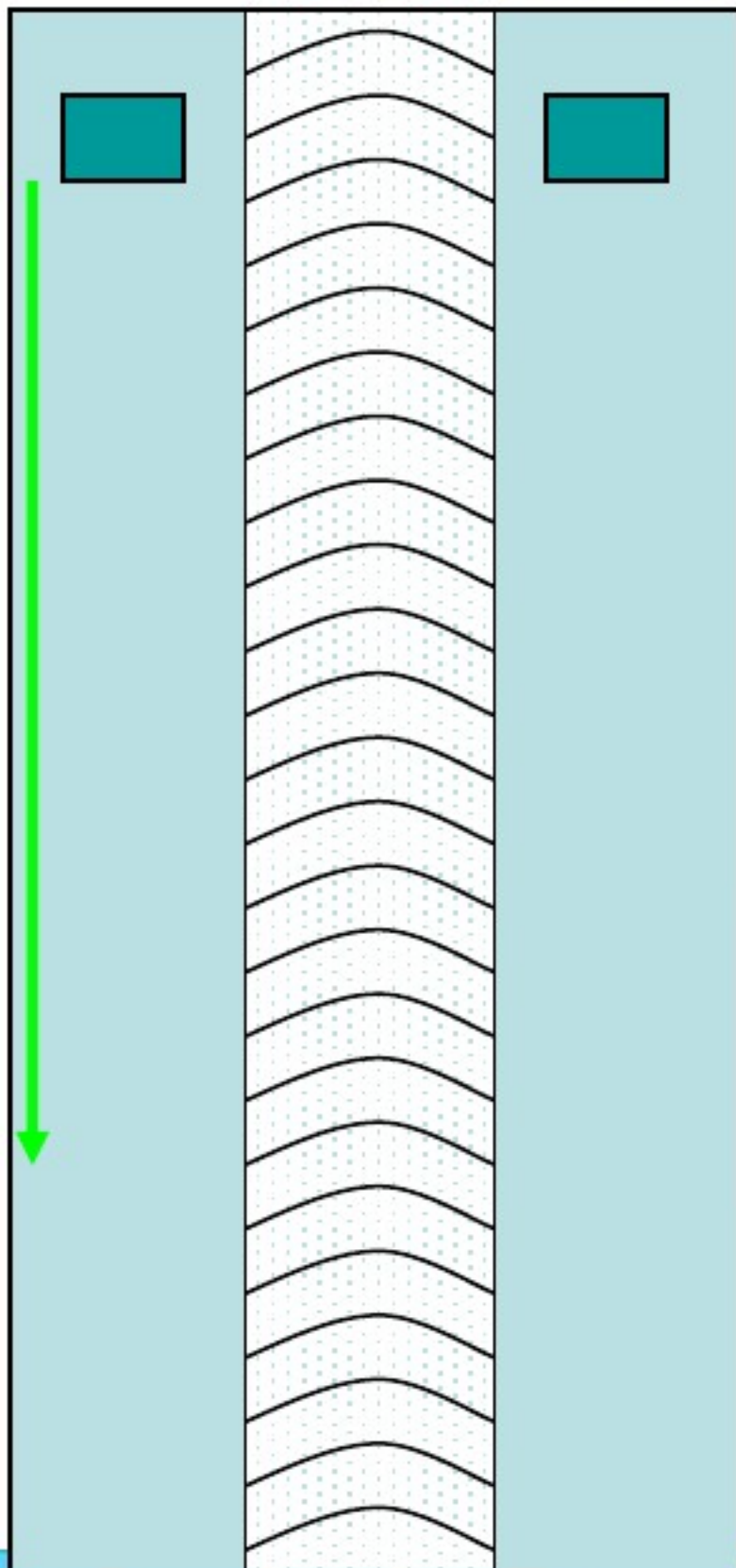




•连续扫查时得到的扫描图像

•A扫波形

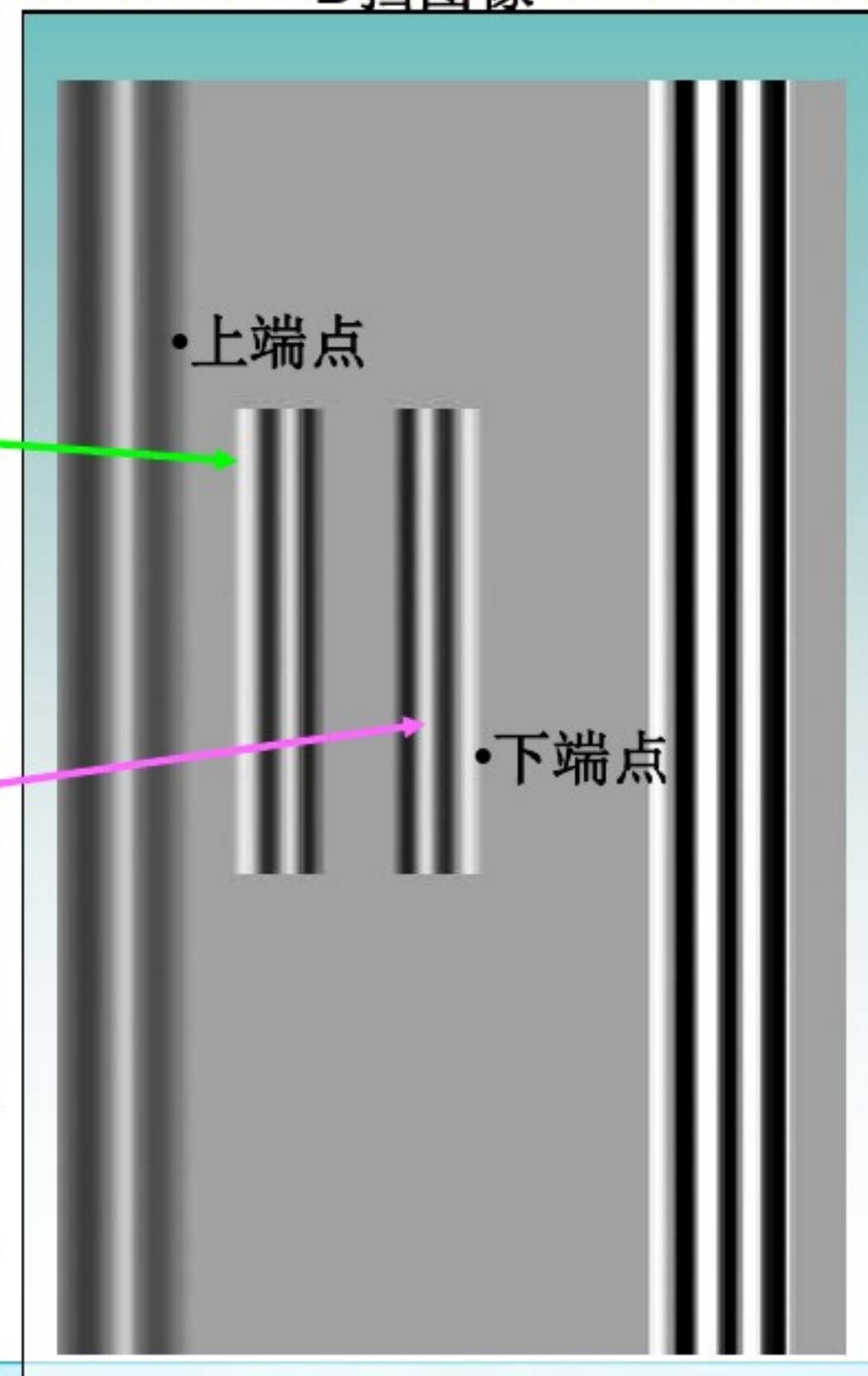
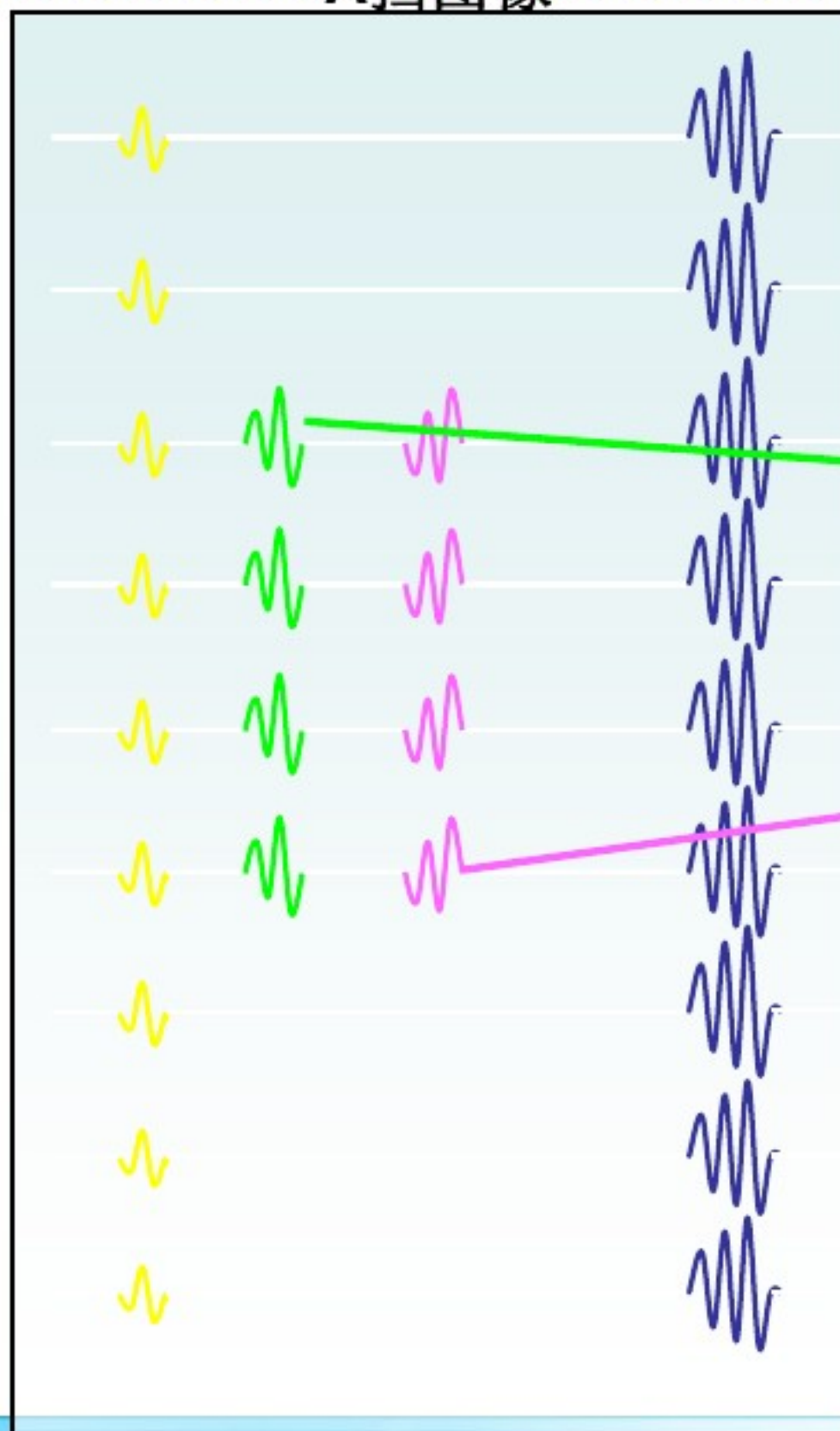
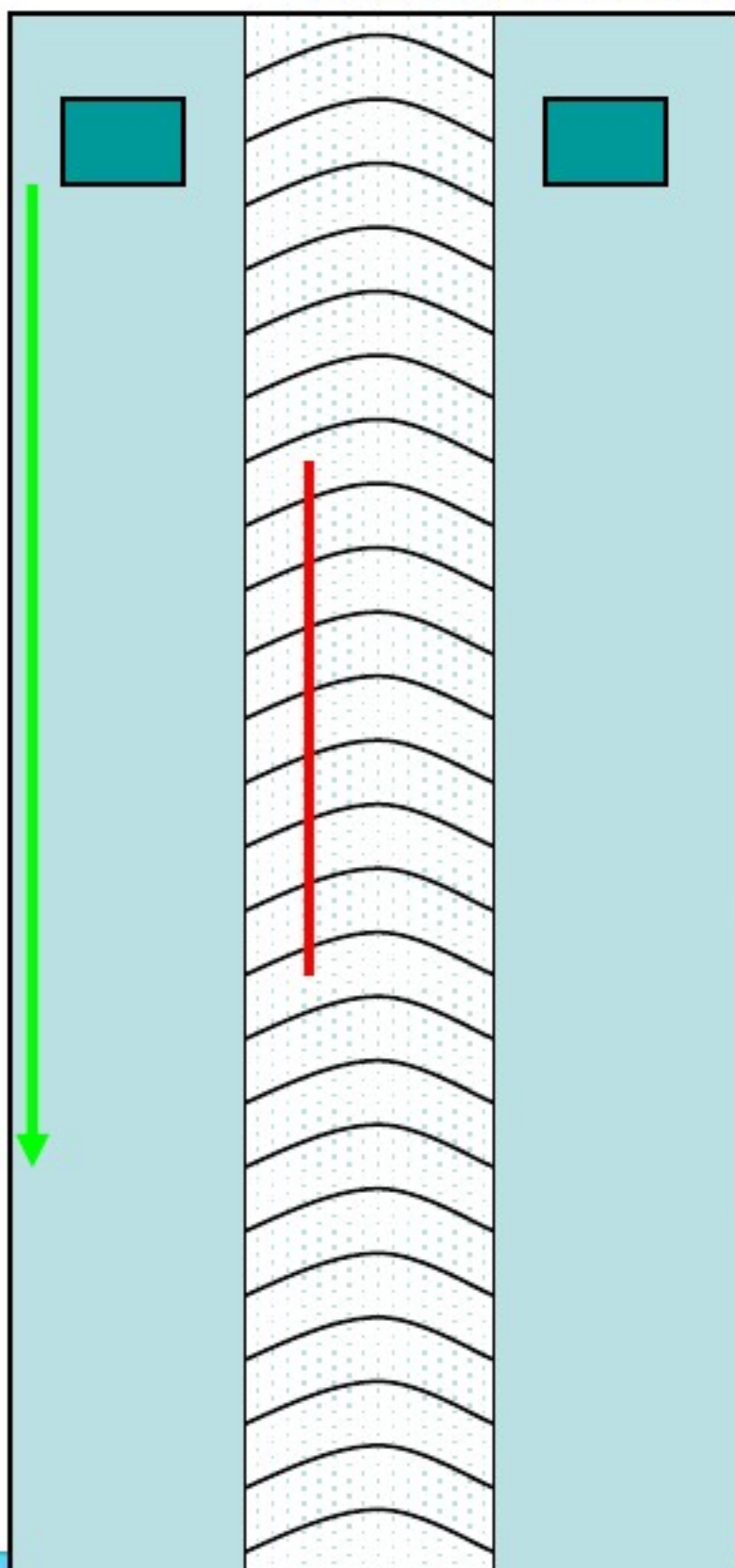
•D扫图像



•有缺陷时扫描图像

•A扫图像

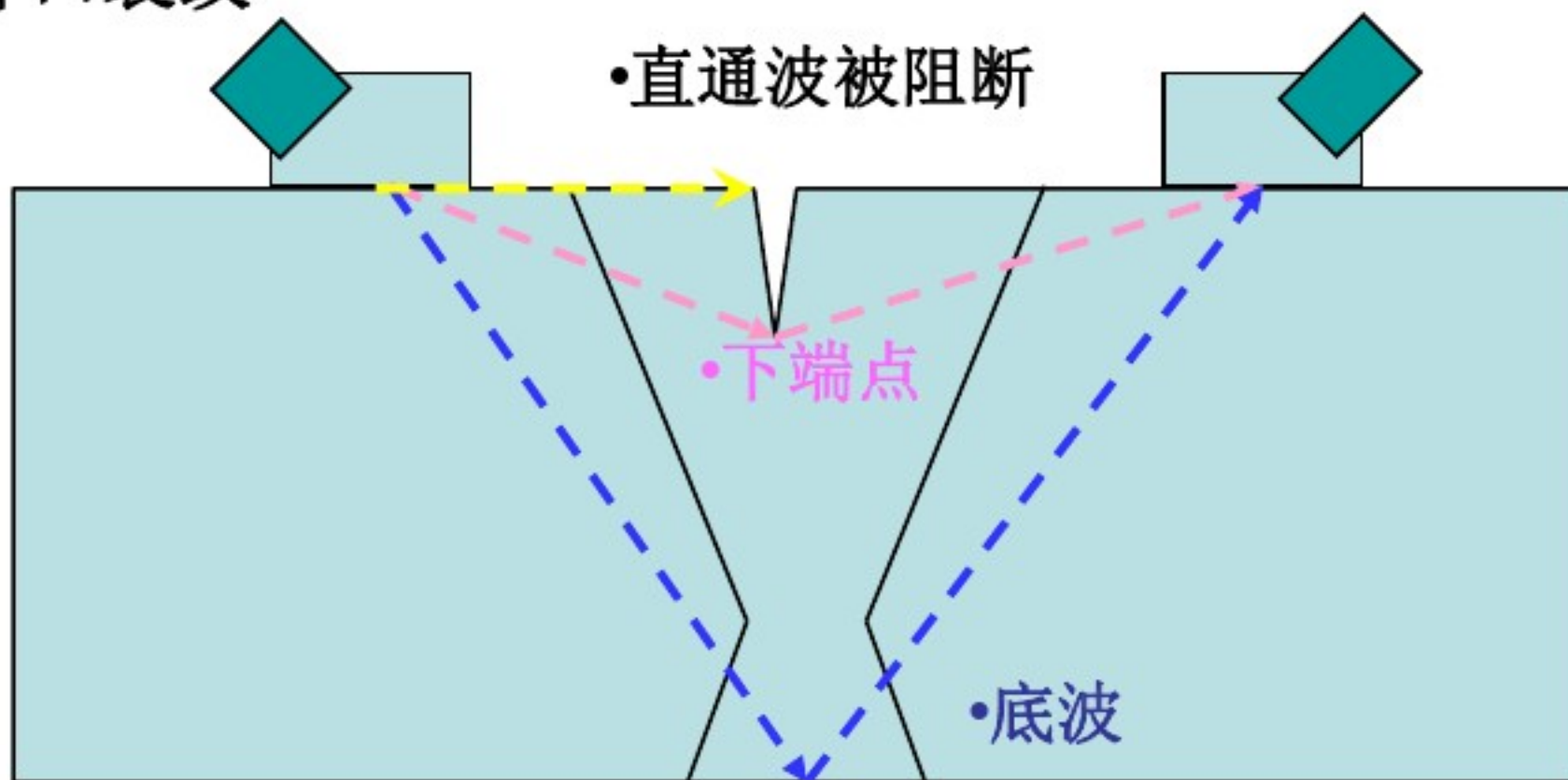
•D扫图像



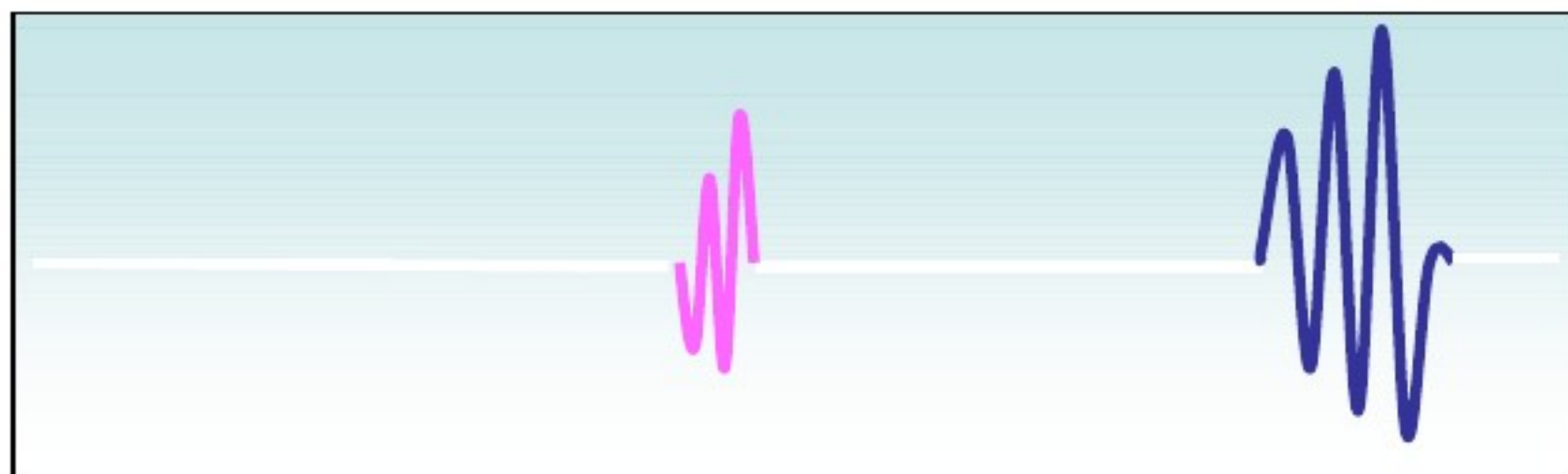


# •特殊缺陷的特征

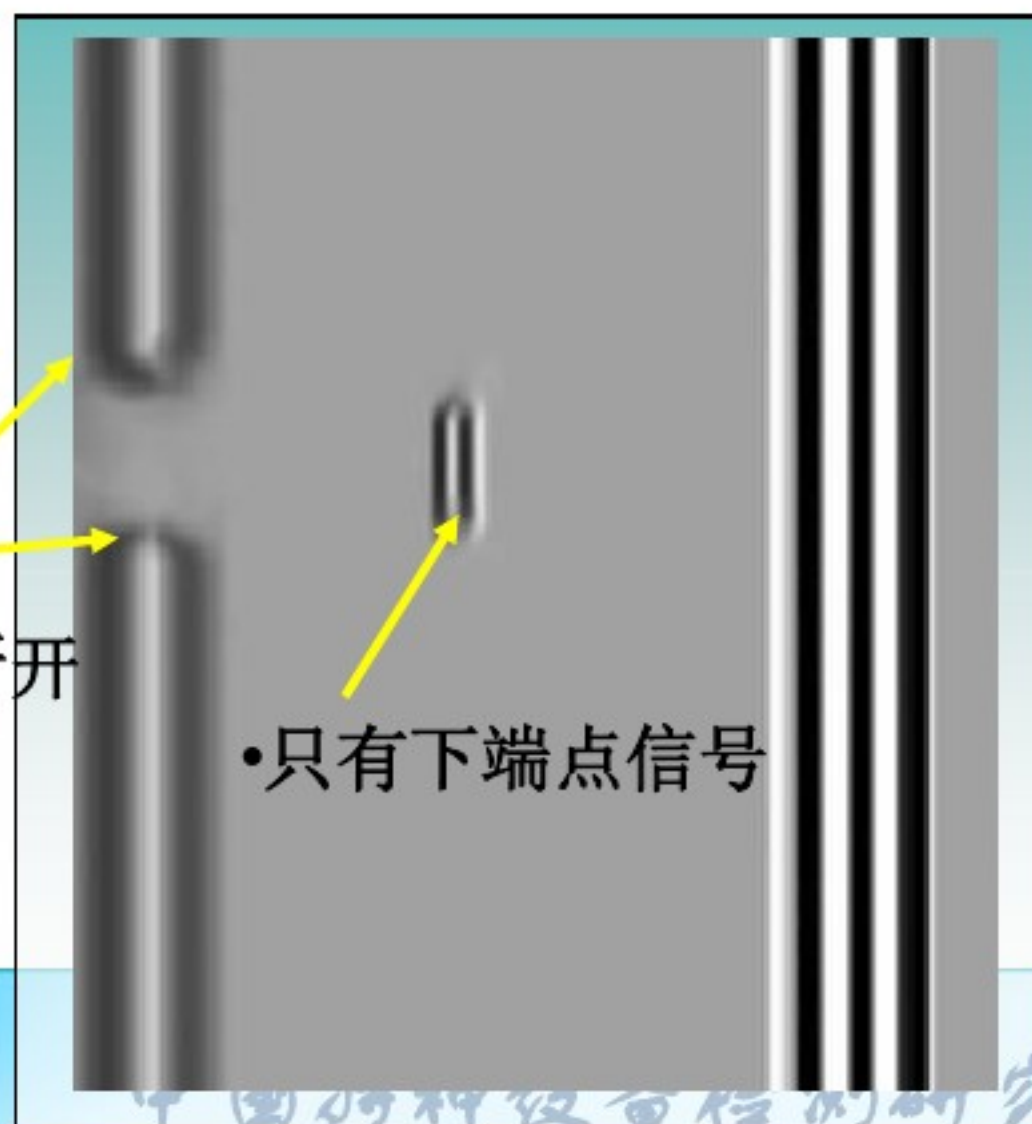
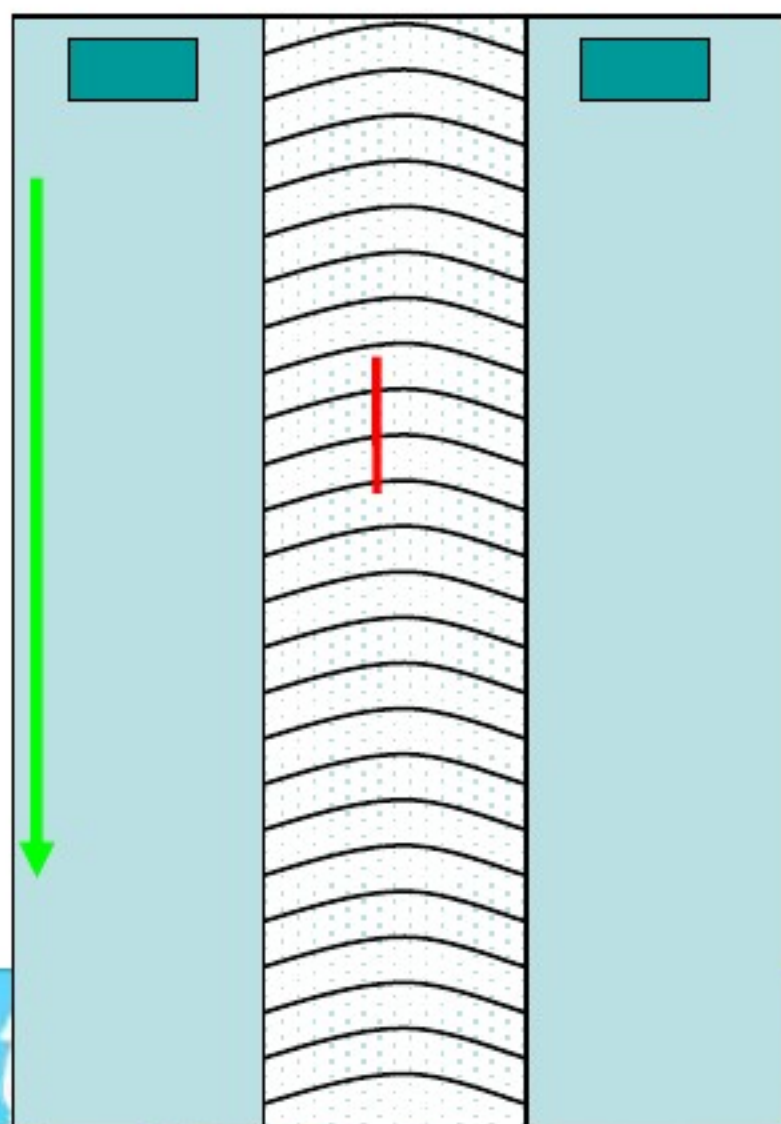
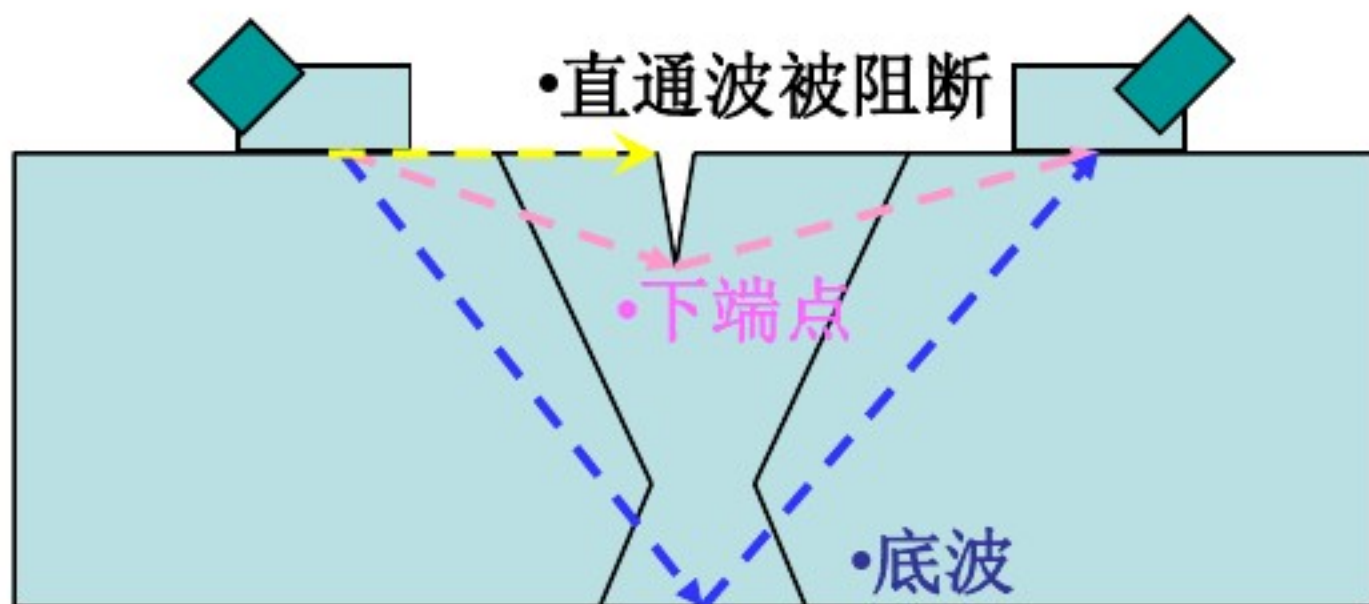
## •1.上表面开口裂纹



- 没有直通波
- 和上端点的
- 信号

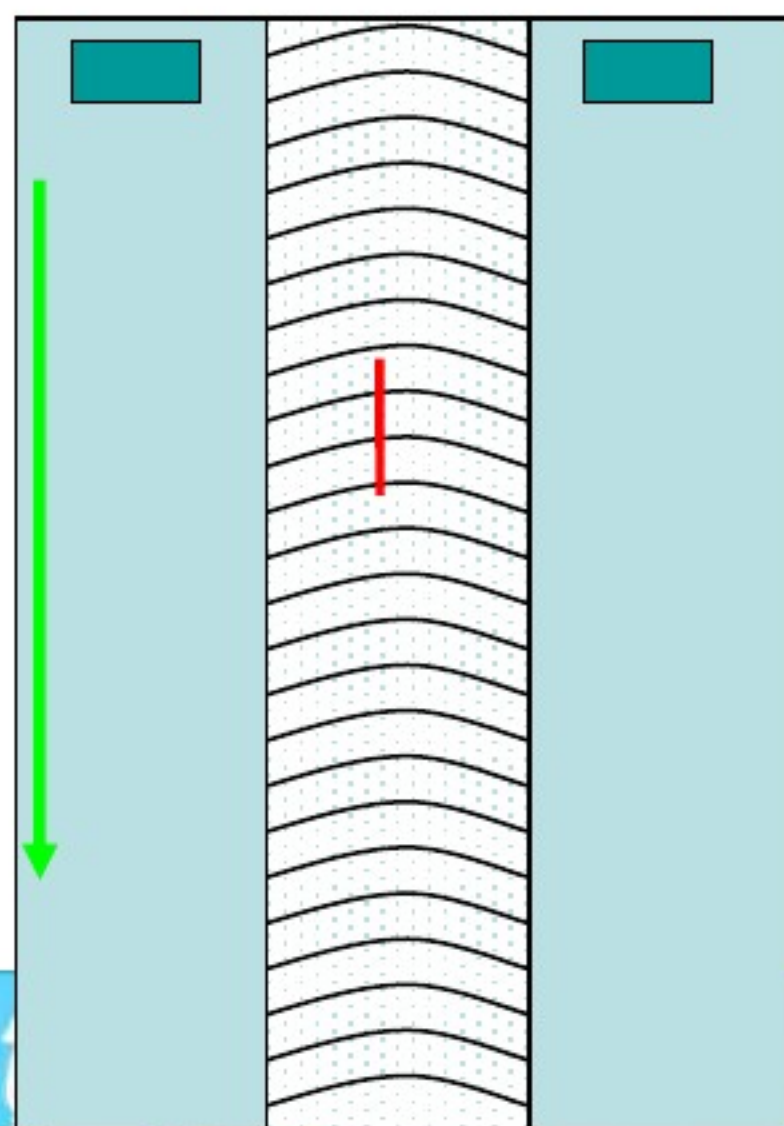
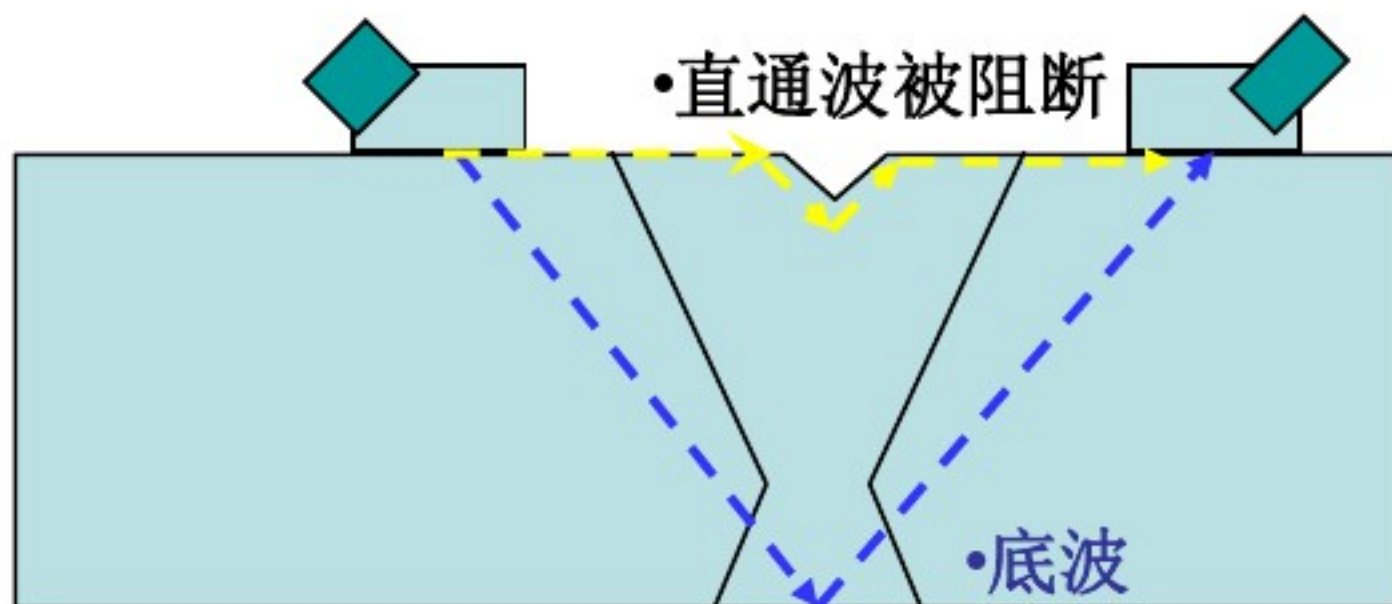


•当缺陷沿扫查方向有一定长度时，连续扫查得下如下D扫图像

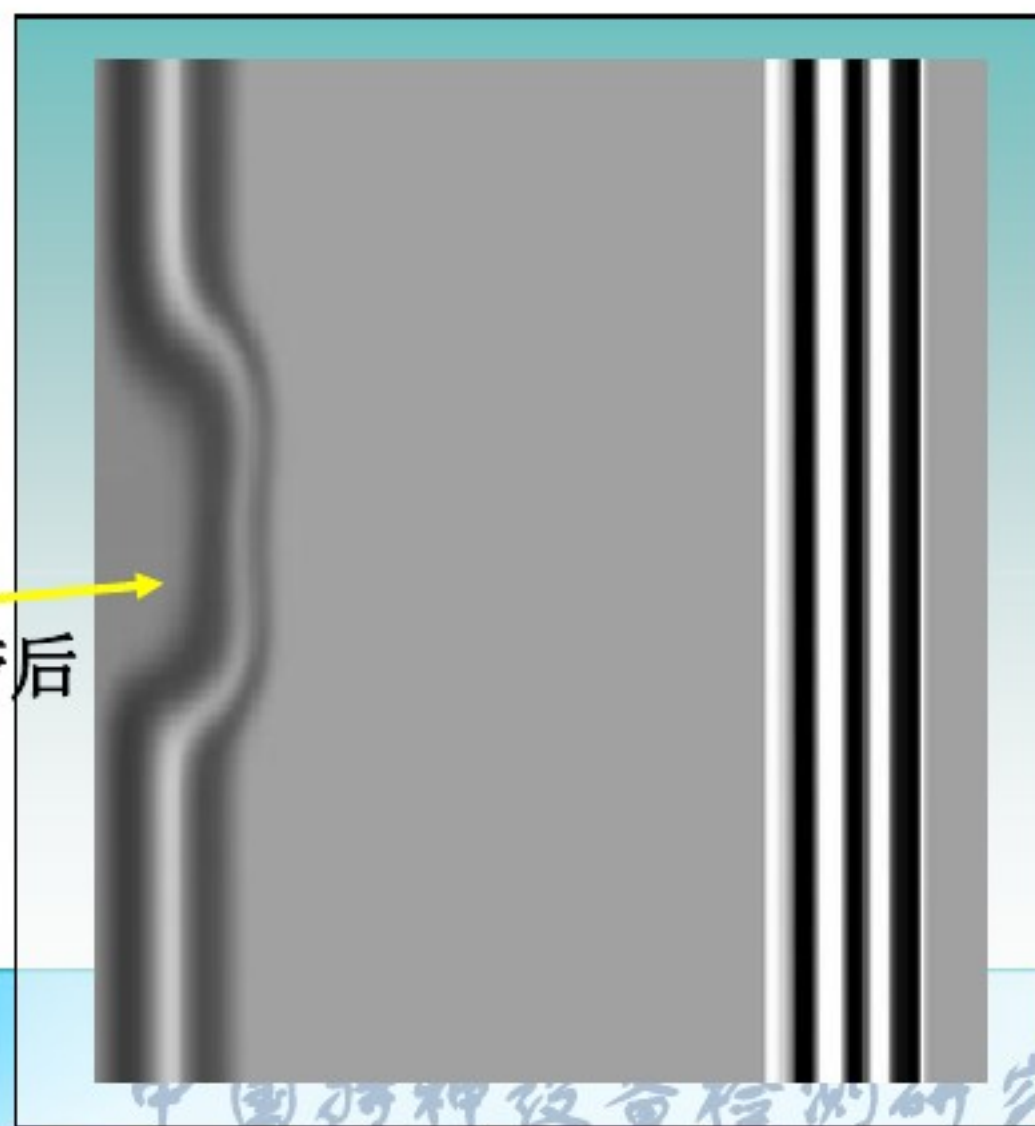




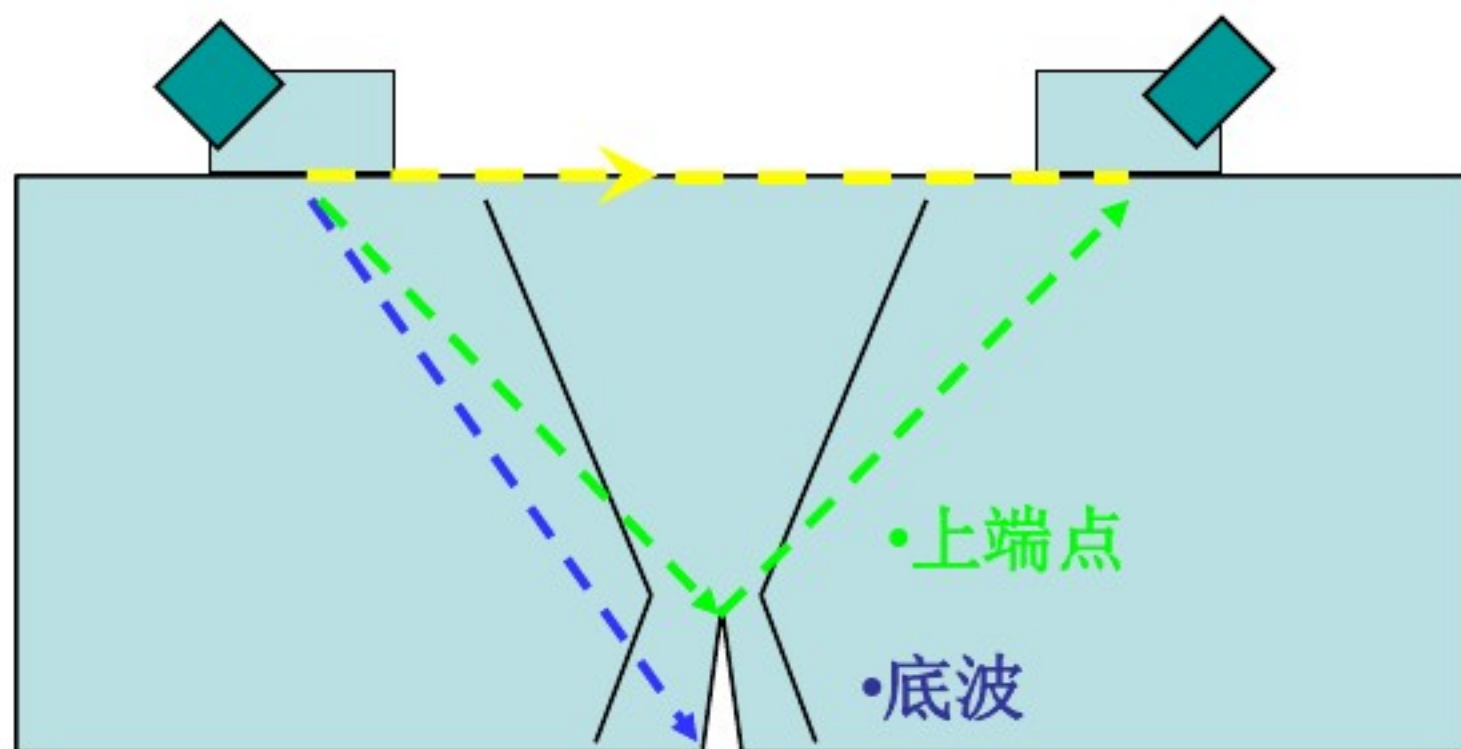
- 当表面开口深度非常小时，直通波并没有断开，但明显滞后



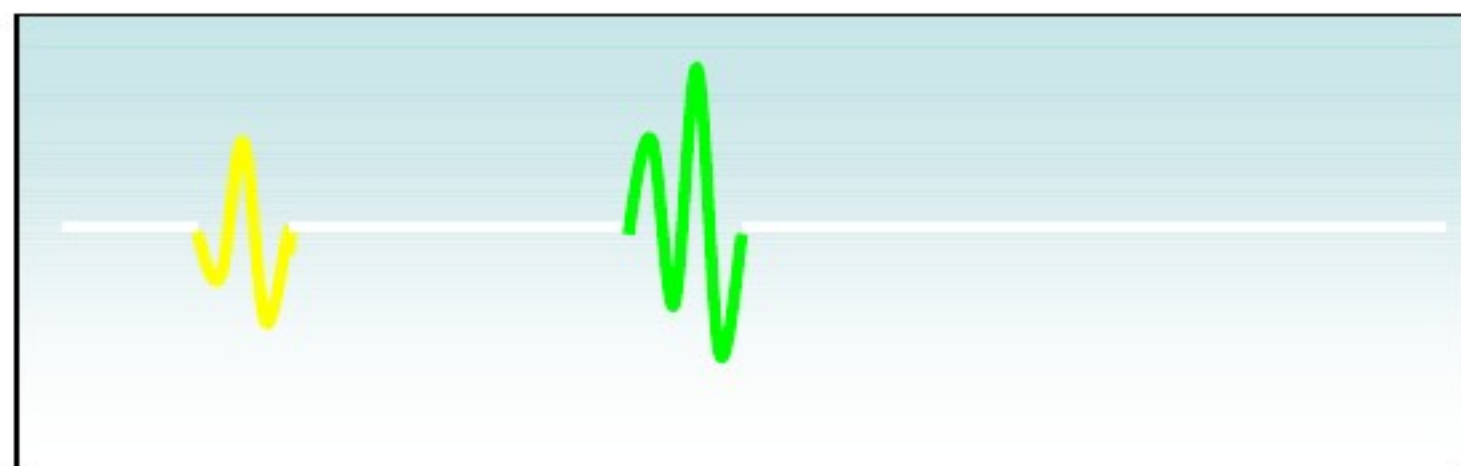
•直通波滞后



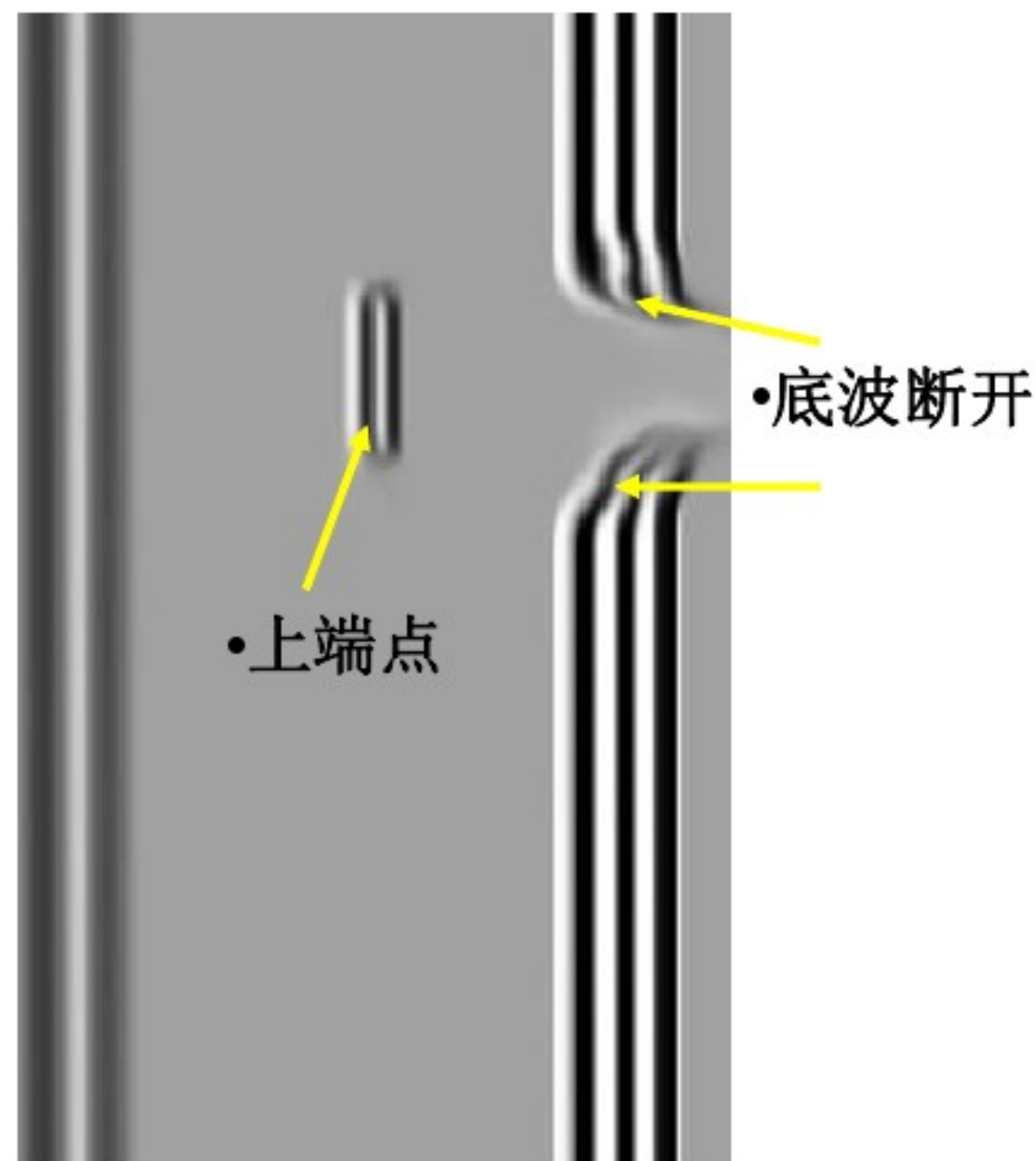
## •2.下表面开口裂纹



•底波被阻断



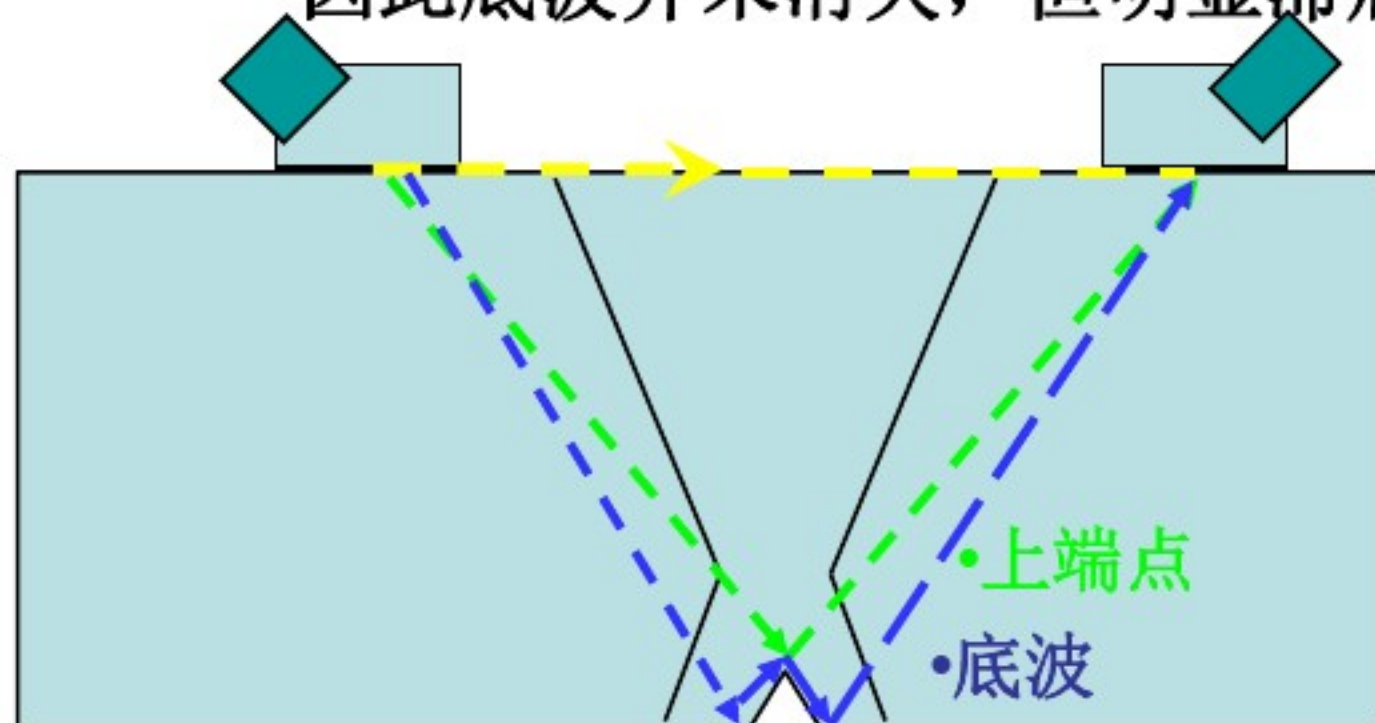
•没有下端点和底波



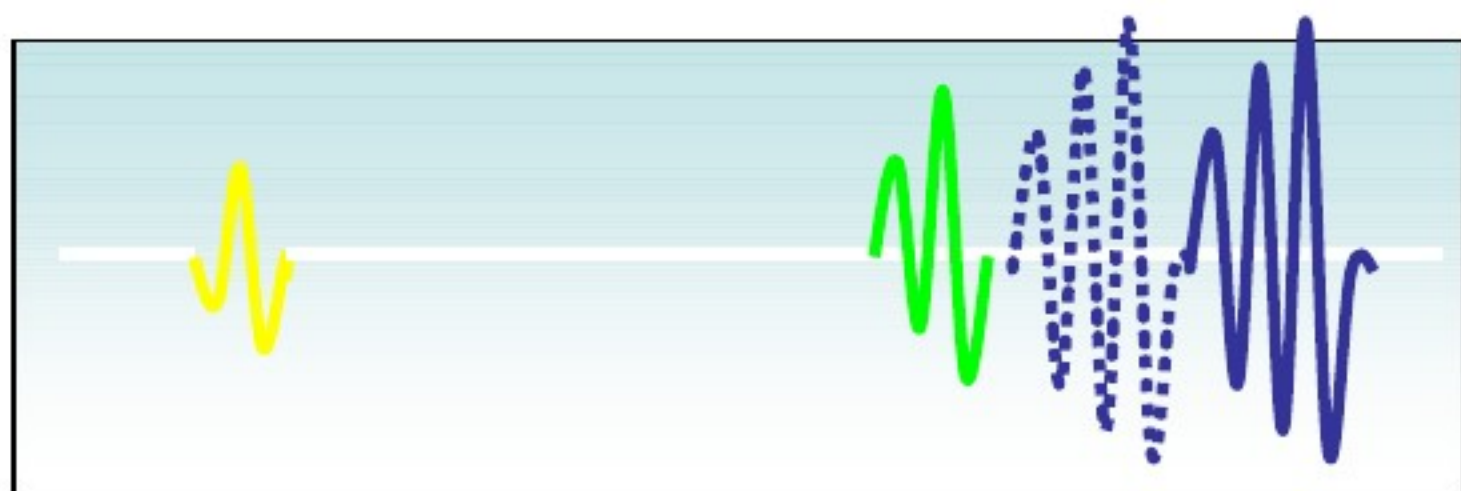


## •2.下表面开口裂纹

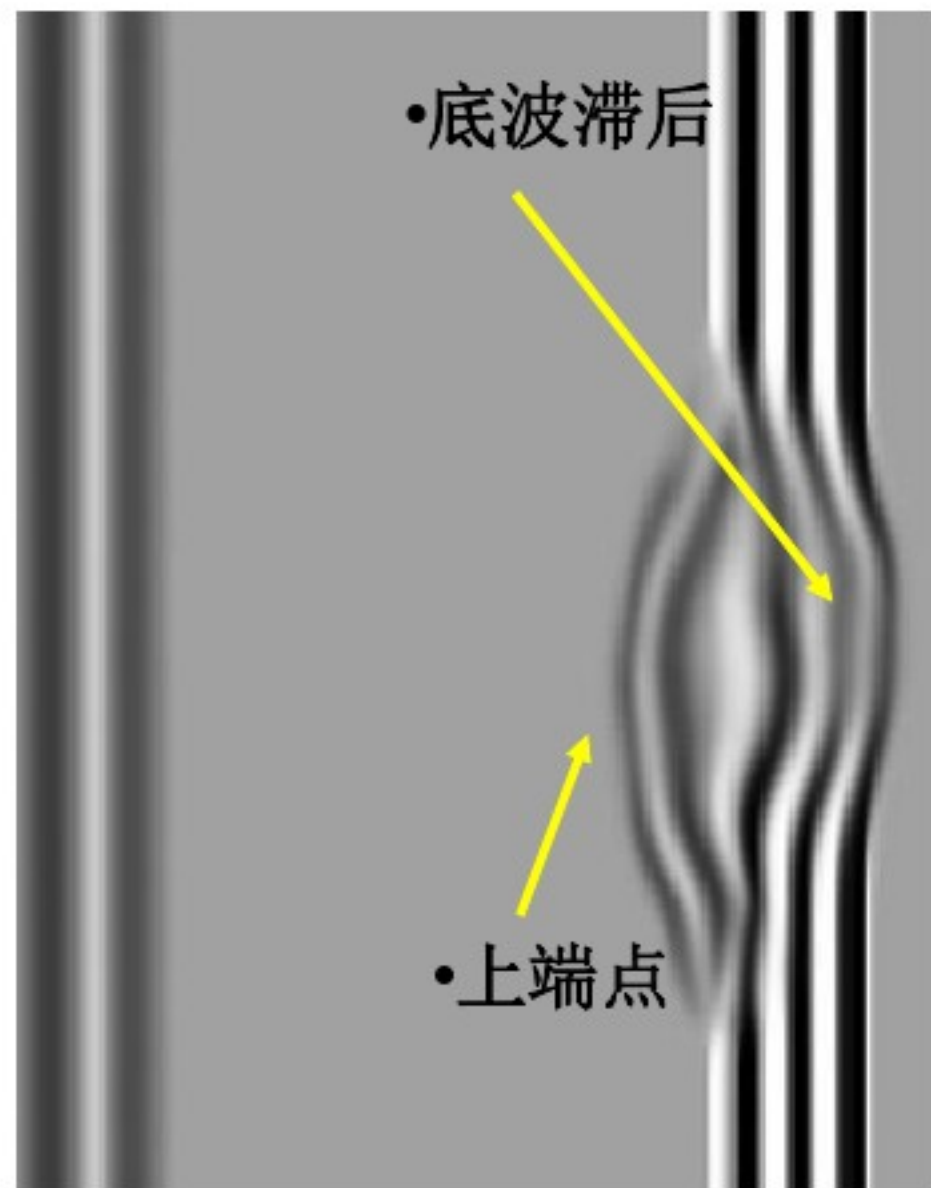
- 由于开口深度较小，无法完全阻挡直通波，
- 因此底波并未消失，但明显滞后



•底波被阻断

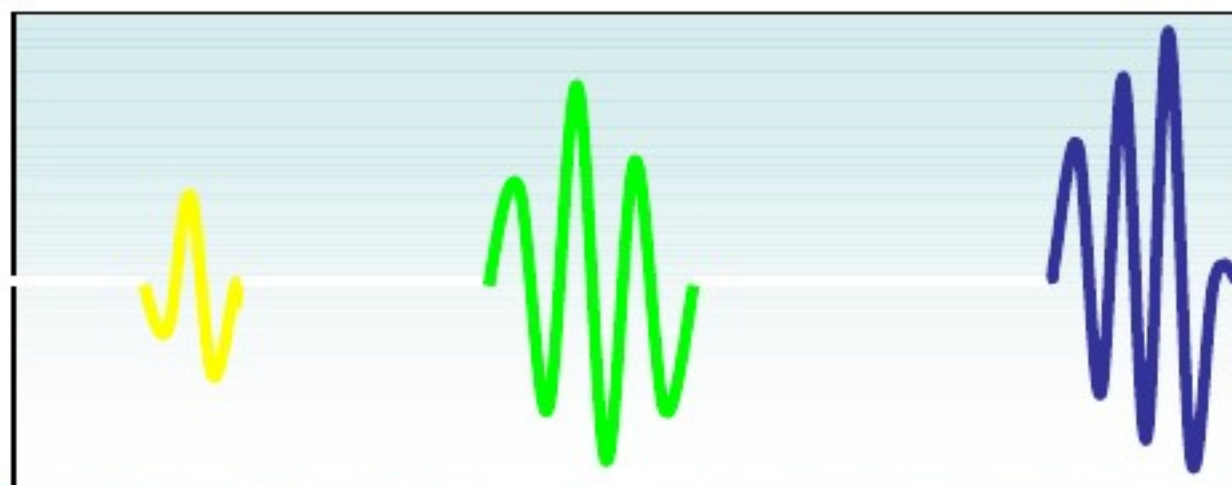
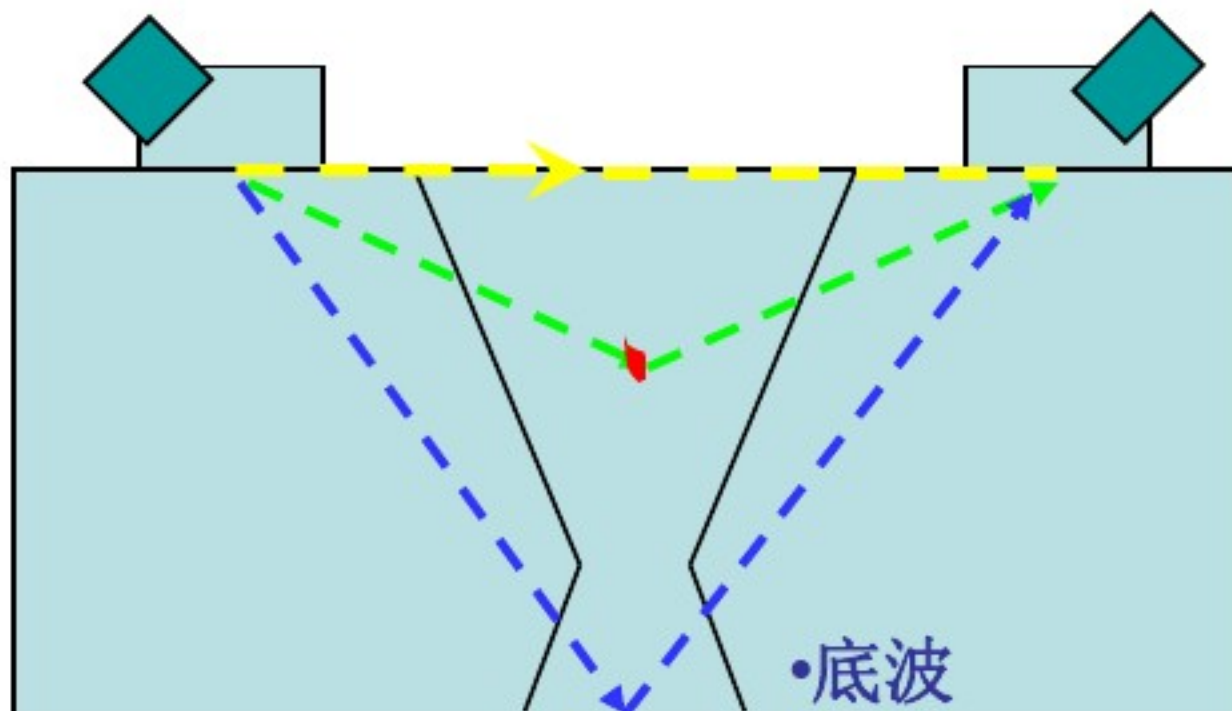


•没有下端点和底波



### •3.短小缺陷

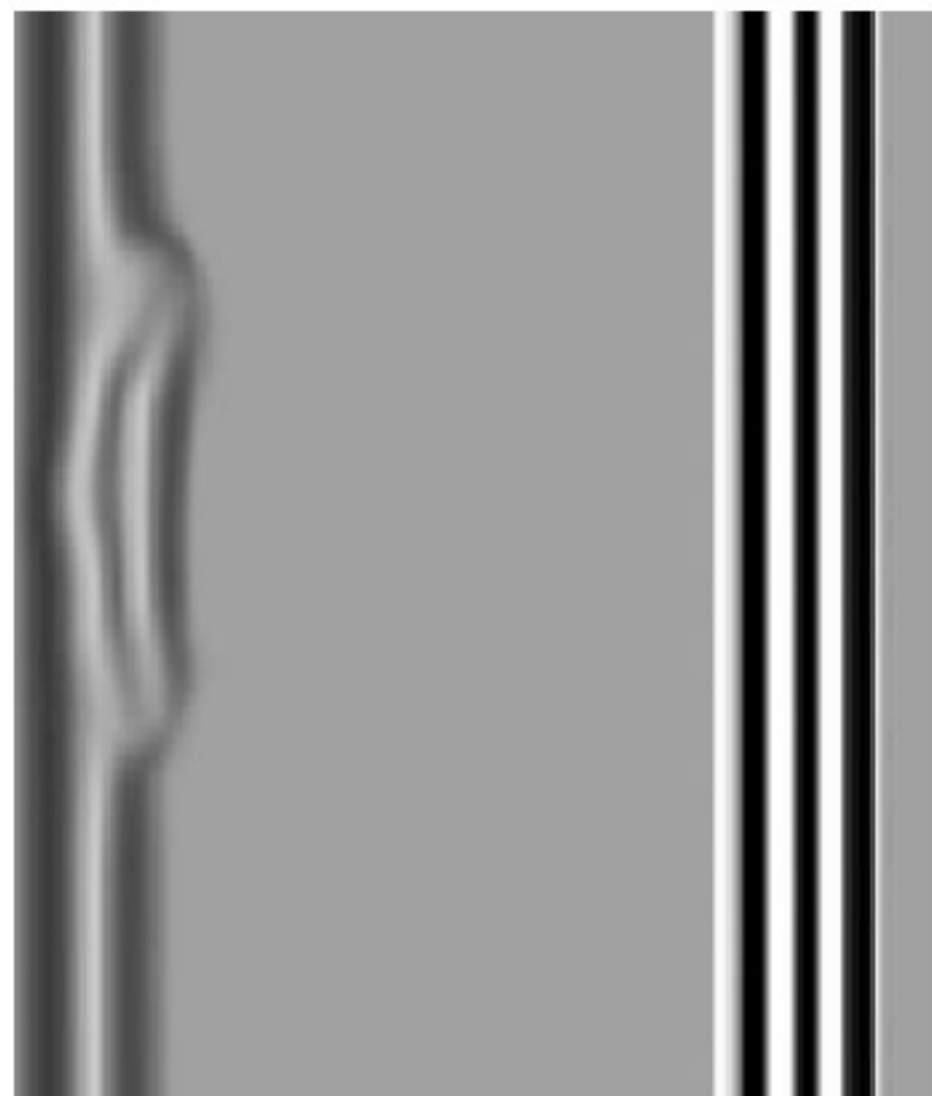
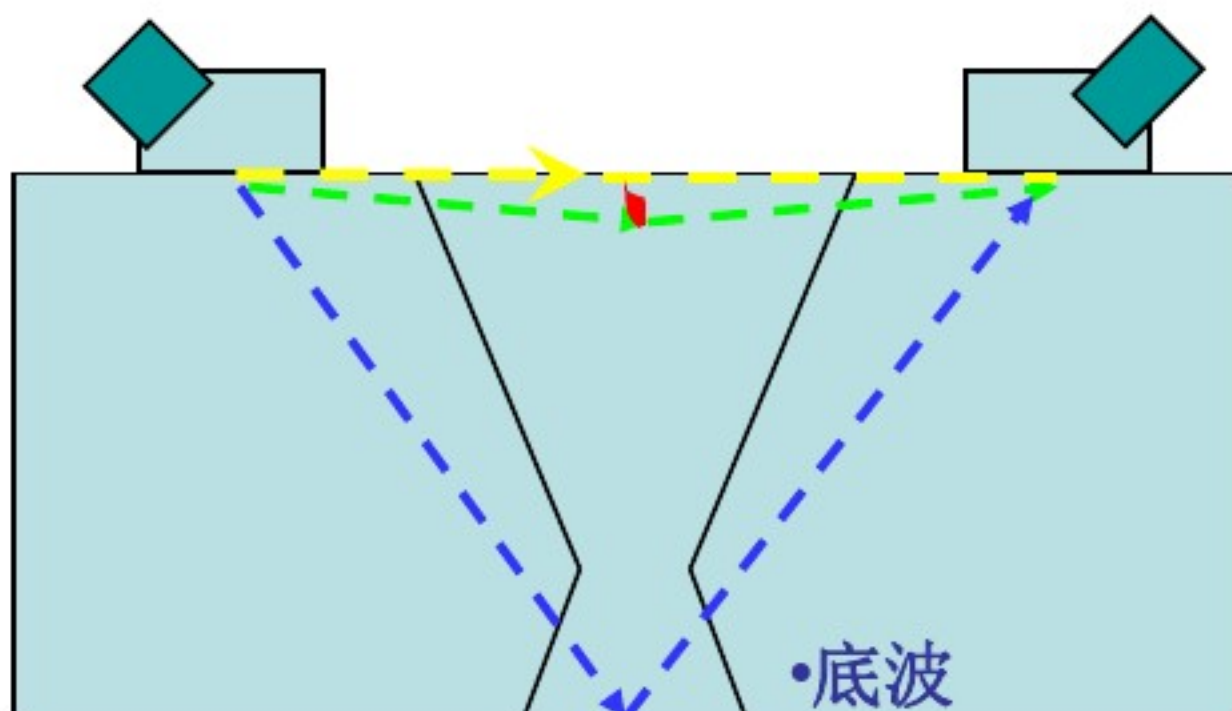
- 在焊缝中出现短小缺陷，上下端点距离很小，
- 因此没有明显区分的上下端点衍射，
- 因此会出现一个非常明显的**不规则多次振荡信号**



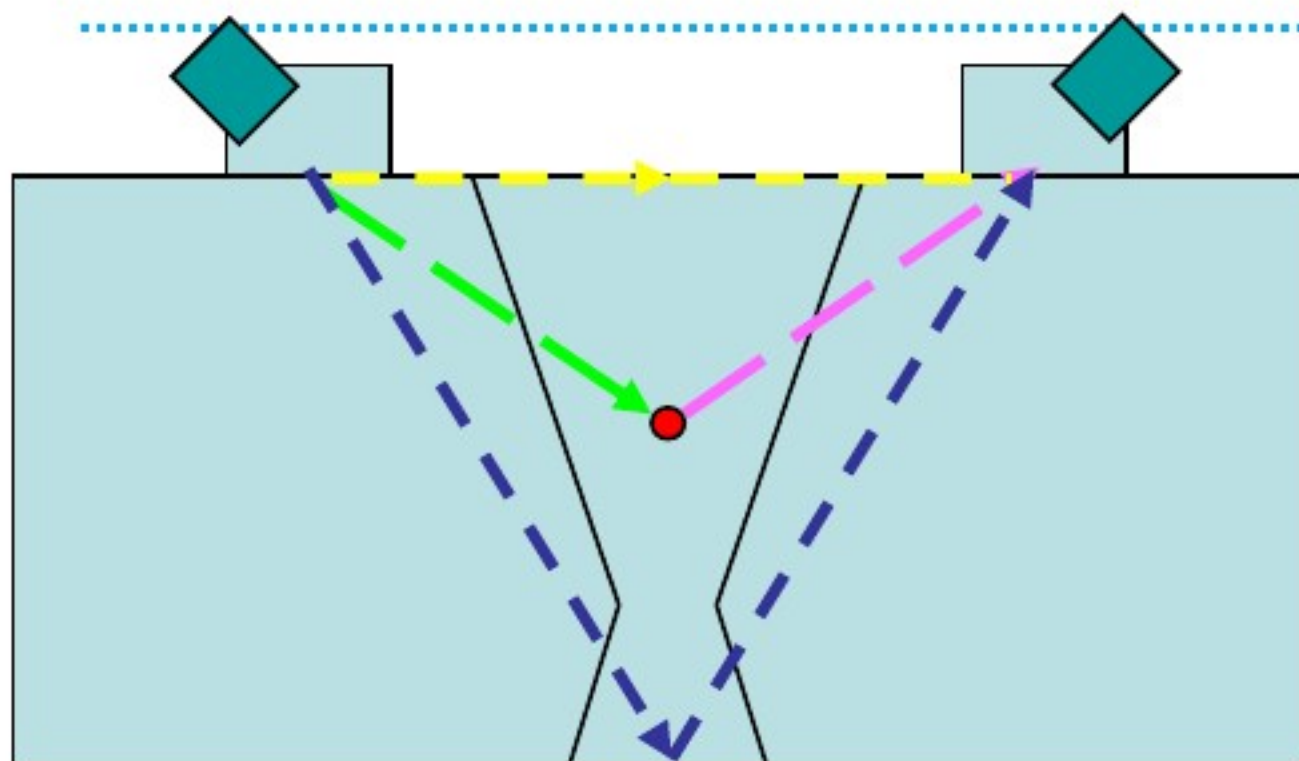


#### •4.近表面缺陷

- 在近表面发现的缺陷，由于与直通波距离近，
- 因此上端点与直通波叠加在一起难以区分。



## •5. 单个气孔

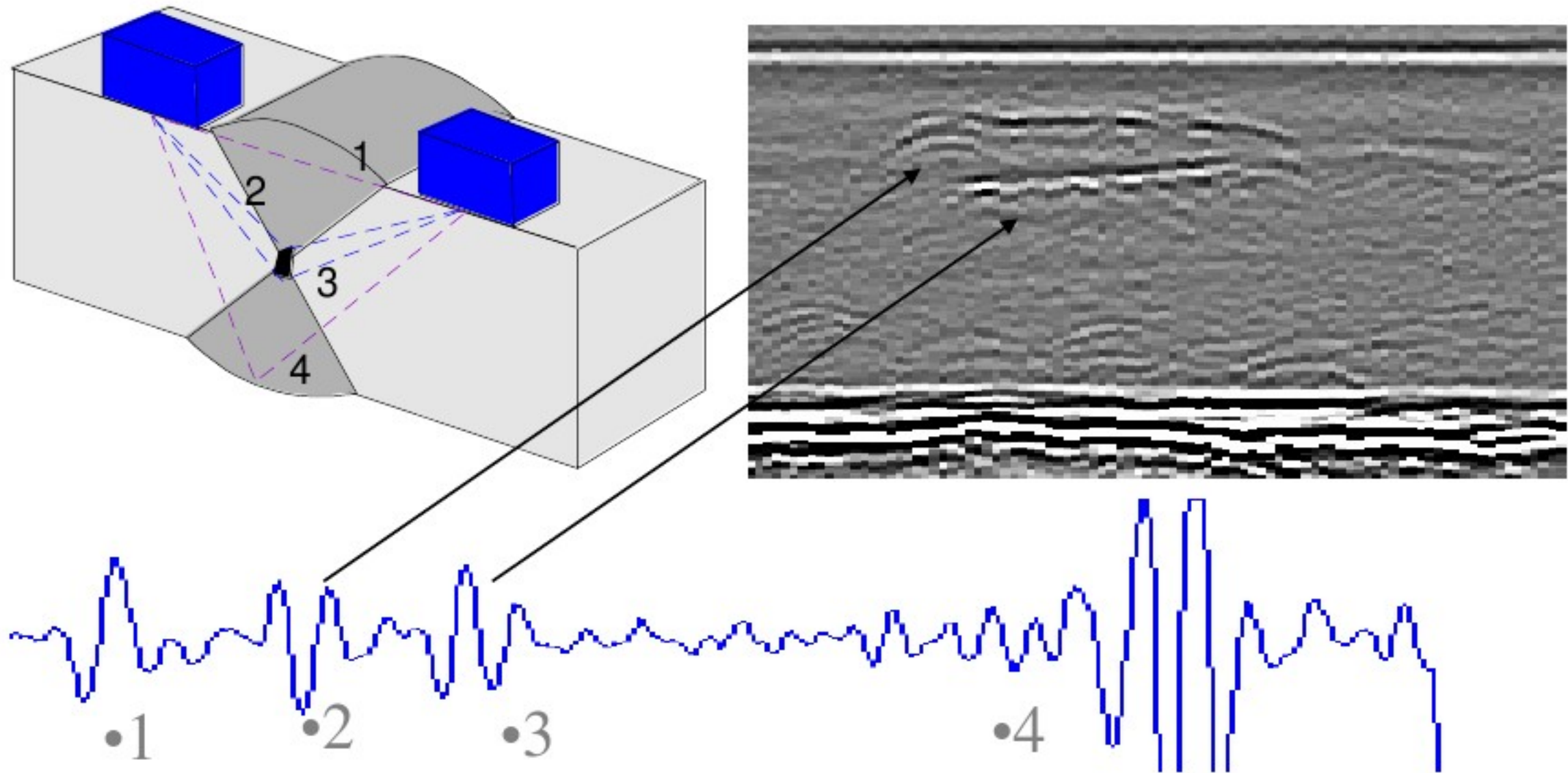


- 由于几何尺寸小，因此没有明显分离的上下端点回波，
- 形成一个小月牙状，相位无法分辨





# 根部未焊透



•Note the two signals from the top & bottom



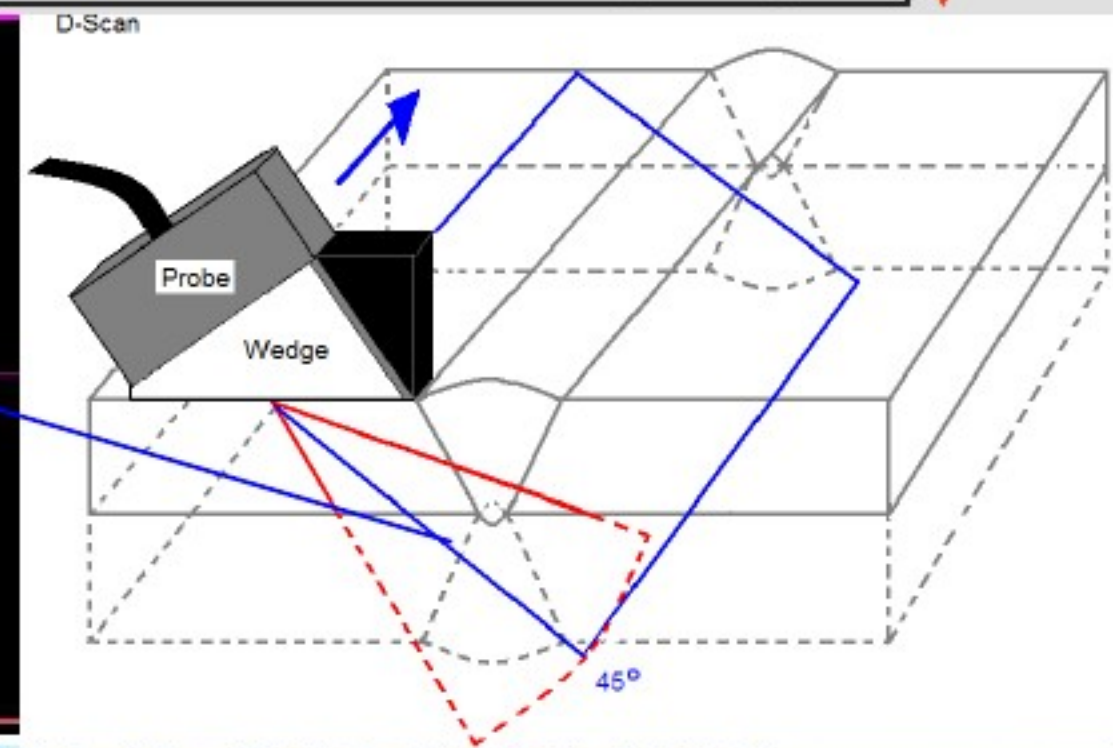
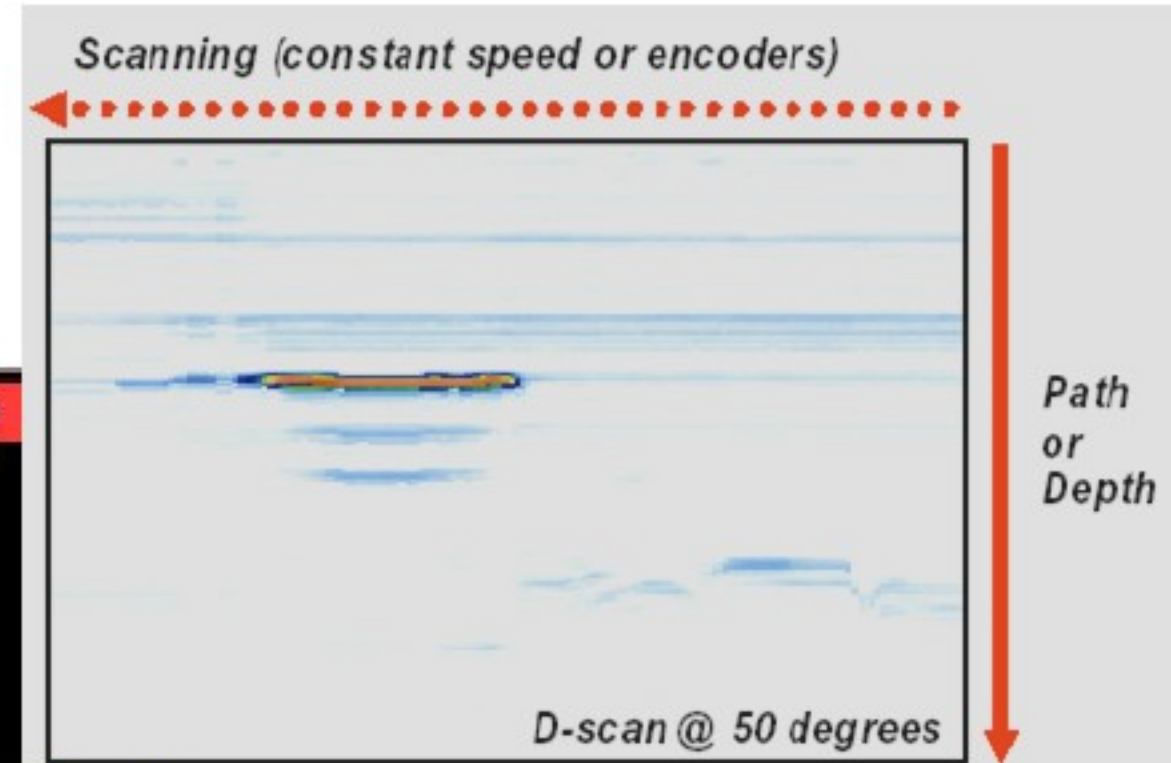
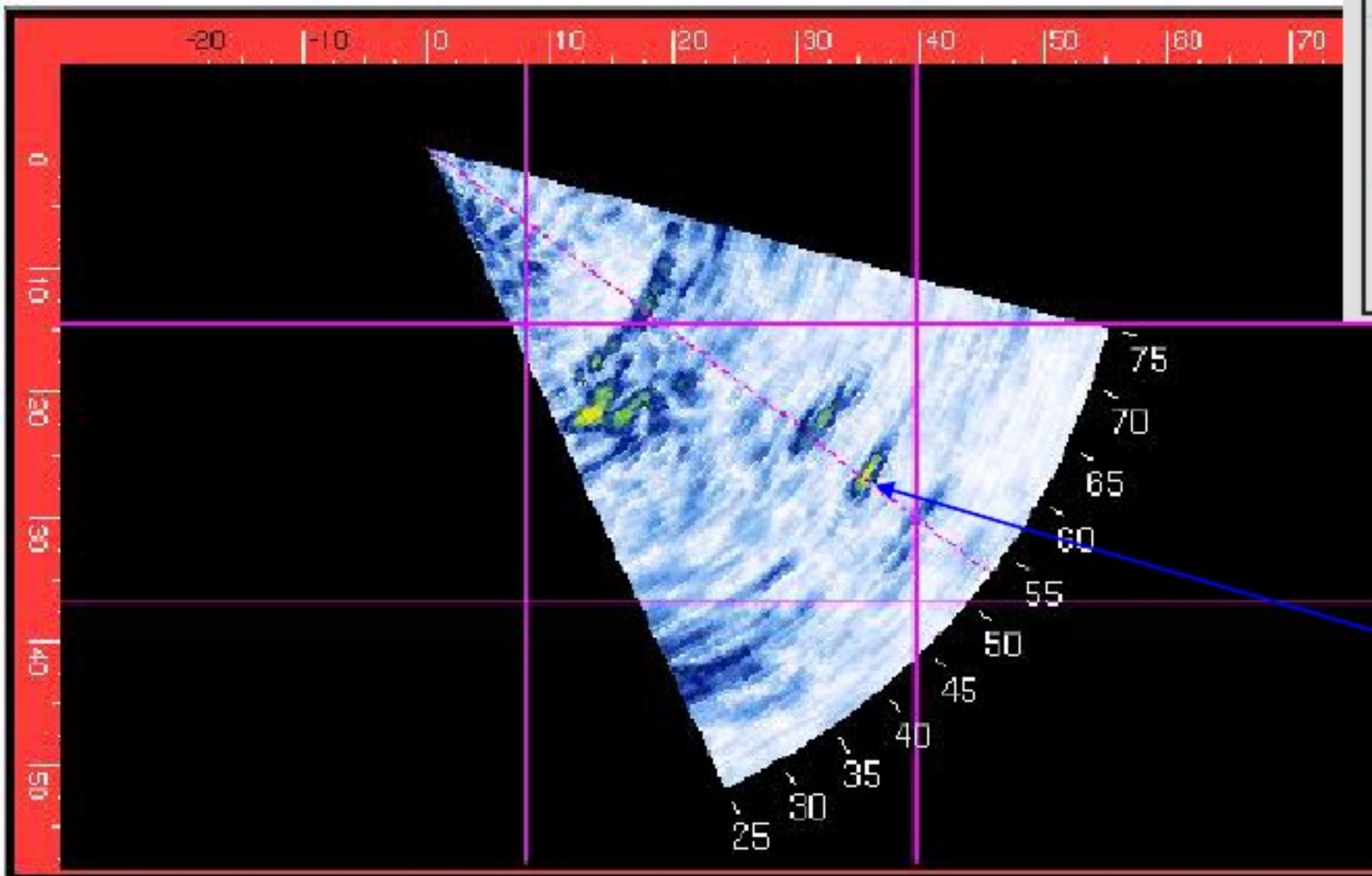
# 超声波相控阵检测技术

---

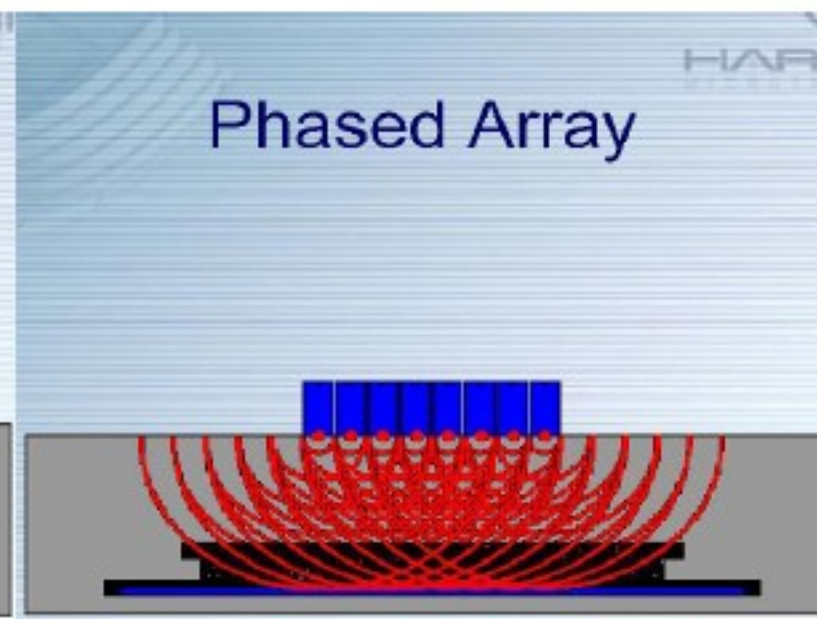
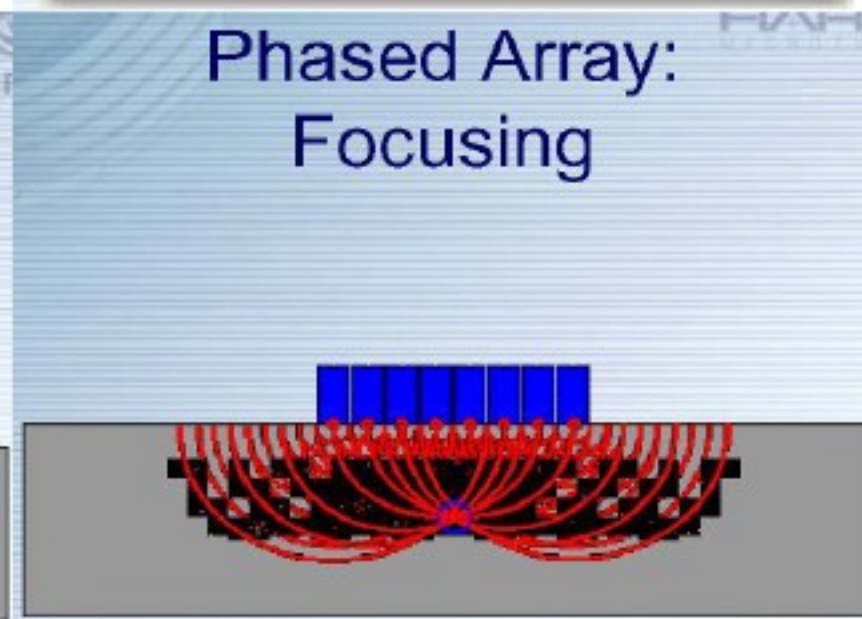
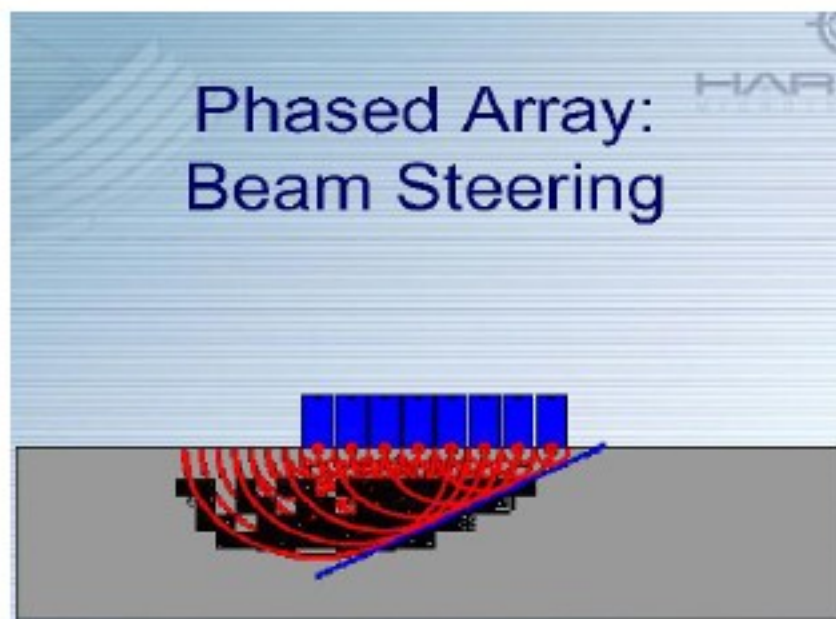
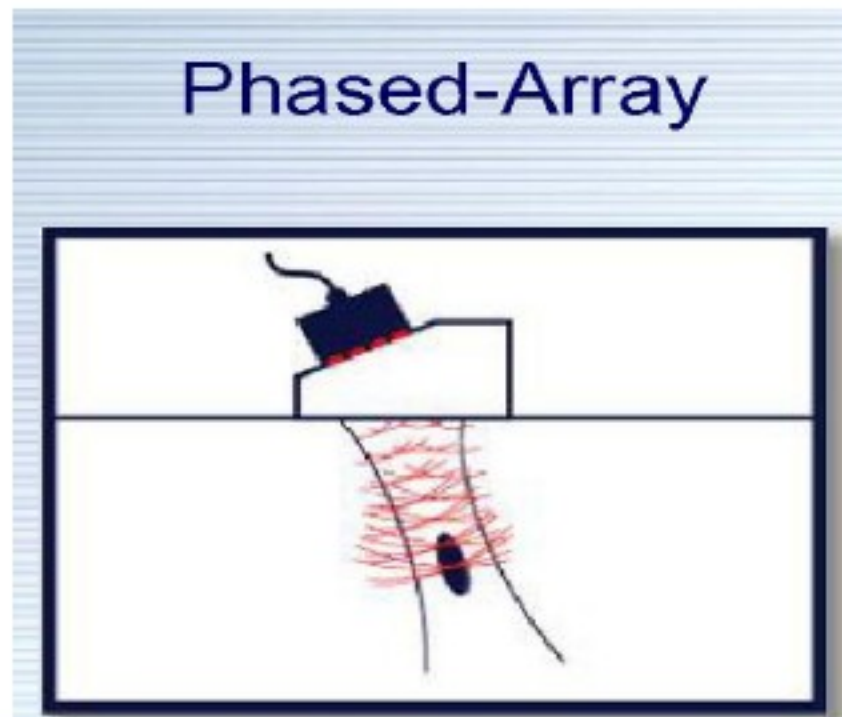
超声相控阵技术是通过控制各个独立阵元的延时，可生成不同指向性的超声波束，产生不同形式的声束效果，可以模拟各种斜聚焦探头的工作，并且可以电子扫描和动态聚焦，无需或少移动探头，检测速度快，探头放在一个位置就可以生成被检测物体的完整图像，实现了自动扫查，且可检测复杂形状的物体，克服了常规A型超声脉冲法的一些局限。







## 线阵列延迟技术:





## 超声波相控阵检测技术的优点：

- 1) 检测速度快
- 2) 缺陷定量准确性高
- 3) 缺陷以图象方式显示，直观和可记录
- 4) 适用于大壁厚容器和管道的快速检测
- 5) 适用于复杂结构工件的检测
- 6) 降低作业强度，检测可靠性高





# 带保温层管道腐蚀的超声导波检测技术

近年来，人们利用某些特定频率的超声波可以在线状材料中长距离传播而衰减较小的特点，开发出了专门用于埋地或带保温层管道腐蚀的超声导波检测仪器。





# 带保温层管道腐蚀的超声导波检测技术

- 该技术采用一种其频率仅略高于声频的低频导波信号，此信号由安装在管道上的环形传感器发出，通过在传感器的背面采用机械和气压的方法使得传感器与管体表面能良好接触来实现耦合效果的。
- 通过采用计算机控制下的电信号激发传感器，可在传感器和管体表面之间的均匀空间产生出导波，这些导波可在管体内沿着轴向向管道的两边均匀传播，就象一个环形的波在扫查整个管道。





- 导波的传播受波的频率和材料的厚度的影响，当波在前进方向上遇到管壁厚度的变化时（无论是增大还是减小），其一部分能量即被反射回传感器，这就是检测管道的“不连续”性的机制。
- 如在管道的某一部位发生腐蚀，局部的厚度就会减薄，这就导致缺陷波除了反射外还会发生散射，同时还会发生模式的转换，反射回来的就是缺陷波叠加转换波形成分的波，而非均匀的源产生的转换波可能揭示出管道在某处出现了弯曲。

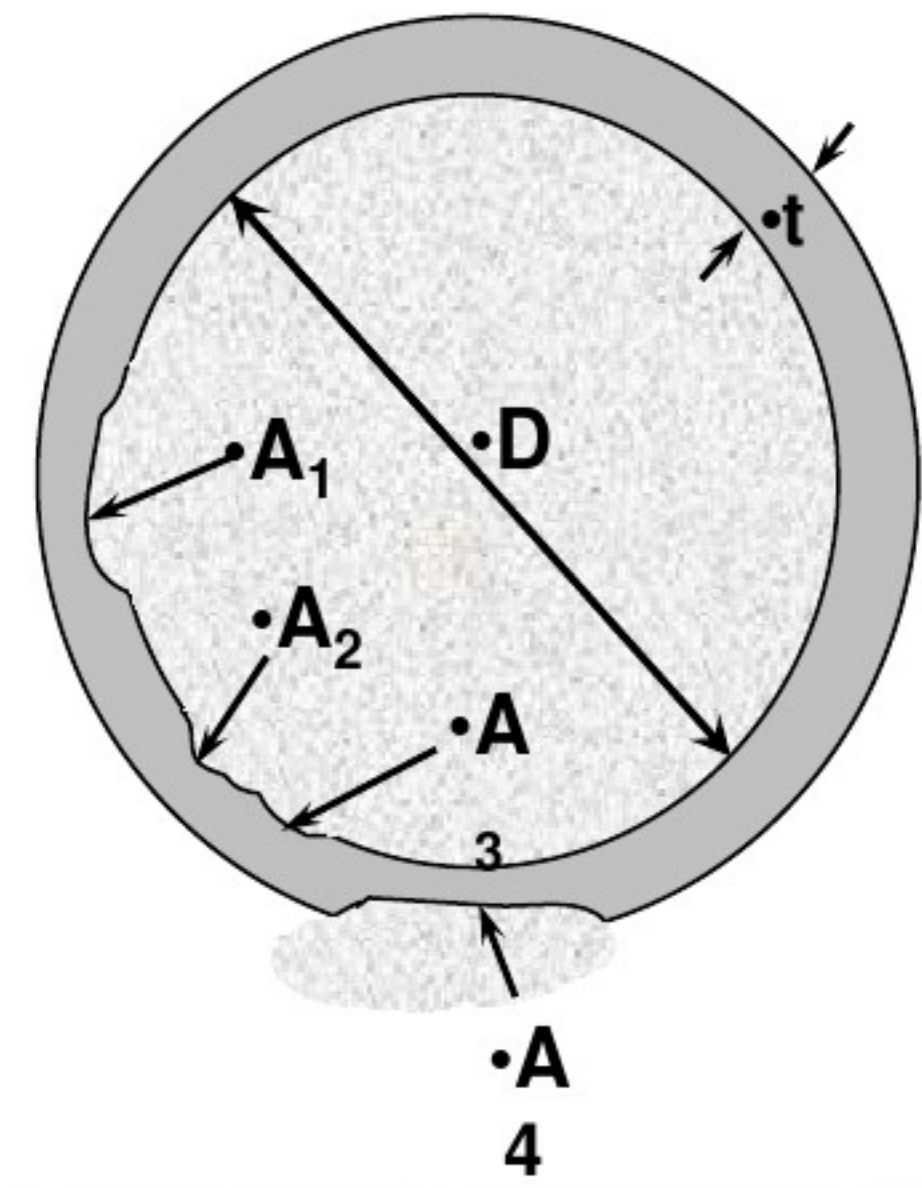




- 该技术对于“截面损失率 > 9%”的腐蚀检出率为100%，对于“3% < 截面损失率 < 9%”的腐蚀视具体情况检出率不等。

管道壁厚的截面损失率

$$\bullet \text{截面损失}\% = \frac{\bullet 100(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)}{\bullet \pi D t}$$



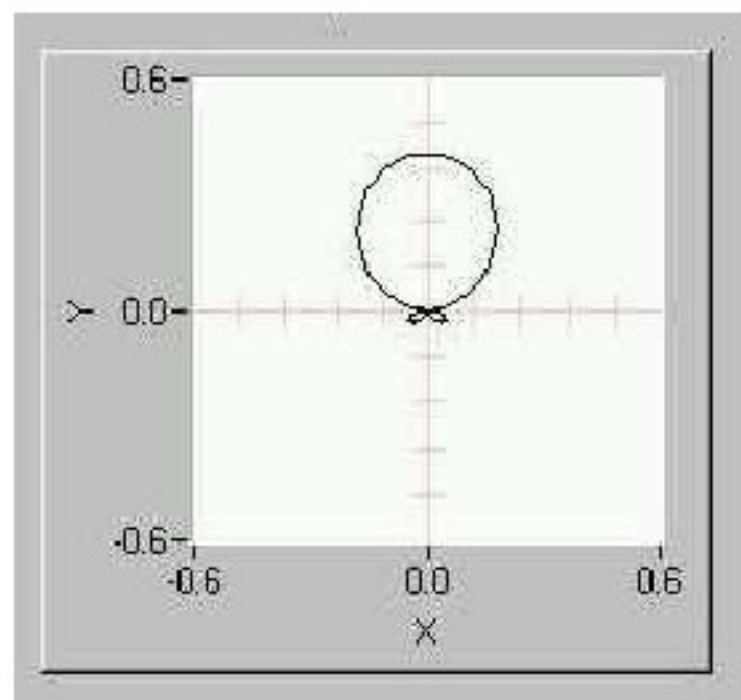
- 一次检测长度分别为： $\pm 100\text{M}$ （清洁、装满液体和带环氧涂层管道）、 $\pm 35\text{M}$ （严重腐蚀管道）、 $\pm 15\text{M}$ （带沥青涂层管道），对于埋地管道一次检测长度会有所缩短。
- 腐蚀部位定位精度为 $\pm 100\text{mm}$ 。
- 采用聚焦技术能够发现截面损失率 $>3\%$ 的腐蚀。

• 演示

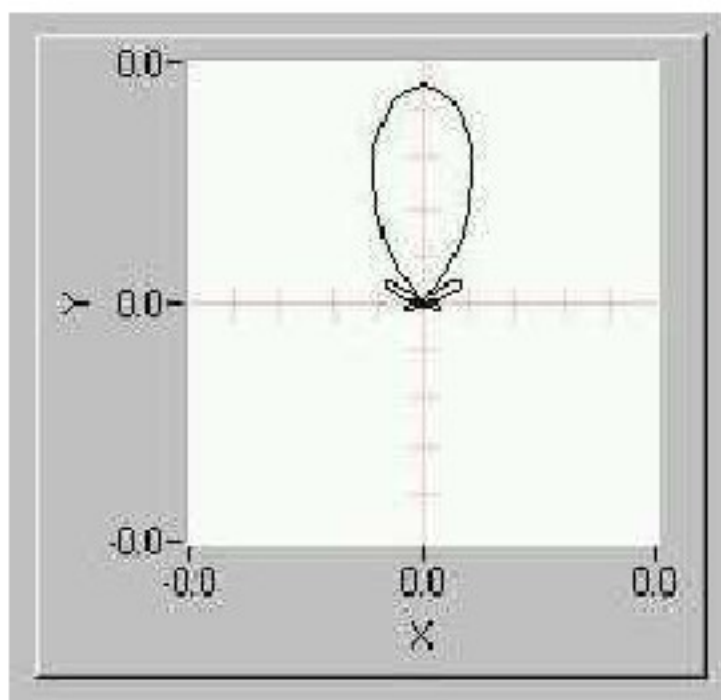




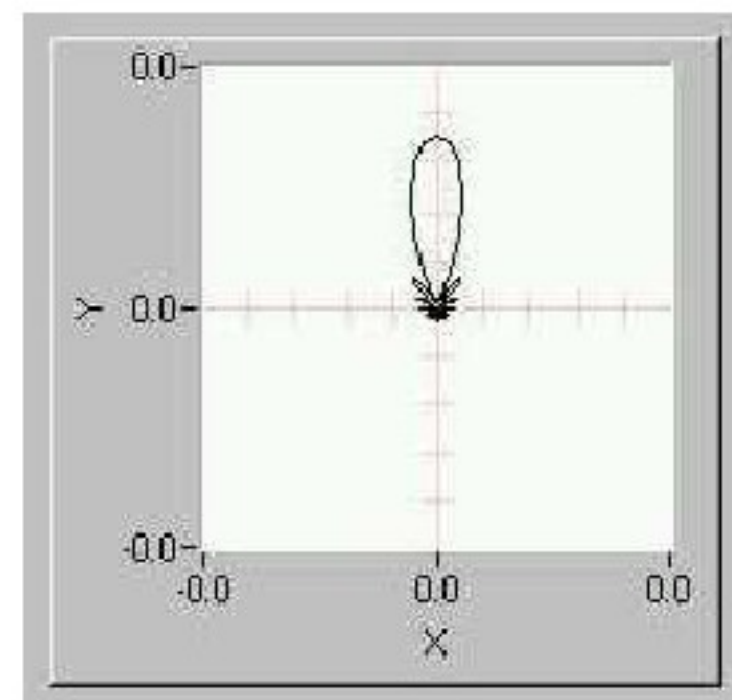
# 超声导波的聚焦技术



•4 segments



•8 segments



•16 segments





# 3.5 带保温层管道腐蚀的超声导波检测技术





---

## 国内外各种导波仪器的介绍

- 主要仪器开发商和设备：
- 英国焊接研究所（TWI）TELETEST
- 英国导波公司（GUL）WAVEMAKER
- 美国西南研究院（SwRI）MSSR
- 以色列Sonotron NDT公司isonic系列



# 1、英国焊接研究所（TWI）

英国TWI集团下属PI公司最早于1998年开发出导波检测仪，其中teletest第四代导波检测仪，主要特点：

- 多模式模块：五圈探头，其中纵向3圈用来激励L（0，1）模态，横向2圈探头用来激励T（0，1）模态。
- 具有聚焦功能
- 压电陶瓷传感器，干耦合技术

中国特检院、中海油、合肥通用所、上海宝钢





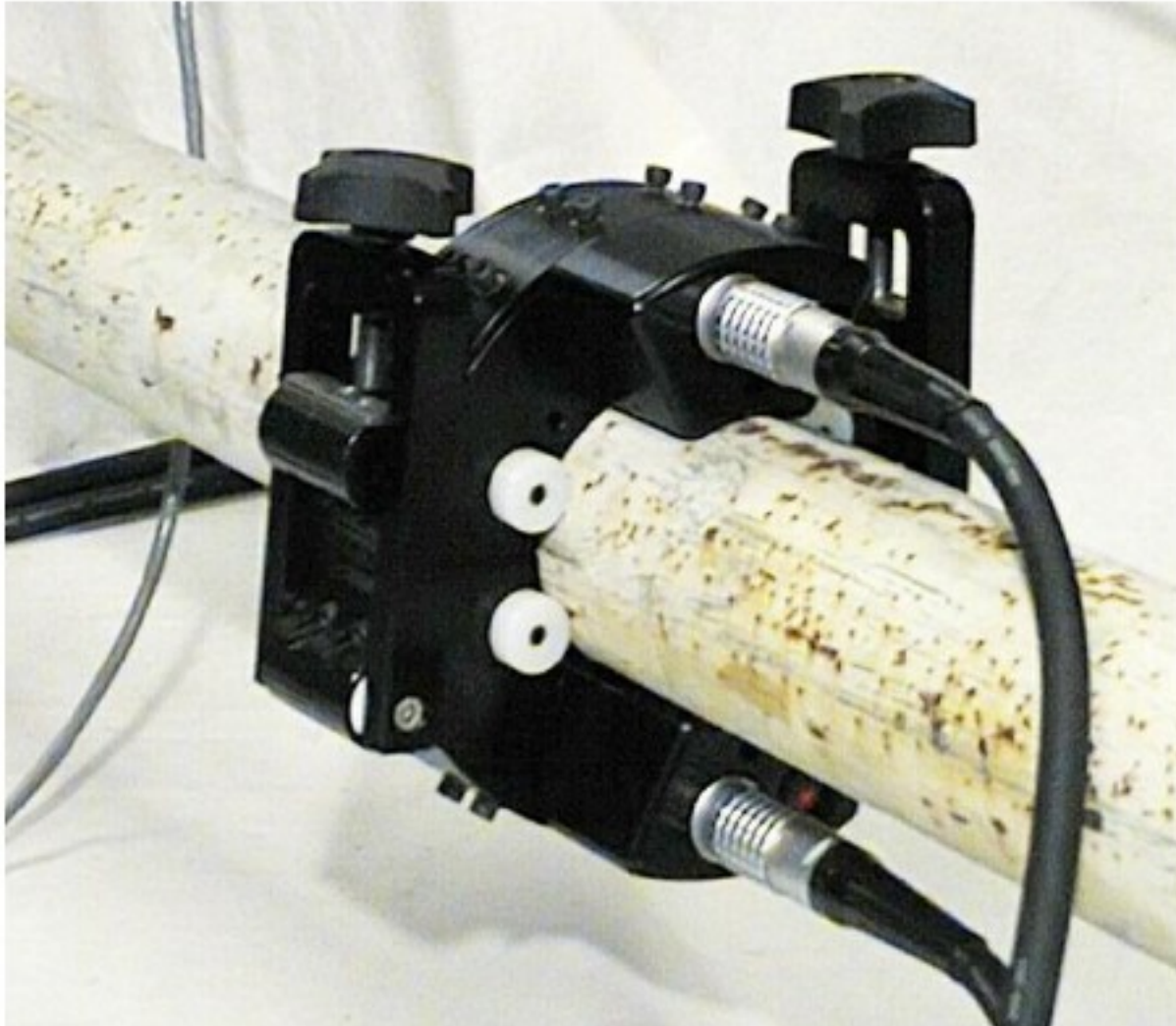
- 英国导波公司从Pi公司分离出来，与英国帝国理工学院于1999年开发出第一台检测仪，主要特点：
  - 两圈探头，只能利用T波检测
  - 操作方便；
  - 压电陶瓷传感器，干耦合技术

江苏特检院  
廊坊管道局  
重庆特检院  
华油





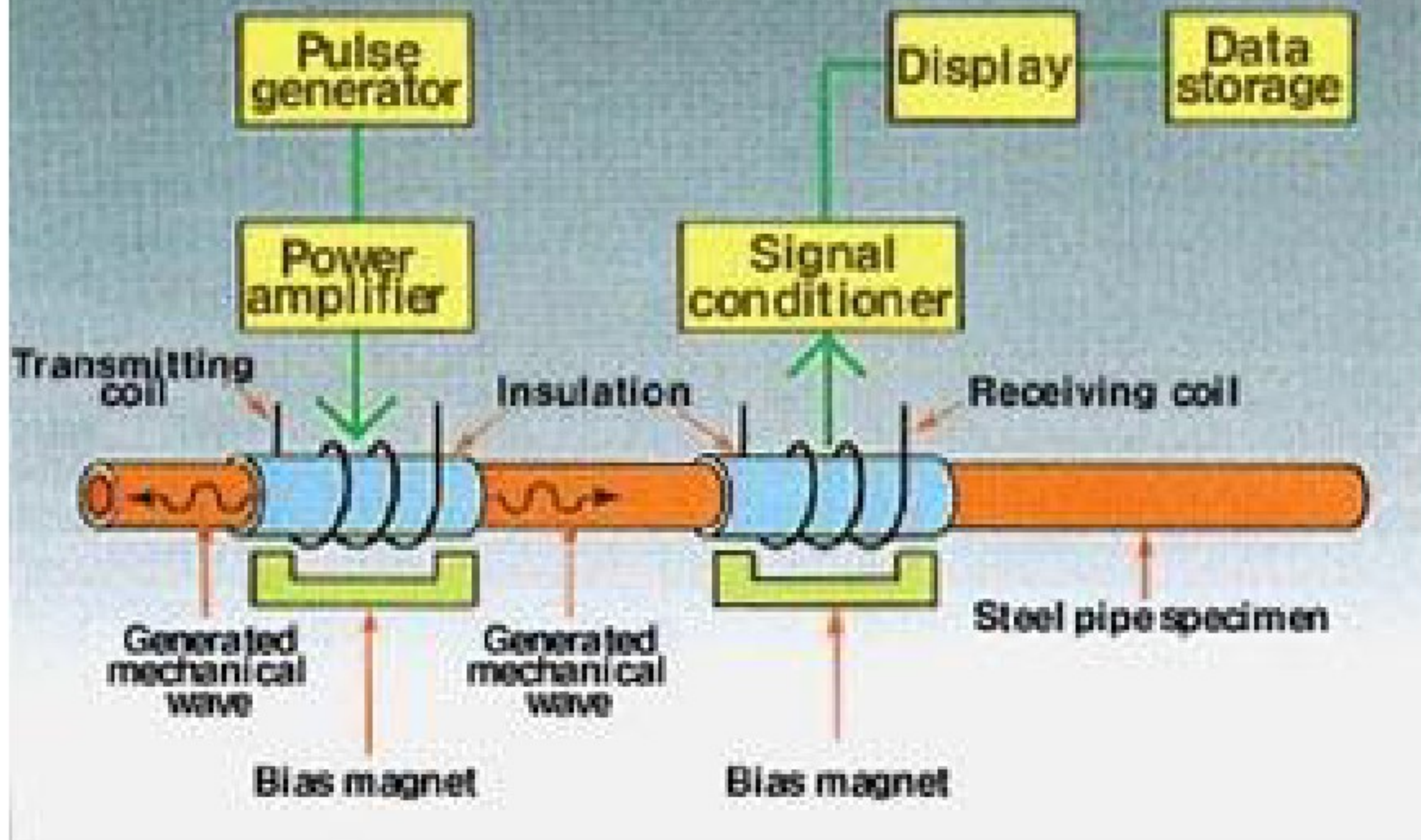
# Commercial Transducer System



• Guided Ultrasonics Ltd

中国特种设备检测研究院





- 磁致伸缩导波原理：磁致伸缩效应及其逆效应。
- 铁磁体在外磁场中被磁化时，其外形尺寸会发生变化（磁滞伸缩应变），激发应力波（结构导波）
- 缺陷回波---应力---尺寸变化—磁场变化—接收线圈电压的变化



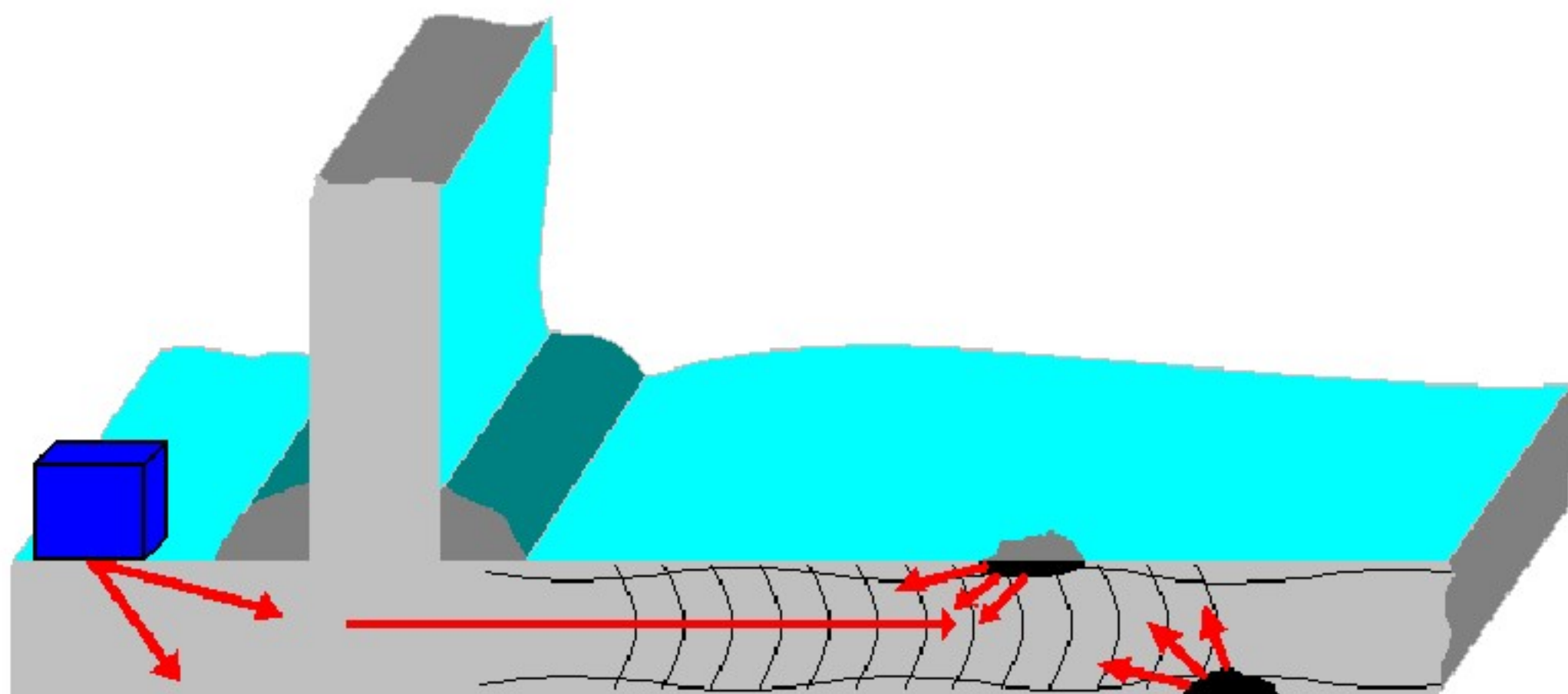


# 储罐边缘板外侧的超声导波检测

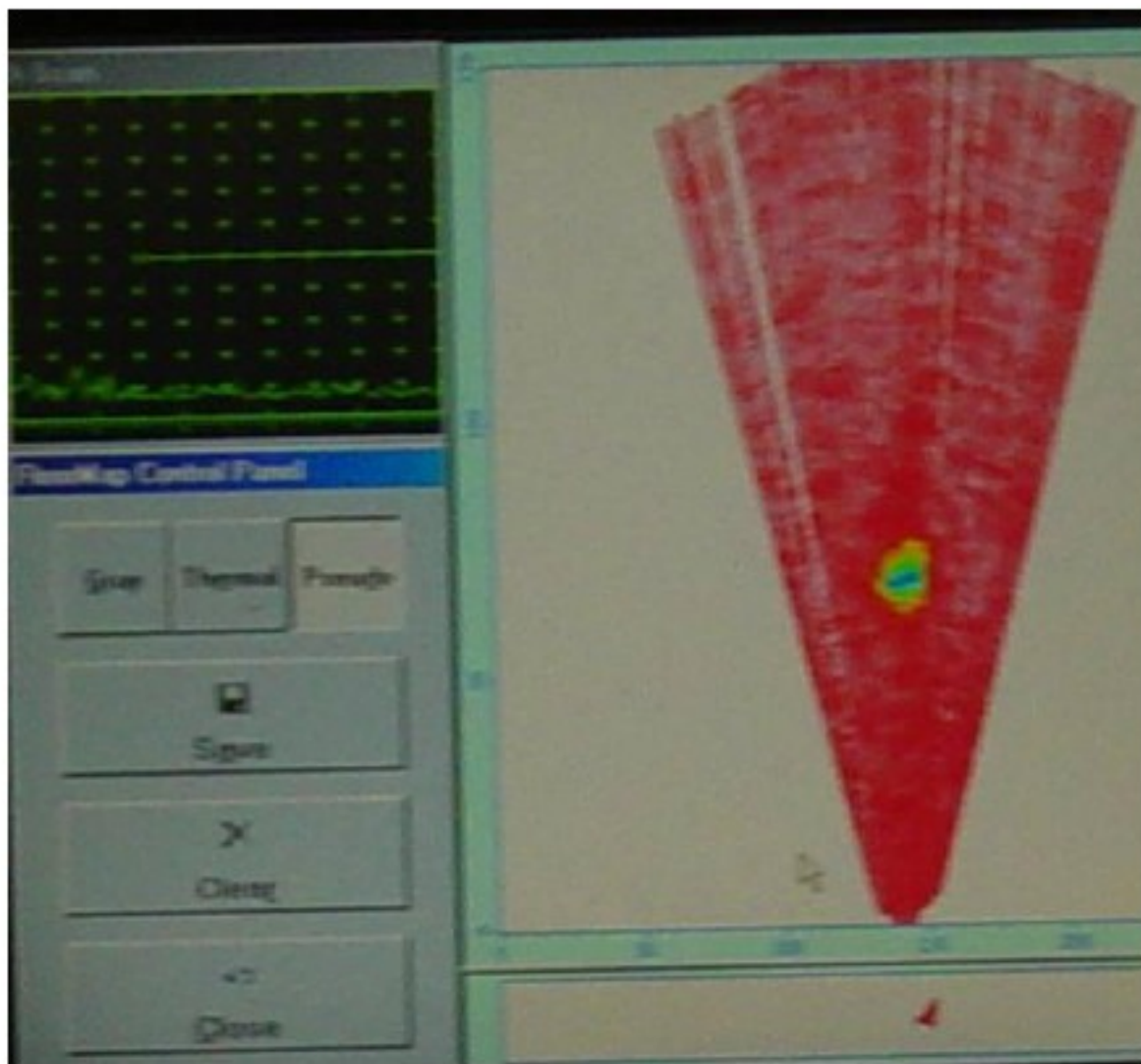




# 高频导波从外部检测储罐的底板



# 储罐底板焊缝的超声扫查





# 导波技术在管道检测中的优势

## 导波技术在管道检测中的优势

- 测量长距离管道并发现缺陷或损伤而无需剥离防腐层
- 检测管道内外壁损失量和环向裂纹
- 1、检测--测量模式中可以测量2 to 5%管壁损失量；监测模式中可以测量1%管壁损失量
- 2、位置精度-- $\pm 10\text{ cm}/15\text{ cm}$ 。
- 3、测试范围--取决于管道状况
- 检测架空、穿跨越管道
- 从遥远的位置远距离检测难以到达的区域
- 在管道运行期间在役检测管道腐蚀状态
- 基于信号强度和特征对管道的损坏严重程度进行分级
- 能够区别焊缝和缺陷



# 导波技术在管道检测中的局限性

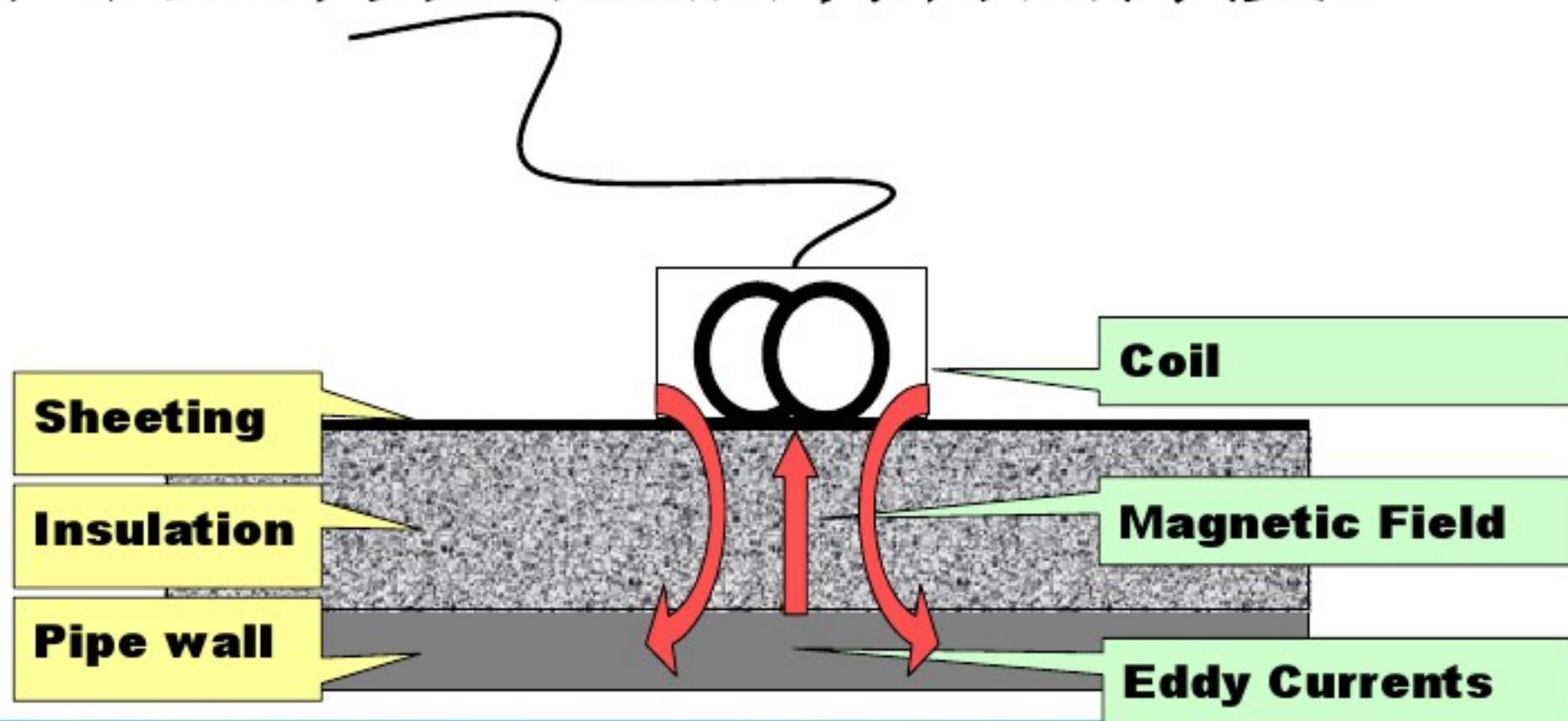
---

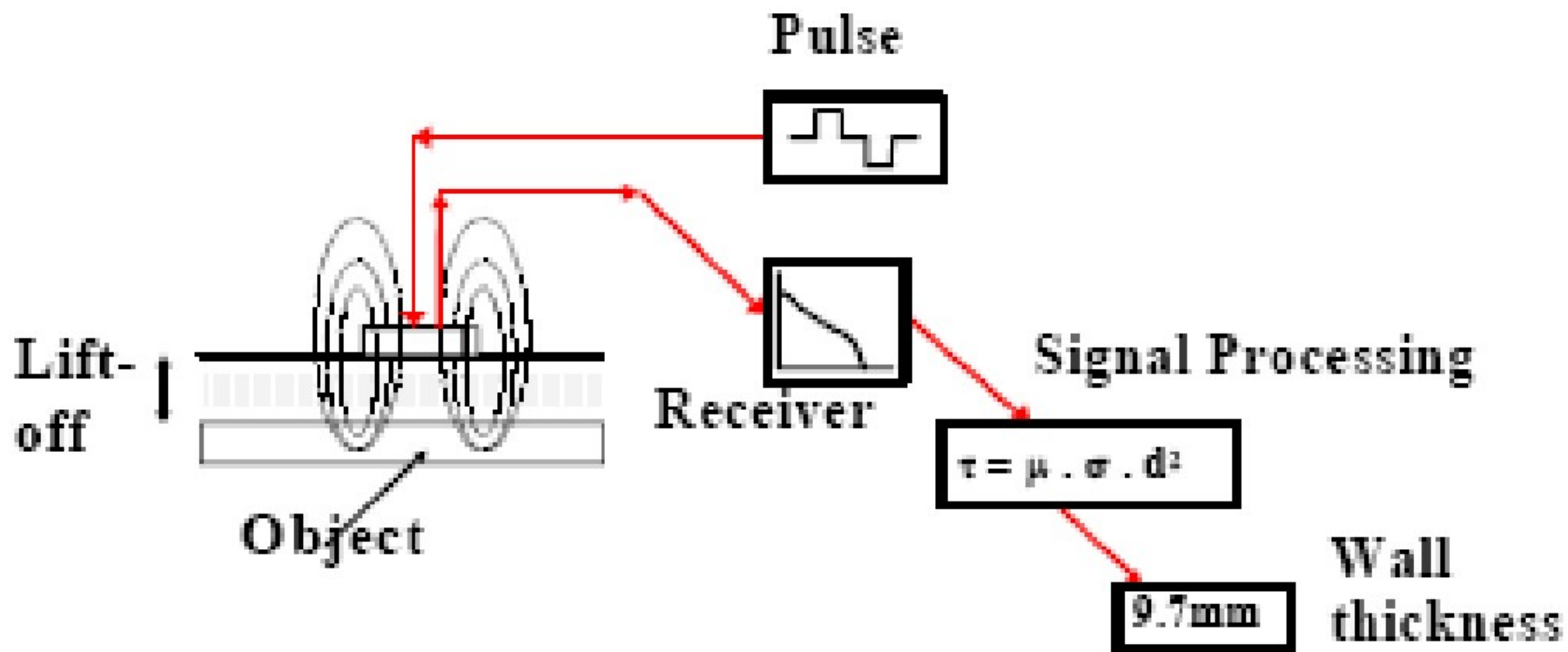
- ■不能测量管道的真实残余壁厚或最小壁厚
- ■不能区分内外壁损伤
- ■不能确定缺陷的形状和尺寸
- ■轴向裂纹检测的局限(但可以检测深度大于壁厚的70%轴向裂纹)
- ■不能检测孤立的小的凹坑
- ■不能穿越法兰检测





- 脉冲涡流腐蚀检测的基本原理是一个外加的电磁脉冲信号在金属内部可以产生一个涡流信号，此涡流随着时间的延长而逐渐消失，对于不同厚度的金属材料，其持续时间是不同的，通过测量持续时间可以计算出金属材料的厚度。









# 带保温层铁磁性材料脉冲涡流腐蚀检测技术

- 荷兰RTD检验公司1996年通过购买美国德克萨斯
- **ARCO**公司的专利已制造出型号为InCo-Test
- (Insulation Component Test) 带保温层腐蚀
- 检测仪器。
- 该设备1997年进行了首次商业应用，目前已经在
- 6个国家13家无损检测公司中销售30多台，拥有
- 相当成熟的使用经验。
- 该设备主要用于管道、容器等表面有覆盖层设备
- 的腐蚀减薄检测，属于非接触式检验技术。
- 目前，法国已经制定了相关的标准。
- 中国特检中心2005年进口了1台设备。







# 带保温层铁磁性材料脉冲涡流腐蚀检测技术

仪器的工作指标如下：

- 材料：铁磁性材料
- 最大保护层（石棉、水泥等）厚度：150mm  
（外壳为铝、不锈钢或低合金钢薄层）
- 最小测量灵敏度：壁厚减薄10%（最小为0.5mm）
- 壁厚测量范围：6到65mm
- 温度：-150°C to 500°C
- 能进行测量的最小管径：50mm







# 带保温层铁磁性材料脉冲涡流腐蚀检测技术

## 塔器的检验

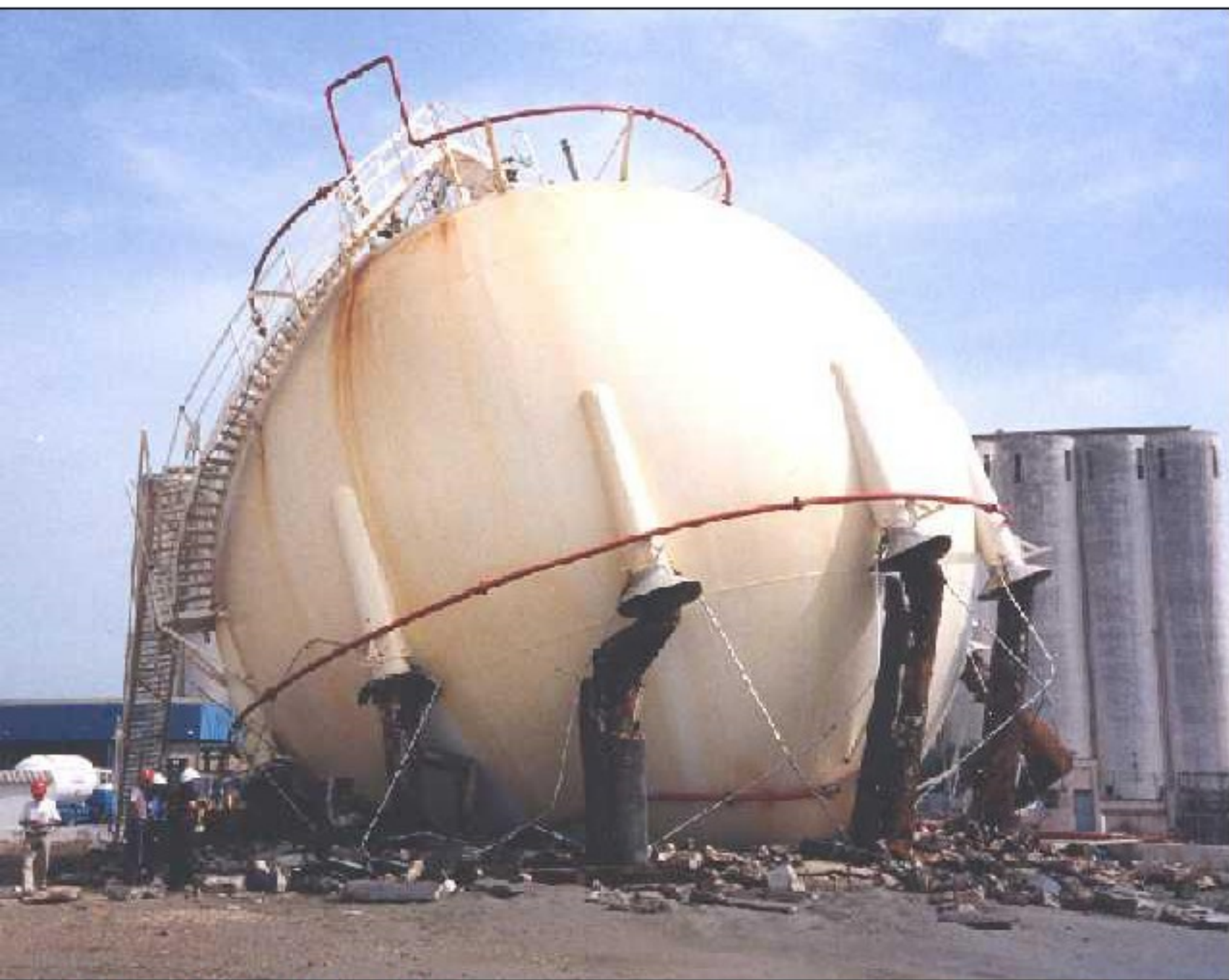






# 带保温层铁磁性材料脉冲涡流腐蚀检测技术

## 球罐支柱的检验

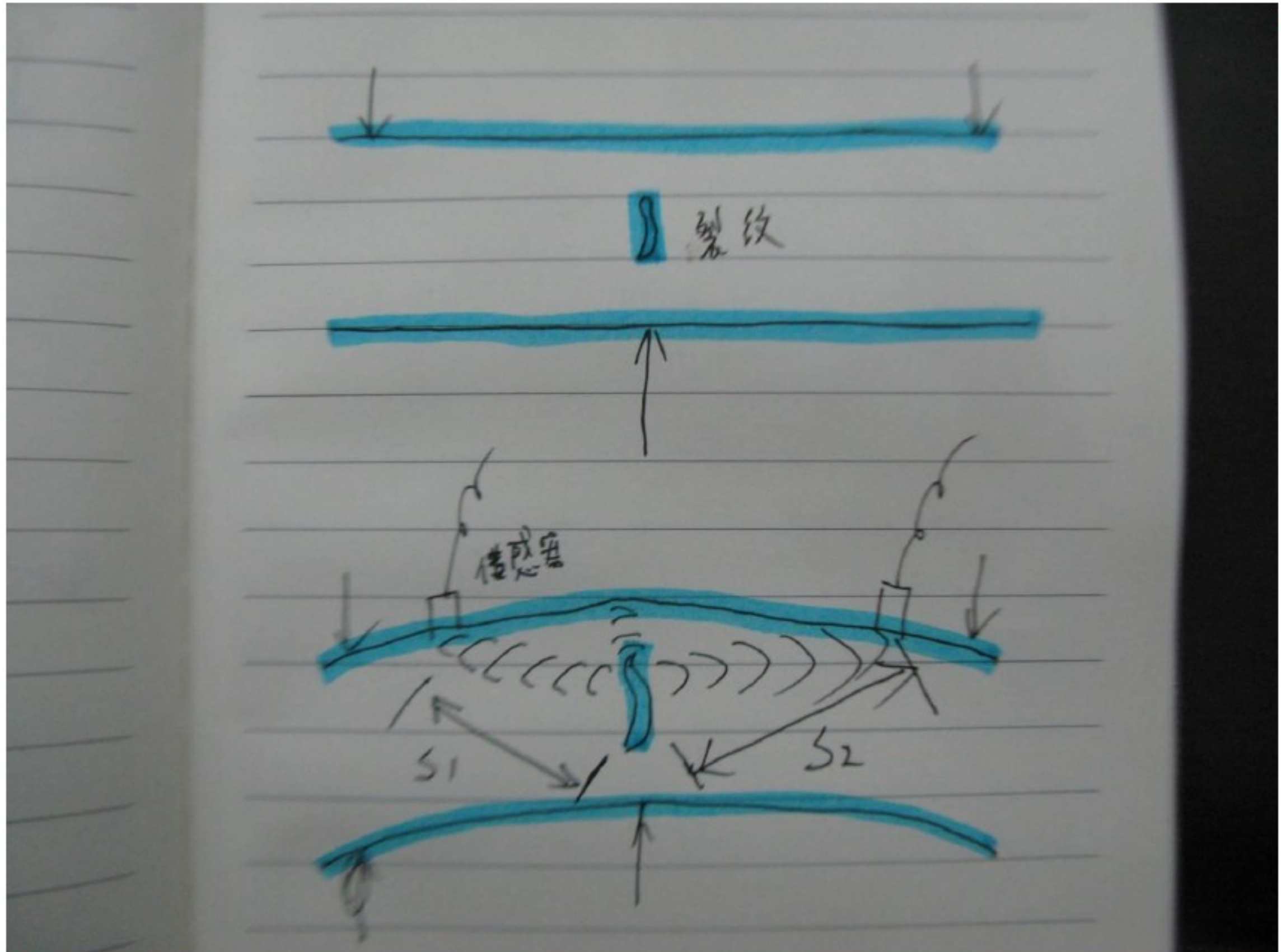




材料受外力或内力作用产生变形或断裂，以弹性波形式释放出应力应变能的现象称为声发射 (**Acoustic Emission**, 简称**AE**)，有时也称为应力波发射。

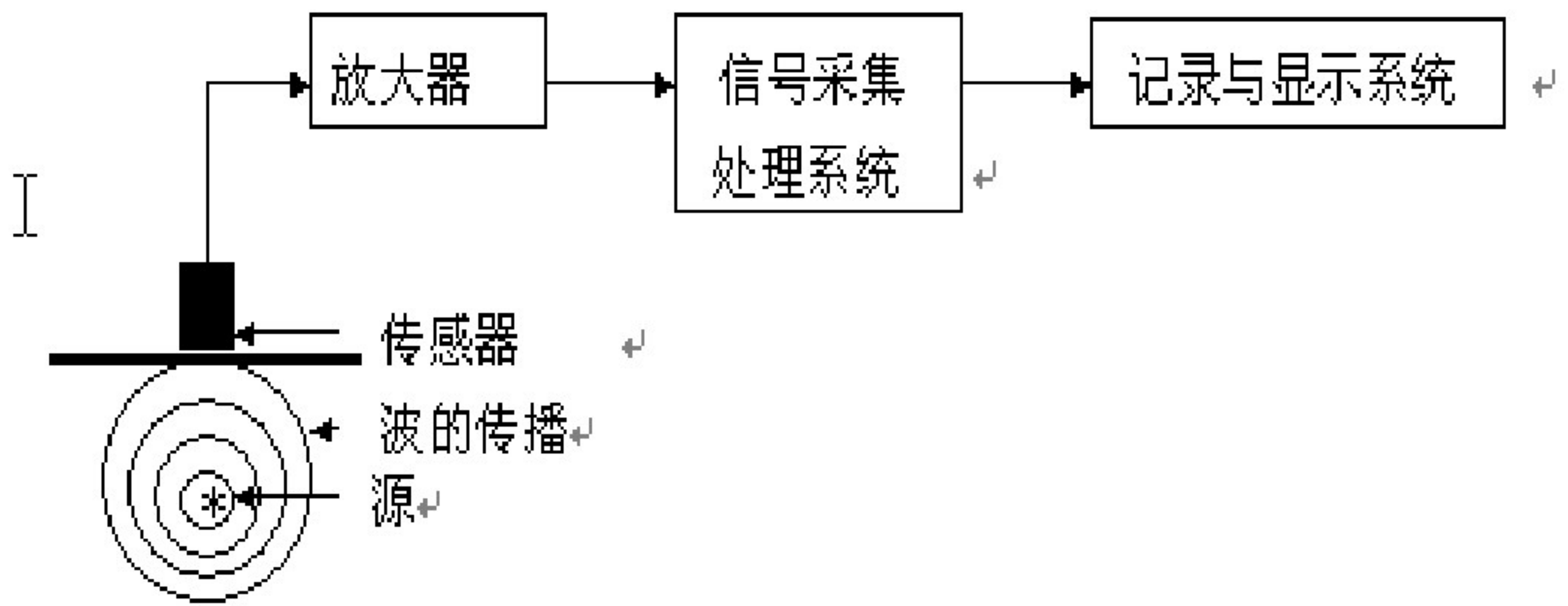


# 5.1 声发射检测概述





# 5.1 声发射检测概述



## 5.1 声发射检测概述

声发射对压力容器的检验可分为制造的验证试验、在用定期检验和运行过程中的在线监测，与其它常规无损检测方法，其优点主要表现为：

- (1) 声发射是一种动态检测方法；
- (2) 声发射检测方法对线性缺陷较为敏感，稳定的缺陷不产生声发射信号；
- (3) 在一次试验过程中，声发射检验能够整体探测和评价整个被监测结构中缺陷的活动状态；
- (4) 对于在用压力容器的定期检验，声发射检测方法可以缩短检验的停产时间或者不需要停产；
- (5) 对于压力容器的耐压试验，声发射检测方法可以预防由未知缺陷引起的灾难性失效和限定压力容器的最高工作压力。





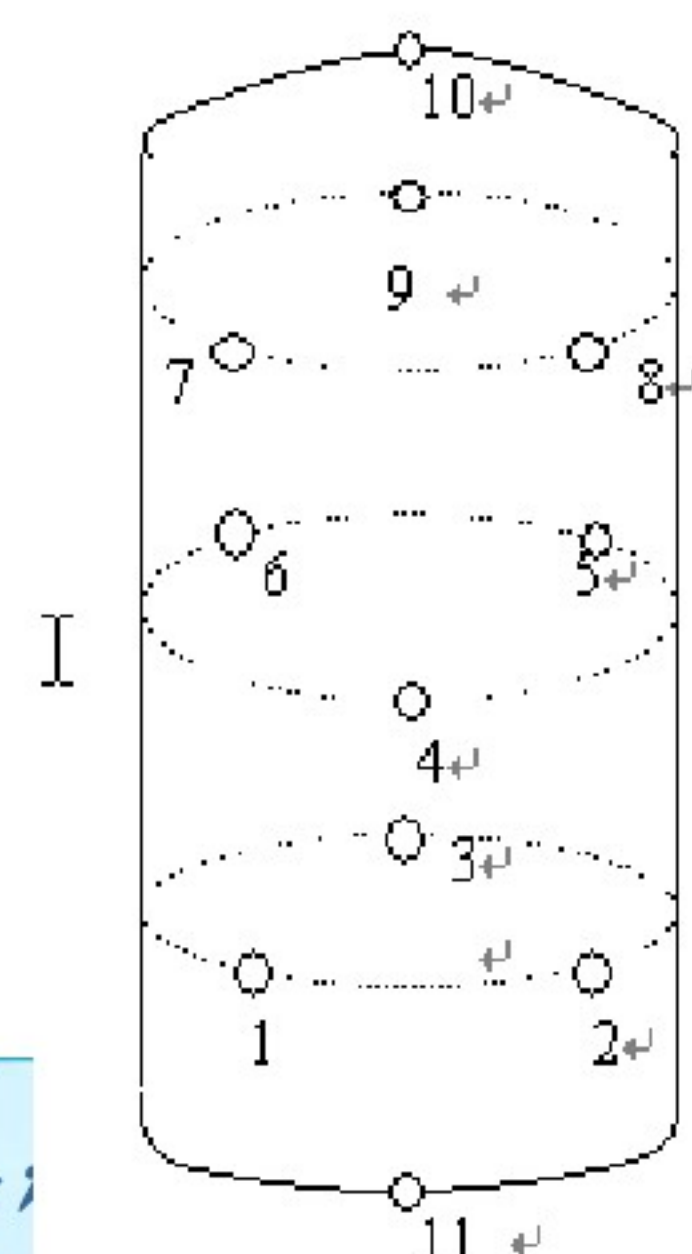
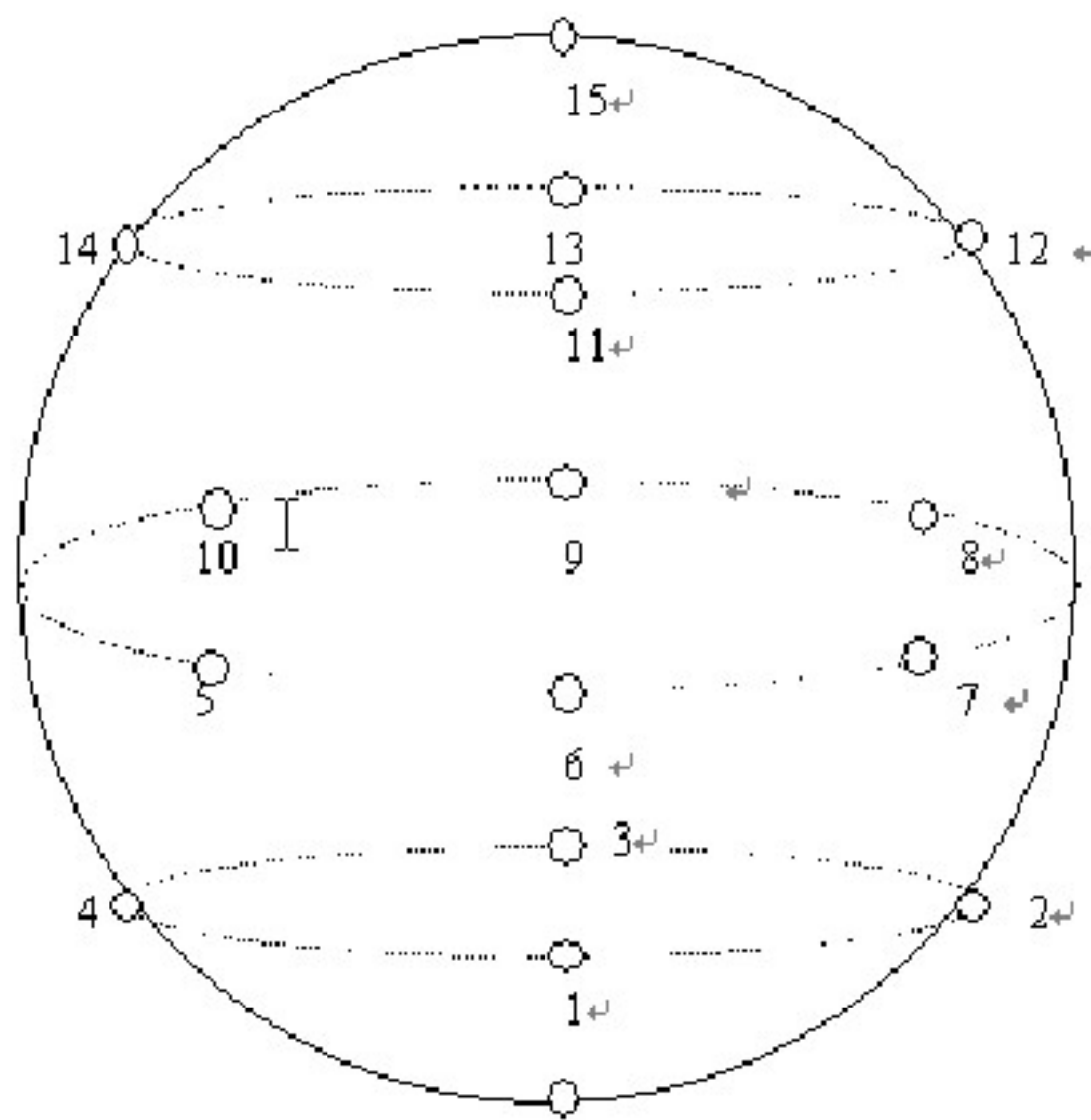
## 声发射应用场合

- (1) 承压设备运行状态下的安全监测（307罐裂纹监测）；
- (2) 大型球罐、加氢反应器等不开罐或不卸剂检验；
- (3) 超过设计寿命的承压设备延寿使用时整体安全状况评价；
- (4) 缺陷超标的活性监测（某液化石油气罐氢致开裂）；
- (5) 特殊结构承压设备的检验检测（缠绕式高压氢储罐检验）。



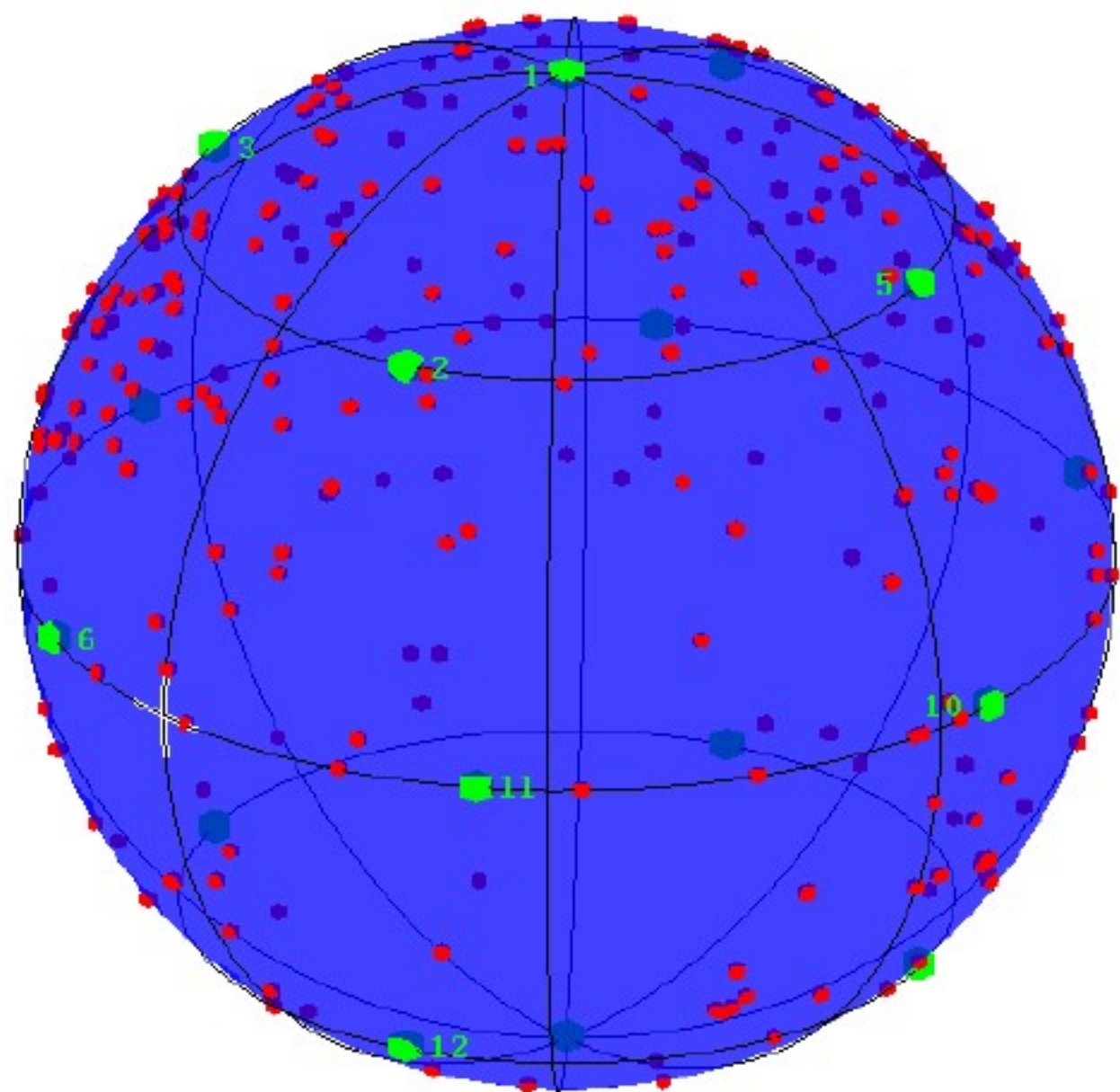
## 5.2 压力容器的声发射检测

压力容器的声发射检测通常采用多通道仪器进行。加载方式为水压试验，但最高试验压力可根据容器的最高使用压力来确定，不一定达到设计图纸规定的最高试验压力。如首次加压分散性信号过多，须进行第二次加压试验，以发现活性缺陷

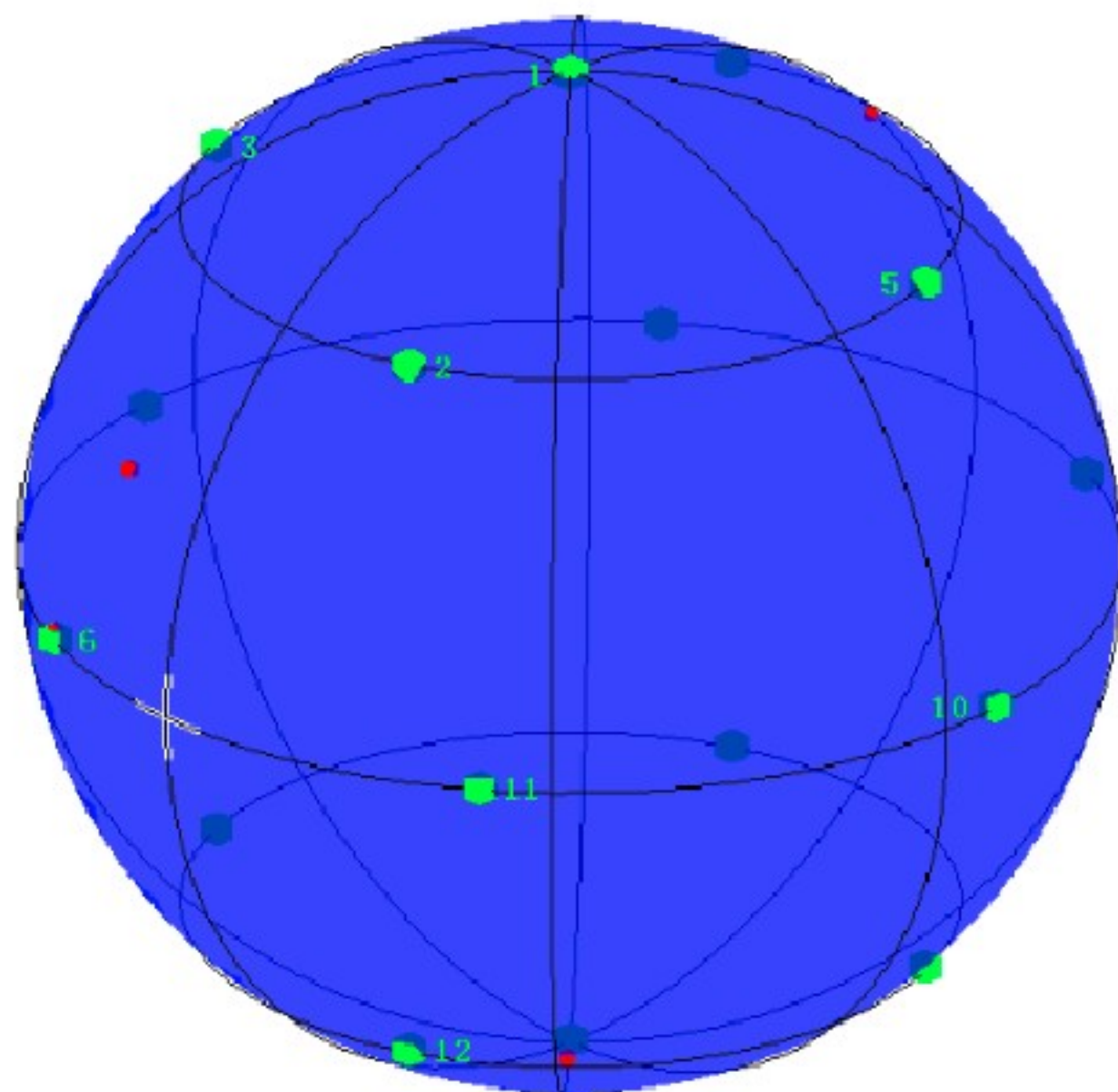




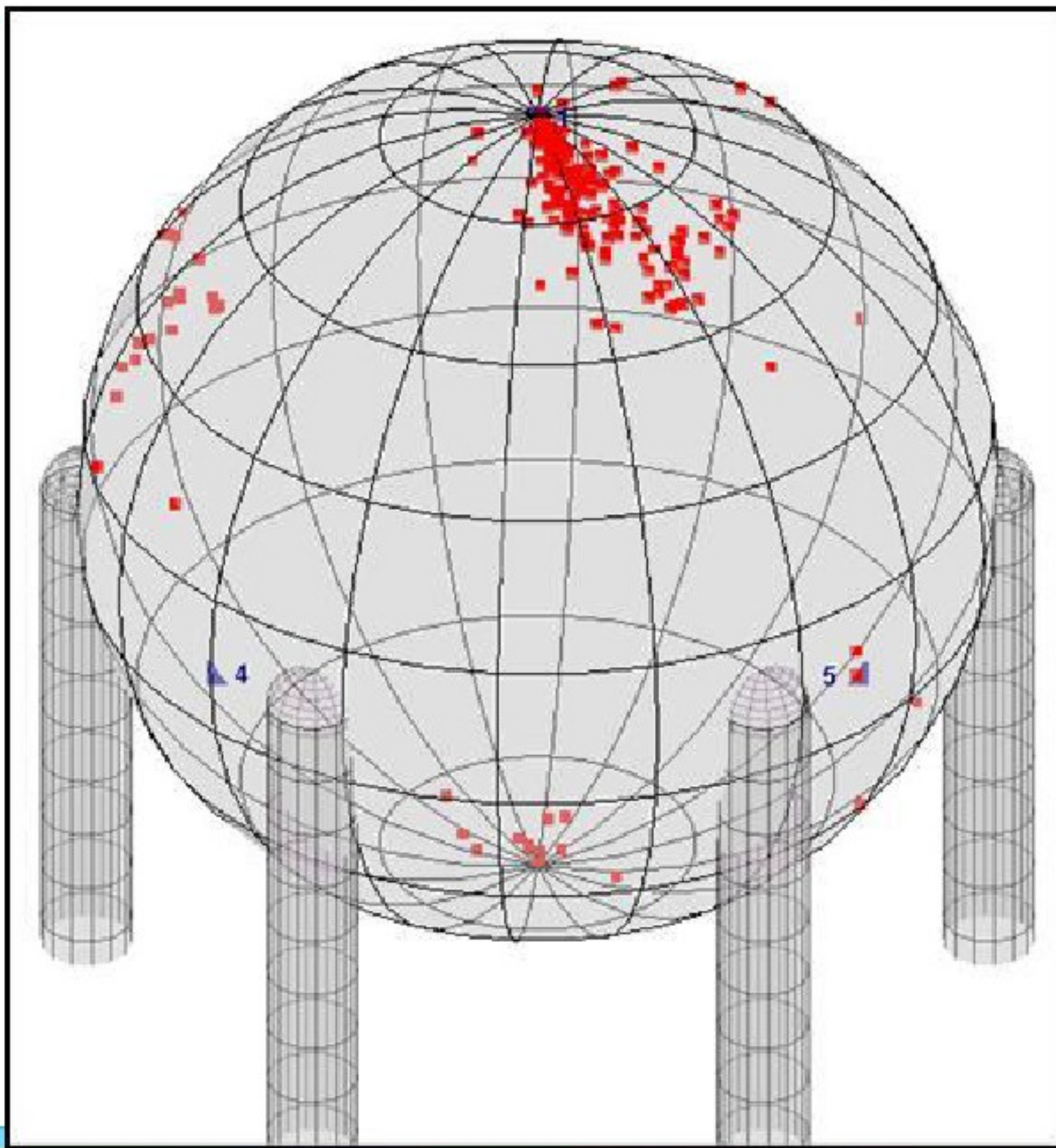
球<所有通道>定位[1]



球<所有通道>定位[1]



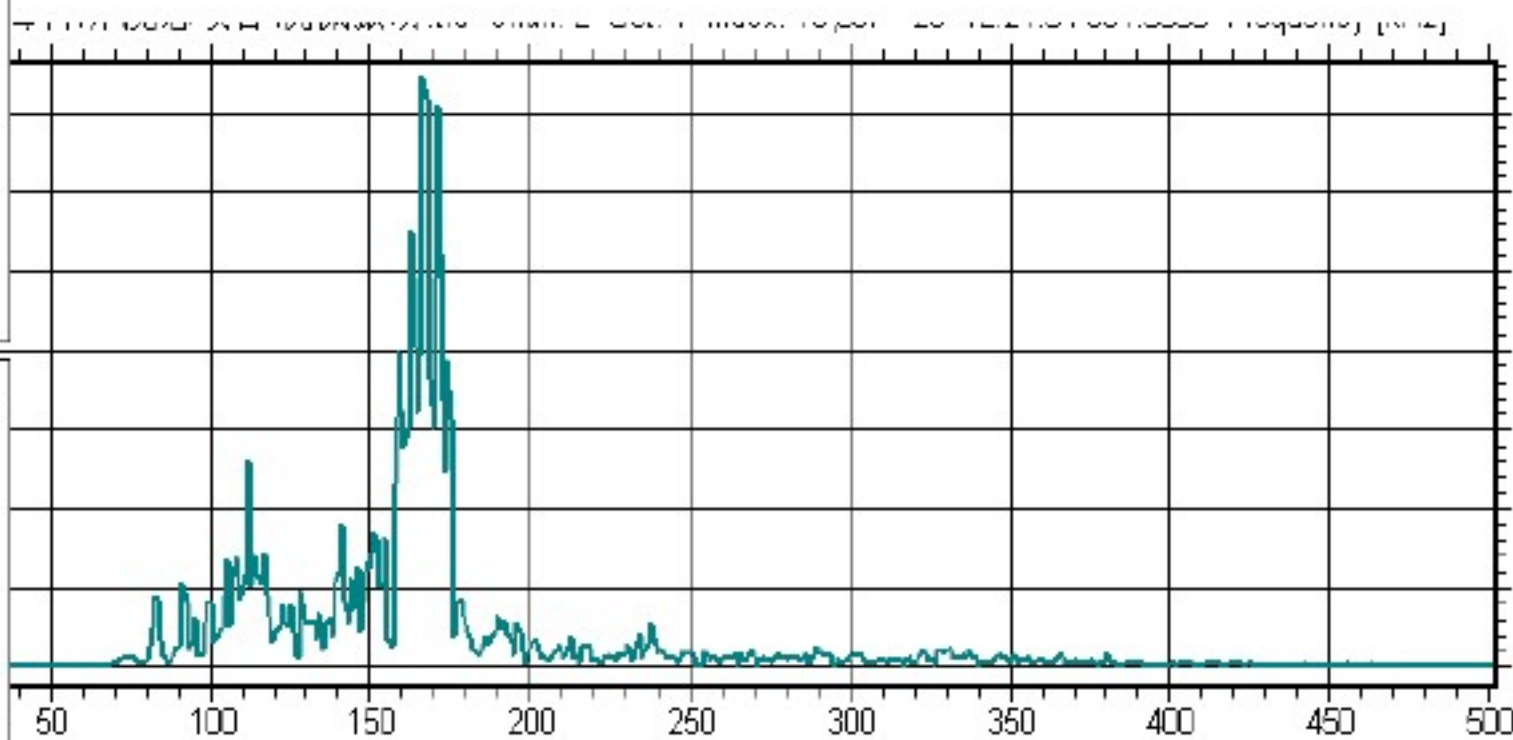
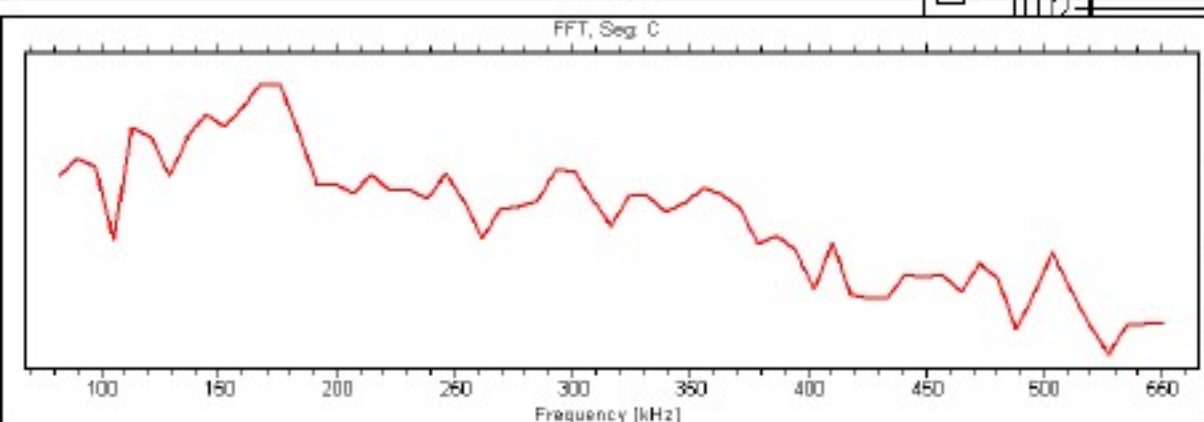
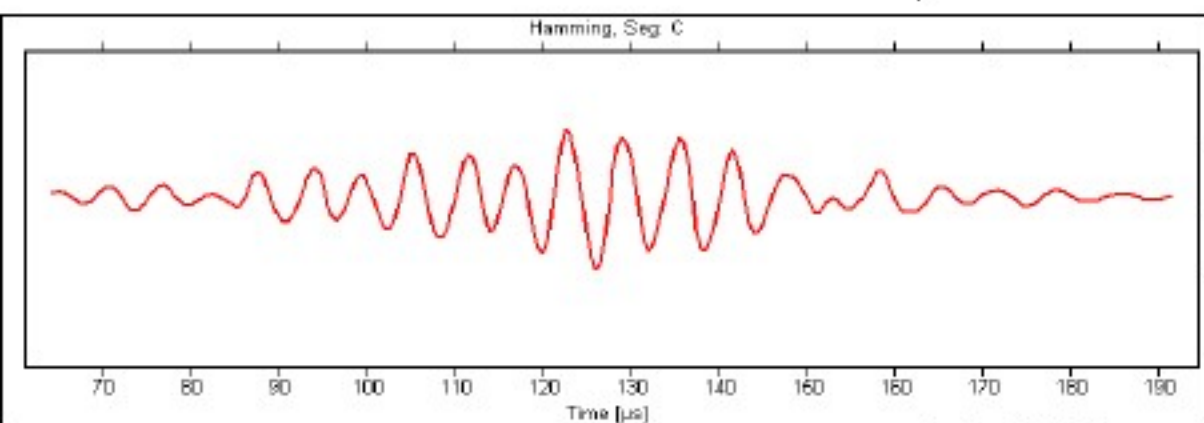
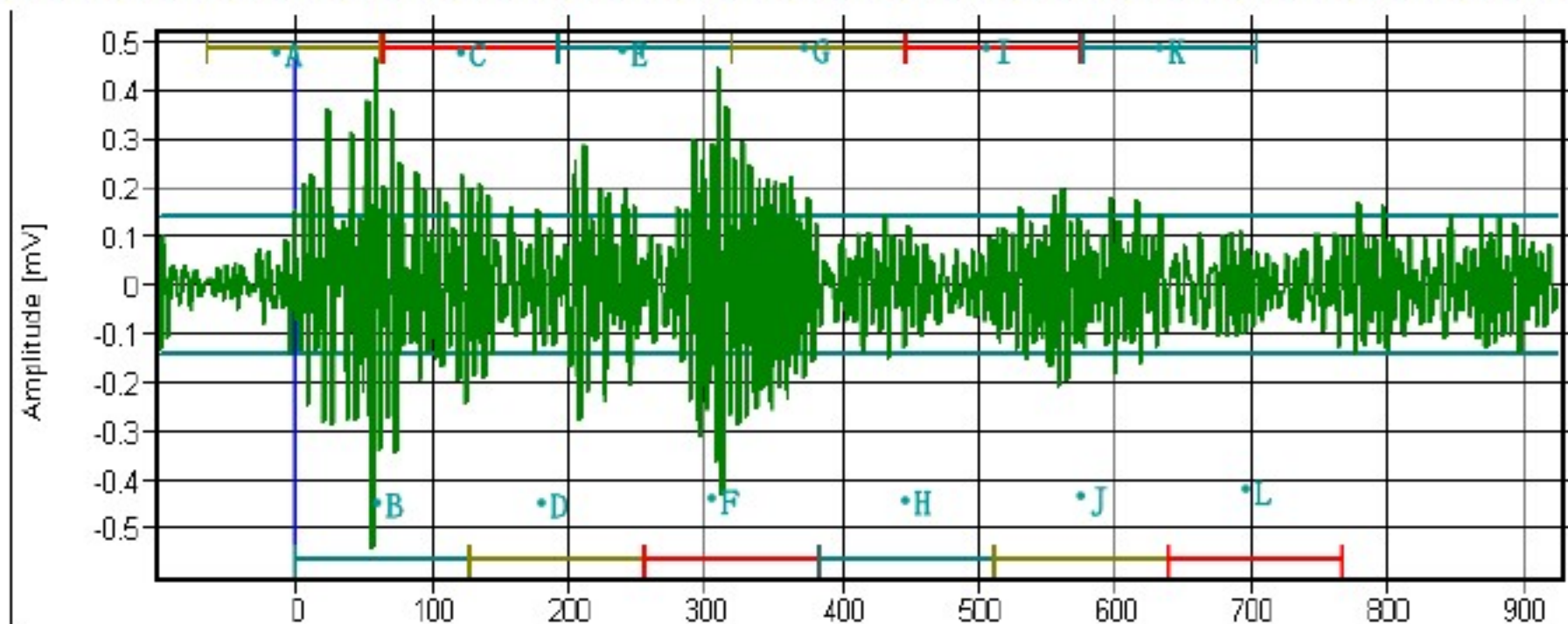
## 5.2 压力容器的声发射检测





# 压力容器的声发射检测

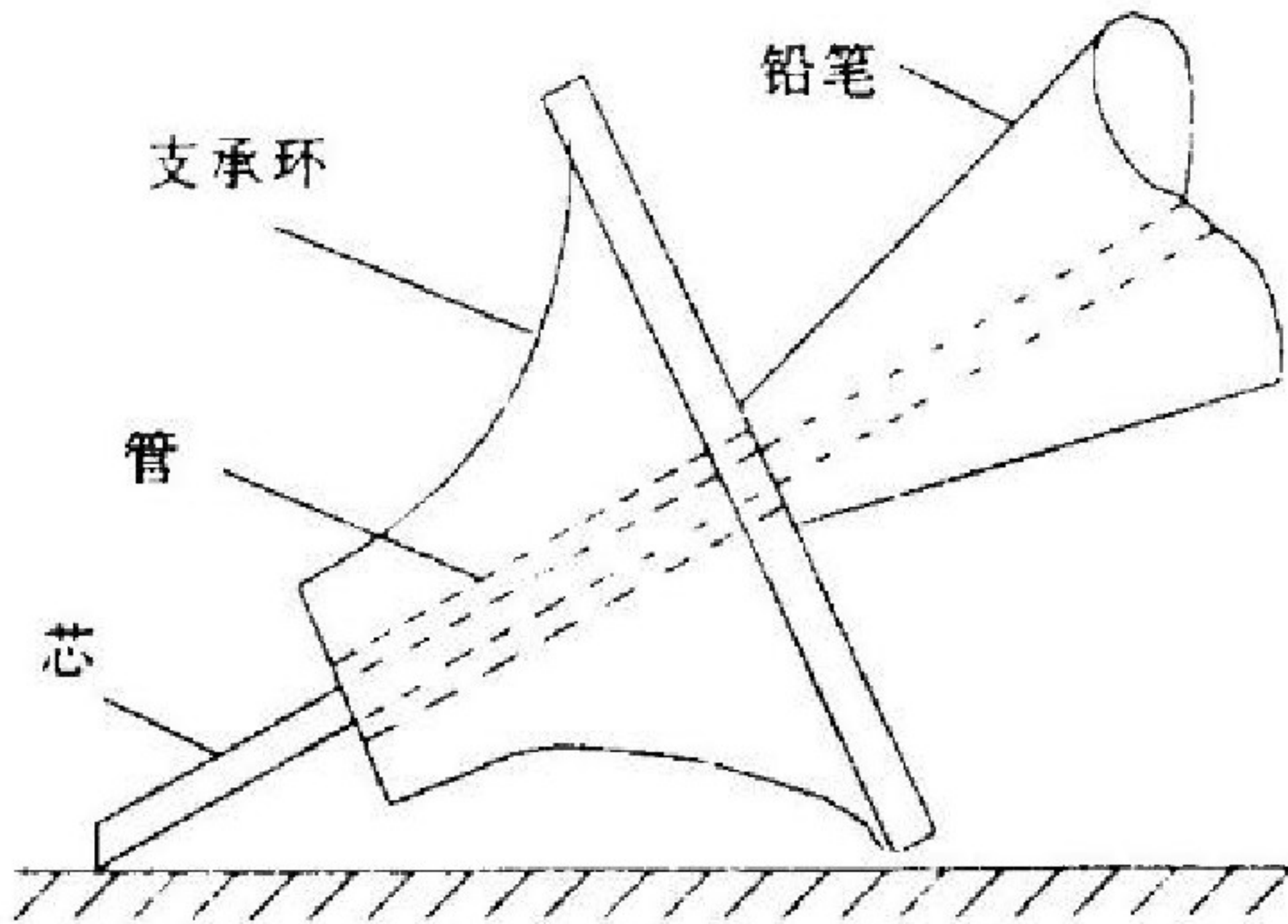
- 波形信号的前处理
- 波形信号的基本特征提取



• 机械振动信号的短时傅立叶分析

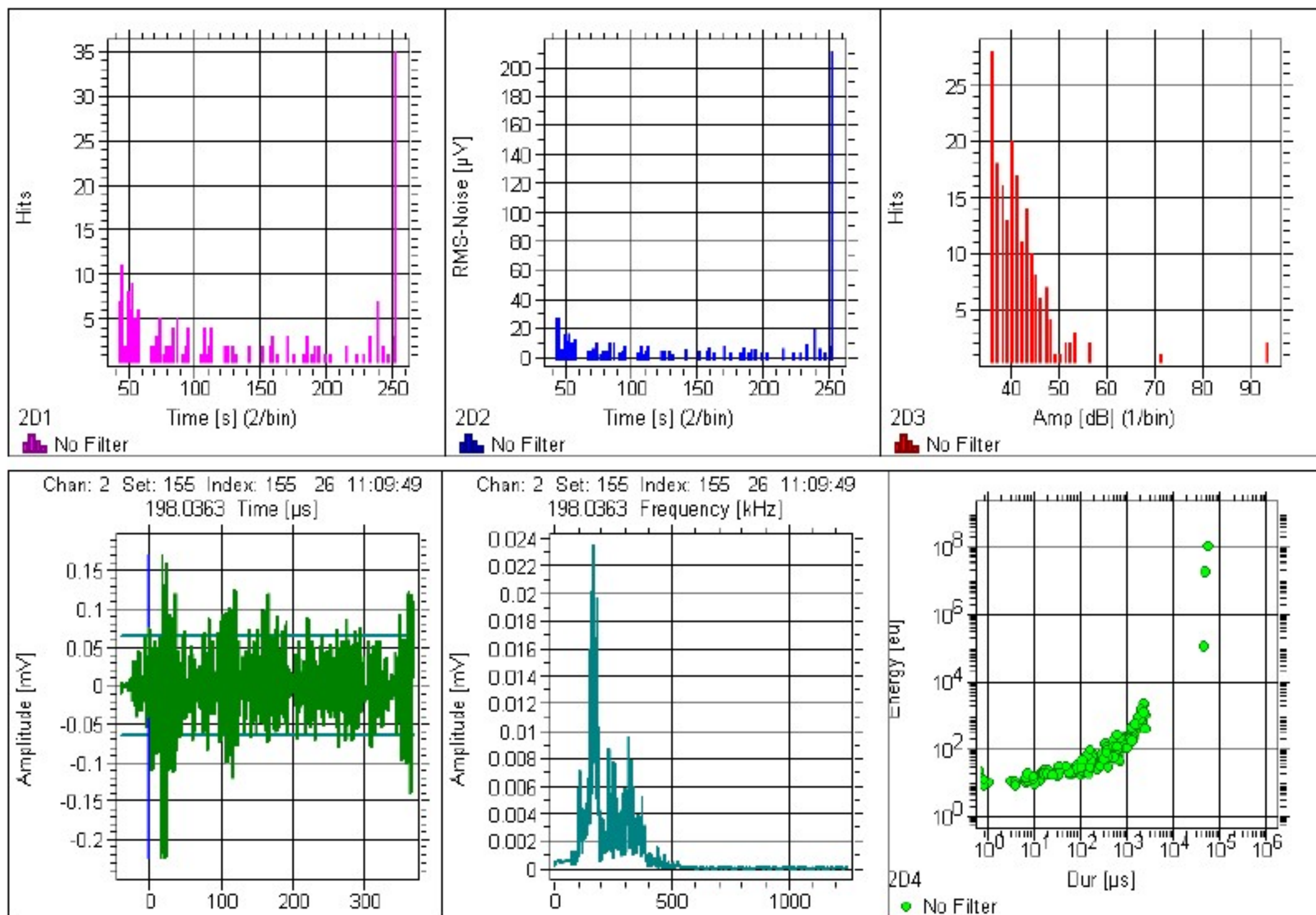


# 声发射在线监测及缺陷识别



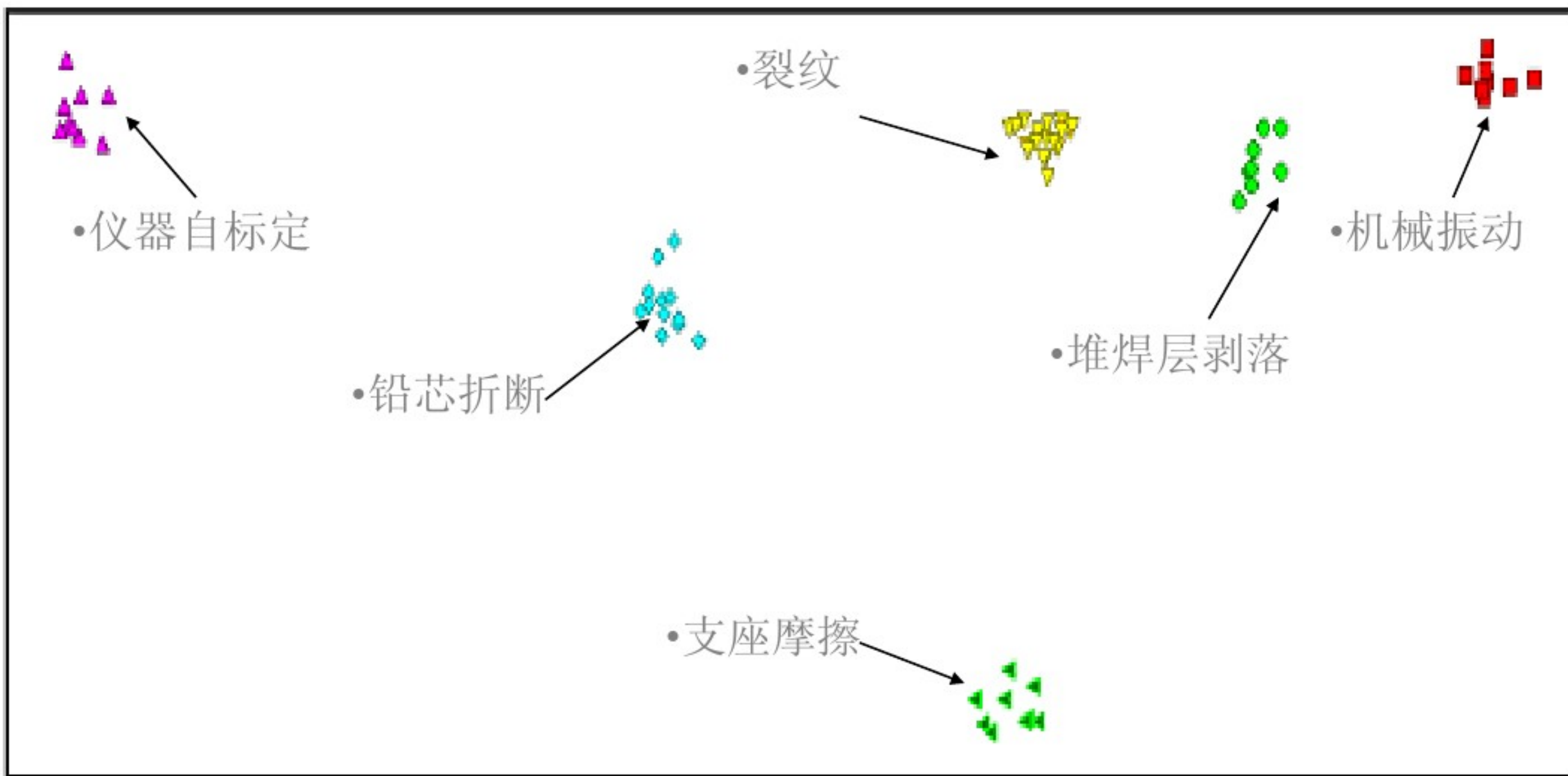


# 声发射在线检测



•450 $^{\circ}$ C下保温半小时后，2-1/4Cr1Mo母材在拉伸过程中的声发射信号特征

# 声发射在线监测及缺陷识别



• 训练声发射的聚类结果





### 压力容器在线声发射检测：

(1) 将容器的工作压力调整到工艺所允许的最低工作压力，然后采用工作介质逐步提高容器的工作压力并同时进行声发射检测，直到介质的压力达到工艺所允许的最高工作压力；

(2) 对采集到的声发射信号进行分析和解释，如存在活性缺陷的信号，应给出其具体部位，如可以采用常规无损检测方法复验，则应进行磁粉和超声波探伤复验，如不能进行复验，则可以根据出现声发射信号的压力给出容器可以使用的安全工作压力，并确定下次进行声发射监测的时间。



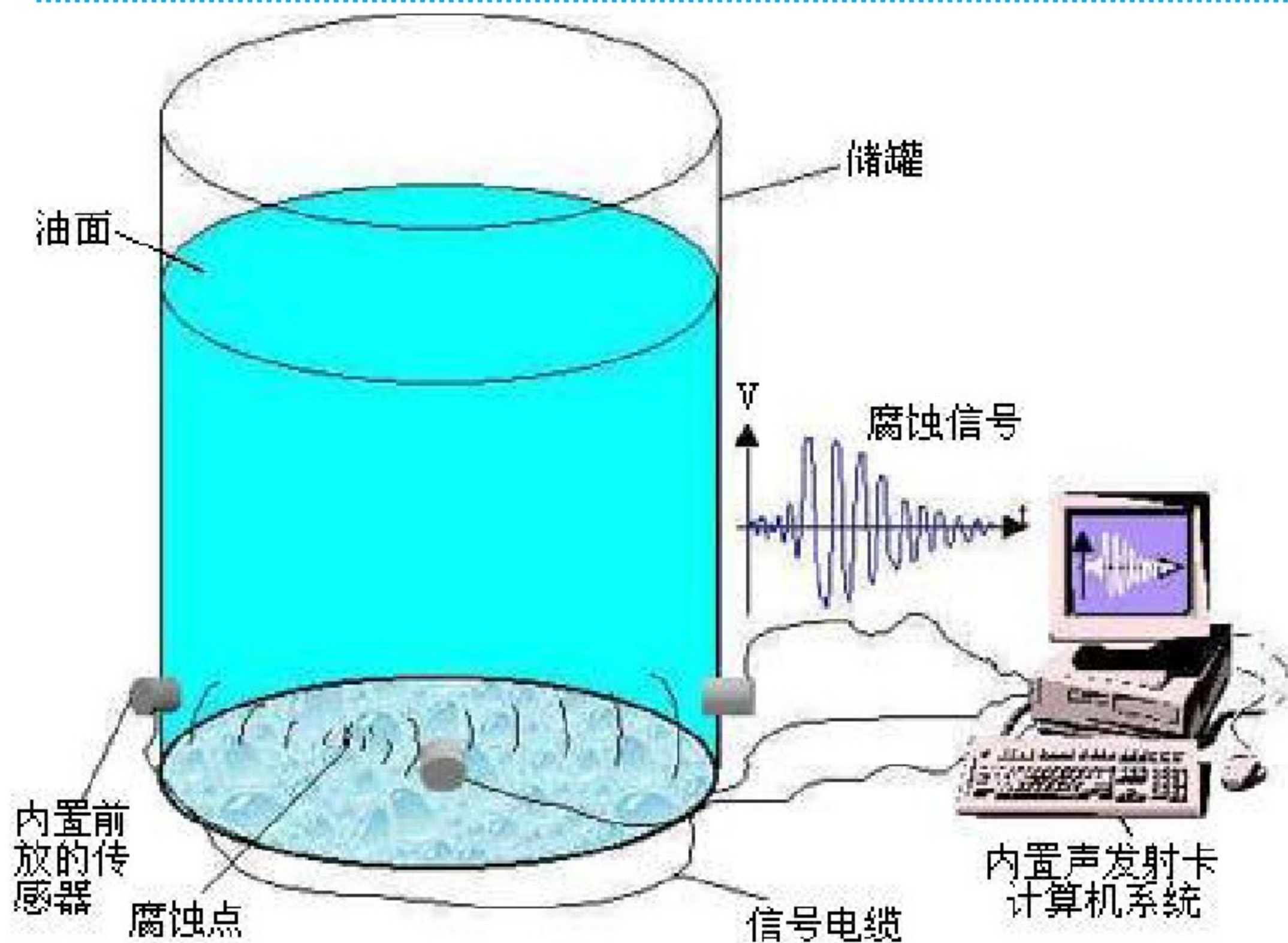


- 大型储油罐是广泛用于石油、化工、航空、港口等行业生产的重要设备；
- 近些年来，泄漏事故时有发生，损失惨重，破坏环境，威胁人民生命财产；
- 我国对在用的储罐缺少有效的检验检测技术和科学的安全评价方法；
- 目前采用的检验检测技术成本高、耗时长、盲目性强；
- 利用声发射技术可在不停产情况下对罐底板腐蚀状况和泄漏进行检测与综合评价。





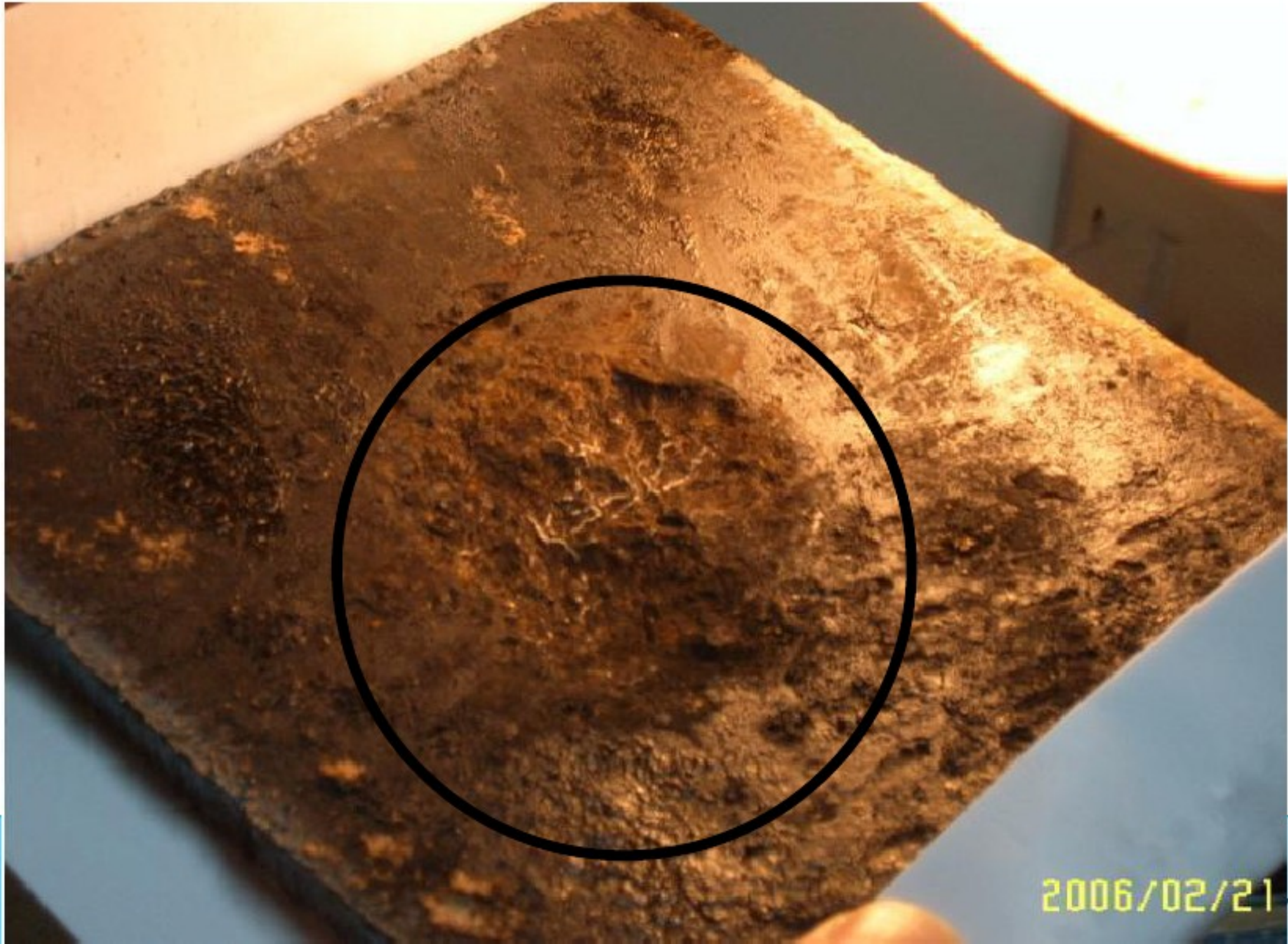
# 储罐罐底板声发射检测





## •5.3 大型常压储罐声发射在线检测

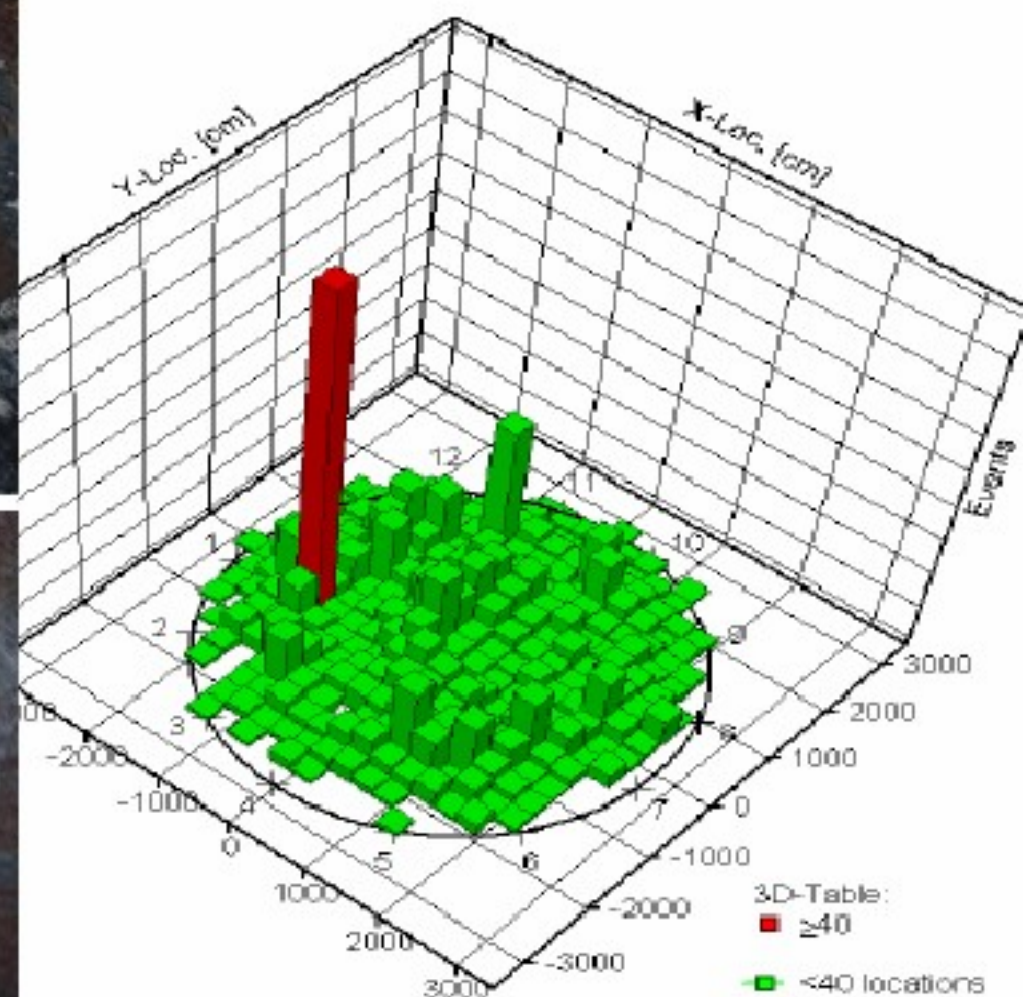
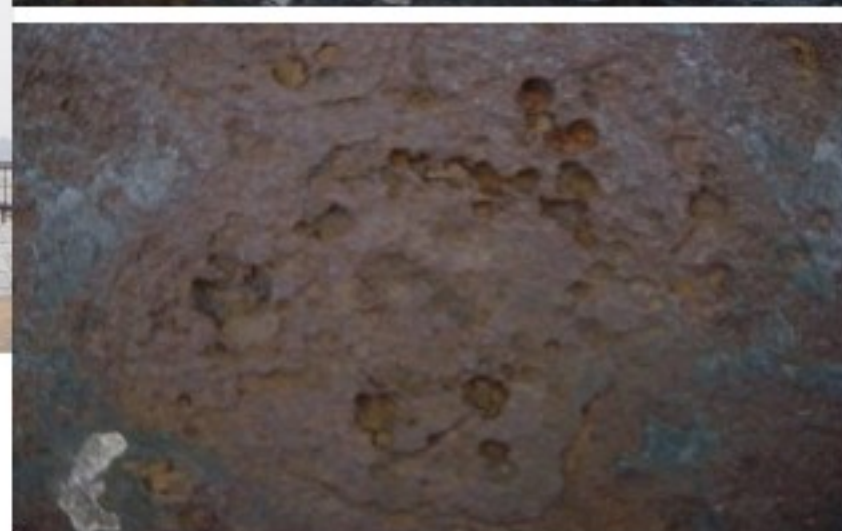
### 典型的底板腐蚀图



2006/02/21



## 5.3 大型常压储罐声发射在线检测



- 20000m<sup>3</sup>原油罐

• 声发射在线检测级别:D级

• 罐底板声源定位图

• 离线检测结果: 腐蚀严重

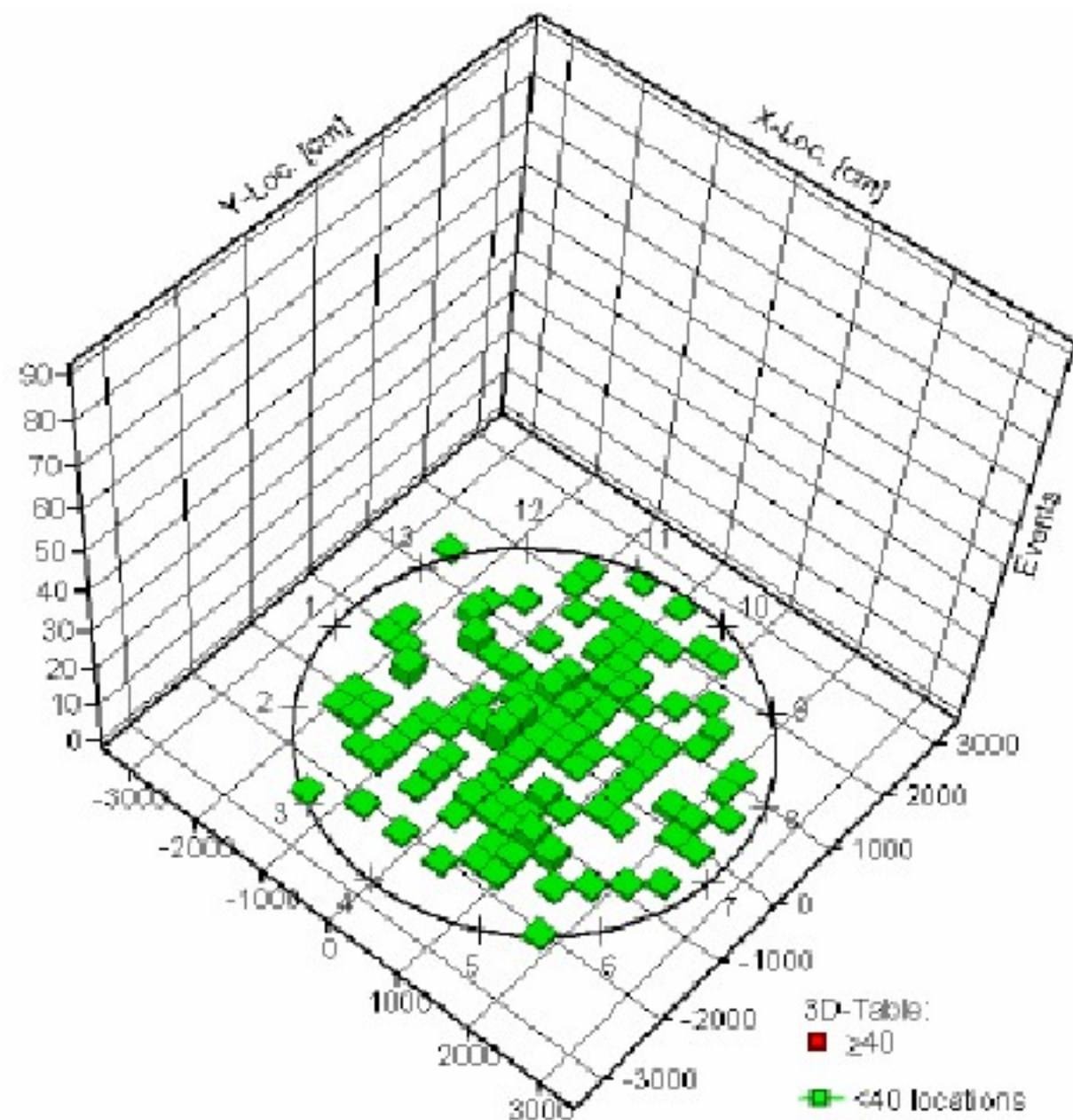


# 5.3 大型常压储罐声发射在线检测



• 10000m<sup>3</sup>原油罐

- 声学在线检测级别B,
- 离线检测结果: 腐蚀轻微



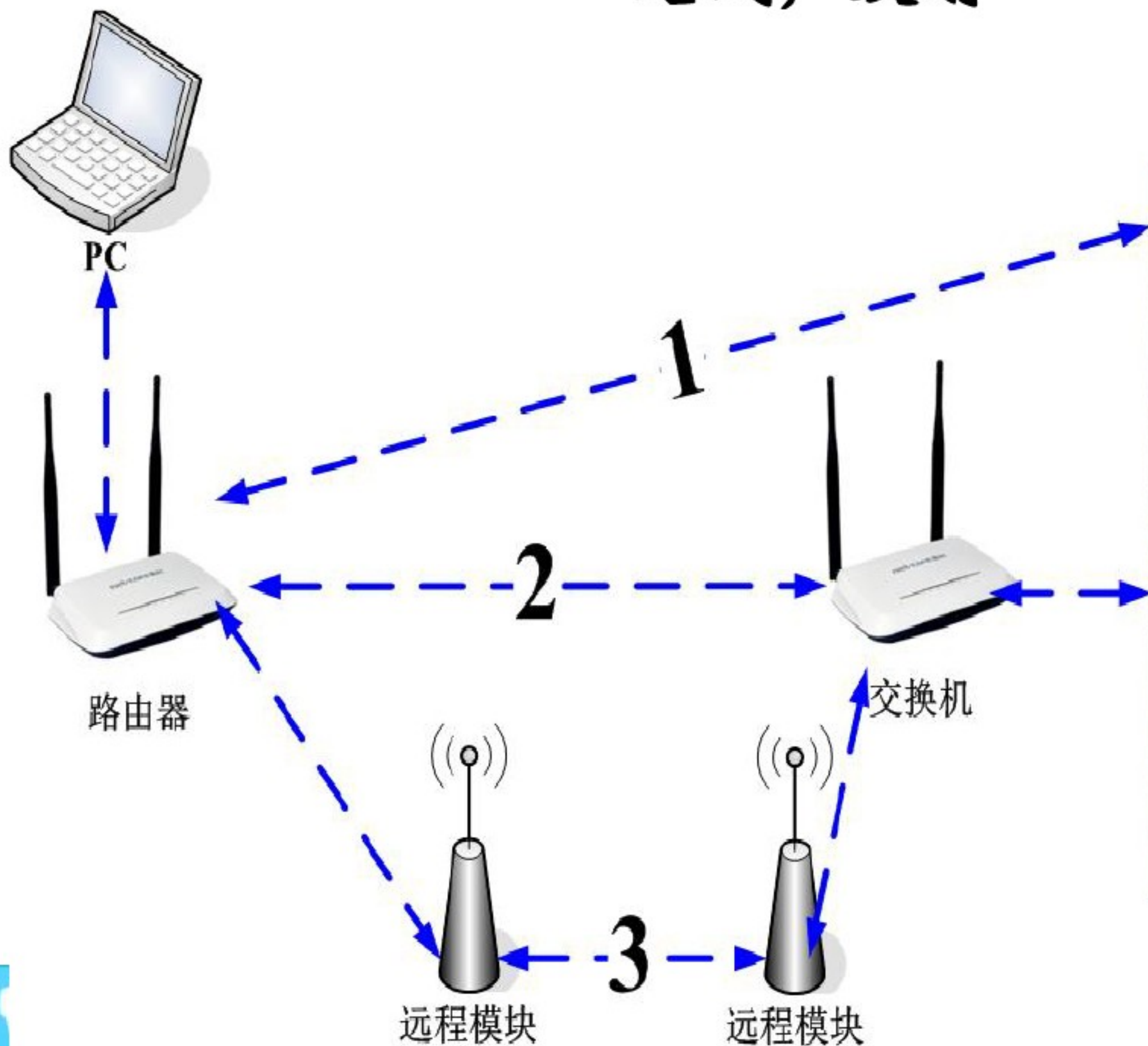
中国储油罐罐底声源定位图







# 无线声发射



无线采集模块  
(传感器+采集卡+GPS)



# 16通道无线声发射仪及工作原理





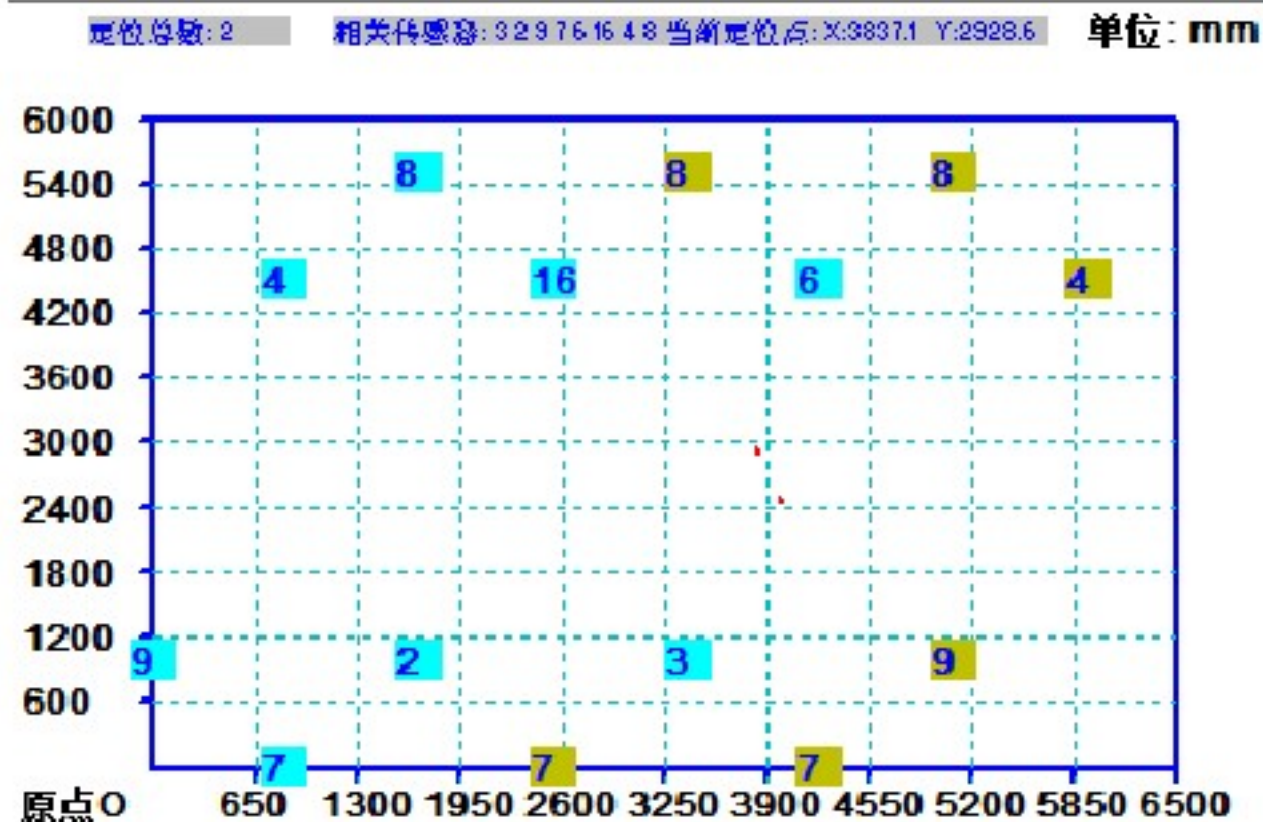
# 仪器的主要工作指标

测试项目	部分考核指标	新仪器实现指标
声发射信号通道的实时参数采集、实时定位、关联、统计等分析与显示	支持1~16个	支持1~16个
无线传输距离	≥300，无障碍物	≥2000米，无障碍物
输入滤波器	可选带通、低通、高通	可选带通、低通、高通、带阻
实时显示时间	≤10s	≤2s
定位精度	声发射探头间距的10%， 最小为0.5米	当最大探头间距为4.5米时，定位误差为0.3米。
波形采集	无	具有实时采集、傅里叶变换和波形重构功能
参数传输率	无	实测：9657撞击/秒
波形传输率	无	实测：467.3K字节/秒
自标定功能	无	有
波形分析功能	无	原波形回放、傅里叶变换、波形重构、小波分析和人工神经网络模式识别功能





# 定位精度测试



经现场断铅测试，当最大探头间距  
为4.5米时，定位误差为0.3米





# 含缺陷压力容器的无线声发射检测





# 含缺陷压力容器的无线声发射检测

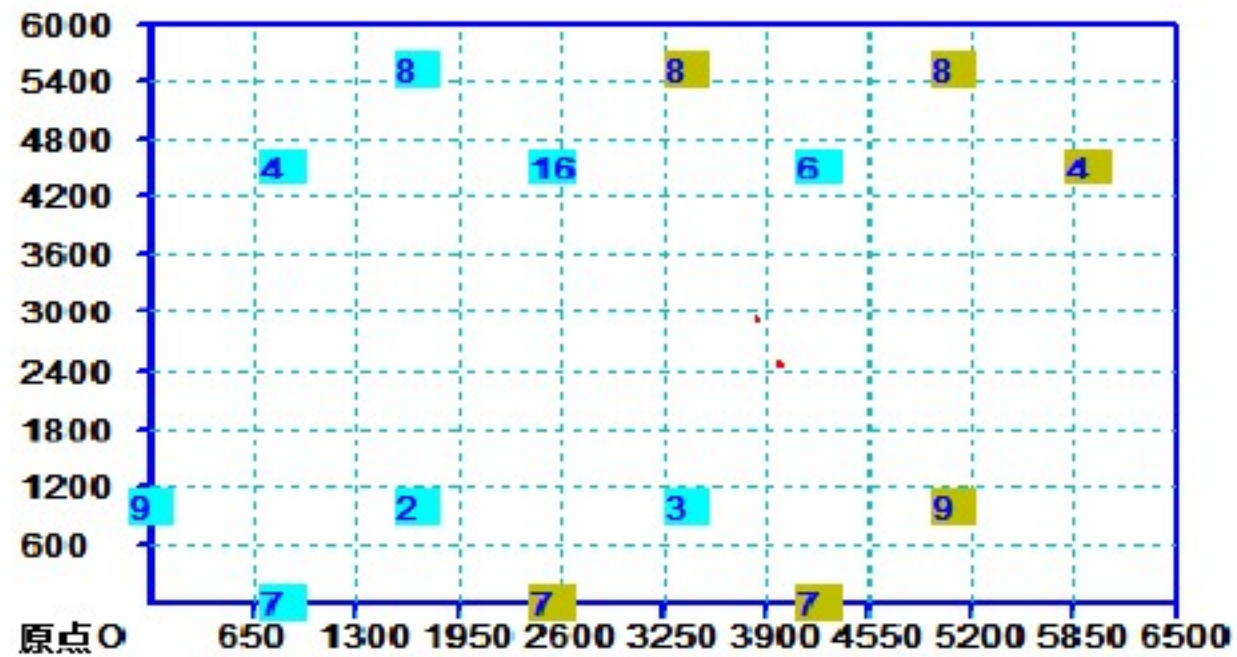




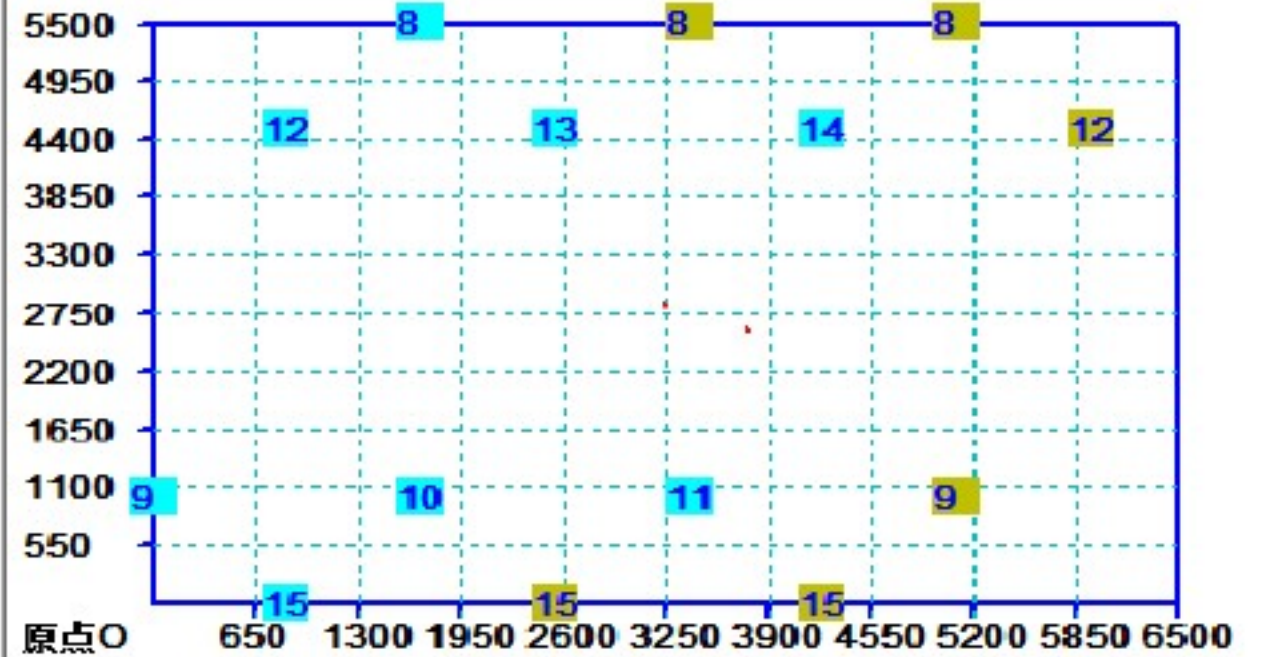
# 定位源校准



定位总数: 2 相关传感器: 3 2 9 7 6 16 4 8 当前定位点: X:3837.1 Y:2928.6 单位: mm



定位总数: 2 相关传感器: 11 10 9 13 14 12 当前定位点: X:3755.8 Y:2583.0 单位: mm





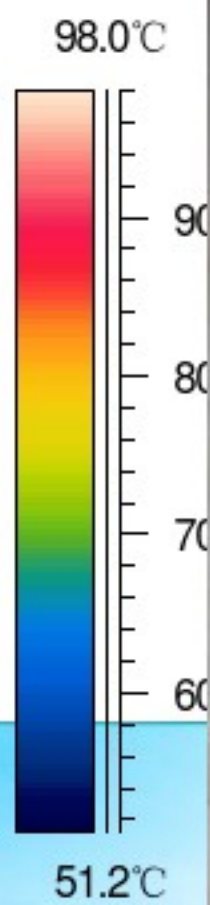
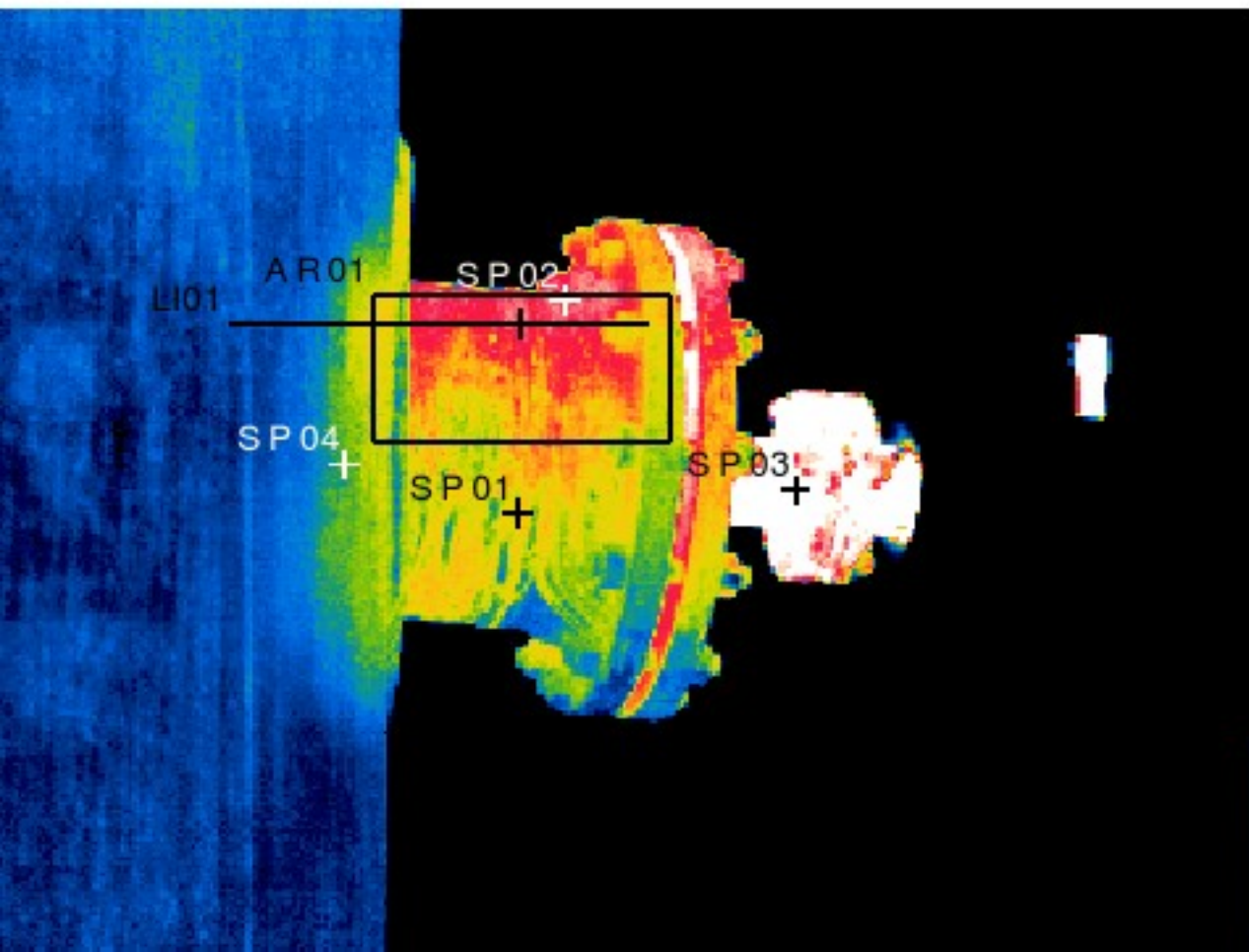
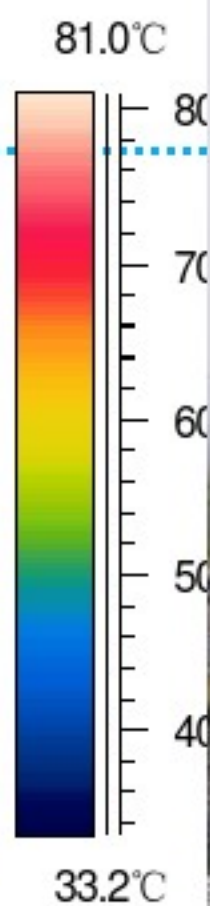
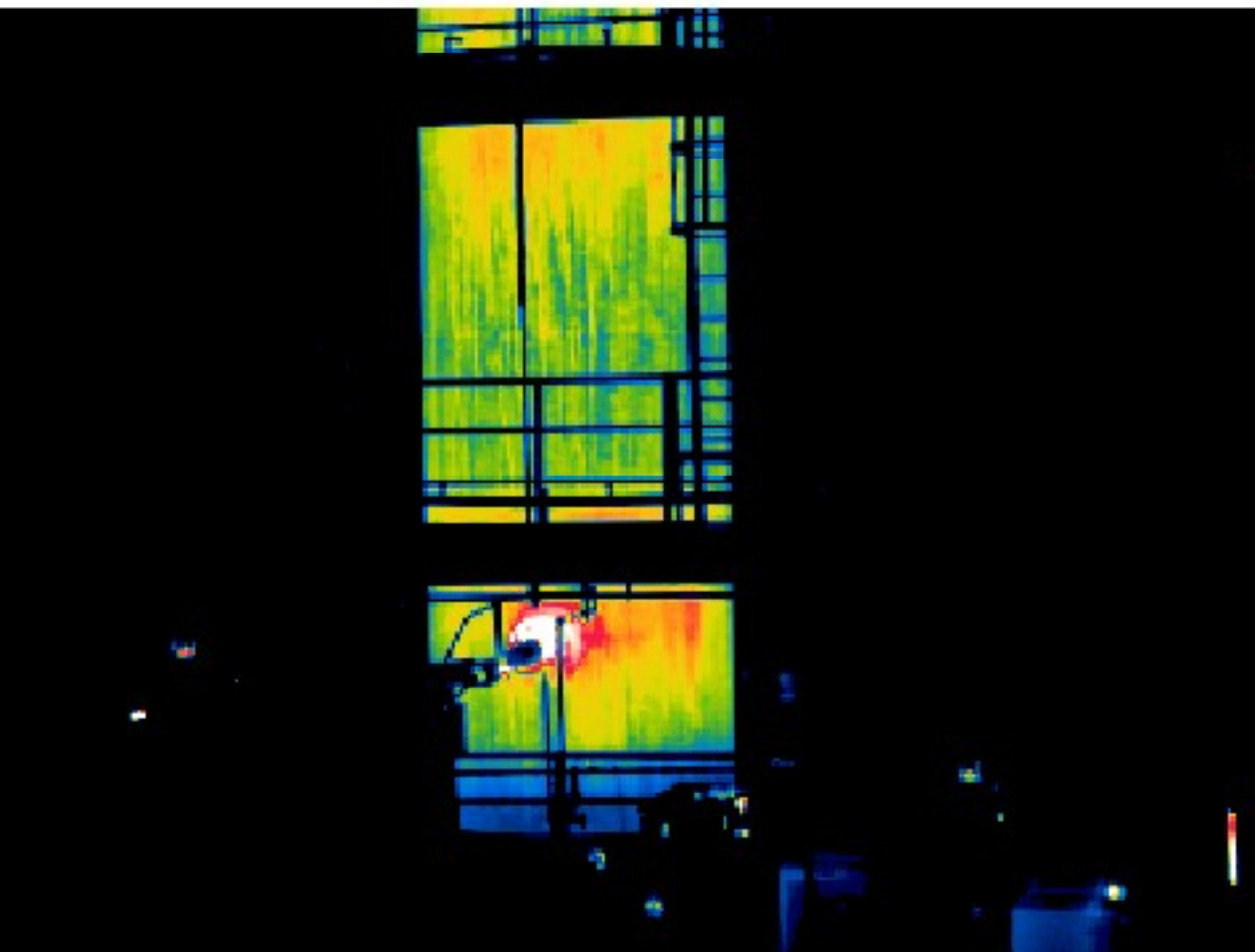
## 高温压力容器的红外热成像检测技术



石化厂有许多设备在高温高压下运行，有时会出现内部保温层开裂、脱落，高温管道的结焦、过烧或堵塞等问题，采用红外热成像检测技术可以对这些问题进行在线检测和诊断。









## 7.1 压力管道腐蚀的漏磁检测技术

## 7.2 大型常压储罐底板腐蚀的漏磁检测技术

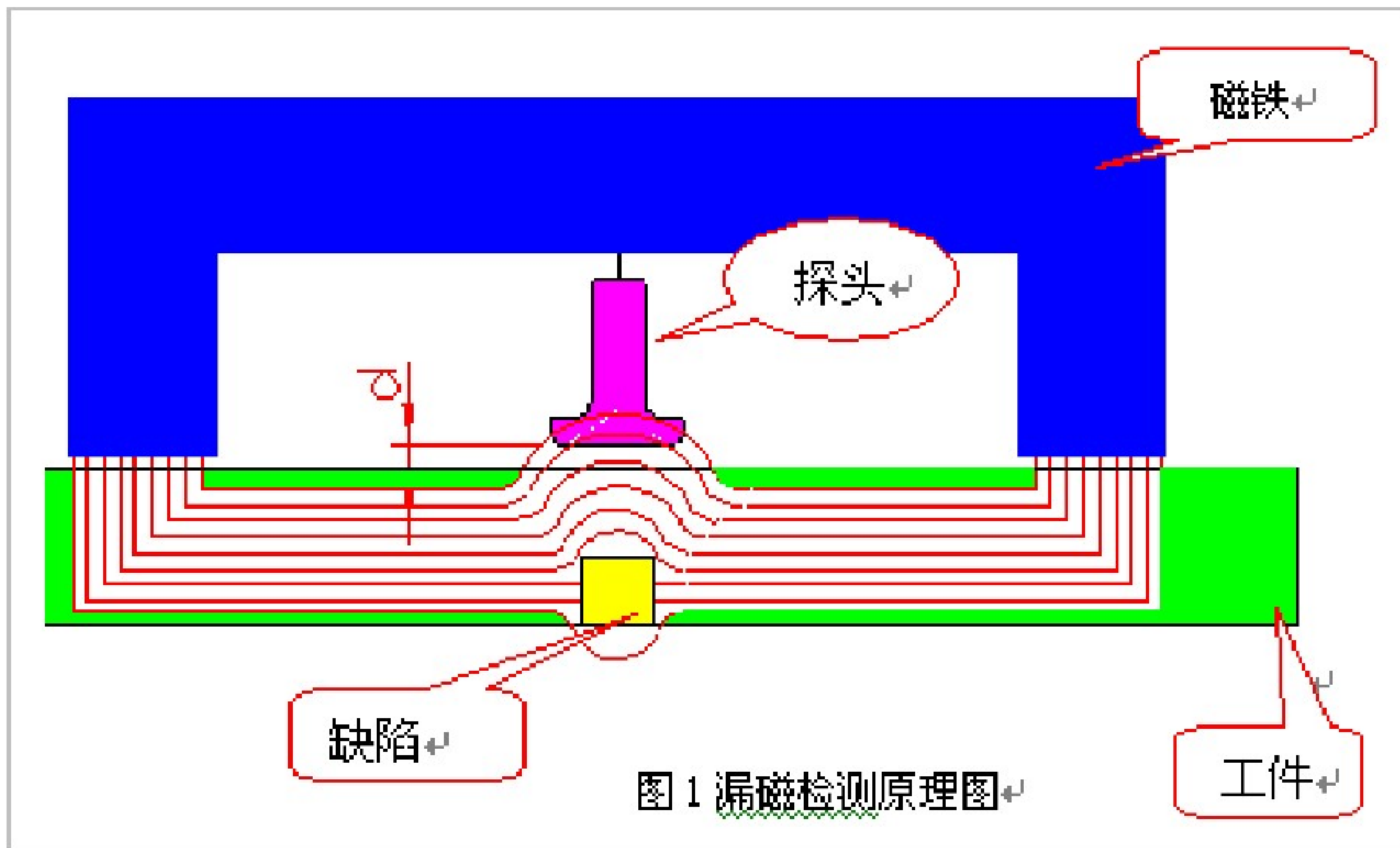




- 漏磁检测 (MFL) 在西方发达国家已被广泛应用于铁磁性板材和管材的坑状腐蚀检测。
- MFL的基本原理是采用永久磁铁在板材或管壁上产生强的感应磁场。若板材或管壁存在腐蚀缺陷，在其相应的表面形成漏磁场。通过在磁极之间放置一排探头（霍尔元件或线圈）探测该漏磁场，漏磁场的大小与腐蚀坑的深度和面积有关，通过对漏磁场信号的分析 and 处理，即可得到腐蚀坑的深度。

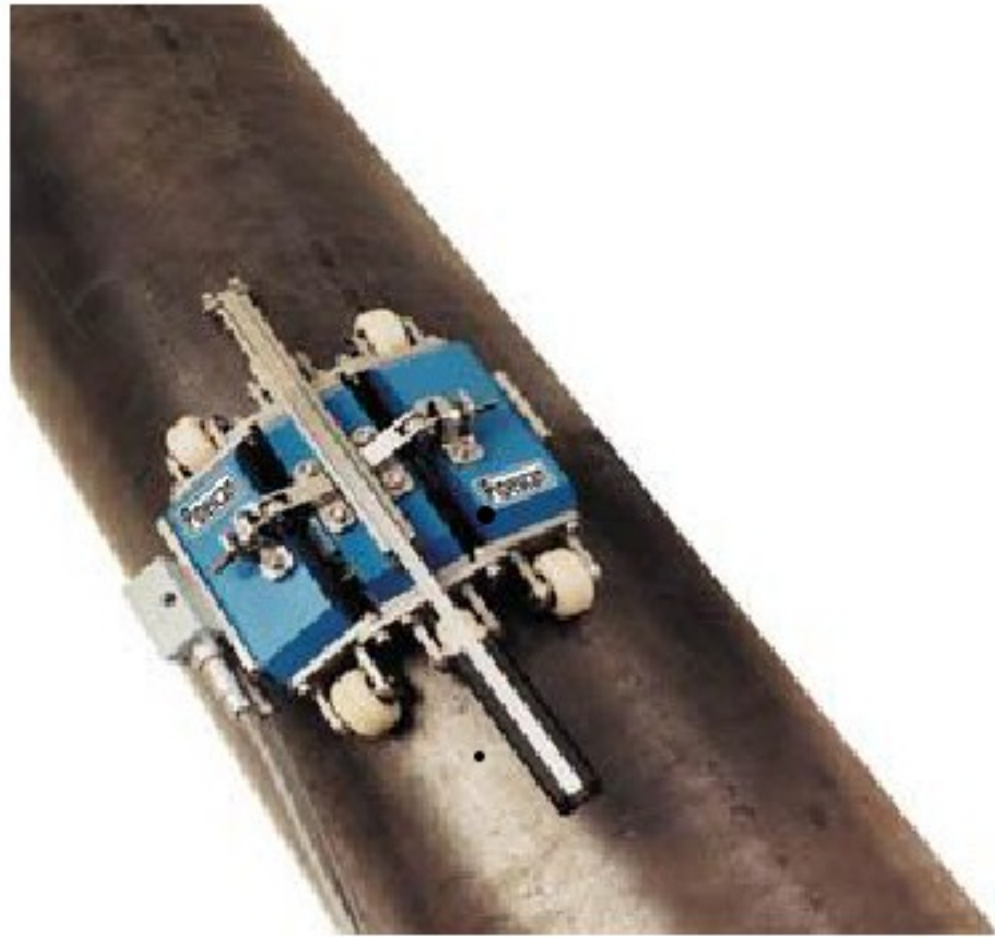


# 7.1 压力管道腐蚀的漏磁检测技术





# 7.1 压力管道腐蚀的漏磁检测技术



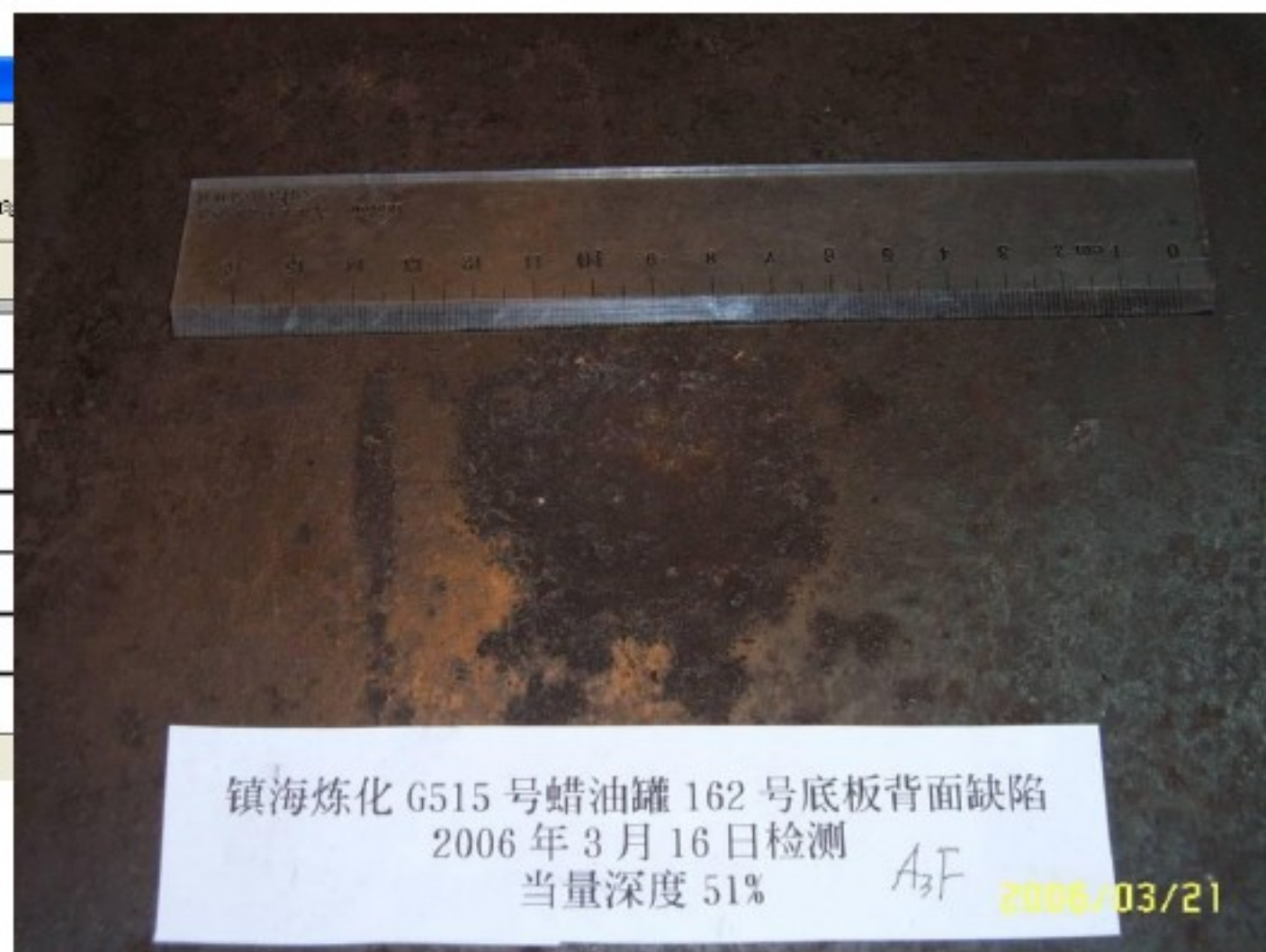
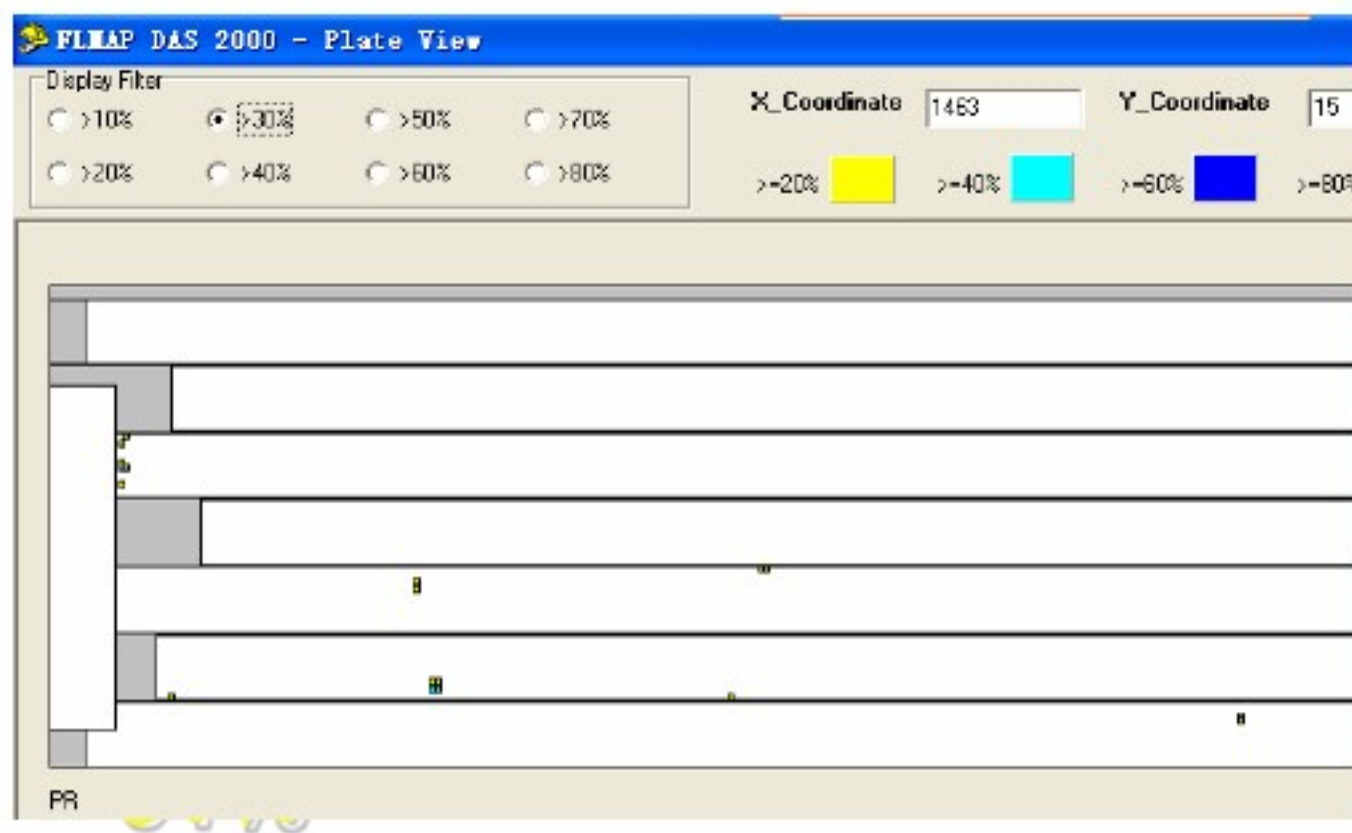






# 7.2 大型常压储罐底板腐蚀的漏磁检测技术

## 大型储罐底板腐蚀漏磁扫描检测应用： 对储罐的检测应用和割板验证实验



# 8 金属磁记忆检测技术



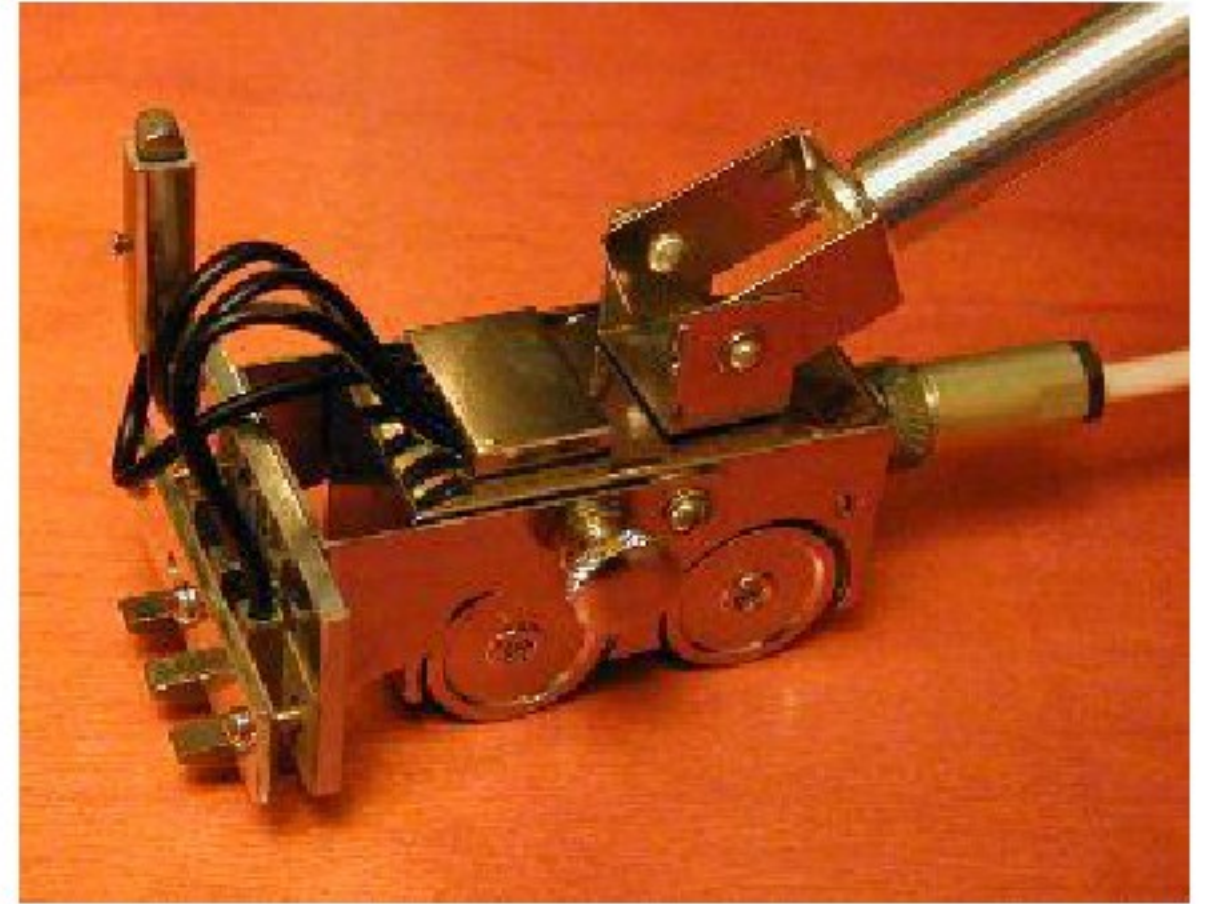


- 金属磁记忆检测（MMMT）技术是是俄罗斯杜波夫教授于20世纪90年代初提出于90年代后期发展起来的一种检测材料应力集中和疲劳损伤的新的无损检测与诊断方法。
- MMMT的原理是利用铁磁工件在受载工作过程中，在应力和变形区域内产生的磁状态不可逆变化。
- 在该区域内发生具有此致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向，而且这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留，还与最大作用应力有关系。





# 8 金属磁记忆检测技术





- 采用专门的仪器测量工件表面的漏磁场，即可发现铁磁性金属部件上存在的高应力集中部位，而往往在这些部位容易产生应力腐蚀开裂和疲劳损伤，对于高温设备还容易产生蠕变损伤。
- 目前市场上通用的磁记忆检测仪器是测量工件表面磁场的法向分量。
- 对设备进行检测时，通常采用磁记忆检测仪器对焊缝进行快速扫查，以发现焊缝上存在的应力峰值部位，然后对这些应力峰值部位进行表面磁粉检测、内部超声检测、硬度测试或金相分析，以发现可能存在的表面裂纹、内部裂纹或材料微观损伤。



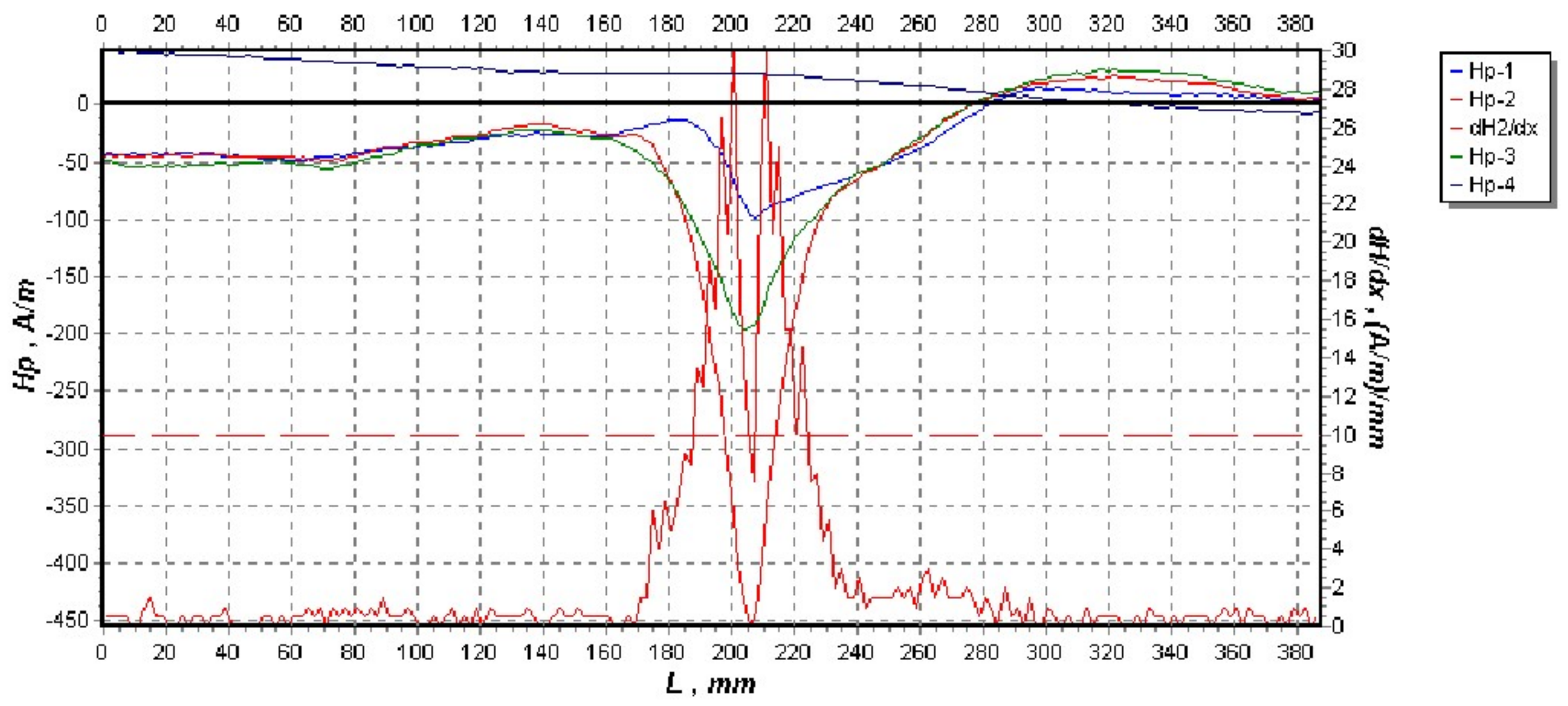


# 金属磁记忆检测技术





# 8 金属磁记忆检测技术



---

# 谢谢

