

# 超声相控阵技术

## 第二部分 扫查模式和图像显示

李 衍

(江苏太湖锅炉股份有限公司, 江苏无锡 214187)

**摘 要:**概述相控阵超声检测6种基本扫查模式和9种基本图像显示,掌握其要领,是掌握相控阵超声检测程序和结果诊断的关键。

**关键词:**相控阵超声;相阵探头;扫查模式;图像显示

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4423 (2007) 06-33-07

### 1 超声相控阵扫查模式

超声相控阵探头的扫查模式、扫查器与相控阵声束的有机组合,是超声相控阵可靠探伤和定量的基础。相控阵检测大致有3种方式:◎自动检测:探头行走器靠电机驱动装置移动;◎半自动检测:探头行走器靠手动,移动时编码定位;◎手工检测:相控阵探头用手移动,数据按采集时间储存。3种方式的数据采集均可由编码位置、内时钟或外信号触发进行。

R/D 系统可提供检测类型:◎层扫型(Tomoscan II, Tomoscan FOCUS™):有全自动、半自动和手动;◎全扫型(OmniScan™PA):也有全自动、半自动和手动;◎快扫型(QuickScan™ PA, PipeWIZARD®):自动式(半自动用于校准和机械调整)。

探头行走器可按表1所示任一种扫查模式移动。

表1 超声相控阵自动和半自动检测扫查模式

扫查模式	坐标轴数	说 明
双向式	2	探头在两个方向进行搜索(图1)。
单向式	2	探头只在一个扫查方向进行搜索;扫查器在每一扫查长度上作前后移动(图1)。
直线式	1	探头沿单一坐标轴移动时,记录所有采集数据(图2)。
转角式	2	类似于双向、单向或直线式扫查,但主轴相对于机械轴偏转一定角度(图3)。
螺旋式	1	探头沿圆柱形工件表面或绕圆柱型工件作螺旋形移动,进行探测(图4)。
螺线式	1	探头在圆柱体端面作螺线形移动,搜索缺陷(图5)。
定制式	1-6	按多向坐标或工件外形,按用户要求定制相控阵扫查模式。

#### 1.1 双向式扫查

相控阵探头沿扫查轴线向前和向后两方向采集探测数据(图1(a))。

#### 1.2 单向式扫查

相控阵探头只沿扫查轴线向前一个方向采集探测数据;随后扫查器返回原点并移行,再沿扫查轴向前采集数据,依次类推(图1(b))。

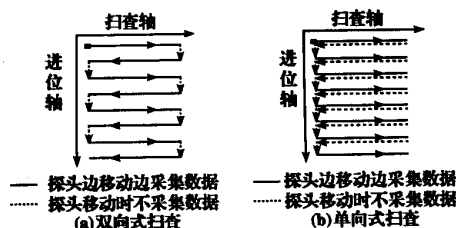


图1 相控阵双向式和单向式扫查特点

#### 1.3 直线式扫查

相控阵探头作单轴扫查,只用一位置编码器沿扫查轴或进位轴标定数据搜索位置。须提供的唯一设置是速度、沿扫查轴线的探测范围,及数据采集间距(取决于编码器分辨率)。常用于焊缝探伤和腐蚀检测等。借助于电子扫描的直线式扫查,其速度比等效的常规超声检测——“光栅式”扫查快一个数量级。直线式扫查对探头在横孔参考试块上作表征很有用(图2)。



图2 一维扫查用于探头表征

### 1.4 转角式扫查

也是一种双向式扫查(软件“层析视图 TomoViewTW2.2”),扫查时,扫查和进位路径相对于机械轴线偏斜一定角度(偏转角度由软件选定,偏转小增量接近编码器分辨率)。图3表示相阵探头实际移动路线与其平均化移动轨迹。

当扫查器轴线与工件不能置于最佳扫查路径时,或缺陷位置、方向需用特定扫查模式才能获最佳检出和定量时,可选用转角扫查。此时不必重新设计制作扫查器,且能减小文件尺寸,缩短缺陷分析时间。

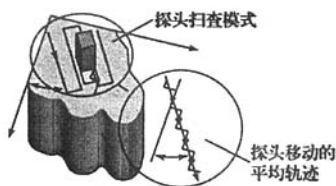


图3 转角式双向扫查示例

转角式扫查特点:◎适于检测几何形状复杂的工件及方向与正交轴有一定角度的缺陷;◎能使线阵探头适应特殊形状的工件;◎文件尺寸减小1/2~2/3;◎缺陷波幅提高6 dB~8 dB;◎扫查速度提高1~3倍。

### 1.5 螺旋式扫查

适用于在圆柱形工件表面进行检测。扫查器环绕圆柱体作螺旋形移动(图4)。作螺旋式扫查时,有两独立的编码器:扫查轴编码器控制绕圆柱体的连续移动,而进位轴编码器则控制沿圆柱体长度方向的连续移动。每绕圆柱体转一圈,用同步信号复位,使扫查轴编码器重新置“0”。

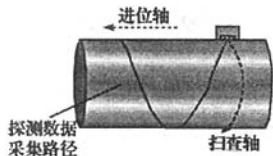


图4 在圆柱形工件上作螺旋式扫查

### 1.6 螺旋式扫查

适用于在圆柱形工件平端面进行检测。相控阵探头在圆柱体平端面上作螺旋形移动(图5)。也有两独立的编码器控制程序:扫查轴编码器控制探头在平端面上围绕中心连续移动时的 $\theta$ 角,而进位轴编

码器则控制探头沿平端面半径方向连续移动时的位置P。探头在平端面上每绕中心转一圈,用同步信号复位,使扫查轴编码器重新置“0”。

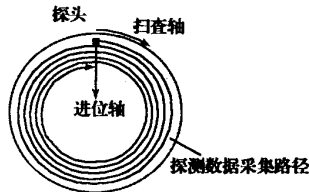
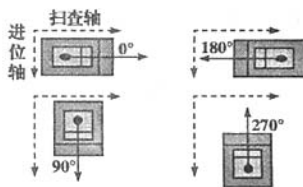


图5 在圆柱形工件平端面上作螺旋式扫查

### 1.7 扫查声束方向

以扫查轴和进位轴为参考坐标,相控阵探头声束有图6所示各种方向。可按探头偏转角度界定。检测表面范围及数据采集间距(两轴向分辨率)决定扫查表面和超声数据显示的像素尺寸。



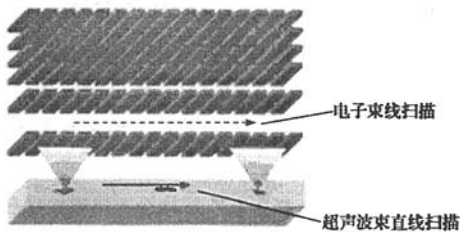
探头偏转角度必须输入聚焦律计算器  
图6 探头位置和声束方向坐标

### 1.8 其他扫查模式

工件、相控阵探头状态及声束动态三要素,按表2和图7~图9所示各种组合,可构成其他相应扫查模式。

表2 与工件、探头状态及声束动态相关的扫查模式

工件状态	探头状态	声束动态	扫查模式
固定	固定	线性(平移)	直线式扫查
固定	沿进位轴移动	线性(旋转)	螺旋式扫查
平移	固定	线性(旋转)	螺旋形扫查
固定	沿扫查轴移动	线性(偏转90°)	单向式扫查



工件和探头静止不动  
图7 电子束线扫描,超声束直线扫查

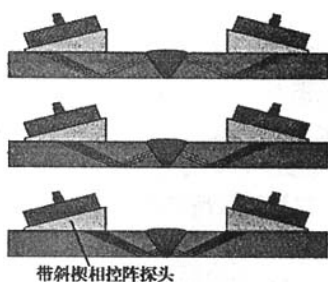
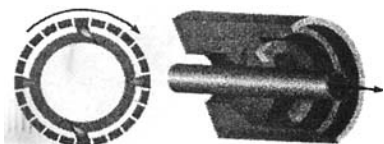


图8 焊缝检测用相控阵电子线扫描



管子平移+探头环旋转

图9 管材检测用螺旋形扫描

### 1.9 扫描时基模式

若编码器按时间(时钟)调节,则数据采集基于扫描时间(秒)(图10)。时基模式的数据采集时间  $T$  等于采集总数  $N$  除以采样率  $\xi$ , 即  $T = N/\xi$  (式中  $\xi$  — 每秒 A 扫描显示数)。

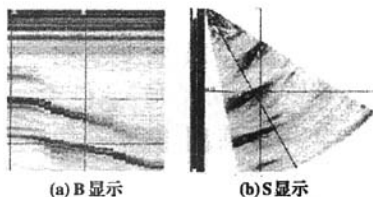
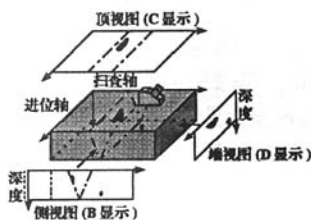


图10 时基扫描模式示例

## 2 相控阵扫描图像显示模式

超声扫描图像显示是指相关于超声声程和扫描参数(扫描轴或进位轴)的不同平面上的图像显示。大多数显示类似于技术图样的平面投影图(图11), 有顶视图(C显示)、侧视图(B显示)和端视图(D显示)等, 可为一个平面显像图或数个叠积平面显像图。



探头转角270°

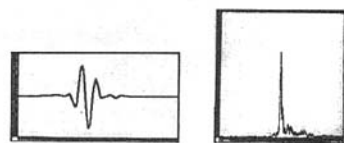
图11 超声扫描图像显示(B显示、C显示和D显示)

若探头转角为0°(或180°),则侧视图(B显示)变成端视图(D显示),反之亦然。B显示相关于工件深度和探头进位轴,D显示相关于工件深度和电子扫描轴。

超声扫描基本图像显示大致有八种: A显示、B显示、C显示、D显示、S显示、极坐标图、带状图、TOFD图。此外,还有组合图形,如[顶视+侧视+端视]组合图、[顶视+侧视+TOFD]组合图。

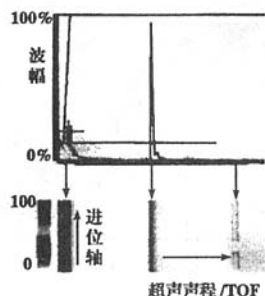
### 2.1 A显示

A显示表示换能器接收到的超声脉冲幅度或波形与超声传播时间(声程)的关系,可为射频(不检波)信号或整流(检波)信号显示(图12)。A显示检波信号幅度经彩色编码处理后,能增添相关信息,能将探头移动坐标(或数据采集时间)与彩色编码的超声波幅数据联系起来(图13)。



(a)射频(不检波)信号 (b)整流(检波)信号

图12 A显示图形



衍生彩色B显示用

图13 彩色编码A显示检波信号

射频显示的超声数据常编码为不同等级(-100%~100%)的灰度像素,可用黑白相间的灰谱图表示,以保存相位信息。灰谱幅度编码多用于TOFD设置和数据分析(图14)。

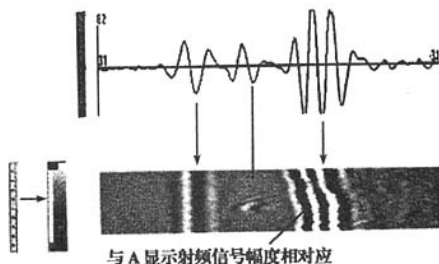
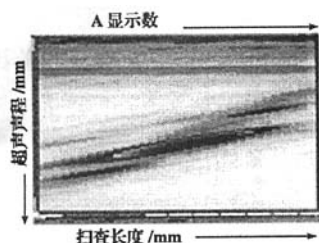


图14 D显示灰谱图

相控阵 UT 中最重要的平面图显示如下所述。

## 2.2 B 显示

B 显示是超声仪记录检测数据的侧视平面显像图。焊缝 UT 时,可用来显示焊缝宽度方向的横断面图像。通常,水平轴表示扫查位置,垂直轴表示超声声程或传播时间(图15)。视显示要求,两轴可互换。数据显示位置相关于数据采集时的编码器位置。一幅 B 显示基本上是一系列 A 显示或波形的叠加显示。每一 A 显示均示有编码器和时基取样位置。A 显示的波幅可彩色标码。



示有反射体而声程未校正

图15 超声 B 显示(未校正)

若超声声程已根据折射角和探头延时作了适当校正,则 B 显示可成为被检工件体积已校准的侧视图,横轴代表扫查长度,纵轴代表深度(图16)。



折射角已经校正

图16 超声 B 显示(已校正)

## 2.3 C 显示

这是 UT 数据作为被检工件顶视图的二维显示。其中一轴为扫查轴,另一轴为进位轴。对常规 UT 来说,两轴均为机械轴;而对相控阵检测,仅一轴为机械轴,另一轴为电子扫描轴。显示数据的位置相关于数据采集过程中的编码器位置。每一点(像素)只有最大波幅投影在平面图的扫查进位轴上,该平面图特称为 C 显示(图17)。

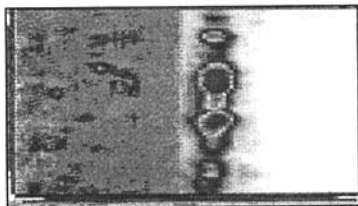


图17 超声 C 显示(顶视图)

## 2.4 D 显示

D 显示也是 UT 数据的二维图显示。类似于 B 显示,但其视图与 B 显示方向垂直。若 B 显示是侧视图,则 D 显示即端视图。焊缝 UT 时,D 显示可用来表示焊缝长度方向的纵断面显示。B 显示和 A 显示的选通区,都只显示预定深度范围内的检测数据。D 显示的一轴为进位轴,另一轴为超声声程(图18)。B 显示表示扫查轴与时间的关系,而 D 显示则表示进位轴与时间的关系。

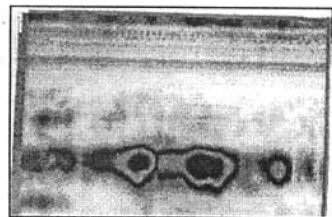


图18 超声 D 显示(端视图)

若超声声程已按折射角和探头延时作了适当校正,则纵轴(垂直轴)表示深度。D 显示(端视图)对工件纵断面特别是焊缝纵断面检测的数据分析很有用。

## 2.5 S 显示

即扇形或方位显示,是探头延时和折射角已作校正、特定通道所有 A 显示叠加而成的二维图像。典型的 S 显示是用相同阵元和相同焦距通过一定角度范围的扫查获得的。其水平轴对应于投影距离(试件宽度),而垂直轴对应于深度(图19)。

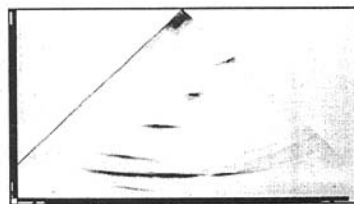


图19 超声相控阵 S 显示(扇形图)

S 显示是相控阵所特有的显示,可由纵波或横波产生;相控阵探头可直接接触,或装在斜楔上,或用水浸法。S 显示也有未校正和已校正两种显示。已校正 S 显示展示反射体实际位置,对检测结果可视化和图像比较很有用。

## 2.6 极坐标图

是显示探头在管内壁检测或在圆筒形工件外壁检测时所得数据的二维图(图20)。与试件平面图一

起,极坐标图可提供缺陷周向分布和径向深度位置信息。

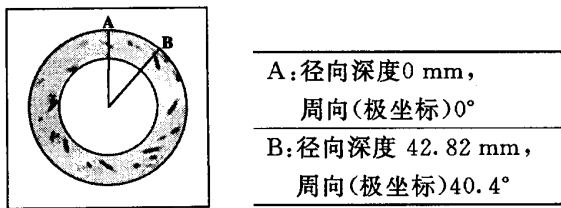
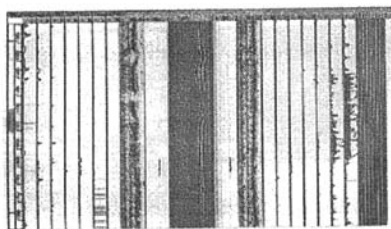


图 20 超声相控阵极坐标图

2.7 带状图

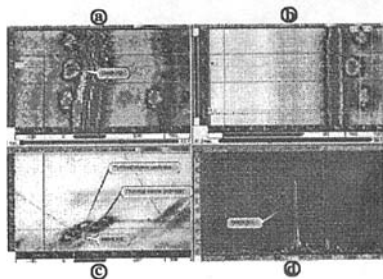
通常对单通道,是时间闸门内峰值信号的显示图。有些带状图也列入超声传播时间(或位置)等数据。一般数字带状图采用多通道,每一通道显示焊缝或其他特定区域的数据(图 21)。



显示中有超声波幅和传播时间数据,并有耦合校正、TOFD 及 B 显示  
图 21 管子 UT 自动检测多通道带状图

2.8 多视图和汇总图

即多种显示(包括 C、D、B、A 等显示)图同时在显示屏上以汇总图的形式并列展示(图 22)。这些显示型式要求捕获全波形(不像图 21 所示带状图:只求显示闸门中的峰值波幅和时间)。每幅视图都关联着一定特性和组合信息。



用低频超声相控阵探头探测 (a) C 显示 (b) D 显示 (c) B 显示 (d) A 显示  
图 22 异种金属焊缝相控阵检测四视图分析布置

各种视图可作为单一平面图显示,也可通过闸门选择,作体积投影图显示(图 23 和图 24)。TOFD 与相控阵超声脉冲回波数据可组合一起,以汇总图形式显示(图 25)。

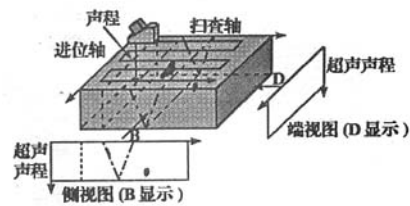
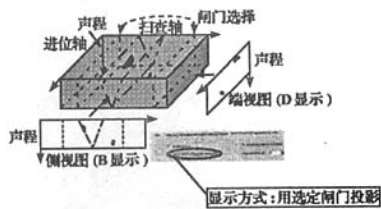
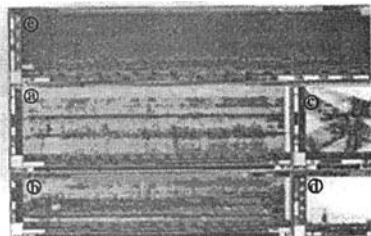


图 23 D 显示和 B 显示的平面投影



端视图(D 显示)和侧视图(B 显示)上处于闸门内的所有缺陷均能显示  
图 24 有参考光标的体积投影



(a) 顶视图 (b) 侧视图 (c) 端视图 (d) 波形图 (e) TOFD 图  
图 25 焊缝超声相控阵检测多视图

2.9 TOFD 图

TOFD 布置见图 26,所得 D 显示灰谱图见图 27(图中示有典型焊接缺陷)。近年来,TOFD 技术已在锅炉、容器和管道焊缝检测上得到广泛应用。注意,这里所举示例是指只用衍射纵波的“常规”TOFD 检测。TOFD 也可用其他波型(如横波—横波)或用“双模式”进行。TOFD 定量很准,它是基于超声到达缺陷的时间,而非超声波幅。TOFD 能提高缺陷检出率,对方向不利的缺陷亦然。TOFD 检测覆盖范围约为整个壁厚 90%,约有 10%漏检区靠近工件上下表面,但实际数值取决于 TOFD 设置、探头频率及阻尼。为达到完全覆盖,应将 TOFD 与脉冲回波法或相控阵法结合使用,以取长补短。

2.10 TOFD 法与脉冲回波法并举

TOFD 法与脉冲回波法并驾齐驱的快速检测技术(即 RD 技术)能完全覆盖被检焊缝(图 28)。为简化数据采集和分析,RD 技术要求 UT 系统将多通道采集和分析同步进行,一如层析扫描常规超声系统或层析扫描聚焦相控阵系统。

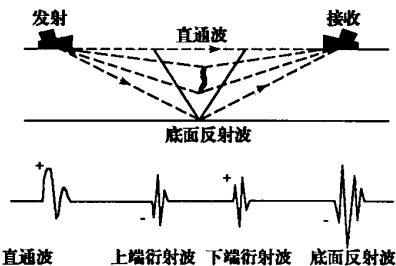
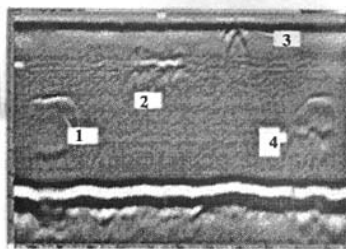


图26 焊缝 TOFD 检测布置和 A 显示射频波形图



从直通波到纵波底面回波选通区内的灰谱 D 显示  
1—坡口面未熔合;2—中心裂纹;3—横向裂纹;4—夹渣  
图27 标准 TOFD 显示(示有四种焊接缺陷)

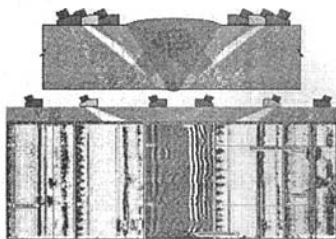
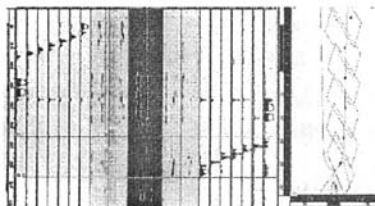


图28 TOFD 法与脉冲回波法并举互补

## 2.11 组合带状图

TOFD 和相控阵脉冲回波 UT 数据相结合,常用于管道和锅炉、压力容器焊接接头的自动 UT。这样100%检测焊缝的结果可同时展示在一幅汇总图上(图29)。



管道和锅炉压力容器焊缝检测示例  
图29 TOFD 与相控阵及脉冲回波法检测结果汇总图

## 2.12 R/D 立方体展开显像图

R/D 公司已研制出一种立方体展开超声显像

图(TomoView™Cube)(图30)。在该立方图的五个面上,示有扫描模式、线阵列主动窗和从动窗、及体积已校正的顶视图(C 显示)、侧视图(B 显示)和端视图(D 显示)。有关扫描模式和各种显像图的种种细节还可参见参考文献[1-12]。



右为立方体展开的五个面(R/D 公司推出)  
图30 超声相控阵立方体展开显像图

## 3 小结

(1)按操作模式,相控阵超声检测分自动、半自动和手动三种。

(2)按探头和声束动态特征、探测数据采集方式,自动和半自动检测又分双向、单向、直线、转角、螺旋和螺旋6种基本扫描模式。按工件形状和取用坐标,还可定制特殊的扫描模式。

(3)针对焊接件、锻件、轴类、管子、螺栓、螺柱等不同几何形状的工件,可选用适当的相控阵扫描模式,完成体积检测。

(4)相控阵超声扫描的基本图像显示分9种: A、B、C、D、S、极坐标、带状、TOFD 及组合显示。

(5)S(扇形)显示是相控阵检测最常用的显示。通常用校正的 S 显示使检测结果可视化,并进行图像评析。

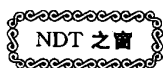
(6)检测管类或圆筒形工件时,采用极坐标显示图像,可展示缺陷周向分布和径向深度。

(7)检测焊接接头时,采用带状图可显示多种信息:时间闸门内峰值信号、缺陷位置、探头耦合状态、断面显示及 TOFD 图像等。

(8)多视图即汇总图能同时展示 C、D、B、A 等显示图像,有助于缺陷的综合分析和评价。

(9)相控阵与 TOFD 并驾齐驱,可取长补短,优化检测,常用于压力管道和锅炉、压力容器焊接接头的自动检测。100%检测结果可同时展示在一幅汇总图上。

(10)国内已有多家承压设备制造单位和检测机构已将相控阵 UT 设备用于管道和压力容器焊接



# 某型飞机襟翼滑轨连接螺栓超声检测中异常波分析

张海兵 孙金立 袁英民 陈新波 樊向党

(海军航空工程学院青岛分院, 山东青岛 266041)

**摘要:**利用波形转换原理,分析了螺栓超声检测中出现异常波的原因,得出了判断变形横波的依据。通过分析变形横波对检测结果的影响,采取了有效的措施,提高了检测的准确性。

**关键词:**襟翼;螺栓;超声检测;变形横波

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4423 (2007) 06-39-02

## 1 问题提出

某型飞机的襟翼滑轨与机翼是用螺栓联接为一体的,在飞机襟翼收放时,螺栓受比较大的剪切力,容易产生裂纹,因此对螺栓的探伤至关重要。按维护规程要求,该型飞机在定期检修时用超声纵波探伤法对螺栓进行检查(图1)。在实施检测中往往在底波的前面会出现异常反射波,按要求可判该处为裂纹。但探伤人员发现,探头在一定位置时,即使完好的螺栓也存在这种反射波。因此,裂纹波的可能性值得怀疑。

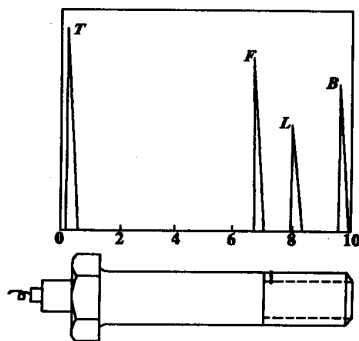


图1 螺栓检测示意图

接头的在制和在用检测,期望在相控阵和 TOFD 技术的应用上积极开展技术交流,不断提高应用水平。

## 参考文献:

- [1] R/D Tech. TomoView for Tomoscan FOCUS; User's Manual. R/D Tech document number DUML006A. Qu6bec; R/D Tech, 1999, 11.
- [2] R/D Tech. TomoView Analysis; User's Manual. R/D Tech document number DUML001C. Qu6bec; R/D Tech, 1999, 11.
- [3] R/D Tech. Technical Documentation Guidelines for TomoView 1.4R9. R/D Tech, 2001, 1.
- [4] R/D Tech. Advanced Training in TomoView 2.2R9. R/D Tech, 2003, 5.
- [5] R/D Tech. Tomoscan FOCUS; User's Manual. R/D Tech document number DUMG004B. Qu6bec, R/D Tech, 1999, 1.
- [6] R/D Tech. Tomoscan III PA; User's Manual. R/D Tech document number DUMG049A. Qu6bec; R/D Tech, 2002, 8.
- [7] R/D Tech. TomoView 2; Reference Manual. Vol. 1, General Features — Setup and Data Acquisition. R/D Tech document number DUML039A. Quebec; R/D Tech, 2003, 7.
- [8] R/D Tech. TomoView 2; Reference Manual. Vol. 2, Analysis and Reporting. R/D Tech document number DUML040A. Qu6bec; R/D Tech, 2003, 7.
- [9] R/D Tech. TomoView 2.2 — Technical Documentation — Technician Training. Slide presentation, rev. A. R/D Tech, 2002, 5.
- [10] R/D Tech. OmniScanMX; User's Manual. R/D Tech document number DUMG060B. Qu6bec; R/D Tech, 2003, 12.
- [11] R/D Tech. TechDocE-Features-TomoView2-revA. R/D Tech, 2003, 7.
- [12] R/D Tech. TechDocE-TomoView22R9-Guidelines-revA. R/D Tech, 2003, 7.