



国家电网公司
电力科技著作出版项目

衍射时差法 (TOFD)

超声波检测

胡先龙 季昌国 刘建屏 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

衍射时差法 (TOFD) 超声波检测

胡先龙 季昌国 刘建屏 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是国内第一本关于 TOFD 检测技术的专著, 包含了作者近年来的理论研究成果、现场应用和缺陷处理案例, 并融合了国内外最新研究成果。

本书全面深入地介绍了衍射时差理论、检测设备与换能器、专用软件构架、数据采集与处理系统、检测结果误差分析及数据分析, 以及 TOFD 技术检测与监测缺陷的能力和等方法。书中还详细介绍了电力行业重要部件的 TOFD 检测技术实际应用案例。

本书既可供电力科研院所从事无损检测的相关研究人员和工程技术人员使用, 也可供电力系统设备设计人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

衍射时差法 (TOFD) 超声波检测/胡先龙等编著. —北京: 中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-6892-7

I. ①衍... II. ①胡... III. ①衍射方法—应用—超声检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 288758 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 207 千字

印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

本书编委会

主 任 胡先龙

副 主 任 季昌国 刘建屏

编写人员 胡先龙 季昌国 刘建屏

宿修平 毛良彦 陈君平

王春水 马延会 牛晓光

池永斌 田力男 罗为民



随着科技的发展,电力行业的技术水平不断提高,如发电设备向大容量(单机容量为 1000、1200MW 机组)、高参数(超临界、超超临界)发展,特高压电网、新能源建设也日新月异,大量的新材料和新工艺被广泛使用。这就对电力设备的质量提出了越来越高的要求,单纯依靠常规无损检测方法来检测和评定电力设备中可能存在的缺陷就难以为继。而衍射时差法(TOFD)检测技术具有缺陷定量精度高、缺陷检出率高、可替代射线进行检测等诸多优点,因此,TOFD 检测技术在电力工业中正逐步被采用。

本书对 TOFD 技术进行了系统的研究和专业阐述,全书共分六章,首先阐述了 TOFD 的理论基础,其次对数据采集系统、软件原理、误差分析、检测结果数据分析和缺陷的监测方法展开了研究和论述,最后还介绍了 TOFD 技术在电力行业中的应用实例。书中的理论和方法可以提高我国电力等行业在无损检测领域中的技术水平,实现对缺陷的精确定量和监测。同时,应用该项技术所得到的缺陷数据还可为断裂力学计算,设备寿命评估提供重要的依据,为电网、火力水力发电、风电光伏等新能源的安全发展及稳定运行发挥重要的作用。

本书作者长期从事电力行业无损检测评价、寿命评估研究工作,既具有深厚的理论基础,又具有丰富的实践经验,对缺陷的检验与监测具有深刻的见解。编写组的大多数成员为 DL/T 1317—2014《火力发电厂焊接接头超声衍射时差检测技术规程》的起草人,本书被列入 2012 年国家电网科技著作出版计划。

本书在编写过程中,由于时间仓促和编著者的水平与经历有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2014 年 10 月



前言

绪论	1
第一章 衍射时差法的理论基础	15
第一节 各向同性均匀介质中的波	15
第二节 波的衍射	18
第三节 均匀介质中的衍射时差法	20
第四节 裂纹自身高度或深度的轨迹	33
第五节 衍射弧	34
第六节 其他裂纹深度测量方法	36
第七节 单探头技术	37
第二章 TOFD 检测信号的幅度	40
第一节 光滑平面裂纹的 TOFD 信号	40
第二节 信号幅度与其他技术所产生的相比较	45
第三节 扭转的平面裂纹的 TOFD 信号	50
第三章 TOFD 检测系统	52
第一节 检测基础	52
第二节 TOFD 检测系统	60
第四章 TOFD 检测通用技术	69
第五章 数据分析	92
第六章 TOFD 检测技术的应用	113
第一节 TOFD 检测实验分析	113
第二节 常见对接焊缝 TOFD 检测的基本程序	118
第三节 TOFD 技术在汽包焊缝检测中的应用	124
第四节 主蒸汽管道焊缝 TOFD 检测	135
第五节 管道环焊缝根部缺陷 TOFD 检测	139
第六节 Y 形和 T 形焊接接头检测工艺	144
第七节 焊接缺陷定性的一般准则	147
内容索引	150

绪 论

一、概述

电力、石油、化工、机械等工业设备部件或焊接接头中存在的缺陷直接威胁着设备的安全运行，通过各类无损检测手段实时检测出这些缺陷并进行评价具有十分重要的意义。常规无损检测技术主要有磁粉检测、渗透检测、涡流检测、射线检测及超声波检测，各种检测方法及主要检测能力见表 0-1。

表 0-1 常规无损检测方法及主要检测能力

检测方法	主要检测能力	能否确定缺陷在壁厚方向上的尺寸
磁粉检测	能够检测铁磁性材料表面及近表面缺陷	不能
渗透检测	能检测部件表面开口缺陷	不能
涡流检测	能够检测导电材料表面及近表面缺陷	不能
射线检测	能够检测表面及内部缺陷	不能
超声波检测	能够检测表面及内部缺陷	能，但常规超声波定量精度不高

由表 0-1 可知，超声波检测技术既可检测有无缺陷，也可测量缺陷尺寸，因此得到了广泛的应用。

常规超声波检测技术是利用超声波传播过程中遇到缺陷时波的反射、散射等特征进行缺陷的检测和定量，其中一般采用脉冲回波幅度进行定量。

如果从工件不连续处（工件外形或结构的任何间断）反射回来的波束到达探头晶片，使晶片振动并转换成电信号，那么金属中的反射体就会被检测到。为了使超声波能够被接收到，波束应该以适当的角度入射到反射体上。如果相对于超声波束而言反射体表面是倾斜的，那么探头将接收不到反射波，无法检测出工件中的缺陷。当声束中心线与反射体垂直时，反射能量最强，即“镜面反射”。随着倾斜角度的增加，波束返回到晶片的强度快速下降，角度倾斜 5° 将使波幅下降约 2 倍（6dB），而倾斜 10° 将可能导致波幅完全消失。

在没有镜面反射的位置，返回的信号可能是裂纹表面的漫反射和裂纹边缘的衍射波。

衍射信号包含缺陷边界尖端的信息,可以用来精确地测定缺陷尺寸和评价工件的完整性。超声波衍射时差法就是以缺陷尖端衍射波的特性为其物理基础。

二、精确测量缺陷尺寸的必要性

如果工程结构中存在超过临界尺寸的裂纹,在承载时会以脆性断裂的方式迅速失效。

材料的抗脆断能力取决于材料表面和内部的裂纹临界状况。材料被拉伸时,能量储存在弹性变形中。如在加载后,材料中的裂纹尺寸增大,则此裂纹将略为张开,裂纹的两个面更加分开了。在裂纹后面的材料会得到松弛,其中储存的拉伸能量被释放。但是这个过程形成了新的裂纹表面——这是一种需要一定能量的过程。两种能量平衡后,可以得到理论临界裂纹尺寸 a_c 的关系式

$$a_c = \frac{2WE}{\pi\sigma^2} \quad (0-1)$$

式中 a_c ——理论临界裂纹尺寸, m;

W ——材料的冲击韧度, J/m^2 ;

E ——拉伸弹性模量;

σ ——外加的拉应力, N/m^2 。

对脆性材料如玻璃, W 的典型值是 $6J/m^2$, 脆性材料的临界裂纹尺寸很小;而塑性材料如钢或铝, W 值为 $104 \sim 106J/m^2$ 。当实际载荷为 $100MPa$ 时,对于无限宽和无限厚的平板,玻璃的临界裂纹尺寸为 $27\mu m$,钢的临界裂纹尺寸为 $1.3m$ 。对于实际部件来说,临界尺寸要小得多。临界裂纹是垂直于主应力方向上的缺陷,而临界裂纹尺寸通常是缺陷在壁厚方向的最大允许尺寸。因此,为确保结构的整体强度,对缺陷尺寸的精确测量是非常重要的。

传统的脉冲回波超声检测法可对缺陷进行定位,但定量精度较低。采用超声波衍射时差法 (TOFD) 可对缺陷自身高度进行精确测量,测量精度高于 $\pm 1mm$ 。

为了测量裂纹的扩展速度,必须精确测定缺陷的尺寸,图 0-1 显示了精确测量缺陷尺寸的重要性。图 0-1 (a)、(b) 给出了特定缺陷的预期寿命曲线,它们都估计出达到临界尺寸大约需要 1.5 年,图 0-1 (a) 给出了常规超声波测量裂纹高度的结果,由于在裂纹高度测量上面的误差,夸大了此裂纹的扩展危害,因此得出的预期寿命比真实寿命要短;图 0-1 (b) 给出了使用 TOFD 测量的结果,由于测量精度高,而测量的结果也说明了裂纹实际的扩展比预期的要慢,所以设备的使用寿命是比较长的。

精确的尺寸测量有利于减少伪缺陷的数量,如果检测到了密集型气孔,则要精确地测量它们的尺寸,而常规脉冲回波测量这样尺寸的能力是有限的,原因是常规脉冲回波在尺寸定量上存在很大的误差,实际测量的缺陷尺寸往往比其真实尺寸要大,这样就夸大了很多良性的缺陷。

从原理上可以看出,TOFD 的缺陷定量是很准确的,因此可以降低检测的误判率。

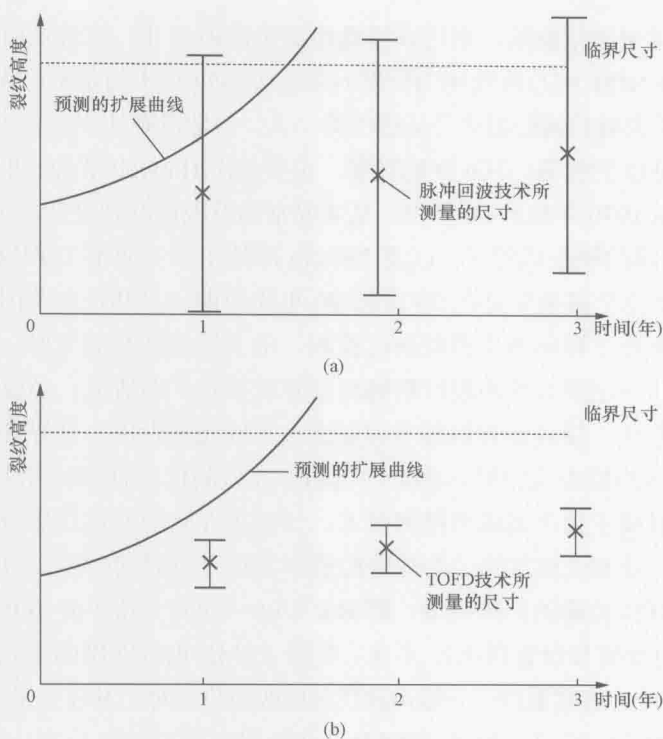


图 0-1 精确测量缺陷尺寸的重要性

(a) 常规超声波测量结果; (b) TOFD 测量结果

三、衍射时差法 (TOFD) 的历史^[1]

衍射时差技术的发展是因对缺陷进行断裂力学评价而提出的, 因为用常规脉冲回波技术很难达到精确测量缺陷尺寸的要求。

在缺陷与工件异质界面处, 除镜面反射外还有衍射波等其他信号存在, 在缺陷的所有位置都可以进行测量, 原因是: 当将一障碍物置于光束路径中间时, 一些光线通过衍射作用弯向阴影区。同样的效果也可以在水波中看到。将一粒石子投入平静的水中, 波在水面上传播, 当遇到障碍物时, 水波就从障碍物的边缘反射, 并且绕过障碍物端部产生衍射, 此时就容易看到这种效果, 因为与可见光相比, 水波有较长的波长。同样的现象可发生在弹性波中, 此时超声波波长为几毫米量级, 其作用易于观察。K.G.Hall 在英国铁路工程局通过超声波穿过带有缺陷的玻璃块的实验, 发现在一个入射纵波 (纵波) 与一个缺陷间有许多相互作用的一些情况, 并且缺陷边缘将产生明显的衍射波。有经验的脉冲回波专业人员用这些边缘衍射波可得到精确的缺陷尺寸; 但必须在一较大且可能变化的镜面反射信号背景下进行观察。

在检测镜面反射波的基础上, 如果要依靠衍射波来进行缺陷尺寸测量, 那么是不是可以设计一种技术, 即直接针对衍射波, 避开镜面反射进行检测呢? 另外, 时间测量的

精度很高,如果用来测量缺陷,则可以精确地测量缺陷尺寸。这就是由 Maurice Silk 博士在 Harwell 国家 NDT 中心所发明的衍射时差 (TOFD) 技术的基础。虽然 Miller [1970] 似乎是发表从裂纹尖处检测衍射信号证据的第一人,但他没有认识到这个信号的来源,因而错过了发明 TOFD 的机遇。TOFD 的发展,主要是由 Harwell 实验室的 Maurice Silk 及其同事进行的,从 1970 年起的 10 年中,从实验室的发现进展到复杂、全面的检测方法,已经可以对 1mm 厚的钢板或管子,以及 250mm 厚的压水反应堆 (DWR) 压力容器进行缺陷检测。TOFD 完全被接受是在 20 世纪 80 年代中期,尤其是在英国的石油和天然气行业,因为它们在海上和陆地上都要进行检测,出于经济利益的考虑,对于一些良性缺陷可不进行修复,只定期对缺陷进行精确测量并观察其扩展情况,必要时才进行处理。

20 世纪 90 年代,随着计算机技术和制造技术的飞速发展,世界各国相继研制出了以 B、C、D、P 等扫描方式为显示的数字化超声波检测仪。TOFD 与这些硬件系统相结合,就进一步发展成了超声波成像检测技术,该技术在欧美发达国家得到了迅速发展,尤其在海上石油工业和天然气行业的焊缝检查中发挥了重要的作用。1993 年,英国制定了世界上首个 TOFD 检测的标准规范,即 BS 7706—1993《超声波 TOFD 技术对缺陷检测、定位和定量的校验与设置指南》。不久,美国 ASME 也以案例的形式,即 ASME code case 2235-9《锅炉压力容器案例——超声波代替射线检验》对 TOFD 技术予以认可。目前,国外相关标准有 ASTM 2373—2004《TOFD 技术标准》、CEN/TS 14751—2004《焊接——焊缝检测中使用 TOFD 技术》、ENV 583-6—2000《无损检测之超声检测第六节,TOFD 是一种可以对缺陷定位及定量的方法》及 NEN 1822—2005《TOFD 检验验收规范》等。

进入 21 世纪,各种硬件和软件的更新换代有力地推动了 TOFD 技术的进一步发展,OMNI-Scan 检测系统、专用分析软件 Tomoview 及仿真软件 CIVA 就是其中的代表。

四、TOFD 技术在中国电力等行业的发展^[1]

天津电力科学研究院于 1998 年从荷兰 KEMA 公司引进了一套 TOFD 设备及技术,2000 年东北电力科学研究院从加拿大 R/D 公司购入了 5700 多功能相控阵及 TOFD 检测装置。2001 年 12 月,电力行业首次在汕头进行了技术培训,2001~2006 年多家电力科学研究院进行了 TOFD 现场实际应用技术研究,将该技术应用于对汽包焊缝、主蒸汽管道缺陷的定量。2002 年,华北电力科学研究院与武汉中科创新技术股份有限公司签订联合进行 TOFD 检测设备研制的技术协议。2005 年 5 月,华北电力技术研究院与华北电力科学研究院、欧宁检测公司等单位在北京举办了电力行业首届 TOFD 及超声波相控阵检测技术研讨会。2006 年 7 月,电力工业无损检测考委会邀请英国专家 TIM 对来自全国 20 多家电力科学研究院的 30 名学员进行了深入的技术培训。

2006 年以后,TOFD 技术已逐步成为电力行业的常规检测技术,并于 2014 年发布了电力行业标准。根据被检部件表面状态不同,可采用栅格扫描法和线性扫描法。栅格 TOFD 扫描获取的信息更多而且更精确,而线性 TOFD 速度较快。对于汽包等焊接接头余高磨平的部件,可以使用栅格扫描。对于焊接接头余高未磨平的部件常使用线性扫描法。栅格扫描

是 x - y 平面内前后运动扫描 (B 扫描)。线性扫描是平行于焊口的单一方向扫描 (D 扫描)。

国内颁布的相关标准有:

(1) 适用于电力行业标准 DL/T 1713—2014《火力发电厂焊接接头超声衍射时差检测技术规程》;

(2) 适用于水电行业标准 DL/T 330—2010《水电水利工程金属结构及设备焊接接头超声衍射时差法超声检测》;

(3) 适用于特种设备行业标准 NB/T 47013.10—2010《承压设备无损检测 衍射时差法超声检测》;

(4) 修改采用 ENV 583-6: 2000 的 GB/T 23902—2009《无损检测 超声检验 超声衍射声时技术检测和评价方法》。

五、TOFD 技术简介

当超声波传播过程中遇到缺陷时,在产生反射波的同时,在缺陷的边缘和尖端产生绕射波。这种绕射波在很宽的角度内发散,强度很弱。

TOFD 利用两个探头进行探伤,一个作为发射探头,另一个作为接收探头,探头间的距离称作探头间距 (PCS)。TOFD 通常使用频率为 2~10MHz 的纵波探头,这是因为纵波传播速度比横波快,最先到达接收探头且纵波宜发生绕射,同时纵波的应用可以简化接收的波形和结果图形的解释。通常应用的纵波探头 (角度为 45°、60°和 70°) 也产生传播速度较慢的横波。横波也产生附加的绕射波,但附加的绕射波比纵波产生的绕射波晚到达接收探头。TOFD 技术原理见图 0-2。

最先到达接收探头的声波称为直通波 (Lateral Wave, LW),直通波是沿被检试件表面传播的波,在没有缺陷的试件中,第二个到达接收探头的声波称为底面回波 (Back Wall Echo, BWE),底面回波是从试件另一面反射的声波。

检测时,以横向波和底面回波作为参考,TOFD 系统具有很低的信噪比,很弱的超声波信号可以通过前置放大器进行放大处理。当试件中存在平面缺陷时,缺陷上端绕射波比下端绕射波先到达接收探头,并且这两个纵波信号位于横向波和底面回波之间,见图 0-2。因此,TOFD 系统不仅能够测量缺陷在壁厚方向的高度,而且能够测量缺陷的深度,采用灰阶度来显示图像。图 0-3 为 TOFD 技术典型应用。由图 0-2、图 0-3 可知,横向波和底面回波具有相反的相位,缺陷上下端的绕射波也同样具有相反的相位。这些特性是缺陷判定的一个辅助依据,因此 TOFD 采用未经检波处理的波形,如 RF (射频信号) 波形。横向波与缺陷上端产生的绕射波的传播时间差和缺陷位置有关,缺陷上下端产生的绕射波的传播时间差与缺陷高度有关,因此,关于缺陷高度和缺陷位置的测量,都由接收到的声波信号的传播时间决定,与信号的波幅无关。

六、与 TOFD 相关的对缺陷进行定量的方法^[2]

TOFD 技术能检测及记录从缺陷端部产生的衍射信号,因此可发现缺陷并对缺陷定

量，具体内容在后面各章节详细叙述。下面简要介绍与 TOFD 相关的对缺陷进行定量的方法，这些方法在许多情况下采用 TOFD 技术与其他方法结合组成双模式（或多模式）进行检测，主要有相对到达时间技术（RATT）、绝对到达时间技术（AATT）、波形转换技术及手工脉冲回波检测等。

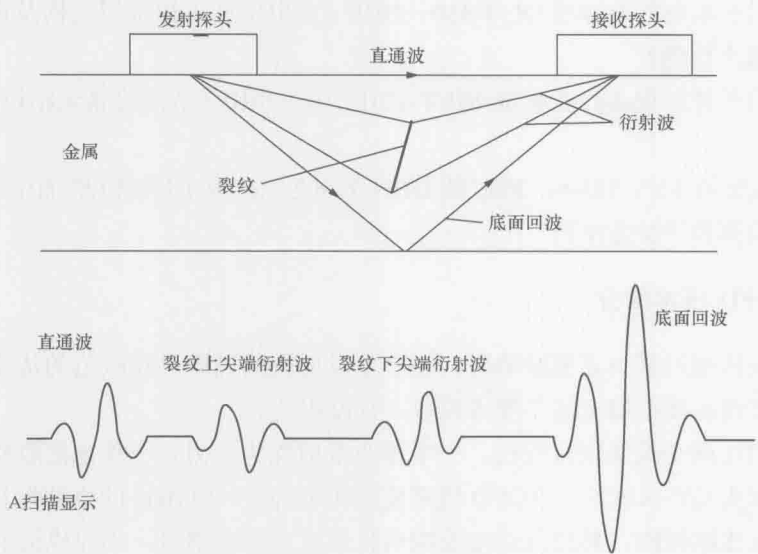


图 0-2 TOFD 技术原理 (A 扫描图)

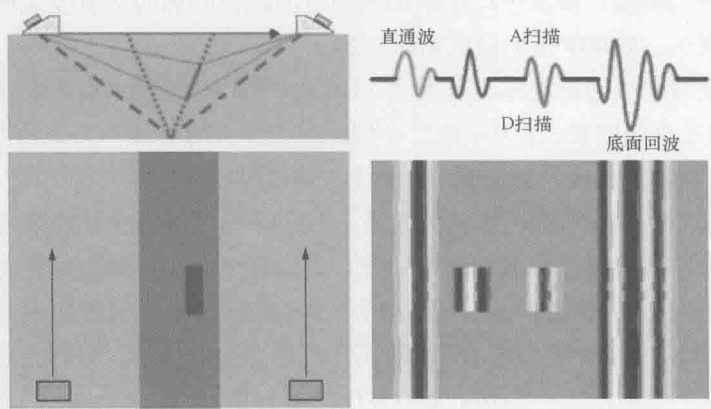


图 0-3 TOFD 技术典型应用

七、相对到达时间技术

当裂纹尺寸小于超声声束直径时，超声波探头在同一位置可同时获得裂纹端点衍射波和端角回波，如图 0-4 所示，利用端点衍射波和端角回波的声程差可计算裂纹高度，该方法称为相对到达时间技术（Relative Arrival Time Technique，RATT）。

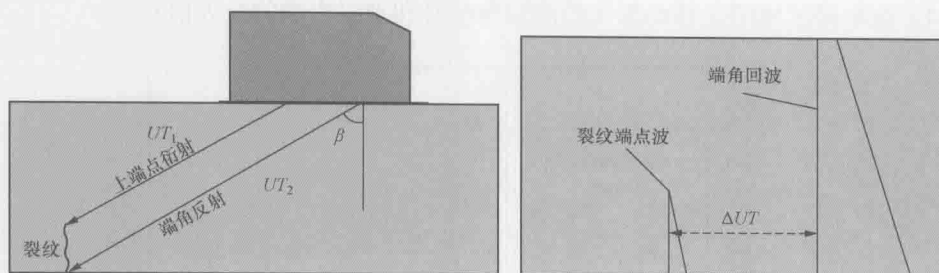


图 0-4 用端角和裂纹尖端的声程差计算裂纹高度

UT_1 —裂纹上端点衍射波声程； UT_2 —端角反射波声程；

ΔUT —端点波与端角回波声程差； β —折射角

裂纹高度 h 为

$$h = \Delta UT \times \cos \beta \quad (0-2)$$

$$\Delta UT = UT_2 - UT_1$$

如果超声声束有足够的扩散（较大的声程和折射角），则裂纹尖端可使声束直射到达和通过底面反射后到达的波均产生衍射波（见图 0-5）。直射到达裂纹尖端产生的衍射波与端角波相位相反，反射后到达裂纹尖端产生的衍射波信号相位则相同。采用裂纹端点衍射波与端角回波计算裂纹高度方法与图 0-4 相同，也可采用端角回波与反射后到达的衍射信号声程差进行计算。

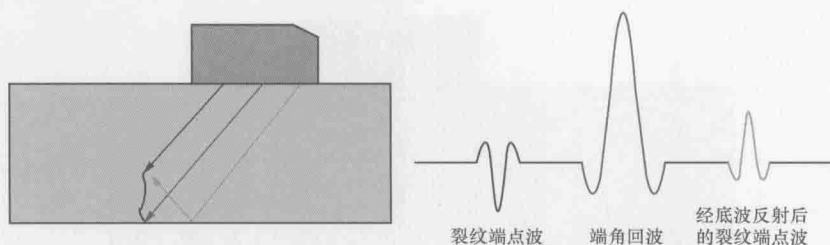


图 0-5 直射到达和底面反射到达裂纹尖端的射频信号

图 0-6 显示了裂纹高度系数与折射角的关系。由图可以看出，相对声程差 ΔUT 随着折射角的增大而缩小。在折射角比较“陡”时，如 $30^\circ \sim 35^\circ$ 之间，两束衍射波抵达探头的时间拉得较开。

八、绝对到达时间技术（AATT）

绝对到达时间技术（AATT）有以下特点（见图 0-7）：

- （1）裂纹高度可能比声束宽。
- （2）需要移动探头和获取两个最佳角度以便准确读取声程。

- (3) 读取的是已经修正过的角度和声程。
- (4) 在缺陷区域手工移动探头检测端角信号和裂纹尖端的最大信号。

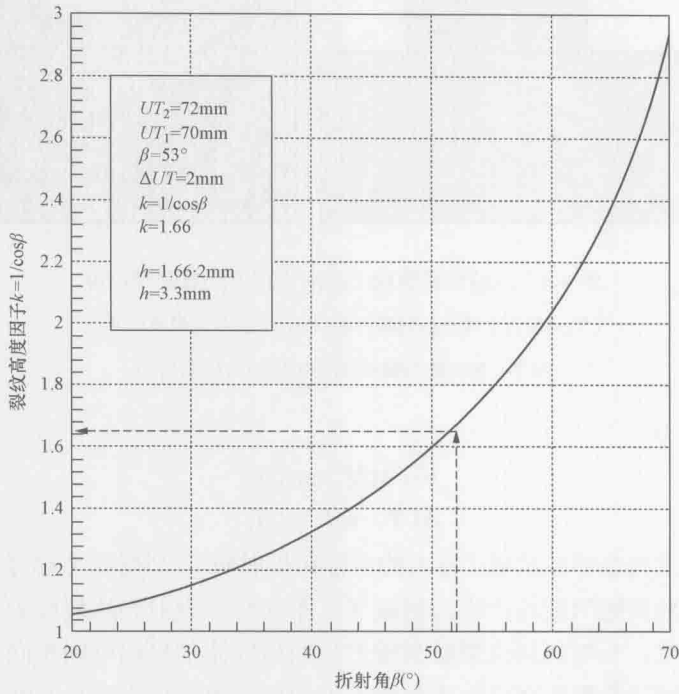
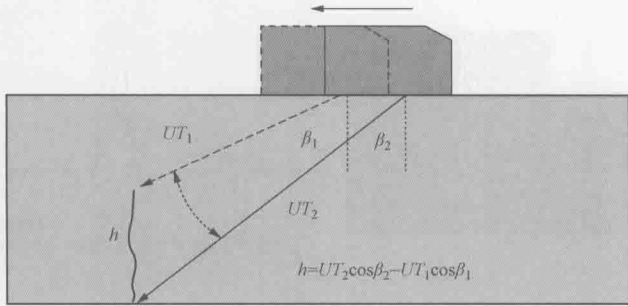


图 0-6 采用 RATT 的裂纹高度系数与探头折射角的关系



注：在相控阵超声波中，声束能以扇形扫描缺陷区域，从而可以计算出缺陷的高度（见图 0-8）。采用常规 B 扫描或栅格扫描能达到异曲同工的目的。

图 0-7 AATT 的裂纹高度测量原理

基于缺陷尖端回波技术可靠测量缺陷高度的能力依靠下列因素：合适的试件厚度、相控阵探头频率、衰减、频率带宽及被检材料本身的质量。

九、波形转换检测技术

基于波形转换 (Mode-Converted, MC) 的检测技术可用图 0-9~图 0-11 表示。图中

可见多种波形转换。

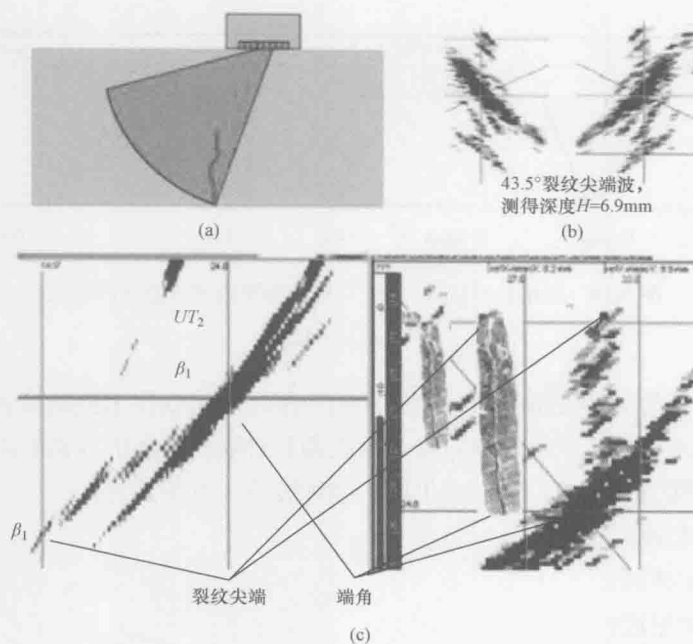


图 0-8 采用相控阵探头不动、声束扇形扫描的方式测定疲劳裂纹大小的 AATT 例子
(a) 原理；(b) 用反射波测得一个 7.1mm 深的裂纹；(c) 测得 $h=10.2\text{mm}$ 的一个裂纹时， $H=9.9\text{mm}$

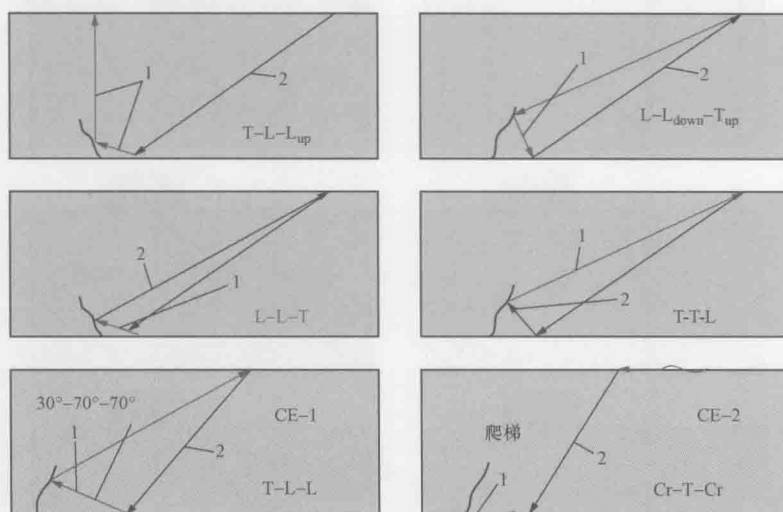


图 0-9 使用波形转换 (MC) 技术检测内表面开口裂纹

1—纵波；2—横波

T—横波；L—纵波； L_{up} —向上变形纵波； L_{down} —向下变形纵波； T_{up} —向上变形横波；

Cr—变形表面波；CE-1—第一平行回波；CE-2—第二平行回波

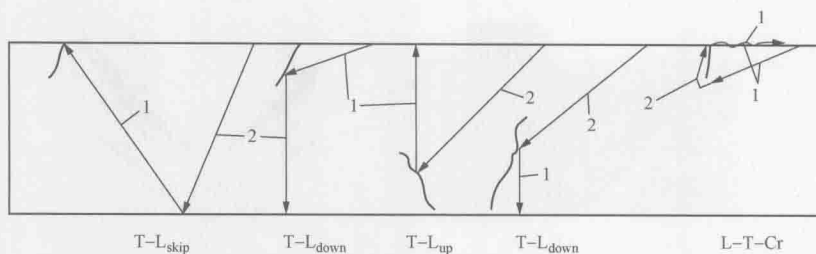


图 0-10 使用波形转换 (MC) 技术检测内外表面开口裂纹

1—纵波; 2—横波

爬波技术是最常见的波形转换检测技术的应用, 它可以用来检测或者验证内表面开口裂纹。这种技术可以用来检测和定量从内表面到外表面之间的线性缺陷。这种能力是以爬波探头的特性为基础的, 它能产生以下各种波形 (见图 0-12):

- (1) 外表面爬波;
- (2) 折射 34° 横波;
- (3) 折射 70° 纵波;
- (4) 经波形转换的 31° 横波;

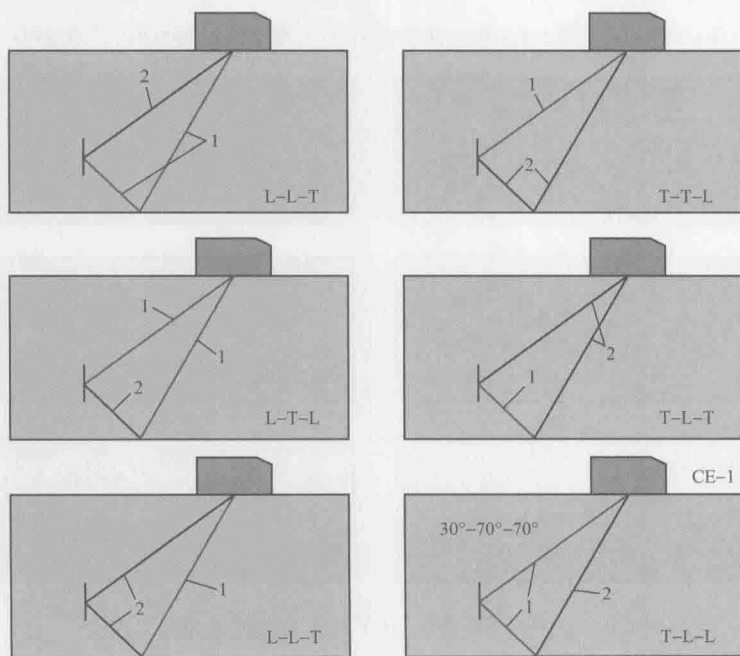


图 0-11 使用波形转换 (MC) 技术检测工件内部线性缺陷

1—纵波; 2—横波; T—横波; L—纵波

- (5) 经波形转换的内表面爬波。爬波具有较短的表面传播深度 ($6 \sim 10\text{mm}$), 仅在 $2 \sim$

3 倍波长厚度范围内发生, 并且它还取决于平板/管子的平行度 ($\pm 5^\circ$)。横波可能会在底面转换成 70° 的纵波, 并被垂直的缺陷以 70° 的纵波反射回来。这种波形转换检测被称为“第一平行回波”(CE-1)。爬波检测/验证回波被称为“第二平行回波”(CE-2)。在纵波校准中它们的声程取决于厚度 (见图 0-13)。

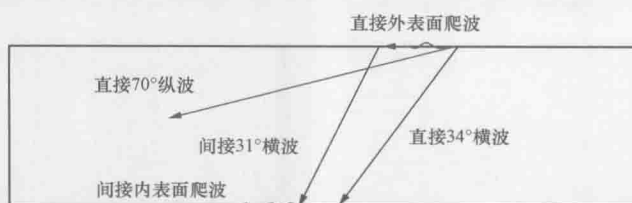


图 0-12 爬波探头产生的各种波形

$55^\circ \sim 62^\circ$ 之间用纵波检测、波形转换技术验证可以结合起来应用 (见图 0-14)。一对 L-L 纵波可以用来定量, 而 CE-1 和 CE-2 的波幅可以用来确定缺陷高度。一个与下表面 (有时指上表面) 距离超过 4mm 的垂直缺陷只能反射回 L-L 纵波对和 CE-1。CE-1 的信号波幅与缺陷的高度有线性变化关系。然而, 如果缺陷是倾斜的, 则 CE-1 与其波幅不具有线性关系。

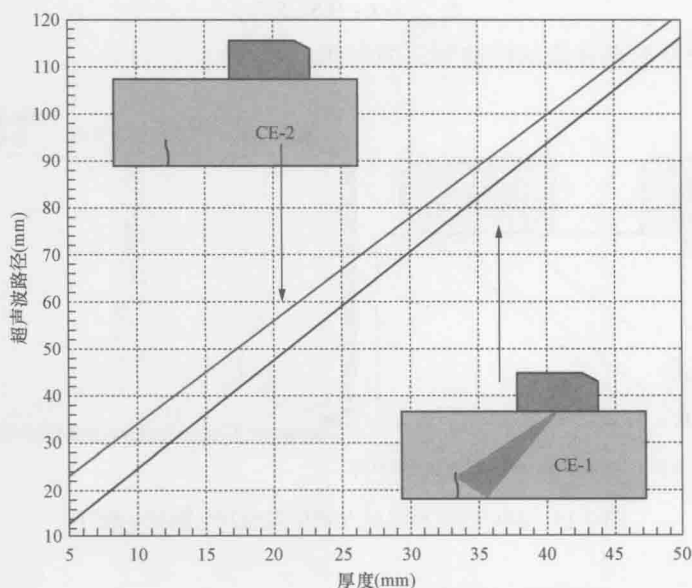


图 0-13 CE-1 (30° - 70° - 70°) 及 CE-2 (爬波) 的声程与厚度的依赖关系

另一种波形转换定量方法是 Δ 技术 (见图 0-15)。 Δ 技术就是把 60° 的横波与 0° 的纵波结合起来。高度可由公式 (0-3) 计算, 即

$$\text{TOF}\Delta 60 = \frac{(t-h)}{v_T[(1/\cos\beta) + (v_T/v_L)]} \quad (0-3)$$