

YINGYONGXINLUNWUSUNJ

无损检测应用新论

何远山 赵波 主编



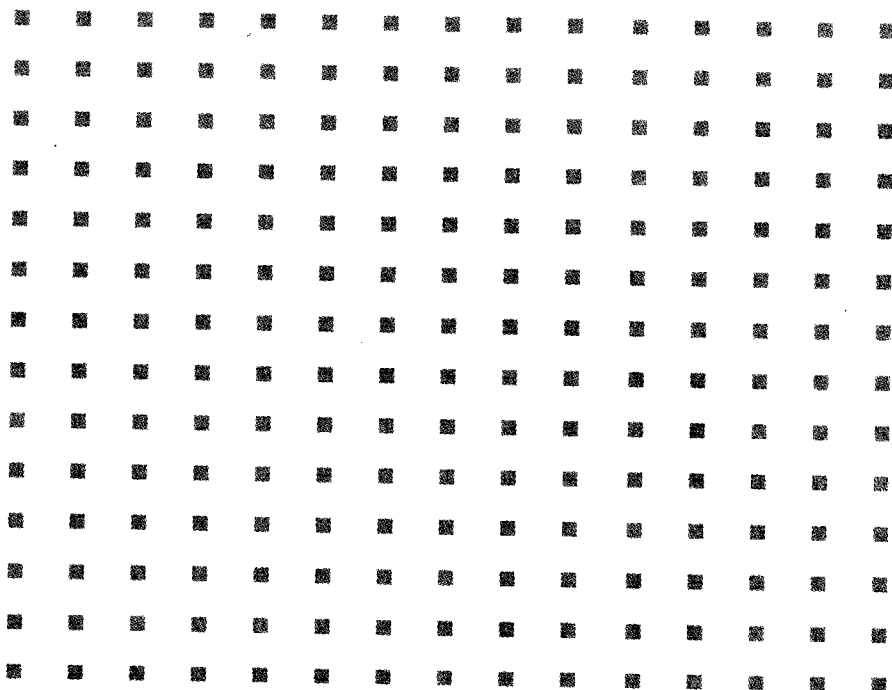
中国石油大学出版社

无损检测应用新论

.....

WU SUN JIAN CE YING YONG XIN LUN

何远山 赵 波 主编



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无损检测应用新论/何远山,赵波主编. —东营:中国
石油大学出版社,2009.1
ISBN 978-7-5636-2709-7

I. 无… II. ①何…②赵… III. 无损检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 007864 号

书 名: 无损检测应用新论
主 编: 何远山 赵 波

责任编辑: 阎长亮 李明华(电话 0546—8392787)
封面设计: 成玲玲

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: liliatu@163.com
印 刷 者: 东营市新华印刷厂
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8391809)
开 本: 170×230 印张: 16.25 字数: 283 千字
版 次: 2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 26.00 元

编委会名单

主 编	何远山	赵 波		
副主编	姜奎书			
编 委	梁金昆	刘德镇	叶学余	张 波
	汪立新	曹怀祥	邢兆辉	侯少华
	肖世荣	雒利勇	李以善	邹石磊
	杜 宏	王忠民	魏忠瑞	郭振祥
	田建新	陈 伟	苏 敏	

序 言

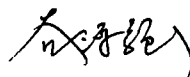
1955年7月经国务院批准,仿照前苏联安全监察模式,在劳动部设立锅炉安全检查总局,开始对锅炉、压力容器、起重机械等特种设备进行专门监督管理,实行国家安全监察。但由于历史条件的局限,没有形成连贯的、系统的国家监察基本制度,缺少作为安全监察依据的检验检测技术手段,以致“文革”结束后的1979年,锅炉压力容器万台事故起数达到历史最高点(7.9起/万台),特种设备安全面临着严峻的形势。

1982年2月,国务院颁布了《锅炉压力容器安全监察暂行条例》,首次提出了我国锅炉压力容器全过程安全监察的基本制度,为构建安全监察与技术检验“双轨体制”提供了法律支撑。20多年来,这种监察制度和监管体制在实践中不断丰富完善,直到2003年3月,我国新的行政法规,即《特种设备安全监察条例》应运而生。至此,纳入国家安全监察的特种设备范围科学合理,工作职能比较清晰,法制依据比较充分,安全责任比较明确。这一阶段,法制逐步完善,监管措施逐步到位,管理逐步规范,监管能力逐步提高,各类事故较大幅度下降。其中,特种设备无损检测方法的广泛使用和检测人员素质的提升,对我国特种设备安全监察工作起到了重要的作用。

近几年来,我们在健全法制、完善体制、创新机制上积极探索,努力推进法规标准体系、动态监管体系、安全评价体系建设,坚持从源头抓安全质量、从薄弱环节抓专项整

治,取得了一定成效。在整个过程中,分布在特种设备生产制造、安装、检验检测等环节的广大无损检测人员站在安全生产的第一线,科技支撑作用进一步强化,为安全状况进一步改善又作出了重要贡献。

该书是山东无损检测人员在新形势下,努力实践科学发展观和质量兴省的一个缩影,也是近几年山东无损检测科技发展和实用技术的一个小结。希望广大的无损检测人员以此为新的起点,为特种设备安全生产提供最广泛、最坚实的检测基础,为我国特种设备安全提供更为有利的质量保障。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '李永红' (Li Yonghong), written in a cursive style.

2008 年 11 月 25 日

前言

Preface

无损检测技术广泛应用于工程、机械、医疗、军工、石油、化工、钢铁等行业,其中在特种设备检验领域的使用非常普及。现在全国 17 万无损检测人员中,有近 15 万人从事特种设备行业。据国家质检总局 2005 年度统计,在特种设备监督检验中年均发现 2 万条缺陷,其中无损检测人员发现 1/3 以上;在定期检验中共发现 80 万条缺陷,其中无损检测人员发现 1/2 以上。由此可见,无损检测技术的应用明显促进了特种设备在生产制造、使用、维护等各方面的质量安全。

近几年,我们在开展特种设备无损检测人员训练的过程中,有关专业技术人员对无损检测技术不断进行研讨,提出一些自己的见解。为了更好地交流探索,我们组织他们将其见解形成材料提供交流平台,并按前沿技术与标准、管理体系、无损检测理论应用探索、无损检测实际应用探索、综合技术应用五个方面(涉及射线、超声、表面、管理等内容)编辑出版,请专家和社会同业人士斧正。

在本书的编写过程中,梁金昆、刘德镇、叶学余三位专家提出了许多修改意见;邢兆辉、侯少华、肖世荣等同志对有关文章提出了指导意见,且被作者予以采纳;魏忠瑞、郭振祥、田建新、陈伟等同志为本书的出版提供了帮助,在此一并表示感谢。

希望本书为无损检测行业从业人员提供工作交流的平台,亦可作为特种设备制造、安装、检验检测单位无损检测人员的工作参考。但由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和不足,敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 12 月



第一部分 前沿技术与标准

超声 TOFD 原理	1
关于超声 TOFD 法缺陷检出率的讨论	12
JB/T 4730—2005 渗透检测部分执行情况分析	16
X 射线多元曝光因子经验公式	20
衍射时差法(TOFD)超声检测技术	26
大氮肥合成塔出口管线材料失效的确定	35
表面缺陷对钢结构质量影响的研究	40
P91/T91 钢焊接接头的超声波探伤	47

第二部分 管理体系

特种设备检验检测机构质量管理体系内部审核和管理评审实施探讨	51
特种设备检验检测机构如何建立同时满足资格核准与计量认证、实验室认可的质量管理体系	59
特种设备无损检测机构质量管理体系文件建立的思考	73
特种设备无损检测行业现状及发展对策	81

基于 Web 的电梯安全可靠运行的远程监控系统	85
试论压力管道安全技术现状和对策	89

第三部分 无损检测理论应用探索

超声导波在发电厂管道检测中的应用研究	92
双壁透照时焦点偏移量的控制	104
超声 TOFD 法同时差曲线的制作方法	109
衍射斑纹	112
小径管超声波检测技术在电力建设工程中的应用	114
金属磁记忆诊断技术及其对电站高温高压螺栓的检测	121
正交试验法在焊缝射线探伤中的应用	126
不同型号的罐底板检验声发射探头灵敏度的比较方法	130

第四部分 无损检测实际应用探索

在用尿素合成塔内衬层渗透检测	142
中厚板超声波检测技术探讨	148
30 万千瓦汽轮机叶轮轮缘小脚的超声波探伤	154
Se-75 射线在中、小径管射线探伤中的应用	157
爆炸不锈钢复合板制除氧器的无损探伤	163
电梯限速器检测	166
透照管电压对焊缝射线照相灵敏度影响的试验	170
液化石油气卧式储罐表面裂纹的磁粉检测及表面裂纹特征分析	174
低合金高强钢焊接接头裂纹与超声波检测	178
浅谈使用周向 X 射线机透照对纵向裂纹检出的控制	183
高温管线焊缝的射线检测	187
超声检测中对未熔合的检出与判断	191
过渡段容器的射线多片检测	193
声发射技术在合成工序中置锅炉在线监测中的应用	196

渗透探伤在钢内筒钛板对接接头检测中的应用.....	200
渗透检测技术在 8AS-25 型氨气压缩机设备诊断中的应用	204

第五部分 综合技术应用

特种设备无损检测仪器设备溯源的要求.....	207
浅谈奥氏体不锈钢制压力容器产品的制造监检.....	216
新型锅壳热水锅炉安全经济运行.....	221
卧式快装热水锅炉烟管腐蚀原因分析及防止对策.....	225
对限速器实际检验工作中的几点探索.....	229
超声波探伤技术工作总结.....	234
论储气式集装箱定期检验中的无损检测.....	240
一台电站锅炉局部水冷壁管产生裂纹原因分析.....	243

第一部分 前沿技术与标准

超声 TOFD 原理

梁金昆

(山东科捷工程检测有限公司, 山东济南, 250100)

摘 要:本文对超声 TOFD 基础原理部分进行了较为详细的叙述。

关键词:超声波 衍射时差法 原理

0 引言

脉冲衍射时差法超声波探伤(TOFD), 辅以脉冲反射法超声波探伤(UT, 即常规超声波探伤), 可简称为 TOFD+UT。TOFD+UT, 统称为超声波探伤, 正作为 RT 的替代方法, 在我国处于试应用阶段。我学习了相关文章, 从应用入门角度, 撰写了此文。如有不当, 敬请指正。

1 基础原理

常规超探方法, 它的原理名称为“A 型脉冲反射法”。这种方法使用一个单发收探头, 发出脉冲超声纵波。利用折射横波声轴(波束的中心波线)扫查焊缝横截面, 遇到缺陷, 产生基本按原路返回的反射脉冲横波, 通过示波屏的 A 型显示发现缺陷。

TOFD 法原理名称应该叫“A 型脉冲衍射时差法”。这种方法使用一发一收相对倾斜的两个探头(“探头对”), 垂直横跨焊缝放置。一个探头发出脉冲超声纵波, 利用折射纵波声束扫查焊缝横截面, 遇到缺陷, 在缺陷端部(边

界)产生近似柱面波或球面波的衍射脉冲纵波。接收探头从不同方向上都可能接收到这个信号,通过示波屏的 A 型显示发现它,并且随着探头沿焊缝长度方向移动,把无数个 A 型脉冲显示通过射频采样数字化后,转换成灰度不同的 TOFD 图像。这就是说,A 型显示脉冲超声波的知识,也是 TOFD 的基础。

1.1 脉冲非检波的 A 型显示和 TOFD 图像形成

1.1.1 脉冲非检波的 A 型显示

脉冲超声波是间歇发射的超声波。因为持续发射时间短,间歇时间长,人们把持续的信号称为“脉冲”。常规超声波探伤,我们看到的脉冲是 A 型检波显示,TOFD 则利用它的非检波显示(以下简称“A 型显示”),如图 1 所示。

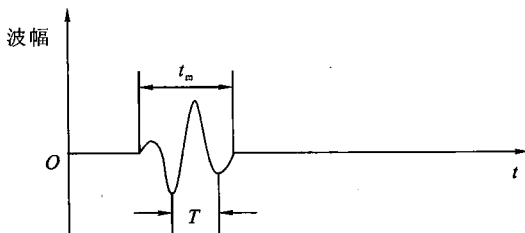


图 1 脉冲超声波的非检波 A 型显示

图 1 横坐标表示超声波的传输时间 t ,或者说声程 s ;纵坐标表示脉冲超声波的双相(双向)波幅。 t_m 是脉冲宽度, T 是超声波中心频率 f 对应的周期,则:

$$T = 1/f \quad (1)$$

在 TOFD 法中, t_m 和 T 的常用单位为 μs (微秒)或 ns (纳秒),它们与 s (秒)的关系是:

$$1 \text{ s} = 10^6 \mu\text{s} = 10^9 \text{ ns} \quad (2)$$

超声波的中心频率 f 的单位是 MHz , $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ s}^{-1}$,把其中的“s”换成“ μs ”,得:

$$1 \text{ MHz} = 1 \mu\text{s}^{-1} \quad (3)$$

如将 $f = 5 \text{ MHz} = 5 \mu\text{s}^{-1}$ 代入式(1)得: $T = 1/(5 \mu\text{s}^{-1}) = 0.2 \mu\text{s} = 200 \text{ ns}$ 。

由图 1 可得, $t_m = 2T$,当 f 为 $5 \mu\text{s}^{-1}$ 时, $t_m = 0.4 \mu\text{s} = 400 \text{ ns}$ 。

TOFD 法强调“时差”,所以对脉冲的 A 型显示,以及脉冲宽度、超声周期、相位的识别是很重要的。

1.1.2 TOFD 图像形成

“探头对”在某一位置直通波的 A 型显示如图 2(a) 所示, 它的 TOFD 图像是一条白、黑相间的直线。如图 2(b) 所示, 随着探头对位置的平稳移动, A 型显示转换成的无数条白、黑相间的直线, 构成了如图 2(c) 所示的 TOFD 图像。只要系统设置和探头与工件耦合符合标准要求, 灵敏度选择恰当, TOFD 图像便可以形成, 操作者只要按说明书操作就行了, 不必过多关注电子线路(如采样射频等)的问题。简单地说, 当把脉冲非检波 A 型显示的正、负半周用白、黑相间的线段表示时, A 型扫描线就成了有白、黑线段的直线, 如图 2(b) 所示。随着探头对沿焊缝长度方向平行移动, 无数条白黑线段就形成了 TOFD 图像, 如图 2(c) 所示。TOFD 仪器至少应该有 A 型图像显示的。

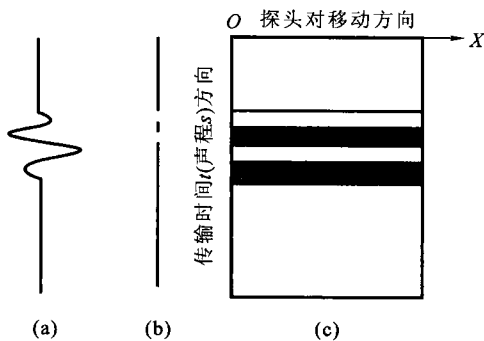


图 2 TOFD 法成像原理示意图

1.2 TOFD 法折射纵波的扫描范围

1.2.1 扫描方式

不论是常规方法, 还是 TOFD 法, 都以探头移动, 用折射波扫描整个焊缝(包括热影响区)体积为前提。图 3 所示的三维空间坐标, 能表示焊缝体积, 可便于表示扫描方向, 以及标定探伤发现的缺陷位置。

我们知道, 常规探伤最常用的扫描方式, 是探头基本垂直于焊缝做锯齿形扫描, 就是探头对既沿 X 轴移动、又沿 Y 轴前后移动的复合扫描。探头前后移动, 用折射横波的一次波声轴, 扫描焊缝的下半部, 用二次波声轴扫描焊缝的上半部。这样的叙述如何用简单的技术语言来表述呢? 设工件厚度为 T , 扫描焊缝的下半部, 扫描范围表述为“ $T/2 \sim T$ ”; 扫描焊缝的上半部, 扫描范围表述为“ $0 \sim T/2$ ”。这样一、二次波合起来的扫描范围为“ $0 \sim T$ ”, 代表扫描了焊缝的整个横截面。TOFD 法的扫描范围也可以用“ $0 \sim T$ ”或“ $0 \sim T/2$ ”、

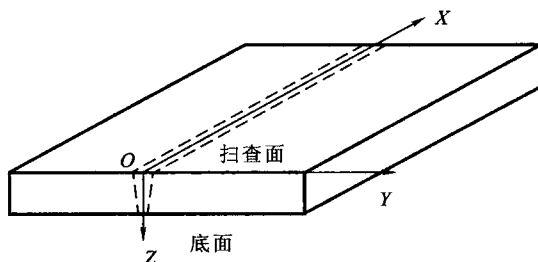


图3 三维空间坐标的定义

O—设定的检测起始参考点;X—沿焊缝长度方向的坐标;
Y—沿焊缝宽度方向的坐标;Z—沿焊缝厚度方向的坐标

“ $T/2 \sim T$ ”等方式来表达。

(1) 主要扫查方式——非平行扫查(D-scan)

非平行扫查是指探头对仅沿 X 轴方向平行移动的扫查,如图 4 所示。之所以称其为非平行扫查,是说扫查方向(探头移动方向)和声束的 YZ 平面不是平行的,而是垂直的。当工件厚度 T 为 6~50 mm、扫查范围为 0~ T 时,一次非平行扫查可检验整个焊缝体积。由于探头对横跨焊缝,焊缝余高不会影响扫查。通常情况下,这种扫查的探头对连线的中垂线就是焊缝中心线,声轴交叉点位于焊缝中心线所在的 XZ 平面中。如果探头对的声轴交叉点偏离焊缝中心线所在的 XZ 平面,这种非平行扫查称为“偏置设置”扫查,如图 5 所示。本文将对非平行扫查的非偏置扫查(图 4)进行重点讨论。

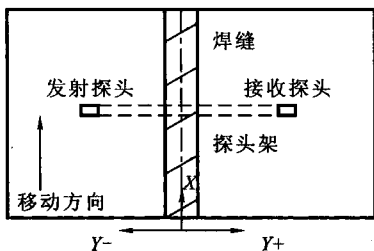


图4 非平行扫查

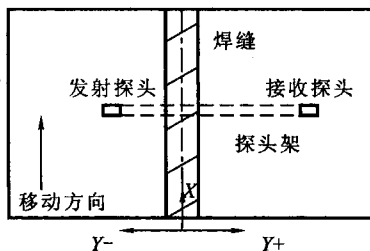


图5 偏置非平行扫查

(2) 辅助扫查——平行扫查(B-scan)

这是探头对仅沿 Y 轴方向平行移动的扫查,如图 6 所示。这是在非平行扫查之后,需要确定缺陷位置在焊缝的哪一侧(在 Y 轴上的位置),特别是需要精准地确定缺陷埋藏深度(在 Z 轴上的位置)和自身高度时,才使用的方法。由于焊缝宽度较之探头间距 $2s$ 很小,不会出现探头对中的一个探头位于焊缝余高上的情况。

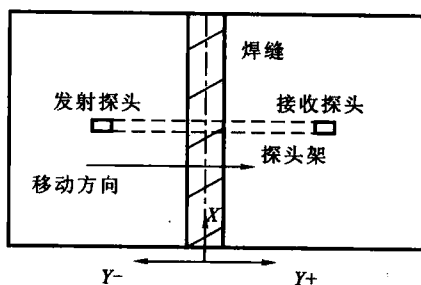


图6 平行扫查

1.2.2 纵波波束扫查

常规探伤方法,实质上是用折射横波主声束声轴(或称“中心波线”)来扫查,用最高波幅来给缺陷定位的。声轴的折射角 β_s 是恒定的, $\tan \beta_s = K$,所以 K 值是固定的。

TOFD法的主要扫查方式是非平行扫查(D扫查),即探头对只沿 X 轴平行移动,或者说扫查焊缝横截面时,探头对不沿 Y 轴前后移动。在这种情况下,仅用折射纵波中心波线扫查焊缝整个横截面是不可能的。因此,这种扫查是利用 $\beta_F \sim \beta_L$ 范围内的折射纵波的波束(波束中的众多波线)来扫查的。扫查范围应在 $\beta_F \sim \beta_L$ 声束覆盖的范围之内,如图7所示。

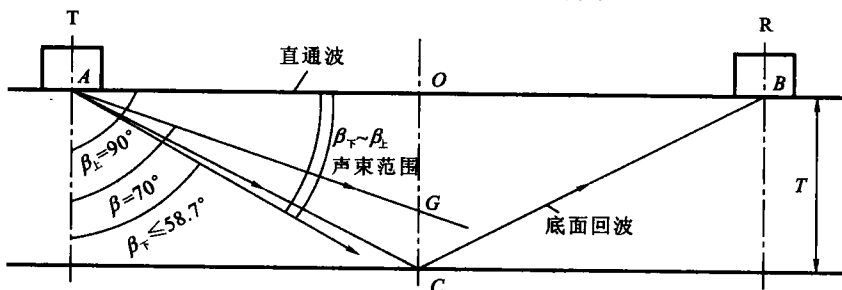


图7 按标准要求设置,扫查范围 $0 \sim T$ 的 β_L 和 β_F

当扫查范围为 $0 \sim T$ 时, $\beta_L = 90^\circ$,两探头 T 和 R 之间有直通的折射纵波,简称“直通波”,也叫“侧向波”。位于 A 、 B 两点中垂线上的底面 C 点有纵波的反射波,简称底面回波。需要注意的是,直通波不是表面波,它是在表面下(深度约为 $1 \sim 2$ 个金属原子)的纵波。

波束扫查的最大缺点是不知扫查到缺陷的折射纵波波线的折射角,因此,不能再简单地认为缺陷埋藏深度 h 和声程成正比。这个问题后面还要专门叙述。

1.2.3 $\beta_{\perp}$ 和 β_{F} 的计算

尽管 TOFD 法是用折射纵波波束扫查,但 TOFD 探头特性参数“声束角度”仍用声轴的折射角表示,如 70° 或 60° 等。研究折射声束为何有如此大的扩散声束,是学习 TOFD 基础理论之一。

(1) 求人射角 α

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c_{L1}}{c_{L2}} \times \sin \beta \right) \quad (4)$$

式中, c_{L1} ——探头塑料楔块纵波声速, $c_{L1} = 2400 \text{ m/s} = 2.4 \text{ mm}/\mu\text{s}$;

c_{L2} ——钢中纵波声速, $c_{L2} = 5950 \text{ m/s} = 5.95 \text{ mm}/\mu\text{s}$;

β ——钢中纵波主声束中心波线折射角。

如已知 $\beta = 70^\circ$, 将有关数值代入公式(4)得:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{2.4}{5.95} \times \sin 70^\circ \right) \approx 22.3^\circ \quad (5)$$

(2) 求第一临界角 α_1

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{c_{L1}}{c_{L2}} \right) = \arcsin \left(\frac{2.4}{5.95} \right) \approx 23.8^\circ \quad (6)$$

(3) 求发射声束的半扩散角 θ

这是我们所熟悉的,不过 TOFD 法有不同的规定。

$$\theta = \arcsin \left(F \times \frac{\lambda_{L1}}{D} \right) \quad (7)$$

式中, F ——人为取定的扩散因子,最大为 1.22, TOFD 法规定 $F = 0.7$; 当取 $F = 1.22$ 时, θ 称为主声束零值半扩散角,记为 θ_0 。

λ_{L1} ——纵波在探头楔块中的波长, $\lambda_{L1} = c_{L1}/f$, TOFD 法较常规法使用的频率 f 较高,波长 λ_{L1} 较小。

D ——探头晶片直径,较常规探伤法使用的晶片直径要小,下面举例说明。

当工件厚度 T 为 $6 \sim 10 \text{ mm}$ 时,扫查范围为 $0 \sim T$, 欧盟标准 EN/TS 14751:2004《焊缝超声波 TOFD 检测》(以下简称“标准”)推荐使用的中心频率 $f = 15 \text{ MHz} = 15 \mu\text{s}^{-1}$, 晶片直径 $D = 2 \text{ mm}$ 。计算出 $\lambda_{L1} = c_{L1}/f = 2.4 \div 15 = 0.16 \text{ (mm)}$, 已知 $F = 0.7$, 将有关数值代入公式(7), 则:

$$\theta = \arcsin (0.7 \times 0.16/2) \approx 3.2^\circ \quad (8)$$

(4) 求 $\beta_{\perp}$

设入射波前沿波线的人射角为 $\alpha_{\text{前}}$, 则:

$$\alpha_{\text{前}} = \alpha + \theta \quad (9)$$

$$\beta_{\perp} = \arcsin [(5.95/2.4) \times \sin \alpha_{\text{前}}] = 90^{\circ} \quad (10)$$

当已知扫查范围从“0”开始时,也可用下列方式判定 $\beta_{\perp}$ 为 90° 。

$$\alpha_{\text{前}} = \alpha + \theta \geq \alpha_1 \quad (11)$$

$$\theta \geq \alpha_1 - \alpha \quad (12)$$

例如当 $\beta = 70^{\circ}$ 时, $\alpha = 22.3^{\circ}$; 已知 $\alpha_1 = 23.8^{\circ}$, 则 $\alpha_1 - \alpha = 1.5^{\circ}$, 又 $\theta = 3.2^{\circ} > 1.5^{\circ}$, 所以 $\alpha_{\text{前}} > \alpha_1$, 所以 $\beta_{\perp} = 90^{\circ}$ 。

(5) 求 β_{F}

设入射波后沿波线的人射角为 $\alpha_{\text{后}}$, 则:

$$\alpha_{\text{后}} = \alpha - \theta \quad (13)$$

$$\beta_{\text{F}} = \arcsin [(5.95/2.4) \times \sin \alpha_{\text{后}}] \quad (14)$$

例如当 $\beta = 70^{\circ}$ 时, $\alpha = 22.3^{\circ}$, $\theta = 3.2^{\circ}$, $\alpha_{\text{后}} = 19.1^{\circ}$, 则:

$$\beta_{\text{F}} = \arcsin [(5.95/2.4) \times \sin 19.1^{\circ}] = 54.2^{\circ}$$

(6) TOFD 法折射纵波的特点

折射纵波范围很宽, 以上面 $\beta = 70^{\circ}$ 为例, 波束在 $\beta_{\text{F}} = 54.2^{\circ}$ 至 $\beta_{\perp} = 90^{\circ}$ 之间。

当扫查范围从“0”开始时, $\beta_{\perp} = 90^{\circ}$ 。

1.2.4 “标准”对扫查范围的具体规定

上述计算是为我们理解所用, 实际应用并不需要计算 $\beta_{\perp}$ 和 β_{F} , 只要按“标准”推荐的数据设置(选择)相关参数, 就可以保证扫查范围在 $\beta_{\text{F}} \sim \beta_{\perp}$ 覆盖的区域之内。概括起来分两种情况。

(1) 一次扫查(设置一个探头对的扫查)

当工件厚度 T 为 $6 \sim 50$ mm 时, 可选大折射角度(主声束角度) β 为 70° (或 60° 探头), 一次扫查整个(焊缝的)横截面, 扫查范围则是 $0 \sim T$ 。

$$2s = \frac{4}{3 \tan \beta} \times T \quad (15)$$

$$s = \frac{2}{3 \tan \beta} \times T \quad (16)$$

这就是说, 当折射纵波中心波线交叉点在到工件厚度 T 的 $2/3$ 时, 就可以认为 $\beta_{\perp} = 90^{\circ}$ 的波束扫查范围为 $0 \sim T$ 。

(2) 多次扫查(分层多通道扫查, 或设置数大于 1 的扫查)

当工件厚度 $T > 50$ mm 时, 应进行多次扫查。如 $T = 100$ mm 时, 要进行两次扫查(设置两组不同折射角探头对的扫查)。第一次要用折射角 $\beta = 70^{\circ}$ 时(或 60°)的探头, 创造 $\beta_{\perp} = 90^{\circ}$ 的条件, 扫查焊缝上半部, 扫查范围是 $0 \sim 50$