



中华人民共和国国家标准

GB/T 36228—2018

无损检测 平面型伤高度超声定量导则

Non-destructive testing—Guide for planar flaw height sizing by ultrasonic testing

2018-05-14 发布

2018-12-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 方法概要	2
5 30-70 法	2
6 端点衍射法	8
7 双晶双模法.....	14
8 双晶同模法.....	19
附录 A (资料性附录) 方法的局限性	23
附录 B (资料性附录) 伤高度评价流程	24

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出和归口。

本标准起草单位:国核电站运行服务技术有限公司、东方电气(广州)重型机器有限公司、上海电气核电设备有限公司、哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司。

本标准主要起草人:汪明辉、车天泽、汪军、汤国祥、邓黎、邓道勇、季龙华、张建磊。

无损检测 平面型伤高度超声定量导则

1 范围

本标准规定了用于测定铁素体和奥氏体工件开口平面型伤高度尺寸的超声检测技术及其原理。本标准推荐采用传播时间 (TOF) 或传播时差 (Δ TOF) 进行伤高度超声定量。

本标准所述的各项平面型伤高度定量技术均有其最佳适用范围, 详见附录 A。

本标准推荐按照附录 B 中的评价流程进行平面型伤高度定量。

本标准不适用于采用信号幅度法对伤尺寸进行定量, 不涉及平面型伤的长度定量方法, 不提供平面型伤的验收标准。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件, 其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

3 术语和定义

GB/T 12604.1 和 GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

双模法 bi-modal method

一种利用工件中同时存在的纵波和横波进行伤高度定量的超声检测方法。

3.2

端角反射 corner reflection

超声声束倾斜传播到由伤和被检工件表面形成的呈 90° 的交界面, 由于声波与界面相互作用而发生的超声能量反射。

3.3

双峰 doublet

同时成对出现在屏幕上, 且随着探头靠近和远离伤移动时同步游动的两个信号。

注: 采用端点衍射法进行伤高度定量时, 伤上端点信号和下端点信号(或者端角反射信号)即为双峰出现。

3.4

远表面 far-surface

检测时, 被检工件上与探头接触面相对的另一个表面。

注: 例如从外表面检测管材时, 管材内表面即为远表面。

3.5

近表面 near-surface

检测时, 被检工件上与探头接触的表面。

注: 例如从外表面检测管材时, 管材外表面即为近表面。

3.6

30-70 法 30-70 mode Conversion method

一种利用工件中同时产生的 70° 折射纵波和 30° 折射横波对工件远表面开口缺陷进行检测的技术。

注：使用这种检测技术时，可能会用到 70° 折射纵波、二次爬波和 30-70-70 波形转换声波对工件远表面开口裂纹的高度进行定量。

4 方法概要

4.1 平面型伤高度超声定量有如下几种方法：

- 30-70 法；
- 端点衍射法；
- 双晶双模法；
- 双晶同模法。

4.2 采用上述方法进行伤高度超声定量时，被检工件在厚度方向分为三个等分的区域：远表面 $1/3$ 区域，中部 $1/3$ 区域和近表面 $1/3$ 区域。使用 30-70 法时，检测人员根据某种特定信号的出现与否大致判断伤高度扩展到上述某个区域。

4.3 伤高度超声定量方法分别应用于起始于工件远表面，但扩展至不同厚度范围内的伤，其中端点衍射法主要应用于远表面 $1/3$ 区域，双晶双模法主要应用于中部 $1/3$ 区域，双晶同模法主要应用于近表面 $1/3$ 区域。如果采用合适的试块且方法经证明是有效的，上述各定量方法也可扩展应用于其对应的 $1/3$ 区域以外范围。

4.4 超声声程路径通常采用单一线条来表示。

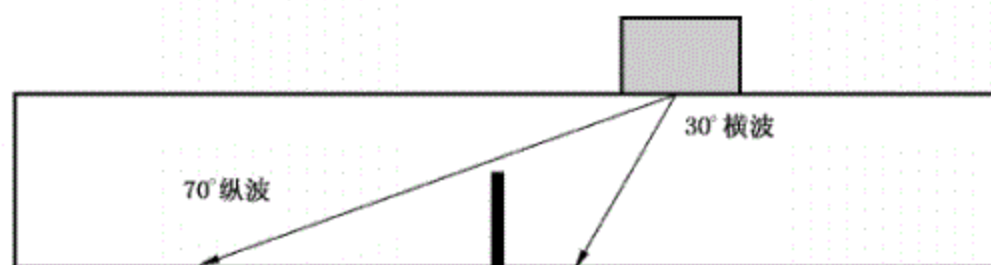
5 30-70 法

5.1 基本原理

5.1.1 方法概述

5.1.1.1 30-70 法测高时，利用 70° 折射纵波信号、波型转换信号和二次爬波信号，通过上述三种信号出现与否、信号游动范围和 70° 折射纵波信号的传播时间，大致判断伤高度扩展到被检工件的远表面 $1/3$ 区域、中部 $1/3$ 区域还是近表面 $1/3$ 区域。

5.1.1.2 30-70 法用于判断伤的大致高度或者伤是否远表面开口，见图 1。



a) 30-70 法声波入射方式

图 1 30-70 法声束传播示意图

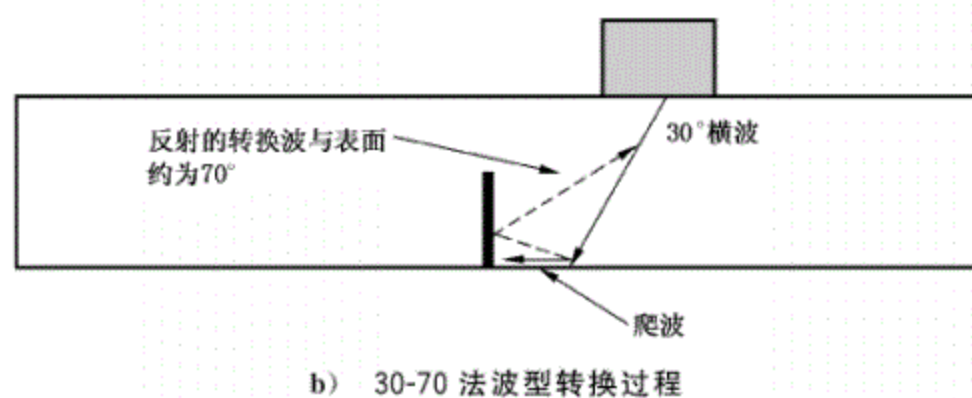


图 1 (续)

5.1.2 爬波的激发

纵波斜入射时在第二介质中产生折射纵波和折射横波。当速度较高的波型(例如纵波)与速度较低的波型(例如横波)在界面上发生相互作用,折射纵波和折射横波混杂在一起,在工件表面附近形成了一种沿着近表面区域传播的声波,该声波被称为爬波。爬波传播时,由于其中的纵波持续不断地激励横波,因此纵波会在距离激发起始点很短的位置就全部衰减,见图 2。随着近表面爬波的传播,其在声波到达的每个位置都发生波型转换产生横波,然后横波传播到工件内部,爬波的头部、直接和间接横波共同形成的波前被称为头波,见图 3。头波传播角度见式(1)。

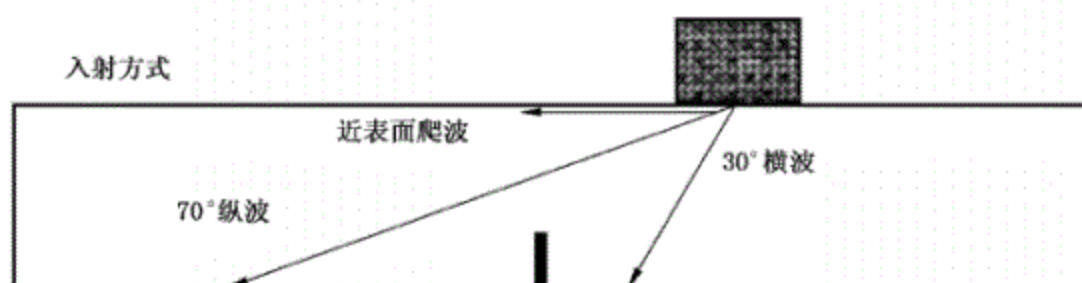


图 2 纵波入射形成近表面爬波的示意图

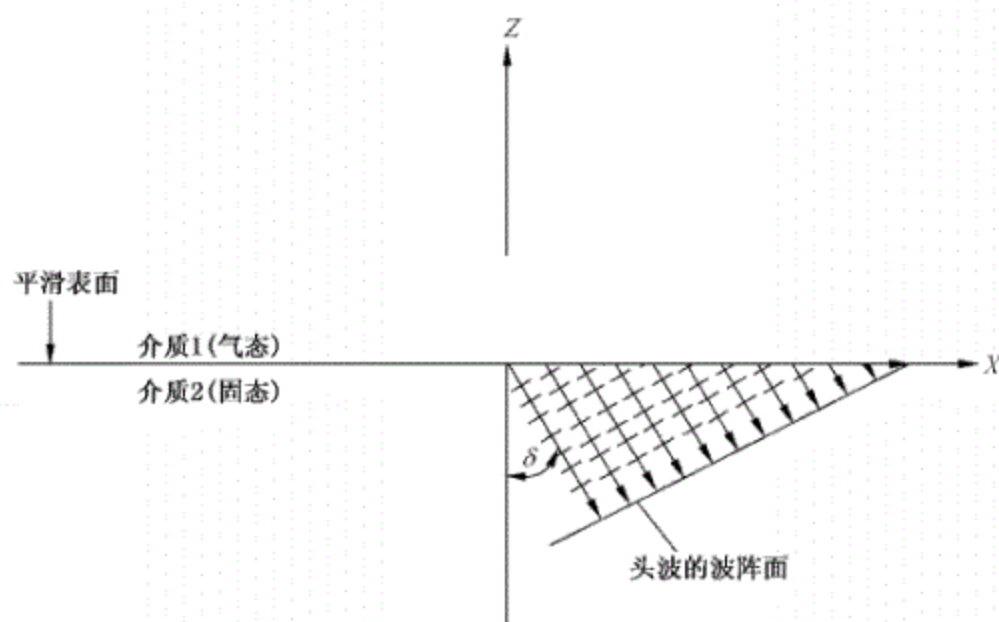


图 3 纵波转换成头波的示意图

$$\delta = \arcsin \frac{V_s}{V_L}$$

.....(1)

式中：
 V_s ——介质 2 的横波声速；
 V_L ——介质 2 的纵波声速；
 δ ——头波传播角度。

5.1.3 二次爬波的产生

当头波(由于纵波已全部衰减,此时只剩直接横波和间接横波)传播到工件的远表面时,由于声波与界面的相互作用原理,声波在此转换成爬波和 70°纵波,此时的爬波即为二次爬波。二次爬波经远表面的切槽或伤反射后,其部分能量转换为头波传播到近表面并被探头所接收。二次爬波对于远表面开口的微小反射体有着很强的检测灵敏度,其检测覆盖范围大约为远表面上距离波型转换点 5 mm~6 mm 的位置。

5.1.4 30-70 法的典型回波信号

5.1.4.1 概述

当探头向远表面反射体移动时,依次出现三种不同信号,分别为：
——70°折射纵波信号；
——30-70-70 波型转换信号；
——二次爬波信号。

5.1.4.2 70°折射纵波信号

如果伤延伸到被检工件中上部区域时,70°折射纵波在伤的上部产生反射信号。

5.1.4.3 波型转换信号

头波或直接横波在远表面反射时发生波型转换而形成 70°纵波,如果伤高度超过 10%~20%工件厚度,该 70°纵波被伤反射,并被扫查面上的探头接收,形成波型转换 70°纵波信号,见图 4。波型转换信号的出现通常表明伤高度大于 10%~20%被检工件厚度。

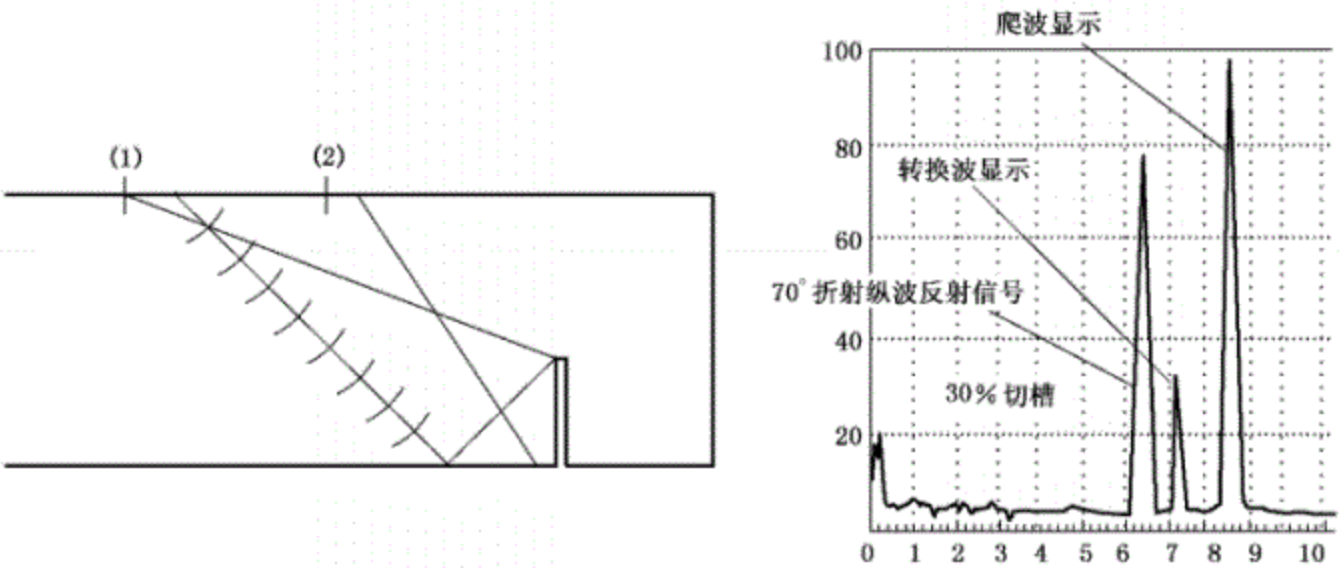
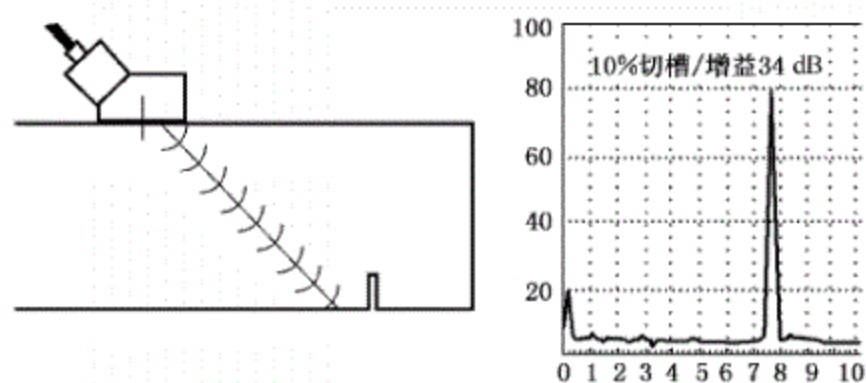


图 4 波型转换信号形成示意图

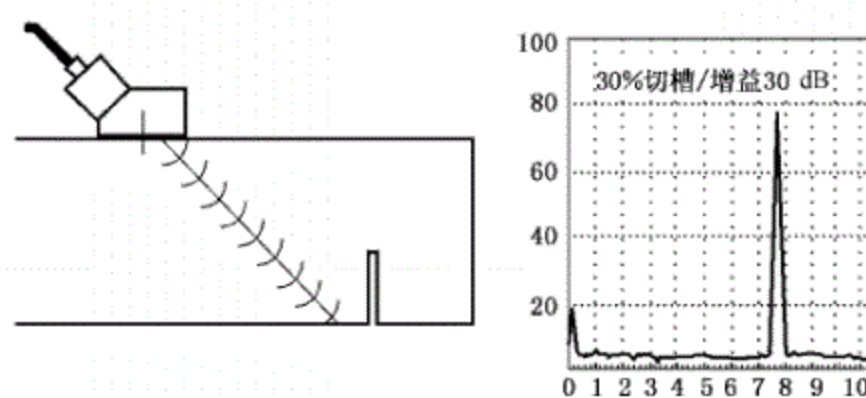
5.1.4.4 二次爬波信号

当工件远表面存在开口伤时,探头向伤的位置移动,二次爬波经伤反射后发生波型转换,产生头波或横波,最终被扫查面上的探头接收,形成二次爬波信号,见图 5。

二次爬波不是表面波,不受焊缝根部结构影响,不会出现根部焊瘤信号。二次爬波信号通常清晰可辨,形状比较尖锐,幅度明显比波型转换信号高,见图 6。二次爬波信号的游动范围一般小于波型转换信号,只出现在有限的探头移动范围内,见图 7。

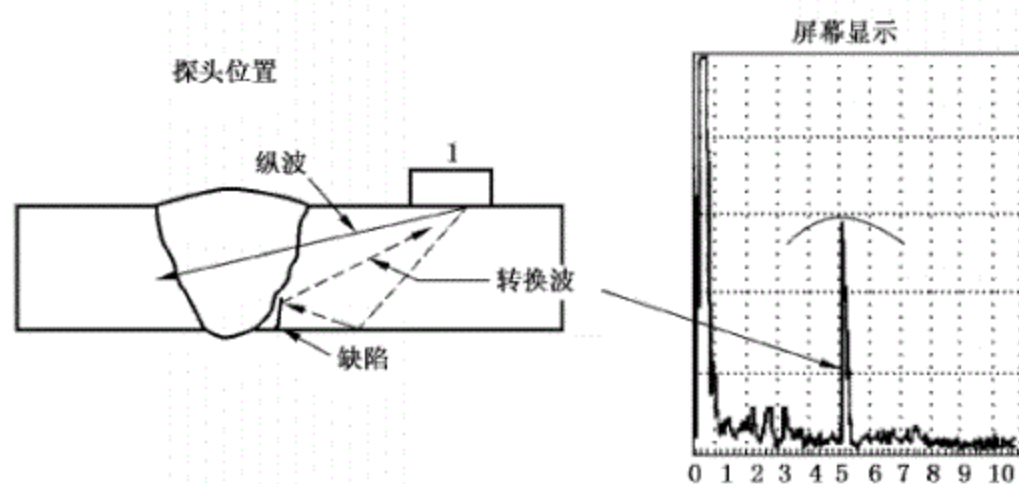


a) 切槽深度:10% t (t 为被检工件厚度),增益 34 dB



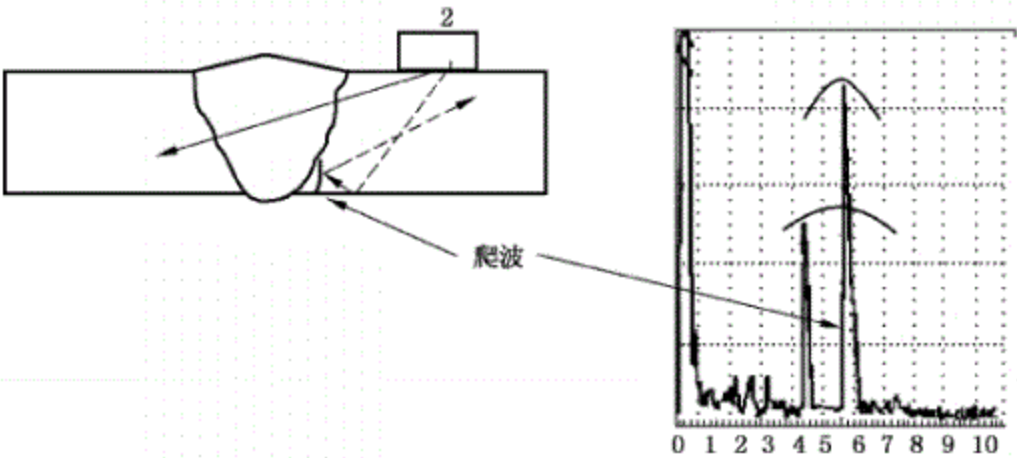
b) 切槽深度:30% t (t 为被检工件厚度),增益 30 dB

图 5 二次爬波信号的产生



a) 波型转换信号最高时的探头位置示意图

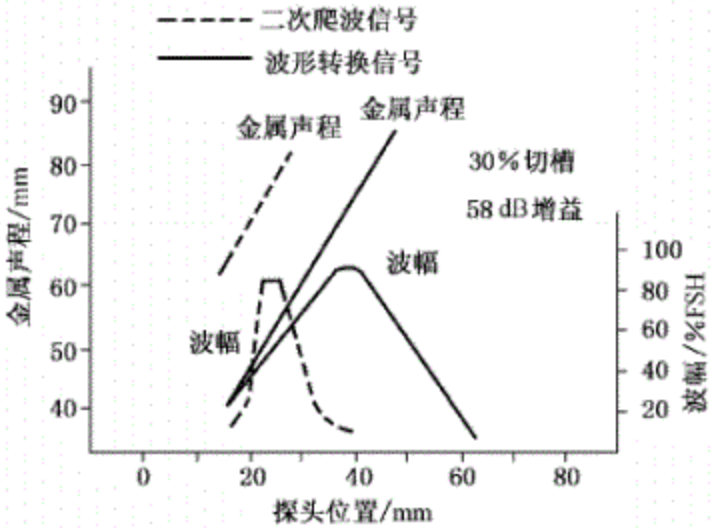
图 6 30-70 法信号与探头入射点的关系



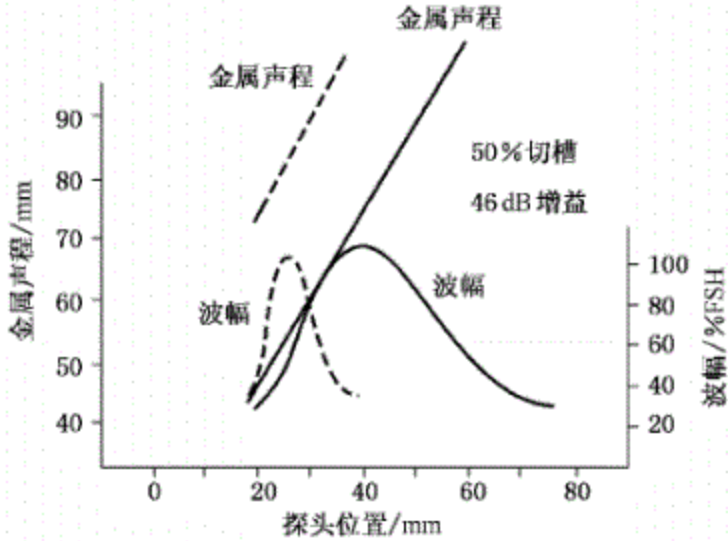
b) 二次爬波信号最高时的探头位置示意图

说明：
1——波型转换信号最高时的探头位置；
2——二次爬波信号最高时的探头位置。

图 6（续）



a) 二次爬波信号与波形转换信号游动范围比较(切槽深度:30% t , t 为被检工件厚度)



b) 二次爬波信号与波形转换信号游动范围比较(切槽深度:50% t , t 为被检工件厚度)

图 7 不同深度人工伤二次爬波信号和波型转换信号的回波动态特性比较

5.2 检测设备及系统调节

5.2.1 探头

5.2.1.1 概述

是否能够产生 70° 折射纵波信号、波型转换信号和二次爬波信号,在很大程度上取决于探头的性能参数。即便是同一厂家制作且标称参数值完全一样的探头,其性能也可能存在差异,因此在检测开始前,宜采用深度分别为 $20\%t$ 、 $40\%t$ 、 $60\%t$ 、 $80\%t$ (t 为被检工件厚度) 的内壁切槽评价探头的适用性。

5.2.1.2 声束角度

30-70 法测高时,通常要求折射纵波不小于 55° ,或者直接使用 70° 折射纵波探头,以此实现同时出现折射纵波信号、波型转换信号和二次爬波信号的目的,并利用上述三种信号来评价伤高度。

5.2.1.3 晶片

30-70 法检测时通常采用单晶探头。推荐使用晶片边长为 10 mm 的探头,也可根据工件厚度进行选择。

5.2.2 仪器

宜使用脉冲反射式超声仪,仪器的工作频率范围在 1 MHz~5 MHz。仪器水平线性误差不大于 2%。

5.2.3 试块

使用含有不同深度远表面切槽(如线切割槽、V 型槽、U 型槽等)的试块进行检测系统调节。试块可以是平板或者管道的一段,试块厚度与被检工件厚度相等,试块上的切槽深度最小为 $10\%t$,最大为 $80\%t$,并以 $10\%t$ 或者 $20\%t$ 递增(t 为被检工件厚度)。

5.2.4 系统调节

30-70 法测高时,系统调节步骤如下:

- 调节仪器延迟旋钮,使得始脉冲位于仪器屏幕的左半侧;
- 探头置于靠近试块端部的位置,找到波型转换信号和二次爬波信号;
- 前后移动探头使得二次爬波信号达到最高峰,然后分别调节仪器延迟和扫描范围旋钮,使得波型转换信号和二次爬波信号分别位于仪器的第 4 格和第 5 格;
- 调节仪器增益,使得二次爬波信号幅度达到仪器满屏幕的 $80\% \sim 100\%$,然后在此基础上将仪器增益提高 8 dB,此时的系统增益即为扫查灵敏度;
- 探头置于 $20\%t$ (t 为被检工件厚度) 切槽上方,移动探头获得切槽二次爬波信号的最高峰值。然后前后移动探头并记录此时波型转换信号的动态包络线;
- 探头置于 $40\%t$ (t 为被检工件厚度) 切槽上方,移动探头获得切槽二次爬波信号的最高峰值。前后移动探头并记录此时波型转换信号的动态包络线。如果存在 70° 折射纵波信号,记录其幅值;
- 探头置于 $60\%t$ (t 为被检工件厚度) 切槽上方,移动探头获得切槽二次爬波信号的最高峰值。前后移动探头并记录此时波型转换信号的动态包络线。如果存在 70° 折射纵波信号,记录其幅值。提高系统增益,使得 70° 折射纵波信号达到仪器满屏的 40% ,前后移动探头找到 70° 折射纵波信号的最高峰值,记录下此时信号在仪器屏幕上的位置,例如:2.5 格;
- 探头置于 $80\%t$ (t 为被检工件厚度) 切槽上方,移动探头获得切槽二次爬波信号的最高峰值。

前后移动探头并记录此时波型转换信号的动态包络线。如果存在 70° 折射纵波信号,记录其幅值。提高系统增益,使得 70° 折射纵波信号达到仪器满屏的 40%,前后移动探头找到 70° 折射纵波信号的最高峰值,记录下此时信号在仪器屏幕上的位置,例如:1.8 格;
——按照上述步骤进行调节和记录。典型的切槽深度与信号位置关系见表 1。

表 1 切槽深度与信号位置关系

远表面切槽深度/被检 工件厚度 $\times 100\%$	70° 折射纵波信号位置	爬波信号位置	是否存在波型转换信号
20%	无	2.5 格	有
40%	无	3.5 格	有
60%	2.5 格	4.5 格	有
80%	1.8 格	5.5 格	有

5.3 高度评价方法

- 5.3.1 整个工件厚度均分为 3 个区域,30-70 法判断远表面开口伤是否扩展至远表面 1/3 区域、中部 1/3 区域还是近表面 1/3 区域。宜采用其他测高方法测量伤高度。
- 5.3.2 仅出现二次爬波信号,大致判断伤高度小于 $15\%t$;同时出现波型转换信号和二次爬波信号,大致判断伤高度在 $15\%t \sim 40\%t$;同时出现 70° 折射纵波信号、波型转换信号和二次爬波信号,大致判断伤高度大于 $40\%t$ (t 为被检工件厚度)。
- 5.3.3 30-70 法高度评价结果会因探头类型、频率、晶片尺寸、工件厚度和材质不同而存在变化。使用该方法时,宜仔细关注波型转换信号的动态游动范围,如果该信号动态游动范围很大,则间接证明伤高度较大。

6 端点衍射法

6.1 基本原理

6.1.1 超声衍射是指超声绕过放置在其传播路径上的尖角或端部的一种现象。衍射现象通常发生在伤尖端,此时伤尖端作为一个新的超声能量发射源,向周围空间发射球面波或者柱面波,见图 8。如果在仪器屏幕上观察到衍射信号,则可确定衍射信号在工件厚度方向上的位置,即衍射信号的深度。尽管端点衍射法基本原理比较简单,但由于声波和平面性伤的相互作用非常复杂,导致实际应用中会存在很多其他干扰信号,比如伤本体的镜面反射信号、波型转换信号等,使得衍射信号的辨别存在困难。

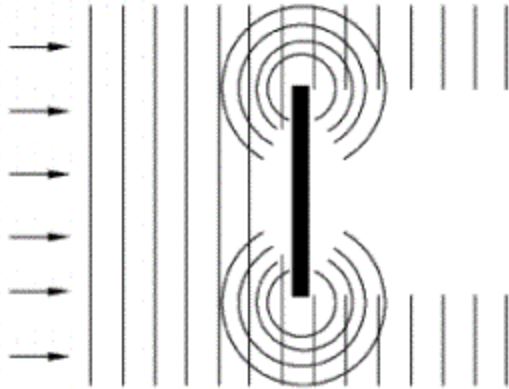


图 8 端点衍射现象示意图

6.1.2 采用端点衍射法测量伤尺寸的方法通常有以下两种：

- 传播时间法：测量衍射信号从伤端点传播到探头的时间，确定其相对于近表面的位置；
- 传播时差法：测量伤端点衍射信号和端角反射信号的时间差，确定其高度尺寸。

6.1.3 传播时间法(TOF)

传播时间法(TOF)定量技术是一种利用端点衍射信号的传播时间来对伤端点进行定位的技术。前后移动探头使得伤端点衍射信号达到最大波幅，然后通过计算该衍射信号的传播时间或声程确定伤端点距离扫查表面的深度，见图9。有时也利用伤端点的一次反射信号进行定量，即当探头远离伤运动时，伤的端点信号可能再次出现，但此时的伤端点信号出现在伤端角反射信号之后。

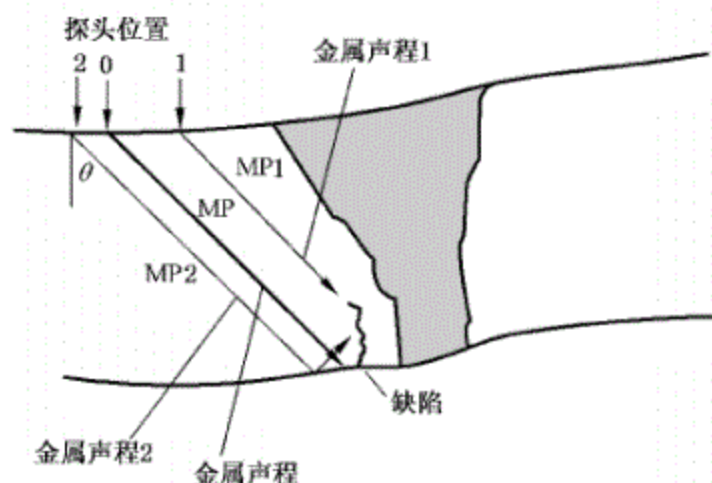


图9 传播时间法(TOF)测高的声束传播示意图

6.1.4 传播时差法(Δ TOF)

6.1.4.1 传播时差法(Δ TOF)是指通过测量同时出现在仪器屏幕上的伤端点衍射信号和端角反射信号的传播时间差计算伤的高度。使用传播时差法时，声束直径需大于被测量的伤高度，且伤基本垂直于检测表面，此时伤端点衍射信号出现在端角反射信号之前。与端角反射信号相比，端点衍射信号通常低得多，且端点衍射信号与端角反射信号的相位相反。

6.1.4.2 采用传播时差法(Δ TOF)测量伤高度时，测量端点衍射信号和端角反射信号的传播时间差，并应用式(2)计算伤高度。

$$h = \frac{v(\delta_t) \cos \theta}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- h ——伤高度，单位为毫米(mm)；
- v ——材料声速，单位为米每秒(m/s)；
- δ_t ——传播时间差，单位为秒(s)；
- θ ——折射角，单位为度(°)。

6.1.4.3 伤端点衍射信号和端角反射信号总是成对出现，虽然两者的动态波形不完全同步变化(即两者不会同时达到最高波幅)，但两者传播时间差相对固定，即两者在仪器屏幕上的间隔不变。因此，超声仪器宜设定成直接读取伤端点衍射信号和端角反射信号的传播时间差来计算伤高度，而不用分别读取两个信号最高波幅时的传播时间。这种测量方法适用于焊缝余高较宽，以至于阻碍探头移动到能够获得端点信号最高峰的情况。

6.1.4.4 有时也利用伤端点的一次反射信号来测量伤高度，其基本原理与直射波端点信号一样，差别是一次反射信号会出现在端角反射信号之后。无论是采用伤端点的直射波信号和一次反射信号，伤高度测量的精确度都取决于伤的生长方向：如果伤垂直于扫查表面，则高度定量结果较准确；如果伤朝指向探头侧倾斜，则采用直射波测量时伤高度偏大，采用一次反射波测量时伤高度偏小；如果伤朝远离探头侧倾斜，则采用直射波测量时伤高度偏小，采用一次反射波测量时伤高度偏大。

6.1.5 技术应用注意事项

6.1.5.1 采用端点衍射法进行伤高度定量时宜使用伤端点衍射信号,因此正确辨认伤端点信号是测量伤高度的关键。接近伤上端点的部位产生声波的反射信号,因此用于高度测量的伤端点信号有时并不仅仅来自于端点衍射信号,也包含伤端点反射信号,例如:采用对比试块上的人工切槽进行试验时,由于尖端衍射信号能量较弱,仪器接收到的更多的是伤端点反射信号的能量。伤端点信号的幅度通常比端角反射信号低 20 dB~30 dB。

6.1.5.2 保证探头有足够的扫查空间,以便能够发现伤区域所有可能存在的伤信号。检测人员注意信号辨别,避免将几何形状的反射信号或者焊缝内部的体积伤信号误判成伤端点信号。

6.1.5.3 有些伤会存在多个分叉,产生多个端点信号,检测人员注意端点信号的选取,采用能获得最大高度的信号来确定伤高度。

6.1.5.4 区分簇状裂纹的端点信号和端角信号比较困难,端角信号可能会淹没端点信号,此时前后移动探头,通过观察动态波形找到端点信号的最高峰。

6.1.5.5 在伤端点信号能够与其他信号相区分的前提下,端点衍射法适用于不同高度范围的伤测高。对于高度很小的伤,如果探头分辨力不佳,端点信号极易被端角信号所淹没,因此提高检测探头的分辨力是提高端点衍射法测高能力的关键。宽带窄脉冲探头能提供更好的分辨力,但对于奥氏体不锈钢焊缝,为了获得更好的声波穿透能力,又倾向于选择窄带探头。为了平衡上述矛盾,对于位于或邻近奥氏体不锈钢焊缝的伤,宜采用纵波探头进行检测,纵波探头发现高衰减特性材料中微弱的端点信号从而测量伤的高度,不宜使用一次反射波进行检测,因为纵波经底面反射后会发生波型转换,并由此带来很多干扰信号。

6.2 检测设备及系统调节

6.2.1 探头

6.2.1.1 概述

选择探头时宜关注以下几方面:

- 信噪比。探头信噪比与频率、晶片尺寸和波形有关;
- 分辨力。选择高频、窄脉冲的探头,以获得较高的分辨力;
- 声束扩散角。采用传播时差法测量中等高度的伤时,选择声束扩散角大的探头,同时观察伤上端点和端角信号;
- 波形。纵波探头可获得较好的上端点信号,但会存在变形波信号的干扰;
- 探头前沿。探头前沿尽可能小,尤其是检测存在余高的焊缝时;
- 脉冲周期。探头-6 dB 脉冲周期在 1.5 周~2 周。

6.2.1.2 声束角度

通常选择折射角为 40° ~ 55° 的探头。

6.2.1.3 频率

采用标称频率为 2 MHz~5 MHz 的单晶或双晶探头。采用直射波测量小伤高度时,宜采用频率为 4 MHz~5 MHz 的探头。采用横波探头检测粗晶材料母材时,宜采用较低频率的探头(例如 2 MHz~2.5 MHz),但低频探头会降低高度测量精度,如可行,宜先采用低频探头检出伤,再选用高频探头测高。

6.2.1.4 波型选择

当使用直射波端点衍射法进行测高时,横波和纵波探头都可用。对于不锈钢材料,纵波能获得更高

的端点衍射信号幅度,但分辨力下降。由于纵波探头同时发射横波,因此采用纵波时只能使用直射波进行检测。同时,纵波在底面反射时较易发生波型转换,从而导致信噪比下降。

6.2.2 仪器

宜使用脉冲反射式超声仪,仪器的工作频率范围在 1 MHz~5 MHz。仪器水平线性小于 2%。仪器应能显示全波检波信号和射频波信号。

6.2.3 试块

使用含有不同深度远表面切槽(如线切割槽、V 型槽、U 型槽等)的平板参考试块进行检测系统调节,切槽深度为厚度的 10% t ~90% t (t 为被检工件厚度)。试块材质与被检工件相同或相近,试块厚度与被检工件厚度差异不超过 $\pm 25\%$ 。

6.2.4 系统调节

6.2.4.1 概述

采用端点衍射法测高时,用 IIW、CSK-IA 等试块进行检测系统时基线调节,用一组带有表面切槽的试块(见图 10)进行深度调节。

6.2.4.2 传播时间法深度调节

传播时间法深度调节步骤如下:

- 选择合适的参考试块,试块上至少有两处深度已知的切槽(如深度为 20%和 80%被检工件厚度的切槽),且待定量伤高度在两切槽深度范围之内;
- 将探头置于试块表面,前后移动探头找到试块下端角反射信号峰值,调节仪器延迟旋钮,使得试块下端角反射信号至仪器屏幕的第 5 格;
- 移动探头找到试块上端角反射信号峰值,调节仪器扫描范围旋钮,使得试块上端角反射信号至仪器屏幕的第 10 格;
- 反复调节仪器延迟旋钮和扫描范围旋钮,使得试块下端角反射信号和上端角反射信号分别至仪器屏幕的第 5 格和第 10 格;
- 移动探头找到深度为 80%被检工件厚度的远表面切槽的上端点衍射信号峰值,调节仪器延迟旋钮使得该信号至仪器屏幕的第 1 格;
- 移动探头找到深度为 20%被检工件厚度的远表面切槽的上端点衍射信号峰值,调节仪器扫描范围旋钮使得该信号至仪器屏幕的第 4 格;
- 反复调节仪器延迟旋钮和扫描范围旋钮,使得深度为 80%被检工件厚度的切槽和深度为 20%被检工件厚度的切槽的上端点衍射信号分别至仪器屏幕的第 1 格和第 4 格。

按照上述方法调节完毕后,不同深度切槽上端点衍射信号在仪器屏幕上的显示位置见表 2。

表 2 不同深度切槽在仪器上的显示位置

信号在屏幕上的位置	远表面切槽深度/被检工件厚度 $\times 100\%$
1 格	80%
2 格	60%
3 格	40%
4 格	20%

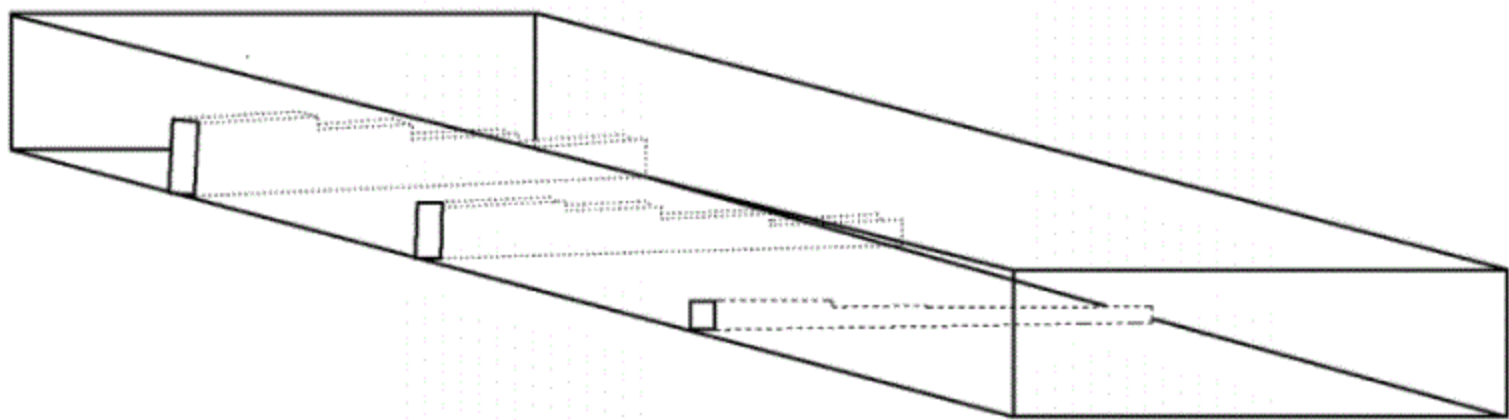


图 10 端点衍射法参考试块示意图

6.2.4.3 传播时差法深度调节

按照 7.2.4.2 的步骤完成检测系统调节,记录试块上各切槽的端角反射和上端点衍射信号显示位置差,该差值与切槽高度之间的大致关系见表 3。由于探头声束不能同时覆盖切槽端角和上端点,可能不能同时观察到高度大于 60%被检工件厚度的切槽端角反射信号和上端点衍射信号。

表 3 切槽深度与切槽端角反射/上端点衍射信号间距的对应关系

远表面切槽深度/被检工件厚度 $\times 100\%$	端角反射与上端点衍射信号显示位置差
20%	0.5 格
40%	1.0 格
60%	1.5 格
80%	N/A

6.3 高度评价方法

6.3.1 概述

采用直射波或一次反射波进行伤高度测量,但条件允许的情况下,宜有限选择直射波进行测量。

6.3.2 直射波测量

6.3.2.1 传播时间法

使用直射波找到伤端点衍射信号峰值,测量伤端点衍射信号声程或深度,被检工件厚度与端点衍射信号显示深度的差值即为伤高度,见图 11。

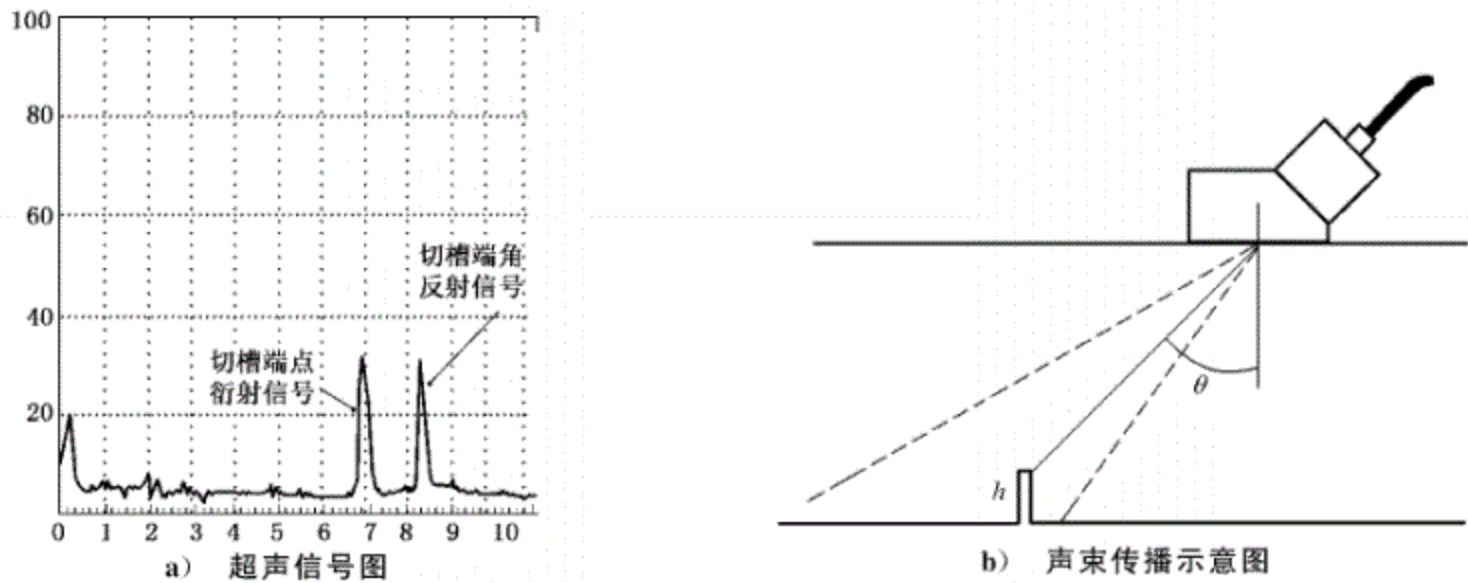


图 11 直射波端点衍射传播时间法测高示意图

6.3.2.2 传播时差法

使用直射波同时找到伤端点衍射信号和端角反射信号,前后移动探头使其中一个信号达到峰值,然后测量两信号的声程或深度差,则该深度差值即为伤高度,见图 12。

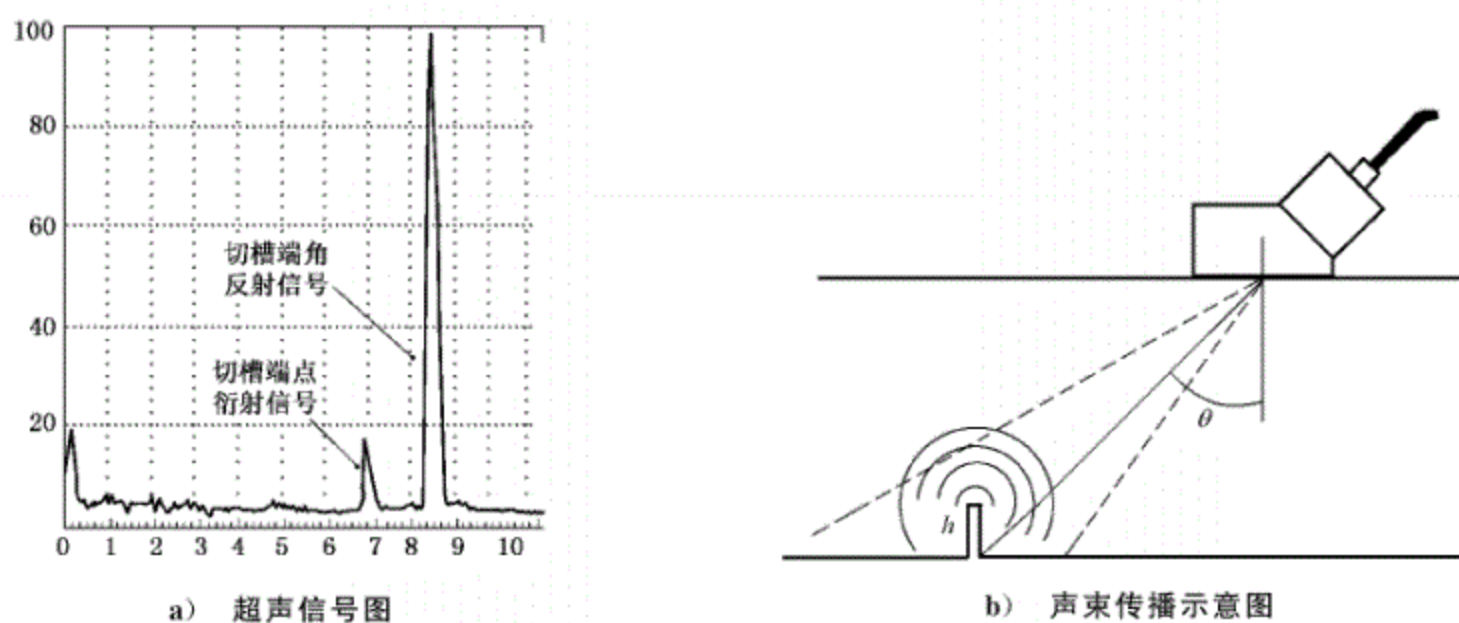


图 12 直射波端点衍射传播时差法测高示意图

6.3.3 一次反射波测量

6.3.3.1 传播时间法

使用一次反射波找到伤端点衍射信号峰值,测量伤端点衍射信号声程或深度,端点衍射信号显示深度与被检工件厚度的差值即为伤高度,见图 13。

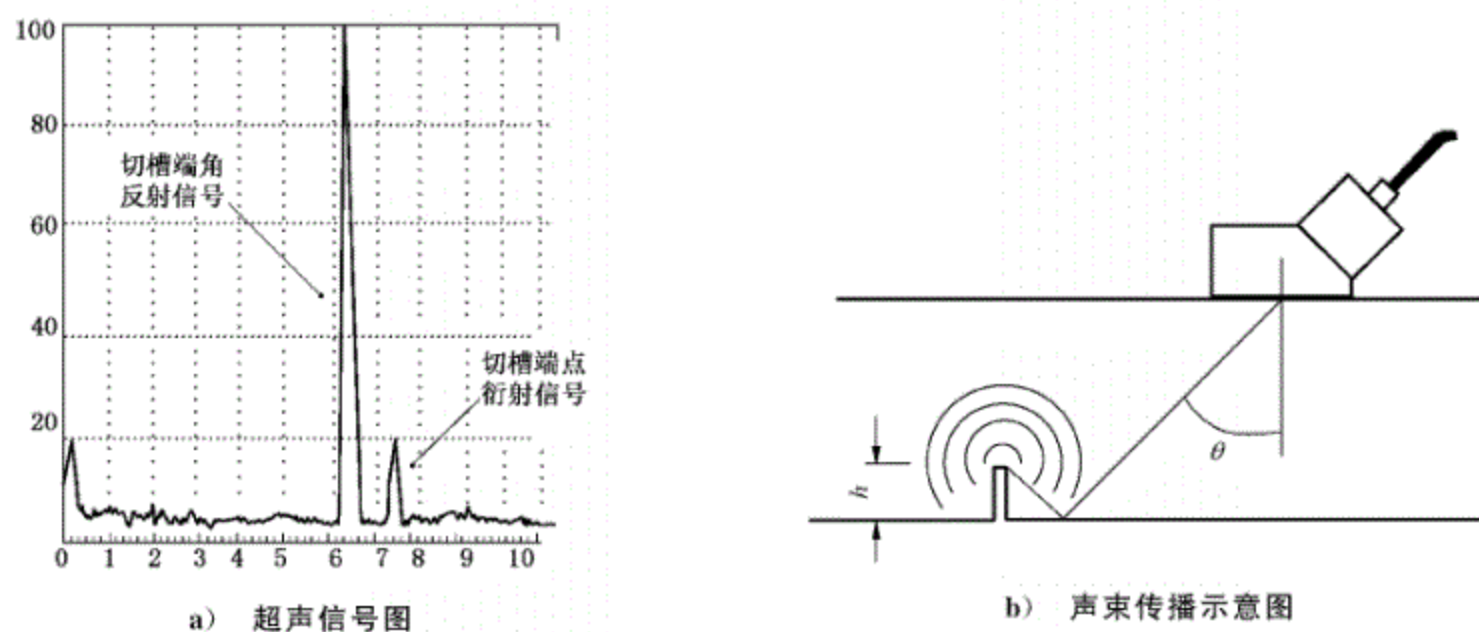


图 13 一次反射波端点衍射传播时间法测高示意图

6.3.3.2 传播时差法

使用一次反射波找到伤端点衍射信号,并同时找到伤端角反射信号,前后移动探头使其中一个信号达到峰值,然后测量两信号的声程或深度差,则该深度差值即为伤高度,见图 14。

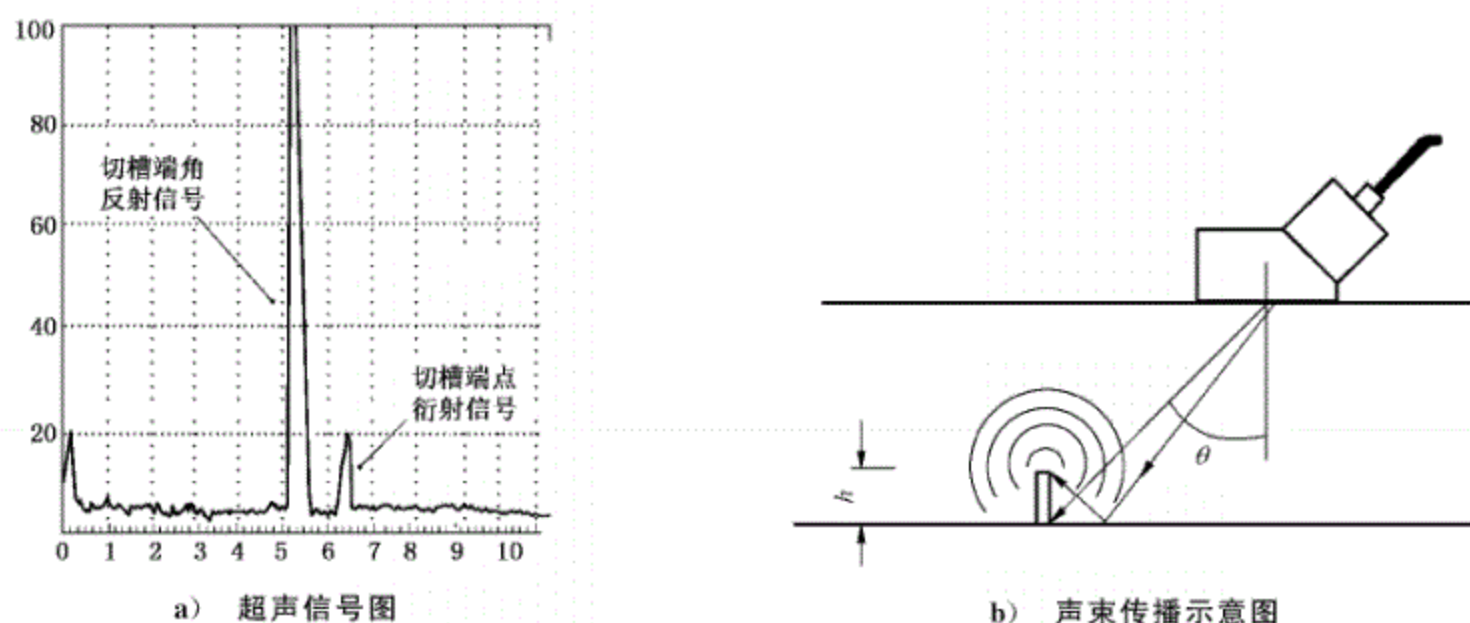


图 14 一次反射波端点衍射传播时差法测高示意图

7 双晶双模法

7.1 基本原理

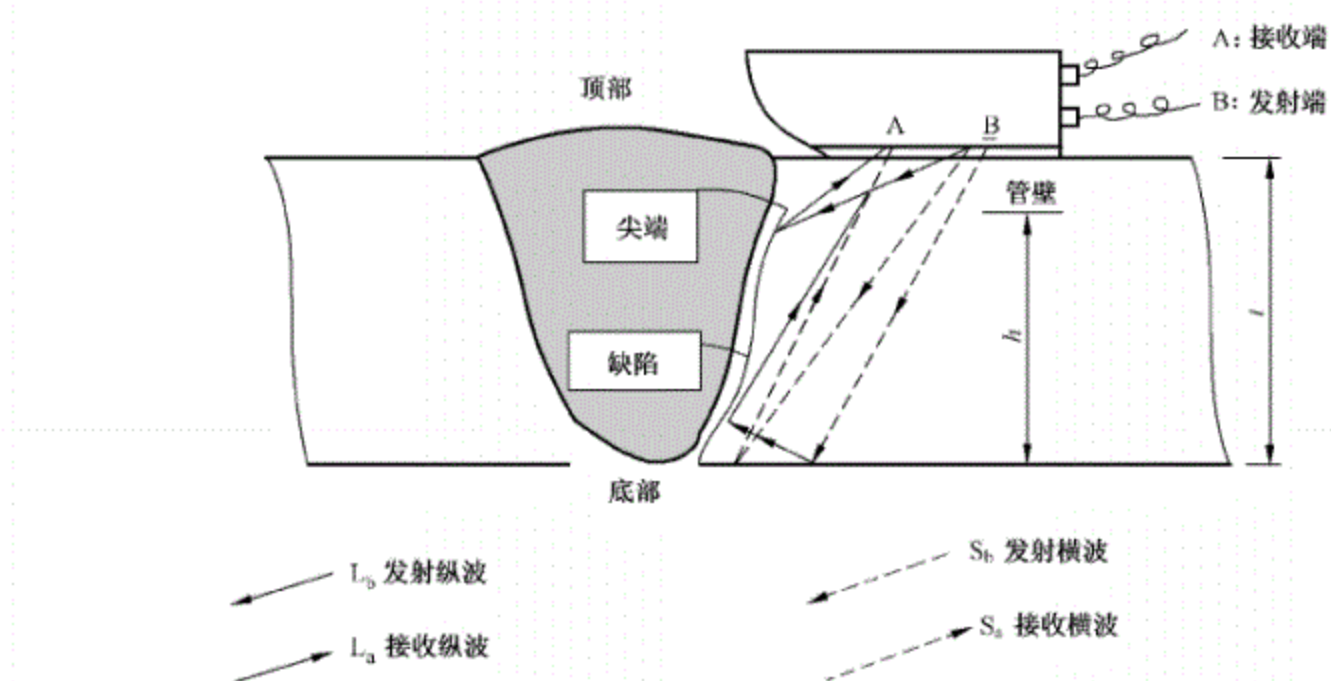
7.1.1 伤高度的双模定量法选择晶片呈一前一后布置的双晶探头,使用大角度的折射纵波声束和小角度的折射横波声束,声束能够穿透整个工件厚度。因此,双晶双模测高方法适用于高度在 10%~90% 被检工件厚度的远表面开口伤。

7.1.2 双晶双模法测高技术采用传播时间法或传播时差法进行高度测量。采用传播时间法时,前后移动探头使伤上端点的纵波信号幅度达到最高,并将其出现在仪器时基线上的位置与工件厚度进行归一化处理;采用传播时差法时,测量直接纵波信号和波型转换信号之间的间隔,该间隔与伤高度呈线性关系。传播时差法对于由于焊缝余高存在而阻挡探头移动的情况非常有用,因为此时不必测量信号的最高波幅。

7.1.3 采用双晶双模法测高时,使用不同高度的远表面切槽来进行仪器时基线的归一化调节,例如:对于厚度范围在 10 mm~40 mm 的工件,采用高度为 20% 被检工件厚度和 80% 被检工件厚度的远表面切槽进行仪器时基线的归一化调节。调节完成后,根据仪器屏幕上的信号显示直接读出伤高度与工件厚度之间的比值,伤的高度由仪器屏幕上左半部分的信号来表征,即直接纵波信号距离屏幕中线位置越远,或者直接纵波信号与波型转换信号间距越大,则伤高度越高。

7.1.4 声波在材料中的传播模式

双晶双模法检测时,探头同时发射一束纵波和两束横波,并且同时接收两束纵波(分别来自于伤上端点和根部)、一个来自于伤本体的波型转换信号和一个来自于伤根部的远表面爬波信号,见图 15。双晶双模法探头中的发射晶片和接收晶片可根据需要互换。由于探头的有效晶片尺寸较小,且探头频率不高(3 MHz 左右),所以声束扩散角较大,大角度的纵波和小角度的横波几乎能够覆盖被检工件的全厚度范围。当探头在试块上进行大范围的来回移动时,扫查区域下方的远表面切槽产生四个信号,分别是伤上端点纵波信号、伤根部纵波信号(不总是能观察到)、波型转换信号(通常是幅度最高的信号)、二次爬波信号,见图 16。纵波信号的游动范围最大,二次爬波信号的游动范围最小,见图 17。纵波信号和二次爬波信号的包络线几乎是同步的,这是因为当入射纵波的主声束接近伤上端点时,入射横波的主声束也正好接近伤根部,导致纵波信号和二次爬波信号几乎同时达到峰值。当探头进一步靠近伤,纵波信号逐渐降低。为测量信号的传播时间,通常移动探头直到信号达到峰值并开始下降。



说明：

A ——接收晶片；

B ——发射晶片；

L_a ——接收纵波；

L_b ——发射纵波；

S_a ——接收横波；

S_b ——发射横波。

图 15 双模法原理示意图

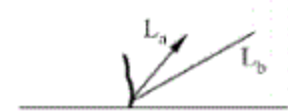
来自于尖端的直射纵波

L_a 与 L_b 在缺陷尖端相遇



来自于底部的直射纵波脉冲

L_a 与 L_b 在缺陷底部相遇



转换波脉冲

L_a 与转换波 S_b 在缺陷底部相遇



爬波脉冲

S_a 与 S_b 在缺陷底部相遇



图 16 双模法信号传播示意图

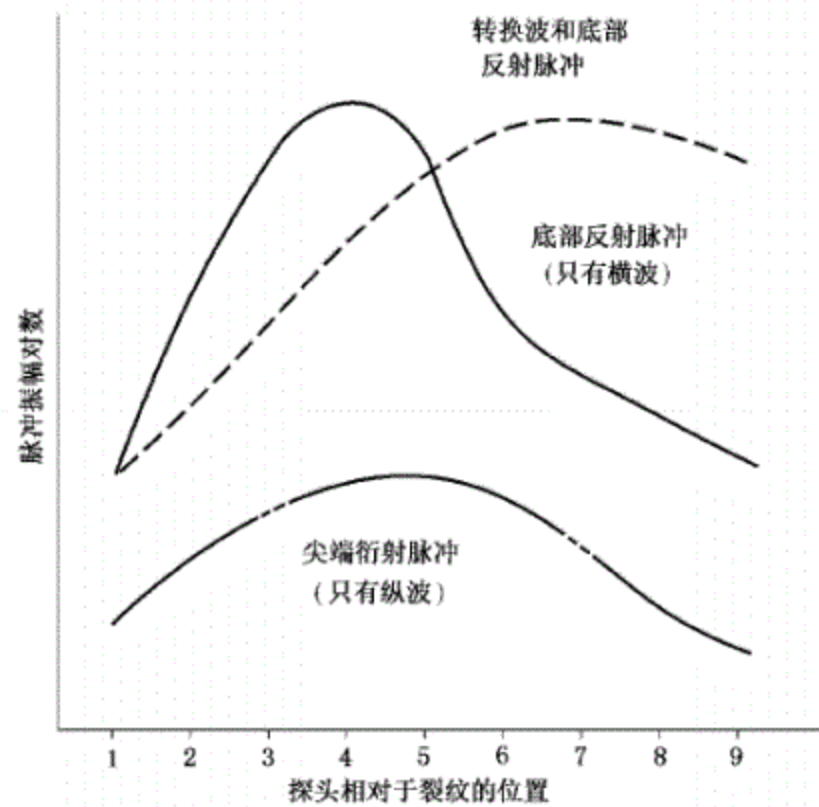


图 17 双模法信号动态包络图

7.1.5 传播时间法测高原理

如果焊缝余高不影响探头正常移动,则探头宜移动到能够获得上端点的纵波反射最高峰信号。图 18 阐述了纵波信号传播时间与伤高度占整个被检工件厚度百分比的关系,两者几乎呈线性比例关系,且线性关系与工件厚度无关。

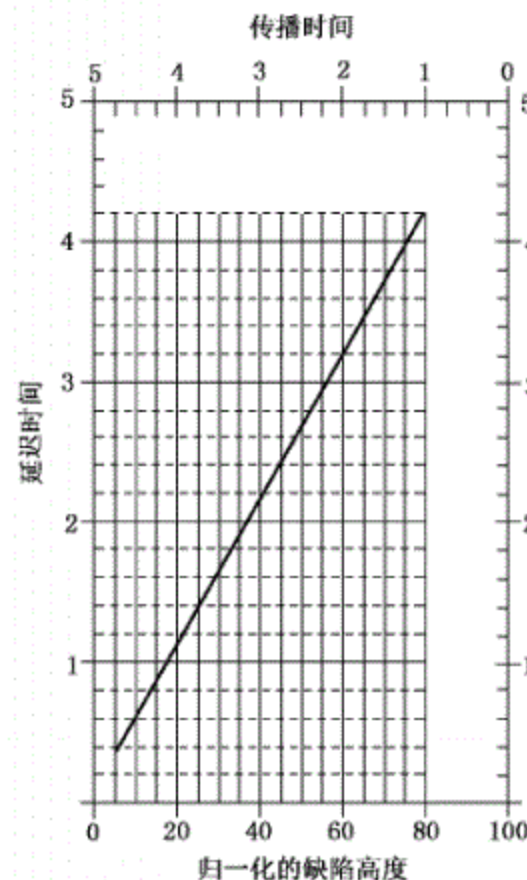


图 18 纵波信号传播时间与伤高度/厚度(h/t)线性关系

7.1.6 传播时差法测高原理

双晶双模法检测时,同一伤纵波信号与波型转换信号之间的间距与探头相对于伤的距离无关,伤的归一化高度与上述两信号间距之间的线性关系见图 19 和图 20。也可通过计算伤上端点纵波信号和伤

根部纵波反射信号(并不总是能够被观察到)的传播时差来确定伤高度,如果伤垂直于检测表面,其传播时差与伤高度/工件厚度的百分比呈近乎线性的关系。

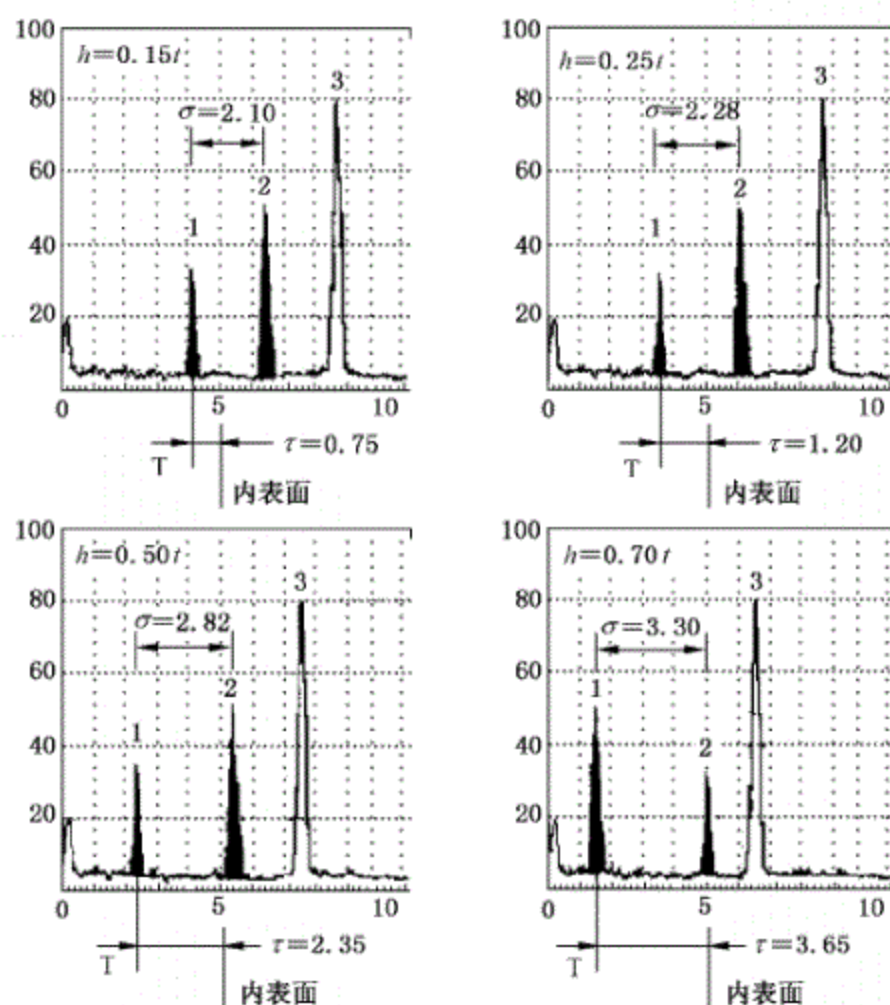


图 19 纵波信号传播时间、纵波信号与波型转换信号传播时差与伤高度/厚度(h/t)比例关系

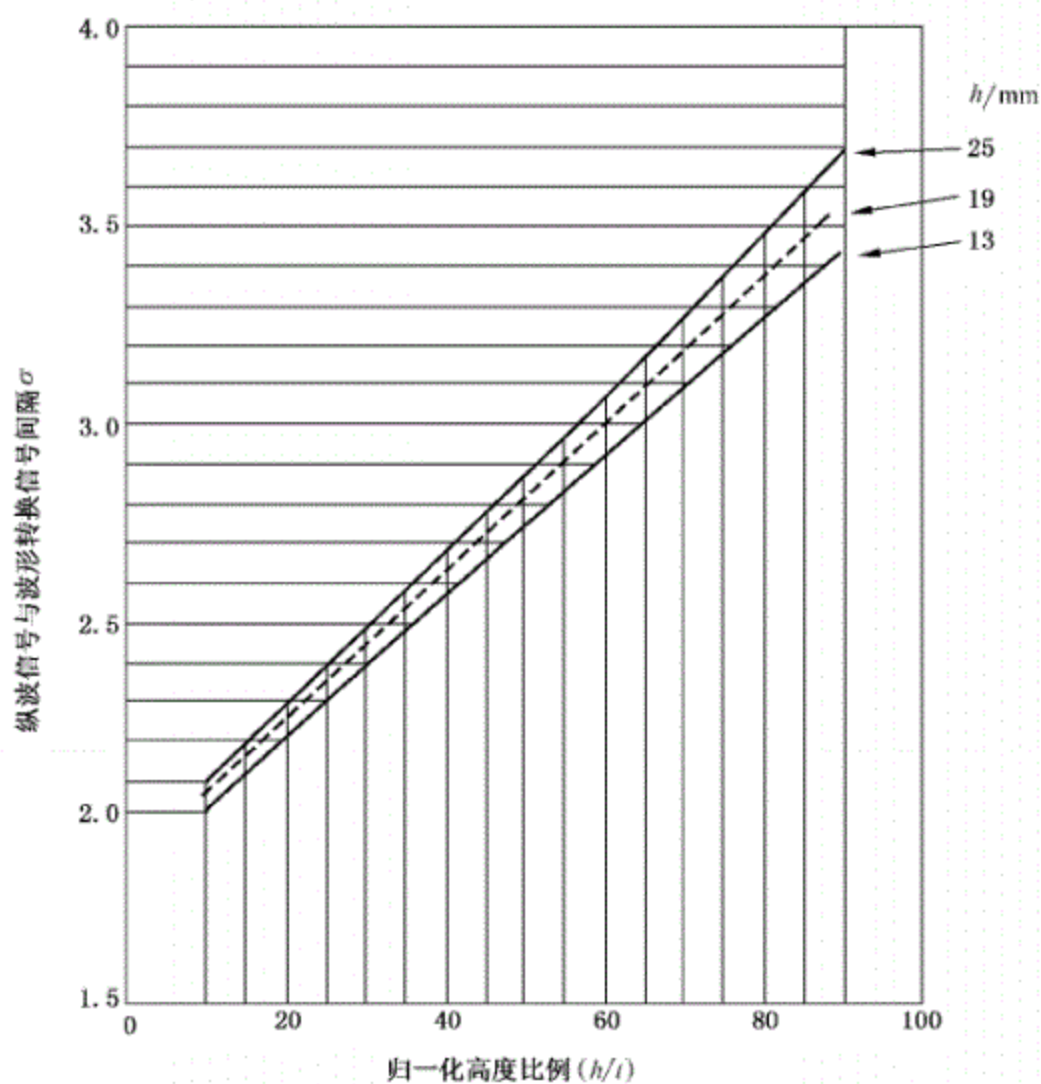


图 20 纵波信号与波型转换信号传播时差与伤高度/厚度(h/t)比例关系

7.2 检测设备与系统调节

7.2.1 探头

7.2.1.1 声束角度

探头由两块前后布置的晶片构成,每块晶片的楔块角度不同。检测时,探头中的一块晶片同时发射大角度的纵波声束和小角度的横波声束,另一块晶片接收从远表面开口伤不同部位反射的所有声波信号。

7.2.1.2 传播波型

双模法检测用探头同时发射和接收纵波和横波信号。

7.2.2 仪器

宜使用脉冲反射式超声仪,仪器的工作频率范围在 1 MHz~5 MHz。

7.2.3 试块

使用带有一组不同深度远表面标准切槽(如线切割槽、V 型槽、U 型槽等)的对比试块来调节检测系统,试块示意图见图 21。

单位为 mm

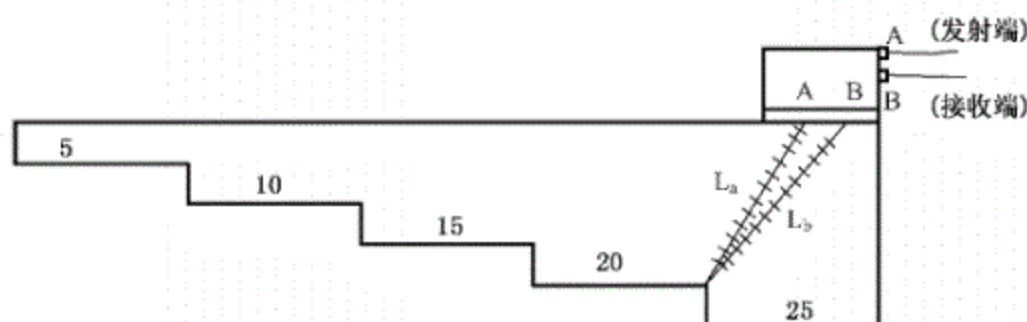


图 21 双模法参考试块示意图

7.2.4 系统调节

7.2.4.1 传播时间法调节步骤

- 探头置于试块边缘,移动探头直至出现折射纵波信号、波型转换横波信号和二次爬波信号;
- 调节扫描范围旋钮,将屏幕上第二和第三个信号的间距调节至大约 2 格;
- 移动探头,使得来自于深度为 80% 被检工件厚度的远表面切槽的折射纵波信号达到峰值,调节延迟旋钮使得该信号位于屏幕上的第 1 格;
- 移动探头,使得来自于深度为 20% 被检工件厚度的远表面切槽的折射纵波信号达到峰值,调节扫描范围旋钮使得该信号位于屏幕上的第 4 格;
- 反复调节仪器延迟和扫描范围旋钮,使得深度为 80% 被检工件厚度的远表面切槽和深度为 20% 被检工件厚度的远表面切槽的折射纵波信号分别位于仪器屏幕的第 1 格和第 4 格。

7.2.4.2 传播时差法调节

传播时差法调节步骤与传播时间法相同。检测系统调节完成后,记录折射纵波信号与波型转换信号之间的间距,远表面开口伤的深度与上述信号间距之间大致的对应关系见表 4。

表 4 远表面开口伤深度与折射纵波/波型转换信号间距的对应关系

远表面伤深度/被检工件厚度 $\times 100\%$	折射纵波和波型转换信号间距
20%	2.1 格
40%	2.5 格
60%	2.9 格
80%	3.3 格

7.3 高度评价方法

- 探头与仪器连接,仪器处于一发一收工作模式;
- 参照图 18 对检测系统进行调节,并使用试块中的切槽端点衍射信号对系统调节的准确性进行核查;
- 探头置于试块表面前后移动,并观察来自于不同尺寸伤信号的动态波形是否与预期的一致;
- 在被检工件无伤处进行正反两个方向的扫查,并观察仪器屏幕上非相关信号的动态和静态信号特征。调节仪器增益使得平均噪声水平约为仪器满屏高度的 10%;
- 前后大范围扫查伤区域,找到波型转换信号和二次爬波信号。如果伤垂直于扫查面,则只能观察到间距为 2.2 格的两个信号,且两信号位置分别约位于第 5 格和第 7 格。前后移动探头时,伤信号持续范围越大,则伤越深;
- 从相反的两个方向前后大范围扫查伤区域,如果两个方向扫查时伤信号特征基本一致,则意味着伤很可能垂直于扫查面且伤平面垂直于探头轴线;
- 分别从工件两侧进行扫查,找到伤的纵波端点衍射信号。如果两侧扫查时伤端点衍射信号的幅度基本相等,且低于参考试块上的信号,则同样意味着伤平面垂直于探头轴线。测量伤的纵波端点衍射信号和波型转换信号之间的间隔,按照图 20 计算伤高度。两信号间隔越大,则伤越深;
- 移动探头,找到纵波端点衍射信号最高峰,此时信号位置与屏幕中间值之间的间隔用来计算伤距扫查面深度/工件厚度的比值;
- 如条件允许,从其他方向测量伤高度。如果能找到伤根部反射信号,则用伤端点衍射信号与根部反射信号之间的深度差确认伤高度。

8 双晶同模法

8.1 基本原理

双晶同模纵波法或双晶同模横波法基本原理也是利用传播时间或传播声程来测量伤高度,不同的是此时采用的是双晶纵波或横波探头,该方法最适合于高度超过工件厚度 50% 的内壁开口伤的测高,此时采用大角度探头进行测量,能获得较高的测量精度,基本方法是移动探头获得伤上端点信号的峰值,记录下此信号的传播时间或传播声程,计算获得伤上端点距离检测表面的深度,其与工件厚度之间的差值即为伤高度。当伤朝着远离探头声束方向倾斜时,记录的信号可能不是伤上端点衍射信号,而是靠近伤上端点的反射信号,此时信号幅度较高且游动范围较大,而且会导致测量的伤高度偏小。这种情况下,宜采用以下方式进行修正:

- 探头朝着伤方向移动,直到信号达到最高峰并下降 3 dB,以此时信号传播时间或传播声程计算伤上端点距离检测表面的深度;

- 探头朝着伤方向移动,观察包络线上信号达到最高峰后下降过程中波幅细微上升(由于衍射信号叠加造成波幅增强),以此时的信号传播时间或传播声程计算伤上端点距离检测表面的深度。

8.2 检测设备与系统调节

8.2.1 探头

8.2.1.1 概述

探头的声束会聚深度取决于其设计参数和设计用途。即便是同一厂家制作且标称参数值完全一样的双晶探头,其声束会聚深度范围也可能存在较大的差异,因此使用双晶探头前,宜在带有不同深度反射体的试块上进行声束会聚深度范围的测试。

8.2.1.2 声束角度

采用双晶探头进行伤高度测量,能减少界面反射,解决散射信号干扰和能量下降等问题。双晶探头通常用直射波进行检测。根据被检工件厚度范围,分别选择折射角为 45° 、 60° 、 70° 的纵波或横波双晶探头,以及上表面爬波探头。薄工件进行伤高度定量时,由于声波不需要穿透很深,宜选择大折射角的探头;厚工件进行伤高度定量时,宜减小折射角以增加声波穿透能力。

8.2.1.3 频率

探头频率通常选择 $2\text{ MHz}\sim 5\text{ MHz}$,粗晶材料检测时宜更低。宜选用窄带探头。薄工件进行伤高度定量时,由于声波不需要穿透很深,宜选择高频率的探头;厚工件进行伤高度定量时,宜降低探头频率以增加声波穿透能力。近表面伤进行测高时,探头频率宜为 $4\text{ MHz}\sim 5\text{ MHz}$ 。

8.2.1.4 晶片

探头为双晶片。根据被检工件厚度进行选择晶片尺寸,探头晶片边长宜为 $10\text{ mm}\sim 30\text{ mm}$ 。

8.2.1.5 声束会聚深度或声程

根据被检工件厚度或待检测的深度范围选择合适的声束会聚深度或声程。声束会聚深度和声束会聚声程的换算关系见式(3)。

$$FD = FS \cdot \cos\beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

FD——声束会聚深度,单位为毫米(mm);

FS——声束会聚声程,单位为毫米(mm);

β ——探头折射角,单位为度($^\circ$)。

8.2.2 仪器

宜使用脉冲反射式超声仪,仪器的工作频率范围在 $1\text{ MHz}\sim 5\text{ MHz}$ 。仪器水平线性小于 2% 。仪器宜能显示全波检波信号和射频波信号。

8.2.3 试块

双晶同模法检测时,采用带有一系列不同深度远表面标准切槽(如线切割槽、V型槽、U型槽等)的试块进行系统调节。试块为平板或一段管子,试块材质与被检工件相同或相近,试块厚度与被检工件厚度相同,试块上切槽上端点的深度以距扫查面 3 mm 进行递增。

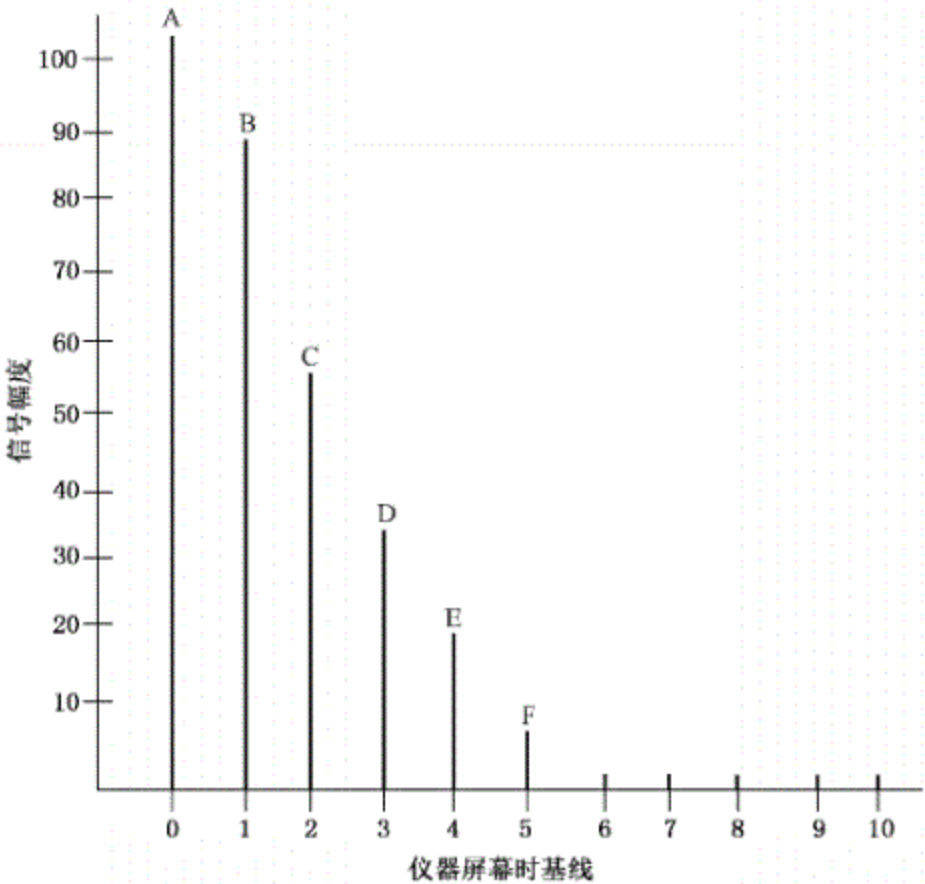
8.2.4 系统调节

- 调节仪器延迟旋钮,使仪器始脉冲位于屏幕左半侧;
- 移动探头找到距扫查面 3 mm 深的切槽上端点信号的最高峰,调节仪器延迟旋钮使该信号位于仪器屏幕的 1 格处;
- 移动探头找到距扫查面 15 mm 深的切槽上端点信号的最高峰,调节仪器扫描范围旋钮使该信号位于仪器屏幕的 5 格处;

按照上述步骤调节后,切槽上端点深度与仪器线性对应关系见表 5,信号在仪器屏幕上的位置见图 22。

表 5 反射体深度与仪器线性对应关系

切槽上端点深度	信号显示位置
3 mm	1 格
6 mm	2 格
9 mm	3 格
12 mm	4 格
15 mm	5 格



说明:

- A ——试块端部信号显示位置;
- B ——3 mm 深反射体信号显示位置;
- C ——6 mm 反射体信号显示位置;
- D ——9 mm 反射体信号显示位置;
- E ——12 mm 反射体信号显示位置;
- F ——15 mm 反射体信号显示位置。

图 22 双晶同模法调节结果示意图

8.3 高度评价方法

应用式(4)计算伤高度。

$$h = t - 3s \quad \text{.....(4)}$$

式中：

h ——伤高度,单位为毫米(mm)；

t ——工件厚度,单位为毫米(mm)；

s ——上端点信号出现在仪器上的格数。

附录 A

(资料性附录)

方法的局限性

每种测高方法都有局限性,因此,实际应用中,宜详细了解每种测高方法的有效适用范围,并采用多种测高方法进行测量,以提高伤高度定量的准确性。图 A.1 以框图示意的方式给出了 3 种主要测高方法所对应的最佳适用性范围。

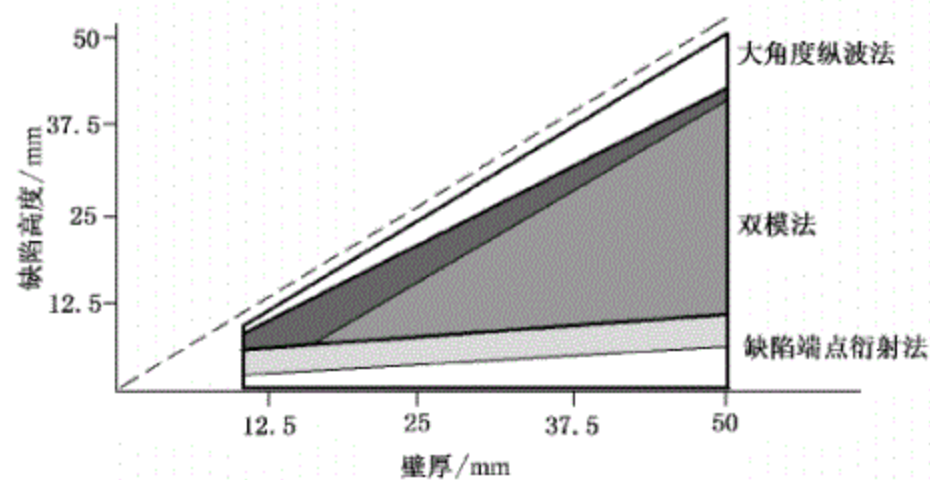
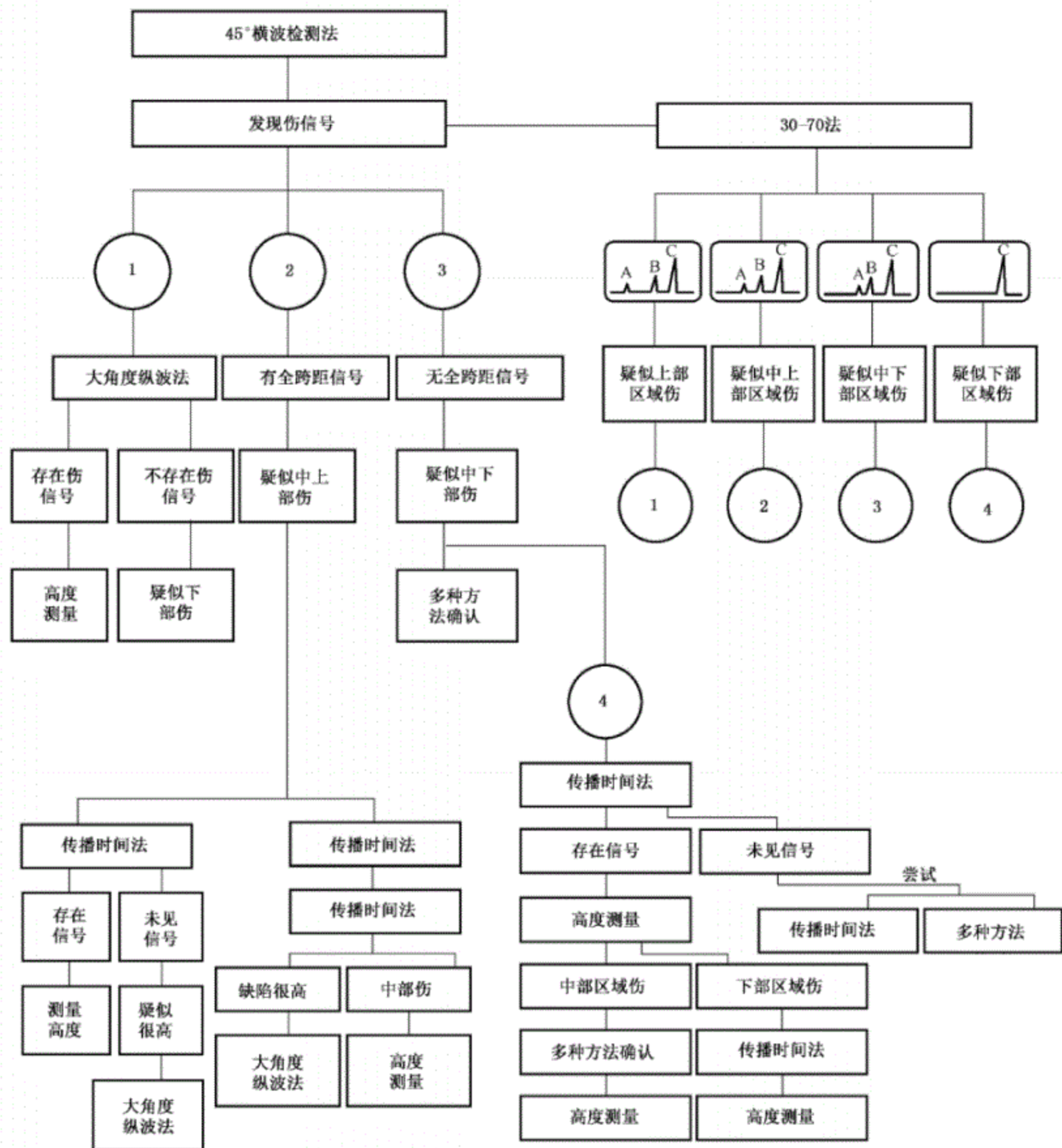


图 A.1 各伤定量方法的最佳适用性范围

附 录 B
(资料性附录)
伤高度评价流程

- B.1** 伤高度分为上部、中上部、中下部、下部四种情况(即①~④四种类型),伤高度评价流程图见图 B.1。
- B.2** 采用 45°横波检测法进行检测,发现伤信号后进行定性。
- B.3** 如判定为平面型伤,采用 30-70 法进行检测,并根据信号特征初步判断伤的扩展区域。
- B.4** 根据初步判断的结果,分别按照流程图左侧①~④各种类型平面型伤定量方法的步骤进行高度测量。



说明：

A——70°折射纵波信号；

B——波形转换信号；

C——二次爬波信号。

图 B.1 伤高度评价流程