



中华人民共和国国家标准

GB/T 11344—2021

代替 GB/T 11344—2008

无损检测 超声测厚

Non-destructive testing—Ultrasonic thickness measurement

(ISO 16809:2017, NEQ)

2021-05-21 发布

2021-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

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 1

5 一般要求 3

6 测量准备 3

7 仪器的设置 6

8 检测报告和记录 7

附录 A (资料性) 常见工程应用材料的超声声速 9

附录 B (资料性) 容器和管道腐蚀的超声测厚 11

附录 C (资料性) 测量方法选择 14

附录 D (资料性) 影响测量准确度的因素 18

附录 E (资料性) 特殊检测条件下的仪器设置 25

参考文献 27

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 11344—2008《无损检测 接触式脉冲回波法测厚方法》，与 GB/T 11344—2008 相比，除编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 修改了检测方法的内容，增加了穿透法超声测厚的相关要求[见 4.3d)，2008 年版的第 4 章]；
- 删除了意义和用途(见 2008 年版的第 5 章)；
- 增加了测量准备(见第 6 章)；
- 删除了双晶探头的非线性基本要求(见 2008 年版的第 7 章)；
- 删除了方法要求(见 2008 年版的第 9 章)；
- 增加了检测记录(见第 8 章，2008 年版的第 10 章)；
- 删除了典型的测厚校准用阶梯试块(见 2008 年版的附录 A)；
- 增加了常见材料声速表(见附录 A)；
- 增加了容器和管道腐蚀测厚的特殊要求(见附录 B)；
- 增加了在役和制造过程中的测量方法选择(见附录 C)；
- 增加了影响测量准确度的因素和不确定度计算(见附录 D)；
- 增加了特殊检测条件下的仪器设置(见附录 E)。

本文件参考 ISO 16809:2017《无损检测 超声测厚》起草，一致性程度为非等效。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本文件起草单位：中国航发北京航空材料研究院、上海材料研究所、西安热工研究院有限公司、矩阵科工检测技术(北京)有限公司、艾因蒂克科技(上海)有限公司、硕德(北京)科技有限公司。

本文件主要起草人：韩波、梁菁、史亦韦、黄隐、汪丽丽、蔡晖、王鹏、侯召堂、江运喜、张瑞、刘文超。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 1989 年首次发布为 GB/T 11344—1989，2008 年第一次修订，本次为第二次修订。

无损检测 超声测厚

1 范围

本文件规定了接触法脉冲声时测量的超声测厚。
本文件适用于金属和非金属材料的超声测厚。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证(GB/T 9445—2015,ISO 9712:2012,IDT)
GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测(GB/T 12604.1—2020,ISO 5577:2017,MOD)
GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义(GB/T 20737—2006,ISO/TS 18173:2005,IDT)
GB/T 36439 无损检测 航空无损检测人员资格鉴定与认证

3 术语和定义

GB/T 12604.1 和 GB/T 20737 界定的术语和定义适用于本文件。

4 方法概要

4.1 通过测量探头发出的超声波信号一次、两次或多次穿过被测材料后的时间来确定被测材料的厚度。厚度通过已知声速与脉冲回波时间的乘积除以穿过次数来计算,见公式(1)。

$$d = vt/n \dots\dots\dots (1)$$

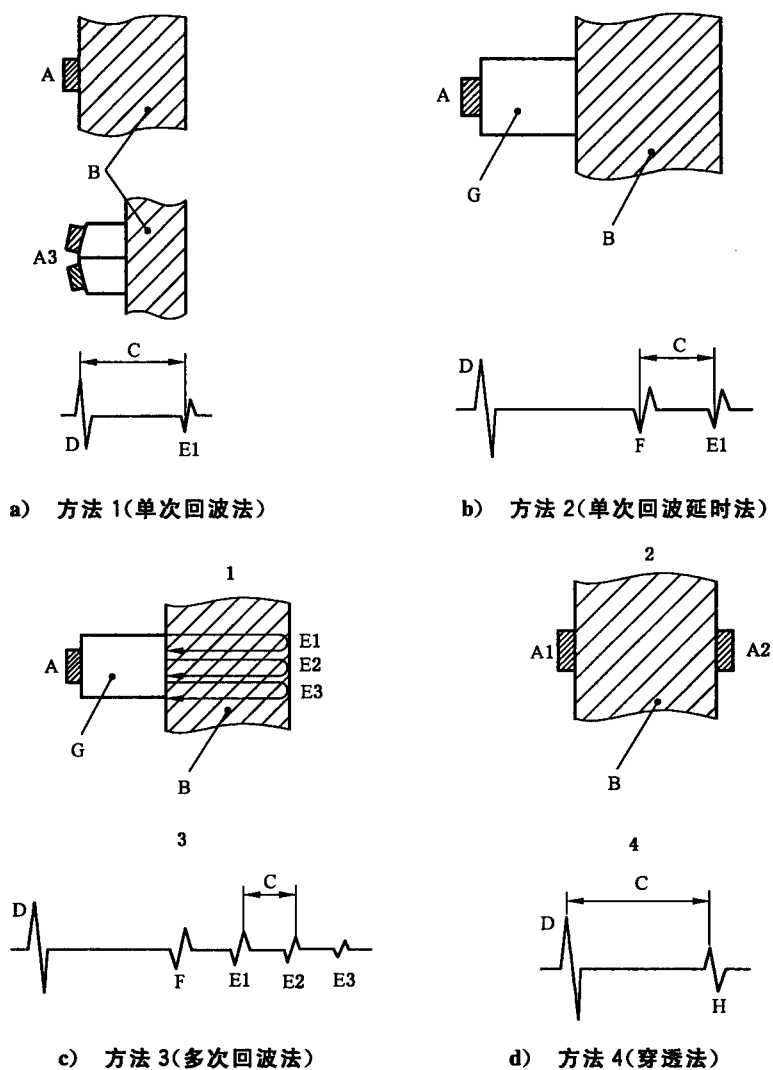
式中:

d ——厚度;
 v ——声速;
 t ——测量时间;
 n ——超声波穿过次数。

4.2 被测材料声速是材料物理特性的函数。对给定的材料通常假定材料声速是一常数。常用材料的声速值参见附录 A。因成分、处理工艺和测量条件变动的影响,表 A.1 中数据不是绝对准确的,但通常情况下可直接使用,也可根据试验重新测定。

4.3 超声测厚可通过图 1 所示的以下四种方法来实现:

- a) 方法 1(单次回波法):测量初始脉冲和第一次底面回波之间的时间,同时对零点进行校正;
- b) 方法 2(单次回波延时法):测量延迟块界面波与第一次底面回波之间的时间;
- c) 方法 3(多次回波法):测量多次底面回波之间的时间;
- d) 方法 4(穿透法):测量超声脉冲从发射探头通过被测材料到底面接收探头的时间。



标引序号说明：

- A —— 发射/接收探头；
- A1 —— 发射探头；
- A2 —— 接收探头；
- A3 —— 双晶探头；
- B —— 被测产品；
- C —— 声波传输时间；
- D —— 发射脉冲信号；
- E1、E2、E3 —— 底面回波；
- F —— 界面回波；
- G —— 延迟声程；
- H —— 接收脉冲。

图 1 测量方法

5 一般要求

5.1 仪器

5.1.1 仪器应能方便调节并显示测量范围内的厚度值。时基线调节功能在不同的仪器上有不同的名称,例如范围、扫描、材料校准或声速。用于测厚的仪器可分为以下 3 类:

- a) 数字直读式超声测厚仪;
- b) 带 A 扫描显示并能直接显示厚度的超声测厚仪;
- c) 带 A 扫描显示的超声探伤仪。

5.1.2 数字直读式超声测厚仪是将初始脉冲和第一次回波之间或多次回波之间的声程时间转换成仪表指示或数字显示。这类仪器用于特定材料和厚度范围内被测产品的厚度测量,并直接数字显示厚度。

5.1.3 带 A 扫描显示并能直接显示厚度的超声测厚仪是将材料厚度用超声波形显示,然后在数字显示屏上显示测量值。A 扫描显示可通过观察测量情况的变化,监测测量的有效性。测量中出现的内部不连续或回波强度变化,均可导致不准确的读数。

5.1.4 带 A 扫描显示的探伤仪是通过校准零点和声速后,读出初始脉冲和第一次底面回波之间的距离来测量厚度,或通过 A 扫描显示校准时基线上多次底面反射回波之间距离来测量厚度。

5.1.5 超声测厚仪每年应按现行有效的方法进行校准并满足使用要求。

5.2 探头

5.2.1 超声测厚应采用双晶或单晶纵波探头。

5.2.2 探头的其他具体要求见 6.3。

5.3 耦合剂

5.3.1 超声测厚是通过施加流体或凝胶来满足探头和材料之间的声学耦合。耦合剂应透声性好,对被检材料、设备和操作人员无不利影响。

5.3.2 选择的耦合剂应适用于被测产品表面条件和形状的不规则性,以确保能充分耦合。

5.3.3 特殊测量条件下使用的耦合剂要求见 6.4。

5.4 校准试块

校准试块的声速和厚度应是已知的,且与被测产品材料相同或相似。校准试块可以是一组,也可以是阶梯试块。试块的厚度宜覆盖被测产品的厚度范围。其中试块的一个厚度值应不小于测量范围的最大厚度,试块的另一个厚度值应不大于测量范围的最小厚度。

测厚用钢阶梯试块的制作可参考 GB/T 39432,其他材料测厚试块也可参考该文件制作。

5.5 检测人员

5.5.1 按本文件实施超声测厚的人员应按 GB/T 9445、GB/T 36439 或合同各方同意的体系进行人员资格鉴定或认证,取得超声检测人员资格等级证书,并由雇主或代理对其进行岗位培训和授权。

5.5.2 检测人员应了解被测产品和材料的特性。

6 测量准备

6.1 表面状态

6.1.1 被测产品表面应清洁、平整,无表面松散及非黏性涂层。测量接触区域不小于 2 倍探头直径。

接触不良可引起信号声能损失以及信号和声束传播路径的改变。

6.1.2 如果测量表面存在涂层,涂层应与材料结合良好,允许表面存在紧贴型涂层如涂漆、珐琅等。仅有少数测厚仪可测出涂层厚度。当测量有涂层的产品厚度时,涂层的厚度和声速应该是已知的,否则应采用方法 3(多次回波法)进行测量。

6.1.3 一般腐蚀、磨蚀产品表面比较粗糙,有点蚀或其他缺陷(参见附录 B)。腐蚀表面应打磨去除锈斑,打磨时厚度不应减小到可接受的最小值以下。

6.2 方法选择

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 超声测厚通常应用在以下两个领域:

- 制造过程测量;
- 在役剩余壁厚测量。

6.2.1.2 应根据被测产品的材料、几何形状和厚度以及测量精度的要求,选择合适的仪器和测量方法,参见附录 C 和附录 D。

6.2.1.3 厚度测量的精度取决于声波时间的测量精度。采用不同的方式进行时间测量(过零测量,前沿测量,峰值测量),方法 3(多次回波法)精度均高于方法 1 和方法 2;依据不同的频率进行测量时,高频探头比低频探头的测量精度高。

6.2.1.4 若被测产品的测厚区域较大,宜采用均匀的测量间距,推荐使用网格。网格尺寸宜结合工作量和测量结果的代表性综合考虑确定。

6.2.2 制造过程测量

6.2.2.1 采用脉冲回波法测量时(方法 1、方法 2 和方法 3),参见附录 C(图 C.1 和图 C.2)。测量清洁、平行的表面时,可选用简单的数字直读超声测厚仪。当测量中除了底面回波还有其他回波时,如复合材料的测量,宜采用带 A 扫描显示的超声测厚仪或 A 扫描显示的超声探伤仪。

6.2.2.2 当被测产品对超声具有高衰减性或厚度较大,回波幅度较小无法获取时,可选择方法 4 进行测量。此时仪器应具有独立的发射和接收功能(TR 方法),测量时将两个探头分别放置在被测产品的正反两面。该方法通常采用小于 1 MHz 的频率较低的探头。

6.2.3 在役剩余壁厚测量

6.2.3.1 在役测量主要应用于腐蚀、磨蚀产品的剩余厚度测量。建议使用双晶探头,低反射回波区域的测量可适当提高增益。

6.2.3.2 测量有位置信息的大量数据点时,宜使用有数据记录功能的仪器。

6.2.3.3 在役测量时,测量设备在测量现场应能承受高温、苛刻的环境条件或电磁干扰。

6.2.3.4 在役厚度测量的方法,参见附录 C(图 C.3 和图 C.4)。

6.3 探头选择

6.3.1 宽频带探头比窄频带探头激发时间更短的脉冲波,具有更好的分辨力,一般用于涂层或薄板的测厚。在测量高衰减材料时,宽频带探头获得更稳定的回波。

6.3.2 探头尺寸和频率的选择应能获得较窄的声束宽度,以精确测量限定的区域,并能穿透整个厚度范围。

6.3.3 对于薄的材料,一般使用高阻尼、高频率探头。高频(10 MHz 或更高)延迟块探头可用于 0.6 mm 左右厚度钢材料的测量;也可采用小焦距双晶探头进行薄材料的测量。对于双晶探头,焦距范

围应覆盖被测产品的厚度范围。

6.3.4 当测量较小厚度的产品时,可使用延迟块探头采用方法 2 或方法 3 进行测量。当延迟块材料声阻抗较低时,如塑料延迟块放在金属上测量,界面回波产生相位转变,应校正以获得准确的测量结果。有些测厚仪具备自动校正功能。

6.3.5 当材料表面温度较高,延迟块做为热屏障使用时,延迟块应能承受被测产品的温度。测量前应了解温度对延迟块声特性的影响(声衰减和声速漂移)。探头制造商应提供探头可使用的温度范围和测量温度下的使用时间。

6.3.6 根据不同的厚度和材料,探头频率范围可从测量高衰减材料使用的 100 kHz 到测量薄金属片使用的 50 MHz。

6.3.7 如使用双晶探头,应对声波传输 V 型路径的误差进行补偿。通常在测量薄材料时双晶探头的传播时间与厚度不再有线形关系,测量的厚度越小,这种非线性越严重。变化示意图见图 2a)所示,典型的误差值见图 2b)。

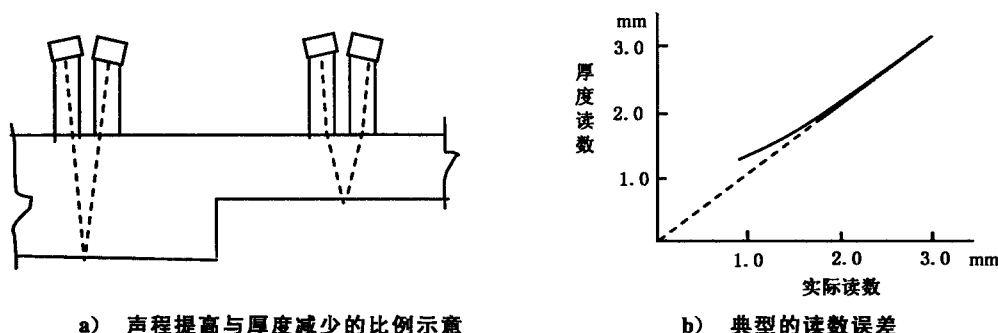


图 2 双晶探头的非线性

6.3.8 在弧面上测量时,应保证探头直径远小于被测区域。

6.4 特殊条件下的厚度测量

6.4.1 一般要求

6.4.1.1 应严格遵守关于安全使用化学品及电气设备的法规及程序。

6.4.1.2 如要求高精度测量,宜在与被测产品环境温度相同时使用校准试块或参考试块进行标定。

6.4.2 温度 0℃ 以下的测量

6.4.2.1 对于 0℃ 以下的测量,耦合剂应保持声学特性并且凝固点低于测量环境温度。

6.4.2.2 当温度低于 -20℃ 时,宜使用特殊设计的探头,且遵循制造商建议限制接触被测产品时间。

6.4.3 高温环境下的测量

6.4.3.1 当温度高于 60℃ 时,应使用高温探头,且耦合剂应满足在检测温度下的使用要求。

6.4.3.2 在使用 A 扫描显示探伤仪时,仪器应具有锁屏功能,以利于检测人员评估响应信号。探头的接触时间应限定在制造商建议测量所需的最短时间内。

6.4.4 危险环境下的测量

6.4.4.1 在危险环境测量时,应严格遵守现行的安全法律法规。

6.4.4.2 在腐蚀性环境中,耦合剂不应与环境发生不良反应,并保持其声学性能。

7 仪器的设置

7.1 带 A 扫描显示的超声探伤仪设置

7.1.1 带 A 扫描显示的超声探伤仪与直接接触单晶片探头的组合

7.1.1.1 显示起点与初始脉冲同步,时基线应是线性的。整个厚度范围均在 A 扫描上显示。

7.1.1.2 对延时控制进行微调,减去保护膜中的传播时间。校准试块至少提供覆盖所测厚度范围的两个厚度,以校准整个测量范围的精度。

7.1.1.3 探头放在已知厚度的试块上,调整仪器控制(声速校准、范围、扫描或声速)直到回波显示适当的厚度读数。

7.1.1.4 在读数值小于该厚度值的试块上检查和调整,以提高系统的精度。必要时在阶梯试块的中间厚度上再进行验证。

7.1.2 带 A 扫描显示的超声探伤仪与延时块单晶片探头组合

7.1.2.1 使用延时块单晶片探头时,仪器应能校正通过延时块的时间,以便延时结束时能对应零厚度。仪器应具备“延时”控制,或电子自动调零功能。

7.1.2.2 若可预先调整到某给定材料的声速,则可通过调整延时控制直到仪器显示正确厚度值的方法标定;若无法设定声速,也可采用如下方法进行仪器设置。

a) 至少使用两个试块。一个试块厚度不小于测量范围的最大值,另一个试块厚度不大于测量范围的最小值。为方便起见,厚度宜是整数,使厚度之差也是整数值。

b) 探头依次放在两个试块上,分别调整声速校准功能,取得两者厚度读数差。调整直至厚度读数差等于实际厚度差,材料厚度范围调整正确。

7.1.2.3 另一种延时块探头的调整方法是 7.1.2.2 规定方法的变化。按步骤进行一系列调整后,使用延时控制在薄试块上提供正确读数和“范围”控制功能在厚试块上校准读数。有时适度的过校准是有用的。当两个读数正确时,仪器调整完毕。

7.1.3 带 A 扫描显示的超声探伤仪与双晶探头的组合

7.1.3.1 7.1.2.2 规定的方法也适用于双晶探头测量大于 3 mm 厚度范围的仪器设置。由于声速传播的声程是 V 字型,因此对于小于 3 mm 厚度测量存在固有的误差。传播时间与厚度不再成线性关系,测量的厚度越小,这种非线性越严重。见图 2 所示。

7.1.3.2 在厚度接近且非常薄的有限范围内测量时,可在适当的薄试块上采用 7.1.2.2 规定的方法校准仪器,得出在有限范围内近似正确的校准曲线。此时测量较厚产品会产生误差。

7.1.3.3 若测量厚度范围较大,则按 7.1.2.2 规定的方法校准。使用两块试块,一块为最大厚度,另一块的厚度为最大厚度和最小厚度的中间值。此时进行薄端测量会产生误差。

7.1.4 厚部件高精度测厚的仪器设置

7.1.4.1 基本设置按 7.1.1 规定的方法进行。校准试块应精确校准整个扫描距离的厚度值,即满屏大约 10 mm 或 25 mm。

7.1.4.2 基本设置完成后,调整扫描延时。例如被测产品标称厚度是 50 mm~60 mm,校准试块是 10 mm,厚度范围也是 50 mm~60 mm。调整延时控制使校准试块的第五次背面反射等于 50 mm,与 A 扫描显示上参考零点重合,第六次背面回波应位于校准扫描线的右侧。

7.1.4.3 设置结束后可在已知近似总厚度的试块上进行验证。

7.1.4.4 在未知试块上取得的读数应加上被延时在荧光屏以外的值。例如,如果读数是 4 mm,则总厚度为 54 mm。

7.1.5 高衰减材料测厚的仪器设置

高衰减材料可采用方法 4(穿透法)进行测厚。发射脉冲指示可用于表示零时间脉冲,将其设置为零刻度,并将接收到的脉冲信号位置设置与刻度上的已知厚度对齐。

7.2 数字直读式超声测厚仪的设置

7.2.1 仪器应有“声速设定”(或“材料选择”或“声速校正”)和“零位校正”功能。

7.2.2 通常采用与被测产品材料相同的试块,一块厚度不小于待测厚度最大值,另一块不大于待测厚度的最小值。

7.2.3 探头置于较厚试块上,调整仪器的“声速设定”,使测厚仪显示读数接近已知值。

7.2.4 探头置于较薄试块上,调整仪器的“零位校正”,使测厚仪显示读数接近已知值。

7.2.5 反复进行 7.2.3 和 7.2.4,直到厚度量程的高低两端都得到正确读数为止。

7.2.6 若已知材料声速,则可预先设定声速值,然后测量仪器附带的薄钢试块,调节“零位校正”,使仪器显示出不同材料换算后的显示值。

7.3 带有 A 扫描的超声测厚仪的设置

直接显示厚度的 A 扫描测厚仪的设置见 7.1 和 7.2。

7.4 特殊检测条件下测厚时仪器的设置

特殊检测条件下测厚时仪器的设置见附录 E。

7.5 仪器设置的核查

发生以下情况时应进行仪器设置的核查:

- a) 所有测量工作完成时;
- b) 工作期间定期检查,每天至少一次;
- c) 在探头或探头线更换时;
- d) 被测材料类型改变时;
- e) 材料或仪器温度显著变化时;
- f) 仪器设置改变时;
- g) 按其他质量文件规定的核查时间。

8 检测报告和记录

8.1 检测报告

应按照现场操作的实际情况详细记录测量过程的有关信息和数据。除合同要求的信息外,还至少包含以下内容:

- a) 检测单位;
- b) 检测日期;
- c) 测量地点;
- d) 材料类型;
- e) 被测产品的一般描述;

- f) 测量要求；
- g) 参考文件编号；
- h) 测量结论(或数据)；
- i) 测量和复核人员。

8.2 检测记录

一般包含以下内容：

- a) 测量方法；
- b) 测量点位置描述/或标示；
- c) 设备型号和序列号；
- d) 探头型号(包括探头尺寸/频率)和序列号；
- e) 校准试块(如使用)；
- f) 耦合剂类型；
- g) 原始厚度(如需要)和允许的公差(如果已知)；
- h) 测量结果(表和/或图)；
- i) 测量位置的图纸/草图；
- j) 目视检查/条件注释(如需)；
- k) 不连续部位示意图(如需)。

附 录 A

(资料性)

常见工程应用材料的超声声速

常见的工程材料声速值参见表 A.1。

表 A.1 常见工程应用材料的超声声速表

材料	密度 kg/m ³	纵波声速 m/s
铝	2 700	6 300
铍	1 850	12 400
铋	9 850	2 180
黄铜	8 100	4 370
青铜	8 860	3 530
镉	8 600	2 780
铈	8 580	4 950
铜	8 900	4 700
金	19 300	3 240
铪	1 130	3 860
英康镍基合金	8 250	5 720
铁(电解)	7 900	5 960
铅	11 400	2 160
铅铋合金	10 900	2 160
镁	1 740	5 740
蒙乃尔铜镍合金	8 830	6 020
镍	8 800	5 630
塑胶(丙烯酸树脂)	1 180	2 670
铂	21 450	3 960
熔凝石英	2 200	5 930
银	10 500	3 600
银镍合金	8 750	4 620
不锈钢(347)	7 910	5 790
不锈钢(410)	7 670	5 900
钢	7 700	5 900
锡	7 300	3 320
钛	4 540	6 240
铌	19 100	5 460

表 A.1 常见工程应用材料的超声声速表 (续)

材料	密度 kg/m ³	纵波声速 m/s
铀	18 700	3 370
锌	7 100	4 170
铍	6 490	4 310

附录 B
(资料性)
容器和管道腐蚀的超声测厚

B.1 一般要求

容器和管道等部件的腐蚀可能由不同的机理引起。表 B.1 给出了不同腐蚀机理产生的腐蚀形貌，和超声测量材料剩余厚度的指导方法。

表 B.1 钢中的腐蚀-推荐性超声测量技术

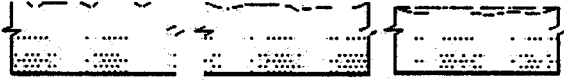
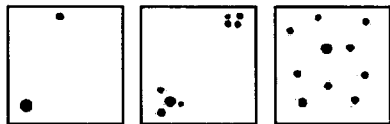
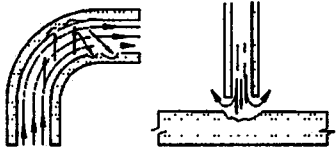
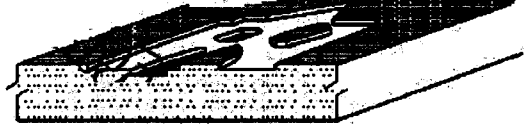
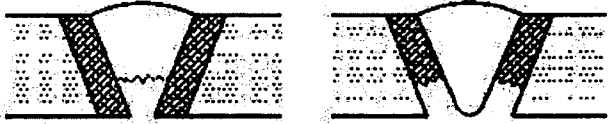
序号	简介	典型的腐蚀成因和机理	图例	推荐性 超声检 测方法
1	均匀腐蚀	发生在以下腐蚀环境中： ——饱和溶解氧的水； ——酸溶液； ——蒸汽中的冷凝水	 均匀腐蚀的发展过程	B.2
2	点蚀	腐蚀区域有清晰的界限，相邻区域未发生明显的腐蚀。 点蚀可能会呈现不同的形式，取决于材料的结构和表面状况	A: 较平的点蚀 C: 半圆形点蚀 B: 逐层破坏性点蚀 D: 表面球形破坏型点蚀	B.3
		分布形式		见注
3	结垢腐蚀， 缝隙腐蚀	发生在充满水的狭窄 裂缝中		见注
4	电偶腐蚀	不同的金属间		见注

表 B.1 钢中的腐蚀-推荐性超声测量技术（续）

序号	简介	典型的腐蚀成因和机理	图例	推荐性 超声检 测方法
5	流动腐蚀			见注
6	湍流腐蚀			见注
7	台面腐蚀			见注
8	空泡腐蚀			见注
9	焊缝腐蚀			见注
注：上述列出的腐蚀形态是为了阐明在实现腐蚀的定性和定量检测时可能会遇到的困难。示例仅供参考。因资料有限，受材料厚度以及其他参数影响，无法给出针对某一特定情况的具体技术意见。				

B.2 一般腐蚀的测量

B.2.1 仪器

B.2.1.1 表面条件不满足要求，被测产品中存在夹杂或较厚涂层，仪器不能提供可靠的读数时，宜使用带 A 扫描显示的超声探伤仪。

B.2.1.2 测量表面有涂层并且需从结果中去掉涂层厚度时，宜选择使用方法 3 的仪器。

B.2.1.3 在给定区域内找到最薄点时，宜使用 A 扫描显示测厚仪或探伤仪。

B.2.2 探头

B.2.2.1 探头的选择取决于仪器类型、材料厚度、表面状况和涂层条件。

B.2.2.2 对于数字直读式超声测厚仪，宜使用制造商规定的探头。

B.2.2.3 对于带 A 扫描显示的仪器，宜遵循以下准则选择探头。

——探头频率的选择，宜使其在被测材料中的波长至少是被测厚度的 1.5 倍(参见附录 D 的 D.1.3)。

——被测产品厚度不小于 10 mm 时，宜选择单晶探头。多次回波技术(方法 3)仅适用于单晶探头。

- 被测产品厚度小于 10 mm 时,宜选择双晶探头进行测量。
- 被测产品厚度小于 5 mm 时,宜使用具有特殊焦距的双晶探头进行测量。
- 被测产品表面是曲面时,宜选择合适的探头晶片直径满足声耦合要求。
- 对有涂层的被测产品,宜选择单晶探头结合方法 3 进行测量,允许补偿涂层厚度。

B.2.3 测量

B.2.3.1 读取多个底面回波(仅单晶探头)时,通过读取第 n 个回波并将读数除以 n 获得准确的结果。测量表面含涂层产品厚度时,读取从回波 1 到回波 n 的距离并除以 $n-1$,获得的测量结果中不包含涂层厚度。

B.2.3.2 仅获取一个底面回波测量时,宜在与仪器标定时相同的回波位置读取读数。若表面存在涂层,则涂层厚度包含在读数中,测量结果应减去涂层厚度。

B.2.3.3 若测量重复性的要求高,测量点的位置则应另行记录。当需测量给定区域内的最薄点时,一般使用带 A 扫描的仪器[5.1.1b)或 5.1.1c)]进行测量。

B.2.3.4 使用数字显示测厚仪应遵循制造商的说明。

B.2.3.5 由于材料内部不连续导致测量异常时,宜进行补充检测,如用斜探头检测来验证测量结果的准确性。

B.3 点蚀的测量

B.3.1 仪器

宜使用带 A 扫描的仪器[5.1.1b)或 5.1.1c)]测量可能出现点蚀的厚度。

B.3.2 探头

宜选用双晶探头检测点蚀,探头焦距长度应能达到点蚀的预测距离。

B.3.3 仪器的设置

在厚度范围覆盖被测产品厚度的阶梯试块上进行仪器的设置。试块材料和温度应与被测产品相同。在怀疑有小直径点蚀时,应在深度与点蚀距离相同的小直径平底孔试块上确定检测灵敏度进行检测验证。

B.3.4 测量

B.3.4.1 测量点蚀时,应使用第一个底面回波,来自点蚀的回波可能与底面回波同时出现。

B.3.4.2 如果反射回波不能确定为腐蚀或夹杂时,宜使用斜探头进行确认。可使用 45°(K1)探头进行夹杂物和点蚀的区分。

附录 C
(资料性)
测量方法选择

测量方法的选择参考图 C.1～图 C.4。图中 d 为被测产品厚度, D 为探头晶片直径。

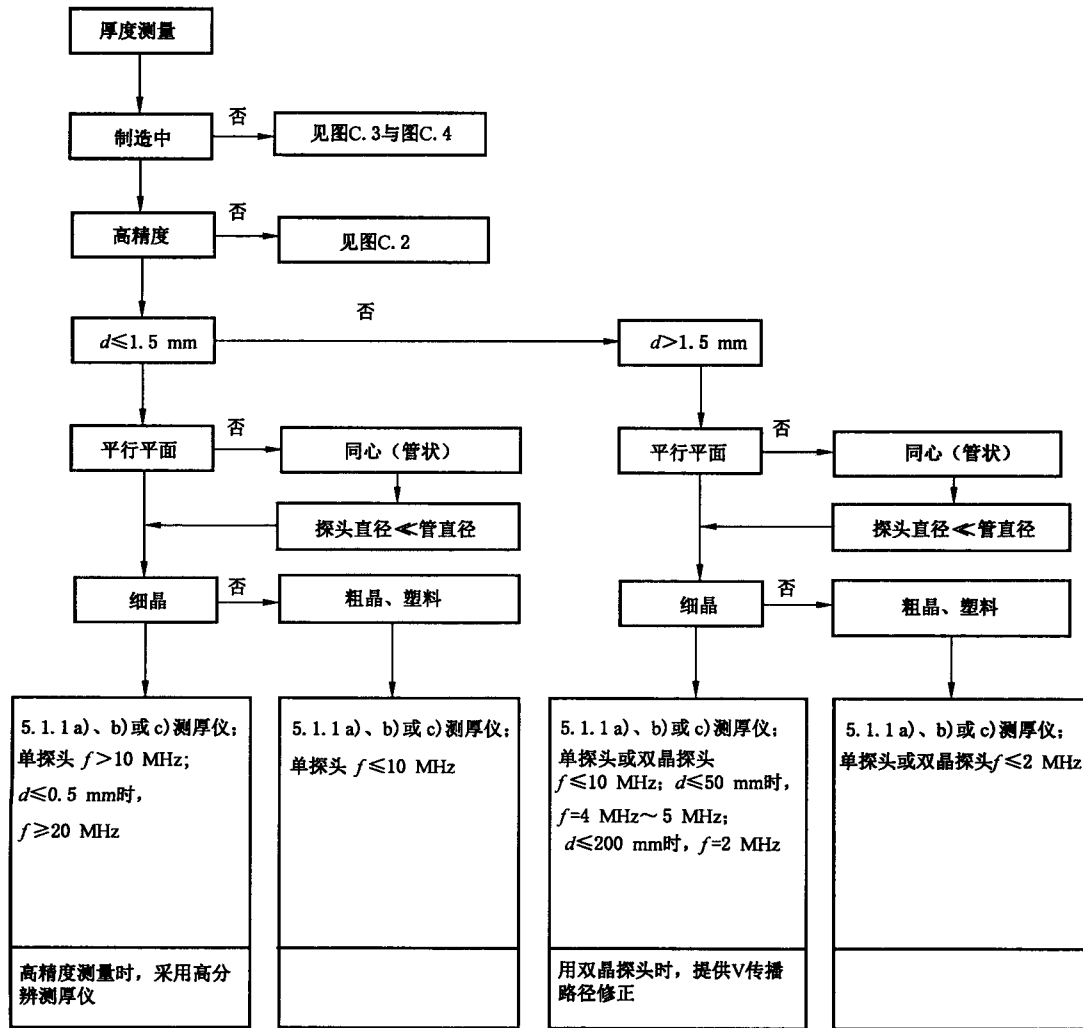


图 C.1 制造规程中被测产品高精度厚度测量流程图

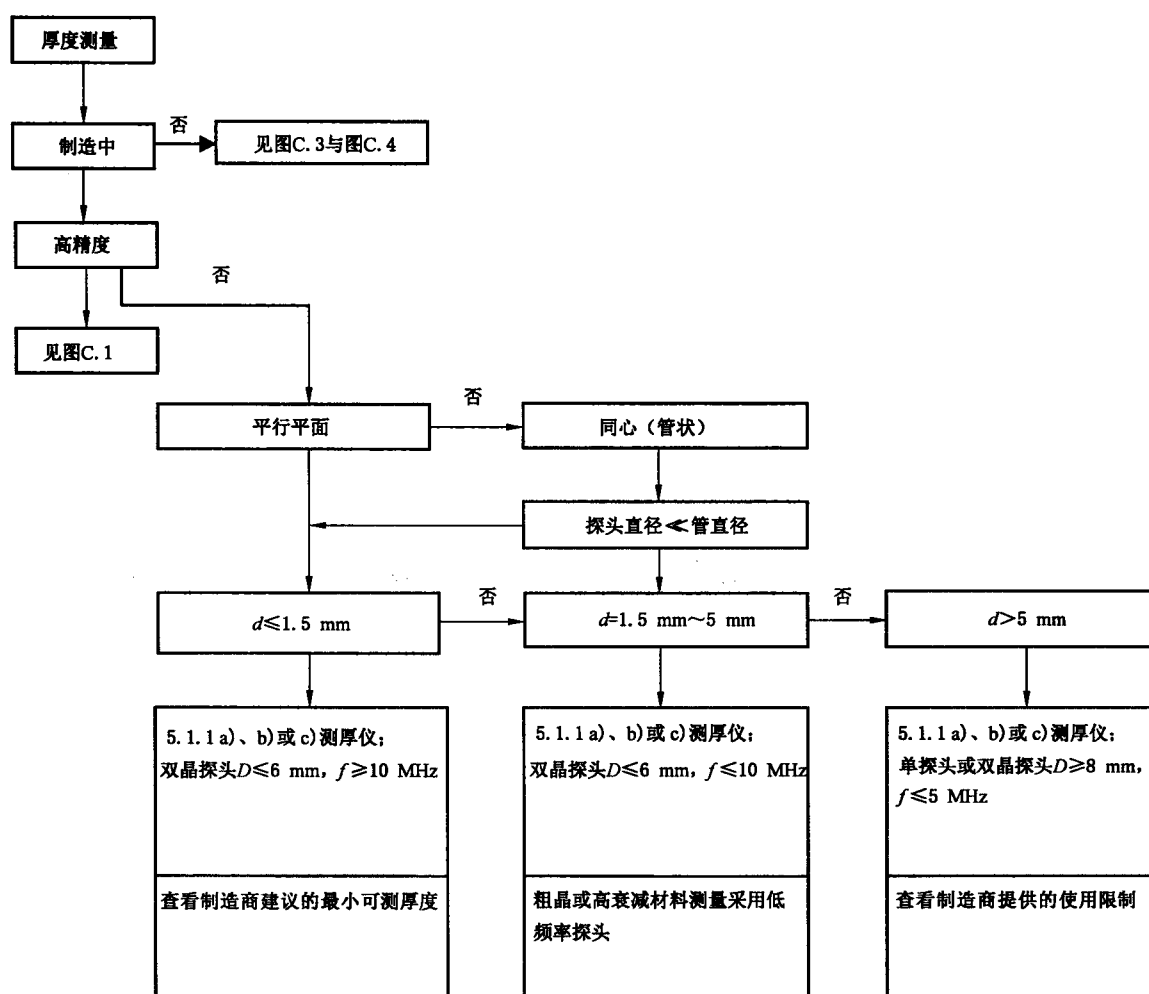


图 C.2 制造规程中被测产品厚度测量流程图

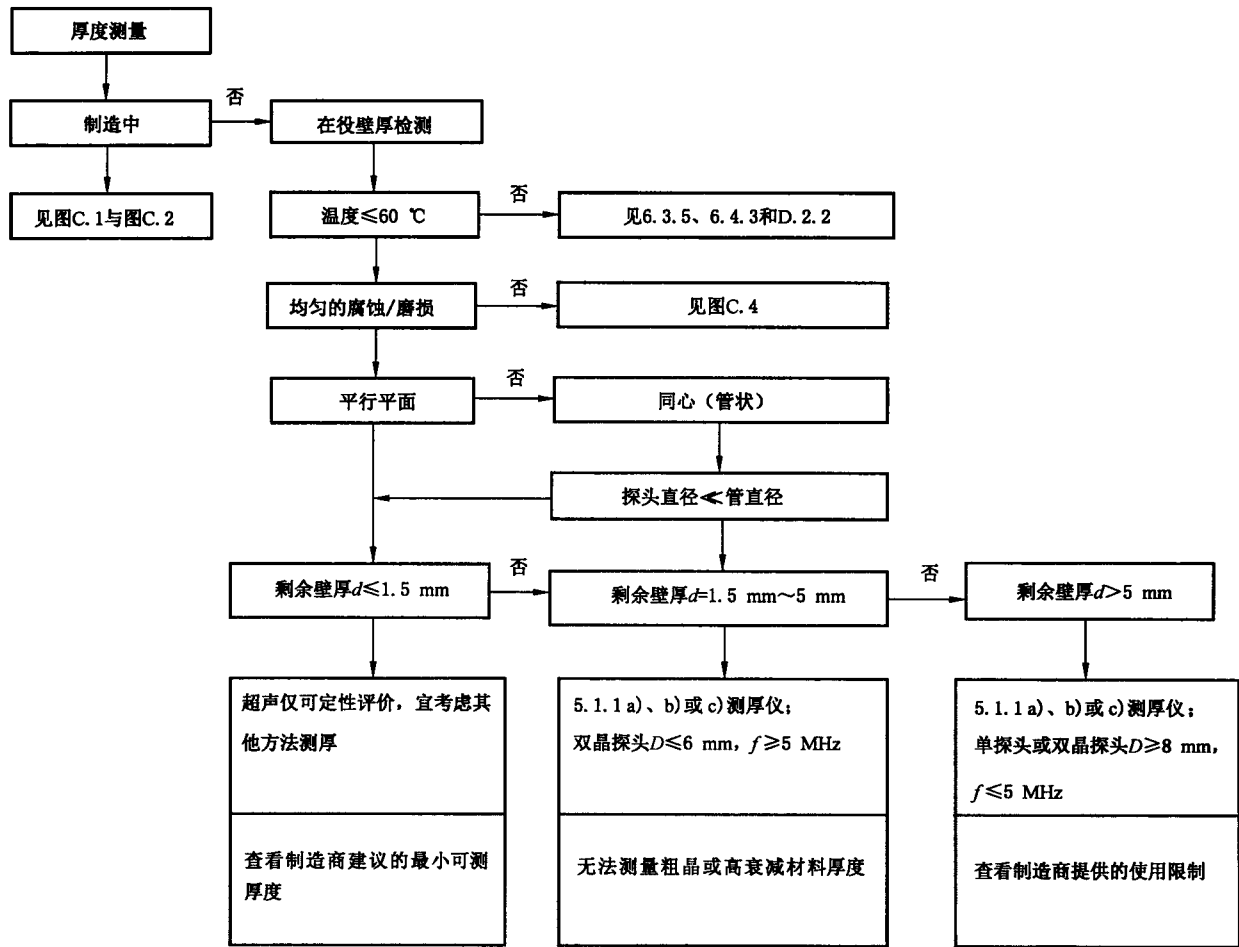
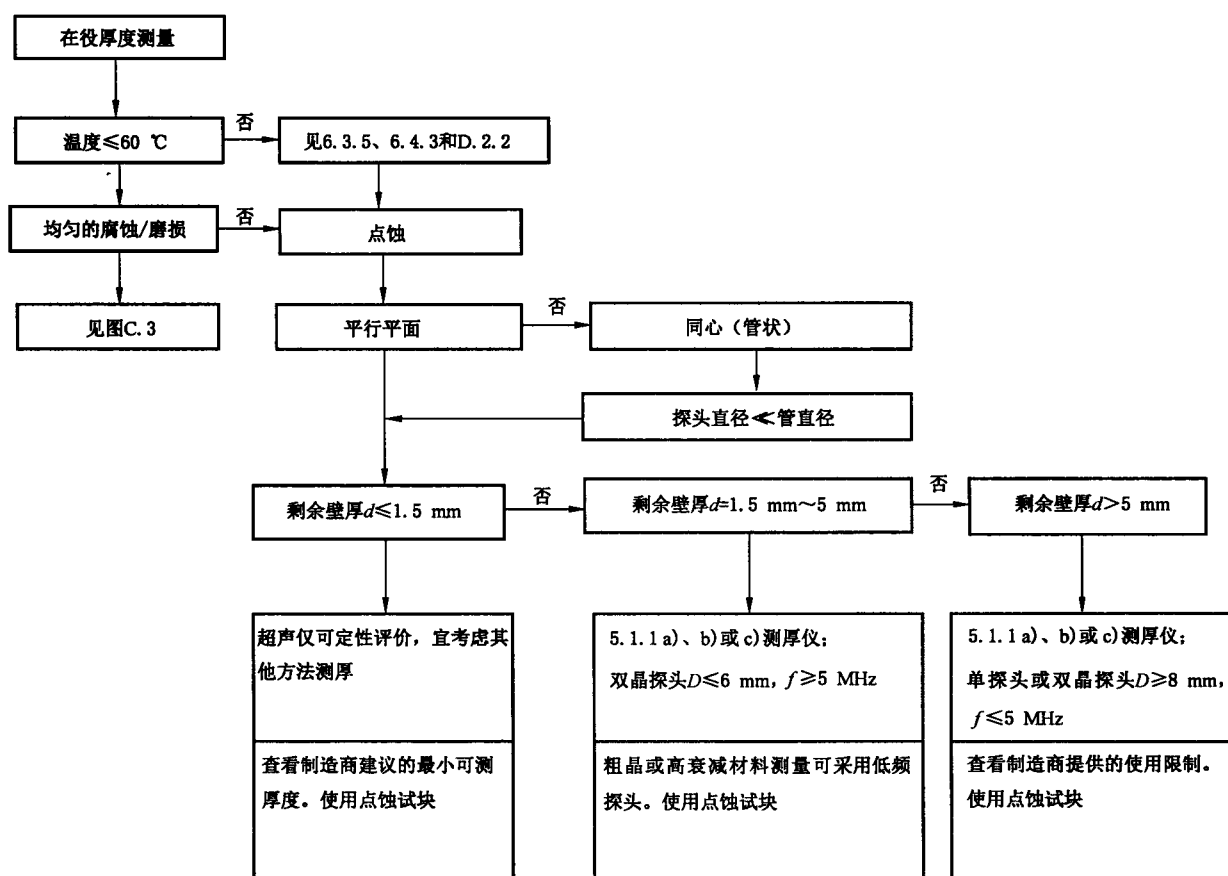


图 C.3 在役过程中被测产品温度小于或等于 60 ℃ 且腐蚀均匀时的厚度测量流程图

图 C.4 在役过程中被测产品温度大于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且为点蚀状态时的厚度测量流程图

附 录 D
(资料性)
影响测量准确度的因素

D.1 仪器**D.1.1 线性**

仪器计时电路的线性及稳定性对测量精度有直接影响。仪器时基应是线性的,以使材料厚度的变化产生厚度指示的相应变化,如果用 CRT 作为读出装置,它的水平线性依据相应文件进行校准。

D.1.2 分辨力

D.1.2.1 仪器的分辨力是系统可识别测量值的最小增量。例如数字直读式测厚仪分辨力可达到 0.001 mm,但仅能测量 0.01 mm;一台带 A 扫描显示的超声探伤仪[5.1.1c)]没有固定或假设的厚度分辨力,它依赖于探伤仪的数字化速度、屏幕分辨率(X 和 Y 向的像素点)和时基线设置等因素。

D.1.2.2 仪器分辨力受探头类型和频率的影响,探头频率越高分辨力越高。

D.1.3 测量范围

D.1.3.1 范围是仪器实际可测量的厚度范围。数字仪器显示屏上的数字位数只是可显示的厚度范围。

D.1.3.2 仪器的最小测量范围与探头频率和使用条件有关,最大测量范围通常由探头频率和被测产品(材料条件等)决定。通常探头的最小测厚范围由其频率和待检材料的声速决定。选择探头时要使其最小可测厚度低于待测最小厚度。理论上认为,在一定速度下,测量最小范围不小于 1 个波长。

$$\lambda = v/f$$

式中:

λ ——波长;

v ——声速;

f ——频率。

D.1.3.3 仪器的测量范围宜覆盖被测产品的可能厚度。带 A 扫描显示的超声探伤仪[5.1.1c)]在不改变量程的情况下,其设置宜满足分辨力的要求。

D.2 操作条件**D.2.1 表面条件****D.2.1.1 清洁度**

材料的清洁度影响其厚度测量结果。在测量前去除附着的污垢和氧化皮。

D.2.1.2 粗糙度

D.2.1.2.1 粗糙度影响测量准确度,并改变界面处的反射和透射系数。在粗糙度较大的情况下测量,声程增加,接触面减小,导致测量值偏高。测量不确定度随厚度减小而增加。

D.2.1.2.2 材料底面粗糙可引起声波失真,导致测量误差。粗糙表面对测量灵敏度有影响(一般应作局部修磨以便耦合良好)。能得到测量结果的情况下,宜以一个测量点为中心,在直径 30 mm 圆内做多点测量,把显示的最小值作为测量结果。

D.2.1.3 表面形状

D.2.1.3.1 不规则表面用接触式探头测量使用较厚的耦合剂时,可造成声波失真。

D.2.1.3.2 使用方法 1、方法 2 或方法 4 时,声波通过耦合层的时间包含在测量读数中,声速是被测材料声速 $1/4$ 的耦合剂,导致实际耦合剂厚度 4 倍的叠加误差。

D.2.1.3.3 耦合剂适应表面条件和表面的不规则性,确保充分的耦合。

D.2.2 表面温度

D.2.2.1 温度改变声速(在材料、延迟块及探头表层)和声衰减(使声速衰减)。

D.2.2.2 较高精度的测量时,宜考虑以下因素的温度变化和影响:

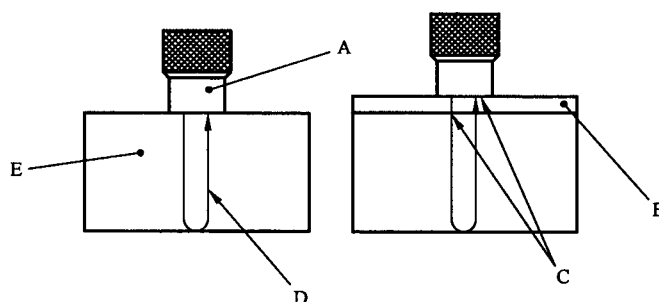
- 参考试样:标准试块、计量器具、试块;
- 设备:仪器、探头等;
- 工艺和方法:耦合剂、被测产品。

D.2.2.3 随着温度升高,多数金属和塑料声速降低,玻璃和陶瓷中声速增加。温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,大多数钢的纵波声速降低约 0.8 m/s 。

D.2.2.4 温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,常用于探头延迟块的丙烯酸塑料声速降低 2.5 m/s 。测量时予以补偿。

D.2.3 涂层

D.2.3.1 通常涂层(多层)的存在引起测量时声程增加,即增加了反射回波的声时。通过涂层测量时,由于涂层和被测产品的声速不同,导致测量误差。见图 D.1。



标引序号说明:

- A —— 探头;
- B —— 涂层或电镀层;
- C —— 涂层增加的声程;
- D —— 声波传输时间;
- E —— 被测产品。

图 D.1 涂层导致声程增加

D.2.3.2 以下情况时涂层材料的存在影响测量结果的准确性:

- 与被测产品材料的声学性能相似;
- 与被测产品的厚度相比具有较明显的厚度。

D.2.3.3 表面有涂层且与基体结合良好,宜使用多次回波法通过涂层进行测厚。

D.2.3.4 声反射不良或高衰减只能实现单次回波测量时,宜已知涂层厚度,并从单次回波读数中去除。

D.2.3.5 若上述条件都不能满足,则在条件允许的情况下去除涂层。

D.2.4 几何结构

D.2.4.1 平行度

测厚部位的上下表面宜保持平行,最大不超过 $\pm 10^\circ$,否则表面不平行引起的底面回波变形或消失,导致无法测量或测量结果不准确。

D.2.4.2 曲面

测量表面曲面时,探头与被测物体之间接触面积小,耦合效果差,造成声透性和重复性不好。测量时探头宜与被测产品的曲率中心对齐,或使探头接触面曲率与检测面曲率相同以提高声穿透性。

D.2.4.3 凹凸面

探头与被测产品表面宜始终保持良好的耦合。小直径被测产品的测量宜选用小晶片探头。

D.2.5 材料

D.2.5.1 一般要求

被测产品的材料可对超声测厚的技术选择产生影响。

被测产品的材料的整体均匀性影响测量精度。均匀性的变化引起材料声速与校准试块的声速不同,导致测量误差。

D.2.5.2 不均匀性

材料的合金元素、杂质和制造工艺对晶粒结构和取向的均匀性有影响,造成声波在材料中传播速度和衰减发生局部变化,从而导致测量偏差或在极端情况下无法测量。

D.2.5.3 各向异性

各向异性材料中,不同取向声速不一定相同,并且结构可能引起声速方向的改变,导致测量结果不准确。如:轧制或挤压的材料,特别是奥氏体钢,铜及其合金,铅和所有纤维增强塑料等。

为减少误差,仪器设置宜在与被测产品相同的取向上进行。

D.2.5.4 衰减

D.2.5.4.1 衰减由吸收(例如橡胶)和散射(例如粗颗粒)引起,衰减导致信号幅度减小或信号失真。铸件的声衰减通常是吸收和散射,塑料的声衰减主要是吸收。两者都导致测量出现误差。

D.2.5.4.2 材料不均匀,衰减较大均影响测量结果的准确性。测量区域存在微小夹杂物或分层时,也会得到异常的厚度显示值,此时宜采用带 A 扫描显示的超声探伤仪测量厚度。

D.2.5.5 腐蚀和侵蚀

在石油、天然气、电力、化工等领域,腐蚀通常发生于轧制钢板、无缝管和焊接组件等制成的钢制容器和管道中。

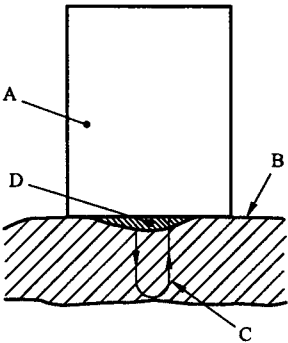
在选择超声测厚技术时,宜考虑钢容器和管道组件中以下类型的腐蚀:

- 均匀腐蚀;
- 点蚀;
- 沉积腐蚀;
- 间隙腐蚀;

- 电腐蚀；
- 流动腐蚀；
- 焊缝区腐蚀；
- 两种或多种上述类型腐蚀。

D.2.6 耦合剂

宜根据被测产品的表面状态及声阻抗,选用无气泡、黏度适宜的耦合剂。对于表面粗糙件,宜适当增加耦合剂的用量,选用比较稠的耦合剂,使探头和试件之间有良好的声耦合。图 D.2 为表面存在凹坑情况下的测量示意图,此处的测量值包含了耦合剂层厚度或等价厚度,此时的测量精度比表面条件好的情况下的测量精度低。



- 标引序号说明:
- A —— 探头;
 - B —— 测试对象;
 - C —— 声波路径;
 - D —— 耦合剂。

图 D.2 通过耦合层的声程

D.2.7 探头与被测产品的接触

探头与被测产品接触时,宜在探头上施加一定压力(20 N~30 N),保证探头与被测产品之间有良好的耦合,并排出多余的耦合剂,使测量面形成一层极薄的耦合剂,减少声波通过耦合层的时间,提高测量精度。

D.2.8 背反射回波幅度

数字直读式超声测厚仪在波列超过一定幅度和固定时间的第一个半周期内读出厚度值。如果被检材料的背面反射回波幅度与校准试块的背面反射回波幅度不同,厚度读出可能对应波列不同的半周期,因此产生一个误差。可以通过下列方法减少:

使用的校准试块宜与被检材料有相同的衰减特性,或调整背面反射回波幅度使校准试块和被检材料的幅度相同。

D.3 准确性评价

D.3.1 一般要求

测量准确性取决于选择的参数和计算方法。

D.3.2 参数选择

参数选择及影响准确度的因素见表 D.1 所示。

表 D.1 参数选择及影响准确度的因素

项目		因素	结果	可能的改进方法
被测产品	材料	成分	衰减、吸收、散射和声速的局部变化	在与被测产品相同的材料上进行仪器设置
		结构		
		各向异性		
	表面状况	清洁度	表面状况的变化导致耦合剂厚度的变化	清洁表面
		粗糙度		条件允许情况下对表面进行打磨
		表面形貌		使用小尺寸探头
	涂层	涂层	涂层与基体的声速差异导致测量误差	清除涂层或采用方法 3
		油漆		
		表面处理		
	几何形状	非平行度	被测产品的底面回波消失或变形失真	选用的探头宜保证平行度在探头的声波发散角之内
		曲率	降低耦合效果	使用小尺寸探头
		范围	因衰减导致底面回波扭曲失真	采用方法 1, 或采用方法 4 使用低频探头
参考测量方法	方法	设置方法的不确定度	读数不准确	选用代表性的试块, 阶梯厚度要覆盖被测产品的厚度, 校准方式参见附录 E
	校准试块	试块厚度和声速的不确定度	试块厚度的不确定度显著影响测量精度	保证试块厚度及声速的测量精度
	仪器	分辨力	系统分辨力显著影响测量精度	使用高精度的仪器, 选用高频探头和宽频探头
		电缆线长度	过长的探头线使信号失真	使用较短的探头线或与校准时相同的电缆线
		仪器误差	不精确的读数	使用前对仪器进行开机预热直到读数稳定或使用稳定的仪器设备
		渡越时间	测量精度低于渡越时间的精度	采用更高精度的仪器
		线性	读数不准确	保证系统的良好线性
		触发点	读数不准确	选择更好的触发点
	操作方法	V 型路径	因声波传播路径导致厚度不同而引起的读数错误	使用带有 V 型路径校正的测厚仪, 或考虑探头晶片夹角。 使用单晶探头
		相位改变	读数错误	考虑相位改变

表 D.1 参数选择及影响准确度的因素 (续)

项目		因素	结果	可能的改进方法
可重复性	检测人员	方法	不恰当的操作	提供正确的操作规程。 进行重复试验
		耦合	耦合不好会导致读数偏差	选择与被测产品表面状况相适应的耦合形式,或使用方法 3
		培训	读数错误	操作培训
其他	温度	声速变化	读数错误	在与被测产品相同的温度下进行仪器设置,或对声速进行修正校准

D.3.3 计算方法

不确定度的获取方法有以下两种:

- 全部对测量结果有影响的参数的不准确度相加来计算测量的不准确度。
- 通过计算测量结果从而确定不准确度 I_g 。测量结果 MR 根据 ISO 14253-2 定义为读数 R 加或减 I_g 。

$$MR = R \pm I_g$$

其中

$$I_g = K \sqrt{\sum \sigma_i^2}$$

式中:

K ——根据置信概率取值,例如:

当置信概率为 68% 时, $K=1$;

当置信概率为 95% 时, $K=2$;

当置信概率为 99.8% 时, $K=3$ 。

σ_i ——参数获取的不确定性,可通过下列方式获得:

- 通过统计学的方式;
- 通过其他方式,例如公认标准,规范,研究 i 是不同独立的参数,例如表面情况、线性、重复性,统计分布:
 - 统一或矩形定律: $\sigma_i = 0.6a$;
 - 高斯定律: $\sigma_i = 0.5a$ 。

式中:

a ——结果的准确度。

表 D.2 以厚度为 10 mm、表面粗糙度 $Ra=6.3 \mu\text{m}$ 的钢板为例,比较两种方法的准确度评估。

表 D.2 方法 a 与方法 b 使用举例:样本为 10 mm 厚、表面粗糙度 $Ra = 6.3 \mu\text{m}$ 的钢板

参数	组	因素	测试条件	准确度评估	
				mm	
				方法 a	方法 b
测试对象	材料	构成	低合金钢	0	0
		结构	晶粒度	0	0
		各向异性	—	0	0
	表面状况	洁净度	—	0	0
		粗糙度	表面粗糙度 $Ra = 6.3 \mu\text{m}$	0.006 3	0.003 2
		表面轮廓	平滑	0	0
	涂层	涂层	无涂层	0	0
		涂料	无涂料	0	0
		表面处理	无处理	0	0
	几何形状	不平行度	平行面	0	0
		曲率	无弯曲	0	0
		范围	衰减可忽略不计	0	0
参照	校准方法	校准方法的不确定度	试块 同种材料/5 步法校准	0	0
	试块	厚度与速度的不确定度	厚度不确定性:0.01 mm 速度不确定性:±30 m/s	0.05	0.025
测量	设备	分辨率	数字仪器分辨率:0.01 mm	0.01	0.006
		探头线长度	固定长度	0	0
		仪器的漂移	稳定	0	0
		渡越时间	测时精度:10 ns	0.03	0.018
		线性	1%最大距离(制造商数据)	0.1	0.05
测量	操作	触发点	等幅	0	0
		V 型路径	单探头	0	0
		相位变化	无	0	0
重复性	操作	耦合	耦合方式错误	0	0
		操作者培训程度	合格的操作者	0.1	0.05
其他	温度	声速变化	在室温下测量,变化忽略不计	0	0
误差合计				0.296	0.155

附 录 E
(资料性)
特殊检测条件下的仪器设置

在阶梯试块上的仪器设置见表 E.1。在一块已知厚度校准试块或无校准试块情况下的仪器设置见表 E.2。

表 E.1 阶梯试块上的仪器设置

设置步骤	选取的试块			
	材料相同、表面状态相同	材料相同、表面状态不同	材料不同、表面状态相同	材料不同、表面状态不同
仪器设置	在超过测量范围中最大厚度和低于最小厚度试块上设置仪器	在超过测量范围中最大厚度和低于最小厚度试块上设置仪器	在超过测量范围中最大厚度和低于最小厚度试块上设置仪器	在超过测量范围中最大厚度和低于最小厚度试块上设置仪器
进行中间厚度试块的线性验证	超过两个阶梯时	超过两个阶梯时	超过两个阶梯时	超过两个阶梯时
校准修正	不需要	在被测产品上校正零点	在被测产品上重新校正;或根据已知声速修正仪器读数	在被测产品上重新校正;或在被测产品上根据已知声速重新校正零点
与仪器设置有关的测量不确定度因素	——校准试块厚度的精度; ——若仅使用两个阶梯校准的线性不确定度	——校准试块厚度的精度; ——被测产品的表面状况; ——若使用两个阶梯试块的线性不确定度	——校准试块厚度的精度; ——被测产品厚度的精确性或已知声速的准确性; ——若使用两个阶梯试块的,线性不确定度	——校准试块厚度的精度; ——被测产品厚度的精度; ——被测产品的表面状况或已知声速的精度; ——若使用两个阶梯试块的,线性不确定度

表 E.2 在一块已知厚度校准试块或无校准试块情况下的仪器设置

设置步骤	材料相同的校准试块		无同材料的校准试块
	表面状况相同	表面状况不同	
仪器设置	设置声速和零点,使其与已知厚度值相符	设置声速和零点,使其与已知厚度值相符	设置与被测产品相同的声速。根据已知数值或方法 3,或探头自动识别功能设置零点
中间阶梯的线性验证	不需要	不需要	不需要

表 E.2 在一块已知厚度校准试块或无校准试块情况下的仪器设置（续）

设置步骤	材料相同的校准试块		无同材料的校准试块
	表面状况相同	表面状况不同	
校准修正	不需要	在被测产品上校正零点	不需要
与仪器设置有关的测量 不确定度影响因素	校准试块厚度的准确性； 线性不确定度	校准试块厚度的精确性； 线性不确定度； 被测产品的表面状况	已知数值的准确性

参 考 文 献

- [1] GB/T 39432 无损检测 超声检测 阶梯试块
 - [2] ISO 14253-2 Geometrical product specifications (GPS)—Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment—Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification
 - [3] ISO 16811 Non-destructive testing—Ultrasonic testing—Sensitivity range setting
-