

# 团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X  
代替 T/CMES XXXX—201X

## 无损检测 回转结构薄壁件超声临界折射纵波残余应力检测的高重复精度控制方法

Non-destructive testing—A high repeatability accuracy control method for ultrasonic critical refracted longitudinal wave detection of residual stress in rotary thin-walled parts  
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

## 目 次

目 次.....	II
前 言.....	IV
引 言.....	V
1 范围 .....	6
2 规范性引用文件.....	6
3 术语和定义.....	6
4 一般要求.....	6
4.1 人员要求.....	6
4.2 检测环境.....	6
4.3 回转结构件测试方法.....	6
5 测试原理.....	7
6 测量系统.....	8
6.1 超声探头.....	8
6.2 超声楔块.....	8
6.3 耦合剂.....	8
6.4 脉冲发生仪.....	9
6.5 示波器.....	9
6.6 基准应力试件.....	9
7 测量预处理.....	10
7.1 测量件预处理.....	10
7.2 应力基准.....	10
7.3 声时差系数标定.....	10
8 影响因素补偿.....	10
8.1 温度影响补偿与修正.....	10
8.2 耦合强度控制.....	11
8.3 互相关计算步长.....	11
9 测量流程.....	12
10 检测报告.....	13

附录 A.....	14
图 1 回转对称结构应力测量路径.....	7
图 2 超声残余应力测量装置及信号传递示意图.....	7
图 3 超声楔块结构原理图.....	8
图 4 基准应力拉伸样件尺寸.....	9
图 5 45 钢声时差系数拟合曲线.....	10
图 6 温度 $T$ 与声时差 $t_T$ 变化曲线.....	11
图 7 耦合强度控制方法流程.....	11
图 8 不同互相关步长下声时差曲线.....	12
图 9 不同步长下声时差和互相关特征值关系.....	12
图 10 超声法应力测量流程图.....	13
图 A.1 基于回波信号幅值检测的界面耦合控制方法.....	15
图 A.2 不同阈值( $U_s$ )下声时误差测量结果.....	16

## 前 言

本文件参照 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。

本标准的起草单位：中国工程物理研究院机械制造工艺研究所，大连理工大学，郑州大学，四川神工科技有限公司，中国科学院金属研究所，华东理工大学。

本标准的主要起草人：黄明，李加胜，魏兆成，郭明龙，夏志辉，孔金星，徐猛，李应举，李锦。

中国机械工程学会标准征求意见稿

## 引 言

回转型薄壁零件通常由对称成型工艺制备，应力状态呈规则分布，在航空航天、精密仪器、汽车等领域应用广泛，对圆度、同轴度、壁厚均匀性等形位公差要求高，但大径厚比使得该类薄壁件的整体和局部刚度低，自身刚性较差，其加工尺寸精度和尺寸稳定性难以得到保证。同时，受残余应力的影响，易发生尺寸精度退化，零件使役性能也难以保障。评估薄壁零件中残余应力大小及其分布，是薄壁零件性能控制的关键。超声应力测量技术作为一种基于测量声速变化的应力无损检测技术，具备简便快捷、适用广泛的优点，但实际测量过程中测量结果易受到测量现场环境因素、测量人员以及测量工艺等多方面因素影响，测量结果重复精度较低。因此，针对回转型薄壁件超声临界折射纵波残余应力检测，规范回转型薄壁零件的超声法应力测量流程，提出对影响测量结果因素的控制及补偿方法，提高应力测量稳定性，为应力的精确表征提供有效技术支持。

中国机械工程学会标准

# 无损检测 回转结构薄壁件超声临界折射纵波残余应力检测的 高重复精度控制方法

## 1 范围

本标准规定了基于超声临界折射纵波测量回转型规则结构薄壁件残余应力的高重复精度无损检测方法。

本标准适用于检测金属和非金属固体材料回转性规则结构薄壁件残余应力。

## 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/T16923 钢件的正火与退火

GB/T12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T18852 无损检测 超声检验 测量接触探头声束特性的参考试块和方法

GB/T 32073 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法

GB/T25712 振动时效工艺参数选择及效果评定方法

GB/T228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法

GB/T 6402 钢锻件超声检测方法

## 3 术语和定义

GB/T12604.1 界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 一般要求

### 4.1 人员要求

按本标准实施检测的人员应通过薄壁件残余应力超声临界折射纵波无损检测技术的专门培训。

### 4.2 检测环境

超声法应力检测环境要求检测台架应具备稳定性，检测时不应产生颤动和振动。

### 4.3 回转结构件测试方法

参照 GB/T 6402，针对球状和棒状回转型结构，沿母线及回转方向，可根据测试需求均匀设置

多条测试路径，进行扫描测量，如图 1 所示。

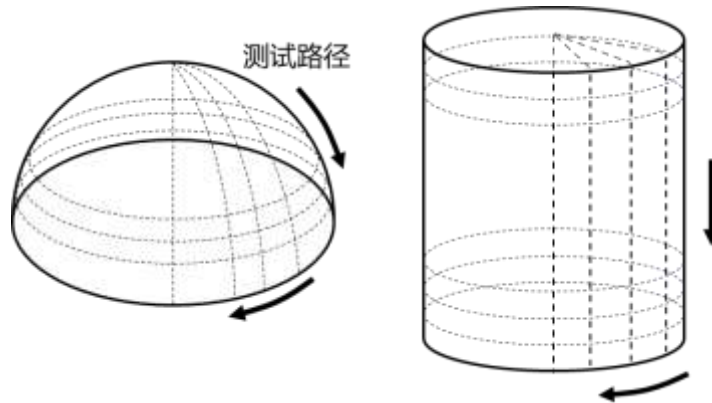


图 1 回转对称结构应力测量路径

### 5 测试原理

超声法测量残余应力原理基于声弹性效应，即材料所受应力与超声波的传播速度的关系。通过测量这种速度的变化，可以间接得到材料内部的应力状态。具体来说，通过发射换能器向材料表面发射一定频率的超声波脉冲，根据 Snell 定律，当超声波入射角等于第一临界角时，超声波将以临界折射纵波 (Longitudinal Critical Refracted wave, 简称 LCR 波) 形式在材料近表面传播，如图 2 所示，传播深度与超声波的频率有关 (见式(2))，由接收换能器接收到的 LCR 波信号。通常在固定声传播路程上，将应力引起的声速变化转换成 LCR 波的传播时间  $t$  的变化，当两超声探头间距离固定后，拉伸应力使超声纵波传播速度变慢或传播时间  $t$  延长，压缩应力使超声纵波传播速度加快或传播时间  $t$  缩短。通过检测并对比同种低应力材料 (应力为  $\sigma_0$ ) 中超声传播时间  $t_0$  和被检测材料 (应力为  $\sigma$ ) 的超声传播时间  $t_\sigma$ ，按式(1)计算被检件中的残余应力  $\sigma$ ，即：

$$\sigma = K(t_\sigma - t_0) = K\Delta t_\sigma \quad (1)$$

式中：

$\sigma$  ——被检测工件应力；

$t_\sigma$  ——应力为  $\sigma$  状态下的超声传播时间；

$t_0$  ——应力基准样件超声波传播时间；

$K$  ——应力系数，与被检测工件的材料有关，可通过拉伸试验标定获得。

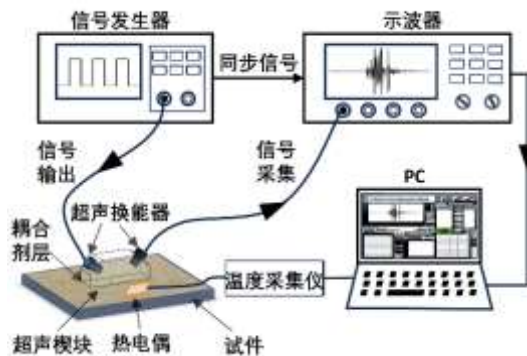


图 2 超声残余应力测量装置及信号传递示意图

## 6 测量系统

### 6.1 超声探头

- a. 采用纵波探头实现波的发射和接收，探头频率根据待检测材料和检测深度进行选择。检测深度参照 GB/T 32073 中的计算方法，超声应力检测深度  $D$  由超声应力测量探头的发射频率  $f$  决定：

$$D = \alpha \times f^{-0.96} \quad (2)$$

式中， $D$  为检测区域深度，单位 mm； $f$  为探头发射频率，单位 MHz； $\alpha$  为检测深度修正系数。检测深度宜小于被检件壁厚。

- b. 探头按 GB/T18852 规定的方法测试，并定期校准。  
c. 检测和标定所采用探头为同一型号探头。

### 6.2 超声楔块

与超声探头配套使用的超声楔块的声阻抗应与被测物体材料的声阻抗匹配，通常采用高纯度的有机玻璃制作，其功能在于固定超声探头位置，并使探头与测量物体表面的夹角为第一临界折射角，以便能在测量物体表面产生临界折射纵波。鉴于回转型薄壁件曲率影响，为在弯曲表面发生临界折射纵波，需根据公式 (3) 对用于弯曲表面超声楔块的入射及接受进行角度补偿  $\theta_a$ ，如图 3 所示，

$$\theta_{cr} = \arcsin \frac{V_{\text{楔块}}}{V_{\text{材料}}} \pm \arcsin \frac{L}{2R} = \theta_{cr0} + \theta_a \quad (3)$$

其中， $\theta_{cr0}$  为平面入射时的第一临界折射角， $\theta_a$  为入射点处的法线相对于平面状态下的偏转角，式中凸曲面取“+”，凹曲面取“-”， $R$  是曲面构件半径， $L$  为两换能器的中心距。为实现良好耦合，在超声楔块斜面上加工出螺纹孔，换能器与超声楔块采用螺纹连接。安装时传感器与超声楔块斜面之间须注入甘油进行耦合，并在超声楔块内部加工出一空腔，以排出安装时多余的甘油。

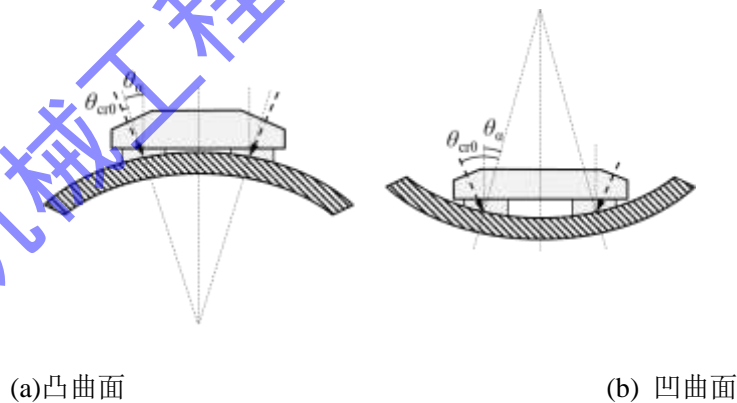


图 3 超声楔块结构原理图

### 6.3 耦合剂

- a) 具备良好的声学性能。可实现超声楔块和被检材料间声阻抗良好匹配，降低超声能量损耗。  
b) 具有适宜的粘度和流动性。可填补微小缝隙，确保其能在超声楔块与被检件之间形成稳定的耦合层，不会轻易流淌。  
c) 无腐蚀性。避免造成对探头、超声楔块和被检材料的侵蚀。  
d) 易于清除。测量完成后能方便地从被检件表面清理干净，不残留污渍影响被检件后续使用。

- e) 对人体无害，保障操作人员的健康安全。

#### 6.4 脉冲发生仪

脉冲发生仪能够产生特定频率的方波脉冲，用于激励超声发射探头产生特定频率的超声波，脉冲发生仪应至少具有如下功能：

- a) 激发脉冲频率设置；
- b) 带通滤波；
- c) 脉冲激励电压控制；

应定期对脉冲发生仪进行综合性能校准，校准间隔最长不超过一年。

#### 6.5 示波器

示波器用于采集超声接收换能器接收到的超声信号，同时将信号可视化展示在示波器屏幕上，便于观察超声信号波形，示波器应至少具有如下功能：

- a) 高频率响应。需要有足够高的频率响应以准确捕捉和分析高频信号。
- b) 高时间分辨率。精确测量超声波的传播时间和反射信号，示波器需要有高时间分辨率。
- c) 触发功能。示波器需要具备可靠的触发功能，以便能够稳定地显示和分析超声波信号的各个周期。
- d) 存储和回放功能：为了便于分析和记录测量结果，示波器应该能够存储捕获的信号，并支持回放功能。
- e) 接口功能。具备与计算机的接口（如 USB、LAN 等），以便于数据的导出和进一步分析。
- f) 多通道输入功能。可为同时监测多个信号，需要多通道检测。

#### 6.6 基准应力试件

基准应力试件的材料应使用和被检材料金相组织状态和表面粗糙度相同的材料。试件尺寸如图 4：

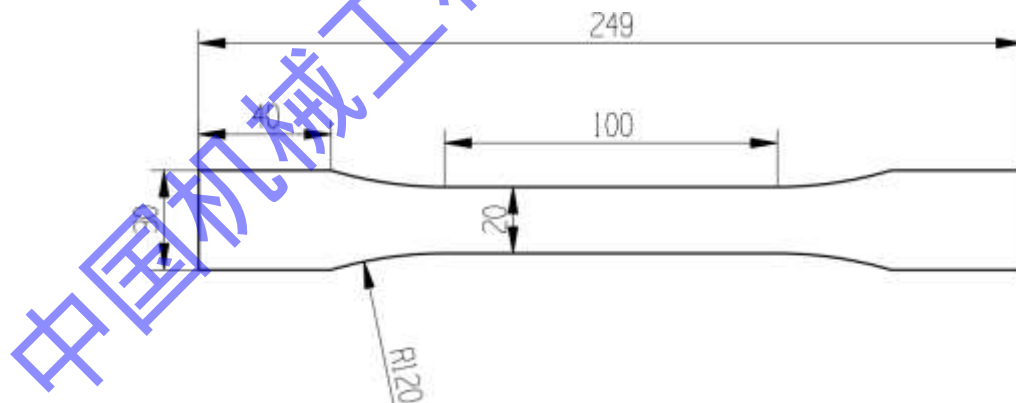


图 4 基准应力拉伸样件尺寸

可采用如下之一方法来获得基准应力，首先将试件尽可能消除残余应力，然后再采用拉伸的方法获取基准应力：

- a. 按 GB/T16923 所述方法，对试块进行去应力退火处理，退火后试块的金相组织状态应与被检件的材料组织状态相同。

- b. 按 GB/T25712 所述方法，对试块进行振动时效去应力处理，近似得到应力为零的试块。

## 7 测量预处理

### 7.1 测量件预处理

- 测量工件表面预处理，表面粗糙度 $R_a$ 应小于或等于  $10\ \mu\text{m}$
- 测量工件待测量区域应进行标记
- 按照标记的测量点位制定测量方案

### 7.2 应力基准

调整和设置检测仪器，将探头稳定耦合在基准应力试块的待测区域，记录仪器测出的基准应力对应的超声临界折射纵波传播时间  $t_0$ 、测量时环境温度、接收 LCR 波段幅值。

### 7.3 声时差系数标定

参照 GB/T 228.1 和 GB/T 32073 固定的方法，在常温环境下，对待测材料进行拉伸测试标定。在弹性范围内，在拉压试验机上对拉伸件进行拉伸，每次递增 20~30 MPa，计算不同应力下声时差，拟合计算结果，如图 5 所示，该拟合曲线为 45#钢声时差系数拟合曲线，得到的直线斜率的倒数即为应力系数  $K$ 。

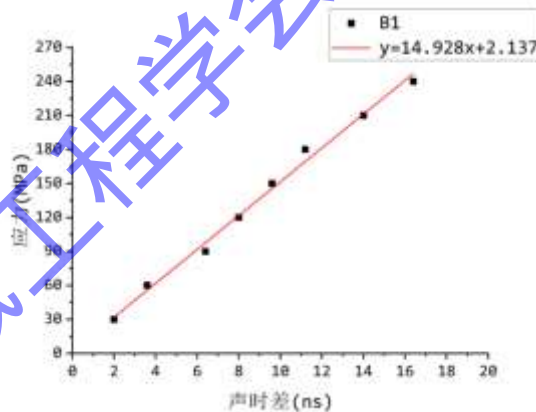


图 5 45 钢声时差系数拟合曲线

## 8 影响因素补偿

### 8.1 温度影响补偿与修正

温度补偿方法通过预实验获取温度对待测材料声时差的影响，并拟合规律曲线，然后在测量结果中对温度影响进行补偿。温度与声时差关系的标定需控制环境温度，可在水浴、恒温箱等环境中进行，根据检测环境温度范围，例如 10~50 °C 范围内，以 5 °C 为间隔进行变温，每次变温后需至少恒温 20 min 后测量声时差。以 45#钢为例，温度-声时差影响关系如图 6 所示，随着温度的增加，声时差随温度变化成近似线性增大，在测量过程中必须考虑温度的影响。为保证拟合精度，可利用多

项式函数将实验数据进行拟合。

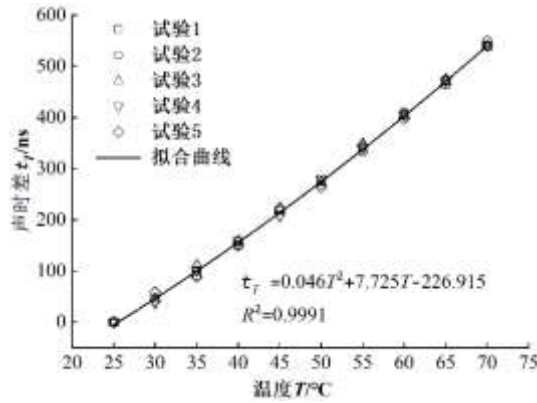


图 6 温度  $T$  与声时差  $t_T$  变化曲线

温度与声时的关系表达式为：

$$t_T = 0.046T^2 + 7.725T - 226.915 + t_{25}, \quad (4)$$

式(4)中， $t_{25}$  为 25℃时的声时。设基准温度为  $T_0$ ，测量时温度为  $T_1$ ，代入式(4)可得：

$$t_{\Delta T} = \Delta T(0.046(T_0 + T_1) + 7.725), \quad (5)$$

测量过程中结合温度-声时差关系式(5)，在式(1)中减去温度变化所造成的声时误差  $t_{\Delta T}$ 。修正温度影响后的应力计算式为：

$$\sigma = K(\Delta t_{\sigma} - t_{\Delta T}), \quad (6)$$

根据式(6)对温度影响进行补偿。

## 8.2 耦合强度控制

探头与被测材料之间的界面耦合直接影响测量结果的稳定性，通过监测控制界面接触压力可实现对耦合效果的控制。耦合强度与信号幅值存在对应关系，测量过程中耦合强度一致性的控制方法采用信号幅值检测法，检测流程如图 7 所示，通过软件检测超声回波信号特定区间的信号强度作为标准来调整超声楔块和检测工件间的耦合力，方法具体原理见附录 A。

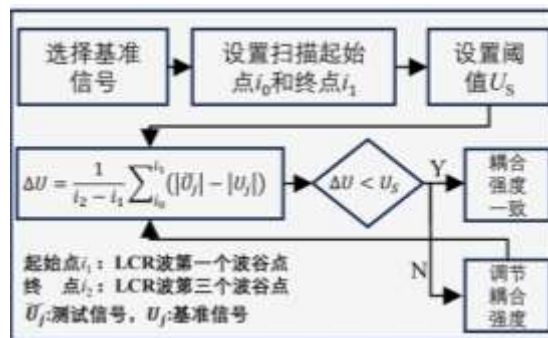


图 7 耦合强度控制方法流程

## 8.3 互相关计算步长

临界折射纵波应力测量需对接受的超声波信号进行互相关处理以计算声时差，互相关计算所需的波段区域（后文简称步长）选取方法核心在于通过预先计算遍历整个信号查找到能使计算结果保持稳定的最优互相关步长区间，然后将该区间设置在软件参数中。45 钢检测互相关算法中不同步长  $N$  对应的声时差如图 8 所示。从图中可以看出在 2.5 倍波长前和 3.2 倍波长后，声时差随互相关步长  $N$  的改变而改变，可见当回波信号中波长  $\lambda$  微小改变时会导致互相关步长  $N$  改变。当互相关步长  $N$  在 2.5 倍波长和 3.2 倍波长之间时，声时差保持稳定，在该区间回波信号中波长  $\lambda$  微小改变不会产生声时误差  $t_{\Delta N}$ 。除此之外图 9 表明，互相关步长  $N$  在 2.5 倍波长和 3.2 倍波长之间时互相关特征值  $\rho_{xy}$  也最接近 1，说明两信号的相似性最高，将该区间定义为最稳定的互相关步长区间，在测量过程中选取该区间中间点的互相关步长进行计算。

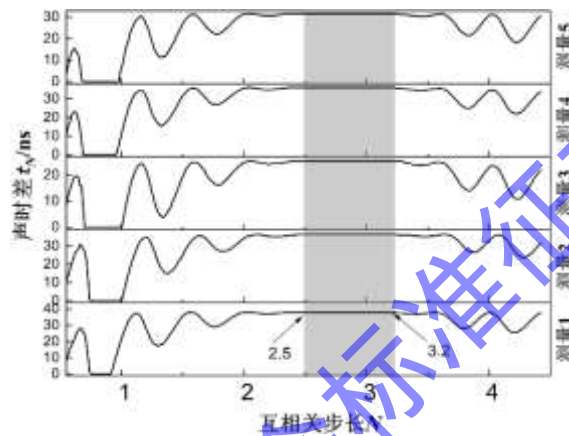


图 8 不同互相关步长下声时差曲线

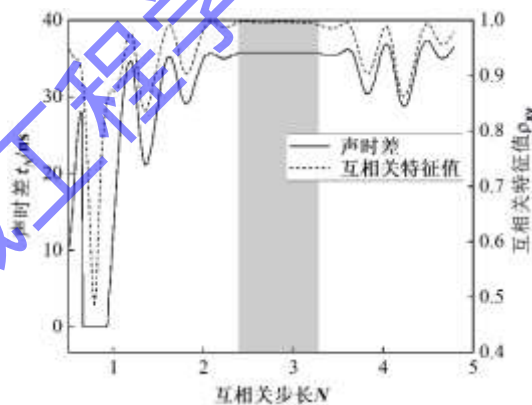


图 9 不同步长下声时差和互相关特征值关系

## 9 测量流程

采用超声法测量残余应力测量流程如图 10 所示：

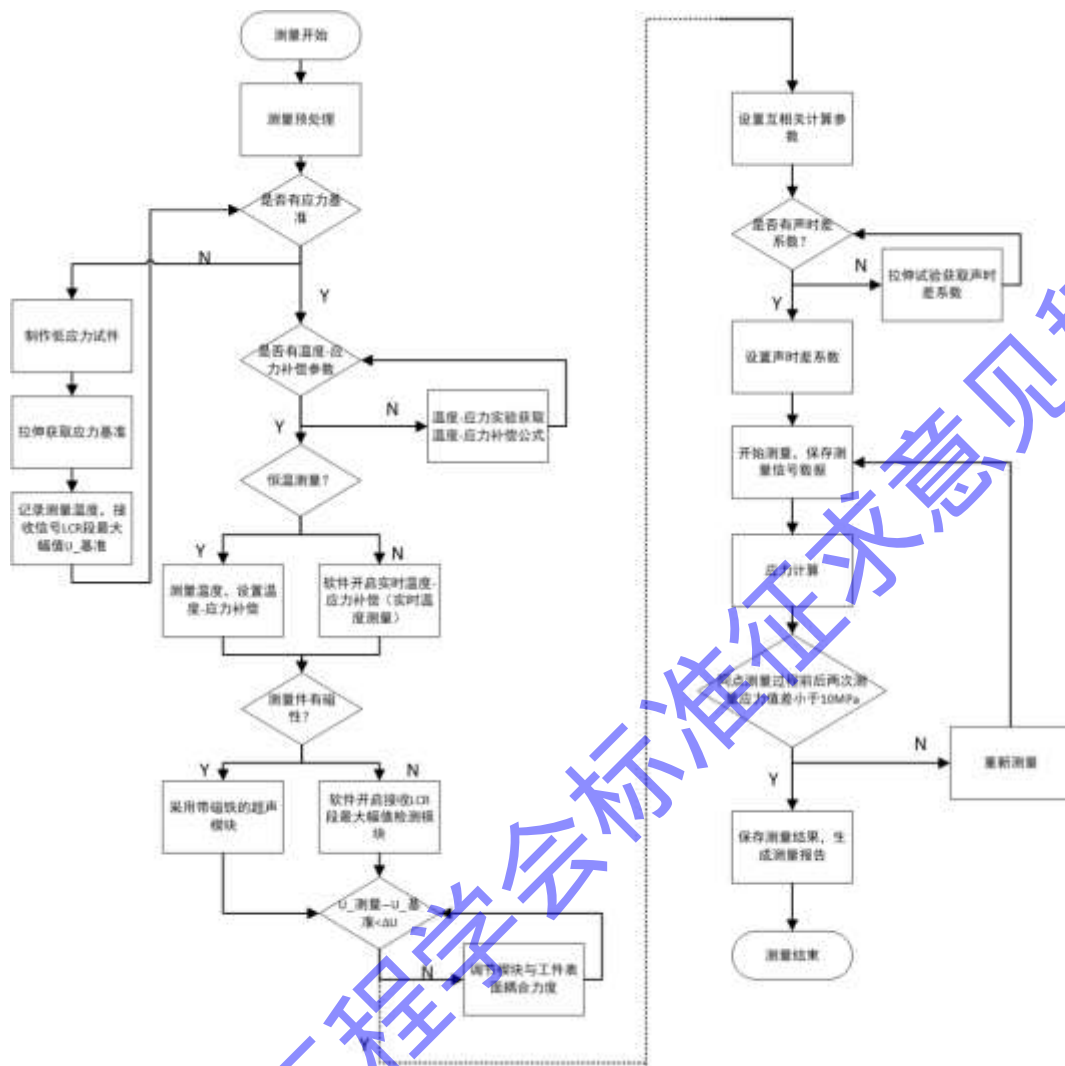


图 10 超声法应力测量流程图

## 10 检测报告

- a. 检测报告的内容应至少包括下列信息;
- b. 检测单位、人员、日期等;
- c. 被检件的材料、厚度、表面粗糙度和曲率等;
- d. 检测中用于计算的基准信号。
- e. 检测时环境温度、应力计算算法参数。
- f. 探头中心频率和间距、及检测仪器的滤波带宽、增益和采集频率等;
- g. 检测区域;
- h. 残余应力数值

## 附录 A

### 耦合强度控制原理

以 45 钢为例，以楔块自重压在试件上的信号作为基准压强  $P_0$ ，对超声楔块逐步施加载荷来改变耦合压强  $P$ （见图 A. 1 (a)），并测量计算不同加载条件下的声时差，重复实验五次。计算结果如图 A. 1 (b)所示，对数据进行拟合，拟合曲线的表达式为  $t_{\Delta P} = 64.28e^{(-\Delta P/17.73)} - 63.83$ ，该式为指数衰减形式，当耦合强度  $\Delta P = P - P_0$  越小时，耦合剂厚度受耦合强度的影响越大，对超声波传播声程的影响也越大，进而产生较大的声时误差  $t_{\Delta P}$ 。当耦合强度  $\Delta P$  达到 60 KPa 时，耦合剂厚度基本已经达到稳定，此时耦合强度  $\Delta P$  增加对声时差的影响最小。因此，应最大限度减小声时误差  $t_{\Delta P}$ ，使每次测量时耦合强度  $\Delta P$  一致。

检测信号的幅值会随着耦合强度  $\Delta P$  增大而增大，如图 A. 1 (c)所示，当耦合强度  $\Delta P$  增加到一定程度后，检测信号幅值基本保持稳定。根据这一现象，本标准提出一种基于回波信号幅值检测的耦合强度控制方法，通过检测基准信号和测试信号的幅值差异来反映耦合强度的一致性，计算公式为：

$$\Delta U = \frac{1}{i_2 - i_1} \sum_{j=i_0}^{j=i_1} (|U_j| - |U_i|) \quad (6)$$

式中： $\Delta U$  为基准信号和测试信号在比较区间幅值变化均值， $i_1$  为基准信号第一个波谷点， $i_2$  为基准信号第三个波谷点， $U_j$  为测试信号幅值， $U_i$  为基准信号幅值。式(6)中采用基准信号第一、第三个波谷点计算能够方便后续程序设计，计算时将测试信号和基准信号第一个波谷点对齐并取绝对值，如图 A. 1 (d)所示。 $\Delta U$  越接近 0，说明两信号在测量时耦合强度  $\Delta P$  越接近。计算图 A. 1 (c)中不同耦合强度  $\Delta P$  下测试信号，结果如图 A. 1 (e)所示，在耦合强度  $\Delta P$  较小时，测试信号在比较区间内幅值差均值  $\Delta U$  随耦合强度的增加而增大。当耦合强度达到 60 KPa 时， $\Delta U$  基本保持不变，这与如图 A. 1 (b)的趋势相似。声时误差  $t_{\Delta P}$  与幅值差均值  $\Delta U$  的关系如图 A. 1 (f)所示。从图中可以看出，声时误差  $t_{\Delta P}$  绝对值随着幅值差均值  $\Delta U$  增加而增加，可见回波信号的幅值变化能够反映声时差的变化。

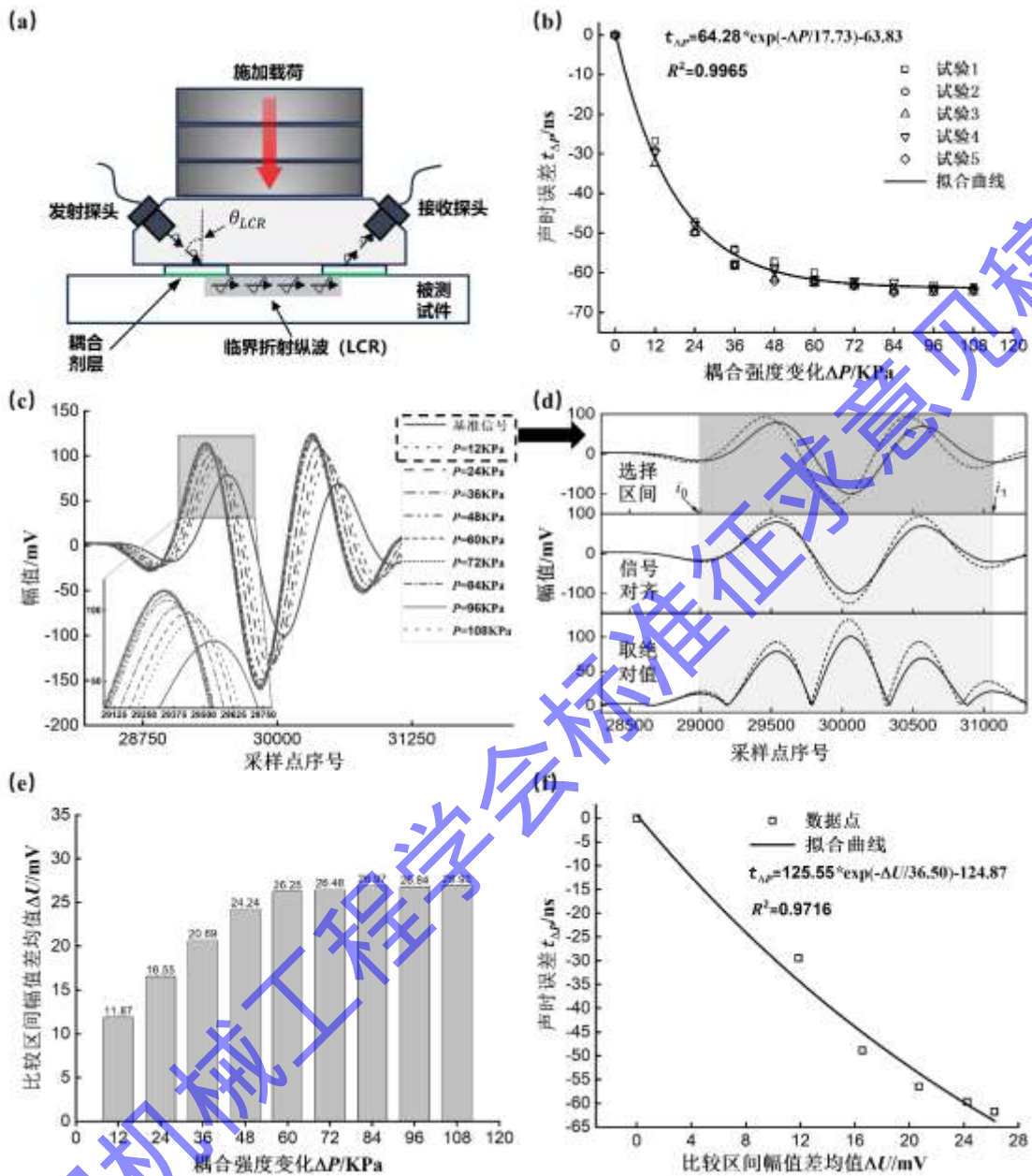


图 A.1 基于回波信号幅值检测的界面耦合控制方法:

(a)楔块载荷施加示意图;(b)在不同耦合强度下声时误差测量结果;(c)不同耦合强度下回波信号幅值;(d)回波信号波形处理流程;(e)不同耦合强度下回波信号在比较区间变化均值;(f)不同比较区间幅值差均值对应的声时误差

实际使用过程中, 设置一个阈值  $U_s$ , 当  $\Delta U < U_s$  时, 判定两信号测量时耦合强度一致。为探究阈值  $U_s$  大小对耦合强度控制效果的影响, 对同一个检测点位进行多次测量, 将首次测量信号作为基准信号, 只改变阈值  $U_s$  的大小, 重复测量 10 次, 其声时差结果如图 A. 2 所示, 其中对照组不采用耦合强度控制方法。从图中可以看出采用耦合强度控制法的测量稳定性高于不采用耦合强度控制法的测量稳定性, 同时阈值  $U_s$  设置的越小, 测量稳定性越高。

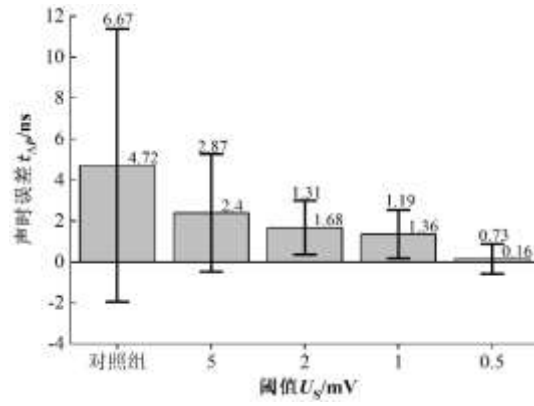


图 A.2 不同阈值( $U_s$ )下声时误差测量结果

中国机械工程学会标准征求意见稿