



中华人民共和国国家标准

GB/T 38897—2020

无损检测 弹性模量和泊松比的 超声测量方法

Non-destructive testing—Measurement method for material elastic modulus and
Poisson's ratio using ultrasonic velocity

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

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 人员要求	2
5 方法概要	2
6 设备	3
7 检测规程	4
8 报告	8
附录 A (资料性附录) 弹性模量和泊松比检测材料	10
附录 B (资料性附录) 弹性模量和泊松比测量及不确定度评定实例	11

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)提出并归口。

本标准起草单位:北京理工大学、上海材料研究所、中国工程物理研究院化工材料研究所、钢铁研究总院、北京遥测技术研究所。

本标准主要起草人:周世圆、徐春广、蒋建生、肖定国、丁杰、郝娟、潘勤学、韩丽娜、张伟斌、徐尧、张敬霖、冯红亮、彭泳卿、黄巧盛、赵明华、吴玄、付君强。



无损检测 弹性模量和泊松比的 超声测量方法

1 范围

本标准规定了基于声速法的材料弹性模量和泊松比超声测量方法,包括人员、设备、试样、规程和报告等要求。

本标准适用于检测金属和非金属固体材料的弹性模量和泊松比,其他复合固体材料亦可参照使用。

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 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 15014 弹性合金、膨胀合金、热双金属、电阻合金物理量术语及定义

3 术语和定义

GB/T 10623、GB/T 12604.1 和 GB/T 15014 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

体波 body wave

在无限或半无限弹性介质中传播的波。

3.2

导波 guided wave

在有界弹性介质中传播的波。

3.3

扭转波 torsional wave

在圆形棒、管形和线材中扭转振动沿轴线传播的波。

3.4

信号前沿 leading edge

回波波峰上升沿与时基的交点。

注:如图 1a)所示,半波检波检测信号中的点 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 是信号前沿;如图 1b)所示,双极性检测信号中的点 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 是信号前沿。

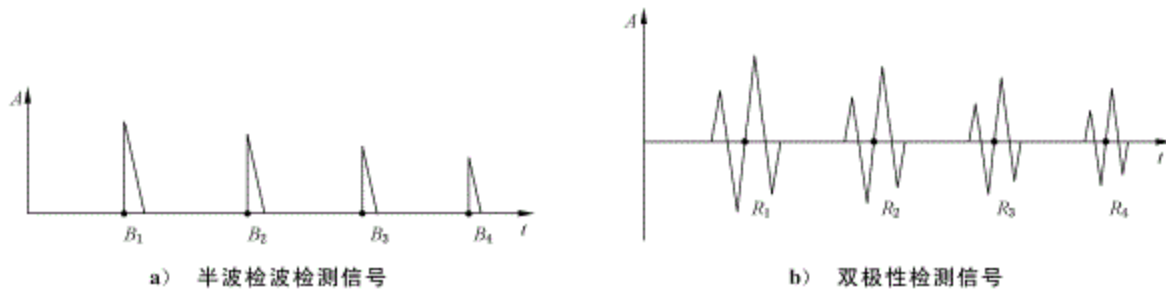


图 1 回波信号前沿示意图

4 人员要求

从事材料弹性模量和泊松比测量的人员应掌握一定的超声检测知识。按照本标准实施的人员,应掌握与本标准相关的技术与知识,并由雇主或其代理对其进行岗位培训和操作授权。

5 方法概要

5.1 原理

固体材料中的超声波传播速度由其弹性模量和密度决定。在已知材料密度的基础上,通过测量超声波在固体材料中的传播速度,计算获得材料的弹性模量和泊松比,检测方法包括适用于块状试样的体波法和适用于圆形截面杆状试样的导波法。

体波法通过测量块状固体中纵波和横波的传播时间和传播距离,获得材料的纵波声速和横波声速,由材料的纵波声速、横波声速和密度计算获得材料的杨氏模量,由材料的横波声速和密度计算获得材料的剪切模量,由材料的纵波声速和横波声速计算获得材料的泊松比。

导波法通过测量圆形细杆中纵波和扭转波的传播时间和传播距离,获得材料的纵波声速和扭转波声速,由材料的纵波声速和密度计算获得材料的杨氏模量,由材料的扭转波声速和密度计算获得材料的剪切模量,由材料的纵波声速和扭转波声速计算获得材料的泊松比。

5.2 方法特性

体波法利用在半无限弹性介质中传播的声波速度测量弹性模量和泊松比,测量横波声速,计算获得剪切模量;测量纵波声速和横波声速,计算获得杨氏模量或泊松比。

导波法利用圆形截面杆中传播的声波速度测量弹性模量和泊松比,测量纵波声速或扭转波声速,计算获得杨氏模量或剪切模量;测量纵波声速和扭转波声速,计算获得泊松比。

按本标准规定的方法检测弹性模量和泊松比的材料名称参见附录 A。

5.3 方法选择依据

体波法适用于厚度不小于 5 mm 的块状试样,且垂直于声波传播方向的最小尺寸应不小于换能器直径或长边尺寸的 3 倍。

导波法适用于直径不大于 5 mm 的圆形截面杆状试样,且长度不小于 100 mm,长径比不小于 40。

各向异性材料按本标准规定的方法获得的弹性模量为沿声束传播方向的弹性模量。

根据试样的制备难易程度和换能器的尺寸选择检测方法,如板材和棒材检测宜采用体波法,丝材检测宜采用导波法。

6 设备

6.1 组成

检测仪器由 A 型脉冲反射式超声波探伤设备(或 A 型脉冲反射式超声脉冲信号收发仪和示波器)和超声换能器组成。超声脉冲信号收发仪用于产生电脉冲信号激励超声换能器发射超声波,并对超声换能器接收超声回波输出的脉冲电信号放大和滤波处理。示波器用于显示超声脉冲信号收发仪输出的脉冲电信号。超声换能器用于反射和接受超声波信号和信号采集。检测仪器特性应至少达到如下要求:

- a) 仪器激励电脉冲信号的电压与峰值频率(脉冲宽度)可调,电压不低于 60 V,峰值频率调整范围至少覆盖 1 MHz~15 MHz。
- b) 接收放大增益和滤波带宽可调,放大增益调整范围至少覆盖-10 dB~60 dB。
- c) 示波器时间测量分辨力和显示宽度可调,测量分辨力不低于 5 ns,最大显示宽度不小于 10 μ s。
- d) 体波法采用接触式换能器或非接触式换能器,纵波换能器用于测量纵波声速,横波换能器用于测量横波声速,尺寸应不大于试样垂直于声传播方向的最小尺寸的 1/3。
- e) 导波法采用磁致伸缩波导杆式超声换能器,在纵波模式下产生和接收纵波,在扭转波模式下产生和接收扭转波。
- f) 换能器频率的选择应考虑材料的声衰减和缺欠的分散率。体波法检测频率一般为 1 MHz~15 MHz,导波法检测频率一般为 50 kHz~200 kHz。为得到更高精度的弹性模量和泊松比值,宜采用尽可能高的频率,并至少能够显示 2 次清晰的反射回波。

6.2 试样

6.2.1 体波法试样

试样放置换能器的两检测表面(声波入射面和反射面)之间的距离(试样厚度)应不小于 5 mm,且不小于波长的 5 倍;两检测表面应平行,平行度在 $\pm 3^\circ$ 以内;两检测表面的表面粗糙度 $R_a \leq 3.2 \mu\text{m}$ 。垂直于声波传播方向的最小尺寸应不小于换能器直径或长边尺寸的 3 倍,且不小于波长的 10 倍。

6.2.2 导波法试样

试样为圆形截面杆,杆直径不大于 5 mm,且长度不小于 100 mm,长径比不小于 40,杆两端面平行度在 $\pm 3^\circ$ 以内,圆柱度在 0.05 mm 以内,圆柱表面粗糙度优于 3.2 μm 。

6.3 耦合剂

检测时,应使用适应被测试样的耦合剂,以保证换能器与被测试样表面具有良好的耦合。对于纵波声速测量,耦合剂应使用洁净的轻质油等材料;对于横波声速测量,应使用树脂或固体黏结剂等高黏性的材料,对某些材料使用蜂蜜、类聚丁烯或其他高黏性的材料更有效。耦合剂不应对被测试样有影响。

导波法检测时,可采用钎焊法将磁致伸缩波导杆式超声换能器的波导杆与被测试样焊接在一起,以保证稳定可靠的超声耦合。

6.4 量具

用于测量被测试样厚度 h 或长度 l 的游标卡尺或千分尺(或其他等效量具),测量精度应不低于 0.1%。被测试样密度应依据材料类型依据相关标准进行测量,测量精度应不低于 0.1%。

7 检测规程

7.1 检测区域

根据使用的仪器和现场实际情况,按照有关文件的要求选择检测区域。如材料特殊或结构复杂,适宜时在同一被测试样上,选择多个检测位置,并记录检测信号对应的检测位置。

7.2 表面要求

被测试样表面应清洁平整,检测前,应对可能引起错误解释的表面疑物予以清除。

7.3 换能器布置方案

换能器布置于检测区域的指定位置。体波法中应保证纵波声速和横波声速测量时,纵波换能器与横波换能器位于同一检测位置。

7.4 检测仪器的调整 and 设置

超声脉冲信号收发仪器调整到正常工作状态,设置脉冲激励频率、脉冲激励电压、接收信号滤波带宽、接收信号放大增益、A 扫信号显示位置和宽度等检测参数。

7.5 体波法

7.5.1 检测系统示意图

体波法通过测量块状固体中纵波和横波的传播速度获得其弹性模量和泊松比,其检测系统如图 2 所示。

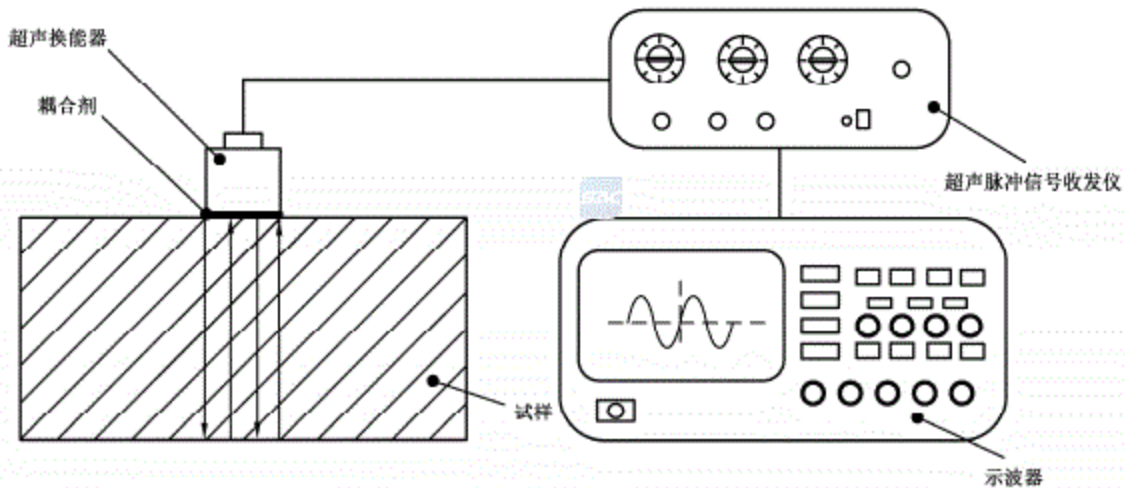


图 2 体波法弹性模量和泊松比检测系统示意图

7.5.2 纵波声速测量

7.5.2.1 通过测量被测试样的厚度和纵波在其中的传播时间,获得被测试样的纵波声速。

7.5.2.2 纵波换能器放置于被测试样声波入射面,施加耦合剂,保证良好耦合,调整超声脉冲信号收发仪,使底面回波信噪比不低于 10 dB,调整示波器,获得尽可能多的底面回波信号,如图 3 所示。

7.5.2.3 声波从入射面传播至反射面再传播回入射面称为一次完整路径传播,一次完整路径传播为 2 倍被测试样厚度。第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数 n_i 等于回波个数

减 1。如图 3 所示,回波 1 和回波 5 之间完整路径传播次数为 4。

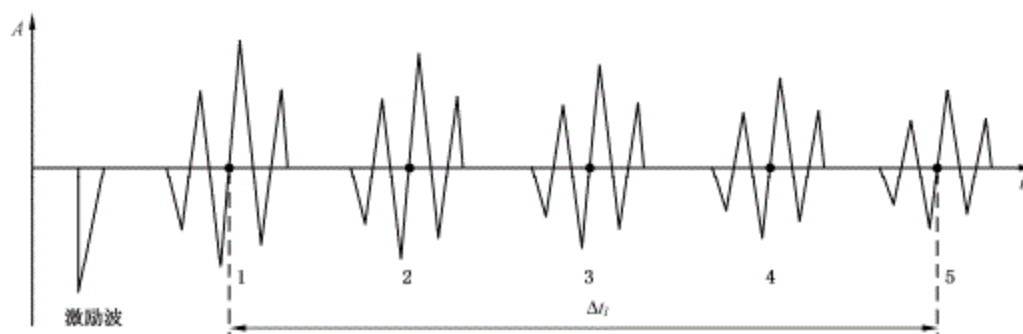


图 3 回波波形图

7.5.2.4 测量第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差 Δt_l 。

7.5.2.5 按式(1)计算被测试样的纵波声速:

$$v_l = \frac{2n_l h}{\Delta t_l} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

v_l ——纵波声速,单位为米每秒(m/s);

n_l ——第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数;

h ——厚度,单位为米(m);

Δt_l ——第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差,单位为秒(s)。

7.5.3 横波声速测量

7.5.3.1 通过测量被测试样的厚度和横波在其中的传播时间,获得被测试样的横波声速。

7.5.3.2 横波换能器放置于被测试样声波入射面,施加耦合剂,保证良好耦合,调整超声脉冲信号收发仪,使底面回波信噪比不低于 10 dB,调整示波器,获得尽可能多的底面回波信号,如图 2 所示。

7.5.3.3 计算第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数 n_s 。

7.5.3.4 测量第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差 Δt_s 。

7.5.3.5 按式(2)计算被测试样的横波声速:

$$v_s = \frac{2n_s h}{\Delta t_s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

v_s ——横波声速,单位为米每秒(m/s);

n_s ——第一个回波信号和最后一个回波信号之间完整路径传播次数;

h ——厚度,单位为米(m);

Δt_s ——第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差,单位为秒(s)。

7.5.4 弹性模量和泊松比计算

7.5.4.1 计算方法

根据声波传播规律,由待测材料的纵波声速、横波声速和密度,计算得到待测材料的弹性模量和泊松比。

7.5.4.2 杨氏模量

按式(3)计算被测试样的杨氏模量:

$$E = \rho v_s^2 \frac{3v_l^2 - 4v_s^2}{v_l^2 - v_s^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- E ——杨氏模量,单位为帕斯卡(Pa);
- ρ ——密度,单位为千克每立方米(kg/m³);
- v_s ——横波声速,单位为米每秒(m/s);
- v_l ——纵波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.5.4.3 剪切模量

按式(4)计算被测试样的剪切模量：

$$G = \rho v_s^2 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- G ——剪切模量,单位为帕斯卡(Pa);
- ρ ——密度,单位为千克每立方米(kg/m³);
- v_s ——横波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.5.4.4 泊松比

按式(5)计算被测试样的泊松比：

$$\mu = \frac{v_l^2 - 2v_s^2}{2(v_l^2 - v_s^2)} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- μ ——泊松比;
- v_l ——纵波声速,单位为米每秒(m/s);
- v_s ——横波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.6 导波法

7.6.1 检测系统示意图

导波法通过测量圆形细杆中纵波和扭转波的传播速度获得其弹性模量和泊松比。检测系统如图4所示。

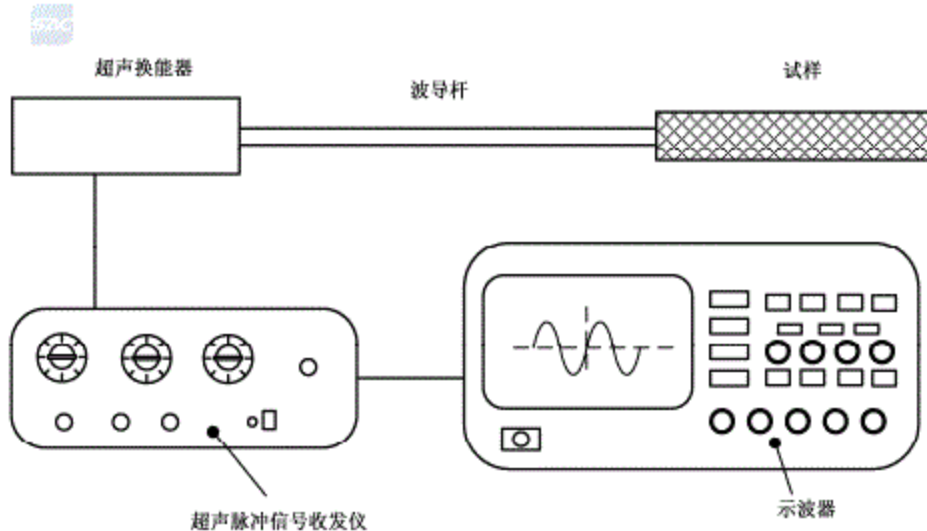


图4 导波法弹性模量和泊松比检测系统示意图

7.6.2 纵波声速测量

7.6.2.1 通过测量被测试样的长度和纵波在其中的传播时间,获得被测试样的纵波声速。

7.6.2.2 磁致伸缩波导杆式纵波换能器放置于被测试样声波入射面,采用钎焊法将换能器的波导杆与被测试样焊接在一起,保证良好耦合,调整超声脉冲信号收发仪,使底面回波信噪比不低于 10 dB,调整示波器,获得尽可能多的底面回波信号,如图 3 所示。

7.6.2.3 计算第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数 n_{lg} 。

7.6.2.4 测量第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差 Δt_{lg} 。

7.6.2.5 按式(6)计算被测试样材料的纵波声速:

$$v_{lg} = \frac{2n_{lg}l}{\Delta t_{lg}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

v_{lg} ——纵波声速,单位为米每秒(m/s);

n_{lg} ——第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数;

l ——长度,单位为米(m);

Δt_{lg} ——第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差,单位为秒(s)。

7.6.3 扭转波声速测量

7.6.3.1 通过测量被测试样的长度和扭转波在其中的传播时间,获得被测试样的扭转波声速。

7.6.3.2 磁致伸缩波导杆式扭转波换能器放置于被测试样声波入射面,采用钎焊法将换能器的波导杆与被测试样焊接在一起,保证良好耦合,调整超声脉冲信号收发仪,使底面回波信噪比不低于 10 dB,调整示波器,获得尽可能多的底面回波信号,如图 3 所示。

7.6.3.3 计算第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数 n_{tg} 。

7.6.3.4 测量第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差 Δt_{tg} 。

7.6.3.5 按式(7)计算被测试样的扭转波声速:

$$v_{tg} = \frac{2n_{tg}l}{\Delta t_{tg}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

v_{tg} ——扭转波声速,单位为米每秒(m/s);

n_{tg} ——第一个回波信号和最后一个回波信号之间的完整路径传播次数;

l ——长度,单位为米(m);

Δt_{tg} ——第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差,单位为秒(s)。

7.6.4 弹性模量和泊松比计算

7.6.4.1 计算方法

根据声波传播规律,由待测材料的纵波声速、扭转波声速和密度,计算得到待测材料的弹性模量和泊松比。

7.6.4.2 杨氏模量

按式(8)计算被测试样的杨氏模量:

$$E = \rho v_{lg}^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

E ——杨氏模量,单位为帕斯卡(Pa);

ρ ——密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 v_{L} ——纵波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.6.4.3 剪切模量

按式(9)计算被测试样的剪切模量:

$$G = \rho v_{\text{R}}^2 \dots\dots\dots(9)$$

式中:

G ——剪切模量,单位为帕斯卡(Pa);
 ρ ——密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 v_{R} ——扭转波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.6.4.4 泊松比

按式(10)计算被测试样的泊松比:

$$\mu = \frac{v_{\text{L}}^2 - 2v_{\text{R}}^2}{2v_{\text{R}}^2} \dots\dots\dots(10)$$

式中:

μ ——泊松比;
 v_{L} ——纵波声速,单位为米每秒(m/s);
 v_{R} ——扭转波声速,单位为米每秒(m/s)。

7.7 检测步骤

7.7.1 体波法检测步骤

- 7.7.1.1 按 7.4 调整和设置检测仪器。根据换能器布置方案,纵波换能器稳定耦合在检测位置。
- 7.7.1.2 记录示波器测出的被测试样中第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差和完整路径传播次数。
- 7.7.1.3 根据式(1),计算被测试样的纵波声速。
- 7.7.1.4 采用横波换能器重复 7.7.1.1 和 7.7.1.2,根据式(2),计算被测试样的横波声速。
- 7.7.1.5 根据式(3)、式(4)和式(5),计算被测试样的杨氏模量、剪切模量和泊松比。
- 7.7.1.6 体波法弹性模量和泊松比测量实例参见附录 B。

7.7.2 导波法检测步骤

- 7.7.2.1 按 7.4 调整和设置检测仪器。根据换能器布置方案,磁致伸缩波导杆式纵波换能器稳定耦合在圆形截面杆试样一端。
- 7.7.2.2 记录示波器测出的被测试样中第一个回波信号前沿和最后一个回波信号前沿之间的时间差和完整路径传播次数。
- 7.7.2.3 根据式(6),计算被测试样圆形截面杆内部的纵波声速。
- 7.7.2.4 采用磁致伸缩波导杆式扭转波换能器重复 7.7.2.1 和 7.7.2.2,根据式(7),计算被测试样圆形截面杆内部的扭转波声速。
- 7.7.2.5 根据式(8)、式(9)和式(10),计算被测试样的杨氏模量、剪切模量和泊松比。
- 7.7.2.6 导波法弹性模量和泊松比测量实例,参见附录 B。

8 报告

报告应包括且不限于下列内容:

- a) 检测方法；
- b) 被测试样的材料；
- c) 耦合剂；
- d) 超声脉冲信号收发仪器的名称、型号等；
- e) 超声换能器的类型、尺寸和频率；
- f) 检测时的环境温度；
- g) 被测试样的杨氏模量、剪切模量和泊松比的测量值；
- h) 检测单位、人员和日期。



附 录 A
(资料性附录)

弹性模量和泊松比检测材料

按本标准规定的方法检测弹性模量和泊松比的材料名称如表 A.1 所示。

表 A.1 弹性模量和泊松比检测材料汇总表

检测方法	材料名称
体波法	碳钢、不锈钢、工具钢、铝、粉末合金、陶瓷、高聚物黏结炸药
导波法	碳钢、不锈钢、特殊不锈钢、铝、铝青铜、钨、碳、形状记忆合金、高温合金、粉末合金、弹性合金

附录 B (资料性附录)

弹性模量和泊松比测量及不确定度评定实例

B.1 概述

本附录以钢块和碳棒为例分别说明体波法和导波法测量弹性模量和泊松比的不确定度评定。

在下面的不确定评定中,待测材料为钢块和碳棒,待测的各分量互不相干,因此灵敏系数均为 1,在下面的评定中不再单独列出关于灵敏系数的说明。

B.2 不确定度来源

测量弹性模量和泊松比的不确定度来源主要有:

- a) 纵波/横波声时测量不确定度,包括其测量重复性、模数转换精度所引入的测量不确定度等;
- b) 游标卡尺引入的长度测量不确定度;
- c) 被测试样的密度测量不确定度。

B.3 体波法检测钢块弹性模量和泊松比及其不确定度评定

B.3.1 纵波声时、横波声时和厚度测量值

利用体波法检测钢块的弹性模量和泊松比,使用示波器、超声脉冲信号收发仪和接触式压电换能器搭建的通用检测系统测量纵波声时和横波声时,使用游标卡尺测量待测材料厚度,重复测量 10 次,取测量的平均值作为各个测量量的基本值,计算其标准差,测量结果分别如表 B.1、表 B.2 和表 B.3 所示。

表 B.1 纵波声时测量值 单位为微秒

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 t_L	标准差 $u_{L,1}$
3.34	3.35	3.35	3.34	3.35	3.35	3.34	3.35	3.34	3.34	3.35	0.001 6

表 B.2 横波声时测量值 单位为微秒

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 t_s	标准差 $u_{s,1}$
6.15	6.16	6.16	6.16	6.17	6.16	6.16	6.17	6.16	6.15	6.16	0.001 6

表 B.3 厚度测量值 单位为毫米

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 h	标准差 $u_{h,1}$
9.84	9.86	9.82	9.80	9.84	9.86	9.82	9.82	9.80	9.84	9.83	0.007 0

测量量平均值的标准差按式(B.1)计算:



$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- n ——重复测量次数；
- x_i ——第 i 次测量的数值；
- \bar{x} —— n 次测量的平均值。

B.3.2 纵波声速测量值及标准不确定度评定

B.3.2.1 纵波声时的标准不确定度评定

B.3.2.1.1 纵波声时的标准不确定度 A 类评定

纵波声时测量的重复性采用 A 类评定,纵波声时均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差：

$$u_{u1} = 0.001\ 6\ \mu\text{s} \dots\dots\dots (B.2)$$

B.3.2.1.2 纵波声时的标准不确定度 B 类评定

数据采样卡的模数转换引入的测量不确定度采用 B 类评定。纵波声时测量精度取决于采样频率和电压分辨率,经验表明数据采样卡的模数转换误差引起的测量误差一般不会超过 5 个采样周期。当使用 100 MHz 的采样频率时,系统测量声时的误差不超过 50 ns,因此纵波声时的示值误差的半区间为 25 ns,引入的标准不确定度按均匀分布估计,则纵波声时的 B 类标准不确定度为：

$$u_{u2} = 25\ \text{ns} / \sqrt{3} = 0.014\ 4\ \mu\text{s} \dots\dots\dots (B.3)$$

B.3.2.1.3 纵波声时的合成标准不确定度

纵波声时的合成标准不确定度为：

$$u_{u'} = \sqrt{u_{u1}^2 + u_{u2}^2} = 0.014\ 5\ \mu\text{s} \dots\dots\dots (B.4)$$

B.3.2.2 厚度的标准不确定度评定

B.3.2.2.1 厚度的标准不确定度 A 类评定

厚度测量的重复性采用 A 类评定,厚度均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差：

$$u_{k1} = 0.007\ 0\ \text{mm} \dots\dots\dots (B.5)$$

B.3.2.2.2 厚度的标准不确定度 B 类评定

厚度测量使用分辨力为 0.02 mm 的游标卡尺,其测量分辨力引入的测量不确定度采用 B 类评定。示值误差的半区间为 0.01 mm,按均匀分布估计,B 类标准不确定度为：

$$u_{k2} = 0.01\ \text{mm} / \sqrt{3} = 0.005\ 8\ \text{mm} \dots\dots\dots (B.6)$$

B.3.2.2.3 厚度的合成标准不确定度

厚度的合成标准不确定度为：

$$u_k = \sqrt{u_{k1}^2 + u_{k2}^2} = 0.009\ 1\ \text{mm} \dots\dots\dots (B.7)$$

B.3.2.3 纵波声速测量值及标准不确定度评定

纵波声速由纵波声时和厚度计算,纵波声速和其合成标准不确定度分别为:

$$v_l = \frac{2h}{t_l} = 5\,868.66 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

$$u_{v_l} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_l}{\partial h} u_h\right)^2 + \left(\frac{\partial v_l}{\partial t_l} u_{t_l}\right)^2} = 25.974 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

B.3.3 横波声速测量值及标准不确定度评定

B.3.3.1 横波声时的标准不确定度评定

B.3.3.1.1 横波声时的标准不确定度 A 类评定

横波声时测量的重复性采用 A 类评定,横波声时均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差:

$$u_{t_{s1}} = 0.001\,6 \text{ } \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.10})$$

B.3.3.1.2 横波声时的标准不确定度 B 类评定

横波声时的标准不确定度 B 类评定与纵波声时的标准不确定度 B 类评定相同,对数据采样卡的模数转换引入的测量不确定度采用 B 类评定:

$$u_{t_{s2}} = 25 \text{ ns}/\sqrt{3} = 0.014\,4 \text{ } \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.11})$$

B.3.3.1.3 横波声时的合成标准不确定度

横波声时的合成标准不确定度为:

$$u_{t_s} = \sqrt{u_{t_{s1}}^2 + u_{t_{s2}}^2} = 0.014\,5 \text{ } \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

B.3.3.2 厚度的标准不确定度评定

厚度的标准不确定度评定与纵波相同,合成标准不确定度为:

$$u_h = \sqrt{u_{h1}^2 + u_{h2}^2} = 0.009\,1 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

B.3.3.3 横波声速测量值及标准不确定度评定

横波声速由横波声时和厚度计算,横波声速和其合成标准不确定度分别为:

$$v_s = \frac{2h}{t_s} = 3\,191.56 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

$$u_{v_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_s}{\partial h} u_h\right)^2 + \left(\frac{\partial v_s}{\partial t_s} u_{t_s}\right)^2} = 8.069 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.15})$$

B.3.4 密度的标准不确定度评定

钢密度 ρ 取 7.84 g/cm^3 ,测量精度小于或等于 0.1% ,取 95% 置信度,扩展因子为 2,计算得到其不确定度 u_ρ 为 $0.003\,9 \text{ g/cm}^3$

B.3.5 弹性模量和泊松比测量值及标准不确定度评定

B.3.5.1 杨氏模量测量值及标准不确定度评定

由 7.5.4.2 式(3),代入纵波声速、横波声速和密度值计算得到杨氏模量:

$$E = \rho v_l^2 \frac{3v_l^2 - 4v_s^2}{v_l^2 - v_s^2} = 206.04 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.16})$$

其合成标准不确定度由纵波声速、横波声速和密度的标准不确定度计算得到：

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial v_l} u_{v_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial v_s} u_{v_s}\right)^2} = 1.154 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.17})$$

取包含因子为 3，则待测材料的杨氏模量的扩展不确定度为：

$$U_E = 3u_E = 3.462 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.18})$$

B.3.5.2 剪切模量测量值及标准不确定度评定

由 7.5.4.3 式(4)，代入横波声速和密度值计算得到剪切模量：

$$G = \rho v_s^2 = 79.86 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.19})$$

其合成标准不确定度由横波声速和密度的标准不确定度计算得到：

$$u_G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial v_s} u_{v_s}\right)^2} = 0.406 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.20})$$

取包含因子为 3，则待测材料的剪切模量的扩展不确定度为：

$$U_G = 3u_G = 1.218 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots(\text{B.21})$$

B.3.5.3 泊松比测量值及标准不确定度评定

由 7.5.4.4 式(5)，代入纵波声速和横波声速计算得到泊松比：

$$\mu = \frac{v_l^2 - 2v_s^2}{2(v_l^2 - v_s^2)} = 0.29 \quad \dots\dots\dots(\text{B.22})$$

其合成标准不确定度由纵波声速和横波声速的标准不确定度计算得到：

$$u_\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu}{\partial v_l} u_{v_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial v_s} u_{v_s}\right)^2} = 0.006 \quad \dots\dots\dots(\text{B.23})$$

取包含因子为 3，则待测材料的泊松比的扩展不确定度为：

$$U_\mu = 3u_\mu = 0.018 \quad \dots\dots\dots(\text{B.24})$$

B.4 导波法检测碳棒弹性模量和泊松比及其不确定度评定

B.4.1 纵波声时、扭转波声时和长度测量值

利用导波法测量碳棒的弹性模量和泊松比，使用示波器、超声脉冲信号收发仪和致伸缩波导杆式超声换能器搭建的通用测量系统测量纵波声时和扭转波声时，使用游标卡尺测量待测材料长度，重复测量 10 次，取测量的平均值作为各个测量量的基本值，并计算其标准差，测量结果分别如表 B.4、表 B.5 和表 B.6 所示。

表 B.4 纵波声时测量值 单位为微秒

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 $t_{\text{纵}}$	标准差 $u_{\text{纵}}$
42.54	42.58	42.57	42.58	42.59	42.50	42.48	42.52	42.50	42.49	42.54	0.013 3

表 B.5 扭转波声时测量值 单位为微秒

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 $t_{\text{扭}}$	标准差 $u_{\text{扭}}$
76.84	76.88	76.88	76.86	76.88	76.82	76.86	76.86	76.84	76.84	76.86	0.006 6

表 B.6 长度测量值

单位为毫米

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 \bar{l}	标准差 u_{l1}
70.80	70.84	70.90	70.78	70.74	70.72	70.80	70.90	70.90	70.86	70.82	0.021 2

测量量平均值的标准差按式(B.1)计算。

B.4.2 纵波声速测量值及标准不确定度评定

B.4.2.1 纵波声时的标准不确定度评定

B.4.2.1.1 纵波声时的标准不确定度 A 类评定

纵波声时测量的重复性采用 A 类评定,纵波声时均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差:

$$u_{u_{g1}} = 0.013\ 3\ \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (B.25)$$

B.4.2.1.2 纵波声时的标准不确定度 B 类评定

数据采样卡的模数转换引入的测量不确定度采用 B 类评定。纵波声时测量精度取决于采样频率和电压分辨率,经验表明数据采样卡的模数转换误差引起的测量误差一般不会超过 5 个采样周期。当使用 100 MHz 的采样频率时,系统测量声时的误差不超过 50 ns,因此纵波声时的示值误差的半区间为 25 ns,引入的标准不确定度按均匀分布估计,则纵波声时的 B 类标准不确定度为:

$$u_{u_{g2}} = 25\ \text{ns}/\sqrt{3} = 0.014\ 4\ \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (B.26)$$

B.4.2.1.3 纵波声时的合成标准不确定度

纵波声时的合成标准不确定度为:

$$u_{u_{g}} = \sqrt{u_{u_{g1}}^2 + u_{u_{g2}}^2} = 0.019\ 6\ \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (B.27)$$

B.4.2.2 长度的标准不确定度评定

B.4.2.2.1 长度的标准不确定度 A 类评定

长度测量的重复性采用 A 类评定,厚度均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差:

$$u_{l1} = 0.021\ 2\ \text{mm} \quad \dots\dots\dots (B.28)$$

B.4.2.2.2 长度的标准不确定度 B 类评定

长度测量使用分辨力为 0.02 mm 的游标卡尺,其测量分辨力引入的测量不确定度采用 B 类评定。示值误差的半区间为 0.01 mm,按均匀分布估计,B 类标准不确定度为:

$$u_{l2} = 0.01\ \text{mm}/\sqrt{3} = 0.005\ 8\ \text{mm} \quad \dots\dots\dots (B.29)$$

B.4.2.2.3 长度的合成标准不确定度

长度的合成标准不确定度为:

$$u_l = \sqrt{u_{l1}^2 + u_{l2}^2} = 0.022\ 0\ \text{mm} \quad \dots\dots\dots (B.30)$$

B.4.2.3 纵波声速测量值及标准不确定度评定

纵波声速由纵波声时和厚度计算,纵波声速和其合成标准不确定度分别为:

$$v_{lg} = \frac{2l}{t_{lg}} = 3\,329.57 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.31})$$

$$u_{v_{lg}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_{lg}}{\partial l} u_l\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{lg}}{\partial t_{lg}} u_{t_{lg}}\right)^2} = 1.850 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.32})$$

B.4.3 扭转波声速测量值及标准不确定度评定

B.4.3.1 扭转波声时的标准不确定度评定

B.4.3.1.1 扭转波声时的标准不确定度 A 类评定

扭转波声时测量的重复性采用 A 类评定,横波声时均值的标准不确定度的 A 类评定为其多次测量值的标准差:

$$u_{t_{g1}} = 0.006\,6 \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.33})$$

B.4.3.1.2 扭转波声时的标准不确定度 B 类评定

扭转波声时的标准不确定度 B 类评定与纵波声时的标准不确定度 B 类评定相同,对数据采样卡的模数转换引入的测量不确定度采用 B 类评定:

$$u_{t_{g2}} = 25 \text{ ns}/\sqrt{3} = 0.014\,4 \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.34})$$

B.4.3.1.3 扭转波声时的合成标准不确定度

扭转波声时的合成标准不确定度为:

$$u_{t_{gk}} = \sqrt{u_{t_{g1}}^2 + u_{t_{g2}}^2} = 0.015\,8 \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.35})$$

B.4.3.2 长度的标准不确定度评定

长度的标准不确定度评定与纵波相同,合成标准不确定度为:

$$u_l = \sqrt{u_{l1}^2 + u_{l2}^2} = 0.022\,0 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(\text{B.36})$$

B.4.3.3 扭转波声速测量值及标准不确定度评定

扭转波声速由扭转波声时和长度计算,扭转波声速和其合成标准不确定度分别为:

$$v_{tg} = \frac{2l}{t_{tg}} = 1\,843.03 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.37})$$

$$u_{v_{tg}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_{tg}}{\partial l} u_l\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{tg}}{\partial t_{tg}} u_{t_{tg}}\right)^2} = 0.686 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(\text{B.38})$$

B.4.4 密度的标准不确定度评定

碳棒密度 ρ 取 1.55 g/cm^3 ,测量精度小于或等于 0.1% ,取 95% 置信度,扩展因子为 2,计算得到其不确定度 u_ρ 为 0.016 g/cm^3 。

B.4.5 弹性模量和泊松比测量值及标准不确定度评定

B.4.5.1 杨氏模量测量值及标准不确定度评定

由 7.6.4.2 式(8),代入纵波声速和密度值计算得到杨氏模量:

$$E = \rho v_{lR}^2 = 17.18 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.39})$$

其合成标准不确定度由纵波声速和密度的标准不确定度计算得到：

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial v_{lR}} u_{v_{lR}}\right)^2} = 0.178 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.40})$$

取包含因子为 3, 则待测材料的杨氏模量的扩展不确定度为：

$$U_E = 3u_E = 0.534 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.41})$$

B.4.5.2 剪切模量测量值及标准不确定度评定

由 7.6.4.3 式(9), 代入扭转波声速和密度值计算得到剪切模量：

$$G = \rho v_{tR}^2 = 5.26 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.42})$$

其合成标准不确定度由扭转波声速和密度的标准不确定度计算得到：

$$u_G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial v_{tR}} u_{v_{tR}}\right)^2} = 0.054 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.43})$$

取包含因子为 3, 则待测材料的剪切模量的扩展不确定度为：

$$U_G = 3u_G = 0.162 \text{ GPa} \quad \dots\dots\dots (\text{B.44})$$

B.4.5.3 泊松比测量值及标准不确定度评定



由 7.6.4.4 式(10), 代入纵波声速和扭转波声速计算得到泊松比：

$$\mu = \frac{v_{lR}^2 - 2v_{tR}^2}{2v_{lR}^2} = 0.63 \quad \dots\dots\dots (\text{B.45})$$

其合成标准不确定度由纵波声速和扭转波声速的标准不确定度计算得到：

$$u_\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu}{\partial v_{lR}} u_{v_{lR}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial v_{tR}} u_{v_{tR}}\right)^2} = 0.02 \quad \dots\dots\dots (\text{B.46})$$

取包含因子为 3, 则待测材料的泊松比的扩展不确定度为：

$$U_\mu = 3u_\mu = 0.06 \quad \dots\dots\dots (\text{B.47})$$
