**《超声检测试块声学参数校准规范》**

**不确定度分析报告**

**超声检测试块声学参数校准规范编制组**

**2025年10月**

**《超声检测试块声学参数校准规范》**

**不确定度分析报告**

**1 声速测量不确定度分析**

**1.1测量原理与数学模型**

脉冲回波法使用超声探头发射一个短暂的脉冲，该脉冲在样品中传播，在另一端反射后回到同一探头。通过测量发射脉冲与第一次回波（或第*m*次与*k*次回波）之间的时间间隔（即声时*T*km），并已知样品的厚度*d*，即可计算纵波声速*c*。

脉冲回波法声速测量的数学模型：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-1） |

其中，*d*为试块厚度；*T*km为第*k*次和第*m*次超声脉冲之间的时间间隔；为衍射修正。

**1.2不确定度来源分析**

1）厚度*d*测量的不确定度*u*(*d*)：

测厚工具（如数显测高仪）的不确定度；

测厚工具的分辨率；

测量重复性；

样品平行度误差（两端面不平行导致厚度测量值不唯一）；

温度对样品尺寸的影响。

2）声时差*T*km的测量不确定度*u*(*T*km)

示波器的时间分辨力（时基精度）；

示波器的校准不确定度；

回波特征点判读重复性：由于高温噪声和波形畸变，每次人工或互相关判读回波特征点位置会引入随机误差；

声束非垂直入射（声程增长）：如果探头不垂直于样品表面，实际声程会大于2*d*，导致*T*km偏大，声速计算值偏大；

波形叠加与失真：当回波间隔很近或材料声衰减很大时，回波可能导致叠加或失真，影响*T*km的准确提取测量。

3）其他潜在来源：

声衍射效应：声传播中路径导致的声扩散效应，引起波形及幅度变化，影响回波特征点的提取。

模型不完善：多次回波法中，假设声波在完全平面的界面间传播，每次路径完全相同，偏离该假设引入的不确定度。

耦合：耦合层厚度和一致性影响（在多次回波法中，该影响作为共模干扰被大幅削弱）

**1.3 标准不确定度分析**

A）厚度*d*的测量不确定度*u*(*d*)

①数显测高仪的测量不确定度：

数显测高仪的最大允许误差MPE为±[1.2+L(mm)/1000]µm，代入L=20 mm，计算MPE=±1.22 µm。假定满足矩形分布，则标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （1-2） |

②分辨力：

数显测高仪的分辨力为0.1 µm，按均匀分布处理：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （1-3） |

③测量重复性与平行度：

在样品不同位置测量6次，6组的测量结果（mm）：

20.0396、20.0295、20.0341、20.0413、20.0331、20.0293

得到标准偏差s=5.03 µm。取单次测量的标准偏差作为该分量的估计：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （1-4） |

厚度d的合成标准不确定度由上述三个分量合成（假设相互独立）：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （1-5） |

相对标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-6） |

2）声时差*T*km的测量不确定度*u*(*T*km)

常温23.6℃时，第2与第4次回波时延为13.34 µs。

①示波器的时间校准不确定度：

根据示波器校准证书，时基的扩展不确定度为0.01%（*k*=2）。对于*T*km=13.34 µs，其绝对不确定度为13.34 µs×0.01%=0.001334 µs。则标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| µs | （1-7） |

②示波器时间分辨力

示波器采样率为100 MSa/s，采样间隔为10 ns。由于通过互相关法定位回波特征点，其不确定度通常小于采样间隔。按均匀分布，分辨力引入的不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| µs | （1-8） |

③回波特征判读重复性

在相同条件下重复采集并判断*T*km 6次，6组的测量结果（μs）：13.34、13.34、13.34、13.34、13.34、13.33。计算其标准偏差*s*，则

|  |  |
| --- | --- |
| =6.8×10-4 µs | （1-9） |

④声束非垂直入射：假设探头最大倾斜角估计为。实际声程为2d/cos()，声时差为*T*km=*T*km/ cos()。由此引入的系统误差为*T*km/（1/cos()-1）。当时，1/cos()-1=1.52×10-4。假设角度估计在半角为0.5°的区间内均匀分布，则其相对标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| = 5.5×10-5 | （1-10） |

声时差的合成标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| 3.13×10-3µs | （1-11） |

相对标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-12） |

**1.4 合成标准不确定度**

声速的相对合成方差为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-13） |

代入数值得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-14） |

**1.5 扩展不确定度**

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1-13） |

**2 . 声衰减系数不确定度分析**

**2.1 测量原理与数学模型**

脉冲回波法通过测量被测试样中多次底面回波的幅度衰减来计算材料的声衰减系数。理想情况下，相邻回波幅度的衰减主要由材料的吸收和散射引起。

脉冲回波法声衰减测量的数学模型：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-1） |

单位为dB/m。其中：

：待测的声衰减系数（dB/m）；

*A*m，*A*k：第*m*次和第*k*次底面回波的峰值电压幅度（V）；

d：被测试样的厚度（m）；

（*m*-*k*）：回波次数差；

：系统衰减修正项，包含了声束扩散（衍射）修正、界面透射损失等。若不修正，此处测的是“表观衰减”。

**2.2 不确定度来源分析**

1）回波幅度测量引入的不确定度*u*(*A*)

测量重复性：由于耦合层厚度变化、探头压力微小变化、仪器噪声、电子系统漂移等导致同一回波幅度多次测量的分散性；

仪器幅度校准与线性度：示波器的垂直电压可读不准确，以及在不同幅度范围内的非线性相应；

信号噪声：噪声影响峰值幅度判读的准确性，特别是针对小幅度回波；

波形失真与基线漂移：影响峰值电压提取。

2）厚度*d*测量的不确定度*u*(*d*)：

测厚工具（如数显测高仪）的不确定度；

测厚工具的分辨率；

测量重复性；

样品平行度误差（两端面不平行导致厚度测量值不唯一）；

温度对样品尺寸的影响。

3）声束扩散（衍射）修正引入的不确定度*u*()

衰减测量中最棘手和重要的系统误差来源，修正公式本身是基于模型的近似；

模型所需的参数（如探头有效半径、被测试样声速）不准确；

声场与理想模型（如高斯声束）的偏离。

4）其他系统效应引入的不确定度*u*()

耦合波动：耦合层厚度和均匀性的变化导致声能传输效率变化，影响回波幅度；

界面非平行度：样品两面不平行导致声波偏离轴线，使接收到的回波幅度降低；

声束非垂直入射：导致声程变化和反射效率变化；

电路非线性与换能器非线性：发射电压、接收器增益可能不严格线性，导致大动态范围幅度测量的误差；

材料围观结构不均匀性：导致不同测量点的声衰减系数本身存在差异。

**2.3 标准不确定度分析**

1）厚度*d*的测量不确定度*u*(*d*)

①数显测高仪的测量不确定度：

数显测高仪的最大允许误差MPE为±[1.2+*L*(mm)/1000]µm，代入*L*=20 mm，计算MPE=±1.22 µm。假定满足矩形分布，则标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （2-2） |

②分辨力：

数显测高仪的分辨力为0.1 µm，按均匀分布处理：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （2-3） |

③测量重复性与平行度：

在样品不同位置测量6次，6组的测量结果（mm）：

20.0396、20.0295、20.0341、20.0413、20.0331、20.0293

得到标准偏差*s*=5.03 µm。取单次测量的标准偏差作为该分量的估计：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （2-4） |

厚度*d*的合成标准不确定度由上述三个分量合成（假设相互独立）：

|  |  |
| --- | --- |
| µm | （2-5） |

相对标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-6） |

2）回波幅度比*A*m/*A*k的测量不确定度*u*(*R*)

幅度比*R*=*A*m/*A*k。

①幅度测量重复性*u*rep(*R*)：

在保持耦合和设置不变的情况下，连续采集6组数据，得到*A*m和*A*k，并计算对比值*R*。计算这6组*R*值：3.057、3.055、3.053、3.052、3.056、3.055。实验标准偏差*s*(*R*)=0.0019。则该分量为：

|  |  |
| --- | --- |
| 0.0019 | （2-7） |

②仪器幅度校准与线性度*u*lin(R)：

根据示波器的校准证书，其电压测量的相对扩展不确定度为2%（*k*=2）。由于*R*是两个电压的比值，根据交流信号测量假定满足反正弦分布，测量该分量对比值*R*的相对标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-8） |

幅度比*R*的合成标准不确定度：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-9） |

相对标准不确定度：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-10） |

**2.4 合成标准不确定度**

首先，计算未考虑衍射修正时的“表观”衰减系数及其不确定度。

表观衰减：

|  |  |
| --- | --- |
| dB/m | （2-11） |

的相对合成方差（仅考虑*R*和*d*）

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-12） |

由于在的关系中，的灵敏系数不是1。对于20，其标准不确定度。

因此，更准确的合成方式先计算的绝对方差：

幅度比*R*引入的分量：

厚度*d*引入的分量：

所以：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-14） |

现在，考虑衍射修正。修正后的衰减系数为：

|  |  |
| --- | --- |
| dB/m | （2-15） |

衍射修正引入的不确定度分量：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-16） |

修正后的衰减系数的合成标准不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-17） |

**2.5扩展不确定度**

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2-18） |

相对不确定度：

|  |  |
| --- | --- |
| （*k*=2） | （2-19） |