

细小管材的自动化高精度超声测量

毛 捷 郭成彬 张逸君 黄振俨 杨玺贞

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

2001 年 6 月 19 日收到

摘要 文章介绍了高精度细管材直径和薄壁厚的超声自动测量系统, 对实验结果进行了误差分析, 实验结果表明系统不确定度可达 $\pm 2\mu\text{m}$ 。

关键词 测量, 超声, 自动化, 细小管材

Automatic high-precision ultrasonic measurement of fine tubing

MAO Jie GUO Chengbin ZHANG Yijun HUANG Zhenyan YANG Xizhen

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract High-precision automatic ultrasonic measurement of diameters and wall thickness of fine tubing is described in the paper. Error analysis is discussed. Experimental results show accuracy of $\pm 2\mu\text{m}$.

Key words Measurement, Ultrasonic, Automation, Tubing

1 引言

到国际先进水平。

超声测量仪广泛地应用在工业测量中。用于核反应堆的核燃料包壳管时, 其直径范围 6–20mm, 壁厚 0.4–1mm (如管材 $\phi 10.04^{\pm 0.03} \times 0.72^{\pm 0.04}$), 测量对象的允许公差范围通常是几十 μm , 这就要求测量系统的不确定度保持在 μm 量级, 普通的超声测量仪及自动化检测设备是无法达到要求的。由中科院声学所先后与上海有色金属研究所及核工业五院研制成功的数字化多通道超声测量系统 SCAN20G, 其管材直径和壁厚的测量不确定度优于 $\pm 2\mu\text{m}$, 达

2 系统结构

SCAN20G 高精度超声测量系统是一套多通道超声检测装置的一部分, 由三通道的超声测量仪、机械传动设备和定位装置组成。采用 15MHz 聚焦探头, 检测过程中采用管材移动, 探头旋转的扫描方式。探头每旋转一圈测量 N 组直径数据和 2N 组壁厚数据, 并在此基础上提供该截面的圆度和偏心率。整个系统实现了自动上料、自动测量、自动判别、自动分选、

自动下料的全自动化检测过程。

3 测量方法

壁厚测量方法已有众多工作,不再赘述。以下主要探讨直径测量方法。

测量采用水耦合方式,如图1所示,探头 Tr_a 和 Tr_b 沿径向固定在管材两边。两个探头到管材表面的距离为 L_1 和 L_2 。我们可以得到声波在 L_1 、 L_2 中的传播时间 T_1 、 T_2 。探头 Tr_a 和 Tr_b 之间的距离 L 为一常数。针对任意被测管直径 D_x , 可有:

$$L = (T_{1x} + T_{2x})V_x + D_x \quad (1)$$

其中 T_{1x} 和 T_{2x} 分别为两个测量通道测得的声时, V_x 为测量时刻耦合介质中的声速。如果已知水中声速 V_x 和长度 L , 即可计算出被测管直径 D_x 。

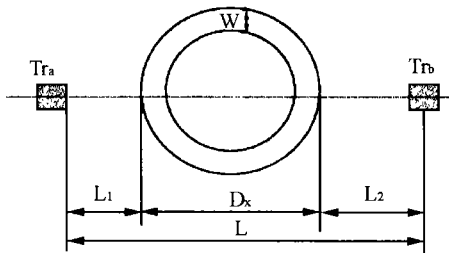


图1 测量方法示意图

问题是,当测量精度要求达到 μm 量级时,距离 L 的测量精度无法达到。此外,水中声速的微小变化都将引起显著的误差。粗略估算可知,在实际可行的条件下,水温变化 $0.1^\circ C$ 即可引起超声传播时间 $1m\mu s$ 左右的变化,直径测量结果相应将改变接近 $1\mu m$ 。

为此,我们采取了几种措施:

(1) 用一段已知直径为 D_o 的标准管来进行标定, 可有:

$$L = (T_{1o} + T_{2o})V_o + D_o \quad (2)$$

于是, 被测直径 D_x 可表示为:

$$D_x = D_o + (T_{1o} + T_{2o})V_o - (T_{1x} + T_{2x})V_x \quad (3)$$

这里我们假定探头之间的距离 L 为常量。当测量过程中周围(空气和水)温度的变化不明显时, 这种假设是成立的。

(2) 监测水温:

表达式(3)中的声速 V_o 和 V_x 受温度影响较大(大约 $10^{-3}/^\circ C$)。我们用带固定反射体的探头组件 Tr_c (如图(2)所示)来监测水中声速变化。在实际测量中, 固定反射体的探头组件 Tr_c 和被测管置于同一水槽中, 由它测得的声时代入方程(3)可得到:

$$D_x = D_o + (T_{1o} + T_{2o})L_{co}/T_{co} - (T_{1x} + T_{2x})L_{cx}/T_{cx} \quad (4)$$

其中 L_{co} 和 L_{cx} 分别为测量标准管和待测管时可能的不同温度下探头-反射体的距离 L_c ; T_{co} 和 T_{cx} 为相应的探头-反射体内的声波传播时间。

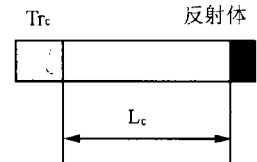


图2 探头反射体组件

(3) 用标准管的平均直径 D_{av} 来代替 D_o :

在实际检测过程中, 由于检测位置不可能准确确定, 作为标准管的管材直径也不可能是一个准确的常数, 我们用标准管的平均直径 D_{av} 来代替 D_o 。因此 D_x 表示为:

$$D_x = D_{av} + (T_{1o} + T_{2o})L_{co}/T_{co} - (T_{1x} + T_{2x})L_{cx}/T_{cx} \quad (5)$$

4 误差分析

不影响误差分析精度, 假设 $L_{co}/T_{co} \approx L_{cx}/T_{cx} \approx L_c/T_c$, $T_{1o} \approx T_{2o} \approx T_{1x} \approx T_{2x} \approx T$

(机械上给予保证), 直径测量误差可表示为

$$\Delta D = \Delta D_{av} + 4T \times L_c / T_c (\Delta L_c / L_c + \Delta T / T + \Delta T_c / T_c) \quad (6)$$

误差 ΔD_{ac} 和 ΔL_c 各项包括两部分, 一部分是由于所提供尺寸不精确引起的系统误差, 这部分误差是可以修正的; 另一部分是由于标准管和探头 - 反射组件受温度变化引起的。

引起误差 ΔT 的因素很多, 如偏心度、温度变化和仪器的不确定度。

(1) 机械偏心

如果超声换能器 Tr_a 、 Tr_b 和被测管材不同心, 或管材移动时产生震动, 都会引起测量位置的改变, 从而影响被测时间 T_0 。很明显, 为了得到高精度的测量结果, 所允许的最大机械偏心量必须受到严格控制。如对于直径 10mm 的管材, 要保证测量不确定度小于 $2\mu m$, 计算可得, 偏移量必须小于 $0.14mm$ 。机械设备设计中, 采取了一系列措施, 使实际偏移量远小于上述数值。

(2) 温度变化

温度变化对测量精度的影响主要表现在两个方面, 一是对金属部件尺寸的影响, 一是对水中声速的影响。根据测量精度的要求, 环境和水的温度变化范围必须受到严格控制。金属随温度变化的线性膨胀系数大约是 $10^{-5}/^{\circ}C$ 量级, 只要适当控制温度范围, 其影响远小于水中声速。水中声速的温度系数大约为 $10^{-3}/^{\circ}C$ 量级, 是影响测量的主要因素, 因此必须对其进行精确的实时监测。

(3) 仪器不确定度

仪器采用数字化脉冲相位法来测量声时。仪器的不确定度依赖于时钟、发射接收通道电路延时、模数变换器的稳定性等因素。实验表明, 晶振频率的相对波动大约为 10^{-7} 。经特殊处理后, 发射接收通道电路延时、模数变换器的不稳定性小于 $1ns$ 。将检测物体放入恒温水浴中, 将恒温水浴中水温控制在 $\pm 0.1^{\circ}C$ 。实验结果 (图 3) 表明, 声时测量的变化小于

10^{-4} , 与水温变化 ($\pm 0.1^{\circ}C$) 引起的声速变化接近。可以推想, 不确定性主要是因为水温变化引起的, 仪器的不确定度小于水温的影响。

通过以上的分析可以知道, 将直径测量的偶然误差控制在 μm 量级, 不仅需要在机械上保证换能器 Tr_a 、 Tr_b 与被测管材的的偏心度控制在一定范围内, 而且需要实时监测水中声速的变化。当温度控制在较为稳定的情况下 (如 $\pm 0.1^{\circ}C$), 由于温度变化引起金属伸缩而产生的偶然误差可以忽略不计, 这时直径测量中的偶然误差主要是声时测量误差引起的。

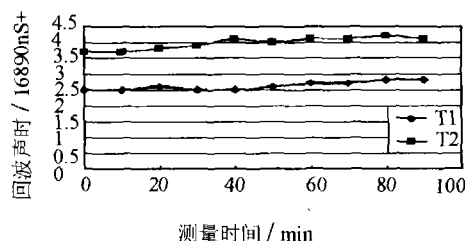


图 3 仪器的不确定度 ($\pm 0.1^{\circ}C$)

5 实验结果

实验的管材种类为 $\phi 10.04 \pm 0.03 \times 0.72 \pm 0.04$ 。为检查本系统的不确定度, 分别在静态、准动态和动态三种不同状态下进行了测量。在静态状态下, 管材和探头都不动, 90min 内的连续测量结果如图 4 所示, 直径和两个通道的壁厚测量不确定度均在 $\pm 1\mu m$ 范围内; 在管材保持不动探头旋转的准动态状态下, 如图 5 所示, 平均直径和平均壁厚的测量的不确定度优于 $\pm 2\mu m$ 。

动态不确定度: 在自动测量方式下, 经过标准管标定后, 重复测量标准管 10 次, 并计算特定部位 (长约 20mm) 的平均、最大、最小直径和壁厚, 以检验整个系统的动态不确定度。实验结果 (图 6(a)、6(b)) 表明, 平均直径和壁厚的不确定度优于 $\pm 1\mu m$, 最大和最小值优于 $\pm 2\mu m$ 。

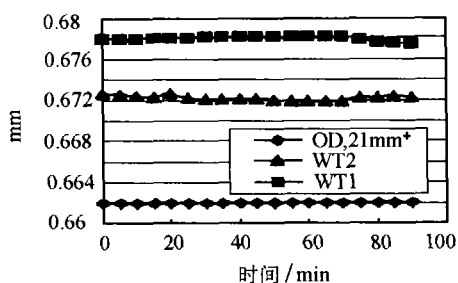


图4 静态不确定度
(OD— 外径 WT1, WT2— 壁厚)

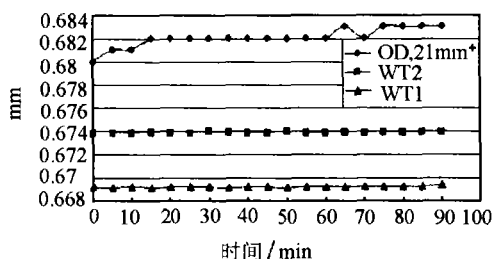
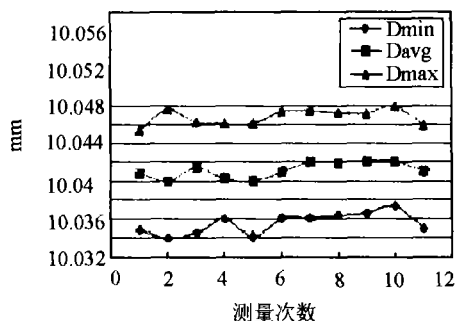
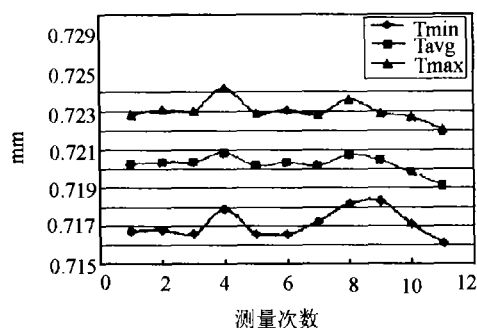


图5 准动态不确定度
(OD— 外径 WT1, WT2— 壁厚)



(a) 直径
(Dmin— 最小直径, Davg— 平均直径, Dmax— 最大直径)



(b) 厚度
(Tmin— 最小厚度, Tavg— 平均厚度, Tmax— 最大厚度)

图6 动态不确定度

6 结论

SCAN20G 超声测量系统采用超声数字化脉冲相位法,通过对标准管的标定对比,而给出测量管材的直径、壁厚。文章主要分析了在测量过程中可能引起测量偶然误差的的各种因素及解决方法,通过实验验证了该设备测量的高度稳定性和可重复性。需要指出的是,该设备的测量精度依赖于标准管材的给定值。SCAN20G 超声测量系统的研制成功填补了国内高分辨力、高可靠性自动化数字超声测量设备的空白,适用于核工业、航空航天、电子和其它领域内精密管(棒)材的尺寸测量。

致谢 本项目的完成及系统测试得到上海有色金属研究所、国营 812 厂及核工业五院的大力协助,在此一并表示感谢。

(上接第 35 页)

地通气或加少量催化剂可以做到事半功倍的效果,因而在进行超声水处理设备的研制时,可针对不同水质,选用适当的方法进行优化设计。可以做到一次性处理达标。

参 考 文 献

- 1 Kennetyhs Suslick. *Sonochemistry Science*, 1990, **247**: 1439-1445.
- 2 陈传好, 谢波, 任源等. 环境科学, 2000, **21**(3): 93-96.
- 3 冯晓西, 乌锡康. 精细化工废水治理技术. 北京: 化工工业出版社, 2000.
- 4 漆新华, 庄源益, 袁有才等. 环境科学, 2001, **22**(5): 432-436.