

用超声透射频谱方法定征金属板的弹性常数^{*}

陆 鹏 邹欣晔 王耀俊

(南京大学近代声学国家重点实验室 南京 210093)

2001 年 7 月 9 日收到

摘要 本文采用超声双透射技术测量了水中各向同性金属板的超声透射频谱。将透射频谱的理论值与实验值实现最佳拟合, 具体反演得到了金属板的杨氏模量和泊松比。

关键词 超声透射频谱, 弹性常数, 反演方法

Determination of elastic constants of a metal plate from its ultrasonic transmission spectrum

LU Peng ZOU Xinye WANG Yaojun

(State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Ultrasonic transmission spectrum of an isotropic metal plate is measured by an ultrasonic double-transmission technique as well as theoretically evaluated. Based on the best matching between the computed and the measured transmission spectra, the Young's modulus and Poisson's ratio of the plate are reconstructed.

Key words Ultrasonic transmission spectrum, Elastic constants, Inversion method

1 引言

声波在各向同性和各向异性固体媒质中的传播速度决定于固体的弹性常数和密度, 对各向异性媒质还依赖于声传播方向, 因而测定声纵波和横波传播速度已成为确定固体弹性常数的常用方法^[1-3]。但对于线度较小的固体(如金属细杆和薄板), 直接测定其中的声传播速度往往十分困难。人们曾借助于超声散射频谱技术反演得到金属细杆的弹性常数(杨氏模量和泊松比)^[4,5]。与传统的静力学方法相比较, 用超声散射频谱方法测定的细杆弹性常数

值更为可靠。

由声学理论知道, 入射角一定的平面声波遇见密度和厚度已知的金属薄板时, 声反射和透射频谱完全决定于板的弹性常数, 这样, 测定声反射或透射频谱有可能成为确定各向同性和各向异性薄板弹性常数的一种有效方法, 其优点是对被测量板的表面加工状况要求不高, 而实验精度较高。

本文首先介绍用单一超声换能器测定金属板的超声透射频谱的双透射实验技术。根据声波通过金属板的透射理论, 由超声透射频谱的实验结果具体反演了一种金属板的杨氏模量和

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (19174037)

泊松比。

2 超声透射频谱的测量

2.1 实验原理

我们利用如图 1 所示的测试系统测定水中金属板的超声透射频谱。实验样品和换能器均置于水槽中。计算机控制信号发生器产生的高频信号被脉冲发生器调制和放大后直接激励超声宽频带换能器产生声被, 在水中传播的声波遇到金属板后将产生反射和透射, 透射波在遇到刚性反射体后沿原路返回, 再次通过样品板透射后被同一个换能器接收, 换能器的输出信号经限幅器后输到一数字存储示波器(限幅器的主要作用是限制脉冲发生器产生的高幅值电信号直接馈送到示波器), 再由计算机记录并进行数据处理(如傅氏变换、开方、相除等)。实验时首先必须仔细调节换能器及反射体的相对位置, 使得换能器发射的声波传播方向与反射体的反射面垂直。反射体的另一个作用是利用从反射体直接反射的信号频谱来确定系统的频率响应。实验中必须调节实验样品表面与反射体表平行度。计算机控制步进马达转动实验样品以改变声波相对于样品的入射角。将换能器接收到的两次通过实验样品板的透射信号频谱开方并除以直接由反射体反射信号的频谱, 就能得到声波在不同入射角度时金属板的透射频谱的实验值。

2.2 测量结果

实验中所用的宽频带超声换能器的中心频率为 2MHz, 实验样品是厚度为 2.76mm 的金属板(其密度测量为 $2.60 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 表面有明显的生锈痕迹)。图 2(a) 为测得的两次通过样品板后的透射信号 $s_1(t)$, 图 2(b) 为其相应的透射信号频谱图 $S_1(f)$ 。实验中时域信号未进行多次采样平均, 因而出现一定的随机噪声; 另外, 示波器(HP54615)的直流量未能精确调整在零的位置, 在零频率处产生一定的跳跃(这并不影响反演弹性常数所涉及的频率范

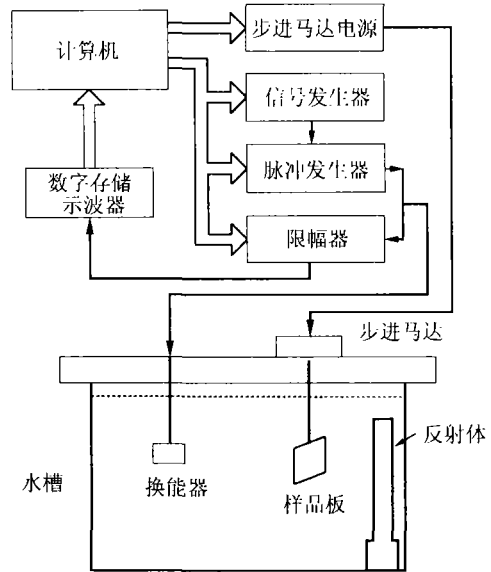


图 1 超声透射谱实验系统示意图

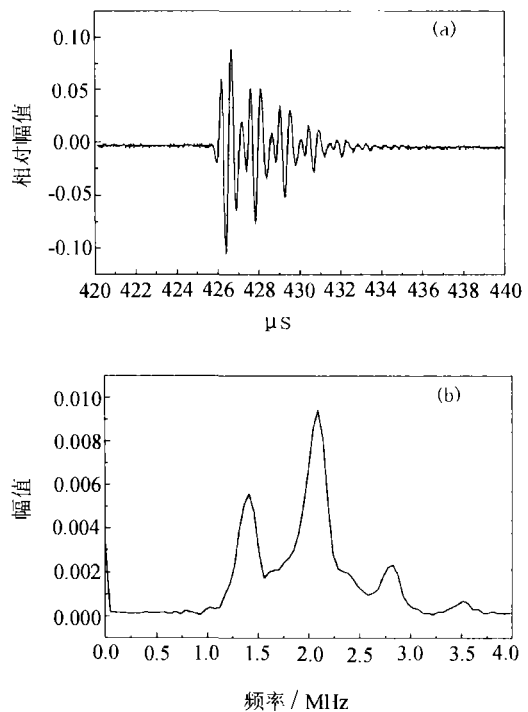


图 2 测量结果

(a) 两次通过样品板后的透射信号

(b) 相应的透射信号频谱

围)。同样我们可以测得没有样品时直接来自反射体的反射信号 $s_2(t)$ ，通过傅立叶变换求得其相应的频谱 $S_2(f)$ 。根据上述原理，可得样品板的超声透射频谱：

$$T_e(f) = \sqrt{S_1(f)/S_2(f)} \quad (1)$$

在 1.0~3.25MHz 频率范围内金属样品板的超声透射谱实验值如图 3 中点线所示。

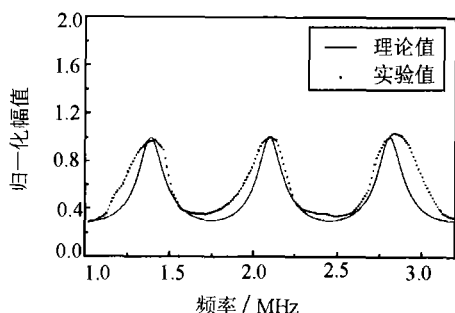


图 3 水中一金属板样品的透射频谱的实验值和理论值 (入射角为 17.64°)，其中实线对应理论值，点线对应实验值

3 金属板弹性常数的反演

3.1 超声透射频谱理论公式的确定

设金属板浸没在均匀的流体中，对不同入射角度时平面声波通过金属板的透射频谱的计算公式导出过程如下^[6,7]：分别写出流体中入射声波、反射声波透射声波、板中激励的声纵波和横波的位移势函数表达式，由这些势函数可得到板中质点位移和应力分量以及板两侧流体中质点位移和声压，再利用金属板和流体两界面处边界条件 (法向位移和法向应力分别连续，切向应力等于零)，求解包含声反射系数、声透射系数和板中激励波系数的线性联立方程式，最后可得到金属板的声透射系数 (随频率而变)，即声透射频谱 $T_e(f)$ 的表达式。因为声透射谱与板的弹性常数有关，我们把它写成 $T_e(f, E, \sigma)$ ，其中 E 代表杨氏模量， σ 为泊松比，它们现在是待定值。

3.2 弹性常数的反演过程和理论计算出的透射频谱

由水中金属板样品透射频谱的实验结果可以反演材料的杨氏模量和泊松比。在杨氏模量 E 和泊松比 σ 组成的二维空间内给出一初始组数，将它们代入有关公式计算声透射频谱 $T_e(f, E, \sigma)$ 。超声透射频谱的理论值与实验值之间的误差用平方和的形式表示：

$$S(E, \sigma) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_e(f_i) - T_c(f_i, E, \sigma)]^2 \quad (2)$$

式中的 f_i 为换能器有效频率范围内选取的频率值 ($i = 1, 2, \dots, N$ ，反演时取 $N = 180$)， $T_e(f_i)$ 是频率为 f_i 时透射系数的实验值，而 $T_c(f_i, E, \sigma)$ 代表透射系数的理论计算值。仔细改变杨氏模量和泊松比的组合，使 (2) 式给出的误差 S 达到最小，这时对应的杨氏模量和泊松比即为金属样品的弹性系数。实现理论与实验值最佳拟合时，我们取 E 的初始值小于 60.0 GPa，步长为 0.1 GPa； σ 的初始值小于 0.30，步长为 0.01。用此方法，我们对本实验金属样品板的杨氏模量和泊松比进行了多次反演，其平均值为： $E = 74.4$ GPa， $\sigma = 0.37$ 。我们用反演得到的杨氏模量和泊松比重新计算了样品板的透射频谱，其结果在图 3 中用实线表示。由图可知，理论曲线与实验曲线符号相当好。

4 讨论

本文用超声透射频谱的实验资料反演了金属样品板的杨氏模量和泊松比。因为样品金属板是各向同性的，独立的弹性常数只有两个。对于各向异性板，因其独立的弹性常数数目增加，用相同技术反演所有弹性常数可能会遇到较大的困难。例如，单向纤维增强型复合材料板有 5 个独立弹性常数，我们必须在 5 维空间中求误差函数的极小值，具体的计算量是很大

(下转第 40 页)

波频率的增加, 滤料负荷逐渐下降, 即清灰效果逐渐增加。当声波频率达到 220Hz 左右时, 清灰效果最好。再继续增加声波频率, 清灰效果变差。因此, 选择声波频率在 200-250Hz 范围内较为理想。

图 4 表示袋滤式除尘器上采用声波吹灰器进行试验所得的滤袋压力差。从图中可看出, 采用声波吹灰器作为辅助清灰装置, 可以使袋滤式除尘器的滤袋压力差下降达 40%, 而且当声波频率在 200-250Hz 时, 清灰效果最佳。图 4 中的滤袋压力差的周期性变化是由于周期性清灰而造成的。

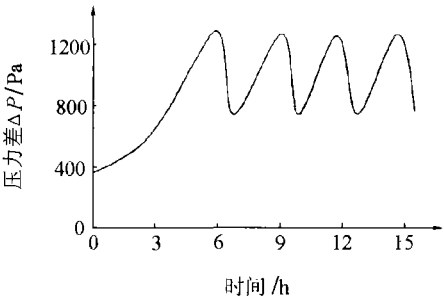


图 4 袋滤式除尘器压力差与时间的关系

某水泥厂 10 万吨 / 年机立窑烟气治理中采用的金属滤袋除尘器, 安装了 IKT230/220 声波吹灰器, 实测结果如表 4 所示。

声波吹灰器作为除尘器的清灰装置, 国外应用较多。但从国外的资料及应用情况报道看, 声波吹灰器在工作过程中采用单一的声压

表 4 除尘器中烟气测试数据

烟气温度 (°C)	水蒸汽百分体积 (%)	烟气流量 (m ³ /h)	设备阻力 (Pa)	
			安装前	安装后
114	9.1	61692	2200	1300

和声频值。根据我们的应用试验及使用情况, 对声波吹灰器的气压控制单元进行了改进。在声波吹灰器的一个工作周期中, 声频由 200Hz 连续变化到 250Hz, 这是因为刚开始吹灰时, 灰尘在滤料上积聚很多, 滤料、灰尘、网架系统质量大, 固有频率低, 用较低声频, 清灰效果好。随着灰尘的清除, 系统的固有频率逐渐提高, 因此, 声频也跟着提高。

综上所述, 声波吹灰器作为袋滤式除尘器的辅助清灰装置, 可以大大降低除尘设备的阻力, 从而可以减少设备的运行能耗, 提高过滤速度, 缩小设备体积, 同时可以提高除尘设备滤袋的使用寿命。

参 考 文 献

1 杜功焕等. 声学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 224-246.
2 陈国金. 环境工程, 1997, 15(5): 32-37.
2 Rokhlin S I, Wang W. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 91: 3302.
3 许明翔, 王耀俊. 应用声学, 1996, 15(1): 1.
4 Migliori A, Sarrao J L, Visscher W M, et al. Physica B., 1993, 183: 1.
5 刘胜兴, 王铁海, 王耀俊. 应用声学, 2000, 19(1): 4.
6 Thompson W. J. Appl. Phys., 1950, 21: 89.
7 王耀俊. 南京大学学报 (自然科学版), 1993, 29: 49.
8 周宇峰, 王耀俊. 应用声学, 1999, 18(6): 10.

(上接第 23 页)

的。这时可行的方法是将超声透射频谱技术与声速测量技术^[3]相结合, 因为各向异性板有些弹性常数用声速测量方法是很容易确定的; 另外, 各向异性金属板弹性常数新的反演方法也有待研究^[8]。

参 考 文 献

1 Rose J L. Ultrasonic Waves in Solid Media (Cambridge University Press, 1999.)