

钢试样应力测量的超声方法

王寅观

(同济大学声学研究所)

一、引言

在实验应力分析中,用光弹法分析材料的应力已被广泛采用。早在1816年, Brewster^[1]发现当玻璃受到应力时,可以观察到一些不同的条纹,这便是应力引起的光双折射现象。他的这一发现,奠定了光测弹性力学的基础。1941年, Frocht^[1]出版了《光测弹性力学》一书,从而使应力测量的光弹理论趋于完善,其间经历了125年时间。与此同时,1940年 OKa^[2]提出了与光双折射现象相类似的应力引起超声波双折射的现象,他的这一发现,引起了人们对声弹性理论的探索和研究。但是由于应力所引起的声速变化极其微小,又由于当时缺乏精确地测量这些微小变化所需要的声速测量设备,所以影响了超声应力分析研究工作的进展。近些年来,由于实验装置精度的提高,又由于声弹法具有光弹法所没有的某些优点,不但可以象光弹法那样测量透明材料的表面应力,而且还能测量各种不透明材料内部的作用应力和残余应力,因而声弹法比之光弹法有它的独到之处。目前这种声弹性理论和超声应力测量技术正在不断地向前发展,并日益引起国内外同行专家的关注^{[3][4]}。

本文叙述了用超声方法分析材料应力的声弹性理论,利用我们研制的84-1型超声波声速测量仪^[5]对钢试样的作用应力进行了测量。

二、声弹性理论

在初始状态下为各向同性的具有弹性

的固体,诸如在零应力状态下内部的晶格方向为不规则的多晶体材料和钢材等,当处于除了静压力和静张力以外的任何应力状态下,都不可能是弹性各向同性的。因此当一束超声波通过一块内部存在作用应力或残余应力的固体时,它将呈现出各向异性的性质^[6]对于一块起初是各向同性的,而后受到一个应力系统作用的固体,可以很方便地用三个相互正交的坐标轴(相应于固体内部的三个主应力轴)来对它进行描述,并得到超声波速度与应力之间的相互关系^[7]

$$\rho_0 V_{LP}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{P}{3K_0} (7\lambda + 10\mu + 6l + 4m) \quad (1)$$

$$\rho_0 V_{SP}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} (3\lambda + 6\mu + 3m - \frac{n}{2}) \quad (2)$$

$$\rho_0 V_{Lx}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{T}{3K_0} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (3)$$

$$\rho_0 V_{sx}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (4\lambda + 4\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu}) \quad (4)$$

$$\rho_0 V_{LY}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} \left[\frac{2\lambda}{\mu} (\lambda + 2\mu + m) - 2l \right] \quad (5)$$

$$\rho_0 V_{SY}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu}) \quad (6)$$

$$\rho_0 V_{sz}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} (2\lambda - m + \frac{n}{2} + \frac{\lambda n}{2\mu}) \quad (7)$$

式中速度V的第一个下标表明超声波的波动性质，L为纵波，S为切变波；第二个下标表明作用应力的种类和方向，P为静压力，X为沿X轴方向的轴向张力，Y为沿Y轴方向的轴向张力。 ρ_0 为初始状态下的材料密度， λ 和 μ 为各向同性材料的二阶弹性常数， l, m, n 为各向同性材料的三阶弹性常数， T 为轴向张力， K_0 为各向同性材料在初始状态下的体积模量

$$K_0 = \frac{1}{3}(3\lambda + 2\mu) \quad (8)$$

方程(1—7)的坐标系以及与此相关的超声波的传播方向，振动方向和应力的作用方向如图1所示。

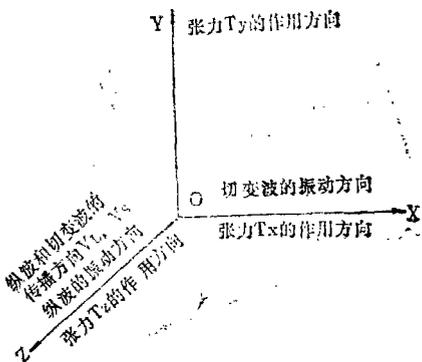


图1 超声波的传播和振动方向，应力的作用方向

方程(1—2)是超声波在固体处于静应力状态下的速度表达式，方程(3—7)是超声波在固体承受轴向应力时的速度表达式。由方程(1—7)可以发现，当静压力P或轴向张力T等于零时，上述七个方程便可简化为两个基本公式

$$\rho_0 V_{L0}^2 V_{S0}^2 = \lambda + 2\mu \quad (9)$$

$$\rho_0 V_{S0}^2 = \mu \quad (10)$$

以上两式分别代表了超声波在零应力状态下的各向同性材料中传播的纵波声速和切变声速。显然，这完全可以由一阶理论中直接导出，应变通常被假设为无限小的。

在平面应力场中，垂直于应力作用面的两个正交的超声切变波的速度之差($V_{SY} - V_{SX}$)与两个主应力之差($T_Y - T_X$)之间具有线

性关系^[8]

$$\frac{(V_{SY} - V_{SX})}{V_{S0}} = \frac{4\mu + n}{8\mu^2} (T_Y - T_X) \quad (11)$$

同时，在平面应力场中垂直于应力作用面传播的超声纵波速度的相对变化 $\frac{V_L - V_{L0}}{V_{L0}}$ 与两个主应力和($T_Y + T_X$)之间也呈线性关系^[9]

$$\left(\frac{V_L - V_{L0}}{V_{L0}} \right) = \frac{\mu l - \lambda(m + \lambda + 2\mu)}{\mu(3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)} \cdot (T_Y + T_X) \quad (12)$$

联立式(11)和(12)，便可通过对声速的测量来求得固体内部的两个主应力(或残余应力) T_X 和 T_Y 。

三、超声应力测量

1. 弹性常数的测量公式

利用声速方法测量材料的应力，必须首先确定材料的二阶弹性常数(λ, μ)和三阶弹性常数(l, m, n)。

引入三个中间常数(或称超声应力常数) S_1, S_2, S_3 。设试样仅承受轴向应力，即 $T_X = 0, T_Z = 0$ 。当轴向应力 $T_Y \neq 0$ 时，纵波和切变波的速度为 V_{L0} 和 V_{S0} ；当轴向应力 $T_Y \neq 0$ 时，纵波和切变波的速度为 V_L, V_{SX}, V_{SY} ，根据方程(11)和(12)，有

$$S_1 = \frac{(V_{SY} - V_{SX})}{V_{S0} \cdot T_Y} = \frac{4\mu + n}{8\mu^2} \quad (13)$$

$$S_3 = \frac{(V_L - V_{L0})}{V_{L0} \cdot T_Y} = \frac{\mu l - \lambda(m + \lambda + 2\mu)}{\mu(3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)} \quad (14)$$

根据方程(6)，(8)和(10)，有

$$S_3 = \frac{(V_{SY} - V_{S0})}{V_{S0} \cdot T_Y} = \frac{\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \quad (15)$$

于是我们得到各向同性固体二阶和三阶

常数的表达式

$$\lambda = \rho_0 (V_{L_0}^2 - 2V_{T_0}^2) \quad (16)$$

$$\mu = \rho_0 V_{T_0}^2 \quad (17)$$

$$n = 8\mu^2 S_1 - 4\mu \quad (18)$$

$$m = 2\mu(3\lambda + 2\mu)S_2 - \frac{\lambda n}{4\mu} - (\lambda + 2\mu) \quad (19)$$

$$l = (3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)S_2 + \frac{\lambda(m + \lambda + 2\mu)}{\mu} \quad (20)$$

2. 试样

超声应力测量实验采用的试样为两块相同的45号钢(供应态)材料,一块用作测定材料的弹性常数,另一块用于超声应力测量。试样的端面经过研磨,其长度 $Z = 0.02986$ 米(20℃),截面积 $x.y = 0.03 \times 0.07$ 米²,端面平行度优于 2×10^{-5} 米。

3. 换能器 耦合剂

在测量试样的纵波声速时,我们采用的压电换能器是正X切割的石英晶片,耦合剂为201—21.4型甲基硅油。

在测量试样的切变声速时,我们采用的压电换能器是正Y切割的石英晶片,耦合剂为紫云英蜂蜜。

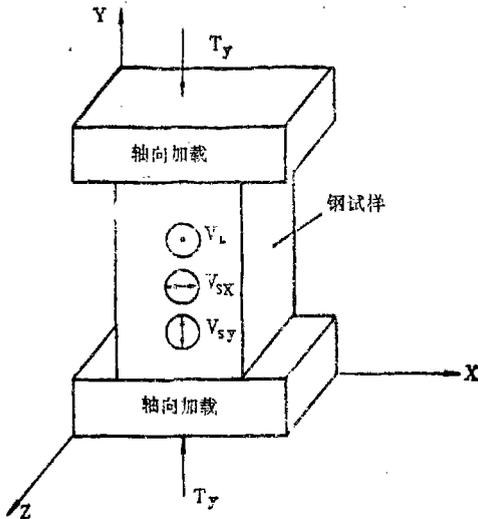


图2 换能器晶片的粘贴方式

上述两种石英晶片均由上海市计量测试技术研究所提供,晶片的电极半径为6.5毫米,谐振频率 $f_0 = 5$ MHz。

换能器的粘贴方式如图所示。

4. 实验设备

- (1)84—1型超声波声速测量仪(自制);
- (2)SR—37型双踪示波器(100MHz);
- (3)E312A型通用数字频率计;
- (4)材料力学试验机。

5. 测量结果

我们将试样1置于材料力学试验机上,在轴向应力分别为0和50MPa的情况下,利用脉冲回波重合法(PEO)测量了钢试样中声速,该系统声速测量的精度优于 10^{-4} [5],所得的声速数据列于表1。

表1. 45号钢试样的声速

波的类型	应力情况(MPa)	声速(10^3 m/s)
VL	0	5.9344
Vs	0	3.2300
VL	50	5.9237
Vsx	50	3.2297
Vsy	50	3.2311

经实测45号钢的密度 $\rho_0 = 7.840 \times 10^3$ kg/m³,由表1中沿Z轴传播的纵波和切变波的声速。得到该试样的二阶和三阶弹性常数列于表2,为比较也给出了文献[4]的数据。

表2. 45号钢的二阶和三阶弹性常数

试样	二阶弹性常数		三阶弹性常数			备注
	λ	μ	l	m	n	
	10^{10} pa					
45号钢	11.159	8.179	-8.125	-58.31	-78.285	本文
Nickel steel	10.90	8.17	-5.6	-67.1	-78.5	文献[4]

45号钢上文献[4]中的Nickel钢的材质略有不同,但两者的数据还是比较接近的。

然后将试样2置于材料力学试验上

利用84-1型超声波声速测量仪中的脉冲迭加法(PS)精密地测定了钢试样中的声速随应力的变化。

实经中的载荷安排:最大压缩应力为110 MPa, 测量间距为10MPa。测量声速变化的精度优于 2×10^{-7} [5], 理论计算与实际测量结果见图3。图中直线为理论值, “·”为纵波速度 V_L 的测量值, “□”为切变波速度 V_{SY} 的测量值, “○”为切变波速度 V_{SX} 的测量值。实测结果与计算值吻合得很好。同时,我们从图3中还可以看到在钢试样的弹性限度内, 试样的纵波和切变波速度与应力大小呈线性关系, 其中振动方向与应力轴一致的那个切变波的波速变化最大, 而其它两种波的波速变化较小。

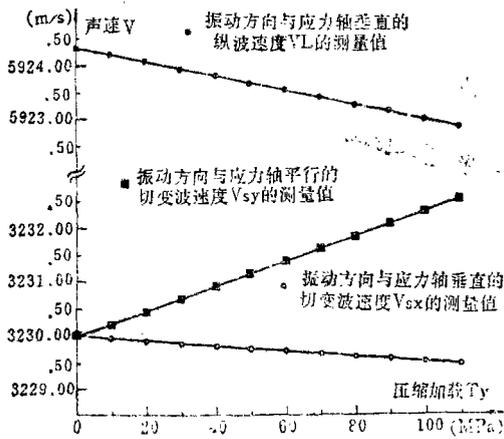


图3 45号钢试样的应力—声速的测量值与计算值

(上接第48页)

生未被左边支路补偿的电压降, 由此在变压器次级绕组提取出电压:

$$U'_{ia} = n_2 I_M R''_{ia}$$

当给定电声换能器的参数, 並已知振荡器的输入参数时, 反馈跟踪电路的计算将归结为确定补偿参数 R_c , X_c 及差动变压器的数据。对压电陶瓷换能器而言, 介电损耗由电

四、结论

利用超声方法测量材料的应力是一项有前途的超声检测技术。声弹性理论可严格地给出超声纵波和切变波速度与静压力、轴向应力和平面应力的关系。文章提出了超声应力测量的方法和步骤, 并利用具有脉冲回波重合法(PEO)和脉冲迭加法(PS)的84-1型超声波声速测量仪和材料力学试验机, 测定了45号钢(供应态)在轴向应力状态下的声速及其随应力的变化, 计算了材料的二阶和三阶弹性常数。应力—声速变化的测量值与理论值相吻合。

本项工作是在魏墨璽教授的指导下完成的, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Filon L.N.G Photoelasticity (1941) 10
- [2] OKa s Zeit. Phys.116 (1940) 632
- [3] 朱森第 《无损检测》 [4—5 (1982) 1
- [4] Crecraft D Ultrasonic Testing (1982) 440
- [5] Wang Yinguan Wei Moan Proceedings of China—Japan Joint Symposium on Acoustics (1985)44
- [6] Murnaghan F.D. Finite Deformation of a Elastic Solid (1951) 35
- [7] Hughes D.S. Kelly J.I. Phys. Rev 92 (1953) 1145
- [8] Bach F. Exp. Mech 19—2 (1979) 69
- [8] Kino G.S. J. Appl. Phys 50—4 (1979) 2607

阻 R_c 表征通常很小。因此, 压电陶瓷换能器的电损耗的实部照常规不予补偿。使用平衡电感的线路因调谐复杂未得到普及。

*译者注: $k_a = \frac{A_a}{A_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\Delta f_a / f_o Q)^2}}$, A_a 是允许的换能器幅振, A_o 是共振频率上的换能器振幅。对清洗设备 $k_a = 0.6 \sim 0.8$, 对高Q值换能器 $k_a = 0.800 \sim 0.98$ 。