

# 螺栓材料应力与声速、温度关系的测定

刘镇清 华剑南 梁 穗 王 路

(同济大学声学研究所 上海 200092) (上海医疗器械专科学校 上海 200093)

1996年3月14日收到

**摘要** 基于应力 - 超声波速度关系的方法已用于螺栓轴向应力的测量。而声速与被测材料的许多物理因素有关, 如弹性模量、密度与温度。因此, 正确了解不同材料的声速与应力、温度的关系是十分重要的。本文介绍了用于分析超声波速度 - 应力 - 温度三者关系的实验与计算方法, 并给出了三种金属材料的结果。检测的质量。

**关键词** 超声波速度 - 应力 - 温度关系, 螺栓轴向力, 测量

## Determination of ultrasonic wave velocity-stress-temperature relations in bolt materials inspection

Liu Zhenqing Hua Jiannan Liang Sui

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

Wan Lu

(Shanghai medical equipment trainign school, Shanghai 200093)

**Abstract** The method based on the stress-ultrasonic velocity relation has been applied to axial stress measurements in bolts. But the ultrasonic velocity is dependent on many materials parameters, such as elastic modulus, density and temperature. So it is important to realize how the ultrasonic velocity varies with stress and temperature in different materials. In this paper, experimental and calculating approaches for the analysis of ultrasonic velocity-stress-temperature relation are described, and results for three metallic materials are also given.

**Key words** Ultrasonic velocity stress temperature relation, Axial stress in bolt, measurement

# 1 引言

为了保障关键设备的可靠性,经常需要测量构件内部的应力状况,用超声波测应力的设想很早就有人提出,国内外学者倾注了极高的热情从原理与方法上对此进行研究<sup>[2,4]</sup>,其中超声波螺栓紧固应力测试技术最有可能得到工业性应用.以前的研究工作大多侧重于实验室的探索,国内尚未形成真正实用的仪器;国外则已出现了一些商品化超声波螺栓应力仪的报道<sup>[5]</sup>.由于超声应力测试技术以被测件本身作为敏感元件,使得不同的材料有不同的敏感系数;即使同样是钢材,不同牌号的敏感系数也有差别.因此超声波测应力技术在实际使用前必须正确地标定超声波参数与特定材料的应力关系,这可能是阻碍超声波应力测试技术推广使用的重要因素之一.为此,作者针对超声波测螺栓紧固应力的实际情况,实验测量了若干螺栓用金属材料的应力与声速、温度关系,给出了标定它们之间关系的简捷方法.

# 2 原理

声速测量可以达到很高的精度,且仪器较简单、不需人工调节<sup>[4#6]</sup>,各国学者大多倾向于用声速(或声时)及其变化来表征固体中的应力,本文也采用声速及其变化作为测应力的超声波参量.在实际测量工作中,被测件的温度变化范围可能会较大,而温度对介质的声速有较大的影响,这里作者将讨论应力与声速、温度三者间的关系.

对声速法测螺栓应力来说,由于纵波换能器较易与被测件耦合,实际应用方便,本文用脉冲纵波进行测量.纵波声速法测螺栓应力时探头放在螺栓的一端表面,发射并接收沿螺栓轴向传播的超声波.设螺栓温度为 $T_0$ 时的声速为 $C_0$ ,保持温度不变并在螺母上加载,设向两端的拉伸应力 $\sigma$ ,则应力引起的声速变化为<sup>[3]</sup>

$$C(T_0, \sigma) = C_0 [1 - A(T_0)\sigma] \quad (1)$$

式中 $A(T_0)$ 与材料弹性常数有关的量.另一方面,拉伸应力的作用还使螺栓长度有所增加.

由于实验中螺栓各部分受应力的不同,螺母之间的螺栓部分受应力为 $\sigma$ ,在螺母中螺栓部分所受的应力则越朝螺栓两端越小,螺母外侧的螺栓两端部分则不受加载应力.因此必须确定一个比螺栓总长度小些的等效受力长度,在这一长度上螺栓所受的应力为 $\sigma$ ,文献<sup>[3]</sup>介绍了求解等效受力长度的方法.本文选用的螺栓为双头螺栓,可以简单定义等效受应力长度为螺母之间的距离加上螺母的内直径.设在温度为 $T_0$ 时,螺栓未受应力时的总长度为 $L_0$ ,受等效应力时的长度为 $L_l$ ,则受应力作用后螺栓的长度变为

$$L(T_0, \sigma) = L_0 - l_0 + l_0 (1 + \sigma/E) \quad (2)$$

式中 $E$ 为材料的杨氏弹性模量.

温度的变化同样会引起螺栓的声速及长度发生变化,假定整个螺栓的温度是均匀的,当螺栓同时受到应力与温度变化的作用时,在螺栓中的声速可由两部分表示:等效受应力长度区域的声速为

$$C_1(T, \sigma) = C_0 [1 - A(T)\sigma] [1 - k(T - T_0)] \quad (3)$$

式中 $T$ 为即刻温度, $k$ 为温度对超声波速度的影响系数,单位是 $(^\circ\text{C}^{-1})$ ;  $A(T)$ 则为温度的函数,而未受应力区域的声速为

$$C_2(T) = C_0 [1 - k(T - T_0)] \quad (4)$$

同样,等效受应力长度区域受温度、应力作用后螺栓的长度变为

$$l_1(T, \sigma) = l_0 [1 + a(T - T_0) + \sigma/E] \quad (5)$$

式中 $\alpha$ 为材料的线膨胀系数.这时,等效应力长度区域之外螺栓的长度则只受温度变化的影响,它的长度为

$$l_2(T) = (L_0 - l_0) [1 + a(T - T_0)] \quad (6)$$

上述公式是在线性近似条件下得出的.这里,应力与声速或长度之间呈线性的关系,温度与声速或长度这间也呈线性关系,这种近似的线

性关系在工程应用时是可以接受的. 受应力、温度变化同时作用时, 长度的变化分别与应力、温度变化成正比, 而声速的变化则与应力、温度、长度的变化都有关.

在实际测量时, 通常只能测得超声波传播时间 (以下简称声时), 不能直接测得声速, 声速法测螺栓应力是通过测量声时及其变化来确定应力. 本文根据所测声时、应力、温度关系, 进一步转化为声速、应力、温度三者关系, 这是实现声速法测螺栓应力的重要环节, 以此可对特定材料进行标定, 并根据标定系数制成相应的实用仪器.

### 3 实验装置与实验步骤

本项工作的实验装置如图 1 所示. 试样为双头螺栓, 两头的螺母通过特制的夹具由 30 吨拉力试验机进行拉伸, 根据拉力机的拉力及螺栓的截面积可换算成螺栓的轴向力. 热电耦温度传感器固定在螺栓上, 通过热电耦温度测量仪读出螺栓的温度值. 中心频率为 7.5MHz 的宽带、窄脉冲超声波换能器置于螺栓的一端, 换能器与试样通过甘油耦合. 超声波系统采用一只换能器的自发自收工作方式, 由超声分析仪接收并放大后的超声波信号送数字存储示波器. 示波器读时间的灵敏度达 0.1 ns, 本项工作即利用它进行声时测量. 在实验前及实验过程中, 用阿贝比长仪准确测量螺栓的总长度及其随应力、温度的变化情况, 阿贝比长仪的测量精度为  $1\mu\text{m}$ .

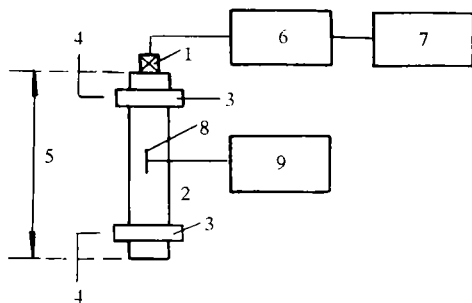


图 1 实验装置示意图

1. 超声波换能器 2. 螺栓 3. 螺母 4. 拉力机
5. 比长仪 6. 超声波分析仪 7. 数字存储示波器
8. 热电耦传感器 9. 温度测量系统

本实验中实际上只能测得超声波在螺栓轴向传播的总声时及总长度, 为了区分温度及应力对螺栓长度的影响, 根据式 (5) 与式 (6) 可求得应力不变时螺栓材料的线膨胀系数为

$$a = \frac{L - L_0}{L_0(T - T_0)} \quad (7)$$

式中  $L = L(T)$ , 是温度为  $T$  时螺栓的总长度. 在温度不变时则量螺栓长度随应力的变化, 这样可由下式求得螺栓材料的杨氏弹性模量:

$$E = \frac{\sigma \cdot l_0}{l_1(\sigma) - l_0} \quad (8)$$

式中  $l_1(\sigma)$  为随应力变化的等效应力长度. 根据式 (7) 与式 (8), 在已知螺栓总长度及等效应力长度条件下, 可由应力与温度值推算出应力引起的螺栓伸长量.

结合式 (7) 与式 (4) 可求得温度对超声波速度的影响系数  $k$  为:

$$k = \frac{L_0 \cdot t(T) - L(T) \cdot t_0}{t(T) \cdot L_0(T - T_0)} \quad (9)$$

式中  $t(T)$  为无轴向紧固应力情况下温度为  $T$  的声时,  $t_0$  为温度为  $T_0$  的声时, 得到系数  $\alpha A^{1/3} E A^{1/3} k$  后, 就能根据实验数据推算出式 (3) 中的系数  $A(T)$

$$A(T) = \frac{C_2(T) \cdot t(T, \sigma) - l_2(T) - l_1(T, \sigma)}{\sigma [C_2(T) \cdot t(T, \sigma) - l_2(T)]} \quad (10)$$

这样, 根据上述步骤, 通过测量螺栓的总声时、总长度、温度及应力, 由式 (1) 至式 (7) 可得到完整的声时、温度、应力三者关系.

为了避免螺栓侧壁超声反射对测量的影响, 实验中选择发射超声波到第一次反射波形中的第一个过零点的时间间隔为原始声时读数<sup>[6]</sup>. 这里主要存在着三个误差: (1) 超声波系统各种延迟造成系统延迟; (2) 声波衍射造成的误差; (3) 换能器与试样间耦合层厚度不稳定造成的耦合层随机误差. 为保证测量的可靠性, 本文给出的结果都对此三种误差进行了如下修正.

对系统延迟误差, 实验前先用同一超声系

统(包括换能器及电缆)对平面尺寸较大的玻璃试块进行测量,将发射到第一次回波的声时与第一次回波到第二次回波的声时之差作为系统延迟.而衍射修正则采用文献[7]的方法.对耦合层随机误差,作者在试验中尽可能将换能器压紧,并取声时读数最小的值为有用值.对同一状况的多次测量实验表明,这种方式的重复测量误差约为 $\pm 1ns$ .

#### 4 实验结果与讨论

实验用螺栓材料为三种.(1)20号碳钢螺栓,它的直径为 $30mm$ ,总长度为 $220.13mm$ ,实验时两螺母的间距为 $130mm$ ,取其等效应力长度为 $160mm$ (2)NCu28-2.5-1.5镍铜合金螺栓,它的直径为 $12mm$ ,总长度为 $110.07mm$ ,实验时两螺母之间的间距为 $65mm$ ,取其等效应力长度为 $77mm$ ;(3)0Cr18Ni9不锈钢螺栓,它的直径为 $16mm$ ,总长度为 $149.9mm$ ,实验时两螺母之间的间距为 $90mm$ ,取其等效应力长度为 $106mm$ .图2给出了加载应力时三种螺栓声时变化与温度变化的关系,图3是长度变化温度变化的关系 $5^{\circ}C$ 时三种螺栓无加载力的声时分别为 $t_a = 73.98(\mu s)$ 、 $t_b = 39.17(\mu s)$ 、 $t_c = 52.19(\mu s)$ ,可得它们的声速分别为 $C_a = 5951(m/s)$ 、 $C_b = 5620(m/s)$ 、 $C_c = 5744(m/s)$ .从图2、图3可见,声时、长度与温度变化呈良好的线性关系.由式7可得三种材料的线膨胀系数分别为: $\alpha_a = 10.37 \times 10_6(^{\circ}C^{-1})$ 、 $\alpha_b =$

$13.03 \times 10$ ),  $\alpha_c = 15.91 \times 10^{-6}(^{\circ}C^{-1})$ ,这里,下标 $a, b, c$ 分别代表20号碳钢、NCu28-2.5-1.5镍铜合金及0Cr18Ni9不锈钢(后同).

结合图2与图3可得到声速随温度变化的关系.由式(9)获得的温度对超声波速度的影响系数为, $k_a = 6.885 \times 10^{-5}(^{\circ}C^{-1})$ 、 $k_b = 12.858 \times 10^{-5}(^{\circ}C^{-1})$ 、 $k_c = 8.787 \times 10_5(^{\circ}C^{-1})$ .根据这些数据可知,造成声时随温度变化的主要因素是声速,且在本项实验工作的温度范围内声速随温度的变化也大致呈线性关系.

图4(a)~图4(c)给出了不同温度下三种螺栓声时随应力的变化关系,图5(a)~图5(c)给出了不同温度下三种螺栓的长度随应力的变化关系.图4及图5显示,不同温度时同一螺栓的声时或长度随应力变化都呈很好的线性关系,且曲线的斜率几乎一致,可考虑在常温附近的杨氏弹性模量为一常数.取各温度点杨氏弹性模量的均值为近似值,得三种材料的杨氏弹性模量分别为: $E_a = 208.5(GPa)$ 、 $E_b = 185.8(GPa)$ 、 $E_c = 197.4(GPa)$ .

根据图4及图5的数据,由式(10)计算得同一螺栓材料在不同温度下的 $A(T)$ 也相差不大(相对误差约1%),这里也可将 $A(T)$ 视为与温度无关的常数,取不同温度下 $A(T)$ 的均值得三种螺栓材料的系数为: $A_a = 8.77 \times 10^{-3}(GPa^{-1})$ 、 $A_b = 11.03 \times 10^{-3}(GPa^{-1})$ 、 $A_c = 11.32 \times 10^{-3}(GPa^{-1})$ .由此可见,应力造成声时变化的主要贡献是声速发生了变化.

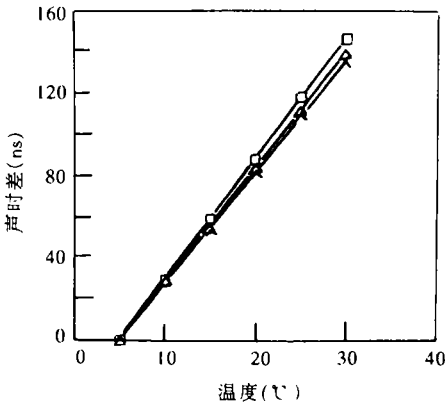


图2 声时随温度变化的关系

□: 20号碳钢    △: 镍铜合金    x: 不锈钢

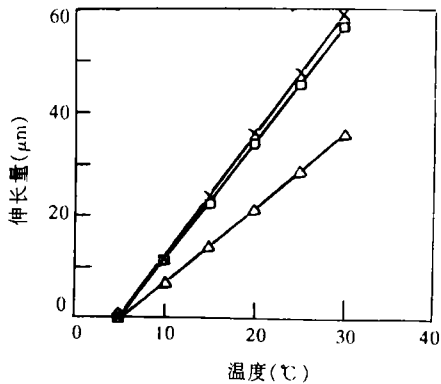


图3 长度随温度变化的关系

□: 20号碳钢    △: 镍铜合金    x: 不锈钢

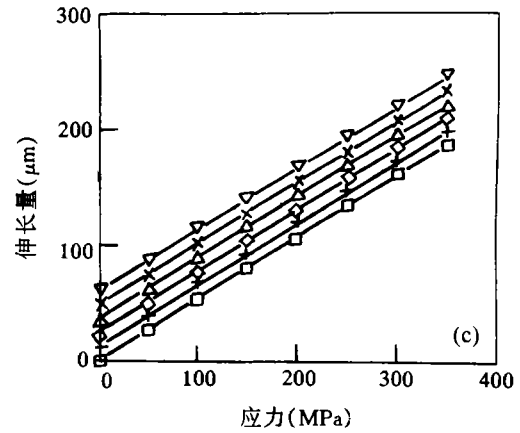
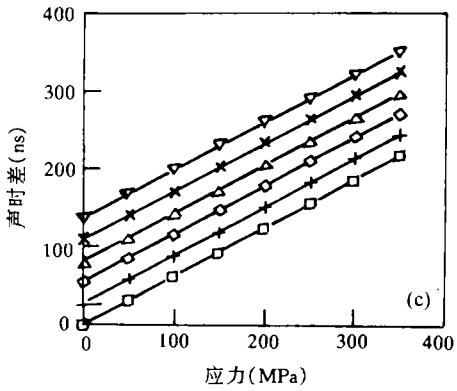
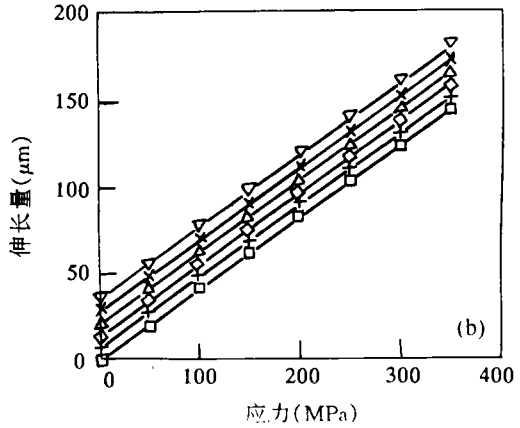
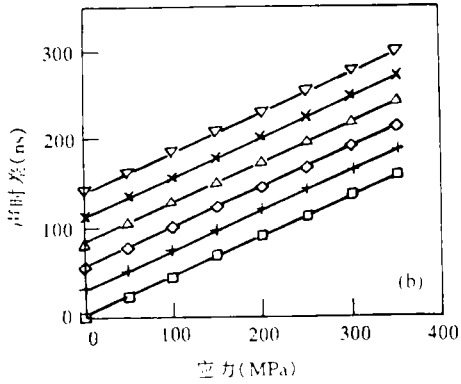
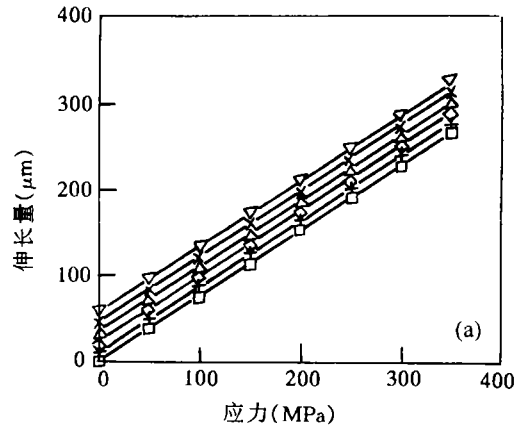
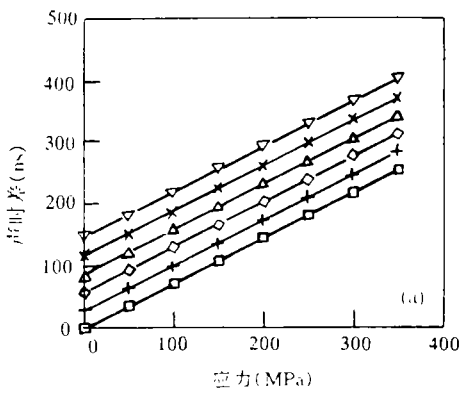


图4 声时随应力变化的关系

图5 长度随应力变化的关系

(a): 20号碳钢 (b): 镍铜合金 (c): 不锈钢

(a): 20号碳钢 (b): 镍铜合金 (c): 不锈钢

□: 5°C +: 10°C ◇: 15°C  
△: 20°C ×: 25°C ▽: 30°C

□: 5°C +: 10°C ◇: 15°C  
△: 20°C ×: 25°C ▽: 30°C

实验结果可知, 温度与应力都对声速变化有影响, 且还能引起螺栓总长度的变化, 本实验范围内它们的变化都呈良好的线性关系. 反映到实际测量参数声时上, 声时变化也与应力、温度呈线性关系, 这是因为, (1) 声速或螺栓长度随应力或温度的相对变化幅度较小, (2) 本实验的应力、温度测量范围不是很大, 这是考虑到在常温条件下测量小于屈服点应力的情况较多的缘故. 这里特别应注意, 温度对整个螺栓的声速、长度有影响, 而应力仅在等效应力长度区间对声速、长度变化有影响. 准确给出了螺栓材料的线度或声速随应力及温度变化的关系, 就可能据此研究出实用的带温度补偿的智能型超声应力测试仪<sup>[8]</sup>, 且能够在不同的温度条件下给出由应力引起的螺栓伸长量.

## 5 结束语

采用声速法测应力的关键是要获得各种材料声速、声时与应力的关系, 而且还要区分温度造成的声速、声时变化. 由于在常温附近螺栓材料的声速、伸长量与应力、温度呈良好的线性关系, 本文将它们之间的关系归结为几个线性关系常数, 这为实用仪器的标定带来了便利, 它为超声波应力仪的推广奠定了基础.

用简单的以单片机为核心的声时、温度测量装置, 根据本文所述的关系系数测量与标定方法, 我们已研制出了适合工业应用的超声波

螺栓紧固应力自动测试仪, 仪器成本较低廉, 比较适合在我国推广, 该仪器可测螺栓的应力、紧固力及伸长量, 并能借助拉力机对待测螺栓材料自行标定, 这对超声波应力测试技术十分有利.

**致谢** 华东电力试验研究所的季献武、华北电力试验研究所的杨启璋与河北电力试验研究所的张道钢等为本项工作提供了许多帮助并参加了部分实验, 特致衷心的感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Crecraft D I. Ultrasonic Measurement of Stress Ultrasonics, 1968, 6(2): 117.
- [2] Szilard J. Ultrasonic Testing: Non □ conventional testing techniques, Vail □ Ballou Press Inc., 1982, 437 - 458.
- [3] 冉启芳等, 用超声波方法测量螺栓应力, 固体力学学报, 1982, 3(1): 64.
- [4] 朱士明等, 超声波高温螺栓应力监测仪的研制, 同济大学学报, 1991 19(4): 433.
- [5] Bickford J H., Using ultrasonics to measure the residual tension in bolts, Experimental Techniques, 1988, (11):3
- [6] 刘镇清, 一种高精度超声波声速自动测量仪, 应用声学, 1994, 13(1): 29
- [7] Khimunin A S., Numerical calculation of diffraction corrections for the precise measurement of ultrasound phase velocity, Acustica, 1975, 32: 192
- [8] 刘镇清, 单片机为核心的超声波轴向应力仪, 工业仪表与自动化装置, 1993,(5): 49

(上接第 16 页)

## 参 考 文 献

- [1] J.L.Flanagan. Bell System Technical Journal, 1980, 59(9): 693 - 1719.
- [2] J.L.Flanagan. Bell System Technical Journal, 1979, 58(4): 903 - 941.
- [3] 稻永洁. 电声技术, 1984, 1: 28 - 32.
- [4] J.M.Goldberg, M.B.Sandler, Journal of Audio Engineering Society, 1991, 39(6), 49 - 460
- [5] 骆立俊, 邹家禄. 电声技术, 1993, 7: 22 - 28
- [6] Yusuyuki Matsuya, Kuniharu Uchimura, Atsushi Iwata, IEEE Journal Of Solid-state Circuits, 1989, 24(4), P969 - 975
- [7] Albert H.Nuttall, IEEE Transactions On Acoustics And Signal Processing, 1981, 29(1), 84 - 91
- [8] Stuart.K.Tewksbury, Robert W.Hallock, IEEE Transactions On Circuits And Systems, 1978, 25(7), 436 - 447