

纵横波测已紧固螺栓轴向应力

江泽涛

朱士明

(南昌航空工业学院 南昌 330034) (同济大学 上海 200092)

1998 年 11 月 23 日收到

摘要 本文提出了用纵横波声时测已紧固螺栓轴向应力的一种新方法,解决了用超声精确地测已紧固螺栓应力问题,并且利用超声波沿轴向传播的波速同轴向应力以及三阶弹性常数的关系导出了螺栓应力同其材料声速特性、夹紧距离、温度及纵、横波声时的一种新关系,考虑了受应力作用时温度对声速的影响,简化了测量及计算过程。本文还介绍了材料的声速特性实验及测量方法;实验结果表明应力低于 250MPa,夹紧距离大于 30mm 时,应力超声测量的绝对误差小于 10MPa。

关键词 螺栓应力, 纵横波, 声时, 夹紧距离

The measurement of the stress in a tightened bolt by the ultrasonic longitudinal and transverse waves

Jiang Zetao

(Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

Zhu Shiming

(Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract This paper presents a new method measuring the axial stress by the transit time of longitudinal waves and transverse wave in the tight bolt ; It solves that the stress in the tight bolt is measured more accurately by ultrasonic. It deduces a new relationship of the stress, the characteristics of ultrasonic velocity of material, the clamping distance, the transit time of longitudinal waves and transverse wave and the temperature by use of the relationship between the velocity of ultrasonic transiting along the axial direction, the axial stress and the elastic constants ; It is taken into account that the temperature affects the ultrasonic velocity under the action of the stress. This method simplifies the measurement and the calculation process. The paper also introduces the experiment and test method of characteristic of ultrasonic velocity of bolt material. The experimental results show that the error of stress is less than 10MPa when the clamping distance is more than 30mm and the stress is less than 250MPa.

Key words Stress in bolt, Longitudinal waves and transverse wave, Transit time, Clamping distance

螺栓的应力测量是工业中普遍存在又急需解决的一个共性问题,如在航空航天、核电阀门、发电厂、化工、锅炉、水泵等工业领域的一些关键性设备,都涉及到螺栓密封应力是过大或过小,目前工业上常用扭力扳手,由于螺母与构件的接触面之间及螺母与螺栓的螺纹面之间摩擦系数离散性较大,使得由力矩推算出的轴向应力很不准确,近十几年来国内外都在积极探索用超声波直接测量螺栓轴向应力的方法和手段^[1-7],目前的超声波应力仪都要测得螺栓未受应力状况下的超声波参量,这对安装过程是适用的,但对一些已紧固的设备则是不可取的,为此研究能测出已紧固螺栓应力并考虑温度对应力测量的影响以及测量精度高,

2 纵横波声时和应力及温度的关系

当螺栓不受应力时,纵横波在其中传播的声速为:

$$\begin{cases} C_{l0} = \sqrt{(\lambda + 2\mu)\rho_0} \\ C_{t0} = \sqrt{\mu/\rho_0} \end{cases} \quad (1)$$

上式中 C_{l0} 、 C_{t0} 分别为纵横波在固体材料中传播的声速, ρ_0 为材料的密度, λ 、 μ 为拉梅常数。

而根据非线性弹性理论和非线性声学^[8],当各向同性固体材料受某一方向应力、且纵横波同应力方向一致时,声速和应力的关系为:

$$\begin{aligned} V_{la}^2 &= C_{l0}^2 - T[(\lambda + 2\mu)(4\lambda + 10\mu + 4m)/\mu + \lambda + 2j]/[\rho_0(3\lambda + 2\mu)] \\ V_{ta}^2 &= C_{t0}^2 - T[2J - 2\lambda(m + \lambda + 2\mu)/\mu]/[\rho_0(3\lambda + 2\mu)] \end{aligned}$$

上式中的 J , m 为三阶弹性常数, V_{la} , V_{ta} 为受应力后的声速, T 为应力。令:

$$\begin{aligned} 2K_L &= -[(4\lambda + 10\mu + m)(\lambda + 2\mu)/\mu + \lambda + 2J]/[3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)] \\ 2K_T &= -[2J - 2\lambda(m + \lambda + 2\mu)/\mu]/[(3\lambda + 2\mu)\mu] \end{aligned} \quad (2)$$

则上式可化为:

$$\begin{aligned} V_{la}^2 &= C_{l0}^2(1 + 2K_L T) \\ V_{ta}^2 &= C_{t0}^2(1 + 2K_T T) \end{aligned}$$

设螺栓未受应力时温度为 $t_0^\circ\text{C}$, 螺栓的温度膨胀系数为 β , 则螺栓在温度为 $t^\circ\text{C}$ 时, 纵横波在螺栓中传播的声时分别为:

$$\begin{cases} S_{l0} = 2L_0[1 + \beta(t - t_0)]/V_l(t) \\ S_{t0} = 2L_0[1 + \beta(t - t_0)]/V_t(t) \end{cases}$$

根据文献^[4]有:

$$\begin{aligned} V_l(t) &= C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t) \\ V_t(t) &= C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中的 $\Delta t = t - t_0$, $V_l(t)$ 、 $V_t(t)$ 、分别为纵、横波不受应力而温度为 t 时声速, L_0 为螺栓在温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 时的长度, 如图(1)所示, β 为温度膨胀系数, C_{l0} 、 C_{t0} 分别为纵横波在不受应力且温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 时的声速, α_l 及 α_t 分别为纵横波声速随温度变化的声速系数。

$$S_{l0} = 2L_0(1 + \beta\Delta t)/[C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)]$$

$$S_{t0} = 2L_0(1 + \beta\Delta t)/[C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)]$$

设横纵波在不受应力时 S_{t0} 对 S_{l0} 比值为 x_0 , 则有:

$$x_0 = S_t/S_0 = [C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)]/[C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)] \quad (4)$$

由实验测定及文献 [4] 知 α_l 及 α_t 约为 10^{-4} 数量级, 是只与材料有关的常数。所以当 $\Delta t < 10^3$ 度数量级时, $\alpha_l \alpha_t \Delta t < 10^{-5}$, 取一级近似得

$$x_0 = S_{t0}/S_{l0} \approx C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t + \alpha_t \Delta t)/C_{t0} \quad (5)$$

上式表明当 $\Delta t < 10^3$ 时, x_0 与 Δt 近似为一直线, 且斜率为 $(\alpha_t - \alpha_l)C_{l0}/C_{t0}$ 。

设螺栓受力纵横波在螺栓内传播的声时为 S_l 和 S_t , 螺栓中传播的声时为受力部分及不受力部分声时之和, 考虑温度及应力对螺栓的伸长, 并注意利用式 (3) 及图 1, 则有

$$\begin{aligned} S_l &= \frac{2\Delta l[1 + \beta(t - t_0)]}{V_l(t)} + \frac{2r'[1 + \beta(t - t_0)] + 2r'T/E}{V_l(T, t)} \\ &= \frac{2\Delta l[1 + \beta(t - t_0)]}{C_{l0}[1 - \alpha_l(t - t_0)]} + \frac{2r'[1 + \beta(t - t_0)] + 2r'T/E}{C_{l0}[1 - \alpha_l(t - t_0)](1 - K_L T)} \\ &= S_{l0} + \frac{2r'(1 + \beta\Delta t) + 2r'T/E - 2r'(1 + \beta\Delta t)(1 - K_L T)}{C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)(1 - K_L T)} \end{aligned} \quad (6)$$

上式中 $V_l(T)$ 、 $V_l(T, t)$ 、 $V_t(T)$ 、 $V_t(T, t)$ 分别为纵、横波受应力 T 且温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 及 $t^\circ\text{C}$ 时的声速。 $V_l(T, t) = (1 - \alpha_l \Delta t)V_l(T)$, $V_t(T, t) = (1 - \alpha_t \Delta t)V_t(T)$, E 为杨氏模量, $r' = r + r_1 + r_2$ 为有效夹紧距离, 即螺栓受应力长度 (见图 1), r 为两螺母内夹紧距离, $(r_1 + r_2)$ 为两螺母内螺栓受力长度称夹紧距离; K_L 、 K_T 为三阶弹性常数 (见式 2), T 为应力; $\Delta l = L_0 - r'$ 为螺栓不受应力长度, $2\Delta l\beta(t - t_0)$ 为螺栓不受力长度由温度变化所增加的声程, $2r'T/E$ 为螺栓受力长度由温度变化所增加的声程, $2r'\beta(t - t_0)$ 为螺栓受力长度由应力变化所加的声程。化简 (6) 式得:

$$S_{l0} = S_l + \frac{2r'(1 + \beta\Delta t)K_L T + 2r'T/E}{C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)(1 - K_L T)} \quad (7)$$

同理可求得横波受到应力时的传播声时为

$$S_{t0} = S_t + \frac{2r'(1 + \beta\Delta t)K_T T + 2r'T/E}{C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)(1 - K_T T)} \quad (8)$$

式 (7) 和式 (8) 式可进一步化得

$$S_{l0}C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)(1 - K_L T) = S_l C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)(1 - K_L T) - (1 + \beta\Delta t)K_L T - 2r'T/E \quad (9)$$

$$S_{t0}C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)(1 - K_T T) = S_t C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)(1 - K_T T) - (1 + \beta\Delta t)K_T T - 2r'T/E \quad (10)$$

用 (10) 式除 (9) 式两边并注意利用 (4) 式得:

$$\begin{aligned} S_{t0}C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t)(1 - K_T T)(1 - K_L T) - 2r'(1 + \beta\Delta t)K_T T(1 - K_L T) - 2r'T(1 - K_L T)/E \\ = S_{l0}C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t)(1 - K_L T)(1 - K_T T) - 2r'(1 + \beta\Delta t)K_L T(1 - K_T T) - 2r'T(1 - K_T T)/E \end{aligned}$$

进一步化简得:

$$\begin{aligned} S_{l0}C_{l0}(1 - \alpha_t \Delta t)(K_T + K_L)T - S_{t0}C_{t0}(1 - \alpha_l \Delta t)(K_L + K_T)T + 2r'(1 + \beta\Delta t)(K_L - K_T) \\ = S_l C_{l0}(1 - \alpha_l \Delta t) - S_t C_{t0}(1 - \alpha_t \Delta t) \end{aligned} \quad (11)$$

将 (4) 式代入 (11) 式并进一步化简整理可得应力同纵横波声时的关系:

$$T = \frac{S_l x_0 - S_t}{(S_l x_0 - S_t)(K_L + K_T) + \frac{2r'(1+\beta\Delta t)(K_L - K_T)}{C_{l0}(1-\alpha_t\Delta t)}}$$

上式可化得:

$$(S_l x_0 - S_t)[1 - (K_L + K_T)T] = 2r'T(1 + \beta\Delta t)(K_L - K_T)/[C_{l0}(1 - \alpha_t\Delta t)]$$

经实验测定和理论推算可知 K_L 约为 $10^{-5}/\text{MPa}=10^{-11}\text{m}^2/\text{N}$, K_T 约为 $10^{-12}\text{m}^2/\text{N}$ 数量级。一般情况下 $T < 250\text{MPa}$, 因此 $T(K_L + K_T) \ll 1$, 上式可进一步化为:

$$\begin{aligned} (S_l x_0 - S_t) &= \frac{2r'T(1 + \beta\Delta t)(K_L - K_T)}{C_{l0}(1 - \alpha_t\Delta t)} \\ T &= \frac{C_{l0}(1 - \alpha_t\Delta t)(S_l x_0 - S_t)}{2r'(1 + \beta\Delta t)(K_L - K_T)} \end{aligned} \tag{12}$$

上式为大范围温度下的应力表达式, 在实际应用场合中, Δt 约为 10^2 数量级, 因而 $\alpha_t\Delta t \ll 1$ 及 $\beta\Delta t \ll 1$, (12) 式可进一步近似为:

$$T = (S_l x_0 - S_t)C_{l0}/[2r'(K_L - K_T)] = K(r)(S_l x_0 - S_t) \tag{13}$$

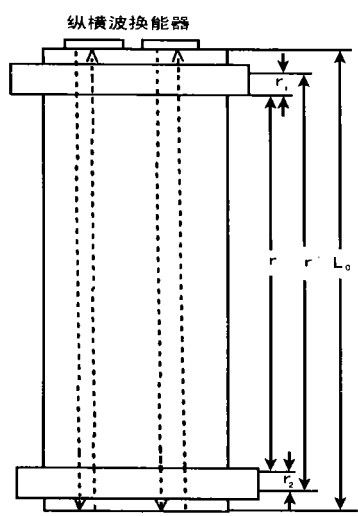


图 1 纵横波法测紧固螺栓轴向应力

上式中 $K(r)=C_{l0}/[2r'(K_L - K_T)]$ 为只与材料和夹紧距离有关的系数, 而与温度及应力无关的系数, 因此 $K(r)$ 可以在实测定应力前测出其相应螺栓材料值并存储在计算机中, 而 x_0 为螺栓不受应力时的横、纵波波速之比值, 由式 (5) 可知其值与温度及材料有关而与应力

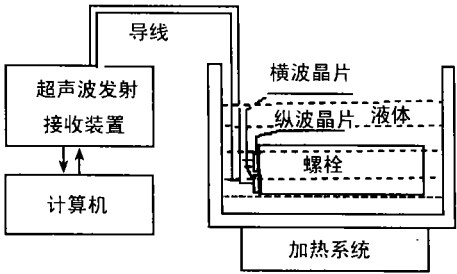


图 2 测量系统

无关, 因此 x_0 也可以在测定应力前测出其相应螺栓材料值并存储在计算机中, 所以当温度变化不大 (小于 100°C) 时, 根据螺栓受应力时测得的纵横波声时 S_l 、 S_t 可由 (13) 式近似计算出螺栓应力。

3 常数测定与实验结果

我们采用如图 (2) 的测定系统, 测出螺栓不受应力时纵、横波波速之比 (即声时之比) , 对 $\phi=26.6\text{mm}$ 的 B7M 材料和 $\phi=14\text{mm}$ 的 35CrMo 螺栓进行实验, 用计算机采集数

据并描绘曲线,实验结果如图(3)。结果表明 $x_0=S_{t0}/S_{i0}$ 为一直线,不同的材料有不同的斜率,这验证了式(3)和(4)的正确,对同一材料 $x_0=x_0(t)$ 为温度的函数而不是文献[7]所述的为一常数。

为了进一步验证不同温度下声时同应力的关系,测出了 $r'=150\text{mm}$ 的 35Cr Mo 螺栓在 $t=30^\circ\text{C}$ 和 $t=360^\circ\text{C}$ 时纵横波声时差(即加应力后声时减去未加应力声时,即 $S_t - S_{i0}$ 及 $S_t - S_{i0}$) 同应力的关系曲线如图(4)。从图(4)可以看出,不同温度下,纵横波声时同应力的关系不是文献[7]所述的简单的平移,而是和式(7)和(8)相吻合。式(13)中的 $r'=r+r_1+r_2$ 是螺栓的受应力长度是不易直接测量的(见图1),但 r 是夹紧距离是较易测量的, (r_1+r_2) 是螺栓在螺母区内受力部分,无法直接量度。为了求出 $K(r)$, 令 $\Delta S=S_t x_0 - S_t$, 由(13)式可知 $\Delta S/T=K'(r+r_1+r_2)$, 其中 $k'=2(K_l-K_T)/C_{t0}$ 为只与材料有关而与应力、温度无关的常数,因此测出同一温度下不同夹紧距离下的一系列 $\Delta S/T=K'(r)$, 然后用 $K'(r)$ 与 r 进行直线拟合求出 (r_1+r_2) 及 K' 可得 $K(r)$ 值,将 $K(r)$ 及 $x_0(t)$ 存贮在计算机中;采用图2实验装置测出该螺栓材料不受应力时横、纵波的声时比值(即为波速之比)及温度,

由式(5)可知 x_0 与温度 t 为线性关系,将测得的数据拟合成线性关系式 $x_0(t)$ 存贮在计算机中;将各种螺栓材料的 $K(r)$ 及 $x_0(t)$ 都进行测定并存贮在计算机中,当实测已紧固螺栓应力时,根据已测得的对应螺栓材料 $K(r)$ 及 $x_0(t)$ 及测得螺栓受应力时的纵、横波声时及测得的夹紧距离并根据(13)式可算出测得的应力,用此方法测应力测得结果见表1;表中的实测应力采用特制的专用应力传感器并配计算机数据采集系统,其绝对误差小于 0.3MPa , 其值由液压泵紧固螺栓过程中测出;夹紧距离是用千分尺测出的;超声波声时数据采集系统声时精确到 1ns , 其值是在螺栓完成紧固后测出;超声测应力由式(13)算出;实验结果表明,采用此方法测应力时,当应力小于 250MPa 时其误差小于 $\pm 10\text{MPa}$ 。

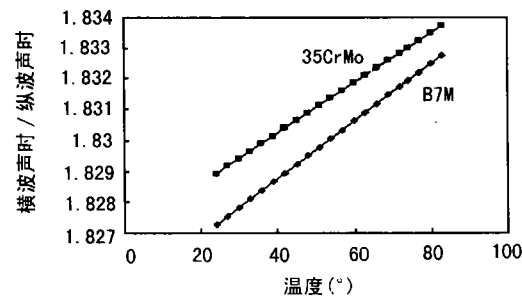


图3 纵横波声时比值同温度的关系

表1 纵横波法测应力同实测应力结果比较表 (温度: 25.7°C)

夹紧距离 (mm)	纵波声时 (μs)	横波声时 (μs)	超声测应力 (MPa)	实测应力 (MPa)	应力误差 (MPa)
79.200	44.994717	82.163147	106.96	106.01	0.95
79.200	45.042763	82.186302	171.30	177.52	-6.22
79.200	45.078571	82.210579	227.90	221.84	6.06
70.300	44.997540	82.139900	117.58	122.83	-5.25
70.300	45.017059	82.163719	149.25	152.39	-3.14
70.300	45.060535	82.186829	222.94	221.66	1.28
52.200	44.968739	82.111671	103.30	105.06	-1.76
52.200	45.005005	82.134224	176.36	180.04	-3.68
52.200	45.018543	82.144615	204.39	211.75	-7.36

4 结论

本文创立了用纵横波相结合测螺栓应力

的一种新方法,考虑了温度补偿,实测中先将 $K(r)$ 及 $x_0(t)$ 一系列材料系数存贮在计算机中,就可测出各种不同材料的螺栓应力。采用

此方法可免去测量螺栓受力长度和螺栓总长及三阶弹性常数等参量, 应力同纵横波声时及温度的关系简捷, 由于考虑了温度补偿, 测量精度较高 (如果忽略温度影响, 每度将造成 7.5MPa 的误差^[9]), 可用于检测飞机、大桥、发电厂等关键性设备的已紧固螺栓应力, 深信将得到广泛的应用。

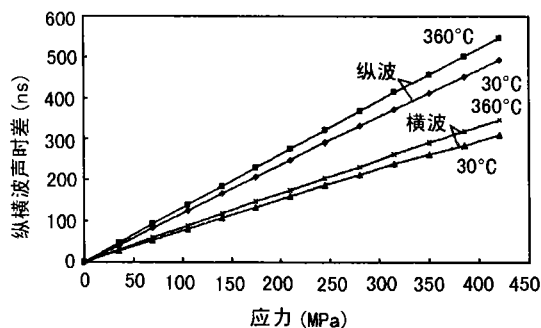


图 4 30°C 和 360°C 纵横波声时差随应力的变化关系

参 考 文 献

- 1 Johnsan G C. *Journal of Testing and Evaluation*, sep 1986, 14.
- 2 Deputat J. Ultrasonic technique for Measuring stress in screw. Ninth conference on non-destructive testing.
- 3 冉启芳, 费星如. 固体力学学报, Feb, 1982, 64-69.
- 4 何存富, 吴克成. 实验力学, 1992, 7(3): 238-241.
- 5 江泽涛, 朱士明, 梁军汀等. 应用声学, 1996, 15(4): 1-5.
- 6 Chandrasekaran N, Salamu K. Relationship between stress and temperature dependence of ultrasonic shear velocity. *Nondestructive Methods for Material Property Determination*, 393-403.
- 7 刘镇清, 王路. 仪器仪表学报, 1996, 17(6): 662-665.
- 8 钱祖文. 非线性声学. 北京: 科学出版社, 1992, 234-360.
- 9 江泽涛. 同济大学硕士论文. 超声测应力研究与螺栓应力仪研制, 1997 年 3 月.

全国功率超声会议在无锡召开

1999 年全国功率超声会议于 1999 年 10 月 19 日至 21 日在江苏省无锡市召开。本次会议是近几年会议中规模较大的一次, 全国近 40 个单位、团体的约 60 名代表出席了会议。会议开得较活泼。除论文报告交流外, 会议组织了专题讨论会。会议期间, 功率超声分会召开了全体委员会会议, 有 80% 以上的委员出席了会议。中国声学学会名誉理事长、中国科学院资深院士应崇福先生专程出席了本次会议。

功率超声是超声学的一大分支, 功率超声技术是一项应用广泛的高新技术。当前, 功率超声的应用领域已经扩展和渗透到机械、材料、石油、化工、纺织、医药、食品等几乎所有工业部门以及农业、环保、医疗卫生、科学研究、日常生活、空间技术等领域, 能够完成其它技术难以实现或效率很低的工作。新兴的超声治疗技术和“声化学”及其技术是令人瞩目的两个新应用领域, 将成为下世纪重要的新兴技术。“声空化”的现象及其相关效应的理论价值和巨大应用潜力, 使对“声空化”基础性研究成为目前国际上的热点课题。出席会议代表的踊跃和会议进行的热烈正是

这种形势的反映。

会议收到论文 32 篇, 论文内容涉及功率超声的应用研究、作用机理研究、和相关设备与元器件研究等许多方面。会议报告包括对国内外功率超声的成就和当前的发展的评述; 对已经成为国内外研究热点的超声空化研究的评述; 对新兴的超声应用技术, 例如超声治疗肿瘤技术、超声电机技术的评述; 对已经产业化的超声清洗等行业的发展, 市场分析以及向这些技术的深度和广度开拓、开拓新应用领域的评述等许多重要热点问题。会议报告内容广而且新。会议报告中还介绍了受到大家普遍关注的许多新技术, 例如新兴的铝塑复合管的超声金属焊接技术、超声清洗中的新技术和新用途、超声马达、超声悬浮等技术。本次会议有许多较为深入的超声作用机理研究报告, 例如在超声加工流变性、超声减摩、超声空化、声致发光、声化学等方面。在声场参量测量的新仪器、新器件、换能器、变幅杆、激励电路的设计和研究等方面也有很好的报告和交流。

(下转第 45 页)