

螺栓轴向应力超声测量技术

杜刚民, 李东风, 曹树林

冉启芳

(水利部水工金属结构质量检验测试中心, 郑州 450006) (郑州机械研究所, 郑州 450052)

摘要: 简要介绍螺栓轴向应力超声测量的基本原理和测量方法, 推导了螺栓伸长量和轴向应力的计算公式, 介绍了测试过程中探头的选择、表面状态要求、温度补偿以及测量的适用条件。实际应用表明, 该方法容易实施, 测量精确度较高。

关键词: 超声检测; 螺栓; 应力测量

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)01-0020-03

Bolt Axial Stress Measurement by Ultrasonic Testing

DU Gang-min, LI Dong-feng, CAO Shu-lin

(National Center of Quality Inspection and Testing for Hydro Steel Structure, the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450006, China)

RAN Qi-fang

(Zhengzhou Institute of Machine, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Ultrasonic measurement of bolt axial stress was briefly introduced including its rationale and testing method, and the formula for bolt elongation and axial stress was derived. The choice of probe, the requirement for the surface condition of the bolt tested, temperature compensation and the condition applicable for measurement were also detailed. It was shown by practical application that the method was easy for operation and high in accuracy.

Keywords: Ultrasonic testing; Bolt; Stress measurement

钢结构、桥梁、压力容器法兰和压力管道法兰等连接接头大量使用高强螺栓作为紧固件。如果连接接头上的螺栓紧固力大小不一, 会造成螺栓过紧或过松, 从而有可能导致螺栓断裂或密封接头的泄漏。因此, 紧固螺栓应力除应符合设计要求外, 同一连接接头上的所有螺栓应力应均匀一致。使用超声技术检测螺栓轴向应力, 可以使测量精度达到 $\pm 2\%$, 能较好地解决该问题。

1 超声测量螺栓应力的基本原理

根据声弹性理论, 固体中的声速与应力有关, 在材料屈服强度以内, 材料的伸长量与施加的张力呈正比, 应力与伸长量的比值是一个常数, 等于弹性模量 E 。

超声测量螺栓轴向应力, 使用的是脉冲反射法。该法是将超声波探头用耦合剂放在螺栓的一端, 探头首先产生一个声脉冲穿过螺栓的整个长度, 在另一侧被反射回超声波探头, 测量声脉冲信号的传播时间。将螺栓规格参数事先输入仪器, 便可得出声脉冲传播时间、螺栓伸长量、载荷和轴向应力。

材料中声速会随施加应力的大小而变化, 当螺栓施加张力载荷时, 其声速会变慢。试验得出, 施加载荷前后, 螺栓因张力导致的超声测量伸长量大约是物理伸长量的三倍。

2 螺栓伸长量及轴向应力的计算^[1,2]

用 C_0 表示超声纵波在试样中应力 $\sigma=0$ 时的速度, C_σ 表示 $\sigma>0$ 时沿应力方向的传播速度, 可得

$$\frac{C_\sigma - C_0}{C_0} = -A\sigma \quad (1)$$

式中 A 为比例系数。负号表明,沿张应力方向传播的纵波速度将随应力增大而减小。

另外,由于应力作用,试样长度将有微小变化。设 L_0 和 L_σ 分别表示 $\sigma=0$ 和 $\sigma>0$ 时的长度,则

$$\frac{L_\sigma - L_0}{L_0} = \frac{1}{E}\sigma \quad (2)$$

假定 t_0 和 t_σ 分别表示 $\sigma=0$ 和 $\sigma>0$ 时超声脉冲沿试样往返一次的时间间隔,则有

$$t_0 = \frac{2L_0}{C_0}$$

$$t_\sigma = \frac{2L_\sigma}{C_\sigma} = \frac{2L_0 \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right)}{C_0(1 - A\sigma)}$$

设相对时间变化为 $\Delta t/t_0$, 则

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t_\sigma - t_0}{t_0} = \frac{\left(\frac{1}{E} + A\right)\sigma}{1 - A\sigma} \quad (3)$$

式中 $A\sigma \ll 1$, 故 $\frac{\Delta t}{t_0} \approx \left(\frac{1}{E} + A\right)\sigma$, 令 $K_1 = \frac{1}{E} + A$, 则

$$\sigma = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{\Delta t}{t_0} \quad (4)$$

式(4)表明,应力正比于超声脉冲传播时间的相对变化 $\Delta t/t_0$ 。通过试验求得系数 K_1 后,可算出应力值。

求螺栓应力时还必须考虑螺栓形状和螺母的位置,因为螺栓在使用中仅在紧固长度范围内产生轴向应力,而测得的 t 值却是超声脉冲经过整个螺栓长度所需的时间,这时,可求得螺栓应力为

$$\sigma = \frac{K_2}{K_1} \frac{\Delta t}{t} \quad (5)$$

式中 K_2 为形状因子,与螺栓形状和螺母的位置有关(图1)。从理论上可求得 K_2 的表达式为

$$K_2 = \frac{L}{L_0 + L_1} \quad (6)$$

$$L_1 = \left(\frac{d_0}{d_2}\right)^2 \left[\frac{1}{m} \left(\tanh \frac{mm_1}{2} + \tanh \frac{mm_2}{2} \right) + (t_1 + t_2) \right] \quad (7)$$

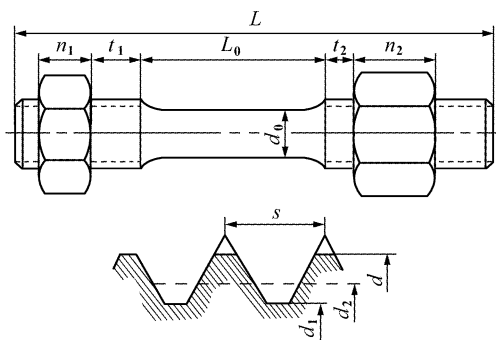


图1 螺栓和螺纹形状示意图

$$m = \frac{1}{s} \left[\frac{3.7 \frac{s}{d_2} \left(\frac{1 + 1.2s}{d_2} \right)}{1.86 + 0.35 \frac{d_2}{s}} \right]^2 \quad (8)$$

式(6~8)中各符号的意义如图1所示。

K_2 可采用下述方法通过试验求得,在式(7)中,设

$$L_{11} = \left(\frac{d_0}{d_2}\right)^2 \left[\frac{1}{m} \left(\tanh \frac{mm_1}{2} + \tanh \frac{mm_2}{2} \right) \right]$$

$$L_{12} = \left(\frac{d_0}{d_2}\right)^2 (t_1 + t_2)$$

得 $L_1 = L_{11} + L_{12}$, 这时由式(5)和(6)可得

$$\sigma = \frac{L}{K_1(L_0 + L_{11} + L_{12})} \frac{\Delta t}{t} \quad (9)$$

对同一螺栓,改变 $(t_1 + t_2)$ 即 L_{12} 的数值,测出相应的 $\sigma \Delta t/t$ 曲线,从曲线求相应的斜率 M' 和 M'' ,并令 $L'_0 = L_0 + L'_{12}$, $L''_0 = L_0 + L''_{12}$, 则可求得

$$M' = \frac{L}{K_1(L'_0 + L_{11})} \quad (10)$$

$$M'' = \frac{L}{K_1(L''_0 + L_{11})} \quad (11)$$

上两式相除后可解得

$$L_{11} = \frac{L'_0 \left(\frac{M'}{M''} \right) - L''_0}{1 - \frac{M'}{M''}} \quad (12)$$

将实测所得 M' , M'' 和 L'_0 , L''_0 值代入式(12),便可求出 L_{11} 的值,然后将有关数值代入式(6)可求出 K_2 ,将此 L_{11} 值代入式(10)或(11)还可求出 K_1 。常数 K_1 和 K_2 的实测与计算可参见文献[1]。

必须指出,温度变化对超声传播速度有较大的影响。当螺栓的温度增高时,螺栓的物理长度会随之增加,超声波的传播速度降低,传播时间变长,超声测量长度增加,因此,在公式中还应对此加以修正^[3]。在实测中,为了保证测量精度,对每种材料都应有相应的温度补偿系数 C_p ,仪器应具有温度测量探头和自动补偿功能。

3 超声波传播时间的精确测量

以上可见,螺栓应力的测定最后归结为精确测量螺栓在紧固前后超声波传播时间或速度的微小变化。这里主要介绍超声脉冲传播时间的直接测量方法。该方法的基本原理是用发射脉冲(或某次回波)去开启计数门,用反射回波(或另一次回波)去关闭计数门,从而测得发射脉冲与反射回波(或某两次回波)之间的传播时间。这种测量方法看起来很简单,但是在触发电平一定的条件下,回波幅度的变化会

影响测量结果。Reider 报道的一种测量电路,由于采用零电平触发系统,测量准确度达 0.2 ns 以上。

延迟线法、零频法、脉冲回波重合法和回振法等其它声速测量方法参见文献[1,2]。

4 螺栓应力的测量^[2,4]

4.1 测量探头的选择和操作

对于高强紧固螺栓,应根据其种类、长度和直径选择超声波探头的频率和直径,频率一般在 1~15 MHz,晶片直径一般为 $\phi 6\sim 30$ mm。原则上讲,对于长度短直径小的螺栓,宜选频率高直径小的探头;反之,则选频率低直径大的探头。

探头放置正确与否关系到测量的准确性与有效性。对一般螺栓,超声波探头应尽可能放置在端面中央;对中心有孔的螺栓则应靠近侧面,以避开中心孔。在测初始值时要将探头放在平整的部位,并稍许用力将探头贴紧螺栓,挤压出多余的耦合剂,必要时可稍许移动探头,使初始读数达到稳定状态。初始值测试后,用记号笔在螺栓上标出探头的位置与方向,以便在螺栓紧固后测试时探头位置与方向与测初始值时严格一致。温度测量探头原则上放在螺栓的侧面;若螺栓的侧面不可触及,则应尽可能靠近被测螺栓。用手长时间握住温度测量探头是不允许的,这将使仪器读入错误的温度信息。

4.2 螺栓参数、端头表面的修整和耦合

螺栓的参数(材料、几何形状、螺纹型式、螺栓长度、直径、横截面积、夹持长度和有效长度等)应事先准确地输入仪器。探头与螺栓端头表面耦合好坏,对测量结果有直接的影响。因此,螺栓端头表面的毛刺和杂物应打磨清除,对于粗糙度 $R_a > 12.5\ \mu\text{m}$ 的表面须打磨光滑。应使探头与螺栓端面紧密接触并保持稳定。螺栓紧固后测量时耦合压力应尽可能与测初始值时一样,并保持仪器显示值稳定,如对钢铁螺栓,可用磁性探头固定;对非磁性材料,可用手固定探头一定时间,以得到稳定读数。

4.3 温度补偿

试样温度的变化将对声速产生较大影响,对于钢材而言,可达到 $10^{-4}\ \text{mm}/^\circ\text{C}$,因此测量时必须保持试样温度的恒定,或加以温度补偿校正。实际操作中,应尽量缩短测量时间,使两次测量间试样温度不发生明显变化。

4.4 螺栓应力测量的适用条件

不是所有螺栓都可用超声波应力仪测量其紧固

应力,测量条件是① 螺栓的一端能够让超声探头触及与安放。② 螺栓的加载应力必须在弹性范围以内。除两个基本条件外测量还受以下情况限制:

(1) 拉伸情况 由于超声波测螺栓应力时的变化量是长度与声速,因此要求螺栓总体长度与声速应有变化。当螺栓的夹紧距很小时,测量精度会受到很大的影响。如被螺栓夹紧的是很薄的钢板时,有效夹紧距很小,即使在轴向应力较大时螺栓的声速与长度变化也十分小,仪器在计算时的误差将较大。另一种情况是加载的应力十分小,如应力值低于极限应力的 5% 时,螺栓总的声速与长度变化也相当小,要准确测得紧固应力也很困难。

(2) 材料 大多数金属材料可较好地传播超声波,但一些铸铁、不锈钢铸件及多数塑料中超声波衰减较大,由其制成的螺栓的紧固应力可能测量不出。

(3) 螺栓端面状态 为了向螺栓内沿轴向发射与接收超声波,螺栓的测试端面必须平整光滑且平行同轴,否则应予修整,以免测量精度降低。

5 工程应用实例

水利部水工金属结构质量检验测试中心于 2004 年初对乌江洪家渡水电站厂房构架柱、吊车梁及 $2\times 250\ \text{t}$ 桥式起重机的试验过程进行了吊车梁和构架柱螺栓轴向应力和荷载测试。检测仪器为 BOLTMIKE III 螺栓应力检测仪,应力比为 0.000 0%,材料等级为 10.9 级,应力修正值为 0.000 MPa,屈服应力 883.0 MPa,弹性模量为 $2.062\ 203\times 10^5\ \text{MPa}$,材料声速为 $6\ 047.230\ \text{m/s}$,系数 $K=1.116\ 222\times 10^{-7}$,AB-1 型耦合剂,温度系数为 $7.693\ 200\times 10^{-5}$ 。被检螺栓的尺寸、位置和形状见表 1 和图 2。图 3 为 M24 mm $\times$ 90 mm 螺栓拉力静载检测结果(1.25 倍静载试验时起吊过程和持重状态),图 4 为 M24 mm $\times$ 90 mm (总长度 108 mm)螺栓拉力多次回波检测波形图。

表 1 螺栓几何尺寸和位置 mm

规格	总长度	有效长度 ¹⁾	夹持长度	平均横截面积	连接螺栓位置
M24 $\times$ 90	108	81.0	48	353	吊车梁腹板
M27 $\times$ 110	130	105.5	72	459	吊车梁翼板
M30 $\times$ 570	570	125.0	84	561	吊车梁翼板与构架柱间

注:1) 螺栓有效长度按美国 Stresstel 公司 Guide to Ultrasonic Inspection of Fasteners 计算并考虑了垫圈厚度。

(下转第 25 页)

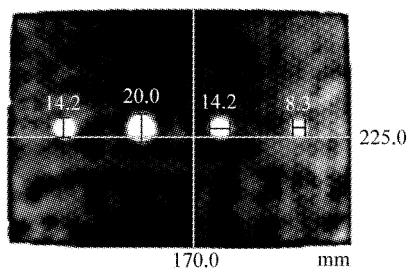


图2 缺陷图像及其尺寸的测量

3 试验结果分析

聚四氟乙烯的热导率比铝小很多,热量在此受阻,反映在试件表面与缺陷对应的区域温度较高,在图2热图中呈亮色而显示出缺陷。图2经高通滤波处理的图像示于图3。可见,除了四个缺陷的大小和位置外,试件的蜂窝结构也清晰可见。

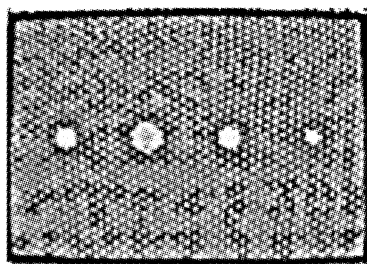


图3 高通滤波后的热图像



(上接第22页)

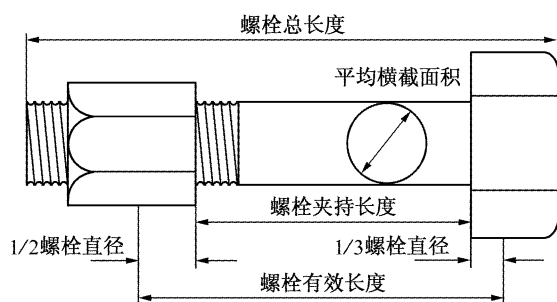


图2 螺栓形状

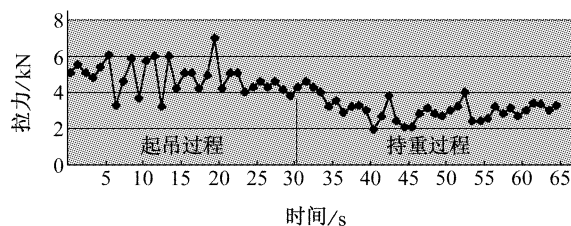


图3 M24 mm×90 mm 螺栓拉力静载检测结果

现场应用表明,超声波螺栓应力检测仪可有效检测在弹性应力范围下,被显著拉伸且声传播性能良好的螺栓的应力状态,保障螺栓的安全使用。

4 结论

采用超声法也可检测铝蜂窝缺陷,但检测效率很低。用X射线法基本无法检测出该试件中设计的缺陷,这是因为铝蒙皮铝蜂窝中缺陷和主体对于射线的吸收差异太小。试验结果证明红外热波无损检测技术可对铝蜂窝复合材料试件夹层胶接情况和蜂窝结构进行快速有效的检测,保证铝蜂窝胶接产品的安全应用。

参考文献:

- [1] 陈积懋,余南廷. 胶接结构与复合材料的无损检测[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] 耿荣生. 飞机复合材料粘结质量评价的新方法研究[J]. 无损检测,2001,23(11):461—464.
- [3] 张斌,陈积懋,王珏. 金属蜂窝胶接结构冲击损伤的无损检测[A]. 21世纪华人无损检测技术论坛论文集[C]. 珠海:知识产权出版社,2001.
- [4] 范华,赵明涛,谭玉山. 电子散斑测量仪及其在无损检测中的应用[J]. 半导体光电,1998,19(1):31—34.
- [5] Wang Xun. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. USA: Wayne State Univ,2001.
- [6] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

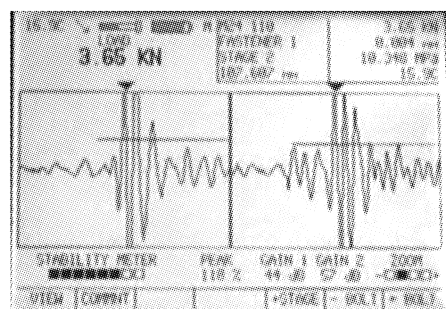


图4 M24 mm×90 mm 螺栓拉力检测波形图

参考文献:

- [1] 冉启芳,费星如. 超声波方法测量螺栓应力[J]. 固体力学学报,1982,(1):64—69.
- [2] 郑超祖. 超声波实验应力分析方法[J]. 无损检测,1979,1(1):18—24.
- [3] Deputal J. Ultrasonic technique for measuring stress in screws[A]. Proc of Ninth World Conference on NDT [C]. Melbourne,1979.
- [4] Stress Tel. Guide to Ultrasonic Inspection of Fasteners [Z]. Part No.021—002—175 Rev. B.