

螺栓横向剪力的超声检测

向鹏宇, 陈 兵, 邱菲菲, 朱忠尹, 苟国庆

(西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031)

摘要: 介绍了螺栓轴向应力检测的原理, 设计了一种受剪夹具, 采用超声检测法研究了在不同扭矩下剪力和时延的线性关系。结果表明, 在不同扭矩下, 剪力与时延呈线性关系, 但斜率不一样, 可为超声波法测量螺栓剪力提供依据。

关键词: 超声波时延; 剪力; 轴向应力; 压电晶片; 螺栓

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2022)03-0036-04

Ultrasonic testing of transverse shear force in bolt

XIANG Pengyu, CHEN Bing, QIU Feifei, ZHU Zhongyin, GOU Guoqing

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The principle of bolt axial stress detection is introduced, a shear fixture is designed, and the linear relationship between shear force and time delay under different torques is studied by ultrasonic detection method. The results show that there is a linear relationship between shear and time delay under different torques, but the slope is different, which can provide a basis for measuring bolt shear stress by ultrasonic method.

Key words: ultrasonic time delay; shear stress; axial stress; piezoelectric wafer; bolt

螺栓广泛用于核电、轨道交通、机械制造、桥梁建筑等行业的结构设备中^[1]。螺栓连接的原理为: 预拉力通过垫片传递到螺栓上, 在同样大小的预压力作用下螺栓和被连接件之间产生足够的摩擦力, 只要所承受的负载外力不超过最大摩擦力, 螺栓与被连接件间便不会产生相对滑动^[2]。若所受的轴向力过大, 构件产生的塑性变形可能会导致螺栓产生裂纹腐蚀、结构失稳和疲劳断裂等, 从而严重影响工件设备的稳定性和牢靠性^[3]。当轴向力不足时, 紧固件之间会留有余隙, 在设备或者环境造成的交变作用下, 构件可能会出现应力松弛等现象, 破坏设备完整性^[4]。

扭矩扳手法和转角法是常见的螺栓连接装配方法, 其用于控制施加在螺栓上的轴向力^[5], 但在实际装配工艺中, 即使按照标准装配连接件, 最终轴向预拉力的大小也会受离散摩擦系数、装配工具等诸多因

素影响^[6]。超声检测技术具有无损、高效、准确等优点, 被广泛用于螺栓应力的工程测量中。超声检测在假设螺栓紧固状态下受单一轴向应力的前提下进行^[7], 这与实际工作的情况有所不同。实际工作中, 螺栓的受力分为受单一轴向应力、受单一横向应力、受拉伸和扭转同时存在的复合应力等情况。螺栓的横向剪力来自于相应方向上的工作载荷, 其扭剪力由螺纹副连接件之间的摩擦力矩产生。何存富等研究了扭转剪力对螺栓轴向力的影响, 但横向剪力对螺栓轴向应力的影响和其测量方法却鲜有研究。

文章推导了超声纵波法中螺栓应力与超声波波速的关系。以优安螺栓轴向力测试仪作为实时检测装置, M20(螺纹直径为 20 mm)的 A2-70 型螺栓为试验对象, 标定了螺栓的轴向应力系数 K , 并定性研究了不同扭矩下剪力与超声波时延的关系, 为定量测量剪力提供参考。

1 螺栓应力的超声检测原理

1.1 螺栓应力检测理论

超声纵波法测量螺栓应力的两大理论依据为胡

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 成都市国际合作基金资助项目(2020-GH02-00058-HZ)

作者简介: 向鹏宇(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测

通信作者: 苟国庆, gouguoqing1001@163.com

克定律和固体声弹性效应^[8]。在物体弹性变形范围内,由胡克定律可得

$$L_\sigma = L_1(1 + \sigma/E) \quad (1)$$

$$L_0 = L_1 + L_2 \quad (2)$$

式中: σ 为轴向应力; E 为材料的弹性模量; L_σ 为螺栓在外加应力 σ 下的总长度; L_0 为螺栓初始状态下的总长度; L_1 为螺栓发生弹性变形区间的长度; L_2 为螺栓未发生弹性变形区间的长度。

单头轴向螺栓在恒温且长度不变的条件下,根据固体声弹性原理,其声速和紧固件的受力大小呈线性关系,表达式为

$$v_\sigma = v_0(1 + A \cdot \sigma) \quad (3)$$

$$t_0 = 2L_0/v \quad (4)$$

式中: t_0 为螺栓初始状态下声波的渡越时间; v_σ 为超声波在外加应力 σ 下的传播速度; v_0 为超声波在螺栓零应力下的传播速度; A 为声弹性系数。

由式(1)~(4)可得

$$t_\sigma = t_0 \left[\frac{L_1(E^{-1} - A) + L_0(1 + A \cdot \sigma)}{L_0(1 + A \cdot \sigma)} \right] \quad (5)$$

式中: t_σ 为螺栓在外加应力 σ 下超声波的渡越时间。

根据实际情况,可将式(5)简化为^[9]

$$t_\sigma = t_0 \left[\frac{L_1(E^{-1} - A)}{L_0} + 1 \right] \quad (6)$$

设应力系数 K 满足下式

$$K = \frac{L_0}{t_0 L_1 (E^{-1} - A)} \quad (7)$$

令 $F = \sigma$, 可得到简化后的表达式

$$F = K(t_\sigma - t_0) \quad (8)$$

式中: F 为螺栓所受应力(拉应力为正,压应力为负)。

从式(8)可知在胡克定律生效范围内,螺栓的应力大小和超声波的渡越时间差($t_\sigma - t_0$)成线性关系。

1.2 螺栓应力检测系统

螺栓应力检测系统分为硬件单元、软件单元和超声换能器 3 个部分。硬件单元负责输出和接收超声波信号,双向转换声信号和电信号。软件单元可放大采集波形,记录实时数据以及对信号进行消噪处理。

工控机通过换能器将信号透射至螺栓内部,换能器再将反射回来的超声信号转换成电信号,工控机再对信号进行计算处理实现螺栓应力的实时检测。超声螺栓应力检测仪外观及工控机系统界面如图 1 所示。

超声换能器外观如图 2 所示,其直径为 10 mm,

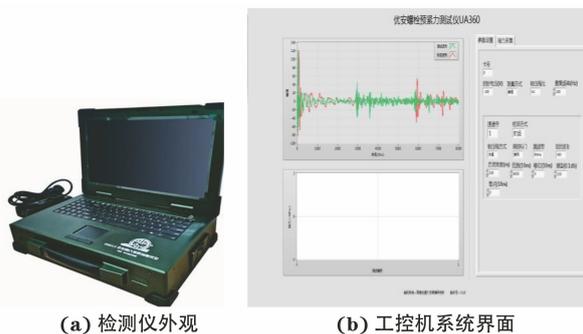


图 1 超声螺栓应力检测仪外观及工控机系统界面

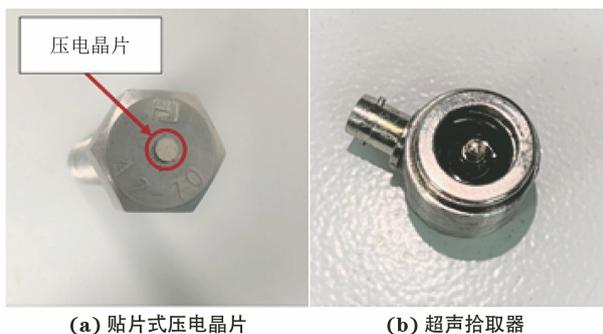


图 2 超声换能器外观

中心频率为 3 MHz。

2 影响螺栓剪力的因素

2.1 轴向应力系数标定

标定螺栓轴向应力系数 K ,设计模拟实际工况下受横向剪力的螺栓夹具,利用拉伸机施加拉力,定性研究不同扭矩下剪力与时延的关系。

由式(7)可知,标定了 K 值后即可建立螺栓所受轴向应力与时延的线性关系。用砂纸将螺栓端面打磨平整,将压电晶片贴合至螺栓表面后,再将螺栓放置在拉伸机上以 30 MPa 为步进进行拉伸,直至载荷增至 150 MPa。拟合应力与时延曲线得到的斜率即为 K 值。标定试验螺栓的装夹如图 3 所示。超声波轴向应力系数的标定结果如图 4 所示,其拟合系数 $R^2 = 0.998 6$,直线拟合程度高,应力系数 $K = 1.462 9$ 。

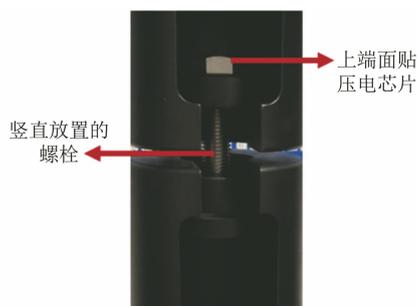


图 3 标定试验螺栓的装夹示意

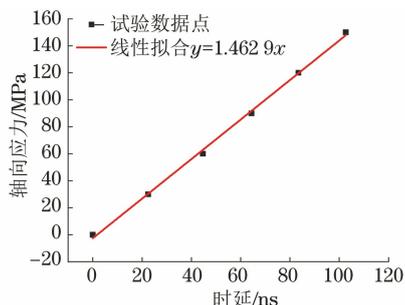


图4 超声波轴向应力系数的标定结果

2.2 剪力夹具设计

为了更好地满足试验要求,针对 A2-70 型螺栓(见图 5),设计了一种对称开孔夹具,夹具材料为 45 调质钢,外观如图 6 所示。

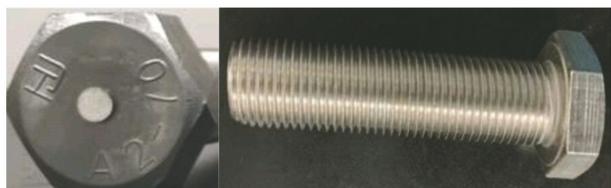


图5 A2-70 型螺栓外观

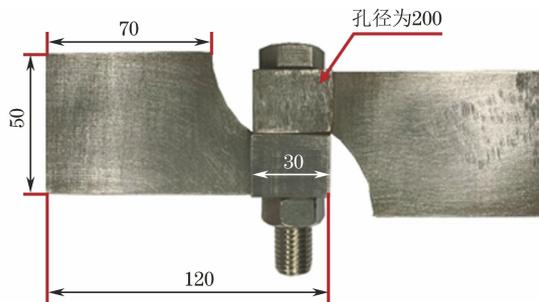


图6 对称开孔夹具外观

2.3 不同扭矩下螺栓剪力的检测

检测螺栓剪力时的装夹位置如图 7 所示。拉伸机从 0 N 开始加载,每隔 5 000 N 记录一次数据,直至载荷增加到 45 000 N。记录 5 个螺栓试样的数据,验证试验的重复性。零扭矩纯剪切时得到螺栓剪力与时延的关系曲线如图 8 所示,关系曲线的参

数如表 1 所示。

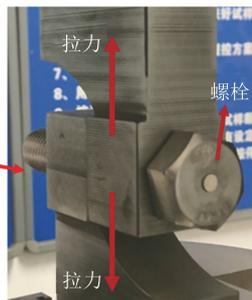


图7 螺栓剪力检测时的装夹位置示意

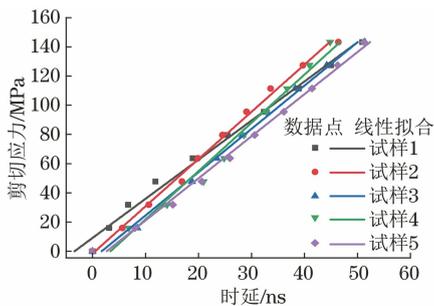


图8 零扭矩纯剪切时螺栓剪力与时延的关系曲线

表1 零扭矩纯剪切时螺栓剪力与时延关系曲线的参数

试样编号	斜率	截距	拟合系数
1	2.655 5	9.708 8	0.991 03
2	3.220 5	-1.210 4	0.995 61
3	2.951 2	-4.754 0	0.995 71
4	3.246 8	-9.711 1	0.982 05
5	2.866 0	-7.246 4	0.994 32

由图 8 和表 1 可知,螺栓的剪力和超声时延的线性相关性很高,可为超声法测量螺栓的剪力提供依据。受纯剪力的螺栓在工业设备中并不多见,因此需要探究在不同扭矩下剪应力对时延的影响。在夹装螺栓前,先用扭矩扳手在平面上拧紧螺栓达到一定的扭矩,大小分别为 30 N·m,60 N·m 和 90 N·m,然后进行拉伸剪切。不同扭矩下螺栓剪力和时延的关系曲线如图 9 所示,关系曲线的参数如表 2 所示。

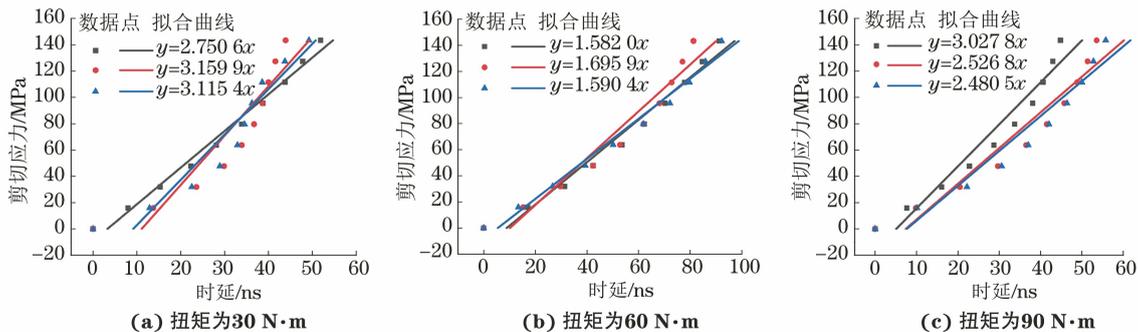


图9 不同扭矩下螺栓剪力和时延的关系曲线

表 2 不同扭矩下螺栓剪力与时延关系曲线的参数

扭矩/(N·m)	斜率平均值	拟合系数平均值
0	3.065 6	0.992 4
30	3.008 6	0.911 6
60	1.595 8	0.968 2
90	2.678 4	0.966 0

由图 9 和表 2 可知,在不同扭矩下,螺栓的剪力和超声时延呈一定的线性相关,但离散度不一样,扭矩为 0 N·m 时的拟合程度最好,30 N·m 时的拟合程度最差;螺栓的剪力对超声时延的影响不同,扭矩为 0 N·m 时的影响最小,30 N·m 时的影响最大,因为此时螺栓受到剪力后,相较于 60 N·m 和 90 N·m 的扭矩,其更容易因为剪力的改变而发生松动。将

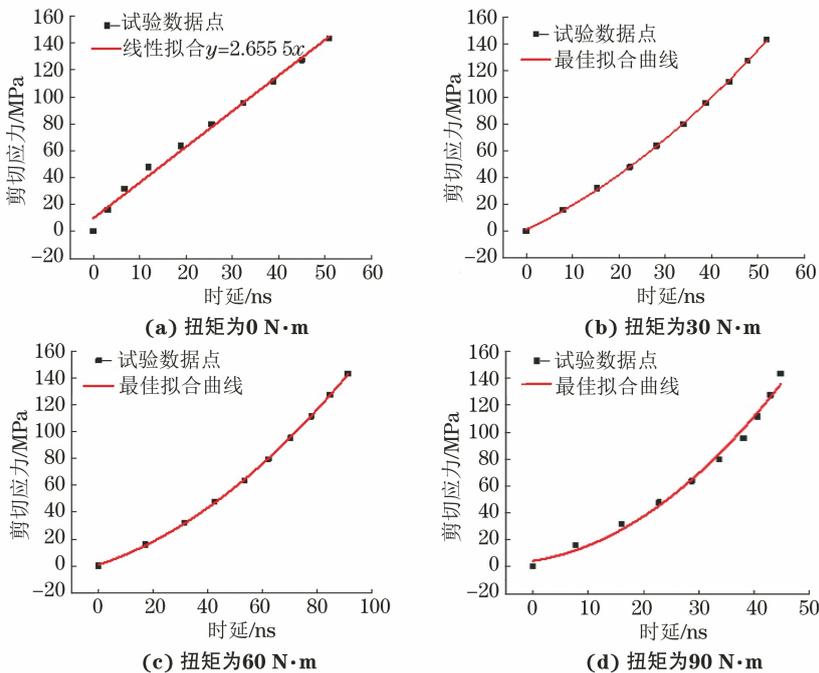


图 10 单个螺栓不同扭矩下时延和剪力的关系曲线

3 结语

采用超声波法检测了螺栓的轴向应力,设计了一种在拉伸力的作用下使螺栓受横向剪力的夹具,对螺栓在不同扭矩下时延和剪力的关系进行了试验研究。结果表明,在不同扭矩下,剪力与时延呈线性关系,但斜率不一样。螺栓的剪力和超声时延的线性相关性很高,为超声波法测量螺栓剪力提供了依据。

参考文献:

[1] 徐春广,李晓,潘勤学,等.螺栓拉应力超声无损检测方法[J].应用声学,2014,33(2):102-106.
[2] 侯兆新,龚超,张艳霞,等.钢结构高强度螺栓连接技术

整个试验装置视为一个整体结构,只有螺母部分是单独连接在螺栓上的,这起到了给予轴向应力的作用。当螺栓受到剪力时,螺栓会发生微小形变而弯曲,从而导致螺母部分沿螺栓轴向发生松动,而在未加载扭矩的情况下,螺栓并不会受到扭矩变化的影响,因此线性程度最好。

试验通过扭矩与剪力结合来模拟螺栓实际工程应用中的工况。单个螺栓在不同扭矩下时延和剪力的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知,不同扭矩下数据点构成的曲线形状总是向下凹,分析认为螺栓受到剪力过程中扭矩减小导致螺栓松动,拟合曲线从而呈抛物线状。因此,在工程实际应用中,某些通过螺栓连接的结构件受到的剪力越大,其螺栓越容易发生松动。

新进展[J].钢结构(中英文),2021,36(1):1-12.
[3] WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG Y, et al. Experimental investigation and design of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins[J]. Engineering Structures, 2019, 200: 109675.
[4] DING X, WU X J, WANG Y G. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer [J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 914-920.
[5] 王斌,陈才龙,陆现波.水电站螺栓紧固状态在线监测系统的安装技术分析[J].工程建设与设计,2019(20): 253-255.

(下转第 74 页)