

基于超声纵波法的螺栓连接件轴力测量

谢琳娜

(浙江华湛工程咨询有限公司 公路工程咨询部, 浙江 杭州 310000)

摘要:为了解决螺栓连接板件的轴力测量问题,基于超声纵波法的测量公式,通过 10.9S 级 M20 高强度螺栓的标定试验,获得了轴力与超声纵波声时差之间的特征关系曲线;基于特征关系曲线,对 10 组螺栓连接板件上的 40 颗螺栓进行了轴力实测。结果表明:螺栓连接件的轴力值主要分布在 130~155 kN 的范围内,小于 10.9 S 级高强螺栓 155 kN 的设计预拉力值。通过螺栓轴力检测发现,使用超声纵波测量法可以快速获得连接板上的螺栓轴力,可以为螺栓连接板件的施拧验收工作提供数据支持。

关键词:高强度螺栓连接板;超声纵波测量原理;标定试验;轴力实测

中图分类号:TH131.3

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2023)1-0035-06

0 引言

在建筑钢结构领域,高强度螺栓虽然凭借连接强度高、耐疲劳、施工方便的优点得到了大量应用,但是其连接轴力的大小却不可忽视。螺栓连接轴力过大将出现超拧现象,螺栓易发生断裂;若连接轴力过小,则会导致连接板件发生松动滑移。要想准确得到螺栓的连接轴力,就需要采取相应的测量方法明确得出螺栓轴力值。目前,常用的螺栓轴力测量方法有电阻应变片法、压力传感器法和贴片光弹法等。电阻应变片法通过螺栓表面应变来计算轴力,用这种方法测量螺栓轴力必须粘贴应变片于螺杆侧面,多用于试验室螺栓的轴力测量工作^[1]。压力传感器法是借助压力传感器去测量螺栓轴力的方法。在使用过程中传感器必须和被测螺栓紧固在一起,不仅增加了螺栓的长度,且只能测量与待测螺栓同直径螺栓的轴力,无法直接得出待测螺栓的轴力值。贴片光弹法是在螺栓施拧过程中,通过观测光弹贴片上的条纹变化来判断螺栓轴力的方法。该方法灵敏度较高、观测直观,但是偏振光场带来的光线斜射问题却难以克服,造成了较大的测量误差^[2]。综上所述,常用的螺栓轴力测量方法均存在不足,无法准确获得螺栓的轴力值。

近年来,实用的超声无损检测技术发展迅猛,螺栓轴力的超声测量研究也取得了相应成果^[3]。何存富等从理论与试验两个方面研究了温度、扭转剪力对螺栓轴力超声测量结果的影响^[4-5]。徐春广等基于超声纵横波法分析了在不同应力状态下的螺栓轴向应力系数^[6]。贾雪等建立了一套螺栓标定试验测试系统,用来标定螺栓轴力与超声纵波声时差间的数学关系^[7]。

本文从超声纵波法的测量原理出发,基于超声纵波测量原理,对 M20 × 55 高强度大六角头螺栓进行了标定试验,得到了螺栓在一定装夹长度下的特征关系曲线;并基于螺栓的特征曲线,对连接板件上的螺栓进行了轴力实测。

1 超声纵波法测量原理

根据声弹性原理可知:超声波在螺栓中传播时,其传播速度不但与材料的二阶弹性常数和密度有关,还与螺栓应力及三阶弹性常数有关^[8]。当螺栓处于某一应力状态时,超声纵波在栓杆中的声速如式(1)所示:

$$V_{\sigma} = V_0(1 + k\sigma) \quad (1)$$

式中: V_0 、 V_{σ} 为螺栓处于未受力与受力状态时的纵波传播速度; k 为声弹性系数; σ 为应力。

考虑到紧固螺栓的弹性变形主要发生在螺栓装夹长度区域内,所以螺栓装夹受力后的长度如式(2)所示:

收稿日期:2022-07-01

作者简介:谢琳娜(1994—),女,浙江嘉兴人,浙江华湛工程咨询有限公司公路工程咨询部工程师。

$$L_{\sigma} = L_1 (1 + \sigma/E) \quad (2)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad (3)$$

式中: L_{σ} 为螺栓受力后装夹长度区间的长度; L_1 为螺栓未受力时装夹区间的长度; E 为弹性模量; L 为螺栓未受力时的总长度; L_2 为螺栓未受力部分的长度。

由于超声波对温度变化敏感, 所以温度变化对超声传播造成的影响不可忽视。温度对超声纵波的传播速度与传播路程的影响如式(4)、(5)所示:

$$V_{(0,T)} = V_0 (1 - \alpha \Delta T) \quad (4)$$

$$L_{(0,T)} = L (1 + \beta \Delta T) \quad (5)$$

式中: α 为温度改变纵波声速的系数; ΔT 为温度变化量; β 为螺栓材料的热膨胀系数。

螺栓在温度一定且处于未受力状态时, 超声纵波在去程与回程中所用声时 t_0 如式(6)所示:

$$t_0 = 2L/V_0 \quad (6)$$

当温度变化为 T 且螺栓处于受力状态时, 超声纵波在去程与回程中所用声时 $t_{(\sigma,T)}$ 如式(7)所示:

$$t_{(\sigma,T)} = \frac{2L_{\sigma}(1 + \beta \Delta T)}{V_0(1 + k\sigma)(1 - \alpha \Delta T)} + \frac{2L_{\sigma}(1 + \beta \Delta T)}{V_0(1 - \alpha \Delta T)} \quad (7)$$

在综合考虑螺栓受力与温度变化的前提下, 超声纵波在式(6)、式(7)两种状态下的去程、回程所用声时不同, t_0 与 $t_{(\sigma,T)}$ 两者之间存在一个声时差。经公式变换可得应力与声时差的关系为^[9]:

$$\sigma = \frac{V_0}{2L_1(1/E - k)} \left(\frac{1 - \alpha \Delta T}{1 + \beta \Delta T} t_{(\sigma,T)} - t_0 \right) \quad (8)$$

根据螺栓弹性变形阶段轴力与应力的关系, 可得超声纵波测量式:

$$F = C \cdot \left(\frac{1 - \alpha \Delta T}{1 + \beta \Delta T} t_{(\sigma,T)} - t_0 \right) \quad (9)$$

由式(9)可知, C 为螺栓轴力与声时差间的标定系数, 只要确定了螺栓轴力与超声纵波声时差之间的标定关系, 即可检测螺栓轴力的大小。

2 螺栓标定试验

2.1 试验样品

选取 3 副 10.9S 级 M20 × 55 的高强度大六角头螺栓进行标定试验。螺栓试样参数如表 1 所示, 装夹长度如图 1 所示。

表 1 螺栓试样参数

螺栓规格	性能等级	材质	螺纹段截面积 A_s/mm^2	装夹长度 γ/mm	设计预拉力 F/kN
M20 × 55	10.9	20MnTiB	244.8	31.17	155

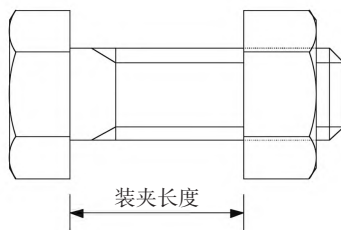


图 1 试验螺栓装夹长度示意图

2.2 试验过程

螺栓标定试验在材料试验室内完成, 在试验室温度恒定的条件下, 通过 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机加载螺栓, 同时连接超声测量设备测定施加荷载所对应的声时差, 如图 2 所示; 螺栓的加载拉力值以 30 kN 为加载步距从 0 kN 开始增加到 150 kN, 具体加载数据如表 2 所示。

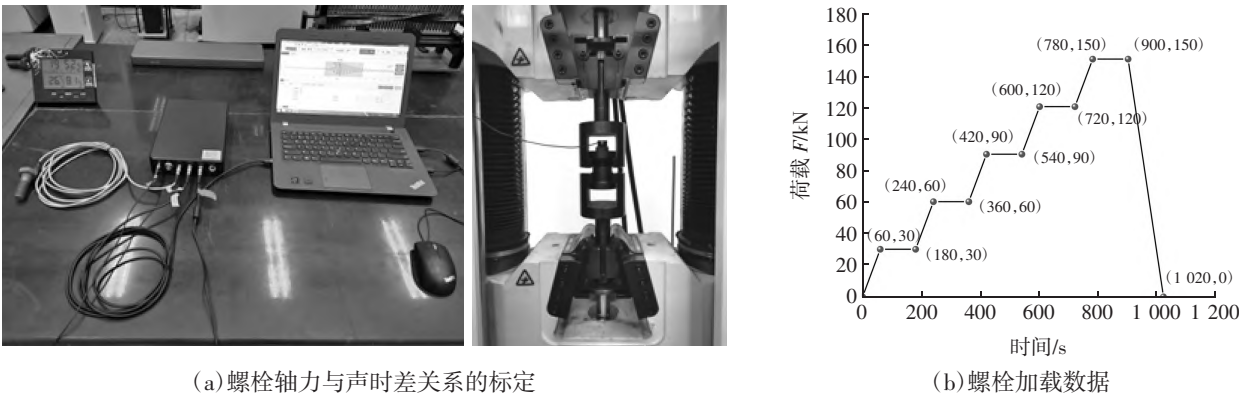


图 2 螺栓标定过程

表 2 螺栓加载数据

加载次数	拉伸荷载 F/kN	加载时间 t/s	加载速度 $v/(\text{kN}\cdot\text{s}^{-1})$	保载时间 t_1/s
1	30	60	0.5	120
2	60	60	0.5	120
3	90	60	0.5	120
4	120	60	0.5	120
5	150	60	0.5	120

2.3 试验结果

通过对 10.9S 级 $M20 \times 55$ 高强度螺栓的标定试验,得出了螺栓在相同装夹长度下的标定系数。考虑到螺栓的个体差异,对相同夹持长度下的螺栓进行了多次标定,螺栓在不同拉伸荷载下的纵波声时变化情况如表 3 所示。根据螺栓轴力与超声纵波声时差的线性拟合结果,得到每颗螺栓拉伸标定一次的标定曲线,如图 3 所示。

表 3 $M22$ 螺栓的标定试验结果

序号	声时差 $\Delta t/\text{ns}$						标定系数 $C/(\text{kN}\cdot\text{ns}^{-1})$
	$F = 0 \text{ kN}$	$F = 30 \text{ kN}$	$F = 60 \text{ kN}$	$F = 90 \text{ kN}$	$F = 120 \text{ kN}$	$F = 150 \text{ kN}$	
1-1	0	32.72	59.98	88.48	119.07	151.66	1.003
1-2	0	30.30	59.92	88.84	119.49	150.39	1.001
2-1	0	29.68	58.31	89.04	121.31	155.94	0.966 5
2-2	0	30.95	60.83	91.68	123.79	157.49	0.956 9
3-1	0	29.48	57.44	85.89	117.04	150.43	1.005 6
3-2	0	28.37	57.53	87.22	118.31	150.44	0.997 9

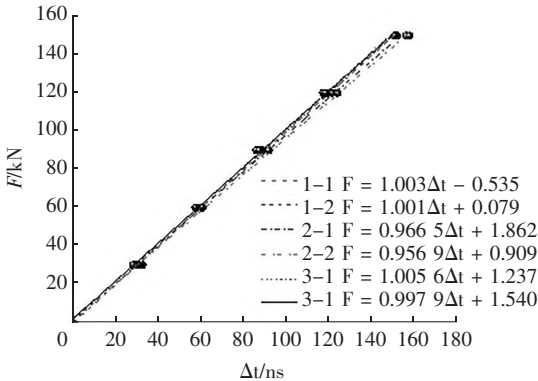


图 3 $M20 \times 55$ 螺栓的声弹性标定曲线

由于螺栓的标定系数存在着些许离散,所以采用螺栓的平均标定曲线作为该批次螺栓的特征关系曲线进行轴力测量工作,由表 4 可知,M20 × 50 螺栓的标定系数平均值为 0.988 4,标准差为 0.021。对各序号螺栓的标定曲线再次进行线性拟合可得,M20 × 50 螺栓进行轴力检测所使用的特征关系曲线为 $F=0.988\ 4\Delta t+0.894$ 。

表 4 声弹性标定系数变化

序号	声弹性标定系数 $C/(\text{kN}\cdot\text{ns}^{-1})$	平均值 $/(\text{kN}\cdot\text{ns}^{-1})$	标准差 $/(\text{kN}\cdot\text{ns}^{-1})$
1-1	1.003 0	0.988 4	0.021
1-2	1.001 0		
2-1	0.966 5		
2-2	0.956 9		
3-1	1.005 6	0.988 4	0.021
3-2	0.997 9		

3 螺栓连接件的轴力检测

3.1 螺栓连接件

螺栓连接件安装有 4 副 M20 × 55 高强度螺栓,如图 4 所示;板件为 Q345 钢,试件尺寸见表 5。

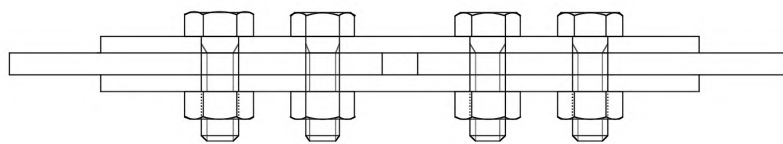


图 4 螺栓连接件

表 5 试件尺寸

单位:mm

芯板长度	盖板长度	宽度	厚度	螺栓孔径
620	290	190	8	22

3.2 螺栓轴力测量过程

螺栓连接件采用扭矩法进行组装施拧后,即可通过超声测量设备进行轴力测量工作。

第一步,初拧螺栓。将扭矩扳手上的初拧扭矩值设定为终拧扭矩值的一半,以此作为螺栓初拧扭矩扳手的设定值。将初步组装的螺栓连接板置于施拧工装上,当扳手套筒套上螺母后,开始初拧螺栓;待加载的扭矩值达到初拧设定值时即停止施拧,此时标志着螺栓初拧完成。

第二步,终拧螺栓。将扭矩扳手的设定值修定为终拧扭矩值,然后对螺栓进行终拧。待扭矩扳手响起报警声时,说明此时的施拧扭矩已达设定值的 95%;当扭矩扳手出现急促的报警声时,说明螺栓终拧扭矩达到设定值,此时螺栓终拧完成。

第三步,测量终拧扭矩对应的轴力。螺栓终拧完成后,将连接组装好的超声测量设备探头吸附在螺栓头部的压电陶瓷片表面,系统将会自动得出螺栓终拧所产生的轴力值。超声测量螺栓轴力的原理框图如下图 5 所示^[10]。

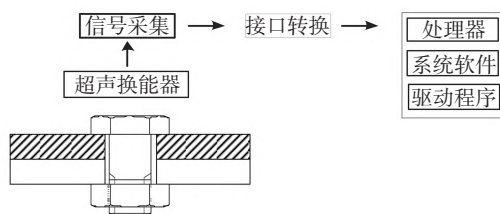


图 5 超声波螺栓轴力测试原理框图

3.3 轴力测量结果

通过超声纵波测量法对 10 套螺栓连接板上的螺栓轴力进行测量,得到的轴力数据如表 6 所示。

表 6 螺栓终拧扭矩及轴力测量结果

试件编号	螺栓编号	终拧扭矩/(N·m)	终拧预紧力/kN
B1	1	302	161
	2	390	158
	3	328	152
	4	370	147.6
B2	5	308	149.6
	6	319	149.3
	7	428	179
	8	298	147.6
B3	9	330	158
	10	350	153
	11	350	157
	12	354	148
B4	13	350	142
	14	350	144
	15	332	147
	16	320	151
B5	17	330	143
	18	330	150
	19	335	137
	20	335	140
B6	21	310	147
	22	320	133
	23	321	135
	24	300	138
B7	25	330	148
	26	330	145
	27	330	141
	28	320	133
B8	29	340	144
	30	310	141
	31	370	140
	32	340	141
B9	33	330	145
	34	320	135
	35	340	132
	36	300	168
B10	37	330	143
	38	320	178
	39	300	173
	40	310	135

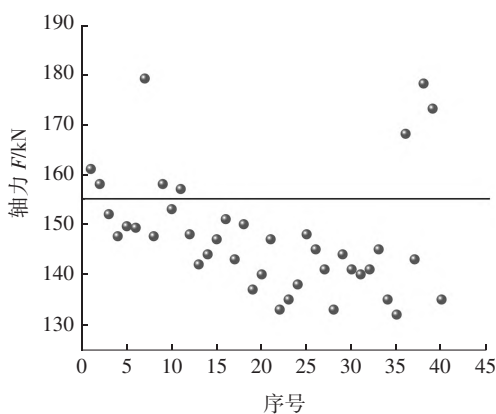


图6 螺栓轴力分布

由图6可知,螺栓连接件的轴力值主要分布在130~155 kN之间,只有少数螺栓的轴力值大于155 kN的预拉力设计值。由于扭矩法在螺栓装配过程中易受拧紧速度、温度和摩擦阻力的影响,导致轴向预紧力的精度仅为20%~30%,所以此次检测出的螺栓轴力值离散分布在以预拉力设计值为中心的区间[132 kN, 179 kN]范围内,符合工程实际。

4 结束语

本文从螺栓轴力的超声纵波测量原理出发,建立了螺栓轴力与超声纵波声时差之间的关系;通过对10.9S级M20高强螺栓的标定试验,获得了轴力与超声纵波声时差之间的特征关系曲线;对10组螺栓连接板件上的40颗螺栓进行轴力实测发现,螺栓连接件的轴力值主要分布在130~155 kN的范围内,略低于螺栓的预拉力设计值。通过螺栓轴力检测发现,超声纵波测量法可以快速获得螺栓轴力值,可以为螺栓连接板件的施拧验收工作提供数据支持。

参考文献:

- [1]张俊.基于声弹性原理的超声波螺栓紧固力测量技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [2]陆鹏,俞乐,刘骅,等.用贴片光弹法研究螺栓预紧力[J].力学季刊,2013(2):275-278.
- [3]李光,莫亚梅,吴努.螺栓轴向应力测量技术的研究概况及展望[J].南通大学学报(自然科学版),2009(3):67-71.
- [4]何存富,吴克成.温度对螺栓紧固应力超声测量的影响研究[J].实验力学,1992(3):238-244.
- [5]何存富,吴克成.扭转剪应力对螺栓紧固应力声弹性测量的影响研究[J].固体力学学报,1992(4):337-342.
- [6]徐春广,李骁,潘勤学,等.螺栓拉应力超声无损检测方法[J].应用声学,2014(2):102-106.
- [7]贾雪.基于声弹性效应的螺栓轴向应力检测系统研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [8]潘勤学,邵唱,肖定国,等.基于形状因子的螺栓紧固力超声检测方法研究[J].兵工学报,2019(4):880-888.
- [9]娄燕祯,赵伟,杭振园.基于超声检测的拼装罐螺栓预紧力损失研究[J].机电产品开发与创新,2021(6):151-155.
- [10]孙国峰.基于超声波技术的螺栓紧固力测量应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2012.

(责任编辑:张 利)

(下转第84页)

[5]王维平.航海英语阅读[M].大连:大连海事大学出版社,2019.

[6]ROS WRIGHT. How to write ESP materials (training course for ELT writers, book 3)[M]. Oxford: ELT Teacher 2 Writer Publ, 2013.

[7]汪榕培.高级英语词汇学[M].上海:上海外语教育出版社,2011.

(责任编辑:范可旭)

Research on Terminologies of English for Occupational Purpose and Its Application in Teaching Practice

ZHOU Hong-fen, WANG Wei-ping

(School of International Education, Zhejiang International Maritime College, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Terminologies play an important role in English For Occupational Purpose (EOP) teaching. It can be more accurate and comprehensive to select terminologies from EOP language materials by the methods of terminologies classification, word cluster analysis, morphological analysis and classification analysis, which are based on the small corpus. According to a case study of ship engineering technology, the theoretical results of terminology selection and analysis methods for the shipbuilding English are formed and applied in teaching practice. With these results, the impact of terminology selection methods and analysis process in classroom teaching practice is studied, which is found that it can bring about better teaching effect.

Key words: terminologies; English For Occupational Purpose; analysis method; teaching effect

(上接第 40 页)

Axial Force Measurement of Bolted Joints Based on Ultrasonic Longitudinal Wave Method

XIE Lin-na

(Highway Engineering Consulting Department, Zhejiang Huazhan Engineering Consulting Co., Ltd, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to solve the problem of axial force measurement of bolted connectors and based on the measurement formula of ultrasonic longitudinal wave method, the characteristic relationship curve between axial force and ultrasonic longitudinal wave sound time difference was obtained through the calibration test of 10. 9S grade M20 high-strength bolts. Based on the characteristic relationship curve, the axial force of 40 bolts on 10 groups of bolted connectors was measured. The results showed that the axial force values of the bolted connectors were mainly distributed in the range of 130~155 kN, which was less than the designed pretension value of 155 kN for 10. 9 S grade high-strength bolts. It is found by bold axial force detection that the bolt axial force on the connection plate can be obtained quickly by using ultrasonic longitudinal wave measurement method, which can provide data support for the acceptance of the bolted connection plate.

Key words: high-strength bolt connection plate; ultrasonic longitudinal wave measurement principle; calibration test; axial force measurement