

蒋树勤,周勇军,曹资源,等. 基于拉拔法的索夹螺杆紧固力检测试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 72-80.

JIANG Shu-qing, CAO Zi-yuan, ZHOU Yong-jun, et al. Experiment on detection of preload force in bolt clamp by pulling method[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 72-80.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.06.007

基于拉拔法的索夹螺杆紧固力检测试验

蒋树勤^{1,2}, 周勇军¹, 曹资源¹, 吴雨航¹, 罗之然¹, 杨帆^{1,2}, 赵煜¹

(1. 长安大学 公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064;

2. 广西欣港交通投资有限公司, 广西 钦州 535000)

摘要: 为研究拉拔法检测螺杆紧固力误差产生原因, 提高测量精度, 以龙门大桥索夹为研究背景, 基于理论分析与模型试验相结合的方法研究拉拔法误差影响机制。构建拉拔法螺杆两阶段有效紧固力的力学模型; 设计室内 M27 螺杆模型, 并利用压力传感器对螺杆两端螺母紧固力进行检测, 分析张拉过程中紧固力的变化规律, 并对理论模型进行验证; 以龙门大桥索夹 MJ45 螺杆和 MJ56 螺杆为对象, 开展拉拔超声法的紧固力检测方法研究, 分析不同紧固力条件下, 螺母松动前后的超声声时差、螺杆伸长量、螺杆有效紧固力与张拉力之间的关系。研究结果表明: 螺杆的紧固力并非恒定不变, 而是随着检测张拉力的增加而逐渐增长, 当张拉端螺母松动时, 张拉力通常比初始有效紧固力高 10%~20%; 拉拔超声法能够准确捕捉螺母松动的关键时刻; 并由此提出了 1.1~1.2 的检测折减系数, 以校准检测过程中可能出现的误差。研究结论可为实际工程的螺杆紧固力检测提供依据。

关键词: 桥梁工程; 索夹螺杆; 模型试验; 紧固力; 超声纵波; 拉拔法

中图分类号: U44

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2024)06-0072-09

Experiment on detection of preload force in bolt clamp by pulling method

JIANG Shu-qing^{1,2}, ZHOU Yong-jun¹, CAO Zi-yuan¹, WU Yu-hang¹,
LUO Zhi-ran¹, YANG Fan¹, ZHAO Yu¹

(1. Engineering Research Center of Highway Large Structure, Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Guangxi Xingang Communications Investment Co. Ltd., Qinzhou 535000, Guangxi, China)

Abstract: In order to reveal the causes of errors in the detection of screw preload force by the pull-out method and to improve measurement accuracy, the cable clamps of the Longmen Bridge were taken as the example. This study combined theoretical analysis with model experiments to study the mechanism of the pull-out method. A mechanical model of the effective preload force of the screw during two-stage by pull-out method was constructed. The M27 screw model was made

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 广西科技重点研发计划项目(桂科 AB23026125); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102214301, 300102214403)

作者简介: 蒋树勤(1981-), 男, 湖南衡阳人, 高级工程师, E-mail: 416441456@qq.com.

通讯作者: 周勇军(1978-), 男, 湖北孝昌人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: zyj@chd.edu.cn.

indoors, and pressure sensors were used to detect the preload force of the nuts at both ends of the screw, the change law of the preload force during the tensioning process was analyzed, which verified the theoretical model. The MJ45 and MJ56 screw of the cable clamp of the Longmen Bridge was used, and the pull-out ultrasonic method for preload force was studied, the relationship between the ultrasonic time difference, the effective preload force, elongation and tension force of the screw was analyzed under different preload force conditions. The results show that the preload force of the screw is not constant but increases gradually with the increase of the tension force. When the nut is loosening, the tension force is usually 10% to 20% higher than the initial effective preload force, and the pull-out ultrasonic method can accurately capture the critical moment of nut loosening. This study proposes a detection reduction factor of 1.1 to 1.2 to address the errors that may occur during the detection process. The research results can provide a basis for the detection of screw preload force in actual engineering. 1 tab, 13 figs, 21 refs.

Key words: bridge engineering; cable clamp screw; model test; preload force; ultrasonic longitudinal wave; pull-out method

0 引言

在悬索桥中,主缆与吊杆通过索夹连接。索夹采用高强螺杆预紧固,从而在主缆-索夹界面产生摩擦力,一旦螺杆紧固力损失则会导致摩擦力下降,引起索夹滑移和临近吊索索力重分配,进而改变主梁线形^[1]。该过程具有发散效应,且结果不可逆。因此,确保足够的螺杆紧固力对索夹可靠连接以及结构安全至关重要。

在索夹螺杆紧固力检测方面,目前工程常用拉拔法、超声法以及二者结合的方法。拉拔法是一种传统的螺杆锚固应力检测方法。通常采用千斤顶对螺杆进行机械拉拔,当千斤顶施加的荷载和螺杆内力相等时,螺母将卸载并产生松动,此时千斤顶施加的荷载被认定为有效紧固力。该方法的弊端在于需要人为判定螺母是否松动,即便是高精度千分表也无法捕捉到螺母内力为0的瞬间,经过测试,该方法在悬索桥螺杆的应力测试中产生10%~20%的相对误差^[2]。超声法最早应用于钢结构的螺栓轴向力检测^[3],其原理是利用螺杆轴力与超声在螺杆内部沿轴向传播时间变化的关系,通过测量超声波声时得到螺杆轴力数据。由于测试设备轻和方法新颖,此方面的研究较多。Jhang等通过试验验证了超声速度与轴向应力之间的线性关系吻合良好^[4];丁旭等研制了在役螺栓轴力测量系统,有效解决了耦合剂对测试的影响^[5];徐广春等利用纵横波对螺栓残余应力进行了测试,一定程度上解决了检测需要标定的问题,但仍受限于耦合剂^[6];何星亮等利用超声模式转化进行测量,减小了纵横波探头数量^[7];刘家

斌等对超声检测系统进行了研制,实现了自动标定和噪声滤波功能^[8-9];贾雪等对不同类型螺栓进行了标定,并利用小波去噪处理波形,验证了其线性关系^[10];伊建军等开发了超声检测系统,通过测试标定,并对实桥进行了检测,具有一定实用性^[11-12];Sun等开发智能压电螺栓,将压电陶瓷换能器嵌入螺栓头中,消除了耦合剂的影响^[13];Liu等提出了一种利用干耦合超声波测量紧固力的方法,克服了液体耦合剂的局限性^[14];陈鑫等对螺杆超声回波包络进行了高斯建模,实现了实测数据质量的自诊断^[15];潘勤学等利用超声非线性系数表征螺栓轴向应力,在一定应力水平下,其效果优于线性超声检测^[16];严勇等对风电螺栓进行了实测,结果表明其误差能满足该行业需求^[17];蔡依花等对超声纵波法进行了误差分析,发现温度、表面粗糙度及纵波张拉法拟合误差对结果影响较大^[18]。

针对拉拔法和超声法的弊端,目前发展了一种新的方法,即拉拔超声法。该方法继承了二者的优势,解决了超声法需要标定、拉拔法需要人为判断螺母松动的缺点,是一种具有发展潜力的螺杆紧固力检测方法。但是该方法认为张拉力小于有效紧固力之前,螺杆紧固力保持不变,这与实际不符。鉴于此,本文对拉拔法和超声法检测螺杆紧固力展开研究,设计单螺杆模型试验,对拉拔检测中的螺杆进行受力分析,研究张拉力与紧固力的关系;然后,通过高精度智能张拉与超声设备,对实桥单螺杆模型进行拉拔超声检测,分析超声声时差、螺杆有效紧固力与张拉力之间的关系。研究结果可为实桥施工阶段以及运营阶段的螺杆紧固力检测提供参考。

1 螺杆紧固力检测原理

1.1 拉拔法检测原理

拉拔法测量螺杆紧固力原理如图 1(a)所示,通常采用拉拔器对螺杆进行机械拉拔,当拉拔器施加的荷载 P 和螺杆内力 F 相等时,螺母将卸载并产生松动,认为此时张拉力即为紧固力。

该方法具体实施过程如图 1(b)所示:首先对既有螺杆施加初始检测张拉力 P_0 ,检测螺母松动与否以判断是否需要继续张拉;若未松动则进一步增加张拉力,直至螺母松动为止,此时输出的张拉力即认为是实际螺杆有效紧固力 F 。在实际使用中,通常需要多次测量并计算平均值,以提高测量精度。

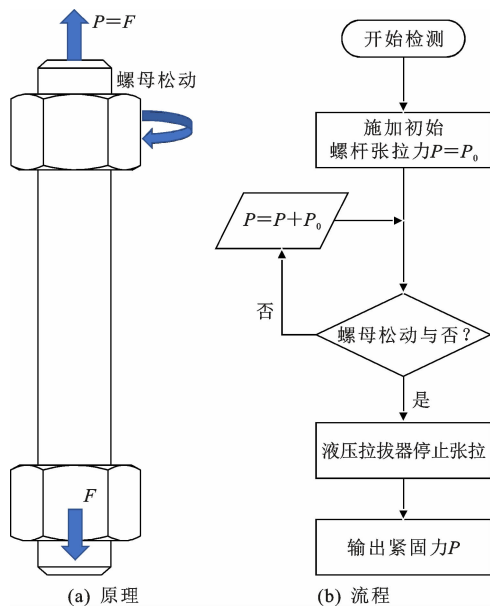


图 1 拉拔法检测原理及流程

Fig. 1 Principle and process of pull-out method detection

1.2 超声法检测原理

基于声弹性效应的超声纵波法检测螺杆轴力时,超声换能器从螺杆一端发射的超声波脉冲传入螺杆,该脉冲穿过整个螺杆并在螺杆端头被反射回来重新进入超声换能器,当螺杆应力发生变化时,一方面其物理长度将发生变化而导致超声波回波时间发生变化;另一方面,应力变化将导致超声波传播速度发生变化而进一步改变其超声波回波时间^[19]。因此,通过对螺杆回波声时变化量的测试可以获得其应力水平。

超声波在螺杆中的传播途径如图 2 所示。超声波换能器产生的超声波 p 透射进入螺杆头形成超声波 P_1 ,超声波 P_1 沿螺杆杆件传播到螺杆尾部反

射一次,形成反射波 P_2 ; P_2 再沿螺杆杆件返回到超声探头进入超声波换能器形成超声信号,并记录为回波声时。当螺杆处于受拉状态时如图 2(b)所示,超声波在螺杆杆件内的传播受到影响,导致反射波 P_2 回到超声波换能器的时间与无应力状态下反射波 P_2 回到超声波换能器的时间发生偏差,所测得的回波声时值也存在偏差,这种声时之间的偏差称为声时差 Δt 。

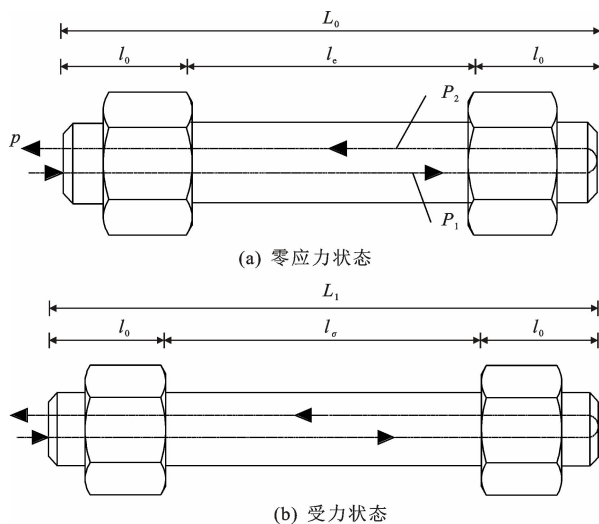


图 2 超声在螺杆中的传播示意

Fig. 2 Propagation of ultrasound in screw

根据声弹性效应,在各向同性均匀材料中,沿测试应力方向传播的纵波速度可用其 1 阶项^[20]近似表示为

$$V_{\sigma}^L = V_0^L (1 + \alpha \sigma) \quad (1)$$

式中: σ 为螺杆轴向应力; V_{σ}^L 为 σ 应力状态的纵波波速; V_0^L 为无应力状态下的纵波波速; α 为纵波的声弹性常数。

对于承受紧固力的螺杆,总长度的某些部分属于局部受力或无应力状态。因此,假设初始超声传播路径 L_0 为螺母间无应力长度 l_e 与自由端无应力长度 l_0 之和(螺母段螺杆应力为变应力状态,考虑到螺母长度与整个螺杆长度相比可以忽略,因此这里假设图 2(b)中 l_0 为无应力段),即

$$L_0 = 2l_0 + l_e \quad (2)$$

当螺杆受到紧固力时,螺杆的应力为

$$\sigma = F/A_e \quad (3)$$

式中: F 为螺杆预紧力; A_e 为有效截面积。

此时,超声波的传播路径变长

$$L_1 = 2l_0 + l_e \quad (4)$$

$$l_e = l_e (1 + E^{-1} \sigma) \quad (5)$$

式中: L_1 为应力状态下超声传播路径; l_e 、 l_0 分别为

两螺母间的受力长度和无应力长度; E 为螺杆材料的弹性模量。

由式(4)得出超声波脉冲回波传播时间 $t(\sigma)$ 为

$$t(\sigma) = \frac{2l_\sigma}{V_\sigma^L} + \frac{4l_0}{V_0^L} \quad (6)$$

联合式(1)、式(5)和式(6)得到

$$t(\sigma) = \frac{2l_e(1+E^{-1}\sigma)}{V_0^L(1+\alpha\sigma)} + \frac{4l_0}{V_0^L} \quad (7)$$

对式(7)进行1阶求导,展开可得

$$t(\sigma) = t(\sigma_0) + t'(\sigma_0)\sigma - \epsilon_1 \quad (8)$$

$$t(\sigma_0) = \frac{2l_e}{V_0^L} + \frac{4l_0}{V_0^L} \quad (9)$$

$$\Delta t = t(\sigma) - t(\sigma_0) - \epsilon_2 \quad (10)$$

$$F = \frac{V_\sigma^L}{2(E^{-1}-\alpha)} \frac{A_e}{l_e} (\Delta t + \epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (11)$$

式中: ϵ_1 为1阶展开的误差; ϵ_2 为测量误差; Δt 为声时的变化。

由式(11)可知,螺杆紧固力与声时差呈线性关系^[13]。

1.3 拉拔超声法检测原理

拉拔超声法的基本思路^[2]为:通过千斤顶对螺母端部施加拉力。测试过程中,记录当前所施加力 P_i ,利用置于螺杆顶端的超声波探测螺杆记录声时并计算当前螺杆总长 L_i 。以螺杆总长在螺母松动前后的变化率不同来获取螺杆紧固力。传统方法假定螺杆紧固力在检测过程中保持不变,而实际检测过程中螺杆紧固力是变化的,如图3所示。

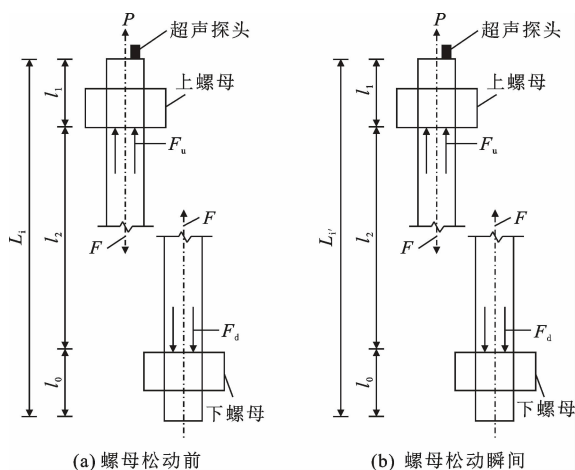


图3 螺杆两阶段受力示意

Fig. 3 Screw force in two-stage

设螺杆在检测前,实际有效紧固力为 F_0 ;在拉拔法检测过程中,持续变化的紧固力为 F ,张拉力为 P 。

当上螺母(张拉端)未脱离垫片时,随着张拉

力 P 的增大,下螺母受力 F_d 增大,上螺母受力 F_u 减小,螺杆伸长,两螺母间紧固段的紧固力 F 亦增大。各部件彼此受力存在以下关系

$$F = P + F_u \quad (12)$$

$$F = F_d \quad (13)$$

若螺母未脱离接触面,此时 $F < F'$,螺杆存在以下变形关系:

上端螺杆伸长量 Δl_1 为

$$\Delta l_1 = \frac{P}{EA} l_1^0 \quad (14)$$

两螺母间螺杆伸长量 Δl_2

$$\Delta l_2 = \frac{F - F_0}{EA} l_2^0 \quad (15)$$

螺杆总伸长量 ΔL_i

$$\Delta L_i = L_i - L_{F_0} = \Delta l_1 + \Delta l_2 = \frac{P}{EA} l_1^0 + \frac{F - F_0}{EA} l_2^0 \quad (16)$$

当螺母脱离垫片瞬时,上螺母不再受力,上端螺杆 l_1 和紧固段螺杆 l_2 变形一致,受力关系如下

$$P = F' = F_d \quad (17)$$

$$F_u = 0 \quad (18)$$

若螺母脱离接触面,此时 $P = F \geq F'$,同理螺杆存在以下变形关系

$$\Delta L_i = L_i - L_{F'} = \frac{P - F'}{EA} (l_1^0 + l_2^0) = \frac{F - F'}{EA} (l_1^0 + l_2^0) \quad (19)$$

式中: ΔL_i 为螺杆总长变化量; F' 为螺母脱离接触面瞬时的螺杆紧固力; L_{F_0} 为检测前超声波装置所测得的螺杆长度; $L_{F'}$ 为螺母发生松动瞬间,超声波装置所测得的螺杆长度; l_1^0 为无应力状态下上螺杆端部长; l_2^0 为无应力状态下两螺母间距; l_0 为下螺杆端部长。

由式(16)和式(19)可知,螺母脱离前,螺杆伸长变化量不同,这与传统拉拔超声法基本假定一致;但基于紧固力变化的假设可知,当 $P = F$ 时,所对应的紧固力 F' 并非有效紧固力。

2 拉拔法螺杆紧固力检测试验

2.1 试验概况

为研究拉拔法下螺母紧固力随张拉力变化情况,设计拉拔法试验装置(图4),其中钢套筒作为紧固力保持装置模拟索夹,千斤顶通过连接装置对螺杆施加张拉力(连接装置为空心钢筒,以方便测试张拉端螺母及垫片应力)。在此过程中,应变式压力传

感器采集紧固段左侧的螺杆紧固力变化(钢套筒贴应变计作参照),在连接装置垫片两侧粘贴应变片,以反映张拉端螺母压力的变化。在螺杆张拉端与垫片之间安装振弦式压力传感器(长沙金马测控 JMZX-3110HAT,精度 0.2%FS),通过综合测试仪读取压力传感器的压力值作为螺杆张拉力的真实值。图 5 为拉拔检测设备在实验室进行试验的情形。采用 M27 型螺杆进行拉拔试验,其中,螺杆公称直径 $D=27\text{ mm}$,长度 $L=1\ 000\text{ mm}$,强度等级 10.9 级,弹性模量 $E=210\text{ GPa}$ 。

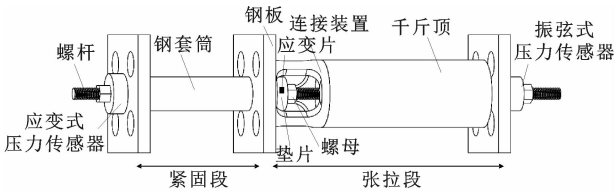


图 4 单根螺杆拉拔检测试验装置

Fig. 4 Single screw pull-out detection test device

2.2 试验过程

步骤 1,通过千斤顶将螺杆张拉至一定的力值;
步骤 2,待螺杆力达到设定值,通过连接装置的空隙将螺母拧紧,拆除千斤顶,记录此时左段螺母下应变式压力传感器值(即实际螺杆紧固力)以及右段垫片处应变片应变;

步骤 3,安装千斤顶,以一定荷载等级逐级张拉加载,并测试各级荷载下各压力传感器读数、垫片及钢套筒应变;

步骤 4,张拉过程中观察垫片的应力状态,垫片应变会发生变化从而出现拐点,当应变值为 0 时,可以判定螺母为脱离状态,此时,拧松螺母,停止张拉操作,记录张拉力值;

步骤 5,考虑偶然性影响,重复试验若干次。

2.3 试验结果及分析

测量过程中,采用千斤顶对螺杆进行逐级张拉,记录张拉端螺母垫片应变随张拉力变化的情况,通过压力传感器实时采集锚固端螺母紧固力变化,详细结果见图 6、图 7。

由图 7 可知:随着张拉力逐级增大,螺杆有效紧固力缓慢增加,张拉端螺母力缓慢减小;经测试发现,当张拉至目标紧固力 77.3 kN 后,拧紧螺母,此时图 7 中螺杆有效预紧力为 25.8 kN,而当检测张拉力达到 83.4 kN 时,从图 6 可知,此时垫片应变几乎为 0,手动即可旋松螺母,说明螺母此时已经脱离垫片。

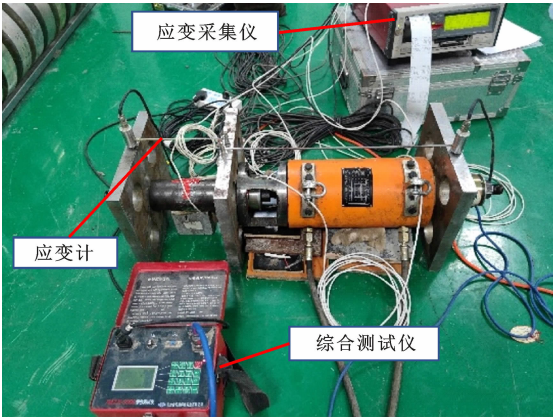


图 5 拉拔法试验系统与设备

Fig. 5 Pull-out test system and equipment

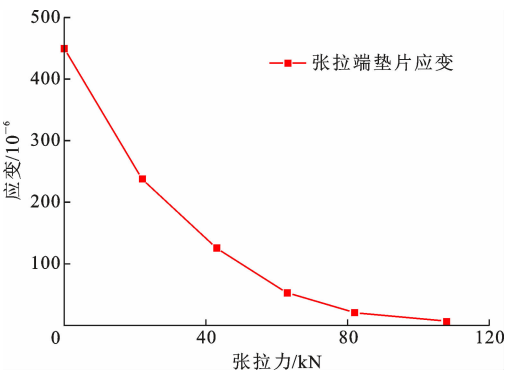


图 6 张拉端垫片应变变化

Fig. 6 Gasket strain changes of tension end

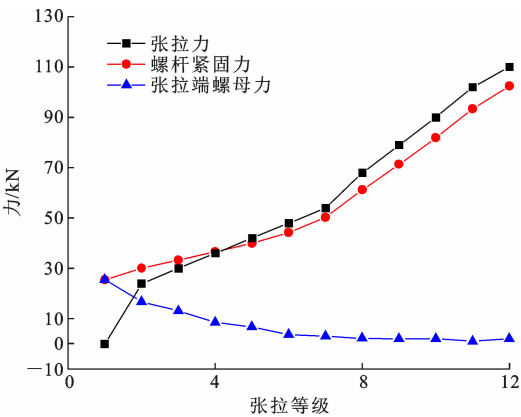


图 7 紧固力以及张拉端螺母力随张拉力变化关系

Fig. 7 Relationships between preload force and nut force with tension force

由图 7 可知,螺杆有效紧固力随着张拉力增大而缓慢增加,前期增长速率低于张拉力增长速率,但当张拉端螺母松动时,螺杆紧固力随张拉力的增长同步增加,而此时垫片应力为 0。同时可知,螺母松动时,千斤顶张拉力并非螺杆检测前的实际有效紧固力,比实际偏大。即螺杆紧固力在张拉力开始增长时随其增加,当螺母与垫片分离时通过千斤顶施

加的张拉力大于螺杆初始有效紧固力,这与第 1.3 节理论分析结果一致,进一步验证了理论分析的正确性。虽然由于钢套筒及连接装置刚度较小,导致螺杆获得的有效紧固力较小,但可以看出螺母松动时,检测张拉力基本与放张锚固时的张拉力相等,说明了该过程的可逆性。

3 拉拔超声法螺杆紧固力检测试验

拉拔超声法是超声法和拉拔法的结合,通过在拉拔测试过程中使用超声技术来实现螺杆紧固力无损检测。通过拉拔法试验分析可知,检测过程中螺杆紧固力并非一成不变,但拉拔超声法检测值是否受到影响仍需进一步试验验证,因此本文研究拉拔超声法对螺杆紧固力识别效果,并进一步确定拉拔法的误差来源。

3.1 试验概况

拉拔超声法试验装置如图 8 所示,试件采用实际桥梁工程中的 MJ45×3 mm 的螺杆,长度为1 020 mm。持力装置采用刚度较大的钢管混凝土,加载仪器采用自行研制的液压螺杆拉伸器(图 9),超声测量仪器采用 iFast-Standard 螺杆轴力测量仪,声时分辨率为 0.1 ns。超声探头采用 2 MHz 纵波探头。其他测量装置和传感器同第 2 节所述。

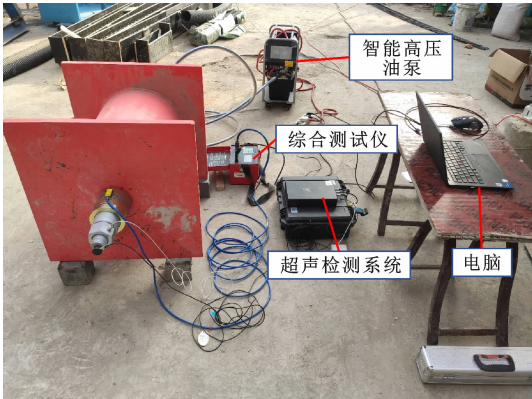


图 8 拉拔超声检测系统
Fig. 8 Pull-out ultrasonic testing system

为研究拉拔-超声法在检测过程中,不同目标紧固力下的螺杆有效紧固力识别效果以及回波声时变化,试验设置目标紧固力分别为 324、405、490、560 kN,通过螺杆拉伸器施加荷载,对螺杆施加设定目标紧固力并锚固(拧紧螺母);对螺杆进行拉拔超声检测,利用千分表和超声测量仪检测螺杆伸长量与声时差,得到不同目标紧固力下,各级螺杆张拉力与回波声时差和伸长量变化值关系。

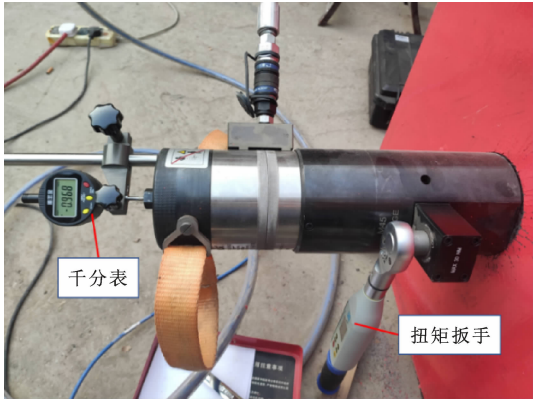


图 9 螺杆拉伸器
Fig. 9 Screw tension device

3.2 试验过程

- 足尺模型试验步骤如下:
- 步骤 1, 组装 MJ45 螺杆、螺母以及垫片与持力构件,并在锚固端螺母下安装压力传感器;
- 步骤 2, 利用拉伸器在张拉端以目标紧固力为 324 kN 进行张拉,达到目标紧固力时,利用扭矩扳手以 30 N·m 扭矩(拉伸器内部齿轮组最大输出扭矩)拧紧螺母;
- 步骤 3, 释放张拉力,待压力传感器稳定后,记录此时螺杆的有效紧固力;
- 步骤 4, 将千分表安装于拉伸器顶端,利用乐泰螺纹胶将压电陶瓷片粘贴于螺杆检测端端面,靠近螺杆中心避开坑槽,将超声换能器置于压电陶瓷之上;将千分表置 0,并检测此时螺杆声时,将波形设置为参考回波;
- 步骤 5, 在该目标紧固力下,以荷载力为 60 kN 逐级张拉加载,测试各级荷载下的伸长量和声时差;
- 步骤 6, 当张拉荷载为 732 kN 时,测试相关数据并停止张拉测试;
- 步骤 7, 设定其他不同目标紧固力(405、490、560 kN),重复步骤 1~6。

3.3 试验结果及分析

分别汇制张拉力与伸长量、紧固力关系,以及张拉力与声时差、紧固力关系,以螺母脱离垫片为分界点,将数据进行分段拟合,从而求得声时差、伸长量和紧固力突变点,分析不同目标紧固力下的试验结果,以目标紧固力为 324 kN 下的声时差及伸长量测量数据为例进行分析,结果如图 10、图 11 所示。

由图 10、图 11 可知:在螺母松动前(斜率突变点左侧),随着张拉力的增加,螺杆紧固力缓慢增加,其增幅远小于张拉力增幅;当螺母脱离垫片产生松

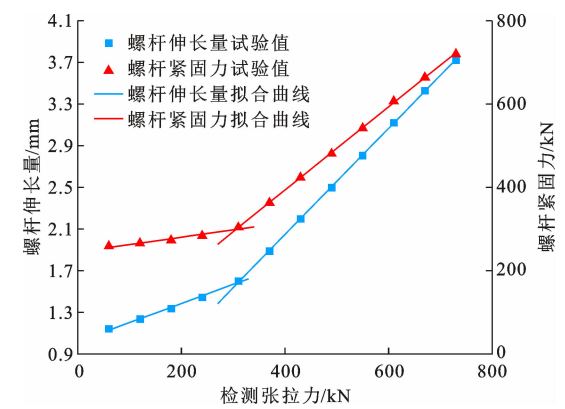


图 10 MJ45 紧固力与伸长量随检测张拉力变化关系
Fig. 10 Relationships between preload force and elongation with change of tension force for MJ45 screw

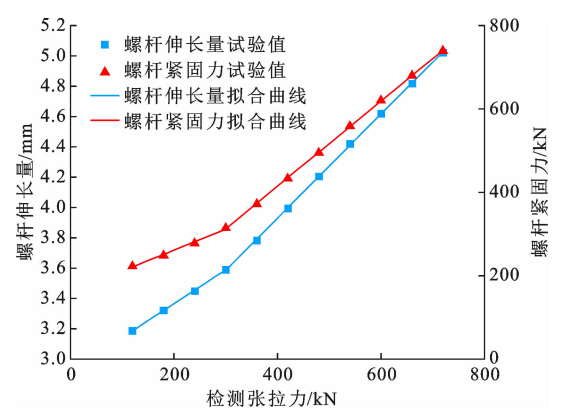


图 12 MJ56 紧固力与伸长量随检测张拉力变化关系
Fig. 12 Relationships between preload force and elongation with change of tension force for MJ56 screw

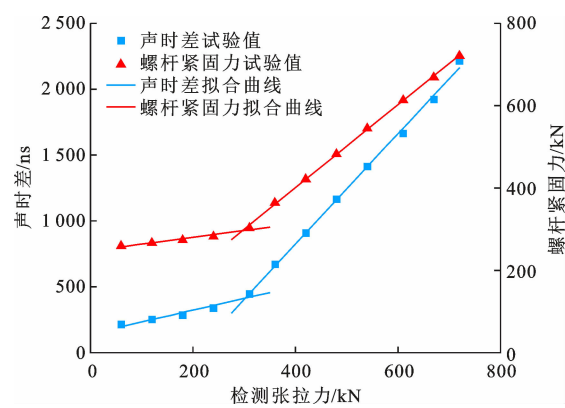


图 11 MJ45 紧固力与声时差随检测张拉力变化关系
Fig. 11 Relationships between preload force and acoustic time difference with change of tension force for MJ45 screw

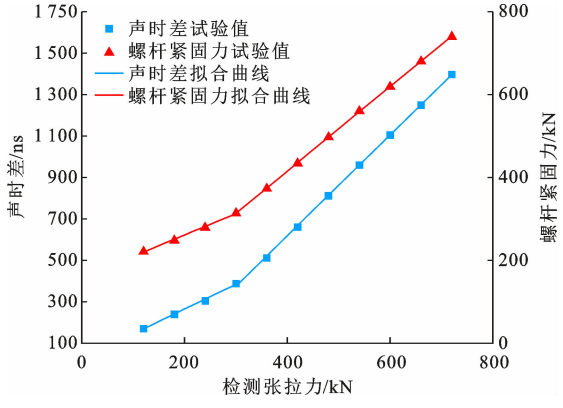


图 13 MJ56 紧固力与声时差随检测张拉力变化关系
Fig. 13 Relationships between preload force and acoustic time difference with change of tension force for MJ56 screw

动时(斜率突变点右侧),螺栓紧固力随张拉力同步增加,张拉力增量与紧固力增量相同,这也再次验证了第 1.3 节的理论结果。

由于紧固力在螺母松动前后均呈线性变化,由式(11)和图 10、图 11 中现象可知,声时差前后亦呈线性变化,这与第 1 节提到的超声原理相符,且图 10、图 11 中无论声时差还是伸长量斜率突变点位置的张拉力都与螺母松动时的紧固力相近,故二者皆可作为螺栓紧固力检测的指标量;然而此时螺栓紧固力并非检测前的螺栓有效紧固力,而是相较检测前的有效紧固力偏大。

为了减少随机因素的干扰,对 MJ56 螺栓也进行拉拔超声试验,给予 MJ56 螺栓 325 kN 初拉力,试验过程与 MJ45 螺栓相同,结果如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可知,不同规格螺栓同样可以得出典型拉拔超声测量图形。MJ56 螺栓实际有效紧固力为 251 kN,伸长量和声时差识别值分别为

306.4、302.7 kN,识别值与实际有效紧固力的相对偏差分别为 22%和 20%。

为了进一步分析拉拔超声法紧固力识别误差,对 4 组 MJ45 螺栓试验中的声时差、伸长量和螺栓紧固力的数据进行分析,如表 1 所示。

表 1 拉拔超声法螺栓紧固力检测数据

force detection data					kN
目标紧 固力	实际有效 紧固力	伸长量 识别值	声时差 识别值	螺母松动 时张拉力	螺母松动 时紧固力
324.2	256.9	302.2	304.0	297.8	297.4
404.8	324.5	367.7	363.2	381.3	371.0
490.0	358.0	406.1	411.4	423.8	420.9
560.3	427.0	488.0	478.3	506.5	492.4

由表 1 可知:伸长量斜率突变点张拉力、声时差斜率突变点张拉力以及螺母松动时螺栓张拉力,与螺母松动时螺栓紧固力的相对误差均在 5%以内,表明拉拔超声法识别的紧固力是螺母松动时的螺栓瞬时紧固力。

(2)螺母松动时张拉力与目标紧固力的相对误差基本在10%以内,声时差和伸长量的识别值与目标紧固力的偏差也是如此,而在试验中亦发现,常需要将张拉力张拉至目标紧固力才能将螺母手动拧松,这表明拉拔超声法识别紧固力与目标紧固力更为相近,这与第2节结论相似。

(3)由于弹性压缩及非弹性变形影响^[21],有效紧固力的损失率为30%左右,即目标紧固力与螺杆初始有效紧固力相对偏差在30%左右,同时螺母松动时螺杆张拉力与螺杆有效紧固力的相对偏差接近20%,该部分10%偏差是由于拉伸器与构件间存在一定的间隙导致。另外超声测量也存在误差,实际螺杆分为无应力段和两螺母之间的有应力段,在实际测量螺杆时超声传播应该为2种速度,但是目前超声法均采用平均速度来进行测量,因此测量结果存在偏差。

(4)拉拔超声法检测值(拐点处)与螺杆有效紧固力的相对偏差为15%左右,考虑拉拔超声法的测量仪器相对误差为5%左右,为了结构安全,综合考虑拉拔超声法的检测值应当除以1.1~1.2的系数进行折减。相关文献^[2]表明,拉拔法相对误差为10%~20%,且拉拔超声法的最大相对误差可达18%^[18],由本文分析可知,其主要误差是由于紧固段的紧固力变化导致,并非人为误差以及螺母界面粗糙度造成,同时进一步表明1.1~1.2折减系数的可靠性。

4 结 语

(1)螺杆紧固力在拉拔法检测过程中会缓慢增长,当螺母松动时,紧固力和张拉力随着张拉力的增长同步增加。

(2)拉拔超声法可以间接判断螺母的松动进而识别螺杆有效紧固力,无论是声时差还是螺杆伸长量斜率突变点位置处的张拉力都与螺母松动时瞬时紧固力相近,因此二者皆可作为螺杆紧固力检测的指标量。

(3)与拉拔法相似,拉拔超声法识别的螺杆紧固力不是检测前螺杆紧固力,其误差率与不同的目标紧固力有关,其识别的紧固力比实际有效紧固力高10%~20%。

(4)拉拔法主要误差是由于紧固段的紧固力变化导致,并非人为误差以及螺母界面粗糙度造成,建议对拉拔法检测结果除以1.1~1.2的系数进行折减,可得到真实的有效紧固力。

(5)本文虽在特定螺杆上取得进展,但存在一定局限性。主要表现在试验条件与实际施工环境的差异,如未充分考虑温度、湿度及主缆等因素对结果的影响。此外,本文主要针对MJ45及MJ56螺杆,对于不同材质、尺寸和强度等级的螺杆,其适用性和普适性需要进一步验证。因此提出的1.1~1.2检测折减系数虽有助于减少误差,但误差具体来源仍需深入分析。未来研究需在以上几个方面进行拓展和深化。

参考文献:

References:

- [1] 张鹏飞. 悬索桥索夹螺杆预紧力下降原因分析与预防性养护对策[J]. 公路, 2019, 64(2): 101-105.
ZHANG Peng-fei. Cause analysis and preventive maintenance countermeasures of pre-tightening force reduction of cable clamp screw of suspension bridge[J]. Highway, 2019, 64(2): 101-105.
- [2] 唐亮, 王熠, 崔冰, 等. 悬索桥索夹螺杆应力无损检测研究[J]. 公路, 2015, 60(10): 125-129.
TANG Liang, WANG Yi, CUI Bing, et al. Study on nondestructive testing of cable clamp screw stress of suspension bridge [J]. Highway, 2015, 60(10): 125-129.
- [3] 张俊, 顾临怡, 钱筱林, 等. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 216-220.
ZHANG Jun, GU Lin-yi, QIAN Xiao-lin, et al. Ultrasonic measurement of high strength bolt axial tension in steel construction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 216-220.
- [4] JHANG K Y, QUAN H H, HA J, et al. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement [J]. Ultrasonics, 2006, 44(S1): 1339-1342.
- [5] 丁旭, 武新军. 在役螺栓轴力电磁超声测量系统的研制[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 48-52, 64.
DING Xu, WU Xin-jun. Development of EMAT based axial load measurement system for in-service bolts [J]. Nondestructive Testing Technologing, 2016, 38(6): 48-52, 64.
- [6] 徐春广, 李焕新, 王俊峰, 等. 残余应力的超声横纵波检测方法[J]. 声学学报, 2017, 42(2): 195-204.
XU Chun-guang, LI Huan-xin, WANG Jun-feng, et al. Ultrasonic shear and longitudinal wave testing method of residual stress[J]. Acta Acustica, 2017, 42(2): 195-204.

- [7] 何星亮,陈平,刘华强.基于超声模式转换的螺栓轴向应力测量方法[J].振动与冲击,2021,40(21):201-206.
HE Xing-liang, CHEN Ping, LIU Hua-qiang. Measurement method of bolt axial stress based on ultrasonic mode conversion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 201-206.
- [8] 刘家斌,王雪梅,倪文波.螺栓轴向应力-超声波渡越时间自动标定系统研究[J].中国测试,2020,46(3):91-96.
LIU Jia-bin, WANG Xue-mei, NI Wen-bo. Research on automatic calibration system of bolt axial stress-ultrasonic time of flight[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(3): 91-96.
- [9] 胡可宁,陈义,伊建军,等.悬索桥索夹螺杆轴力超声检测系统的研制[J].公路工程,2023,48(1):55-59.
HU Ke-ning, CHEN Yi, YI Jian-jun, et al. R & D of ultrasonic testing system for axial force of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. Highway Engineering, 2023, 48(1): 55-59.
- [10] 贾雪,王雪梅,甘文成,等.声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J].中国测试,2018,44(3):23-27.
JIA Xue, WANG Xue-mei, GAN Wen-cheng, et al. Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(3): 23-27.
- [11] 伊建军,彭旭民,王波,等.悬索桥索夹螺杆轴力超声检测技术[J].桥梁建设,2019,49(增1):68-73.
YI Jian-jun, PENG Xu-min, WANG Bo, et al. Ultrasonic testing technology for axial force of cable clamp screw of suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(S1): 68-73.
- [12] 伊建军,高天,荆国强,等.悬索桥已紧固索夹螺杆轴力超声纵波测量方法[J].桥梁建设,2021,51(6):39-44.
YI Jian-jun, GAO Tian, JING Guo-qiang, et al. Ultrasonic longitudinal wave inspection method for axial forces of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 39-44.
- [13] SUN Q C, YUAN B, MU X K, et al. Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt[J]. Smart Material Structures, 2019, 28(5): 055005.
- [14] LIU Y M, LIU E X, CHEN Y L, et al. Measurement of fastening force using dry-coupled ultrasonic waves[J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106178.
- [15] 陈鑫,朱劲松,叶仲韬,等.基于高斯回波包络模型的悬索桥索夹螺杆轴力识别[J].桥梁建设,2021,51(3):56-61.
CHEN Xin, ZHU Jin-song, YE Zhong-tao, et al. Axial load identification for cable clamp bolts in suspension bridge based on Gaussian echo envelop model[J]. Bridge Construction, 2021, 51(3): 56-61.
- [16] 潘勤学,常梅乐,潘瑞鹏,等.螺栓轴向应力的非线性超声检测技术研究[J].机械工程学报,2021,57(22):88-95.
PAN Qin-xue, CHANG Mei-le, PAN Rui-peng, et al. Research on nonlinear ultrasonic testing technology of bolt axial stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 88-95.
- [17] 严勇,刘楚达.风电螺栓轴向应力超声测量标定实验研究[J].应用声学,2021,40(4):594-601.
YAN Yong, LIU Chu-da. Experimental study on ultrasonic measurement and calibration of axial stress of wind turbine bolt[J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(4): 594-601.
- [18] 蔡依花,陶思雨,郑晓东,等.超声纵波法测量索夹螺杆轴力的误差分析[J].公路,2023,68(1):141-147.
CAI Yi-hua, TAO Si-yu, ZHENG Xiao-dong, et al. Error analysis of axial force of cable clamp screw by ultrasonic longitudinal wave method[J]. Highway, 2023, 68(1): 141-147.
- [19] 陈鑫,朱劲松,叶仲韬,等.悬索桥索夹螺杆轴力超声识别的影响因素分析及应用[J].工程科学与技术,2021,53(6):142-147.
CHEN Xin, ZHU Jin-song, YE Zhong-tao, et al. Influence factor analysis and application of ultrasonic method for identifying cable clamp bolt axial force in suspension bridge[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 142-147.
- [20] HUGHES D S, KELLY J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Physical Review, 1953, 92(5): 1145-1149.
- [21] 周勇军,贾利强,杨帆,等.考虑主缆镀锌层蠕变的索夹螺杆紧固力损失预测研究[J].中国公路学报,2024,37(7):157-167.
ZHOU Yong-jun, JIA Li-qiang, YANG Fan, et al. Research on preload loss prediction of clamp bolt considering cable creep of galvanized layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 157-167.