

# 螺栓装配预紧力测量方法分析

于爱军 丁贺 杨传朋 张朝阳

(徐州徐工挖掘机械有限公司 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 高强度螺栓在工程机械中被广泛应用, 主要通过施加准确的预紧力保证螺栓紧固质量, 螺栓装机后的预紧力检测较为困难, 利用测量伸长量间接检测预紧力的方法, 基本不改变螺栓装配状态, 精度较高; 但是如何标定螺栓伸长量与预紧力的关系式难度较大。本文介绍在台架试验条件下, 通过超声波法测量螺栓在装配后的伸长量, 采用螺栓紧固检测系统检测预紧力, 标定螺栓预紧力-伸长量关系式, 然后采用超声波法检测螺栓实际装机伸长量, 计算螺栓装配实际预紧力。

**关键词:** 高强度螺栓; 预紧力; 超声波; 伸长量; 弹性模量

## 0 引言

在挖掘机装配过程中, 驱动轮等重要部位均需使用到高强度螺栓, 保证螺栓预紧力是提高紧固质量的有效手段。本文介绍在台架试验条件下, 通过超声波法测量螺栓在装配后的伸长量, 采用螺栓紧固检测系统检测预紧力, 标定螺栓预紧力-伸长量关系式, 然后采用超声波法检测螺栓实际装机伸长量, 计算螺栓装配实际预紧力。

本次标定试验中, 采用常用 M16 螺栓 (10.9 级), 并且对螺栓的不同长度也进行标定。且每个螺栓的两个端面均需磨平, 粗糙度不大于 6.3。试验中通过测量某规格的螺栓在施加预紧力时, 螺栓相对原始长度的伸长量, 并基于预估螺栓材质弹性模量, 计算此伸长量下的预紧力, 并与试验预紧力比对, 当误差  $\leq \pm 3\%$  时, 标定伸长量与预紧力关系方程, 作为装机螺栓预紧力的检测公式; 调整螺栓材质弹性模量值进行计算。

## 1 预紧力 F 的计算公式

螺栓在弹性范围内, 伸长量与预紧力之间的关系为:

$$\delta_s = \Delta l / F \quad (1)$$

式中:

$\Delta l$ ——螺栓伸长量, mm;

$F$ ——预紧力, kN;

$\delta_s$  为弹性模量与横截面积之间的系数:

$$\delta_s = \delta_h + \delta_{sh} + \delta_{ft} + \delta_{et} \quad (2)$$

式中:  $\delta_h$ 、 $\delta_{sh}$ 、 $\delta_{ft}$  和  $\delta_{et}$  分别是螺栓大径、螺栓光杆、螺栓小径和螺栓未旋合部分的系数。

其计算公式分别是:

$$\delta_h = \frac{0.5}{E_s \pi d / 4} \quad (3)$$

$$\delta_{sh} = \frac{l_{sh}}{E_s \pi d_{sh}^2 / 4} \quad (4)$$

$$\delta_{ft} = \frac{l_{ft}}{E_s \pi d_3^2 / 4} \quad (5)$$

$$\delta_{et} = \frac{0.5d}{E_s \pi d_3^2 / 4} + \frac{0.4}{E_s \pi d / 4} \quad (6)$$

式中:

$E_s$ ——弹性模量, MPa;

$d$ ——螺纹外径, mm;

$d_{sh}$ ——光杆直径, mm;

$l_{sh}$ ——光杆长度, mm;

$l_{ft}$ ——螺纹未旋合长度, mm;

$d_3$ ——螺纹小径, mm。

## 2 试验设计

本试验设计专用工装模拟螺栓在挖掘机上的装机条件, 使用 Schatz-Analyse 螺纹紧固件试验分析系统对预紧力进行测量, 使用 MINI-MAX 超声波长测量仪对螺栓的伸长量进行测量。

首先选择与挖掘机上螺纹孔相同的材质进行工装设计, 试验螺母与垫圈均为挖掘机装机物料。一般来说, 按照计算公式, 在同种规格螺栓已经确定的情况下, 弹性模量不再变化,  $\delta_s$  也不会再变化, 此时伸长量  $\Delta l$  和预紧力  $F$  之间呈比例关系。在施加预紧力时, 按照螺栓屈服强度的百分比进行加载。

每个螺栓在试验工装上先通过手动预紧, 再使用带套筒的扭矩扳手终紧, Schatz-Analyse 螺纹紧固件试验分析系统对预紧力进行测量, 系统由于受到工装安装误差及设备误差影响, 测量误差约  $\pm 3\%$ 。在使用超声波

仪器时，由于受到螺栓头部、螺母及工装的影响，再加上测量仪器本身的影响，其伸长量的总测量误差为±3%。根据经验，一般国内工程机械连接螺栓预紧力为该螺栓材料屈服强度的50%~70%，本试验使用定扭扳手一次性将预紧力缓慢加至螺栓屈服拉力的50%~60%，预紧力值如表1所示，通过实时观测螺纹紧固件试验分析系统的示数控制加载。

每次选择一颗螺栓进行试验，每颗螺栓都是单独一

表1 螺栓的屈服拉力和预紧力范围

螺栓规格	M16
屈服拉力/kN	147
螺栓预紧力范围/kN	73.5 ~ 88.2

次性加载，不允许拆卸后重新加载，故每颗螺栓的测试结果互不影响，均能单独测量出伸长量并计算出预紧力值，测量过程如图所示。在材料的屈服强度以内，螺栓为弹性形变，故式(1)是适用的。试验的测量数据如表2所示。

螺栓测量完后，拆卸并完成光杆长度、光杆直径、

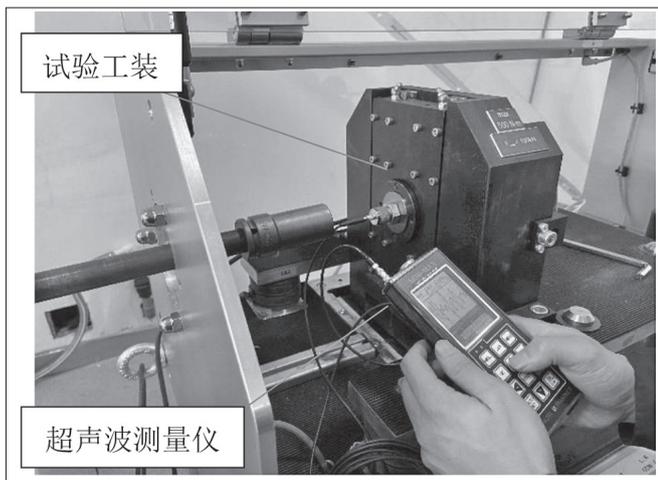


图 超声波仪器测量伸长量

未旋入长度等参数，如表3所示。

### 3 预紧力计算

根据螺栓材料，初步设定螺栓的弹性模量  $E_s=260000\text{MPa}$ ，根据式(3)、(4)、(5)、(6)可以得到M16×50螺栓相关系数，如表4所示。

根据式(1)能够得到计算预紧力和实际预紧力之间的误差值，如表5所示。

试验紧固4颗螺栓，逐级增大或减小螺栓弹性模量，计算预紧力与实际预紧力之间的误差，如表6所示。

表2 M16×50数据记录表

螺栓号	声速	螺栓长度/mm	伸长量/mm	预紧力/kN
1	5854.8	59.51	0.1074	85.92
		59.47	0.1068	
		59.47	0.1066	
平均值		59.48	0.1069	
2	5854.8	59.58	0.104	83.26
		59.59	0.1038	
		59.56	0.1034	
平均值		59.57	0.1037	
3	5854.8	59.55	0.1089	81.3
		59.53	0.1089	
		59.63	0.1088	
平均值		59.57	0.1088	
4	5854.8	59.57	0.1001	81.8
		59.55	0.1001	
		59.56	0.1001	
平均值		59.56	0.1001	
5	5854.8	59.63	0.1004	81.97
		59.59	0.1005	
		59.55	0.1004	
平均值		59.59	0.1004	

表3 螺栓尺寸参数

公称直径 $d$	光杆长度 $l_{sh}/\text{mm}$	光杆直径 $d_{sh}/\text{mm}$	螺纹内径 $d_3/\text{mm}$
16	0	14	13.84
22	51.31	21.81	18.97

表4 M16×50螺栓相关系数计算表

参数	计算数值
$\delta_h$	$1.56 \times 10^{-7}$
$\delta_{sh}$	0
$\delta_{et}$	$3.26 \times 10^{-7}$
$\delta_{ft}$	$7.69 \times 10^{-7}$
$\delta_s$	$1.25 \times 10^{-6}$

表5 计算预紧力及误差

螺栓号	计算预紧力	误差
1	85.5	0.44
2	82.9	0.34
3	87.1	7.11
4	80.1	2.11
5	80.3	1.99

由以上的误差分析可以知道，当弹性模量在表6 1~4号螺栓预紧力误差

弹性模量	1号	2号	3号	4号
256000	1.98	1.87	3.62	3.50
257000	1.59	1.49	3.24	3.12
258000	1.21	1.11	2.86	2.74
259000	0.83	0.72	2.49	2.37
260000	0.45	0.34	2.11	1.99
261000	0.06	0.04	1.74	1.61
262000	0.31	0.42	1.36	1.24
263000	0.7	0.81	0.98	0.86
264000	1.08	1.19	0.61	0.48
265000	1.46	1.57	0.23	0.11

261000MPa左右时，每颗螺栓的计算预紧力与实际施加的预紧力之间的误差能够达到最小的范围。因此可以选择261000MPa作为计算预紧力的基数值，将 $\delta_s$ 计算出来，最后代入式(1)，便可以计算得到装配过程中的实际预紧力。

经计算，M16×50螺栓预紧力与伸长量的关系为：

$$F = 800.33 \cdot \Delta l(\text{kN}) \tag{7}$$

利用式(7)检测某机型挖掘机驱动轮M16×50螺

栓预紧力为89.7kN，与实验室检测结果相近。

### 4 结语

螺栓预紧力检测采用此种预紧力标定方法，能够快速、准确地得到螺栓预紧力-伸长量关系式，通过装机检测螺栓伸长量，计算出螺栓预紧力，有效保证了螺栓装配质量。

### 参考文献：

[1] 杨可桢,程光蕴,李仲生,钱瑞明,机械设计基础(第六版)[M].北京:高等教育出版社,2013.

[2] 杜刚民,李东风,曹树林,冉启芳.螺栓轴向应力超声测量技术[J].无损检测,2006(01):20-22.

[3] 苏凤宇,王大为,寇春荣.浅析一种螺栓预紧力检测的新方法在风力发电机组中的应用[J].农村牧区机械化,2011(02):30-40.

[4] 李法林,李树林.用超声波技术测量螺栓拉伸[J].国外舰船技术(内燃机类),1980(07):26-32.

[5] 初泰安.螺栓拧紧方法与预紧力控制[J].化工设备与管道,2005(03):8-10.

