

# 不同因素对高锁螺母锁紧力矩影响的研究<sup>\*</sup>

吴南星<sup>1</sup>, 鲍星<sup>1</sup>, 徐梅香<sup>2</sup>

(1. 景德镇陶瓷学院机械电子工程学院, 景德镇 333403;

2. 中国直升机设计研究所, 景德镇 333403)

**[摘要]** 在直升机的实际装配过程中,一种高锁螺母会与多种高锁螺栓进行装配,而高锁螺母的锁紧力矩与稳定性不能保证。首先,从螺纹副精度、润滑条件、收口尺寸、材料、表面处理等方面对高锁螺母的锁紧力矩变化规律进行了定性分析。然后,通过试验的方法研究了不同材料、润滑条件及表面处理情况下,高锁螺母锁紧力矩的变化。试验结果表明:同规格下,硬度越大的材料,锁紧力矩愈大,稳定性愈差;在同样条件下,有润滑的高锁螺母配合,其锁紧力矩愈小,稳定性有明显加强;不同表面处理对高锁螺母的锁紧力矩的大小有一定影响,但稳定性变化很小。

**关键词:** 高锁螺母; 锁紧力矩; 材料; 润滑条件; 表面处理

## Influence of Some Different Factors on Locking Torque of Hi-Lock Nut

WU Nanxing<sup>1</sup>, BAO Xing<sup>1</sup>, XU Meixiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China;

2. China Helicopter Design and Development Institute, Jingdezhen 333403, China)

**[ABSTRACT]** In the actual assembly process of a helicopter, one kind of hi-lock nut will match with a variety of hi-lock bolts, which cause locking torque of hi-lock nut not to be guaranteed. Firstly, parameters that may affect the locking torque of hi-lock nut are qualitatively analyzed which takes into consideration screw precision, lubrication conditions, reducing values, materials, surface treatment. Then the test is done which in terms of variation of locking torque under different materials, different lubrication conditions and different surface treatments. The result of test shows the harder the material is, the greater the tightening torque is and the worse the stability is. Under the same condition, the locking torque becomes smaller and the stability is significantly enhanced when the nuts are with lubrication. And different surface treatments have effect on locking torque and change the stability a little.

**Keywords:** Hi-lock nut; Locking torque; Material; Lubrication condition; Surface treatment

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.103

高锁螺母是飞机上常用的一种不可拆卸型紧固件,与高锁螺栓配合形成的紧固组件具有自锁、高强度、高抗疲劳性、抗振动、易于安装等特点<sup>[1-3]</sup>。目前,在我国各机种中广泛使用,某型号军机全机采用的不锈钢、铝制高锁螺母及钛合金高锁螺栓就已超越2万件<sup>[4]</sup>。

高锁螺母的关键性能参数有锁紧力矩、拧断力矩、预紧力等。其中,锁紧力矩是高锁螺母自锁及防松性能的重要指标,若锁紧力矩过大,会给飞机装配过程造成困难,严重时会导致连接件涂层损坏,防腐蚀功能失效;若锁紧力矩过小,在飞机飞行过程可能因锁紧力矩不够,导致螺钉受振动脱落,造成严重事故<sup>[5]</sup>。锁紧力矩是依靠高锁螺母内螺纹变形与螺栓装配时挤压摩擦而

产生的。如图1所示,在高锁螺母螺纹部分有液压机进行三点收口,三点在螺母截面上呈120°三角分布。

在飞机实际装配过程中,高锁螺母和高锁螺栓的配合是不固定的,同一种高锁螺母要和多种高锁螺栓进行装配,由于高锁螺栓的材质、表面处理等条件不尽相同,

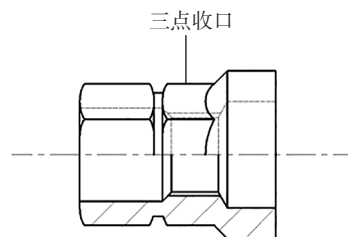


图1 高锁螺母示意图

Fig.1 Schematic of hi-lock nut

<sup>\*</sup> 基金项目: 江西省科技计划项目(20112BBE50016)。

所以其与高锁螺母装配时产生的锁紧力矩也会出现不一致的情况。目前,国内对不同种类的高锁螺栓对同一类高锁螺母锁紧力矩产生的影响的研究鲜见。本文针对不同材质的高锁螺栓、有无润滑条件的高锁螺栓及不同表面处理的高锁螺栓与不锈钢高锁螺母装配产生的锁紧力矩进行研究。

## 1 高锁螺母自锁原理

在高锁螺母中,由于收口部位的螺纹直径变小,在螺母和螺栓装配时,螺母的收口螺纹会再次由于螺栓旋入挤压而产生塑性变形和弹性变形,此时螺栓在锁紧部位会受到弹性恢复力  $F_N$ 。根据锁紧力矩的测量规定<sup>[6]</sup>,锁紧力矩是在内、外螺纹紧固件相对运动过程中且没有轴向力的情况下所测得的力矩,故螺栓在旋入过程不受轴向力。如图2所示,  $F_N$  将分解成沿螺纹齿向的分力  $F_T$  与垂直于螺纹面的正压力  $F$ 。在螺纹接触面上,由压力  $F$  产生螺纹副间的摩擦力,从而在螺栓拧入过程中会产生摩擦力矩。本文根据已有的文献资料<sup>[7]</sup>先推算出正压力  $F$ ,再算出锁紧力矩  $T$ 。

$$F = F_N \cdot \sin \frac{\beta}{2}, \quad (1)$$

式中,  $\beta$  角为牙型倾角。

根据螺纹受力分析<sup>[7]</sup>,锁紧力矩计算如下:

$$T = F \cdot \cos \frac{\beta}{2} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\rho + \lambda), \quad (2)$$

式中,  $d_2$  为螺纹中径;  $\lambda$  为螺纹升角;  $\rho$  为螺纹副的当量摩擦角,  $\operatorname{tg} \rho$  为螺纹副的当量摩擦系数,  $\operatorname{tg} \rho = f' / \cos \frac{\beta}{2}$ ,  $f'$  为螺纹副间的摩擦系数。

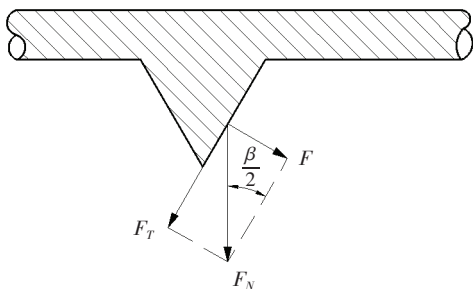


图2 高锁螺母螺纹受力图

Fig.2 Force diagram of hi-lock nut

## 2 锁紧力矩的影响因素

### 2.1 螺纹副精度

螺纹副的配合精度对锁紧力矩影响很大。如果螺栓螺纹的精度低,则可能造成锁紧力矩不稳定<sup>[8]</sup>。

### 2.2 润滑条件

润滑对于高锁螺母的锁紧力矩影响十分显著。如

果没有润滑,螺母的锁紧力矩难以控制,进而影响锁紧性能和螺母的放松效果。一般高锁螺栓在装配时都涂有一层干膜润滑剂,如十六醇或者二硫化钼,以控制螺纹副的摩擦系数,并避免螺纹表面涂层或镀层因干摩擦而划伤。

### 2.3 收口尺寸

螺纹部分的收口尺寸控制十分关键,它是确定锁紧力矩大小的重要指标,有专门的收口机和收口模具来保证<sup>[5]</sup>。

### 2.4 材质

由于高锁螺母的收口部位在与高锁螺栓装配时会产生塑性和弹性变形,这时材料的硬度高低,模量的大小,决定了弹性恢复力大小,也间接影响到了高锁螺母的锁紧力矩。

### 2.5 表面处理

由于航空行业的特殊性,高锁螺栓一般都要经过有防腐性能的表面处理,例如涂覆铝、阳极化、镀镉镀锌等。这些表面处理改变了高锁螺栓表面刚度和粗糙度,也会影响高锁螺母的锁紧性能。

## 3 试验

### 3.1 试验件

试验件为某型直升机所用的高锁螺母与高锁螺栓。螺母材料为 302HQ 不锈钢,螺纹部位直径为 4.826mm,螺纹按 AS8879D,螺纹倒角按 GJB52。

试验的高锁螺栓分为 4 种:分别是 40CrNiMoA 经过镀镉钝化、十六醇润滑, Ti-6Al-4V 经过阳极化、十六醇润滑, Ti-6Al-4V 经过涂覆铝、十六醇润滑, Ti-6Al-4V 经过阳极化。

### 3.2 试验

高锁螺母自锁力矩试验是按照 GJB 715.14-1990 的要求在 CTT1202 扭转试验机上进行试验。扭转试验机由扭转机和控制计算机组成。扭转机上装有传感器,可以实时传输扭矩数值到控制机内,控制计算机主要控制扭转过程,包括扭转的速率、角度等。

高锁螺母在安装时,由于与高锁螺栓相互挤压,收口的螺纹部位会产生变形,因此高锁螺母的夹具需要专门制作,避免套住高锁螺母的螺纹部分,对锁紧力矩的测试产生影响。

在试验中,为避免高锁螺栓拧入时产生偏心弯曲现象,将高锁螺栓预先旋入高锁螺母内  $40^\circ \sim 90^\circ$ ,再将高锁螺母固定在专门夹具上,高锁螺栓也在扭转试验机上安装好,安装完成图如图 3 所示。为减小因螺纹摩擦引起螺纹面摩擦系数的变化,导致试验数据不精确的影响,每个螺母只与一个高锁螺栓进行拧进拧出配合试验。

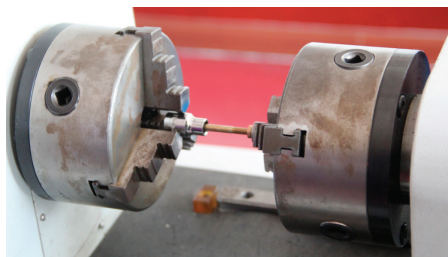


图3 试件安装图

Fig.3 Installation diagram of testing pieces

根据规定<sup>[6]</sup>高锁螺栓旋入高锁螺母后,应保证高锁螺栓伸出高锁螺母的锁紧区最少一个倒角的长度。按照规定,运行扭矩试验机,扭转机上的传感器将实时测得的扭矩传递到控制计算机上,计算机将自动寻找到最大的扭矩值并予以记录。

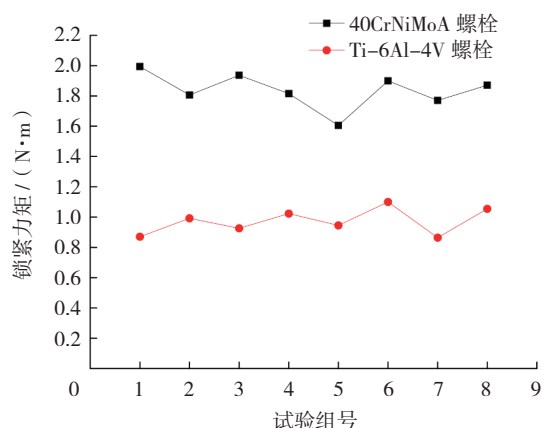
## 4 试验结果

### 4.1 不同材质高锁螺栓对高锁螺母锁紧力矩的影响

本对照组用 40CrNiMoA 材质的螺栓及 Ti-6Al-4V 材质的螺栓与高锁螺母配合做试验,总共做了 20 组试验,任意选出 8 组数据如表 1 所示。

表1 不同材质下试验结果对比

试验组号	40CrNiMoA 螺栓的锁紧力矩 / (N·m)	Ti-6Al-4V 螺栓的锁紧力矩 / (N·m)
1	1.994	0.870
2	1.806	0.992
3	1.936	0.926
4	1.815	1.023
5	1.605	0.945
6	1.899	1.100
7	1.770	0.864
8	1.871	1.054

图4 不同材料的高锁螺栓与高锁螺母配合的锁紧力矩  
Fig.4 Locking torque of different materials

根据表 1 得图 4。由图 4 可以明显看出高锁螺母与 40CrNiMoA 螺栓配合的锁紧力矩明显大于与 Ti-6Al-4V 螺栓配合的锁紧力矩,相差几乎有一倍之多。

试验所用 40CrNiMoA 螺栓材料经过 900℃ 正火、850℃ 油淬、500℃ 回火后,硬度约为 38.5~41.5HRC,而 Ti-6Al-4V 螺栓材料经过固溶时效处理后,硬度约为 35.2~38.2HRC,明显小于 40CrNiMoA。而 40CrNiMoA 的弹性模量也要高于 Ti-6Al-4V,所以在装配时与 40CrNiMoA 螺栓匹配的高锁螺母弹性变形更大,从而导致弹性恢复力  $F_N$  值变大,锁紧力矩自然变得更高。

再由计算可得 40CrNiMoA 螺栓与高锁螺母配合时,锁紧力矩的标准差为 0.119,而 Ti-6Al-4V 螺栓与高锁螺母配合的锁紧力矩标准差为 0.079,两个标准差之间的差值有 0.04。一定程度上反映了:硬度小的螺栓与高锁螺母配合时,锁紧力矩值愈稳定。

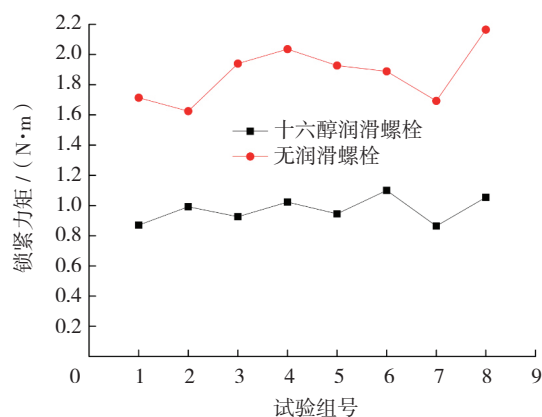
### 4.2 润滑对高锁螺栓锁紧力矩的影响

本对照组用十六醇润滑的 Ti-6Al-4V 螺栓及无润滑的 Ti-6Al-4V 螺栓与高锁螺母配合做试验,总共做了 20 组试验,任意选出 8 组数据如表 2 所示。

由表 2 可得图 5。由图 5 可见,无润滑 Ti-6Al-4V

表2 不同润滑条件下试验结果对比

试验组号	十六醇润滑 Ti-6Al-4V 螺栓锁紧力矩 / (N·m)	无润滑 Ti-6Al-4V 螺栓锁紧力矩 / (N·m)
1	0.870	1.714
2	0.992	1.625
3	0.926	1.940
4	1.023	2.036
5	0.945	1.927
6	1.100	1.889
7	0.864	1.693
8	1.054	2.165

图5 不同润滑条件的高锁螺栓与高锁螺母配合的锁紧力矩  
Fig.5 Locking torque under different lubrication conditions

螺栓与高锁螺母配合的锁紧力矩要高于十六醇润滑螺栓配合的锁紧力矩。这是由于高锁螺栓与高锁螺母配合时,无润滑的螺纹副间的摩擦系数要大于有润滑的螺纹副摩擦系数。再计算标准差,十六醇润滑螺栓锁紧力矩的标准差有 0.079,无润滑螺栓的锁紧力矩标准差达到 0.143,这说明十六醇润滑螺栓与高锁螺母配合的锁紧性能更加稳定。

#### 4.3 不同表面处理的高锁螺栓对高锁螺母锁紧力矩的影响

本对照组用涂覆铝十六醇润滑的 Ti-6Al-4V 螺栓及阳极化十六醇润滑的 Ti-6Al-4V 螺栓与高锁螺母配合做试验。试验前对表面处理前的涂覆铝螺栓进行尺寸调整,保证表面处理两种螺栓尺寸公差的一致性。

同样做了 20 组试验,任选其中 8 组如表 3 所示。由表 3 可得图 6。由图 6 可知,涂覆铝 Ti-6Al-4V 螺栓与高锁螺母配合时产生的锁紧力矩要比阳极化 Ti-6Al-4V 螺栓的锁紧力矩大一些。说明不同的表面处理对高锁螺母的锁紧力矩也会产生影响。

计算试验数据的标准差,得出涂覆铝螺栓锁紧力矩标准差为 0.096,略大于阳极化螺栓标准差 0.079,说明

表3 不同表面处理下的试验结果对比

试验组号	阳极化 Ti-6Al-4V 螺栓的锁紧力矩 / (N·m)	涂覆铝 Ti-6Al-4V 螺栓的锁紧力矩 / (N·m)
1	0.870	1.320
2	0.992	1.199
3	0.926	1.445
4	1.023	1.315
5	0.945	1.188
6	1.100	1.338
7	0.864	1.347
8	1.054	1.448

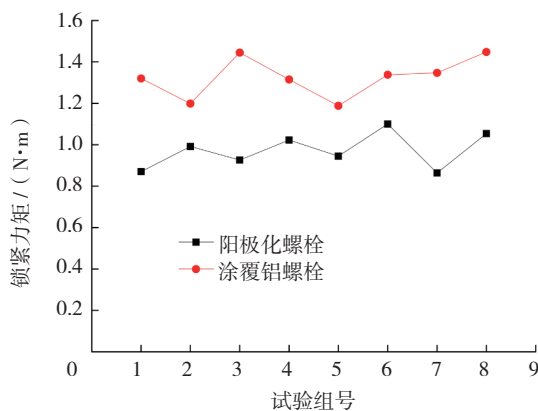


图6 不同表面处理的高锁螺栓与高锁螺母配合的锁紧力矩  
Fig.6 Locking torque under different surface treatments

这两种表面处理对于高锁螺母的锁紧性能稳定性影响不大。

## 5 结论

(1) 高锁螺母的锁紧力矩受到螺纹副精度、润滑条件、收口尺寸、材料、表面处理等因素的共同影响。

(2) 在同等条件下,高锁螺母的锁紧力矩会随着材料的硬度减小、润滑条件的改善而减小,且锁紧力矩的稳定性会随之提高。在同等条件下,高锁螺母的锁紧力矩会因螺栓表面处理的不同而改变,但其稳定性变化不大。

## 参考文献

[1] 徐梅香,胡建清,韩志忠. 高锁螺母、高锁螺栓的国产化研制[J]. 直升机技术, 2009(3):94-97.

XU Meixiang, HU Jianqing, HAN Zhizhong. Research and manufacture of civil hi-lock pins and nuts[J]. Helicopter Technology, 2009(3): 94-97.

[2] 崔明慧. 波音 737 飞机紧固件的应用研究[J]. 航空制造技术, 2013(13):96-99.

CUI Minghui. Study on the application of the Boeing 737 aircraft fasteners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13): 96-99.

[3] 刘风雷,刘丹,刘建光. 复合材料结构用紧固件及机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2012(1/2):102-104.

LIU Fenglei, LIU Dan, LIU Jianguang. Fastener and mechanical connection technology for composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(1/2):102-104.

[4] 侯崑,张辉英. 英制轻型钛合金高锁螺栓鉴定试验探讨[J]. 航空标准化与质量, 2008(5):49-53.

HOU Kun, ZHANG Huiying. To test the high lock bolt inch light titanium alloy[J]. Aviation Standardization and Quality, 2008(5): 49-53.

[5] 刘仁志,吴海荣,王华明. TC16 钛合金六角自锁螺母加工技术研究[J]. 飞机设计, 2011(6):51-54.

LIU Renzhi, WU Hairong, WANG Huaming. Study on processing technology of six angle self locking nut of TC16 titanium alloy[J]. Aircraft Design, 2011(6):51-54.

[6] 航空航天工业部. GJB715.14-1990 紧固件试验方法—力矩[S]. 北京: 航空航天工业部, 1990.

Ministry of Aeronautics and Astronautics. GJB715.14-1990 Fastener test methods—torque[S]. Beijing: Ministry of Aeronautics and Astronautics, 1990.

[7] 中国航空工业总公司. HB/Z 251-1993 螺栓连接拧紧力矩与轴向力的关系[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1993.

Aviation Industry Corporation of China. HB/Z 251-1993 The relationship between tightening torque and axial force in the bolt connection[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1993.

[8] 孙小炎. 关于航天型号用自锁螺母标准综述[J]. 航天标准化, 1999(4):17-22.

SUN Xiaoyan. A review on the standard of self-locking nuts for aerospace models[J]. Aerospace Standardization, 1999(4): 17-22.

(责编 大漠)