

## 英制轻型钛合金高锁螺栓的国产化研究

## Domestic Manufacturing of British System Light-Weight Titanium Alloy Bolt

北京航空制造工程研究所 赵庆云 刘风雷 任 翀 徐鑫良 刘 丹 于 雷

**[摘要]** 介绍了英制轻型钛合金高锁螺栓的结构特点,重点分析了其制造加工工艺难点,短螺纹收尾强化技术和考虑涂层的螺纹尺寸变化,并对研制件的性能进行了评估。

**关键词:** 钛合金 轻型高锁螺栓 国产化 研制

**[ABSTRACT]** The structure features of light-weight Ti-alloy bolt is introduced, and the manufacturing process and the technical difficulties are discussed in details. Detailed qualification tests are carried out.

**Keywords:** Ti-alloy Light-weight bolt Domestic manufacturing Development

随着航空工业的发展,复合材料的使用日益增加。由于钛合金具有强度高、重量轻、与复合材料电位匹配和防腐等性能,因此,钛合金紧固件越来越多地应用于航空产品中。而轻型钛合金高锁螺栓所具有的减重,抗疲劳等优点,使得其在飞机上得到了大量采用,一架波音 747 飞机上使用的英制轻型钛合金高锁螺栓约为 7 万件,某型号军机上也使用了约 2 万件<sup>[1-2]</sup>。

## 1 轻型钛合金高锁螺栓结构特点

钛高锁螺栓是一种用于飞机结构的双面安装单面连接的钛紧固件,有平圆头抗拉、平圆头抗剪、沉头抗拉、沉头抗剪 4 种头型,与相应的抗拉或抗剪高锁螺母配合使用。相对于普通螺栓螺母的连接,轻型高锁螺栓和高锁螺母的连接具有重量轻、疲劳性能好、自锁能力高等特点,且能保证较高的稳定预紧力。这种高锁螺栓具有较短的收尾,由于螺纹收尾缩短了,而与之配套的高锁螺母的高度也降低了,见图 1,因此安装后的重量大

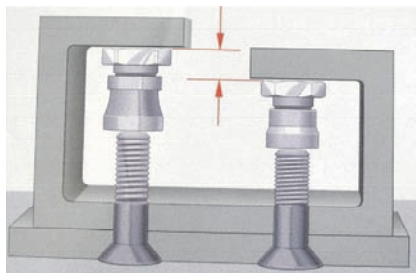


图1 轻型高锁螺栓装配螺母高度降低

Fig.1 Light-weight Ti-alloy bolt assembled with a lower nut

大降低,与普通高锁螺栓相比,可平均减轻 13%,因此,在保证强度性能的同时,对飞机减重具有积极的意义。

为便于金属结构安装,解决钛合金与铝合金相连接时因电位差大而可能产生的电化学腐蚀问题,螺栓表面需涂覆铝涂层,这样可减少螺栓湿装配,节省密封胶,缩短安装周期。

## 2 国产化目标

由于英制轻型钛合金高锁螺栓所具有的减重、单面安装、疲劳性能好等特点,其在国内范围内的军、民机制造上得到了大量应用,实现英制轻型钛合金高锁螺栓的国产化是十分迫切的。研制件需满足相应的产品标准和技术规范的要求,具体机械性能以光杆标准型为例,要求如表 1 所示。

表1 英制轻型钛合金高锁螺栓性能要求

规格代码	机械性能	双剪力 /kN	抗拉力 /kN			疲劳
			平头抗剪型	沉头抗剪型	抗拉型	
-5		≥ 17.84	≥ 8.63	≥ 7.04	≥ 9.69	单个试样的疲劳循环次数不小于 45 000 次,全部试样的平均疲劳循环次数不小于 65 000,连续试验疲劳循环次数不超过 130 000
-6		≥ 23.94	≥ 11.12	≥ 8.90	≥ 14.14	
-8		≥ 41.38	≥ 19.13	≥ 16.46	≥ 25.87	
-10		≥ 64.96	≥ 28.01	≥ 22.25	≥ 40.90	
-12		≥ 93.43	≥ 38.71	≥ 32.04	≥ 62.23	

## 3 加工工艺

研制的轻型钛合金高锁螺栓选用材料为进口 Ti-6Al-4V 丝材,材料需满足 AMS4967 标准的要求。与航标高锁螺栓类似,主要制造工艺路线为:头部锻锻—固溶时效处理—螺纹滚压—机械加工—表面涂覆—性能试验。下面仅就与航标高锁螺栓不同的加工工艺进行探讨。

### 3.1 螺纹收尾及强化

国产 MJ 螺纹,按 GJB3.2-85《MJ 螺纹首尾》要求,采用 2P 的收尾,而轻型钛合金高锁螺栓螺纹收尾是 1.5P。在使用过程中,第一扣螺纹就要参与受力,因此,轻型钛合金高锁螺栓螺纹收尾为特殊结构(见图 2),需要对过渡区进行结构尺寸设计。采用专用技术加工此部

位并对此部位进行强化。通过强化工艺试验和对强化后的最终成形件进行性能试验,并将强化量和性能试验结果对比,最终确定最佳的可用于批生产的加工方法和加工参数。试验证明,选择合适的滚压参数,经过强化的轻型钛合金高锁螺栓的疲劳试验均可满足标准要求。

### 3.2 螺纹及考虑涂层带来的厚度增加

英制轻型高锁螺栓所采用的为 ANSIPASME B1. 1-2001《统一英制螺纹》(简称为 ASME B1. 1) 标准,具如图 2 和表 2,除 -5 规格的为粗牙螺纹,其余均为细牙螺纹。与公制 MJ 螺纹相同,螺纹为 60° 牙型,螺纹大

值,可以看出,涂覆后螺纹的中径增加了 4 倍的涂层厚度。这样,涂前的螺纹中径公差相对于涂后更严了,小了 0.03mm。

为了使涂前的螺纹尺寸满足要求,需订购涂前螺纹环规,并进行滚丝试验,测量螺纹的大径、中径,涂前螺纹环规检测通止,最终确定涂前的滚丝毛坯尺寸。

即便这样,涂覆步骤的粗心也可能导致不均匀的涂层厚度,涂覆工艺的不当控制可能引起涂层的太快沉积和在螺纹上的不均匀堆积。因此,涂覆工艺的严格控制对生产出满足规范要求的紧固件是非常重要的。

### 3.3 铝涂层

根据产品标准要求,需要对试件表面涂覆铝涂层,一方面涂层防止在高锁螺栓紧固系统的安装过程中出现划伤,另一方面提供优良的耐腐蚀性能和耐高温性能(230℃)。酚醛树脂基铝涂层通过喷涂及高温固

化方式达到最终性能要求。研究过程中对涂层涂料配方和涂覆工艺进行了研究,通过对涂覆后的试件进行外观、涂层厚度、结合力、耐流体性、耐脱漆剂、脆性、防腐性、耐热性、装配压力等试验检测,试验结果全部满足标准要求,证明了涂层的合理性。

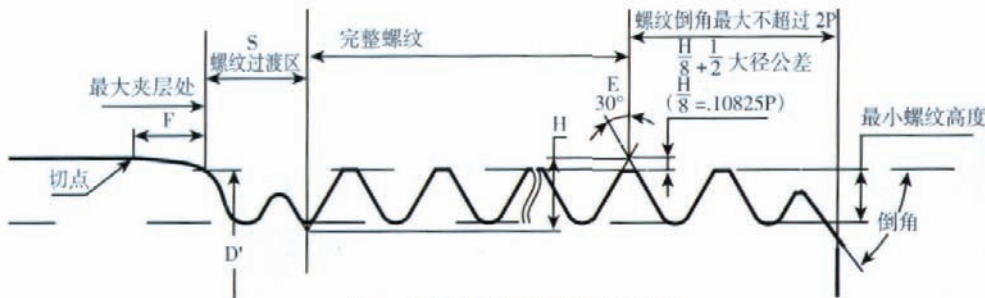


图2 轻型钛合金高锁螺栓螺纹收尾  
Fig.2 Thread runoff of light-weight Ti-alloy bolt

表2 英制螺纹

代码	-5	-6	-8	-10	-12
螺纹规格	8-32UN JC-3A	10-32UN JF-3A	1/4-28UN JF-3A	5/16-24UN JF-3A	3/8-24UN JF-3A
	修正	修正	修正	修正	修正
螺纹大径/mm	3.9878	4.5974	6.1214	7.6708	9.2456
	4.0513	4.6736	6.1976	7.7724	9.3472
螺距/mm	0.7938	0.7938	0.9070	1.0584	1.0584

径采用修正值。公差等级较高,均为 3A 级。

MIL-S-8879 及 H28 手册中对英制螺纹的尺寸有明确的规定,但由于英制轻型高锁螺栓表面带有涂层,因此,螺纹的尺寸需考虑留有涂层的厚度。见图 3 所示,AB 段为涂层厚度,BC 段为涂后中径较涂前的增加

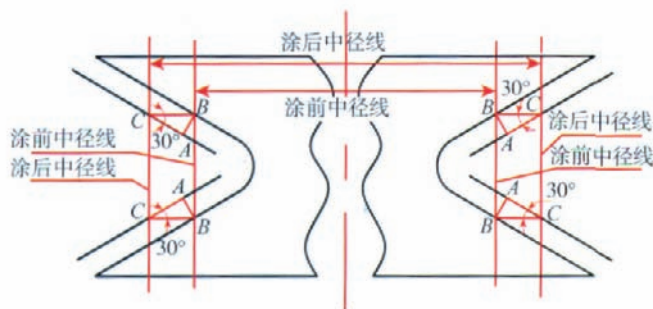


图3 螺纹部位涂层厚度示意图  
Fig.3 Diagram of coating thickness in thread

## 4 研制试件评估

### 4.1 外观尺寸

图 4 为北京航空制造工程研究所研制的英制轻型钛合金高锁螺栓,经检测所有研制件外观、尺寸满足技术规范的要求。



图4 北京航空制造工程研究所研制的英制轻型钛合金高锁螺栓  
Fig.4 British system light-weight Ti-alloy bolt developed by Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute

### 4.2 机械性能试验

轻型钛合金高锁螺栓所要求的机械性能试验项目包含：双剪力、破坏拉力以及拉拉疲劳试验，所有试样为考虑涂层的试样，试验项目的试验方法根据 GJB 715 的要求进行。下面试验结果以平头抗拉型 -5-7、-6-8、-8-11、-10-14、-12-16 进行说明，双剪、抗拉试验取样 7 件，疲劳试验取样为 8 件，所示试验值为取样件数的平均值。

#### (1) 双剪力。

双剪试验依据 GJB715.26 进行，试验结果见图 5 所示，所有规格试件的双剪强度均大于标准规定的理论值要求。

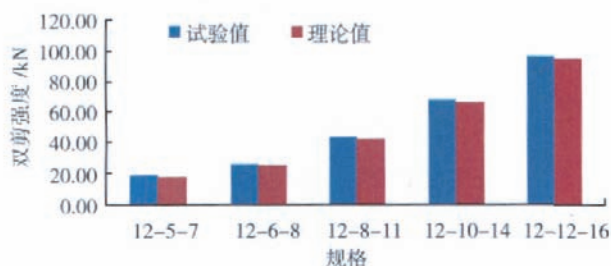


图5 不同规格英制轻型钛合金高锁螺栓的平均双剪强度值  
Fig.5 Average double shear strength of british system light-weight Ti-alloy bolt with different sizes

#### (2) 抗拉力。

拉伸试验依据 GJB715.23 进行，如图 6 所示试验结果，所有试件的拉伸失效载荷均超过标准规定的理论值要求。所有试件失效部位为螺纹。

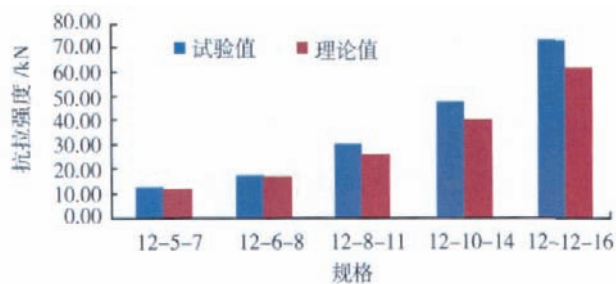


图6 不同规格英制轻型钛合金高锁螺栓的平均拉伸强度值  
Fig.6 Average tensile strength of british system light-weight Ti-alloy bolt with different sizes

#### (3) 拉拉疲劳。

疲劳试验依据 GJB715.30 进行，试验载荷依据产品标准，频率 = 100Hz，最小最大载荷比值  $R=0.1$ 。从图 7 的试验结果来看，12-5-7 规格的螺栓达到  $13 \times 10^4$  循环次数而未发生失效，其他规格的个别螺栓有未达到  $13 \times 10^4$  循环次数而发生失效的现象，但最低平均循环次数  $> 11.11 \times 10^4$  循环次数，满足产品技术规范的要求。

### 4.3 冶金性能

图 8 为所研制的英制钛合金高锁螺栓金相检查照片，结果显示研制件不存在表面污染和磨削烧伤，显微

组织为初生  $\alpha+\beta$  转变组织，研制件的头部和螺纹流线都是连续的，不存在破裂、空洞、折叠等缺陷，冶金特性满足技术规范的要求。

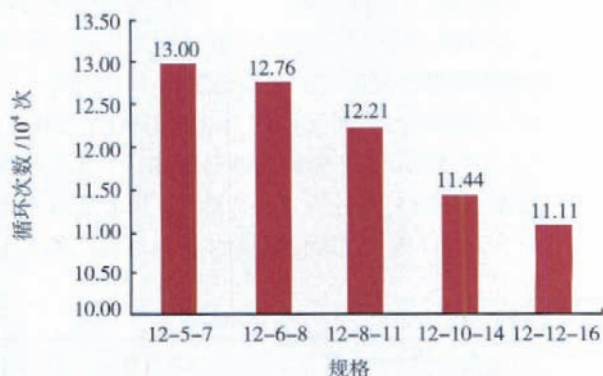


图7 不同规格英制轻型钛合金高锁螺栓的平均疲劳循环次数  
Fig.7 Average fatigue life cycle of british system light-weight Ti-alloy bolt with different sizes

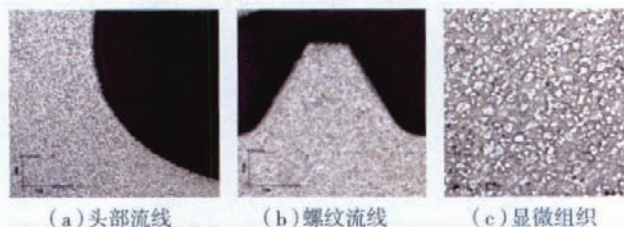


图8 研制轻型钛合金高锁螺栓金相检查结果  
Fig.8 Result of metallographic examination for development of british system light-weight Ti-alloy bolt

## 5 结束语

本研究介绍了英制轻型钛合金高锁螺栓的结构特点，分析了制造加工工艺难点。对研制件进行了详细的质量评估，含非破坏性外观尺寸检查、机械性能试验和冶金性能检查，试验结果显示所研制的英制钛合金轻型高锁螺栓达到了产品标准和技术规范的要求。

轻型钛合金高锁螺栓具有重量轻、可控预载荷、自锁、高的疲劳寿命、抗振动、防松、可与多种材料组合、安装噪音小、容易安装等特点，目前在世界上的各种先进飞机上大量使用，主要用于机身、机翼、垂尾、平尾、方向舵等结构的开敞部位连接，还可用于间隙、干涉配合、以及油箱装配等场合。实现轻型钛合金高锁螺栓的国产化，既可满足目前国内军机的使用需求，又可为我国航空工业的发展做好技术储备。

### 参考文献

[1] 侯崑, 张辉. 英制轻型钛合金高锁螺栓鉴定试验探讨, 航空标准化与质量, 2008(5):49-53.  
[2] 赵庆云, 刘风雷, 刘华东. 世界先进航空紧固件进展. 航空制造技术, 2009(3):54-56. (责编 飞翔)