

# 航空钛合金紧固件丝材制造质量控制技术

## Quality Control Technology of Wire Manufacturing for Aeronautical Titanium Alloy Fastener

中航工业北京航空制造工程研究所 刘风雷 庄宝潼  
首都航天机械公司 张秀艳

**[摘要]** 钛合金紧固件因具有较好的综合性能,广泛应用于飞机机体连接结构中。本文根据钛合金紧固件标准及其材料标准提出了对钛合金丝材的质量要求,并从国外材料性能入手,分析了保证其质量一致性的控制方法,阐述了钛合金紧固件丝棒材生产过程和自动化生产要求。

**关键词:** 钛合金紧固件 钛合金丝材 质量一致性 自动化生产

**[ABSTRACT]** Titanium alloy fastener is widely used in airframe connect structure because of its good comprehensive properties. The quality requirement is presented according to Ti-alloy fastener standards and material standards. Control technology of quality conformity is analysed by views of imported materials properties. The process and automated production requirements of titanium alloy fastener is further elaborated.

**Keywords:** Ti-alloy fastener Ti-alloy wire Quality conformity Automated production

钛合金紧固件以其重量轻、比强度高、耐腐蚀、抗高温、抗疲劳等优良综合性能,广泛应用于飞机机体连接结构中,从战斗机到运输机再到民用航空飞机,单架飞机钛合金紧固件使用量从几万件到几十万件,有的飞机使用量高达 70 ~ 80 万件。目前,1100MPa 强度等级的 Ti-6Al-4V 钛合金紧固件是飞机机体铝合金、钛合金、复合材料结构使用的数量最大及种类最多的紧固件,并且 Ti-6Al-4V 钛合金被公认为是综合性能最好的一种钛合金<sup>[1]</sup>。随着钛合金紧固件使用数量的增加,钛合金丝材需求量逐年增加,目前全世界全年使用钛合金紧固件用丝材和棒材的数量约为 2000t。对航空钛合金紧固件用丝棒材,由于紧固件制造要求越来越严格,对航空钛合金紧固件制造用的材料性能和质量提出了更高的要求,甚至比飞机其他部位使用的棒材、板材等钛合金材料要高。目前,我国多种新型飞机项目均在进行了大刀阔斧的研制,中国正向飞机制造大国进军,进而带动国内钛合金紧固件需求量的大幅提升。由于航空用钛合金材料加工技术要求高,产品附加值也高,航空钛合金紧固件用丝棒材成为国内多个厂家研发生产的对象,但由于历

史原因和各自的设备条件及技术水平的限制,国内仍需在较多方面开展深入研究,以保证产品质量的一致性,才能满足钛合金紧固件生产对丝材提出的要求。本文从航空紧固件标准要求入手,针对航空钛合金紧固件丝材加工设备、性能和质量要求进行剖析,并提出了钛合金紧固件丝材质量控制要求。

### 1 钛合金紧固件标准及丝材标准要求

采用丝材制造的 Ti-6Al-4V 钛合金紧固件绝大多数要求进行固溶时效热处理,以满足抗拉强度 1100MPa、抗剪强度 660MPa 的性能要求。对钛合金制造的紧固件,除进行外观检查外,还需要进行冶金检查和机械性能检查,冶金检查主要包括头部流线、螺纹流线、金相组织、污染和过热等,而机械性能检查要求进行抗拉强度、剪切强度、疲劳、应力持久等试验,因此紧固件标准要求材料具有较高的性能及质量要求,在这些紧固件技术条件中要求材料满足美国 AMS4967 标准(退火、可热处理的钛合金棒材、丝材、锻件和环形件)或等同于该标准所提出的要求。

美国 AMS4967 标准在材料的尺寸、公差、外观、金相、机械性能、缺陷的控制等方面均有要求,并有较高的质量一致性要求。对质量一致性这项要求,足以使得材料在制造过程中必须进行极为严格的控制,如果在组织上、性能上一件有问题,就有可能造成整批报废。对钛合金紧固件,并不是机械性能越高越好,相应技术条件对加工质量一致性也提出了较高的要求,钛合金丝材的一致性在保证产品的合格性的基础,其性能必须控制在一定范围之内,这就要求必须按照 SPC (Statistical Process Control) 的控制流程进行丝棒材生产。

### 2 钛合金丝棒材加工质量控制

#### 2.1 国外丝材质量状态

在国内,中航工业制造所是最早进行多种钛合金紧固件研发并应用于多种机型的研究单位,在生产中长期使用进口钛合金丝棒材,通过使用发现,从国外进口的钛合金丝材具有较好的质量一致性,如图 1 所示。可见,φ4~φ10mm 的丝棒材在退火状态下的抗拉强度、淬火后的抗拉强度和剪切强度均具有较高的一致性,且退火

状态供应的丝棒材具有较高的抗拉强度,接近钛紧固件要求的最小抗拉强度值 1100MPa。另外,国外进口丝材在金相组织上都具有较好的一致性,如图 2 所示,为等轴  $\alpha$  + 转变  $\beta$  组织,晶粒细小、均匀。而国产材料在轧制过程中由于成分、工艺等原因,会造成内部组织分布不均,甚至出现带状组织,如图 3 所示,微观组织的不一致将导致宏观上抗拉、剪切等性能的不一致性。

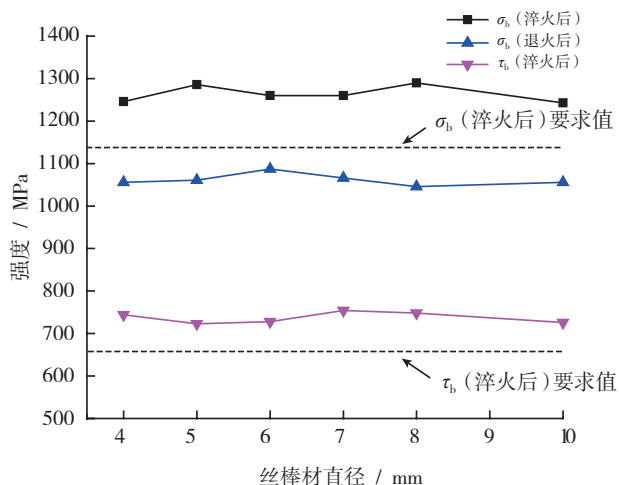


图1 国外不同规格Ti-6Al-4V钛合金热处理前后强度值  
Fig.1 Intensity of imported different-sized Ti-6Al-4V before and after heat treatment

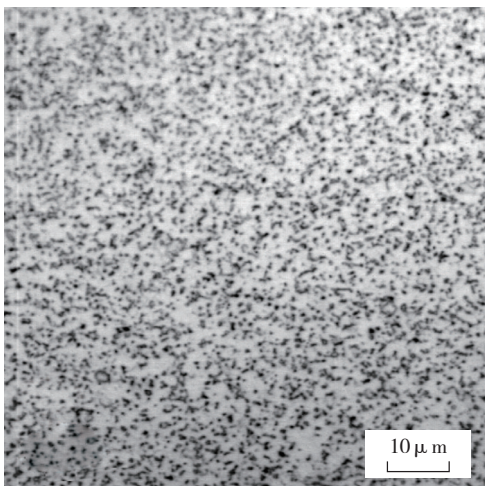


图2 进口原材料组织照片  
Fig.2 Metallurgical structure of imported material

由材料复验以及热处理后钛合金材料的性能和组织可以看出,进口钛合金丝棒材具有较好的质量一致性,根据分析以及从国外现场考查的情况可以得出:虽然钛合金丝棒材各种化学成分含量在标准中均有规定,但在实际生产中,为了保证质量一致性和较高的性能指标要求,国外材料生产厂商对各种化学成分的控制都有内控的企标要求,以保证各成分含量控制在较小的波动

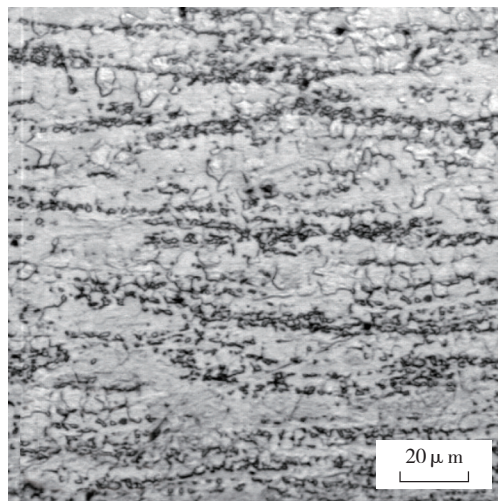


图3 国产某单位材料组织照片  
Fig.3 Metallurgical structure of national material

范围之内,由化学成分试验可以验证这一点;另外,在生产过程中国外材料生产厂商在保证丝棒材变形量一致性以及避免缺陷如裂纹、折迭、杂质、偏析的产生等方面进行了严格的控制。

## 2.2 生产质量控制及生产过程要求

钛合金紧固件用丝棒材生产过程是一个全面的质量控制过程,除保证尺寸、机械性能和内部组织外,还需对缺陷进行严格的控制,对于前者易于达到,而要做到防止缺陷发生和控制剔除缺陷以及保证不同批次之间质量稳定性是较难实现的,不能单纯依靠检测实现,这就必须做到在源头即开始对缺陷进行控制,并将控制渗透到材料成分、铸锭控制以及最终生产出产品的各个环节中。同时,生产过程不能依靠人工保证产品的质量,必须是自动化的过程,即在材料提纯、原材料混合、铸锭生产、大规格棒材轧制、小规格丝棒材轧制、棒材加工、丝材拉拔、表面涂润滑剂等方面均采用自动化设备及工艺技术,并配套相应的化学成分、性能与组织检测条件,只有这样才能保证钛丝棒材加工质量。

### 2.2.1 原材料提纯和混合

材料成分的配备有两种方法:一是采用海绵钛加 Al、V、O 等成分进行配置;二是采用钛屑加海绵钛,然后再添加 Al、V、O 元素进行配置。由于目前世界上钛矿越来越少,采用第二种方法可保证绝大多数钛屑能得到重复利用,提高了材料的使用率,但是采用这种工艺必须极其慎重,需要有一套严格的钛屑回收程序,以绝对保证所回收钛屑的同一性。回收的钛屑需要进行提纯:首先,将大块钛屑分解成碎片,离心去除大部分油污,并在此时将钛屑分成大、中、小屑;其次,进行碱洗,清水清洗,并将钛屑烘干,再次将钛屑分成大、中、小屑;最后,采用磁铁将可能存在的铁屑等(如断折的刀头等)

去除,此时的钛屑就可以作为原材料进行混合。

将适当比例的钛屑加适量的海绵钛,再加入 Al、V 元素进行充分混合,压制成一定大小的坯料,就可作为 EB 炉(电子束冷床炉)熔炼原材料。

### 2.2.2 钛锭熔炼控制

钛锭生产过程(如图 4 所示)主要包括两次熔炼:首先采用 EB 炉进行第一次熔炼,然后采用 VAR 炉(真空电弧自耗炉)进行第二次熔炼。在进行 EB 炉熔炼时,需在每隔 200mm 处取样进行化学成分分析,达到对整个铸锭成分进行控制的目的,从而确保材料合格及满足一致性要求。

过程全部采用计算机自动化控制(如图 5 所示),在轧制过程中采用两个梯次的感应加热并经多道反复轧扁、轧圆、轧三角、轧圆的复合过程,在轧制出口处采用激光对尺寸进行检测并进行周向涡流探伤,对有缺陷的材料部位进行涂覆标记,以便随后可去除缺陷部位。

### 2.2.5 钛棒加工

国内钛棒加工大都采用电阻加热拉直的方法,该方法可能造成加热温度不一致而产生批内不同根材料及同一根材料不同部位密度和性能不一致性,因此这种方法在航空钛棒材加工中不宜采用。而真正能够满足质量一致性要求的加工是:退火状态的圆盘料在多滚冷轧

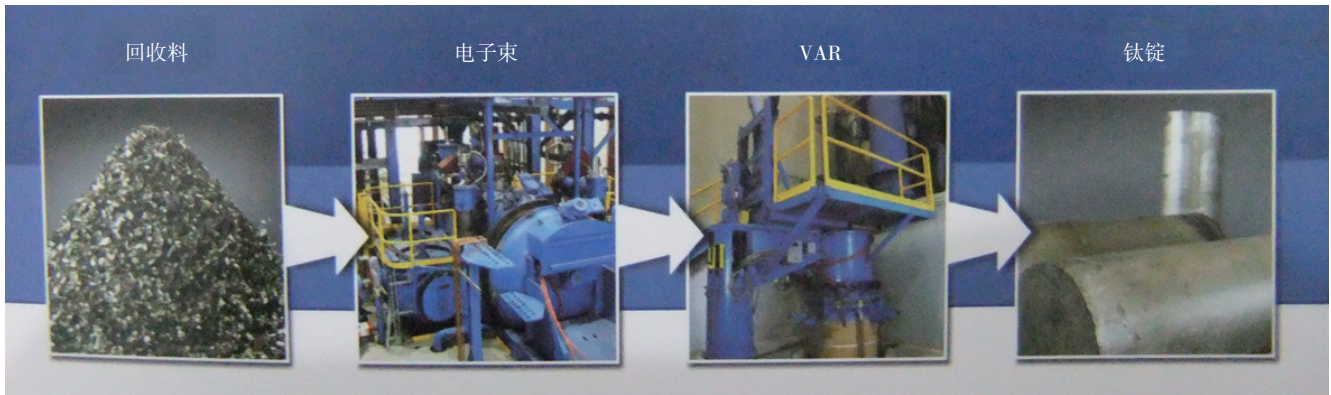


图4 钛锭生产主要过程

Fig.4 Manufacturing process of Ti-ingot



(a) 自动化控制操作台



(b) 卷取出样

图5 钛棒轧制控制过程

Fig.5 Controlled rolling process of Ti-bar

### 2.2.3 大规格钛锭轧制

为减少氧化,在大规格钛锭轧制过程中采用感应方法进行加热,达到相转变点温度后进行轧制,形成一定尺寸的方形钛棒,经检测去除表面裂纹后,方形钛棒再经感应加热轧制轧成  $\phi 100\text{mm}$  圆形钛棒,在此基础上便可进行后续小尺寸圆丝材的轧制,上述过程均通过计算机控制而实现自动化生产。

### 2.2.4 小规格棒丝材轧制

从  $\phi 100\text{mm}$  圆棒可直接轧制到  $\phi 6\text{mm}$  盘圆,这个

校直下成形并定尺切断,通过带自动补偿的数控无心磨床进行最终尺寸加工,在自动涡流仪上进行裂纹检测。

### 2.2.6 丝材加工

经退火处理的轧制圆盘料需在专用车削拉拔机上加工成丝材,在加工过程中采用旋转车削工艺,并在表面抛光后进行冷拉,采用涡流进行探伤,对存在问题的部分进行标识,以便后续进行去除,最后将拉出的丝材进行卷盘,以满足包装尺寸要求。

(下转第 73 页)

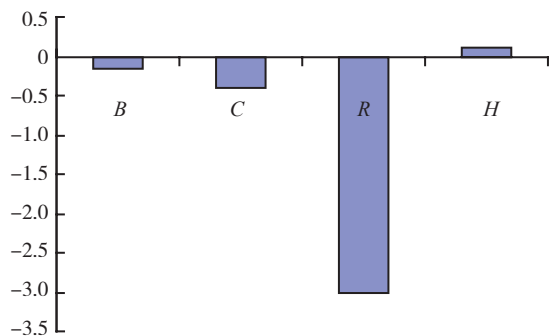


图7 二次响应面法均值灵敏度分析结果图

Fig.7 Histogram of mean value sensitivity analysis results by second response surface method

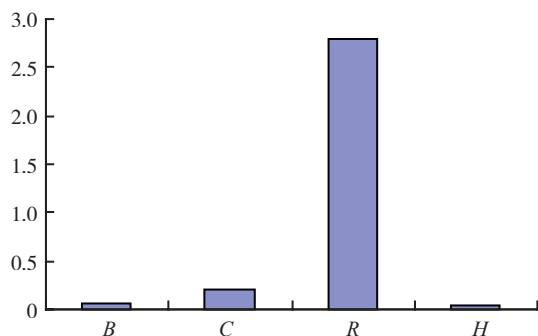


图8 二次响应面法标准差灵敏度分析结果图

Fig.8 Histogram of deviation sensitivity analysis results by second response surface method

与滑轨接触区的厚度。灵敏度分析可以为导弹吊挂结构疲劳寿命的可靠性设计提供依据,通过对主要随机变量的控制来提高寿命可靠性。

### 3 结论

本文通过有限元分析,发现导弹吊挂的倒角部位存在应力集中,是整个结构寿命最薄弱部位,其 Von Mises 最大应力为 302MPa,疲劳寿命为 367000 次。从确定性角度分析,结构满足强度和疲劳寿命设计要求。考虑到关键部位的尺寸分散性,用二次响应面法进行寿命可靠性分析发现,结构发生疲劳失效概率为 0.1548,不能满足武器装备的可靠性要求。灵敏度分析表明,倒角半径是影响导弹吊挂结构疲劳寿命的最主要因素,其次是滑轨接触区耳片厚度,尺寸分散性对导弹吊挂结构寿命影响较大。因此在导弹吊挂结构设计时应适当增大倒角半径和耳片厚度,并严格控制加工误差。

#### 参考文献

- [1] Bullough R, Greena V R. A review of methods and applications of reliability analysis for structural integrity assessment of UK nuclear plant. *Pressure Vessels and Piping*, 1999, 76: 909-919.
- [2] 刘纪涛,张为华,王中伟. 基于数论方法的结构可靠性分析.

机械工程学报,2010,46(6): 195-198.

[3] Di S M, Lomario D. A comparison between Monte Carlo and FORMs in calculating the reliability of a composite structure. *Composite Structures*, 2003, 59: 155-162.

[4] 张峰,吕震宙. 可靠性灵敏度分析的自适应重要抽样法, *工程力学*, 2008,25(4): 80-84.

[5] Lu Z, Song S, Yue Z. Reliability sensitivity method by line sampling. *Structural Safety*, 2008, 30(6): 517-532.

[6] Cheng J, Li Q, Xiao R. A new artificial neuralnetwork-based response surface method for structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2008, 23(1): 51-63.

[7] 高宗战,刘志群,姜志峰,等. 飞机翼梁结构强可靠性灵敏度分析. *机械工程学报*, 2010, 46(14):194-198.

[8] Jhojan, Enrique R. Stochastic and reliability analysis of fluid-structure interaction problems using finite element models. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2010, 6 (1): 6-22.

[9] 吕震宙. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析. 北京: 科学出版社, 2009.

[10] 黄启珍. 导弹结构·材料·强度. 北京: 宇航出版社, 1996.

[11] 申志彬,唐国金,雷勇军,等. 基于 Patran 二次开发的星形药柱结构分析与设计. *固体火箭技术*, 2009, 32(2): 175-179.

[12] MSC.Software. PCL and customization. Los Angeles: The Macneal Schwendler Corporation, 2005. (责编 亦非)

(上接第 68 页)

#### 2.2.7 丝材的表面润滑

在钛合金紧固件加工过程中,需采用热镦工艺镦制出各种头型,为满足脱模要求并防止材料与模具粘连,丝材表面必须进行润滑,从而保证生产顺利进行。润滑要求较为严格,厚度和粘接力必须合适,否则将影响产品质量,为此需采用专用干膜润滑剂及涂覆技术。

### 3 结论

钛合金紧固件用丝棒材的生产过程是一个全方面质量控制的过程,应将缺陷消灭在源头即策划中,并在生产中加入多道检测控制。为满足产品尺寸和质量的一致性要求,需在各道工序质量一致性及生产自动化方面进行严格的控制和执行: 首先,需将材料成分控制在标准规定的范围内以保证高性能和一致性; 其次,在生产中需保证各种规格尺寸变形的一致性; 再次,在原材料提纯及混合、铸锭生产、大规格棒材轧制、小规格丝棒材轧制、棒材加工、丝材拉拔、表面涂润滑剂等过程均要实现自动化控制,只有这样才能保证产品质量的均匀一致,满足航空航天紧固件产品在质量一致性方面提出的要求。

#### 参考文献

- [1] 张全纯,汪裕炳,瞿履和,等. 先进飞机机械连接. 北京: 兵器工业出版社, 2000:134. (责编 良辰)