

大长径比钛合金螺栓制造及测试

Manufacturing and Testing of Titanium Alloy Fastener With Large Length-Diameter Ratio

中航工业北京航空制造工程研究所 李伟强 刘风雷 任 翀 陈 闯 冯 硕 刘 丹

[摘要] 航空钛合金紧固件具有较高的精度要求,需完备的技术基础以支撑,因而其制造难度高于民用合金钢紧固件,其中大长径比钛合金螺栓更为明显。对于大长径比钛合金螺栓,在制造过程中存在严重的加工变形,需要解决热锻成形、热处理变形控制、整体型面加工及尺寸协调、高频疲劳测试等方面的难题。本文通过有效的热锻设备加工能力开发解决锻成形问题,热处理工装开发研究、科学的加工余量设计等途径解决了大长径比钛合金螺栓加工变形难题,通过优化的测试方法实现了大长径比钛合金螺栓有效性能测试。

关键词: 大长径比 钛合金螺栓 制造 测试

[ABSTRACT] The manufacturing technique of aerial titanium fasteners with high required precision, which is more difficult than civil alloy steel fasteners, is supported by strong technological base, especially the manufacturing technique of the fasteners with large length-diameter ratio. There is severe distortion in the manufacturing procedure of titanium fasteners with large length-diameter ratio because of limited capacity of equipment, imperfect heating processing, unsuitable machining allowance and testing method. The new technologies are discussed, including the full capacity utilization of equipment, the designing of fixture in heating processing, the distribution of machining allowance and testing method, in order to deal with the problem of distortion. In addition, optimization method is taken so as to achieve effective test result.

Keywords: Large length-diameter ratio Titanium alloy fastener Manufacture Test

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被全球各顶级飞机制造商广泛应用于各种型号军用及民用飞机,粗略统计,一架飞机的钛合金螺栓使用量少则几万件,多则数十万件。随着国内先进飞机性能要求的不断提升,在减重、长寿命、高可靠性等方面均提出了较高的要求,为了满足这些指标,钛合金紧固件的使用量随之不断增加,为了满足国内飞机钛合金紧固件的需求,国内近十几年来在钛合金紧固件制造设备和工艺技术上进行了大量的研究。钛

合金紧固件制造需要大量的专用设备和相应技术基础,是综合性较强的领域,经过多年发展,目前国内在该方面的加工技术已经日趋完善和成熟。

通常飞机上使用的紧固件主要集中在长径比为6以下、较长件为10左右的紧固件,其加工技术已经得到较好的解决,而对于超长件如长径比大于20的钛合金紧固件,其制造具有较高的难度,在制造过程中仍然存在着大量的问题,主要表现在热锻成形难、加工中产生严重变形以及性能试验中存在影响试验结果的因素等方面。本文以长径比大于20的钛合金紧固件为研究对象,针对加工设备、工装、工艺方法进行阐述,解决其研制过程中存在的关键难题,以实现该类钛合金紧固件的批量加工。

1 加工技术难度突破

钛合金紧固件加工主要由以下工序组成:温(热)锻、固溶时效热处理、磨削、机加工、滚螺纹、圆角强化、表面处理、机械性能试验、冶金检查等,并由多种专用或通用设备及相应工艺技术保证所需加工零件的尺寸、精度、机械性能和质量要求。

在已往的生产中,主要加工长径比为10以下的产品,已形成一整套完善的加工技术,但对于长径比为20以上的螺栓,如若采用以往的加工设备、工艺技术则难以保证产品的加工和精度要求,主要问题表现在加工设备能力不足、变形较大等方面,因而对于大长径比钛合金紧固件加工需要解决如下4个问题:

(1)设备加工限制:采用温锻机如何实现长杆螺栓锻制成形。

(2)热处理变形弯曲:长径比较大的工件在热处理时极易产生工件头杆弯曲。

(3)热处理后续加工工序对紧固件自身头部、光杆部分及螺纹部分同轴度的保证。

(4)大长径比紧固件成品测试,特别是高频抗拉疲劳测试。

1.1 热锻成形控制技术

批量较大的中长杆以下的钛合金紧固件加工一般都采用连续温锻设备及工艺完成头部成形,该工艺首先将材料通过送料轮送至加热区进行感应加热,然后切断

并送至锻机阴模进行锻制,完成各种头型钛合金紧固件的加工;对于中长杆螺栓加工,材料通常通过整体长度连续加热进行锻制成形,但是对于超长杆螺栓由于杆部过长而使其无法保证加热到所需温度,致使锻制毛坯极易产生裂纹,因而连续温锻设备对于锻制超长杆螺栓具有一定的局限性。对于锻锻设备,每一种设备都有其行程和可加热及锻锻的产品范围,另外,对于整体加热工艺,由于所需通过加热进行锻锻的部位仅限于变形为头部形状的部分,因而从经济性角度分析,实际上整体加热工艺造成了大量能源的浪费。

在充分考虑设备锻锻能力、材料加热的有效性、头部结构成形、超长件出模并满足表面及内部组织要求的基础上,大长径比钛合金紧固件在加工过程中采用单独加热材料变形区域的方式进行加热锻锻成形,如图1所示。采用该工艺首先需将直条料切断为所需要的长度,在锻锻过程中使用加热装置对变形区域进行局部加热,之后进行锻锻成形。在出模阶段,因超长件杆部锻锻变形胀粗非均匀性,采用分步进行出模方式,能够有效防止伤及模具工装和零件,消除零件的部分应力弯曲变形。

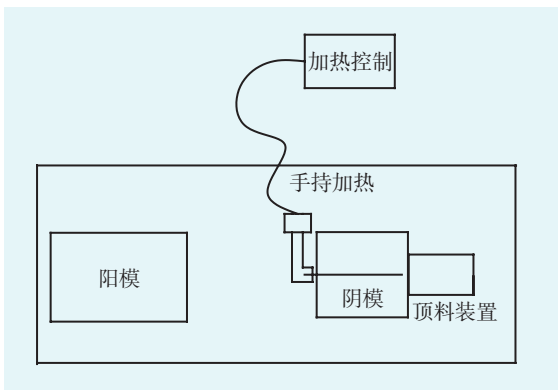


图1 大长径比紧固件锻锻实现示意图

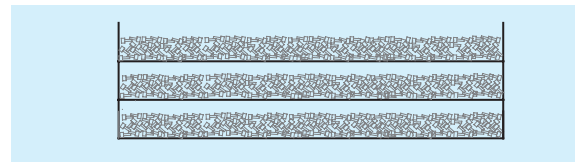
Fig.1 Diagram sketch of single-blow beading of fasteners with large length-diameter ratio

1.2 热处理变形控制技术

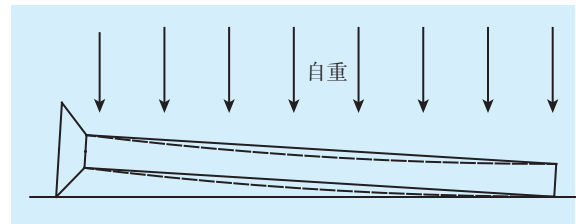
大长径比钛合金紧固件在热处理时极易发生弯曲变形且变形量较大,虽然在该阶段中彻底消除变形并不现实,但是对于工艺的改进,可以使这种变形降低到最小状态,以缓解后续加工的难度,并能够保证通过后续加工保证其精度要求。热处理阶段引起变形的因素主要有3个方面:

(1) 自由码放的摆放方式易造成紧固件之间接触引起的挤压变形以及紧固件自身自重引起的弯曲变形,如图2所示。

- (2) 淬火阶段水对紧固件冲击引起的冲击变形。
- (3) 热处理全过程中冷热交替引起的材料热变形。



(a) 自由码放



(b) 自重变形

图2 自由码放及其引起的变形

Fig.2 Distortion because of random setting

根据分析和以往的生产状态统计,第一种因素所引起的变形量最大,因而在热处理阶段应尽量降低此类变形,以保证通过后续加工能够实现产品的高同轴度要求。

为避免紧固件自重及相互挤压所产生的变形,可以将紧固件码放在料架上再进行热处理,如图3所示,此时紧固件自重的承力面为沉头面与杆部转接的圆角区域,且沿圆角圆周所承受重力基本相同,不会引起头部相对于杆部的弯曲;另外,由于料架将紧固件相互隔离,因而在紧固件之间不会产生相互的加压变形,从而避免了杆部的变形,同时零件之间所保留的空间能够保证加热时热辐射的自由流通,防止热处理产生中心部分热传递不充分现象。在淬火阶段料架随同紧固件一起置于水中,这时料架中间的隔断框条能够防止紧固件在入水时产生冲击变形及紧固件之间的挤压变形,从而进一步降低了大长径比钛合金紧固件的杆部弯曲变形量。

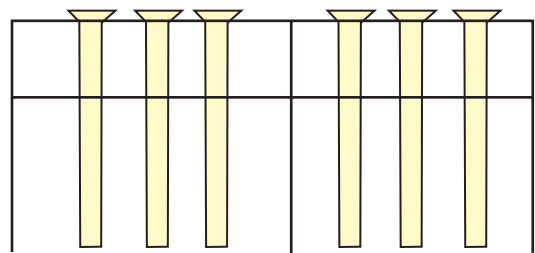


图3 大长径比零件热处理时料架放置

Fig.3 Bracket of fasteners with large length-diameter ratio during heat treatment

1.3 整体型面加工及尺寸协调

如前所述,由于热处理阶段所产生的变形并不可能通过工艺优化而彻底消失,使得在热处理后紧固件沉头面、光杆部位及后续要加工的螺纹等之间的同轴度仍不能达到技术条件要求,因而必须通过后续的整体型面加

工以实现紧固件各部位之间的同轴度要求。由于钛合金紧固件螺纹一般通过滚压成形,因而螺纹部位、光杆部位及头部之间的同轴度完全取决于滚压螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位的同轴度。为了保证大长径比钛合金紧固件螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位的同轴度,需采用一次磨削工艺技术实现这3个部位的成形,从而满足较高的同轴度要求。通过整体型面无芯磨削工艺,大长径比紧固件的螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位之间的同轴度能够完全符合紧固件各部位同轴度要求。

螺纹毛坯部位、光杆部位与沉头面部位需采用不同磨削量,根据无芯磨削原理,沉头面的磨削是依靠在光杆和螺纹毛坯磨削时产生的拉力而实现的,光杆和螺纹毛坯磨削时产生的拉力大小和磨削部分长度及去除量有直接关系,所以沉头面磨削量的大小就直接取决于光杆和螺纹毛坯磨削长度及沿直径方向的去除量;另外,由于沉头面的磨削量直接影响到紧固件头部高度尺寸,因而在加工过程中应对沉头高度加工余量、光杆和螺纹毛坯直径及长度之间的关系进行严格控制,才能达到最理想的磨削效果。根据试验数据积累及统计分析,获得如下公式以确定沉头高度加工余量:

$$h = K \times (l/d) \quad (1)$$

式中, h 为沉头紧固件头部高度加工余量; K 为磨削系数; l 为钛合金紧固件光杆长度; d 为钛合金紧固件光杆直径。

1.4 高频抗拉疲劳测试

对于高频疲劳测试,试验过程中对同轴度具有一定的要求,即由于加载不同轴所产生的附加弯曲应力应不超过平均应力的6%,而大长径比紧固件在普通装夹方式下(GJB715.30-2008《紧固件试验方法抗拉疲劳》),紧固件头部和螺纹部分夹具之间距离过大,致使紧固件光杆部分在加载过程中产生横向颤震,使得所加载的轴向载荷产生弯曲应力,长度越长弯曲应力越大,该应力远远超过了设备所要求的不超过平均应力6%的指标,致使试验无法正常进行。

为避免这种情况的发生,对试验夹具进行了优化设计(见图4),加大了上拉头对紧固件的固定长度,减小了紧固件光杆部分空置长度,大幅度降低了试验中紧固件光杆部分的横向颤震,从而减小了加载载荷产生的弯曲应力,使测试设备能够按照标准要求的载荷和频率正常工作。通过试验验证,大长径比钛合金紧固件的高频抗拉疲劳性能完全达到要求。

2 结论

对于大长径比钛合金紧固件,可通过采用单打热敏

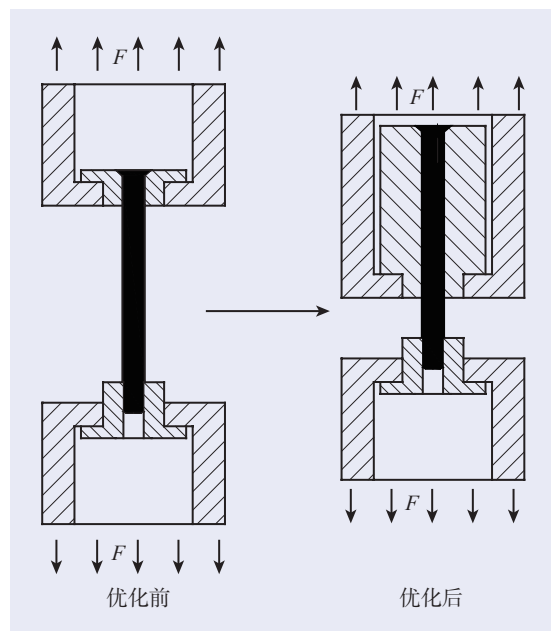


图4 高频抗拉疲劳测试装夹方式

Fig.4 Clamping method of high frequency tensile fatigue test

成形控制、料架热处理变形控制、整体型面成形同轴度控制及加工尺寸协调等先进工艺技术实现该类产品的加工。在产品性能测试中通过优化高频抗拉疲劳测试,保证试验的顺利及准确进行。大长径比钛合金紧固件加工工艺及检测技术的研究也为同类特殊钛合金紧固件的研制奠定了技术基础。(责编 夏宛)

(上接第64页)

械连接中采用适当的干涉配合可以提高接头强度。试验数据^[7]表明,对于复合材料机械连接不宜采用过大干涉量。

参考文献

- [1] Thoppul S D, Finegan J, Gibson R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—a review. *Compos Sci Technol*, 2009, 69(3/4): 301-329.
- [2] Lanza D, Scalea F, Cloud G L, et al. A study of the effects of clearance and interference fits in a pin-loaded cross-ply FGRP laminate. *Comp Mat*, 1998, 32(8): 783-802.
- [3] Pedersen P. On the influence of clearance in orthotropic disc-pin contacts. *Compos Struct*, 2007, 79(4): 554-561.
- [4] 王武,陶华,刘风雷,等.多排机械连接复合材料钉载分配的研究. *绝缘材料*, 2006, 39(1): 28-32.
- [5] 许小强,赵洪伦.过盈配合应力的非线性有限元分析. *机械设计与研究*, 2002(1): 33-35.
- [6] Binnur G K. Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites. *Materials and Design*, 2010, 31(1): 85-93.
- [7] 王武,陶华,刘风雷,等.干涉配合复合材料多排机械连接钉载分配的研究. *绝缘材料*, 2006, 39(4): 28-32. (责编 夏宛)