



钛合金骨架结构件加工工艺研究

李 松¹ 魏世民¹ 李 军² 刘景坡² 禄亚锋²

(1. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876;

2. 北京新凤机械厂, 北京 100854)



摘要: 针对钛合金骨架结构件特点, 通过工艺流程设计、工艺装备设计、检验方法和检验工具设计, 摸索出一套合理的加工工艺方法, 解决了该结构件在批量生产中的质量和效率问题, 创造了良好的经济效益。

关键词: 钛合金加工; 复合角度面; 变形控制

Research on Processing Technology of Titanium Alloy Skeleton Structure

Li Song¹ Wei Shimin¹ Li Jun² Liu Jingpo² Lu Yafeng²

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876;

2. Beijing Xinfeng Machinery Factory, Beijing 100854)

Abstract: Considering the features of titanium alloy skeleton structure, a new process method is presented. It solved problems of quality and efficiency in batch production by the design of process, process equipments, test methods, and inspection tools, and can create a favorable economic benefit.

Key words: titanium alloy processing; surface of compound angle; deformation control

1 引言

钛合金骨架结构件有一对单角度面和一对空间复合角度面, 零件的加工精度直接决定其与蒙皮的焊接质量。由于零件形面复杂, 精度要求高, 材料为难加工材料——铸造钛合金, 结构刚性差, 容易发生变形, 因此零件加工难度很大。

本文通过对零件加工工艺难点的分析, 经实践中不断摸索, 总结出一套可行的工艺解决方案, 经过批量的生产验证, 采用该工艺方法, 零件质量稳定, 加工效率提高。

2 工艺难点分析

骨架结构件材料为铸造钛合金 ZTi-3B。零件长度

大于 500mm, 宽度大于 200mm, 前缘宽度(2.67 ± 0.05) mm。后端角度面 I 为单角度面, 前端复合角度面 II 为空间复合角度面。零件中下部有一处窗口, 窗口周围有台阶, 窗口内部为两组上下平行的同轴孔, 两组孔要求孔距(32 ± 0.02) mm, 同轴度小于 $\phi 0.03$ mm, 两组孔对窗口边缘垂直度小于 0.05 mm。

2.1 零件形状复杂

如图 1 所示, 零件的两组主要平面(角度面 I 和复合角度面 II)都与零件的对称平面(XY 平面)成一定角度, 特别是前部的复合角度面 II, 空间复合角 9.72° , 由对称平面同时绕 x 轴、y 轴旋转得到, 这给零件加工过程中的定位、装夹造成很大困难。若在批量生产中采用多轴数控机床加工, 将大幅增加成本。

作者简介: 李松(1982-), 硕士, 机械工程及自动化专业; 研究方向: 机械工程及自动化。

收稿日期: 2010-10-26

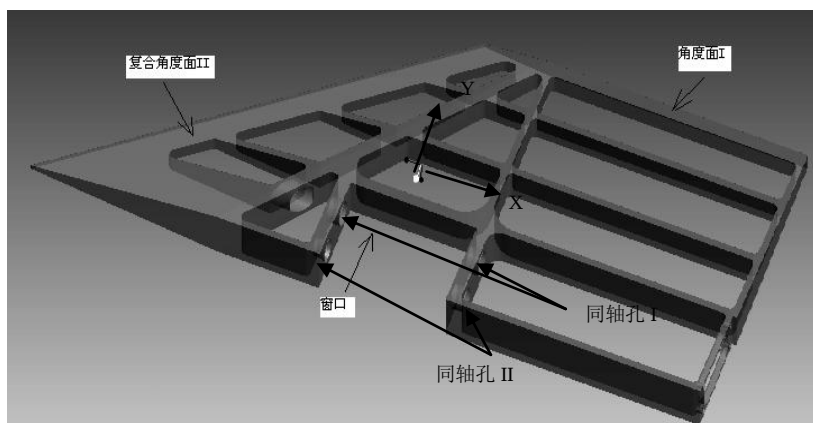


图1 钛合金骨架结构件三维模型图

2.2 零件尺寸要求多，关键尺寸设计精度高

整个零件要求保证的尺寸超过 50 处，且图纸要求未标注尺寸公差精度为 f 级。由于零件的角度面 I 和复合角度面 II 在后续组件的加工中要焊接蒙皮，因此整个零件的外形尺寸和各处平面的平面度、表面粗糙度必须符合要求。另外，两组角度面的角度公差要求很严格，复合角度面前缘部分总长约 350mm 的窄边全长宽度要求为 (2.67 ± 0.05) mm，角度面 I 与复合角度面 II 各自的对称中心平面偏差要求小于 0.3mm。一旦复合角度面 II 角度超差，将直接导致前缘宽度、复合角度面 II 对称度等多处尺寸超差。零件中下部窗口中的两组同轴孔在装配中有重要作用，孔径、孔距、同轴度、垂直度等必须进行严格控制。

2.3 铸造钛合金材料加工难，加工中易发生变形

零件材料硬度约为 HRC40，切削抗力大，容易产生加工应力导致零件变形，加工精度难以保证。零件表面共设计了 11 处减轻槽，导致零件刚性差。另外，由于零件毛坯为铸件，各处减轻槽表面为表面硬度很高的铸造氧化层，刀具在横筋和竖筋上行进，即使在精加工阶段，每次切入、切出都要经过氧化层，导致加工中振动强烈，刀具磨损快，从而直接影响了零件最终的平面度、角度精度和表面粗糙度等。

2.4 零件的部分尺寸检测困难

例如窗口内的两组同轴孔，直孔的公差要求为 $\phi 15^{+0.043}_{+0.014}$ mm，利用现有通用检具三爪内径千分尺，由于受到槽底深度、槽口宽度的尺寸干涉，无法进行测量。锥孔小端直径要求 $\phi (10.38 \pm 0.05)$ mm，锥度要求半角 $80^\circ \pm 5'$ ，采用传统方法无法进行测量。两组孔要求前后同轴度小于 $\phi 0.03$ mm，在现有生产条件

下，三坐标测头无法探到槽口底部进行测量。图纸要求角度面 I 与复合角度面 II 的交线位于斜筋正中，并在上下两端面有严格的位置要求，同时要求交线的直线度小于 $\phi 0.2$ mm，由于此交线为加工角度面 I、复合角度面 II 后在斜面上自然形成，采用传统方法无法进行测量。

3 工艺方案设计

3.1 工艺流程设计

综合上述加工难点，依照逐步去量的原则设计了工艺路线（见表 1）。在加工过程中穿插了自然时效和真空时效处理。同时为了在批量生产的条件下保证零件质量，提高生产效率，还采取了如下措施：粗加工过程中采用大功率大扭矩的普通铣床去除大量；考虑到钛合金材料易发生加工变形，零件结构刚性差的特点，在工序间穿插了自然时效过程，在粗精加工之间安排真空时效处理工序，以消除铸造和加工应力，稳定零件尺寸；在精加工阶段为保证加工的高效率和高精度，采用立式加工中心、卧式加工中心进行加工；由于角度面 I 为精加工阶段的基准面，因此其平面度及角度精度必须进行工艺加严，在批产中采用数控加工中心进行高速切削代替磨削，提高了加工效率；为消除后续焊接蒙皮工序造成的零件变形，在零件上下两窄边各留量 0.5mm，焊接完成后去除这两处余量，以保证零件最终的宽度要求；普通方法难以保证窗口内两组同轴孔的尺寸精度和表面粗糙度要求，采用了卧式镗床粗钻预孔，电火花机安装双头电极进行精加工的方法。

表 1 骨架结构件工艺流程

工序	内容	设备
1 钳	划线，借量，均匀化加工余量，刻编号	
2 铣	粗铣下端面	立式铣床 FA3A
3 铣	粗铣铣角度面 I	立式铣床 FA3A
4 铣	粗铣四周	立式铣床 X8140
5 铣	半精铣角度面 I	立式铣床 X8140
6 铣	粗铣复合角度面 II	立式铣床 B1-400K
7 铣	粗铣后端台阶面及腰形槽	立式铣床 XA6132
8 热	真空时效处理	
9 铣	精铣下端面	立式铣床 3M
10 数铣	精铣角度面 I，铣窗口台阶、后基准面	立式加工中心 FV800A
11 钳	去毛刺，修平接刀	
12 数铣	数铣外形轮廓及窗口、槽、凸台、后端台阶面、腰形槽，钻螺纹底孔	卧式加工中心 IS500
13 钳	去毛刺，划角度面交界线	
14 数铣	精铣复合角度面 II	立式加工中心 FV800A
15 钳	去毛刺	
16 镗	粗钻孔预孔	坐标镗床 T42100
17 钳	去孔口毛刺	
18 电火花	电火花加工两组同轴孔	电火花加工中心 F053HSFS
19 数铣	精铣底边角度	卧式加工中心 IS500
20 钳	倒角，去毛刺，划线，刻字	
21 终检	终检	

3.2 工艺装备设计

骨架结构件形面复杂，角度面 I 为单角度面，复合角度面 II 为复合角度面，两组平面与零件 XY 对称平面都成一定角度，给零件的基准选择和加工中的定位造成了困难。在加工中通过设计三套高精度工装，解决了这两组角度面及零件四周铣加工的加工精度问题，也达到利用普通铣床进行粗加工，利用三轴平面数控铣床进行精加工，从而降低加工成本的目的。由于角度面形状复杂，零件结构刚性差，在加工中容易产生振动。为减小局部装夹力，控制加工变形，减小加工中的振动，在工装设计中普遍采用了中心涨

紧、侧面顶紧、辅助压紧等多种方式增强零件的装夹刚性，对降低加工振动，保证加工精度起到了很好的作用。在粗加工同轴孔的工序中，设计了一套带有固定钻套、快换钻套的钻孔工装，实现了在普通卧式镗床上用加长钻头完成粗钻预孔，达到了较高的加工效率。

3.2.1 铣四周工装

用于骨架结构件铣四周，在图示下方和右侧共有三处定位销，用于毛坯粗定位，在零件夹紧后将下方两处即插式定位销拔出，进行铣四周加工，工装结构如图 2 所示。

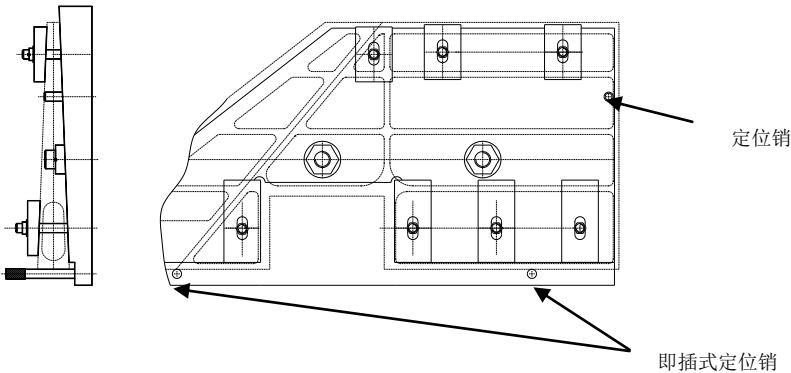


图 2 铣四周工装结构示意图

3.2.2 铣角度面 I 工装

用于骨架结构件铣角度面 I，利用工装上的螺纹孔安装涨块进行内部涨紧，用异型压板进行侧面顶紧，提高了零件的装夹刚性，可有效降低加工中的振动，经过多次翻面加工后即可保证角度面 I 与工装贴实，经过测量角度面 I 加工精度可控制在 $\pm 2'$ 以内，能够满足零件的设计要求，工装结构如图 3 所示。

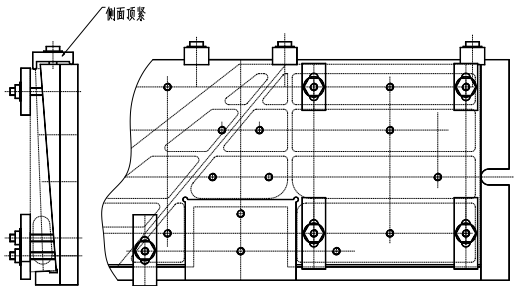


图 3 铣角度面 I 工装结构示意图

3.2.3 铣复合角度面 II 工装

铣复合角度面 II 工装采用角度分解的方法，将围绕 x、y 轴同时旋转的复合角分解为绕 x、y 轴分别旋转的两个单角，将两个单角分别在两块基础板上加工，最后将两块基础板装配在一起，即可保证角度面 I 在上基础板上贴实的情况下复合角度面 II 为水平面，从而实现了用三轴普通立式铣床加工空间复合角度面的目的。为解决复合角度面没有贴实、刚性差的问题，在复合角度面 II 下布置三处可调式辅助支撑，增加了装夹刚性，保证了零件前缘宽度的一致性。本工装分为左右两套，为对称结构，工装结构如图 4 所示。

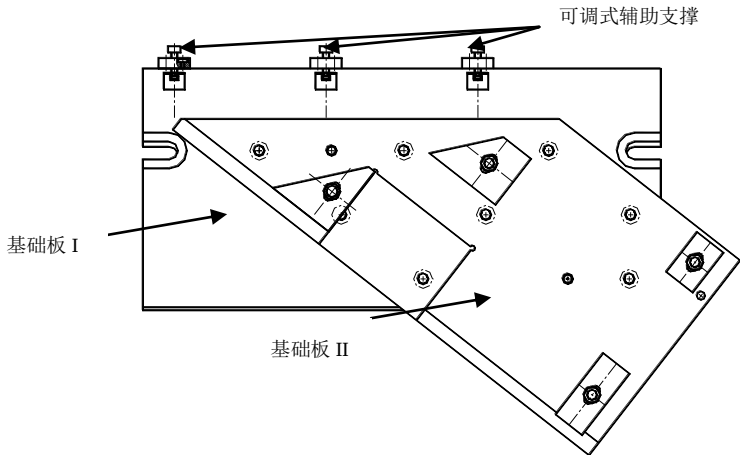


图 4 铣复合角度面 II 工装结构示意图

3.2.4 钻孔工装

用于骨架结构件在卧式坐标镗床钻预孔，由于加长钻头悬伸长，工装上安装导入、导出钻模，钻模内

可安装不同内径的快换钻套，以便在钻扩孔过程中使用不同直径加长钻头，对不同直径钻头进行导引，工装结构如图 5 所示。

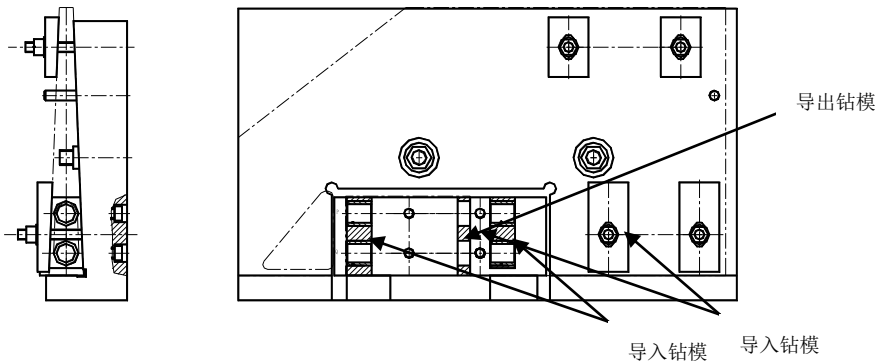


图 5 钻孔工装结构示意图

3.3 检验方法及检具设计

在骨架结构件的诸多尺寸中,由于零件干涉等原因,有些尺寸难以利用通用型检具进行检测,有些尺寸虽能够进行检测(如利用三坐标测量机检测同轴度以及利用红丹粉着色法检测锥孔等),但检测方法不够快捷,不能满足批量生产的要求。因此设计了专用检具以解决批量生产条件下快速检测的问题。

3.3.1 直孔孔径的检具

骨架上 $\phi 15^{+0.043}_0$ mm 孔位于宽度为 100mm 窗口根部,距离槽底深度为 18mm,槽口宽度为 100mm,现有内孔检具为三爪内径千分尺,受到槽底深度、槽口宽度的尺寸干涉,无法测量。为解决批量生产中的检验工作,设计了锥柄圆柱塞规(图 6),塞规通止两端基本尺寸为孔口基本尺寸 $\phi 15$ mm,通端基本偏差按所检验孔口下偏差选取,考虑磨削加工精度,公差带宽度定为 0.005mm。

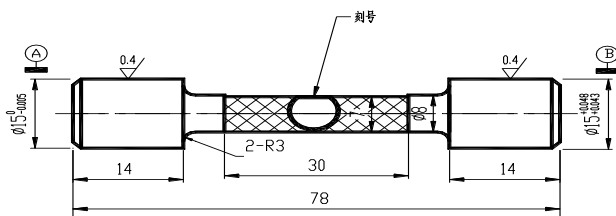


图 6 钛合金骨架结构件直孔孔径检具示意图

3.3.2 同轴度检具设计

骨架上 $\phi 15^{+0.043}_0$ mm 与 $\phi 15.5^{+0.043}_0$ mm 两组圆柱孔同轴度要求为小于 $\phi 0.03$ mm,两组孔位于宽度为 100mm 窗口,距离槽面深度为 50mm,孔距尺寸为 120mm。在现有生产条件下,缺乏同轴度测量检具,同时三坐标测头水平长度大于 140mm,受槽口宽度 100mm 限制,无法探到槽口底部测量。为满足测量要求,设计了一款圆柱孔同轴度检具(图 7),同轴度检具尺寸基本偏差的选取原则是在满足设计尺寸要求下,采取最大可通过原则,从而可确定检验圆柱孔极限偏差的下偏差值。检具的测量部分总长为 104mm,两段圆柱直径经过计算后确定制造公差范围为 $\phi 15^{+0.005}_0$ mm、 $\phi 15.5^{+0.005}_0$ mm,两圆同轴度小于 $\phi 0.008$ mm,制造公差通过磨削可保证,在使用 3.3.1 所述孔径检具检测零件孔径满足设计要求的前提下,

检具可满足同轴度小于 $\phi 0.03$ mm 的测量要求。

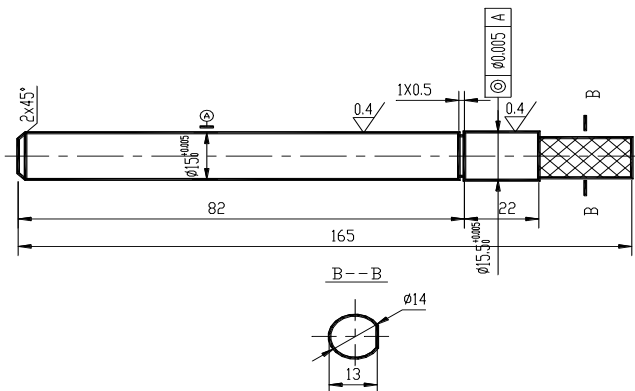


图 7 钛合金骨架结构件同轴度检具示意图

3.3.3 形面对称检测方法

骨架结构件图纸要求角度面 I 与复合角度面 II 的交界线位于斜筋正中,并在顶面、底面有严格的位置要求,同时要求成品零件角度面 I、复合角度面 II 各自对称中心的偏差不大于 0.3mm。这些尺寸在加工中难以直接测量和保证,因此设计了一套实用的方法,可以直观测量和检验零件是否加工到位,并确定零件装夹后 z 方向的切削深度,同时保证两组角度面的对称中心平面偏差满足要求。具体方法为:将零件顶面、底面加工到位后在两端面的两角度面理论交界线周围划一系列栅格线,随着栅格密度的提高,可提高加工和检测中目测交界线位置的精度。在实际使用中,使用栅格线间隔 1mm,采用通过肉眼目测控制加工中形成的两角度面交界线的位置,并同时测量 2.67mm 前缘宽度保证加工精度。在操作过程中,通过观察实际交界线在栅格中的位置,可方便地推算出机床 z 向进刀的深度(交界线前进 1mm,对应实际进刀深度 0.25mm),检验人员通过观察最终交接线在栅格线中的位置,可清楚判断零件是否合格。经三坐标机检测,采用此方法,零件角度面 I 及复合角度面 II 对称中心平面偏差可控制在 0.15mm 以内,能够满足设计要求。这种“放大镜式”间接测量方法应用于批量生产中,极大地提高了加工和检验效率。钛合金骨架结构件划线检测法见图 8。

(下转第 39 页)