

箱体类钛合金零件加工技术

■ 中航工业沈阳飞机工业（集团）有限公司数控加工厂 （辽宁 110850） 孙国雁 王金海 崔 洋

摘要：本文选取某一典型钛合金箱体类零件作为研究对象，通过在实际生产中对此箱体类零件的数字化加工的研究，摸索出了箱体类钛合金零件变形量控制技术和高效数字化加工方法，为今后其他军、民用飞机钛合金材料箱体零件的数字化加工制造提供了有利的参考依据。

从航空结构件的发展方向看，整体结构件将逐步成为主流，同时伴随零件结构的日趋复杂、零件几何精度的不断提高，高性能材料得到了大批量的应用。鉴于钛合金材料具有比强度高、热强度好及耐腐蚀性好等一系列优良性能，因此在军、民机结构件中得到了最为广泛的应用，是现阶段最有应用前景的材料之一。

箱体零件结构有封闭式、半封闭式和开敞式，来料均为模锻件且余量分布不均。本文选取了

一种典型的钛合金箱体零件，其特点是：型腔内转角规格不等，槽腔较深，配合面尺寸精度高，缘条内外表面存在较厚的下陷，箱体内部壁上分布不同规格导孔需要钻制，并且由于该箱体类零件交付俄方后需要焊接成一个整体件，加工过程中需要按俄方工艺数模制造，所有筋条或缘条端面留有阶梯状余量，需要采用T形刀具进行加工。本文的研究过程中，为钛合金箱体类零件的数字化加工制造积累了宝贵经验，这对提高我国机械制造业的技术

水平有很大的帮助。

1. 零件结构特点

本文选取的箱体零件为钛合金模锻件，结构上属于半封闭式箱体（见图1），是某机型前机身封闭式箱体焊接组件（见图2）中一个最大

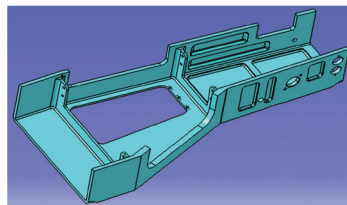


图1 箱体结构零件示意图

孔加工，去除表面多余的氧化层，按此方案零件可以正常加工。

在切除矩形槽过程中，电极丝在加工槽一周最后即将切断时，切除下的废料与零件表面连接部分会由于废料的自重和线切割产生的切削力而断裂，在起点和终点交接处的内壁上残留一部分多余物，而由于槽宽较小，中心切除下的废料需使用工具将其顶出后，再把零件重新装夹进行一次精加工，将这一部分残留槽整除干净，这样才能保证矩形槽整

体的外形尺寸。

4. 结语

通过该零件的加工，摸索出了一种有类似直径小且深度长的槽（孔）结构件的加工方法，为以后此类零件的加工提供了借鉴。

参考文献：

- [1] 孟少农. 机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
- [2] 王先逵. 机械制造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

MW（收稿日期：20160629）

专家点评

该文别出心裁地选用打断裂丝锥的电火花打孔机加工深槽穿丝孔，并借助专用工装，采用两端打孔的方法，解决打孔机定位和加工精度差的问题，减少了电极丝偏移误差。文章很实用，小设备解决大难题，就地取材的方法给了我们很好的启示。

的分装件，零件外廓尺寸为480mm×185mm×1 000mm，最大下刀深180mm，金属去除率大，零件加工周期长。该焊接组合件由多个分装件组成，因为焊接零件一般都要留工艺余量，这往往会给机加工带来很大的加工难度，把工艺数模和设计数模装配后进行对比，发现零件每个焊缝都留有工艺余量，这样造成零件侧壁存在凹陷的台阶，只有应用T形刀才能将侧壁的凹陷加工到位。由于T形刀的加工效率低，加之此分装件需要应用T形刀加工的区域非常大，这势必会大大增加零件的加工周期。

零件材料为B T 6 ч，国内与其相对应的牌号为TC4钛合金，属于难加工材料，广泛应用于航空工业中，其主要特点为：①强度高，其值一般为60~150kg/mm²；而比重低，仅为4.5×10⁻³g/mm³。②热强度高，热稳定性好，在300~500℃条件下，其强度比铝合金高约10倍。③化学活性大，亲和性强，在热加工中，易吸收氢、氧、氮及碳等杂质。④工艺性差。因其导热性差、摩擦系数大，使得切削加工性差，易变形。⑤抗腐蚀性好，对大气、海水及其蒸气以及

一些酸、碱、盐介质有较高的抗腐蚀能力。

2. 加工难点分析

本项目具体需要攻克的难点包括：

(1) T形刀具的应用、加工参数和加工方法的摸索。箱体类零件因其结构特点，普遍需要多个加工工位、多方向加工，且存在很多难加工部位，这些难加工部位可以应用T形刀具加工到位。

(2) 转角处理。零件的底角、转角规格不等，深腔槽多规格转角的加工和处理方法需要进一步验证。

(3) 多工位加工技术研究。箱体零件结构复杂，往往需要多个工位才能保证零件加工到位，而有一些零件尺寸也需要两个甚至多个工位来保证，工位转换存在误差累积，这给保证零件尺寸增加了难度。

(4) 刀具选择。箱体类零件由于其自身的结构特点，箱体内外往往都存在大的下刀深，这需要专用的加工刀具，且加工过程中容易产生振动和让刀，难以保证尺寸，需要多次光刀。

3. 关键技术

本项目突破了如下关键技术。

(1) 应用T形刀具实现难加工位置的加工。该箱体零件的工艺数模如图3所示，可见由于侧壁顶端绿色部分留有焊接余量，与箱体内壁存在2mm的阶差，所以不仅是箱体内侧壁的凹槽处，整个箱体内侧壁都需要用T形刀加工。通过在实际生产过程中的摸索，探究出了T形刀具使用的关键技术：首先是验证刀具。在刀具使用之前，需要用测量工具测量出刀具的尺寸与设计尺寸是否相符。刀具的尺寸精准是保证零件尺寸的前提，特别是零件进行精加工之前，应该再次对T形刀具的尺寸进行测量；其次是底面留余量分层加工。由于T形刀具没有底刃，如果加工时底面不留余量，会造成零件与刀具的磨损，甚至损坏刀具，或对零件造成不可逆的损伤。与此同时，在使用T形刀具时，应采用分层加工的方式，逐层去除余量；最后，加工过程中T形刀具的刀柄应该躲开零件，避免刀具刀柄与零件发生碰撞，这就需要在CATIA编程和VERICUT仿真过程中严格按照刀具尺寸做出刀具模型，然后检测其在加工过程中刀具和刀柄的位置，保证刀柄能够避开零件，不与其发生碰撞。

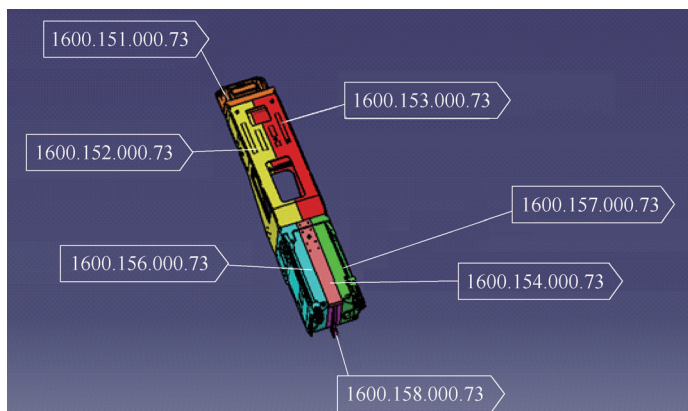


图2 焊接整体箱体示意图

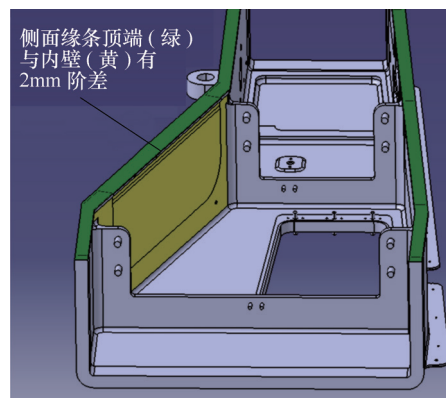


图3 工艺数模焊接余量示意图

(2) 多规格转角的处理方法。箱体类零件会存在多规格的转角,且随着不同槽腔深度的变化,转角的深浅也不尽相同。深槽腔转角对刀具的下刀深有很高的要求,刀具长度太长之后,加工时会产生颤动和让刀,无法保证转角加工到位。粗铣后的转角若不处理就进行精加工,往往会导致刀具的损坏。

针对这一问题,采取了分层清转角和插铣转角的方法解决。首先用短刀将能加工的部分加工到位,再更换长刀对之前短刀加工不到的地方进行分层清转角处理,这里注意分层的层深要兼顾加工效率和加工效果,综合前一把加工刀具直径、转角直径和转角深度考虑,分层清转角如图4所示。

另外一种更为高效的清转角方法是插铣,如图5所示。插铣是利用刀具的底刃对转角进行铣削,相对于分层的方法来说更为高效,对于转角残留较大的部位,往往需要插铣多刀,具体插铣几刀,也是要综合考虑前一把加工刀具直径和转角直径的大小。另外,插铣时刀具的轴向受

力较大,不适宜插铣深的转角。因为深的转角插铣需要更长的刀具,而刀具在插铣过程中的受力时间长,受力部位容易向刀具局部集中,进而造成刀具在插铣过程中折断。所以在深槽腔的转角加工时,往往不应用插铣进行转角的处理。转角清理后精铣,可以保证转角数控加工到位,无需常规补加工。

(3) 多工位加工。箱体类零件由于其自身结构的特点,往往都需要多工位加工才能完成零件的制造。图6所示的箱体类零件需要在四个方向加工,有些尺寸需要在两个以上工位保证,由于误差累积,导致厚度公差不容易保证。在加工过程中,要避免多次重新装夹造成的误差累积对壁厚尺寸的影响。此零件采用三坐标立式机床加工,通过利用铣夹不同工位的定位实现各个方位的加工。为了减少申请制造专用工装

的时间和成本,尝试直接在机床上定位。

(4) 刀具的选择及切削参数。该箱体的特点是槽腔很深,且工艺数模中留有焊接余量,极大地限制了加工中刀具的选择。选用国产特制刀具,长短刀交替加工。由于受到零件槽腔内形面的影响,不宜选择过大直径的刀具。粗加工、半精加工和精加工大多数都选择的刀具直径为40mm。由于箱体内形深度较深,所以在粗加工内形时,刀具选用长短搭配方式进行。浅切削深度时选用短刀长刀具加工,提高刀具的刚性,使得加工线速度尽量提高,进而提高加工效率。

切削参数的选择需要综合考虑。对于不同的刀具材料,加工不同的零件材料时,选用的切削参数不同。另外,对于不同的加工目的,选取的切削参数也不同,粗加工是为了去除大部分余

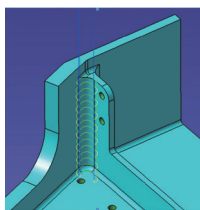


图4 分层清除转角示意图

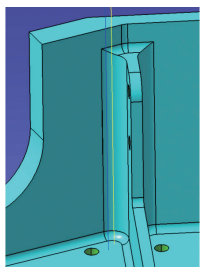
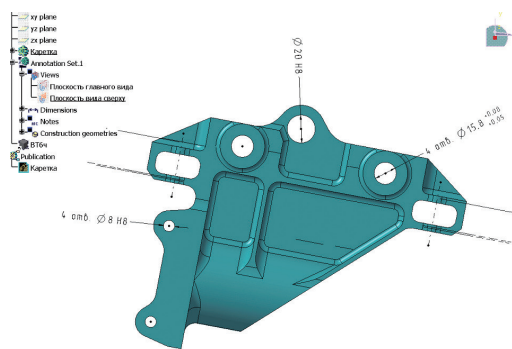
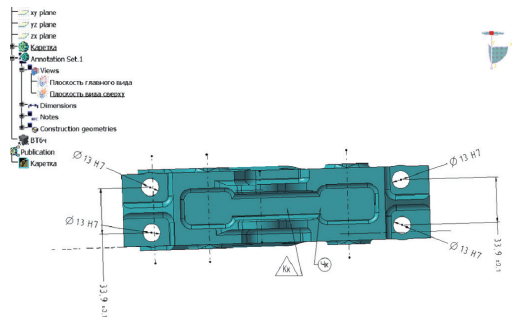


图5 插铣转角示意图



(a)



(b)

图6 典型多工位加工箱体零件示意图

量，因此，切削参数要尽可能地选取上限值；精加工为了保证零件的尺寸，则需要选取合适的加工参数。

对于侧刃加工的形式，可以按照等截面积方式换算切削深度与切削宽度。粗加工选取较大的参数，精加工选取较小的参数。由于钛合金材料本身变形系

数小，所以刀具的每齿进给量不宜选择过大，否则会加剧刀具的磨损，使刀具寿命下降。粗加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.13\sim0.20\text{mm/z}$ ，半精加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.10\sim0.13\text{mm/z}$ ，精加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.06\sim0.10\text{mm/z}$ 。在精加工中主要通过切削速度的提高来弥补每齿

进给量的不足，最终达到表面的光整加工。此外，切削钛合金材料刀具线速度一般选择 $v_c=20\sim60\text{m/min}$ 。

附表列出了加工中所使用的刀具和相对应的切削参数。

实际在粗加工过程中，严格限制了轴向切深，每层最大深度10mm，避免因切削深度过大

加工刀具选择及切削参数表

加工类别	刀具规格			切削参数					
	(直径 ϕ /mm)和(底圆角半径R/mm)	齿数	刃长/mm	线速度/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	每齿进给量/($\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$)	主轴转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	切削深度/mm	切宽/mm	进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
粗加工	$\phi 40\text{R}4$	4	65	25.10	0.11	200	5	30	88
粗加工	$\phi 30\text{R}3$	4	55	28.26	0.15	300	3	2	180
精加工	$\phi 20\text{R}5$	4	60	37.24	0.08	600	2	0.5	192

产生过多的切削热，导致零件变形。此外，切削过程中的切削液一定要充分供给，切屑的清理要及时，否则会对刀具的切削性能产生不利影响，严重时会影响已到已加工表面的表面质量。

另外，由于零件侧壁有凹陷的台阶，转角 $R12\text{mm}$ 、凹槽深 11mm ，T形刀无法加工到位，只有大悬深的硬质合金刀具才可以加工到位，所以需要申请加长刀杆，刀杆长度为 320mm ，如图7所示。

4. 结语

通过对以上工艺方案的摸

索、制定，得到了一种箱体类钛合金零件变形量控制技术和高效数字化加工方法，该方案已经在箱体类零件制造中得到应用验证，运行稳定并取得了显著效果，实现了我国航空制造业技术上的突破，其应用范围及实施规模处于国内同行业领先水平，为今后其他军、民用飞机钛合金材料箱体零件的数字化加工制造提供了有利的参考依据。

参考文献：

- [1] 陈五一，袁岳峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技

术，2010（15）：15-18.

- [2] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

- [3] 王先逵. 机械制造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

MW（收稿日期：20160810）

专家点评

本文所述箱体零件材料为钛合金，属难加工材料，而且零件结构较复杂，加工有一定的难度。作者针对零件的加工难点，分析制定了T形刀具加工难加工位置、多种规格转角的处理及零件的多工位加工等工艺措施，并在实际加工中进行验证，摸索出了这类箱体零件的加工方法，为今后这类零件的加工积累了丰富的经验。

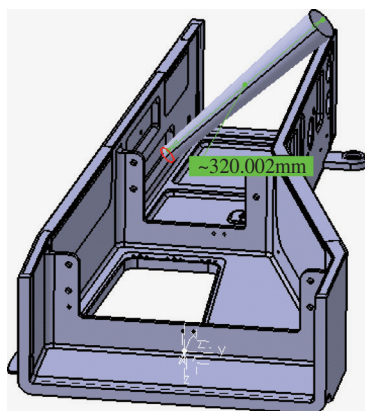


图7 箱体零件大下刀深示意图