

防止铝合金工件变形的工艺方法

白雪坤

成都剑润优能航空设备制造有限公司 四川成都 610213

摘要：阐述铝合金零件加工变形的原因及常规工艺方法。根据材料特性和零件特征改进工艺路线，通过时效处理和加工方法的改善，解决加工变形问题。

关键词：铝合金；变形；落料；吸盘；时效处理；加强筋；填充

1 序言

目前，铝合金材料大量应用于航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中。对于铝合金工件加工工艺的研究内容，大部分是如何控制铝合金变形，从而进一步提高产品精度。

2 铝合金工件的常规加工方法

(1) 落料加工 又称套料加工，即用类似铣槽的方法让工件从毛坯上脱落下来，一般底面留量 $0.10\sim 0.15\text{mm}$ 。该加工方法常用于外形、内腔及内孔有较大的材料去除量时，可避免大余量开粗造成的因热量及内应力集中而导致的工件最终变形。

落料加工对于防止铝件的变形具有重要的作用，特别是配合吸盘，可以解决一大类薄壁件变形及装夹问题，非常适用于板类零件的加工。落料加工如图1所示。

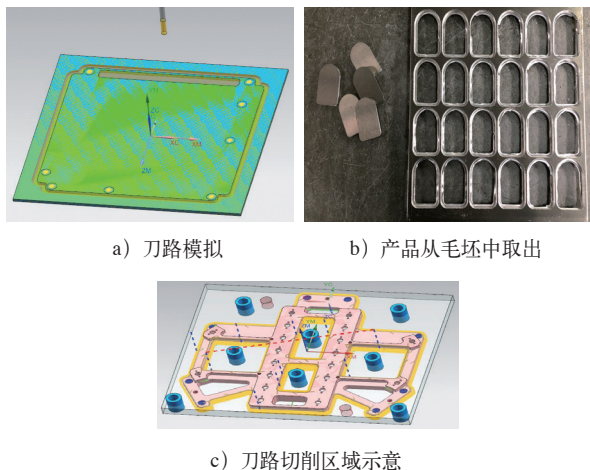


图1 落料加工

(2) 真空吸盘法 工件的定位面吸附在吸盘上，配合压板对工件进行加工。吸盘装夹，配合落料加工方法，只要产品中有可以吸附的面，即使是斜面、曲面也适用。运用吸盘和落料加工，可以完成各种板类薄壁件的加工，即使板厚只有 0.5mm ，也可以加工。通用吸盘如图2所示，根据产品设计的专用吸盘工装如图3所示。

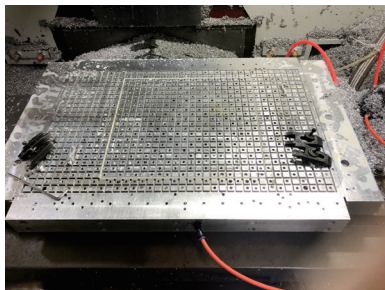
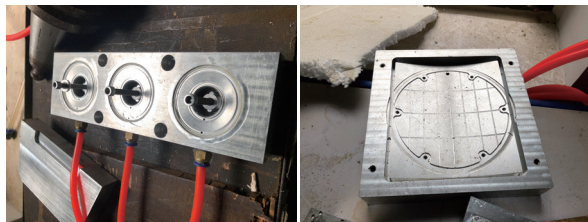
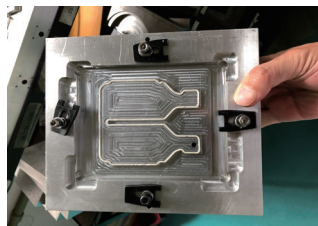


图2 通用吸盘



a) 小叶轮吸盘工装

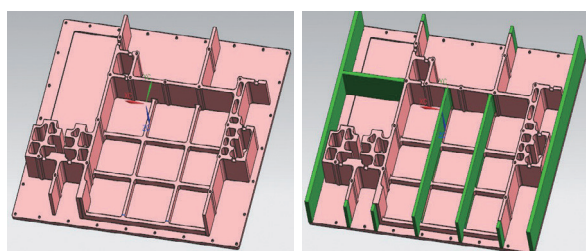
b) 凹模吸盘工装



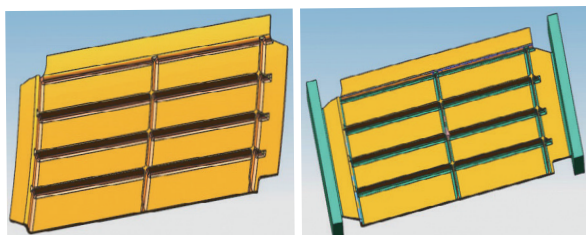
c) 气动壳吸盘工装

图3 根据产品设计的专用吸盘工装

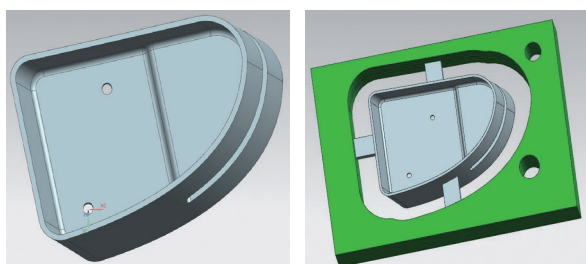
(3) 设计加强筋和工艺料头 若产品结构强度不足以支持后序精加工, 则需在开粗时留下加强筋, 从而保证精加工前的装夹强度, 且去除加强筋时也不会产生多余的热量及应力。采用该方法的工件外形尺寸不宜过大。例如: ①设计加强筋便于虎钳装夹加工工件背面(见图4)。②设计工艺料头便于后序定位(见图5)。③设计工艺料头+加强筋便于后序定位和加工(见图6)。



a) 产品结构 b) 设计加强筋
图4 设计加强筋便于虎钳装夹加工工件背面



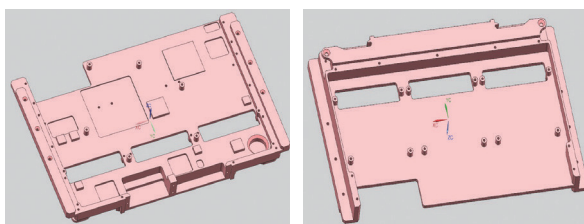
a) 产品结构 b) 设计工艺料头
图5 设计工艺料头便于后序定位



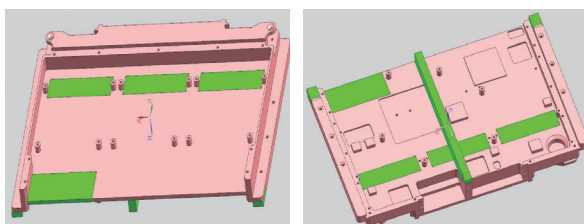
a) 产品结构 b) 设计工艺料头+加强筋

图6 设计工艺料头+加强筋便于后序定位和加工

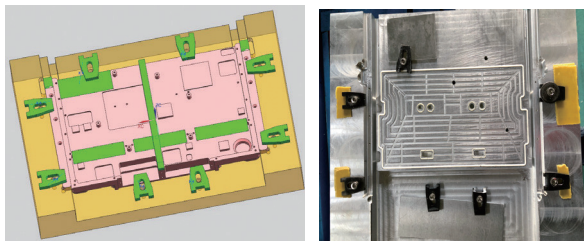
常规加工方法的综合应用实例如图7所示。工艺实施方法如下: ①根据产品正反面结构分析, 工件反面加工内容较少, 适合作为定位面(见图7a、图7b)。②定位面补面, 便于后序吸盘装夹(见图7c)。③产品较薄, 易变形, 正面设计加强筋, 可同时避免产品粗加工变形、定位面精加工变形(见图7d)。④定位面精加工完成后, 通过专用吸盘工装装夹, 完成产品正面精加工(见图7e、图7f)。



a) 产品正面结构 b) 产品反面结构



c) 反面定位面补面 d) 正面设计加强筋



e) 专用吸盘工装装夹, 精加工正面 f) 专用吸盘工装实物

图7 常规加工方法的综合应用实例

3 时效处理

(1) 间接时效处理 即将粗加工单独作为一道工序替代时效处理。工件在机床上加工, 粗加工完成后取下工件, 然后再进行精加工, 中间可以不用间隔时间(如果是批量生产产品, 统一开粗后再进行精加工即可, 中间不用间隔时效时间)。注意: 工件需进行完全开粗, 整体开粗后单边留余量0.5mm, 再进行精加工。

毛坯的开粗过程就是一次间接的时效处理, 而工件的二次松开与夹紧过程就是应力的间接释放过程。该方法适用于大部分精密结构件、航空结构件的加工。

(2) 时效处理 ①人工时效: 对于铝合金工件来说, 大部分方法就是开粗后放置24~48h。主要针对大型零件和薄壁零件, 过程较慢。②热处理时效: 相对于人工时效过程更快捷, 较多应用于结构复杂的大余量开粗的封闭性零件。

两种方法在铝合金工件的加工上都在沿用, 较多应用于去除余量大、精度要求高的产品, 目的就是去除内应力, 获得稳定的组织。若产品在结构上

属于动力零件（见图8），则多数要求做时效处理：首先，时效处理能有效地消除内应力，保证后续加工的尺寸稳定性；其次，在去除内应力的同时，可以获得稳定的组织，以免运动过程中持续产生的热量使原本合格的产品再次产生变形。

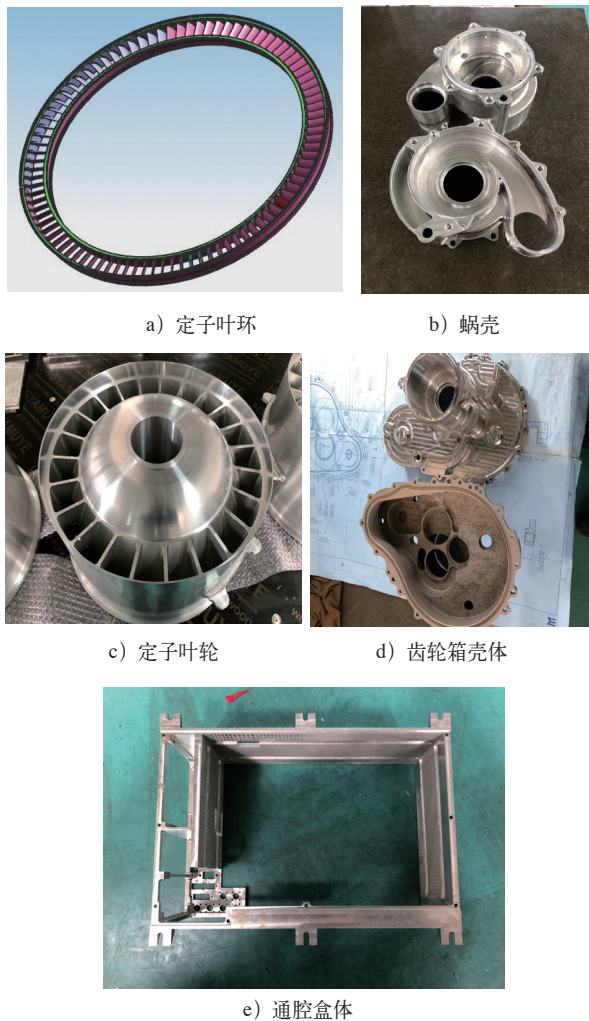


图8 在结构上属于动力零件的产品

4 防止铝合金产品基准面变形的方

在加工中，经常会遇到精加工前基准面已经变形，无法作为精加工基准的情况，又因为铝合金工件的变形为弹性变形，所以无论是压还是夹，松开之后均存在回弹现象，造成精加工后尺寸变形、超差。

铝合金产品基准面防止变形的方

1) 若工件只能用铣的方法，则一定要在工件主体强度足够高的前提下加工基准面，这样精铣的基准面才会平。

2) 若工件只能用铣的方法，且工件较单薄，则

同样需要在先保证一个基准面较平的情况下，多重复几次，即多翻几次面，才可有效地消除变形量。不过此方法最终获得的面依然会有一定的变形。

3) 在工件自身结构允许的情况下，车也是很好的方法，而且车的面比铣的平。因为在车削过程中几乎不产生热量，所以在粗加工后可以不进行半精加工，而是一次性地把基准面车削到位。笔者曾经加工一个四方形产品的基准面，在铣削时总是出现变形，即使刀具的进给速度很慢，但是由于刀具与工件是面接触，所以不可避免地会产生热量及应力。最后改用单动卡盘夹持四方形工件，车出了合格的基准面。车削终究是刀尖点接触，不会出现大面积的热量及应力集中。举例如下。

待加工产品如图9所示。工件材料为2A12-T4，毛坯尺寸 $120\text{mm} \times 400\text{mm} \times 12\text{mm}$ ，产品尺寸 $370\text{mm} \times 110\text{mm} \times 7\text{mm}$ ，要求两大面平行度为 0.03mm 、平面度为 0.025mm 。初始工艺方法：采用精度较好的加工中心，反复多次翻面铣削，去除多余余量，厚度的几何公差无法达到要求。改进后的工艺方法：①用车床配合单动卡盘夹持，车削一面见光。②在加工中心上，见光面作定位面，在保证不伤到工件的前提下，在毛坯四周制作螺纹孔。③制作车床专用工装，螺钉反向拉紧工件，将产品厚度车削至尺寸达到图样要求。

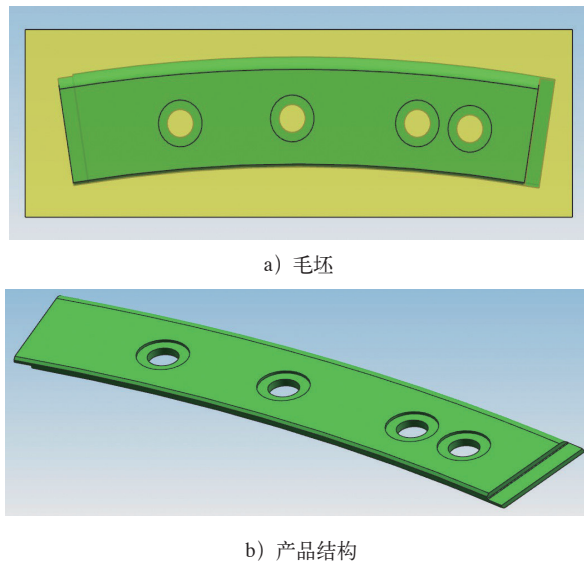


图9 待加工产品毛坯及结构示意

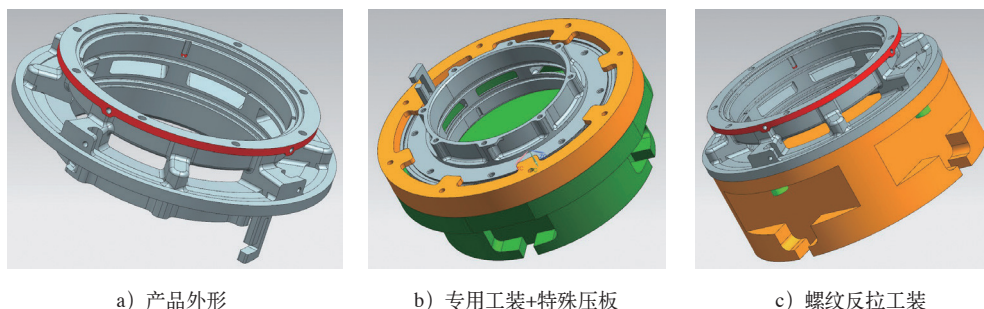
5 防止铝合金产品变形的装夹思路

除了吸盘装夹防止变形外，不能用吸盘装夹的

产品该如何装夹？可以肯定地说，除了开粗时可以用虎钳装夹，之后的工序大多是不允许用虎钳直接接触工件的。因为虎钳的力是水平的，而工件材料本身又属于易变形材料，虎钳的夹持力会造成工件出现弹性变形，所以工件需要合理的向下装夹力，也就是采用类似压板或螺钉装夹的方式。

铝合金工件加工工装的设计思路其实就是要考

虑装夹力的方向，参考方法如下：①设计专用工装+特殊压板、螺纹反拉工装（见图10）。②内孔配合+小凸台限位（见图11）。③设计带销钉的软钳口（见图12）。④设计带限位的V形定位工装（见图13）。⑤设计与外形配合的单件工装块和多模块工装（见图14）。⑥设计特殊压板配合的工装（见图15）。

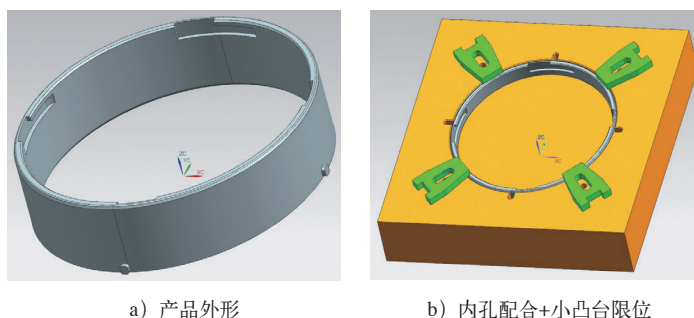


a) 产品外形

b) 专用工装+特殊压板

c) 螺纹反拉工装

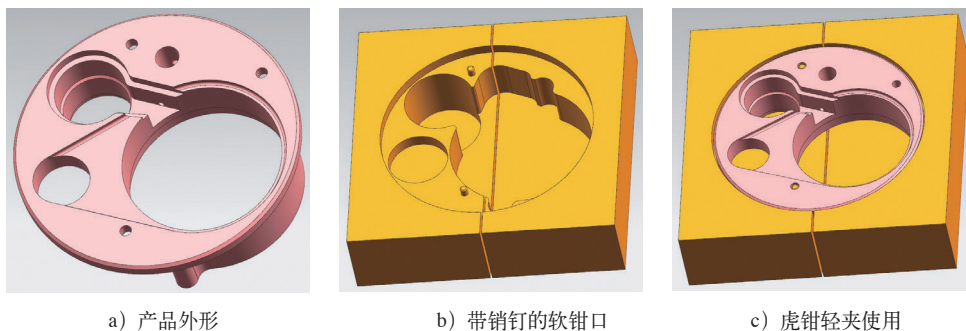
图10 设计专用工装+特殊压板、螺纹反拉工装



a) 产品外形

b) 内孔配合+小凸台限位

图11 内孔配合+小凸台限位

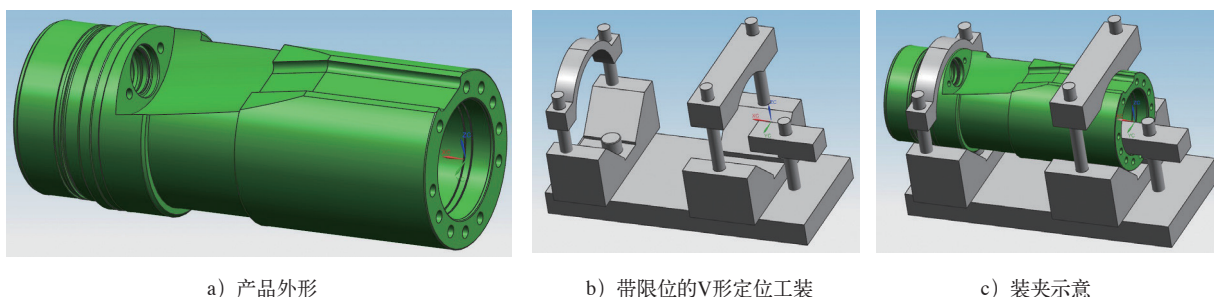


a) 产品外形

b) 带销钉的软钳口

c) 虎钳轻夹使用

图12 设计带销钉的软钳口



a) 产品外形

b) 带限位的V形定位工装

c) 装夹示意

图13 设计带限位的V形定位工装

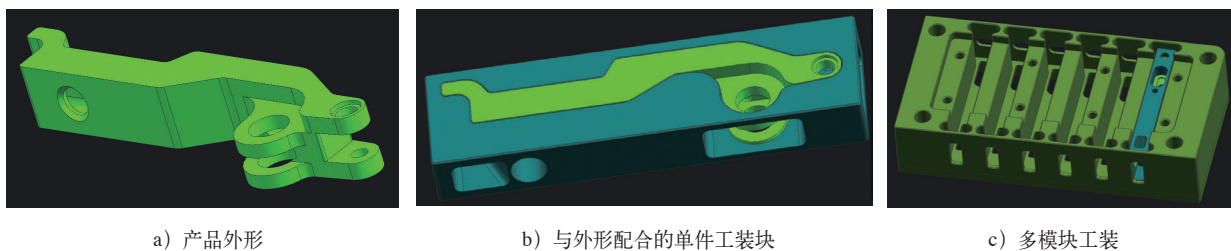


图14 设计与外形配合的单件工装块和多模块工装

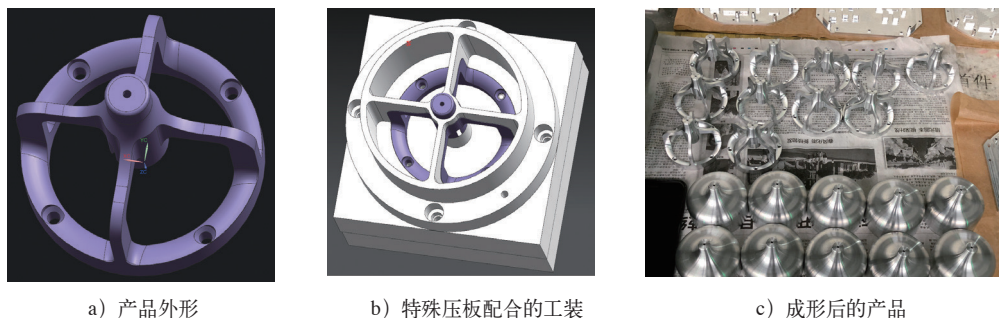


图15 设计特殊压板配合的工装

6 针对铸铝件塑形变形的工艺改进措施

铸铝件产品有一定的特殊性。由于是铸件，所以产品精度要求通常很高。其外形上一些不重要的地方已经铸造成型，在方便的同时却存在一些缺点：①铸件本身结构已经缺乏刚性，加工时更是缺乏装夹刚性。②铸件在加工过程中就是一个应力集中体，稍作加工，内应力便存在。③大部分铸铝件加工后的基准面和基准孔都很容易出现塑性回弹。

图16为某铸铝件的加工过程，期间并无造成硬

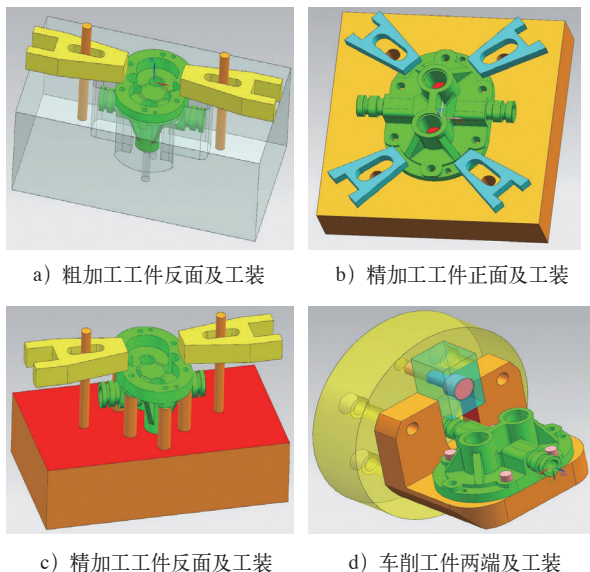


图16 某铸铝件的加工过程

性变形的刚性装夹，但是加工出来的产品尺寸精度及几何公差都达不到要求。

该产品的主要精度要求：竖直两个孔的极限偏差为 $^{+0.01}_{-0.01}$ mm，大平面平面度为0.02mm，大平面与两个竖直孔、水平孔的垂直度和平行度均为0.03mm。

对加工工艺进行改进如下。

1) 第一次改进：加工过程中，由于孔加工完成后出现尺寸回缩现象，检测得到回缩量为单边0.005mm，因此精镗尺寸单边增加0.003mm。在对孔的镗削方法上，增加两次空刀。经检测孔的公差合格，但是产品几何公差超差。

2) 第二次改进：换一种思路，对大平面及相对面分别增加一次光刀，且光刀余量为0.08mm，成功地保证了产品尺寸及几何精度，由此可见，铸铝件的塑性变形应该引起重视。

7 铝合金材料自身易变形情况

两种常用的铝合金材料的机械加工性能如下。

(1) 2A12铝合金 可进行热处理强化，常用于高端产品如军工、航天等高负荷零件和高精密模具，其中2A12-T4是应用最多的硬铝合金材料。2A12铝合金的机械加工性能良好，但其最大的特点是易变形，是考验工艺人员水平的代表性材料。

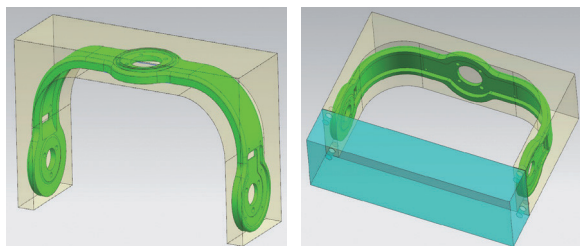
(2) 6061铝合金 强度虽然不能与2系或7系

铝合金相比,但具备优良的焊接特点和电镀性,以及良好的抗腐蚀性,在工业上应用非常广泛,产量已超过有色金属材料总量的1/3,常用于强度和抗腐蚀性要求较高的各种工艺结构件,例如船舶、电车和手机壳等。6061铝合金的机械加工性能体验极佳,不易变形,但是一旦变形,几乎就是报废,校形非常困难,特殊结构的产品除外。

8 开放性硬填充和化学填充

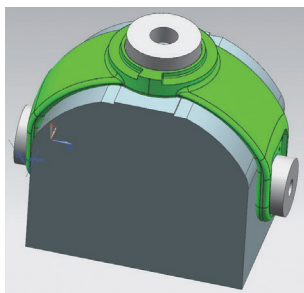
(1) 开放性硬填充(见图17) 图17a为开粗后的状态,内部为工件,外部为毛坯,且为开放性毛坯。之所以不做成封闭性毛坯,是因为切断会造成产品大量的应力集中,通过销孔联接块将刚性提高,粗加工后可以取下联接块,释放应力后,再次联接进行后序精加工,以达到减少工件变形的作用。这里值得一提的是,填充的一个最重要的作用是增强刚性,另一个作用是增加产品的时效性。

工件内弧面加工至达到尺寸要求后,配合内弧面填充支撑工装,加工外部余量,起到增强刚性的作用。



a) 工件与开粗后的毛坯

b) 销孔联接块



c) 内部填充加工外形

图17 开放性硬填充示意

(2) 化学填充 主要用于精加工。该方法笔者目前仅用过一次,是给一个薄壁的弧形铝合金叶片做化学填充,同时还需要工装的辅助。化学物质填充进已加工的弧面,随着化学物质的凝固,对装夹面是一种无缝隙的支撑,这样既防止了变形,又可

以避免加工中因产品过薄而产生振刀现象。该方法不是大众化的通用方法,而是针对专用产品的特殊工艺方案。

9 钳工校形

钳工校形大部分针对的是板类零件,非常考验钳工的技能 and 经验。且钳工校形终究是机械校形,毕竟可以校形的产品至少需要一个好的机体作为前提。此外,笔者认为校形的大部分产品本身价值不会太高。钳工校形一般分为粗加工校形和精加工后校形。技术好的钳工对板类产品进行校形,校平精度在0.1mm左右。

10 结束语

防止铝合金工件变形的工艺方法很多,转变思路尤为重要。在实际加工中要抓住零件结构和材料特征去寻找突破点,采用合理的装夹方式和切削路线,通过时效处理消除应力变形,用简单的方法去解决复杂的问题。

参考文献:

- [1] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 余光国, 马俊. 机床夹具设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.
- [3] 曾正明. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 蔡春源, 汪恺, 余俊, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

MW 20210402

专家点评

文章的亮点是工艺思路的转变,在防止铝合金工件加工变形方面别出心裁,用简单的方法去解决复杂的问题。在常规加工方法的基础上,抓住铝合金材料特性实现技术突破,将粗加工单独作为一道工序替代时效处理,通过工装设计减少装夹变形,采用余量切削消除塑性变形,困难迎刃而解。