

航天薄壁框架类零件数控加工的变形抑制方法

刘剑龙,陆荣,孔维森,徐兴硕,尹春晖,刘晓

(上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200240)

摘要:针对航天薄壁框架类零件数控加工过程中的变形抑制问题,对加工工艺、装夹方式与切削路径进行分析,获得产品数控加工变形的影响因素并提出相关优化方向,改进总体加工工艺,量化夹持点、夹紧力等装夹要素,提出切削路径优化方法。通过产品加工验证试验,证明上述优化要素的有效性,为航天薄壁框架类零件的数控加工变形抑制提供技术支持。

关键词:薄壁框架类零件;数控加工;变形抑制;加工工艺;装夹方式;切削路径;有限元分析

中图分类号:TH16 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0059-03

Deformation Suppression Method for Nc Machining of Spaceflight Thin-Walled Frame Parts

LIU Jianlong, LU Rong, KONG Weisen, XU Xingshuo, YIN Chunhui, LIU Xiao

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the deformation suppression in NC machining of spaceflight thin-walled frame parts, the machining technology, clamping method and cutting path are analyzed. The influencing factors of the above process on the NC machining quality of the products are obtained, its relative optimization direction is put forward, the overall machining process is improved, the clamping elements such as clamping point and clamping force are quantified, and the cutting path optimization method is put forward. Through the product machining verification test, the effectiveness of the method above is proved. The technical support is provided for NC machining deformation suppression of spaceflight thin-walled frame parts.

Keywords: thin-walled frame parts; NC machining; deformation suppression; machining technology; clamping means; cutting path; finite element analysis

0 引言

随着我国各类航天器发射需求的大幅增加,航天制造企业的生产压力也在不断地增大。为了能够更好地完成各项发射任务,航天企业必须不断地完善加工工艺,提升加工效率。目前,典型的航天产品大多采用高强度铝合金材料制成。由于产品具有结构复杂、材料去除量大、薄壁、易变形的特点,并且对零件的加工精度、质量有更高的要求,所以薄壁框架类零件的加工难度更加突出。传统的加工方法难以控制零件尺寸,成品率低,数控加工后还需借助钣金整形,对钣金技能要求较高,即使这样,该类零件的合格率仍较低。上述问题已成为制约航天型产品研制生产的瓶颈。

以某航天电器系统安装底板为例,其最大包络尺寸约为 250 mm×230 mm×25 mm,几何特征如图 1 所示,其尺寸精度要求 0.02 mm,平面度要求 0.05 mm,呈薄壁镂空特征。该零件材料为 2014 铝合金,材料硬度相对较小,热膨胀系数大,来料状态为板状锻件,数控加工过程中材料去除率大,易产生变形。

针对上述问题,本文从整体加工工艺、装夹方式与切削路径等方面入手,面向薄壁特征数控加工变形抑制,对

加工工艺进行改进,量化装夹方案,优化切削路径,并通过产品加工试验,验证优化工艺的有效性。

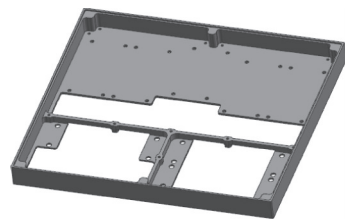


图 1 零件几何特征图

1 影响零件加工精度的因素

在机械加工过程中,一个完整的工艺系统是由机床、夹具、刀具和工件组成。在整个过程中,影响零件加工精度的因素有很多。对完整的工艺系统依次分析,可得到影响零件精度的主要因素是机床本身的精度、机床的热变形、工件在装夹过程中的夹紧变形、刀具的精度、在加工过程中切削力和切削热引起的变形以及零件残余应力释放引起的变形等(图 2)。在所有影响精度的因素中,夹紧变形对零件精度的影响最大,其次为工艺系统热变形和应力释放^[1]。上述变形与整体加工工艺、装夹方式与切削路

基金项目:国家科技重大 04 专项(2018ZX04011001)

作者简介:刘剑龙(1988—),男,工程师,本科,研究方向为航天结构件的数控加工。

径均存在直接的关系。以下将针对上述三点进行分析优化,以实现加工变形抑制。

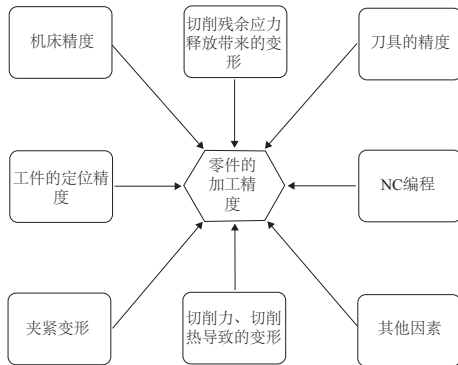


图2 影响零件加工精度的因素

2 总体加工工艺的改进

对于薄壁框架类零件的数控加工,通常的变形抑制方法是多次稳定化处理、自然时效并分粗加工、半精加工、精加工多道工序完成。上述措施虽能在一定程度上抑制变形,但是流程繁复,耗时较多,且在半精加工、精加工工序中,受制于薄壁特征的刚性问题。为减少变形,各项刀具参数的提高均受到限制,导致加工效率降低^[2]。

针对上述情况,以提高产品加工整体刚性为出发点,在半精加工、精加工工序中,采用向零件内部填充石蜡、石膏或者树脂聚合物的方式提高产品整体刚性(图3)。这些填充物都具有同样的特点,融化与固化迅速、刚性好、价格低廉。姚荣庆^[3]提到在近几年广泛使用一种聚合物作为增强零件刚性的材料,该聚合物组成成分主要是聚氨酯树脂和硫酸钾,其成分配比为96:4。这些填充物均可局部或整体地增强非刚性零件的刚性。加工完毕后,将零件加热或者放入水中,都可以使零件与填充物脱开,但使用树脂聚合物时,在加工过程,不能使用水剂冷却液。

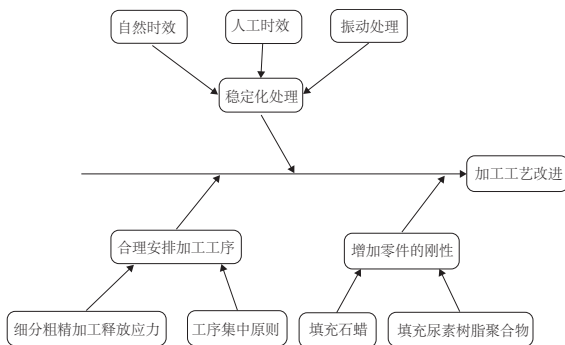


图3 加工工艺的改进

3 装夹方案量化

对于薄壁框架类零件的数控加工,传统装夹方式为虎钳装夹,存在装夹面大、厚薄不同处受力一致易导致装夹变形的问题。为此,以装夹避让薄壁处为目标,采用在零件刚性较好的转角处以支撑块顶装的方式进行装夹^[4]。该方式虽然可以较好地解决薄壁处受力的问题,但是由于

顶装面有限,顶装力过小,易造成切削加工过程中零件松动造成超差;顶装力过大,也会造成装夹变形。因此,根据产品几何特征与材料特性,确定适当的顶装力,是采用转角支撑顶装方式的关键^[5]。

3.1 通过受力仿真确定零件最大顶装力

图4显示了在零件转角处的支撑顶装方案,对装夹过程进行有限元建模分析。典型框架零件材料为2014铝合金,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.3。通过有限元分析若将零件的整体变形控制在0.02 mm以内(图5),得出最大的顶装力 F 为600 N。

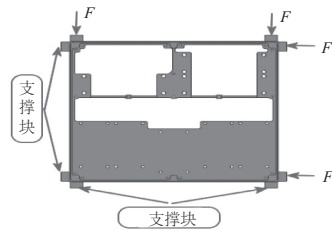


图4 施加力及支撑块位置

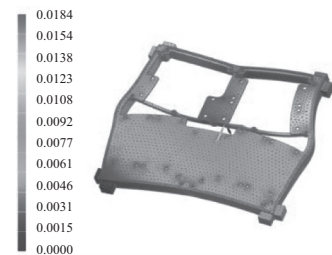


图5 位移等值线图

3.2 根据切削力确定最小顶装力

在数控加工过程中,刀具切削参数的选择是非常重要的,选择不当会导致因切削力过大引起零件的变形增大,降低刀具的使用寿命,零件表面的残余应力也会随之增加,同时影响零件的加工表面质量等,制约加工效率的提高,增加对产品精度控制的难度。艾兴等人提出高速加工技术可以有效地减少因刀具引起的加工变形。在高速切削状态下,零件的加工特性会得到明显的改善,切削力降低,尤其是径向切削力的减小最为明显,并且伴随着机床设备性能的不不断提高,高速加工也得到越来越多的应用。高速加工还有一个优点是大部分的切削热可以被切削飞速带走,零件的温度不会出现较大的波动,因此特别适用于加工容易产生热变形的零件^[6]。

因此,零件在半精和精加工加工过程中选用高速铣削的方式,并确定刀具的切削参数。零件在数控加工时使用硬质合金铣刀铣削,铣刀的齿数 z 为4齿,刀具直径 d_0 为10 mm,刀具前角为 0° 。刀具的切削参数转速 n 为13000 r/min,每齿切削量 $f_z = 0.15$ mm/z,铣削深度 $a_p = 4$ mm,铣削宽度 $a_e = 0.8$ mm。以下为线速度及主切削力计算公式:

$$V_c = \frac{\pi \times n \times d_0}{1000}$$

$$F_c = \frac{c_p \cdot a_p^{0.86} \cdot f_z^{0.74} \cdot a_e \cdot z}{d_0^{0.86}} \times K \times K_1 \times 10$$

式中: C_p 、 K 、 K_1 分别为工件材料、刀具前角和刀具速度对切削力的影响系数。

通过计算得出线速度 V_c 为 408.2 m/min, 主切削力 F_c 为 110.67 N。根据垂直分力 F_f 与 F_c 的比值为 0.9, 计算 F_f 为 99.603 N, 查表 1 可知支撑块(材料为铝合金)与零件的摩擦系数为 0.3, 计算需要的顶装力为 99.603/0.3=332.01 N。

表 1 各种材料摩擦系数

材料 A	材料 B	干摩擦条件		润滑摩擦条件	
		静摩擦	滑动摩擦	静摩擦	滑动摩擦
铝	铝	1.05~1.35	1.40	0.30	
铝	低碳钢	0.61	0.47		
黄铜	铸铁		0.30		
青铜	铸铁		0.22		
青铜	钢			0.16	

由分析计算得出的最大顶装力为 600 N, 最小顶装力为 332.01 N, 取其中值 466 N 作为装夹使用的装夹力, 通过扭力扳手进行量化。

4 切削路径优化

关于高速切削的刀位路径规划问题, 郭新贵、李从心提出高速铣削的加工路径对其高速及高精度有决定性的作用^[7]。因此在采用高速加工的同时, 从刀位路径进一步优化, 在层优先和对称铣削加工策略的前提下, NC 编程方面采用 UG 插件 iMachining 编制 CAM 文件, 使用螺旋铣削的方式, 能很好地控制切削力及加工变形, 其刀路轨迹如图 6。

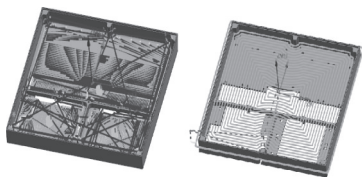


图 6 螺旋铣削与传统铣削刀路对比图

采用 iMachining 后在整个铣削过程中其优势是均采用顺铣的加工方式, 并且在拐角处自动减速, 减少了刀具的磨损和零件的颤动, 避免了传统路径没有切削过渡, 刀具超载荷, 空切削的缺点^[8]。螺旋铣削的切削角度是在最小值和最大值之间不断调整的, 同时动态调整进给确保了刀具上恒定的机械和热负荷, 以最高的材料去除率 (MRR) 保证提供最长的刀具寿命。使用螺旋线路径, 可减少振动, 防止刀具过度磨损, 并降低形成临时薄壁的可能性, 达到控制零件变形的目的。

5 产品加工验证

为了验证本文提出的优化方法是否有效, 以图 1 产品为对象, 开展产品加工试验。

验证过程中, 零件的加工分为粗加工、半精加工、精加工 3 步, 其中粗加工单边留 2 mm 余量, 半精加工单边留

0.5 mm 余量, 均采用虎钳装夹的方式, 铣削方式为高速螺旋铣削, 去除大部分材料。在零件进行精加工时, 装夹方式采用顶装方式, 施加力及支撑块位置如图 7 所示, 并通过扭力扳手对零件施加 466 N 的顶装力。按此方案加工后对零件进行检测, 零件尺寸精度、形位公差及表面粗糙度均符合图样要求。检测结果见表 2。

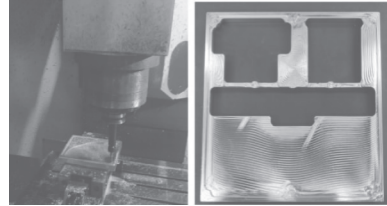


图 7 零件加工图

表 2 零件主要尺寸的检测值 单位: mm

名称	零件凹陷 长度尺寸	零件凹陷 深度尺寸	零件凹陷及 凸台平面度	零件凸台 深度尺寸	零件凸台 长度尺寸
图样尺寸	246 ^{+0.10} _{+0.05}	1.5 ^{+0.02} ₊₀	□0.05	1.5 ⁰ _{-0.02}	246 ^{-0.05} _{-0.10}
实测尺寸	246.08	1.51	□0.03	1.49	245.97

6 结语

通过开展实验, 得出相关试验数据证明本文提出的优化方法有效可行, 提高了该产品的加工效率及合格率。总结如下:

1) 向零件内部填充树脂聚合物有效提高了产品整体刚性, 避免零件的颤振, 可以采用更大的切削参数, 提高加工效率。

2) 根据分析计算得出的顶装力可以可靠地夹紧零件并且减少因过大顶装力引起的装夹变形。

3) 高速螺旋铣削有效提高了铣削效率, 因切削力恒定, 减少了加工过程中的冲击, 降低了零件的震动, 提高了刀具寿命, 达到了控制变形的目的。

参考文献:

- [1] 董朝辉. 铝合金易变性结构件铣削加工变形理论及预测方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [2] 仪维. 夹紧力对薄板件端面铣削变形的影响机理及变形补偿方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [3] 姚荣庆. 薄壁零件的加工方法[J]. 机床与液压, 2007, 35(8): 250-253.
- [4] 陈禹至, 陈蔚芳, 施圣杰. 一种薄壁件柔性多点加工工装布局优化技术[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 61-63.
- [5] 汤爱君. 薄壁件高速铣削三维稳定性及变形研究[D]. 山东大学, 2009.
- [6] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 郭新贵, 李从心. 高速切削的刀位路径规划与控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(4): 482-486.
- [8] 吴世雄, 马伟, 李斌, 等. 高速铣削摆线加工的刀具磨损研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 327(5): 99-101, 105.