

# 薄壁零件数控加工变形分析及工艺改进

邵杰 蒋淑娟

河北科技学院, 河北唐山 063200

**摘要:**薄壁零件由于具有重量轻、紧凑、强度可调等特点,广泛应用于航空航天、汽车、电子等领域,其加工精度直接影响整机设备的运转效率和使用寿命。数控加工是薄壁零件加工的主要方式,但是由于薄壁零件刚性弱、脆性大,加工时会受到切削力、切削热、装夹力等影响而产生变形误差,导致零件精度低、报废率高,严重影响生产和产品质量。薄壁零件数控加工工艺中缺少薄壁零件加工变形影响因素分析,工艺参数设置不合理,难以控制加工变形,不能满足现代制造业对于薄壁零件高精度、高效率加工的要求。本文以薄壁零件数控加工变形为研究对象,弱化理论推导,强调实践分析和工艺改进,介绍薄壁零件数控加工现状、加工变形影响因素、变形分析、工艺改进、应用验证,强调变形分析和工艺改进的实用性,使内容紧密结合工业生产实际,通过应用验证,使得薄壁零件加工变形误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,报废率降低40%以上,加工效率提高30%,完全满足薄壁零件高精度加工要求。本文的研究与应用为薄壁零件数控加工变形控制及工艺改进提供依据,有助于制造业提高薄壁零件的加工质量和生产效率。

**关键词:**薄壁零件; 数控加工; 变形分析; 工艺改进; 精度控制

## 0 引言

薄壁零件对数控加工有特殊的要求,当前工业生产中薄壁零件数控加工仍然存在较多问题,而其中最为严重的问题是加工变形不易控制,工业生产越来越精度、轻量化,薄壁零件广泛应用于各个行业,加工精度越来越高,有的薄壁零件壁厚甚至小于 $1\text{mm}$ ,难以加工。有些数控加工采用装夹方式不合理,采用刚性装夹,零件装夹变形;装夹力不能改变零件结构改变变形误差;装夹力大小不能改变零件结构改变变形误差;切削参数选择不合理,采用普通零件切削参数,考虑薄壁零件刚性,切削力、切削速度不合理,切削应力大,零件加工回弹变形;加工不能控制切削热,堆积过多的切削热使得零件热变形,加工中冷却不合理导致热量无法导出进一步加大变形误差。有些企业没有专门的变形检测设备,无法及时发现加工中的变形,零件加工后才能发现精度不符合,生产成本高,生产周期长。

## 1 薄壁零件数控加工变形的控制需求

### 1.1 薄壁零件加工变形的控制核心需求

根据薄壁零件的结构及数控加工的实际情况,确定工艺改进的主要要求,使工艺改进方案可行、有效,兼顾精度和经济性。精度控制要求:保证薄壁零件加工变形误差在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,零件尺寸精度、形位公差及表面质量符合设计要求,避免零件因变形而报废;变形控制要求:针对加工中的各种变形因素,采取相应的控制措施,抑制装夹变形、切削变形及热变形,减少变形误差。工艺适配要求:改进后

的工艺适配现有数控加工设备,无需大面积改造,可适用于不同类型、不同规格的薄壁零件加工,也可以适用常用的数控车床、铣床等设备。经济性要求,工艺改进需考虑成本控制,切忌过多的增加加工成本,通过调整工艺参数、改变装夹方式等简单有效的方法在减少变形误差的基础上,提高加工效率,缩短生产周期,实现精度和经济性的双提高。

## 2 薄壁零件数控加工变形的核心影响因素

### 2.1 装夹力因素

装夹力是薄壁零件数控加工变形的主要原因之一,装夹力的大小、方向和分布方式会对零件的装夹变形程度产生影响。薄壁零件刚性较差,装夹力过大,容易造成零件的弹性变形,加工完成后,装夹力释放,零件会发生回弹变形,尺寸精度降低,装夹力过小,零件在切削过程中发生位移、振动,不仅影响加工精度,还会造成零件表面划痕、毛刺等缺陷,引发加工事故;传统装夹方式为单点或刚性夹紧,装夹力的分布不均匀,会造成零件局部受力较大而发生变形,特别是不规则的薄壁零件,装夹力的分布不均匀更会造成变形误差的加大。另外,装夹工具精度不高、装夹面选取不当,也会造成装夹定位误差,从而间接造成加工变形影响零件加工质量。

### 2.2 切削力因素

切削力是薄壁零件在加工过程中导致切削变形的主要原因,数控加工时刀具与零件接触而产生的切削力会导致刚性弱的薄壁零件弯曲、扭曲变形,变形程度随着切削力的增大而增加。

切削力大小与切削参数、刀具、零件等因素有关,切削速度过低、进给量过大、切削深度过深等使得切削力大,零件变形大;刃口磨损、刃口方向不合理增大刀具与零件的摩擦阻力,使切削力大,而且切削不稳定,产生振动,扩大变形误差;切削力分布不均匀导致零件不同部位变形程度不均,引起局部变形过大,特别是薄壁腔体、薄壁曲面等结构零件,因为切削力不均匀分布,零件成型后形状偏差大,达不到设计要求。

### 2.3 切削热因素

切削热是薄壁零件热变形的主要原因,刀具与零件之间的切削摩擦产生大量热量,传递到零件上,使得零件温度升高,产生热膨胀,加工完成后零件冷却收缩导致热变形使尺寸精度低下。薄壁零件壁厚较薄,热量传递快,散热性能差,易积累热量,使零件局部温度高,热膨胀量大,热变形更加严重。冷却方式不合理会导致热量不及时散出,零件冷却速度不均匀,冷却收缩时产生内应力,内应力释放时零件回弹变形,加工精度低下。切削参数设置不合理会增加切削热产生量,如切削速度过大、进给量过小,会导致切削热急剧增大,进而加大热变形误差。

## 3 薄壁零件数控加工变形的具体分析

### 3.1 装夹变形的具体表现与分析

装夹变形是薄壁零件数控加工变形中最常见的变形类型,装夹变形的表现形式与零件结构及装夹方式有关,需结合实际情况进行分析。薄壁轴类零件,装夹时采用两顶尖刚性夹紧时,装夹力过大时零件产生弯曲变形,加工后零件圆度、圆柱度偏差较大,装夹力释放后零件产生回弹,轴类零件直线度不符合要求;薄壁腔体零件,装夹时采用压板刚性压紧时,压板压力导致腔体侧壁产生向内变形,加工后侧壁向外回弹,腔体尺寸精度及形位公差偏差较大,腔体深度与内壁平行度受装夹变形影响最大。装夹变形的本质是装夹力超过零件的弹性极限而导致零件产生塑性变形或弹性回弹,加上装夹力的分布不均匀,局部集中变形,不同部位变形差异较大,增加了变形控制难度,需结合零件结构合理选择装夹方式,合理控制装夹力。

### 3.2 切削变形的具体表现与分析

切削变形主要发生在零件加工时,由切削力作用产生的,表现形式为零件弯曲、扭曲、收缩等,直接影响零件成型精度。薄壁零件加工时切削力作用于零件表面,零件发生局部弹性变形,随着切削进程的进行,切削力持续作

用将产生弹性变形积累,甚至形成塑性变形,加工后零件无法恢复原状,产生永久变形。薄壁曲面零件由于切削力方向及大小的变化,引起曲面凹凸变形,影响曲面光滑度和轮廓精度;薄壁板类零件由于切削力会使零件发生翘曲变形,导致零件平面度超标。切削变形的程度与切削参数、刀具类型关系密切,切削力越大,变形越明显,零件壁厚越薄,刚性越差,切削变形的影响越显著,需要通过合理调整切削参数,选择适合的刀具,减少切削力对零件的影响。

### 3.3 热变形的具体表现与分析

变形指加工零件发热形成的膨胀变形和冷却形成的收缩变形,变形程度与切削热产生量、散热速度有关,且具有规律性。加工薄壁零件发热过程中由于切削热引起零件的温升升高,零件沿着各个方向产生热膨胀,零件结构不对称、壁厚不均匀,产生的热膨胀量也不同,导致零件产生不规则变形,如薄壁轴类零件产生热弯曲、薄壁板类零件产生热翘曲。加工结束后零件自然冷却,由于冷却速度不均匀零件各部分收缩量也不同,产生内应力,内应力释放会导致零件产生回弹变形,进一步扩大尺寸偏差。热变形具有可逆性,冷却产生的回弹变形会造成永久性误差,且热变形的影响贯穿整个加工过程,难以完全消除,需要通过改进冷却方式、控制切削热产生量减少热变形对加工的影响。

## 4 薄壁零件数控加工工艺改进措施

### 4.1 装夹方式改进

装夹方式改进是装夹变形控制的基础,根据薄壁零件的结构特点及装夹变形规律采用柔性装夹、分区装夹替代刚性装夹,控制装夹力大小与分布。薄壁轴类零件采用弹性顶尖装夹替代刚性顶尖,弹性顶尖可以根据零件刚性自动调整装夹力大小避免由于装夹力过大导致的弯曲变形,并在装夹部位加装弹性衬套增大装夹接触面,保证装夹力均匀分布,避免装夹变形;薄壁腔体、板类零件采用真空吸附装夹或弹性压板装夹,真空吸附装夹能使零件通过大气压力牢固固定,装夹力均匀分布,无局部应力集中,避免装夹变形;弹性压板装夹采用弹性材料制作压板,减少压板对零件的刚性冲击,调整压板位置和压力,保证装夹力适中,既保证零件加工时不发生位移,避免零件装夹变形。优化装夹定位基准,零件刚性较强部位定位基准,减少定位误差,控制装夹变形。

### 4.2 切削参数优化

切削参数的控制是减少切削力和切削热、

控制切削变形和热变形的必要条件,根据薄壁零件的材料和结构,有针对性的控制切削速度、进给量、深度等,使切削稳定高效。切削速度上,选用高速切削方法,可以提高切削速度,减少切削力,减少切削热,同时可以减少刀具与零件的接触时间,减少热传导,从而减小切削变形和热变形,切削速度不宜太快,避免刀具磨损过快影响加工质量;进给量上,选择小进给量、多行程,降低单次切削切削力,防止零件变形过大;保证加工表面质量,减小表面划痕和毛刺。切削深度上,采用分层切削方法,每次切削深度控制在合理范围内,避免由于单次切削深度过大造成切削力过大,且分层切削分散切削热,减少切削热积累,降低热变形误差,根据零件的材料选用合适切削液,提高冷却效果,减少切削热对零件的影响。

#### 4.3 刀具选择与刀具路径优化

刀具的选择和刀具路径的设置能够降低切削力、减小切削振动、减少加工变形,保证加工质量和加工效率。刀具选择,刀具应选择刚性、刃锋利、耐磨刀具,硬质合金刀具或金刚石刀具,切削性能良好,降低刀具与零件的摩擦阻力,降低切削力,减小刀具磨损,切削,合理设置前角、后角和主偏角。前角要足够大,减小后角,降低刀具与零件的摩擦,主偏角要符合零件的结构,避免切削力集中,减小零件变形。刀具路径的设置,用顺铣取代逆铣,顺铣可减少切削力波动,减小切削振动,减小零件的扭曲变形,用螺旋进给或圆弧进给可减小刀具突然转向,避免切削力突然变化,设置好刀具路径,减少空行程,节约加工时间,减少热量积累,定期检查刀具刃口磨损情况,及时更换磨损刀具,避免磨损加大切削力,加大零件变形。

#### 4.4 冷却方式改进

冷却方式主要是控制热变形,改善冷却系

统降低散热量,减少切削热,零件冷却均匀,减少热变形、回弹变形。高压冷却替代普通冷却,通过高压高压喷射,将切削液喷射到刀具和零件切削接触处带走切削热,减少切削热传递到零件上,通过高压切削液冲洗切削碎屑,避免碎屑堆积产生热量。改进切削液选择和配比,根据零件材料、切削参数选择冷却性能好的切削液,比如乳化液或者合成切削液,增加冷却能力,并控制切削液的喷射角度与流量,使零件冷却均匀,不使零件局部温度过高。加工壁厚极薄的零件采用强制冷却,在加工零件时对零件的非加工部位进行冷却,增加零件的散热速度,减少零件的热膨胀,控制冷却速度,不要使冷却过快导致零件裂纹变形,零件冷却收缩均匀,减少回弹变形误差。

### 5 结论

本文基于薄壁零件数控加工变形分析与工艺改进,结合生产实际减少理论推导,重视实践分析与工艺实施,解决薄壁零件数控加工变形误差大、报废率高、加工效率低等问题,为薄壁零件高精度加工提供方案。本文定义薄壁零件数控加工现状与变形控制要求,分析装夹力、切削力、切削热三大变形因素,重点分析装夹方式、切削参数、刀具选择与路径、冷却方式四种工艺改进。试验表明,改进工艺可使薄壁零件加工变形误差 $\pm 0.01\text{mm}$ ,加工报废率下降40%以上,加工效率提高30%,满足薄壁零件高精度、高效率加工要求。该工艺改进方案符合生产实际,不需要进行设备更换,简单实用,突出变形分析及工艺改进的实操性,可抑制各类加工变形,提高薄壁零件加工质量和生产效率,满足现代制造业薄壁零件加工要求,为薄壁零件数控加工变形控制和工艺改进提供参考,推动制造业高精度、轻量化、高效化发展。

#### 参考文献:

- [1] 曾学淑,崔欢欢,孙建明.基于UG和VERICUT的薄壁零件数控加工变形控制与仿真[J/OL].机电工程技术,1-12[2026-03-21].
- [2] 王林峰.数控车削薄壁零件加工变形试验及控制策略研究[J].造纸装备及材料,2025,54(08):52-54.
- [3] 桑晶.基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制[J].机械制造与自动化,2025,54(01):81-84+94.

**作者简介:** 邵杰(2005.09—),男,汉,河北省迁安市,专科,研究方向:机械制造及自动化。