

Application of workpiece clamping mode in milling deformation control of thin wall parts

Qingquan Xue

The Eighth Research Institute of China Shipbuilding Corporation, Nanjing, Jiangsu, 211106, China

Abstract

the structural characteristics of thin-walled parts are weak rigidity and sensitive to external forces. Obvious elastic deformation and residual deformation often occur in the milling stage, which will significantly reduce the machining accuracy and surface quality of parts. As the key link connecting the machine tool workpiece tool system in milling machine processing, clamping mode has a decisive impact on the stress state, deformation mode and residual stress release process of thin-walled parts. Focusing on the deformation mechanism of thin-walled parts in milling process, this paper systematically analyzes the influence of different clamping methods on the deformation behavior of parts under typical working conditions such as plane milling, sidewall milling and cavity milling, and focuses on the applicable characteristics and engineering effects of rigid clamping, elastic/flexible clamping, vacuum adsorption clamping and combined clamping in milling machine processing. Based on the comprehensive analysis of the clamping force distribution, constraint degrees of freedom and their collaborative relationship with milling parameters, the milling clamping optimization strategy for thin-walled parts with different structures is proposed, which provides a technical reference for improving the milling accuracy and process stability of thin-walled parts.

Keywords

thin wall parts; Clamping method; Milling; Deformation control

工件装夹方式在薄壁零件铣削变形控制中的应用

薛清泉

中国船舶集团第八研究院, 中国·江苏 南京 211106

摘 要

薄壁类零件的结构特性表现为刚性偏弱、对外部作用力较为敏感, 铣削加工阶段往往会出现明显的弹性形变与残余形变问题, 此类问题会大幅降低零件的加工精度与表面品质。装夹方式作为铣床加工中连接机床—工件—刀具系统的关键环节, 对薄壁零件的受力状态、变形模式及残余应力释放过程具有决定性影响。本文围绕薄壁零件铣削加工过程中的变形机理, 系统分析了在平面铣削、侧壁铣削及型腔铣削等典型工况下, 不同装夹方式对零件变形行为的影响规律, 重点探讨了刚性装夹、弹性/柔性装夹、真空吸附装夹以及组合装夹在铣床加工中的适用特性与工程效果。在综合分析装夹力分布、约束自由度及其与铣削参数协同关系的基础上, 提出了面向不同结构薄壁零件的铣削装夹优化策略, 为提高薄壁零件铣削加工精度与工艺稳定性提供技术参考。

关键词

薄壁零件; 装夹方式; 铣削加工; 变形控制

1 引言

在航空航天、汽车制造及高端装备制造领域, 薄壁零件多以框架件、板件及复杂型腔结构形式存在, 其加工过程主要依赖数控铣床或加工中心完成。铣削过程具有多刃同时参与、切削力方向周期性变化、侧向载荷显著等特点, 使得薄壁零件在铣削过程中更容易产生侧向挠曲和局部翘曲变形。

【作者简介】薛清泉(1976-), 男, 中国江苏南京人, 从事铣床加工研究。

2 薄壁零件铣削变形的产生机理分析

2.1 薄壁零件结构特点与铣床加工刚度特性

薄壁零件在铣床加工中通常表现为壁厚尺寸小、型腔深、筋肋与曲面结构并存、材料去除率高等结构特征, 其整体刚度明显低于常规实体零件。壁厚参数仍然是决定薄壁零件刚度水平的关键因素, 随着壁厚的进一步减小, 零件截面惯性矩呈非线性下降趋势, 在铣床切削载荷作用下更容易产生弯曲变形和局部翘曲现象。虽然通过设置筋板或加强肋可以在一定程度上提升零件的局部刚度和抗变形能力, 但筋板的布置方向、间距尺寸及其与壁面的连接方式, 对整体刚度改善效果存在显著差异。当筋板高度较小或分布不均时, 其

对铣削过程中变形抑制作用有限,难以有效抵抗铣床加工过程中周期性切削力的影响。如图1所示为典型薄壁零件结构。

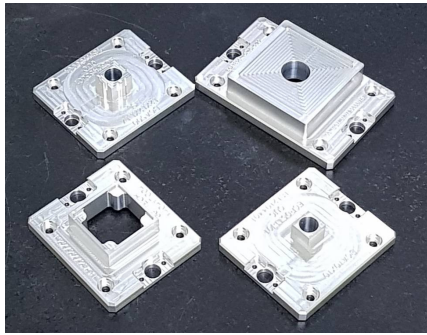


图1 铣床薄壁零件

2.2 铣床铣削过程中薄壁零件变形的主要来源

在数控铣床加工过程中,切削力是引发薄壁零件变形的最主要外部因素。与车削加工不同,铣削属于间歇切削过程,刀具齿与工件周期性接触,切削力呈现周期性波动特征,极易激发薄壁结构的弹性响应。在立式数控铣床高速铣削条件下,主切削力通常分布在30~180 N范围内,径向力和轴向力随刀具路径变化呈现明显波动特征。该类切削力作用于薄壁区域时,极易导致工件产生瞬时弹性变形,使刀具与工件之间出现相对位移,实际变形量一般可达到0.03~0.20 mm。尽管部分弹性变形会在切削结束后恢复,但在铣削过程中已对零件的尺寸精度和表面质量产生不利影响。此外,铣床加工中所采用的装夹力同样是诱发薄壁零件变形的重要因素。为确保工件在高速铣削状态下的定位稳定性,夹紧力通常控制在0.3~2.0 kN区间,若夹紧力过大或受力分布不合理,会在加工前即使薄壁区域产生初始变形,并在后续铣削过程中不断叠加,最终转化为难以消除的加工误差。

2.3 加工残余应力释放引起的变形及装夹作用机理

薄壁零件在毛坯制造及前序铣削工序中,往往已经形成一定程度的加工残余应力,其应力水平一般处于40~150 MPa范围内。在铣床逐层去除材料的过程中,原有的残余应力平衡状态被不断打破,随着材料的去除和结构刚度的降低,残余应力发生重新分布并逐步释放,从而诱发零件整体或局部的翘曲与弯曲变形。研究表明,该类由残余应力释放引起的变形在最终铣削加工误差中所占比例可达到25%~50%。同时,铣床加工中所采用的装夹方式通过改变零件的约束条件和受力边界,对残余应力释放路径具有显著影响。不同装夹方案下,零件的力传递形式与变形特征存在明显差异,过强的局部刚性约束容易导致应力集中,使变形在铣削过程中或卸夹阶段集中释放,进一步加剧薄壁零件的加工变形问题。

3 常见薄壁零件装夹方式及其特点

3.1 刚性装夹方式

刚性装夹是数控铣床加工中最常见的装夹方式之一,

主要包括虎钳装夹、压板装夹及专用刚性夹具。该方式通过机械结构向工件施加较大的夹紧力,以保证在数方向铣削力作用下工件的定位稳定性。以此保障加工过程中工件定位稳固以及抵抗切削载荷的能力,虎钳装夹一般适用于外形规整、壁厚分布相对均匀的薄壁零件,其夹紧力数值通常控制在2~5 kN区间,能够有效避免工件在切削力作用下发生整体位置偏移,压板装夹更多应用于型腔类或者异形薄壁零件,通过螺栓结构施加轴向预紧力,单点压紧力数值通常处于1~3 kN区间。

3.2 弹性与柔性装夹方式

弹性与柔性装夹方式通过设置弹性元件或者柔性机构,实现对装夹力的缓冲效果与均匀分配,常见应用形式包含弹性垫片、弹簧压紧机构以及柔性夹爪等,弹性垫片一般选用橡胶或者聚氨酯材料制成,材料弹性模量数值处于5~50 MPa区间,能够在保障夹紧稳定性的基础上,降低装夹力峰值对零件的影响,柔性压紧机构可以根据薄壁零件产生的微小变形进行自适应调整,促使夹紧力分布更加均匀,单点夹紧力可控制在0.5~1.5 kN区间。

3.3 真空吸附装夹方式

真空吸附装夹方式运用负压工作原理,通过真空泵在工件与夹具接触面之间形成压力差,以此实现对工件的夹紧固定,真空系统常用工作负压数值为-60~-90 kPa,吸附作用力大小与吸附接触面积呈正相关关系,该装夹方式的夹紧力分布均匀,几乎不会造成零件局部应力集中问题,对于大面积薄板类薄壁零件具有显著应用优势,特别适用于铝合金板材的精加工工序,但真空装夹对工件表面平整度与密封性要求较高,当零件自身刚度偏低或者切削力数值超过吸附力极限时,工件容易出现微量滑移现象,这一特性限制了其在重切削加工条件下的应用范围。如图2所示。



图2 真空吸附技术

4 装夹方式对薄壁零件铣削变形的影响规律

4.1 装夹力大小与分布对变形的影响

装夹力数值大小直接决定薄壁零件加工前的初始受力状态,当装夹力过大时,薄壁区域在夹紧阶段就会出现明显的弹性甚至塑性变形,加工完成并卸夹后变形得以释放,最终造成零件尺寸超差;若装夹力不足,则难以抵御切削力作用,容易引发加工过程中工件产生微小位移或者振动问

题，实际加工操作中，薄壁铝合金零件的单点装夹力控制在 0.5~2.0 kN 区间，通常能够取得较为合理的加工效果，装夹力分布不均会诱发零件局部应力集中，形成力学性能上的“硬约束”区域，加工过程中容易出现局部翘曲变形。

4.2 装夹位置与支撑方式的影响

装夹位置选择对薄壁零件铣削变形具有显著作用，装夹点靠近加工区域时，能够有效缩短受力传递路径，降低切削力引发的零件整体弯曲变形，但会造成局部区域刚度突变，容易形成压痕或者局部凹陷缺陷，装夹点远离加工区域时，零件整体受力状态更加平缓，但工件悬伸长度随之增加，整体挠度数值也会相应增大，辅助支撑手段在薄壁零件加工中表现出明显的变形抑制效果，通过在零件刚度薄弱区域布置可调支撑结构，能够将最大变形量降低 30%~60%，将支撑间距控制在零件特征尺寸的 1~1.5 倍区间内，既有助于提升零件整体刚度，又不会形成过度约束的问题。

4.3 装夹方式与切削参数的协同关系

装夹方式与切削参数之间存在明显的耦合关联。采用刚性装夹方式时，切削深度一般控制在 0.5~1.5 mm 区间，进给量不宜超过 0.08 mm/z，以此避免切削力与装夹力叠加作用引发过大变形；采用柔性或真空装夹方式时，需进一步将切削深度减小至 0.3~1.0 mm 区间，同时调低进给速度，保障吸附或弹性夹紧的稳定性，科学匹配装夹方式与切削参数，是控制薄壁零件加工变形的核心工艺原则，某航空用铝合金框架类薄壁零件，材料型号为 7075-T6，壁厚尺寸 2.0 mm，研究人员采用三种不同装夹方式对其开展侧壁铣削试验，加工参数保持统一标准：切削深度 $a_p=1.0\text{ mm}$ ，进给量 $f_z=0.06\text{ mm/z}$ 。加工完成后通过三坐标测量仪检测壁面最大变形量，结果如表 1 所示。

表 1 不同装夹方式下加工变形对比

装夹方式	最大装夹力 / kN	最大变形量 / mm
虎钳刚性装夹	3.0	0.21
弹性垫片装夹	1.2	0.12
真空吸附装夹	—	0.08

测量结果显示，刚性装夹条件下的零件卸夹后变形量数值最大，变形位置主要集中在型腔中部区域；弹性装夹方式显著降低了零件整体变形幅值；真空吸附装夹凭借受力均匀的优势，使零件变形趋势更为平缓，仅在边缘区域存在轻微回弹现象。

5 薄壁零件铣削装夹方式的优化策略

5.1 面向结构特征的装夹方式选择

薄壁零件的结构形态存在显著差异，需结合自身几何特征与受力表现针对性选取装夹方式，框架类薄壁零件往往带有多型腔与筋板构造，加工期间极易出现整体翘曲变形问题，装夹操作时应采用多点支撑与区域压紧相融合的模式，在筋板或者高刚度部位设置装夹点位，减少薄壁区域承受的

直接作用力，板类薄壁零件的受力形式相对简洁，真空吸附或柔性压紧的方式能够实现装夹力的均匀分布，适用于大面积的精加工工序。

5.2 多工序加工中的装夹策略

薄壁零件的铣削作业通常需历经粗加工与精加工等多个工序，不同工序对于装夹刚性与变形控制的要求各不相同，粗加工阶段的材料去除量较大，切削力处于较高水平，此时应将保障整体刚性与定位稳定性作为核心目标，可将装夹力适度提升至 1.5~3.0 kN，同时搭配必要的辅助支撑结构，精加工阶段的核心任务是保障尺寸精度与表面品质，需将装夹力下调至 0.5~1.0 kN，规避因装夹操作引入新的初始变形。

5.3 分阶段释放应力的方法

在薄壁零件的加工流程中，科学规划装夹与加工的先后顺序，有助于控制残余应力释放引发的变形问题，常用的调控手段包含对称加工、分层去除材料以及中途松夹重装等，对称加工的方式能够平衡切削力的分布状态，降低单侧位置的应力集中程度；分层铣削工艺将单次切削深度控制在 0.3~0.8 mm，可有效缓解应力突变带来的不良影响；在关键工序完成后适当松夹并重新定位工件，能够释放部分装夹应力，让后续加工工序在更稳定的受力条件下开展。

5.4 组合装夹与工艺集成

组合装夹技术通过整合刚性定位与柔性压紧、真空吸附等多种方式，实现装夹稳定性与变形控制的双重目标，装夹方式与数控编程的协同优化至关重要，在编程环节需充分考量装夹区域与支撑位置，科学规划刀具运行路径，避免在低刚度区域执行大负载切削操作。

6 结语

在数控铣削加工薄壁零件的过程中，装夹方式对加工变形控制具有决定性影响。通过结合零件结构特征、铣削阶段及工艺参数，合理优化装夹力大小、分布形式及支撑方式，可显著降低铣削变形，提高加工精度与工艺稳定性。工程实践表明，采用多点支撑、柔性或组合装夹方式，并配合分阶段铣削加工策略，是实现薄壁零件高质量铣削加工的有效途径。

参考文献

- [1] 陈莹莹.数控铣加工工件装夹方式及发展研究[J].造纸装备及材料,2022,51(03):127-129.
- [2] 迟赤,关忠.卧车装夹方式对工件跳动的影响与分析[J].机械工程师,2010,(07):136-137.
- [3] 杨博.薄壁零件五轴铣削变形预测与误差补偿技术研究[D].中北大学,2021.DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000981.
- [4] 宋荣灯.薄壁零件铣削变形的控制研究[J].科技风,2020,(17):181. DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202017149.
- [5] 李体仁,马超超,王悉颖.TC4钛合金薄壁零件铣削变形分析研究[J].机电工程技术,2019,48(01):55-58+134.