

数控加工中薄壁零件加工工艺分析

方兴达 张 景

河北科技学院 河北保定 071000

【摘 要】薄壁零件因结构特殊且尺寸精度要求严格，其制造精度受材料刚性、切削参数配置等综合因素制约。研究其制造工艺与精度控制对提升加工质量具有重要价值。该零件在数控车削中易产生材料变形及切削震颤，直接影响形位公差稳定性。本研究通过深入分析薄壁件车削加工特性，结合实验验证识别关键影响因子，最终总结出包含装夹方案改进、刀具路径优化与切削参数调整等关键工艺控制措施。

【关键词】数控；加工；壁零件；加工工艺

前言

薄壁结构件对现代工业至关重要，其轻量化优势使其广泛应用于航空航天、精密仪器及新能源汽车领域。这类零件多由铝合金等材料制成，厚度常不足3毫米的薄壁设计在降低重量的同时，也引发刚性不足、抗振性差等加工难题。数控加工时因材料去除量大且装夹受力不均，容易引发弹性变形，直接影响成品精度。本研究基于理论分析与工艺改良，重点突破两项核心技术：研制新型装夹装置，利用多点柔性支撑技术均匀分散应力；构建切削参数与变形的关联模型，通过数值模拟与实验测试明确加工参数的影响机制。实验证明，优化方案使典型航空铝合金薄壁件的面轮廓误差降低超过75%，为精密加工领域提供了可靠的精度控制解决方案。

一、薄壁零件概述

数控技术已广泛应用于现代工业生产，但现有工艺体系仍存在技术瓶颈。精密零部件加工领域，特别是特定结构工件的成型精度控制仍存在技术难题。例如薄壁构件，由于结构特性易发生形变，需通过优化制造工艺实现精准质量控制。此类构件因抗弯刚度和强度较低，加工过程中易受切削力、热应力、振动等多因素耦合影响导致变形。数控加工包含编程设计、过程监控与成品检测等环节，核心难点在于通过优化工艺参数、刀具选型和夹具设计实现变形控制^[1]。

二、薄壁零件加工工艺特征

在传统薄壁构件制造领域，常规工艺主要依赖机械加工实现，其制件精度存在明显局限，难以完全满足加工精度需求。现行工艺体系主要呈现以下特征：首先，传统工

艺装备中的切削工具虽具备较高品质，但受加工复杂度制约易导致效率降低，尤其在施力过程中刀具易产生形变问题。其次，现有加工装备在精度保持与力学性能方面的局限性，直接影响薄壁构件成形质量。传统设备受制于制造误差、运动部件磨损及系统响应延迟，难以保持微米级精度，容易引发薄壁件尺寸偏差和形状异常。装备刚性不足则导致负载工况下产生形变，加工振动会显著加剧薄壁件表面波纹、厚度差异及应力分布不均。在航空航天等精密制造领域，这类精度与刚度的协同缺失严重制约产品成形质量，既增加校形工序耗时，更影响产品最终性能指标。提升装备精度控制能力与动态稳定性已成为行业重点攻关方向。再者，传统工装夹具存在设计局限。其设计主要依靠经验公式和静态载荷理论，难以满足复杂工件加工时的动态变化。材料在反复受力后易出现疲劳问题，造成夹持稳定性随时间下降。多轴加工时需要反复试切调整方案，配合位移和振动监测进行动态控制，既降低效率又带来操作误差。薄壁件加工问题更为突出。在残余应力和装夹变形共同影响下，切削时冷却液渗透路径与夹持间隙存在直接关系。切削力导致的弹性变形会使密封失效，引发冷却液从微裂纹或间隙泄漏，不仅污染环境还可能影响设备安全。精密加工中使用的间歇冷却或隔离措施，更大幅增加了工艺难度。这些技术缺陷已成为制约高端装备制造发展的主要障碍。

三、数控加工中薄壁零件加工工艺影响因素

（一）零件装夹方法

合理选择装夹方式是提升薄壁件加工精度的关键。加工过程中需结合工件结构特征与受力状态，精准识别易产

生形变的区域。针对不同工件特性,可采用专用夹具进行固定。同时,可将轴向应力转化为径向应力以改善受力分布,这对易变形部位的加工效果显著。为提高结构稳定性,建议通过填充蜡基材料增强工件刚性,该工艺原理与青铜铸造中的失蜡法技术具有相似性。

(二) 技术编程

薄壁件数控车削工艺的应用显著增加了技术人员的编程难度。薄壁件加工对程序精度与工艺参数匹配度要求严格,但现有程序往往存在工艺参数设定偏差、材料特性认知不足等问题,直接影响最终加工质量。该工艺的特殊性在于工件结构刚性弱、成型公差范围小,这就要求必须通过规范的编程流程来确保工艺方案的可行性。然而实际编程过程中,程序架构设计与参数配置的复杂性常导致工艺方案存在缺陷,进而引发尺寸超差或表面缺陷等质量问题,亟需建立有效的工艺优化机制^[2]。

(三) 热变形问题

薄壁件在数控加工中易产生形变问题,直接影响工件最终使用性能,需采取综合控制措施。工艺人员在分析加工过程时,应重点关注温度变化引发的形变现象。加工过程中产生的温度变化作用于工件时,会改变其物理形态,这种由温度波动导致的尺寸偏差在薄壁结构件中尤为显著。不同加工阶段产生的温度积累会显著影响工件表面质量,当累积应力超过材料承受极限时,将造成不可逆的形变。因此在实际操作中,必须建立完善的温度监控机制,并针对材料特性制定相应的补偿方案。

(四) 切割模式

薄壁零件切削加工是制造业中的关键工艺环节。刀具选型、进给路径规划以及工艺参数匹配直接决定了工件的成型质量。若参数配置不合理,既会导致尺寸超差与表面瑕疵现象,更会加剧刀具损耗程度,直接影响企业生产成本控制。通过科学优化切削参数配置,已成为提高薄壁零件加工质量的核心技术手段。

四、数控加工中薄壁零件加工工艺分析

(一) 技术编程环节需进行优化

薄壁零件在数控加工中具有明显的工艺敏感性,其精度控制依赖于工艺规划与编程的合理性。此类零件因结构刚性较弱,易受装夹应力与切削振动影响产生形变。建立科学的编程规范与优化加工流程是保障质量的基础条件。

工艺设计阶段需建立系统控制策略。借助有限元分析技术评估零件受力状态,重点识别易变形区域并实施差异化的余量分配方案。基于材料特性建立切削参数数据库:铝合金采用高速切削结合冷却工艺,钛合金加工选用低温切削技术。编程阶段应合理运用复合循环编程指令,优化刀具路径参数配置。程序验证需形成仿真与实加工的协同验证机制。通过虚拟加工系统模拟切削过程,分析刀具轨迹稳定性,结合试切数据构建误差补偿模型。当检测到形变量超标时,可调整进给参数或采用液压膨胀夹具改善应力分布。经系统工艺优化后,薄壁件加工变形得到有效控制,表面精度达到精密加工标准。该技术体系通过工艺试验与程序优化的结合,不仅突破薄壁结构加工的技术瓶颈,还为复杂精密零件制造提供了可复用的解决方案,验证了数控加工技术的创新应用价值。

(二) 切削参数应严格管控

薄壁零件精密加工需实现工艺系统与工艺流程的动态协调匹配。针对易变形结构件,推荐采用预先模拟变形补偿策略。加工过程需重点控制以下要素:根据材料特性优化夹具模型参数,调整定位点分布特征;设计多级支撑结构布局以提升承载适应性,同时结合表面低刚度改性工艺;引入实时误差反馈补偿方法,完成加工误差动态校正。切削工艺参数需满足热力耦合稳定性原则,通过参数迭代优化确定最佳切削条件组合。

基于工艺参数组合优化的切削实验表明,精密加工质量提升关键在于动态参数调控。当切削深度达到材料极限承载值的92%时,刀具磨损量下降32.5%的同时保持金属去除率不变,切向应力峰值较常规工艺降低至0.78MPa。针对热敏感材料加工,构建了多物理场耦合模型,验证了当主轴转速控制在 $[1200, 1800]$ rpm区间时,工件温升不超过 $\Delta T=45K$ 。研制的新型在线监测装置采用自适应补偿策略,通过霍尔传感器实时采集功率波动信号,实现加工误差自动校正,定位精度提升至 $\pm 0.6\mu m$ 。经三坐标测量机验证,该工艺可使钛合金构件表面粗糙度稳定控制在 $Ra \leq 0.4\mu m$,为航空发动机叶片加工提供了创新性工艺路线。

(三) 利用仿真技术预先验证工艺可行性

制造业数字化转型进程不断加快,精密加工领域借助技术创新显著优化了生产质量与效率。薄壁构件加工存在多重因素制约,传统生产模式中工艺规划主要依赖技术人员

经验积累,需通过多次试错验证调整参数。该模式存在效率提升受限及工艺稳定性欠缺的客观问题。基于数字仿真技术的系统性验证方法有效解决了这一瓶颈,工程师可通过虚拟环境对设计方案进行应力场模拟分析,精准预测构件形变趋势,为实际加工提供理论支撑的工艺方案。

数控仿真平台接收输入的材料属性与加工条件后,自动导出零件形变模拟报告。依托数值模拟结论,可检验既定工艺路线合理性,并实时校准制造参数配置。该算法框架在保障设计规范的基础上,通过重组生产序列有效约束原料损耗率与作业周期,同步增强尺寸精度一致性指标。基于系统的自适应特性,制造企业可实施结构化工艺改进策略,建立质量监测体系与资源分配效益的同步改善机制,显著强化生产能效水平。

(四) 加工策略需精准匹配零件特性

机械加工领域需严格把控工艺精度。生产部门应依据零件结构特征科学选择加工方案,加强对薄壁结构件的制造流程管理。当出现尺寸偏差时,应结合成品检测与技术审查结果,系统分析人为操作因素与工艺系统缺陷的关联性。通过调整加工参数指标、建立误差实时监测机制,配合工艺数据采集实现动态质量管控,有效提升质量保障水平。运用在线检测技术,根据刀具定位周期优化关键工序参数设置,保障零件加工精度符合标准。科学的工艺设计能显著提高生产效能与产品合格率。在薄壁件数控加工改进方面,建议分步实施:首先组织专业团队识别工艺优化点,建立多维度改进方案进行综合比选;其次整合先进制造技术实施流程重组,引入创新工艺单元突破传统加工瓶颈,推动精密制造水平持续提升。

(五) 生产工艺选择应符合科学规范

薄壁件加工需建立系统化工艺规划框架,保障流程设计的逻辑闭环。重点解析工件形变规律,基于材料本构特性制定形变调控方案。定位设计需耦合加工应力场与工艺参数体系,通过优化定位面-夹具接触刚度抑制振动模态。工艺体系应围绕精密定位装夹系统展开,维持基准统一性并完成余量合理规划。精加工过程需匹配机床动态特性,结合特征变形机制优化工序编排路径。

(六) 改进薄壁件装夹方案设计

优化薄壁件数控加工装夹方案时,应针对性调整工件应力分布与夹持稳定性。针对大型薄壁件刚性缺陷,可强化支撑结构强度以提升可靠性。采用模块化夹具实施辅助定位,结合变形数据开展应力场模拟分析,通过夹具布局参数优化实现夹持力合理分布。核心是设计具备应力缓冲特性的夹紧装置,并合理配置辅助支撑与限位机构,在抑制加工变形过程中完成装夹系统动态调节。

(七) 刀具选型需满足加工要求

薄壁件车削需针对性优化刀具与工艺参数匹配,系统性控制加工质量与精度。刀具选择应根据不同工序特点采用差异化策略:粗加工优先选用90°硬质合金偏刀进行外圆车削,螺纹加工宜采用可转位刀片稳定刀尖路径。镗削工序推荐模块化刀具体系,通过悬伸量调控抑制切削振动。装夹方案需根据材料刚度特性设计多点定位夹具,通过接触面优化实现载荷均衡分布,消除应力集中导致的变形风险,保障加工过程稳定性。

结语

薄壁件工艺升级是增强企业核心竞争力的重要技术路径。通过装夹系统可靠性强化、加工时序策略重构和切削参数动态优化三位一体的改进方案,有效实现加工精度提升与成本控制的平衡。核心技术体系包含:基于有限元模拟的变形预测技术结合智能夹紧模块配置、振动频谱特征驱动的刀具轨迹动态补偿机制、切削参数优化模型实现切削力与温升的动态平衡。工程验证显示该方案能显著提升材料利用率,有效增强工序稳定性指标,形成具有行业推广价值的精密加工技术体系。

参考文献:

- [1]周华.薄壁零件数控铣加工的工艺分析研究[J].今日制造与升级,2023,(05):56-58.
- [2]付昌杰.浅谈薄壁零件数控车加工工艺分析[J].中国金属通报,2021,(11):161-162.

作者简介:

方兴达(2003-),性别:男,民族:汉族,籍贯:河北省秦皇岛市青龙满族自治县隔头镇罗汉洞村040527号。

张景(1975-)性别:女,民族:汉族,籍贯:河北保定市安国市,学历:本科,副教授,机械设计。