

薄壁零件数控加工变形控制工艺方法分析

郑 跃

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550087

【摘 要】：薄壁零件刚性弱、壁厚小，在数控加工中易受切削力、装夹力、切削热和残余应力影响产生变形，直接影响尺寸精度和表面质量。围绕薄壁零件加工变形控制问题，从变形机理、工艺路线、装夹方案、刀具选择、切削参数及应力释放等方面展开分析，提出合理分层加工、优化夹紧位置、减小切削载荷、控制加工温升等工艺方法，为提升薄壁零件数控加工稳定性与成形精度提供参考。

【关键词】：薄壁零件；数控加工；加工变形；工艺优化；变形控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.051

引言

薄壁零件因质量轻、结构紧凑、材料利用率高，被广泛应用于航空航天、机械制造和精密装备领域。受自身刚性不足影响，此类零件在数控加工过程中容易出现让刀、振动、夹紧变形和热变形等问题，导致壁厚不均、尺寸超差和表面质量下降。如何在保证加工效率的同时控制零件变形，成为薄壁结构件高精度制造中的重要问题。对数控加工变形控制工艺方法进行分析，有助于提高加工质量和工艺稳定性。

1 薄壁零件加工变形影响因素辨析

1.1 零件结构刚性不足对加工精度的影响

薄壁零件通常具有壁厚小、跨度大、局部支撑弱等结构特征，在数控加工中承受外力后容易产生弹性变形。材料去除过程中，原有结构刚性不断降低，零件由毛坯状态逐渐转变为薄壁成形状态，抗弯、抗扭能力随之减弱，刀具切削时产生的微小作用力也可能引起壁面偏移。若加工余量分布不均，局部区域受力集中，容易造成尺寸偏差、轮廓误差和壁厚不一致。对于环形、框架类或腔体类薄壁零件，悬伸部位和转角区域更容易出现让刀现象，导致加工面与设计基准之间产生偏离。结构刚性不足还会放大装夹误差，使零件在加工状态与松夹状态之间出现形态差异，影响最终尺寸稳定性和加工精度。

1.2 切削力与切削热对变形形成的作用

数控加工过程中，刀具与工件材料持续接触，切削力会直接作用于薄壁表面，使零件产生瞬时弹性变形。切削深度、进给速度、刀具锋利程度和走刀方向不同，都会改变受力大小及分布状态。当切削参数偏大时，径向力增强，薄壁区域容易被推离理论加工位置，形成让刀误差；当刀具磨损加剧时，摩擦阻力上升，切削过程稳定性下降，表面振纹和尺寸波动也会随之增加^[1]。切削热对薄壁零件的影响同样明显，局部温升会引起材料热膨胀，冷却后又可能发生收缩变形。由于薄壁结构散热条件不均，温度场容易呈现局部集中状态，使加工面出现热变形差异，进而影响形位精度、表面质量和后续装配配合效果。

1.3 残余应力释放对尺寸稳定性的影响

薄壁零件毛坯在铸造、锻造、轧制或热处理过程中通常会形成一定残余应力，材料内部应力在未加工前处于相对平衡状态。数控加工去除大量材料后，原有应力平衡被打破，内部应力重新分布，零件容易发生翘曲、扭转或局部变形。薄壁结构自身约束能力较弱，残余应力释放带来的形态变化更为明显，尤其在粗加工后、半精加工后和松夹检测阶段，尺寸回弹现象较为突出。若工艺路线缺少应力释放环节，直接进入精加工，后续材料变形会叠加到已加工表面，造成孔位偏移、平面度超差或轮廓精度下降。合理安排粗精加工间隔、时效处理 and 对称去除余量，能够减缓应力集中释放对尺寸稳定性的影响。

2 数控加工过程中的工艺控制短板

2.1 装夹方式不当造成局部弹性变形

薄壁零件在装夹过程中对夹紧力较为敏感，夹紧点位置、受力方向和支撑范围若设置不合理，容易使局部壁面在加工前已经处于受压变形状态。采用刚性压板、点接触定位或单侧夹紧方式时，夹紧力难以均匀传递，薄弱区域会产生弯曲或凹陷，刀具加工时形成的尺寸看似符合要求，松开夹具后却可能出现回弹，造成实际尺寸与加工状态不一致。夹具支撑不足还会使零件在切削过程中发生微振，影响基准稳定性和重复定位精度。对于框架类、腔体类和环形薄壁件，装夹方案需要兼顾定位可靠性与受力均衡性，避免局部过压、悬空加工和基准漂移等问题。

2.2 走刀路径不合理引发受力不均

走刀路径直接影响材料去除顺序和切削力传递状态，若加工路线缺少对称性和连续性，容易造成零件不同区域受力差异扩大。薄壁零件在单侧连续切削或局部集中去除余量时，结构刚性会迅速失衡，未加工区域与已加工区域之间形成明显刚度差，导致刀具作用力沿薄弱方向集中释放^[2]。路径安排不合理还可能使刀具频繁进退、急停换向，增加局部冲击载荷，使边角、筋板和薄壁交接处产生微小位移。合理的走刀方式应控制材料去除节奏，使加工余量逐步释放，减少局部突变对壁面形

态的影响。对腔体和环形结构而言,分区加工、对称走刀和由粗到精的路径衔接能够降低受力不均带来的变形风险。

2.3 切削参数匹配不足影响表面质量

切削参数与零件材料、壁厚、刀具类型和加工阶段之间缺少匹配时,表面质量容易出现波动。较大的切削深度和进给量会提高切削载荷,使薄壁表面产生让刀、振纹和局部拉伤;主轴转速过低时,刀具切削不够平稳,容易形成毛刺和刀痕;转速过高而冷却不足,又会加剧摩擦升温,使加工面出现热影响变形。刀具悬伸过长、刃口磨损或切削角度选择不当,也会削弱切削过程的稳定性,使表面粗糙度增大。薄壁零件加工参数需要根据粗加工、半精加工和精加工阶段分别调整,通过小切深、轻切削、稳定进给和充分冷却,降低表面缺陷与尺寸偏差叠加的可能。

3 薄壁零件变形控制工艺优化

3.1 分层分序加工降低材料去除冲击

分层分序加工能够缓解薄壁零件在材料快速去除过程中产生的刚性突变。粗加工阶段宜保留适当余量,避免一次切除过多材料导致壁面失去支撑,特别是腔体、环形和框架类结构,应按照外形基准、内部轮廓、局部薄壁的顺序逐步加工,使零件受力状态平稳过渡。半精加工阶段可采用均匀留量方式,对不同区域的余量进行协调分配,减少单侧集中切削造成的变形累积。精加工阶段应在零件形态趋于稳定后进行,通过小余量、多步走刀和对称去除控制最终尺寸。分层分序还可结合中间检测和自然时效,使加工变形能够在进入精加工前得到释放,降低后续修正难度。

3.2 夹具支撑优化增强加工稳定性

夹具支撑优化需要围绕薄壁零件受力薄弱区域进行设计,使定位、压紧和辅助支撑形成协调关系。定位基准应选择刚性较好、尺寸稳定的部位,避免将夹紧力直接作用于薄壁悬伸面。对于易变形区域,可设置随形垫块、软爪、真空吸附、辅助顶撑或组合夹具,扩大接触面积,使夹紧力均匀传递^[3]。加工过程中,支撑点位置应避开刀具干涉区域,保证零件在切削载荷作用下不产生明显振动。夹紧力控制需要满足固定可靠和不过度压紧的双重要求,可通过分段夹紧、对称压紧和弹性支撑降低局部变形。夹具方案与加工顺序配合后,能够提高基准保持能力和重复定位精度。

3.3 刀具参数协同减小切削载荷

刀具参数协同控制的重点在于降低切削阻力,提升薄壁区域加工平稳性。刀具直径、刃数、螺旋角、前角和刃口锋程程度需要与零件材料及壁厚条件相匹配,避免刀具刚性不足或切削过重引起振动。加工薄壁零件时,可选用锋利度较高、排屑顺畅的刀具,减少材料挤压和摩擦发热。切削参数应与刀具结构共同调整,采用较小切削深度、合理进给速度和稳定主轴转

速,使径向力维持在较低水平。精加工阶段还需控制刀具悬伸长度,减少刀杆弹性变形对轮廓精度的影响。刀具磨损状态应及时检查,避免钝化刀具增加切削热和表面拉伤,从而提高加工面质量。

4 典型薄壁零件加工应用呈现

4.1 环形薄壁零件夹具方案设计

环形薄壁零件在加工中容易因圆周刚性不足产生椭圆化变形,夹具方案需围绕均匀支撑和稳定定位展开。设计时可选取端面与内孔作为主要定位基准,通过定位芯轴、涨套或随形支撑结构提高圆周约束能力,使零件在装夹后保持较好的同轴度和圆度。压紧方式不宜采用少量集中压点,应通过多点均布压紧、端面压环或软性过渡垫片分散夹紧力,避免局部壁面受压变形。对于壁厚较薄、直径较大的环形结构,可在内外圆之间增设辅助支撑,减少切削时的径向振动。夹具与零件接触面还需保证贴合精度,防止因支撑间隙造成加工过程中微量位移,从而提高加工基准的稳定性。

4.2 数控加工路径仿真与参数校核

数控加工路径仿真能够在实际切削前检查刀具运动、余量分布和受力集中区域,减少工艺安排不当造成的变形风险。针对环形薄壁零件,可通过三维建模与加工仿真观察刀具进退刀位置、转角衔接和切削方向是否平稳,避免在薄弱部位形成突然切入或局部重切^[4]。参数校核应结合零件材料、壁厚、刀具规格和机床刚性,对切削深度、进给速度、主轴转速和冷却方式进行综合匹配。粗加工阶段需重点控制余量去除均衡性,精加工阶段则应关注轮廓连续性和表面质量。仿真结果还可用于判断刀具干涉、夹具避让和加工节拍,使加工路径与变形控制要求保持一致。见图1,薄壁零件在数控铣削过程中受刀具切削力、装夹支撑和走刀路径共同影响,需结合加工参数校核与工艺控制降低变形风险。



图1 薄壁零件数控铣削加工现场

4.3 加工精度检测与变形结果对比

加工精度检测需要围绕薄壁零件易变形部位设置检测项目,重点关注圆度、同轴度、壁厚差、平面度和轮廓误差等指标。检测过程可在粗加工、半精加工和精加工后分别进行,通

过阶段性数据记录判断变形产生的主要环节。对于环形薄壁零件，松夹前后的尺寸变化尤其需要对比，若松夹后圆度误差增大或局部回弹明显，说明装夹力、材料去除顺序或残余应力释放仍存在控制不足。检测结果还应与工艺方案调整前的数据进行比较，分析夹具支撑、走刀路径和切削参数优化后的改善幅度。通过尺寸偏差、表面质量和形位精度的综合对比，能够直观呈现变形控制工艺的实际效果。

5 薄壁零件加工工艺深化方向

5.1 仿真预测提升工艺前置控制能力

仿真预测能够将薄壁零件加工变形控制前移到工艺设计阶段，建立零件结构模型、材料属性模型和切削载荷模型，提前判断薄弱区域的受力变化与可能变形位置。针对腔体、环形和框架类薄壁结构，可利用有限元分析模拟装夹力、切削力和热载荷对零件形态的影响，识别悬伸壁面、转角过渡区和局部减薄区域的变形趋势。工艺人员可根据仿真结果调整加工余量、走刀顺序、夹具支撑位置和切削参数，减少依靠经验反复试切带来的时间消耗。仿真预测还可与实际检测数据进行对照修正，使工艺方案在正式加工前具备更高的可靠性和针对性。

5.2 智能监测促进加工过程动态修正

智能监测能够增强薄壁零件数控加工过程中的实时感知能力，使变形控制不再局限于加工后的尺寸检测。在机床、刀具或夹具系统中布置力传感器、振动传感器、温度传感器和位移检测装置，可持续采集切削力波动、刀具磨损、工件振动和局部温升等信息^[5]。当监测数据出现异常变化时，系统可及时调整进给速度、主轴转速、冷却强度或加工路径，降低过载切削对薄壁结构造成的影响。在线测量技术还可对关键尺寸和形位误差进行阶段性反馈，便于在半精加工或精加工前完成补偿修正。数据采集、状态识别与参数调节相结合，有助于提升加工过程的稳定性。见图2，机器人与自动化加工单元的结合体现了薄壁零件制造向智能化、柔性化方向发展，通过自动夹持、稳定运动控制和过程状态识别，可减少人工操作误差，提高复

杂薄壁结构加工的一致性与变形控制水平。



图2 机器人辅助薄壁零件智能化加工场景

5.3 复合工艺推动高精度制造升级

复合工艺能够从材料状态、加工方式和精度保障等多个环节提升薄壁零件制造质量。对于变形敏感零件，可将数控铣削、精密车削、热处理、振动时效、低应力磨削和在线检测等工艺进行组合，使材料去除、应力释放和精度修正形成连续流程。粗加工后安排时效处理，可降低残余应力对后续精加工的影响；精加工阶段配合低切削载荷工艺和高精度测量，可减少表面缺陷与形位误差。针对复杂薄壁结构，还可引入增减材复合制造、柔性夹具和误差补偿技术，提高结构成形与后续加工的匹配度。复合工艺的深化应用，将推动薄壁零件加工向高稳定性、高一致性和高精度方向发展。

6 结语

薄壁零件数控加工变形控制需要从结构刚性、切削载荷、装夹支撑、加工路径和残余应力等方面协同推进。通过分层分序加工、夹具优化、刀具参数匹配和过程检测，可有效降低弹性变形、热变形与应力释放带来的精度偏差。后续工艺深化应加强仿真预测、智能监测与复合制造应用，推动薄壁零件加工质量向稳定化、精密化和智能化方向提升。

参考文献：

- [1] 王志涛.基于UG与VERICUT的薄壁件铣削变形控制与仿真优化研究[J].智能制造研究与应用,2025,1(3):14-16.
- [2] 谢友银.关于低刚性薄壁件异形夹位的零件加工工艺的探究[J].科学技术创新,2025,(22):102-105.
- [3] 马颖化,周瑜哲.铝合金薄壁套类零件铣削加工柔性装夹技术[J].航空精密制造技术,2025,61(5):54-57.
- [4] 赵荣谦.薄壁箱体零件数控加工技术研究[J].模具制造,2025,25(9):39-41.
- [5] 陈百全.大型薄壁衬套零件的夹具设计及应用[J].模具制造,2025,25(8):198-200.