

文章编号: 1007-6735(2026)01-0032-09

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20251124002

基于浮动装夹系统的薄壁深腔零件加工 变形实时监测与调控方法

桑佳博^{1,2}, 张国良³, 庄可佳^{1,2}, 胡诚^{1,2}, 唐成⁴

(1. 武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学高性能材料特种零部件制造技术教育部重点实验室, 武汉 430070; 3. 海军装备部, 株洲 412000; 4. 中国航发中传机械有限公司, 长沙 410200)

摘要: 针对航空发动机附件机匣加工易变形的难题, 提出了一种基于浮动装夹系统的加工变形实时监测与调控方法。提取附件机匣典型薄壁深腔特征构建了实验零件, 设计了气动控制的4压紧缸+6支撑缸的浮动装夹系统, 通过嵌入支撑缸加载-卸载动态调控策略, 实现了加工区域集中应力的阶段性释放与重布; 通过在支撑缸作用区域集成压电和激光传感器, 获取了应力释放前后弱刚度位置支撑力和位移历程数据, 借助有限元仿真模型, 将轴向力负载转变为零件加工应力、变形场。结果显示, 动态支撑相较于传统固定支撑, 平均应力下降72.16%, 变形量降低67.11%, 表明所建立的浮动装夹系统与调控策略能够有效降低薄壁深腔零件加工残余应力累积, 提高附件机匣类零件加工几何精度。

关键词: 薄壁零件; 浮动装夹系统; 加工变形; 传感器

中图分类号: TG 547 文献标志码: A

Real-time monitoring and regulation of machining deformation in thin-walled deep-cavity components based on floating fixture system

SANG Jiabo^{1,2}, ZHANG Guoliang³, ZHUANG Keja^{1,2}, HU Cheng^{1,2}, TANG Cheng⁴

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for High Performance Parts of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Equipment Department of Navy, Zhuzhou 412000, China; 4. Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd., Aero Engine Corporation of China, Changsha 410200, China)

Abstract: To address the machining deformation of aero-engine accessory casings, a real-time monitoring and control method based on a floating fixture system was proposed. An experimental part

收稿日期: 2025-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175482, 52505517); AECC航空齿轮制造技术创新中心开放基金(AGMTIC-KFKT-202407); 中国博士后科学基金资助项目(2025M771326)

第一作者: 桑佳博(2003—), 男, 硕士研究生。研究方向: 零件加工变形监测。E-mail: sangjiabo123@whut.edu.cn

通信作者: 胡诚(1996—), 男, 助理研究员。研究方向: 智能制造与数字孪生。E-mail: hucheng828@whut.edu.cn

引文格式: 桑佳博, 张国良, 庄可佳, 等. 基于浮动装夹系统的薄壁深腔零件加工变形实时监测与调控方法[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(1): 32-40.

Citation: SANG Jiabo, ZHANG Guoliang, ZHUANG Keja, et al. Real-time monitoring and regulation of machining deformation in thin-walled deep-cavity components based on floating fixture system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(1): 32-40.

with typical thin-walled deep-cavity features of an accessory casing was constructed, and a pneumatically actuated floating fixture system consisting of four clamping cylinders and six supporting cylinders was developed. A dynamic loading-unloading strategy was embedded in the supporting cylinders to achieve staged release and redistribution of concentrated machining stresses. Piezoelectric and laser sensors were integrated in the supporting region to obtain force and displacement histories at weak-stiffness locations before and after stress release. Using a finite element simulation model, the measured axial supporting force was converted into machining stress and deformation fields. The results show that, compared with conventional fixed support, the dynamic floating support reduce the average stress by 72.16% and decreased the deformation by 67.11%. These findings demonstrate that the proposed floating fixture system and control strategy effectively suppress residual stress accumulation and improve the geometric accuracy of thin-walled deep-cavity accessory-casing components.

Keywords: *thin-walled component; floating fixture system; machining deformation; sensor*

航空发动机附件机匣是发动机传动与附件安装的重要承力结构, 通常采用整体高强轻质合金材料加工而成, 其内部具有多空腔、筋条及局部薄壁等复杂结构特征。随着发动机推重比与可靠性要求不断提升, 附件机匣在服役过程中不仅需满足精确的装配基准和严格的形位公差, 还必须避免因局部变形与应力集中导致的密封失效或疲劳损伤。然而, 这类典型薄壁结构件在加工过程中大量材料被逐步去除, 整体刚度显著降低^[1], 在切削力、夹紧力及热载荷共同作用下极易产生弹塑性变形^[2], 给尺寸精度与结构稳定性控制带来突出挑战。

在航空航天等高端制造领域, 薄壁结构件凭借轻质高强、结构紧凑等优势得到广泛应用。然而, 其固有的低刚度特性使其在数控加工中对装夹边界条件极为敏感: 一方面, 夹紧或支撑位置稍有不妥便可能导致局部过约束或残余应力集中; 另一方面, 工件刚度和受力状态随加工阶段不断演化, 对装夹系统的适应性与调控能力提出更高要求。

装夹系统是现代数控加工的重要组成部分, 其核心任务是在加工过程中实现工件的准确定位与有效支撑, 以防止切削载荷或外部扰动引起的偏移或过度变形。传统夹具多采用刚性夹紧方式, 在加工普通刚性件时具有较好稳定性, 但对于航空发动机附件机匣等复杂薄壁结构, 刚性装夹往往在支撑区域引入较大的反力与应力梯度, 易诱发局部隆起或凹陷变形, 甚至导致夹紧损伤与装配干涉。

针对薄壁件加工变形问题, 研究者近年来围绕变形调控提出了多种智能装夹与柔性夹具方案。Zhang 等^[3] 构建了具有主动调节能力的智能夹具, 通过传感器实时感知夹紧状态并调节夹紧力; Shi 等^[4] 在夹具中集成局部阻尼结构, 以改善工件模态特性、抑制振动诱发的变形; Yu 等^[5] 提出双球面自适应夹具, 可根据工件姿态及残余应力状态自动调整支撑方式, 减少装夹误差导致的凹陷。为进一步提升夹具对复杂曲面结构的适应能力, 程齐等^[6] 将磁流变液与真空吸盘耦合, 实现薄壁曲面的自适应贴合; Wu 等^[7] 采用多点辅助夹紧方式提升大型叶片整体刚度。在此基础上, 监测反馈与智能调控逐渐成为装夹系统的发展趋势。Gonzalo 等^[8] 基于夹具受力构建反馈调节机制; Möhring 等^[9] 集成多维传感器以实时补偿工件姿态误差; Denkena 等^[10] 提出基于液压与自动夹紧单元的智能装夹系统, 使其在复杂工况下具备更高适应性。

从工艺流程角度, 薄壁件加工变形控制措施可分为预处理、实时在线调控及后处理 3 类。预处理方法主要通过降低残余应力、优化毛坯与工艺路径来减少变形源。王景坡等^[11] 通过有限元分析, 指出合理布设夹紧区域与刀路可显著降低隔框件最终变形; 夏灵等^[12] 通过构建应变能最小化的余量分配模型改善变形; Barcenas 等^[13] 基于剥层法获得残余应力场并优化毛坯定位; Rodríguez-Sánchez 等^[14] 结合有限元与神经网络优化毛坯姿态。实时在线调控则通过传感监测、刚度调节与刀路动态优化来应对加工中的状态变化, 例如:

李曦等^[15]基于工件刚度演化实现非均匀余量动态分配；Hao等^[16]通过加工过程反馈更新后续刀路；Li等^[17]采用临时加强筋提升局部等效刚度；Wang等^[18]利用压电驱动实现主动振动控制；Fan等^[19]从残余应力与弹性响应耦合关系出发优化工艺参数。后处理方法如机械校形、超声喷丸、电磁校形与蠕变校形等^[20-23]则对加工后的变形进行二次矫正与应力释放。

尽管已有研究在薄壁件变形控制方面取得进展，但现有方法多将工件视为固定支撑条件下的被动对象，缺乏以支撑力为核心控制量的主动调控策略，关于机匣深腔底部等关键弱刚度区域的支撑调控机理仍不清晰。基于此，本文以航空发动机附件机匣典型薄壁深腔结构为对象，选用7075-T6铝合金材料，开展浮动支撑条件下的加工变形实时调控研究。首先，提取机匣结构特征构建多薄壁实验件；随后，设计集成定位、夹紧与浮动支撑的专用装夹系统，通过气动支撑缸实现深腔底部支撑力的可调加载，并构建基于力传感器与激光位移传感器的“支撑力-变形”在线感知链路。在此基础上，提出基于动态加载-卸载的浮动支撑调控方法，实现加工应力的阶段性释放与重新分布。结合实测力-位移数据，在ABAQUS中建立刚性支撑与动态支撑两类仿真模型，对比分析应力场与变形场的演化规律，揭示浮动支撑对薄壁深腔件变形抑制的作用机理，为复杂薄壁结构件的高精度加工提供可工程化的新途径。

1 实验平台搭建

1.1 浮动支撑装夹方案

a. 薄壁深腔零件建模

提取航空发动机附件机匣典型薄壁结构特

征，构建图1所示的铝合金薄壁零件，零件具有大量空腔和槽结构，过渡区域均采用圆角连接，有效避免在加工过程中形成锐角或应力集中点。空腔底部通过加强筋类似结构连接，增加零件的强度和刚性，整体壁厚均匀分布，具有一般深腔薄壁件特征。

b. 浮动支撑夹具设计

夹具系统主要由定位、夹紧、浮动支撑及气动控制4个模块构成，如图2所示。定位模块由3个圆柱支撑柱、两个对角短销以及一个辅助支撑缸组成，用于实现工件的完全、可靠定位。夹紧模块由4个压紧缸构成，通过活塞杆与夹爪对工件四角施加稳定夹紧力。浮动支撑模块由5个气压控制支撑缸组成。由预先仿真优化可知，零件深腔底部中心部位刚度较弱，为提升加工过程中的局部支撑刚度，将支撑缸布置在零件的5个深腔底部。此外，夹具系统集成了独立的气动控制模块，用于协调各气缸的气流压力、响应速度以及夹紧-支撑动作的时序切换。该模块能够根据预设策略对压紧缸和支撑缸实施逐级加载、卸载及动态调节，在保证夹持稳定性的同时实现深腔区域支撑力的可控变化。

1.2 力-位移感知模块

力传感器选用微型凸点式压电力传感器，如图3(a)所示。该传感器通过顶部凸点将工件受力转化为电荷信号，并在内部电荷放大电路的处理后输出稳定的电压信号。配套的通讯模块可对原始数据进行滤波与放大，并将处理后的力信号实时传输至上位机的数据采集软件，便于后续分析。传感器底部设置标准螺纹孔，便于与支撑结构进行刚性连接，其量程精度可达1 N，采样频率为10 Hz，可满足薄壁结构加工过程中对中低频力变化的实时监测需求。

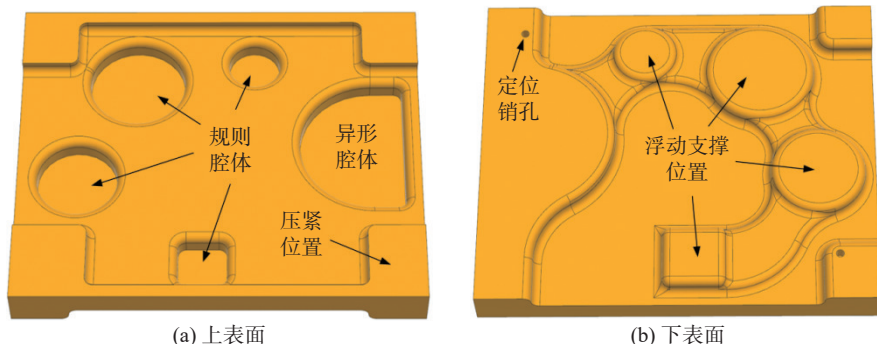


图1 零件三维模型

Fig.1 3D model of the part

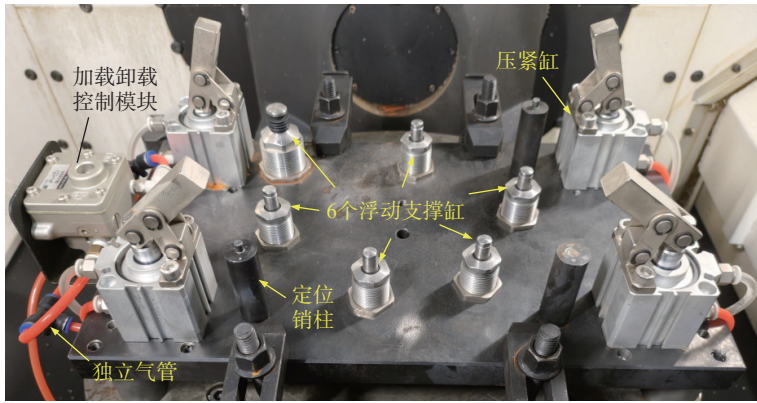


图2 浮动支撑夹具

Fig.2 Follow-up support fixture

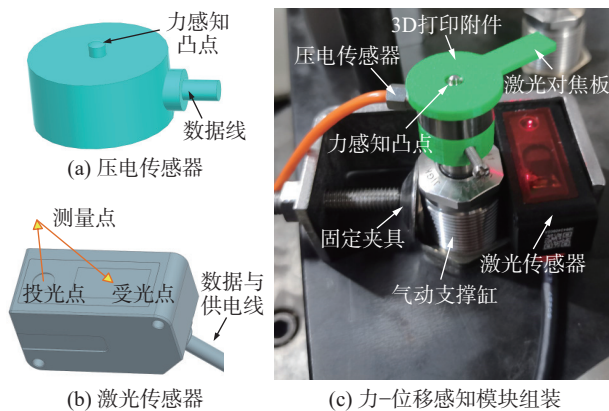


图3 力-位移感知模块

Fig.3 Force displacement sensing module

位移测量模块采用非接触式激光位移传感器, 如图3(b)所示。该传感器基于光三角测量原理工作, 当被测表面发生位置变化时, 激光光斑在接收器上的偏移量将随之改变。通过光斑偏移、入射角及基线长度之间的几何关系, 即可计算出对应的位移值。该传感器具有 $0.1 \mu\text{m}$ 的高重复定位精度和 10 Hz 的采样频率, 能够准确捕捉深腔底部微小的弹性恢复与变形演化过程。

在实际装配中, 力传感器通过图3(c)所示的3D打印辅助固定件安装于浮动支撑杆顶部, 使凸点能够直接接触工件底部, 从而精确测量支撑处的轴向载荷。位移传感器则通过G字夹固定在支撑缸外壁, 传感器光束对准活塞杆端部, 通过检测活塞杆伸缩量来实时反映工件深腔底部的位移变化情况。实验使用的3D打印材料为聚乳酸, 具有较好的刚度, 经过压缩测试标定对测量精度的影响比较小。通过力、位移两类传感器的协同监测, 可构建“支撑力-位移-变形”的在线感知链路, 为后续的应力场推断与变形调控提供可靠数

据支撑。

2 仿真模型建立

2.1 零件材料本构建模

本实验在良好切削液冷却条件下进行, 温度场对切削区域的影响有限, 实际过程中对支撑力调控的响应比较迅速, 为提高计算效率, 将零件切削过程简化为准静态仿真过程。7075-T6 铝合金属于典型的沉淀强化型高强度铝合金, 其在加载过程中表现出明显的非线性力学特性, 在塑性阶段存在应变硬化效应、屈服平台模糊等现象。本研究结合线性弹性理论、屈服准则与等向强化规律, 构建可用于准静态有限元模拟的本构力学模型^[24-26]。

首先, 在微小变形和低应力条件下, 材料可视为各向同性线弹性体, 其应力与应变关系满足胡克定律(Hooke's law)。其三维表达式为

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2G \epsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量分量; ϵ_{ij} 为应变张量分量; ϵ_{kk} 为应变张量的迹, 即体积应变; δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 当 $i=j$ 时为 1, 否则为 0; λ 为第一类 Lamé 常数; G 为剪切模量。分别计算如下:

$$\epsilon_{kk} = \sum_{k=1}^3 \epsilon_{kk} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中, E 和 ν 分别为材料的杨氏模量和泊松比。

当应力超过材料的屈服强度时, 材料表现出

非线性塑性行为。此时应力应变关系由弹塑性本构模型描述，最常见的理想弹塑性模型如下：

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (5)$$

式中： ε_{ij}^e 为弹性应变； ε_{ij}^p 为塑性应变。应力与弹性应变仍满足胡克定律：

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (6)$$

式中： C_{ijkl} 为四阶弹性模量张量，对于各向同性材料，其非零分量由 E 与 ν 唯一决定； ε_{kl}^e 为弹性应变分量。本研究中采用冯·米塞斯屈服准则(Von Mises yield criterion)，其广泛用于各向同性金属材料：

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} \cdot s_{ij}} \leq \sigma_y \quad (7)$$

其中，

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\sigma_{kk} = \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} \quad (9)$$

式中： σ_{eq} 为Von Mises等效应力； s_{ij} 为偏应力张量分量； σ_{kk} 为应力张量迹。屈服塑性变形由关联流动法则控制：

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

式中： $d\lambda$ 为塑性乘子； f 为屈服函数，Von Mises准则中有：

$$f = \sigma_{eq} - \sigma_y \quad (11)$$

此外，采用等向强化模型表示屈服应力随塑性变形演化：

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + H \bar{\varepsilon}^p \quad (12)$$

式中： σ_{y0} 为初始屈服应力； H 为等向强化模量； $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变，定义为

$$\bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p} dt \quad (13)$$

式中： $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变率张量； $\dot{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 是张量的自缩并，代表应变率张量大小的二阶不变量。

7075-T6铝合金在初期加载呈线性响应，屈服点之后迅速进入强化阶段并表现出略微下降的应力趋势。实验得到的应力-应变曲线大致如下：

$$\begin{cases} \sigma(\varepsilon) = E\varepsilon, \varepsilon < \varepsilon_y \\ \sigma(\varepsilon) = \sigma_{y0} + E_t(\varepsilon - \varepsilon_y), \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (14)$$

其中，

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_{y0}}{E} \quad (15)$$

$$E_t = \frac{EH}{E+H} \quad (16)$$

式中： ε_y 为屈服应变； E_t 为一致切线模量。

2.2 零件加工仿真模型

通过ABAQUS有限元仿真平台，设计一种基于浮动支撑的主动变形调控方法：在零件加工过程中，控制浮动支撑缸施加动态载荷实现加工过程中的应力释放与重新分布，以减小零件变形与应力集中情况。

a. 刚性支撑工况：模拟一般浮动支撑工况下支撑缸对工件的刚性、刚性支撑。在工件四周及深腔底部施加平面自由度约束，模拟夹具与工件接触区域的支撑作用，边界条件的设置结果如图4所示。本工况起基准对照作用，旨在评估引入动态支撑行为工件应力场与位移场的变化。

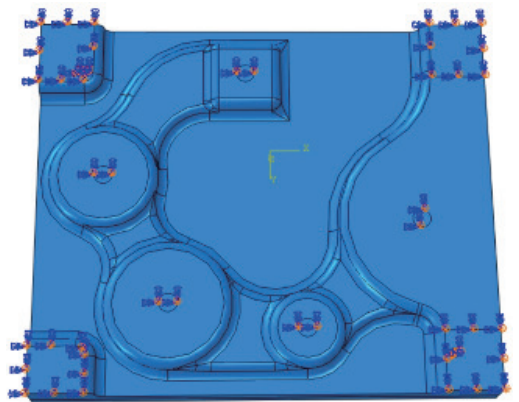


图4 刚性支撑下的边界条件

Fig.4 Boundary conditions under rigid support

b. 动态支撑工况：对浮动支撑缸引入变载行为，模拟气压调控下浮动支撑杆提供动态支撑力过程。取消支撑缸垂直方向自由度约束，并对支撑缸施加图5所示时变衰减载荷函数来拟合支撑力的变化，其他载荷与边界条件均与刚性支撑下相同。

在接触设置方面，定义支撑杆与零件之间的相互作为面-面接触。其中，法向行为设置为硬接触，允许分离但不允许穿透；切向行为定义为库伦摩擦，摩擦系数设定为0.2。在网格划分上，选用C3D10单元，全局网格尺寸控制在3 mm，为准确捕捉薄壁深腔区域的应力梯度，对该区域进行了局部网格细化，局部网格尺寸为1 mm。零件采

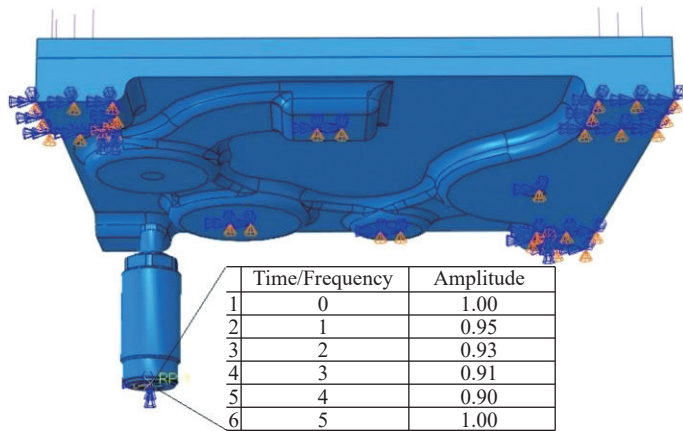


图5 载荷函数设置

Fig.5 Load function settings

用了预拉伸工艺, 初始残余应力水平较低, 因此在仿真中简化忽略了初始应力场。

预期仿真结果: 在动态支撑工况下, 浮动夹具通过周期性释放加工过程中的应力积累, 实现了对工件内部应力的动态均化和工件变形的抑制, 最终有望获得更优的几何精度控制效果。

3 结果与分析

3.1 实验与仿真方案设计

本实验以 7075-T6 铝合金薄壁件为研究对象, 毛坯采用尺寸为 250 mm×210 mm×30 mm 的铝合金块, 零件加工工序见表 1, 工艺参数依据湿切削下铝合金材料加工的经验选取。其中工序 1~5 在平口钳装夹下进行, 对零件下表面进行加工; 工序 6~10 在浮动夹具上进行, 对主要薄壁结构特征进

行加工, 并在工序 7~8 完成主要的测量工作。在加工过程中, 压紧力保持恒定, 且大于支撑缸作用力的总和, 以确保工件始终贴合定位销柱。通过控制浮动支撑杆锁紧装置与气压大小, 进行支撑力的调控。将测量得到的轴向载荷作为仿真分析的输入, 测量得到位移变化与仿真结果进行比较。

3.2 力-位移传感器测量结果分析

如图 6 所示, 测量得到零件初始轴向载荷为 200 N, 将这一数值作为仿真中载荷的输入。观察力-时间曲线可知: 虽然受设备调节精度限制, 部分测量值出现跳动, 但压力的变化规律与实验方案一致, 证明通过对支撑缸气压的调控, 能够给空腔底部施加一个动态支撑力, 实现对支撑力主动调控。

如图 7 所示, 位移传感器的示数持续减小, 随后保持不变。这说明, 在卸荷过程中, 由于材

表 1 零件加工工序表

Tab.1 Machining process table of the part

工序号	工序名称	主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给率/(mm·min ⁻¹)	步距/mm	每刀切深/mm	余量/mm
1	粗铣端面	1500	600	7	2	1
2	整体外形开粗	1500	600	7	2	1
3	通槽、圆角粗加工	2500	400	0.8	0.8	0
4	钻孔加工	3000	30			0
5	平面精加工	2000	500	1	1	0
6	槽粗加工	2000	800	5	1	0.5
7	空腔粗加工	2000	600	3	1	0.5
8	空腔精加工	3000	450	1	0.8	0
9	通槽、圆角精加工	2500	400	1	1	0
10	槽底面精加工	2500	400	1	1	0

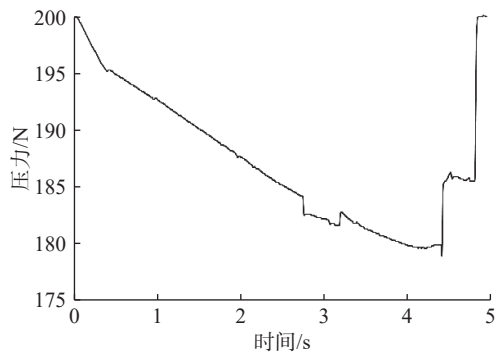


图6 力数据图

Fig.6 Force data chart

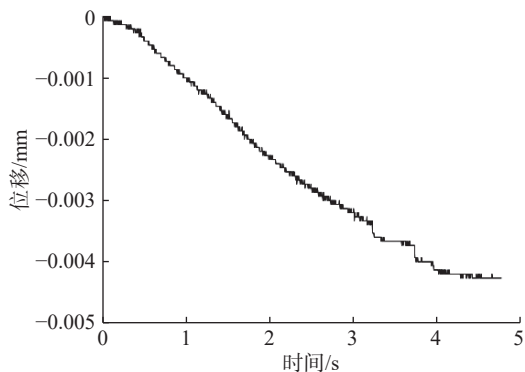


图7 位移数据图

Fig.7 Displacement data chart

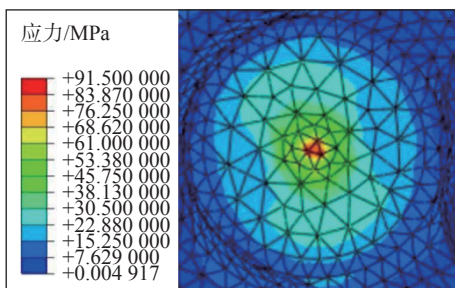
料自重、轴线载荷和衰减支撑力的影响, 先前由刚性支撑而导致的上凸变形得以恢复。在这一过程中, 材料的残余应力重新分布, 最终减小了变形的发生。

3.3 依据测量数据的仿真结果分析

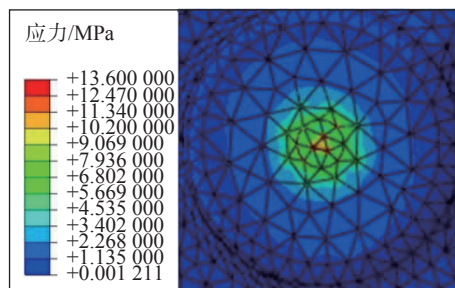
由图8两种工况下应力分布云图可知: 刚性支撑工况下, 腔体底部峰值应力为 91.50 MPa, 平均应力为 26.47 MPa; 而动态支撑工况下, 腔体底部峰值应力为 13.60 MPa, 平均应力为 7.369 MPa, 峰值应力和平均应力分别比刚性支撑工况时下降 85.14%、72.16%。仿真结果说明, 通过对气缸

支撑力进行调节, 由机床轴向载荷导致的加工应力得以释放, 改善了零件加工过程中的应力分布状况。

由图9轴向位移可知: 在刚性支撑下, 底面中心由于收到约束反力会产生正向位移 5.223 μm ; 而在动态支撑下, 由于锁紧装置的取消, 中心区域凹陷变形得以恢复, 位移减小到 1.718 μm , 相较刚性支撑工况下降低了 67.11%。这说明, 在对支撑力进行动态调控后, 应力场重新分配, 在刚性约束下的凹陷变形得到恢复, 工件深腔底部整体变形情况得以改善。



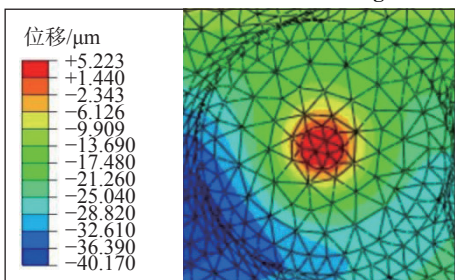
(a) 刚性支撑应力云图



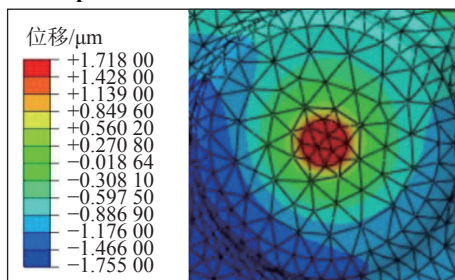
(b) 动态支撑应力云图

图8 应力云图

Fig.8 Stress contour plot



(a) 刚性支撑轴向位移图



(b) 动态支撑轴向位移图

图9 轴向位移图

Fig.9 Axial displacement plot

实验数据测量的主要是支撑杆接触区域位移, 变化值为 4.2 μm , 由仿真得到的位移变化值

为 3.505 μm , 测量误差为 19.83%。本实验中可能产生误差的原因: a. 物理模型的简化: 仿真模型

主要基于机械力学分析,而在切削区存在由于切削温升引起的局部热变形,导致实际变形量大于纯机械仿真值;同时,仿真忽略了毛坯内部微小的初始残余应力。**b.** 接触条件的理想化: 仿真将气动支撑简化为瞬态载荷,未考虑气缸活塞运动的摩擦阻尼和气体的压缩性滞后。**c.** 测量与系统误差: 包括力传感器和激光位移传感器的非线性误差、安装位置的微小几何偏置,以及加工现场高频振动对测量信号的干扰等。

总体上,实验结果与仿真预测结果基本吻合,进一步验证了本文提出的基于浮动支撑的动态变形调控方法在复杂薄壁结构加工中的可行性。

4 结 论

本研究通过建立具有代表性的薄壁空腔结构模型,利用有限元分析软件 ABAQUS 构建出刚性支撑和动态支撑工况下的有限元仿真模型,系统分析了各工况下工件的轴向变形及应力分布。仿真结果表明: 刚性支撑条件下,由于约束反力的作用,工件在加工过程中会出现凹陷变形,同时在支撑区域会产生明显的应力集中情况;而通过调节支撑力,工件底部应力场重新分配,应力峰值与平均值均有明显降低,工件的凹陷变形有所恢复,平面度降低。搭建了集成力-位移传感器的浮动装夹实验平台,测量得到了工件加工过程中的载荷信息与位移变化,测量数据符合仿真预期。研究表明,所提出的基于浮动装夹的支撑力控制方法能够有效改善加工应力场分布与工件变形情况,为薄壁零件变形调控提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] JIANG X H, HU F X, WU C J, et al. Deformation prediction model for milling residual stresses in complex thin-walled parts with variable curvature[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 139: 156–171.
- [2] HU C, DONG J X, ZHUANG K J. DIC-informed microscale elastoplastic flow states in machining[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 307: 110892.
- [3] ZHANG Z X, LUO M, TANG K, et al. A new in-processes active control method for reducing the residual stresses induced deformation of thin-walled parts[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 316–325.
- [4] SHI J H, SONG Q H, LIU Z Q, et al. Partial surface damper to suppress vibration for thin walled plate milling[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(3): 632–643.
- [5] YU J H, CHEN Z T, JIANG Z P. A control process for machining distortion by using an adaptive dual-sphere fixture[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9/12): 3463–3470.
- [6] 程齐, 方喜峰, 章振, 等. 汽车主模型薄壁件加工防变形夹具设计与研究 [J]. *制造技术与机床*, 2020(10): 133–136.
- [7] WU D B, WANG H, PENG J S, et al. Machining fixture for adaptive CNC machining process of near-net-shaped jet engine blade[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(4): 1311–1328.
- [8] GONZALO O, SEARA J M, GURUCETA E, et al. A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 209–218.
- [9] MÖHRING H C, WIEDERKEHR P, LEREZ C, et al. Sensor integrated CFRP structures for intelligent fixtures[J]. *Procedia Technology*, 2016, 26: 120–128.
- [10] DENKENA B, DAHLMANN D, KIESNER J. Production monitoring based on sensing clamping elements[J]. *Procedia Technology*, 2016, 26: 235–244.
- [11] 王景坡, 杨东, 范鑫, 等. 非对称隔框类航空薄壁结构件加工变形控制 [J]. *工具技术*, 2021, 55(7): 71–75.
- [12] 夏灵, 杨吟飞, 郝秀清, 等. 基于能量转化规律的加工变形控制方法研究 [J]. *工具技术*, 2018, 52(10): 18–21.
- [13] BARCENAS L, LEDESMA-OROZCO E, VAN-DERVEEN S, et al. An optimization of part distortion for a structural aircraft wing rib: an industrial workflow approach[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, 28: 15–23.
- [14] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ A E, LEDESMA-OROZCO E, LEDESMA S. Part distortion optimization of aluminum-based aircraft structures using finite element modeling and artificial neural networks[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, 31: 595–606.
- [15] 李曦, 袁军堂, 汪振华, 等. 基于 Rayleigh-Ritz 法的钛合金薄壁件非均匀余量加工变形控制研究 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(11): 1378–1385.
- [16] HAO X Z, LI Y G, ZHAO Z W, et al. Dynamic machining process planning incorporating in-process workpiece deformation data for large-size aircraft structural parts[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(2): 136–147.
- [17] LI B H, GAO H J, DENG H B, et al. A machining deformation control method of thin-walled part based on

- enhancing the equivalent bending stiffness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(9/10): 2775–2790.
- [18] WANG S Y, SONG Q H, LIU Z Q. Vibration suppression of thin-walled workpiece milling using a time-space varying PD control method via piezoelectric actuator[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(7/8): 2843–2856.
- [19] FAN L X, LI L, YANG Y F, et al. Control of machining distortion stability in machining of monolithic aircraft parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(11/12): 3189–3199.
- [20] LU L X, SUN J, LI Y L, et al. A theoretical model for load prediction in rolling correction process of thin-walled aeronautic parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9/12): 4121–4131.
- [21] HE Y Z, WANG D P, WANG Y, et al. Correction of buckling distortion by ultrasonic shot peening treatment for 5A06 aluminum alloy welded structure[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(6): 1531–1537.
- [22] 梅龙, 刘维, 邹希凡, 等. 采用均匀压力线圈的铝合金曲面零件电磁校形 [J]. *锻压技术*, 2020, 45(9): 118–122.
- [23] 邹建锋, 余海东, 来新民. 基于改进粒子群算法的大型薄壁加筋结构多点协调校形优化方法研究 [J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(3): 122–128.
- [24] LEZGY-NAZARGAH M. A generalized layered global-local beam theory for elasto-plastic analysis of thin-walled members[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 115: 48–57.
- [25] CHAU A K, BRUN M, VENTURA P, et al. Non-linear buckling analysis of thin-walled beams modeled with 7-parameter shell elements[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 201: 111994.
- [26] MANTARI J L, CANALES F G. Compact and unified elasto-plastic formulation to study isotropic plates[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2020, 118: 103253.

(编辑: 董 伟)