

航空发动机薄壁机匣数控加工变形主动抑制技术

夏明亮

中国航发南京航空动力有限责任公司 江苏南京 211111

摘要: 航空发动机作为航空装备核心动力单元,薄壁机匣依托结构轻量化特性普遍适配现代航空机型,数控加工阶段较易出现形态畸变,进而干扰装备装配精度与服役稳定性能。本文聚焦薄壁机匣加工变形主动抑制技术开展系统性探索,梳理变形现象在材料特性、结构设计、工艺实施等维度的关键成因,梳理应力调控、工艺改良及工装辅助等主动抑制方向,剖析技术落地的关键路径与逻辑架构,为薄壁机匣加工质量的提升提供理论依据与技术借鉴,对航空制造技术迭代升级、航空装备性能夯实具有重要价值。

关键词: 航空发动机;薄壁机匣;数控加工;变形主动抑制;制造工艺

引言

在我国的航空制造行业中,有很多的加工需要我们重点关注和注意,只有不断的解决和处理航空制造行业的加工过程中的难题,才能够不断的推动我国航空制造技术的发展,才能够促进我国航空制造行业的创新以及持续发展。传统被动修正手段难以从本质上解决变形症结,还会增加加工成本与周期,主动抑制技术通过预判变形态势、针对性调控加工过程实现源头管控,本文全面厘清薄壁机匣加工变形的制约要素,深度解析主动抑制技术核心机理与实施路径,搭建多维度技术架构,为相关领域学术研究与工程实践提供参考。

一、薄壁机匣数控加工变形的核心影响因素

(一) 材料特性与力学行为

航空发动机薄壁机匣多采用高温合金、钛合金等难切削材质,这类高强度高韧性材质在加工进程中切削力与切削热耦合作用,易诱发内部残余应力集聚,其分布失衡会造成工件加工后回弹畸变,热传导效率偏弱的材质特性使得热量无法快速逸散,进而放大应力集中效应,让畸变规律更显复杂,直接干扰机匣尺寸稳定性及形位精度。微观组织结构加工进程中呈现动态演变,晶粒细化或相变现象会重塑材料力学性能,间接作用于应力演化规律及畸变幅度,各向异性特质会造成不同方向的畸变偏差,提升畸变控制难度,这些材料层面的本质属性共同成为加工变形的核心本源诱因。

(二) 结构设计 with 几何特征

薄壁机匣多选用环形、筒形等薄壁构型,壁面厚度

分布失衡且含复杂型腔与筋条等结构形态,加工阶段刚度分布呈现明显差异,薄弱区域在切削力作用下易发生弹性与塑性形变,结构对称性欠缺会放大应力传导的不均衡态势,形变方向与幅度难以精准把控^[1]。机匣的长径比例、开口构型等几何参数也会对加工形变产生直接作用,进一步提升形变管控的复杂程度,筋条分布密度、型腔深浅与形态会改变局部受力格局,开口结构破坏整体结构完整性,导致应力集中区域拓展,壁面厚度过渡区域的突变设计易引发应力梯度波动,这些结构细节的差异直接影响形变分布规律与演化走向,让形变管控更显棘手。

(三) 加工工艺与参数匹配

数控加工中的切削参数、走刀路径、装夹方式等工艺环节与形变存在紧密关联,切削速度、进给量、背吃刀量的适配失衡易导致切削力过载或热量集聚,装夹力的大小与分布偏差会诱发工件弹性形变,走刀路径规划欠缺科学性常造成加工区域应力集聚。工艺参数与机匣结构、材料特性的匹配度欠佳会进一步加剧形变效应,干扰加工质量的稳定表现,刀具切削角度、刃口状态会调整切削力的分布与幅值,加工顺序的不当排布易造成残余应力累积叠加,冷却方式的选取直接关联切削热逸散效率,这些工艺细节的协同匹配度不足会放大形变难题,单一工艺环节的优化调整难以达成理想的形变管控成效。

二、航空发动机薄壁机匣加工变形主动抑制核心原理

(一) 残余应力调控原理

主动抑制技术基于材料加工阶段应力演化规律的预

判,通过预处理与加工过程协同调控促成残余应力均匀分布,改良材料热处理工艺可提前释放部分内应力,削弱加工阶段应力集聚的初始条件,加工中动态调整切削参数能管控切削力与切削热生成,缩减应力集中,辅助冷却手段的运用可缓解热应力影响,从根源遏制形变萌生。预处理工艺需契合材料特性制定靶向方案,通过改变材料内部组织形态削弱应力敏感性,加工中的应力调控要兼顾实时响应与适配性,依据加工阶段不同调整调控方案,规避过度调控引发新的应力失衡,构建“预处理-加工中调控-应力均衡”的完整技术逻辑,保障残余应力始终处于可控区间^[2]。

(二) 工艺系统优化原理

工艺系统适配性与加工变形控制成效密切相关,主动抑制技术注重优化各环节协同性,提升整体抗畸变效能,刀具选配需契合材料特性选定适配材质与几何参数,减少切削中刀具磨损与切削力波动,走刀路径规划恪守刚度均衡利用准则,规避薄弱区域切削载荷集中,装夹系统改良依托柔性夹持、多点支承,均衡装夹力分布以减少装夹形变。各环节优化需形成协同效应,刀具与走刀路径适配可削弱切削力对薄弱区域的冲击,装夹系统与工件结构契合可减少附加内应力萌生,兼顾加工中各环节动态变化,动态调整维持工艺系统持续适配,提升整体抗变形能力与加工稳定性。

(三) 工装辅助与约束强化原理

工装辅助是主动抑制形变的关键支撑,设计专用工装可实现对机匣的可靠约束与刚度补强,刚性支撑工装能提升薄壁区域局部刚度,降低切削力引发的弹性形变,自适应工装系统根据加工中的形变反馈实时调整支撑点位与作用力,实现动态约束,工装与机匣的接触方式优化可减少局部压力集聚,规避装夹诱发的附加形变,保障加工稳定^[3]。工装设计需充分考量机匣结构特征与加工工况,刚性支撑与自适应调节结合可兼顾静态刚度强化与动态形变补偿,接触方式优化需平衡约束效果与表面保护,工装通用性与专用性需合理兼顾,既满足形变抑制需求,又适配不同结构机匣加工,提升技术应用灵活性。

三、薄壁机匣加工变形主动抑制关键技术实现路径

(一) 加工参数智能适配技术

基于材料特性与结构特征搭建加工参数与变形量的关联模型,理论分析明确切削速度、进给量等参数对变形的作用机理,依托参数寻优算法结合加工实时反馈完

成参数动态适配,保障加工效率的同时将切削力与切削热管控于适宜区间。参数匹配达成加工过程平稳态势,削减应力集聚为变形抑制提供基础支撑,关键在于参数与工况的精准契合,关联模型搭建需整合材料力学、切削理论等多学科知识,全面考量参数间耦合关联,参数寻优算法需具备快速响应与自适应特性,依据工况波动实时优化参数组合,同时建立边界约束准则,规避超幅调整影响效率或表面质量,实现变形控制与加工效率协同提升。

(二) 在线监测与实时反馈技术

借助传感技术达成加工过程中切削力、切削温度、工件变形等关键参数实时监测,搭建多源信息采集体系,数据传输与处理模块实时解析监测信息,预判变形演化态势并拟定调控指令,反馈机制让加工系统可依据变形状态动态调整工艺参数或工装约束,形成“监测-分析-调控”闭环管控,从被动应对转向主动预防,强化变形控制的及时性与精准性^[4]。多源信息采集体系需保障监测数据精准度与时效性,传感设备布局涵盖核心加工区域,数据处理模块兼具高效信息融合解析效能,能从多维度数据中挖掘变形特征信息,反馈机制响应速度与加工过程动态变化相适配,优化调控指令执行精度,确保各项调控措施精准执行,促成闭环管控高效运转。

(三) 多场耦合调控技术

考量切削过程中力场、热场、应力场的耦合作用,构建多场耦合分析模型明确各场相互作用机制与对变形的综合影响,通过工艺优化降低耦合场不利影响,低温切削技术调控热场分布,刀具路径改良均衡力场作用,工装约束措施调整应力场状态。多场耦合调控技术强调从整体视角协调各场相互作用,对变形实施综合抑制,强化机匣加工质量的稳定性与一致性,分析模型需全面反映各场动态演化过程与耦合机理,规避单一字段分析导致的调控片面性,工艺优化措施针对多场耦合关键影响环节,通过针对性调控实现各场协同优化,考虑加工过程中多场耦合状态的动态变化,建立动态调控机制,确保不同加工阶段均能达成各场有效协调,最大限度降低耦合作用对变形的不利影响。

四、主动抑制技术的应用前景与优化方向

(一) 多机型适配与标准化推广

航空发动机机型谱系丰富,不同机型薄壁机匣的结构形态与性能指标各具特性,主动抑制技术需向多机型兼容适配维度发展,构建模块化技术架构,针对不同结

构特征的机匣制定针对性抑制策略，同步推进技术标准建设，明确关键工艺参数与工装设计规范，降低技术落地门槛，促成在航空制造领域的规模化应用，提升行业整体加工品质与生产效能。模块化技术架构的搭建需梳理不同机型机匣的结构共性与个性特质，形成可灵活组合的技术模块，标准化建设需结合行业技术现状与发展诉求，制定科学合理的技术规范与操作流程，建立技术更新迭代机制，依据新机型、新材料的应用及时优化标准内容，保障技术适配性与标准化的动态平衡，推动技术在全行业的高效推广与实践落地。

（二）绿色加工与高效协同

主动抑制变形过程中融入绿色加工理念，优化工艺参数减少能耗与刀具损耗，采用环保冷却介质降低环境影响，工艺重构实现加工效率与变形控制协同优化，缩短加工周期的同时保障精度，绿色加工与高效协同的深度融合，使主动抑制技术既满足质量要求，又顺应现代制造业可持续发展导向，拓展技术应用深度与广度^[5]。绿色理念融入需覆盖材料选用、工艺设计、废弃物处理等多环节，实现全流程环境友好，工艺重构需突破传统加工模式局限，结合并行工程、精益生产理念优化工序布局与衔接，建立加工效率与变形控制的协同优化模型，厘清两者平衡关系，在保障变形抑制效果前提下最大化提升效率，实现技术经济性与环境可持续性双重目标。

（三）智能化与数字化升级

随着智能制造技术演进，主动抑制技术需借力数字化手段升级，搭建机匣加工数字孪生模型，复刻加工变形演化轨迹，为工艺优化提供虚拟仿真支撑，结合人工智能算法强化参数优化与变形预判精准度，实现加工过程自主决策与智能调控，智能化与数字化升级可深度提升主动抑制技术的适配性与可靠性，推动航空发动机制造向高端化、智能化转型。数字孪生模型需达成物理与虚拟实体精准契合，涵盖材料特性、结构参数、加工工

况等多维度信息，人工智能算法应用需立足海量理论数据与工程经验，优化模型训练及参数调优流程，提升算法泛化能力与预判精度，推进智能化设备与数字化系统集成，实现数据互通共享与调控指令精准执行，构建全流程智能化加工体系。

结语

航空发动机薄壁机匣数控加工变形主动抑制技术，是提升航空制造精度与装备可靠性的核心保障，核心逻辑聚焦于通过源头管控实现变形高效约束。从变形影响因素、抑制原理、实现路径及优化方向等维度系统梳理，构建多维度协同技术体系，凸显材料、结构、工艺与工装的联动效应，技术发展需统筹适配性、绿色化与智能化诉求，未来应深化多场耦合机制研究，完善数字化仿真与智能调控手段，推动技术向工程实践深度渗透，为航空发动机制造技术迭代升级筑牢基础，助力航空装备产业高质量发展。

参考文献

- [1] 郭皓邦, 魏祥政, 雷学林, 等. 航发薄壁机匣铣削过程的装夹技术研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(04): 84-89+96.
- [2] 刘志学, 胡登洲, 高曦. 航空薄壁机匣加工颤振及切削参数优化[J]. 工具技术, 2022, 56(08): 87-91.
- [3] 韩金昌, 左彦飞, 冯坤. 周期性碰摩激励作用下薄壁机匣支撑系统响应机理[J]. 航空动力学报, 2021, 36(01): 167-175.
- [4] 冯坤, 朱振桥, 左彦飞, 等. 薄壁机匣发动机轴承位置不平衡响应矢量逆推方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 89-95.
- [5] 林东玲. 某延伸机匣机械加工工艺研究[J]. 科技风, 2020, (07): 161.