

基于轻量化设计的机械零部件加工工艺改进

王跃明

中国二冶集团有限公司 内蒙古 包头 014020

摘要:为解决轻量化设计背景下机械零部件加工精度不足、效率偏低等问题,本文围绕轻量化设计与加工工艺的协同适配展开研究。首先概述轻量化设计核心理论及加工工艺基础,分析当前轻量化零部件加工工艺应用现状与核心问题;进而提出基于材料和结构轻量化的两类工艺改进方案,明确数字化建模、在线监测等关键支撑技术;最后形成系统的工艺改进体系。研究成果可提升轻量化零部件加工稳定性与经济性,为相关制造企业的工艺优化提供技术参考。

关键词:轻量化设计;机械零部件;加工工艺;改进方案;技术

引言:在节能环保与高端制造升级的双重驱动下,轻量化设计已成为机械零部件研发的核心趋势,其通过材料优选与结构优化实现减重提质目标,但也对加工工艺提出严苛挑战。当前轻量化零部件加工普遍存在材料加工缺陷频发、复杂结构加工适配性不足等问题,制约了轻量化优势的充分发挥。因此,开展轻量化导向的加工工艺改进研究具有重要现实意义。本文立足实际生产痛点,系统梳理轻量化设计对加工工艺的要求,构建针对性改进方案并明确关键支撑技术,旨在为提升轻量化零部件加工质量与效率提供可行路径。

1 轻量化设计与机械零部件加工工艺概述

1.1 轻量化设计核心理论

轻量化设计以“减重不降效、减重不降质”为核心目标,通过材料优选、结构优化及拓扑重构等手段实现零部件轻量化。材料轻量化原理聚焦轻质高性能材料的应用,如铝合金、钛合金、碳纤维复合材料等,利用材料本身低密度特性降低零部件重量;结构轻量化设计方法包括薄壁化、镂空化、仿生结构设计等,在保证结构强度和刚度的前提下精简材料用量;拓扑优化技术则借助计算机仿真,在给定载荷和约束条件下,优化材料在空间的分布,实现结构轻量化与性能最优的平衡,是轻量化设计的核心技术支撑。

1.2 机械零部件加工工艺基础

机械零部件加工工艺是实现零部件设计要求的关键环节,主要分为传统加工与现代加工两大类。(1)传统加工工艺包括车、铣、钻、磨等,具有技术成熟、成本较低的特点,适用于常规材料和简单结构零部件的加工,但存在效率偏低、精度提升空间有限等不足。(2)现代加工工艺则以高速切削、精密磨削、特种加工为代表,具备加工精度高、效率高、适应性强等优势,尤其适用于轻质材料和复杂结构零部件的加工。

1.3 轻量化设计对机械零部件加工工艺的要求与影响

轻量化设计对加工工艺提出了更高要求:(1)轻质材料多具有硬度低、韧性高、导热性差等特性,易出现加工变形、表面质量差等问题,要求工艺具备更高的稳定性和精准控制能力;(2)轻量化结构多为薄壁、镂空、复杂曲面等形态,对加工刀具路径规划、装夹方式等提出了严苛要求。(3)轻量化设计也推动了加工工艺的革新,促使企业优化切削参数、改进刀具材料、采用多工序集成加工等方式,以适配轻量化零部件的加工需求,实现轻量化设计目标与加工可行性、经济性的统一^[1]。

2 基于轻量化设计的机械零部件加工工艺现状分析

2.1 轻量化零部件加工工艺应用现状

当前轻量化零部件加工以轻质材料加工和复杂结构成型为核心方向,实际应用中形成了传统工艺改良与现代特种工艺结合的格局。材料层面,铝合金、碳纤维复合材料等广泛应用于汽车、航空领域,配套采用高速切削、精密磨削等工艺;结构层面,针对薄壁、镂空等轻量化结构,逐步推广五轴联动加工、真空吸附装夹等技术。部分高端制造领域引入数字化仿真技术优化工艺参数,但多数中小企业仍依赖经验化操作,工艺标准化程度不足。新能源汽车领域的薄壁管件加工,已尝试精密冷轧与内孔磨削复合工艺,但大规模量产中的稳定性控制仍处于探索阶段。

2.2 轻量化加工工艺现存核心问题

实际生产中,工艺问题集中体现为精度控制与效率成本的矛盾。(1)轻质材料加工缺陷频发,铝合金高速切削易粘刀、复合材料易出现纤维撕裂,导致表面质量达标率低;(2)薄壁结构加工变形突出,因刚度不足,装夹力与切削力易引发弹性变形,如薄壁件卸下夹具后尺寸超差报废率可达10%-15%;(3)工艺适配性不足,传统设备难以满足复杂拓扑结构的加工需求,而专用设

备投入大导致中小企业成本压力剧增；（4）流程管控滞后，缺乏实时监测手段，难以精准控制切削热与应力分布，影响加工一致性^[2]。

3 轻量化导向的机械零部件加工工艺改进方案

3.1 基于材料轻量化的加工工艺改进方案

3.1.1 轻质材料加工刀具与切削参数优化

针对轻质材料的物理力学特性，开展刀具与切削参数的系统性优化。刀具方面，选用具备高硬度、高耐磨性及良好润滑性的专用刀具材料，优化刀具几何参数，合理设计切削刃角度与刀尖圆弧半径，减少刀具与工件的摩擦系数，降低切削力与切削热产生。切削参数优化需建立基于材料特性的参数体系，通过试验确定最优切削速度、进给量与背吃刀量组合，避免因参数不匹配导致的材料撕裂、毛刺过多等问题。同时，采用切削参数自适应调节技术，实时监测加工过程中的切削力、切削温度等信号，动态调整参数，确保加工过程的稳定性。

3.1.2 针对轻质材料的特种加工工艺改进

聚焦轻质材料加工需求，对特种加工工艺进行针对性改进。对于塑性较强的轻质金属材料，优化高速切削工艺，提升主轴转速与进给速度，缩短刀具与材料的接触时间，减少切削热积累，降低材料变形风险；优化切削路径规划，减少空行程与重复切削，提升加工效率。对于复合材料等难切削轻质材料，改进超声加工工艺，优化超声频率、振幅及加工压力等核心参数，提升超声能量的传递效率，增强切削刃的切削能力，减少材料纤维的损伤与断裂，保障加工表面质量。

3.1.3 材料轻量化加工过程中的变形控制工艺

建立全流程变形控制体系，从加工前准备、加工过程调控到加工后处理全环节落实变形控制措施。加工前，对轻质材料坯料进行预处理，消除材料内部残余应力，减少后续加工过程中的应力释放变形。加工过程中，采用对称加工、分层切削等工艺方法，均衡分布切削力，避免局部应力集中；优化装夹方式，采用柔性装夹或多点定位装夹技术，减少装夹力对工件的挤压变形；实时监测工件温度变化，通过精准的冷却润滑系统控制切削温度，抑制热变形。加工后，采用时效处理、低温回火等工艺手段，进一步消除加工残余应力，稳定工件尺寸精度。

3.2 基于结构轻量化的加工工艺改进方案

3.2.1 拓扑优化后复杂轻量化结构的加工工艺规划

针对拓扑优化后零部件的复杂结构特征，开展精细化加工工艺规划。采用数字化建模技术，构建零部件三维加工模型，基于模型进行加工工序的拆分与排序，明确各工序的加工范围与技术要求。优化加工路径，采用

等高线切削、螺旋线切削等高效加工策略，减少刀具路径的冗余环节，提升加工效率。针对复杂型腔、异形曲面等难加工结构，采用五轴联动加工技术，提升加工自由度，确保各部位加工精度的一致性。同时，建立工艺参数的数字化仿真体系，通过仿真模拟加工过程，提前预判潜在的加工干涉问题，优化工艺方案。

3.2.2 薄壁、镂空等轻量化结构的加工稳定性提升工艺

针对薄壁、镂空结构刚性差、易变形的特点，从工艺优化角度提升加工稳定性。优化切削参数，采用小切削量、高进给速度的切削策略，减少切削力对工件结构的冲击。改进装夹工艺，采用刚性支撑与柔性夹紧相结合的方式，在工件薄弱部位增设辅助支撑，提升装夹稳定性，同时避免装夹力过大导致的结构变形。采用高频振动抑制技术，通过优化刀具结构、调整加工参数等方式，减少加工过程中的切削振动，避免颤振对加工表面质量与结构稳定性的影响。加强加工过程中的实时监测，通过传感器实时采集工件的变形数据，动态调整加工参数，保障加工过程的稳定性。

3.2.3 多工序集成加工工艺改进

通过多工序集成加工工艺改进，减少装夹次数，提升加工精度。采用复合加工设备，实现铣、钻、镗、磨等多工序的一体化加工，避免多次装夹带来的定位误差。优化工序集成方案，合理规划各加工工序的顺序与衔接方式，减少工序间的辅助时间，提升加工效率。采用高精度定位技术，建立统一的基准坐标系，确保各工序加工基准的一致性，减少基准转换误差。完善集成加工过程中的质量检测体系，在关键工序节点设置在线检测环节，实时反馈加工精度数据，及时调整加工参数，保障零部件的整体加工精度^[3]。

4 轻量化零部件加工工艺改进的关键技术

4.1 数字化建模与仿真技术在工艺改进中的应用

数字化建模与仿真技术为轻量化零部件加工工艺改进提供精准预判与优化依据，核心应用方向包括：（1）构建全流程数字化模型，整合零部件设计参数、材料物理力学属性、加工设备技术参数、夹具结构参数等核心数据，搭建涵盖毛坯制备、切削加工、表面处理等全工序的数字化模型，实现加工全流程的可视化呈现与数据化映射；（2）开展加工工艺仿真优化，基于数字化模型模拟不同切削参数、刀具路径、装夹方式下的加工过程，定量分析切削力分布、切削热传导规律、工件应力应变状态，精准预判加工变形、刀具磨损、表面质量缺陷等潜在问题；（3）进行加工方案可行性验证，针对轻量化复杂结构的多轴联动加工需求，通过仿真模拟验证加工路径的

合理性, 排查刀具与工件、夹具之间的干涉风险, 优化工序衔接逻辑与加工顺序; (4) 建立工艺参数数据库, 将仿真优化结果与实际加工数据进行融合校准, 构建覆盖不同轻质材料、不同轻量化结构类型的工艺参数库, 包含最优切削参数、刀具选型方案、装夹参数等, 为工艺方案的快速制定与动态优化提供数据支撑;

4.2 加工过程在线监测与质量控制技术

加工过程在线监测与质量控制技术是保障轻量化零部件加工精度与稳定性的核心支撑, 具体应用包括: (1) 搭建多维度监测参数采集系统, 针对轻量化加工特点, 选取切削力、切削温度、机床振动、刀具磨损、工件尺寸偏差等关键监测指标, 配备高精度力传感器、温度传感器、振动传感器、视觉检测设备等, 实现各监测参数的实时采集与高速传输; (2) 开展监测数据实时处理与分析, 引入数据预处理算法消除环境干扰、设备噪声带来的信号失真, 通过特征提取技术筛选出反映加工状态的核心特征参数, 建立特征参数与加工质量的关联模型, 实现对加工状态的实时研判与异常识别; (3) 建立多级预警与响应机制, 根据不同加工阶段的质量要求, 设定合理的监测参数阈值与预警等级, 当监测数据超出阈值时, 及时触发对应的预警信号, 同时生成初步的问题处置建议; (4) 构建闭环质量控制体系, 基于监测数据的分析结果与预警信息, 向加工控制系统反馈调节指令, 自动调整切削速度、进给量、装夹力度等工艺参数, 或触发刀具更换、工序暂停等操作, 形成“数据采集-分析研判-预警响应-参数调节”的闭环控制, 保障加工质量的一致性;

4.3 智能制造装备与自动化技术的融合应用

智能制造装备与自动化技术的融合应用可显著提升轻量化零部件加工工艺的稳定性与效率, 核心应用方向包括: (1) 推进加工装备智能化升级, 对传统加工设备进行数控化、智能化改造, 搭载智能控制系统与伺服驱动系统, 实现加工参数的精准调控与多轴联动的协同控制, 提升设备对复杂轻量化结构的加工适配能力; (2) 构建自动化物料传输与装夹系统, 配备工业机器人、桁架机械

手、AGV小车等自动化传输设备, 结合柔性夹具、自动定位与找正技术, 实现工件从毛坯上料、工序间转运到成品下料的全流程自动化, 减少人工干预带来的误差与效率损失; (3) 实现智能调度与生产过程管理, 引入生产执行系统, 整合加工任务、设备状态、物料库存等信息, 基于智能算法实现加工任务的最优分配、设备负载的动态平衡与生产进度的实时管控, 提升生产组织效率; (4) 推动加工装备与信息系统互联互通, 通过工业互联网、物联网技术实现加工设备、监测系统、调度系统、管理系统的信息共享与协同联动, 构建一体化智能制造平台, 实现加工过程的全局可视化与协同管控; (5) 集成自适应加工与柔性制造技术, 在加工装备中融入自适应控制算法, 根据实时采集的加工状态数据与工件质量信息, 自动调整加工策略与工艺参数, 适配不同轻质材料、不同轻量化结构的加工需求^[4]。

结束语: 本文围绕基于轻量化设计的机械零部件加工工艺改进完成系统研究, 明确了轻量化设计与加工工艺的适配需求, 剖析了现有工艺的应用现状与核心问题, 提出了涵盖材料、结构维度的工艺改进方案, 且确定了数字化、智能化等关键支撑技术。未来可进一步深化智能算法与工艺优化的融合, 推动轻量化零部件加工工艺向更高效、精准、绿色的方向发展, 助力制造业高质量升级。

参考文献:

- [1]魏晓荣.工程机械轻量化方法与设计探究[J].机械工业标准化与质量,2022(9):32-35.
- [2]王守峰.汽车关键零部件数字化设计制造与性能优化研究[J].汽车测试报告,2025(9):31-33.
- [3]柴文伟,潘鹤,褚小云,万方.拓扑优化技术在复杂内流道壳体轻量化设计中的应用研究[J].燃气涡轮试验与研究,2023,36(5):49-55.
- [4]张文邦.基于数字化设计与制造的复杂零部件加工工艺优化研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(3):146-148.