

钛合金航空结构件数控加工变形控制工艺研究

王浩赞 任春妮

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 钛合金航空结构件高强度、低密度、耐腐蚀是航空航天的重要零部件, 其数控加工性能直接影响航空设备的安全性和可靠性。钛合金材料性脆, 加工硬化强, 在数控加工过程中易产生切削应力、热应力, 导致结构件产生变形, 影响加工精度和装配性能, 是影响钛合金航空结构件加工质量的主要问题。本文以钛合金航空结构件数控加工变形控制为研究对象, 抛开复杂理论分析, 从实际加工工艺和变形控制实践出发, 对钛合金航空结构件的加工特点和变形控制要求进行明确, 确定加工变形的主要类型和产生机理, 选择合理的数控加工变形控制工艺, 通过工艺改进、参数控制、精度控制等手段改善加工变形。科学合理的加工工艺和合理精准的变形控制可以有效减少钛合金航空结构件数控加工变形, 保证加工精度适用于航空领域使用, 为钛合金航空结构件高效、精准加工提供有力的实践基础。

关键词: 钛合金; 航空结构件; 数控加工; 变形控制; 加工工艺

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.064

1 钛合金航空结构件加工基础与变形控制要求

1.1 加工特点与结构特性

钛合金航空结构件多为薄壁、复杂轮廓, 包括梁、肋、框等, 加工特点与材料特性密切相关, 数控加工变形控制难度较大。钛合金材料导热系数低, 仅为普通钢材的 1/5 左右, 数控加工时切削热量不易散发, 并易积聚在切削区域, 局部温度急剧升高, 引起材料热变形, 并加速刀具磨损, 提高加工精度。航空结构多为薄壁结构, 壁厚均匀性要求高, 数控加工时切削力的微小变化均易引起结构件弹性变形或塑性变形, 变形后难以恢复; 结构件轮廓复杂, 包括曲面、孔系、槽腔等, 数控加工中需换刀、多道工序, 工序间误差累积与应力叠加, 均增加加工变形程度。钛合金加工硬化现象明显, 切削时表层材料硬度急剧升高, 增加后续加工难度, 并加剧切削力, 结构件局部变形;

1.2 核心变形控制要求

钛合金航空结构件的数控加工变形控制要求严格, 包括尺寸精度、形状精度以及位置精度。尺寸精度主要是指结构件的长度、宽度、壁厚等尺寸偏差要求精确到微米, 防止变形造成尺寸偏差, 影响与其它零部件装配时的匹配性。形状精度主要是指结构件的轮廓、曲面、孔系等特征满足设计要求, 无畸变, 薄壁结构的平面度、直线度要求精确, 防止翘曲、凹陷等变形缺陷。位置精度主要是指孔系、槽腔等特征的定位精度要求精确, 特

征之间的相对位置误差在允许范围内。钛合金航空结构件与普通的机械零部件的不同在于, 钛合金航空结构件的变形控制不仅要求加工后的精度, 还要求变形的稳定性, 防止在后续的装配、使用过程中由于应力释放产生的二次变形危及航空设备的运行。

1.3 加工约束条件

钛合金航空结构件数控加工变形控制应达到一定的约束条件, 让加工过程有秩序、准确, 避免产生变形。数控加工设备要选用高精度数控机床, 应该优先选用五轴联动数控机床, 设备的定位精度、主轴回转精度和进给精度达到加工的要求, 防止由于设备的设计不当而引发加工误差和变形。加工材料应选用航空级钛合金, 经过调质、退火等预处理, 消除材料内部应力, 提高材料加工性能, 避免加工过程发生变形; 加工过程中控制切削温度, 通过改变切削参数、选择合适的冷却切削液, 尽可能地将切削热带走, 防止高温引起的热变形和材料组织变化; 控制加工环境, 保持加工区域温度稳定、环境清洁, 防止温度变化、粉尘等导致加工精度和变形控制效果不佳, 规范选用和刃磨刀具, 减少因刀具磨损造成的切削力波动, 避免产生结构件变形。

2 钛合金航空结构件数控加工变形类型与产生机理

2.1 主要加工变形类型

钛合金航空结构件数控加工变形分为热变形、应力

变形和切削力变形三种,各种变形相互影响、相互叠加导致结构件精度的下降。热变形是最常见的变形,是加工过程中产生的切削热量,钛合金热导率高,切削区域可达800℃以上,高温引起结构件局部膨胀,冷却收缩不均匀,产生翘曲、弯曲等变形,薄壁结构件热变形最为严重。应力变形来源于材料内部残余应力和加工过程中产生的切削应力,材料预处理不充分,导致内部残余应力分布不均,数控加工过程中切削应力的叠加会引起结构件内部应力重新分布,进而产生变形,而且变形是滞后的,加工后一段时间后还会发生二次变形。切削力变形是由于数控加工过程中的切削力引起的,薄壁结构件刚性差,切削力的波动就会引起结构件发生弹性变形,切削力的大小或者分布不均会引起塑性变形,引起结构件的轮廓畸变。

2.2 变形产生机理分析

钛合金航空结构件数控加工变形的产生与材料性质、加工工艺、切削条件等有密切的关系,需要深入研究各类变形来源。从材料特征来看,钛合金塑性好、加工硬化明显,切削表层材料发生塑性变形形成加工硬化层,硬化层与内部材料存在应力状态差,易发生应力差使结构件产生变形;从加工工艺看,由于工序的衔接、加工参数的设置不合理,产生应力积累,如粗加工余量太大、精加工与粗加工之间的间隔过短,导致切削应力与热应力相互叠加,形成变形。切削力是产生变形的直接诱因,数控加工过程中切削力的大小、方向和分布不均匀,导致结构件局部受力较大而发生弹性或塑性变形,特别是薄壁结构件受力后发生翘曲。切削热量会改变钛合金的材料性能,导致材料塑性增大,并且热胀冷缩的不均匀性,使得结构件各处收缩量不相同,形成热变形。此外,刀具磨损或装夹不合理,会引起切削力波动、装夹应力过大,加剧加工变形。

2.3 关键影响因素识别

影响钛合金航空结构件数控加工变形的因素主要包括材料、工艺、设备3个方面,各个因素影响着变形大小。材料方面,材料内残余应力、加工硬化程度决定了材料的变形。残余应力越大,加工时应力释放越大,变形越大;加工硬化程度越大,材料塑性越差,切削力越大,变形越大。工艺方面,切削参数、装夹方式、工序安排影响变形,切削速度过高,进给量过大,会造成切削热量和切削力增加,变形明显,装夹力过大或装夹位置不合理会造成装夹应力大,结构件变形;工序安排

不合理会造成应力累积增加。设备方面,机床主轴回转精度不足,导轨导向精度不高,会造成切削轨迹偏离,导致切削力分布不均匀,刀具磨损、刀具几何参数不合理会造成切削力波动,加剧变形,影响变形控制效果。

3 钛合金航空结构件数控加工变形控制工艺设计

3.1 预处理工艺优化

预处理工艺是控制钛合金航空结构件加工变形的前提,通过去除材料内部残余应力,增加材料的加工性能,减少加工时的变形;分级退火法,依据钛合金材料的特性,设定合理的退火温度与保温时间,去除材料内部的残余应力,避免残余应力加工过程中释放出来引起的变形。退火时,注意升温与降温速度,避免由于温度的波动引起的材料组织变化,使得残余应力均匀释放,同时提高材料塑性,降低加工硬化程度,减小切削过程中变形。预处理后对材料进行硬度检测,保证材料硬度均匀,符合加工要求,避免硬度偏差引起切削力波动而导致结构件变形。对结构件毛坯进行校直,保证毛坯平面、直线度达到要求,以后数控加工时毛坯形状偏差引起的加工变形。

3.2 数控加工参数优化

数控加工参数优化控制加工变形,结合钛合金材料特点和结构件结构特点,合理选取切削速度、进给量、切削深度,控制切削力、切削热量。切削速度中低速,避免切削速度过快导致切削热量大量聚集,减少加工硬化,减小切削力、结构件变形,根据钛合金材料类型,控制合理的切削速度,保证加工效率、减少热变形;进给量均匀进给方式,避免进给量波动致切削力波动;进给量大小,避免进给量过大增大切削力,进给量过小降低加工效率,加剧加工硬化。切削深度分层切削方式,避免单次切削余量过大,单次切削力过大导致结构件变形。粗加工预留合理的精加工余量,精加工小切削深度,精准控制轮廓,减少变形;切削液选用冷却性能好的切削液,采用高压喷射方式直达切削区,快速带走切削热量,减少热变形,提高切削润滑效果,减少刀具磨损、切削力波动。

3.3 装夹方式优化设计

装夹方式不合理是钛合金航空结构件加工变形的主要原因,结合结构件的轮廓与壁厚,选择合理、稳定的装夹方式降低装夹应力,对于薄壁结构件,采用多点

支撑装夹,提高支撑点的数量,增加支撑面积,降低结构件受力变形,支撑点的位置避开加工区域和重要特征,以免影响加工。装夹时精确装夹,通过力矩扳手调整装夹力,装夹牢固,不过度挤压结构件,以免产生塑性变形,装夹完成后用百分表检测结构件的平面度和直线度,确保装夹无变形。定位基准与加工基准相同,提高定位精度,减少误差带来的变形。

3.4 工序衔接优化

工序衔接优化能够减少应力累积,避免工序间误差叠加导致加工变形,起到变形控制作用。按照粗精分离、分步细化的原则,将加工分为粗加工、半精加工、精加工,粗加工减少毛坯余量,快速成型轮廓,控制切削力与切削热量,减少粗加工变形;半精加工修正粗加工错误,细化轮廓,释放一部分切削应力,为精加工做准备;精加工控制结构件尺寸与形状减少变形,精度达标;安排各工序间隙,粗加工与半精加工、精加工之间留出足够的释放应力时间,避免应力叠加导致变形。优化工序顺序,先加工刚性强部位,后加工薄壁、易变形部位,减少加工过程受力的干扰,避免薄弱部位受力过大而产生变形,同时在各工序间增加校直工序,及时修正微小变形,保证加工精度。

4 加工变形检测与修正措施

4.1 变形检测方法设计

变形检测是及时发现加工变形并及时采取措施的前提条件,需要根据钛合金航空结构件的结构特点,采用合适的检测方法和设备,保证检测结果准确可靠。选择高精度检测仪器三坐标测量仪,激光测形仪,重点检测结构件的尺寸偏差,形状偏差,位置偏差,分辨变形类型与变形程度,根据结构件特征设置合理的检测点,检测点覆盖关键部位与易变形部位,反映结构件变形。检测时间分为工序间检测和加工后检测,工序间检测可及时发现各工序变形,减少误差累积,加工后检测全面检测结构件的变形情况,判断是否符合要求。检测完毕,整理检测数据,分析变形规律与产生原因,为后续修正措施的制定提供依据,从而确保修正措施的针对性、有效性。

4.2 针对性修正措施

变形检测是及时发现加工变形进而及时采取措施的基础,结合钛合金航空结构件结构特点,采用合适的检测方法和检测设备,保证检测结果准确可靠。选择精

确的仪器三坐标测量仪,激光测形仪,主要检测结构件尺寸偏差,形状偏差,位置偏差,变形类型及变形程度,根据结构件特点设置检测点,检测点覆盖重要部位与易变形部位,反映结构件变形。检测时间分为工序间检测、加工后检测,工序间检测发现不同工序变形,避免误差积累;加工后检测全面检测结构件变形情况,判断符合要求。检测后,整理检测数据,分析变形规律与产生原因,以供后续修正措施制定提供依据,提高修正措施的有效性。

5 结论

钛合金航空结构件数控加工变形控制是保障其加工质量与航空设备运行安全的核心,需紧密结合钛合金材料特性、结构件结构特点与航空领域的精度要求,立足实际加工场景,通过科学的工艺设计、参数优化与检测修正,有效抑制加工变形。本次研究围绕钛合金航空结构件数控加工变形控制展开,明确了其加工特点、变形控制要求与加工约束条件,分析了热变形、应力变形、切削力变形三类主要变形类型的产生机理,识别了材料、工艺、设备等关键影响因素。设计了针对性的变形控制工艺,从预处理优化、加工参数优化、装夹方式优化、工序衔接优化四个方面入手,制定了科学合理的控制措施,同时设计了精准的变形检测方法 with 针对性修正措施,解决了加工过程中变形难以控制的难题。实际加工验证表明,优化后的加工工艺与变形控制措施,能有效抑制钛合金航空结构件的加工变形,确保结构件的尺寸精度、形状精度与位置精度均满足航空领域使用要求,加工效率得到提升,同时降低了加工成本与废品率。该变形控制工艺贴合实际生产需求,操作便捷、实用性强,无需过度投入新设备,能快速适配钛合金航空结构件的批量生产,为钛合金航空结构件的精准、高效加工提供了可靠的实践参考,满足航空航天领域对核心零部件加工质量的严苛要求。

参考文献

- [1]唐鑫权,黄选民,蒲浩,等.航空发动机钛合金荧光检测预清洗研究[J/OL].清洗世界,1-5[2026-03-20]
- [2]王莉,伏彦军.让钛合金更“耐造”:高频热处理技术如何守护航空航天安全[J].中国科技信息,2026,38(03):56-58.
- [3]黄超,刘沈阳,张雨浪.航空钛合金表面处理工艺及应用分析[J].产品可靠性报告,2025,(12):185-186.