

航空发动机叶片复杂曲面精密铣削工艺优化及刀具磨损机制研究

杨晨曦 张 萌

西安航天职工大学 陕西 西安 710100

摘要: 航空发动机作为现代航空器的核心动力装置,其性能直接关系到飞行安全、燃油效率与服役寿命。压气机与涡轮叶片作为发动机的关键热端部件,普遍采用具有优异高温强度和抗氧化性能的镍基或钛基高温合金制造,并呈现出高度复杂的自由曲面几何形态。此类材料与结构的耦合,使得其精密铣削加工面临严峻挑战,其中刀具磨损问题尤为突出,不仅影响加工精度与表面完整性,更制约着生产效率与制造成本。本文从叶片几何特征与材料属性出发,系统剖析了复杂曲面五轴铣削过程中影响加工质量与刀具寿命的关键因素;深入探讨了高温合金切削中刀具的主要磨损形式及其物理化学机理;在此基础上,提出一套以抑制刀具异常磨损、保障表面质量为核心的集成化工艺优化框架。该研究旨在为航空发动机叶片高效、高质、高可靠制造提供理论支撑与技术路径。

关键词: 航空发动机叶片; 复杂曲面; 精密铣削; 工艺优化; 刀具磨损; 高温合金; 五轴加工

引言

第四代、第五代战斗机及新一代大推力民用航空发动机的研制,对核心部件性能提出更高要求。压气机与涡轮叶片作为发动机能量转换核心单元,设计趋向高负荷、高效率与轻量化,气动型面极端复杂。同时,叶片材料多选用难加工高温合金,具有高强度、高硬度等特性,切削时表现出“难切削”特性,导致切削力大、温度高、易产生积屑瘤等问题。在严苛加工条件下,刀具磨损复杂且迅速,非正常磨损或失效会造成经济损失。因此,理解并控制航空发动机叶片精密铣削中的刀具磨损,是实现高质量、高效率、低成本制造的关键。但叶片几何复杂、材料特殊,传统三轴加工和经验式参数选择已无法满足需求,需依托五轴联动数控技术,构建科学、系统的工艺优化体系。本文旨在厘清工艺-磨损-质量内在关联,为工程实践提供指导。

1 叶片结构与材料特性对铣削加工的影响

1.1 复杂曲面几何约束

航空发动机叶片几何复杂,本质是三维自由曲面,难以用简单解析方程描述,需用离散点云或NURBS曲面定义。其加工难点有三:一是无统一基准且干涉风险高,加工中刀具与工件相对姿态需不断调整,刀轴矢量规划不当易引发干涉,导致加工中断或设备损坏;二是薄壁弱刚性结构,叶片为追求推重比设计纤薄,动态刚度低,铣削时易颤振,恶化表面质量并加速刀具疲劳破损;三是特征区域敏感,前缘尖锐或小半径过渡、后缘纤细,对刀具路径等控制要求极高,稍有不慎会造成过切等问

题。鉴于上述几何约束,五轴联动加工成为唯一可行技术路线,它能同步控制多轴,让刀具以最佳切入角接触工件,实现无干涉连续加工。

1.2 高温合金材料的难加工性

高温合金的“难加工性”源于其独特的物理力学性能组合:①高强度与高硬度:即使在室温下,其屈服强度也远超普通结构钢,导致切削过程中需要克服巨大的材料变形抗力,从而产生极高的切削力。②极低的热导率:以Inconel718为例,其热导率仅为45号钢的四分之一左右。这意味着切削过程中产生的绝大部分热量(约80%以上)无法通过切屑有效带走,而是积聚在刀具-切屑接触区和刀具-工件接触区,导致局部温度急剧升高。③显著的加工硬化效应:在切削刃前方的剪切区,材料经历剧烈的塑性变形,其表层硬度可瞬间提升至原始值的两倍以上。后续刀齿或同一刀齿的后续切削将作用于这个硬化层上,进一步加剧切削难度和刀具磨损^[1]。④高化学亲和性与扩散活性:在高温高压环境下,工件材料中的Ni、Cr、Fe等元素与刀具材料(如硬质合金中的W、Co)之间极易发生粘结、溶解和互扩散,破坏刀具表层的完整性。这些材料特性共同作用,使得切削过程处于一个高力、高热、高化学活性的极端环境中,为刀具的快速劣化创造了条件。

2 精密铣削工艺参数的优化逻辑

2.1 切削用量的协同作用

切削速度(vc)、每齿进给量(fz)、轴向切深(ap)和径向切深(ae)是四个最核心的工艺参数,它们之间存

在复杂的耦合关系。①切削速度 (vc)：提高vc可以改善切屑的流动性，有利于断屑，并可能在一定程度上降低单位切削力。然而，对于高温合金而言，过高的vc会因摩擦热剧增而导致切削温度失控，反而加速刀具的扩散、氧化与粘结磨损。因此，存在一个针对特定刀具-工件副的“最佳切削速度窗口”。②每齿进给量 (fz)：增大fz能有效提高生产率，但也会线性增加切削力。对于薄壁叶片，过大的切削力会引发变形和颤振。反之，过小的fz会使刀具在工件表面产生“犁耕”效应，增加摩擦热，同样不利于刀具寿命。理想的fz应确保形成连续、稳定的切屑。③切深 (ap, ae)：在整体叶盘的通道铣削中，通常采用“侧铣为主”的策略，即较小的ap (沿刀具轴向) 配合较大的ae (沿刀具径向)。这种策略可以有效减小垂直于薄壁叶片表面的法向力分量，从而抑制加工变形。

2.2 刀具路径与姿态的智能规划

如果说切削用量是“量”的优化，那么刀具路径与姿态规划则是“质”的优化，对于复杂曲面加工尤为重要。①恒定切屑厚度原则：理想的刀路应保证在整个加工过程中，每个刀齿切除的材料体积 (即未变形切屑厚度) 保持恒定。这可以避免切削载荷的剧烈波动，使刀具磨损均匀，延长其有效寿命。②最优刀轴矢量：刀具相对于曲面的姿态直接影响有效前角、后角以及切削力的方向。通过基于曲面微分几何的算法 (如测地平行、等残留高度法)，可以动态计算出能使切削力最小化、表面成形误差最小化的局部最优刀轴方向。③平滑过渡与避让策略：在叶片前后缘、根部与冠部等几何突变区域，刀路必须进行精心的光顺处理，避免速度与加速度的突变，防止冲击载荷对刀具刃口造成损伤。

3 刀具磨损机制的理论探析

3.1 主要磨损形式

根据磨损发生的部位和主导机理，可将刀具磨损归纳为以下几类：①磨粒磨损：由工件材料内部或表面的硬质第二相颗粒 (如碳化物、氮化物) 对刀具表面造成的机械刮擦与犁沟作用。这是所有切削过程中都存在的基础磨损形式，在高温合金中尤为明显。②粘结磨损：在刀具-切屑、刀具-工件接触界面的高压高温条件下，两种材料的微观凸起发生冷焊 (粘结)，随后在相对运动中断裂，导致刀具材料被工件材料带走。高温合金的高化学活性使其极易与硬质合金刀具发生粘结^[2]。③扩散磨损：当切削温度超过一定阈值 (通常 > 800° C) 时，刀具与工件材料中的化学元素会通过固态扩散相互渗透。例如，硬质合金中的W、Co元素会向切屑中扩散，而工件中的Ni、Fe元素则会向刀具中扩散，导致刀具表层成分改变、硬度

下降，最终剥落。④氧化磨损：在高温有氧环境下，刀具材料 (特别是涂层中的Al、Ti) 会与空气中的氧气反应生成氧化物 (如Al₂O₃、TiO₂)。这些氧化物通常较脆，在机械冲击下容易剥落，暴露出新的刀具表面继续被氧化。⑤微崩刃：这是一种机械疲劳与热疲劳共同作用下的脆性破损。由于切削过程的间歇性 (铣削特性) 和材料的不均匀性，刀具刃口承受着周期性的热-力冲击，导致微观尺度的脆性断裂。

3.2 磨损的内在驱动机理

上述各种磨损形式并非孤立存在，而是相互促进、交织演化的。其根本驱动力在于切削区极端的物理环境：高切削温度是扩散磨损、氧化磨损和加剧粘结磨损的“催化剂”。它降低了材料的屈服强度，促进了原子的迁移与化学反应。高接触压力是粘结磨损和磨粒磨损的直接原因。它迫使刀具与工件材料紧密接触，为原子间的相互作用提供了条件。材料的加工硬化则形成了一个恶性循环：初始切削导致表面硬化，后续切削作用于硬化层上，产生更大的切削力和更高的温度，进而加速刀具磨损，磨损后的钝化刀具又会进一步加剧工件的加工硬化。此外，刀具自身的材料与结构也深刻影响其磨损行为。例如，细晶粒硬质合金基体具有更高的硬度和耐磨性；而先进的多层复合涂层 (如AlTiN、AlCrN) 则能有效隔绝高温与化学侵蚀，显著提升刀具的综合性能。

4 集成化工艺优化策略的构建

4.1 刀具系统的科学选配

构建高效的叶片铣削工艺，其起点在于刀具系统的科学选配。这要求超越简单的型号匹配，深入到刀具材料与几何结构的内在性能层面。基体的选择应优先考虑超细或纳米晶粒的硬质合金，因为更细小的晶粒结构能够显著提升材料的硬度、耐磨性和抗弯强度，从而更好地抵抗高温合金切削中无处不在的磨粒磨损和由间歇切削引发的微崩刃。在涂层方面，应采用具有高硬度、优异热稳定性和低摩擦系数的PVD (物理气相沉积) 多层复合涂层，如AlTiN或AlCrN。这类涂层不仅能在高温下保持其结构完整性，有效阻隔工件材料与刀具基体之间的元素扩散和化学反应，其自身还具备一定的自润滑效果，能够主动降低切削界面的摩擦热。在几何参数设计上，需在锋利性与强度之间寻求最佳平衡，针对高温合金可适当增大前角以减小切削力，但必须辅以刃口强化处理，如进行精确控制的钝圆 (T-land) 或倒棱 (Chamfer)，以增强刃口抵抗冲击和热疲劳的能力，防止早期崩刃。

4.2 冷却润滑方式的革新

有效的冷却润滑是打破前述“高热-高磨损”恶性循环的关键一环。传统的浇注式冷却由于难以穿透高速旋转的刀具和密集切屑云,其冷却液往往无法精准抵达真正的切削热点,效率低下^[3]。相比之下,高压内冷(HPIC)技术通过将冷却液经由刀具内部的微通道,以极高的压力直接喷射到刀尖与工件的接触区域,实现了对热源的精准确打击,不仅能高效地带走热量,还能强力冲刷切屑,防止其在切削区堆积造成二次切削或划伤已加工表面。在追求绿色制造和可持续发展的背景下,微量润滑(MQL)和低温冷却(如液氮或CO₂)等新兴技术也展现出巨大潜力。MQL通过将极微量的润滑油雾化后送入切削区,既能提供必要的润滑以降低摩擦,又能避免大量切削液带来的环境污染和处理成本;而低温冷却则利用极低温度介质的强吸热能力,在不引入液体的前提下实现对切削区的有效降温,尤其适用于对热敏感的材料或工序。

4.3 智能化加工策略

工艺优化的高级形态体现在将智能化策略融入加工全过程。自适应加工技术通过实时监控主轴功率、振动或声发射等信号,能够感知切削状态的变化。当系统检测到切削力异常增大或颤振即将发生时,可自动、动态地调整进给速度,在保护刀具和工件的同时,维持加工过程的稳定性。这种闭环控制模式将被动的工艺执行转变为主动的状态调控。此外,基于数字孪生理念的虚拟加工验证已成为现代工艺规划不可或缺的一环。在物理加工启动之前,利用高度集成的CAD/CAM/CAE平台,在虚拟环境中对完整的刀具路径、工艺参数乃至机床动力学进行全要素仿真,可以提前发现并修正潜在的干涉、过切、欠切或工艺参数不合理等问题,极大地降低了试错成本和生产风险,确保了首次加工的成功率。

4.4 刀具寿命管理理念

对刀具磨损的有效控制,最终需要落实到科学的寿命管理理念上。这要求摆脱传统的“一刀用到底”或凭经验更换的粗放模式,转向基于模型预测的精细化管理。

通过深入理解特定刀具-工件副的磨损规律,可以建立刀具寿命与切削用量(如切削速度、进给量)之间的定量数学模型,经典的泰勒公式及其修正形式为此提供了理论基础。依据此模型,可以精确预测在给定工艺条件下刀具的预期使用寿命。在此基础上,制定预防性的换刀策略,在刀具进入急剧磨损阶段、尚未对工件质量造成不可逆影响之前,就将其更换^[4]。这种前瞻性的管理方式,能够确保每一件流出的叶片产品都拥有稳定、可靠的加工质量,将刀具磨损这一不确定因素纳入了可控的生产管理体系之中。

5 结语

本文通过理论分析,阐明了叶片几何特征与材料属性对铣削加工的根本性影响,揭示了高温合金切削中以粘结-扩散复合磨损为主导的多元磨损机理。在此基础上,提出了一套涵盖刀具选配、冷却策略、智能规划与寿命管理的集成化工艺优化框架。该框架强调,工艺优化不应仅停留在单一参数的调整上,而应是一个系统工程,需从材料科学、切削力学、数控技术和制造管理等多个维度进行协同创新。通过科学地控制切削过程中的力、热、化学环境,可以有效延缓刀具磨损进程,保障叶片的几何精度与表面完整性,最终实现航空发动机核心部件的高效、高质、高可靠制造。未来的研究可进一步融合人工智能与大数据技术,推动叶片加工向更高水平的智能化与自主化迈进。

参考文献

- [1]沈智军,张明德,谢乐.航空发动机叶片铣削工艺调整方法研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(05):1-9.
- [2]张凯尧.航空发动机精锻叶片铣削工装结构分析与优化设计[D].烟台大学,2020.
- [3]马晓国.航空发动机叶片在机测量方法及加工修复技术研究[D].沈阳工业大学,2025.
- [4]刘杰龙.基于UG二次开发的航空发动机叶片加工轨迹规划研究[D].中国民用航空飞行学院,2025.