

航空机械制造中的精密加工技术与质量控制

姜 通 王新建 陈李楠

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西西安 710089

摘 要：航空机械制造精密加工技术与质量控制是保障航空器高性能、高可靠性的核心。精密加工涵盖超精密切削、超声加工、精密研磨及复合加工等技术，实现微米级精度与复杂结构成型，适应难加工材料需求。质量控制通过核心指标体系、无损检测、误差补偿及数据管理四大环节，构建全链条管控网络。两者协同作用，提升零部件精度一致性，支撑航空器轻量化与高性能发展，形成“精度保障网”，为安全飞行与高效运行奠定基础，是航空工业技术进步与产业升级的重要支撑。

关键词：航空机械制造；精密加工技术；质量控制

引言

航空机械制造作为高端装备制造的支柱，其精密加工技术与质量控制水平直接决定航空器的性能上限与安全边界。在航空器追求更高推重比、更长服役周期的趋势下，零部件加工精度已从微米级向纳米级跨越，这对加工稳定性、材料适应性提出极致要求。然而，钛合金、碳纤维复合材料等难加工材料的高强度特性，以及发动机叶片、涡轮盘等复杂结构件的精密成型需求，使得传统加工工艺面临效率与精度双重挑战，亟需通过技术创新突破现有瓶颈，支撑航空工业的持续升级与安全发展。

一、航空机械制造中精密加工技术与质量控制概述

航空机械制造作为高端制造业的核心领域，其产品性能直接关系到飞行安全与运行效率，而精密加工技术与质量控制是保障这一领域发展的核心支撑。航空装备运行环境复杂，需承受高温、高压、高速气流等极端工况，对零部件的精度、稳定性和耐久性提出了严苛要求，这使得精密加工技术与质量控制成为航空机械制造不可或缺的关键环节。精密加工技术在航空机械制造中的核心价值，在于通过精细化的加工工艺实现零部件的高精度成型与性能优化。不同于普通机械加工，航空领域的精密加工需适配多种特殊材料，这些材料往往具备高强度、高硬度或特殊物理化学特性，加工难度极大^[1]。精密加工技术通过对加工过程的精准调控，包括切削参数的优化、加工路径的规划以及加工设备的精准运作，在保障材料原有性能不受破坏的前提下，实现零部件尺寸精度、形状精度与表面质量的严格把控，满足航空装备

装配的高精度匹配需求。质量控制贯穿航空机械精密加工的全流程，并非单纯的事后检测。从加工前的原材料筛选、工艺方案论证，到加工过程中的实时状态监测、参数动态调整，再到加工后的多维度性能检验，质量控制形成了一套完整的闭环体系。其核心目标是提前规避加工缺陷，确保每一个零部件都符合航空装备的严苛标准，因为航空领域的微小误差都可能引发严重的安全隐患，质量控制因此成为保障飞行安全的重要防线。技术的进步为质量控制提供了更有效的实现手段，而严格的质量要求又反向驱动精密加工技术不断创新，二者的协同发展是航空制造业持续突破的重要基础。

二、航空机械制造中的核心精密加工技术

（一）航空精密加工技术核心内涵与分类

航空精密加工技术的核心内涵，是围绕航空零部件的特殊工况需求，以保障材料原有性能、实现结构精准成型为目标，通过对加工全过程的精细化管控，达成远超普通机械加工的精度标准与质量稳定性。其核心在于适配航空领域常见的高强度、高韧性及复合材料，在加工中规避材料变形、应力集中等问题，同时满足零部件复杂结构与超高尺寸一致性的要求，为航空装备的安全运行奠定基础。从技术应用逻辑来看，航空精密加工技术可分为三类核心方向。一类是高速精密切削技术，针对钛合金、高温合金等难加工材料，通过优化切削路径与刀具适配方式，减少加工过程中的热损伤，实现零部件高精度成型；另一类是精密成型技术，如粉末冶金精密成型、等温锻造等，适用于复杂型腔或整体式结构件，通过模具与工艺参数的精准控制，直接获得近净形零件，

降低后续加工难度；还有一类是精密表面处理技术，如离子注入、激光熔覆等，通过对零部件表面进行改性加工，提升其抗腐蚀、抗磨损性能，适配航空装备的极端运行环境。

（二）超精密切削与磨削加工技术

超精密切削与磨削加工技术，是航空机械制造中实现超高精度零部件加工的关键手段，二者针对不同加工需求形成互补，共同支撑航空装备核心部件的制造。超精密切削技术以“低损伤、高精度”为核心，重点适配航空领域中需严苛表面质量的零部件加工。其通过选用高硬度、高耐磨性的专用刀具，结合对切削速度、进给量的精准调控，减少加工过程中对零部件表面的挤压与摩擦，避免产生微裂纹或应力损伤^[2]。尤其针对钛合金、高温合金等难加工材料制成的发动机转子、叶片等核心部件，该技术能在保障材料原有力学性能的前提下，实现微米级甚至纳米级的尺寸精度与表面粗糙度控制。磨削加工技术则更适用于航空零部件中复杂轮廓、高硬度表面的精密加工，如发动机轴承套圈、机匣等结构件。其通过优化砂轮粒度、磨削液配方及磨削路径，利用砂轮磨粒的微切削作用，逐步修正零部件的形状误差与尺寸偏差；同时，通过高效的冷却系统带走磨削过程中产生的热量，避免零部件因热变形导致精度下降，确保加工后零部件的形状精度与位置精度符合航空装备的装配要求。

（三）超声加工技术在难加工材料中的应用

在航空机械制造中，超声加工技术是应对难加工材料加工难题的关键技术之一，尤其适用于陶瓷基复合材料、高强陶瓷、超硬合金等传统加工方式易产生损伤的材料，为航空核心零部件的精密制造提供了有效解决方案。超声加工技术依托高频振动能量实现材料去除，其核心逻辑是通过超声振动系统带动工具头产生高频微幅振动，结合磨料悬浮液的冲击与研磨作用，逐步剥离材料表面微粒。这种加工方式区别于传统切削的“硬力切削”，能大幅降低加工过程中对材料的机械应力与热损伤，避免难加工材料因脆性高、硬度大而出现裂纹、崩边等缺陷。在航空零部件加工中，该技术常用于发动机燃烧室陶瓷衬套、透平叶片边缘强化层等部件的精密成型；例如针对陶瓷基复合材料制成的燃烧室部件，超声加工可在保障材料耐高温性能不受破坏的前提下，实现复杂内腔与精密孔系的加工；针对超硬合金制成的叶片边缘结构，其能通过精准控制振动参数与磨料配比，保证边缘尺寸精度与表面完整性，满足航空装备对零部件

严苛的性能与精度要求，弥补传统加工技术在难加工材料处理上的短板。

（四）精密研磨与复合加工技术

精密研磨与复合加工技术是航空机械制造中实现高精度、高性能零部件加工的关键技术组合。精密研磨通过超精密磨削、抛光等工艺，实现亚微米级甚至纳米级的表面粗糙度控制，有效降低摩擦损耗、提升疲劳强度，尤其适用于航空发动机叶片、涡轮盘等高温高压部件的表面精整。复合加工技术则融合机械加工、电化学加工、激光加工、超声加工等多种工艺优势，形成“1+1>2”的协同效应，例如，电化学机械复合加工可高效去除难加工材料的余量，同时改善表面完整性；激光-机械复合加工则通过激光预处理软化材料，降低切削力，减少刀具磨损，提升加工效率与精度^[3]。二者共同突破了传统单一加工技术的局限性，适应了航空领域对复杂曲面、异形结构及难加工材料的高精度加工需求。通过工艺优化与参数匹配，精密研磨与复合加工技术不仅提升了零部件的几何精度与表面质量，更增强了其在极端工况下的性能稳定性与可靠性，是航空机械制造向高精度、高性能方向发展的重要技术支撑。

三、航空精密加工质量控制关键环节

（一）航空精密加工质量控制核心指标体系

航空精密加工质量控制核心指标体系围绕“精度、性能、可靠性”三大维度构建。精度控制聚焦尺寸公差与形位公差，通过高精度机床、智能刀具补偿及过程监控技术，确保零部件加工误差控制在微米级以内，满足装配互换性与功能适配性要求。性能指标强调材料特性与加工质量的一致性，如表面粗糙度、硬化层深度、残余应力分布等，直接影响零部件的疲劳寿命与耐腐蚀能力，需通过工艺优化与材料改性实现性能稳定。可靠性评估则贯穿全生命周期，通过无损检测、环境适应性测试及加速寿命试验，验证零部件在极端温度、振动、高压等工况下的稳定表现。体系构建需融合过程控制与结果验证，如在线测量与离线检测的协同、统计过程控制（SPC）与六西格玛管理工具的应用，形成闭环管控机制。最终，核心指标体系通过标准化、量化评价与持续改进机制，确保航空精密加工质量满足高安全性、高可靠性的行业要求，支撑航空器在复杂工况下的长效稳定运行。

（二）精密加工过程无损检测技术

航空精密加工过程无损检测技术是保障零部件内在质量的核心手段，通过非破坏性方式探测内部及表面缺

陷。其技术体系涵盖多种方法：超声波检测利用高频声波反射识别材料内部裂纹、夹杂等缺陷，尤其适用于厚壁结构件；射线检测通过X射线或 γ 射线穿透成像，直观显示内部不连续性，对体积型缺陷敏感度高；磁粉检测与涡流检测聚焦表面及近表面缺陷，前者通过磁粉堆积显现裂纹，后者利用电磁感应探测导电材料表面缺陷；渗透检测则通过荧光或着色液渗入表面开口缺陷，经显像后直观呈现。无损检测还融入数字化、智能化趋势，如相控阵超声、数字射线成像等技术提升检测精度与效率，结合人工智能图像识别实现缺陷自动判读^[4]。其核心价值在于提前预警潜在质量风险，确保航空零部件在极端工况下的安全可靠，是精密加工质量控制中不可或缺的“质量防火墙”。

（三）加工误差补偿与控制技术

加工误差补偿与控制技术是航空精密加工中实现高精度制造的核心策略。其核心在于识别并修正加工过程中的各类误差源，如机床热变形、刀具磨损、材料特性波动及环境振动等。通过实时监测系统采集加工状态数据，结合智能算法分析误差模式，实现动态补偿。例如，机床热变形可通过温度传感器与位移传感器联动，利用闭环控制系统调整刀具路径或工件位置，抵消热膨胀引起的尺寸偏差；刀具磨损则通过在线监测刀具寿命，触发自动换刀或参数优化，维持切削稳定性。此外，误差补偿技术还融合多源误差耦合分析，如几何误差、动态误差与热误差的协同补偿，构建全链条误差控制网络。该技术体系不仅提升单件加工精度，更保障批量生产的一致性，是航空零部件高可靠性制造的关键支撑。通过持续优化补偿算法与控制逻辑，可进一步拓展精密加工的精度边界，满足航空领域对极端工况下性能稳定性的严苛要求。

（四）质量数据采集与分析管理

质量数据采集与分析管理是航空精密加工质量控制的神经中枢，贯穿设计、加工、检测全周期。数据采集聚焦多源异构数据的高效获取，包括机床运行状态、刀具磨损参数、环境温湿度、工艺参数波动等实时数据，以及成品尺寸、表面质量、无损检测结果等结果数据。

采集方式融合传感器网络、工业物联网、数字孪生等技术，实现数据自动化、高精度采集与同步。分析管理则依托大数据平台与智能算法，对数据进行清洗、整合、挖掘与可视化，识别质量波动规律与潜在风险。通过统计过程控制（SPC）追踪关键参数趋势，利用机器学习模型预测质量偏差，结合专家系统实现异常预警与决策支持^[5]。数据管理强调全生命周期可追溯，构建标准化数据模型与共享机制，确保数据一致性、完整性与安全性。最终，通过数据驱动的质量改进循环，持续提升加工过程的稳定性与产品的一致性，为航空精密加工提供科学决策依据与持续优化支撑，筑牢航空器安全可靠运行的质量基石。

结束语

航空精密加工技术与质量控制是航空制造的“双引擎”。精密加工技术通过超精密切削、复合加工等突破材料与结构限制，实现纳米级精度；质量控制体系以无损检测、误差补偿、数据管理构建全流程保障网。二者协同推动航空装备向高精度、高可靠、长寿命方向升级。未来，随着智能算法、数字孪生等技术的融合，精密加工将向“自适应、自优化”的智能加工模式演进，质量管控也将迈向预测性、主动性新阶段，持续支撑航空工业的技术突破与安全发展。

参考文献

- [1] 安晶. 激光焊接技术在航空工业机械制造中的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(4): 121-123.
- [2] 安晶. 航空工业机械制造中的特种焊接技术探析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(3): 113-115.
- [3] 冯聪, 张黎明, 李伟兴. 航空领域智能机械制造工艺的创新路径研究[J]. 汽车周刊, 2024(3): 219-221.
- [4] 安晶. 航空工业机械制造中的机器人辅助自动化机械加工焊接技术分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(6): 153-155.
- [5] 李晶晶. 航空机械的制造工艺与质量控制[J]. 汽车周刊, 2024(3): 158-160.