

航空机械制造中的精密加工技术与质量控制

王 博 徐明显

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：航空机械制造中的精密加工技术与质量控制是确保航空器性能与安全的关键。本文探讨了超精密加工技术、电化学加工技术及其他新兴精密加工工艺在航空零件制造中的应用，强调了参数控制、实时监测与误差传递控制等过程质量控制手段的重要性。同时，介绍了尺寸精度、表面质量等多维度成品质量控制方法。文章还提出加强技术研发、完善质量控制体系等策略，并展望了智能化、绿色化及精密测量技术的发展趋势。

关键词：航空机械制造；精密加工技术；质量控制

引言：航空机械制造领域对精密加工技术和质量控制的要求极为严格，因为这直接关系到航空器的飞行性能与安全可靠性。随着航空工业的快速发展，对零件加工精度的要求不断提升，精密加工技术成为实现这一目标的关键。同时，质量控制体系的完善与否，直接影响航空产品的质量稳定性和使用寿命。本文旨在探讨航空机械制造中的精密加工技术与质量控制方法，以期为航空工业的持续发展提供技术支持和保障。

1 航空机械制造中的精密加工技术

1.1 超精密加工技术

(1) 磨削加工在航空发动机核心部件制造中占据关键地位。发动机叶片需承受高温高压气流冲击，其型面精度需控制在3微米以内，通过数控成形磨削技术可实现复杂曲面的精准加工，确保叶片气动性能达标。轴类零件作为传动核心，通过超硬磨料砂轮磨削，可实现0.1微米级的圆度控制，降低运转时的振动噪声。(2) 电火花加工凭借非接触式加工特性，成为高硬度合金零件的理想加工方案。针对涡轮盘槽等复杂结构，利用脉冲放电产生的局部高温实现材料蚀除，加工精度可达 ± 2 微米。通过自适应脉冲电源控制，可在硬质合金零件上加工出R0.05mm的微小圆角，满足航空零件的严苛结构要求。(3) 抛光加工是提升零件表面质量的关键工序。发动机机匣经磁流变抛光后，表面粗糙度可从Ra0.8 μ m降至Ra0.02 μ m，显著减少气流摩擦阻力。对于光学测速部件，通过气囊抛光技术实现纳米级表面精度，确保光学信号传输不受表面缺陷干扰。

1.2 电化学加工技术

(1) 化学腐蚀加工通过精确控制腐蚀液浓度与处理时间，在铝合金蒙皮表面形成均匀氧化层，实现Ra0.1 μ m的表面光洁度。航空导管经化学抛光后，内壁粗糙度降低60%，有效减少燃油输送阻力，同时通过pH值精确控

制(± 0.1)确保腐蚀均匀性。(2) 电解加工基于阳极溶解原理，在航空发动机叶片加工中展现独特优势。采用成型阴极对高温合金叶片进行整体电解，可一次成型复杂型面，加工效率较传统方法提升5倍，且表面无加工应力，避免零件在高温工况下的应力开裂风险，型面精度可达 ± 0.03 mm^[1]。

1.3 其他精密加工技术

(1) 电镀加工是提升航空零件防护性能的重要手段。在起落架零件表面电镀硬铬层，厚度控制在5-10 μ m，可使耐磨性提升3倍以上，同时通过孔隙率检测(≤ 1 个/cm²)确保镀层致密性，抵御航空煤油腐蚀。镀镍层则需满足盐雾试验500小时无锈蚀的严苛要求。

(2) 新兴精密加工工艺正逐步拓展应用边界。激光微加工可在涡轮叶片表面制备0.1mm深的冷却孔，孔位精度达 ± 5 μ m；离子束加工通过高能离子轰击，实现光学零件亚纳米级表面修整；微纳加工技术则为航空传感器制造提供10 μ m以下精密结构加工能力，推动航空电子设备向小型化、高精度发展。

2 航空机械制造中的质量控制

2.1 过程质量控制

(1) 加工参数控制对零件加工质量起决定性作用。切削速度过高会导致航空发动机涡轮盘材料产生过热现象，使表面硬度下降15%-20%，而进给量每增加0.1mm/r，零件表面粗糙度可能上升20%。因此需根据材料特性动态调整参数，如加工钛合金时切削速度通常控制在60-100m/min，进给量0.05-0.15mm/r，通过参数优化可使加工误差降低30%以上。(2) 实时监测技术为加工过程提供全方位保障。在线激光测量系统可实时捕捉零件尺寸偏差，精度达 ± 0.001 mm，一旦超出阈值立即触发停机；声发射技术通过监测切削过程中的声波信号，能提前5秒预警刀具磨损；振动监测系统则可识别0.01g的微小振

幅变化,有效预防因机床颤振导致的加工缺陷^[2]。(3)误差传递与控制需建立全工序追溯体系。毛坯制造的尺寸偏差会使后续加工余量分配不均,导致最终精度下降25%,因此需将锻造工序的圆度误差控制在0.05mm以内。关键控制点设置遵循“3M原则”(人员、设备、材料),如发动机叶片加工中,榫头部位需进行100%工序间检测。

2.2 成品质量控制

(1)尺寸精度检测依赖高精度测量设备。三坐标测量机实现空间尺寸的三维检测,重复精度达0.002mm,可完成复杂曲面的数字化比对;光学比较仪则适用于螺纹、齿轮等标准件的快速检测,测量效率较传统方法提升4倍,确保每批次零件的尺寸一致性。(2)表面质量检测采用多维度评估方式。表面粗糙度测量仪可分辨Ra0.001 μ m的差异,对发动机轴颈部位实施100%检测;金相显微镜能观察到5 μ m以下的表层缺陷;涡流探伤技术可发现0.1mm深的表面裂纹,而渗透检测则适用于检测非金属材料的表面开口缺陷。

2.3 质量改进

(1)质量分析工具助力问题精准定位。鱼骨图可系统梳理导致零件超差的6大因素(人员、机器、材料、方法、环境、测量),某发动机厂通过该工具使叶片合格率提升12%;控制图则能识别加工过程中的异常波动,当CPK值低于1.33时立即启动改进流程。(2)改进措施跟踪与评估需建立闭环管理机制。针对加工变形问题,采用“试切-检测-调整”三步法验证改进效果,通过30件以上的样本测试确认稳定性;设置量化评估指标,如将某类零件的报废率从3%降至0.5%以下视为改进有效,并定期回顾调整措施以适应新材料、新工艺的变化^[3]。

3 提高航空机械制造中精密加工技术和质量控制水平的策略

3.1 加强精密加工技术的研究与开发

(1)高精度加工设备的研发与投入需聚焦核心性能突破。重点攻关五轴联动加工中心的纳米级驱动技术,通过磁悬浮主轴与光栅尺闭环控制,将定位精度控制在 ± 0.0003 mm,满足航空发动机叶片的复杂型面加工需求。企业应每年投入营收的7%-9%用于设备升级,优先引进配备实时误差补偿系统的加工设备,使设备长期运行精度保持率提升至95%以上。同时建立设备全生命周期管理体系,通过预防性维护将故障停机率降低至1%以下。(2)新型精密加工工艺的探索与研究要兼顾效率与精度。深入开发激光辅助切削技术,在高温合金加工中通过1064nm波长激光预热材料,使切削力降低40%,加工

效率提升30%;研究电解-机械复合抛光工艺,实现发动机机匣表面粗糙度从Ra0.2 μ m降至Ra0.01 μ m。建立工艺参数数据库,针对钛合金、复合材料等特殊材料形成标准化工艺包,缩短工艺调试周期至原来的1/3。

3.2 完善质量控制体系

(1)制定全过程质量管理体系需构建闭环控制流程。在设计阶段采用DFMEA(设计失效模式分析)识别潜在质量风险,加工阶段实施“首件三检+过程巡检+末件比对”机制,关键工序的抽检频率不低于每小时5件。明确各环节质量阈值,如主轴加工的圆度误差 ≤ 0.002 mm,表面粗糙度 $\leq Ra0.05\mu$ m,确保过程能力指数CPK稳定在1.67以上。(2)建立质量追溯系统需依托数字化技术。采用区块链技术构建不可篡改的质量档案,每件产品生成唯一数字身份证,记录原材料批次、加工参数、检测数据等28项关键信息。系统具备智能分析功能,可自动识别超差趋势,提前预警质量风险,实现从原材料到成品的全链条追溯,追溯响应时间控制在5分钟以内。(3)加强供应商质量管理要实施分级动态管控。制定严格的供应商准入标准,要求原材料供应商提供材料性能检测报告,化学成分波动控制在0.01%以内。每季度开展供应商质量审核,对A级供应商给予订单倾斜,对出现质量问题的供应商启动整改验收机制,连续两次整改不达标的取消合作资格^[4]。

3.3 人员素质与培训

(1)操作人员专业技能培训需推行阶梯式培养。初级工需通过精密测量实操考核,能熟练使用三坐标测量机,测量误差 ≤ 0.003 mm;高级技师需掌握五轴加工中心编程,可独立完成复杂零件加工编程,每年组织技能轮训不少于80学时。建立技能等级与薪酬挂钩机制,高级技师津贴较普通操作者高30%以上。(2)质量控制意识和责任的提升要融入日常管理。每月开展质量事故案例复盘会,用报废零件实物展示质量缺陷的危害;实施质量责任连带制度,操作人员、检验员、班组长共同对批次质量负责,对零缺陷班组给予月度质量奖励,将质量指标纳入绩效考核,权重不低于20%。

3.4 监督与检查

(1)独立质量监督部门的设立要确保权威性。成立直属公司管理层的质量监督部,配备10年以上航空制造经验的专职监督员,赋予其停工整改权和质量否决权。监督部每月发布质量红黑榜,对连续三个月上榜的车间负责人进行约谈。(2)定期检查机制需覆盖全生产要素。加工现场检查重点验证“三按”(按图纸、按工艺、按标准)执行情况,每周至少开展2次突击检查;设

备状态检查实施“点检+校准”双轨制，关键设备每半年进行一次精度校准，确保主轴跳动 $\leq 0.001\text{mm}$ ；工艺执行检查采用飞行检查模式，随机抽取正在加工的零件进行参数复核，发现违规操作立即停产整改。

4 航空机械制造中精密加工技术与质量控制的发展趋势

4.1 智能化加工与质量控制

人工智能与大数据技术正重塑航空制造的精度控制模式。AI算法可通过分析历史加工数据（累计10万+工艺参数组合），自动生成最优切削参数方案，使钛合金零件加工精度波动幅度降低40%。深度学习模型能实时识别声发射信号中的刀具磨损特征，提前15分钟预警故障风险，将废品率控制在0.3%以下。

大数据平台则实现全流程质量溯源，通过采集500+传感器的实时数据，构建加工过程数字孪生体，可模拟不同参数对产品质量的影响，预测精度偏差 $\leq 0.002\text{mm}$ 。未来3-5年，自适应加工系统将成为主流，能根据材料硬度实时调整进给量（响应速度 $\leq 0.1\text{秒}$ ），实现“零编程”智能加工。

4.2 绿色加工与环保质量控制

环保材料与工艺革新推动航空制造可持续发展。航空发动机机匣正逐步采用碳纤维增强陶瓷基复合材料，其切削加工需使用植物油基切削液（生物降解率 $\geq 90\%$ ），配合低温冷风切削技术（ -10°C 至 -5°C ），可减少70%切削液消耗。

绿色质量控制体系新增“碳足迹”检测指标，要求关键零件加工过程的能耗数据实时上传区块链，确保每吨产品碳排放较传统工艺降低35%。激光清洗技术替代化学酸洗，在去除氧化层的同时实现表面粗糙度 $R_a \leq 0.05\mu\text{m}$ ，且无废水排放，已在波音787机身部件加工中实现规模化应用。

4.3 精密测量技术的发展

测量仪器向亚纳米级精度突破，推动质量控制升级。新一代三坐标测量机采用多传感器融合技术（激光+接触式探针），测量范围扩展至 $2000\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，精度达 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ ，可一次性完成发动机整体叶盘的全尺寸检测。

光学相干断层扫描（OCT）技术实现零件内部缺陷的三维成像，分辨率达 50nm ，能识别传统方法无法检测的微裂纹（长度 $\geq 0.1\text{mm}$ ）。量子传感测量仪正进入实用阶段，通过原子干涉技术实现绝对距离测量，误差 $\leq 0.1\text{ppm}$ ，为大型航空结构件装配提供基准级测量能力，预计2028年将广泛应用于机身对接工序。

结束语

精密加工技术与严格的质量控制体系共同构成了航空机械制造领域发展的坚固基石。面对日益增长的航空产品性能需求与安全挑战，技术创新与质量优化成为了推动该领域持续前行的双轮驱动。随着智能化、绿色化趋势的加速推进，我们有理由相信，未来的航空机械制造将在精密加工与质量控制方面取得更多突破性进展，为航空工业的蓬勃发展注入不竭动力，助力实现更加安全、高效的航空旅行体验，开启航空事业的新篇章。

参考文献

- [1]郭大伟.现代机械制造工艺和精密加工技术研究[J].中国设备工程,2024,(13):100-102.
- [2]王应帅.机械制造工艺及精密加工技术的应用[J].造纸装备及材料,2023,52(11):124-126.
- [3]尹巧灵.现代机械制造工艺与精密加工技术探析[J].集成电路应用,2023,40(02):260-261.
- [4]刘金良.现代机械制造工艺与精密加工技术分析[J].世界有色金属,2022,(24):27-29.