

提升航空机械制造精度的加工技术与质量控制协同研究

刘 明

海军装备部 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安全可靠运行的关键。精密加工技术,如磨削、电火花加工、抛光等,为航空机械产品提供高精度、高表面质量的保障。同时,严格的质量控制手段,包括过程参数监控、成品检测与质量改进等,确保产品符合设计要求。这些技术的应用与体系的建立,对于提升航空机械产品的性能、可靠性和安全性具有重大意义,是推动航空机械制造行业高质量发展的核心支撑。

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科技领域的核心组成部分,对加工精度与质量控制的要求极为严格。随着航空技术的不断进步,精密加工技术成为提升航空机械性能与可靠性的关键。通过综合运用先进的精密加工技术与全面的质量控制手段,不仅能满足航空产品对高精度、高质量的需求,更能推动航空制造行业的持续创新与升级。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策略,以期为提高航空制造水平提供理论参考与实践指导。

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。在起落架液压产品加工中,磨削技术需达成微米级精度控制,关键配合面尺寸误差需控制在 $8\mu\text{m}$ 以内,密封面粗糙度 R_a 值低于 $0.8\mu\text{m}$,以保障液压系统密封性能,避免渗漏并提升起落架承载稳定性。轴类零件如涡轮轴的磨削则要求圆度误差 $\leq 0.5\mu\text{m}$,圆柱度 $\leq 1\mu\text{m}$,确保高速旋转时的动平衡性能。采用陶瓷结合剂CBN砂轮的高速磨削技术,可实现材料去除率提升30%的同时保持高精度。(2)电火花加工。该技术利用电极与工件间脉冲放电产生的高温熔化材料,适用于硬质合金、钛合金等难加工材料。其加工精度可达 $\pm 0.001\text{mm}$,能成型起落架液压件精密油道等异形结构。特点是无机械切削力,避免零件变形,尤其适合薄壁类精密零件加工,但加工效率相对较低,表面会形成微米级重铸层。(3)抛光加工。磁流变抛光技术通过磁场控制磁流变液的流变特性,实现光学级零件表面加工,某型航空起落架液压阀芯经此工艺处理后,表面粗糙度达 $R_a 0.01\mu\text{m}$ 。电解抛光则利用阳极溶解原理,在铝合金舱体表面形成均匀氧化层,同时将表面粗糙度从 $R_a 1.6\mu\text{m}$ 降至 $R_a 0.08\mu\text{m}$,提升耐腐蚀性^[1]。

1.2 电化学加工技术

(1)化学腐蚀加工。基于金属与腐蚀液的氧化反应,通过掩膜控制腐蚀区域,可在起落架液压阀套加工出精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 的孔系。该技术能批量处理零件,表面粗糙度达 $R_a 0.2\mu\text{m}$,适用于铝合金表面光亮处理。航空导管内壁采用硝酸-氢氟酸混合液腐蚀,可高效去除毛刺,表面光滑度提升30%。(2)电解加工。利用阳极溶解原理实现材料去除,在起落架液压阀块批量生产中,借定制阴极一次成型复杂油路,效率是铣削的7倍,加工精度达IT8级。某起落架液压阀芯生产线采用此技术,每小时加工12件,合格率99%,尤其适合高温合金大批量加工,成本较电火花低40%。

1.3 其他精密加工技术

(1)电镀加工。起落架活塞杆镀铬层厚 $50\text{-}80\mu\text{m}$,硬度HV900,耐磨性提升4倍,孔隙率 ≤ 1 个/ cm^2 。钛合金紧固件无氰镀镉后,盐雾寿命达1500小时,镀层厚度均匀性误差 $\leq 5\%$ 。航空连接器镀金后,接触电阻稳定在 $5\text{m}\Omega$ 以下,满足高可靠性要求。(2)新兴工艺探索。激光加工可在钛合金薄板上加工 0.05mm 微孔,精度 $\pm 0.003\text{mm}$,已用于燃油喷嘴量产。离子束加工在石英摆片加工中实现 $0.1\mu\text{m}$ 平面度。微纳加工推动MEMS传感器微型化,体积缩小至1/10,精度 $\pm 0.1\%$ FS,未来5年将在智能蒙皮领域广泛应用。

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:切削速度对航空零件加工质量影响显著,以起落架液压钛合金阀芯加工为例,当切削速度从 $60\text{m}/\text{min}$ 提升至 $120\text{m}/\text{min}$ 时,表面粗糙度 R_a 值可从 $1.2\mu\text{m}$ 降至 $0.4\mu\text{m}$,但超过 $150\text{m}/\text{min}$ 会导致刀具磨损加剧,使零件尺寸误差超 $\pm 0.02\text{mm}$ 。进给量需匹配材料特性,铝合金构件采用 $0.1\text{-}0.2\text{mm}/\text{r}$ 进给量时,加工效率与表面质量达到平衡;而高温合金零件需将进给量控制在

0.05-0.1mm/r, 避免产生颤振。切削深度过大大会引发零件变形, 航空发动机轴类零件粗加工阶段切削深度通常不超过3mm, 精加工阶段控制在0.1-0.5mm, 确保形位公差 $\leq 0.01\text{mm/m}$ 。(2) 实时监测技术: 激光干涉仪可实时监测机床定位精度, 分辨率达 $0.01\mu\text{m}$, 在五轴加工中心上应用时, 能动态补偿因温度变化导致的误差, 使加工精度提升20%。三坐标测量机配备自动上下料系统后, 可实现每小时30个复杂零件的在线检测, 通过与CAD模型对比, 即时反馈尺寸偏差。此外, 红外热像仪用于监测切削区温度, 当温度超过 600°C 时自动调整冷却参数, 避免航空钛合金零件产生热变形^[2]。(3) 关键控制点识别: 通过FMEA(故障模式与影响分析)识别关键工序, 如起落架液压阀芯密封面加工被列为A级控制点, 需每小时抽取3件进行全尺寸检测。采用统计过程控制(SPC)对关键参数进行监控, 当 C_p 值 < 1.33 时启动工艺评审。建立关键设备台账, 对主轴跳动、导轨直线度等每月校验, 确保加工能力指数 $C_{mk} \geq 1.67$ 。

2.2 成品质量控制

(1) 尺寸精度检测: 高精度测长仪测量航空螺栓长度, 分辨率达 $0.1\mu\text{m}$, 重复精度 $\leq 0.2\mu\text{m}$; 关节臂测量机对复杂曲面零件进行三维扫描, 点云密度达 $100\text{点}/\text{mm}^2$, 与CAD模型比对误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 内。对于超大尺寸构件如机身框架, 采用激光跟踪仪检测, 空间定位精度达 0.025mm/m , 确保装配接口符合公差要求。

(2) 表面质量检测: 表面粗糙度测量仪采用电感式传感器, 在起落架液压阀芯密封面选10个检测点, 确保 R_a 值 $\leq 0.8\mu\text{m}$; 金相显微镜放大500倍观察镀层截面, 评估航空齿轮渗碳层厚度是否在 $0.8\text{-}1.2\text{mm}$ 范围内。对于光学级零件表面, 运用白光干涉仪检测, 可识别 0.1nm 级的表面缺陷, 确保反射率符合设计标准。(3) 内部缺陷检测: 超声波检测用于发动机盘类零件, 采用 2MHz 聚焦探头, 可发现直径 $\geq 0.2\text{mm}$ 的内部气孔; 磁粉检测在起落架关键部位施加纵向磁场, 磁悬液浓度控制在 $0.1\text{-}0.4\text{mL}/100\text{mL}$, 能显示 0.1mm 宽的裂纹。射线检测对焊缝进行数字化成像, 缺陷识别灵敏度达2%对比度, 确保涡轮叶片焊接质量。

2.3 质量改进与分析

(1) 质量问题分析工具: 鱼骨图从人、机、料、法、环五个维度分析航空导管弯曲合格率低的问题, 最终锁定工装定位误差为主要原因; 直方图显示某批次螺栓直径分布呈偏态, 判定为刀具磨损导致的系统性误差; 控制图对主轴温度进行连续监控, 当连续7点偏向中心线一侧时, 触发设备维护预警。(2) 改进措施的实施

与效果评估: 针对孔加工尺寸超差, 将高速钢钻头更换为超细晶粒硬质合金钻头, 配合冷却参数优化, 使孔径公差合格率从82%提升至99%; 通过有限元分析改进夹具结构, 将薄壁件加工变形量从 0.15mm 降至 0.03mm ; 采用涂层刀具替代传统刀具, 使刀具寿命延长3倍, 零件表面质量稳定性提升40%。建立改进效果验证机制, 通过3个月连续生产验证, 确保过程能力指数维持在1.67以上^[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

3.1.1 投入高精度加工设备研发

高精度加工设备是精密加工的核心保障。航空机械零件因结构复杂、尺寸精度和表面质量要求极高, 对加工设备性能提出严苛挑战。需加大资金投入, 集中科研力量研发具有自主知识产权的高精度设备, 如纳米级定位精度的数控机床、高效精密磨削设备等。同时, 提升设备智能化水平, 融入传感器、物联网和人工智能技术, 实现实时监控、自动调整及故障预警, 提高加工效率与稳定性。自主研发不仅能降低对国外高端设备的依赖, 还可针对航空制造特殊需求进行定制化设计, 更精准满足精密加工要求。

3.1.2 探索新型精密加工工艺

航空材料的持续更新使传统加工工艺难以适配, 需积极探索新型精密加工工艺。针对高强度、高硬度航空合金材料, 可深入研究电火花加工、电解加工等特种工艺, 此类工艺不受材料硬度限制, 能实现复杂形状零件的精密加工。此外, 激光加工技术因其高精度、热影响区小等优势, 在精密打孔、切割等工序中潜力巨大。通过探索和应用新型工艺, 可拓宽航空零件加工范围, 显著提升加工质量。

3.1.3 加强工艺集成创新, 形成复合加工技术

单一加工工艺难以满足航空零件日益复杂的加工需求, 因此加强工艺集成创新、形成复合加工技术至关重要。复合加工技术将多种工艺集成于一台设备, 实现零件一次装夹完成多道工序, 如车削、铣削、磨削的集成, 既能减少装夹次数、降低装夹误差, 又能提高加工效率。在集成过程中, 需注重各工艺的协同配合, 优化加工参数以保障质量稳定性, 同时结合数字化与仿真技术对加工过程进行模拟优化, 进一步提升集成效果^[4]。

3.2 完善质量控制体系

3.2.1 制定全过程质量管理度

航空机械制造涉及原材料采购、零件加工、装配、检验等多个复杂环节, 任一环节都可能影响产品质量。

因此,需制定全过程质量管理体系,明确各环节的质量责任与控制要求。原材料采购时,严格审核供应商资质,对原材料进行全面检验试验,确保符合标准;零件加工环节,制定详细工艺规程,重点监控关键工序,记录加工参数与检测数据;装配环节,严格遵循装配工艺,保障装配精度与可靠性;检验环节,采用先进设备与方法进行全面检验,杜绝不合格产品流入下道工序。

3.2.2 建立质量追溯系统,确保问题迅速定位

质量追溯系统是实现有效管控的重要手段,可对产品从原材料采购到最终交付的全过程进行跟踪记录,涵盖原材料批次、设备运行状态、操作人员信息、检测数据等。当出现质量问题时,能通过系统快速定位原因与环节,及时整改以避免重复发生,同时为产品维护维修提供依据,提升售后服务效率与质量。建立系统时,需确保数据准确完整,借助信息化技术实现实时采集与共享。

3.2.3 加强供应商质量管理,建立评估和审核机制

供应商提供的原材料与零部件质量直接决定航空产品质量,因此必须加强供应商管理。建立严格的准入制度,全面评估供应商的生产能力、技术水平及质量管理体系,筛选优质合作伙伴;同时建立评估审核机制,定期从产品质量、交货期、售后服务等方面评估供应商表现。对合格供应商维持长期稳定合作,不合格者要求整改,整改不达标则取消资格,从源头保障产品质量。

3.3 提升人员素质与培训

3.3.1 通过定期培训和技术交流提升操作人员的专业技能

航空制造技术不断发展,新设备、新工艺、新技术持续涌现,要求操作人员具备高水平专业技能与知识。需通过定期培训与技术交流提升其能力,培训内容包括精密设备操作、新型工艺应用、质量控制知识等,可邀

请行业专家、技术骨干授课,采用理论与实践相结合的方式提高效率。同时,组织操作人员参与行业研讨会、技能竞赛等交流活动,使其了解行业最新动态,学习先进经验与技术,拓宽视野,提升专业素养。

3.3.2 建立激励机制,鼓励参与质量改进活动

激励机制能充分调动操作人员参与质量改进的积极性。可设立质量奖励基金,对表现突出的个人与团队给予奖金、荣誉证书等表彰;将质量改进成果与绩效考核挂钩,在晋升、评优中优先考虑有贡献者。通过激励,让操作人员深刻认识质量改进的重要性,主动提出合理化建议,优化加工工艺与操作方法,持续提升产品质量。

结束语

综上所述,精密加工技术与严格的质量控制体系是航空机械制造领域不可或缺的两大支柱。随着科技的不断进步与航空工业的飞速发展,对加工精度与产品质量的追求将永无止境。未来,我们应持续探索创新,不断优化精密加工技术,完善质量控制流程,确保航空机械产品的高性能与可靠性。同时,加强国际合作与交流,共同推动航空制造技术的进步,为全球航空工业的繁荣与发展贡献力量。

参考文献

- [1]张文明.航空发动机叶片精密加工技术研究进展[J].机械工程学报,2022,58(5):37-38.
- [2]刘志峰.航空铝合金构件精密加工变形控制技术现状与发展趋势[J].航空学报,2021,(10):83-84.
- [3]陈明,李亮.航空难加工材料精密与超精密加工技术[J].中国机械工程,2020,(12):127-128.
- [4]徐九华.航空钛合金结构件高效精密加工技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2021,(05):68-69.