

# 高精度机械加工中钳工装配技术的优化与应用

马钰斐

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

**摘要：**高精度机械加工中钳工装配技术的优化需从工艺、设备、人员三方面推进。工艺上通过精确设计、先进方法及标准化提升精度；设备工具优化采用数显工具与智能辅助设备；人员技能提升依靠理论实践结合与数字化培训。其应用广泛，航空航天领域用于发动机部件修整与航天器装配，光学仪器中实现镜组高精度定位，半导体设备保障超精密运动，汽车行业则进行零部件修配与性能调整，共同支撑高端制造精度需求。

**关键词：**高精度机械加工；钳工装配技术；优化与应用

## 引言

在现代制造业精密化发展趋势下，高精度机械加工对装配环节的精度要求已达微米级，钳工装配技术凭借手工操作的灵活性与经验优势，在复杂零件修整、精密配合调整等场景中仍具不可替代的核心价值。然而传统钳工工艺存在效率低、质量稳定性不足等局限，难以满足高端装备制造需求。为此，需通过装配工艺优化、设备工具升级及人员技能提升等路径实现技术突破。

## 1 高精度机械加工与钳工装配技术概述

高精度机械加工与钳工装配技术是现代制造业实现精密制造的核心支撑，二者通过技术协同构建了从零件成形到系统集成的全流程精度保障体系。高精度机械加工依托数控技术、激光加工、电火花等先进工艺，以自动化设备为载体，实现材料的微米级切削与成形，其核心在于通过数字化控制减少人为干预，确保零件尺寸公差（如 $\pm 0.001\text{mm}$ ）、形位精度（如平面度 $\leq 0.002\text{mm}/100\text{mm}$ ）及表面质量（粗糙度 $Ra \leq 0.025\mu\text{m}$ ）的稳定性，广泛应用于航空航天、医疗器械等高端领域。而钳工装配技术则以手工操作为核心，凭借操作者的经验与技能，在机械加工难以覆盖的复杂场景中发挥关键作用，例如通过精细锉削、研磨修正零件配合间隙（如密封面贴合误差 $\leq 0.005\text{mm}$ ），采用修配法调整传动机构啮合精度（如齿轮侧隙控制在 $0.01\sim 0.03\text{mm}$ ），或手工研磨液压阀座实现零泄漏密封<sup>[1]</sup>。二者的融合体现在：高精度加工为装配提供合格基础件，而钳工技术则通过手工调整补偿加工误差、处理异形零件配合、修复精密部件磨损，最终实现整机性能的跃升。这种“机器精度+人工智慧”的模式，既发挥了自动化加工的高效与稳定，又通过钳工的灵活性解决了极端精密场景下的技术瓶颈，共同推动制造业向更高精度、更复杂功能的方向发展。

## 2 高精度机械加工中钳工装配技术的优化方法

### 2.1 装配工艺的优化

#### 2.1.1 精确的装配工艺设计

精确的装配工艺设计需基于产品三维模型与公差分析，通过计算机辅助工艺规划（CAPP）软件模拟装配流程，明确各部件的定位基准、连接方式及顺序。例如，对航天发动机涡轮组件装配，需通过有限元分析预判零件受力变形，设计阶梯式装配路径，优先完成基准件（如涡轮盘）的定位，再以“由内向外、从下到上”的顺序装配叶片与密封件。同时，需制定详细的工序参数，如螺栓预紧力矩（精确至 $\pm 1\text{N}\cdot\text{m}$ ）、压合行程（控制在 $0.01\text{mm}$ 级），并标注关键工序的检测节点（如每装配3片叶片检测一次动平衡），确保工艺设计对装配精度的指导性与可执行性。

#### 2.1.2 采用先进的装配工艺方法

先进装配工艺方法可显著提升精度与效率，例如推广“分组选配法”替代传统修配法：将活塞销与销孔的配合公差放大4倍后分组，通过颜色标记实现同组零件的精准匹配，使过盈量控制在 $0.0025\sim 0.0075\text{mm}$ 范围内，装配合格率提升至98%以上。引入“调节装配法”，在机床主轴箱装配中加装可换垫片或偏心轴套，通过旋转调节件实现轴承间隙（ $0.003\sim 0.005\text{mm}$ ）的动态补偿。此外，应用“数字化预装配”技术，通过三维扫描获取零件实际尺寸，在虚拟环境中模拟装配干涉，提前修正超差零件，减少现场试装次数，将装配周期缩短30%。

#### 2.1.3 装配工艺的标准化和规范化

装配工艺的标准化需建立涵盖工具、流程、检测的全要素标准体系：工具方面，规定扭矩扳手、百分表等计量器具的校准周期（每月1次）与精度等级（如扭矩扳手误差 $\leq \pm 1\%$ ）；流程方面，制定《精密部件装配作业指导书》，明确划线（使用激光投线仪定位，误差 $\leq$

0.02mm)、清洗(采用超声波清洗,残留杂质粒径 $\leq 5\mu\text{m}$ )、连接(螺纹连接需涂抹防松胶并按对角顺序紧固)等工序的操作规范。同时,推行“5S”管理,要求工装夹具分区存放、零件摆放使用定位托盘,通过过程记录表单(如《装配工序检验卡》)实现质量追溯,确保每道工序的可复制性与稳定性,将人为操作误差降低至0.01mm以内。

## 2.2 装配设备与工具的优化

装配设备与工具的优化是提升钳工装配精度与效率的物质基础,需从高精度工具升级、智能化辅助设备应用及工具管理体系完善三方面推进。在工具升级上,将传统手工工具替换为精密数显工具,如采用数显扭矩扳手(精度 $\pm 0.5\%$ )控制螺栓预紧力,数显千分表(分辨率0.001mm)实时监测配合间隙,配合激光对中仪(同轴度误差 $\leq 0.002\text{mm/m}$ )实现轴系装配精准定位。引入智能化辅助设备,如便携式三坐标测量臂(测量精度 $5\mu\text{m}$ )现场检测复杂零件形位公差,避免离线检测的二次装夹误差;使用气动平衡吊具(承重0.5~50kg)辅助搬运重型部件,减少人工操作导致的零件磕碰与定位偏差<sup>[2]</sup>。同时建立工具全生命周期管理系统,通过RFID标签追踪工具使用状态,制定分级保养计划(如研磨工具每50工时精磨一次),并配置恒温工具柜(温度控制 $20\pm 2^\circ\text{C}$ )存放精密量具,防止环境因素影响测量精度,最终实现工具误差对装配质量的影响降低40%以上。

## 2.3 装配人员技能的提升

在高精度机械加工中,钳工装配技术的优化离不开装配人员技能的全方位提升,这主要体现在以下几个方面:(1)构建分层级培训体系:针对不同经验水平的钳工设计差异化课程,初级人员侧重基础量具使用与工艺规范学习,高级人员强化误差分析、数字化工具操作及复杂结构装配能力,通过“理论+实操+考核”闭环模式提升技能覆盖深度。(2)引入虚拟仿真训练平台:利用VR技术模拟高精度装配场景(如航空叶片定位、光学镜片调整),使学员在无实物损耗环境下反复练习关键操作,结合力反馈设备感知装配阻力,缩短从理论到实际操作的适应周期。(3)建立标准化操作视频库:将典型装配案例(如核电主泵叶轮过盈配合、半导体导轨刮研)分解为标准化步骤,录制高清操作视频并标注关键参数(如刮削压力、冷却时间),供装配人员随时调阅学习,减少经验依赖导致的误差。(4)实施装配过程追溯与误差分析:通过视频记录装配全流程,结合CMM测量数据定位偏差环节,组织装配人员复盘讨论,针对性改进操作手法(如调整敲击力度、优化夹具装夹顺

序),形成“问题-改进-验证”的持续优化机制。(5)开展跨学科技术交流:定期组织钳工与机械设计、材料工程、数字化测量等领域的专家开展联合培训,使其理解装配误差对产品性能的影响机理(如热变形对航空发动机间隙的影响),提升技术决策的系统性。

## 3 高精度机械加工中钳工装配技术的具体应用

### 3.1 航空航天部件的精密加工

#### 3.1.1 飞机发动机核心部件的手工精密修整

在飞机发动机叶片与涡轮盘的装配中,钳工需通过手工研磨修正叶片榫头与榫槽的配合间隙,确保接触面积 $\geq 85\%$ ,以承受高速旋转时的离心力与热力学负荷。例如,采用“涂色法”检测接触区域,通过细锉刀(000号)对高点进行微量切削,使配合间隙控制在0.005~0.01mm,同时保证叶片安装角误差 $\leq 0.05^\circ$ 。对于燃烧室密封环等薄壁零件,需手工调整其圆度(公差 $\leq 0.02\text{mm}$ ),通过铜锤敲击与专用胎具配合,避免机械加工导致的变形,确保发动机工作时的气密性(漏气量 $\leq 0.5\text{L/min}$ )。

#### 3.1.2 航天器结构件的精准装配与调整

航天器舱体对接面的装配依赖钳工手工刮削,通过“三点接触法”控制平面度误差 $\leq 0.003\text{mm/m}$ ,确保舱段连接后的整体刚度。在卫星天线反射面装配中,钳工需手工调整数百个支撑点的高度差( $\leq 0.01\text{mm}$ ),配合激光干涉仪检测面形精度(RMS值 $\leq 0.02\lambda$ , $\lambda = 632.8\text{nm}$ ),以满足高频信号传输需求。对于火箭发动机喷管的收敛段与扩散段,采用手工修配法调整同轴度(误差 $\leq 0.03\text{mm}$ ),通过增减垫片厚度补偿焊接变形,保证推进剂喷射的对称性,提升火箭飞行姿态稳定性。

#### 3.1.3 航空液压系统的密封与功能调试

航空液压阀组装配中,钳工需手工研磨阀芯与阀座的配合面,通过“8”字形研磨轨迹使密封带宽度控制在0.3~0.5mm,表面粗糙度达 $\text{Ra}0.025\mu\text{m}$ ,确保在30MPa工作压力下无渗漏(保压10min压降 $\leq 0.2\text{MPa}$ )。对于起落架收放机构的铰链轴与轴套,采用手工铰孔(精度H7)配合液氮冷却装配,控制过盈量在0.008~0.012mm,同时手工调整缓冲器行程(误差 $\leq 1\text{mm}$ ),通过反复试装验证收放动作的平稳性(无卡滞、异响),保障飞机起降安全。

### 3.2 光学仪器的镜组装配

光学仪器的镜组装配是高精度机械加工中钳工装配技术的关键应用领域之一,其精度直接影响仪器的成像质量和性能。(1)镜片的清洗与处理:在装配前,钳工需使用高纯度酒精和超声波清洗设备对镜片进行彻底

清洗, 去除表面灰尘、油污等杂质, 确保镜片表面清洁无瑕, 为后续装配提供良好基础。(2) 镜片的定位与安装: 利用精密的定位装置和装配夹具, 钳工精确地将镜片放置在预定位置, 通过微调装置确保镜片的光轴与仪器的光轴完全重合, 实现高精度的光学对准, 保证成像的清晰度和准确性。(3) 镜组的调整与校准: 装配过程中, 钳工使用专业的光学检测设备, 如自准直仪和干涉仪, 对镜组的光学性能进行实时监测和调整, 通过精细的调整螺钉和垫片, 校准镜组的焦距、像差等参数, 确保光学系统的最佳性能。(4) 镜组的固定与保护: 在镜组调整完成后, 钳工采用合适的固定方式, 如使用低应力的胶水或机械固定件, 将镜片牢固地固定在镜座上, 同时确保固定过程中不会对镜片造成损伤或应力变形, 保证镜组的长期稳定性。(5) 装配后的检测与验证: 装配完成后, 对整个光学仪器进行全面的光学性能检测, 包括成像质量、分辨率、光斑形状等, 确保装配后的光学仪器符合设计要求和质量标准, 为用户提供可靠的光学产品。

### 3.3 半导体设备的超精密定位

在半导体设备的超精密定位中, 钳工装配技术通过手工操作与精密工具结合, 实现纳米级精度控制。例如, 光刻设备光学平台的装配需钳工手工调整导轨平行度 (误差  $\leq 0.002\text{mm/m}$ ), 通过刮研导轨面接触点 ( $\geq 25$ 点/ $25\text{mm}\times 25\text{mm}$ ), 配合激光干涉仪实时监测, 确保平台移动直线度达 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 。晶圆传输机械臂的末端执行器装配中, 钳工需手工研磨吸盘平面度 ( $\leq 0.005\text{mm}$ ), 调整真空管路接口同心度 (误差  $\leq 0.01\text{mm}$ ), 并通过百分表校准抓取位置重复精度 ( $\pm 0.003\text{mm}$ ), 避免晶圆吸附时产生应力损伤。在探针台的探针卡装配中, 采用手工微调节机构, 控制探针针尖与晶圆接触压力 ( $5\sim 15\text{g}$ ) 及垂直度 (偏差  $\leq 0.5^\circ$ ), 通过显微镜观察接触痕迹优化定位, 确保测试信号传输稳定性 (阻抗波动  $\leq 2\%$ ), 满足 $7\text{nm}$ 及以下制程芯片的检测需求。

### 3.4 汽车零部件的修配与调整

在汽车零部件的修配与调整中, 钳工装配技术通过手工操作实现关键部件的精度保障与性能优化。例如, 发动机缸体与缸盖的接合面需经钳工手工刮削, 通过“涂色研点法”确保接触面积  $\geq 75\%$ , 平面度误差  $\leq 0.05\text{mm}/100\text{mm}$ , 配合专用密封胶实现无垫片密封, 防止冷却液渗漏<sup>[3]</sup>。变速箱齿轮组装配时, 钳工采用“压铅法”测量齿侧间隙 (控制在 $0.15\sim 0.25\text{mm}$ ), 通过手工研磨同步器锥面 (表面粗糙度 $Ra0.8\mu\text{m}$ ), 调整锁止角误差  $\leq 1^\circ$ , 确保换挡平顺无冲击。对于底盘悬挂系统, 需手工调整转向节主销后倾角 (偏差  $\leq 0.5^\circ$ ) 和前轮定位参数, 通过增减垫片厚度补偿零件加工误差, 使车轮外倾角控制在 $\pm 0.3^\circ$ 范围内, 提升车辆行驶稳定性。此外, 在新能源汽车电池包装配中, 钳工手工校平汇流排连接面 (平面度  $\leq 0.03\text{mm}$ ), 控制螺栓预紧力矩 (精度  $\pm 2\text{N}\cdot\text{m}$ ), 确保导电接触电阻  $\leq 50\mu\Omega$ , 保障电池系统安全高效运行。

### 结语

未来, 制造业的发展将更加依赖于数字化技术与传统工艺的深度融合。通过引入先进的数字化工具和平台, 我们可以实现对生产过程的精确控制和优化, 从而提高生产效率和产品质量。同时, 跨领域的创新将为制造业带来新的发展机遇, 例如将人工智能、物联网等新兴技术应用于生产流程中, 可以实现智能化生产和个性化定制, 满足市场对更高精度、更复杂功能产品的需求。

### 参考文献

- [1]胡向南,魏代钢.数控加工技术在机械加工制造中的应用策略探究[J].中国金属通报,2025(4):129-131.
- [2]赵威.自动化技术在航空机械加工中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(1):128-131.
- [3]李宁.飞机结构装配中自动制孔技术的精度与效率优化研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(2):018-021.