

圆台磨床高精度磨削技术的研究与应用

陈勇奇

杭州祥生砂光机制造有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8438

[摘要] 精密制造行业对工件加工精度与生产效率的要求持续提高，圆台磨床高精度磨削技术受核心部件精度衰减、磨削参数匹配不足、环境干扰等问题影响，逐渐难以满足实际生产需求。本文核心论点为多维度技术优化突破技术瓶颈，提升圆台磨床磨削性能，提出核心部件结构优化、磨削参数智能调控、环境干扰防控三类改进路径。实际应用数据表明，这些改进能有效提升加工精度、改善生产效率、降低工件报废率，为圆台磨床在精密加工中的应用提供有力支持。

[关键词] 圆台磨床；高精度磨削；技术优化；精密制造

Research and Application of High-Precision Grinding Technology in Surface Grinder

Chen Yongqi

Hangzhou Xiangsheng Sanding Machine Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] The precision manufacturing industry continues to demand higher standards for workpiece machining accuracy and production efficiency. However, the high-precision grinding technology of centerless grinders is gradually struggling to meet practical production requirements due to issues such as core component accuracy degradation, insufficient grinding parameter matching, and environmental interference. This paper argues that multidimensional technological optimization can break through these bottlenecks and enhance the grinding performance of centerless grinders. Three improvement approaches are proposed: core component structural optimization, intelligent grinding parameter regulation, and environmental interference control. Practical application data demonstrates that these improvements effectively enhance machining accuracy, improve production efficiency, and reduce workpiece scrap rates, providing strong support for the application of centerless grinders in precision machining.

[Key words] cylindrical grinding machine; high-precision grinding; technical optimization; precision manufacturing

引言

近年来，航空航天发动机叶片、汽车精密轴承、高端医疗器械核心部件等产品向高精密化方向发展，精密制造行业对工件的尺寸公差、形位精度及表面粗糙度要求持续升级，部分核

心零部件加工精度需控制在微米级甚至亚微米级。圆台磨床依托稳定磨削性能，成为实现这类高精度工件加工的核心设备，其磨削技术水平直接影响下游产业产品质量。实际生产中，该技术面临核心部件长期运行精度衰减、磨削参数与工件特性适

配性差、环境温湿度及振动干扰精度等问题，制约精度潜力发挥，开展相关技术与改进具有重要现实意义。

一、圆台磨床高精度磨削技术现存关键问题分析

圆台磨床高精度磨削作业中，核心部件精度保持能力存在明显短板。主轴是核心传动部件，长期高速运转易出现轴承磨损、轴颈圆度误差增大，导致主轴径向跳动超工艺范围，使工件圆柱度精度下降；主轴与电机间传动机构若有齿轮啮合间隙过大或皮带张紧度不足问题，会引发传动振动，振动传递至砂轮后，造成砂轮切削轨迹不规则，影响工件表面粗糙度^[1]。磨削过程参数调控体系未实现精准适配，砂轮转速、进给速度与工件材质、硬度的匹配缺乏动态调整机制。加工不同批次、不同硬度的金属工件时，沿用固定磨削参数，要么因砂轮切削力过大导致工件热变形，要么因切削力过小使磨削效率降低且达不到预设精度；砂轮修整周期设定无科学依据，过度使用未及时修整的砂轮，会导致表面磨粒钝化、切削能力下降，既增加工件表面划痕概率，又使磨削热量无法及时散发，进一步加剧工件热变形^[2]。环境因素对磨削精度的干扰未得到有效控制，磨床工作区域温度波动会引发设备基础部件热胀冷缩。床身是支撑结构，温度变化会导致导轨直线度偏差，影响工作台运动精度，使砂轮与工件相对位置偏移；空气中粉尘颗粒若进入导轨间隙或主轴轴承内部，会加剧导轨磨损、增大轴承旋转阻力，导致工作台运动平稳性下降，最终影响磨削加工的尺寸精度和形状精度。

二、圆台磨床高精度磨削技术优化改进路径探索

（一）核心部件精度衰减的结构优化

主轴组件结构优化中，除传统轴承改进，还采用主轴两端双支撑结构设计，在主轴前端增设径向推力轴承组，借对称布局分散主轴运转时的径向载荷与轴向载荷，减少单一轴承承受的压力，延缓轴承磨损速度^[3]。对主轴轴颈表面开展超精密磨削加工，将轴颈表面粗糙度控制在 $Ra0.02\mu m$ 以下，降低轴承与轴颈的摩擦系数，减少运转过程产生的热量。针对工作台旋转精度衰减问题，改进工作台与床身的连接结构，用高精度滚珠转盘替代传统滑动导轨。滚珠转盘内部设多组精密滚珠循环通道，借预紧工艺消除滚珠与滚道间隙，提升工作台旋转时的定心精度；在工作台底部装环形光栅位移传感器，实时监测旋转角度偏差，偏差超出设定范围时，由伺服电机驱动微调机构动态补偿，确保旋转精度稳定。对砂轮架结构优化，用一体化铸造工艺制作砂轮架壳体，减少壳体因拼接产生的形位误差，同时在砂轮架与床身连接部位设刚性支撑块，增强砂轮架稳定

性，避免磨削过程中砂轮架振动导致的精度偏差。

（二）磨削参数匹配不足的智能调控改进

参数调控系统中引入自适应控制算法，依托实时采集的工件加工数据构建动态调整模型。传感器检测到工件材质密度存在细微差异时，系统借算法自动修正进给速度与砂轮切削深度，避免因材质不均导致局部磨削过量或不足。结合不同磨削阶段的精度需求差异，将磨削过程划分为粗磨、半精磨、精磨三个阶段，各阶段设独立参数调控逻辑：粗磨阶段用较高进给速度与较大切削深度，提升加工效率；半精磨阶段逐步降低进给速度并减小切削深度，消除粗磨阶段产生的表面缺陷；精磨阶段用极低进给速度与微小切削深度，配合高频振动抑制技术，进一步提升工件表面精度。参数调控系统中还加入砂轮弹性变形补偿模块，通过压力传感器监测砂轮与工件的接触压力，结合砂轮弹性模量参数计算变形量，进而自动调整砂轮进给量，抵消弹性变形对加工精度的影响。开发参数模拟仿真功能，实际磨削前借数字孪生技术构建虚拟磨削环境，输入工件参数后模拟不同磨削参数下的加工效果，提前筛选最优参数组合，减少实际加工中的参数调试时间。

（三）环境干扰影响精度的防控探索

针对地面振动对磨床精度的影响，磨床底部安装主动式隔振系统。该系统包含多个液压减震器与振动传感器，振动传感器实时采集地面振动数据，控制系统分析振动频率与振幅后，驱动液压减震器产生反向振动，抵消外部振动对磨床的影响，将磨床工作台振动幅度控制在极小范围^[4]。湿度干扰防控上，磨床工作区域设置除湿装置，湿度传感器实时监测空气中的湿度值，湿度超出工艺允许范围时，除湿装置自动启动，将空气中水汽冷凝排出，避免湿度较高导致金属工件表面锈蚀，同时防止水汽进入磨床电气控制系统，减少电气元件故障概率。针对冷却液污染问题，冷却液循环系统中增设多级过滤装置。第一级过滤用滤网去除冷却液中的大颗粒金属碎屑，第二级过滤用磁性分离器吸附冷却液中的铁磁性杂质，第三级过滤用精密滤芯过滤微小杂质，确保冷却液清洁度，避免杂质随冷却液进入磨削区域，造成工件表面划伤或砂轮堵塞。磨床周围设置气流屏障，气流发生器产生稳定气流层，阻挡外部气流对磨削区域的干扰，避免气流导致的砂轮与工件相对位置偏移，维持磨削过程稳定性。

三、圆台磨床高精度磨削技术实际应用成效总结

（一）核心部件优化的精度提升成效

设备核心部件优化后，加工精度提升成效体现在多维度指

标改善上。主轴组件采用新型陶瓷轴承与空心轴结构设计，运转时温升从优化前的 12℃ 降至 5℃，有效减少热变形对精度的影响，配合主轴端部精密动平衡校正，轴向窜动量从 0.005mm 降至 0.001mm。工作台与床身的导轨接触面采用聚四氟乙烯涂层处理，导轨摩擦系数从 0.15 降至 0.03，工作台移动时爬行现象完全消除，直线运动精度误差从 0.008mm/1000mm 缩小至 0.002mm/1000mm。工件圆度精度检测采用圆度误差评定的最小区域法，对应的计算公式为

$$f_{\text{round}} = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$$

(其中 f_{round} 为圆度误差， R_{max} 为工件横截面轮廓到圆心的最大距离， R_{min} 为最小距离)，优化后加工直径 200mm 的轴承套圈工件时， R_{max} 与 R_{min} 的差值从 0.009mm 减小至 0.002mm，圆度精度显著提升。砂轮轴径向刚度通过增加轴径尺寸从原来的 80N/μm 提升至 150N/μm，磨削硬度为 HRC55 的合金工件时，砂轮轴弯曲变形量从 0.004mm 降至 0.001mm，确保砂轮切削轨迹稳定，工件表面波纹度从原来的 0.006mm/m 降至 0.001mm/m。

(二) 参数智能调控的效率改善成果

磨削参数智能调控可提升多类工件加工效率。加工不锈钢 304 材质、厚 10mm、直径 300mm 的圆盘时，系统按区域精度自动分配参数：边缘用进给速度 50mm/min、切削深度 0.02mm，中心切换为 30mm/min、0.01mm，单件加工时间从 18 分钟缩至 11 分钟。批量加工长 500mm、直径 50mm 的阶梯轴，系统记忆学习存储最优参数，后续调用时间从 40 秒减至 5 秒，连续加工 500 件尺寸一致性误差控制在 0.003mm 内。系统还能监测砂轮磨损，磨粒磨损达 0.1mm 时自动修整，修整时间从 12 分钟缩至 5 分钟，单日加工量从 280 件升至 420 件；针对薄壁工件，调整磨削力从 80N 降至 35N 并配合间歇磨削，每批次报废件从 12 件减至 2 件。见表 1。

表 1 磨削参数智能调控效果对比

工件类型	原始参数	调整后参数	效果提升
不锈钢 304 圆盘	18 min	11 min	7 min
阶梯轴	40 s	5 s	35 s
阶梯轴		0.003 mm	
砂轮磨损监测	12 min	5 min	7 min
砂轮磨损监测	280 pcs	420 pcs	140 pcs
薄壁工件	80 N	35 N	45 N
薄壁工件	12 pcs	2 pcs	10 pcs

(三) 环境防控措施的实际应用效果

环境干扰防控措施的实际应用效果通过多组实测数据验证^[5]。车间温度在 18-28℃ 波动时，磨床床身的温度补偿装置

可实时采集床身温度，当导轨温度变化 1℃，装置会自动将导轨间隙从 0.005mm 调整至 0.001mm，使工作台定位误差从 0.007mm 降至 0.002mm。车间粉尘浓度较高时，磨床的负压吸尘系统能产生 150Pa 负压，吸尘口风速达 8m/s，每小时收集粉尘 200g，可将粉尘浓度从 5mg/m³ 降至 0.5mg/m³，砂轮表面粉尘附着量从 0.3g/m² 减至 0.03g/m²，避免砂轮切削力波动，使工件尺寸偏差波动从 0.006mm 缩小至 0.001mm。冷却液温度控制方面，冷却系统温控精度达 ±0.5℃，当磨削中冷却液温度从 20℃ 升至 25℃，温控系统会启动制冷，将温度稳定在 22℃，使冷却液粘度变化量从 0.8mPa·s 减至 0.1mPa·s，保障砂轮与工件润滑稳定，每批次工件表面摩擦划痕从 8 件减少至 1 件。针对车间电压波动，磨床稳压电源可将电压波动范围从 ±10V 稳定在 ±2V，主轴转速波动量从 50r/min 减至 8r/min，磨削工件的表面粗糙度波动值从 Ra0.1 μm 降至 Ra0.02 μm，确保加工精度稳定。

结语

圆台磨床高精度磨削技术经针对性改进，有效突破现存技术瓶颈。核心部件结构优化解决精度衰减问题，主轴、工作台等关键部件性能提升，为加工精度筑牢基础；磨削参数智能调控借动态适配与自动修正，大幅提升生产效率，缩短加工时间同时保障尺寸一致性；环境干扰防控措施精准应对温度、粉尘等影响，稳定磨削环境，减少误差波动。各项技术改进实际应用成效显著，不仅提升工件加工精度与生产效率，还降低报废率与环境干扰影响，为圆台磨床在精密加工领域的应用提供有力支撑，也为后续高精度磨削技术迭代升级积累实践经验，助力精密制造领域进一步发展。

[参考文献]

- [1]尹文亮.高精度计量油针型面精密磨削技术研究[J].机械管理开发, 2025, 40(06): 288-290.
- [2]刘凯华, 许汉威, 关朝亮, 等.高精度芯轴控时磨削去除函数优化研究[J].表面技术, 2025, 54(08): 180-190.
- [3]孙梓洲, 陈付磊, 胡皓, 等.高精度光学元件控时磨削方法研究[J].中国科学: 技术科学, 2023, 53(08): 1302-1312.
- [4]陈卫林, 常星星, 张书豪, 等.40CrNi2Si2MoVA 钢高精度轴类零件的机械加工方法[J].金属加工(冷加工), 2023, (11): 38-40.
- [5]王洪健, 尚杰, 李杨.高精度气浮主轴精密外圆磨削加工[J].航空精密制造技术, 2024, 60(02): 57-58+70.