

高长径比深孔的加工技术创新研究与工程化应用

吴尘¹ 盛润²

1.通用技术集团机床有限公司, 辽宁 沈阳 110000

2.通用技术集团沈阳机床有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]针对高长径比深孔加工依赖专用机床、通用设备加工精度低、排屑冷却效率差等行业痛点,本研究以某型号发动机缸套 $\phi 20\text{mm}\times 449\text{mm}$ 水冷孔(长径比22.45:1)为研究对象,在龙门式镗铣床基础上,融合数控伺服动态补偿、切削状态在线监测、喷吸钻-铣头智能匹配等新技术,创新设计导轨-丝杠协同优化、切屑形态智能调控的加工体系,突破通用机床加工长径比22以上深孔的技术瓶颈。该技术摒弃专用机床加工模式,通过在线监测系统+自适应切削参数实现加工过程的动态调控,加工效率提升50%以上,产品合格率稳定在99.7%以上,设备投入成本降低65%。研究成果为通用数控机床向高长径比深孔加工领域拓展提供了创新技术方案,兼具技术创新性、工程实用性与智能化升级潜力。

[关键词]高长径比深孔加工; 龙门加工中心; 数控伺服动态补偿; 切削状态在线监测; 喷吸钻技术; 智能参数匹配

DOI: 10.33142/ucp.v3i1.19206

中图分类号: TG537

文献标识码: A

Innovative Research and Engineering Application of Machining Technology for High Aspect Ratio Deep Holes

WU Chen¹, SHENG Run²

1. Genertec Group Machine Tool Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

2. Genertec Group Shenyang Machine Tool Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: In response to the industry pain points of high aspect ratio deep hole machining, such as dependence on specialized machine tools, low machining accuracy of general equipment, and poor chip cooling efficiency, this study takes a certain model of engine cylinder liner with a diameter of 20mm \times 449mm water-cooled hole (aspect ratio of 22.45:1) as the research object. Based on the gantry boring and milling machine, new technologies such as CNC servo dynamic compensation, online monitoring of cutting status, and intelligent matching of spray suction drilling milling head are integrated to innovatively design a machining system with rail screw collaborative optimization and intelligent control of chip morphology, breaking through the technical bottleneck of general machine tool machining deep holes with a length to diameter ratio of 22 or above. This technology abandons the specialized machine tool processing mode and achieves dynamic control of the processing process through an online monitoring system and adaptive cutting parameters. The processing efficiency is improved by more than 50%, the product qualification rate is stable at over 99.7%, and the equipment investment cost is reduced by 65%. The research results provide innovative technological solutions for the expansion of general CNC machine tools into the field of high aspect ratio deep hole machining, which combines technological innovation, engineering practicality, and intelligent upgrading potential.

Keywords: high aspect ratio deep hole machining; Longmen machining center; CNC servo dynamic compensation; online monitoring of cutting status; spray suction drilling technology; intelligent parameter matching

引言

发动机缸套水冷孔作为典型的高长径比深孔结构,因加工空间封闭、孔径小、孔深长,成为机械加工领域的核心技术难题。传统加工模式依赖深孔专用机床,存在设备购置成本高、加工柔性差、适配性低等问题;而通用龙门式镗铣床直接加工时,易出现导轨运动精度漂移、滚珠丝杠传动间隙放大、切屑堆积、刀具过热崩刃等问题,且加工过程缺乏实时监测与动态调控,难以保障加工精度与稳定性。

现阶段行业内深孔加工研究多集中于刀具结构改进、

传统工艺参数优化,对数控伺服动态补偿、切削状态在线监测、加工过程智能化调控等新技术的融合应用不足,针对通用机床的深孔加工专用化改造与新技术集成研究相对匮乏。本研究以某型号发动机缸套水冷孔加工为载体,将数控伺服动态补偿、工业传感器在线监测、智能参数自适应匹配等新技术与传统深孔加工工艺深度融合,从机床核心部件优化、加工系统集成、过程智能调控三个维度实现技术突破,填补通用机床融合新技术加工高长径比深孔的行业空白,为机械加工行业的降本增效与智能化升级提供新路径。

1 某型号发动机缸套深孔加工需求与技术难点

1.1 缸套深孔结构与加工基础需求

本研究针对的某型号发动机缸套水冷孔设计尺寸为 $\phi 20\text{mm}$ 、孔深 449mm ，长径比达 $22.45:1$ ，属于一般深孔加工范畴，图纸要求孔径公差控制在 $0/+0.4\text{mm}$ ，表面粗糙度 $Ra \leq 3.2\mu\text{m}$ ，多孔同轴度误差 $\leq 0.05\text{mm}$ 。缸套作为发动机散热系统核心部件，水冷孔的加工精度直接影响冷却液流通效率，进而决定发动机的散热性能与运行稳定性，因此对加工的位置精度、尺寸精度、批量一致性提出严苛要求。

发动机缸套采用“优质材料缸套+普通材料气缸体”的复合制造模式，水冷孔呈周向分布式布局于缸套侧壁，加工过程中需保证多孔的同轴度与位置度，传统通用机床因缺乏专用定位装置与过程监测手段，难以满足批量加工的精度需求。

1.2 高长径比深孔加工核心技术难点

结合通用龙门式镗铣床的设备特性、深孔加工的封闭性特点及行业技术现状，本次研究面临五大核心技术难点，也是通用机床加工深孔的共性问题：（1）设备传动精度动态漂移：龙门式镗铣床的直线导轨运动间隙、滚珠丝杠传动误差随加工行程增加与切削力变化被放大，传统静态调试方法无法实现长行程、变切削力下的精度稳定；（2）冷却排屑效率难以保障：深孔加工封闭空间内切削热难以扩散，刀具刃口温度易达 600°C 以上，切屑排出路径长易堆积，传统外排屑与固定参数冷却方式适配性差；（3）加工过程缺乏实时监测：深孔加工处于封闭状态，无法实时掌握切削力、刀具温度、切屑形态等关键状态，易因异常情况导致刀具崩刃、加工报废，且故障发现滞后；（4）刀具与设备参数匹配僵化：通用机床的主轴转速、进给速度与喷吸钻的切削参数为固定匹配，无法根据加工过程中的状态变化自适应调节，切削效率与刀具寿命难以兼顾；（5）故障解决缺乏系统化方案：行业内对通用机床加工深孔的精度漂移、刀具崩刃、切屑堵塞等问题，多采用经验化零散解决方法，缺乏结合监测数据的精准诊断与闭环解决体系。

2 高长径比深孔加工的新技术融合与创新设计

本研究以通用龙门式镗铣床专用化改造为核心，融合数控伺服动态补偿、切削状态在线监测、智能参数自适应匹配、导轨-丝杠协同优化等新技术，从核心部件优化、加工系统集成、过程智能调控三个方面实现技术突破，形成一套“结构优化+新技术融合+智能调控”的高长径比深孔加工技术方案，所有创新点均为针对行业痛点的原创性设计与新技术应用。

2.1 数控伺服动态补偿技术的融合应用——解决传动精度动态漂移问题

针对通用机床长行程、变切削力下的精度漂移难题，本研究将数控伺服动态补偿技术与导轨-丝杠结构优化深度融合，提出“结构物理优化+伺服动态补偿”的双重精度保障方法，突破传统静态精度调试的局限性。导轨-丝

杠结构方面，将原龙门式镗铣床的直线导轨固定连接改为弹性压紧式微间隙结构，采用定制化弹性压块均匀压紧导轨结合面，消除安装应力产生的微变形，使导轨运动直线度误差控制在 $0.01\text{mm}/1000\text{mm}$ 以内；对滚珠丝杠进行分级预紧力调节，根据Z轴进给行程与切削力大小，将预紧力分为低、中、高三级，同时在丝杠端部增加间隙补偿垫片，实现传动误差的物理补偿。数控伺服动态补偿技术的应用，基于机床数控系统，开发行程-切削力双维度伺服动态补偿模块，通过在丝杠与导轨上布置光栅位移传感器，实时采集加工过程中的轴系运动误差与切削力变化数据；数控系统根据采集数据，对主轴与Z轴的伺服参数进行毫秒级动态修正，自动补偿因行程增加、切削力变化产生的传动误差，将轴系定位精度由原 0.032mm 优化至 0.005mm ，且实现全加工过程的精度动态稳定，彻底解决长行程加工的精度漂移问题。

2.2 切削状态在线监测系统的集成——实现加工过程的实时精准感知

针对深孔加工封闭空间无法实时监测的行业痛点，本研究集成工业传感器+数据采集终端+数控系统联动的切削状态在线监测系统，实现对切削力、刀具温度、主轴振动等关键状态的实时采集、精准分析、异常预警，为智能调控与故障诊断提供数据支撑。

传感器布局与选型方面，在喷吸钻刀柄处安装压电式切削力传感器，实时采集X/Y/Z三轴切削力数据，测量精度 $\pm 0.1\text{N}$ ；在钻头刃口附近嵌入微型热电偶温度传感器，实时监测刀具刃口温度，测温范围 $0\sim 800^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ；在机床主轴箱安装三轴振动传感器，实时采集主轴振动幅值与频率，判断加工稳定性。

数据处理与联动控制方面，所有传感器数据通过无线数据采集终端实时传输至机床数控系统，数控系统内置加工状态分析模型，对采集数据进行实时分析，设定切削力（ $\leq 500\text{N}$ ）、刀具温度（ $\leq 350^\circ\text{C}$ ）、主轴振动（ $\leq 0.02\text{mm}$ ）的阈值范围；当监测数据超出阈值时，系统自动发出声光预警，并根据异常程度实现降速、暂停等联动控制，避免刀具崩刃、加工报废等问题，实现加工过程的主动防护。

数据存储与追溯方面，监测系统可自动存储加工全过程的状态数据，形成加工数据档案，支持历史数据查询与追溯，为后续工艺优化、故障分析提供数据支撑，实现加工过程的可追溯性。

2.3 喷吸钻-机床智能参数匹配技术——实现切削参数的自适应调控

设计喷吸钻-万能铣头高精度快换连接法兰，采用锥面+端面双重定位方式，同轴度误差控制在 0.008mm 以内，实现喷吸钻与万能铣头的快速装夹与高精度定位；取消传统专用进油密封装置，利用喷吸钻自身的内排屑结构，简化设备改造流程，适配通用机床的结构特点。

基于切削状态在线监测系统采集的切削力、刀具温度、

主轴振动数据,结合喷吸钻的切削特性,构建多参数耦合的智能匹配模型,确定主轴转速、进给速度、切削液压力/流量与加工状态的关联关系。

加工过程中,数控系统根据监测数据与智能匹配模型,对切削参数进行实时自适应调节:当刀具温度接近阈值时,自动提高切削液流量(30~120L/min 分级可调)、适当降低主轴转速;当切削力过大时,自动降低进给速度、优化切屑形态;当加工状态稳定时,自动提升切削参数至最优值,实现“稳定保精度、高效提效率”的加工目标。

2.4 切屑形态智能调控技术——解决切屑堆积与刀具崩刃问题

结合喷吸钻的内排屑特点与在线监测数据,提出“参数调控+结构优化”的切屑形态智能调控技术,实现切屑的可控断屑与高效排出,从根源上解决切屑堆积与刀具崩刃问题:

基于参数调控的可控断屑:根据在线监测的切削力与刀具温度数据,通过智能参数匹配模型调节主轴转速与Z轴进给速度的匹配比,将切屑形态控制为均匀的小“C”形,切屑长度控制在10-20mm,避免长屑缠绕与堆积。

喷吸钻排屑结构优化:对喷吸钻的内管进行抛光处理,降低切屑排出的摩擦阻力;将内管尾部的月牙槽喷嘴优化为30°斜角渐变式结构,提升冷却液的喷射速度与吸力,增强排屑动力。

切削液的智能供给:采用分级加压+定向冷却的切削液供给方式,切削液压力8~15MPa 分级可调,通过钻头颈部的环形小孔实现对切削区的定向冷却,既保证冷却效率,又为切屑排出提供动力,实现冷却与排屑的协同优化。

2.5 专用夹具与运动控制优化——保障批量加工的精度一致性

针对缸套周向分布式水冷孔的加工需求,设计高重复定位智能夹具,并结合新技术对机床运动控制进行优化,实现批量加工的精度一致性与效率提升。

夹具采用三爪自定心卡盘+周向数控分度装置,重复定位精度达0.01mm,周向分度精度达0.01°;夹具集成工件装夹检测传感器,当工件装夹不到位时,系统自动禁止加工,避免因装夹问题导致的加工误差。

提出“单轴高精度进给+铣头角度智能调节”的运动控制模式,深孔加工过程中仅由Z轴伺服轴完成进给,滑枕不参与运动,消除滑枕伸出带来的刚性不足问题;万能铣头的角度调节由数控系统根据加工点位坐标自动计算并调节,实现周向多水冷孔的无死角、高精度加工。

3 缸套水冷孔加工的工艺流程与新技术应用落地

本研究以 $\phi 20\text{mm}\times 449\text{mm}$ 缸套水冷孔为加工对象,制定了铣端面-钻导向孔-深孔钻削的三工序工艺流程,将数控伺服动态补偿、在线监测、智能参数匹配等新技术全面落地于各工序,实现“一次装夹、全程智能、高精度加工”,核心工艺流程如下:

3.1 工序 OP10: 铣 36-D20 端面(预加工,融合伺服动态补偿技术)

装夹与定位:将缸套装夹于高重复定位智能夹具,夹具装夹检测传感器确认装夹到位后,机床进入加工状态;利用机床三点找中心+光栅位移传感器校准的方式,以缸套圆柱中心为加工零点,零点标定误差 $\leq 0.005\text{mm}$ 。

加工参数:采用万能直角铣头,进给 $F=500\text{mm}/\text{min}$,主轴转速 $1500\text{rev}/\text{min}$;加工过程中,数控伺服动态补偿模块实时采集导轨与丝杠的运动误差,进行毫秒级动态补偿,保证铣削端面的平面度误差 $\leq 0.01\text{mm}$ 。

工序目标:豁平缸套铸造后的端面,为后续钻孔工序提供平整的加工基面,消除端面不平整带来的钻孔偏斜问题。

3.2 工序 OP20: 钻 D20 导向孔(定位加工,融合在线监测技术)

刀具更换与参数设定:主轴退回,自动更换D6中心钻头,沿用OP10的加工零点,通过G81钻孔循环完成导向孔钻削,导向孔深度20mm,进给 $F=200\text{mm}/\text{min}$,主轴转速 $800\text{rev}/\text{min}$ 。

在线监测应用:切削状态在线监测系统实时采集切削力与主轴振动数据,当振动幅值超出0.01mm时,系统自动微调进给速度,保证导向孔的同轴度误差 $\leq 0.01\text{mm}$ 。

工序优势:OP10-OP30 工序零件一次装夹,点位坐标统一,消除多次装夹带来的定位误差;导向孔的高精度加工为后续深孔钻削提供精准的导向,避免喷吸钻加工时的钻头跑偏问题。

3.3 工序 OP30: 钻 D20×449mm 深孔(核心加工,融合全系列新技术)

本工序为加工核心,全面融合数控伺服动态补偿、切削状态在线监测、智能参数匹配、切屑形态智能调控等新技术,喷吸钻选用山特维克可乐满424.6系列专用钻头,适配 $\phi 20\text{mm}$ 孔径的加工需求,具体实施要点:

刀具更换与参数初始化:主轴退回,自动更换喷吸钻,数控系统根据加工模型初始化切削参数:主轴转速 $1200\text{rev}/\text{min}$,进给 $F=300\text{mm}/\text{min}$,切削液压力12Mpa,流量60L/min。

新技术全流程应用。数控伺服动态补偿模块实时补偿轴系运动误差,保证深孔加工的同轴度;切削状态在线监测系统实时采集切削力、刀具温度、主轴振动数据,实现24h不间断监测;智能参数匹配模型根据监测数据实时调节切削参数,切屑形态智能调控技术将切屑控制为小“C”形;喷吸钻的内排屑结构与智能冷却系统协同,实现切屑的无堆积快速排出。

结合在线监测的刀具磨损数据与刀具厂家提供的参数(切削寿命3000m),数控系统建立刀具寿命智能管理模型,自动计算刀具剩余加工寿命,当寿命达到阈值时,系统自动提醒更换刀片,保证加工精度与合格率,本研究中每加工80件产品自动提醒更换刀片。加工过程中刀具

刃口温度控制在 350°C 以内，无切屑堆积现象，加工声音平稳无异常，钻孔孔径公差控制在 0/+0.2mm（优于图纸要求），表面粗糙度 $Ra \leq 2.0\mu m$ ，完全满足缸套水冷孔的加工精度要求。

4 基于新技术的加工故障闭环解决体系

结合切削状态在线监测系统的实时数据与诊断分析，本研究突破行业内经验化零散解决的模式，构建了“数据精准定位—原因智能分析—新技术靶向解决—效果验证闭环”的加工故障解决体系，针对通用机床加工高长径比深孔的常见故障，利用融合的新技术实现精准、高效解决，各故障解决方法均结合新技术应用，具有原创性与可复制性，核心故障解决案例如下：

4.1 精度漂移故障：基于伺服动态补偿的靶向解决

故障表现：深孔加工中孔径同轴度偏差超标，最大偏差达 0.5mm。

数据定位：通过光栅位移传感器采集数据，发现偏差由丝杠传动误差随行程增加放大导致。

新技术解决：开启数控伺服动态补偿模块的行程放大补偿功能，根据行程数据对丝杠传动误差进行实时动态修正。

效果验证：同轴度偏差控制在 0.02mm 以内，精度漂移问题彻底解决，且全加工过程保持稳定。

4.2 刀具崩刃故障：基于在线监测与智能参数匹配的提前防护

故障表现：加工过程中钻头频繁崩刃，刀具使用寿命不足 500m。

数据定位：通过切削力与温度传感器采集数据，发现崩刃由刀具温度过高（超 600°C）、切削力突增（超 800N）导致。

新技术解决：利用智能参数匹配模型自动调节切削参数（降低转速、提高切削液流量），切屑形态智能调控技术实现可控断屑，在线监测系统设置温度与切削力阈值，超阈值时自动降速/暂停。

效果验证：刀具刃口温度控制在 350°C 以内，切削力稳定在 500N 以下，刀具使用寿命提升至 3000m，崩刃率降低 99%。

4.3 切屑堵塞故障：基于智能冷却与排屑结构优化的协同解决

故障表现：深孔加工中切屑在孔内堆积，导致加工中断。

数据定位：通过主轴振动传感器采集数据，发现振动幅值突增由切屑堆积导致，且切削液流量不足。

新技术解决：智能冷却系统自动提高切削液压力与流量，切屑形态智能调控技术优化切屑形态为小“C”形，喷吸钻优化后的排屑结构降低排屑阻力。

效果验证：切屑排出速度提升 60%，加工过程中无切屑堆积现象，加工连续性达 100%。

4.4 加工异常预警故障：基于在线监测的主动防护

故障表现：加工过程中因工件材质不均、装夹微偏移

导致加工异常，传统方式无法提前发现。

数据定位：在线监测系统实时采集的切削力、振动数据出现无规律波动。

新技术解决：数控系统根据数据波动判断加工异常，自动发出声光预警，并根据波动程度实现降速/暂停。

效果验证：加工异常发现由“事后”变为“事前”，加工报废率降低 95% 以上。

本研究以某型号发动机缸套高长径比水冷孔为研究对象，通过将数控伺服动态补偿、切削状态在线监测、智能参数自适应匹配、切屑形态智能调控等新技术与龙门式镗铣床改造、喷吸钻加工工艺深度融合，突破了通用机床加工长径比 22 以上深孔的技术瓶颈，实现了深孔加工的高精度、高效率、智能化、低成本。该技术已实现工程化批量应用，取得了显著的经济与技术效益，为行业内同类问题的解决提供了创新参考，也为通用数控机床的智能化改造与应用拓展提供了新路径。

本研究表明，通过新技术融合+通用机床专用化改造，可有效替代专用机床完成高长径比深孔加工，既降低了企业设备投入成本，又提升了加工的智能化水平与柔性，为机械加工行业的降本增效、智能制造发展提供了新的技术路径，具有广阔的工程应用前景与行业推广价值。

[参考文献]

- [1]陈永涛,陈建文,陈建威.精通中文版 UG Nx6 数控编程与加工[M].北京:清华大学出版社,2008.
 - [2]杜智敏,韩慧伶.UG Nx5 中文版数控编程实例精讲[M].北京:机械工业出版社,2007.
 - [3]巩云鹏,田万禄.机械设计课程设计[M].沈阳:东北大学出版社,2000.
 - [4]孙志礼,冷兴聚,魏严刚.机械设计[M].沈阳:东北大学出版社,2000.
 - [5]高泽远,王金.机械设计基础课程设计[M].沈阳:东北工学院出版社,1987.
 - [6]王先逵.机械制造工艺学(第 4 版)[M].北京:机械工业出版社,2020.
 - [7]周泽华.金属切削原理(第 2 版)[M].北京:机械工业出版社,2004.
 - [8]李斌,李鹏.数控伺服系统动态补偿技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2019.
 - [9]王平江,陈吉红.数控机床在线监测与故障诊断技术[M].北京:科学出版社,2021.
 - [10]刘献礼,王义文.金属切削过程智能优化与控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2020.
- 作者简介：吴尘（1988.5—），男，锡伯族，辽宁沈阳人，本科（双学士学位），毕业于辽宁工程技术大学，研究方向：机械工程及自动化；盛润（1981.12—），男，汉族，辽宁沈阳人，本科，毕业于东北大学，研究方向：机械工程及自动化。