

# 金属加工机械焊接质量控制与管路弯曲精度

恩金山 高铮 薛飞 霍天驰 张海涛  
首都航天机械公司 北京 100075

**摘要:** 焊接质量与管路弯曲精度是决定金属加工机械性能与可靠性的核心要素。焊接工艺参数智能调控、自动化焊接及无损检测等技术,有效提升焊接质量稳定性;材料特性、工艺参数、设备模具等因素深刻影响管路弯曲精度。通过工艺集成优化、数字化仿真、在线监测及人员培训等协同策略,实现焊接质量与管路弯曲精度的同步提升,为金属加工机械制造的高质量发展提供技术支撑,助力行业提升生产效率与产品竞争力。

**关键词:** 金属加工;机械焊接;质量控制;管路弯曲精度

## 引言

在现代制造业向高端化、精密化转型的背景下,金属加工机械的焊接质量与管路弯曲精度直接关乎设备运行稳定性与使用寿命。焊接作为金属构件连接的关键工艺,其质量缺陷可能引发结构失效;管路弯曲精度不足则影响流体传输效率与系统性能。本文针对金属加工机械制造过程,深入剖析焊接质量控制关键技术与管路弯曲精度影响因素,提出协同优化策略,旨在为提升金属加工机械整体制造水平、推动行业技术创新提供理论与实践参考。

### 1 金属加工机械中焊接与管路弯曲的重要性

金属加工机械领域中,焊接与管路弯曲作为关键制造工艺,对设备性能、结构完整性及应用可靠性产生深远影响。焊接通过原子间的冶金结合,将分离的金属部件连接成具有特定结构和功能的整体,其本质是利用热能或压力促使金属原子突破表面能垒,实现晶格重组与扩散结合。在航空航天发动机制造中,高温合金部件的焊接需要精确控制热输入量与冷却速率,以避免焊缝区域出现晶界粗化、热裂纹等缺陷,确保部件在高温、高压、高转速工况下保持优异的力学性能与抗疲劳特性。对于海洋工程装备的厚板焊接,多采用多层多道焊工艺,配合超声波探伤、射线检测等无损检测技术,保证焊缝内部质量,抵御复杂海洋环境的腐蚀与交变载荷作用。管路弯曲则是通过塑性变形赋予管材特定空间几何形状,满足流体传输系统的复杂布局需求。在汽车发动机燃油喷射系统中,高压油管的弯曲精度直接影响燃油流动阻力与喷射压力稳定性,采用数控弯管技术可将弯曲角度误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,弯曲半径偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ,确保管路及发动机各部件精准装配。在石油化工装置中,大口径管道的冷弯加工需综合考虑管材的屈服强度、延伸率及回弹特性,通过有限元模拟优化弯曲模具设计与工艺参数,避免管壁减薄超差、起皱等缺陷,保证管道在高温

高压介质输送过程中的密封性与结构安全性。激光加热辅助弯曲技术的应用,可显著降低难变形材料的弯曲阻力,拓宽了钛合金、镍基合金等特种管材的加工范围,提升了复杂管路系统的制造效率与质量稳定性。焊接与管路弯曲工艺的协同优化,更是推动金属加工机械向高精度、高性能、高可靠性方向发展的核心驱动力。

## 2 金属加工机械焊接质量控制关键技术

### 2.1 焊接工艺参数智能调控技术

在金属加工机械焊接过程中,焊接工艺参数直接决定焊接接头的质量与性能,焊接工艺参数智能调控技术通过构建多参数耦合数学模型,融合人工智能算法实现对焊接电流、电压、焊接速度等核心参数的动态优化。该技术基于传感器实时采集焊接区域的温度场、熔池形态、电弧形态等数据,利用机器学习算法对海量焊接数据进行深度挖掘与分析,建立焊接工艺参数与焊接质量之间的非线性映射关系。当焊接过程中出现工件材质不均匀、装配间隙波动等干扰因素时,智能调控系统能够迅速响应,依据预先训练好的模型自动调整焊接参数,使焊接过程始终处于最佳状态。例如,在厚板多层多道焊中,系统可根据已完成焊道的熔深、熔宽数据,精确计算后续焊道的工艺参数,避免出现未熔合、咬边等缺陷,大幅提升焊接接头的力学性能与可靠性。该技术还可通过仿真模拟不同工艺参数组合下的焊接结果,辅助工艺人员快速制定最优焊接工艺方案,缩短工艺开发周期,降低生产成本。

### 2.2 自动化焊接技术

自动化焊接技术借助机械臂、焊接专机等自动化设备,实现焊接过程的精确控制与高效执行,显著提升焊接质量的稳定性与生产效率。以弧焊机器人为例,其通过高精度伺服电机驱动机械臂,配合视觉传感器对焊缝进行实时跟踪定位,能够在复杂曲面工件上完成高质量焊接。在焊接过程中,机器人按照预设程序精确控制焊

枪的姿态、位置与焊接速度，有效避免人工操作带来的手抖、疲劳等问题，确保每条焊缝的焊接质量一致性。自动化焊接设备还可集成送丝系统、气体保护系统等，实现焊接参数的协同控制。例如，在铝合金焊接中，通过精确控制氩气的流量与送丝速度，能够有效抑制铝合金焊接过程中的气孔、氧化等缺陷。自动化焊接技术支持多工位、多任务连续作业，可与生产线其他设备实现无缝对接，构建高度自动化的焊接生产单元，大幅提高金属加工机械的生产效率与产能，尤其适用于大批量、重复性焊接作业场景<sup>[1]</sup>。

### 2.3 焊接质量无损检测技术

焊接质量无损检测技术在不破坏焊接接头的前提下，实现对内部缺陷的精准探测与评估，是保障金属加工机械焊接质量的关键环节。其中，超声检测技术利用超声波在不同介质中的传播特性，通过探头向焊接接头发射超声波，当遇到气孔、裂纹、夹渣等缺陷时，超声波发生反射、折射与散射，接收探头将携带缺陷信息

的回波信号转换为电信号，经信号处理与分析后，以波形图或图像的形式呈现缺陷的位置、大小与形状。相控阵超声检测技术更是进一步提升了检测的灵活性与准确性，通过控制多个超声换能器的发射时间与相位，实现声束的多角度、多方位扫描，能够检测复杂结构与形状的焊接接头。射线检测技术利用X射线或γ射线穿透焊接接头，根据缺陷对射线吸收程度的差异，在底片或数字探测器上形成对比度不同的影像，直观显示缺陷信息。涡流检测则基于电磁感应原理，对导电材料表面与近表面缺陷具有较高的检测灵敏度。这些无损检测技术相互补充，能够覆盖不同类型、不同材质焊接接头的质量检测需求，为金属加工机械的安全可靠运行提供有力保障。

## 3 金属加工机械管路弯曲精度影响因素分析

### 3.1 材料特性因素

金属材料自身的特性是影响管路弯曲精度的内在根源，其力学性能与微观结构从本质上决定了弯曲过程中的变形行为（表1）。

表1 材料特性影响分析表

影响维度	具体表现	对弯曲精度的影响
屈服强度与抗拉强度	高强度材料弯曲需更大成形力。	易引发回弹，导致实际弯曲角度偏离设计值。
延伸率	低延伸率易裂，高延伸率管壁减薄量可能超公差。	低延伸率出现裂纹影响质量，高延伸率超出公差影响精度。
各向异性	晶体取向使材料不同方向力学性能有差异。	材料流动不均，造成截面畸变与壁厚分布不均。
晶粒尺寸	细晶粒成形稳定，粗晶粒晶界滑移不协调。	细晶粒降低缺陷概率，粗晶粒引发局部变形失稳，影响几何精度与表面质量。

### 3.2 工艺参数因素

弯曲工艺参数的科学设定是实现高精度管路弯曲的

关键环节，各参数间的协同作用直接关系到成形效果（表2）。

表2 工艺参数影响分析表

影响维度	具体表现	对弯曲精度的影响
弯曲半径与管径比值	比值小，管材外侧受拉应力加剧，内侧受压应力。	外侧易破裂，内侧易起皱，影响弯曲精度。
弯曲速度	高速惯性效应显著，低速生产效率低。	高速导致弯曲角度控制精度下降，低速影响生产效益。
芯棒位置与形状	插入过深划伤内壁，插入不足难抑制椭圆畸变，合理头部形状改善应力分布。	插入不当影响内部支撑，合理形状减少截面变形。
压模与夹模压力	压力过大损伤管材，过小导致打滑。	压力不当使夹持不稳定，弯曲精度失控。

### 3.3 设备与模具因素

金属加工设备与模具是保障管路弯曲精度的硬件基

础，其性能和精度直接决定着弯曲质量的高低（表3）。

表3 加工设备与模具影响分析

影响维度	具体表现	对弯曲精度的影响
设备传动系统精度	伺服电机控制精度、滚珠丝杠传动误差、导轨直线度误差。	误差累积导致管材运动轨迹偏离，影响弯曲角度与曲率半径准确性。
设备刚度特性	设备结构弹性变形改变外力传递路径。	实际成形力与理论值偏差，影响弯曲精度。
模具设计制造精度	型面精度决定成形轮廓，表面粗糙度影响表面质量，装配精度影响部件配合。	型面误差影响几何形状，粗糙表面划伤管材、影响材料流动，装配不当导致弯曲变形不稳定。

## 4 金属加工机械焊接质量控制与管路弯曲精度协同优化策略

### 4.1 工艺集成优化设计

(1) 在金属加工机械制造中, 焊接工艺与管路弯曲工艺的集成优化需深度融合材料特性与加工参数。针对不同金属材料如合金钢、不锈钢等, 分析其热导率、熔点及塑性变形能力, 将焊接热输入参数与管路弯曲温度区间进行匹配, 避免因热影响区软化导致管路弯曲精度下降, 通过工艺参数的交叉验证建立协同加工窗口。

(2) 工装夹具的一体化设计是实现工艺集成的关键载体。开发多功能复合工装, 在焊接工位完成定位与夹紧后, 通过模块化转换直接进行管路弯曲操作, 减少工件多次装夹产生的累积误差, 利用有限元分析优化工装结构刚度, 确保焊接应力释放与管路弯曲过程互不干扰。

(3) 工序顺序的合理编排对质量控制具有决定性作用。通过工艺试验确定先焊后弯或先弯后焊的优先级, 对于复杂结构件, 采用分段焊接-局部弯曲-整体校形的组合工艺, 运用残余应力测试技术评估每道工序对焊接质量与管路精度的影响, 动态调整工艺流程以实现双指标最优<sup>[2]</sup>。

### 4.2 数字化仿真与预测

(1) 基于有限元方法构建焊接与管路弯曲耦合仿真模型, 将焊接过程中的热-力-冶金多物理场与管路弯曲的弹塑性变形场进行联合求解。引入材料的非线性本构关系与相变模型, 精确模拟焊接热循环对管路材料力学性能的影响, 预测焊接残余应力分布对后续弯曲变形的耦合作用。(2) 开发数字化工艺数据库, 集成焊接电流、电压、速度, 以及管路弯曲角度、曲率半径、进给速率等工艺参数, 结合实际加工数据进行机器学习训练, 建立工艺参数与质量指标的映射关系模型。通过数字孪生技术在虚拟环境中预演加工过程, 快速筛选最优工艺组合, 降低物理试验成本与时间消耗。(3) 利用人工智能算法构建质量预测模型, 基于实时采集的加工参数数据, 如焊接熔深、管路弯曲回弹量等特征信号, 采用神经网络或支持向量机算法进行质量指标的在线预测。提前识别潜在质量缺陷, 为工艺参数动态调整提供数据支撑, 实现焊接与管路弯曲精度闭环优化控制<sup>[3]</sup>。

### 4.3 在线监测与反馈控制

(1) 部署多传感器监测系统实现加工过程的全方位感知, 采用红外热像仪实时监测焊接区域温度场分布, 通过激光位移传感器动态测量管路弯曲轮廓, 利用声发射传感器捕捉焊接裂纹及管路变形异常信号。多源数据融合处理后, 建立基于特征提取的质量状态评估模型。

(2) 设计自适应反馈控制系统, 将监测到的关键质量参数与预设目标值进行对比分析。当焊接熔宽或管路弯曲角度偏离阈值时, 系统自动触发控制逻辑, 通过PID调节算法动态修正焊接电流、送丝速度或弯曲模具压力等执行机构参数, 实现加工过程的实时纠偏。(3) 搭建工业互联网平台实现设备间的数据交互与协同控制, 将焊接机器人、弯管机等设备的运行状态数据上传至云端, 利用边缘计算技术快速处理分析。基于质量反馈结果, 优化多设备联动策略, 例如根据焊接变量实时调整管路弯曲补偿参数, 确保焊接质量与管路精度的协同稳定。

### 4.4 人员培训与质量体系建设

(1) 聚焦实操技能提升开展针对性培训, 精心构建多元化培训方案。通过虚拟仿真培训系统, 让操作人员直观且深入地掌握焊接工艺参数对管路弯曲性能的影响规律。利用虚拟现实技术逼真模拟复杂工况下的加工操作, 强化操作人员对焊接熔池形态、管路弯曲回弹控制等关键环节的感知与处理能力。(2) 建立基于案例库的知识共享机制, 收集整理焊接缺陷与管路弯曲精度超差的典型案例, 分析其产生原因与解决措施。通过定期技术研讨会与经验交流会, 促进操作人员之间的知识传递, 提升团队对复杂加工问题的综合解决能力。(3) 构建质量追溯与持续改进体系, 在加工设备上安装数据采集终端, 记录每个工件的加工参数与质量检测数据。利用大数据分析技术挖掘质量波动规律, 针对频繁出现的质量问题制定改进方案, 通过优化工艺参数、调整工装设计等措施实现焊接质量与管路弯曲精度的持续提升。

### 结语

综上所述, 金属加工机械焊接质量控制与管路弯曲精度的提升是复杂系统工程。焊接质量控制关键技术与管路弯曲精度影响因素的研究, 为优化制造工艺提供了理论依据。通过工艺集成、数字化仿真、在线监测及质量体系建设等协同策略, 实现两者同步优化。未来, 随着智能制造技术发展, 需进一步探索新技术、新方法, 持续提升金属加工机械制造精度与质量, 推动行业向智能化、绿色化方向迈进。

### 参考文献

- [1]康洪源.金属机械加工制造工艺研究[J].百科论坛电子杂志,2023(16):295-297.
- [2]郭雪亭.机械焊接的质量控制措施分析[J].建筑工程技术与设计,2020(18):2300.
- [3]张璐.自动焊接技术在金属机械加工中的运用分析[J].造纸装备及材料,2022,51(12):34-36.