

数控导管弯曲技术的精度控制与工艺优化

张海涛

首都航天机械有限公司 北京 100075

摘要：本文聚焦于数控导管弯曲技术，深入剖析其精度控制与工艺优化。详细分析了影响精度的关键因素，涵盖设备性能、材料特性、模具设计及工艺参数等，并结合具体技术细节与数据阐述精度控制策略，如设备精度保障、材料预处理、模具优化设计和实时监测反馈调整。在工艺优化方面，从弯曲工艺路线规划、多工序协同优化以及智能化技术应用等角度展开研究。旨在为提高数控导管弯曲质量、降低生产成本提供全面且具有可操作性的理论支持与实践指导。

关键词：数控导管弯曲；精度控制；工艺优化；模具设计；智能化技术

1 引言

导管在航空航天、汽车制造、船舶工程等众多领域扮演着关键角色，其弯曲质量直接关乎整个系统的性能与可靠性。以汽车发动机燃油系统为例，燃油导管的弯曲精度若不达标，可能导致燃油泄漏，引发安全隐患；在航空航天领域，液压导管的弯曲质量更是影响飞行器液压系统正常运行的重要因素。数控导管弯曲技术作为一种先进的制造工艺，凭借其高精度、高效性和能够加工复杂形状导管的优势，成为满足现代工业对导管制造需求的重要手段。然而，在实际生产中，该技术仍面临精度难以精确控制、工艺稳定性不足等问题，导致产品质量波动较大、生产效率低下。因此，深入研究数控导管弯曲技术的精度控制与工艺优化具有重要的现实意义。

2 数控导管弯曲技术概述

2.1 数控导管弯曲原理

数控导管弯曲技术主要借助数控系统精确操控弯曲模具的运动轨迹和作用力，使导管在特定模具作用下发生塑性变形，达成弯曲成型。其核心设备为数控弯管机，一般由床身、弯曲主轴、夹紧装置、送料机构、辅助推弯装置以及数控系统等部分构成。在弯曲过程中，导管被夹紧装置稳固固定，送料机构依据设定长度将导管精准送至弯曲位置。以某型号数控弯管机为例，其送料机构的定位精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，能够确保导管送料位置的准确性。弯曲主轴在数控系统指令下旋转，带动弯曲模具对导管施加弯曲力矩。同时，辅助推弯装置可根据实际需求提供额外推力，例如在弯曲壁厚为3mm的不锈钢导管时，辅助推力可达到5000N-10000N，以保证导管顺利弯曲。

2.2 数控导管弯曲的特点

与传统手工弯曲或半自动弯曲工艺相比，数控导管

弯曲技术优势显著。它具备高度的自动化和智能化水平，通过数控系统可实现弯曲参数的精确设定与实时调整。例如，在弯曲角度控制方面，数控系统可将角度误差控制在 $\pm 0.2^\circ$ 以内，大大提高了生产效率和加工精度。该技术能够加工各种复杂形状的导管，包括多弯、异形截面导管等^[1]。以汽车排气系统中的异形截面导管为例，数控导管弯曲技术可精确实现其复杂的弯曲形状，满足汽车发动机对排气管道的特殊要求。此外，它还具有良好的工艺重复性和稳定性，能有效保证产品质量的一致性，减少废品率。

3 影响数控导管弯曲精度的关键因素

3.1 设备性能因素

数控弯管机的设备性能是影响导管弯曲精度的基础因素。其中，弯曲主轴的回转精度、传动系统的传动精度以及各运动部件的定位精度等都会直接影响到导管弯曲的角度精度和形状精度。例如，弯曲主轴的回转误差会导致导管弯曲角度出现偏差，传动系统的间隙会使弯曲过程中的运动不平稳，从而产生弯曲形状的波动。此外，设备的刚度和稳定性也对弯曲精度有重要影响，若设备刚度不足，在弯曲过程中容易产生振动和变形，进而影响导管的弯曲质量。

3.2 材料特性因素

导管材料的物理性能和力学性能对弯曲精度有着显著影响。材料的弹性模量、屈服强度、伸长率等参数决定了导管在弯曲过程中的变形行为。例如，弹性模量较大的材料在弯曲后回弹量较小，而屈服强度较低的材料则更容易发生塑性变形，但也可能导致弯曲截面变形增大。此外，材料的均匀性和各向异性也会影响弯曲精度，如果材料内部存在缺陷或不均匀组织，在弯曲过程中容易产生裂纹、起皱等缺陷，导致导管弯曲质量下降。

3.3 模具设计因素

模具是数控导管弯曲成型的关键工具，其设计质量直接影响着导管的弯曲精度。模具的几何形状、尺寸精度以及表面质量等都会对导管弯曲后的形状和尺寸产生重要影响。例如，弯曲模具的圆角半径过小，会导致导管在弯曲过程中产生过大的应力集中，容易引发裂纹；而模具的尺寸精度不高，则会使导管弯曲后的尺寸出现偏差。此外，模具的安装和调整也会影响弯曲精度，若模具安装不牢固或调整不当，会导致弯曲过程中模具与导管之间的相对位置发生变化，从而影响弯曲质量。

3.4 工艺参数因素

数控导管弯曲过程中的工艺参数，如弯曲速度、弯曲力、辅助推力等，对弯曲精度有着重要影响。弯曲速度过快会使导管在弯曲过程中来不及充分变形，导致弯曲截面形状不理想，同时还会增加导管内部的应力，容易引发裂纹等缺陷。弯曲力的大小直接影响导管的变形程度，若弯曲力过小，导管无法达到所需的弯曲角度；而弯曲力过大，则可能导致导管过度变形甚至破裂。辅助推力在弯曲厚壁导管或复杂形状导管时起着重要作用，其大小和作用点的选择不当也会影响导管的弯曲精度。

4 数控导管弯曲技术的精度控制策略

4.1 设备精度保障

为确保数控弯管机的设备精度，应定期对设备进行维护保养和精度检测。建立完善的设备维护管理制度，制定详细的维护计划，定期对设备的各运动部件进行清洁、润滑和紧固处理，及时更换磨损的零部件^[2]。例如，每运行500小时对弯曲主轴的轴承进行润滑保养，每运行1000小时检查并更换传动系统的齿轮油，保证设备的正常运行。同时，采用高精度的检测仪器对设备的各项精度指标进行定期检测。使用激光干涉仪检测弯曲主轴的回转精度，其检测精度可达 $\pm 0.001^\circ$ ；采用三坐标测量仪检测模具的尺寸精度，测量精度能达到 $\pm 0.005\text{mm}$ 。对于检测出的精度偏差及时进行调整和修复，确保设备始终处于良好的精度状态。

4.2 材料预处理

针对导管材料的特性对弯曲精度的影响，在弯曲前对材料进行适当的预处理。对于弹性模量较大、回弹量较大的材料，可采用预热处理的方法。以不锈钢材料为例，预热温度在300-400℃之间，预热时间根据导管壁厚和长度确定。对于壁厚为2mm、长度为1m的不锈钢导管，预热时间可控制在10-15分钟。预热后，不锈钢材料的塑性增加，回弹量可降低30%-50%，从而提高弯曲精度。对于材料表面存在油污、氧化层等杂质的情况，应

在弯曲前进行清洗和除锈处理。采用化学清洗方法，将导管浸泡在含有清洗剂的溶液中，清洗时间根据油污程度确定，一般为15-30分钟，然后用清水冲洗干净并烘干，以保证材料表面的清洁度，避免杂质影响弯曲质量。

4.3 模具优化设计

模具优化设计是提高数控导管弯曲精度的关键环节。在模具设计过程中，应充分考虑导管材料的特性、弯曲形状和尺寸要求等因素，合理确定模具的几何形状和尺寸参数。例如，根据导管材料的屈服强度和伸长率，选择合适的弯曲模具圆角半径。对于屈服强度为300MPa、伸长率为25%的钢管，弯曲模具圆角半径可取导管直径的1.5-2倍。采用先进的模具制造工艺，提高模具的尺寸精度和表面质量。利用数控加工中心进行模具加工，加工精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ；对模具表面进行抛光处理，使模具表面粗糙度达到 $\text{Ra}0.8\mu\text{m}$ 以下，确保模具与导管之间的良好配合。建立模具的数字化模型，利用计算机模拟技术对模具的设计方案进行优化分析。通过有限元分析软件，模拟导管在弯曲过程中的应力应变分布情况，提前预测模具在弯曲过程中可能出现的问题，并进行相应的改进。例如，通过模拟发现模具某部位应力集中过大，可对该部位进行结构优化，增加圆角过渡，降低应力集中，从而提高模具的设计质量和弯曲精度。

4.4 实时监测与反馈调整

在数控导管弯曲过程中，采用实时监测技术对弯曲过程进行全程监控，及时发现弯曲过程中出现的偏差，并通过反馈调整系统对工艺参数进行实时调整，以保证弯曲精度。常用的监测技术包括角度传感器、位移传感器、力传感器等。角度传感器可实时采集弯曲角度数据，其测量精度可达 $\pm 0.1^\circ$ 。位移传感器用于监测导管的送料位置和弯曲半径，测量精度能达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 。力传感器则实时采集弯曲力和辅助推力数据，测量精度为 $\pm 10\text{N}$ 。这些传感器将采集到的数据传输给数控系统^[3]。数控系统根据预设的精度要求对采集到的数据进行分析处理，当发现参数偏差超过允许范围时，及时发出调整指令，对弯曲速度、弯曲力等工艺参数进行自动调整。例如，当监测到弯曲角度偏差超过 $\pm 0.2^\circ$ 时，数控系统会自动降低弯曲速度10%-20%，同时调整弯曲力5%-10%，从而实现弯曲过程的闭环控制，确保导管弯曲精度始终保持在允许范围内。

5 数控导管弯曲技术的工艺优化

5.1 弯曲工艺路线规划

合理的弯曲工艺路线规划是提高数控导管弯曲效率和质量的关键。在规划弯曲工艺路线时，应综合考虑导

管的形状、尺寸、弯曲顺序以及设备的特点等因素。对于多弯导管，应尽量减少弯曲次数和弯曲方向的变化，避免导管在弯曲过程中产生干涉和变形。以一个具有三个弯曲部位的导管为例，若采用先弯曲两端再弯曲中间的工艺路线，可能会导致中间弯曲部位与两端弯曲部位产生干涉，增加弯曲难度和废品率。而采用先弯曲大半径部位，再弯曲小半径部位的工艺路线，可使导管在弯曲过程中受力均匀，减少残余应力的产生。

5.2 多工序协同优化

数控导管弯曲加工通常涉及多个工序，如切割、倒角、弯曲、校直等。各工序之间的协同优化对于提高整体生产效率和产品质量至关重要。通过建立多工序协同优化模型，对各工序的工艺参数进行统一规划和优化，实现工序之间的无缝衔接。在切割工序中，根据弯曲工序的要求精确控制导管的切割长度。例如，对于需要精确装配的导管，切割长度偏差应控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内。若切割长度误差过大，会导致弯曲后导管尺寸不符合要求，增加后续校直和修正的工作量。在校直工序中，根据弯曲过程中产生的残余应力情况，采用合适的校直方法和工艺参数。对于弯曲后残余应力较大的导管，可采用热校直方法，将导管加热到适当温度（一般为 $200\text{--}300^\circ\text{C}$ ）后进行校直，能够有效消除导管的弯曲变形，提高导管的直线度和形状精度。

5.3 智能化技术应用

随着人工智能、大数据、物联网等智能化技术的不断发展，将其应用于数控导管弯曲技术中，可实现弯曲工艺的智能化优化和控制。利用人工智能算法对大量的弯曲工艺数据进行分析和学习，建立弯曲工艺参数与弯曲质量之间的映射关系模型。通过收集不同材料、不同形状导管的弯曲工艺数据，包括弯曲速度、弯曲力、辅助推力、弯曲角度等参数，以及对应的弯曲质量数据，如弯曲截面圆度、表面粗糙度、废品率等^[4]。利用神经网络算法对这些数据进行训练，建立工艺参数-质量模型。

根据该模型，可以根据不同的导管材料、形状和尺寸要求，自动生成最优的弯曲工艺参数，提高工艺设计的效率和准确性。借助物联网技术实现设备之间的互联互通和数据共享，实现生产过程的远程监控和智能化管理。通过在数控弯管机上安装传感器和通信模块，将设备的运行状态、工艺参数等数据实时传输到监控中心。管理人员可以通过手机或电脑远程监控生产过程，及时发现和解决生产过程中出现的问题，提高生产效率和产品质量稳定性。

结语

本文对数控导管弯曲技术的精度控制与工艺优化进行了全面深入的研究。通过详细分析影响数控导管弯曲精度的关键因素，提出了设备精度保障、材料预处理、模具优化设计以及实时监测与反馈调整等精度控制策略，同时从弯曲工艺路线规划、多工序协同优化以及智能化技术应用等方面探讨了工艺优化的方法。通过实施上述精度控制与工艺优化措施，能够有效提高数控导管弯曲质量，降低废品率，提高生产效率，为企业创造显著的经济效益。未来，随着科技的不断进步，数控导管弯曲技术将朝着更高精度、更高效率、更智能化的方向发展，需要进一步深入研究新技术、新方法在该领域的应用，以满足不断发展的市场需求。

参考文献

- [1] 杨睿萌,岳韬,林磊,等.不锈钢连续多弯导管数控弯曲成形数值仿真与工艺优化[J].锻压技术,2022,47(09):105-111.
- [2] 李小曼,李善良,张治,等.大直径薄壁导管数控弯曲成形技术浅析[J].轻合金加工技术,2019,47(11):47-51.
- [3] 卢鹏.大直径薄壁小弯曲半径不锈钢导管数控弯曲成形研究[D].哈尔滨工业大学,2019.
- [4] 钟琪平.基于逆向测绘的金属导管数控弯曲技术[J].安徽科技,2024,(03):43-46.