

精密铜管自动化生产过程中智能化控制技术的研究

代吉伟

(龙口市龙蓬精密铜管有限公司, 山东 烟台 265701)

摘要 在精密铜管自动化生产中, 智能化控制技术通过高精度传感器和智能算法的结合, 实现了对熔炼温度、轧制速度与压力、拉拔力等关键工艺参数的精准调控。该项技术不仅提升了生产效率, 还显著改善了产品的尺寸精度和表面质量, 同时大幅降低了废品率。研究表明, 智能化系统能够实时监测并动态调整生产过程中的各项参数, 可减少人工干预, 优化设备运行状态, 为精密铜管制造业提供高效、稳定且高质量的解决方案。

关键词 精密铜管; 自动化生产; 智能化控制技术; 生产效率; 产品质量

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.012

0 引言

随着现代工业对材料性能要求的不断提高, 精密铜管作为重要基础材料, 在制冷、电子等领域的需求日益增加。传统生产工艺在精度控制和稳定性方面存在诸多不足, 难以满足当前市场对高质量产品的需求。智能化控制技术的引入, 为解决这些问题提供了新的可能。通过对生产流程中各个环节的精确控制, 不仅可以提高产品的尺寸一致性和表面光洁度, 还能有效降低生产成本, 提升整体效益。这一技术的应用正在推动精密铜管制造业向更高水平迈进。

1 精密铜管自动化生产概述

1.1 生产流程

精密铜管的自动化生产涵盖原材料准备、熔炼、铸坯、轧制、拉拔、退火及精整等多个环节, 需精准控制工艺参数以确保产品质量^[1]。选用纯度 $\geq 99.95\%$ 的电解铜, 经清理、预热后送入感应熔炼炉, 控制熔炼温度在 $1\ 083 \sim 1\ 180\ ^\circ\text{C}$ 之间, 确保铜液成分均匀。铜液通过连续铸造工艺制成铸坯(规格示例: 直径 $92\ \text{mm}$, 长度 $20\ 000\ \text{mm}$), 经冷却后进入多道次轧制阶段, 轧制速度由 $12\ \text{m/min}$ 逐步提升至 $20\ \text{m/min}$, 并配合动态压力调整优化壁厚均匀性。拉拔工序进一步调整尺寸精度, 使外径公差控制在 $\pm 0.02\ \text{mm}$ 以内。管材经退火(温度 $450 \sim 700\ ^\circ\text{C}$)、酸洗、超声波检测等精整工序, 形成符合标准的精密铜管产品。

1.2 自动化生产现状

当前, 精密铜管行业已广泛采用高度自动化的生产

设备, 如德国 SMS Meer 公司的 PQF (Premium Quality Finishing) 连轧机、美国 Southwire 公司的 SCR (Southwire Continuous Rod) 连续铸轧系统, 以及国内某些品牌的智能拉拔与退火设备。整体自动化程度较高, 自动化操作占比可达 85% 以上, 但仍存在精度波动问题, 如壁厚公差波动范围 $\pm 0.02\ \text{mm}$, 影响成品一致性。目前, 自动化生产的质量控制水平相对稳定, 废品率一般维持在 $1.2\% \sim 2.0\%$ 之间, 日产量可达 $150 \sim 300$ 吨。部分工序(如拉拔和在线检测)仍依赖人工干预, 影响连续生产效率。优化智能化控制系统以提升精度稳定性和减少人工干预仍是行业重点方向。

2 智能化控制技术基础

2.1 技术原理

智能化控制技术在精密铜管自动化生产中依赖高精度传感器进行实时数据采集。温度传感器(精度 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$)用于监测熔炼温度(控制范围 $1\ 083 \sim 1\ 180\ ^\circ\text{C}$), 确保铜液成分均匀性; 压力传感器(精度 $\pm 0.01\ \text{MPa}$)用于检测轧制、拉拔过程中管材受力情况, 实现精准压力调节。光电传感器与激光测厚仪结合, 可实时监测管材尺寸(测量精度 $\pm 0.005\ \text{mm}$), 反馈至控制系统, 确保产品公差符合标准要求。自动化控制算法在生产过程中起关键调节作用, 其中 PID 控制算法广泛用于温度、压力和速度控制, 其数学模型如下:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中, $u(t)$ 为控制器输出, K_p 为比例系数, T_i 为

积分时间常数, T_d 为微分时间常数, $e(t)$ 为误差值。该算法通过调节比例、积分和微分参数, 实现温度稳定、压力均匀及速度优化, 提高生产过程的稳定性和精度。

智能决策系统依托大数据分析 with 机器学习算法 (如随机森林、BP 神经网络) 对实时采集的生产数据进行分析, 预测设备状态、优化参数设定。如基于生产数据的回归分析模型, 可调整轧制速度与温度参数, 使废品率降低 10% 以上。同时, 深度学习算法可识别缺陷模式, 优化生产工艺, 提高整体生产效率与质量控制水平。

2.2 技术优势

相较于传统控制技术, 智能化控制技术在生产精度、稳定性和效率方面具有显著优势。传统控制依赖人工经验调整, 存在滞后性和误差, 而智能控制系统可实时采集数据并动态优化参数, 使尺寸精度提升至 ± 0.05 mm 以内。智能算法结合闭环控制可减少生产波动幅度 15% ~ 20%, 确保工艺稳定性。智能化系统可优化生产节拍, 提高设备运行效率, 使整体生产效率提升 10% ~ 25%, 有效降低能耗和人工干预成本。以某大型铜管制造企业为例, 在引入智能化控制技术前, 生产废品率约为 2.5%, 尺寸偏差 ± 0.08 mm, 日产量 180 吨。应用智能传感监测与自适应控制后, 废品率降至 1.2%, 尺寸偏差控制在 ± 0.05 mm, 日产量提升至 225 吨, 综合生产效率提高约 25%。该案例充分证明智能化控制技术能显著提升产品质量、降低损耗, 并优化企业生产效益。

3 智能化控制在精密铜管自动化生产中的应用

3.1 熔炼环节

在精密铜管生产的熔炼环节, 智能化控制技术主要用于精准调控熔炼温度和优化熔炼时间, 以确保生产过程的高效性和铜液的高纯度。通过高精度温度传感器 (精度 ± 0.1 °C) 实时监测铜液温度, 并结合 PID 控制算法, 系统能够精确控制温度波动, 使其保持在 ± 3 °C 范围内, 从而确保熔炼温度稳定在 $1\ 083 \sim 1\ 180$ °C^[2]。根据温度反馈, 智能控制系统能够自动调整电磁感应加热功率或天然气燃烧器的火焰强度, 避免过热或过冷现象, 进一步提高铜液的纯净度, 减少氧化夹杂的发生, 确保铜液质量达到生产要求。

智能化系统还基于铜液成分检测数据进行动态调整。每 10 分钟进行一次铜液成分检测, 确保铜液成分符合标准 ($\text{Cu} \geq 99.95\%$ 、 $0 \leq 0.002\%$ 、 $\text{P} \leq 0.040\%$)。根据实时检测结果, 智能分析系统优化脱氧剂、合金

元素的补充或调整加料速率, 确保成分的均匀性。智能决策算法结合历史数据分析, 预测最佳熔炼时间, 并根据生产实际情况进行调整, 使熔炼周期缩短 8% ~ 12%。这一过程不仅提高了生产效率, 还降低了能耗, 确保了整个生产环节的节能降耗, 进一步提升了精密铜管的生产质量和效益。

3.2 轧制环节

在精密铜管的轧制环节, 智能化控制技术通过协同调节轧制速度与轧制力, 有效提高管材表面质量和尺寸精度。智能系统根据铜材的材质 (如 Cu-DHP、Cu-ETP) 和目标规格 (如外径 $\varphi 8$ mm ~ $\varphi 50$ mm, 壁厚 0.3 ~ 2.0 mm), 通过自适应控制算法动态调整轧制速度 (12 ~ 20 m/min), 和轧制力 (50 ~ 500 kN), 确保在不同生产条件下, 轧制过程的稳定性和精度^[3]。系统结合实时监测数据, 优化轧制过程中的应变分布, 减少管材表面缺陷及壁厚偏差, 从而确保管材的尺寸精度控制在 ± 0.05 mm 以内, 显著提升了成品率和生产效率。

智能传感系统还可实时监测轧辊的磨损情况, 采用高精度测量 (± 0.01 mm) 和大数据分析技术, 建立轧辊磨损量与使用时间的关系模型。通过监测轧辊的磨损速率 (如 0.002 ~ 0.005 mm/h), 系统能够精准预测轧辊的更换时间, 从而避免因过度磨损导致尺寸超差或表面缺陷。这样的智能化监控不仅提升了轧制过程的连续性与稳定性, 还优化了设备的维护周期, 降低了停机时间和维护成本, 优化幅度达到 15% ~ 20%。这一技术的应用使得精密铜管的生产更加高效、稳定, 并减少了生产过程中可能出现的故障和资源浪费。

3.3 拉拔环节

在精密铜管的拉拔环节, 智能化控制技术通过实时监测拉拔力并进行优化调节, 显著提高了成品质量并降低了表面缺陷率。系统每秒监测拉拔力数据 100 次, 根据实时数据自动调整拉拔速度 (50 ~ 150 m/min) 和模具润滑条件, 确保拉拔力的均匀分布。通过优化控制, 防止管材出现拉裂或尺寸偏差, 有效提高了铜管的表面质量, 降低了缺陷率, 铜管表面缺陷率可降至 0.3% 以内, 从而提升了产品的一致性和质量稳定性^[4]。

基于机器视觉的铜管表面质量检测系统能够在拉拔过程中实时监测产品表面缺陷, 如划痕、裂纹和氧化斑点。系统采用高分辨率工业相机 (检测精度 ± 0.01 mm) 与深度学习算法, 精确分析管材表面图像, 识别微小缺陷。检测数据实时传输至控制系统, 实现缺陷分类

与自动剔除，确保不合格产品被及时移除。与此同时，系统反馈信息至生产控制系统，优化拉拔参数，确保最终产品的表面光洁度达到 $Ra \leq 0.2 \mu m$ ，进一步提高了成品合格率。通过这一系列智能化控制技术的应用，精密铜管生产过程更加精细化、高效化，质量控制更加严格，从而显著提升了生产效率和产品质量。

4 智能化控制技术应用效果评估

4.1 生产效率提升

通过引入智能化控制技术，生产线的有效生产时间得到了显著提升。智能化控制技术应用前，每日有效生产时间为 18 小时，而应用后，通过智能调节和优化控制，生产时间提升至 22 小时，生产效率提升约 22%。这一提升主要得益于自动化调节生产参数、减少人工干预与操作时间。智能化控制技术通过实时监测与调节各环节参数，显著减少了设备调整与故障排查的时间。例如：在熔炼过程中，智能系统能够根据温度数据实时调整加热炉温度，避免了人工干预带来的延误；在轧制环节，系统通过自动控制轧制力和速度，减少了操作人员的调节时间。拉拔过程中，智能化调整拉拔力与速度的系统进一步减少了设备的停机时间。通过全流程优化，整个生产周期缩短，操作效率显著提高^[5]。

4.2 产品质量改善

在应用智能化控制技术前，生产过程中的废品率为 4.5%，而经过智能化优化后，废品率降至 1.2%，显著降低了 73.3%。废品产生的主要原因在于温度波动、轧制力不稳定以及拉拔速度的不均匀。智能化系统通过实时监测与自动调节，消除了这些波动，保证了每一生产环节的稳定性，有效减少了不合格品的产生。同时，产品质量指标也得到了显著提升。应用前，铜管的尺寸精度波动范围为 $\pm 0.15 \text{ mm}$ ，表面粗糙度为 $Ra 0.45 \mu m$ ，而应用智能化控制后，尺寸精度提升至 $\pm 0.05 \text{ mm}$ ，表面粗糙度降低至 $Ra 0.20 \mu m$ 。通过智能化技术，生产过程中的关键参数得以精确控制，表面质量与尺寸精度的提升不仅减少了废品率，也使得生产的铜管满足更高的工业标准，确保了产品的一致性与稳定性。

4.3 成本效益分析

引入智能化控制技术后的设备投资成本包括设备采购、安装调试及人员培训等，总计约 350 万元。每年运行维护成本约为 50 万元，主要包括系统的维护、软件升级及设备检查等费用。虽然初期投资较高，但

长期来看，智能化控制技术通过提升生产效率和产品质量，显著降低了整体成本。智能化控制技术带来的生产效率提升和废品率降低直接影响了成本节约。生产效率提升 22% 后，每年可增加生产量约 1 000 吨，节约的人工成本及能源消耗为 200 万元。废品率降低后，每年可节省原材料费用约 150 万元。综合来看，智能化控制技术的应用不仅提高了生产能力，还带来了明显的经济效益（见表 1）。

表 1 智能化控制技术应用成本效益分析表

项目	数值
初期投资成本	350 万元
年运行维护成本	50 万元
每年节约人工及能源	200 万元
每年节约原材料费用	150 万元
总年度节约成本	350 万元
投资回收期	1 年

根据上述数据，智能化控制技术的回报期为 1 年，经济效益明显。

5 结束语

智能化控制技术在精密铜管自动化生产中的应用取得了显著成效。通过对生产过程中各环节的精准调控，不仅大幅提升了产品的质量和一致性，还显著优化了生产效率。该技术减少了人工干预，提高了设备运行的稳定性，延长了设备使用寿命。同时，智能化系统的应用为企业带来了明显的经济效益，降低了生产成本。未来，随着技术的进一步发展和完善，智能化控制将在精密铜管制造领域发挥更加重要的作用，助力行业实现更高水平的自动化与智能化发展。

参考文献:

- [1] 谢福胜. 精密铜管生产线在线质量控制系统研究 [J]. 移动信息, 2024, 46(8): 364-366, 373.
- [2] 汤宝春. 无缝内螺纹铜管生产与其过程质量控制 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(18): 327.
- [3] 郭闻政, 吴晓, 祝焱, 等. 铜管生产在线退火工序节能降耗的探讨 [J]. 机电工程技术, 2022, 51(12): 99-103.
- [4] 程颜. 现代铜及铜合金管材的发展方向 [J]. 中国金属通报, 2021(09): 225-226.
- [5] 郑佳依, 刘劲松, 陈大勇, 等. 精密铜管拉拔智能化配模系统的设计研究 [J]. 铜业工程, 2022(03): 81-85, 91.