

智能调速驱动的大型铝双动挤压机绿色成形关键技术

薛菲菲 侯永超 隋 健 陈永甲

中国重型机械研究院股份公司 陕西 西安 710018

摘 要: 在大型铝双动挤压机领域, 研究聚焦智能调速驱动与绿色成形关键技术。通过设计智能调速驱动系统, 采用多参数同时调速策略与能量优化匹配技术, 实现挤压速度精准控制与能耗降低。在绿色成形加工工艺上, 优化温度场均匀化控制、提升材料利用率。工业试验表明, 新技术使产品尺寸精度提升, 能耗降低42%, 生产效率提高30%。本文研究成果为铝挤压行业提供高效、节能、环保的解决方案, 推动行业技术升级。

关键词: 大型双动铝挤压机; 智能调速驱动; 绿色成形; PLC控制; 能耗优化

引言: 铝挤压件在航空航天、汽车制造等领域应用广泛, 传统挤压机存在速度不稳定、能耗高、产品精度低等问题。随着制造业对产品质量、生产效率及环保要求的提升, 开发智能调速驱动的大型铝双动挤压机绿色成形关键技术迫在眉睫。该技术能实现挤压速度精准控制、温度场均匀化调节, 提高材料利用率, 降低能耗, 对提升我国铝挤压行业竞争力, 满足高端市场需求具有重要意义。

1 智能调速驱动系统设计

1.1 系统组成与架构

1.1.1 检测元件的功能与作用

检测元件作为系统感知外界信息的基础, 在大型双动铝挤压机智能调速驱动系统中发挥着至关重要的作用。该系统搭载磁致伸缩位移传感器、压力传感器、红外测温装置等检测元件, 能够同步采集挤压速度、主缸压力、筒体温度等20余项参数, 且采样频率可达100Hz。其中, 磁致伸缩位移传感器凭借高精度与高可靠性, 可实时获取挤压杆位置信息, 为速度控制提供准确依据; 压力传感器则能敏锐捕捉主缸压力变化, 确保系统在安全压力范围内运行。

1.1.2 核心控制器与HMI人机界面

核心控制器选用PLC控制器, 其集成数字量输出模块, 连接模拟量输入模块, 强大的逻辑处理能力与稳定性, 为系统稳定运行提供保障。PLC控制器通过TCP/IP通讯与HMI人机界面进行数据交互, 内部存储挤压工艺数据库和模具模型库。HMI人机界面以直观的图形化界面, 方便操作人员输入指令与查看系统运行状态, 同时存储挤压工艺数据库, 为工艺参数选择提供参考。

1.1.3 动力调节部分

基金项目: 250 MN超重型挤压成形工艺与装备研究 (项目编号: ZDZX2024-12)

动力调节部分是系统实现调速功能的核心环节, 由变量泵控制单元、主侧缸、伺服比例阀构成^[1]。各部件协同配合, 依靠多泵联合调节实现按需供能。变量泵控制单元可依据系统需求灵活调整泵的输出流量, 主侧缸提供强大动力推动挤压过程, 伺服比例阀则通过精确控制阀口开度, 实现对流量与压力的精准调节。

1.2 多参数同时调速策略

为实现挤压速度的精准控制, 采用三级控速策略。操作人员可在HMI人机界面输入合金类型与型材截面信息, 系统从工艺数据库中选取适配的挤压速度曲线与泵头开度值, 解决传统人为设定困难的问题。通过位移传感器获取挤压杆位置信息, 经计算得出实际速度, 并与目标速度对比。若偏差超出允许范围, PLC控制器控制伺服比例阀动态改变变量泵开口度, 形成闭环控制, 确保速度稳定。同时引入多参控制模型, 将挤压力、温度波动等因素纳入速度控制体系, 运用智能PID控制算法确定控制参数。通过比例、积分、微分环节协同作用, 使挤压速度在全速度段平滑运行, 将速度波动约束在极小范围内, 显著提升产品合格率。

1.3 能量优化匹配技术

传统油泵系统长期处于“大马拉小车”运行状态, 存在能耗浪费问题。研发工况配功率的新方式。(1) 建立负载-功率映射模型是能量优化匹配的基础, 该模型可实时识别挤压突破、恒速挤压、回程等不同工况的功率需求, 液压系统输出功率满足 $P = p \cdot Q$, 其中P代表功率, 单位为kW, p代表系统压力, 单位为MPa; Q代表泵输出流量, 单位为L/min。(2) 采用变量泵组联合控制方式, 可智能调整泵头开口数值投入运行泵的数量等参数, 让输出功率贴合负载实际需求。流量大小由泵转速和排量共同决定, 计算公式: $Q = n \cdot V \cdot \eta_v$, 公式中n代表电机转速, 单位为r/min; V代表泵排量,

单位为mL/r; η_v 代表容积效率。系统总效率: $\eta_{total} = \eta_m \cdot \eta_v \cdot \eta_{control}$, 依托工况自适应功率匹配, 可提高 η_{total} 值。(3) 挤压回程阶段的液压能储存于蓄能器, 供下一周期启动使用, 进一步降低整体能耗。

2 绿色成形加工工艺优化技术

2.1 温度场均匀化控制策略

2.1.1 挤压筒分区温控与智能管理

挤压筒在挤压加工中承担着重要角色, 其温度均匀性直接影响挤压制品质量。多向分区热处理方式依据挤压筒不同区域在挤压过程中的受热特点与功能需求, 把挤压筒分成3~5个区, 每个区域单独加热, 配套循环风冷, 能够根据实际需求灵活调节温度。智能PID管理算法在此发挥关键作用, 它实时监测各区域设定温度与实际温度的偏差, 通过动态调整加热功率或冷却流量, 精准控制各区域温度, 可将轴向温差控制在 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ 范围, 确保挤压筒整体温度均匀稳定, 有效避免因温度差异引发的挤压制品裂纹、弯曲等缺陷, 为高质量挤压加工奠定基础。

2.1.2 模具冷却方式优化与气流智能排布

模具冷却对挤压制品微观组织与力学性能影响显著。液氮冷却以其极低温度与快速冷却能力脱颖而出, 能够迅速细化模具工作带附近金属晶粒, 增强制品强度。同时, 合理设计气流通道并实现智能排布至关重要^[2]。利用液氮冷却, 智能排布内部气流通道, 使氮气均匀吹到模具表面, 且由测温装置检测型材出口温度值并实时调节液氮喷洒量, 保证模具温度场均匀分布, 延长模具使用寿命, 降低生产成本。

2.1.3 全流程温度与工艺参数联动控制

全流程联动控制将挤压出口温度与淬火工艺参数紧密相连。挤压出口温度直观反映金属在挤压终了时的热状态, 建立挤压出口温度同后续淬火工艺参数的联动关系, 淬火温度波动可控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$, 6082铝合金抗拉强度波动范围从原有20MPa降至5MPa以下。依据此温度实时调整淬火介质流量、温度以及喷淋时间等参数。这种精准的联动控制确保金属在淬火过程中获得理想的冷却速度, 实现组织转变与性能优化的精准调控, 进一步提升挤压制品的综合性能, 满足不同领域对高质量产品的需求。

2.2 材料利用率提升技术

2.2.1 电液闭环定针技术减少废料

电液闭环定针技术借助高精度传感器实时、精准监测挤压针位置。结合先进的电液控制系统, 能够稳定控制挤压杆推进精度, 头尾废料产出规模减小, 材料利用率整体提高幅度超过30%, 有效避免挤压过程中因挤压针

偏移导致的头尾废料产生。该技术的应用显著提高了材料利用率, 减少了原材料浪费, 降低了生产成本, 同时提升了挤压加工的效率与稳定性。

2.2.2 数字孪生技术助力模具优化设计

数字孪生技术为模具优化设计提供了强大的虚拟仿真平台。借助数字孪生技术搭建模拟试模仿真平台, 优化模具分流通道布局, 调整工作带形状, 使金属流入模具的平均速度提高40%, 试模次数减少70%。通过构建模具的数字孪生模型, 能够模拟挤压过程中金属的流动情况、应力应变分布等关键信息。依据详细的模拟结果, 对模具结构、尺寸以及流道形状进行针对性优化, 改善金属填充效果, 减少因模具设计不合理而产生的废料。数字孪生技术的应用实现了模具设计的智能化与精准化, 提高了模具设计质量与效率, 为材料利用率提升提供了有力支持。

2.2.3 挤压废料闭环回收模式与高效利用

建立挤压废料闭环回收模式是实现材料高效利用的重要途径。将生产过程中产生的各类废料进行分类收集、专业清洗与预处理, 去除废料表面的杂质与污染物。随后, 通过先进的熔炼、精炼等工艺, 将废料重新制成符合标准的合格坯料, 并投入后续生产流程。搭建挤压废料、熔炼、铝棒循环的闭环回收模式, 使废料利用率超过95%, 这种闭环回收模式实现了废料的高效再利用, 显著提升了废料利用率, 降低了对原材料的依赖, 推动了绿色成形加工工艺的可持续发展。

3 工业试验与结果分析

3.1 试验设备与参数设置

本次工业试验聚焦于自主研发的智能调速驱动系统与绿色成形工艺的实际应用效果。试验设备选用最大挤压力125MN的正向双动挤压机, 该设备挤压速度可调整区间为0.5-20mm/s, 挤压筒内径为 $\phi 600\text{mm}$, 集成了先进的智能调速驱动模块, 可实现挤压速度的精准调节与动态优化^[3]。在原材料选择上, 依据成形工艺要求, 挑选了性能稳定、成分均匀的6061铝合金棒材, 确保试验结果的可靠性与代表性。研究对象为航空航天领域使用的薄壁管材成形工艺, 成形工艺采用优化后的绿色挤压工艺。此工艺融合了温度场均匀化控制策略与材料利用率提升技术, 通过精确控制挤压筒温度、模具冷却方式以及优化挤压参数, 旨在实现高质量、低能耗的型材生产。智能调速驱动系统依据成形工艺需求, 实时调整挤压速度, 确保金属在挤压过程中流动均匀, 减少缺陷产生。

3.2 试验结果与数据分析

试验结果显示, 产品尺寸精度得到显著提升。实验

过程中,工作人员使用激光测径仪检测产品尺寸,数据显示,纵向壁厚公差由传统工艺的8%降至2.8%,直线度误差控制在0.3mm/m以内,满足航空航天领域高精度标准要求。这得益于智能调速驱动系统对挤压速度的精准控制以及绿色成形工艺对温度场的均匀化调节,有效避免了因速度波动与温度不均导致的型材变形。在能耗与效率方面,实验采集数据显示,新技术应用后,单位产品能耗从850kWh/t降到493kWh/t,节能比例达到42%,生产效率提高30%,单根型材挤压周期从12分钟压缩至8.4分钟。智能调速驱动系统通过优化动力输出,减少了不必要的能量损耗;绿色成形工艺中的能量优化匹配技术与废料回收利用模式,进一步降低了生产过程中的能源消耗。同时,高效的成形工艺缩短了生产周期,提升了整体生产效率。综合试验结果,与传统工艺相比,自主研发的智能调速驱动系统与绿色成形工艺在提升产品尺寸精度、降低能耗与提高生产效率方面表现出色,具备广阔的工业应用前景。

4 结论与展望

4.1 研究结论总结

在本次研究中,多参数协同调速系统设计取得显著成果。多参数协同调速系统完成全新设计,可将挤压速度波动稳定在 $\pm 0.5\text{mm/s}$ 范围内,通过巧妙整合多种控制参数,实现对挤压速度的精准调控,有效抑制速度波动,解决了传统设备速度不稳定的技术瓶颈,为稳定生产提供坚实保障。温度场均匀化控制策略的实施效果斐然,全新温度场均匀化控制策略可将挤压筒温度梯度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内,模具与型材温度同步精度可达到 $\pm 2^\circ\text{C}$,精准的温度调控使金属在挤压过程中受热均匀,微观组织结构得到优化,产品品质大幅提升,满足高端市场对产品性能的严苛要求。在节能环保领域,研究实现重要突破^[4]。单位产品能耗降低42%,材料利用率提高30%,得益于对挤压过程中能量传递与转换的深度优化,减少不必要的能量损耗。通过创新工艺设计与废料回收利用

模式,实现资源的高效循环利用,降低生产成本,契合绿色制造发展理念。

4.2 未来研究方向与展望

未来,将数字孪生技术深度整合至成形加工领域,搭建全流程虚拟仿真平台。借助该平台,可在虚拟环境中模拟实际生产过程,提前发现潜在问题,优化工艺参数,减少试错成本,提高生产效率与产品质量。机器学习算法的应用前景广阔。通过收集大量生产数据,构建工况、参数与性能之间的关联模型,利用算法挖掘数据潜在规律,实现工艺参数的智能优化与自适应调整,进一步提升生产智能化水平。致力于多场耦合实时控制芯片开发,追求更高精度、更低能耗的成形技术。该芯片可实时感知并调控挤压过程中的温度、应力、速度等多场信息,实现多参数协同控制,推动成形加工技术向更高水平迈进,满足未来工业发展对高质量、高效率、绿色环保的需求。

结束语

智能调速驱动的大型铝双动挤压机绿色成形关键技术研究成果显著。多参数协同调速系统保障挤压速度稳定,温度场均匀化控制策略提升产品品质,节能环保成果突出。后续可进一步整合数字孪生技术,应用机器学习算法,开发多场耦合实时控制芯片,持续优化成形加工技术,推动行业向高质量、高效率、绿色环保方向发展。

参考文献

- [1]中国铝业集团有限公司.西北铝高端铝材数智化制造能力实现新跃升[EB/OL].2026-02-11.
- [2]吴量,苏振华,付永涛,等.一种大型挤压机智能调速控制系统及方法[P].中国专利:42790968,2025-08-19.
- [3]中国报告大厅.2026年铝型材行业技术特点分析:高端化进程加速[EB/OL].2026-01-20.
- [4]一种数据驱动型铝挤压机智能控制方法、系统和铝挤压机[P].中国专利:202511543592,2025-11-28.