

铝型材挤压模具的高效生产和质量控制分析

黎兆鉴，杨桦，梁浩坚，邹村先

广东兴发铝业有限公司，广东 佛山 528137

DOI:10.61369/SE.2025100025

摘要：随着新能源、建筑幕墙等领域对高精度铝型材需求的飞速增长，及工业互联网与AI技术在制造业的深度应用，铝型材挤压模具作为生产核心装备，其生产效率与质量直接影响企业产能与产品竞争力。但当前行业普遍存在模具设计周期长（改型复用率不足40%）、制造精度波动大（关键工序公差超差率高）、工艺参数依赖人工经验（缺乏动态优化）、全生命周期管理脱节（保养与使用数据割裂）等问题，导致模具报废率高、寿命短。基于此，本文针对铝型材挤压模具的设计标准化构建、制造自动化管控、工艺参数智能优化、全生命周期数据追溯四大环节展开分析，以期实现模具设计周期缩短30%、寿命延长20%、试模返工率降低15%，为铝型材企业降本增效提供技术与管理支撑。

关键词：铝型材挤压模具；高效生产；质量控制；工艺参数优化；全生命周期管理；数据驱动

Analysis of High-efficiency Production and Quality Control in Aluminum Extrusion Dies

Li Zhaojian, Yang Hua, Liang Haojian, Zou Cunxian

Guangdong Xingfa Aluminum Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528137

Abstract : With the rapid growth of high-precision aluminum profile demand in new energy and building curtain wall sectors, coupled with the deep integration of industrial internet and AI technologies in manufacturing, aluminum extrusion dies—core production equipment—directly impact corporate productivity and product competitiveness through their manufacturing efficiency and quality. However, the industry currently faces challenges including lengthy die design cycles (with reuse rates below 40%), significant manufacturing precision fluctuations (excessive tolerance rates in critical processes), process parameter reliance on manual experience (lacking dynamic optimization), and disconnected lifecycle management (fragmented maintenance and usage data), resulting in high die scrapping rates and short service lives. This paper analyzes four key aspects: standardizing die design, automating manufacturing control, intelligent process parameter optimization, and implementing lifecycle data traceability. The study aims to reduce die design cycles by 30%, extend service life by 20%, and decrease trial die rework rates by 15%, providing technical and managerial support for cost reduction and efficiency enhancement in aluminum profile enterprises.

Keywords : aluminum extrusion die; efficient production; quality control; process parameter optimization; whole life cycle management; data-driven

引言

随着新能源汽车、建筑幕墙等产业对高精度铝型材需求的爆发式增长，及工业互联网、AI技术在制造业的深度渗透，铝型材挤压模具作为决定型材成型精度与生产效率的核心装备，其重要性愈发凸显。当前行业却面临设计周期长（改型设计复用率不足40%）、制造精度波动大（关键工序公差超差率高）、工艺参数依赖人工经验（缺乏动态优化机制）、全生命周期管理脱节（保养与使用数据割裂）等痛点，导致模具报废率高、平均寿命短，直接推高企业20–30%的挤压生产成本。基于此，本文围绕模具设计标准化构建、制造自动化管控、工艺参数智能优化、全生命周期数据追溯展开分析，旨在通过技术与管理协同，实现模具设计周期缩短30%、寿命延长20%，为铝型材企业降本增效提供切实路径。

一、模具设计阶段的效率与质量前置管控

(一) 设计标准化体系构建

设计标准化体系围绕模坯、图层、工艺参数三大维度搭建，是模具高效生产的基础。模坯方面，建立覆盖1800T、2200T等主流挤压机吨位的标准模坯库，统一模坯直径、厚度、止口尺寸，避免重复设计；图层管理严格遵循规范，如凹模划分为21个专用图层（含外圆工艺孔、止口、焊合室等），明确每个图层的轮廓与尺寸标注要求，禁止多余或重合线条，确保设计文件一致性。同时统一工艺参数定义，如工作带长度、分流孔面积比参考标准，减少设计偏差。该体系可将图纸一次性通过率提升25%以上，为后续自动化加工提供精准数据，避免因设计不规范导致的返工浪费^[1]。

(二) 三维一体化设计技术应用

推行“2D驱动3D”技术，打破传统设计与建模脱节困境。设计人员完成二维线割图后，系统自动同步生成三维模型；修改设计时，仅调整二维轮廓并点击“更新”，三维模型与工程图便自动适配变更，减少重复操作。同时集成相似模具查找算法，通过比对型材截面尺寸、米重、难度系数，匹配相似度80%以上的历史模具，70%改型设计周期可缩短至全新设计的1/3。此外，三维模型可直接用于CNC编程与挤压仿真，实现设计、制造、仿真无缝衔接，进一步提升整体效率，降低人工建模成本。

(三) 设计阶段质量预评估

在设计环节嵌入质量预评估机制，通过仿真提前规避缺陷。采用QForm软件对模具分流孔、焊合室、工作带等关键结构进行模拟：分析铝液流动速度场与压力场，预判焊合不良、金属堆积等问题；模拟挤压时模具温度分布与应力变化，评估工作带磨损、芯头变形风险。针对仿真发现的问题（如分流孔尺寸导致的流速不均），及时优化结构参数，如调整分流孔面积比、增加泄压区。该环节可将试模返工率降低15%–20%，避免因设计缺陷导致的钢材浪费与生产延误，从源头保障模具质量。

二、模具制造过程的高效协同与精度控制

(一) 制造流程自动化与数字化

依托模具MES系统构建制造全流程自动化管控体系，实现从订单下达到成品缴库的数字化闭环^[2]。在排产环节，系统结合工单优先级、设备负荷（如CNC机床、线切割设备利用率）自动生成最优生产计划，避免人工排产的不均衡问题；针对淬火、氮化等批量处理工序，开发专属批量报工功能，操作人员通过扫码即可完成多台模具的开工、报工记录，操作效率提升40%以上。同时，系统与DNC系统无缝对接，CNC程序根据模具型号自动下发至对应设备，无需人工手动传输，减少程序输入错误。此外，通过SCADA系统实时采集各工序加工参数（如CNC铣削转速、电火花放电电流），自动关联至模具编号，形成完整的制造数据追溯链，为后续质量问题定位与工艺优化提供数据支撑。

(二) 关键工序的精度管控

针对锯切、线切割、电火花、平面磨等关键工序，建立“实

时监测 – 标准比对 – 偏差修正”的精度管控机制。锯切工序通过激光定位系统确保坯料切割尺寸公差控制在±0.5mm内，避免后续加工余量不均；线切割工序利用SCADA系统实时采集切割速度、脉冲宽度等参数，当参数偏离标准范围（如切割速度波动超5%）时，系统自动预警并锁定设备，待技术人员调整后重启。同时，在平面磨工序后部署在线激光测径仪，对模具止口直径、凸台直径等关键尺寸进行100%检测，确保公差符合设计要求（如止口直径公差±0.1mm）。此外，QMS系统明确各工序质检标准，如工作带表面粗糙度Ra≤0.8μm，质检结果实时上传系统，不合格品需经评审后才能进入下一工序，杜绝精度隐患流转。

(三) 设备协同与运维保障

基于TPM系统搭建设备全生命周期运维体系，实现设备、工装、物料的协同调度与故障预防。通过传感器实时采集设备运行数据，如电机振动值、氮化炉温度均匀性，当数据超出阈值（如电机振动超0.1mm/s）时，系统自动生成维护工单，推送至维修人员，避免突发故障导致的生产中断——该机制可使设备故障停机率降低25%。同时，系统实时更新设备状态（如“运行中”“待保养”），排产时自动避开故障或保养设备，确保生产连续性。此外，建立工装（如线切割钼丝、CNC刀具）与物料（如模具钢坯）的库存预警机制，当工装剩余寿命不足或物料库存低于安全值时，自动触发采购或更换提醒，避免因工装磨损、物料短缺导致的制造精度下降或工期延误，保障制造环节高效协同。

三、工艺参数的智能优化与质量闭环

(一) 工艺参数智能推荐模型

依托工艺算法模型构建参数智能推荐体系，以数据驱动替代传统人工经验，确保初始工艺参数的科学性与适配性。模型输入维度涵盖模具（模径、工作带长度）、型材（米重、难度系数、合金牌号）、设备（挤压机吨位）三类核心参数，通过堆叠模型（多基学习器+元学习器）对历史生产数据（模具资产云、大数据湖存储的10万+批次数据）进行训练，输出挤压速度、棒炉进/出棒口温度、模具预热温度等关键参数推荐值，同时将参数上下限（如挤压速度下限2mm/s、模具温度上限500℃）存入工艺配方库。例如针对6063-T5合金、1800T挤压机场景，模型可根据型材米重1.8kg/m自动推荐挤压速度5–7mm/s、铝棒加热温度480–520℃，推荐准确率达90%以上，大幅减少人工试错成本，为生产效率与模具保护奠定基础。

(二) 实时工艺动态优化

在生产现场部署等温算法模型（边缘侧），实现工艺参数的实时动态调整，平衡生产效率与模具质量。模型通过工业网关实时采集关键数据：挤压出口温度（目标520–550℃）、突破压力（根据模具强度设定阈值）、铝棒实际加热温度，结合预设约束条件（如淬火温度100–300℃），采用MPC（模型预测控制）策略滚动优化挤压速度。当检测到出口温度超550℃时，模型自动将挤压速度降低0.5–1mm/s；若突破压力接近阈值，则进一步下调速度以减少模具负荷^[3]。该动态优化机制可使工艺参数偏差率降低

35%，既避免因参数不当导致的模具过度磨损，又保障型材成型质量，实现“效率 – 质量”双平衡。

(三) 工艺偏差监控与闭环改进

搭建工艺管控系统为核心的偏差监控与闭环体系，确保工艺异常及时处理、数据持续迭代。系统实时比对采集参数与工艺配方库标准值，当出现偏差（如棒炉温度低于480℃、挤压速度超推荐上限）时，立即触发分级告警：一级偏差（轻微超差）弹窗提示操作人员，二级偏差（中度超差）暂停设备并推送处理指南，三级偏差（严重超差）联动设备停机。同时，所有偏差数据（类型、时间、处理方案）自动回传大数据湖，作为工艺算法模型的迭代样本——例如某模具多次出现出口温度超差，模型会基于历史处理数据优化下次同类场景的速度推荐值。此外，每月生成工艺偏差分析报告，提炼高频问题（如棒炉温控不准）并推动设备校准或流程优化，形成“监控 – 告警 – 处理 – 迭代”的完整闭环，持续提升工艺稳定性。

四、模具全生命周期的效率与质量协同管理

(一) 全流程数据追溯体系

依托 EAM 系统构建模具“一物一码”全流程数据追溯体系，打通设计、制造、使用、保养各环节数据壁垒。为每副模具分配唯一标识（如 H140005-C1900-001），设计阶段关联 PLM 系统中的图纸版本、模芯尺寸、仿真报告；制造阶段同步 MES 系统的加工参数（如 CNC 铣削转速、线切割精度）、质检结果（止口公差、工作带粗糙度）；使用阶段记录挤压机台、挤压棒数、平均速度、成材率；保养阶段录入氮化次数、氮化层厚度、修模位置及方案。所有数据实时归集至模具台账，当出现质量问题（如模具磨损导致型材尺寸超差）时，可通过标识快速回溯全流程数据，定位根因（如某次修模未达标）^[4]。该体系实现数据可查、责任可追，为模具质量改进提供精准数据支撑，减少因数据断层导致的问题排查时间。

(二) 模具状态动态监控与保养优化

基于传感器与寿命模型实现模具状态动态监控，推动保养从“定期”向“按需”转变。在模具关键部位（工作带、芯头）部署温度、振动传感器，实时采集使用过程中的数据，传输至边缘计算节点；结合模具寿命模型（输入参数含挤压次数、合金硬度、

工艺温度），自动计算剩余可用周期（如当前模具还可挤压200根铝棒）。当剩余周期低于阈值或传感器检测到异常（如工作带温度骤升）时，系统自动推送保养提醒，明确保养类型（如氮化、工作带抛光）及参数（氮化温度500℃、时长6小时）。同时，记录每次保养后的模具使用效果（如成材率变化），反向优化保养参数——例如某模具经480℃氮化后寿命延长15%，系统后续将该参数作为同类模具的推荐标准，避免过度保养浪费或保养不足导致的模具损坏。

(三) 知识沉淀与复用机制

构建模具知识库并实现智能关联复用，降低对资深人员的依赖，提升全流程效率。知识库分类存储核心知识：设计规范（模坯选型规则、分流孔面积比计算方法）、制造工艺（关键工序参数范围，如电火花放电间隙0.02–0.05mm）、修模经验（常见缺陷如“拉沟”的修复方案）、使用技巧（不同合金对应的模具预热温度）。系统在各环节自动关联推荐知识：设计时推荐相似模具的参数，制造时提示工序注意事项，修模时匹配历史解决方案。例如新设计师设计1800T 挤压机用空心型材模具，系统自动推送同类模具的分流桥宽度、焊合室深度参数，及之前的试模优化记录，使设计周期缩短40%。同时，允许用户手动补充经验（如新型缺陷修复方法），经审核后纳入知识库，形成“沉淀 – 复用 – 迭代”的知识闭环^[5]。

五、结语

本文围绕铝型材挤压模具高效生产与质量控制，从设计、制造、工艺、管理四大维度展开分析，核心逻辑在于以“数据驱动”贯穿全流程：设计阶段通过标准化体系与三维一体化技术缩短周期、前置质量评估；制造环节依托自动化管控与精度监测提升效率、保障加工精度；工艺层面借助智能推荐与动态优化平衡效率与模具负荷；全生命周期管理通过数据追溯、状态监控与知识复用实现协同管控。这些措施可推动模具设计周期缩短30%、寿命延长20%、试模返工率降低15%，切实解决行业效率低、质量波动大的痛点。未来，随着数字孪生、AI 大模型的深度应用，可进一步探索虚拟试模、跨系统数据无缝流转等方向，持续迭代模具管控能力，为铝型材产业高质量发展提供更强支撑。

参考文献

- [1] 杜颖聪. 铝型材挤压模具的高效生产和质量控制方法 [J]. 上海轻工业 ,2023(6):168–170.
- [2] 管晓伟 . 铝型材挤压工艺参数对产品质量的影响分析 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A,2024(12):151–155.
- [3] 王杰刚 , 程广邓 . 铝挤压模具加工的质量控制措施分析 [J]. 科技与企业 ,2015(14):165–165.
- [4] 王小龙 , 孙凤利 . 工业铝型材挤压加工质量控制及工艺改进 [J]. 中国金属通报 ,2021(1):189–190.
- [5] 魏凯歌 , 吴茂来 . 工业铝型材挤压加工质量控制及工艺改进 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术 ,2021(8):162–164.