

# 工业铝型材挤压加工质量控制及工艺改进探析

余洋, 陈群宏, 罗伟浩, 廖结容

广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528137

DOI:10.61369/ADA.2025020025

**摘 要 :** 随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展, 工业铝型材因轻量化、高强度优势需求持续攀升, 挤压加工作为其核心成型工序, 直接决定产品精度与市场竞争力。当前行业存在原料成分管控不精准、挤压过程参数波动大、后处理工序协同不足及质量追溯断层等问题, 导致型材尺寸超差、表面缺陷频发、力学性能不稳定。基于此, 本文针对挤压预处理、过程实时管控、后处理优化及工艺改进四大核心环节展开分析, 以期实现型材尺寸公差达标率  $\geq 99.5\%$ 、表面缺陷率  $< 0.3\%$ 、力学性能达标率  $\geq 99\%$ , 同时缩短加工周期  $10\% - 15\%$ 、降低能耗  $8\% - 10\%$ , 为企业适配高端市场需求提供技术支撑。

**关 键 词 :** 工业铝型材; 挤压加工; 质量控制; 工艺改进; 参数优化; 全流程追溯; 设备智能化

## Analysis of Quality Control and Process Improvement of Extrusion Processing of Industrial Aluminum Profile

Yu Yang, Chen Qunhong, Luo Weihao, Liao Jierong

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

**Abstract :** With the rapid development of high-end industries such as new energy vehicles and rail transit, the demand for industrial aluminum profiles driven by their lightweight and high-strength advantages continues to rise. As the core forming process, extrusion directly determines product precision and market competitiveness. Current industry challenges include imprecise raw material composition control, significant extrusion process parameter fluctuations, insufficient coordination in post-processing procedures, and quality traceability gaps, leading to frequent dimensional deviations, surface defects, and unstable mechanical properties. This paper analyzes four key aspects: pre-extrusion pretreatment, real-time process control, post-processing optimization, and process improvement. The goal is to achieve a dimensional tolerance compliance rate of  $\geq 99.5\%$ , surface defect rate  $< 0.3\%$ , mechanical property compliance rate  $\geq 99\%$ , while reducing processing cycles by  $10\% - 15\%$  and energy consumption by  $8\% - 10\%$ . These advancements provide technical support for enterprises to meet high-end market demands.

**Keywords :** industrial aluminum profile; extrusion processing; quality control; process improvement; parameter optimization; full-process traceability; intelligent equipment

## 引言

随着新能源汽车、轨道交通、建筑幕墙等高端产业的快速扩张, 工业铝型材因轻量化、高强度、易加工的特性, 市场需求持续激增。挤压加工作为铝型材成型的核心工序, 其质量直接决定型材的尺寸精度、表面光洁度与力学性能, 是企业抢占高端市场的关键环节。但当前行业普遍面临痛点: 挤压前原料成分管控不精准 (如合金元素偏差)、模具预热不均; 挤压过程中挤压速度、温度等参数波动大, 易导致型材扭拧、气泡; 挤压后热处理工艺协同不足, 且质量追溯断层, 造成型材尺寸超差率  $> 1\%$ 、表面缺陷率  $> 0.5\%$ , 同时加工周期长、能耗偏高。基于此, 本文围绕挤压预处理、过程实时管控、后处理优化及工艺改进展开分析, 旨在通过参数精准化、监控实时化、改进数据化, 提升型材质量稳定性, 缩短加工周期, 为工业铝型材企业适配高端需求提供切实路径。

作者简介: 余洋 (1992.02—) 男, 汉族, 四川乐山人, 学历学位: 大学本科, 职称: 高级运维工程师, 现供职单位全称: 广东兴发铝业有限公司, 研究方向: 工艺模型、智能控制。

## 一、挤压前预处理环节的质量控制

### （一）铝棒原料质量精准管控

铝棒作为挤压加工的核心原料，其质量直接决定型材基础性能，需从成分、缺陷、精度三方面严格管控。采用光谱分析技术对铝棒化学成分进行100%检测，精准控制合金元素含量（如6063合金Si含量需稳定在0.2%–0.6%、Mg含量0.45%–0.9%），杜绝成分偏差导致的型材力学性能不达标；通过超声波探伤设备扫描铝棒内部，排查疏松、夹杂、气孔等缺陷，不合格原料直接标记剔除，避免挤压时出现断棒或型材内部裂纹；同时采用数控锯床控制短棒锯切精度，确保长度偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ，且切口平整无毛刺，防止因铝棒长度不均导致挤压时金属流动失衡，为后续稳定挤压奠定原料基础。

### （二）挤压模具预处理质量保障

模具预处理是避免型材成型缺陷的关键，需围绕温度、清洁、磨损三方面实施管控。根据模具适配的挤压机吨位设定预热温度：1800T模具预热至430–480℃、2200T模具预热至450–500℃，通过红外测温仪多点监测模具温度均匀性，温差控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 内，防止局部温度过低导致型材成型不均；模具使用前用高压气枪吹扫模孔、工作带及分流孔，清除残留铝渣与油污，避免杂质压入型材表面形成划痕；检查工作带表面粗糙度与磨损情况，当磨损量超0.05mm或粗糙度 $R_a > 0.8\mu\text{m}$ 时，采用金刚石砂轮抛光修复，保障型材表面光洁度<sup>[1]</sup>。

### （三）挤压设备预热与参数校准

挤压设备预热与校准可避免开机初期参数波动，需覆盖核心部件与辅助设备。对盛锭筒、挤压杆进行预热，使盛锭筒温度稳定在400–450℃，减少铝棒与盛锭筒温差过大导致的金属流动不畅；采用标准校准工具对挤压机压力传感器、温度传感器进行精度校验，误差超 $\pm 2\%$ 时立即调整，确保挤压过程中压力、温度数据采集精准；同时检查牵引机、拉直机的运行状态，通过调试使牵引速度与挤压速度偏差 $\leq 0.5\text{mm/s}$ ，避免因设备协同性差导致型材拉伸变形，确保挤压设备整体处于稳定工作状态。

## 二、挤压过程的实时质量控制

### （一）关键工艺参数动态监控

依托SCADA系统构建挤压过程参数实时监控体系，聚焦挤压速度、铝棒加热温度、挤压压力三大核心参数实施精准管控。根据合金牌号与型材截面特性设定参数基准：6063合金挤压速度控制在5–8mm/s，铝棒加热温度稳定在480–520℃，挤压压力不超过模具许用压力（如1800T模具压力 $\leq 350\text{MPa}$ ）；通过部署在设备关键部位的传感器，每秒采集1次参数数据，经边缘计算节点处理后，在可视化看板生成实时曲线，方便操作人员直观掌握参数波动；引入等温算法模型，当参数偏离标准范围（如出口温度超550℃、挤压速度波动超1mm/s）时，系统自动触发分级预警，一级预警弹窗提示，二级预警推送调整方案（如降低挤压速度0.5–1mm/s、微调铝棒加热功率），确保参数始终处于稳定区

间，避免因参数异常导致型材质量波动<sup>[2]</sup>。

### （二）金属流动与成型质量管控

通过数字孪生技术构建挤压过程金属流动仿真模型，提前预判成型风险并优化模具结构：基于铝棒成分与挤压参数，模拟铝液在模孔、分流孔、焊合室的流动轨迹，分析流速分布均匀性，针对流速偏差超10%的区域，优化分流孔面积比（如将不对称分流孔调整为等面积分布）、加深焊合室深度（增加2–3mm），避免出现焊合不良、气泡、金属堆积等缺陷；在挤压出口处部署激光测径仪，采用2000万像素工业相机配合激光扫描技术，实时监测型材截面关键尺寸（如壁厚、外接圆直径、腹板厚度），尺寸偏差超GB/T 6892标准规定的 $\pm 0.1\text{mm}$ 时，系统联动挤压机调整模孔位置或牵引机张力，确保型材精度达标；同时通过红外热像仪监测型材出口温度，温度偏差超 $\pm 10^\circ\text{C}$ 时及时调整冷却系统，防止型材因温度不均出现变形。

### （三）异常识别与实时调整

建立挤压过程异常特征库，涵盖型材表面划痕、扭拧、波浪形、凹陷等12类常见缺陷，明确每类缺陷的视觉特征与判定标准（如划痕深度 $> 0.05\text{mm}$ 判定为异常）；部署AI视觉检测系统，在挤压出口后方设置3组工业相机，多角度抓拍型材表面图像，通过ResNet+Transformer模型进行缺陷识别，准确率 $\geq 95\%$ ，识别延迟 $< 0.5\text{s}$ ；当检测到异常时，系统自动向挤压机PLC发送暂停信号，同时在操作界面推送缺陷类型、可能原因及处理指南（如划痕缺陷提示检查模具工作带是否有铝渣残留，扭拧缺陷提示调整牵引机左右张力）；操作人员处理完成后，系统记录异常处理过程（时间、措施、效果），数据自动同步至大数据湖，作为后续工艺参数优化的样本，形成“实时识别–及时处理–数据沉淀”的闭环管控，减少异常缺陷对生产的影响<sup>[3]</sup>。

## 三、挤压后处理环节的质量优化

### （一）热处理工艺参数精准控制

热处理是保障工业铝型材力学性能的核心工序，需根据合金牌号与性能要求定制差异化工艺并严控参数。针对6063–T5型材，采用180–200℃ $\times 6\text{--}8\text{h}$ 的时效工艺，6061–T6型材则执行120–140℃ $\times 12\text{--}16\text{h}$ 的时效参数，通过时效炉PLC控制系统将温度波动精准控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 内，避免因温度偏差导致型材硬度不达标；在时效炉内布置多组热电偶，实时采集不同区域温度数据，当局部温差超5℃时自动调节加热管功率，确保炉内温度均匀性；时效完成后，按每批次抽样3%的比例，采用拉力试验机检测型材抗拉强度、屈服强度，若力学性能未达标准（如6063–T5抗拉强度 $< 170\text{MPa}$ ），则重新调整时效温度与时长，形成“工艺设定–温度监控–性能检测”的闭环，保障型材力学性能稳定。

### （二）表面缺陷检测与修复

采用“2D+3D”复合检测系统实现型材表面缺陷全维度管控，杜绝不合格品流入下游。2D工业相机（2000万像素）捕捉型材表面划痕、色差、斑点等平面缺陷，通过AI算法比对缺陷库（如划痕深度 $> 0.05\text{mm}$ 判定为异常），精准识别缺陷类型与位

置；3D相机同步采集型材深度数据，生成三维点云模型，检测凹陷、凸起、变形等立体缺陷，如凸起高度超0.1mm立即标记；对轻微缺陷（如浅划痕、小斑点），采用800目金刚石砂纸手工抛光修复，修复后再次检测确保表面粗糙度  $Ra \leq 0.8 \mu m$ ；严重缺陷（如深度 $\geq 0.1mm$ 的凹陷、贯穿性划痕）直接剔除，避免返工浪费；所有检测数据（缺陷类型、位置、处理结果）实时上传大数据湖，为后续工艺改进提供数据支撑。

### （三）后处理工序协同管控

强化矫直、锯切、检测等后处理工序的协同性，避免因工序脱节导致质量问题。矫直工序采用数控矫直机，根据型材截面（如空心、实心、复杂截面）设定矫直压力（10–20MPa）与进给速度（50–80mm/s），矫直后通过激光直线度检测仪验证，确保型材直线度偏差 $\leq 1mm/m$ ，不合格品重新矫直；锯切工序对接订单系统，自动读取型材长度要求，采用数控锯床实现长度偏差 $\leq \pm 0.5mm$ ，同时控制切口垂直度（偏差 $\leq 0.5^\circ$ ），避免切口歪斜影响后续装配；建立工序衔接机制，矫直完成后30分钟内必须进行表面检测，防止型材暴露空气中氧化；锯切后立即贴附追溯码，关联矫直、检测数据，实现后处理全流程数据互通，确保每道工序质量可追溯、问题可定位<sup>[4]</sup>。

## 四、挤压加工工艺改进的关键路径

### （一）基于数据驱动的工艺参数优化

构建挤压工艺大数据平台，整合原料（铝棒成分、炉号）、挤压过程（速度、温度、压力）、质量检测（尺寸、缺陷、力学性能）全环节数据，形成百万级样本库。采用XGBoost算法建立“参数–质量”关联模型，量化不同参数对质量的影响权重（如挤压速度对型材直线度影响权重达35%）。针对不同类型型材截面定制参数方案：复杂空心型材将挤压速度降低1–2mm/s、铝棒加热温度提高10–20℃，减少金属流动不均；实心型材优化冷却系统参数，缩短淬火时间5–8秒。通过模型迭代，使型材尺寸达标率提升至99.5%，成品率提高3%–5%，实现工艺参数从“经验判断”向“数据决策”转变。

### （二）设备协同与智能化升级

引入数字孪生技术搭建挤压生产线虚拟模型，实时映射物理

设备状态（如挤压机压力、时效炉温度），通过虚拟仿真模拟不同参数组合的成型效果，提前优化工艺（如试产新型材前，仿真测试3–5组参数，筛选最优方案），减少实体试错成本<sup>[5]</sup>。升级挤压设备控制系统，采用PLC+运动控制卡实现挤压速度、压力的闭环控制，控制精度达 $\pm 0.1mm/s$ 、 $\pm 1MPa$ 。打通设备数据链路，挤压机实时向时效炉推送型材批次信息，时效炉自动匹配对应工艺，避免人工录入偏差；牵引机与锯切机数据联动，实现“挤压–牵引–锯切”速度同步，减少型材拉伸变形，设备协同效率提升15%–20%。

### （三）全流程质量追溯体系构建

依托MES系统为每根型材分配唯一追溯码，记录全流程关键数据：原料端（铝棒成分报告、锯切精度）、挤压端（挤压参数、操作人员、设备编号）、后处理端（热处理温度曲线、表面检测结果、矫直参数）。当出现质量问题（如某批次型材硬度不足），通过追溯码10分钟内定位根源（如时效炉某区域温度偏低），避免批量返工。每月利用追溯数据开展工艺复盘，分析高频问题（如雨天铝棒氧化导致表面缺陷增多），针对性改进（如增设铝棒防潮存储区）。追溯体系使问题排查时间缩短60%，工艺改进效率提升40%，形成“数据追溯–问题定位–持续优化”的良性循环。

## 五、结语

本文围绕工业铝型材挤压加工质量控制与工艺改进，从挤压前预处理（原料、模具、设备）、过程实时管控（参数、成型、异常）、后处理优化（热处理、表面检测、工序协同）及工艺改进（数据驱动、设备智能化、全流程追溯）展开分析，核心逻辑为“全流程精准管控+数据驱动迭代”。通过上述措施，可实现型材尺寸公差达标率 $\geq 99.5\%$ 、表面缺陷率 $< 0.3\%$ 、力学性能达标率 $\geq 99\%$ ，同时缩短加工周期10%–15%、降低能耗8%–10%，有效解决行业质量波动与效率偏低的痛点。未来可进一步探索数字孪生虚拟试产、低碳挤压工艺，持续推动工业铝型材加工向更高精度、更高效益、更环保方向发展，助力企业更好适配高端市场需求。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张利叶. 工业分析与检验在质量控制与改进中的价值 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(10): 126–129.
- [4] 张福琪. 工业用精密硬质合金制品生产过程中的质量控制与改进研究 [J]. 中国金属通报, 2024(1): 157–159.
- [5] 马为民. 高强度螺母的制造工艺改进与质量控制 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2025(4): 081–084.