

影响铝挤压模具寿命的因素探讨

郑健全, 邹村先, 吴锡坤, 梁金鹏
广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528137
DOI:10.61369/ME.2025070030

摘要 : 随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展, 工业铝型材市场需求持续激增, 铝挤压模具作为型材成型的核心装备, 其寿命直接关联生产效率、产品质量与综合成本。当前行业普遍存在模具设计不合理、制造精度不足、挤压工艺参数波动大、使用维护不规范及材料环境适配性差等问题, 导致模具磨损快、疲劳失效频发, 平均寿命偏低, 严重增加企业生产成本与停机损失。基于此, 本文针对模具自身设计制造、挤压工艺参数、使用维护流程、材料与环境四大核心维度, 系统探讨影响铝挤压模具寿命的关键因素, 厘清各因素作用机制, 以期为企业制定针对性优化策略提供理论支撑, 实现模具平均寿命提升 20% 以上、生产综合成本降低 15%–20%, 助力铝挤压产业高效发展。

关键词 : 铝挤压模具; 模具寿命; 影响因素; 设计制造; 工艺参数; 使用维护; 材料环境

Research on Factors Affecting the Service Life of Aluminum Extrusion Dies by

Zheng Jianquan, Zou Cunxian, Wu Xikun, Liang Jinpeng
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 market demand for industrial aluminum profiles continues to surge. As core equipment for profile forming, aluminum extrusion dies directly impact production efficiency, product quality, and overall costs. Current industry challenges include unreasonable die design, insufficient manufacturing precision, fluctuating extrusion process parameters, non-standard usage and maintenance, and poor material-environment compatibility. These issues lead to rapid die wear, frequent fatigue failures, and short average lifespans, significantly increasing production costs and downtime losses. This study systematically examines key factors affecting aluminum extrusion die lifespan across four dimensions: die design and manufacturing, extrusion process parameters, usage and maintenance procedures, and material-environment compatibility. By clarifying the mechanisms of each factor, the research aims to provide theoretical support for enterprises to develop targeted optimization strategies. The goal is to achieve over 20% improvement in die average lifespan and reduce production costs by 15%–20%, thereby facilitating efficient development of the aluminum extrusion industry.

Keywords : aluminum extrusion die; die life; influencing factors; design and manufacturing; process parameters; use and maintenance; material environment

引言

随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展, 铝挤压模具作为铝型材成型的核心装备, 其寿命直接关联挤压生产的成本、效率与产品质量。在高端产业对铝型材需求激增的背景下, 模具寿命的延长可大幅降低模具更换频率、减少钢材消耗与停机损失, 是企业提升市场竞争力的关键环节。本文的核心目标是明确影响铝挤压模具寿命的关键维度, 厘清各因素对模具磨损、疲劳、失效的作用机制, 为企业制定针对性优化策略提供理论支撑, 最终实现模具平均寿命提升 20% 以上、生产综合成本降低 15%–20% 的目标。分析范围将覆盖模具全生命周期, 包括设计制造、挤压工艺、使用维护、材料环境四大核心维度, 聚焦“内因(模具自身)+外因(使用条件)”的双重逻辑, 系统拆解影响寿命的关键变量。

一、模具自身设计与制造的影响

(一) 模具结构设计合理性

模具结构设计直接决定受力分布与热传导效率, 是影响寿命

的核心内因。分流孔面积比失衡会导致金属流动速度不均, 使模具局部承受超额应力, 加速疲劳开裂; 工作带长度设计需精准匹配型材特性, 过长会增大摩擦磨损, 过短则易因强度不足变形失效; 模具关键部位无弧形过渡圆角、缺乏合理泄压槽, 会造成应

作者简介: 郑健全 (1991.03-), 男, 汉族, 广东佛山人, 现供职单位全称: 广东兴发铝业有限公司, 职称: 材料工程师, 学历学位: 本科、学士。

力集中，挤压时易引发裂纹扩展。优化模具结构（如采用对称分流设计、合理设置工作带长度与泄压槽尺寸、关键棱角做弧形过渡），可均衡应力分布与金属流动状态，减少局部损伤，延长模具疲劳寿命。

（二）制造加工精度控制

制造加工精度偏差会为模具寿命埋下先天隐患。模孔尺寸公差超 $\pm 0.05\text{mm}$ ，会导致挤压时金属流动紊乱，增加模具工作带的不均匀磨损；表面加工粗糙度 $Ra > 0.8\mu\text{m}$ ，会降低金属流动性，加剧摩擦磨损，还易残留铝渣形成划痕；线切割、电火花加工后未进行应力消除处理，模具内部残留的热应力会在使用中逐步释放，引发变形或开裂。采用高精度加工设备保障尺寸公差与表面光洁度，加工后通过时效处理消除残留应力，是确保模具初始性能、延长使用寿命的基础。

（三）热处理工艺质量

热处理工艺直接决定模具的硬度、韧性与耐磨损，是模具制造的关键环节。淬火温度过高（超 550°C ）会导致模具晶粒粗大、脆性增加，易出现崩裂；温度过低则模具硬度不足（ $\text{HRC} < 58$ ），耐磨损大幅下降；回火不充分会使模具残留内应力，使用中易因热冲击引发开裂；氮化处理时，氮化层厚度不均（ $< 0.15\text{mm}$ 或超 0.3mm ）会影响表面耐磨损性与基体结合力，导致氮化层脱落。规范热处理流程，精准控制淬火、回火温度与时间，确保氮化层均匀致密，可使模具获得优良的综合力学性能，提升抗磨损、抗疲劳能力^[1]。

二、挤压工艺参数的影响

（一）挤压温度匹配度

挤压温度（铝棒加热温度与模具预热温度）的匹配性直接决定模具热负荷与磨损速率，是影响寿命的关键工艺因素。铝棒温度过高（超 550°C ）会使金属流动性过强，虽降低挤压阻力，但会加剧模具表面氧化与热疲劳损伤，长期处于高温环境易导致模具工作带软化、龟裂；温度过低（低于 480°C ）则金属塑性下降，需增大挤压压力才能完成成型，会显著增加模具机械磨损与应力负荷。模具预热温度需与铝棒温度适配，控制在 $430\text{--}500^\circ\text{C}$ 区间，若预热不均（温差超 $\pm 10^\circ\text{C}$ ），挤压时模具局部因热胀冷缩不一致引发热冲击，表面易产生微裂纹并逐步扩展。因此，需根据模具材质（如 H13 钢）与型材截面特性，精准匹配铝棒与模具温度，避免热负荷过载与热冲击损伤。

（二）挤压速度与压力控制

挤压速度与压力的稳定性直接影响模具受力状态与磨损程度。挤压速度过快（超 8mm/s ）会导致金属在模孔内流动阻力激增，模具工作带与金属间的摩擦系数大幅上升，不仅加剧机械磨损，还会产生大量摩擦热，使模具表面温度骤升，加速热疲劳开裂；同时，过快的金属流动易引发紊乱，造成局部应力集中，增加模具变形风险。挤压压力需严格控制在模具许用范围（如 1800T 模具压力不超过 350MPa ），若压力超上限，模具将承受超额载荷，分流桥、工作带等关键部位易出现塑性变形或结构性

开裂。采用中低速稳定挤压（ $5\text{--}7\text{mm/s}$ ），搭配压力闭环控制系统，实时监测并调整挤压压力，可均衡模具受力与热负荷，减少磨损与疲劳损伤，延长使用寿命^[2]。

（三）冷却系统适配性

冷却系统的有效性和均匀性直接影响模具热疲劳损伤累积速率。挤压过程中，模具持续承受高温金属的传导热与摩擦热，若出口冷却强度不足（如冷却风机功率不够、喷水嘴堵塞），模具无法及时散热，长期处于 500°C 以上高温环境，表面氧化磨损加快，热疲劳裂纹易萌生；冷却水路设计不合理（如分布不均、管路狭窄）或堵塞，会导致模具局部温差超 $\pm 15^\circ\text{C}$ ，引发热胀冷缩失衡，产生热应力并加速裂纹扩展。优化冷却系统需确保水路覆盖模具关键受力部位，保持水路畅通，出口冷却装置需精准对准模具工作带区域，通过调节冷却介质流量与温度，将模具工作温度稳定在 $400\text{--}450^\circ\text{C}$ 合理区间，减少热疲劳损伤与氧化磨损，为模具寿命延长提供保障。

三、模具使用与维护的影响

（一）预热与冷却规范度

模具使用前后的预热、冷却操作规范是规避热应力损伤、延长寿命的关键环节。模具使用前未充分预热（温度低于 350°C ）或预热速度过快（升温速率超 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ），会导致模具与 $480\text{--}520^\circ\text{C}$ 的高温铝棒形成剧烈温差，引发热冲击，使模具表面产生肉眼难见的微裂纹，这些裂纹在反复挤压的热循环中会持续扩展，最终导致模具崩裂。若预热不匀（局部温差超 $\pm 10^\circ\text{C}$ ），还会造成模具各部位热胀冷缩不一致，进一步加剧内部应力^[3]。挤压结束后，直接采用强风冷或水冷至室温，会使模具表面温度骤降，内部热量无法及时散发，形成巨大热应力梯度，加速模具变形与疲劳失效。因此需严格遵循“梯度预热”原则：按 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 速率分阶段升温至 $430\text{--}500^\circ\text{C}$ ，保温 $1\text{--}2\text{h}$ 确保温度均匀渗透；挤压后将模具置于保温箱中缓冷或自然冷却，使温度缓慢降至室温，最大限度减少热应力对模具基体的损伤，为延长使用寿命筑牢基础。

（二）清洁与润滑有效性

模具清洁与润滑的有效性直接决定摩擦磨损程度，是使用维护的核心要点。挤压间隙若未及时清理，模孔、工作带及分流孔内残留的铝渣、氧化皮会在下次挤压时与金属一起流动，相当于“磨料”划伤模具表面，形成深浅不一的沟痕，这些沟痕会成为应力集中点，加速磨损与裂纹萌生；若模具表面附着油污，还会在高温下分解产生腐蚀性气体，侵蚀模具表面。润滑脂选型不当（耐高温性低于 500°C ）会导致挤压时润滑膜失效，金属与模具间摩擦系数激增，不仅加剧工作带磨损，还易引发粘模现象，强行脱模会造成模具表面撕裂。因此每次换模后，需用 $0.8\text{--}1.0\text{MPa}$ 高压气枪配合专用刮刀，彻底清理模具关键部位残留杂质；选用耐高温、粘附性强的专用挤压模具润滑脂，均匀涂抹于模孔、工作带及分流桥表面，确保形成连续致密的润滑膜，有效降低摩擦损耗，减少粘模与划伤风险，延缓模具失效。

（三）日常检查与修复及时性

日常检查与及时修复是避免小缺陷累积为致命失效的关键手段。模具使用后若未进行表面状态检查，工作带磨损量超 0.05mm 、表面微裂纹等问题未及时处理，会在后续挤压的机械负

荷与热冲击下持续恶化：微裂纹会逐步扩展为贯穿性裂纹，磨损部位会因金属流动不均产生更大应力集中，最终引发模具崩角、开裂等突发性失效，造成严重生产损失。轻微划痕、磨损未及时修复，还会导致金属流动受阻，进一步加剧模具局部损伤。因此需建立完善的检查修复机制：每次使用后通过目视与放大镜检查表面状态，累计挤压2000根型材后，采用超声波探伤排查内部微裂纹；对表面划痕、轻微磨损，用800~1000目金刚石砂轮抛光修复，确保表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ ；对磨损超差或出现小裂纹的部位，选用匹配的模具钢焊条及时补焊，补焊后重新精加工校准，通过“早发现、早修复”延缓缺陷扩展，显著延长模具服役周期。

四、材料与环境因素的影响

(一) 模具材料性能适配性

模具材料的性能是决定其寿命的核心内因，需满足耐高温、耐磨、抗疲劳的综合要求^[4]。当前主流的H13热作模具钢，其碳化物含量（如Cr、Mo、V等合金碳化物）直接影响硬度与耐磨性，含量不足会导致模具工作带硬度低于HRC58，磨损速率加快；若材料中硫、磷等杂质含量超标（>0.03%），会形成脆性相，降低模具韧性，易在挤压应力下开裂。此外，未经过电渣重熔等精炼处理的材料，内部易存在疏松、夹杂、偏析等缺陷，这些隐性问题会在反复热冲击与机械负荷下逐步暴露，引发早期失效。选用优质精炼热作模具钢，严格控制合金成分与纯度，确保材料具备均匀的组织与优良的综合力学性能，是提升模具抗磨损、抗疲劳能力的前提。

(二) 铝棒原料杂质影响

铝棒原料的纯净度直接关系模具的磨粒磨损程度，是易被忽视的关键外因。铝棒中Fe、Cu等元素含量超标（如Fe>0.3%），会形成AlFeSi等硬脆金属间化合物，其硬度远超铝基体，挤压时相当于“刚性磨料”，与模具工作带高速摩擦，加速表面磨损与沟痕形成；铝棒内部夹杂的氧化皮、非金属杂质（如耐火材料碎屑），会在金属流动过程中划伤模具表面，破坏氮化层完整性，甚至嵌入模具表面形成应力集中点，诱发微裂纹。此

外，铝棒表面氧化严重、存在油污或水分，会加剧挤压时的摩擦与腐蚀，进一步缩短模具寿命。通过光谱分析严控铝棒化学成分，采用超声波探伤排查内部缺陷，对铝棒表面进行清洁处理，可显著减少磨粒磨损与划伤风险。

(三) 工作环境腐蚀作用

挤压生产环境中的腐蚀性介质会持续侵蚀模具表面，削弱其耐磨性与结构稳定性。生产现场的水汽、油污、切削液残留，以及挤压过程中产生的铝粉与高温氧化气体，会形成腐蚀性氛围，长期作用下导致模具表面生锈、氮化层脱落，使模具基体直接暴露在金属流动与高温环境中，磨损速率大幅提升；腐蚀产物（如氧化铁、铝酸盐）与金属间的摩擦会形成“腐蚀-磨损”协同效应，加速模具表面缺陷扩展^[5]。尤其闲置模具若未做好防护，暴露在潮湿环境中易发生锈蚀，再次使用时会因表面不平整加剧磨损。保持生产环境干燥通风，定期清理设备与模具表面的腐蚀产物，对闲置模具涂抹防锈油或密封存放，可有效减轻腐蚀作用，延缓模具性能退化。

五、结语

本文从模具自身（设计制造、热处理）、挤压工艺（温度、速度、压力、冷却）、使用维护（预热冷却、清洁润滑、检查修复）、材料环境（模具材料、铝棒纯净度、腐蚀环境）四大核心维度，系统探讨了影响铝挤压模具寿命的关键因素，核心逻辑在于“内因是基础、外因是关键、多因素协同作用”，各维度相互关联、相互影响，共同决定模具的磨损与失效进程。延长模具寿命需针对性施策：选用优质适配的模具材料、优化结构设计与制造精度、精准控制挤压工艺参数、规范使用维护流程、改善生产环境防护，通过多维度协同发力，可有效解决模具磨损快、疲劳开裂等痛点。未来可进一步研发耐高温耐磨新型模具材料、引入数字孪生仿真优化设计、搭建模具状态智能监测系统（如磨损与裂纹实时预警），持续突破寿命瓶颈，助力铝挤压产业实现高效、低成本、绿色化发展，更好适配高端市场需求。

参考文献

- [1] 李健影, 陈泽. 影响铝挤压模具寿命的因素探讨 [J]. 冶金丛刊, 2003(5): 8~9+38.
- [2] 庞祖高, 苏广才, 夏薇, 黄尚猛. 影响温挤压模具的寿命因素及对策探讨 [J]. 锻压技术, 2006, 31(2): 52~55.
- [3] 王智祥, 张建新. 影响铝挤压模具寿命的因素分析 [J]. 模具工业, 2003, 29(2): 49~51.
- [4] 王泽宁, 孙金全, 崔洪芝, 李辉平, 李保民. 影响铝型材挤压模具寿命因素的分析 [J]. 热处理技术与装备, 2014, 35(5): 22~30.
- [5] 张洪辉, 隋荣勃, 王坤. 铝合金挤压模具寿命影响因素 [J]. 中国有色金属, 2013(3): 66~67.