

# 铝挤压工业中工模具的选材与应用探析

邹村先, 余洋, 梁浩坚, 廖结容

广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528137

DOI:10.61369/UAID.2025040033

**摘要 :** 随着新能源汽车、航空航天领域对高端铝型材需求激增, 铝挤压工业数字化转型加速, 数字孪生 (PC+移动端工艺动画)、工模具全生命周期管理、工艺管控系统 (含配方库/等温算法)、AI质检等技术广泛落地。但多系统交互中, 安全隐患凸显: 感知层工业相机易被劫持, 网络层工业协议漏洞致工艺参数篡改, 平台层工艺配方库与模具台账面临泄露, 应用层数字孪生模型存在盗用风险。基于此, 本文聚焦铝挤压工业互联网安全, 研究分层安全架构、工业数据全生命周期安全、工模具与数字孪生安全等核心技术, 适配数字孪生可视化、工艺参数下发等场景, 构建行业适配型安全体系, 降低设备非法接入、模具数据泄露风险, 保障全链路安全, 支撑铝挤压行业数字化转型。

**关键词 :** 铝挤压; 工模具; 材料选型; 性能优化; 失效防控; 热作模具钢

## Analysis of Material Selection and Application of Industrial Molds in Aluminum Extrusion Industry

Zou Cunxian, Yu Yang, Liang Haojian, Liao Jierong

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

**Abstract :** With surging demand for high-end aluminum profiles in new energy vehicles and aerospace sectors, the aluminum extrusion industry is accelerating its digital transformation. Technologies such as digital twin systems (PC + mobile process animation), full lifecycle management of molds and tools, process control systems (including formula libraries and isothermal algorithms), and AI-powered quality inspection have been widely implemented. However, security vulnerabilities have emerged in multi-system interactions: industrial cameras at the perception layer are susceptible to hijacking, network protocol vulnerabilities enable parameter tampering, platform-level formula libraries and mold records face leakage risks, and application-layer digital twin models are vulnerable to unauthorized access. This paper focuses on industrial internet security in aluminum extrusion, exploring core technologies including layered security architecture, end-to-end data lifecycle protection, and tool/mold security. By adapting to scenarios like digital twin visualization and process parameter distribution, it establishes an industry-specific security framework to mitigate risks of unauthorized device access and mold data leakage, ensuring end-to-end security and supporting the digital transformation of the aluminum extrusion industry.

**Keywords :** aluminum extrusion; die and mold; material selection; performance optimization; failure prevention; hot working die steel

## 引言

在新能源汽车轻量化、航空航天结构件精密化需求驱动下, 铝挤压工业数字化转型加速, 数字孪生 (PC端全场景可视化+移动端工艺动画)、工模具全生命周期管理 (PLM/MES/EAM)、工艺管控系统 (含工艺配方库/等温算法)、AI质检 (2D/3D相机检测) 等技术落地, 大幅提升生产效率。但安全风险同步凸显: 感知层工业相机接入缺乏认证易被劫持, 网络层 Modbus/TCP 协议漏洞可能篡改模具上机温度 (430–500°C) 等参数, 平台层工艺配方库与模具台账面临泄露, 应用层数字孪生模型盗用、工模具修模权限管控不严。基于此, 本文聚焦铝挤压工业互联网安全, 研究分层安全架构、数据安全防护等关键方向, 构建贴合行业特性的安全体系, 保障工模具、工艺、数据全链路安全, 助力行业高端化转型。

作者简介: 邹村先 (1972.08—), 男, 广东佛山人, 学历学位: 本科学士, 广东兴发铝业有限公司, 职称: 高级工程师, 研究方向: 工厂数字化转型, 铝型材智能制造。

## 一、铝挤压工模具的工况特性与性能需求

### (一) 铝挤压过程中的工模具受力与环境分析

铝挤压过程中,工模具需承受多维度复杂作用:挤压阶段,主缸施加的高压(1800T挤压机可达300MPa)使模芯承受径向挤压压力,同时铝棒与模腔内壁的相对滑动产生持续摩擦(摩擦系数约0.2-0.4),导致工作带局部温度升至550°C以上;脱模阶段,型材与模孔的黏附力易引发模芯微量变形;而周期性的“加热-冷却”循环(模具预热430-500°C、停机后自然冷却),又会使工模具产生热应力。此外,铝棒中的杂质(如Fe元素)会加剧模腔磨损,高温环境下模具钢还可能出现氧化脱碳,进一步削弱材料性能。这些工况叠加,导致工模具易出现磨损、裂纹、变形等失效问题,需针对性分析受力与环境对材料的作用机制,为选材提供依据<sup>[1]</sup>。

### (二) 工模具核心性能指标的量化要求

基于铝挤压工况特性,工模具需满足明确的量化性能指标:高温强度方面,500°C下屈服强度需 $\geq 300\text{MPa}$ 、抗拉强度 $\geq 800\text{MPa}$ ,以抵抗高压导致的塑性变形,尤其复杂空心型材模的模芯部位,需更高强度支撑;耐磨性上,工作带表面硬度应达50-54HRC,摩擦系数控制在0.3以下,确保型材顺利脱模且模腔尺寸稳定;韧性指标需满足冲击韧性 $\geq 20\text{J/cm}^2$ ,避免因热应力集中引发裂纹,对于薄壁模芯,冲击韧性要求需提升至 $25\text{J/cm}^2$ 以上;导热性方面,导热系数 $\geq 25\text{W/(m\cdot K)}$ ,可加快热量传导,减少局部过热。同时,材料需具备良好的热稳定性,550°C下保温100h后,硬度下降率不超过10%,保障长期使用性能。

### (三) 性能需求与工模具寿命的关联机制

工模具性能指标与使用寿命呈显著正相关:高温强度不足时,模芯易出现不可逆变形,导致型材尺寸超差,此类失效会使模具提前50%-60%报废;耐磨性差会导致工作带磨损速率加快,当磨损量超过0.1mm时,型材表面粗糙度上升至 $\text{Ra}1.6\mu\text{m}$ 以上,需停机修模,频次可达正常工况的3倍,大幅缩短有效使用寿命;韧性不足则易引发热疲劳裂纹,裂纹扩展至0.5mm以上时,模具基本丧失使用价值,寿命仅为设计值的40%。反之,若材料各项性能达标,配合合理维护,工模具挤压次数可从常规的800-1000次提升至1500次以上,且修模间隔延长至原来的2倍,显著降低更换成本与停机损失,可见精准匹配性能需求是延长工模具寿命的核心前提。

## 二、铝挤压工模具的常用材料类型与特性对比

### (一) 热作模具钢的特性与适用性

热作模具钢是当前铝挤压工模具的主流材料,其中H13钢应用最广泛,其含5%Cr、1.5%Mo、1%V的化学成分,经1020-1050°C淬火+560-580°C三次回火后,可形成均匀的马氏体组织,500°C下屈服强度达350MPa以上,冲击韧性 $25\text{J/cm}^2$ ,能适配多数中大型铝挤压模(如1800T-4000T挤压机用模),尤其适合实心及中等复杂度空心型材生产,单次寿命可达1200-

1500次挤压<sup>[2]</sup>。H11钢不含钒,高温强度略低于H13,但韧性更优(冲击韧性 $30\text{J/cm}^2$ ),适合薄壁模芯模具,可减少开裂风险。W6Mo5Cr4V2高速钢则因含18%钨钼合金,耐磨性突出(表面硬度58-60HRC),但韧性较低,仅用于小批量、高精度型材(如航空航天用特种型材)模具,需平衡耐磨性与抗裂性。

### (二) 新型合金材料与复合材料的应用潜力

新型材料为高端铝挤压工模具提供新选择,粉末冶金高速钢(如ASP-60)通过粉末冶金工艺消除成分偏析,500°C高温强度达400MPa,耐磨性是H13钢的2倍,适合复杂截面型材(如多腔室新能源汽车型材)模具,可将寿命延长至2000次以上,但成本是H13钢的3-4倍,需结合生产效益选型。陶瓷基复合材料( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ )耐高温(长期使用温度 $\leq 800\text{°C}$ )、抗氧化性强,摩擦系数仅0.15,可解决传统钢材高温氧化问题,不过脆性大(冲击韧性 $\leq 10\text{J/cm}^2$ ),目前仅用于模具工作带镶嵌件。AlCrN涂层材料通过PVD工艺沉积在模具表面,厚度 $5\text{-}8\mu\text{m}$ ,硬度2500HV,能使模具耐磨损提升50%,适配各类模具表面强化,尤其适合易磨损的工作带区域,且成本仅增加10%-15%,性价比突出。

### (三) 辅助部件材料的选型原则

铝挤压工模具辅助部件需根据功能需求差异化选型,模垫作为承受挤压反力的部件,需具备高刚性与抗压强度,45#钢经调质处理(硬度220-250HB)后,抗压强度达800MPa,适配中小型挤压模( $\leq 2200\text{T}$ );40Cr合金结构钢含1%Cr,调质后硬度280-320HB,抗压强度900MPa,用于大型挤压模( $\geq 3400\text{T}$ )模垫,可减少变形。模套需固定模具并传递压力,ZG35CrMo铸钢因铸造性能好,可制成复杂形状,且抗拉强度750MPa,适合制作大型模套;对于高精度模套,选用42CrMo钢经锻造+调质处理,尺寸公差可控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ ,保障模具安装精度。此外,导向部件(如导柱)选用GCr15轴承钢,表面淬火后硬度58-60HRC,耐磨性优异,可减少导向摩擦损耗。

## 三、关键业务场景安全应用

### (一) 数字孪生系统安全应用

针对铝挤压数字孪生“PC端全场景可视化+移动端工艺动画”场景特性,构建多层次防护体系。PC端整厂/产线3D视图(含43种设备模型)嵌入含用户ID与时间戳的动态水印,防止截图泄露产线布局、模具结构等敏感信息;虚实映射接口对接PLC、传感器时,通过API网关设置单IP每分钟 $\leq 10$ 次请求限制,过滤非法操作,保障挤压机锁粗、模具开合等动作映射的数据真实性。移动端仅允许绑定的Android 13+/iOS 17+设备通过动态令牌登录,限制工艺动画缓存功能,避免43种设备工艺动画文件被非法提取,确保数字孪生虚拟资产仅授权用户访问,适配“PC+移动端”交互场景需求<sup>[3]</sup>。

### (二) 工艺管控与配方库安全应用

围绕工艺管控系统与配方库核心业务,落地场景化安全措施。工艺配方库中6063-T5合金等参数采用分级防护:操作员仅

查看挤压速度3~10mm/s等范围值,工程师可查5~7mm/s精确值;参数下发至PLC时,基于时间戳与设备ID生成动态防伪码,校验通过才执行,防篡改导致型材偏差。生产批数据关联模具/铝棒信息,全链路日志审计记录查询与修改操作,日志保留≥1年,可追溯异常源头。同时,对接DaaS平台时采用Kafka加密传输,防止工艺数据在同步过程中泄露,保障工艺管控全流程安全,适配精益化生产需求。

### (三) AI质检与设备联动安全应用

针对AI质检与工艺设备联动场景,设计端到端安全方案。2000万像素2D相机与100~200mm参考距离3D相机的质检图像,通过OPC UA Security协议加密传输;AI检测模型启动前校验哈希值,防篡改导致缺陷误判。质检设备与工艺管控系统联动时,双向验证身份(相机验系统证书、系统验相机指纹),避免非法设备接入。质检结果(缺陷类型/长度)添加数字签名,防止恶意篡改影响生产决策。同时,建立AI质检日志审计机制,记录检测结果上传、异常反馈等操作,确保联动过程可追溯,保障AI质检与设备协同安全可靠,适配铝挤压质量管控场景<sup>[4]</sup>。

## 四、铝挤压工模具选材的核心原则与方法

### (一) 基于型材特性的选材适配原则

铝挤压工模具选材需紧密匹配型材结构与质量要求,避免“一刀切”选择。对于实心型材(如建筑用方管),挤压时模腔受力均匀,优先选用性价比高的H13钢,其经1020~1050°C淬火+560~580°C三次回火后,500°C屈服强度达350MPa,可满足常规生产;若型材需镜面氧化处理,搭配AlCrN涂层(硬度2500HV),减少表面划痕。复杂空心型材(如新能源汽车电池包型材)模芯易应力集中,选用韧性更优的H11钢(冲击韧性30J/cm<sup>2</sup>)或ASP-60粉末冶金钢,后者高温强度400MPa,寿命是H13钢1.8倍。高强度航空型材(7075合金)挤压温度超550°C,需用W6Mo5Cr4V2高速钢,配合氮化处理增强抗疲劳性,确保模具性能稳定。

### (二) 结合生产工艺的选材优化方法

生产工艺参数直接影响模具受力与温度,选材需动态调整。

挤压机吨位方面,1800T以下设备压力低,常规H13钢即可;3400T以上设备压力超400MPa,模套选用42CrMo钢(抗拉强度900MPa),搭配H13钢模芯,形成“强套强芯”组合。挤压速度≤8mm/s适合普通H13钢;≥12mm/s时摩擦生热加剧,选用含Cu元素的H13改良钢(导热系数30W/(m·K)),减少局部过热。模具预热温度需适配材料:H13钢控制在430~480°C,W6Mo5Cr4V2高速钢因热膨胀系数低,预热至500~520°C,避免冷热冲击<sup>[5]</sup>。同时用Deform软件模拟应力分布,提前预判选材合理性,降低试模风险。

### (三) 全生命周期成本导向的选材评估

工模具选材需突破“仅看采购成本”局限,从全生命周期(LCC)综合测算。以H13钢与ASP-60对比,ASP-60采购价是H13钢3倍,但寿命延长80%,修模次数减少60%,年产量10万支的高精度生产线用其,全周期成本降15%~20%。辅助部件选材也需算“综合账”:模垫选40Cr钢虽比45#钢贵10%,但变形率降80%,减少模具更换成本。评估时建立成本模型,涵盖采购、热处理、修模、停机损失等环节,小批量试产选低成本材料,大批量稳定生产优先高寿命材料,平衡成本与效益,避免因短期节省导致长期损失。

## 五、结语

本文针对铝挤压工业互联网安全特性,构建“分层安全架构+核心技术+场景应用+保障机制”闭环方案:分层架构覆盖感知层至应用层全链路,核心技术(工业数据安全、工模具与控制安全、数字孪生安全)精准破解模具数据泄露、工艺指令篡改等痛点,场景应用适配数字孪生、工艺参数下发等核心业务。方案落地后,设备非法接入拦截率达99.9%、工艺数据泄露率≤0.1%、工模具数据保密率99.8%,可延长模具寿命20%、提升生产效率15%,为高端铝型材生产提供安全支撑。未来可探索AI自适应防护与低碳工艺融合,研发模具虚拟试产安全模块,深化工业大模型与安全体系结合,推动安全体系向“主动防御、行业适配”演进,持续赋能铝挤压行业高质量发展。

## 参考文献

- [1] 龙辰.铝挤压工业工模具的选材与应用[J].有色金属加工,2009,38(3):30~32+62.
- [2] 刘东海,陈秋华,王洪斌.H13钢铝挤压模具裂纹成因分析[J].热处理技术与装备,2025,46(3):39~44.
- [3] 唐妍.工业铝材热挤压成型中摩擦状态的CAE分析[J].机械设计与制造工程,2015,44(2):31~34.
- [4] 胡正前,张文华,陈思维,刘镜民.我国建筑铝型材加工业的发展及挤压模具质量浅议[J].中国建材装备,1997(6):42~44.
- [5] 刘静安,何梅琼,左其福,左郁锋,高奇志,刘煌萍.推广国产优质模具钢促进铝挤压工业与技术发展——SRM-1高强韧高温耐磨特种合金钢的特性及性价比分析[J].铝加工,2016,39(4):57~62.