

# 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℃) 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。

## 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℃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℃、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℃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 $\geq 25\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ，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℃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 $Ra1.6\mu\text{m}$ 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℃淬火+560-580℃三次回火后，可形成均匀的马氏体组织，500℃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℃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 $\leq 800^\circ\text{C}$ ）、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。 $\text{AlCrN}$ 涂层材料通过PVD工艺沉积在模具表面，厚度5-8 $\mu\text{m}$ ，硬度2500HV，能使模具耐磨性提升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，保障挤压机微粗、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：操作人员仅

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 $\geq 1$ 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℃淬火+560–580℃三次回火后，500℃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℃，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 $\leq 8$ mm/s适合普通H13钢； $\geq 12$ mm/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℃，W6Mo5Cr4V2高速钢因热膨胀系数低，预热至500–520℃，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 $\leq 0.1\%$ 、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. 铝挤压工业中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.