

# 高强度螺母冷镦模具的结构设计优化与寿命提升研究

李兴标 葛少辉 王海斌

浙江高强度紧固件有限公司 浙江绍兴 312000

**【摘要】**高强度螺母广泛应用于航空航天等高端装备领域，冷镦成型是其规模化生产主流方式，冷镦模具作为核心工装，决定着螺母的成型精度、效率与质量，其寿命影响生产经济性与连续性。冷镦中模具长期受高压、冲击和摩擦，易磨损、开裂、变形，导致频繁更换，增加成本、影响进度。本文构建“失效机理-设计理论-优化机理-寿命保障”体系，解析失效规律，探究结构优化提升寿命的机理与路径，为高强度螺母冷镦模具精准设计及金属塑性成型模具升级提供参考。

**【关键词】**高强度螺母；冷镦模具；结构设计优化；模具寿命；失效机理；塑性成型；摩擦学

Research on Structural Design Optimization and Service Life Enhancement for High-Strength Nut Cold Heading Dies

Li Xingbiao Ge Shaohui Wang Haibin

Zhejiang High-Strength Fastener Co., Ltd., Shaoxing City, Zhejiang Province 312000

**【Abstract】** High-strength nuts are extensively utilized in advanced equipment sectors such as aerospace, where cold heading is the predominant manufacturing method. As core tooling components, cold heading dies critically determine forming accuracy, production efficiency, and product quality, with their service life directly impacting production economics and operational continuity. Under prolonged exposure to high pressure, impact forces, and friction during cold heading processes, dies frequently experience wear, cracking, and deformation, necessitating frequent replacements that increase costs and disrupt production schedules. This study establishes an integrated framework encompassing "failure mechanisms, design theory, optimization principles, and service life assurance," systematically analyzing failure patterns to identify structural optimization pathways for longevity enhancement. The findings provide valuable references for precision design of high-strength nut cold heading dies and technological upgrades in metal plastic forming die systems.

**【Key words】** high-strength nut; cold heading die; structural design optimization; die life; failure mechanism; plastic forming; tribology

## 一、引言

随着高端装备制造业发展，市场对高强度螺母的力学性能等要求提高。冷镦成型工艺因优势突出，成为其生产核心工艺，冷镦模具作为关键工装，其结构与性能影响螺母成型质量和生产连续性。但冷镦工况严苛，模具易失效，制约高效生产。长期以来，模具设计依赖经验，传统结构存在诸多问题，寿命偏低。当前研究多聚焦材料与热处理，对结构设计优化理论探究不足。制造业转型下，降低模具成本、提升效率迫切，开展相关研究，构建理论体系，对突破瓶颈、提升效益等意义重大。

## 2.1 核心失效类型与演化机理

高强度螺母冷镦模具失效是高压、冲击、摩擦等多因素协同的渐进损伤过程，失效形式多样且关联，主要有磨损、疲劳开裂和塑性变形失效，演化机理各异且相互促进（如表1）。磨损失效最常见，源于模具与坯料剧烈摩擦及磨粒研磨，使型腔尺寸精度下降、表面粗糙度增大而报废。疲劳开裂失效是长期周期性冲击载荷下的典型失效，与应力集中有关，应力集中处裂纹不断萌生扩展，达临界尺寸时模具断裂。塑性变形失效是高压致模具局部塑性流变，常与磨损、疲劳协同，加速模具整体失效。

## 二、高强度螺母冷镦模具的失效机理与影响因素

表1 高强度螺母冷镦模具主要失效类型的特征与量化表征

失效类型	主要特征	典型量化指标/数据表现
磨损失效	型腔尺寸超差，表面粗糙度增大	尺寸偏差 $> 0.05 \text{ mm}$ ；表面粗糙度 $Ra > 0.8 \mu\text{m}$
疲劳开裂失效	裂纹萌生与扩展，最终断裂	裂纹多位于应力集中区，深度 $> 0.5 \text{ mm}$
塑性变形失效	局部永久变形，轮廓失真	变形量 $> 0.1 \text{ mm}$ （在屈服强度80%以上的载荷下）

### 2.2 失效的核心影响因素解析

高强度螺母冷镦模具失效是模具结构、成型工艺、材料

特性与润滑条件协同作用的结果，各因素相互关联，决定模具服役寿命（如表2所示）。模具结构是核心内在因素，型

腔形状、过渡圆角等参数影响应力分布等,如过渡圆角小易应力集中致疲劳开裂,表面粗糙会加剧磨损。成型工艺是外部驱动力,冷锻速度等参数影响载荷与摩擦,变形量大等会

加速损伤。材料特性决定本征承载与抗失效能力,杂质等会加速失效。润滑条件通过影响摩擦状态间接作用,优质润滑可降低摩擦,润滑不足则加剧磨损与表面损伤。

表2 模具失效核心影响因素的量化作用分析

影响因素	关键参数/特征	对寿命的量化影响示例
模具结构	过渡圆角半径 (R)、表面粗糙度 (Ra)	R < 1 mm 时, 应力集中系数可 > 2.5, 寿命降低 60% 以上
成型工艺	冷锻速度、单次变形量	速度提升 20%, 摩擦热可致局部温升 > 100° C, 加速磨损
材料特征	硬度 (HRC)、韧性 (KIC)	HRC < 58 时, 耐磨性显著下降; KIC 值低, 裂纹扩展快
润滑条件	润滑膜厚度、连续性	润滑不良时, 摩擦系数可升高 30-50%, 磨损率倍增

### 2.3 冷锻成型特性对模具失效的耦合影响

高强度螺母冷锻成型工艺特性,让模具面临多重载荷与环境因素耦合,极大加剧失效风险,核心是“载荷强化损伤-损伤弱化承载能力”的恶性循环。高压与冲击载荷耦合,使模具既受静压力致变形,又因动载荷加速疲劳裂纹萌生扩展;高压增大摩擦界面压力,摩擦磨损加剧,摩擦热积累降低材料性能,形成“摩擦热-性能弱化-磨损加剧”反应。坯料变形与模具受力耦合,使型腔应力集中,优先磨损开裂,局部变形又加剧后续损伤。润滑膜在高压与摩擦热下易破裂,加剧磨损,表面损伤又破坏润滑,形成耦合效应,加速模具失效。

### 2.4 传统模具结构设计的局限

传统高强度螺母冷锻模具结构设计以经验积累为主,缺乏对成型机理等系统考量,理论与实践局限明显,难满足高效生产与长寿命需求。设计理念上,过度追求成型精度与加工便捷,忽视应力集中等问题,结构参数缺乏科学计算优化,与服役工况适配性差,易局部失效。设计方法上,采用标准化结构,未针对螺母成型特性优化,无法精准调整参数,受力不合理、磨损不均。结构协同性设计上,对各部件协同适配性考虑不足,冷却、润滑设计也被忽视,加速模具失效。传统模具寿命低,需构建科学的高性能模具结构体系。

## 三、高强度螺母冷锻模具结构设计的理论基础

### 3.1 核心理论支撑体系

高强度螺母冷锻模具结构设计理论源于模具设计学、材料力学、塑性成型理论与摩擦学四大领域,相互融合支撑,构建完整理论框架。模具设计学提供整体指导,明确组成结构等,涵盖强度校核等方法,指导核心部件布局与参数优化。材料力学为承载能力设计提供依据,解析应力应变规律,确保模具抗压冲击,指导应力集中区域优化。塑性成型理论解析材料流动与载荷分布,为型腔设计提供依据,使坯料均匀变形,降低局部载荷。摩擦学理论指导表面结构与润滑系统设计,优化表面粗糙度等,降低摩擦,减少磨损与热积累,提升模具寿命。

### 3.2 模具结构设计的核心原则

高强度螺母冷锻模具结构设计遵循“受力均衡、摩擦优化、刚度适配、寿命优先”原则,四大原则协同,兼顾成型精度、效率与寿命提升。受力均衡是核心,通过优化型腔形状等参数,减少应力集中,使模具各部件协同承载,提升整体抗失效能力。摩擦优化强调降低摩擦损伤,优化型腔表面

结构与粗糙度,减少摩擦接触面积,为润滑系统留空间,形成稳定润滑膜。刚度适配要求模具整体与局部刚度适配成型载荷,避免永久变形与尺寸偏差,减少弹性变形确保精度。寿命优先以延长服役寿命为目标,优化易失效区域,兼顾加工工艺性与经济性,实现寿命与效益协同。

### 3.3 模具结构设计的关键维度与理论逻辑

高强度螺母冷锻模具结构设计关键维度有型腔、模架、导向机构及润滑冷却结构设计,四大维度相互关联,以“型腔适配、模架保障、导向确保、润滑冷却缓解”构建高性能体系。型腔设计是核心,依塑性成型理论优化形状等,让坯料均匀变形,增大过渡圆角等降低应力集中,优化表面粗糙度减少磨损。模架设计基于材料力学,优化结构与尺寸提升刚度,合理设计连接与支撑,强化协同承载。导向机构以运动精度为核心,优化结构与配合精度,确保开合稳定、坯料定位准。润滑冷却设计依摩擦学与传热学,优化布局与位置,确保润滑、有效散热,延长模具寿命。

## 四、模具结构优化提升寿命的理论机理与协同路径

### 4.1 型腔结构优化的寿命提升机理

型腔结构是冷锻模具直接接触坯料的核心部件,优化它是提升模具寿命的关键,机理在于“应力分散-摩擦降低-损伤减缓”。型腔轮廓优化基于塑性成型理论,修正曲面曲线,让坯料流动顺畅,减少局部堆积与变形阻力,实现载荷均匀分布,增大型腔过渡圆角可降低转角区域应力峰值,减少裂纹萌生与磨损。表面结构优化通过控制粗糙度、构建微纳润滑沟槽,改善摩擦润滑条件,降低磨损。优化型腔壁厚分布,确保刚度均匀,协同承载。型腔结构优化要精准适配螺母成型需求,在保障成型精度前提下,实现应力与摩擦最优平衡,最大化提升模具寿命。

### 4.2 模架与导向结构优化的寿命提升机理

模架与导向结构优化能提升模具寿命,机理是“刚度强化-精度保障-损伤规避”。模架优化基于材料力学,通过增大截面尺寸、优化形状、强化支撑等提升整体刚度与抗变形力,有效分散成型载荷,避免型腔应力集中与偏移;优化连接结构,增强结合强度,防止连接松动引发振动与局部磨损,减少疲劳损伤。导向结构优化提升运动精度与稳定性,优化配合间隙等确保开合顺畅、同轴度高,避免型腔错位与摩擦加剧;增设缓冲装置吸收冲击能量,减少振动损伤,缓解裂纹萌生扩展。二者协同优化,同步提升承载与精度,延长模具寿命。

### 4.3 润滑冷却结构优化的寿命提升机理

润滑冷却结构优化是延长模具寿命的重要辅助手段,其机理为“润滑强化 - 降温保性 - 损伤抑制”。润滑结构优化上,通过优化润滑通道布局等,让润滑剂精准均匀覆盖摩擦界面,形成稳定润滑膜,降低摩擦系数,减少磨损;优化通道截面积与分布密度,保证润滑剂循环顺畅,带走碎屑与热量。冷却结构优化基于传热学,合理设计冷却通道位置等,让冷却介质高效带走热量,降低模具表面温度,避免材料性能下降,缓解热疲劳磨损;通道靠近型腔且均匀分布,确保温度场均匀。二者协同优化,同步抑制摩擦与热损伤,提升模具抗失效能力与寿命。

### 4.4 多维度协同优化的理论逻辑

高强度螺母冷镦模具失效是多因素作用结果,单一维度优化难最大化提升寿命,需构建“型腔 - 模架 - 导向 - 润滑冷却”多维度协同优化理论。核心是明确各维度关联与协同优先级,型腔优化是基础与关键;模架与导向优化是保障,能发挥型腔优化效果;润滑冷却优化是辅助,可缓解损伤。协同优化要精准适配各结构参数,如润滑沟槽与通道布局适配、模架刚度与型腔承载匹配等。同时兼顾成型精度、效率与经济性,用多目标优化模型平衡矛盾,像型腔与润滑冷却协同,在保障精度前提下,降低损伤,实现寿命与效益协同提升。

## 五、应用价值与保障体系

### 5.1 核心应用价值:效率与效益协同提升

高强度螺母冷镦模具结构设计优化与寿命提升,核心价值在于协同提升生产效率、产品质量与企业经济效益,推动金属塑性成型行业技术升级。生产上,模具寿命延长减少更换与停机时间,保障生产线连续运行;优化结构提升成型稳定性,降低废品率,还能适配更高冷镦速度与变形量,满足大规模生产。经济上,寿命延长降低模具采购等成本,废品率降低减少材料浪费,生产效率提升降低人工与能耗成本,增强盈利能力。行业层面,相关理论与技术可推广,推动冷镦等工艺升级,提升机械制造行业效益,助力制造业高效、节能、绿色发展。

### 5.2 技术保障:理论落地的规范与支撑

模具结构设计优化理论落地需完善技术保障体系,涵盖设计规范、仿真验证与技术标准,以实现模具寿命与成型性能协同提升。设计规范明确优化设计流程、方法及技术要求,如型腔参数取值范围、模架刚度计算标准等,为设计人员提

供统一指导,避免盲目设计,像规定不同规格螺母模具过渡圆角最小值等。仿真验证借助有限元等技术构建模型,模拟实际工况,评估优化效果,提前发现问题并调整,降低成本、缩短周期、提升可靠性。技术标准规范关键性能指标、检测与验收标准,为生产检测验收提供依据,保障理论成果转化,推动行业技术水平提升。

### 5.3 管理保障:全生命周期的寿命管控

冷镦模具结构优化后,需全生命周期管理保障寿命提升。设计阶段,组建跨学科团队整合专业资源,确保优化理论与生产需求适配;建立评审机制,从寿命、工艺、成本等多维度评审方案,保障研发科学性。生产阶段,严控原材料质量,加强过程管控,优化工艺避免缺陷,建立检验机制确保尺寸、刚度等达标。使用阶段,规范安装调试,控制工艺参数,加强日常维护,定期检查润滑冷却系统,建立台账记录信息。维护阶段,采用科学修复技术处理损伤,建立报废评估机制,收集数据持续优化设计,实现模具寿命的迭代提升。

## 六、研究结论与展望

### 6.1 研究结论

本文基于多学科理论,系统研究高强度螺母冷镦模具结构设计优化与寿命提升体系。经深入分析得出:其一,模具失效是多种失效协同演化,受多因素耦合影响,传统设计有诸多局限,难满足长期服役需求;其二,模具结构设计以多学科理论为支撑,遵循特定原则,经四大维度设计可构建高性能结构;其三,不同维度优化寿命提升机理不同,多维度协同可最大化提升寿命;其四,理论落地需技术与管理协同保障,其应用可协同提升生产、质量与效益,为模具设计优化及行业技术升级提供参考。

### 6.2 研究展望

本文成果为高强度螺母冷镦模具设计优化与寿命提升提供理论支撑,但高端装备制造业发展对模具性能要求更高,未来可从四方深化研究:一是融合智能化技术,用机器学习构建映射模型实现优化方案智能生成,结合数字孪生实时监测状态,实现动态优化与预测维护;二是融合新型材料与结构,探索复合材料等应用,结合仿生设计,开发适配新工艺的一体化模具;三是研究极端工况下模具优化体系,提升环境适应性;四是开展全产业链协同优化,突破局限,构建全流程理论体系,推动行业全面升级。

## 参考文献

- [1]余军,杨春华,葛兵.基于多工位冷镦机的螺母成型模具失效机理与抗疲劳设计优化[J].模具制造,2025,25(9).
- [2]李春玲.基于有限元的注塑模具结构设计及工艺参数优化研究[J].装备制造技术,2025(7).
- [3]林志峰,蒋杨英.通过冷镦模具改进实现紧固件工艺优化[J].金属加工(冷加工),2025(8).
- [4]蔡雅芳,陶惠敏,丁明明,等.啮合齿六角螺栓冷镦成形工艺与模具设计[J].锻压技术,2026,51(1).