

# 全金属锁紧螺母防松结构的齿形设计与锁紧性能优化研究

葛少辉 王海斌 李兴标

浙江高强度紧固件有限公司 浙江 绍兴 312000

**【摘要】**：全金属锁紧螺母因无橡胶、耐高温、抗腐蚀，在航空航天、汽车工业等振动工况领域应用广泛。其防松结构的齿形设计，关乎锁紧可靠性、服役稳定性及重复使用性能。然而在交变振动、冲击载荷下，传统齿形结构易出现齿面磨损、啮合失效、防松力衰减等问题，致使锁紧性能降低甚至失效。本文依托机械设计学、摩擦学与材料力学理论，构建“防松机理 - 齿形设计 - 性能优化”完整学术体系。系统剖析全金属锁紧螺母的防松机理与齿形作用特性，阐述齿形设计核心理论框架与适配逻辑，深入探究齿形优化提升锁紧性能的内在机理与多维度协同路径。研究表明，科学优化齿形设计，可显著增强锁紧与抗失效能力。

**【关键词】**：全金属锁紧螺母；防松结构；齿形设计；锁紧性能；啮合机理；摩擦阻力

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.012

## 1 引言

在高端装备振动服役工况下，锁紧螺母作为核心连接件，需有持久防松能力，以抵御交变振动和冲击载荷带来的连接松动风险，保障装备运行安全。全金属锁紧螺母因无橡胶等非金属材料，具备耐高低温、抗腐蚀、可重复使用等优势，逐渐取代传统非金属锁紧螺母，成为航空航天、轨道交通等领域的首选。其防松依赖特殊齿形结构啮合，通过摩擦阻力与结构约束抑制相对转动。然而，当前研究多侧重整体结构改进，对齿形设计与锁紧性能关联探究不足，传统设计依赖经验，存在啮合不充分等局限，难以满足严苛需求。所以，开展相关研究，构建科学理论体系，对突破瓶颈、提升连接可靠性意义重大。

## 2 全金属锁紧螺母的防松机理与齿形作用特性

### 2.1 核心防松机理与演化规律

全金属锁紧螺母的防松机理源于齿形结构约束、摩擦阻力与载荷传递的协同，核心是结构设计抑制螺母与螺栓相对转动，抵御振动松动风险。图1三阶段示意图呈现其动态过程：初始锁紧阶段（图左），预紧力让螺母与螺栓齿面或支撑面紧密啮合，在蓝色箭头所示预紧力下，齿面形成初始摩擦阻力，齿形几何约束限制转动趋势，为防松奠基，预紧力大小影响初始摩擦与啮合紧密程度及后续稳定性。振动承载阶段（图中），红色箭头所示交变振动载荷使螺母受周期性松动力矩，齿面摩擦与结构约束共同抗松动，齿形啮合深度、接触面积影响抗松动能力，设计不合理会出现齿面滑移等问题。性能稳定阶段（图右），若齿形稳定啮合、摩擦足够，螺母保持锁紧，反之则失效。其防松本质是结构约束与摩擦阻力协同，演化规律和齿形设计、载荷特性、材料性能相关。

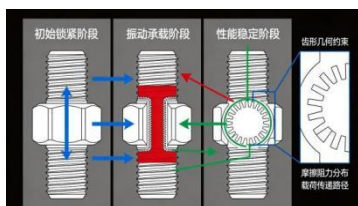


图1 全金属锁紧螺母防松机理示意图

### 2.2 齿形结构的核心作用特性

齿形结构是全金属锁紧螺母防松功能的核心载体，其作用特性体现在啮合约束、摩擦强化、载荷分散三维度，且相互协同决定锁紧性能。图2标注的关键参数，揭示了齿形设计的核心作用。啮合约束源于几何设计，齿顶与齿槽精准啮合形成机械约束，限制相对转动，被动防松稳定，能抵御高频振动松动趋势，啮合角度等参数影响约束强度，合理设计可实现无间隙啮合。摩擦强化通过优化齿面接触状态提升摩擦阻力，齿形决定接触面积等，部分特殊齿形还能强化摩擦、抑制滑移。载荷分散使预紧力与工作载荷在多齿面均匀传递，避免单一齿面过度磨损变形，延长啮合稳定性。三大特性相互支撑，啮合约束为摩擦强化打基础，载荷分散保障二者长期维持。

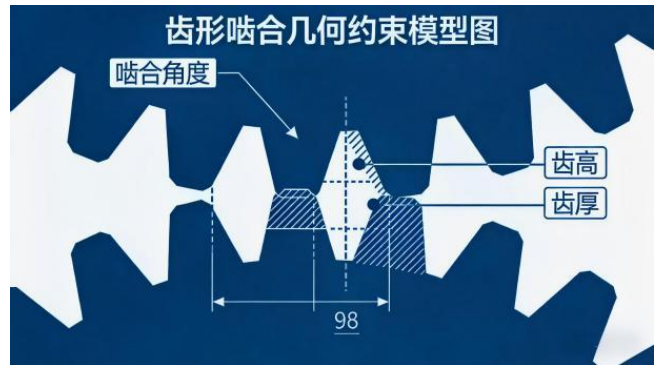


图2 齿形啮合几何约束模型图

### 2.3 锁紧性能的核心影响因素

全金属锁紧螺母的锁紧性能受齿形参数、材料特性、载荷条件协同影响，共同决定防松可靠性与服役寿命。齿形参数是核心内在因素，齿形角度、啮合深度等直接影响啮合稳定性等，如角度不当、深度不足都会带来问题。材料特性决定承载与抗磨损能力，图3显示，低耐磨材料齿面破损严重，高耐磨材料仅浅划痕，材料硬度、韧性等影响齿面抗滑移、变形能力。载荷条件是外部驱动因素，预紧力、振动载荷幅值和频率影响锁紧稳定性，预紧力不当或振动剧烈都会降低性能。此外，安装

工艺与服役环境也间接影响，安装偏差、环境恶劣会弱化材料性能，加速齿面损伤，影响锁紧。



图3 不同材料齿面的磨损对比显微图

## 2.4 传统齿形设计的局限与问题

传统全金属锁紧螺母齿形设计多基于标准化模型，未系统考量防松机理与工况特性，存在明显局限，制约锁紧性能提升。一是齿形参数不合理，多采用对称直齿或简单斜齿，啮合角度和齿厚分布未优化，易出现啮合间隙大、载荷集中，振动下齿面滑移严重。二是摩擦与约束协同不足，难以兼顾二者提升。三是抗磨损与重复使用性差，齿面接触压力不均，多次拆装后齿形变形。四是工况适配性不足，无法满足不同领域差异化需求，严苛工况下锁紧可靠性难达标。

## 3 全金属锁紧螺母齿形设计的理论基础

### 3.1 核心理论支撑体系

全金属锁紧螺母齿形设计以机械设计学、摩擦学、材料力学与啮合理论为支撑，各理论融合为齿形设计提供科学依据。机械设计学搭建整体框架，明确齿形与螺母结构的协同适配原则，指导参数与尺寸、安装方式匹配，兼顾防松、装配便捷与结构强度。摩擦学解析齿面接触摩擦规律，明确各因素与摩擦阻力关系，指导参数优化以提升摩擦、抑制滑移，还为磨损防护提供支撑。材料力学解析应力应变规律，确保齿形承载，指导参数优化分散应力。啮合理论则保障齿形精准啮合，强化约束效果。

### 3.2 齿形设计的核心原则

全金属锁紧螺母齿形设计要遵循“啮合稳定、摩擦强化、载荷均匀、工况适配”原则。啮合稳定方面，优化齿形角度等参数，实现精准无间隙啮合，形成稳定机械约束，抵御振动致齿面滑移与松动，维持长期稳定，还要兼顾拆装便捷。摩擦强化上，优化齿形参数提升齿面摩擦阻力，合理设计接触面积与压力分布，配合齿面处理技术增大摩擦系数，抵御松动力矩。载荷均匀要求优化参数使载荷均匀传递分散，避免单一齿面过度磨损变形。工况适配则要针对不同工况优化参数与结构，确保锁紧性能稳定。

## 3.3 齿形设计的关键维度与理论逻辑

全金属锁紧螺母齿形设计关键维度有齿形角度、齿面轮廓、啮合深度与齿厚分布设计，理论逻辑是“角度定约束、轮廓强摩擦、深度稳啮合、厚度散载荷”。齿形角度设计是核心，依啮合与摩擦学原理优化压力角、螺旋角，合理压力角平衡约束与受力，螺旋角适配振动强化抗转动约束。齿面轮廓设计依摩擦需求，用弧形、微齿结构增大接触面积、提升摩擦系数。啮合深度设计兼顾稳定与拆装便捷，依工况精准确定。齿厚分布设计依载荷均匀原则，优化分布，减少应力集中，提升抗磨损变形能力。

## 4 齿形优化提升锁紧性能的理论机理与协同路径

### 4.1 齿形角度优化的性能提升机理

齿形角度优化通过调整压力角、啮合角等参数，以“约束强化 - 受力优化 - 摩擦提升”提升性能。压力角优化是重点，适当增大能增强啮合约束、抗转动，抵御振动松动，但过大易致齿面接触压力集中、磨损风险增加，需依材料性能与载荷特性确定最优范围，平衡约束与受力。啮合角优化可均匀齿面压力分布，避免局部磨损变形，还能增大摩擦分量。斜齿结构的螺旋角优化能强化抗振动能力，实现渐进式啮合。各角度参数需协同匹配，防止整体性能失衡，确保最优协同。

### 4.2 齿面轮廓与啮合深度优化的性能提升机理

齿面轮廓与啮合深度优化能提升锁紧性能，机理是“接触强化 - 摩擦增效 - 啮合稳定”。齿面轮廓优化摒弃传统平面设计，采用弧形、曲面等，增大接触面积，让压力均匀分布，提升摩擦阻力、减少应力集中与磨损风险；部分微齿轮廓设计形成微小凸起，增大摩擦系数、强化防滑，还能容纳碎屑避免干涉。啮合深度优化要平衡稳定性与拆装便捷性，依工况振动强度确定深度，优化过渡圆角避免磕碰。二者协同优化，让齿面形成良好接触啮合状态，提升摩擦与抗松动能力，延长锁紧性能稳定周期。

### 4.3 齿厚分布与齿根结构优化的性能提升机理

齿厚分布与齿根结构优化可提升锁紧性能耐久性，机理为“载荷分散 - 强度强化 - 抗损提升”。齿厚分布优化依据载荷均匀传递原则，调整轴向与周向分布，让各部位均匀受力，避免单一部位过度磨损、变形或断裂；多齿啮合结构可采用非均匀齿厚设计，优化承载状态。齿根结构优化是关键，增大过渡圆角、优化截面形状可降低应力集中系数，提升抗疲劳、断裂能力，还能避免磨损加剧。二者协同优化，从载荷传递与结构强度提升抗失效能力，维持稳定啮合与摩擦，防止锁紧性能衰减。

### 4.4 多维度齿形协同优化的理论逻辑

全金属锁紧螺母锁紧性能靠齿形各参数协同，单一优化难达性能最大化，要构建“角度 - 轮廓 - 深度 - 厚度”多维度

协同优化理论。其核心是明确各维度关联与协同优先级，角度优化是基础，决定啮合约束与受力；轮廓优化是核心，影响摩擦与接触；深度优化是保障，维持啮合稳定；齿厚与齿根优化是支撑，强化强度与耐久。协同优化要精准适配参数、功能互补，还需兼顾拆装便捷等需求，用多目标优化模型平衡矛盾，实现“锁紧可靠 - 耐久稳定 - 实用经济”，提升综合性能。

## 5 应用价值与保障体系

### 5.1 核心应用价值：安全与效益协同提升

全金属锁紧螺母齿形设计优化与锁紧性能提升，核心价值在于协同提升高端装备运行安全、可靠性与企业经济效益。安全性上，优化齿形增强锁紧可靠性与抗失效能力，抵御严苛振动冲击，避免螺母松动引发部件损坏、装备故障及安全事故，为高危领域装备运行提供保障，还能提升重复使用性与服役寿命，强化安全。经济效益上，延长装备维护周期，减少维修与生产损失；优化重复使用性降低耗材成本；精准设计替代进口产品，提升企业竞争力。其理论与技术还能推动行业升级，助力制造业发展，意义广泛。

### 5.2 技术保障：理论落地的规范与支撑

齿形设计优化理论有效落地，依赖完善技术保障体系，涵盖设计规范、仿真验证与技术标准。设计规范明确基于锁紧性能提升的设计流程、方法及要求，像齿形参数取值范围、协同匹配准则、与螺母整体适配要求等，为设计人员提供理论指导，确保设计科学规范，如规定不同工况下压力角、啮合深度最优范围。仿真验证流程借助有限元等技术构建模型，模拟优化方案性能，评估效果、发现潜在问题并调整，降低成本、缩短周期。技术标准规范关键性能指标等，为生产、检测、验收提供依据，保障理论成果转化应用。

### 5.3 管理保障：全生命周期的性能管控

全金属锁紧螺母齿形优化后的锁紧性能，需全生命周期管理保障。设计阶段，组建跨学科团队整合专业资源，精准适配工况；建立评审机制，多维度评审保障研发科学性。生产阶段，严控原材料质量，加强过程管控，优化工艺控制精度，建立检验机制保证质量一致。安装阶段，规范流程，控制预紧力确保精准啮合，加强质量检验及时调整参数。运维阶段，建立监测维护机制，实时发现隐患处理；制定定期更换制度，提前换性

能衰减螺母；收集数据持续优化齿形，实现锁紧性能迭代提升。

## 6 研究结论与展望

### 6.1 研究结论

本文基于机械设计学、摩擦学与啮合理论，系统研究全金属锁紧螺母防松结构的齿形设计与锁紧性能优化的理论体系，主要结论如下：

(1) 全金属锁紧螺母的防松机理是啮合约束、摩擦阻力与载荷传递的协同作用结果，传统齿形设计因参数不合理、协同性不足，存在锁紧性能衰减快、工况适配性差等局限，难以满足严苛需求。(2) 齿形设计以四大核心理论为支撑，遵循啮合稳定、摩擦强化等原则，通过角度、轮廓、深度、厚度四大维度的设计，可构建适配工况的高性能齿形结构。3. 多维度齿形优化的性能提升机理各有侧重，角度优化平衡约束与受力，轮廓与深度优化强化摩擦与啮合稳定，厚度与齿根优化分散载荷与强化强度，协同优化可实现锁紧性能最大化。4. 理论体系的有效落地需依托技术与管理的协同保障，其应用价值体现为装备安全性与经济效益的协同提升，为全金属锁紧螺母的设计优化提供理论支撑。

### 6.2 研究展望

本文的研究成果为全金属锁紧螺母齿形设计与锁紧性能优化提供了理论支撑，未来可从以下方向深化研究：

(1) 智能化齿形设计技术的融合应用，引入机器学习算法构建齿形参数-锁紧性能-工况特性的映射模型，实现齿形方案的智能生成与精准优化；结合数字孪生技术，构建螺母全生命周期数字孪生体，实时监测齿形磨损与锁紧性能衰减，实现动态优化与预测性维护。(2) 新型齿形结构与材料的研发，探索仿生齿形、复合齿形等新型结构设计，突破传统齿形的性能局限；结合高性能耐磨材料、表面改性技术，进一步提升齿形的抗磨损、抗变形能力，延长服役寿命。(3) 极端工况下的齿形优化体系研究，针对高温、高压、强腐蚀、超高频振动等极端工况，深入探究齿形与锁紧性能的耦合机理，构建适配极端工况的齿形优化体系，提升环境适应性。(4) 多部件协同优化研究，突破单一螺母齿形优化的局限，开展螺母与螺栓、支撑面的协同优化，构建全连接系统的锁紧性能提升理论体系，推动高端装备连接技术的全面升级。

## 参考文献：

- [1] 肖华平,刘文华,程哲. 分离式弹性自紧防松螺母防松机理和防松性能研究[J]. 今日制造与升级,2025(8):48-50.
- [2] 王文超,倪琦涵,高靖靖,等. 振动环境下嵌件锁紧螺母防松性能研究[J]. 机械,2025,52(9).
- [3] 王勇胜,谢乾,刘锴,等. 表面涂镀层对紧固件防松性能的影响研究[J]. 宇航总体技术,2025,9(4).
- [4] 徐洪鹏,常志刚,卢红立,等. 自锁螺母防松性能衰减机理研究[J]. 宇航总体技术,2025,9(2).