

铝合金螺栓连接副在振动载荷下的松动机理与防松措施分析

王加渊

浙江国盛汽车科技股份有限公司 浙江温州

【摘要】针对铝合金螺栓连接副在振动载荷下的松动机理及防松措施展开系统分析。通过研究振动环境下连接副的动力学行为特征，揭示松动演化过程及影响因素。评估传统防松方式在铝合金连接中的适用性，指出其在摩擦维持、机械锁紧及装配适应性方面的不足。提出一种融合多种防松机制的复合型解决方案，并设计相应的实现路径。通过对比实验验证各类防松方式在不同振动条件下的性能表现，结果显示新型策略在预紧力保持和抗滑移能力方面更具优势，为提升连接结构稳定性提供理论依据与工程支持。

【关键词】铝合金螺栓；振动载荷；松动机理；防松措施；连接稳定性

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250058

Analysis of loosening mechanisms and anti-loosening measures for aluminum alloy bolted joints under vibratory loads

Jiayuan Wang

Zhejiang Guosheng Auto Technologies Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang

【Abstract】This paper presents a systematic analysis of the loosening mechanisms and anti-loosening measures for aluminum alloy bolted joints under vibratory loads. By investigating the dynamic behavior characteristics of the joint under vibration, the evolution process and influencing factors of loosening are revealed. The applicability of traditional anti-loosening methods in aluminum alloy connections is evaluated, highlighting their limitations in friction maintenance, mechanical locking, and assembly adaptability. A novel composite anti-loosening solution integrating multiple mechanisms is proposed, along with the corresponding implementation approach. Comparative experiments are conducted to evaluate the performance of various anti-loosening methods under different vibration conditions. Results show that the new strategy offers superior advantages in maintaining preload and resisting slip, providing theoretical support and engineering guidance for enhancing the stability of bolted connections.

【 Keywords 】 Aluminum alloy bolt; Vibratory load; Loosening mechanism; Anti-loosening measure; Connection stability

引言

在现代机械系统中，铝合金螺栓因其轻质高强度特性被广泛应用于航空、汽车及轨道交通等领域。然而，在复杂振动环境下，螺栓连接副易发生松动，进而引发结构失效甚至安全事故。由于铝合金材料的力学特性不同于钢制件，使得传统防松方式难以满足实际工况需求。当前对松动机理的认知尚不够深入，缺乏系统的防松优化设计方法。为此，有必要从动力学行为、防松机制与实验验证等方面开展综合研究，以提升连接结构在振动载荷下的稳定性与可靠性。

1 振动环境下螺栓连接副行为特征分析

由于螺纹接触面之间的相对滑动、微小位移以及预紧力的周期性波动，连接系统内部逐渐积累能量耗散和局部塑性变形，进而引发松动趋势。这种松动过程通常由多个物理机制共同驱动，包括螺纹副之间的摩擦磨损、支承面的压陷效应以及材料本身的疲劳损伤演化等。随着振动频率与幅值的变化，连接副所承受的交变应力也会发生相应改变，导致其在不同阶段表现出差异化的响应特征。从动力学角度出发，螺栓连接副在振动环境中的行为可以分为初始稳定阶段、松动萌生阶段与加速松动阶段。

在初始阶段, 连接结构仍能维持设计要求的预紧力水平, 各接触界面处于相对稳定的结合状态。

但随着振动持续施加, 螺纹牙间的微观滑移开始加剧, 接触压力分布出现重排, 局部区域的摩擦状态由静摩擦向动摩擦转变, 从而削弱了整体的抗松能力。进入松动萌生阶段后, 连接副的轴向刚度明显下降, 螺栓杆部产生微小旋转趋势, 使得扭矩-预紧力关系偏离理想状态, 造成锁紧性能恶化。振动方向与加载路径对螺栓连接副的松动行为具有显著影响。当振动方向与螺栓轴线垂直时, 横向振动会诱发更大的剪切应力, 促使螺纹配合面之间发生错动, 进一步加剧松动进程。而在复合振动条件下, 即同时存在轴向与横向激励的情况下, 连接系统的动态响应更加复杂, 可能出现多自由度耦合运动, 使松动机理呈现多因素交织的特征。与此连接件材料的本构关系也会影响松动行为的发展, 铝合金因其较低的弹性模量与较高的热膨胀系数, 在振动环境中更易出现预紧力衰减现象。

温度变化、润滑状态及表面处理工艺等因素也在一定程度上调控着连接副在振动条件下的行为表现^[1]。高温环境可能引起材料软化或氧化层脱落, 降低摩擦系数稳定性; 而润滑剂的存在虽然有助于装配阶段的扭矩控制, 但在长期振动作用下容易迁移或失效, 造成摩擦界面失稳。在研究振动环境下螺栓连接副的行为特征时, 必须综合考虑外部载荷、材料属性、接触状态及环境因素之间的相互作用, 以揭示其内在的动力学演化规律。

2 传统防松方式在铝合金连接中的局限性

由于铝合金的物理特性与钢制材料存在显著差异, 使得传统防松策略在该类连接结构中难以充分发挥预期效果。摩擦型防松措施主要依赖螺纹接触面之间的正压力维持锁紧状态, 如弹簧垫圈、对顶螺母等。然而, 在铝合金连接中, 材料较低的屈服强度和较高的塑性变形倾向导致预紧力随时间快速衰减。在持续振动作用下, 垫圈的弹性补偿能力有限, 无法有效抵消由微动磨损引起的轴向位移, 致使摩擦阻力迅速下降, 防松功能减弱。铝合金表面硬度偏低, 易在装配过程中发生局部压痕或塑性流动, 进一步降低接触界面的稳定性。

机械防松方式通过附加元件限制螺纹副的相对转动, 如开口销、止动垫片及串联钢丝等。此类方法

虽然在一定程度上提高了连接副的抗松能力, 但在实际应用中存在操作复杂、安装效率低的问题。尤其对于大批量装配场景, 这类防松结构的可重复性和通用性较差, 且容易因人为操作不当而影响防松可靠性^[2]。铝合金构件在受力后容易产生较大的支承面沉陷, 造成止动元件失效或脱离原始定位位置, 削弱整体防松效果。采用破坏式防松手段, 如螺纹胶固接、冲点铆合等方式, 虽能在极端条件下提供较强的锁紧性能, 但其不可拆卸的特点限制了在需要频繁维护或调整场合的应用。

特别是在铝合金材料中, 化学粘结剂的固化收缩可能引发局部应力集中, 影响连接区域的力学性能; 而冲点铆合则可能因材料延展性较好而导致锁紧点滑移或失效, 达不到理想的防松效果。除此之外, 传统防松设计多基于经验公式或标准化规范进行选型, 缺乏针对特定材料组合与载荷条件的系统化匹配分析。铝合金螺栓连接副在振动环境下的松动行为具有高度非线性特征, 传统方法难以适应动态变化的摩擦状态和能量耗散机制, 导致防松性能不稳定。因此, 在面对现代工程对高可靠性连接系统的日益增长需求时, 仅依赖现有防松方式已难以满足实际应用要求。

3 新型复合防松策略的设计与实现路径

在振动载荷持续作用下, 单一防松机制难以有效应对铝合金螺栓连接副所面临的复杂松动问题。为此, 提出一种融合多种防松原理的复合型防松策略, 通过多机制协同作用提升连接系统的抗松动能能力。该策略以摩擦控制为基础, 结合机械约束与材料改性手段, 形成多层次防护体系, 从而实现对连接副松动行为的有效抑制。该复合防松设计的核心在于构建动态自适应的锁紧结构。在螺纹配合区域引入具有高摩擦稳定性的涂层或表面处理层, 增强接触界面在长期振动下的摩擦保持能力。

在连接结构中集成微型弹性补偿元件, 用于实时调节预紧力变化, 弥补由微动磨损和塑性变形引起的轴向位移损失。该弹性元件采用非线性刚度设计, 能够在不同振动强度下维持稳定的力学响应, 避免因刚度突变导致的锁紧失效。在结构层面, 采用双重复合锁紧方式, 将机械止动装置与可控粘粘材料相结合。一方面, 通过可调式止动环限制螺纹副之间的相对旋转自由度, 防止因横向振动引发的

扭矩衰减；另一方面，在关键接触面之间引入可控固化胶粘剂，其初始状态为低粘度流体，装配完成后在外加激励条件下实现定向固化，形成局部高强度粘结区，进一步提高连接副的整体稳定性^[3]。这种物理与化学手段的联合应用，不仅提升了防松可靠性，还保留了一定程度的可拆卸性，满足工程维护的实际需求。为了实现该防松策略的工程化应用，需建立完整的制造与装配流程。

采用精密加工工艺确保螺纹牙形与配合间隙的一致性，为后续功能化处理提供良好基础。在表面处理环节引入等离子喷涂或微弧氧化技术，形成具有高硬度与耐磨性能的复合涂层，提升接触界面的抗滑移能力。随后，通过专用设备完成弹性元件的精准定位与安装，并确保其在服役过程中不发生偏移或脱落。在装配过程中根据实际工况设定粘结材料的固化参数，使粘结强度与连接副受力状态相匹配，避免过早失效或过度固化的风险。针对该复合防松策略的应用效果，还需配套开发相应的检测与评估方法。

4 振动载荷下防松性能的对比实验分

为系统评估不同防松策略在振动环境中的实际效果，采用标准化实验平台对多种典型防松方式进行动态性能测试。实验设计模拟实际工程中常见的轴向与横向复合振动载荷条件，设定不同频率与加速度幅值组合，以覆盖广泛的应用场景。通过高精度传感器实时采集螺栓连接副在振动过程中的预紧力变化、扭矩衰减及相对位移等关键参数，构建完整的力学响应数据集。

实验对象涵盖传统摩擦型、机械锁紧型以及新型复合防松结构等多种类型，确保样本具有代表性与可比性。所有试样均在同一装配条件下完成拧紧操作，控制初始预紧力一致，并在相同环境温湿度下进行测试，避免外部因素干扰实验结果。每组实验重复多次，以提高数据的统计有效性与结论的可信度。在实验过程中，重点关注连接副在持续振动作用下的松动演化趋势。通过连续监测预紧力的变化曲线，识别各类型防松结构在不同振动强度下的失效临界点。同时记录连接副发生微小旋转的角度偏移量，作为衡量其抗松动能力的重要指标。

结合高频摄像技术捕捉接触界面的动态行为，分析松动初期的微观滑移现象及其对整体连接性能的影响^[4-8]。实验数据显示，传统摩擦型防松结构在

低频高幅振动条件下预紧力衰减较快，锁紧性能随振动时间延长明显下降。机械锁紧方式虽能延缓松动进程，但在多向振动作用下存在定位元件失效或脱落风险，导致防松效果不稳定。相比之下，新型复合防松策略表现出更优的动态稳定性，在多种振动条件下均能有效维持较高预紧力，并长时间抑制螺纹副间的相对运动。通过引入能量耗散分析方法，进一步揭示连接系统内部损耗机制，发现复合防松结构凭借多重锁紧功能，在不同阶段分别实现摩擦阻尼、弹性补偿与局部粘结效应，显著提升了能量吸收能力，降低了松动风险。

5 结语

在振动载荷作用下，铝合金螺栓连接副的松动问题已成为影响结构稳定性的关键因素。传统防松方式因材料特性与载荷环境的不匹配而表现出一定局限性。通过引入复合防松策略，结合表面处理、弹性补偿与局部粘结等多种机制，有效提升了连接副的抗松动能力。实验结果表明，新型防松方法在动态环境下具有更优的稳定性与可靠性。未来可进一步探索智能化监测与自适应调节技术的融合应用，推动防松设计向更高精度与更广适用性方向发展。

参考文献

- [1] 何志全,邱慧慧,孙珺珩,等.热力作用下铝合金结构应力及强度研究[J].机械强度,2025,47(05):140-151.
- [2] 李杰,赵鹏,张剑睿,等.基于损伤力学的 7050-T7451 铝合金蠕变本构模型[J].机械强度,2025,47(05):152-158.
- [3] 宗志坚,王飞,刘华荣,等.铝合金型材的轻量化原理[J].机械设计,2025,42(05):9-15.
- [4] 饶邦政,黄亮,苏东坡,等.铝合金框架螺栓连接节点抗震性能研究[J].河南科学,2025,43(04):469-481.
- [5] 柳荣星,张志楠,刘马宝,等.气密顶板螺栓连接结构改进设计及试验验证[J].工程与试验,2025,65(01):64-67+70.
- [6] 张小朋.重型牵引车铝合金车架结构-连接-性能轻量化优化设计方法研究[D].吉林大学,2025.
- [7] 孙晓光,陈志坚,王睿,等.循环盐雾环境中碳纤维复合材料-6082 铝合金螺栓连接结构中铝合金的腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2024,45(04):26-32.
- [8] 刘超,孟庆勋,潘新,等.CFRP/铝合金间隙叠层螺栓连接孔周拉伸失效仿真[J].机械科学与技术,2025,44(04):730-736.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS