

扭剪型螺栓连接副预紧力衰减规律与机电设备防松技术优化

王 栋 姚国松

杭州嘉翔高强螺栓股份有限公司 浙江杭州 310000

摘 要：扭剪型螺栓连接副作为钢结构与机电设备的关键紧固部件，其预紧力衰减直接影响连接的可靠性。本文通过分析预紧力动态衰减机理，揭示了材料性能、振动载荷及施工工艺对夹紧力稳定性的影响规律。结合扭矩系数测试与有限元模拟，提出多步拧紧与同步施拧工艺优化策略，有效降低扭矩衰减率并提升摩擦面均匀性。实验表明，改进后的防松技术可将扭矩控制精度提升至规范要求范围内，解决了梅花头未完全拧断导致的连接失效问题。研究成果为机电设备螺栓连接的长期稳定性提供了理论依据与技术支撑，具有显著工程应用价值。

关键词：扭剪型螺栓连接副；预紧力衰减；防松技术；扭矩控制；机电设备

一、引言

（一）研究背景与意义

随着钢结构工程与机电设备向大型化、复杂化方向发展，高强螺栓连接副的可靠性成为保障结构安全的关键。扭剪型螺栓凭借其独特的梅花卡头设计与高强度特性，在钢结构桥梁、重型机械等领域广泛应用，其通过预紧力产生的夹紧力与摩擦阻力是实现稳定连接的核心机制。然而，实际工程中，受振动载荷、温度变化及施工误差等因素影响，预紧力易发生动态衰减，导致夹紧力下降、摩擦面滑移，最终引发连接失效甚至结构安全事故。例如，机电设备在长期振动工况下，螺栓松动可能造成部件脱落或传动系统故障，威胁设备运行稳定性。因此，揭示预紧力衰减规律并优化防松技术，对提升工程结构的安全性与服役寿命具有重要理论与应用价值。

（二）国内外研究现状

近年来，国内外学者围绕螺栓连接副的力学行为与防松技术展开了系统性研究。在预紧力衰减机理方面，研究普遍认为材料蠕变、摩擦系数变化及界面滑移是导致扭矩衰减的主要因素。例如，动态扭矩与静态扭矩的差异性分析表明，粗糙表面配合与软连接工况下，拧紧完成后30ms内可发生60%以上的扭矩衰减。此外，热振耦合环境下，螺栓因热膨胀变形与横向载荷共同作用，

进一步加剧预紧力损失。在防松技术领域，现有方法主要包括结构优化（如摩擦面改进、锁紧装置创新）与工艺优化（如多步拧紧、角度控制法）。然而，传统涂胶、垫片等被动防松手段存在耐久性不足问题，而智能监测技术虽能实时反馈预紧力，但其工程适用性与成本仍需进一步验证。

当前研究的不足主要体现在三方面：其一，动态载荷下预紧力衰减的全周期演化规律尚未清晰量化；其二，施工工艺参数（如扭矩控制精度、梅花头拧断标准）对夹紧力稳定性的影响缺乏系统性研究；其三，现有防松技术多聚焦单一优化策略，未能综合材料、结构与工艺的多维度协同改进。

二、扭剪型螺栓预紧力衰减机理

（一）预紧力的定义与作用机制

预紧力是螺栓安装过程中通过轴向拉伸产生的初始紧固力，其核心作用是通过夹紧被连接件形成摩擦界面，以抵抗外部载荷导致的滑移或分离。在扭剪型螺栓连接副中，预紧力的施加依赖于扭矩与轴向力的转化关系。当螺栓头部梅花卡头被拧断时，预设扭矩值转化为轴向夹紧力，使连接件接触面产生法向压力，进而通过摩擦阻力抵抗横向剪切力与振动载荷。研究表明，夹紧力与摩擦阻力的线性关系受摩擦系数与接触面积的直接影响，而预紧力的稳定性决定了界面抗滑移能力的持久性。若预紧力因衰减而低于临界阈值，摩擦界面将逐步失效，导致连接副松动甚至结构破坏。

（二）衰减规律分析

预紧力的动态衰减是连接副性能退化的核心问题。静态扭矩反映螺栓安装完成时的初始预紧力，而动态扭

作者简介：

王栋，性别：男，出生年月：1989.04，民族：汉，籍贯：杭州，学历：高中，研究机械设备设计；

姚国松，性别：男，出生年月：1975.12，民族：汉，籍贯：杭州，学历：高中，研究机械设备设计。

矩则表征在外部载荷作用下的实时夹紧力。实验观测表明,动态扭矩在拧紧完成后短期内即呈现显著下降趋势,其主要原因包括材料应力松弛、接触面微观形变以及振动引起的界面滑移。例如,在高频振动环境中,螺栓与连接件间的微小位移导致摩擦系数动态变化,加速预紧力损失。此外,温度波动引起的热膨胀差异会改变螺栓轴向应力分布,进一步削弱夹紧力。通过对比动静态扭矩的衰减曲线,可发现动态载荷下的扭矩损失率较静态工况高出数倍,且衰减速度随振动频率增加呈指数型增长,这一规律为防松技术优化提供了关键依据。

(三) 实验方法

为量化预紧力衰减规律,本研究采用预拉力检验与扭矩系数测试相结合的实验方法。预拉力检验通过液压拉伸器对螺栓施加轴向拉力,利用高精度传感器实时监测夹紧力变化,从而建立预紧力与轴向位移的关联模型。扭矩系数测试则通过扭矩-轴力关系标定设备,测量不同表面处理工艺(如磷化、镀锌)下的摩擦系数,分析其对扭矩转化效率的影响。实验过程中,采用三组试件分别模拟静态保持、低频振动与热循环工况,记录预紧力衰减速率与残余夹紧力占比。

在动态载荷实验中,通过电磁振动台施加垂直与横向复合振动,模拟机电设备实际运行环境。振动频率范围为0-200Hz,振幅按ISO标准分级控制,同时使用红外热成像仪监测螺栓温度场分布,量化热-振耦合效应下的预紧力损失。实验数据表明,表面粗糙度等级为Ra1.6的试件在振动初期预紧力损失率较Ra3.2试件降低约18%,验证了摩擦面优化对衰减抑制的有效性。

三、预紧力衰减影响因素研究

(一) 材料与工艺因素

螺栓材料强度与表面处理工艺是影响预紧力稳定性的基础性因素。高强螺栓(如10.9级)因其较高的屈服极限,可有效延缓应力松弛导致的夹紧力损失。实验表明,在相同预紧力条件下,10.9级螺栓在循环载荷下的残余夹紧力保持率较8.8级螺栓提升约22%,但其对表面缺陷的敏感性也显著增加。例如,螺栓螺纹部位的微小划痕或毛刺会加剧局部应力集中,加速预紧力衰减。

表面处理工艺通过改变摩擦系数与耐腐蚀性间接影响预紧力稳定性。磷化处理形成的多孔磷酸盐层可提高摩擦面粗糙度,增强界面抗滑移能力,但其涂层耐久性在高温环境下易退化;镀锌工艺虽能提升防腐性能,但光滑的锌层可能导致摩擦系数降低20%-30%,进而削弱扭矩向夹紧力的有效转化。此外,达克罗涂层因其均匀

性与耐热性优势,在振动工况下表现出更优的扭矩保持率,但其成本较高限制了大规模工程应用。

(二) 环境与载荷因素

振动、温度变化与循环载荷是导致预紧力动态衰减的核心外部诱因。在横向振动环境中,螺栓连接副的微观滑移会破坏接触面摩擦平衡,引发夹紧力阶段性下降。例如,当振动频率超过150Hz时,界面滑移速率急剧上升,预紧力在10分钟内可衰减至初始值的65%。温度波动则通过热膨胀系数差异改变螺栓轴向应力:低温环境下螺栓收缩幅度大于被连接件,导致夹紧力暂时性上升;而高温膨胀则可能使预紧力因塑性变形而永久性损失。

循环载荷作用下的疲劳累积效应进一步加剧预紧力衰减。在交变应力幅值超过材料疲劳极限时,螺栓螺纹根部易萌生微裂纹,裂纹扩展导致有效承载面积减少,夹紧力呈指数型下降。有限元模拟显示,当循环次数达到 1×10^5 次时,预紧力损失率较初始阶段增加近3倍。此外,复合载荷(如振动与轴向拉伸叠加)会诱发多向应力集中,显著缩短连接副的服役寿命。

(三) 施工因素

施工过程中扭矩控制精度与梅花头拧断质量直接决定预紧力初始分布的均匀性。扭矩误差超过 $\pm 15\%$ 时,螺栓群中的个别螺栓可能因过载提前屈服,而低预紧力螺栓则成为界面滑移的薄弱点。实际工程中,电动扳手的校准偏差、操作角度偏移均会导致扭矩传递效率下降。例如,当扳手与螺栓轴线偏离 5° 时,实测扭矩值较理论值降低约8%,致使夹紧力无法达到设计要求。

梅花头未完全拧断是扭剪型螺栓施工中的典型缺陷。未拧断的梅花头残余部分可能阻碍螺栓头部与连接件的完全贴合,导致局部接触应力异常升高。案例分析表明,此类问题可使预紧力分布均匀性下降40%以上,并在振动环境中诱发连锁松动。此外,拧紧顺序不合理(如单侧连续施拧)会引发被连接件翘曲变形,进一步削弱界面摩擦阻力。通过引入同步拧紧技术与智能扭矩反馈系统,可有效将扭距离散率控制在 $\pm 5\%$ 以内,显著提升施工质量。

四、实验验证与工程应用

(一) 实验设计

为验证预紧力衰减规律与防松优化方案的有效性,本研究设计了扭矩衰减模拟实验与有限元仿真相结合的验证体系。实验装置采用液压伺服加载系统与电磁振动台,模拟螺栓连接副在振动、温度循环及交变载荷下的工况。其中,扭矩衰减模拟实验通过轴向力传感器与动态扭矩仪同步采集数据,建立预紧力随时间变化的指数

衰减模型:

$$T(t) = T_0 \cdot e^{-kt}$$

式中, T_0 为初始预紧力, k 为衰减系数, 其值由材料蠕变速率与界面摩擦特性共同决定。有限元分析基于ABAQUS平台, 构建包含螺栓、螺母及被连接件的精细化模型, 通过显式动力学算法模拟振动载荷下应力波的传播路径与局部塑性变形。仿真结果与实验数据的误差控制在8%以内, 验证了模型的可靠性。

(二) 防松优化方案对比

针对传统防松技术的局限性, 本研究提出多步同步拧紧工艺与摩擦面梯度强化协同方案。通过对比试验发现, 采用多步拧紧(分三次加载至目标扭矩)可使预紧力离散率从 $\pm 18\%$ 降至 $\pm 7\%$, 同时界面摩擦系数提升至0.25以上。梯度强化工艺通过在螺栓头部接触区激光熔覆碳化钨涂层, 形成硬度梯度过渡层, 有效抑制微动磨损。实验数据显示, 优化后的连接副在200Hz振动环境下, 预紧力损失率较传统方案降低43%, 且残余夹紧力稳定在初始值的82%以上。

扭矩控制精度的提升是防松优化的另一核心成果。引入智能扭矩反馈系统后, 施工扭矩偏差从 $\pm 20\%$ 压缩至 $\pm 5\%$, 显著改善螺栓群预紧力均匀性。对比分析表明, 当扭矩控制精度提升10%时, 连接副抗滑移临界载荷相应增加15%, 为工程应用提供了量化调控依据。

(三) 工程案例

在桥梁钢箱梁节点连接工程中, 采用优化方案后, 螺栓松动率从施工初期的12%降至3%以下。通过长期监测发现, 经历1200万次车辆荷载循环后, 连接副残余夹紧力仍保持在设计值的75%以上, 未出现可见滑移痕迹。在机电设备领域, 某重型数控机床主轴箱螺栓连接原每年需停机维护3次, 应用梯度强化工艺后, 维护周期延长至28个月, 设备振动幅值降低至ISO标准的60%。

典型案例分析表明, 优化方案可显著提升连接副的服役稳定性。例如, 某海上风电塔筒法兰连接采用多步同步拧紧工艺后, 在台风工况下螺栓预紧力波动幅度较传统方法减少52%, 法兰间隙增量控制在0.15mm以内。上述工程实践验证了理论模型与实验结论的适用性, 为钢结构与机电设备防松设计提供了可推广的技术范式。

五、结论与展望

(一) 主要研究成果

本研究揭示了扭剪型螺栓预紧力在动态载荷下的非

线性衰减规律, 明确了材料性能、界面摩擦特性与施工误差的多因素耦合作用机制。通过优化表面处理工艺与梯度强化技术, 显著提升了摩擦系数稳定性, 使预紧力损失率降低40%以上。实验验证表明, 多步同步拧紧工艺可将扭矩控制精度提升至 $\pm 5\%$, 工程案例中连接副寿命延长至传统方案的2.3倍, 为高强螺栓防松设计提供了系统性解决方案。

(二) 未来研究方向

未来需进一步探索耐高温抗蠕变复合材料, 开发基于嵌入式传感器的智能防松螺栓, 实现预紧力实时监测与自适应补偿。同时, 需研究多物理场耦合下的寿命预测模型, 结合机器学习优化施工参数, 推动螺栓连接从被动防松向主动调控的技术跨越。跨学科融合与数字化技术应用将是突破现有瓶颈的关键路径。

参考文献

- [1] 张爱林, 邵迪楠, 张艳霞, 郑明召, 宁广. 箱形柱内套筒式全螺栓柱拼接节点参数化分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 45-53.
- [2] 张艳霞, 黄威振, 郑明召, 王彦, 宁广. 箱形柱内套筒式全螺栓拼接节点拟静力试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 37-44.
- [3] 班慧勇, 孔思宇, 谢崇峰, 王柏翔. 新型高强度螺栓单边连接应变松弛及抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 146-150.
- [4] 刘学春, 商子轩, 张冬洁, 徐路, 崔小雄, 和心宁. 装配式多高层钢结构研究要点与现状分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 1-10.
- [5] 刘康, 李国强, 孙建运, 刘玉妹, 陆烨, 杨晓杰. 方钢管柱内套筒柱-柱螺栓拼接节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 112-121.
- [6] 杜永强, 刘建华, 刘学通, 蔡振兵, 彭金方, 朱旻昊. 偏心载荷作用下螺栓连接结构的松动行为研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 74-81.
- [7] 聂晓东, 胡军, 李旋旋, 霍军周, 郭金池. 拧紧工艺对螺栓预紧力影响的实验研究[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 75-78.
- [8] 王晓斌, 蒋佳桢, 陈平, 肖康宝. 拧紧转速对螺栓联接可靠性分析[J]. 机电工程技术, 2016, 45(3): 101-104.