

法兰连接密封性能优化与螺栓预紧力控制策略

江帆 刘芳杏

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

摘要: 法兰连接是工业管道与压力容器常用可拆卸密封结构,其密封性能关乎设备安全与介质泄漏防控。螺栓预紧力是法兰连接系统核心控制参数,影响垫片压紧、法兰变形及长期密封可靠性。本文分析法兰连接密封机理与失效模式,揭示预紧力对密封性能的影响规律,从精确计算、均匀性控制、工艺优化、状态监测四个方面构建控制策略体系。预紧力离散度与衰减是密封失效主因,采用精细化工艺、新型技术与智能监测可提升密封可靠性与服役寿命,为工业管道密封设计与运维提供支撑。

关键词: 法兰连接; 密封性能; 螺栓预紧力; 垫片; 控制策略

引言: 法兰连接因拆卸便捷、密封可靠、适应性强,在石油化工、核电能源、船舶制造、航空航天等领域广泛应用。其密封性能由螺栓预紧力、垫片特性、法兰刚度及工况条件共同决定,螺栓预紧力是唯一可主动控制的关键参数。工程中,因预紧力控制不当致密封失效问题频发,轻则介质泄漏、污染环境,重则引发事故、造成伤亡。传统预紧依赖经验,存在预紧力不足、分布不均、松弛衰减等问题,难以满足严苛密封要求。故研究预紧力影响规律、建立控制策略对提升法兰连接系统安全可靠意义重大,本文将从密封机理展开分析并提出策略。

1 法兰连接密封机理与失效模式

1.1 法兰连接结构组成与密封原理

法兰连接系统由法兰盘、螺栓紧固件、垫片构成。法兰盘提供支撑与连接接口,螺栓用预紧力压紧两片法兰,垫片填充密封面,靠压缩变形形成密封屏障。其密封原理基于垫片材料特性:预紧力使垫片压缩变形,填充微观不平区域形成初始密封;介质压力作用时,垫片在预紧力基础上承受附加载荷,维持接触应力阻止泄漏。核心指标是垫片表面残余压应力,须大于介质压力。法兰密封属强制密封,可靠性取决于预紧力控制。垫片类型多样,不同材料特性影响预紧力控制策略选择。

1.2 密封失效模式与机理分析

法兰连接密封失效主要是介质泄漏,有三种模式。界面泄漏是介质沿垫片与法兰密封面逸出,因预紧力不足、压紧不均或密封面缺陷;渗透泄漏是介质透过垫片渗出,多见于非金属垫片,与材料致密性等有关;结构失效包括螺栓断裂等,因预紧力过大或载荷波动超限。从机理看,预紧力不足使垫片压缩不够,接触应力下降致泄漏;预紧力离散度大造成法兰偏转,局部垫片压紧不足;长期运行中螺栓预紧力松弛,密封性能劣化,工

况波动也会加剧失效风险^[1]。

1.3 影响密封性能的关键因素

法兰连接密封性能受多因素耦合影响,螺栓预紧力是首要控制因素,其大小、均匀性、稳定性直接决定密封效果。垫片特性包括材料性能、结构形式、尺寸规格,不同垫片的压缩回弹曲线、应力松弛率、蠕变特性差异显著。法兰结构参数涵盖法兰刚度、密封面型式、螺栓分布圆直径,刚度不足会导致法兰翘曲变形,影响垫片应力分布。工况条件涉及介质压力、温度、腐蚀性以及载荷波动,高温环境会加速垫片老化与螺栓松弛,交变载荷易引发疲劳失效。安装工艺同样影响密封质量,紧固顺序、紧固方式、润滑条件均会对预紧力均匀性产生显著影响。理解各因素间的交互作用,是制定科学预紧力控制策略的理论基础。

2 螺栓预紧力对法兰密封性能的影响机制

2.1 预紧力与垫片应力分布关系

螺栓预紧力通过法兰传递至垫片,形成垫片压紧应力分布。理想状态下,垫片应力应均匀分布且大于密封所需最小应力值。实际工程中,受法兰刚度、螺栓位置、垫片特性等因素影响,垫片应力分布呈现显著不均匀性。螺栓孔附近区域应力集中,相邻螺栓之间区域应力较低,形成“马鞍形”分布特征。预紧力大小直接影响垫片应力水平。预紧力过低,垫片平均应力不足,无法建立初始密封;预紧力过高,可能导致垫片压溃或法兰过度变形,反而损害密封性能。有限元分析表明,垫片应力不均匀系数与螺栓预紧力离散度呈正相关,当离散度超过15%时,局部区域垫片应力可能降至密封临界值以下。因此,预紧力控制不仅关注总预紧力大小,更需注重各螺栓载荷的均匀性。

2.2 预紧力对法兰变形的影响

螺栓预紧力施加过程中, 法兰产生弹性变形。合理预紧力作用下, 法兰发生可控的弯曲变形, 使垫片获得均匀压缩。预紧力过大时, 法兰产生塑性变形或永久翘曲, 改变密封面几何形状, 导致垫片应力重新分布, 局部区域出现卸载。法兰变形还会影响螺栓附加载荷, 在热力耦合工况下, 法兰与螺栓的热膨胀差异可能引发预紧力显著变化。大型法兰或高压法兰对预紧力更为敏感。法兰刚度不足时, 预紧力造成的弯曲变形会显著改变垫片接触状态^[2]。工程实践中, 采用有限元方法可精确计算预紧力与法兰变形的关系, 为预紧力阈值设定提供依据, 避免结构损伤。

2.3 预紧力衰减与长期密封可靠性

螺栓预紧力衰减是影响法兰长期密封可靠性的核心问题。垫片蠕变松弛是最主要的衰减机制, 非金属垫片在持续压缩下发生蠕变, 垫片厚度减小, 预紧力逐步下降。金属垫片虽蠕变较小, 但高温环境下仍存在应力松弛现象。螺栓螺纹的微观塑性变形、法兰密封面的微动磨损、振动冲击造成的螺纹松动, 均会加剧预紧力衰减。温度变化引发的热应力波动是另一重要因素, 法兰与螺栓材料线膨胀系数差异, 导致升降温过程中预紧力动态变化。高温工况下, 螺栓热膨胀可能使预紧力增加, 但垫片高温蠕变又导致预紧力下降, 两者共同作用形成复杂的时变特性。长期服役中, 预紧力持续衰减至临界值以下, 密封失效随之发生。建立预紧力衰减模型, 预测长期服役中的密封性能演变, 对于制定维护策略具有重要意义。

3 螺栓预紧力控制现状与问题

3.1 常用预紧方法与技术特点

当前工程中常用的螺栓预紧方法主要有扭矩法、转角法、拉伸法三种。扭矩法通过扭矩扳手施加设定扭矩, 利用扭矩与预紧力的经验关系间接控制预紧力, 操作简便、设备普及, 但受螺纹摩擦系数影响大, 预紧力离散度通常达 $\pm 30\%$ 。转角法将螺栓拧紧至贴合面后, 再旋转设定角度, 通过控制螺栓伸长量实现预紧力控制, 摩擦影响较小, 精度优于扭矩法, 但需精确确定起始点。拉伸法采用液压拉伸器直接拉伸螺栓, 通过控制油压实现精确预紧, 预紧力离散度可控制在 $\pm 5\%$ 以内, 且不产生螺纹扭转应力, 适用于高精度要求场合, 但设备成本高、操作空间要求大。超声波法通过测量螺栓伸长量推算预紧力, 精度高、可重复性好, 适用于关键部位监测。各类方法各有优劣, 需根据工况要求、成本预算、操作条件综合选择。

3.2 预紧力控制存在的突出问题

工程实践中, 螺栓预紧力控制普遍存在以下突出问

题。预紧力离散度大, 同一法兰上各螺栓预紧力差异显著, 导致垫片应力分布不均, 局部区域密封失效风险高。预紧力精度不足, 扭矩法受摩擦系数波动影响, 实际预紧力与设计值偏差大, 难以满足高密封要求。预紧工艺不规范, 紧固顺序不合理、分步预紧缺失、润滑条件不一致, 进一步加剧载荷不均。预紧力衰减监测缺失, 多数系统缺乏预紧力在线监测手段, 无法及时发现松弛问题。维护周期不合理, 依赖经验判断, 难以实现精准维护^[3]。高温工况下, 热紧操作不规范, 反而可能造成预紧力失控。这些问题相互交织, 导致法兰连接系统密封可靠性难以保障, 泄漏事故时有发生。

3.3 现有控制方法局限性分析

现有预紧力控制方法在应对复杂工况时显现明显局限。扭矩法在摩擦系数不稳定条件下精度不足, 难以满足高可靠性要求。转角法对起始点判断敏感, 现场操作易引入误差。拉伸法设备复杂, 在空间受限场合难以应用。各类方法均难以实现预紧力实时监测与动态调整, 无法应对服役过程中的预紧力衰减。传统控制策略多基于静态设计, 未充分考虑垫片蠕变、温度循环、振动冲击等动态因素。不同垫片材料的压缩回弹特性差异, 使统一控制策略难以适应多样化需求。此外, 大型法兰多螺栓系统的载荷交互作用、法兰偏转对预紧效果的影响, 现有方法缺乏有效应对手段。因此, 亟需构建更加科学、精准、适应性强的预紧力控制策略。

4 螺栓预紧力优化控制策略

4.1 预紧力精确计算与设计方法

精确计算是预紧力科学控制的前提。基于密封设计准则, 预紧力下限应保证垫片压紧应力大于最小密封应力, 同时考虑介质压力作用下的垫片卸载效应。预紧力上限受限于法兰强度、螺栓强度与垫片许用压应力。建立包含垫片压缩回弹特性、法兰刚度、螺栓弹性变形在内的力学模型, 可精确计算所需预紧力范围。针对不同垫片类型, 建立差异化设计方法。非金属垫片需重点控制压缩率, 避免压溃; 金属缠绕垫片需考虑回弹特性; 齿形组合垫片需关注金属齿嵌入深度。引入安全系数时, 需综合考虑工况波动、预紧力衰减、材料性能离散等因素, 避免过度保守或冒险设计。采用有限元仿真技术, 可精确预测垫片应力分布, 优化螺栓数量与分布圆直径, 提升密封系统固有可靠性。

4.2 预紧力均匀性控制技术

预紧力均匀性是保证垫片应力均匀分布的关键。优化紧固顺序, 采用对称交叉紧固法, 从法兰中心向两侧交替进行, 逐步施加预紧力, 可有效减少法兰偏转。分

步预紧策略,先以较低扭矩初紧,再分两至三次逐步升压至目标值,有利于应力均匀化。采用同步紧固技术,多个液压拉伸器同时作业,可最大限度消除载荷不均。高精度扭矩扳手与转角监控装置结合,实时反馈紧固过程,确保各螺栓载荷一致性。引入垫片应力在线监测,通过应变片或压力传感器直接测量垫片压应力,可实现闭环控制。对于关键部位,采用超声波螺栓轴力测量仪,逐根检测并微调,确保预紧力离散度控制在合理范围。



图1 螺栓预紧力不够,垫片挤出

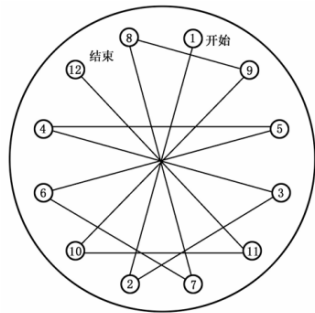


图2 对称交叉编号紧固法

4.3 预紧工艺优化与操作规范

标准化预紧工艺是控制质量的基本保障。制定详细操作规程,明确紧固顺序、紧固步骤、扭矩值或转角量、润滑要求。采用统一润滑剂与润滑方式,降低摩擦系数波动对扭矩法精度的影响。规定温度条件,冷态预紧与热态预紧需区别对待,考虑热膨胀补偿。建立操作人员培训认证制度,提升操作技能与质量意识。关键法兰安装实施过程记录,形成可追溯档案。高温工况下,规范热紧操作,在运行稳定后适时热紧,补偿垫片蠕变与热松弛。对于频繁拆装部位,建立标准化复装流程,确保每次安装质量一致。工艺优化需结合现场条件持续改进,形成闭环反馈机制。

4.4 预紧力监测与维护管理策略

预紧力长期监测是保障密封可靠性的重要手段。采用超声波螺栓轴力监测系统,可在运行状态下实时检测预紧力变化。无线传感技术实现数据远程传输与集中监

控,异常时及时预警。对于关键设备,建立预紧力在线监测平台,结合数据分析预测预紧力衰减趋势。制定差异化维护策略,根据设备重要性、工况严酷度、历史泄漏记录,确定监测频次与维护周期。运行初期加密监测,掌握预紧力衰减规律;稳定运行期定期抽检;发现异常及时复紧。建立设备全生命周期档案,记录预紧力变化、垫片更换、泄漏事件等信息,为维护决策提供数据支撑。引入预测性维护理念,基于预紧力衰减模型,在密封性能劣化前实施维护,避免非计划停机。

4.5 新型紧固技术应用展望

新型紧固技术为预紧力精确控制提供了新途径。智能螺栓内置应变传感器,可实时输出预紧力数值,实现紧固过程可视化。形状记忆合金垫片在温度激励下产生主动压紧力,可补偿热循环造成的预紧力衰减。液压螺母与拉伸垫圈技术,在狭小空间实现精确预紧,拓展了拉伸法的适用范围。扭矩转角组合控制技术,融合两种方法优势,兼具精度与操作便利性。数字化紧固系统集成传感器、控制器与执行器,实现预紧过程自动控制与数据记录。未来随着物联网、人工智能技术发展,预紧力控制将向智能化、自适应方向演进,实现从“被动执行”向“主动优化”的转变,为法兰连接密封性能提升提供更强技术支撑。

结束语

法兰连接密封性能优化与螺栓预紧力控制是保障工业管道系统安全运行的核心课题。本文系统分析了法兰连接密封机理与失效模式,揭示了螺栓预紧力对垫片应力分布、法兰变形及长期密封可靠性的影响机制。针对当前预紧力控制中存在的精度不足、离散度大、衰减监测缺失等问题,从精确计算、均匀性控制、工艺优化、状态监测、新技术应用五个维度构建了全流程控制策略体系。随着智能传感与数字化技术不断发展,预紧力控制将向精准化、智能化方向持续演进,为工业装备安全运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]李祎璞,钟晓峰,陈奕铭,等.天然气站场压力波动对螺栓法兰连接系统密封性能的影响[J].润滑与密封,2026,51(1):134-140.
- [2]黄佳敏.压力容器法兰-筒体连接结构优化——基于密封性能提升的视角[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(3):103-105.
- [3]林莉莉.曲轴皮带轮联接螺栓的预紧控制策略研究[J].汽车与驾驶维修,2023(3):29-31.