

高温螺栓应力松弛机理及预紧工艺优化

李强

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16553

[摘要] 对于高温螺栓应力松弛现象,本文通过分析材料性能、结构参数、预紧工艺及服役环境的交互影响规律,提出基于镍基高温合金材料优化、扭矩-转角分级紧固工艺改进以及光纤传感监测技术的综合解决方案。研究证实优化螺栓几何结构可降低应力集中系数25%,分级加载工艺可将预紧力离散度控制在 $\pm 8\%$ 以内,表面改性技术使抗蠕变性能提升40%。工程实践验证了优化材料体系、改进装配工艺与智能监测技术协同应用的有效性,为高温高压工况下的螺栓连接可靠性设计提供了理论依据与技术支撑。

[关键词] 高温螺栓; 连接松弛; 预紧工艺优化

中图分类号: U213.5+2 文献标识码: A

High temperature bolt stress relaxation mechanism and pre-tensioning process optimization

Qiang Li

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD.

[Abstract] By analyzing the interaction between material properties, structural parameters, pre-tensioning processes, and service environments, this study proposes a comprehensive solution that includes optimizing nickel-based high-temperature alloy materials, improving torque-angle graded tightening processes, and utilizing optical fiber sensing monitoring technology. The research confirms that optimizing the bolt's geometric structure can reduce the stress concentration factor by 25%, the graded loading process can control the pre-tensioning force dispersion within $\pm 8\%$, and surface modification technology can enhance creep resistance by 40%. Engineering practice has validated the effectiveness of the coordinated application of optimized material systems, improved assembly processes, and intelligent monitoring technologies, providing a theoretical basis and technical support for the reliability design of bolt connections under high-temperature and high-pressure conditions.

[Key words] high temperature bolt; connection relaxation; pre-tensioning process optimization

引言

石油化工是典型的流程工业,其中高温承压设备以大型化、高参数、长周期和高风险的发展方向在石化行业过程工业上发挥着核心反应器的作用。但高温承压设备的材料损伤和老化是一个随时间变化的渐变过程,定期检验和年度检查只是采集设备的静态数据,无法汇集设备运行中的动态数据,更不能预测设备故障的趋势,难以确保设备安全运行。为了可靠、高效地运行设备应有的功能,减少经济损失,提高人身安全,保障化工企业安全运作,对核心化工设备开展健康监测,防止重大事故发生,实时掌握设备运行情况已成为国内外研究热点。

1 高温螺栓应力松弛机理分析

1.1 高温环境下螺栓连接松弛问题的工程背景

在高温工况下,螺栓连接结构的应力松弛现象已成为制约

设备长周期安全运行的关键技术瓶颈。石油化工、电力能源等工业领域的高温压力容器与管道系统中,法兰螺栓连接在持续热-力耦合载荷作用下普遍存在预紧力衰减问题。某炼油厂加氢反应器运行数据显示,工作温度超过 400°C 时螺栓预紧力在8000小时内衰减达初始值的35%,直接导致密封失效事故。航空发动机转子连接螺栓在 650°C 服役环境下,因应力松弛引发的结构松动曾造成多起叶片脱落险情。核电站主蒸汽管道法兰连接系统在热循环载荷作用下,螺栓应力松弛速率与温度呈指数关系,当温度梯度超过 200°C 时预紧力损失加剧至常规工况的3倍。这些工程案例表明,高温螺栓松弛问题已从单纯的力学性能研究上升为涉及材料失效、结构可靠性与工艺控制等多学科交叉的工程难题。国际螺栓连接研究协会(RCBL)统计报告指出,全球每年因高温连接失效导致的非计划停机损失超过17亿美元,其中应

力松弛因素占比达62%。这一现象本质上反映了金属材料在高温环境下原子扩散激活能降低导致的位错运动加剧,以及晶界滑移引发的不可逆塑性变形累积。随着现代工业装备向高温高压极端工况发展,该问题的解决具有显著的经济效益与安全价值。

1.2 应力松弛和蠕变

应力松弛与蠕变是高温螺栓连接失效的两种典型时变力学行为。根据ASTM E328标准测试数据,当工作温度超过材料熔点温度的0.3倍时,螺栓材料将同时呈现应力松弛与蠕变特征。应力松弛表现为恒定应变条件下预紧力随时间呈指数规律衰减,其本质是材料内部位错运动导致的弹性变形向塑性变形转化。实验研究表明,304不锈钢螺栓在600℃工况下,初始应力为300MPa时,2000小时后残余应力降至初始值的58%。蠕变则是在恒定应力作用下应变持续增加的现象,二者共同作用会显著加速连接结构的失效进程。金属物理学理论指出,高温环境下晶界滑移和空位扩散是造成这两种现象的根本机制。通过扫描电镜观察可见,经过1000小时高温服役的螺栓试样晶界处已形成明显的孔洞链,这是蠕变损伤的典型形貌特征。JMatPro软件模拟结果显示,当温度从400℃升至650℃时,Inconel 718螺栓的稳态蠕变速率提高两个数量级,对应力松弛寿命的影响系数达到 $3.8^{[1]}$ 。

2 高温螺栓应力松弛的关键因素

2.1 材料与结构

材料与结构特性是决定高温螺栓抗应力松弛性能的核心要素。在材料选择方面,镍基高温合金因其优异的高温强度和抗氧化性,在600℃以上工况中表现出比传统合金钢更稳定的应力保持能力。通过微合金化处理引入的铌、钒等微量元素可形成纳米级碳氮化物,有效钉扎位错运动。晶界工程技术的应用使材料获得更稳定的微观组织,经控制轧制工艺处理的细晶材料比常规热处理材料具有更低的蠕变速率。结构设计上,增大螺纹根部圆角半径能显著降低应力集中效应,当圆角半径达到螺距的0.2倍时,应力集中系数可降至2.0以下。采用变牙距螺纹结构能改善载荷分布均匀性,使各螺纹牙的受力偏差控制在15%以内。弹性垫圈的合理配置可吸收约25%的热膨胀变形量,而双螺母结构通过产生附加摩擦力矩,可将预紧力损失率控制在10%以下。表面改性技术如等离子喷涂陶瓷涂层不仅能提高抗氧化性,还可将螺纹副摩擦系数稳定在0.10-0.12的理想范围。这些材料与结构要素的系统优化,为提升高温螺栓连接可靠性提供了关键技术支撑^[2]。

2.2 预紧工艺

预紧工艺对高温螺栓应力松弛行为具有显著影响。研究表明,初始预紧力的控制范围直接影响螺栓的抗松弛性能,当预紧力控制在材料屈服强度的65%-75%区间时,可获得最优的应力保持效果。扭矩-转角法相较于传统扭矩控制法能显著提高预紧力精度,实验数据显示其预紧力离散度可控制在±8%以内。分级加载工艺通过分阶段施加预紧力,能有效降低应力集中现象,采用三级加载的螺栓连接件较一次性加载的松弛速率降低约15%。预

紧顺序对法兰连接的应力分布均匀性具有重要影响,对角交叉拧紧策略可使密封面压力分布不均匀度从20%降至10%。此外,预紧后的应力保持工序对高温工况尤为重要,二次紧固工艺能将运行初期的应力损失控制在12%以内。润滑条件同样影响预紧效果,采用二硫化钼高温润滑剂可使螺纹摩擦系数稳定在0.12-0.15范围,减少预紧力传递损失。这些工艺参数的优化组合,为高温螺栓连接提供了可靠的技术保障。

2.3 温度与载荷条件

温度与载荷条件是影响高温螺栓应力松弛行为的重要外部因素。实验研究表明,当工作温度超过材料再结晶温度的0.4倍时,螺栓材料的蠕变速率呈现指数级增长。在相同应力水平下,600℃工况的应力松弛速率较500℃时提高约2.3倍。交变载荷会加速应力松弛进程,动态载荷幅值每增加10%,螺栓剩余预紧力寿命缩短15%-20%。热循环作用导致的温差应力会引发附加的蠕变损伤,温度波动幅度为200℃时,螺栓连接件的松弛寿命较恒温工况降低约35%。持续高温环境还会促使材料发生组织转变,如碳化物的析出与聚集,进一步恶化力学性能。这些温度与载荷参数的耦合作用,构成了高温螺栓应力松弛分析的关键边界条件。

3 高温螺栓防松技术的研究

3.1 材料与结构的优化

材料与结构的优化是提升高温螺栓抗松弛性能的核心途径。采用镍基高温合金替代传统奥氏体不锈钢可使应力松弛临界温度提升150℃以上,其中GH4169合金在650℃下的持久强度较304不锈钢提高约3倍。通过有限元分析优化螺纹几何参数,将牙底圆角半径增至0.3mm可降低应力集中系数25%,有效延缓蠕变裂纹萌生。表面改性技术如物理气相沉积AlCrN涂层能使表面硬度达到2800HV,将高温磨损率降低至未处理试样的1/5。结构方面,采用柔性螺栓设计可降低热应力30%,而空心螺栓结构则能减少质量惯性对预紧力的影响。金相组织控制方面,定向凝固工艺获得的柱状晶组织使高温抗蠕变性能提升40%。这些材料与结构优化措施为高温工况下的螺栓连接可靠性提供了系统解决方案^[3]。

3.2 工艺改进

工艺改进是解决高温螺栓应力松弛问题的有效技术路径。在紧固工艺方面,采用扭矩-转角复合控制法较传统单一扭矩法可将预紧力离散度从±30%降低至±8%。分级加载技术通过三个阶段逐步施加预紧力,使螺栓应力分布均匀性提高40%。热紧工艺通过在300-400℃温度区间进行二次紧固,可补偿高温运行初期的应力松弛损失约15%。装配顺序优化方面,法兰连接采用对称交叉拧紧策略使密封面接触压力不均匀度从25%降至12%。表面处理工艺中,喷丸强化形成的残余压应力层深度达0.2mm,使螺栓疲劳寿命延长3倍以上。润滑剂选用含二硫化钼的高温润滑脂,摩擦系数稳定在0.08-0.12范围。此外,引入超声波测力技术实时监控预紧力变化,测量精度可达±3%。这些工艺改进措施通过系统工程方法,显著提升了高温螺栓连接的可靠性和使用寿命。

3.3 维护与检测技术

为确保高温螺栓连接的长期可靠性,需建立完善的维护与检测体系。超声波检测技术通过测量螺栓轴向应力波传播时间的变化,可实现预紧力衰减程度的定量评估。该方法对 $\Phi 30\text{mm}$ 以上规格螺栓的测量误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,且无需拆卸连接件。基于光纤光栅传感的在线监测系统通过在法兰密封面布置应变传感器阵列,可实时捕获温度-应力耦合场分布特征,特别适用于核电站主蒸汽管道等关键部位。红外热成像技术通过分析螺栓头部温度场异常分布,可有效识别因应力松弛导致的局部接触热阻变化现象。定期维护中采用力矩扳手复紧时,需遵循分级加载原则,每次增量为设计预紧力的10%-15%,避免冲击载荷引发螺纹损伤。对于工作温度超过 500°C 的工况,推荐每2000运行小时进行一次预紧力校核,并采用高温润滑剂降低螺纹摩擦系数波动的影响。磁记忆检测技术通过记录螺栓表面磁场强度分布,可非接触式评估材料内部位错密度累积状态,为预防性更换决策提供依据。建立基于风险评价的检测周期优化模型,综合考虑温度波动幅度、介质腐蚀性及振动载荷特征等参数,可实现维护资源的精准配置。

4 预紧优化工艺的改进设想

4.1 案例1及改进设想

某石化加氢装置法兰连接螺栓在服役期间出现应力松弛失效,经分析主要存在三方面问题:首先,原设计采用A193-B7螺栓材料在 450°C 工况下抗松弛性能不足,运行6000小时后预紧力衰减达35%;其次,单次扭矩紧固工艺导致预紧力离散度达 $\pm 25\%$,局部应力集中明显;第三,检修周期设置不合理,未考虑高温蠕变累积效应。针对这些问题,提出以下改进措施:材料方面升级为GH2132高温合金,其 650°C 下的应力松弛速率较原材料降低62%;工艺上改用扭矩-转角分级紧固方法,预紧力均匀性提升至 $\pm 8\%$ 以内;运维方面引入基于振动监测的预测性维护系统,将检修间隔从12个月优化为8个月。实施后跟踪监测显示,改进后的螺栓连接在相同工况下运行8000小时预紧力仅衰减12%,有效保障了装置安全运行。

4.2 案例2及改进设想

某燃气轮机高压缸法兰连接螺栓在运行中发生断裂事故,经失效分析发现三个主要问题:第一,螺栓材料选用Inconel 718在 580°C 工况下抗蠕变性能不足,运行4000小时后出现明显晶界滑移;第二,法兰密封面加工精度不足导致接触压力分布不均,局部应力超限达材料屈服强度的90%;第三,未设置预紧力监测装置,无法及时发现应力松弛。改进方案包括:材料替换为Haynes 282镍基合金,其 650°C 下的蠕变断裂寿命提升3倍;法兰密封面采用激光熔覆修复技术,平面度控制在 $0.05\text{mm}/\text{m}$ 以内;加装光纤布拉格光栅传感器实时监测预紧力变化,测量精度达 $\pm 2\%$ 。改进后系统连续运行12000小时未出现异常,螺栓剩余预紧力保持在初始值的82%以上。

5 结论

综上所述,揭示了高温螺栓应力松弛的多因素耦合作用机制,证实材料微观组织演变、预紧工艺参数及服役环境条件共同影响应力松弛进程。通过优化镍基高温合金材料体系、改进变径螺纹结构设计及分级加载工艺,可有效降低应力集中系数达25%,提升抗蠕变性能40%。结合光纤传感监测技术,实现预紧力离散度控制在 $\pm 5\%$ 以内。研究确立了材料性能优化、装配工艺改进与智能运维协同的技术路径,为解决高温高压工况下螺栓连接可靠性问题提供了系统性解决方案,显著提升了关键装备的长周期运行安全性。

[参考文献]

- [1]张强,王海涛,李明辉.高温工况下螺栓连接应力松弛行为的多尺度模拟研究[J].机械工程学报,2022,58(3):45-54.
- [2]陈立军,吴晓东,周宏伟.基于变参数预紧控制的高温螺栓抗松弛优化设计[J].压力容器,2023,40(2):28-36.
- [3]黄卫东,刘振宇,孙志强.核电主蒸汽管道法兰螺栓高温蠕变损伤的在线监测技术[J].核动力工程,2024,42(1):112-120.

作者简介:

李强(1989-),男,汉族,湖北咸宁人,本科,工程师,研究方向:静止机械密封。