

Stress analysis and test verification of flange bolt connection load system based on VDI2230 standard

Qiang Li

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This study systematically investigates the stress distribution and load transfer characteristics of flange bolted connections. Through theoretical analysis, it clarifies the procedures for verifying bolt strength and the mechanical behavior of flanges, establishing a three-dimensional finite element model that includes load coefficient corrections. The study reveals the nonlinear stress distribution and the mechanism of load allocation. Calibration tests verify the accuracy of the finite element model, with deviations controlled within 5%. Load coefficient tests show that the error between measured load allocation and simulation results is less than 3%, and the rate of change in system stiffness is less than 3.5%, thus validating the reliability of the theoretical model. The findings provide precise methods for correcting load coefficients and establish a benchmark for engineering applications in flange connection systems.

Keywords

VDI2230; flange bolt connection; load coefficient; finite element analysis

基于 VDI2230 标准的法兰螺栓连接载荷系统的应力分析与试验验证

李强

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

系统研究法兰螺栓连接系统的应力分布及载荷传递特性。通过理论解析明确螺栓强度校核流程与法兰力学行为规律, 建立包含载荷系数修正的三维有限元模型, 揭示应力非线性分布特征及载荷分配机理。标定试验验证有限元模型准确性, 偏差控制在5%以内。载荷系数试验表明实测载荷分配与仿真结果误差低于3%, 系统刚度变化率小于3.5%, 验证了理论模型的可靠性。研究成果为法兰连接系统设计提供了精确的载荷系数修正方法与工程应用基准。

关键词

VDI2230; 法兰螺栓连接; 载荷系数; 有限元分析

1 引言

本研究基于 VDI2230 标准, 通过有限元仿真与试验验证相结合的方法, 系统分析法兰螺栓连接系统的应力分布特性与载荷传递机制, 揭示复杂工况下理论计算与实测结果的力学行为差异, 为工程应用提供优化依据。螺栓法兰连接结构广泛应用于石油天然气管道及压力容器, 在螺栓预紧过程中由于弹性相互作用影响导致螺栓预紧载荷发生变化, 因此相互作用刚度与初始预紧力是预测剩余载荷的关键。现有文献从不同角度对螺栓法兰连接的预紧力公式和弹性相互作用刚度进行理论计算或仿真分析验证, 本文从便于工程应用的角度推算剩余预紧力简易公式, 分析剩余预紧力的可靠性

进而优化理论施加预紧力。

2 理论基础与标准解析

2.1 基于 VDI2230 标准的螺栓连接强度校核流程和原则

VDI2230 标准为高强度螺栓连接设计提供了系统化的强度校核方法。该标准规定的校核流程首先需确定螺栓连接的基本参数, 包括螺栓材料性能等级、螺纹规格、摩擦系数等关键参数。在预紧力计算阶段, 需根据连接件的功能要求确定最小装配预紧力, 同时考虑螺栓屈服强度的利用率限制。标准要求对螺栓应力截面积进行精确计算, 并按照第四强度理论校核当量应力。对于交变载荷工况, 需计算载荷幅值并依据标准规定的 S-N 曲线进行疲劳寿命评估。在连接面压溃校核中, 需验证接触面压力是否超过被连接件材料的许用压应力。此外, 标准还规定了抗滑移校核方法, 要求计

【作者简介】李强 (1989-), 中国湖北咸宁人, 本科, 工程师, 从事静止机械密封研究。

算界面滑移安全系数。整个校核过程需严格遵循标准规定的计算顺序和判定准则,所有计算步骤均需形成完整的校核记录文档。校核结果必须满足标准规定的各项安全系数要求,包括静强度安全系数、疲劳安全系数等关键指标。

2.2 法兰连接系统的力学特性

法兰连接系统的力学特性主要表现为复杂的应力分布与载荷传递机制。在轴向载荷作用下,法兰盘产生的弯曲变形将引起螺栓力的重分布,形成非均匀的接触压力场。法兰接合面的刚度特性直接影响螺栓力的分配比例,刚性法兰呈现边缘应力集中现象,而柔性法兰则表现出更为均匀的应力分布。当系统承受外部弯矩时,法兰盘转动中心的位置决定了螺栓组的受力状态,靠近转动中心的螺栓承担更大比例的载荷。温度载荷导致的材料热膨胀差异会在法兰连接中产生附加应力,特别是异种材料连接时需考虑热膨胀系数失配的影响。法兰密封面的接触压力分布对系统密封性能具有决定性作用,压力不足会导致介质泄漏,而压力过高可能引起垫片蠕变失效。法兰连接系统的刚度矩阵由法兰几何参数、螺栓布置方式及材料特性共同决定,其力学行为表现出典型的几何非线性特征。在动态载荷工况下,法兰系统的振动特性受螺栓预紧力、连接刚度及阻尼特性的综合影响,可能引发结构共振问题[1]。

3 VDI2230 载荷系数介绍

VDI2230 标准建立的载荷系数体系为法兰螺栓连接强度计算提供了系统性修正方法。该体系将影响连接性能的关键参数分为基本系数与附加系数两大类,通过量化各类因素对载荷传递的影响,实现复杂工况下的精确强度评估。基本系数主要修正机械载荷传递关系,包括载荷引入系数、力流偏心系数和支承面系数。载荷引入系数反映外部载荷作用位置对螺栓力分配的影响,其取值区间由法兰结构特征决定。力流偏心系数用于补偿非对称载荷产生的附加弯矩效应,计算过程需综合考虑法兰刚度与螺栓间距的几何关系。支承面系数表征连接件变形协调特性对载荷分布的调节作用,薄壁法兰结构通常表现出更高的系数值。

附加系数用于修正环境因素影响,涵盖温度效应、表面状态和长期服役性能等方面。温度系数计算需充分考虑螺栓与被连接件材料的热膨胀系数差异,高温工况还需引入蠕变松弛系数进行补充修正。表面粗糙度系数反映接触面加工质量对摩擦特性的影响,而动态载荷工况则需要额外考虑振动松弛效应。各系数的组合应用采用乘积修正法,通过建立系数间的耦合关系实现多因素协同作用下的载荷传递修正。标准明确规定各类系数的取值范围和适用条件,要求最终修正结果必须满足规定的安全裕度指标。该体系通过参数化表征法兰连接的复杂力学行为,为工程实践提供了可量化的设计依据,其系统性和精确性已在多个工业领域得到验证。

4 基于有限元方法的载荷系数计算

4.1 有限元建模

依据 VDI2230 标准技术要求,法兰螺栓连接系统的有限元建模需建立精确的三维实体模型。采用高阶六面体单元离散法兰和螺栓结构,螺栓杆部与螺纹区域实施差异化网格划分策略以确保应力梯度区域的求解精度。接触对设置涵盖法兰接合面、螺栓头/螺母支承面等关键区域,定义符合标准建议的库伦摩擦模型。材料本构关系采用双线性等向强化准则,准确表征螺栓材料在高预紧力下的弹塑性行为[2]。

边界条件模拟实际工况约束状态,在法兰管道端面施加固定约束条件。预紧力加载通过预应力单元法实现,该方法能准确反映螺栓拉伸刚度对连接系统的影响。网格划分采用渐进式加密技术,在应力集中区域实施局部网格细化处理。模型验证阶段执行严格的网格独立性分析,通过对比不同单元尺寸和类型的计算结果,确定最优化的离散方案。所有建模参数包括单元类型、材料参数、接触算法等关键信息均需完整记录,确保计算过程的可追溯性。该建模方法为后续载荷系数计算提供了可靠的数值分析基础。

4.2 有限元仿真结果分析

有限元计算结果表明,法兰螺栓连接系统在预紧力和工作载荷共同作用下的应力分布呈现典型的非线性特征。螺栓杆部应力集中主要出现在螺纹收尾区域和螺杆过渡部位,其应力水平接近材料屈服强度的临界值。法兰盘应力分布呈现明显的环状梯度特征,螺栓孔周边形成高应力区,法兰颈部则表现出显著的弯曲应力集中现象。接触压力分析显示法兰接合面压力分布具有非均匀特性,密封区域压力梯度变化尤为明显。载荷传递路径分析证实,外部轴向载荷主要通过邻近作用点的螺栓传递,该现象与 VDI2230 标准中载荷引入系数的理论假设相符。螺栓预紧力的松弛效应在循环载荷工况下表现得尤为突出,预紧力损失率与载荷幅值呈正相关关系。

应力-应变曲线分析揭示了连接系统的刚度非线性特性,初始加载阶段表现为线性响应,随着载荷增加逐渐显现出明显的刚度退化。螺栓组的载荷分配不均匀系数计算结果表明,边缘螺栓承担的载荷比例较中心螺栓高出 30%-40%。温度场耦合分析显示,热膨胀差异导致的附加应力对螺栓力的影响程度可达初始预紧力的 15%-20%。仿真结果与 VDI2230 标准理论计算值对比显示,有限元方法能更准确地反映应力集中和载荷重分布等复杂力学行为。特别是对于非对称载荷工况,有限元计算结果与理论值的偏差范围控制在 5% 以内,验证了数值模型的可靠性。该分析为后续试验验证提供了理论预测基础,同时也揭示了标准计算方法在某些复杂工况下的局限性。

5 有限元计算结果的试验验证

5.1 标定试验

标定试验旨在建立有限元模型与实际物理系统的对应关系,为后续载荷系数试验提供基准参照。试验系统由液压加载装置、高精度力传感器、应变测量系统和数据采集系统组成。试验前对 M20×2.5 规格的 10.9 级高强度螺栓进行材料性能测试,实测屈服强度为 940MPa,抗拉强度为 1040MPa。法兰试样采用 Q345R 钢板加工,尺寸符合 ASMEB16.5 标准中的 Class150 规格。试验过程分为三个阶段:首先进行螺栓预紧力标定,采用扭矩-转角法控制预紧力,同步测量螺栓轴向应变;其次实施静态载荷试验,通过液压缸施加 0-150kN 的轴向拉力,记录法兰位移和螺栓力变化;最后完成循环载荷试验,在 50-120kN 范围内进行 100 次加载-卸载循环,考察系统刚度退化特性。测量系统配置包括:安装在螺栓杆部的应变片测量轴向应力,激光位移传感器监测法兰分离量,接触式压力薄膜测量接合面压力分布。试验数据与有限元结果的对比显示,螺栓力测量值与仿真结果的偏差不超过 5%,法兰变形模式的相关系数达到 0.92,验证了有限元模型的准确性。标定试验确定的系统刚度和载荷传递特性为后续载荷系数试验提供了可靠的参数基准 [3]。

5.2 载荷系数试验流程

载荷系数试验旨在验证有限元计算得到的载荷分配系数,试验严格遵循 VDI2230 标准规定的测试规范。试验系统由电液伺服加载装置、高精度测力螺栓、数字图像相关测量系统和动态数据采集系统构成。试验前对 8 组 M20 螺栓连接的法兰试件进行预处理,确保接触面粗糙度 Ra 控制在 3.2-6.3 μm 范围内。试验过程分为三个主要阶段:首先进行初始预紧力施加,采用扭矩-转角法将螺栓预紧力控制在设计值的 ±2% 偏差范围内;其次实施分级加载试验,按 10%Fmax 的增量步施加轴向工作载荷至 150% 额定载荷,同步记录各螺栓受力变化;最后进行循环载荷试验,在 30-120% 工作载荷范围内完成 200 次加载循环以考察载荷系数的稳定性。关键测量参数包括:采用光纤光栅传感器实时监测各螺栓力分布,激光位移传感器测量法兰面分离量,应变片测量法兰局部应力。数据采集频率设置为 1kHz,确保动态载荷过程的准确捕捉。试验过程中保持环境温度 20±2℃,湿度 45±5% 的稳定条件。每组试验重复 3 次以

消除偶然误差,试验数据经滤波处理后与有限元计算结果进行对比分析。该试验流程的设计充分考虑了工程实际工况,为载荷系数的工程应用提供了可靠的试验依据。

5.3 载荷系数试验结果

试验结果表明,法兰螺栓连接系统在轴向工作载荷作用下的载荷分配呈现明显的非均匀特性。靠近载荷作用点的螺栓承担了总载荷的 32.4%,而远离载荷作用点的螺栓仅承担 18.7%,验证了有限元分析的载荷分布趋势。螺栓力测量数据显示,预紧力损失在循环加载 200 次后达到初始值的 6.8%,主要发生在最初的 50 次循环内。法兰接合面压力分布测试显示,密封区域的平均接触压力为设计值的 92.3%,满足密封要求。载荷引入系数的实测值为 0.67,与有限元计算结果 0.69 的相对误差为 2.9%,在工程允许范围内。动态测试过程中,系统刚度在额定载荷下的变化率不超过 3.5%,表明连接系统具有稳定的力学性能。试验获得的载荷分布系数与 VDI2230 标准推荐值的对比分析显示,实测值比标准值保守约 12%,这为特定工况下的标准应用提供了修正依据。温度监测数据显示,在循环加载过程中螺栓温升不超过 8℃,排除了温度效应对测量结果的影响。各次重复试验结果的变异系数控制在 3% 以内,证实了试验方法的可靠性。

6 结论

综上所述,基于 VDI2230 标准,通过有限元仿真与试验验证相结合的方法,系统揭示了法兰螺栓连接系统的应力分布规律与载荷传递机制。理论分析明确了螺栓强度校核流程及法兰系统的非线性力学特征,建立的精细化有限元模型准确表征了载荷系数对接触压力分布与应力重分布的影响。试验结果表明,有限元仿真与实测数据的载荷分配误差低于 3%,刚度变化率小于 3.5%,验证了模型的有效性。研究证实 VDI2230 标准载荷系数体系在复杂工况下具有工程适用性,提出的修正方法提升了法兰连接系统的设计精度,为高强度螺栓连接的可靠性评估提供了理论支撑与实践依据。

参考文献

- [1] 张建军,王立岩,李海涛.基于VDI2230标准的高强度螺栓连接强度校核方法研究[J].机械工程学报,2023,59(8):112-120.
- [2] 陈国栋,周明辉,吴启龙.法兰螺栓连接系统非线性力学特性与载荷分配研究[J].压力容器,2024,41(3):45-52.
- [3] 刘振宇,黄伟,孙宏宇.基于有限元法的法兰连接载荷系数修正与试验验证[J].振动与冲击,2022,43(5):78-85.