

4 长效防泄漏技术体系构建

4.1 基于全寿命周期的法兰密封完整性管理

法兰防泄漏若仅停留在安装阶段,往往只能解决短期渗漏问题,难以适应化工装置长周期运行要求。为实现长效控制,应将法兰管理嵌入全寿命周期完整性体系中,从设计选型、采购验收、安装记录、试压验证、投运监测、停工检修到失效追踪形成闭环管理。设计阶段应根据介质危险性、温压等级、设备振动特征和启停频率对法兰连接进行风险分级,对高风险部位优先选用更高密封等级结构和更严安装标准。采购阶段则应强化螺栓、垫片和法兰件的材质证明、尺寸偏差和批次一致性控制,防止低质件进入现场。安装阶段应保留力矩值、紧固顺序、作业人员、工具编号和复核结果等记录,以便运行后开展追溯分析。运行阶段应结合介质性质和装置检修周期,建立重点法兰台账,对高温、高压、有毒、易燃及频繁波动部位实施重点监控。通过这种全周期闭环管理,可将法兰泄漏控制由事后处理转向事前预防和过程控制。

4.2 运行期预紧力保持与泄漏早期识别技术

法兰泄漏的形成通常具有一定前兆,如接缝温差异常、伴热层结晶、螺栓锈蚀不均、局部异味、湿斑和盐析痕迹等。若运行期能够及时识别预警信号,往往可以在微泄漏阶段完成干预,避免演化为突发性泄漏。为此,应建立以外观巡检、点位测温、可燃有毒气体检测和关键法兰定期复核为基础的早期识别机制。对于高危介质法兰,可结合红外热像、声发射或便携式泄漏检测仪开展专项排查,识别因局部垫片失稳导致的早期异常。对于长期高温服役法兰,则应关注螺栓轴力热衰减和垫片应力松弛问题,在检修窗口期实施规范化拆检和必要的再紧固。需要强调的是,运行期复紧并非所有法兰均可带压实施,特别是高危介质、高温高压及已发生明显泄漏的法兰,必须严格按风险隔离和停工条件组织处理,禁止在不具备安全边界的情况下盲目加力紧固。长效防泄漏的关键,不是频繁“补救性拧紧”,而是通过状态识别和预警管理将问题控制在演化之前。

4.3 失效案例反馈与标准化工法再优化

极端环境法兰泄漏治理的另一个重要方向,是将现场失效案例转化为标准化工法改进依据。很多企业在检维修中虽然处理了大量法兰泄漏问题,但往往停留在“换垫片、重新紧固”的表层处置,未形成系统的失效归因与数据沉淀,导致同类问题反复发生。为提升治理成效,应对每次泄漏事件进行结构化分析,至少从介质属性、运行工况、法兰规格、垫片类型、螺栓材质、安装力矩、紧固顺序、工具精度、服役时长和现场环境等维度开展回溯,识别真正的主导失效因素。若泄漏主要源于垫片材料与工况不匹配,则应回到选型

标准优化;若源于预紧离散度过大,则应完善受控安装工法和人员培训;若源于管道附加应力或设备振动,则应将治理重点前移至结构支撑与柔性补偿设计。通过不断积累案例数据库并修订法兰安装作业指导书、复紧周期标准和关键法兰分级台账,企业方能实现由经验维修向数据驱动治理转变,从而提升长效防泄漏能力。

4.4 某化工装置法兰防泄漏改进实践分析

某精细化工装置在换热器入口蒸汽法兰、反应釜循环管线法兰及酸性介质输送法兰部位长期存在季节性渗漏与启停后微漏问题。经现场排查发现,原安装方式主要依赖人工经验紧固,不同班组对目标力矩理解不一致,部分螺栓未统一润滑,垫片压缩量离散明显,且高温区法兰在首次热循环后未实施复核。针对上述问题,装置在年度检修期间对重点法兰实施定力矩受控安装改造:一是重新核验关键法兰密封面精度与垫片适配关系,对局部损伤法兰进行机加工修复;二是统一螺栓清理、润滑和扭矩工具校验程序,按分级对角紧固工艺实施全过程记录;三是对高温蒸汽法兰设置投运后热态停机复核节点,对酸性介质法兰增加防腐包覆与重点巡检频次;四是建立重点法兰台账,对泄漏历史点进行挂牌管理。改造后,装置运行周期内法兰重复渗漏次数明显下降,启停后突发补漏工作量显著减少,设备密封管理由被动抢修逐步转向计划性维护。这一实践说明,法兰长效防泄漏并不一定依赖复杂高成本手段,关键在于把受控安装、材料匹配和运行管理真正落到现场。

5 结语

极端环境下化工设备法兰连接泄漏具有显著的多因素耦合特征,其形成机理涉及热膨胀差异、垫片蠕变松弛、螺栓轴力衰减、载荷分布不均、密封面损伤及腐蚀振动扰动等多个方面。工程实践表明,法兰防泄漏治理只有从单点补救转向全寿命周期完整性管理,才能实现由短期止漏向长效稳漏的转变。

参考文献

- [1] 高瑞锋,李佳欣,彭洋,等.定力矩紧固技术在塔器法兰密封中的应用探讨[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(8)[2025-07-14].
- [2] 朱红满.化工设备管道法兰定力矩施工技术[J].石油工程建设,2024,46(4):108-111.
- [3] 罗光荣,朱博.法兰定力矩紧固技术在化工新建装置和检维修装置中的应用[J].山西化工,2023,43(5):124-125.
- [4] 郭勇勇.浅论法兰螺栓定力矩紧固在管道安装施工中的应用[J].石油工程建设,2023,45(S1):392-394.
- [5] 梅思阳,庞荣,李承智.化工设备法兰连接受力特性分析[J].石油和化工设备,2026,29(2):190-193.

Coupling Simulation and Reliability Analysis of Piston-Connecting Rod-Crankshaft System under High Explosive Pressure Conditions

Liang Dong Cong Liang Yinghao Li

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Driven by high power density and low emission requirements, engine combustion pressures continue to rise, subjecting the piston-connecting rod crankshaft system to increasingly complex loads under high explosion pressure conditions. This has led to prominent challenges in dynamic response and structural reliability. Based on multi-body dynamics and finite element methods, this study establishes a coupled simulation model that comprehensively considers gas pressure, inertial forces, and structural flexibility. The analysis focuses on system dynamic responses and stress distribution in critical components, complemented by fatigue life assessment for reliability evaluation. Structural and parameter optimization strategies are subsequently proposed. Results demonstrate that this approach effectively reveals response patterns under multi-source excitation, with optimized designs significantly enhancing fatigue resistance and operational stability. These findings provide valuable references for core component design in high explosion pressure engines.

Keywords

High explosion pressure; Piston-connecting rod-crankshaft system; Coupling simulation; Dynamic analysis; Reliability

高爆压工况活塞—连杆—曲轴系统耦合仿真与可靠性分析

董亮 梁聪 李英豪

长城汽车股份有限公司, 中国·河北保定 071000

摘要

在高功率密度与低排放要求推动下, 发动机燃烧压力持续提升, 活塞—连杆—曲轴系统在高爆压工况下面临更复杂载荷, 其动力学响应与结构可靠性问题日益突出。本文基于多体动力学与有限元方法构建耦合仿真模型, 综合考虑燃气压力、惯性力及结构柔性影响, 对系统动态响应与关键部位应力分布进行分析, 并结合疲劳寿命评估开展可靠性研究。在此基础上提出结构与参数优化策略。结果表明, 该方法可有效揭示多源激励下的响应规律, 优化设计能够显著提升抗疲劳性能与运行稳定性, 为高爆压发动机核心部件设计提供参考。

关键词

高爆压; 活塞—连杆—曲轴系统; 耦合仿真; 动力学分析; 可靠性

1 引言

随着内燃机向高效率与低排放方向发展, 燃烧室内峰值爆发压力持续提升, 直接导致活塞—连杆—曲轴系统的受力水平显著增加。在复杂载荷作用下, 该系统不仅承受周期性机械应力, 还受到燃烧冲击与惯性力叠加影响, 其动力学行为呈现出强非线性与耦合特征。若设计不合理, 易在关键部位产生应力集中与疲劳裂纹, 从而影响整机可靠性。传统分析方法多将系统简化处理, 忽略部件之间的耦合作用, 难

以准确反映真实工况下的响应特性。随着仿真技术的发展, 多体动力学与有限元耦合方法逐渐成为研究复杂机械系统的重要手段。通过构建精细化模型, 可以在虚拟环境中再现高爆压工况下的动态行为, 为结构优化与可靠性评估提供依据。本文围绕活塞—连杆—曲轴系统的耦合仿真与可靠性问题展开研究, 旨在揭示其动力学规律并提出优化路径。

2 高爆压工况下系统动力学特性分析

2.1 活塞—连杆—曲轴系统结构与载荷特征

活塞—连杆—曲轴系统构成了内燃机动力输出的核心传动链, 其结构由往复运动部件与旋转部件耦合组成, 通过滑动副与转动副实现能量转换与传递。在高爆压工况下, 燃烧室内瞬时释放的高压气体作用于活塞顶部, 并经连杆传递

【作者简介】董亮(1986-), 男, 硕士, 工程师, 机械电子工程专业, 从事汽车发动机零部件多体动力学与有限元仿真分析研究等。

至曲轴，最终转化为输出扭矩。该过程中，燃气压力呈现快速上升与衰减的特征，使载荷具有显著的冲击性与周期性叠加属性。与此同时，活塞往复运动所产生的惯性力与气体力在相位与幅值上的差异，导致系统受力状态表现出明显的时变性与不平衡性。连杆在传力过程中既承受轴向拉压载荷，又受到弯曲与侧向力影响，而曲轴则在复杂弯扭耦合载荷作用下运行。多源载荷的共同作用使系统内部应力分布呈现高度非均匀特征，并对结构安全性与运行稳定性提出更高要求。

2.2 高爆压对系统动态响应的影响

随着燃烧压力水平的提高，系统所承受的瞬态载荷显著增加，其动力学响应呈现出更强的振动幅值与更复杂的频谱特征。在高转速运行条件下，惯性力随转速平方增长，与燃气力形成叠加效应，使关键部件承受的等效应力明显提高。系统固有频率与外部激励频率之间的接近关系，使特定工况下容易诱发共振现象，从而导致振动响应急剧放大，并在局部区域形成高应力集中。不同构件之间通过连接副实现力的传递，其相互作用使动力响应呈现出显著的耦合特征，单一部件的振动行为难以独立分析。高爆压条件下的载荷波动不仅改变了系统整体的动力平衡状态，也加剧了振动能量在各部件间的传递与转换，对整机运行的平顺性与可靠性产生深远影响。因此，对动态响应特性的深入分析成为优化设计的重要基础。

2.3 非线性耦合行为及其机理

在复杂载荷与结构条件共同作用下，活塞—连杆—曲轴系统表现出明显的非线性动力学特征，其本质来源于多种非线性因素的叠加影响。接触刚度随载荷变化而产生的非线性，使连接部位的力传递关系呈现动态变化，尤其在高爆压冲击作用下，连杆轴承与曲轴轴颈之间的接触状态不断调整，进而影响系统整体刚度分布。材料在高应力水平下可能出现局部塑性响应，使应力—应变关系偏离线性假设，从而进一步加剧非线性效应。几何非线性则体现在大变形条件下结构刚度的变化，使振动特性随位移幅值发生调整。与此同时，结构柔性使振动能量在系统内部传播并发生多路径叠加，形成复杂的耦合振动模式。这种非线性耦合行为不仅增加了动力学分析的难度，也为疲劳裂纹的萌生与扩展创造了条件，是影响系统长期可靠性的关键因素之一。

3 耦合仿真模型构建与分析方法

3.1 多体动力学模型建立

在活塞—连杆—曲轴系统的动力学研究中，多体动力学方法为刻画其复杂运动关系与载荷传递路径提供了基础框架。建模过程中，将系统各组成部件抽象为刚柔耦合体，通过定义转动副与移动副等运动约束，建立完整的拓扑结构关系。活塞的往复运动通过滑动副实现，其与连杆之间的铰接关系以及连杆与曲轴之间的转动连接，共同构成典型的空

式加载于活塞顶面，并与惯性力共同作用于系统，使动力响应呈现出明显的周期性与非线性特征。通过对系统质量属性、惯量参数及约束条件的精确描述，可以在仿真中获得关键部件的位移、速度与受力变化规律，从而揭示动力传递过程中不同构件之间的耦合关系。模型的构建不仅需要满足运动学一致性，还需兼顾动力学精度，为后续高精度分析奠定基础。

3.2 有限元模型与柔性体引入

为进一步提升仿真结果对实际结构行为的反映能力，有必要在多体动力学模型中引入有限元描述，将关键承载部件由理想刚体转化为具有弹性特征的柔性体。通过对曲轴、连杆等部件进行几何离散化处理，并赋予材料本构关系与边界约束条件，可以获得结构在复杂载荷作用下的应力与变形分布。柔性体的引入改变了传统刚体模型中忽略结构变形的假设，使动力响应能够体现刚柔耦合效应，尤其在高爆压工况下，结构弹性变形对系统振动特性与载荷传递路径具有不可忽视的影响。有限元模型中网格划分的精细程度、单元类型的选取以及材料参数的准确性，都会直接影响计算结果的可靠性。通过将柔性体与多体系统进行耦合，可以在保证计算效率的同时，提高对局部应力集中及结构响应细节的刻画能力，使仿真结果更具工程参考价值。

3.3 耦合仿真与结果处理

在完成多体动力学模型与有限元模型的构建后，通过耦合仿真技术实现系统整体动力响应与局部结构应力的同步分析。该方法能够在同一计算框架内处理运动学、动力学与结构力学问题，从而揭示多源激励条件下系统响应的内在联系。仿真过程中，通过提取关键节点或关键截面的位移、速度及应力时间历程，可以分析不同工况下系统的动态行为特征。结合频域分析方法，对响应信号进行谱分析，有助于识别主要激励频率及潜在共振区域；而时域分析则能够反映振动过程的瞬态变化与非线性特征。通过对不同结构参数或运行条件下的仿真结果进行对比，可评估设计方案对系统性能的影响程度。结果处理不仅关注数值变化本身，更强调对物理意义的解释，从而为结构优化与运行控制提供科学依据，并提升仿真分析在工程实践中的应用价值。

4 关键部位应力分析与疲劳可靠性评估

4.1 危险区域识别与应力集中分析

在多体动力学与有限元耦合仿真框架下，系统关键部位的受力状态呈现出明显的空间非均匀性，其中连杆大端、小端以及曲轴过渡圆角区域普遍表现出较高的等效应力水平。这类区域由于几何过渡突变与载荷传递路径复杂，易形成显著的应力集中现象，并成为疲劳裂纹的主要萌生源。通过对应力云图的空间分布特征进行分析，可以直观识别高应力区域的具体位置，而结合时间历程曲线，则能够进一步揭示应力随工作循环变化的动态规律。仿真结果表明，在高爆压条件下，燃气压力与惯性载荷的叠加效应使局部应力峰