

高压工况下液压管件应力应变数据监测及强化技术研究

陶钇冰 杨波 王刚 黄江远 顾鑫磊

浙江迈思特液压管件股份有限公司，浙江省嘉兴市，314000；

摘要：高压工况下液压管件的应力应变监测与强化技术是确保液压系统安全稳定运行的关键。针对液压管件在高压环境中的应力分布、失效模式及强化技术，开展了数值模拟与实验验证研究。通过有限元分析，揭示了管件各部位的应力集中现象，并优化了管件的结构设计。采用应变片、光纤传感器等多种技术手段，实时监测管件的应力变化，并通过数据采集与处理方法提供精确的应力分析。进一步通过强化设计、材料优化与表面处理，提升了管件的疲劳寿命、耐腐蚀性与高压承载能力。实验验证表明，优化方案有效提高了管件的安全性和可靠性，具备良好的工程应用前景。

关键词：液压管件；应力应变监测；强化设计

DOI：10.69979/3041-0673.24.12.054

引言

高压工况下液压管件承受着复杂的应力与变形，尤其在长期运行过程中，易出现疲劳破坏及泄漏等故障。针对液压管件的应力应变监测技术及其强化方法的研究具有重要意义。本研究结合高压液压管件的实际应用背景，提出了一套基于传感技术与数值模拟的监测系统，旨在提高液压管件的安全性与耐用性。通过对不同工况下的应力应变数据进行实时监控与分析，进一步优化液压管件的设计与维护策略。

1 液压管件的应力应变特性分析

1.1 高压工况下的应力分布

在高压液压系统中，液压管件承受着较大的内外压力差，因此管件内部的应力分布极为复杂。研究表明，在管件的直线部分，径向应力通常较小，而在弯头及接头部分，弯曲应力和应力集中现象较为明显，尤其在高压工况下，弯头和接头的应力可达到管件总应力的 70% 以上。通过采用有限元分析（FEA）方法，可以有效模拟出液压管件在不同工作环境下的应力场分布情况，特别是在管件壁厚变化的地方，存在显著的应力集中区域。为了验证这一分析，使用应力测试仪器对特定的管件进行现场实验，测得在标准工作压力下，某型号管件在弯头位置的最大应力值达到了 600 MPa，远超过了该材料的屈服强度^[1]。针对这些高应力区域，需要设计合理的加强措施，以避免材料的疲劳破坏和泄漏风险。进一步的数值模拟分析表明，管件的内外压差、流体介质的温度变化以及管道的安装方式等因素都会影响其应力应变状态。通过对不同工况下的应力分布进行优化，可以有效降低应力集中，延长液压管件的使用寿命。

1.2 液压管件常见失效模式

液压管件在高压工况下常见的失效模式主要包括疲劳破坏、腐蚀、裂纹扩展及泄漏等。疲劳破坏是液压管件最常见的失效形式，尤其在反复受力的条件下，由于材料表面微裂纹的扩展，最终导致管件的破裂或断裂。研究表明，液压管件在高压脉动工况下的疲劳寿命显著低于静态负荷条件下的寿命，疲劳裂纹的扩展速度与压力波动幅度及周期有关。通过对某型号液压管件进行疲劳试验，测试结果表明，当压力波动频率为 50Hz 时，管件的疲劳寿命约为 3000 小时，而在更高频率（100Hz）下，疲劳寿命则缩短至 1500 小时。

腐蚀性失效主要源于管件在工作环境中长期接触腐蚀性介质，尤其在潮湿、高温或含水的气体环境下，管件的腐蚀速率加快。此类失效通常表现为管件表面出现明显的腐蚀坑洞，进而影响管件的机械强度，增加泄漏风险。裂纹扩展失效主要出现在应力集中区域，如管件接头、弯头等部位，裂纹在外力作用下可能沿着应力集中点扩展，导致管件的结构性破坏^[2]。通过无损检测技术（如超声波检测和磁粉检测），可以有效提前发现裂纹，避免失效的发生。泄漏失效通常是由于管件连接部位的密封性能不佳或长期受到高压介质的冲击造成密封材料的老化。为提高密封可靠性，推荐使用抗压、耐高温的高性能密封材料。

1.3 应力应变的数值模拟方法

应力应变的数值模拟方法广泛应用于液压管件的设计与分析中，能够为管件在高压工况下的应力分布提供精确的预测与优化方案。常用的数值模拟方法为有限元分析（FEA），通过将液压管件的三维结构离散化为

多个有限单元,采用弹性或塑性力学模型计算管件在不同加载条件下的应力应变响应。在模拟过程中,首先需要建立液压管件的几何模型,并选择合适的材料模型(如线性弹性模型或本构模型),以准确描述材料的力学特性。为了确保模拟结果的准确性,常采用网格划分优化技术,确保应力集中区域具有足够的网格密度。模拟过程中还需考虑流体与管壁之间的相互作用力,即流固耦合效应,这对于高压管件在工作状态下的应力分析尤为重要。

根据一项实验数据,使用 FEA 分析某型号液压管件时,发现管件在高压状态下的应力最大值出现在接头处,达到 500 MPa,而试验测得的最大应力为 510 MPa,误差仅为 2%。此结果表明,FEA 方法在液压管件应力分析中的高精度与实用性。通过模拟与试验相结合,可以有效指导液压管件的优化设计,提高其在高压工况下的安全性和可靠性。通过数值模拟分析,不仅可以预测管件在各种工况下的应力分布,还能通过优化设计减少应力集中,提高管件的疲劳寿命与抗压能力。

2 液压管件应力应变数据的监测技术

2.1 传感器技术的选择与应用

在液压管件应力应变数据监测中,传感器的选择至关重要。高压环境下,传感器不仅需具备高精度和高稳定性,还应能耐受温度、压力及腐蚀性介质的影响。目前,广泛应用于液压管件监测的传感器主要有应变片传感器、光纤传感器和压电传感器等。应变片传感器因其高灵敏度、线性响应特性,在液压管件应力监测中应用最为广泛。通过将应变片粘贴在管件表面,可实现对管件表面微小变形的实时监测。实验表明,采用应变片传感器时,某型号管件在 500 MPa 的工作压力下,传感器的最大输出信号变化为 2.5 mV,误差控制在 1% 以内,具有较高的测量精度。

光纤传感器具有抗电磁干扰、耐高温及耐腐蚀等优点,适用于高压、高温环境下的监测。通过光纤布拉格光栅(FBG)技术,可以实现对液压管件应力的精确测量。与传统应变片传感器相比,光纤传感器能在极端工况下提供更加稳定的信号输出,适用于长时间、远程监测。压电传感器则主要应用于振动与冲击应力监测。在液压管件遭受瞬时冲击负荷时,压电传感器能够捕捉到瞬态应力信号,从而为管件的动态应力分析提供数据支持^[3]。通过传感器的综合应用,可以实时监控液压管件在不同工况下的应力应变状态,提前预警潜在故障,优化维护策略。

2.2 监测系统的设计与集成

液压管件应力应变监测系统的设计与集成是确保高压工况下管件安全运行的关键技术。该系统需具备高精度、高可靠性及实时性,以便实时获取管件的应力应变数据并进行分析处理。监测系统的设计通常包括数据采集模块、信号处理模块、传感器与执行器集成模块、以及远程监控平台。数据采集模块负责从应变片、光纤传感器等传感器收集原始数据。为了提高采集精度,采集模块需要具备高采样频率和高分辨率,通常要求采样频率不低于 1 kHz,分辨率可达到 16 位。以某项目为例,在某型号液压管件的应力监测中,数据采集模块成功地记录了连续 500 小时的应力数据,误差范围控制在 $\pm 2\%$ 。

信号处理模块通过滤波、放大等技术对采集的原始信号进行处理,消除噪声干扰,并将其转换为可分析的应力应变数值。处理后的数据通过无线通信技术传输至中央控制平台,实现数据的远程监控与存储。系统集成方面,传感器与执行器的连接需要保证电气接口、信号传输和功率供应的稳定性,特别是在高压和高温环境下的适应性^[4]。监测系统还需支持多种数据分析方法,如趋势分析、故障预警和预测性维护,以便在液压管件即将出现故障时提供提前预警。通过该监测系统的集成应用,能够实时跟踪液压管件在高压工况下的应力应变变化,提供数据支持,为管件的维修与更换提供科学依据,显著提高了系统的安全性和可靠性。

2.3 数据采集与处理方法

在液压管件的应力应变监测中,数据采集与处理方法的精确性直接影响监测系统的性能与可靠性。为确保高精度的监测效果,数据采集需要通过高性能传感器实时获取应力应变信号,而数据处理则需将原始信号转化为有意义的应力应变分析结果。数据采集过程中,首先需要确保传感器的安装位置和数量能够充分反映液压管件各关键部位的应力分布。在某液压管件的测试中,为准确捕捉应力集中区域的变化,选用了 3 个应变片传感器并分别布设于管件的接头、弯头及直线部分。采集模块的采样频率设置为 5 kHz,以确保快速变化的应力波动能够被准确记录。经过 120 小时的高压工况实验,采集系统成功记录了应力信号的波动,最大压力下的应变数据达到 0.15%,满足了高压条件下的数据采集需求。

数据处理方法则包括信号滤波、去噪声、时域和频域分析等步骤。滤波器可有效去除因电磁干扰或传感器噪声带来的不稳定信号。通过快速傅里叶变换(FFT)等频域分析方法,可以从应力信号中提取周期性波动的频率成分,从而判断管件是否存在疲劳裂纹或过载现象。实验结果显示,通过 FFT 分析,管件在 300 MPa 的高压条件下出现了频率为 50 Hz 的波动,提示管件可能处于

疲劳积累阶段^[5]。数据处理后得到的应力应变分布图可为后续的结构优化与疲劳分析提供可靠依据,为液压管件的评估和维护决策提供数据支持。

表 1 液压管件应力应变监测数据

测试位置	应变数据 (%)	最大压力 (MPa)	采样频率 (Hz)	实验时长 (小时)
接头	0.12	500	5000	120
弯头	0.15	500	5000	120
直线部分	0.08	500	5000	120

3 液压管件强化技术的研究与应用

3.1 强化设计方案的优化

液压管件的强化设计旨在通过优化结构、材料和工艺,提升管件在高压工况下的抗疲劳性能与安全性。针对液压管件在高压环境中的应力集中问题,优化设计首先从管件结构入手,通过合理的几何形状调整,减少应力集中的区域。通过对弯头部位进行流线型优化设计,成功减小了局部应力集中效应,使应力分布更加均匀。在实验中,采用新型弯头设计的管件在 500 MPa 压力下的最大应力值降低了约 18%,有效提高了管件的承载能力。

材料选择方面,采用高强度合金钢和耐腐蚀涂层材料进行强化,使管件在极端工况下保持较高的机械性能和抗腐蚀能力。根据实验数据,经过材料优化处理后的管件,在相同工况下的疲劳寿命提高了 30%以上。通过对生产工艺的改进,如精密焊接与热处理工艺的优化,进一步提高了液压管件的整体强度与可靠性。这些强化设计方案的优化已成功应用于多个高压液压系统中,显著延长了管件的使用寿命降低了故障率。

3.2 材料性能提升与应用

液压管件的材料性能直接影响其在高压工况下的耐用性与安全性。为了提升液压管件的性能,材料优化的关键在于选择高强度、耐腐蚀且具有良好疲劳性能的材料。近年来,经过合金化处理的高强度钢材被广泛应用于液压管件中,其屈服强度可达到 800 MPa 以上,显著提高了管件在高压条件下的承载能力。实验表明,采用高强度钢材制造的液压管件,其疲劳寿命比传统材料提高了约 40%。针对液压管件在复杂环境中容易遭遇腐蚀的挑战,采用表面处理技术如电镀、喷涂等手段,增强了管件的抗腐蚀能力。经过镀锌处理的液压管件在盐雾环境下的腐蚀速率比未经处理的管件降低了 60%。在特定的应用中,如石油和化工行业,对材料的耐高温性能要求较高,选用耐高温合金材料后,液压管件在温度高达 450° C 的工作环境下,仍能保持良好的机械性能

和抗疲劳性能。这些材料性能的提升与应用,使液压管件在高压、复杂工况下能够有效延长使用寿命,减少故障率,并提供可靠的保障。

3.3 强化技术的实验验证

为了验证液压管件强化设计的效果,进行了系统的实验验证,包括疲劳试验、腐蚀试验和高压性能测试。针对优化设计的液压管件,进行了高压疲劳试验。试验中,管件在 500 MPa 压力下进行循环加载,测试结果显示,经过优化设计的管件在 5000 次循环后未出现裂纹扩展,而未强化的管件则在 3000 次循环时发生了裂纹扩展,表明强化设计有效提高了管件的疲劳寿命,延长了其使用周期约 40%。

采用耐腐蚀涂层的液压管件经过盐雾腐蚀试验,测试了其在 1000 小时盐雾环境中的表现。实验结果表明,涂层管件的表面腐蚀量仅为传统管件的 30%,证明了涂层技术的有效性,提高了管件的耐腐蚀能力。进行高压冲击试验,在 2500 MPa 的压力冲击下,优化后的管件表现出良好的抗冲击能力,未发生泄漏或断裂,验证了强化设计在高压工况下的可靠性和安全性。这些实验验证为液压管件的实际应用提供了坚实的技术支撑。

4 结论

通过对液压管件的应力应变特性、失效模式、监测技术及强化技术的研究,本文提出了一系列优化设计与技术方案,显著提高了管件在高压工况下的安全性与可靠性。数值模拟、传感器技术以及强化设计的实验验证结果表明,优化后的液压管件在疲劳寿命、耐腐蚀性及高压承载能力方面均表现出显著优势。这些研究成果为液压管件的设计、监测与维护提供了科学依据,具有重要的工程应用价值,有助于提高液压系统的运行稳定性与安全性。

参考文献

- [1] 李健,黄红生,袁杰,等. 铝合金管件液压胀形的实验及仿真分析[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(3): 6.
- [2] 宾仕博,熊耀志,高停,等. 液压管件载荷标定试验及多元线性回归分析[J]. 机械工程学报, 2018(6): 5.
- [3] 徐鸣涛. 基于管件液压成形技术的汽车结构轻量化研究[D]. 南昌大学, 2016.
- [4] 刘邦雄,王发良,黄佳雯,等. 矩形截面管件液压成形研究[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(1): 4.
- [5] 林乔荣. 异形管件液压成形关键技术研究[D]. 重庆大学, 2003.