

华东油田油套管水密封性检测技术应用优化 与经济效益提升

宫平¹ 汪涛¹ 周菁²

(1. 中国石化华东油气分公司泰州采油厂, 江苏 泰州 225300)

(2. 泰州油恒油气工程服务有限公司, 江苏 泰州 225300)

摘要: 华东油田自 2018 年开始对油套管进行气密封检测作业, 近 6 年共有 296 根油套管螺纹丝扣出现不合格现象; 存在设备总价高、运行和维护成本高、用工人多等难题。通过引进水密封检测设备, 以水代气降低运行成本的同时, 提出数字化应用升级, 减少用工人多, 达到提质增效降低劳动强度的目的。该水压检测控制系统在常规油和页岩油页岩气井中效果较好, 具有密封性能良好、控制系统灵敏、检测数据准确等优点, 软件与硬件完美匹配, 值得推广。

关键词: 经济效益提升、提质增效、油套管、螺纹丝扣、水密封检测、控制系统

中图分类号: TE-9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0080-03

Optimization and Economic Benefit Enhancement of Water Sealing Testing Technology for Oil Casing in East China Oilfield

Gong Ping¹ Wang Tao¹ Zhou Qing²

(1. Sinopec East China Oil and Gas Branch Taizhou Oil Production Plant, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

(2. Taizhou Youheng Oil and Gas Engineering Service Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: Huadong Oilfield has been conducting gas seal testing on oil casing since 2018, and in the past 6 years, a total of 296 oil casing threads have been found to be unqualified; There are challenges such as high equipment prices, high operating and maintenance costs, and a large number of workers. By introducing water seal detection equipment and replacing gas with water to reduce operating costs, digital application upgrades are proposed to reduce the number of workers and achieve the goal of improving quality, increasing efficiency, and reducing labor intensity. The water pressure detection and control system has good performance in conventional oil and shale oil shale gas wells, with advantages such as good sealing performance, sensitive control system, and accurate detection data. The software and hardware are perfectly matched and worthy of promotion.

Keywords: economic benefits improvement, quality and efficiency enhancement, oil casing, threaded thread, water seal detection, control system

油套管柱的密封完整性对压裂施工和长期生产至关重要。目前, 气密封检测技术虽能检测密封性, 但存在高压气体风险大、氦氮成本高、初期投入成本高等问题。本研究水压密封检测技术, 以液体介质替代气体进行高压检测; 同时, 通过数字化界面实现压力精准控制、实时数据监测、数据自动存盘, 提升检测效率和可靠性, 为页岩气井页岩油套管完整性管理提供更高效、可靠的检测手段。

1 气密封检测技术的局限性

氦氮检测是目前最灵敏的密封性检测方法之一, 但在技术层面存在: ①气体可压缩性导致高压保压不稳定, 微小泄漏可能被掩盖; ②氦气资源稀缺; ③混合气体成本费用高; ④深井、超深井可能超出气密封

检测的适用范围。基于 2018-2024 年 296 口井的实测数据统计, 在经济层面存在: ①设备成本较高, 为 220 万元/套; ②人工成本较高, 8 人共 120 万元/年; ③氦氮混合气加维保费用 380 万元/年; ④总年化成本为 720 万元/年。为此, 水压检测技术以液体不可压缩性、安全性高和低成本优势成为优化方向, 尤其适用于深井及高风险环境。

2 水密封检测技术的发展优势

水密封检测技术以水或冷却液作为检测介质, 成本及能耗低, 低压驱动提升安全性; 水的不可压缩特性使得压力传递更加稳定, 能够更精准检测微小泄漏; 水介质环保, 符合绿色作业发展要求; 能够在 -10℃ 至 40℃ 稳定运行。水密封检测技术, 其设备成本仅为

60 万元/套, 维保成本降至 50 万元/年, 人工成本降至 90 万元/年, 总年化成本为 200 万元/年, 为油套管密封性能检测提供了更安全、更经济的解决方案。

3 水密封检测技术原理及存在问题

3.1 工作原理

水密封检测技术使用液体介质作为压力传递介质, 采用水压压降法检测油套管螺纹丝扣密封性, 检测区域为封隔器与油套管之间的环形密封空间。通过气动绞车将检测工具下放至油套管接箍检测部位, 气动增压泵建立压力系统驱动液体介质, 在封闭油套环形空间内形成 20MPa 的检测环境, 通过高精度压力传感器监测压力变化, 实现对油套管螺纹丝扣连接处密封性能的精确检测。

3.2 水压压降检测法

压降法是通过监测封闭系统内的压力衰减来判断密封性能的检测方法。理论依据: ①液体不可压缩性: 水介质在高压下体积变化极小(压缩系数约 4.6×10^{-10} / Pa); ②质量守恒定律: 封闭系统中压力下降直接反映介质泄漏量; ③达西定律: 泄漏量与压差呈正比关系。

$$\text{数学表达式: } \Delta P = \frac{Q \times t}{V \times \beta}$$

ΔP : 压力降 (MPa) Q : 泄漏流量 (mL/min)

t : 检测时间 (min) V : 系统容积 (L) β : 液体压缩系数 (1/MPa)

3.3 应用举例

步骤 1: 建立封闭系统, 使用双封隔器卡封待测螺纹接头, 形成约 2L 的环形封闭检测腔室;

步骤 2: 压力加载, 启动气驱液泵(驱动比 1:35), 以 0.5MPa/s 速率升压至 20MPa, 稳压 5min 消除温度影响;

步骤 3: 保压监测, 关闭加压阀门, 记录初始压力 P_1 (如 20.00MPa), 持续监测 10min;

步骤 4: 数据分析, 记录终压力 P_2 (如 19.92MPa), 计算压降 $\Delta P=0.08\text{MPa}$;

换算泄漏率:

$$Q = \frac{\Delta P \times V \times \beta}{t} = \frac{0.08 \times 2 \times 4.6 \times 10^{-4}}{10} = 7.36 \times 10^{-6} \text{ L/min}$$

3.4 存在问题

在水密封检测技术三大系统中, 空气压缩机、干燥机、加热器、隔膜泵、磁翻板液位计等设备均为单独操控, 触摸屏只有显示液位和压力值功能, 无法对其执行机构进行控制, 需要人工对单个设备手动操控。在密封性检测施工时, 一人操作绞车提升封隔器打压测试, 一人通过电脑显示的检测数据分析是否合格,

再用对讲机将数据及信息传递给绞车操作人员, 此方法不仅浪费人工还增加劳动强度, 工作效率低, 存在信息传递误差, 人工成本较高为 8 人共 120 万元/年。因此, 水密封检测技术在信息化操控、降低劳动强度和用工数量方面, 未得到很好的优化和提升。

4 操控系统技术的改进升级

对触摸屏界面进行重新编程排版, 使检测系统更具有操作性和智能化。通过添加数据显示、参数设置、设备控制、报警管理、数据存储和查询等功能, 主界面(见图 1)实时显示密封性检测曲线、水压压力、水箱液位、测试时间、测试井号、编号、操作人等数据, 并通过开始、停止、保存和复位按键, 对检测曲线及数据储存至 U 盘; 通过参数设置界面(见图 2)对压力及液位设置上下限数据, 及对电加热、隔膜泵等设备, 实现数字化界面 HMI “一键式” 操控。

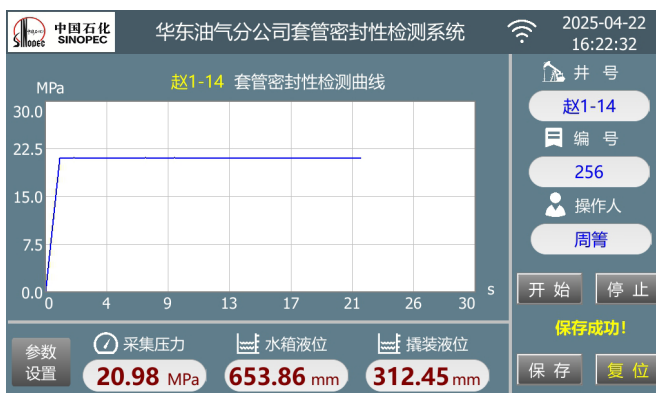


图 1 主界面
Figure 2 Main interface



图 2 参数设置界面
Figure 3 Parameter Setting Interface

本控制系统通过 PLC 实现各执行机构的协调控制, 使操控程序的可靠性提高, 配合智能 HMI 界面与 PLC 直接交互, 通过触摸屏设定检测压力、液位和温度上下限等参数, 在主界面控制压缩机、加热器、气动绞车等设备, 提升操作便利性, 解决了原先设备分散控制、数据采集不足、需配备专人查看数据等问题。

表 1 安全性优势对比表

| 介质安全性对比 | | | |
|---------|--|---------------------------------|---------------|
| 安全风险 | 气密封检测 (氮氮混合气) | 水密封检测 (水 / 冷却液) | 水密封技术优势 |
| 燃爆风险 | 惰性气体, 不易燃烧 | 不可燃, 完全无爆燃风险 | 彻底消除井场爆燃隐患 |
| 毒性风险 | 高浓度时存在窒息风险 (密闭空间) | 无毒无害 | 无需特殊防护装备 |
| 泄漏危害 | 高压气体喷射伤害 (> 0.2MPa 可致皮肤撕裂) | 泄漏仅造成湿污, 无冲击伤害 | 大幅降低人员伤害风险 |
| 压力系统安全性 | | | |
| 压力释放速度 | 气体膨胀速度快, 泄压时易产生冲击波 | 液体泄压平缓 (流速 < 3m/s) | 避免压力骤降导致的设备损坏 |
| 系统储能 | 20MPa 气体储存能量 ≈ 50kJ (相当于 1kg TNT 的 1/10) | 同压力液体储能仅 ≈ 1.2kJ | 能量储存降低 95% 以上 |
| 密封要求 | 需达到 10 ⁻⁷ mbar · L/s 级密封 | 需达到 10 ⁻⁴ mL/min 级密封 | 降低密封件失效风险 |

操作性优势对比

| 安全指标 | 气密封检测 (氮氮混合气) | 水密封检测 (水 / 冷却液) |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 防误操作设计 | 气体系统误操作可能引发“气锤效应”(压力峰值可达工作压力 3 倍) | 水系统误开阀门仅导致液体流出 |
| 应急处理 | 气体泄漏需立即疏散 (氮气探测器报警阈值 100ppm) | 水泄漏可直接关闭阀门, 无后续处理需求 |
| 设备运输 | 气瓶运输需符合 GB/T 34525 (高压容器规范) | 水箱可常压运输, 无特殊资质要求 |
| 用工人数 | 绞车与数据录取各需一名员工 | 将显示器 HMI 界面融入至绞车操作面板 仅需一名员工 |

表 2 经济效益对比表

| 指标 | 气密封检测 | 水密封检测 (升级后) | 经济效益 |
|---------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|
| 设备成本 | 220 万元 / 套 | 60 万元 / 套 | ↓ 72.7% (节约 160 万元) |
| 人工成本 | 8 人 × 15 万 / 年 = 120 万元 / 年 | 6 人 × 15 万 / 年 = 90 万元 / 年 | ↓ 25% (年省 30 万元) |
| 介质与维保成本 | 氮氮混合气 + 维保 = 380 万元 / 年 | 水介质 + 维保 = 50 万元 / 年 | ↓ 86.8% (年省 330 万元) |
| 总年化成本 | 720 万元 / 年 | 200 万元 / 年 | ↓ 72.2% (年省 520 万元) |

整合后的控制系统可实时显示压力曲线、温度变化, 并自动生成导出检测报告, 将数据保存至本地存储 (SD 卡) 中, 支持 USB 导出等操作。

该系统整合了操控岗与数据岗, 将原先用工 8 人降至 6 人, 人工成本由原先 120 万元 / 年降至 90 万元 / 年。

5 技术优势及经济性融合分析

5.1 技术优势

5.1.1 对比气密封检测

气体检测 10⁻⁷mbar · L/s (≈ 5.92 × 10⁻⁹L/min) 性能过剩, 仅用于特殊工况 (如超深井、储氢设施); 水压检测 10⁻⁴mL/min (= 1 × 10⁻⁷L/min), 实际工程需求下限通常为 10⁻⁴~10⁻⁶L/min 级别, 所以水压检测技术优于常规工程需求下限, 且规避了气体检测的安全风险, 是更优的工业化解决方案。

安全与操作性优势对比 (见表 1)。

5.2 经济评价

水密封检测技术与气密封检测技术经济效益对比 (见表 2)。

6 结论与展望

本文针对传统气密封检测技术存在的安全性差、成本较高、操作复杂、数据管理不足、人工传递信息

有误差等问题, 提出水密封检测技术加智能控制系统的创新结合。利用 PLC+HMI 整合数据显示、参数设置、设备控制、数据储存与导出等功能, 实现了油套管螺纹密封性的高效、精准检测, 为油气井管理提供了可靠的解决方案。但仍存在进一步优化空间: 在智能化升级方面, 可升级为数据的远程无线传输、结合红外线和光纤传感技术提升识别能力; 在推广方面可拓展至集输管道中应用; 在绿色发展方面可采用变频驱动微调, 实现降低能耗提升安全性。

参考文献:

- [1] 陈小龙. 气密封检测技术在涪陵页岩气田的应用 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2017, (3): 75-80.
- [2] 林勇, 薛伟, 李治, 等. 气密封检测技术在储气库注采井中的应用 [J]. 天然气与石油, 2012, (01): 55-58.
- [3] 胡芳婷, 赵密锋, 章景城, 等. 塔里木油田套管气密封检测技术现状及分析 [J]. 理化检验 (物理分册), 2021, (03): 1-6.
- [4] 刘啸峰, 陈实. 气密封检测技术在高压深井中的应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(23): 81-82.
- [5] 陈秀琴, 朱维兵, 王和顺. 干气密封技术研究现状及发展趋势 [J]. 液压与气动, 2008, 32(02): 2-56.