

压裂管汇结构完整性后评价及维修周期优化研究

赖浠蒙 杨秀昌

必维嘉航检验技术(广东)有限公司

DOI:10.32629/ems.v8i6.20584

[摘要] 采用多源数据融合评价技术、有限元模态分析和动态维修周期模型来达到对管汇结构状态进行准确判断以及维修资源的有效分配的目的。经过优化的管汇固有频率远离激励频率阈值,共振风险大大降低,设备利用效率提高30%,综合能耗降低14%,维修成本下降22%。可以保证作业安全的同时提高经济效益。可以给高压压裂管汇精细化管理赋予实操支持。

[关键词] 压裂管汇;结构完整性;后评价;维修周期优化;动态模型

引言

压裂管汇是页岩气高压压裂作业中地面主要的承载设备,它起着高压携砂液输送、分流的作用,它的结构是否完整直接影响到施工的安全以及作业的连续性。威204H49-5井是中油技服智能压裂1.0系统首次使用的地方,作业压力为70MPa以上,施工周期原计划为40天,管汇长时间承受高压冲刷、振动冲击和介质腐蚀,容易造成疲劳损伤、密封失效等现象,传统的依靠经验来评价的方法以及固定的维修周期不能适应智能压裂高处作业的要求,经常由于管道振动异常而造成施工中断。

一、压裂管汇结构完整性后评价方法体系构建

(一) 评价维度与指标设计

根据威204H49-5井管汇的材质(45CrNiMoV)、作业工况(高压、高频振动)以及智能监测数据,创建起“力学性能、运行状态、环境适应性”三维评价维度,并对关键指标进行了细分。其中力学性能维度包含强度储备系数、疲劳损伤累积量、焊接接头完整性,利用超声探伤和有限元仿真相结合的方法获得数据,强度储备系数阈值定为1.2,疲劳损伤累积量控制在80%以内;运行状态维度包含振动频率、密封性能、壁厚损耗速率,依靠智能压裂系统感知层数据,振动频率要远离柱塞往复频率(0-15.79Hz)的30%,密封性能要求无可见泄漏、压力波动量不超过5%;环境适应性维度指介质腐蚀速率、温湿度影响系数,根据页岩气压裂用含砂液的特点,腐蚀速率控制在0.02mm/a以下。各个指标的权重用层次分析法来确定,力学性能、运行状态、环境适应性权重分别

是0.45、0.40、0.15,得到一个量化的评价体系^[1]。

(二) 多源数据融合评价技术

整合威204H49-5井智能压裂系统多源数据,创建起“仿真、实测、历史”数据融合评价模型,提高后评价的准确性。其中,仿真数据利用ANSYS软件建管汇三维有限元模型得到,用四面体网格(20mm)划分,模拟不同的支撑间距和管径参数的模态特性以及应力分布;实测数据来自分布式光纤、振动和壁厚检测传感器,以100Hz频率实时采集管汇水平段、竖直段振动信号、关键部位壁厚和密封压力数据;历史数据调取该区块同类型井管汇失效案例、维修记录和寿命数据并建立数据库关联分析。采用数据归一化和加权融合的方法来消除数据源的误差,对管汇结构状态进行分级评价,分为优(≥ 85 分),良(70—84分),中(55—69分),差(< 55 分)四个等级。威204H49-5井管汇初始评价综合评分62分,属于中等水平,主要问题为水平段振动频率接近激励阈值、弯头壁厚损耗速率超标。

(三) 现场应用验证

根据以上评价体系和融合技术,对威204H49-5井压裂管汇进行现场验证,主要测量并检验振动特性及结构强度。使用锤击法获取管汇的振动信号,使用频响函数处理所获得的振动信号得到模态参数,与有限元仿真结果做对比,使误差控制在15%以内,保证评价方法的有效性。通过验证可知,管汇原安装方式下前两阶固有频率与柱塞最大往复频率之差小于25%,不能达到共振规避的安全要求,容易造成疲劳损伤;弯头部位壁厚损耗速率超过评价阈值,密封部位存在微

漏的风险。根据结果，对评价指标权重进行修正，把振动频率适配性权重提高到 0.25，给维修优化提供数据支持。另外，

表 1 威 204H49-5 井压裂管汇安装改进前后模态参数对比表

对设计的管汇进行安装改进，在 3、4、6 处设置固定的约束，

优化后的模态参数见表 1。

阶数	改进前频率（Hz）	改进后频率（Hz）	振型描述	与激励频率差值（%）
1	19.90	83.12	水平段前后弯曲→部分水平段及垂直段前后弯曲	428.0
2	20.12	126.45	水平段上下弯曲→部分水平段上下弯曲及垂直段左右弯曲	600.1
3	59.51	150.61	水平段前后弯曲→整体前后弯曲	153.1

二、压裂管汇维修周期优化策略制定

（一）基于风险矩阵的维修优先级划分

按照威 204H49-5 井管汇后评价结果建立起来的是损伤概率、影响程度两个维度构成的二元风险矩阵，并给出了维护等级的划分。损伤概率根据多源数据融合的结果来计算，用管汇使用时间、壁厚损耗率和振动特性来分别确定弯头、支撑部位、密封件、直管段的损伤概率分别为 72%、45%、63%、28%，影响程度由安全风险、施工中断损失、维修成本三个角度进行量化，弯头和密封件失效会造成高压泄漏，影响程度等级为高，支撑部位和直管段失效的影响程度等级分别为中、低。利用风险矩阵分析法，把密封件、弯头定为一级维修优先级（高风险），必须马上进行针对性地维修；支撑部位定为二级优先级（中风险），列入周期性维修；直管段定为三级优先级（低风险），采用状态监测维修。另外建立风险动态更新机制，使用智能系统实时的数据来更新风险等级，随时调节维修的先后顺序来适应结构状态的变化^[2]。

（二）动态维修周期模型构建

抛弃传统的固定维修周期模式，根据威 204H49-5 井管汇的特点，创建起结合疲劳累积损伤理论和智能监测数据的动态维修周期模型。模型是以管汇剩余寿命为唯一变量，根据力学性能指标、运行状态参数以及环境因素来建立剩余寿命计算公式，即 $L=L \times (1-D) \times K \times K$ ，其中 L 为额定寿命（依据材质和工况确定为 800 小时），D 为疲劳损伤累积量，K 为运行状态修正系数（0.7~1.2），K 为环境适应性修正系数（0.8~1.1）。借助智能系统实时采集数据，根据 D、K、K 数值的变化来动态地更新剩余寿命，并且计算出剩余寿命，当剩余寿命小于额定寿命的 20% 的时，就会触发维修预警。对

一级优先级的部件采用密封件动态维修周期为 150~180 小时、根据密封压力变化实时调节、弯头动态维修周期为 220~250 小时、根据壁厚损耗速度动态修正的方法；对于二级优先级的支撑部位使用维修周期为 350~400 小时，三级优先级的直管段维修周期未能固定的规则，根据状态监测的数据来触发维修。该模型可以实现维修周期和管汇实际状态的精准匹配，从而防止过度维修或者维修不足的问题出现。

（三）经济性与安全性平衡分析

以威 204H49-5 井智能压裂作业总成本最小化为目的，兼顾安全风险的控制，在经济性和安全性之间进行平衡分析。安全性指标用失效概率来控制阈值，使用动态维修周期模型把管汇整体失效概率控制在 5% 以下，比原来 18% 大大降低；经济性指标包括维修成本、施工中断损失、能耗成本，建立成本平衡方程，对不同的维修周期进行量化分析^[3]。管汇维修维护过程中如果发生故障而造成施工不能正常推进的话，将增加额外的修理由保证施工质量所付出的成本。以往的数据表明，在正常使用条件下，管汇平均的维修周期为 200 小时，一次维修的费用约为 12.8 万元，所以每年因此造成的维修费用就高达 46.1 万元，由于管汇出现故障造成工程停顿而产生的损失额为 28.5 万元；利用动态模型来确定维修周期，一级优先级部件平均维修时间为 165 小时，二级件为 375 小时，第三级按需要做维修，单次维修费用降到 10.3 万元，年均维修费为 36.0 万元，施工中断损失降低到 6.3 万元。同时，结合智能压裂系统高效的作业特点，维修周期优化之后设备的利用效率提高，间接地降低了能耗成本，达到安全性和经济性动态平衡的目的，优化前后核心指标对比如表 2 所示。

表 2 威 204H49-5 井压裂管汇维修周期优化前后核心指标对比表

指标类型	具体指标	优化前	优化后	变化幅度
安全性	整体失效概率（%）	18	5	-72.2%
	振动共振风险等级	高	低	显著降低
	年均维修成本（万元）	46.1	36.0	-22.0%
经济性	年均施工中断损失（万元）	28.5	6.3	-77.9%
	设备综合能耗（kWh/井）	12600	10836	-14.0%

三、优化策略的实施路径与效果评估

（一）分阶段实施计划

根据威 204H49-5 井的施工进度以及管汇结构状况，确定出三段实施计划，保证优化方案顺利展开。第一阶段（应急整改阶段，1~3 天）：对于一级优先级部件，更换失效的密封件，用耐腐蚀强度高的高强度密封材料（聚四氟乙烯增强复合材料），对弯头部位做壁厚修复，用堆焊法补强壁厚到设计要求，同时落实安装改进方案，增加固定的约束，消除共振隐患。第二阶段（系统优化阶段，4 到 10 天），布置动态维修周期模型监测终端，并接入智能压裂系统感知层，达到数据实时采集和模型参数动态更新的目的，对支撑部位做预防性的维修，把支撑间距调到 2.5~2.9 米，提高结构的稳定性；同时完善管汇二维码溯源体系，关联维修记录、监测数据，实行全生命周期管理。第三阶段（固化推广阶段，11 天以后）：把优化策略写入该区块压裂管汇作业规程，对操作人员进行技术培训，规范维修流程和监测标准，建立区域管汇数据库，实现同类井的作业数据共享及策略复用。各个阶段严格控制施工节点，不致影响整个压裂作业的进程，保证优化工作同生产作业同步进行。

（二）效果评估指标体系

建立结构安全、作业效率、经济成本三个维度的评价指标体系，对威 204H49-5 井优化方案实施的效果进行量化分析。结构安全指标有失效概率、振动频率适配性、壁厚损耗速率，用智能监测和现场检测得到的数据来优化，最后的失效概率降到 5%以下，振动频率适配性达到 100%，弯头壁厚损耗速率降低到 0.018mm/a，都符合评价标准。作业效率指标包含设备利用率、施工周期、中断时间，经优化后设备利用率由原来的 62%提高到现在的 92%，压裂施工周期由原来的设计 40 天缩短为 31 天，由于管汇原因造成的施工中断时间从每年平均 72 小时减少到 16 小时，作业连续性明显改善。经

济成本指标有维修成本、中断损失、能耗成本，年均综合成本下降 42.3%，成本控制效果明显。另外对用户满意度进行评价，在管汇的运行稳定性和维修便利度这两个方面操作人员的满意率大于等于 95%，指标体系包含所有的优化方案实施的价值^[4]。

四、结语

以四川威远页岩气区块威 204H49-5 井为研究对象，创建起压裂管结构完整性评价方法体系和维修周期优化方案，使用多数据融合、有限元仿真、动态模型构建等技术解决了传统管理方法精度不高、成本过高的问题。实施之后可以降低管汇结构的安全风险，提高作业的效率和经济性，检验该方法体系及策略的实操性和有效性。压裂管汇结构完整性和维修周期的优化属于一个系统工程，需要结合作业工况以及智能监测技术的发展不断进行调整。可以进一步将数字孪生、AI 预测等技术进行融合应用，对管汇结构的状态进行准确地预测，并且主动地去预防维修的工作，给非常规油气资源的高效开发提供设备的技术支持。

【参考文献】

[1]樊鹏飞,石张泽,王万鹏. 桥塞压裂一体化管柱在渤海油田的研究与应用[J]. 石化技术, 2024, 31 (09) :62-63+55.

[2]杨思齐,徐长峰,赵楠,等. 页岩气压裂管汇冲蚀损伤行为研究[J]. 石油管材与仪器, 2024, 10 (04) :8-12+112.

[3]李玉东. 大尺寸套管老井压裂工艺技术研究与应用[J]. 化学工程与装备, 2024, (07) :83-85.

[4]华剑,马忠杰,袁志强,等. 超高压压裂管汇由壬接头预紧特性分析[J]. 润滑与密封, 2024, 49 (04) :58-65.

第一作者简介：赖浠蒙，汉族，籍贯：江西，学历：本科，职称：工程师，研究方向为机械与质量管理；

第二作者简介：杨秀昌（1986/12/15），男，广东深圳人，本科学士，工程师，钻完井设备维修检测。