

# Discussion on the application of intelligent fracturing system in downhole operation of petroleum engineering

Huaizhi Sun Jiang Fan Chaorong Li Wei Li Qiu Chen

Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd. Underground Operations Branch, Deyang, Sichuan, 618000, China

## Abstract

As a comprehensive system platform, the smart fracturing system integrates digital twin technology, Internet of Things technology, big data technology, artificial intelligence technology, and automation control technology. Based on real-time monitoring, data analysis, intelligent decision-making, and automated operation, it can achieve efficient, safe, and intelligent management of fracturing operations, further improving the overall efficiency of fracturing construction. At the same time, the intelligent fracturing system takes "data-driven decision-making, intelligent control of processes, and panoramic risk perception" as its technical core, which can empower the entire process of fracturing operations. Therefore, this article focuses on analyzing the application of smart fracturing systems in underground operations of petroleum engineering, aiming to leverage the role of smart fracturing systems and comprehensively improve the efficiency and safety of underground operations in petroleum engineering.

## Keywords

Smart fracturing systems; Petroleum engineering; Downhole operations; Applications

# 智慧压裂系统在石油工程井下作业的应用探讨

孙怀志 范江 李朝荣 李伟 陈秋

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司, 中国·四川 德阳 618000

## 摘要

智慧压裂系统作为综合性系统平台, 集成数字孪生技术、物联网技术、大数据技术、人工智能技术、自动化控制技术, 在实时监控、数据分析、智能决策及自动化操作的基础上, 可实现对压裂作业的高效、安全以及智能化管理, 进一步提升压裂施工整体效益。同时, 智慧压裂系统将“数据驱动决策、智能控制工艺、全景感知风险”作为技术核心, 可对压裂作业起到全流程赋能作用。因此, 本文重点分析智慧压裂系统在石油工程井下作业中的应用, 旨在发挥智慧压裂系统的作用, 全面提升石油工程井下作业效率及安全性。

## 关键词

智慧压裂系统; 石油工程; 井下作业; 应用

## 1 引言

为做好石油工程油水井维修、大修、油层改造以及试油等井下作业工作, 提升注采量, 改善油层渗流条件及油水井技术状况, 并促进采油速度及最终采收率的提升, 需合理利用现代化科学技术方法及装备。在现代化技术装备方面, 实践工作发现智慧压裂系统可起到至关重要的作用, 比如提升作业效率、降低作业成本、提升作业安全性等。究其原因, 主要是因为利用智慧压裂系统具备的压裂管汇在线监测技术、视频识别技术、压裂施工风险智能预警技术, 可促进风险预警和故障识别功能实现。同时, 智慧压裂系统还具备设

备智能控制、远程决策等功能作用<sup>[1]</sup>。结合现状油气开采行业实践工作经验来看, 利用智慧压裂系统的压裂专属效能凸显功能, 可实现裂缝智能延伸, 即采用 FracGPT 算法对压裂施工参数实时修正, 每 30 秒可迭代 1 次, 使缝网失衡有效避免。还可以实现支撑剂动态调控, 在雷达浓度监测联合变频螺旋给料的基础上, 使传统“砂团堆积”痛点问题得到有效解决。此外, 实现化学剂靶向投送, 借助纳米级流量计与人工智能 (AI) 配方系统, 使降阻剂/破胶剂按需精准注入得到有效实现。鉴于此, 为了发挥智慧压裂系统的价值作用, 提升石油工程井下作业工作质量效能, 需重视智慧压裂系统在石油工程井下作业的应用。

## 2 智慧压裂系统概述

智慧压裂系统, 为油气田开发领域的一项革命性技术装备, 其集合了若干前沿技术, 包括人工智能 (AI) 技术、大数据分析技术、物联网技术、自动化控制技术等, 有助于

【作者简介】孙怀志 (1989-), 男, 中国四川广汉人, 本科, 工程师, 从事石油工程、石油机械设备、电子电器控制研究。

压裂作业智能化、精准化及高效化目标的实现<sup>[2,3]</sup>。在合理应用智慧压裂系统的基础上,可以使传统压裂作业过程存在的一些问题得到有效解决,如高风险、高成本、低效率等问题,进一步有助于油气开发抽象高效、低碳、安全等方向可持续发展。

结合实践工作经验来看,智慧压裂系统在石油工程井下作业的作用显著,可提升井下作业效率、降低井下作业成本、提升井下作业安全性等。一方面,智慧压力系统将“数据驱动、智能决策、自主控制”作为技术核心,可实现精准裂缝赋能,在微地震+DAS光纤实时反馈的基础上,实现射孔簇效率与裂缝网络形态的动态优化,缝高控制精度 $\pm 0.3\text{m}$ ;并使支撑剂浓度实现智能调节,误差控制在 $\leq \pm 3\%$ ;与传统人工加砂工艺技术相比,导流能力提高40%。另一方面,在全链效率革命基础上,实现压裂车群智能调度,使排量系统误差控制在 $\leq \pm 1.2\%$ ,单井施工周期压缩40%;并实现化学添加剂精准投送,使其计量误差控制在0.5%,单井成本降低18万元。此外,实现风险防控跃迁,通过“压力-振动声波”多源感知网络的构建,可实现5秒内预警砂堵与压窜等风险,与人工操作相比提速高达20倍;并通过深度学习,对管汇疲劳破裂情况进行预判,准确度可达92%,进而能够使高压流体喷射事故避免发生。

### 3 智慧压裂系统核心功能的技术实现路径分析

#### 3.1 裂缝智能监测与评估

为发挥智慧压裂系统以上核心功能作用,则需了解其核心功能技术实现路径,如利用分布式光纤传感技术,实现分布式声学传感(DAS)、分布式温度传感(DTS)、分布式应变传感(DSS)。DAS在相位敏感光时域反射技术( $\Phi$ -OTDR)作用下,可实现 $\pm 3\text{m}$ 精度对微震事件进行定期,频带覆盖在0.1Hz到1000Hz之间。DTS可在拉曼散射效应下,对温度场异动情况进行监测,裂缝高度分辨率可达到 $\pm 0.5\text{m}$ 。DSS可捕捉由支撑剂所致的微应变,灵敏度可达 $1\mu\epsilon$ ,使沙堤失衡风险实现有效预警。此外,在三维地质力学建模的基础上,通过地震各向异性反演和实时微震数据的融合,将裂缝热力图构建出来;并借助VR交互系统,将裂缝方位角、倾角、分形锥度参数等动态展示出来,使裂缝结合形态的毫米级可视化重构得到有效实现。

#### 3.2 构建多物理场耦合预警模型

在砂堵预警方面,当压力变化率高于 $2\text{MPa/s}$ 条件下,同时声能突变,系统预先8秒到12秒触发警报信号。在压窜预警方面,当邻井压力升高 $> 10\%$ ,同时温度曲线发生异常情况下,20秒范围内启动相应的应急程序。在管汇疲劳预警方面,当振动RMS值超过 $5\text{g}$ 叠加频谱谐振特征,破裂预测准确率高达92%。

#### 3.3 可持续开发赋能效益

智慧压裂系统在驱动油气开发作业的基础上,可实现

“三升三降”革命性突破。在“三升”方面,通过装备集群智能协同控制,排量波动 $\leq \pm 0.8\%$ ,单井施工周期缩短40%,实现效率跃升;利用AI风险模型,500ms内响应异常,事故率降低80%,实现安全跃升;夯缝网复杂度指数(分形维数 $\times$ 分支密度 $\times$ 非均质系数)控制在 $> 3.5$ ,采收率可提升12%,实现采收跃升<sup>[2]</sup>。在“三降”方面,利用纳米级流量计,使添加剂实现精准投送,误差控制在0.5%,单井化工成本节省18万元,实现成本降低;在电驱压裂装备能效优化到95%的基础上,柴油消耗降低15%,实现能耗降低;通过施工流程压缩、叠加光伏供电系统,吨油碳排放降低0.8吨 $\text{CO}_2$ 当量,实现碳排降低。

## 4 智慧压裂系统在石油工程井下作业的具体应用要点分析

### 4.1 在实时监控与智能决策中的应用

在石油工程井下作业中应用智慧压裂系统,有必要将该系统的实时监控与智能决策功能发挥出来,使压裂作业全过程实现精准控制,进而提升井下作业效率及安全性。

一方面,智慧压裂系统可借助传感器,对压裂作业中的关键参数进行实时采集,包括压力、流量以及温度等参数,然后把采集的数据传输到云端或者控制中心当中。另一方面,系统借助大数据分析及机器学习算法,实时分析采集获取的数据信息,然后对其中的异常情况及时识别,并及时发出预警。此外,系统可结合实时数据及历史经验,对压裂参数进行自动化调整,在优化施工方案的基础上,使压裂效果提升。

以我国某石油工程井下作业公司为例,通过大数据智能压力系统的构建,借助基于云数字化的一体化平台,使数据链路壁垒全被打破,集成若干功能,如实时压裂曲线数据分析、远程监控施工作业现场、现场异常现象预警等。在此基础上,可将井下作业和地面施工之间存在的视觉堵点打通,使压裂施工实现实时监控、智能预警以及远程化决策。在石油工程井下作业实时监控方面,可构建基于液位变化的数学模型,研制智能配液系统,对供液速率进行实时监控。同时,研制高压关键壁厚及应变在线智能管控系统,实时监控高压管汇,进一步对高压管汇薄弱点进行及时预警,并准确预测高压元件的寿命。在石油工程井下作业智能决策方面,则需在构建基于压裂工序的智能化作业系统基础上,进一步研制压裂施工集成化控制及远程化决策的智能化作业系统,根据酸化压裂施工方案,结合酸化压裂不同作业工况及泵注程序作业参数,使智能化施工、参数智能调整决策目标得到有效实现。

### 4.2 在自动化控制与远程操作中的应用

为提升石油工程井下作业的效率及安全性,可借助智慧压裂系统,实现对作业点的自动化控制及远程操作。

首先,引进智慧压裂系统,通过传感器对压裂作业的

关键参数进行实时采集,包括压力、流量以及温度等。其次,技术人员处于远程控制中心,可借助可视化界面,对压裂作业情况进行实时监控,结合系统提供的智能分析结果,制定并实施有效决策,使远程指挥与调度目标得到有效实现。再则,发挥系统的自动化控制功能,由操作技术人员处于远程控制中心,一键操作压裂设备,如一键压裂、一键供液等,使人工干预有效减少,进一步提升井下作业效率及安全性。并且,还可以联合使用智能变频技术与装备集群化控制技术,使若干台压裂设备之间的协同作业、集群控制得到有效实现,使压裂作业高效、安全稳定进行。

以国内某石油工程井下作业公司为例,在压裂作业中积极推广应用智慧压裂系统,使自动化控制与远程操作之间的深度融合得到有效实现。该公司考虑到远程压力施工的实现,对智慧压裂系统网络环境进行优化,并加装压裂工控机,优化原有系统数据采集、传输以及存储框架,引入应用 Redis 存储系统,对不具备自建光纤的地方选用 4G/5G 通讯,使网络传输数据延迟问题得到有效解决。此外,远程压裂施工过程中,通过“无人值守、有人巡检”目标的实现,使井下作业效率及质量大大提升。在自动化控制与远程操作的基础上,还使员工上井频次减少,在系统设备操作人员和高压设备完全隔离的基础上,使井下作业风险大大降低。由此说明,在石油工程井下作业工作开展期间,需引进应用智慧压裂系统,助力实现自动化控制与远程操作。

#### 4.3 在风险预警与安全管理中应用

智慧压裂系统具备风险预警功能,可以对压裂作业期间存在的异常情况实时监测,在及时发出预警信号的基础上,提醒技术人员及时采取有效措施解决相关异常风险问题。与此同时,系统在集成安全管理系统的基础上,还可以对压裂作业过程进行安全风险监控及管理,以此确保石油工程井下作业全过程的可靠性及安全性。

以国内某石油工程井下作业公司为例,通过井场数字化安全监控系统的开发,构建全维度视频监控及红外监测系统,实现对井场内人员作业情况全天候动态跟踪,使现场人员的人身安全得到有效保证。同时,利用系统实时监控全井场压裂设备的运行参数情况下,可及时有效将压裂设备故障工况识别出来,然后及时发出预警信号,启动预警保护。并通过压裂施工异常应急处置系统的构建,在压裂多模块自动化控制的基础上,借助大数据深度挖掘,构建各设备异常工况条件下的应急处置模型,使压裂施工应急处置获得安全保障支持。此外,为加强作业安全管理,通过酸化压裂复杂工

况预警系统的构建,对各类复杂工况实时识别,如砂堵、井内管柱失效、压裂窜扰、套管变形等,在及时预警的基础上,制定并落实有效应急管理措施,使井下压裂作业风险大大降低,保证石油工程井下作业的可靠性及安全性。

## 5 结语

综上所述,智慧压裂系统将人工智能、物联网、大数据作为核心基础,在构建“感知-决策-执行”闭环架构的基础上,实现井下作业模式的重构,实现压裂作业的智能化、精准化、高效化,并在石油工程井下作业中可发挥显著价值作用。其一,实现作业模式升维,革新传统弓检验依赖型施工模式,通过“地质-工程-装备”数字孪生体的构建,使裂缝延伸实现  $\pm 0.3\text{m}$  的毫米级精度控制;同时,实现集群装备智能协同,排量误差控制在  $\leq \pm 0.8\%$ ,施工时效提高 40%,单井 EUR (估算最终采收率) 提升 12%。其二,实现本质安全跃迁,通过多物理场风险预警模型的构建,堵砂、压窜、管爆等风险响应速度  $< 500\text{ms}$ ,事故率降低 80%;并通过远程控空,将传统人工作业模式取代,如机械臂自动接驳高压管汇,使高压区域暴露风险消除。综合来看,智慧压力系统不单具备工具属性,其在油气开发数字化转型发挥的核心引擎作用显著。在对作业流程重构、赋能绿色低碳、驱动产业升级的基础上,可使石油工程朝向“无人化、自适应、零碳排”等自动化、智能化作业方向持续演进。因此,可将智慧压裂系统合理应用到石油工程井下作业实时监控与智能决策、自动化控制与远程操作、风险预警与安全管理等环节,以此充分发挥智慧压裂系统的作用,全面提升石油工程井下作业工作效率及安全性。当然,从智慧压裂系统未来应用价值、实效提升等角度考虑,还需构建完善的《智能压裂数据交互》行业标准(ISO)、培育“AI+地质”复合人才梯队、构建云边端协同算力网络等,使智慧压裂系统推广应用范围扩大,全面发挥智慧压力系统能力作用的基础上,进一步促进石油工程建设事业朝向自动化、信息化、智能化等方向高质量发展。

## 参考文献

- [1] 夏梁志,刘雄,丁小宁,吴汉川.5500HP新型大功率电驱压裂系统的研制[J].石油和化工设备,2021,24(01):8-11+15.
- [2] 刘芳.哈里伯顿推出油气行业首款智能自动化压裂系统[J].世界石油工业,2020,27(05):47.
- [3] 陈洪才,谌廷姗,庄园,洪亚飞,姚远.页岩油压裂水平井试井测试方法研究[J].复杂油气藏,2024,17(02):174-181.