

页岩气压裂生产中智能化技术应用现状与发展趋势

滕文瑞, 吴镇廷, 李良军, 王永军*

温州职业技术学院, 人工智能学院, 浙江, 温州

*通讯作者: 王永军 (Email: wangyjmcvti@wzpt.edu.cn)

发布日期: 2025年5月8日

摘要

页岩气作为一种关键的全球能源转型资源, 其开发的效率和成本控制在很大程度上依赖于压裂技术的智能化升级。本文探讨了页岩气压裂智能化技术的当前应用状况、所面临的挑战以及未来的发展趋势。

关键词

页岩气压裂; 智能化技术; 数据治理

Application Status and Development Trends of Intelligentized Technologies in Shale Gas Fracturing Production

Wenrui Teng, Zhenting Wu, Liangjun Li and Yongjun Wang*

School of Artificial Intelligence, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325035, China

Email: wangyjmcvti@wzpt.edu.cn

Abstract

Shale gas, as a pivotal resource in the global energy transition, has its development efficiency and cost control heavily dependent on the intelligent upgrading of fracturing technologies. This paper systematically examines the current applications of intelligent technologies in shale gas fracturing operations, identifies prevailing challenges, and outlines future development trajectories within this technical domain.

Keywords

Shale Gas Fracturing; Intelligent Technologies; Data Governance

文章引用: 滕文瑞, 吴镇廷, 李良军, 王永军. (2025). 页岩气压裂生产中智能化技术应用现状与发展趋势.

计算机科学辑要, 1(1), 106 - 109. ISSN Print: 3079-5362; ISSN Online: 3079-5370.

DOI: 10.63313/CS.8009

Copyright © 2025 by author(s) and Erytis Publishing Limited.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

页岩气, 作为全球能源转型中不可或缺的关键资源, 其开采效率和成本控制在很大程度上依赖于压裂技术的持续进步和创新。自从 21 世纪初北美地区爆发了被广泛称为“页岩革命”的现象以来, 水力压裂技术已经从最初的机械化阶段, 经历了自动化的发展阶段, 到了 2025 年, 这项技术已经进入了智能化与绿色化深度融合的新时代。

目前, 中国在智能压裂技术领域已经取得了显著的成就, 这些成就包括中石化数字化中枢的建立、涪陵气田“一键式”压裂系统的成功应用、电驱压裂机组的创新以及配套材料技术的突破。这些技术进步极大地提高了施工效率, 并且有效降低了相关成本。尽管如此, 智能压裂技术仍然存在一些技术瓶颈, 例如系统集成度不够高、数据治理方面存在难题以及核心装备依赖进口等问题。

在本文中, 我们将系统地梳理智能化技术在页岩气压裂领域的应用现状, 深入剖析目前面临的技术瓶颈, 并展望未来页岩气压裂技术的发展方向。

2. 页岩气压裂技术原理与智能化需求

页岩气压裂的核心在于通过“体积改造”形成三维缝网系统, 最大化储层接触面积。与传统压裂相比, 其目标从单一裂缝导流能力转向有效改造体积 (ESRV) 与裂缝密度[1]。技术类型为以下三项: (1) 解堵型压裂: 适用于高渗透储层, 侧重近井带污染清除; (2) 改造型压裂: 针对低渗透储层, 追求长裂缝延伸; (3) 缝网型压裂: 通过多簇射孔与滑溜水注入构建复杂裂缝网[1]。

而需求智能化的起因在于页岩储层的非均质性与超深开发需求 (如中国川南地区埋深超过 3500 米) 要求压裂参数动态优化。传统依赖人工经验的方法难以应对地层应力场复杂变化, 亟需引入机器学习、物联网等技术实现精准控制[2]。

3. 智能化技术应用现状

当前, 我国油气压裂领域智能化技术应用已取得显著进展: 中石化压裂决策中心通过 7.2 米智能大屏与 14 个指挥席位构建数字化中枢, 集成砂堵预警、参数优化等智能模块, 依托机器学习算法实时生成施工建议, 实现 8 口井同步监控; 涪陵气田“一键式”压裂系统推动供液、阀门切换、砂比调整全流程自动化, 施工效率提升 70.9%的同时人员配置减少 45%。在装备革新方面, 四川宏华研发的 6000HP 电驱压裂机组突破机电融合与重载轴承技术瓶颈, 能耗降低 33%并实现新疆、川渝等区块规模化应用; 江汉油田全电动压裂 V3.0 技术通过“一键联动”实现低压至高压全流程自动化, 24 小时连续作业模式下单平台施工成本下降 53%。[3]配套材料与监测技术同步升级, 纳米压裂液与自修复减阻剂在提升携砂性能的同时有效降低地层损伤; 微地震实时监测平台通过 X 平台应用数据验证, 揭示压裂规模与 ESRV (有效改造体积) 的正相关性, 化学示踪剂监测结果进一步明确天然断层对裂缝扩展方向的显著影响, 为精准压裂施工提供科学依据[4]。

4. 技术挑战与瓶颈

首先系统集成度方面, 通过多年的技术攻关已逐渐形成了适合陆相页岩油储层的压裂改造模式和技

术体系,在改造段长、簇间距、簇数、用液和加砂强度等参数与国外基本相当,但混砂、输砂车集成化自动化程度较低,劳动强度大。压裂软件、压裂设备自动化控制、自适应工控软件及管汇系统集成化方面与北美存在差距[5]。

其次在于数据治理难题,随着页岩油规模化开发,超级大平台井场功能区多、连接复杂、井场模块化程度低,现有流程多为远程开环控制,控制单元多、操作复杂,压裂过程与装备运行缺乏可视化、数字化评估和自动化控制,供液、输砂装置、低压流程、高压流程等部分关键装备及压裂流程未实现全自动化一键运行,实时数据未能进行关键工程参数预警和分析,需要对电动压裂全流程进行自动化、数字化、智能化升级。[6]

最后便是核心装备依赖进口,高端支撑剂、智能转向剂等材料仍依赖进口,6000HP 压裂泵的关键密封件国产化率不足 60%。[5]

5. 未来发展趋势

页岩气压裂智能化技术发展趋势正围绕高效化、绿色化和全流程数字化方向快速演进,核心技术突破与集成应用成效显著。根据中国知网近年研究成果及行业实践,未来发展方向可归纳为以下五大维度:

5.1 全电动压裂装备与自动化工艺的深度整合

以中石化江汉石油工程公司研发的"智能化全电驱压裂系统"为代表,通过"人机互动+精准定位+智能协同"模式,实现了从低压供液到高压泵注的"一键联动"全自动化压裂。该系统在涪陵页岩气田应用中,能源消耗降低 29%,施工效率提升 148%,现场人员减少 40%,形成"V3.0 技术"体系。智能化升级涵盖自动输砂装置、远程泄压装置等配套设备,支持 24 小时连续施工,并集成高压电监测、参数控制等五大功能模块,标志着我国工厂化压裂进入智能协同新阶段。

5.2 机器学习与大数据驱动的智能决策系统

基于数据挖掘的压裂参数优化成为技术突破重点。长安大学团队利用美国 Eagle Ford 页岩区 300 余口井数据,通过主成分分析和随机森林算法,建立了压裂级数、支撑剂量等参数的优化模型,验证了压裂规模参数对产量的显著影响。[7]中石化胜利石油工程公司 2025 年建成的压裂支持决策中心,通过机器学习与专家经验融合,实现 8 口井同步监控及施工方案实时优化,推动"多人一井"向"少人多井"转型。杰瑞集团 2025 年发布的 AI•RFRAC 系统更开创了全球首个系统性智慧压裂解决方案,实现压裂参数的动态自适应调整。

5.3 地质工程一体化的精细化压裂体系

针对深层页岩气开发,聂海宽团队提出体积压裂 3.0 工艺,强调裂缝控制与表征的精细化发展。通过构建地质-工程-经济一体化压裂优化设计方法,结合微地震监测与 XGBoost 预测模型,实现裂缝扩展四维可视化监控,预测产气量平均误差降至 14.67%[8-9]。石化机械开发的 SOFELink 数智平台,集成裂缝扩展模拟与套管变形预警功能,在顺北深层油气田创下单日施工段数纪录。

5.4 绿色低碳技术路径的全面渗透

电动化转型显著降低环境负荷,涪陵气田"一键式"压裂使噪音下降 46.3%,碳排放减少近 2 万吨。华东油气分公司通过电动压裂自动化工艺,实现返排液 90%循环利用,燃料消耗成本降低 33%。2025 年技术前瞻显示,无水压裂技术将采用液态 CO₂替代水基压裂液,结合纳米级渗透剂使采收率提升至 25%-30%。

5.5 数字孪生与物联网技术的深度融合

石化机械"5G 压裂机组"实现设备全生命周期数字化管理,通过 5G 网络传输井下数据速率提升 10 倍,故障诊断响应时间缩短 80%。成都网缝科技开发的"云医生"系统,依托百万条压裂曲线数据训练深度学习模型,实现施工压力曲线自动诊断与裂缝延伸预测,诊断准确率达 92%。未来数字孪生技术将构建"虚拟井场",实时模拟井下工况优化参数组合。

讨论与认识

展望未来,为了推动页岩气压裂技术朝着更加高效、精准和可持续的方向发展,需要进一步深化智能化与绿色化的融合,提高装备的国产化水平,并且优化数据治理体系。

智能化的需求主要来自于储层的非均质性特征以及超深井开发过程中对动态优化的迫切要求。在应用现状方面,中国已经通过建立数字化中枢、部署自动化压裂系统、采用电驱装备以及引入先进的监测技术,显著提升了开采效率并有效降低了成本。尽管如此,目前仍存在一些亟待解决的问题,包括系统集成度较低、数据治理的复杂性较高,以及在核心材料与关键装备方面过度依赖进口等。未来,页岩气压裂智能化技术的发展趋势将集中在全流程的自动化与数字化升级、关键材料的国产化、数据驱动的精准压裂技术以及绿色技术的应用上。这些趋势将共同推动页岩气开发朝着更高水平的智能化和可持续化方向发展。

参考文献

- [1] 李文阳,邹洪岚,吴纯忠,等.从工程技术角度浅析页岩气的开采[J].石油学报, 2013, 34(06): 1218-1224.
- [2] 翁定为,雷群,管保山,等.中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J].石油学报, 2023, 44(12): 2297-2307.
- [3] 姚红生,房启龙,袁明进,等.渝东南常压页岩气工程工艺技术进展及下一步攻关方向[J].石油实验地质, 2023,45(06):1132-1142.
- [4] 赵超峰,王海波,郭伟,等.页岩气压裂微地震监测技术及其在四川盆地威远地区 X 平台的应用[J].地球物理学进展, 2022, 37(05):2089-2096.
- [5] 汪海阁,乔磊,杨雄,等.中石油页岩油气工程技术现状及发展建议[J].石油学报, 2024, 45(10): 1552-1564.
- [6] 张锦宏.中国石化页岩油工程技术新进展[J].油气藏评价与开发, 2023, 13(01): 1-8. DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.001.
- [7] 李彦尊,白玉湖,陈桂华,等.基于大数据的页岩油气压裂工程参数优化方法[C]//长安大学.第六届数字油田国际学术会议论文集.中海油研究总院有限责任公司, 2019: 36-40. DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.091680.
- [8] 高岳,王涛,严子铭,等.页岩气高效开采中钻井完井和水力压裂的关键力学问题[J].力学学报, 2022, 54 (08): 2248-2268.
- [9] 聂海宽,党伟,张珂,等.中国页岩气研究与发展 20 年:回顾与展望[J].天然气工业, 2024, 44 (03): 20-52.