



## 推进中国式现代化的石油石化行动

### 技术引领市场⑥

# 数智化全电动压裂:油气高效开采新引擎

石化机械研制出最新一代连续满载数智化全电动压裂装备,同工况下相较上一代产品性能提升40%,  
机组装备数量减少33%

### 数智领航

#### 智慧大脑赋能开采

随着页岩油气勘探开发深度纪录被不断刷新,为了更有效地压开地层,形成更复杂的裂缝网络,从而增加油气的渗流通道、提高油气产量,智能成为研制压裂装备的关键词。

给压裂装备装上“最强大脑”,利用大数据算法与人工智能模型,精准调控压裂泵注程序成为趋势。操作人员在远离井场的中控室,面对可视化大屏,就能依托电脑分析决策,实现远程、精准、自动化作业,大幅提升压裂效率,将过去粗放式压裂带入精细化时代。

石化机械基于自主开发的SOFELink智能控制平台,充分利用物联网、大数据、智慧云平台等先进技术,实施信息技术改造和作业全流程优化,将企业生

### 绿色智能

#### 低碳变革驱动未来

为实现绿色施工,新型压裂设备正向低噪声、低污染、节能环保、智能化方向发展,不仅具备远程监控、自动调节等功能,而且能够根据实际工况实时优化,提高作业效率 and 安全性。

石化机械为了促进压裂装备迭代升级、提升压裂时效,着力攻关工艺流程和自动控制技术,开展智能化平台设计,实现从供液、混砂到泵注的全流程电动化,配套电网负荷预测技术确保供电可靠性。实现“全流程供液供砂”远程一键式控制、“压裂泵、高压管汇和井口阀门”高压流程的一键控制,支持作业指令一键下发。压裂参数毫秒级动态优化,施工误差控制在±0.5%,较人工操作精度提升20倍,并具备设备健康自诊断、故障预判等能力。

### 专家视点

## 压裂装备从人工操作转向远程智控

□石化机械钻采装备领域高级专家 王云海

我国石油工业发展初期,压裂装备依赖进口,核心技术被国外垄断长达30余年。1989年以来,石化机械四机公司先后成功研制700型、1000型、1800型压裂装备,彻底打破了国外技术垄断。刚研制成功的最新一代连续满载数智化全电动压裂装置标志着我国压裂装备已经达到了国际领先水平。

最早的压裂装备都是人工操作的,设备的启动、混砂、配液都由人工启停。2006年后,四机公司与国内高校合作,研究数字化成套压裂装备系统集成技术,开发了2500型成套压裂装备,将数字化技术引入压裂作业,实现了压裂装备的部分单机自动化、主体设备的集中控制、基本的数据采集和监控。但此时的数据分析和分析能力有限,主要用于简单的工况判断和安全性。

为满足深层、超深层油气藏及非常规油气开发需求,压裂装备向多功能集成化、智能化、绿色化方向迭代发展。石化机械研制了兼顾节能环保、高效率和安全性的世界首台(套)5000型电动压裂装备,单机最大输出功率达5000马力。该装备通过电机直接驱动,取消柴油机、液力变矩器和变速箱配置,装备国产化率由50%提

升到95%。同时,搭载了石化机械四机赛瓦公司自主研制的SOFELink系统,分析压裂施工数据,优化施工参数和流程,实现压裂液的快速配制和供应,体现模块化、少人化,降低作业成本、缩短施工周期。这一阶段的压裂装备为进阶数智化压裂装备提供了更多的参考。

近年来,石化机械采用国际主流的五缸压裂泵结构,将压裂作业中的多种功能集于一体,如混砂车、压裂车、仪表车等设备的一体化设计,减少设备的数量和占地面积,提高井场的空间利用率和作业的协同性。在同等压裂规模下,压裂装备数量减少25%以上,解决了压裂装备数量多、功率提升难的问题,性能指标达到国际领先水平。借助5G、物联网等通信技术,实现对压裂装备的远程实时监控和故障诊断。操作人员可以在远离井场的控制中心对设备进行远程操作和管理,减少现场工作人员数量,降低劳动强度和作业风险。通过数据分析和预测性维护技术,提前预测设备故障,及时进行维护和保养,提高设备的可靠性、延长使用寿命。

未来,基于大数据分析和机器学习算法,压裂装备将具备更强的智能决策能力,系统可以对大量的历史压裂数据和实时施工数据进行分析,为不同的油气田区块、不同的地层条件提供个性化的压裂方案。

## 压裂技术从经验驱动转向数据驱动

□石油工程技术研究院专家 卞晓冰

在油气开发领域,压裂技术作为释放地层潜能、提升油气产量的核心手段,正经历从经验驱动向数据驱动的模式转变。随着人工智能、物联网等新一代信息技术深度应用,全球油气行业正加快推进压裂作业智能化进程,加速构建涵盖井下、地面、作业中心的自动化、智能化压裂技术体系,预期打造出压裂方案“一键式”设计、压裂风险超前预测、压裂施工智能优化决策与全电动压裂装备智能调控的闭环控制系统。当前,该技术整体处于学术性研究向工业级应用的过渡阶段,有着广阔的发展前景。

2020年后,国际油服公司相继推出了集监测、预警、调控于一体的智能压裂操作系统及装备,包括哈里伯顿的SmartFleet、斯伦贝谢的StimCommander、贝克休斯的CyberFrac等,压裂裂缝均匀性提高30%,单井完井成本降低25%,产量提高20%。国内以中国石油、中国石化为代表的石油公司已经建立了远程技术决策中心,具备智能压裂实时数据传输、监测、分析与优化的基础条件,但智能压裂技术研发与应用总体仍处于起步阶段。

2024年,工程院联合物探院、机械公司、江汉油田、中原油田、国勘公司等单位,聚焦“非常规油气藏压裂智能优化技术及装备研发”,针对储层改造技术“压前-压中-压后”全链条,初步搭建了集基础数据采集、处理、分析、优化及调控于一体的全场景智能压裂云平台,在智

### 前沿攻坚

#### 从蓝图到实物的跨越

压裂装备是实现增产的核心设备之一,是从“低效难采”向“高效经济”跨越的核心驱动力。20世纪80年代末以来,石化机械四机公司先后开发出国内首套700型、1000型、1800型、2000型压裂机组。2008年,由石化机械自主研发制造的世界首套车载式2500型压裂机组亮相普光气田大型酸压现场。2013年,功率更大、马力更强、自动化控制程度更高的3000型压裂车问世,并在涪陵国家级页岩气示范区建设中大展身手,成为主力装备。2014年8月,在焦页42号平台当时国内最大规模的“井工厂”交叉压裂施工中,3000型压裂装备创下7项压裂施工新纪录。

但新的困扰随之而来。“20多台压裂车同时作业,像联合舰队,壮观,但噪声也大。”石化机械着力突破大功率

电动驱动系统关键技术瓶颈,研制5000型超大功率电动压裂装备,适配压裂作业复杂工况。

2017年12月,石化机械研发的首台电动压裂泵装置在涪陵193平台完成先导试验,随后,历经单台工业试验、油电混合压裂到全电动成套压裂。

2020年5月,超大功率全电动压裂成套设备在涪陵页岩气田焦页27东平台成功开展工业试验,首次从主压装备到辅助设备实现100%电动化、橇装化。

该成套设备的核心——超大功率电动压裂装置采用多相变频电驱动压裂泵系统,是基于中国高铁变速控制技术的自主创新,部件国产化率超过95%。与传统压裂装备相比,该成套设备取得了机组功率智能匹配、装备集群控制和远程数据管理等7项创新成果,功率更大、智能更高,二氧化碳、氮氧化物等实现零排放,且降噪20%以上。

□卢 鹏

近日,石化机械针对超深层压裂规模大、高压下压裂泵寿命短、单机功率小、设备配套数量多等难题,研制出最新一代连续满载数智化全电动压裂装备,在焦页32平台完成3口井122段压裂作业,累计使用244小时,单机输出排量2~2.9立方米/分钟,设备平均负载率41%~60%,同工况下相较上一代产品性能提升40%,机组装备数量减少33%。

石化机械研制的数智化全电动压裂装备曾在国家页岩油先导示范区重点工程樊页1试验井组应用,打破了胜利东部油区单井段数最多施工纪录,实现全自动模式下供液、供砂系统自运行。随后,胜利牛页1试验井组同时应用两套数字化指挥中心打造“联合舰队”,首创页岩油双机组同步电动压裂新模式,通过智能变频、装备集群化控制技术实现“零排放”作业,7×24小时持续输出绿色能量,不仅助力打造“绿色开采示范区”,而且填补了“同步电动压裂”装备技术空白。



胜利东部油区首个搭配双电驱压裂机组的牛页1试验井组。

李 佳 摄

### 企业实践

## 胜利油田济阳页岩油:智能装备驱动压裂效率翻倍

□徐海峰 陈 民 顾珍时

6月6日,樊页2HF井组迎来第40段压裂施工,负责指挥的王晨星下达加砂指令,操作人员在电脑屏幕上轻松完成加砂量调整。

“几年前,想都不敢想。”王晨星对工作环境的变化深有感触,“以前在太阳下施工,一身工衣一身汗;现在在空调房里,颇有‘白领’的感觉。”

从“没人干”到“抢着干”,背后是页岩油智能压裂装备的升级。为更好满足页岩油开发施工需要,胜利石油工程井下作业公司先后引进5000型电驱压裂橇、电驱混砂橇、140兆帕远程控制高压管汇等装备,现场设备自动化、智能化水平显著提升。

作为现场应用的受益者,井下作业公司压裂五中队经理朱国松感触最深的是,施工

人员少了近一半,施工强度降低了,压裂质量和速度却明显提升,也更加安全环保。

与传统柴油驱动相比,电动装备动力更足,用更少压裂车便能满足施工需求,降低了对现场空间的需求。

朱国松介绍,柴驱车组每压裂1段,需耗费约6吨柴油,频繁的加油工作量和设备维护工作,使得两段压裂间隔近3小时,加之噪声高,夜间施工受限。

电动装备每天施工段数则实现翻番,在五六段。在樊页1扩试验井组压裂施工中,创下了国内东部油区页岩油水平井施工总液量、加砂量最大,以及单日压裂施工7段的高指标、新纪录。

施工现场的数字控制中心内,施工人员在电脑内输入相应数据,就能精准地自动调节排量、砂比、化工料量等参数。“以往通过手动调整,势必会有响应误差,在一定程度上影响

施工质量。”朱国松说。

页岩油井组普遍采取“拉缝化”压裂,几口井同步压裂,减少等停环节,效率更高。而现场三四十个闸阀,一旦开关错误,便会导致工程事故。新装备的液控系统,内含逻辑控制元件,大大减少误操作的概率。

压裂井场几十公里外的井下作业公司技术研发中心内,副经理袁浩文依托压裂远程支持决策系统,紧盯大屏上压裂曲线的各项参数,与现场时刻保持对话:“压力异常升高,需灵活调整施工排量、加砂浓度、压裂液性能等参数来确保压裂施工安全平稳。”

目前,该系统正在稳步运行中,实现一名专家为多个施工现场提供技术服务。“随着决策系统不断迭代升级,实现前方指挥部后移、多线程支撑多个现场,为智能化压裂做好技术探索。”袁浩文表示,智能压裂装备和数字化决策可有效助力页岩油井获得高产。

缝网络系统。

以往评价压裂效果需要先录取资料再计算,要四五个小时。现在“动态监测+量化评估体系”可通过微地震、广域地磁、光纤监测等监测技术的应用,形成对模拟结果的相互印证,可以实时看到井下裂缝的延伸方向和高度,为压裂调控提供更加全面的决策依据,对压裂效果实时评价。

目前,涪陵页岩气田智能压裂系统已成功打通中国石化工程院实时裂缝模拟与中国地质大学(武汉)三维模型的数据通道,实现了多源数据的深度融合与共享。同时,5个压裂施工平台模型已完成云端部署,相关人员可随时随时随地调取生产数据进行分析研究。

涪陵页岩气田智能压裂系统的成功应用,标志着我国页岩气井压裂技术向智能化、数字化迈出重要一步。

上透视镜,在行业内率先实现了“从看着曲线指挥到看着裂缝指挥”的转变;副屏则作为“现场监控中心”,接入了现场视频监测系统和仪表远传控制系统,通过高清视频与传感器网络,实时展示压裂现场的设备运行状况、关键参数及施工画面,实现压裂作业全方位可视化管控。远程监督人员可在线判断供液、供砂情况,判断排量是否有富余,功率是否正常,进而把装备的能力发挥到极限。当决策中心需要下达调整指令时,就可以通过5G传输对讲系统,将指令第一时间传达至现场。

此外,新建立的三维动态地质模型就像向导,能找到页岩气富集区。借助这个模型,压裂施工前可以设计新井的井眼轨迹,明确风险点,锁定最佳“甜点”区,更好地开展地下岩石新裂缝的设计工作,让新缝、老缝和天然裂缝相互连通、协同作用,形成一个高效的裂

## 江汉油田涪陵页岩气:压裂实现“看着裂缝指挥”

□刘冬娅 王 帅

“焦页9-11HF井前14段压裂的裂缝扩展情况良好,改造裂缝均达到了目的。可以按照设计进入下一段压裂施工……”

在江汉油田产建管理中心一体化压裂决策中心办公室,江汉油田工程院储层改造所所长张凡根据监控系统传输的生产信息,得出了施工顺利的结论,随后下达生产指令。

看得见现场,看得到地下。这就是涪陵页岩气田压裂施工智能监控的现状。

新增添的智能监控系统,让远程指挥人员仿佛有了“透视千里眼”。其主屏宛如“压裂管理中枢”,利用三维地质建模与实时数据融合技术,采用“机理模型+大数据训练”形成了两种裂缝扩展模型,实现了在压裂过程中快速拟合井下裂缝三维形态,如同为远程指挥人员安