



开辟地质工程一体化智能压裂新赛道

□中国工程院院士、中国石化总地质师、
石油勘探开发研究院院长 郭旭升

在全球能源格局深度重构、国家能源安全保障日益紧迫的当下,非常规油气资源已成为我国能源自主可控的“关键增量”。页岩油气、致密油气的规模化开发,迫切需要突破制约地质工程一体化压裂技术智能化发展的关键瓶颈。

传统模式下,国外垄断核心技术、“数据孤岛”横亘,压裂工艺适配油气储层缺乏指引,制约了资源潜力释放。石勘院以创新为刃、协同为盾,在技术自主化与融合化上破局攻坚,以“物理+数据”双轮驱动开辟智能压裂新赛道。

能源变局下的技术突围

随着常规油气开发进入中后期,非常规油气承载着我国增储上产的核心期望,但其勘探开发面临“双重挑战”:一是地质条件复杂,非均质性强、应力状态多变,传统“分段接力”设计模式受制于“数据孤岛”,地质、物探、测井、压裂等专业认识难以有机融合;二是核心技术受制于人,国际巨头构筑了技术和专利壁垒,进行多方面封锁。例如,压裂设计软件被国外产品垄断,价格高昂且存在断供风险;分布式光纤监测也被国外封锁,我们的数据需要在境外解释处理,埋下安全隐患。中国非常规油气压裂技术就在这重重围堵中破茧而出,升级发展!

“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的”,技术命脉必须自主可控,升级发展地质工程一体化压裂技术不仅是非常规油气勘探开发的“金钥匙”,更是守护国家能源安全、掌握技术命脉的“战略必争之地”。

自主创新铸就破局之力

石勘院聚焦“自主可控”与“深度融合”,不断交出答卷,给出中国石化的自主答案。在地质工程一体化压裂核心软件上,自主研发的HiFrac压裂模块打破国外垄断,构建了“地质建模-裂缝模拟-产能预测”技术流闭环流程,实现了多源数据流“持续更新、全程挖掘”;在关键材料上,联合北化院、上海院研发耐高温高盐滑溜水压裂液,可耐温200摄氏度与25万毫克/升矿化度,填补国内空白;在光纤监测上,自主研发HiFiber1.0光纤监测软件,实现了DAS/DSS协同监测和数据解释,将“油气藏的眼睛和耳朵”牢牢掌握在自己手中。

石勘院打破部门壁垒,组建跨专业地质工程一体化压裂团队,以“数据流+技术流”双贯通体系跨越专业鸿沟。7年来,团队长期驻守生产前线,和油田分公司密切配合,以“一段一策”的执着,在普光陆相致密气(普陆3井获13万立方米/日)、林滩海深层页岩气(林页3HF井获17.19万立方米/日)、寒武系第竹寺组新层系(金石103HF井获25.8万立方米/日)等重大突破中作出贡献,践行了“把论文写在祖国的大地上”。



四川盆地某页岩气井进行压裂施工。 资料图片

“物理+数据”培育硬实力

智能压裂不是选择题,而是必答题。产业链升级刻不容缓,深地与非常规油气潜力巨大但挑战艰巨,唯有抢占核心技术制高点,才能打通未来能源供给命脉,铸造端牢能源饭碗的硬实力。

地质工程一体化压裂团队精准锁定未来产业链升级的核心痛点——“智能决策滞后”与“地质认知不清”,以“物理认知+数据智能”双轮驱动破局,赋予压裂“自主决策大脑”,目标直指地下裂缝的精准、高效、自适应控制,突破人工决策瓶颈。这不仅为解决当前增产难题的利器,更是为“十五五”及长远发展储备核心创新动能的关键

布局,将成为未来产业链智能化、高效化升级的“技术锚点”和“价值引擎”。

从实验室的岩芯实验到开场的智能调控,从打破国外垄断到培育新质生产力,地质工程一体化压裂技术的每一步突破,都紧扣着国家能源安全需求。未来,石勘院将继续以“物理+数据”双驱之力,在智能压裂新赛道深耕前行。

走出“孤岛” 让技术成果落地生根

地质工程一体化压裂团队让地质的“眼”、测井的“尺”、压裂的“手”紧紧结合



科研人员在进行岩石力学性质与支撑剂导流能力评价实验。 程力沛 摄

□王海波

石油勘探开发领域面临着“技术孤岛”困境——地质建模、测井解释、压裂设计、油藏模拟分属不同部门,存在专业壁垒,缺少数据互通,难以形成合力,科技成果转化效率不高,严重制约非常规油气藏高效开发。

在此背景下,石勘院于2018年跨专业组建地质工程一体化压裂团队,历经7年攻坚,不仅实现了技术成果的规模化现场应用,更创造多个“首次”突破,为地质工程一体化工作推进提供了可复制、可推广的协同转化范式。

跨专业组队,打通成果转化“中梗阻”

非常规油气藏的复杂性决定了压裂改造不能靠“单打独斗”。2018年,面对致密油气、页岩油气勘探开发中“地质认识不清、工程措施不准”的难题,石勘院组织采油工程研究所、地球物理中心、测井所等部门,整合地质、地震、测井、压裂、油藏等多专业技术骨干组建“地质工程一体化压裂团队”,构建“大兵团作战”模式,让地质的“眼”、测井的“尺”、压裂的“手”紧紧结合在一起,曾经孤立的技术成果,在协同中焕发新生。

团队的核心突破在于搭建“数据流+技术流”双贯通体系:一方面,通过自主研发的地质工程一体化压裂软件HiFrac,实现地质模型、裂缝模型、油藏模型等各类数据无缝衔接,破解“数据孤岛”难题;另一方面,重构工作流程,将“地质建模-甜点评价-裂缝模拟-产能预测-压后评价”串联成闭环,每个环节均有多专业人员协同参与,比如地质研究人员与压裂研究人员共同制定段簇划分方案,确保地质“甜点”与工程改造精准匹配,彻底解决传统“接力式”设计的脱节问题。

此前分散的技术成果真正“活”了起来:地球物理中心提供的裂缝定量评价技术,为压裂方案差异化设计提供支撑;测井所研发的地质工程参数评价算法,直接为压裂选段选簇提供可靠数据;自主研发的全三维复杂裂缝扩展模拟技术,得以依托地质团队提供的高精度储层模型实现精准运算。

驻场作战破难题,不再“纸上谈兵”

科技成果转化的“最后一公里”在现场,而非常规油气藏的现场往往意味着高难度、高风险、高挑战。地质工程

一体化压裂团队长期驻守川渝、中原、河南等油气生产前线,将技术成果与现场需求深度融合,用“驻场攻坚”破解转化难题。

2022年末,四川达州寒潮裹雪,已在前线支撑两个月、即将返京的压裂团队接到普陆301井施工通知后毅然折返,全力保障全井压裂顺利完工;清明节假期前夕,中原油田东濮区块提产任务紧急,团队3天内高效协作完成超4-8井、开40-2井压裂方案设计,用过硬成果赢得甲方高度认可。

在勘探战场上,为了破解千佛崖组致密砂岩“压裂无效”的难题,团队驻井日夜奋战,“一段一策”让普陆3井喷出13万立方米/日高产气流,终结该探区陆相勘探10余年沉寂;在西南林滩海,面对4100米深的储层、窄得像“一线天”的压裂窗口,团队驻场28天,硬是把“可能放弃的探井”变成“功勋井”,保住了区块矿权;在四川盆地寒武系第竹寺组,团队打破业界“唯高有机质”的固有思维,通过反复室内实验和测井数据分析,锁定低有机质厚层粉砂质页岩含气潜力,金石103HF井喷出25.8万立方米/日气流。

正是这种“扎根现场、实时协同”的模式,让技术成果不再是“纸上谈兵”——团队将实验室研发的压裂液体系、裂缝监测技术带到现场,根据实际地层反馈动态优化,解决了“实验室数据与现场工况不匹配”的转化痛点问题。

为一体化推进提供“石勘方案”

地质工程一体化压裂团队不仅实现了自身成果的高效转化,更探索出一套可复制、可推广的“协同转化范式”,为集团地质工程一体化工作推进提供了宝贵经验。

这套范式可总结为“三个一体化”:组织一体化,打破部门壁垒,组建跨专业团队,形成“头靠头协作、手拉手攻关”的组织模式;流程一体化,构建“地质-工程-油藏”闭环流程,让数据与技术在全链条贯通,解决“接力式”设计的脱节问题;应用一体化,坚持“驻场攻坚”,将技术成果与现场需求动态匹配,用“一段一策”破解转化痛点问题。

集团公司首席专家王光付说:“地质工程一体化就像足球队,只有每一脚传球无缝衔接,才有临门一脚的进球。”从打破壁垒到成果落地,从现场攻坚到范式输出,石勘院地质工程一体化压裂团队用协同攻关破解了科技成果高效转化的难题。

国产软件赋能油气突破——地质工程一体化压裂软件 HiFrac

攻关背景

在非常规油气藏压裂改造中,一体化压裂软件是编制压裂方案的核心工具,决定了施工成效,在自主压裂软件HiFrac1.0投入应用之前,国内压裂软件市场完全被国外软件产品垄断,这些软件都是针对国外储层特点研发的,在国内应用存在适应性差,特殊条件无法考虑等问题,同时价格高昂,更存在数据资料更新不及时等问题,严重制约我国非常规油气储层改造技术进程。

技术亮点

HiFrac软件构建了地质建模、压前评价、裂缝模拟、压后分析、产能预测等覆盖压裂全流程的核心功能模块,实现了地质与工程的深度融合,打破传统“接力式”压裂设计的局限性,构建全流程协同联动机制。

HiFrac软件通过两大核心举措实现深度融合:一方面,搭建统一数据管理平台,实现地质模型、裂缝模型、油藏模型等数据“一次录入、全程复用”,确保地质参数能实时传递至工程设计环

节,工程数据也可反向反馈至地质模型优化;另一方面,构建一体化工作流程,从地质建模出发,依次衔接裂缝扩展模拟、产能预测、压后评价,形成“地质指导工程、工程反馈地质”的闭环体系,实现多专业成果交叉应用,让压裂设计既符合地质客观规律,又满足工程施工可行性与产能开发需求。

在裂缝扩展数值模拟核心模块,软件创新实现“井筒-射孔-裂缝”全耦合,刻画多簇裂缝流量动态分配,采用非均匀网格准确表征分米级薄应力夹层,有效模拟裂缝缝长和缝高延伸,同时裂缝扩展和支撑剂耦合计算方法,能够实现支撑剂铺置准确刻画,缝内支撑剂铺置形态模拟与现场施工情况符合程度高,有效指导施工排量、压裂液黏度等工艺参数优化及现场调控。

应用价值

目前HiFrac软件在中原油田、江苏油田、河南油田开展培训应用,支撑了中国石化首口深层地热能科学探井福深热1井压裂施工,助力普陆

3井、金石103HF井等多口重点井并取得勘探重大突破,以及第竹寺粉砂质页岩、阜二段页岩油立体开发方案设计,实现了对国外商业软件的全面替代。

HiFrac软件填补了国内地质工程一体化压裂设计与模拟分析平台的技术空白,降低了国外软件断供风险,形成具有自主知识产权的技术体系。未来,随着软件功能的持续迭代升级,其将在更复杂的油气藏开发场景中发挥更大作用。

点评

和国外压裂软件相比,HiFrac软件更适用于我国岩相多变、岩性复杂的非常规油气藏,能有效模拟非均匀应力条件下的裂缝扩展形态,有效支撑穿行轨迹优选及压裂工艺参数优化。目前,石勘院压裂设计全部采用自研HiFrac压裂软件,支撑了普光、川西、丁山、井研、复兴、苏北等不同类型储层压裂方案设计。

——石勘院采油工程研究所所长 黄志文
王迪 供稿

协同创新显著增产增效——耐高温高矿化度滑溜水压裂液体系

攻关背景

中国石化东部断陷盆地陆相页岩埋藏深、储层温度高,陆相页岩储层普遍发育多层隔层,对压裂液耐温抗盐降阻性能提出更高要求。

我国耐温抗盐滑溜水体系与国外油服公司技术存在代差。面对挑战,集团公司要求充分发挥上下游一体化优势,全面提升压裂液技术水平。石勘院联合北京化工研究院、上海石油化工研究院、江苏油田,依托集团公司科技攻关项目,成功研制出具有中国石化完全自主知识产权的耐高温高矿化度滑溜水压裂液体系,一举填补了国内该领域技术空白。

技术亮点

在集团公司科技部的统筹组织下,组建了覆盖“材料研发-工艺优化-现场试验”全流程的上下游协同攻关团队。

降阻剂共聚物经过系统构效关系研究,引入强极性空间位阻基团和耐盐单体,控制交联位点

的密度和分布,匹配耐高温交联构型,优化聚合物分子量及支化结构,解决超高盐条件下聚合物的水解问题和耐剪切能力弱的问题。面对非常规储层复杂多变的孔隙润湿性,团队通过分子嵌段设计研制出具有分支结构的复合表面活性剂渗吸剂,针对岩石表面矿物成分与孔隙结构复杂的特征,调整其亲水亲油特性,显著提高压裂液在微小孔隙中的渗透效率。研发复合有机锆交联剂体系,使聚合物溶液形成网状结构,在高温下保持压裂液的黏稠度不下降。实验室测试结果显示,该交联体系在200摄氏度高温下仍能保持稳定的交联结构,实现了体系性能的调控。

应用价值

经过两年半集中攻关,团队成功研发出耐温180~200摄氏度、抗盐25万毫克/升矿化度的降阻剂聚合物;研发耐温180摄氏度、抗盐25万毫克/升矿化度的渗吸剂体系;整体研发形成耐温抗盐滑溜水压裂液体系,主要性能指标达到国内外先进

水平。体系研发均由实验室小试到中试放大,所有关键原材料均已实现国产化,拥有自主知识产权。2025年3月,该技术在江苏油田永106-2井成功试验,压后日产油达到21.6吨,增产显著。

点评

这次联合攻关通过上下游紧密协作,体现了“产学研用”深度融合的优势,我们不仅突破了极端条件下的材料瓶颈,构建了一套技术领先的压裂液技术体系,更重要的是实现了降阻剂聚合物从理论创新到现场应用的高效转化。

——北京化工研究院副总工程师、项目技术首席 伊卓

这套新体系在现场应用表现出色,性能稳定,整体施工顺利,产油效果超出预期,为今后开发复杂储层提供了可靠的技术支持。

——江苏油田工程院副院长 黄晓凯
崔佳 供稿

双链融合引领技术革命——光纤压裂监测技术

攻关背景

随着我国油气勘探向深层、超深层领域不断迈进,传统压裂监测技术面临精度不足、覆盖有限的难题。

分布式光纤是油气提质增效的关键核心技术之一,凭借耐腐蚀、易布设、无源传感、抗电磁干扰、传感精度高、传感阵列化等优势被广泛应用。

长期以来,分布式光纤测井部分核心技术和软件被国外极少数专业公司垄断,严重制约了我国相关技术产业化发展。国内施工数据需跨境处理,不仅成本高昂,更埋下数据安全隐患。

技术亮点

攻关团队锚定“一缆多感、全时全域”技术目标,在实验室创新搭建大尺度物理模拟实验平台,成功复现3000米地层高温高压环境,突破性实现了分布式声波传感(DAS)与分布式应变传感(DSS)的协同仿真监测,累计获取有效实验数据超20TB,为技术研发奠定了坚实的数据基础。

针对信号解析难题,团队创新提出“时频-空域”联合分析技术,构建了“本井压裂监测-邻井裂

缝诊断-产剖动态评估”三位一体的监测解释技术体系,并自主研发HiFiber光纤监测综合解释软件,实现了从数据采集、处理到解释评价的全流程自主化闭环。

2024年寒冬,在河南油田甸宜探区,历史性突破诞生——石勘院联合经纬公司,应用完全自主知识产权的光纤压裂监测技术,在东湾7井区成功完成首次现场示范应用。

通过一系列物理模拟实验深入揭示机理,持续攻关明确关键数据处理方法,凭借一行行代码精心构建反演算法——从理论模型、核心硬件到系统软件,中国石化成功实现了该领域全链条技术的自主可控,将能源安全的关键技术命脉牢牢掌握在自己手中。

应用价值

围绕“强研发、促应用、快速实现产业化”目标,石勘院以自主光纤监测解释技术作价入股,联合经纬公司、物探院,资本公司共同组建市场化主体——北京实华数智科技有限公司。

实华数智公司作为技术落地载体,为国内油

气企业提供高精度、低成本、安全可靠的光纤监测服务,确保“能源数据资料掌握在自己手里”。此举不仅大幅降低了勘探开发成本,更显著提升了产业链供应链的韧性及效率,将研发链、产业链有机融合,显著加快了技术成熟与市场应用进程,促进技术的产业化和市场化形成良性循环。

通过创新链与产业链深度融合,光纤传感技术已从实验室的“创新种子”迅速成长为支撑国家能源战略的“新质力量”。

点评

该技术开创了“技术入股”的市场化转化新模式,有效打通了科技成果转化的“最后一公里”。

——集团公司高级专家 王海波

石勘院研发的光纤监测技术为裂缝监测工作开拓了思路,为深入认识井下裂缝的形态、分布及演化规律提供了宝贵借鉴。在现场应用过程中展现出团结协作、攻坚克难的优良作风。

——河南油田的感谢信
黄鑫 供稿