

美国科学引文索引 (SCI) 收录期刊
(SCI影响因子3.803, 石油工程类第3、Q1区, 地学类Q2区)
美国工程索引 (Ei) 收录期刊
中国科技核心期刊 (影响因子4.596)

ISSN 1000-0747

CN 11-2360/TE

石油勘探与开发

 PETROLEUM
EXPLORATION
AND DEVELOPMENT

Vol. 49

2022

1

中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 主办
中国石油集团科学技术研究院有限公司

目次 CONTENTS

石油勘探与开发

第49卷 第1期

2022年2月

油气勘探

| | |
|--|-----|
| 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展马永生, 蔡勋育, 云露, 李宗杰, 李慧莉, 邓尚, 赵培荣 | 1 |
| 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义李国欣, 朱如凯, 张永庶, 陈琰, 崔景伟, 姜营海, 伍坤宇, 盛军, 鲜成钢, 刘合 | 18 |
| 四川盆地及周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组关键界面基本特征王玉满, 王红岩, 邱振, 沈均均, 张琴, 张磊夫, 王灿辉, 李新景 | 32 |
| 塔里木盆地古城地区奥陶系滩相白云岩气藏特征及主控因素冯军, 张亚金, 张振伟, 付晓飞, 王海学, 王雅春, 刘洋, 张君龙, 李强, 冯子辉 | 45 |
| 川西地区二叠系热碎屑流火山岩发育特征及其油气地质意义彭浩, 尹成, 何青林, 夏国勇, 刘勇, 马廷虎, 陈康, 刘冉, 苏旺 | 56 |
| 准噶尔盆地南缘侏罗系一下白垩统岩相古地理恢复与意义.....高志勇, 石雨昕, 冯佳睿, 周川阔, 罗忠 | 68 |
| 中东东鲁卜哈利盆地碳酸盐岩微孔型低电阻率油层饱和度评价方法王拥军, 孙圆辉, 杨思玉, 吴淑红, 刘辉, 童敏, 吕恒宇 | 81 |
| 碳酸盐缓坡沉积微相特征及其对储集层发育的制约——以塔里木盆地古城地区中一下奥陶统为例刘艺妮, 胡明毅, 张三, 张君龙, 高达, 肖传桃 | 93 |
| 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨.....彭军, 曾焱, 杨一茗, 于乐丹, 许天宇 | 106 |

油气田开发

| | |
|--|-----|
| 超深断控缝洞型碳酸盐岩油藏注水重力驱油理论探索.....杨学文, 汪如军, 邓兴梁, 李世银, 张辉, 姚超 | 116 |
| 用于致密气提高采收率的储集层干化方法.....张烈辉, 熊钰, 赵玉龙, 唐洪明, 郭晶晶, 贾春生, 雷强, 王秉合 | 125 |
| 致密油水平井注采储集层四维地应力演化规律——以鄂尔多斯盆地元284区块为例.....朱海燕, 宋宇家, 雷征东, 唐焯赫 | 136 |
| 纳米孔隙储集层动态渗吸数学模型.....田伟兵, 吴克柳, 陈掌星, 雷征东, 高艳玲, 李靖 | 148 |
| 气藏型储气库井注采动态不稳定流分析方法.....王皆明, 李春, 孙军昌, 唐立根, 钟荣, 刘先山, 郑少婧 | 156 |

石油工程

| | |
|---|-----|
| 页岩油气水平井压裂技术进展与展望雷群, 胥云, 才博, 管保山, 王欣, 毕国强, 李辉, 李帅, 丁彬, 付海峰, 童征, 李涛, 张浩宇 | 166 |
| 生物柴油基恒流变钻井液体系.....蒋官澄, 史赫, 贺垠博 | 173 |
| 水平井压裂多裂缝扩展诱发光纤应变演化机理.....陈铭, 郭天魁, 胥云, 曲占庆, 张士诚, 周彤, 王云鹏 | 183 |
| 压裂缝的动态渗透性能及其声波测井评价.....李焕然, 唐晓明, 李盛清, 苏远大 | 194 |

综合研究

| | |
|---|-----|
| 塔里木盆地沙井子构造带志留系油气勘探突破及启示.....张君峰, 张远银, 高永进 | 203 |
|---|-----|

简讯

《石油勘探与开发》2022年第2期部分文章预告 (92)

SHIYOU KANTAN YU KAIFA

(Petroleum Exploration and Development)

Vol.49 No.1 Feb. 2022

CONTENTS

PETROLEUM EXPLORATION

- Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, LI Zongjie, LI Huili, DENG Shang, ZHAO Peirong (1)
- Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China
LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, CHEN Yan, CUI Jingwei, JIANG Yinghai, WU Kunyu, SHENG Jun, XIAN Chenggang, LIU He (18)
- Basic characteristics of key interfaces in Upper Ordovician Wufeng Formation – Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery, SW China
WANG Yuman, WANG Hongyan, QIU Zhen, SHEN Junjun, ZHANG Qin, ZHANG Leifu, WANG Canhui, LI Xinjing (32)
- Characteristics and main control factors of Ordovician shoal dolomite gas reservoir in Gucheng area, Tarim Basin, NW China
FENG Jun, ZHANG Yajin, ZHANG Zhenwei, FU Xiaofei, WANG Haixue, WANG Yachun, LIU Yang, ZHANG Junlong, LI Qiang, FENG Zihui (45)
- Development characteristics and petroleum geological significance of Permian pyroclastic flow volcanic rocks in Western Sichuan Basin, SW China
PENG Hao, YIN Cheng, HE Qinglin, XIA Guoyong, LIU Yong, MA Tinghu, CHEN Kang, LIU Ran, SU Wang (56)
- Lithofacies paleogeography restoration and its significance of Jurassic to Lower Cretaceous in southern margin of Junggar Basin, NW China
GAO Zhiyong, SHI Yuxin, FENG Jiarui, ZHOU Chuanmin, LUO Zhong (68)
- Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East
WANG Yongjun, SUN Yuanhui, YANG Siyu, WU Shuhong, LIU Hui, TONG Min, LYU Hengyu (81)
- Characteristics and impacts on favorable reservoirs of carbonate ramp microfacies: A case study of the Middle-Lower Ordovician in Gucheng area, Tarim Basin, NW China
LIU Yini, HU Mingyi, ZHANG San, ZHANG Junlong, GAO Da, XIAO Chuantao (93)
- Discussion on classification and naming scheme of fine-grained sedimentary rocks
PENG Jun, ZENG Yao, YANG Yiming, YU Ledan, XU Tianyu (106)

OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT

- Theoretical exploration of water injection gravity flooding oil in ultra-deep fault-controlled fractured-cavity carbonate reservoirs
YANG Xuewen, WANG Rujun, DENG Xingliang, LI Shiyin, ZHANG Hui, YAO Chao (116)
- A reservoir drying method for enhancing recovery of tight gas
 ZHANG Liehui, XIONG Yu, ZHAO Yulong, TANG Hongming, GUO Jingjing, JIA Chunsheng, LEI Qiang, WANG Binghe (125)
- 4D-stress evolution of tight sandstone reservoir during horizontal wells injection and production: A case study of Yuan 284 block, Ordos Basin, NW China
ZHU Haiyan, SONG Yujia, LEI Zhengdong, TANG Xuanhe (136)
- Mathematical model of dynamic imbibition in nanoporous reservoirs
TIAN Weibing, WU Keliu, CHEN Zhangxing, LEI Zhengdong, GAO Yanling, LI Jing (148)
- An analysis method of injection and production dynamic transient flow in a gas field storage facility
WANG Jieming, LI Chun, SUN Junchang, TANG Ligen, ZHONG Rong, LIU Xianshan, ZHENG Shaojing (156)

PETROLEUM ENGINEERING

- Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs
LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, GUAN Baoshan, WANG Xin, BI Guoqiang, LI Hui, LI Shuai, DING Bin, FU Haifeng, TONG Zheng, LI Tao, ZHANG Haoyu (166)
- The biodiesel-based flat-rheology drilling fluid system
JIANG Guancheng, SHI He, HE Yinbo (173)
- Evolution mechanism of optical fiber strain induced by multi-fracture growth during fracturing in horizontal wells
CHEN Ming, GUO Tiankui, XU Yun, QU Zhanqing, ZHANG Shicheng, ZHOU Tong, WANG Yunpeng (183)
- Dynamic fluid transport property of hydraulic fractures and its evaluation using acoustic logging
LI Huanran, TANG Xiaoming, LI Shengqing, SU Yuanda (194)

COMPREHENSIVE RESEARCH

- Silurian hydrocarbon exploration breakthrough and its implications in the Shajingzi structural belt of Tarim Basin, NW China
ZHANG Junfeng, ZHANG Yuanyin, GAO Yongjin (203)

文章编号: 1000-0747(2022)01-0166-07 DOI: 10.11698/PED.2022.01.15

页岩油气水平井压裂技术进展与展望

雷群^{1,2}, 胥云^{1,2}, 才博^{1,2}, 管保山¹, 王欣^{1,2}, 毕国强¹, 李辉¹,
李帅^{1,2}, 丁彬¹, 付海峰^{1,2}, 童征^{1,2}, 李涛¹, 张浩宇^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团有限公司油气藏改造重点实验室, 河北廊坊 065007)

基金项目: 国家科技重大专项“储层改造关键技术及装备”(2016ZX05023)

摘要: 通过对“十三五”以来国外页岩油气储集层水平井压裂技术进展的系统总结, 阐述了水平井压裂技术在页岩油气储集层多层叠置立体开发、小井距密网布井、水平井重复压裂、施工参数优化与降低成本方面的新特征; 结合中国页岩油气水平井压裂技术需求, 论述了水平井压裂技术在多裂缝扩展模拟、水平井压裂设计、电驱压裂装备、可溶化系列工具、低成本入井材料与工厂化作业方面的新进展。在此基础上, 结合非常规页岩油气“十四五”规划对水平井压裂改造技术的需求分析, 提出了7个方面的发展建议: ①强化地质工程一体化联合研究; ②深化页岩储集层改造基础理论及优化设计技术研究; ③完善大功率电驱压裂装备; ④研发长井段水平井压裂工具及配套作业装备; ⑤加强水平井柔性开窗侧钻剩余油挖潜技术攻关; ⑥发展长井段水平井压裂后修井作业技术; ⑦超前储备智能化压裂技术。

关键词: 页岩油气; 水平井压裂; 压裂装备; 压裂参数; 立体开发; 智能化压裂

中图分类号: TE352 文献标识码: A

Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs

LEI Qun^{1,2}, XU Yun^{1,2}, CAI Bo^{1,2}, GUAN Baoshan¹, WANG Xin^{1,2}, BI Guoqiang¹, LI Hui¹, LI Shuai^{1,2},
DING Bin¹, FU Haifeng^{1,2}, TONG Zheng^{1,2}, LI Tao¹, ZHANG Haoyu^{1,2}

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*
2. *CNPC Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Stimulation, Langfang 065007, China*)

Abstract: By systematically summarizing horizontal well fracturing technology abroad for shale oil and gas reservoirs since the "13th Five-Year Plan", this article elaborates new horizontal well fracturing features in 3D development of stacked shale reservoirs, small well spacing and dense well pattern, horizontal well re-fracturing, fracturing parameters optimization and cost control. In light of requirements on horizontal well fracturing technology in China, we have summarized the technological progress in simulation of multi-fracture propagation, horizontal well frac-design, electric-drive fracturing equipment, soluble tools and low-cost downhole materials and factory-like operation. On this basis, combined with the demand analysis of horizontal well fracturing technology in the "14th Five-Year Plan" for unconventional shale oil and gas, we suggest strengthening the research and development in the following 7 aspects: (1) geology-engineering integration; (2) basic theory and design optimization of fracturing for shale oil and gas reservoirs; (3) development of high-power electric-drive fracturing equipment; (4) fracturing tool and supporting equipment for long horizontal section; (5) horizontal well flexible-sidetracking drilling technology for tapping remaining oil; (6) post-frac workover technology for long horizontal well; (7) intelligent fracturing technology.

Key words: shale oil and gas; horizontal well fracturing; fracturing equipment; fracturing parameter; three-dimensional development; intelligent fracturing

引用: 雷群, 胥云, 才博, 等. 页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 166-172, 182.

LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 166-172, 182.

0 引言

“十三五”以来, 中国新增石油探明储量的70%、新增天然气探明储量的90%为低品位资源, 主要以非

常规油气资源为主^[1]。一般而言非常规油气主要指页岩油气、致密油气、煤层气、水合物、重油、油砂等。据评估, 中国非常规油资源量中致密油可采储量达 20×10^8 t, 页岩油可采储量达 35×10^8 t, 二者合计 $55 \times$

10^8 t^[2]。加大非常规低品位资源有效动用和效益开发已成为中国油气行业发展的重要保障之一，而水平井多段压裂技术可有效扩大渗流面积，提高采油速度和最终累计产量。因此，水平井压裂技术在页岩油气资源的勘探开发过程中起着核心作用。

本文结合国内外页岩油气资源特征，阐述北美水平井压裂技术的6项新进展，同时梳理了中国水平井压裂技术在提质增效中的6项新技术，结合页岩油气“十四五”规划对水平井压裂改造技术的需求与未来发展方向，提出7项发展建议，以期对未来页岩油气资源的效益开发提供技术借鉴。

1 国外水平井压裂技术新进展

自2002年水平井分段压裂技术在北美应用以来，水平井多段压裂技术迅速发展，2009年，福特沃斯盆地Barnett页岩储集层完钻气井总数为13 740口，其中新钻井3 694口，水平井3 531口，水平井在新钻井中的比例超过95%，助推实现了页岩油气革命^[3]。据美国能源署(EIA)报告，2020年北美水平井压裂井数超过 15.3×10^4 口^[4]，水平井多段压裂技术总体上已趋于成熟，近期在提高动用程度、施工参数优化、增产挖潜、降低成本、裂缝诊断评价等方面取得新进展。

1.1 多层叠置页岩油气水平井立体压裂技术

为应对以往多层叠置页岩储集层单层开发动用程度低及低油价下经济效益差等难题，北美提出全油藏水平井立体开发(Stacked Pay Pad Development或Tank Development)新理念^[5-6]。该理念主要对多层分布储集层的储集层物性、地质力学、应力剖面等特征进行综合评价，并结合人工裂缝三维形态分析与人工裂缝动态模拟结果对施工参数进行优化，充分利用缝间、段间、井间和层间的渗透通道，提高裂缝复杂度和裂缝系统控制体积，实现油气藏的一次性立体式开发^[7]。主要包括3项关键技术：①低成本高效快速钻井技术，目前北美钻井速度普遍在1 000~1 600 m/d，钻头一次入井钻进进尺最高可达5 500 m；钻井成本占建井成本的比例从早期的60%~80%降至21%~34%^[8]；②立体交错布井优化设计技术，纵向上优选甜点和有利层系，模拟人工裂缝高度扩展参数，优化纵向水平井井间距；横向上模拟人工裂缝长度，结合生产历史拟合优化施工参数，确定水平井平面井间距，实现一次布井到位；③工厂化压裂作业技术应用三维应力场时空演化研究成果，压裂改造实施交错布缝，采用多层立体式拉链压裂，实现纵向油气储量的“全波及”。如2014年，

Carrizo公司率先在Niobrara页岩油的2个储集层(A层与B层)开展立体压裂的开发试验，A层(地质条件较好)井压后平均日产油 180 m^3 (1 135 bbl)，B层(地质条件较差)井压后平均日产油 168 m^3 (1 057 bbl)，立体压裂使“差”储集层与“好”储集层开发效果基本一样^[9]。

1.2 改善平面动用效果的小井距密井网布井模式

页岩油气井压裂过程中，因应力干扰，常出现“压裂冲击”(Frac Hits)和“压裂窜扰”(Frac Bashing)等现象^[10]。研究表明，储集层精细描述、地质力学特征评价、压裂作业实施流程优化等多因素耦合的一体化研究是解决上述复杂问题的新途径。采用油气藏生产动态分析、裂缝监测诊断、生产大数据拟合等综合方法分析水平井人工裂缝间干扰、连通状况，并进行井网、井距优化。北美大力推广小井距密井网的布井模式，水平井井距由400 m缩小到200 m，最低到76 m^[11]。其中，Carrizo公司在鹰滩区块将井距由300 m缩小至100 m，其单井预测累计产量增加64%，净现值提高约5.8亿元^[12]，效果显著。

1.3 水平井多段压裂人工裂缝间距优化技术

随着水平井压裂段数增多，裂缝间距优化成为压裂参数研究的重要内容之一。采用地层产能系数法结合模糊数学等手段评价水平井裂缝间距与压后生产动态特征，结果表明，人工裂缝密度与水平井井控地质储量、可采储量和经济效益等具有较强的相关性^[13]。通过数据统计和模糊数学方法分析美国二叠盆地3 000多口页岩油水平井的压后生产数据，结果显示，簇间距从23 m缩小到6 m时，单井日产量提高132%，但继续缩短到3 m时，单井日产量与预测的最终累计产量增幅变缓，且投资成本增加60%以上^[14]；另外美国鹰滩页岩油的生产数据统计也表明：裂缝簇间距由18 m减小到9 m时，净现值增加1 748%，内部收益率增加214%，裂缝簇间距由9 m减到5 m，同样表现出单井日产量与预测最终累计产量增幅变缓、投资成本增加的特征，由此可见裂缝簇间距是影响页岩油气压裂水平井产量的关键参数，合理缩小裂缝间距既能有效提高单井产量又能获得好的经济效益。

1.4 水平井井筒重构重复压裂技术

针对早期水平井改造程度低、生产效果差等问题，利用非线性渗流与非均质地层模型、初次压裂生产动态历史拟合与油藏数值模拟等方法，分析初次压裂后剩余油的分布规律。同时对水平井地应力场、重复压裂裂缝的导流能力以及裂缝穿透率等进行评估，并配

套形成井筒重构、小套管二次固井等系列技术^[15]。井筒重构主要采用膨胀管技术,可用于 11.43~13.97 cm 套管,最终可重构出内径 8.28~10.69 cm 的新油层套管,抗内压达 89 MPa,可实现长 10~2 000 m 井筒的有效封隔。目前,北美膨胀管重构水平井重复压裂技术现场应用已有 1 100 余口井,预计最终单井累计产量可提高 1.0~1.5 倍^[16]。

1.5 低成本滑溜水与石英砂材料

随着页岩油气储集层改造规模增大,压裂液、支撑剂材料费用已占总压裂成本的 35%以上^[17],研发低成本材料已成为页岩油气经济改造与效益开发的关键。在液体研发方面,通过对页岩与水的作用机制、液体降阻作用机理的研究,对以聚丙烯酰胺为主要官能团的压裂液进行改性与合成工艺升级,形成了系列化滑溜水体系^[18]。北美滑溜水应用率已由 2013 年的 51.8% 提高到 2019 年的 95.0% (见图 1),二叠盆地页岩油及 Haynesville 页岩气水平井压裂中滑溜水占总压裂液比例均超过 95.0%^[19]。

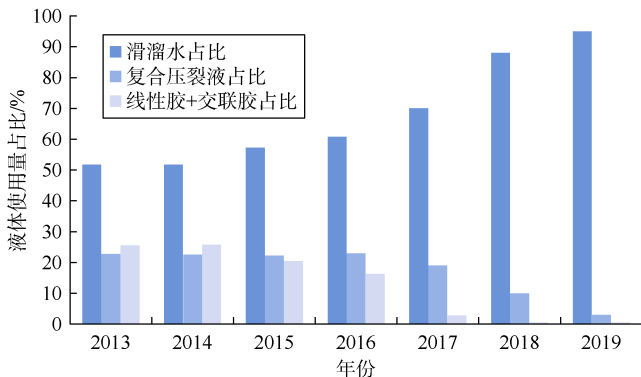


图1 北美压裂液使用情况统计结果

另外,在支撑剂材料优选上,通过综合使用大数据统计、实验室导流能力测试、人工裂缝建模、不同类型支撑剂应用井组对比试验等技术,评估不同类型、尺寸支撑剂性能与储集层渗流需求的匹配关系。通过生产历史拟合和裂缝注入诊断测试(DFIT)及数千次的支撑剂导流能力测试结果估算裂缝渗透率,进而确定裂缝无量纲导流能力,最终提出页岩油气“够用就好”(Just Good Enough)的导流能力优化理念^[20],促使石英砂成为支撑剂的应用主体并不断扩大规模。2019年美国压裂石英砂用量为2010年的10倍以上,达 $8\,030 \times 10^4$ t (见图2),其中页岩油气井压裂用石英砂占比为92%^[21]。同时北美油气公司采用砂源本地化经营策略,在各盆地中寻找石英砂矿藏,就近采砂,降低运输成本,进一步促使支撑剂材料成本降低。以

美国二叠盆地为例,通过本地化自营砂厂建设,石英砂现场应用成本由180美元/t降到50美元/t,仅2018年就已累计节省支撑剂费用 22×10^8 美元,成为推动页岩油桶油成本降至30美元、实现效益开发的有效途径^[22]。

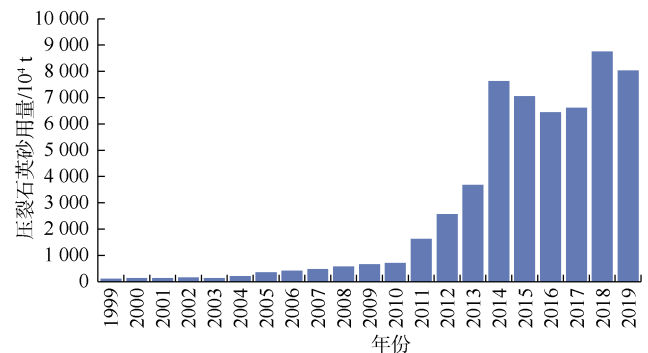


图2 美国压裂石英砂用量统计结果

1.6 可控源电磁追踪裂缝评估技术

尽管微地震、分布式光纤、测斜仪等技术广泛应用于压裂裂缝效果评估中,但微地震技术定量描述人工裂缝延伸位置的精度仍受储集层参数、接收信号、信噪比等影响。光纤监测等技术目前只能反应井筒射孔孔眼与近井带改造情况,精度和手段仍较单一。近年来,为实现人工裂缝的精确定量描述,北美油气公司研发出地面可控源电磁追踪技术(surface-based, controlled-source electro-magnetics)^[23],该技术利用泵注压裂液引起岩石电阻率、流体电导率和储集层电磁场变化,在地面监测泵注压裂液时储集层电磁场的改变,进而评估人工裂缝形态,实现单井或多井水力压裂过程中压裂液动态分布范围的监测,为科学优化压裂方案提供了新的评估技术手段。

北美水平井多段压裂技术促进了压裂施工参数指标的优化与压裂效果的显著提升。目前,单个钻井平台(面积 2.5 km^2)内水平井井数可达51口,水平井间距可缩小到150~200 m、水平段长度可达5 888 m,人工裂缝间距平均可达6 m^[12]。以Purple Hayes1H井为例,井深8 244 m,水平段长5 652 m,压裂124段,5簇/段,用时23.5 d^[24]。上述技术直接促使北美页岩油气产量大幅提高,2020年美国页岩油产量 3.94×10^8 t,占原油产量的65.1%;页岩气产量 $6\,320 \times 10^8$ m³,占天然气产量的66.0%,水平井多段压裂技术成为页岩油气提高产量的重要手段^[25]。

2 中国水平井压裂技术进展

2006年,中国石油天然气股份有限公司启动水平井改造重大攻关项目。通过引进、消化、吸收、创新,

形成了“长井段水平井完井+多簇射孔+滑溜水携砂+分段压裂”的主体改造技术体系^[26]。2009年,中国石油化工集团公司开展页岩气水平井钻完井和分段压裂技术攻关,目前形成了3 500 m中深层页岩气储集层水平井配套压裂工艺技术并实现商业化应用^[27]。

2.1 页岩油气储集层改造基础理论研究

与北美海相储集层相比,中国页岩油储集层具有岩性复杂、压力系数偏低、原油黏度高、裂缝发育程度差、储集层非均质性强、两向应力差大等特点。借鉴北美水平井多段压裂经验,采用体积压裂衰竭式开发模式虽成为页岩油气储集层改造的重要手段,但仍面临压后产量递减快(首年递减率大于50%)、采收率低(页岩油低于20%,页岩气低于30%)、产量低等难题,因此需在裂缝起裂延展、应力场分布、能量补充等方面开展基础技术研究工作。

在多条复杂裂缝扩展延伸模拟方面,结合中国页岩油气储集层非均质性强特征,采用大型岩石样品(762 mm×762 mm×914 mm)裂缝起裂与扩展物理模拟装备及实验技术,在室内条件下,对含天然裂缝、层理的页岩储集层开展了分层应力加载的三维水力压裂裂缝扩展实验,建立了含天然裂缝和水平层理的复杂裂缝扩展模型,绘制了具有天然裂缝及层理条件下的人工裂缝扩展参数优化图版,为复杂页岩储集层压裂参数优化提供了依据^[28]。在水平井压裂优化设计攻关上,研发出FrSmart地质工程一体化压裂系统软件^[29],该软件基于边界元和有限体积法建立流固耦合非平面三维裂缝扩展模型,其裂缝模拟将自适应时间步长算法、并行计算算法相结合提高计算效率,同等条件下,比目前常用压裂软件平面三维模型计算效率提高30%以上,有望实现国产软件的自主化。

近几年,针对中国鄂尔多斯盆地等页岩油储集层压力系数低(压力系数0.7~1.0)、天然能量有限的特殊条件,建立了致密储集层应力场、压力场、渗流场多场耦合的裂缝与油藏模拟方法,引入自发渗吸置换实验装置及表面活性剂运移扩散模型,深入研究人工裂缝扩展规律与液体补能的作用机制,形成人工裂缝扩展、原油渗吸置换、液体增压补能(载体以水为主,部分兼顾CO₂)的“压裂造缝与注液补能”一体化改造模式,可将地层能量提高10%~30%,试验井压后平均单井日产油量增加78.3%^[30]。

2.2 水平井缝控压裂优化设计技术

针对两向水平应力差大(大于10 MPa)、脆性差(脆性指数小于50%)、天然裂缝发育差的储集层,形

成以密切割为主要技术特征的缝控压裂技术^[31]。该技术通过研究“岩石属性与裂缝扩展、水平段长与布缝密度、储集层流体渗流与裂缝流动耦合、人工裂缝与井网井距匹配”4个关系,将人工裂缝的长度、间距、缝高等参数,与储集层的物性、应力、井控储量相结合进行优化,形成了非常规、低渗透等油气储集层改造的核心技术体系,助推非常规油气规模效益开发。该技术已在长庆、新疆和西南等多个油气区块应用283口井,平均单井日产量为对比井的1.8~2.6倍。

2.3 低成本大功率电驱压裂车装备

电驱压裂装备技术通过电机驱动压裂泵,将传统的柴油发动机驱动变成电机直接驱动,将电动压裂泵中的高压变电系统、变频多相矢量控制、可编程逻辑控制器控制、远程操作控制一体化,实现电动压裂泵的智能控制^[32]。目前已研发出5000—7000型电驱动压裂装备,其中7000型电驱压裂车功率达5 520 kW,电压6.6 kV,最大施工压力138 MPa,最大施工排量2.03 m³/min;采购成本降低30%,能耗降低25%,人员减少28%,占地减少31%,噪音可由110 dB降至90 dB以下,展示出“降本、环保、高效、国产化”的优势。目前已在四川涪陵、长宁、威远等区块页岩气储集层,新疆吉木萨尔、大庆古龙等地区页岩油储集层推广应用。2020年,电驱压裂车已在上述区域应用近6 000段,单段平均节约成本5×10⁴元。

2.4 水平井多段压裂可溶化系列工具

随着深层页岩油气水平井压裂水平段长度突破5 000 m,采用传统可钻式桥塞压裂后,钻磨桥塞难度越来越大,分段压裂封隔工具逐步向可溶化方向发展已成为必然趋势。利用镁铝合金在高矿化度液体环境中会发生电化学腐蚀这一基本原理,开展高强度可溶解镁合金材料研发,并研究材料的溶解机理、溶解速度及其影响因素,形成了可溶桥塞、延时可溶趾端滑套、可溶球座等系列压裂工具^[33],其中10.16~13.97 cm多规格胶筒式与全金属系列可溶桥塞溶解时间达7~14 d且可控,耐温达177 ℃,耐压差70 MPa。目前可溶解桥塞等系列化可溶工具在中国页岩油气分段工具中应用占比已达80%以上,成为主流的水平井多段改造工具。

2.5 水平井多段压裂低成本入井材料

中国四川、准噶尔、鄂尔多斯等盆地典型页岩油气水平井压裂成本构成表明,压裂材料已占压裂改造综合成本的30%以上^[34]。为此,围绕压裂液、支撑剂两大核心开展了压裂新材料研发与降低成本研究。在压裂液方面,开展了页岩黏土晶格膨胀性评价实验,

结果表明页岩与泥岩不同,页岩遇水后的膨胀性远比泥岩低,但水对页岩气解吸、提高裂缝复杂程度具有一定促进作用,据此形成了“低浓度、低伤害、可重复”的滑溜水压裂液体系。该体系降阻表面活性剂使用浓度为0.05%~0.30%,综合降阻率达71%~77%,可重复利用率大于95%,目前在中国多个页岩油气储集层推广应用,压裂施工中使用比例超过90%,可节约成本50~80元/m³[35]。在支撑剂优选方面,借鉴北美石英砂替代陶粒、就近建砂厂等方式,对石英砂的各项参数进行系统评价,分析其平均直径、闭合应力、破碎率等指标对支撑剂导流能力的影响。同时利用准噶尔盆地玛湖凹陷致密油、鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油、四川盆地页岩气等350余口水平井的生产动态分析水平井多段压裂中支撑剂的受力情况,结果表明同等储集层条件下,水平井多段压裂支撑剂的有效受力仅为直井的50%~60%,据此改变了常规支撑剂的受力评价方法,为石英砂替代陶粒提供了依据。为进一步降低成本,采取石英砂厂本地化策略,在准噶尔、鄂尔多斯两个盆地建成总年产能力为200×10⁴t的石英砂厂,石英砂成本降低了230~260元/t,降幅达20%~30%,促使石英砂在支撑剂中的应用占比由2014年的47.9%提高到2020年的71.5%[34]。

2.6 大平台布井及工厂化压裂新模式

按照“多层系、立体式、大井丛、工厂化”的开发新思路,重点开展水平井三维轨迹控制技术、平台水平井多层布井、纵向多层应力场分析、工厂化作业压裂模式等研究,形成大平台多层布井、立体压裂新模式。鄂尔多斯盆地针对黄土塬井场受限的特点,根据多小层叠合特征,利用长6段、长7段致密储集层三维地质模型,在华H60平台针对3套小层立体布置22口水平井,平均水平段长1500m,单层井距300m,可实现390×10⁴t石油地质储量的一次动用,100×10⁴t产能节约土地0.93km²,压裂时效提高30%[36],此外在新疆油田玛131井区、大庆古龙页岩油也开展先导性试验,有望成为未来页岩油效益开发的新途径。

综上所述,中国页岩油气勘探开发的持续推进,促使水平井多段压裂改造作业量的大幅增加。中国石油天然气集团有限公司年压裂水平井井数由2016年的550口增加到2020年的1901口,平均段长由800m增加到1300m,平均压裂作业最大井深达8008m,最大水平段长度达4466m,平均单段簇数由2~3簇增至6~12簇,簇间距由20~30m缩小至10~20m(最小4m),压裂后测试日产量提高20%以上,推动了页岩

油气产量的不断提高[37]。例如长庆油田陇东页岩油开发示范区应用58口井,段压裂簇数由2~3簇提至5~12簇,簇间距由22~30m缩小至5~12m,微地震监测裂缝控藏程度由50%~60%提升至90%以上,单井产量由10~12t/d提升至18t/d以上,首年递减率由40%~45%降至35%以下,建成50×10⁴t年产能力[38]。

3 水平井压裂技术发展方向

3.1 强化地质工程一体化联合研究

持续深化地质工程一体化平台工作模式,以页岩油气水平井全生命周期管理为目标,以实现甜点的空间最大体积控制和经济动用为目的,将地质、油藏、工程、管理等多学科综合应用到井的全生命周期管理中,建立4个一体化平台:①地质评价、甜点评价、力学评价、完井品质评价等的一体化评价平台;②地质模型、油藏模型、裂缝模型、经济模型的一体化设计模型平台;③压后跟踪、措施评判、效果评价、模型修正的一体化分析平台;④实验结果共享、优化方案共享、施工设计共享的一体化共享平台。通过上述一体化的优化研究,建立平台一体化管理模式,同时实施智能化管控,实现自动化、智能化、数字化,建立现代化生产基地。储量动用实现最大化,作业效率进一步提升,同时节约用地、用水,实现提质增效降本,保障页岩油气的效益开发。

3.2 深化页岩储集层改造基础理论及优化设计技术研究

在裂缝扩展与应力场模拟等基础理论研究方面,进一步加强地应力场分布、岩石力学性质与裂缝扩展规律研究。重点开展高温岩石力学性质、大型层理发育页岩人工裂缝扩展物理模拟与裂缝分布三维表征技术攻关,揭示复杂储集层的裂缝起裂规律与控制因素,探索不同地质条件下岩石人工裂缝扩展规律[39-40]。如古龙页岩油储集层层理和纹层发育,需重点讨论层理对人工裂缝几何形态的影响规律,分析压裂参数与裂缝几何形态的主控因素[41]。水平井工艺优化设计中进一步完善缝控压裂技术,以3~5年为投资回报期,优化裂缝导流能力、簇间距、裂缝条数、施工规模等,形成适合于不同地区、不同储集层条件的水平井分段压裂施工参数优化方法与设计图版等。

3.3 完善大功率电驱压裂装备

随着水平井多段压裂作业进一步向安全、绿色、高效、智能发展,大功率电驱压裂装备具有满足上述需求及长时间、高压、大排量连续作业的优势。进一步开展大功率智能电驱压裂泵注设备、国产变频传动技术及大功率供配电系统、压裂液自动混输设备、

《石油勘探与开发》第八届编辑委员会

主任 赵文智
常务副主任 马新华

副主任 (以姓氏笔画为序)

马永生 刘合 孙龙德 孙金声 苏义脑 李 宁 李 阳 李根生 杨春和 邹才能 金之钧 周守为
郝 芳 胡文瑞 袁士义 贾承造 高德利 郭旭升 彭平安 窦立荣

名誉委员 (以姓氏笔画为序)

王铁冠 李德生 邱中建 胡见义 郭尚平 康玉柱 韩大匡 童晓光 翟光明 戴金星

委员 (以姓氏笔画为序)

门相勇 马德胜 支东明 王永诗 王兴志 王志远 王建民 王香增 王晓冬 王琳琳 王瑞峰 计秉玉
付 广 付金华 付晓飞 付锁堂 冯子辉 冯永存 卢祥国 田景春 任战利 刘 春 刘文汇 刘月田
刘玉章 刘树根 匡立春 朱筱敏 汤继周 米立军 许安著 许怀先 闫 铁 位云生 何东博 何登发
吴 楠 吴财芳 吴胜和 宋先知 宋明水 宋新民 张士诚 张广清 张水昌 张东晓 张功成 张光亚
张君峰 张建军 张昌民 张金川 张荣虎 时付更 李 勇 (塔里木油田) 李 勇 (中国矿业大学)
李天太 李传亮 李建忠 李治平 李保柱 李相方 李相博 李荣西 李登华 李熙喆 杨 华 杨 涛
杨 智 汪海阁 沈安平 肖安成 远光辉 邱 振 邱龙义 陈 勉 陈世加 陈汉林
陈启林 陈志勇 单玄龙 周 路 周心怀 周进高 孟英峰 庞 雄 庞雄奇 范子菲 范宜仁 郑和荣
金振奎 侯连华 姚 军 姜汉桥 姜在兴 姜福杰 柳广弟 胡永乐 胡明毅 胡素云 胥 云 赵 伦
赵贤正 赵金洲 赵靖舟 钟建华 倪小明 徐长贵 徐国盛 聂海宽 袁选俊 贾 东 贾 虎 贾爱林
郭召杰 郭彤楼 郭建春 高志前 康毅力 曹 宏 曹 剑 曹 曾 曾 涛 温志新 琚宜文 蒋有录 谢 军
韩同城 龚宏恩 雷 群 雷占祥 鲍志东 熊春明 蔡建超 裴晓含 谭秀成 谭静强 潘仁芳 操 应
穆龙新 薛永安 魏国齐 魏新善

Reza Rezaee (澳大利亚)
Alexandre Anozé Emerick (巴西)
Ian Donald Gates (加拿大)
Rahim Masoudi (马来西亚)
G. Shanmugam (美国)
Timothy S. Collett (美国)
Pudji Permadi (印度尼西亚)

刘可禹 (澳大利亚)
Dmitry Anatolievich Novikov (俄罗斯)
谌卓恒 (加拿大)
胡钦红 (美国)
白宝君 (美国)
Jagar Ali (伊拉克)

Linda Stalker (澳大利亚)
Peyman Pourafshary (哈萨克斯坦)
靳吉锁 (加拿大)
曾洪流 (美国)
芮振华 (美国)
Jaber Taheri-Shakib (伊朗)

石油勘探与开发

SHIYOU KANTAN YU KAIFA

双月刊 1974年创刊 国内外公开发行

第49卷 第1期 总第286期 2022年2月23日出版

PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT

(Bimonthly, Started in 1974)

Vol.49 No.1 Feb. 2022

主管单位 中国石油天然气集团有限公司
主办单位 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院
中国石油集团科学技术研究院有限公司
主 编 戴金星
执行主编 许怀先(010-83597258)
副 主 编 王东良(010-83597087)、单东柏(010-83598884)
编辑出版 《石油勘探与开发》编辑部
北京市910信箱 邮政编码: 100083
电 话: 010-83597424(投稿及稿件查询)
E-mail: skykeg@petrochina.com.cn
责任编辑 胡苇玮 魏玮
英文编辑 宋立臣 刘恋
绘图、排版 刘方方
印 刷 北京俊兴彩色包装有限公司
国内发行 北京报刊发行局 邮发代号 82-155
国外发行 中国国际图书贸易总公司 邮发代号 BM364
广告证号 京海市监广登字20200011号
国内定价 120元/册

Chief Editor: Dai Jinxing
Sponsor: PetroChina Research Institute
of Petroleum Exploration &
Development
Editor and Publisher:
The Editorial Board of Petroleum
Exploration and Development,
P.O.Box 910, Beijing 100083, China
Tel: 86-10-83597258; 8884; 7424
E-mail: skykeg@petrochina.com.cn
Overseas Distributor: China International Book
Trading Corporation, P.O.
Box 399, Beijing 100044,
China Code No. BM364

印刷承诺: 如发现印刷、装订错误, 请与编辑部联系调换

中国标准 ISSN 1000-0747
连续出版物号 CN 11-2360/TE

CODEN SKYKEG

网址 <http://www.cpedm.com>

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18763804>

ISSN 1000-0747

