



# 第二届复杂油气工程 科技创新论坛-2020

## 优秀论文摘要集

主办单位：中国石油学会青年工作委员会

承办单位：石油工程教育部重点实验室

中海石油南海西部（海南）有限公司

2020年12月26日-27日，海南·海口

# 目 录

PDC 钻头齿工作区域的数值计算 .....	未九森 刘 维 高德利 / 1
渤海 D 油田热水化学驱适应性研究 .....	张增华 张 健 康晓东 等 / 2
超低渗透水平井分段注水井井地电位法测试 .....	李悠悠 宋 磊 / 3
地震属性综合分析技术在 YL 致密砂岩气藏储层预测中的应用 .....	高 改 赵玉华 王永刚 等 / 4
鄂尔多斯盆地庆城油田三叠系延长组长 7 页岩油工业化开采的经济界限研究 .....	杨兆林 / 5
鄂尔多斯盆地庆城油田三维地震页岩油甜点预测技术研究及应用 .....	黄黎刚 朱 军 赵玉华 等 / 6
鄂尔多斯盆地山西组煤系气勘探开发一体化构想 .....	王 克 / 7
鄂尔多斯盆地天环北段低饱和度致密气测井精细评价技术 .....	陈 阵 杨小明 / 8
鄂尔多斯盆地长 7 页岩油地质工程一体化甜点优选及应用 .....	时建超 / 9
二氧化碳基无水泡沫压裂液体系研究 .....	吕其超 郑 嵘 张 星 等 / 10
仿生靶向可控黏附支撑剂 .....	牛迎春 徐 泉 / 11
非常规油气藏高效开发一体化理论及技术 .....	赵晓亮 / 12
斧形 PDC 钻头齿破岩机理研究 .....	邵方源 刘 维 高德利 / 13
钢悬链立管环焊缝全尺寸（共振）弯曲疲劳试验 .....	姬丙寅 刘江成 史交齐 等 / 14
高效 PDC 钻头关键技术研究进展 .....	刘 维 高德利 / 15
海上注水井扩容增注技术研究及应用 .....	陈 欢 于继飞 范白涛 等 / 16
含有相变胶囊的相变夹层长输管道保温性能研究 .....	王 慧 王 宁 郑彬辉 / 17
基于 DAS 系统的页岩油储层压裂实时监测技术 .....	王振宇 林伯韬 / 18
基于概率分布的致密气藏气井双因素分类新方法 .....	刘会会 刘莉莉 崔越华 / 19
基于钻井模型与人工智能相耦合的实时智能钻井监测技术 .....	张菲菲 / 20
介电扫描测井在鄂尔多斯盆地低阻油层中的应用 .....	郭浩鹏 王长胜 张文静 等 / 21
靖边气田东侧 XX 区块古地貌和气水分布规律 .....	贾浪波 薛云龙 赵晨阳 / 22
临兴区块致密气井动态携液规律研究 .....	李紫晗 陈 欢 张滨海 等 / 23
煤岩包裹水力压裂物模实验影响因素 .....	寇晓璇 王焱钊 / 24
黏土矿物与可溶有机质微观粘附作用研究 .....	柳宇柯 / 25
深海高抗疲劳无缝特殊螺纹立管的开发与应用 .....	黄永智 张哲平 张传友 等 / 26
深水测试双层管柱非线性动力学特性研究 .....	何玉发 / 27
水平井化学驱注采能力影响因素研究 .....	马若雨 张 健康晓东 / 28
苏里格致密砂岩气藏水平井开发关键技术 .....	王文胜 李进步 田清华 等 / 29
台风下深水钻井隔水管系统悬挂动力学及作业技术 .....	刘秀全 李彦伟 胡鹏基 等 / 30
微地震监测技术在致密气水平井开发中的应用 .....	王树慧 费世祥 高 阳 等 / 31
页岩油密切割压裂分簇参数优化模拟研究 .....	常 智 侯 冰 / 32
一种双连通开发低渗天然气水合物藏的井型结构设计 .....	高永海 高冬至 徐 娜 / 33
致密砂砾岩油藏加密井压裂井间干扰研究 .....	史 璨 林伯韬 / 34
致密砂岩气藏水平井地质设计优化 .....	刘 俊 田清华 / 35
致密砂岩气藏水平井精细化地质导向技术 .....	崔越华 费世祥 黄有根 / 36

致密砂岩气藏水平井水平段优化研究-以苏里格气田 S1 区为例	徐运动 薛云龙 张建国 等 / 37
智能导向钻井方法初探	陈 冬 叶智慧 王 涵 等 / 38
开发非常规油气资源利器-连续管气体钻井技术	曹 川 张燕萍 卢 静 等 / 39
油气储运长输管道工程建设管理与技术创新	吕春雷 / 40
注水站工艺密闭研究	冯启涛 张 帆 王国柱 等 / 41
超低渗透油藏水平井异井注采缝间驱替效果研究	宋 磊 王思仪 李悠悠 / 42
关于体积压裂对致密储层有效改造范围的新认识	马 莉 魏中原 王思仪 / 43

# PDC 钻头齿工作区域的数值计算

未九森 刘 维 高德利

(中国石油大学(北京))

**摘要:** 利用现代化的计算机数值方法,以 python 和 C++两种计算机语言为载体,通过计算机图形方法实现了对 PDC 钻头切削齿布齿设计的工作区域计算,对给定的 PDC 钻头布齿设计结果数据,包括每个 PDC 钻头齿的空间位置参数径向位置  $R$ 、转角  $\theta$ 、高度  $H$ , PDC 钻头齿工作面的空间方向转角后倾角  $\alpha$ 、侧转角  $\beta$ 、装配角  $\gamma$  等,以及预设的一般化钻井参数包括机械钻速和钻头转速,输入到本程序中,经过计算能够得到此 PDC 钻头布齿结构设计在该钻井参数状态下的每个 PDC 钻头齿工作区域大小。本程序的计算结果,能够通过对比 PDC 钻头齿的工作区域,个性化地设计加强不同位置的、不同工作区域特性的 PDC 钻头齿,使之更适用于对应位置的切削任务。也能够对 PDC 钻头产品生产和修复过程提供参考,如在焊接 PDC 钻头齿时,使完整的刃部焊接在对应工作区域部分,使某些破损较为严重的 PDC 钻头齿也能在一定程度上重新利用,达到一定的降低钻头成本的目的。而且本程序的计算结果结合 PDC 钻头齿单齿破岩切削力模型,也是后续求解 PDC 钻头整体受力的基础部分。

**关键词:** PDC 钻头 切削齿 工作区域 钻头受力

**第一作者简介:** 未九森(1996),男,中国石油大学(北京)博士研究生在读。

**主要研究方向:** PDC 钻头设计技术。

# 渤海 D 油田热水化学驱适应性研究

张增华<sup>1,2</sup> 张 健<sup>1,2</sup> 康晓东<sup>1,2</sup> 王旭东<sup>1,2</sup> 梁 丹<sup>1,2</sup>

(1.海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028;

2.中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

**摘 要:**渤海 D 油田地下原油粘度为 449mPa·s~926mPa·s, 主要以天然能量开发, 自 2008 年开始进行多元热流体吞吐试验, 随着吞吐伦次增加出现严重气窜、管柱损坏的问题, 开发方式效果并不理想。本文以渤海 D 油田为基础, 探索海上稠油开发新模式, 以 D 油田为依据建立数值模型, 分析研究储层特征、流体性质和转化学驱开发前开发模式对热水化学驱的影响, 建立海上油田热水化学驱适应标准, 明确热效应、化学效应和协同增效作用等不同作用机理对增油量大的贡献, 并以 D 油田井组为例, 开展热水化学驱先导试验研究, 研究结果表明, 通过实施热水化学驱 9 年, 井组累增油 12.55 万方, 吨剂增油 38.21 方/吨, 具有较好的开发效果。

**关键字:**热水化学驱 开发适应性 数值模拟研究 先导试验

**第一作者简介:**张增华(1991), 中国石油大学(北京)石油与天然气工程硕士研究生, 现就职于中海油研究总院有限公司提高采收率重点实验室。主要研究方向: 海上油气田提高采收率。通信地址: 北京市朝阳区太阳宫南街 6 号院海油大厦; 邮政编码: 100028; 联系电话: 010-84526271。Email: zhangzh20@cnooc.com.cn。

# 超低渗透水平井分段注水井井地电位法测试

李悠悠 宋 磊

(中国石油长庆油田勘探开发研究院)

**摘要:** 针对长庆油田超低渗透油藏前期“点注面采”注水补充能量水平井开发见效程度低、递减大、采油速度低等问题, 本文创新提出了线注线采侧向驱替的水平井技术思路, 实现由传统的井间驱替向水平井段间驱替补充能量方式的转变。为摸清缝间驱替水驱状况, 为后期优化及评价水平井分段注水方式及技术政策提供基础, 本文通过线注线采开发方式建立有效驱替系统, 建立水平井异井交错式布缝水平井分段注水能量补充现场试验, 开展水平井分段注水井井地电位法 ERT 测试, 监测水驱前缘半径, 测试了两口 3 井次。研究表明, 通过井地电位 ERT 测试结果证明了水平井缝间驱替; 不同开发时间同一注入点水驱波及段存在优势方向差异, 根据水驱波及半径 (或者波及面积), 为后期注水调整提供依据; 依据注水段水驱波及状况, 指导注采调整。测试实验表明: GP79-78 井的水驱点在 1-2 段, 在 1-2 段向东北方向向 GP79-79 井的 2-3 段水驱, 水驱波及前缘大约为 90-110 米, 波及系数为 0.21; GP79-80 井的水驱点在 1-3 段, 在 1-3 段向东北方向 GP79-81 井的 3-4-5 段水驱, 水驱波及长度大约为 60-120 米, 向西方向 GP79-79 井的 3 段水驱, 水驱波及长度大约为 50-100 米, 水驱波及系数 0.33; GP79-78 井两次井地电位及电阻发生了变化, 水驱波及段间存在优势方向, 主要受储层非均质性及注水压力影响导致。本文的测试研究为摸清长庆油田超低渗透油藏水驱状况具有重要意义。

**关键词:** 超低渗透油藏 水平井 分段注水 井地电位法测试 缝间驱替

**第一作者简介:** 李悠悠 (1994), 中国石油大学 (北京) 硕士研究生, 现任中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院助理工程师。主要研究方向: 非常规油藏渗流规律研究及老油田稳产。通信地址: 陕西省西安市凤城四路长庆科技大厦; 邮政编码: 710016; 联系电话: 15311193506; E-mail: lyy15\_cq@petrochina.com.cn。

# 地震属性综合分析技术在 YL 致密砂岩气藏储层预测中的应用

高 改<sup>1</sup> 赵玉华<sup>1,2</sup> 王永刚<sup>1</sup> 杜广宏<sup>1</sup> 黄 研<sup>1</sup>

(1.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)

**摘 要:** YL 气田位于鄂尔多斯盆地东部, 区域构造为倾角不足一度的西倾斜坡, 区域断裂和圈闭构造不发育。研究区发育多套含气层系, 其中太原组为三角洲前缘沉积, 顶部以北岔沟砂岩之底为顶界, 以 8#、9#煤层之顶为底界, 岩性以砂岩、泥岩及灰岩为主, 沉积厚度一般 40m~80m; 其中砂岩为主要储集层, 厚度薄 (平均 5.8m) 且致密 (<0.1md), 横向变化快且延伸范围窄。受底部区域煤层的影响, 造成地震资料目标层段反射淹没于强反射背景之下, 给储层预测带来了困难。为落实 YL 气田有利区, 本次联合应用子波分解与重构技术及神经网络多属性融合技术对目标储层进行分析。其中, 根据研究区地质特征, 通过子波分解构建新的地震数据体, 以去除强背景的干扰并使得目标层信息得以突显, 并依据去掉强背景影响后即重构后的地震数据体来预测目标层的储层及流体分布, 以精细解释目标区的地质异常。同时, 为了消除单一地震属性解释造成的诸多不确定性和多解性, 在地震属性优选的基础上, 运用神经网络综合预测技术实现地震多属性与单井储层地质信息的有效结合, 通过建立多种量化模型与地震多属性信息之间的对应关系, 实现了地震多属性综合储层预测的量化。最后, 两种预测方法结果补充印证, 大大减少了储层预测的多解性。应用以上方法对 YL 致密砂岩气藏储层进行综合预测, 已经取得了较好的效果。

**关键词:** 子波分解与重构 多属性优选 储层预测 鄂尔多斯盆地

**第一作者简介:** 高改 (1985), 女, 陕西大荔人, 长江大学资源勘查工程专业学士, 现任长庆油田分公司勘探开发研究院物探工程师。主要研究方向: 天然气勘探地震综合解释及储层预测。通信地址: 陕西省西安市未央区凤城四路张家堡街道长庆油田; 邮政编码: 710018; 联系电话: 13679255807; E-mail: gg\_cq@petrochina.com.cn。

# 鄂尔多斯盆地庆城油田三叠系延长组长 7 页岩油工业化开采的经济界限研究

杨兆林<sup>1,2</sup>

(1.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院 陕西西安 710018;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018)

**摘要:** 油气开发是一项带有风险性的复杂系统工程,其收益回报主要可通过储量上市交易和开发(自行或合作开发)两种途径获得,因此,要完成储量交易和可经济地开采,取得高额回报,加强对储量价值评价、经济可采储量和产量经济界限的研究是十分必要的;而影响这些指标的因素较多,其中最主要的是储量品质、规模、丰度、油价、产量、投资和成本。目前我国已逐步加强了经济可采储量的概念,取得了明显的效果,但有关开采经济界限尤其是特低渗透油藏经济界限的研究却很少。同时,随着市场经济的逐步完善,油田经济可采储量要作为商品进入国内市场,与国际市场接轨,必然要以经济可采储量的大小或经济可采储量的货币价值的高低作为标准进行洽谈或合作开发,鄂尔多斯盆地庆城油田三叠系延长组长 7 油藏属于典型的陆相页岩油,资源量丰富,开发潜力巨大,由于具有非常规油藏的特点,开发难度较大,存在着一定的风险,因此,要进行经济有效地开发或交易,先期进行储量价值评价和开采经济界限研究、准确测算经济可采储量、确定经济产量界限则尤为必要。以目前国内流行通用的现金流法,根据投入产出相平衡的原理,以庆城油田三叠系延长组长 7 页岩油目前生产经营活动的价格、成本和税金数据为基础,从储量资源条件、自然地理、地质和资源品位条件对开发的影响出发,建立了储量分级模型,通过分级模型确定出储量的价值等级值,为长 7 页岩油藏储量动用开发、开发规划部署和生产以及储量上市交易奠定基础。

**关键词:** 陆相页岩油 工业化开采 经济界限

**第一作者简介:** 杨兆林(1979),男,中国石油大学(华东)硕士,现中国石油长庆油田公司勘探开发研究院高级工程师高级工程师。主要研究方向:油气藏成藏机理与分布规律、油气储量评估。通信地址:陕西省西安市未央 151 号中国石油长庆油田公司勘探开发研究院;邮政编码:710018;联系电话:13572475071; Email: yzlin\_cq@petrochina.com.cn。



# 鄂尔多斯盆地庆城油田三维地震页岩油甜点预测技术研究及应用

黄黎刚<sup>1</sup> 朱 军<sup>1</sup> 赵玉华<sup>1,2</sup> 张 杰<sup>1</sup> 赵德勇<sup>1</sup>

(1.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)

**摘要:**庆城油田位于鄂尔多斯盆地南部,页岩油资源丰富,主要发育在三叠系延长组长7油层组,储层多为薄互层,单砂体厚度小于5m,且横向变化大、含油非均质性强,受断层影响,局部构造复杂,给甜点区优选、水平井位部署及轨迹导向带来困难。为了落实资源规模及提高水平井钻遇率,2019年在该区首次部署了三维地震勘探,开展了三维地震甜点预测及水平井轨迹导向技术研究。利用三维地震资料,在岩石物理分析的基础上,开展了岩性、含油性、脆性、烃源岩品质评价、裂缝检测、小断层识别及构造精细刻画研究,形成了以地质统计反演薄储层预测、叠前同时反演含油性预测、岩石力学参数储层脆性指数预测、密度反演烃源岩品质评价、叠前五维裂缝检测等储层综合评价技术,并利用神经网络技术,将预测结果进行融合,优选页岩油甜点区;针对页岩油水平井开发对小断层及构造预测的需求,形成的多井构造变速成图、多信息断层识别技术,结合分频相移薄储层预测,对水平井轨迹进行随钻导向。三维地震页岩油甜点预测技术,可以有效识别甜点区展布,预测符合率达85%;首次在该区识别出两期断层,虽然断层对页岩油成藏影响不大,但对水平井钻井及工程施工影响较大,通过对断层、构造精细刻画、并结合薄层预测,有效指导了水平井钻探。三维地震甜点区优选及水平井轨迹导向技术,助力了庆城大油田的发现,两年来优化部署水平井位58口,并对水平井轨迹进行随钻跟踪,提供轨迹调整意见近百次,取得了较好的应用效果,开辟了三维地震在鄂尔多斯盆地页岩油开发中成功应用的先例。

**关键词:**鄂尔多斯盆地 庆城油田 页岩油甜点地震预测 水平轨迹地震导向

**第一作者简介:**黄黎刚,男,西南石油大学勘查技术与工程专业学士,现任长庆油田分公司勘探开发研究院物探工程师。主要研究方向:石油预探、评价常规地震解释。通信地址:陕西省西安市未央区凤城四路长庆油田;邮政编码:710016;联系电话:15114982712; Email: hlg10\_cq@petrochina.com.cn。

# 鄂尔多斯盆地山西组煤系气勘探开发一体化构想

王 克

(西安石油大学 陕西西安 710065)

**摘要:** 我国是“富煤、贫油、少气”的国家,煤炭可采储量位居世界第二,是当今世界上第一产煤大国,煤炭产量占世界的 35%以上。随着理论和技术的进步,煤炭工业正在从单一的固体煤炭开发走向煤系地层资源综合开发与利用。

煤系气是指一套或数套含有煤层并存在成因联系的沉积岩系中生成并聚集的天然气,主要包括致密砂岩气、煤层气、页岩气和少量天然气水合物。广义的煤系气包含煤系烃源岩所生成天然气形成的所有气藏;狭义的煤系气指煤系地层作为一个独立的含气系统,煤系烃源岩生成的天然气未经过长距离运移聚集形成的非常规天然气藏,并包括形成这些气藏必不可少的地质条件和过程。

煤系地层连续含气高度大,气测显示活跃,以大面积含气为特点,发育多种含气组合,成因以煤成气为主。储层主要为非常规储层,微米、纳米级储集空间和游离气、吸附气共存。一般条件下,致密砂岩储层孔喉条件差,毛细管压力大,天然气在浮力驱动下难以有效地克服致密储层的阻力,从而造成天然气富集程度偏低;而在煤系烃源岩大量生排烃阶段,由于生烃增压的作用,烃类在过剩压力的驱动下可以由源岩向致密储层发生运移;受储层非均质性的影响,致密储层中气层、低产气层、气水同层交互分布,气水分布作用不明显,缺乏边、底水和统一的气水界面。致密储层天然气富集程度受烃源岩供烃能力的影响,在紧邻烃源岩(尤其是煤层)的储层,烃源岩持续供烃,储层含气饱和度较高,易出现高产气层。在物性较好的层段,受构造条件控制,相对低部位富集地层水,气水关系属于常规的边底水。

本文提出以含煤盆地对象,对煤系气整体进行研究和勘探开发。煤系气发育不同成藏组合,应针对性采用不同共采方法,开展勘探开采一体化,开展先导性试验,提高煤系气开发效益。

**关键词:** 煤系气 致密储层 勘探开采一体化

**第一作者简介:** 王克(1979),男,中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业博士。主要研究方向:油气藏成藏机理与分布规律、非常规油气地质学。通信地址:陕西省西安市雁塔区电子二路东段 18 号西安石油大学;邮政编码:710065;联系电话:18602908025; Email: wangkeupc@163.com。

# 鄂尔多斯盆地天环北段低饱和度致密气测井精细评价技术

陈 阵 杨小明

(中国石油长庆油田公司)

**摘 要:** 鄂尔多斯盆地天环北段是长庆油田近年来天然气勘探的重点目标区, 主力含气层为上古生界下石盒子组盒 8 段和山西组山 1 段。天环北段物源主要来自盆地西北部, 发育石英砂岩储层, 但由于紧邻西缘冲断带, 储层埋深大, 微幅构造和小型断裂发育, 储层物性差、非均质性强、气水关系复杂, 气层与水层测井响应特征差异小, 流体识别难。围绕准确识别气水层并评价其产能, 开展了岩石物理多学科综合研究。通过配套岩石物理实验和处理解释方法攻关, 引入变  $m$  值阿尔奇公式和印度尼西亚公式, 分层系建立了适用于低孔、低渗储层特征的含水饱和度定量计算模型, 含水饱和度计算误差低于 5%。根据该区出水层电阻率受地层水矿化度、岩性影响大, 对含气性的反映具有不确定性的特征, 研究了该区地层水矿化度平面分布规律, 建立了地层水矿化度定量计算方法, 进而形成了视电阻率增大法气水识别技术; 利用小波变换方法对反映流体性质敏感的测井信号进行分析, 分解成不同频带的多个成分, 不同成分反映不同流体对信号总能量的贡献。分别选取气层、水层构造曲线  $RP=R_t \times \Phi^2$ , 形成了多尺度小波能量谱分析气水识别技术, 利用多种气水判别方法提高测井解释符合率 10% 以上。利用常规物性和气水相渗资料, 采用神经元非线性 Sigmoid 函数构建了产水率评价模型, 精细评价气水层, 为试气方案的制定提供了有力的技术支撑。上述成果的应用, 显著提高了鄂尔多斯盆地天环北段低饱和度致密气试气层位确定、方案优化和气井配产的科学化水平。

**关键词:** 低饱和度致密气 天环北段 气水识别 多尺度小波能量谱 产水率评价

**第一作者简介:** 陈阵 (1981), 毕业于西南石油大学, 现就职于中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院。主要研究方向: 测井精细解释评价及测井新技术。通信地址: 陕西省西安市未央区凤城四路长庆科技楼; 邮政编码: 710018; 联系电话: 1582946598; E-mail: chenzhen1\_cq@petrochina.com.cn。

# 鄂尔多斯盆地长7页岩油地质工程一体化甜点优选及应用

时建超

(中石油长庆油田分公司勘探开发研究院)

**摘要:** 鄂尔多斯盆地长7页岩油主要发育陆相半深湖-深湖重力流沉积,具有单砂体厚度薄、横向连续性差、岩性变化快、非均质性强、储层致密等特征,与北美海相页岩层系相比,具有独特性,开发难度更大,仍面临诸多难题和挑战,我国陆相页岩油资源丰富,页岩油能否成为保障国家能源安全的重大接替领域,成为关注的重点。鄂尔多斯盆地长7页岩油的强非均质性特征,造成了水平井部署有利区难以优选、水平井油层钻遇率提高难度大,影响了页岩油开发效果,综合多学科、多尺度开展地质工程一体化研究,开展页岩油“甜点”优选。在建立三维模型的基础上,结合生产数据,定量评价产能与地质、工程参数相关关系,形成综合评价方法,开展地质-工程综合甜点的一体化评价,优选水平井部署有利区。其次,通过地质、地震对储层的预测,优化水平井轨迹设计,应用随钻导向优化轨迹调整,提高水平井钻遇率。通过地质工程一体化技术的综合应用,陇东页岩油示范区完钻水平井油层钻遇率达78%,水平井初期日产油18.0t,使长7页岩油得到商业化开发,快速建成了年产油量达百万吨的页岩油开发示范区,对国内陆相页岩油气资源的整体动用起到了引领示范作用。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地 长7页岩油 地质工程一体化 “甜点”优选

**第一作者简介:** 时建超(1984),男,西北大学博士,现中石油长庆油田分公司勘探开发研究院高级工程师。主要研究方向:页岩油开发。通信地址:陕西西安未央区凤城四路长庆油田;邮政编码:710018;E-mail:328023509@qq.com。

# 二氧化碳基无水泡沫压裂液体系研究

吕其超<sup>1</sup> 郑 嵘<sup>1</sup> 张 星<sup>2</sup> 周同科<sup>1</sup> 董朝霞<sup>1</sup> 张 娟<sup>1</sup> 李兆敏<sup>3</sup>

(1.中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院 北京昌平 102249;

2.中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司石油工程技术研究院 山东东营 257017;

3.中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580)

**摘要:**我国非常规油气资源丰富,潜力巨大。然而,非常规油气储层物性普遍较差,其“先天发育不足”的储层特性,决定了压裂改造是油气工业化开采的必要措施,“后天易伤害”特征又对压裂作业提出了严格的储层保护要求。目前,水力压裂技术仍是国内外最广泛应用的压裂改造技术,但传统水基压裂液对水资源消耗量巨大,且对水资源及环境存在潜在污染风险。针对传统水基压裂液存在的问题,本研究通过液态二氧化碳包裹高压氮气的形式构建特种泡沫体系,并利用氢氟醚类表面活性剂对其加以稳定和强化,以获得一种“高效、环保、低伤害”特征的二氧化碳基无水泡沫压裂液体系。首先系统研究了不同表面活性剂对高压氮气/液态二氧化碳混合体系的作用规律,明确了其具备起泡能力的基本特征,并通过评估其环境友好性、溶解性、吸附性、界面流变性、起泡和稳泡性,综合优选了可产生稳定无水泡沫的氢氟醚类表面活性剂分子构型。在此基础上,通过高温高压泡沫管式流变装置,测试了泡沫有效粘度随温度、压力、泡沫质量、剪切速率等因素的变化规律,构建了无水泡沫体系的流变方程,明确了其流变敏感特征,二氧化碳基无水泡沫压裂液的形成有效提升了纯二氧化碳压裂液的有效粘度。此外,利用自主设计的无水泡沫动态滤失测试系统,研究了温度、压力、泡沫质量、渗透率对泡沫滤失行为的影响,明确了无水泡沫体系对滤失的控制规律。动态滤失后的反向渗透率伤害测试表明,无水泡沫压裂液具有明显的储层低伤害性。

**关键词:** 无水泡沫 压裂液 液态二氧化碳 低伤害 环保

**第一作者简介:** 吕其超(1993),中国石油大学(华东)博士,现中国石油大学(北京)助理研究员。主要研究方向:非常规油气藏压裂改造及泡沫流体提高采收率。通信地址:北京市昌平区府学路18号;邮政编码:102249;联系电话:010-89734145; Email:lvqc@cup.edu.cn。

# 仿生靶向可控黏附支撑剂

牛迎春 徐 泉\*

(中国石油大学(北京)石油资源与勘探国家重点实验室 北京 102249)

**摘要:** 支撑剂的使用是非常规油气藏增产的关键手段之一, 可以有效的提升非常规油气藏的产量。支撑剂在裂缝网络中的长效运移和有效支撑是评判支撑剂优劣的重要指标, 传统支撑剂的运移距离普遍较短, 大大限制了实际应用。树脂覆膜支撑剂可以有效改善支撑剂的自悬浮性, 从而提升支撑剂的运移性能。但是树脂覆膜支撑剂在裂缝中的分布较为随机, 支撑剂的有效利用率较低。因此, 我们设计了一种仿生可控靶向黏附支撑剂, 在传统覆膜支撑剂上引入了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子, 可以实现支撑剂的靶向吸附, 大大提升了支撑剂的有效利用率。

本研究设计并研究了一种掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂。对涂覆的支撑剂进行了自悬浮实验, 定向运移实验以及液体导流实验, 以评估支撑剂的相关性能。

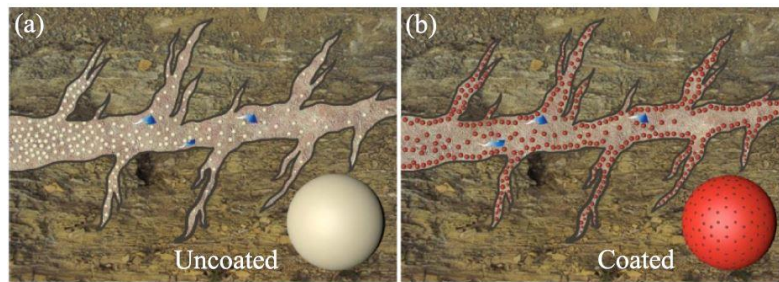


图1 页岩裂缝中(a)普通陶粒支撑剂和(b)掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂示意图

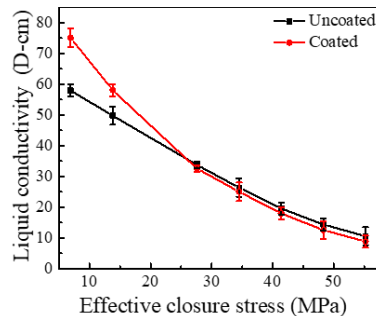


图2 普通陶粒支撑剂和掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂的液体导流能力图

设计并制备了一种掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂 (图 1)。当支撑剂泵入水中时, 支撑剂会浮在水面上, 有效减少了沉降时间。掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂的自悬浮能力提升效果可以达到未涂覆支撑剂的 5 倍以上, 有利于提高支撑剂的液体导流能力, 在 6.9 MPa 的封闭压力下, 掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂的液体导电性比陶粒支撑剂高 30% (图 2)。当闭合压力低于 27.6 MPa 时, 掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂的液体导流能力均高于陶粒支撑剂, 当闭合压力持续增加时, 也可以很好的保持支撑剂本体的液体导流能力。此外, 掺杂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  树脂覆膜陶粒仿生可控靶向黏附支撑剂较强的黏附力和较好的靶向吸附能力也可以在裂缝中实现较好的定向支撑作用, 具有更好的实际应用前景。

**关键词:** 自悬浮 靶向可控 支撑剂

**第一作者简介:** 牛迎春 (1992), 中国石油大学 (北京) 博士研究生在读。通信地址: 北京市昌平区府学路 18 号; 邮政编码: 102249; 联系电话: 15313988901; Email: ycnui92@163.com。

# 非常规油气藏高效开发一体化理论及技术

赵晓亮

(中国石油大学(北京))

**摘要:** 非常规油气藏开发目前仍处于探索阶段,若要高效开发非常规油气藏,其关键是如何深入挖掘油田大量施工数据、生产数据,评价裂缝、储层参数的动态变化,制定合理的生产制度,预测生产井全生命周期产量运行规律,提前预测措施介入时机和介入方式等。目前尚缺少类似的开发一体化技术。

研究基于渗流力学理论、复杂裂缝油藏数值模拟方法、现代试井分析方法,建立了一套非常规油气藏高效开发一体化理论及技术。研究结合生产井施工过程,将储层、裂缝参数划分为压后不稳定、闷井后拟稳定、生产后近稳定三个阶段,分别建立了每个阶段裂缝、储层参数的反演方法。根据每个阶段裂缝、储层参数,又分别建立了闷井时间、合理配产、全生命周期产量运行规律预测等评价方法。

研究表明:压裂裂缝、储层物性参数在不同生产阶段(压裂后、闷井后、生产时)表现为随时间动态变化的特征,从而导致产量也相应出现不稳定变化特征,因此在不同的阶段要选用合理反演方法确定裂缝、储层参数指导生产;生产井产量运行规律的影响因素可以细分成两个层次,首先是动储量及供给能力、其次是储层物性等;配产将影响生产井的动储量,不同储层、裂缝参数具有不同的配产界限,配产不合理将缩小动储量、缩短生产寿命;产量运行规律表现为不稳定、拟稳定、稳定三个生产阶段,根据产量运行规律,可以提前预测措施介入时机及介入方式。

研究建立的非常规油气藏高效开发一体化理论及技术,理论扎实、方法可靠,可以对新井、老井提出下一步工作建议,为非常规油气藏的高效开发提供了技术支撑。

**关键词:** 非常规 闷井 配产 全生命周期

**第一作者简介:** 赵晓亮,中国石油大学(北京)石油工程学院副教授。主要研究方向:生产动态分析、气驱提高采收率技术。Email: zxl@cup.edu.cn。

# 斧形 PDC 钻头齿破岩机理研究

邵方源 刘 维 高德利

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室 北京 102249)

**摘要:** 聚晶金刚石复合片 (Polycrystalline diamond compact, “PDC”) 是 PDC 钻头的关键切削工具。近年来, PDC 钻头齿, 特别是斧形 PDC 钻头齿, 成为了石油钻井工程中 PDC 钻头的研究热点之一。然而, 已有文献大多聚焦于斧形 PDC 钻头齿有限元模拟、现场应用效果的描述, 对其破岩机理研究甚少。为了研究斧形 PDC 钻头齿的切削机理, 以常规圆形 PDC 钻头齿作为对标, 在热稳耐磨测试系统 (VTL) 上进行切削试验。通过计算机语言对 VTL 实验设备的切削程序进行优化, 模拟了井下 PDC 钻头齿切削岩石时的初始状态和稳定状态。切削过程中, 测试系统通过三向力传感器和热电偶分别对两种切削齿的切削力和温度进行了测量。实验结束后, 对岩屑进行了收集、筛分, 并进行分形分析研究。结果表明, 斧形齿的切削效率明显高于常规圆形 PDC 钻头齿。斧形 PDC 钻头齿具有尖形几何形状, 切削初始状态需要的法向力较低, 较容易压入岩石。斧形 PDC 钻头齿具有“脊”状结构, 使其具有比常规圆形 PDC 钻头齿更高的冲击韧性。在相同的试验条件下, 斧形 PDC 钻头齿在稳定切削时所需要的法向力和切向力均小于常规圆形 PDC 钻头齿。尽管斧形 PDC 钻头齿和常规圆形 PDC 钻头齿产生的岩屑粒度分布非常相似, 但基于岩屑分形分析, 斧形 PDC 钻头齿破碎岩石能耗更低。

**关键字:** 斧形 PDC 钻头齿 VTL 实验设备 切削力 抗冲击性 能量消耗

**第一作者简介:** 邵方源 (1990), 中国石油大学 (北京) 博士研究生在读。主要研究方向: PDC 钻头齿高效破岩。通信地址: 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京); 邮政编码: 102249; E-mail: td\_sfy@163.com。



# 钢悬链立管环焊缝全尺寸（共振）弯曲疲劳试验

姬丙寅<sup>1</sup> 刘江成<sup>2</sup> 史交齐<sup>1</sup> 胡锡达<sup>2</sup> 张传友<sup>2</sup>

(1.西安三维应力工程技术有限公司 陕西西安 710075;

2.天津钢管制造有限公司 天津 300301)

**摘要:**深水海洋立管是深水油气田工程开发的组成部分,而深水海洋立管的关键技术在于母材材料和焊接工艺,母材材料和焊缝的疲劳寿命又决定深水油气田生产安全和开采周期。目前在深水石油天然气开发过程中,为了保证深水立管在使用过程中不发生事故,要求立管母材和焊缝在地面进行全尺寸疲劳试验评价,典型试验为采用谐振驱动的全尺寸(共振)弯曲疲劳试验,国外该类试验起步较早,积累了大量的试验数据。为了促进国产深水海洋立管的发展,自主开发全尺寸(共振)弯曲疲劳试验机,为了验证该疲劳系统的可靠性,对 $\Phi 273.1 \times 19.1\text{mm X65QO}$ 和 $\Phi 168.3 \times 15.88\text{mm X65QO SCR}$ 两种规格环焊缝进行全尺寸疲劳寿命进行评估,试验条件为应力幅 $124.5\text{MPa}$ ,应力比为 $-1$ ,应力范围 $249\text{MPa}$ ,应变范围为 $1204\mu\epsilon$ ,内压为 $0.69\text{MPa}$ ,压力介质为水。试验研究了全尺寸疲劳试验共振频率,确定试样封头焊接接头的焊接形式,成功实现了钢悬链立管环焊缝全尺寸(共振)弯曲疲劳试验。该全尺寸(共振)弯曲疲劳试验机能够满足深水海洋立管全尺寸疲劳试验的要求,本项目为国产化海洋立管提供了技术支撑和评价手段,为深水立管国产化的进程起到推动作用。

**关键词:**SCR 环焊缝 全尺寸 (共振) 弯曲疲劳试验

**第一作者简介:**姬丙寅(1983),男,河南许昌人,中国石油大学(北京)工程力学专业硕士。主要研究方向:石油管材全尺寸评价。通信地址:陕西省西安市高新区丈八五路;邮政编码:710075;联系电话:15891760945;E-mail:jibingyin2005@126.com。

# 高效 PDC 钻头关键技术研究进展

刘 维 高德利

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室 北京 102249)

**摘 要:** 聚晶金刚石 (Polycrystalline Diamond Compact, 简称“PDC”) 钻头是石油与天然气钻井工程中破碎岩石的主要工具。本文介绍了作者课题组在高效 PDC 钻头关键技术方面的最新研究进展, 包括实验室搭建、PDC 复合片研制与高效破岩机理研究、PDC 钻头的个性化设计研究。并对课题组自主研制的 PDC 钻头现场应用效果进行了简单的介绍和分析。

**关键词:** PDC 钻头 PDC 复合片 高效破岩

**第一作者简介:** 刘维 (1986), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 高效 PDC 钻头关键技术。通信地址: 北京市昌平区府学路 18 号; 邮政编码: 102249; E-mail: wei.liu@cup.edu.cn。

# 海上注水井扩容增注技术研究及应用

陈欢<sup>1,2</sup> 于继飞<sup>1,2</sup> 范白涛<sup>1,2</sup> 闫新江<sup>1</sup> 杜孝友<sup>1</sup>

(1.中海油研究总院有限责任公司 北京 100028;

2.海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028)

**摘要:** 海上油田注水开发过程中普遍存在注入压力高、注水欠注问题,常规的酸化措施有效期短、作业成本高,严重影响了油田的开发效果。采用注水扩容技术可提高注水井注入能力,延长增注有效期。选取海上油田代表性疏松砂岩岩芯,通过岩石力学实验、扩容室内模拟实验及数值模拟,研究了海上油田疏松砂岩地层的扩容机理及主控因素,并在海上油田进行了现场应用。研究表明,海上油田疏松砂岩剪胀角远大于加拿大 Athabasca 油砂,具备采用扩容注水的基础条件;慢速注水扩容有利于复杂缝网区的发育,高速注水容易形成单一张裂缝,以接近最小主应力进行应力预处理有利于产生复杂裂缝网;扩容区呈长条状扩展,扩展方向垂直于最小主应力方向,在扩容区内剪裂缝和张裂缝共存,一般为大的剪切破坏区内包含很小的窄带状张性区;在相同的注水扩容条件下,油藏埋深越浅,地层渗透率越大,剪胀容面积越大。该技术解决了海上油田注水难题,为海上油田注水开发解堵提供施工设计指导,具有很好的应用前景。

**关键词:** 海上油田 疏松砂岩 剪胀扩容 张性扩容 解堵 数值模拟

**第一作者简介:** 陈欢(1985),硕士,高级工程师。主要研究方向:油气田开采及注水工艺。通信地址:北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座;邮政编码:100028;联系电话:010-84526791; E-mail: chenhuan3@cnooc.com.cn。

# 含有相变胶囊的相变夹层长输管道保温性能研究

王 慧 王 宁 郑彬辉

(海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室)

**摘 要:** 海洋油气生产的流动保障是海洋油气田开发的重要问题,其主要目的是保证在油气生产全生命周期内能够通过控制水合物、蜡结晶、沥青质等固体物质的生成,最终实现将油气从油井到终端的安全经济输送。由于油气生产系统内的流体温度是水合物、蜡结晶等固体物质产生的重要因素,保温设计是流动保障的关键步骤。尤其对于高含蜡、含胶质的高凝点稠油输送管道,以及在低温高压环境下极易生成天然气水合物的天然气海底输送管道,一旦发生管道堵塞,用于恢复深海油气田生产的抢修费用往往高达数千万美元,而由此致使油井停产造成的经济损失远大于抢修费用,水下长输油气管道保温设计是海洋油气生产流动保障的首要关键。基于相变材料的储能原理,相变材料在启动预热阶段储存相变潜热,在停井过程中,随温度下降相变材料由液态转变为固态,释放相变潜热,从而延长停井工况下的保温时间,相变夹层管道为解决海洋长输管线保温问题的发展趋势。运用以相变微胶囊为颗粒,固体保温材料为基质的复合相变材料为管道相变层材料,建立了复合相变材料稳态传热假设下的复合相变材料传热模型。分析了复合相变材料内部的微观传热机制,并运用多孔介质理论,将微观瞬态传热简化为代表性单元体的宏观瞬态传热,推导了复合相变材料的宏观材料属性。将复合材料宏观热物性运用于相变管道中,分析了含有复合相变材料夹层的长输管道瞬态温度响应、焓值变化、及界面移动情况,研究了相变微胶囊含量、相变层厚度比、不同基质材料及不同相变胶囊材料等对管道保温性能的影响。为相变夹层管道的水下安装和运行提供切实可行的实现方案,为复合相变材料的热物性设计提供了理论依据。

**关键词:** 相变胶囊 流动保障 管道保温 多孔介质 有限差分

**第一作者简介:** 王慧(1992),女,中国石油大学(北京)博士,现海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室科研助理。主要研究方向:海洋石油装备、海底管道及可燃冰开采保温技术、复合材料传热。邮政编码:570208;联系电话:13439652393; Email: huiw0318@163.com。

# 基于 DAS 系统的页岩油储层压裂实时监测技术

王振宇 林伯韬\*

(1.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

2.中国石油大学(北京)石油工程学院 北京 102249)

**摘要:** 随着页岩油资源的深入开发和大规模水力压裂技术的不断进步, 储层压后裂缝形态精细刻画的需求日益迫切。针对微地震监测精度低、噪点多、监测滞后、缝网精细解释困难等缺点, 基于传输速度高、抗干扰能力强、声波信号实时监测能力强的分布式光纤声波监测系统 (DAS), 尝试研究其在页岩油储层压裂缝网监测中的应用, 结合物理模拟实验与声波信号三维缝网重构来表征裂缝三维形态。相比传统的室内真三轴实验, 该方法提供了以下两类改进方案: (1) 为了更准确的模拟真实地层压裂的情况, 采用了较大的试样体积 (1m x 1m x 1.5m) 与排量 (泵车排量); (2) 在模拟井筒中布置分布式光纤, 用以监测流体在井内、井周产生的声学信号。首先, 根据不同种类介质所产生的特定声波信号, 降低数据噪点; 其次, 根据声波信号和裂缝面的几何相关性, 采用随机模拟一致性算法识别裂缝面产状; 最后, 在裂缝几何模型优选的基础上, 建立裂缝实时监测模型。研究发现, DAS 系统能够精确定位长水平井大段多簇压裂过程中的流体注入点、确定压裂液和支撑剂等压裂段中的体积、流量分布; 此外, 根据声波信号解释结果, 可实时判断裂缝在储层内的延伸趋势。下一步将结合段内流体体积分布及裂缝延伸监测, 及时调整地面施工参数, 验证施工方案的合理性, 用以指导页岩油储层长水平井的精细化压裂。

**关键字:** 分布式光纤声波监测系统 裂缝监测 缝网重构 室内大型真三轴实验

**第一作者简介:** 王振宇 (1993), 男, 河南濮阳人。中国石油大学 (北京) 博士研究生在读。主要研究方向: 裂缝实时监测。通信地址: 北京市昌平区府学路 18 号; 邮政编码: 102249; E-mail: 924206619@qq.com。

# 基于概率分布的致密气藏气井双因素分类新方法

刘会会<sup>1</sup> 刘莉莉<sup>1</sup> 崔越华<sup>1</sup>

(中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018)

**摘要:** 致密气藏储层物性差, 气井产量低, 多井、低产是其主要表现特征。为了研究具有数万口气井的气藏生产规律与指标评价, 必须对气井进行合理有效的分类。常规的方法以单井 EUR 单一因素进行分类, 但是由于致密气藏气井普遍产水、间歇式生产等, 单井 EUR 难以准确评价, 气井分类难以开展。为了解决这一难题, 通过研究阶段累计产量特征与单井 EUR 的关系, 引入概率分布理论, 以易于获得的阶段累计产量为基础, 研究阶段累计产量的累积频率分布特征, 同时引入净生产时间累计产量斜率优化阶段的选取, 形成双因素约束的气井分类新方法。研究结果表明: 阶段累计产量及净生产时间阶段累计产量的累积频率分布呈现三段式特征, 且不同样本点、同一生产时间条件下, 累积频率曲线三段式的拐点相同。通过新方法在苏南国际合作区的应用, 双因素分类方法能有效缩短生产时间, 使更多气井参与分类, 同时气井分类误差控制在 3%以内, 应用效果较好。

**关键词:** 致密气藏 双因素 阶段累计产量 净生产时间累计产量斜率 累积频率 气井分类

**第一作者简介:** 刘会会 (1986), 中国石油大学 (华东) 硕士研究生, 现长庆油田分公司勘探开发研究院天然气开发三室工程师、科员。主要研究方向: 致密气开发。通信地址: 陕西省西安市未央区凤城四路长庆科技大厦; 邮政编码: 710018; 联系电话: 15291411099; Email: liuhh\_cq@petrochina.com.cn。

# 基于钻井模型与人工智能相耦合的实时智能钻井监测技术

张菲菲

(长江大学石油工程学院)

**摘要:** 钻井过程中钻井复杂监测对于减少事故发生、降低钻井成本意义重大。在实际钻井过程中, 钻井复杂的分析和判断主要靠人工完成, 难以保证预警效率。为此, 将动态钻井物理模型与人工智能、数据挖掘算法相结合, 提出基于实时录井数据的实时钻井监测及事故预警技术。该技术以钻井施工过程中的综合录井数据作为输入, 利用模型算法来实时准确呈现钻井过程中的井下工况条件, 预测即将发生的复杂风险。从实时井眼清洁及水力学监测、实时卡钻预测、实时井涌监测 3 个方面对实时钻井监测及预警技术进行了详细分析。该技术可以实时准确模拟井下工况条件, 识别并降低钻井事故发生概率, 帮助钻井工程师及早发现问题, 减少钻井事故的发生, 减少对自然环境以及人员安全的影响, 为现场施工提供辅助决策, 降低非有效生产时间

**关键词:** 实时钻井监测 异常监测 自我修正 实时数据挖掘 无量纲井涌指标

第一作者简介: 张菲菲 (1988), 教授, 主要研究方向: 油气钻井中岩屑运移及钻井流体力学。通信地址: 湖北省武汉市蔡甸区蔡甸街大学路 111 号长江大学石油科技大楼 B205 室; 邮政编码: 430100; E-mail: feifei-zhang@Yangtzeu.edu.cn。

# 介电扫描测井在鄂尔多斯盆地低阻油层中的应用

郭浩鹏<sup>1</sup> 王长胜<sup>1</sup> 张文静<sup>1</sup> 王艳梅<sup>1</sup> 李高仁<sup>1</sup> 席 辉<sup>1</sup> 钟晓勤<sup>1</sup>

(中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院)

**摘要:** 由于矿物成分、泥质含量、束缚水含量以及孔隙结构等因素影响,鄂尔多斯盆地的环西-彭阳地区延长组长 8 油藏存在大量低阻油层,以阵列感应为代表常规电阻率测井为基础的流体识别方法受到诸多挑战,常规测井方法的流体识别符合率较低,无法满足本地区的油水识别要求,亟需开展非电法测井的流体识别方法和饱和度的定量计算模型研究。本论文在核磁、介电常数、电阻率测量等岩石物理实验岩石物理实验基础上,分析环西-彭阳地区油层低阻的主要成因,明确泥质含量、束缚水含量和孔隙结构对电阻率的影响规律。利用完全饱和水和多次离心状态下核磁共振实验确定本地区的孔隙结构特征和束缚水饱和度范围,确定束缚水和自由水之间的 T2 截止值的大小。针对国外最先进非电法流体识别仪器——ADT 介电扫描测井开展流体识别方法和饱和度计算模型研究,通过对多频介电扫描岩石物理实验研究建立了适用于本地区的介电扫描测井流体饱和度计算模型,利用数值模拟分析技术明确介电扫描测井饱和度模型的影响因素。结合实验数据分析确定环西-彭阳地区岩石骨架相对介电常数,利用不同温度、矿化度地层水以及频率的介电实验获取地层水的介电特性,这些饱和度模型中的关键参数确定为流体饱和度计算精度提高奠定了基础。利用介电扫描测井饱和度模型在环西-彭阳地区进行流体饱和度计算,形成了介电测井油水层解释标准,结合试油资料进行验证,该方法较国外提供的方法流体识别符合率显著提高,低阻油层的流体识别能力明显增强,该方法为陆相低阻油层的识别和饱和度计算提供一套全新的技术思路。

**关键词:** 介电扫描测井 环西-彭阳 低阻油层 饱和度计算

**第一作者简介:** 郭浩鹏(1979),毕业于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业,现就职于中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,主要研究方向:测井精细解释评价及测井新技术。通信地址:陕西省西安市未央区凤城四路长庆科技楼; 邮政编码: 710018; 联系电话: 15829469177, E-mail: guohp\_cq@petrochina.com.cn。



## 靖边气田东侧 XX 区块古地貌和气水分布规律

贾浪波<sup>1</sup> 薛云龙<sup>1</sup> 赵晨阳<sup>1</sup> 刘海锋<sup>1</sup> 李琳<sup>1</sup> 乔博<sup>1</sup> 张芳<sup>1</sup>

(中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院 陕西西安 710018)

**摘要:**靖边东侧 XX 区块作为开发新区, 该区位于岩溶斜坡和岩溶洼地过渡地带岩溶古地貌较为复杂, 同时气水分布规律认识不清, 这些都制约了该区下古气藏开发, 同时对于下古岩溶气藏目前也是目前碳酸盐岩气藏研究热点。本次研究基于该区钻测井资料、岩心、薄片和其他分析测试对该区储层特征、古地貌特征和气水分布规律进行研究。通过对岩心、薄片观察可以看出该区下古岩溶储层发育典型岩溶标志, 包括发育各种类型岩溶角砾岩以及高角度溶缝和亮晶方解石充填等岩溶标志, 储层岩性主要为细粉晶白云岩, 储集空间主要为针孔、晶间微孔和裂缝。该区相对靖边地区下古的储层储集空间溶蚀孔和晶间孔, 该区整体储集空间整体规模偏小, 孔渗偏差, 溶蚀作用弱, 储层较为致密。古地貌研究主要是通过印模法和残厚法相结合进行定性定量古地貌恢复, 通过研究, 研究区古地貌类型为岩溶斜坡和岩溶洼地, 其中进一步可以识别出斜坡、台地、支潜沟、沟槽、洼地和残丘, 相对靖边地区 XX 区块整体岩溶作用较弱, 沟槽仅在研究区北部发育, 中部及南部地区侵蚀沟槽不发育, 对平面上不同地貌物性进行统计, 认为从西部岩溶斜坡地貌到东部岩溶洼地, 物性含气性逐渐变差。通过平面上气水分布特征研究, 再结合储层和古地貌特征, 可以看到 XX 区块气水整体受古地貌控制, 局部受现今构造控制。其中在西部古地貌相对高部位下古以气层为主, 基本不出水, 东部地区北部接近沟槽区域气水复杂, 其中出水井点主要位于现今构造低洼部位, 东南区域古地貌为岩溶洼地, 储层基本致密, 下古普遍产水。通过本次研究可以明确该区的下古建产部署思路, 促进该区下古气藏开发。

**关键词:** 古地貌恢复 印模法 残厚法 气水分布 XX 区块

**第一作者简介:** 贾浪波 (1990), 男, 中国石油大学 (北京) 博士毕业, 现就职于长庆油田勘探开发研究院天然气开发一室。主要研究方向: 沉积学、储层地质学和气田开发。

# 临兴区块致密气井动态携液规律研究

李紫晗 陈 欢 张滨海 于继飞

(1.中海油研究总院有限责任公司 北京 100028;  
2.海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028)

**摘要:** 以提前预警致密气井筒积液、及时介入排采措施为目的,针对临兴区块致密气中后期生产面临的低压、低产临界产气等排采问题,运用气液两相流动室内模拟评价方法并辅以数值模拟手段,建立井筒积液综合临界携液模型。结果表明:①根据气液两项流携液状态分析及压降规律分析,倾斜管段 45°至 60°最难携液;②修正综合临界携液模型误差满足现场使用范围,误差均小于 15%且在 10°至 90°之间应用良好;③对临兴区块已投产致密气井开展积液预测分析,评价速度管、泡排和柱塞气举等多个排采效果。该研究成果建立一套适用于临兴区致密气积液预测的临界携液模型,对致密气井积液预测及后续排采介入时机具有一定指导意义。

**关键词:** 致密砂岩气 气液两相流 临界携液模型 积液预警 排采工艺

**作者简介:** 李紫晗 (1989), 男, 硕士研究生, 中级工程师, 主要研究方向: 非常规及多相管流。通信地址: 北京市朝阳区太阳宫南街 6 号院中海油大厦 A 座; 邮政编码: 100028; 联系电话: 010-84524839; E-mail: lizh19@cnooc.com.cn。

# 煤岩包裹水力压裂物模实验影响因素

寇晓璇<sup>1</sup> 王焱钊<sup>1</sup>

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

**摘要:** 地应力差、尺寸效应和地区差异是影响煤层压裂实验结果的三个重要因素,其不仅影响水力裂缝的起裂压力,而且影响着水力裂缝形态。采用山西成庄、寺河地区井下无烟煤,通过混凝土包裹煤岩方式,开展室内真三轴水力压物理模拟实验,分析压后煤岩裂缝起裂方向、扩展形态和破裂压力等特征,基于煤岩压后 CT 扫描结果,重构煤岩水力裂缝,解释裂缝展布规律。结果表明,大尺寸煤岩破裂压力在 3.0~6.5 MPa 之间,受尺寸影响起裂先沿最大主应力方向扩展,其次沟通煤岩天然割理面形成非平面裂缝;小尺寸煤岩破裂压力在 2.0~5.2 MPa 之间,岩体在井眼处沿天然割理面起裂,随后沿最大主应力方向偏转;低应力差条件下,煤岩破裂压力在 2.9~6.3 MPa 之间,沿主应力方向起裂遇节理转向形成复杂的裂缝网络;高应力差下煤岩破裂压力在 2.1~5.7 MPa 之间,受最大主应力诱导裂缝形态较为单一多为水平缝;成庄煤岩破裂压力在 3.1~5.1 MPa 之间,节理较寺河煤岩发育,水力裂缝主要受天然节理影响,寺河煤岩破裂压力在 2.1~6.3 MPa 之间,水力裂缝主要受最大主应力影响;本文对煤岩包裹实验的分析揭示了不同无烟煤地层裂缝扩展的差异性,明确了不同应力差、不同尺寸下煤岩水力裂缝形成机制,为煤岩的室内压裂实验裂缝形态对比及现场压裂参数优化提供了技术支持。

**关键词:** 煤岩水力压裂 尺寸效应 地应力差 裂缝形态

**第一作者简介:** 寇晓璇(1997),女,辽宁锦州人,中国石油大学(北京)石油工程学院硕士研究生。主要研究方向:油气井石油工程岩石力学。通信地址:北京市昌平区府学路 18 号;邮政编码:102249;联系电话:18340310308;E-mail:K18340310308@163.com。

# 黏土矿物与可溶有机质微观粘附作用研究

柳宇柯

(中国石油勘探开发研究院 北京)

**摘要:** 随着我国日益增长的能源需求和常规油气资源的不断消耗,非常规油气尤其是页岩油资源已成为新能源领域油气勘探开发的重点之一<sup>1-3</sup>。我国陆相页岩油资源丰富,由于沉积环境为半深湖—深湖相,页岩中黏土矿物含量高,其可通过吸附作用控制有机质的运移和富集,从而强烈影响页岩油的可动性。页岩油组分会随储层条件变化而发生动态调整,轻质组分趋于在渗透率较高的砂质层段富集,重质组分倾向于保留在泥质层位中<sup>4</sup>。作为重要的有机质赋存场所,黏土矿物在整个页岩油组分分异过程中扮演何种角色?其对不同组分有机质的微观粘附作用有何差异?这些尚未解决的问题都是揭示黏土矿物与页岩油可动性关系的关键所在。本文以松辽盆地青一段泥页岩抽提可溶有机质为研究对象,基于原子力显微镜针尖修饰技术,分别获取高岭石基面与各族组分(饱和烃、芳烃、非烃+沥青质)有机质之间的微观作用力曲线。发现不同黏土矿物-有机质组合之间的粘附力大小顺序为:饱和烃<芳烃<非烃和沥青质(见图)。有机-无机相之间作用力的强弱实质上反映了两者的界面物化性质,推测有机质组分极性越强,其与高岭石表面结合形成的化学键越稳定、数量也越多。本成果定量表征了黏土矿物与不同化学成分有机质的微观粘附作用,为探究黏土矿物控制页岩油形成过程中组分分异以及后期富集规律等机理提供了重要理论依据。

**关键词:** 黏土矿物 有机质 微观 粘附作用

**第一作者简介:** 柳宇柯(1992),中国科学院广州地球化学研究所地球化学专业博士,中国石油勘探开发研究院博士后。主要研究方向:非常规油气地质学、页岩气与页岩油的生成与富集机理。通信地址:中国北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院;邮政编码:100083;联系电话:15510220601;E-mail:1123564726@qq.com。

# 深海高抗疲劳无缝特殊螺纹立管的开发与应用

黄永智 张哲平 张传友 吕春莉 杨腾飞

(天津钢管制造有限公司)

**摘要:** 立管是连接水下井口或者水下装置与海上平台的重要通道,是负责将水下油气矿产等水下资源传输到水上平台的重要载体。立管在服役过程中会受到洋流、海浪等的冲刷,立管会产生弯曲振动,甚至会产生涡激振动,立管接头作为立管的连接装置,会在经过长时间的弯曲振动之后产生密封结构失效或者疲劳断裂,造成巨大的经济损失。

1. 无缝钢管加工制作的螺纹立管具有以下优点:
2. 采用无缝管制作,避免焊接缺陷影响使用寿命。
3. 螺纹立管安装方便,作业时间短,方便布放回收。
4. 螺纹立管具有超高密封能力,能够达到管体等同的密封能力。
5. 螺纹立管连接强度高,螺纹接头连接强度与管体等同。
6. 抗疲劳能力强,使用寿命长。
7. 可以提供高钢级产品,规避了高钢级产品焊接性能差的缺点。
8. 加工制作成本低。

深海高抗疲劳无缝特殊螺纹立管开发的关键是降低螺纹接头的应力集中,而普通螺纹接头结构无法满足现有应力集中要求,因此需要对接头结构进行针对性优化,降低接头在交变载荷过程中产生疲劳断裂的风险。为开发具有国际领先能力的特殊螺纹立管产品,天津钢管与中国石油大学、天津大学等国内各大高校合作,开发了一套螺纹立管设计开发方法,通过结构设计结合有限元分析计算的方法,不断改进螺纹接头结构,成功开发出了应力集中系数  $SCF \leq 2.0$  的产品 TP-FE。

同时为了保证产品的安全可靠,天津钢管借鉴了国外先进经验,自主开发了一套整管振动弯曲疲劳评价平台,通过半疲劳寿命的评价方法,并结合整管复合力试验平台,充分验证了 TP-FE 的可靠性。

目前天津钢管开发的 TP-FE 产品,已经成功应用在国内的水合物二期开采项目;并且经过国内外专家数次的评审讨论,即将应用在国内首次深海采矿项目。TP-FE 是国内第一款具有自主知识产权的深海高抗疲劳无缝特殊螺纹立管产品,希望可以为国内海洋油气资源开采用立管提供新的选项。

**关键词:** 无缝管 立管 抗疲劳 特殊扣 深海采矿 可燃冰

**第一作者简介:** 黄永智 (1987), 华北理工大学冶金工程专业硕士, 天津大学材料学院工程博士, 现就职于天津钢管制造有限公司技术中心。主要研究方向: 页岩气用管、热采井用管、海抗疲劳螺纹立管、钛合金无缝管等。通信地址: 天津市东丽区津塘公路 396 号天津钢管公司制造有限公司技术中心; 邮政编码: 300301; 联系电话: 18722384096; E-mail: huangyongzhi2007@126.com。

# 深水测试双层管柱非线性动力学特性研究

何玉发

(中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

**摘要:**深水测试时泥线以上测试管柱受到复杂的载荷激励而发生动力响应,产生较大的附加动载,改变管柱的轴力分布,造成管柱的疲劳破坏。深水测试管柱-隔水管双层管柱动力学行为属于典型的“管中管”问题,具有高度非线性。采用微元法、能量法结合哈密顿变分原理分别建立考虑顺流向和横流向耦合作用下的隔水管非线性振动模型和测试管柱纵横向耦合非线性振动模型。基于弹塑性体接触碰撞理论,建立双层管柱接触碰撞力非线性计算模型,并将其引入双层管柱非线性振动模型中,得到深水双层管柱三重非线性振动模型。采用三次 Hermit 差值形函数和 Newmark- $\beta$  法离散并求解系统振动模型。在深水测试管柱动力学建模及求解方法研究的基础上,开发了深水测试管柱动力学行为分析软件。根据南海现场油气井参数,采用相似原理,设计了隔水管-测试管系统振动模拟试验台架,开展了管柱系统振动模拟试验,测得响应的振动数据,与理论模型计算结果和单管模型计算结果对比,所建立的接触碰撞非线性模型计算结果和实验测得数据幅值和频率基本一致,而单管模型计算结果与试验相差较大,验证了深水隔水管-测试管系统非线性振动模型的正确性和有效性。在此基础上,分析了南中国海实例井管柱振动特性,表明在测试管柱振动疲劳分析时,不能忽略其自身局部高频振动的影响;测试管柱易发生强度失效的位置主要出现在中上部和下部。研究成果为深水测试管柱-隔水管的安全设计奠定理论基础。

**关键词:**深水测试 双层管柱 隔水管-测试管柱系统 非线性振动模型 模拟实验

**第一作者简介:**何玉发(1980),男,高级工程师,博士,现中海油研究总院有限责任公司完井资深工程师。主要研究方向:深水完井测试、天然气水合物钻采技术及油气井管柱力学。通信地址:北京市朝阳区太阳宫南街6号院中国海油大厦B808室;邮政编码:100028;联系电话:010-84523631,E-mail:heyf@cnooc.com.cn。

# 水平井化学驱注采能力影响因素研究

马若雨<sup>1,2</sup> 张 健<sup>1,2</sup> 康晓东<sup>1,2</sup> 梁 丹<sup>1,2</sup> 曾 杨<sup>1,2</sup>

(1.中海油研究总院有限责任公司 北京 100028;

2.海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028)

**摘要:** 目前渤海油田大部分已经进入中高含水阶段, 如何进一步提高采收率是石油工作者非常关心的重要问题。水平井技术和聚合物驱技术作为提高采收率的两大有效手段, 二者的结合对提高油气采收率将具有重要的意义和巨大的效益。本文针对水平井聚合物驱的应用需求, 利用数值模拟手段, 建立了水平井聚合物驱一注一采机理模型, 基于单因素分析、正交试验和极差分析法, 分析了聚合物浓度、层内渗透率级差、注聚时机、地层原油粘度、水平段长度、储层渗透率 6 个影响因素对水平井聚合物驱注入能力和产液能力的影响规律。根据单因素分析结果, 随着储层渗透率的增加, 米吸水指数降幅的变化范围较小, 基本就在 0.8 左右波动; 随着层内渗透率级差的增加, 米吸水指数降幅先增大后逐渐平稳; 随着原油粘度的增加, 米吸水指数降幅降低; 随着聚合物溶液浓度、注聚时机、水平井段长的增加, 米吸水指数降幅越来越大并逐渐平稳。随着储层渗透率和层内渗透率级差的增加, 米产液指数降幅呈现的是一个先增加后趋于稳定的规律; 随着地层原油粘度的增加, 米产液指数降幅越来越小; 随着聚合物溶液浓度、注聚时含水率、以及水平段长度的增加, 米产液指数降幅增加, 但增加幅度减小, 最终趋于稳定。根据极差分析的计算结果, 水平井聚合物驱注入能力影响因素的主次顺序为: 聚合物浓度>层内渗透率级差>注聚时机>地层原油粘度>水平段长度>储层渗透率; 水平井聚合物驱产液能力影响因素的主次顺序为: 储层渗透率>层内渗透率级差>水平段长度>聚合物浓度>注聚时机>地层原油粘度。

**关键词:** 水平井 聚合物驱 注采能力 产液能力 影响因素分析

**第一作者简介:** 马若雨 (1994), 女, 中国石油大学 (北京) 油气田开发工程专业硕士, 现就职于油田开发工程师在中海油研究总院。主要研究方向: 化学驱提高采收率。通信地址: 北京市朝阳区太阳宫南街 6 号院中国海油大厦; 邮编: 100028; 联系电话: 010-8452-3670; E-mail: mary7@cnooc.com.cn。

# 苏里格致密砂岩气藏水平井开发关键技术

王文胜<sup>1,2</sup> 李进步<sup>1,2</sup> 田清华<sup>1,2</sup> 史红然<sup>1,2</sup> 张志刚<sup>1,2</sup> 张 晨<sup>1,2</sup>

(1.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)

**摘要:** 苏里格气田位于鄂尔多斯盆地二级构造单元伊陕斜坡西侧,属于典型低压、低渗、低丰度的“三低”气藏,河道横向频繁改道,垂向不断下切侵蚀,造成砂体大面积连片分布,内部隔夹层发育,储层致密强非均质性制约了水平井开发效果。通过近 20 年的开发实践,地震技术形成了以叠前预测为主、叠合预测为辅,以岩性预测为基础、含气性预测为核心的有效储层预测方法,储层描述从层段复合砂体精细化到单砂体,地震地质一体化构建三维地质模型,精细表征地下储层展布,水平井因“地”制宜采用水平井大井组、水平井混合井组多元化部署,常规水平井、老井侧钻水平井、二开结构水平井多井型开发和平直型、大斜度型、阶梯型差异化轨迹设计,创新井震联合地质导向方式和“工厂化”压裂改造工艺,逐步形成了适合苏里格气田水平井高效开发的储层精细描述、地质布井、水平井导向及压裂改造等配套技术。技术的应用确保了气田储层品质渐变差情况下,水平井气层钻遇率依然保持在 60%以上;水平井前三年平均单井日产气量  $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,约为直井的 3.4 倍,水平井井数占比 12.5%条件下产量贡献达到 25.9%。随着开发逐渐深入,开发对象日趋复杂,针对性加强复杂区块、低品质储层条件下水平井经济效益开发研究,对气田持续稳产、保障国家天然气能源安全具有重要意义。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地 苏里格气田 水平井 储层描述 井位优选 轨迹设计 地质导向 压裂改造 高效开发

**第一作者简介:** 王文胜(1985),西北大学硕士研究生,现长庆油田勘探开发研究院工程师。主要研究方向:储层精细描述及三维地质建模。通信地址:陕西省西安市未央区长庆科技 721 室;邮政编码:710018;联系电话:029-86978164/13709290792;E-mail:wwsh1\_cq@petrochina.com.cn。



# 台风下深水钻井隔水管系统悬挂动力学及作业技术

刘秀全 李彦伟 胡鹏基 陈国明

(中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心)

**摘要:**我国南海是热带气旋的频发区,自然环境十分恶劣,频繁发生的台风严重影响深水钻井隔水管作业安全。台风来临前需要进行深水钻井隔水管系统底部脱离,脱离后深水钻井平台悬挂隔水管系统进行避台风撤离与回收作业,严重影响深水钻井效率,若处理不当还有可能引起深水钻井隔水管系统事故。为此,开展台风下深水钻井隔水管系统悬挂动力学及作业技术研究,主要包括:(1)建立深水钻井隔水管系统各关键部件的水动力载荷模型,精细化评估悬挂工况下各关键部件的水动力载荷数据,采用数据驱动方法形成连续的水动力载荷数据模型,融合深水钻井隔水管系统悬挂结构动力学及水动力载荷模型,建立深水钻井隔水管系统悬挂动力学精细化评估模型。(2)开展不同海况、悬挂模式(硬悬挂、软悬挂)及悬挂长度下的深水钻井隔水管系统悬挂动力学分析,分析不同工况下深水钻井隔水管系统轴向位移、应力及轴向载荷分布情况,识别台风下深水钻井隔水管系统悬挂动力学特性。(3)开展不同悬挂模式下的深水钻井隔水管系统避台撤离动力学分析,确定深水钻井隔水管系统悬挂安全作业准则,建立台风下深水钻井隔水管系统避台撤离安全作业窗口。相关研究成果可为我国南海实际工程中的深水钻井隔水管系统悬挂动力学分析及安全作业提供技术支撑。

**关键词:**深水 台风 隔水管 悬挂 安全作业

**第一作者简介:**刘秀全(1987),中国石油大学(华东)博士,现中国石油大学(华东)副教授、博士生导师、机电工程系科研主任,主要研究方向:海洋油气装备与安全技术。通信地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号机电工程学院;邮政编码:266580;联系电话:18954217256;E-mail:lxqmcae@163.com。

## 微地震监测技术在致密气水平井开发中的应用

王树慧<sup>1,2</sup> 费世祥<sup>1,2</sup> 高 阳<sup>3</sup> 蔡 芳<sup>4</sup>

(1.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程试验室 陕西西安 710018;

3.中国石油长庆油田第一采气厂 陕西西安 710018;

4.中国石油集团测井有限公司长庆分公司 陕西西安 710201)

**摘要:**鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏资源总量占盆地天然气总资源量的80%以上。为实现致密气藏高效开发,优选苏里格气田苏东南示范区J-x试验区,试验区前期通过三维地质建模、三维地震及储层沉积学特征分析等多学科联合攻关,实现砂体空间展布,及储层横向预测、有效砂体精细解剖、构造精细刻画等工作;在致密气水平井开发中首次实现水平段内微地震监测技术,该技术是通过观测、分析生产活动中所产生的微小地震事件来监测生产活动的影响、效果及地下状态的地球物理技术,采用试验井、监测井同井场、同方向、同层位,力求更加真实反映压裂过程,对水平井压裂过程裂缝实时空间分布可视化监测,识别压裂暂堵工艺效果,定量计算固井桥塞压裂改造规模。通过邻井对比及综合分析,确定地层主应力方向、天然缝发育情况,评价当前井网井距下井间干扰程度,为后期井位部署及开发方案编制提供依据。研究结果表明压裂改造在现有改造条件下,最优改造段间距在80-100m之间,簇间距不大30m;裂缝暂堵转向技术对新缝开启有一定作用,但影响整体改造规模;在目前的工艺改造条件下,改造规模有限,可适当将井距缩减至400-500m为宜,以便达到最大的储量动用;最大主应力方向为近东西向,与气田开发前期研究资料一致,部署水平井方向应坚持近南北走向。

**关键词:**致密砂岩气藏 水平井 微地震监测 暂堵工艺 主应力方向

**第一作者简介:**王树慧(1986),男,西安石油大学矿产普查与勘探专业硕士研究生,现任中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院天然气开发四室工程师。主要研究方向:天然气综合地质研究、气田产能建设、水平井开发。通信地址:陕西省西安市未央区长庆兴隆园小区;邮政编码:710018;联系电话:029-86978950/13991891514; E-mail: wshhui1\_cq@petrochina.com.cn。

# 页岩油密切割压裂分簇参数优化模拟研究

常 智<sup>1,2</sup> 侯 冰<sup>1,2</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院 北京 102249;

2.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

**摘要:**新疆准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层呈东深西浅,北深南浅的特征,同一开发层位在区块不同位置其地应力状态和厚度均有差异。为探究同一层位在不同深度和厚度条件下分簇参数的优化方法,依据芦草沟组页岩油储层的层位划分及天然裂缝产状特征,建立了密切割体积压裂裂缝扩展 3DEC 离散元三维数值模型,模拟了不同储层厚度、地应力状态及分簇参数条件下的裂缝扩展过程,通过计算复杂裂缝系统的 SRA 和 ESRA 对不同储层厚度和地应力状态条件下的改造效果进行评价,并以此作为判据得到不同储层深度和厚度条件下的密切割压裂射孔参数优化方法。

模拟研究了 30m、50m 储层厚度下分别采用 3 簇、5 簇、7 簇射孔条件下的裂缝扩展模式及裂缝的立体产状,以及不同簇间距下缝间诱导应力对裂缝扩展的影响。通过数值模拟分析可知: 1) 对于 $\leq 50\text{m}$ 厚的单套储层应采用加密射孔簇的完井方案配合增加压裂时长的施工方案进行储层改造,加密射孔簇可有效提高储层改造的 ESRA,增加压裂时长可确保多簇裂缝充分扩展,提升储层改造效果。2) 在相同排量 and 注液时间条件下,裂缝系统 SRA 与分簇数正相关,裂缝系统波及范围与分簇数负相关。分簇数增加会加剧簇间水力能量的不均匀分配,使得簇间裂缝的竞争扩展程度增强,导致多数横切缝不能充分扩展。对于平均厚度为 30m 的储层,多分簇会使得横切缝穿透到干层中的面积减少,减少无效改造面积。3) 在相同排量和注液时间条件下,簇间距越大,激活的天然裂缝越多,簇间裂缝的竞争扩展程度越弱,诱导应力对相邻横切缝的挤压作用越弱,横切缝的裂缝形态趋于规则,缝宽分布趋于均匀。

**关键词:**页岩油 裂缝系统 离散元 SRA 吉木萨尔

**第一作者简介:**常智(1995),中国石油大学(北京)硕士,现中国石油大学(北京)博士研究生在读。主要研究方向:非常规储层水力压裂裂缝形态及扩展规律。  
**通信地址:**北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京);**邮编:**102249;**联系电话:**18811595971;**E-mail:**cz950105@163.com。

# 一种双连通开发低渗天然气水合物藏的井型结构设计

高永海 高冬至 徐 娜 周有为 尹法领 姚 旺 陈 野

(中国石油大学(华东))

**摘要:** 天然气水合物 (NGH) 是一种能量密度高、预测储量大的非常规矿产资源, 通常埋藏在具有低温、高压等环境特点的海洋大陆边缘陆坡及高纬度冻土带等区域, 具有较高的开采潜力。然而其赋存所在沉积层普遍由粉砂、砂及黏土构成, 存在渗透率低、胶结程度差、热传导能力相对较弱等难题, 尤其是 NGH 受外界扰动会在固相与气相、液相间相互转化, 使多孔介质中的传热传质规律变得更为复杂。因此, 尽管人们已围绕降压、热激、添抑制剂以及 CO<sub>2</sub> 置换等传统开发方法开展了大量室内实验、数值模拟乃至试采工程, 但目前取得的最好成绩仍距离产业化门槛约 1-2 个数量级, 尚不能推广 NGH 商业应用。本文通过设计一种双连通式的复杂井型结构, 主要包括两口注入井和一口生产井以及连通他们之间的水平井段, 可以联合多种传统方法协同作用, 较常规的直井开采, 其优点包括: (1) 设置多个水平井段能够增大与天然气水合物藏间接触面积; (2) 水平井段部分采用特殊筛管结构, 在近井范围内可以部分实现喷射、压裂效果, 改善地层低渗性质; (3) 生产井段也部分采用特殊筛管结构, 可以利用管道内流体高速流动产生的局部低压诱使 NGH 分解并促进产物流入井筒; (4) 注入流体能够增大孔隙压力, 与采用降压法的生产井间形成更大压差, 驱动分解产物流向生产井; (5) 注入流体自带高温, 既能加快 NGH 初始分解速度, 也能相对提高相平衡条件, 避免 NGH 二次生成; (6) NGH 由固体分解为气液本身就能改善沉积层流通性, 提高传热传质效率, 从而进入良性循环; (7) 选用 CO<sub>2</sub> 作为携热流体能相对维持沉积层稳定性; (8) 上液下气的注入方法能够充分利用因流体密度差异导致的重力效果, 使注入流体与 NGH 间接触更充分。相比于单一或如热激辅助降压等两种开发方法混合应用的开发效果, 该井型不仅联合了降压、热激、CO<sub>2</sub> 置换等多种开发方法, 还针对不同方法特点, 兼顾了彼此差异、保留了各自优势, 理论上达到了“ $\Sigma n > N$ ”的目的。在后续研究证实其高效可行性后, 为 NGH 商业开发提供一种优选方案。

**关键词:** 天然气水合物 低渗沉积层 储层改善 双连通井 可行性分析

**第一作者简介:** 高永海 (1977), 男, 山东临朐人, 博士, 中国石油大学 (华东) 石油工程学院教授, 主要研究方向: 井控、井筒流动安全、水合物开发和预防。  
**通信地址:** 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学石油工程学院; 邮政编码: 266580; E-mail: upcgaoyh@126.com。

# 致密砂砾岩油藏加密井压裂井间干扰研究

史 璨<sup>1,2</sup> 林伯韬<sup>1,2</sup>

(1.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

2.中国石油大学(北京)石油工程学院 北京 102249)

**摘 要:** 新疆玛湖致密砂砾岩油藏油气富集, 开发潜力巨大, 是新疆油田未来提产的重点区域。目前玛湖致密砂砾岩油藏存在产量递减快 (21.5%-76.7%), 预测采收率低 (约 9.5%) 等问题, 且初次压裂及重复压裂改造导致的应力场复杂, 压后效果不理想, 增产能力差。为进一步增加储层改造体积, 现场开展了加密水平井试验以立体开发砾岩油藏。然而随着井间距减小, 井间水力裂缝干扰明显, 严重影响母井产量。同时, 邻井的压裂和生产导致储层地应力场发生动态演化, 从而影响后续压裂井的储层改造效果。由此, 亟需明确加密井井间干扰机理并提出相应的工程对策。本文首先从地质角度出发, 构建研究区块的三维动态地应力场, 获得储层孔隙压力、地应力大小、地应力方向的动态演化规律; 其次, 基于非连续离散裂缝模型 (DDFM) 建立子井的压裂裂缝扩展模型, 分析了母井注水增能对子井压裂裂缝扩展的影响规律。研究发现, 母井生产导致裂缝周围地层孔隙压力降低, 最小水平地应力方向发生明显偏转, 而直接压裂子井会导致裂缝沿井筒方向偏转, 储层改造程度低; 母井若实施注水增能, 子井压裂后的压裂裂缝偏转角度明显减小, 走向逐渐与井筒垂直。本文的研究明确了母井生产以及注水增能措施对子井压裂后裂缝扩展的影响规律, 为加密井压裂方案提供了有效的工程指导。

**关键词:** 砂砾岩 水力压裂 动态地应力 井间干扰

**第一作者简介:** 史璨 (1994), 男, 中国石油大学 (北京) 博士研究生在读, 主要研究方向: 非常规油气藏储层地质力学及水力压裂。

# 致密砂岩气藏水平井地质设计优化

刘俊田清华

(中石油长庆油分公司田勘探开发研究院)

**摘要:** 苏里格气田是中国致密砂岩气田的典型代表,水平井开发技术是其提高单井控制储量和采收率、实现气田规模有效开发的关键技术,在近些年开发中效益明显。与国外致密砂岩储层分布稳定的条件相比,苏里格致密砂岩气藏储层规模较小、纵向多层、分散展布且局部富集,气田“先肥后瘦”的开发理念导致优质储层动用程度高,按照早期的地质设计标准部署难度较大。随着水平井开发工艺的持续升级与致密砂岩储层认识的不断加深,结合整体开发经济效益,水平井地质设计逐步向多元化转变,在轨迹优化、靶点设计与目的层选取上有较明显的调整,主要思路有:①在常规平直型水平井基础上增加二开大斜度水平井、老井侧钻水平井两种轨迹设计,二开水平井能够提高纵向叠置、横向规模小储层动用程度,老井侧钻水平井作为完善井网的补充方式,提高了井间剩余储量动用;②通过对砂体精细解剖,研究区有效单砂体与河道砂体规模小,水平段一般可控制 1-2 套储层,在骨架井不足时,只要砂体展布规模较为落实,入靶点的选取不局限于含气砂层,由于层入靶也能取得较好的钻遇效果;③与水平井开发主力层盒 8<sub>下</sub>相比,山 1 段储层在局部地区也具备一定规模,具备水平井开发潜力。该方法在苏里格气田水平井井位优选和水平井设计的现场应用中取得了较好的效果,为已开发区块中后期水平井建设提供很好的借鉴作用。

**关键词:** 致密砂岩 苏里格 水平井 优化设计

**第一作者简介:** 刘俊(1988),男,长江大学矿产普查与勘探专业硕士研究生,现中国石油长庆油田公司勘探开发研究院天然气开发一室副主任、工程师,主要研究方向:天然气开发地质与气藏工程。通信地址:陕西省西安市凤城四路长庆油田科技楼;邮政编码:710018;联系电话:029-86598491;E-mail:liujun123@126.com。

# 致密砂岩气藏水平井精细化地质导向技术

崔越华<sup>1,2</sup> 费世祥<sup>1,2</sup> 黄有根<sup>1,2</sup> 刘雪玲<sup>1,2</sup> 游良容<sup>1,2</sup> 张正涛<sup>1,2</sup>

(1.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程试验室 陕西西安 710018)

**摘要:** 苏里格气田某区上古生界 H 段致密砂岩气藏属于辫状河三角洲平原沉积, 多期河道砂体横向频繁迁移、纵向错位叠置, 砂体内部结构复杂, 泥质隔夹层较发育, 储层非均质性强, 水平井地质导向难度大。为了提高水平井钻遇效果, 多学科协同开展储层精细表征, 根据气藏砂体成因类型及其空间叠置关系等最新认识, 科学制定了苏里格气田某区水平井精准入靶及水平段随钻地质导向技术思路; 综合考虑不同区带开发现状, 深入开展了沉积相分析、三维地质建模、三维地震预测等研究, 结合已完钻水平井的实施经验, 强化地质、测井、地震等多学科全过程一体化决策, 创新形成了“小层精细对比入靶、地质小尺度多维刻画、地震大方向实时预测”的综合导向新方法, 实现了致密砂岩气藏水平井精细化地质导向。现场应用表明, 苏里格气田某区平均水平段长度 1387m, 储层钻遇率达到 86.6%, 较历年平均值提高了约 7%, 气层钻遇率 70%, 较历年平均值提高了 10%, 该方法有效提升了水平井开发效果。

**关键词:** 苏里格气田 致密砂岩气藏 水平井地质导向 沉积地质模型 三维地质建模 三维地震预测

**第一作者简介:** 崔越华 (1986), 中国石油大学 (华东) 矿产普查与勘探专业硕士研究生, 气田开发工程师。主要研究方向: 天然气开发地质、水平井导向等。  
**通信地址:** 陕西省西安市未央区长庆兴隆园小区; 邮政编码: 710018; 联系电话: 029-86594773; E-mail: cyh168\_cq@petrochina.com.cn。

# 致密砂岩气藏水平井水平段优化研究-以苏里格气田 S1 区为例

徐运动<sup>1,2</sup> 薛云龙<sup>1,2</sup> 张建国<sup>1,2</sup> 黄琛琛<sup>3</sup> 崔越华<sup>1,2</sup>

(1.长庆油田勘探开发研究院;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室;

3.中国石油长庆油田分公司第一采气厂)

**摘要:** 水平井是开发致密砂岩气藏的最有效手段之一,水平段长度对水平井的有效泄流面积,动态控制储量以及产能等有直接影响,以苏里格气田 S1 区为例,综合区块投产水平井动态开发指标、储层特征及砂体展布特征、经济指标等因素,主要从砂体规模,理论公式计算,经济评价及矿场产量统计等 4 个方面,建立致密砂岩气藏多目标、多参数的水平井长度优化方法,研究成果成功应用在苏里格气田 S1 区,建立了国内致密砂岩气藏整体水平井开发示范区,同时,为国内外同类致密砂岩气藏水平井合理长度优化设计提供了借鉴。

**关键词:** 致密砂岩气藏 水平段长度 动态开发指标 多目标、多参数 水平井开发示范区

**第一作者简介:** 徐运动 (1983), 男, 西南石油大学油气田开发工程专业硕士, 现任长庆油田分公司勘探开发研究院高级工程师。主要研究方向: 气藏工程、数值模拟。通信地址: 陕西省西安市长庆兴隆园小区长庆油田分公司勘探开发研究院; 联系电话: 029-86594832/15191911370; 邮政编码: 710021; E-mail: xyd01\_cq@petrochina.com.cn。



# 智能导向钻井方法初探

陈冬<sup>1</sup> 叶智慧<sup>2</sup> 王涵<sup>2</sup> 杨琼<sup>2</sup> 刘斌<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院 北京 102249;

2.中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249)

**摘要:** 钻井导向技术的进步推动了水平井、大位移井等复杂结构井的发展,为解决复杂油气工程问题提供了技术支撑。导向工具与随钻测量(MWD)的有机结合,使钻井作业人员及时掌握井眼轨迹动态,形成了几何导向钻井技术。在此基础上,融合随钻测井(LWD),实现随钻地质评价(FEWD),形成了地质导向钻井技术。旋转导向工具的发明,改善了滑动导向钻井因钻柱不旋转带来的不利作业工况,大大提高了导向钻井作业效率与质量。导向钻井技术自动化水平越来越高,但决策主体仍为钻井导向专业人员。

近年来,无人驾驶技术发展迅速,机器自主智能导航已成为主流发展方向。地下导向技术与地面导航技术具有相似性,钻井导向技术也必将朝着智能导向的方向发展。实现智能导向的关键是将人类专家对地质导向数据的理解与导向决策过程转换为机器自主认知与决策算法。为此,笔者开展智能导向钻井方法初探:1)构建钻井环境模型,利用机器视觉技术,建立反映地下油气富集程度的三维空间网格评价矩阵,该方法可使机器自主识别甜点区域,为导向决策提供依据;2)建立基于机器视觉的井眼轨道规划方法,无需人类专家利用井眼轨道设计数学模型调整设计方案,且兼具随钻轨道实时优化性能;3)融合井眼轨迹动态扫描方法,及时掌握轨迹误差,为导向决策提供量化指标;4)建立轨迹误差与导向工具的量化关系,为导向决策的执行提供依据。初步研究成果为智能导向钻井提供了算法,为无人化智能钻井的实现提供了技术支撑。

**关键词:** 地质导向 智能导向 钻井 机器视觉 机器学习

**第一作者简介:** 陈冬,中国石油大学(北京)石油工程学院副教授,主要研究方向:智能钻井、石油工程云计算与云设计、人工智能与共享 AI、数值模拟。

# 开发非常规油气资源利器-连续管气体钻井技术

曹 川 张燕萍 卢 静 吴千里 罗 勇

(中国石油集团工程技术研究院有限公司)

**摘 要:** 近年来,我国油气开发面临的对象越来越复杂。其中主要亟待解决的问题包括以下三方面:第一,相当多的老油田都处于高含水和高采出程度的“双高”开发阶段,老油田及衰竭油气藏需要通过老井加深或者开窗侧钻进行二次开发,如何规模化地开发老油田及衰竭油气藏成为各大油田稳产上产的重要议题;第二,新增储量以低渗透、特低渗透为主,单井产量低,总体呈现多井低产局面,如何有效地开发低渗透、特低渗透油气藏,降低单井成本成为保障我国油气供给安全的重要议题;第三,我国非常规天然气资源量庞大,在致密气、页岩气开发重视程度仅次于美国。美国近年来通过非常规油气资源开发改变自身能源格局举世瞩目,如何低成本开发我国非常规天然气资源成为打开我国未来油气潜力的重要议题。连续管气体钻井将连续管钻井与气体钻井相结合,兼具两种技术优势,为油气井作业带来更有力技术支撑,国外已有相对成熟的应用,在国内还鲜有案例。目前国内连续管侧钻井技术应用日趋成熟,特别是 $\phi 139.7\text{mm}$ 套管连续管侧钻技术,研发了14种连续管开窗侧钻成套工具,形成了连续管开窗、定向、稳斜钻进整体侧钻井工艺,该技术已在国内应用超过20余口井,累积进尺超过6000m。本文旨在通过分析国内外气体钻井和国外连续管气体钻井现状及现场应用情况,总结连续管气体钻井的适应性,同时介绍国内连续管钻井井下工具研发与应用新进展,为当前形势下非常规油气开发技术创新提供新思路。

**关键词:** 连续管气体钻井 侧钻井 低压低渗 致密油气 现场应用

**第一作者简介:** 曹川(1985),北京石油大学油气井工程专业硕士,现任中国石油集团工程技术研究院有限公司高级工程师。主要研究方向:连续管侧钻井技术、有缆式连续管气体钻井技术和水平井大斜度井井下减阻技术。通信地址:北京市昌平区黄河街五号院;邮政编码:102206; E-mail: caochuandri@cnpc.com.cn。

# 油气储运长输管道工程建设管理与技术创新

吕春雷

(长庆油田分公司第三采气厂)

**摘要：**油气储运公司地面工程建设一般由生产运营单位自行组建临时项目组，抽调工艺、土建、电仪等专业技术管理人员组成临时机构，负责工程建设管理与企业内部协调。由于生产运营单位较国家管网工程公司建设管理经验差距较大，且受降本增效投资管控等无法搭建如 IPMT 一体化项目管理等模式，查阅生产单位工程建设管理及技术创新参考文献较少。本文以上古天然气处理总厂调气管线工程建设为例，参考借鉴国内西气东输、陕京线、中俄东线等长输管道工程建设成功经验，科学调配管理资源，加强组织领导、统筹谋划、协调推进。深度参与勘察设计，合理优化管线路由，及时避让敏感区，为后续征借地手续报批提供保障，避免了工程建设阶段设计方案变更导致的施工停滞、材料浪费等。开展前站式物资采购，在“互联网+”的背景下，实现业务审批、物资信息共享、采购档案管理等，建立形成“分工负责、协调配合、上下贯通”的物资集中采购管理机制，保证物资需求，有效提升物资供求能力。创新全员监督模式，发挥“施工单位三检制+监理公司旁站制+属地单位交底制+建设单位全程制+质监站专项检查制+安全环保监督制”六制作用，完善项目管理的激励约束机制，切实加强重点工序、关键环节的全过程管控。应用机械化补口方式，统筹流水化施工管理，解决热收缩套补口手工烘烤存在的弊端，避免了热收缩套热熔胶熔融问题，提高了补口的安装质量。为解决传统封堵动火氮气置换时间长，隔离密封性差等问题，应用水溶性封堵技术快速完成含油、气输送管道的封堵，缩短动火准备时间，确保动火焊接作业安全，实现当日放空当日连头作业，节省了氮气成本和时间成本，达到了降本增效的目的。运用数字管道技术，开发 APP 实时上传现场数据，实现管道建设的虚拟现实表达，为长输管道工程建设、后期运营等提供基本数据支持，有效的解决了长输管道由于铺设线路长，地理复杂，施工统筹规划性差等传统问题，为现代长输管道建设提供了更为有效的方式。通过创新工程建设管理与新技术应用，不断提升工程建设管理质量与效率，上古天然气处理总厂调气管线工程历时 3 个月完成 80km 主体焊接任务，焊接合格率达 99.6%，安全穿越 144 处已投支干线，实现“零事故、零伤害、零污染”安全环保目标，优质高效完成工程建设任务，满足长输管道安全平稳运行整体目标，保障了上古天然气处理总厂如期投产。

**关键词：**油气储运 工程建设 管理创新 机械补口 水溶封堵

**第一作者简介：**吕春雷（1985），男，毕业于大庆石油学院金属材料工程专业，现任长庆油田分公司第三采气厂工程施工工程师、作业区采气工程二级专家。主要研究方向：油气储运地面工程建设及作业区、处理厂集输技术管理。

## 注水站工艺密闭研究

冯启涛 张帆 王国柱 王斌

(西安长庆科技工程有限责任公司)

**摘要:** 油气田供水担负着油田注水、生产、生活、消防用水的供给任务。注水站工艺密闭与节能研究是为了简化长庆油田“水源井深井潜水泵组→水罐→供水泵→用户的开式供水工艺”而开展的研究,实现了深井潜水泵组与供水泵之间的泵对泵串联密闭输水。研究应用了水泵变频供水技术、气压罐稳压技术以及配套的吸排气、防水击、过滤、智能控制技术,实现了潜水泵组-加压泵的泵-泵密闭叠压串联供水。采用压力-水泵频率闭环控制原理,根据供水泵进口压力,实时调整电机频率,从而改变供水泵运行工况,使系统始终处于平稳工况下运行,另外在水泵进口端设置了气压水罐稳压措施,保证供水泵在流量变化时有充裕的工况调整时间。

**关键词:** 密闭 变频 稳压 智能控制

**第一作者简介:** 冯启涛(1981),男,2004年毕业于长安大学,现任西安长庆科技工程有限责任公司工程师。主要研究方向:油气田采出水处理。联系电话 029-86598715; Email: fqt03\_cq@petrochina.com.cn。

# 超低渗透油藏水平井异井注采缝间驱替效果研究

宋磊 王思仪 李悠悠

(中国石油长庆油田勘探开发研究院)

**摘要:**长庆油田超低渗透油藏储层物性差、部分油藏天然裂缝多方向发育、水平井排距偏大等因素导致注采间难以建立有效驱替。前期的“点注面采”五点井网注水补能水平井开发方式,目前部分油藏生产表现出见效程度低、递减大、采油速度低的问题。为进一步提高超低渗透油藏开发效果,本文通过线注线采开发方式建立有效驱替系统,建立水平井交错布缝异井注采井网,沿注入水平井的人工裂缝注水,缝间驱油。研究表明,根据地层压力梯度计算公式,依据地层压力梯度大于启动压力梯度的原则,优化缝间距在30m左右时,能够在开发周期内建立驱替系统。矿场实践表明:小排距注水见效典型井I类油藏P检1井(K=0.86mD),位于裂缝侧向83m,投产后较原井网侧向井(排距220m)压力恢复速度快,投产34个月后注水见效明显,产量、压力逐渐上升。当点状注水转变为线状注水,在注水量相同的情况下,注水压力降低,有利于避免天然裂缝在注水过程中产生的天然裂缝二次开启,降低裂缝性水淹风险。人工裂缝缝间的区域由弹性溶解气驱转变为水驱,实现人工裂缝段间驱替和渗吸驱油的能量补充方式。压力场、流线场具有分布均匀,水驱控制范围大的特征。本文的研究对长庆油田超低渗透油藏的水平井有效补能及高效开发具有重大意义。

**关键词:**超低渗透油藏 水平井 异井注采 缝间驱替 缝间补能

**第一作者简介:**宋磊(1991),中国石油大学(北京)油气田开发工程专业博士,现任中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院工程师。主要研究方向:老油田稳产及非常规油藏渗流规律。通信地址:陕西省西安市凤城四路长庆科技大厦;邮政编码:710016;联系电话:15210877944; Email: songlei\_cq@petrochina.com.cn。

# 关于体积压裂对致密储层有效改造范围的新认识

马 莉 魏中原 王思仪

(1.长庆油田公司勘探开发研究院;

2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室.陕西西安, 710018)

**摘要:** 体积压裂在非常规油气田开发中起着至关重要的作用。关于体积压裂形成的裂缝规模以往单纯依靠井下微地震进行测试判断, 真实情况没有过验证。在鄂尔多斯盆地致密油试验区, 选取了一口经过体积压裂并进行了微地震监测的油井, 设计了一口短水平取心井, 以验证人工裂缝为目的, 对经大规模体积压裂后储层中产生的人工压裂缝进行了识别和表征, 进而分析了致密储层体积压裂改造区人工裂缝发育特征, 探讨了体积压裂的有效作用范围、压裂缝的空间分布等关键问题。观察结果表明, 长 7 段体积压裂后油层段块状砂岩中并未见到大规模发育的裂缝, 在整个 85 米取芯岩心段未观察到明显的复杂人工压裂缝网系统, 仅在 1 米左右岩心段范围内可见 3 条疑似人工压裂缝, 断面光滑, 未见明显压裂支撑剂显示, 而微地震监测裂缝带宽为 85 米, 半带长为 184 米, 初步认为实际体积压裂改造范围与井下微地震监测及常规认识存在较大差异。综合分析认为, 现阶段技术条件下, 长 7 段致密油层体积压裂后, 改造区宏观裂缝网络扩展范围有限, 油层剩余油饱和度依然很高, 致密油藏体积压裂效果还有进一步优化的空间。

**关键词:** 体积压裂 裂缝 致密油 微地震 鄂尔多斯盆地

**第一作者简介:** 马莉 (1986), 女, 甘肃省嘉峪关市人, 中国石油大学 (华东) 油气田开发专业硕士, 现任油气田开发工程师, 主要研究方向: 油藏稳产。通信地址: 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院; 邮政编码: 710021; 联系电话: 029-86597402; Email: mali818\_cq@petrochina.com.cn。