



## 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议

陈作 刘红磊 李英杰 沈子齐 许国庆

### The Current Status and Development Suggestions for Shale Oil Reservoir Stimulation at Home and Abroad

CHEN Zuo, LIU Honglei, LI Yingjie, SHEN Ziqi, XU Guoqing

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021081>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 国内外干热岩压裂技术现状及发展建议

The Current Status and Development Recommendations for Dry Hot Rock Fracturing Technologies at Home and Abroad

石油钻探技术. 2019, 47(6): 1-8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019110>

#### 国内外水溶气开发技术现状及发展建议

The Current Situation and Suggestions for Water-Soluble Gas Development Technology at Home and Abroad

石油钻探技术. 2021, 49(2): 1-8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020121>

#### 致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议

Research Progress and Development Recommendations Covering Damage Mechanisms and Protection Technologies for Tight/Shale Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(4): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020068>

#### 我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议

Current Status and Development Suggestions in Drilling and Completion Technology of Underground Gas Storage in China

石油钻探技术. 2020, 48(3): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020041>

#### 废弃井地热能开发技术现状与发展建议

Technical Status and Development Suggestions in Exploiting Geothermal Energy from Abandoned Wells

石油钻探技术. 2020, 48(6): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020120>

#### 南海天然气水合物取样技术现状及发展建议

Current Status and Development Recommendations for Gas Hydrate Sampling Technology in the South China Sea

石油钻探技术. 2020, 48(4): 89-93 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020045>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 综 述 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021081

引用格式: 陈作, 刘红磊, 李英杰, 等. 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 1-7.

CHEN Zuo, LIU Honglei, LI Yingjie, et al. The current status and development suggestions for shale oil reservoir stimulation at home and abroad [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 1-7.

## 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议

陈 作<sup>1</sup>, 刘红磊<sup>1</sup>, 李英杰<sup>2</sup>, 沈子齐<sup>1</sup>, 许国庆<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206; 2. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100176)

**摘 要:** 北美海相页岩油采用长水平段水平井密切割体积压裂技术和“工厂化”施工技术等手段, 已获得规模化商业开发, 而国内陆相页岩油勘探开发起步晚, 总体处于试验与示范阶段。为促进我国页岩油的勘探开发进程和页岩油开发技术的发展, 总结分析了北美海相页岩油和国内陆相页岩油储层的基本特征、储层改造技术现状和特点, 从中得到了诸多启示, 从而针对国内陆相中高成熟度页岩油储层的特性, 提出了强化基础与机理研究、进行多岩性偏塑性储层穿层压裂技术及复杂缝压裂技术攻关、研发多功能压裂液和压力敏感智能支撑剂、研究排采和 CO<sub>2</sub> 注采技术及进行压-驱-采一体化攻关的建议, 以期提高我国陆相中高成熟度页岩油的开发效果。

**关键词:** 页岩油; 海相盆地; 陆相盆地; 中高成熟度; 储层特征; 密切割体积压裂; 技术现状; 发展建议

**中图分类号:** TE357.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2021)04-0001-07

## The Current Status and Development Suggestions for Shale Oil Reservoir Stimulation at Home and Abroad

CHEN Zuo<sup>1</sup>, LIU Honglei<sup>1</sup>, LI Yingjie<sup>2</sup>, SHEN Ziqi<sup>1</sup>, XU Guoqing<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206; 2. CNPC Offshore Engineering Company Limited, Beijing, 100176)

**Abstract:** North American marine shale oil has achieved large-scale commercial development by means of volumetric fracturing with tight spacing in horizontal wells with long horizontal sections and “factory-like” construction technologies, etc. However, the exploration and production of continental shale oil in China started late and are still generally in the stage of experiment and demonstration. To accelerate the exploration and production process of shale oil in China and improve relevant technologies, basic properties of North American marine shale oil reservoirs and China’s continental shale oil reservoirs, as well as the technical status and characteristics of reservoir stimulation applied on those reservoirs were summarized and analyzed, resulting in many new insights. Given the unique properties of continental shale oil reservoirs with medium-high maturity in China, suggestions that would result in better production results were made for such reservoirs in China. The suggestions focused on strengthening basic and mechanism research, addressing technical problems of cross layer fracturing in multi-lithology plastic reservoirs and complex fracture networks based fracturing, developing multi-functional fracturing fluid and pressure-sensitive intelligent proppant, studying drainage and CO<sub>2</sub> injection and production technology, and tackling key problems of fracturing-flooding-producing integration.

**Key words:** shale oil; marine basin; continental basin; medium-high maturity; reservoir properties; volumetric fracturing with tight spacing; technical status; development suggestions

目前国内外开发动用的页岩油, 均为广义的页岩油, 即蕴藏在页岩以及致密砂岩和碳酸盐岩等含油层中的石油资源<sup>[1]</sup>。美国于 1953 年开始在威林斯

顿盆地开展页岩油勘探开发, 历经了直井开发、直井压裂开发、水平井开发和水平井分段压裂开发等阶段, 目前已经形成较为完善的储层改造技术和配

收稿日期: 2021-03-18; 改回日期: 2021-06-03。

作者简介: 陈作 (1968—), 男, 四川大英人, 1991 年毕业于西南石油学院油藏工程专业, 2002 年获中国地质大学 (北京) 石油与天然气工程专业硕士学位, 正高级工程师, 主要从事低渗透油气藏压裂酸化基础理论研究。E-mail: chenzuo.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“盐间页岩油增产工艺及试采技术” (编号: P19013) 资助。

套工具与材料,有力支撑了二叠盆地、利斯顿盆地和墨西哥湾盆地页岩油大规模商业开发<sup>[2-4]</sup>。我国陆相盆地发育多套泥页岩层系,页岩油资源潜力巨大,但具有岩性复杂、黏土含量高、原油流动性差等特性,效益开发面临重大挑战。近五年来,国内掀起了页岩油勘探开发热潮,先后建立了新疆吉木萨尔和长庆陇东页岩油压裂开发示范区,但因投产时间短,最终经济开发效果还有待评价<sup>[5-9]</sup>。为此,笔者综合分析了国内外页岩油储层特征、改造技术特点,对比了储层特征和改造技术的差异,并针对我国陆相中高成熟度页岩油储层的特殊性提出了改造技术的发展建议。

## 1 北美海相页岩油改造技术现状

截至目前,北美海相页岩油开发最为成功,位于美国的二叠盆地、威利斯顿盆地和墨西哥湾盆地等3大盆地的页岩油储量占全美页岩油储量的90%以上,其中二叠盆地的沃尔夫坎普(Wolfcamp)组、威利斯顿盆地的巴肯(Bakken)组和墨西哥湾盆地的伊格尔福特(Eagle Ford)组是页岩油开发的主力层组<sup>[10-11]</sup>,它们分属不同盆地,储层有共同的特点,也有差异性,储层改造技术总体类似。

### 1.1 储层岩石与流体的特征

分析北美页岩油盆地主要储层岩石与流体的特征,可知:

1)储层大面积连续分布,厚度较大。属于海相沉积,滨浅海滩坝砂及浅海碳酸盐岩为有利储集体,储层分布较为稳定且范围大,厚度数十米至数百米,如二叠盆地沃尔夫坎普组的厚度为46.00~92.00 m。

2)岩性复杂。多种岩性层共同产油,页岩层并非主力产油层,如巴肯组岩性为黑色页岩、粉砂岩、云质砂岩、白云岩,伊格尔福特组岩性以碳酸盐岩为主,沃尔夫坎普组岩性为粉砂岩和泥质砂。

3)脆性矿物含量高,黏土矿物含量低。石英、白云石、方解石等脆性矿物的含量达70%~80%,黏土矿物仅3%~25%。

4)裂缝发育、密度大。储层为裂缝性-孔隙性储层,网状裂缝普遍发育,密度大。

5)岩石强度中等,破裂压力梯度较低。岩石杨氏模量14 000~42 000 MPa,泊松比0.20~0.27,破裂压力梯度0.016~0.017 MPa/m。

6)热成熟度较高,总有机碳(TOC)含量普遍较高。镜质组反射率( $R_o$ )为1.0%~1.7%,处于液态烃

大量生成阶段,属于中高成熟度页岩油,总有机碳含量多为3.0%~5.0%。

7)孔隙度高,含油饱和度高。储集层平均孔隙度一般为8%~10%,原油饱和度为50%~75%,储集性能好。

8)地层原油黏度低,流动性好。地层原油密度0.77~0.79 kg/L,黏度<1.0 mPa·s,在裂缝性储层中易于流动。

9)地层压力系数高,能量充足。油层多存在异常高压,压力系数1.3~1.8,溶解气油比一般为50~300 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,油藏弹性能量大。

北美海相页岩油储层岩石和流体的特征表明,其地质条件得天独厚,流体流动性好,驱动能量充足,不仅具有规模开发的地质条件,而且体积压裂形成缝网的工程条件优越<sup>[12-13]</sup>,这决定了北美页岩油开发技术和经济的可行性。

### 1.2 改造技术现状

2007年水平井分段压裂技术突破后,少段少簇压裂技术不断向多段多簇发展,技术体系逐步成熟配套。随着井距不断减小,不刻意追求缝长,近井地带最大化、精细化改造成为当前改造理念。“密切割+强加砂”簇间复杂缝网压裂技术逐渐成为页岩油主流改造技术,压裂段长和射孔簇间距越来越小,单井压裂段数和射孔簇数不断增加,射孔簇间距基本都不超过10.00 m,加砂强度达到4~5 t/m。段间与缝内双暂堵压裂技术和小井眼再造井筒重复压裂技术的应用使单井采出程度不断提高<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.1 井网井距与水平井段长度

北美页岩油纵向上厚度较大,常采用多井多层位立体布井模式,每个井场基本都会布多口水平井,井距100.00~300.00 m。

当纵向上2套储层垂距较大,并且其中一套储层压裂时裂缝不能扩展到另一套储层时,采取2套储层独立开发方式,井距200.00~300.00 m,水平段长度2 000.00~3 000.00 m。

当纵向上有2~3个厚度较大的储层,储层间垂距一般,且其中一套储层压裂时裂缝将扩展到另一套储层时,采用多套储层同一平台联合开发的方式,V形布井。如二叠盆地沃尔夫坎普组纵向上有上沃尔夫坎普(UW)和中沃尔夫坎普(MW)2套储层,厚度分别为107和76 m,上下两层的垂距为91.50 m,开采同一层相邻水平井的井距为198.00 m,开采不同层位相邻水平井的井距为99.00 m,井间的对角线距离为137.00 m,如图1所示。

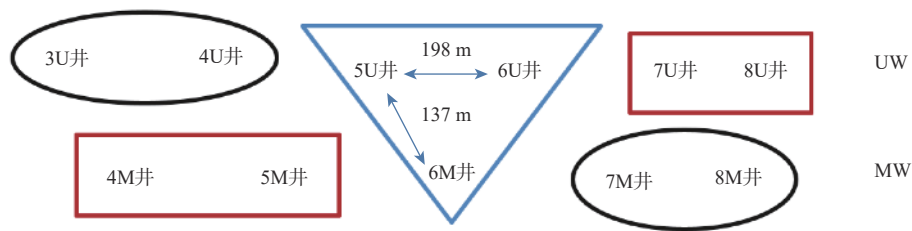


图 1 二叠盆地沃尔夫坎普组页岩油 V 形布井示意

Fig.1 V-shaped well spacing of shale oil reservoirs in the Wolfcamp Formation of the Permian Basin

### 1.2.2 储层改造技术特点

北美页岩油储层的改造理念是通过高效率、低成本的压裂形成复杂缝网,获得最大的改造体积。北美页岩油储层改造技术已成熟配套,并具有一体化、精细化与集约化等技术特色。

1)完井压裂一体化。一般而言,油田开发是地质上先考虑完井方式,完井后再选择分段压裂技术。北美页岩油开发则是考虑将完井和压裂一体化,在完井方式确定之前,预测裸眼滑套、套管泵送桥塞、水力喷射等不同压裂方式对产能的影响,分区域、分井组选择不同的压裂方式,包括裸眼多级滑套压裂、趾部裸眼多级滑套压裂与跟部套管完井泵送桥塞压裂相结合的混合压裂方式<sup>[15]</sup>。目的是工程与地质一体化,将压裂方式选择置于钻井之前,以最优的开发效果来指导设计钻井的穿行层位、井眼轨道、水平段长度和完井方式等。

2)压裂设计精细化。为发挥每一段每一个压裂位置的产油能力,实行了每个环节的精细化压裂设计,包括地质“甜点”和工程“甜点”(简称“双甜点”)、压裂级数与射孔簇数、压裂液组合与用量、支撑剂类型与砂液比以及施工排量等,基本实现了“一井一策,一段一案”。

a. “双甜点”的确定。将岩心分析结果、三维地震预测结果与产液剖面相结合,应用三维裂缝建模、Mangrove<sup>[16]</sup>等新一代裂缝建模技术重建地质模型,确定地质“甜点”;结合压裂施工压力与微地震裂缝监测结果,校准岩石力学性质,确定工程“甜点”(见图 2,图中红色区域为高应力区,白色区域为低应力区、“甜点”区)。

b. 压裂级数与射孔簇数的优化。将 EcoScope 和 TeleScope 等随钻测井解释结果与地应力分析结果结合,优化压裂级数和射孔簇数,使压裂段划分更细、射孔簇更多,改造体积大幅增大<sup>[17-19]</sup>。通过精细优化,压裂段间距缩短至 60.00 m,压裂段数 50~80 段,单段射孔 5~15 簇,簇间距小于 10.00 m。

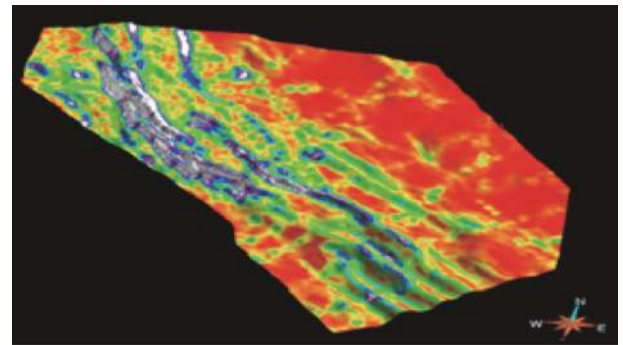


图 2 高低应力区及“甜点”区预测结果

Fig.2 Prediction results of high and low stress areas and sweet spot areas

c. 使用组合压裂液或一体化压裂液。为形成复杂裂缝网络和提高施工砂液比,采用“滑溜水+线性胶+胶液”的液体组合或变黏一体化压裂液,用液强度为 18.9~26.2 m<sup>3</sup>/m。

d. 支撑剂以石英砂为主,大幅度提高砂液比。为提高裂缝导流能力,支撑剂以 30/50 目和 20/40 目石英砂为主,加砂强度提高到 4.0~5.0 t/m,平均砂质量浓度 240~300 kg/m<sup>3</sup>,是页岩气井压裂作业的 4~6 倍。

e. 施工排量。页岩油储层压裂并不是一味追求高排量,而是依据储层的厚度、遮挡层的力学特性与裂缝垂向延伸特性,综合考虑携砂的需求和裂缝高度控制要求,确定压裂施工排量,施工排量多为 10.0~12.0 m<sup>3</sup>/min。

3)压裂施工作业集约化。针对 V 形布井,采用先压裂开发上部储层(UW)的水平井,后压裂开发下部储层(MW)水平井的作业方式。压裂施工采用 2 个压裂机组作业。第一压裂机组压裂 7U 井和 8U 井(图 1 中红色矩形),第二压裂机组压裂蓝色三角形中的 5U 井、6U 井和 6M 井;之后,第一机组再压裂下部的 7M 井和 8M 井;第二机组压裂 3U 井和 4U 井;最后,第二机组压裂 4M 井和 5M 井。先压裂开发上部储层井而后压裂开发下部储层井,优点是可以

增加上部储层的应力,将开发下部储层井的裂缝控制在下部储层中,防止压裂裂缝扩展到上部储层。

采用泵注能力高的压裂车组进行压裂施工,单套压裂车组的施工排量可达 $19\sim 29\text{ m}^3/\text{min}$ ,能满足2口井同时进行压裂施工。准备2套桥塞与射孔设备,当一个平台上的2口井进行压裂施工时,同时对其他2口井进行泵送桥塞和射孔作业,压裂效率可达13段/d,压裂效率高,成本低。

总之,北美海相页岩油压裂开发,并未全部沿用页岩气压裂技术思路,而是在其基础上进行了创新,具体表现在5方面:

1)完井压裂方式不同。页岩气井以套管完井为主,而页岩油井多种完井压裂方式并存。

2)分段与射孔簇数不同。与页岩气井相比,页岩油井分段更细,射孔簇数更多。

3)施工排量不同。页岩气井压裂以大排量为,而页岩油井压裂施工排量相对较低,且多采用变排量。

4)液体组合不同。页岩气井压裂液以滑溜水为主,页岩油井压裂液为“滑溜水+线性胶+冻胶”的组合液体或变黏一体化滑溜水,因高砂比压裂施工的需要,对压裂液的黏度和低伤害性能的要求更高。

5)支撑剂种类、粒径不同。页岩气井压裂支撑剂以100目、40/70目和30/50目陶粒为主,而页岩油井压裂支撑剂多使用30/50目和20/40目的石英砂,且综合施工砂液比较高。

## 2 国内陆相页岩油改造技术现状

我国陆相盆地发育多套泥页岩层,包括东部断陷盆地古近系、松辽盆地白垩系、鄂尔多斯盆地三叠系、准噶尔盆地二叠系、四川盆地侏罗系等,具有分布范围广、时代新、有机质丰度高、成熟度低等特点,资源量丰富。研究资料表明,我国中高成熟度页岩油( $R_o$ 大于1.0%)的资源量为 $(80\sim 100)\times 10^8\text{ t}$ <sup>[19]</sup>。目前,我国在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地等区域进行了页岩油勘探开发试验,取得了阶段性进展,因地质条件复杂,还存在诸多技术难题,需进一步攻关。

### 2.1 储层基本特征

归纳总结准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地等区域页岩油储层的特征,总体表现为“三低两高”,即有机质含量偏低、脆性低、压力系数低、

泥质含量高和原油黏度高。但各个区域又有各自的特点<sup>[20-25]</sup>,它们不同程度地影响着产能的释放和开发的经济性,具体表现为:

1)陆相沉积,储集层横向分布变化大,连续性偏差,厚度偏小。如泌阳凹陷的核桃园组和潜江凹陷的潜江组,储层有效厚度小于30.00 m。

2)岩性复杂。页岩油储层中存在泥页岩、粉细砂岩、灰质泥岩和泥灰岩、白云质页岩、介壳灰岩以及碳酸盐岩等。

3)泥质含量高,脆性低。如四川复兴地区页岩油储层泥质含量在50%以上,脆性指数在0.5以下。

4)热演化程度和有机质含量偏低。成熟度( $R_o$ )主体为0.75%~1.00%,有机质含量2%~3%。

5)原油密度和黏度偏高。地层原油密度多大于 $0.83\text{ kg/L}$ ,原油黏度多高于 $1.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

6)地层压力系数低,气油比小,驱动能量不足。压力系数一般小于1.2,气油比小于 $100\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,地层弹性能量不足,制约了油气流长期流动效果,影响单井累计产量。

7)部分区块页岩油井生产过程中存在结蜡、盐析出和凝析现象,会造成储层伤害。

### 2.2 改造技术现状

通过在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和四川盆地的研究和试验,目前我国初步形成了细分切割分段压裂技术以及配套的材料与工具,水平段长度 $1\ 000.00\sim 3\ 000.00\text{ m}$ ,其压裂理念是通过密切割压裂形成复杂的裂缝网络系统,但各个区块储层的特征不同<sup>[26-29]</sup>,改造技术的主要特点有:

1)水平段相对短,压裂段数相对少。水平段长度多集中在 $1\ 000.00\sim 2\ 000.00\text{ m}$ ,压裂段数以20~25段为主,少数井达到30段以上。

2)簇间距变化大。簇间距 $5.00\sim 20.00\text{ m}$ ,单段射孔3~6簇。部分区块水平井簇间距达到 $5.00\sim 10.00\text{ m}$ ,段内射孔5~6簇。

3)压裂液组合不同。部分区块使用滑溜水压裂,有的区块使用“滑溜水+冻胶”压裂,用液强度约 $25.0\text{ m}^3/\text{m}$ 。

4)支撑剂组合和加砂强度不同。有些区块的支撑剂为70/140目石英砂+40/70目陶粒+20/40目陶粒,而有些区块的支撑剂为70/140目+40/70目+20/40目的石英砂。加砂强度普遍较高,为 $3.4\sim 5.5\text{ t/m}$ ,如长庆油田陇东地区单段加砂量达到 $150\sim 220\text{ m}^3$ 。

5)压前蓄能或进行预处理。在部分低压区块,

压裂前对压裂井进行注水蓄能,以增加地层能量,提高压裂后的稳产效果。有的区块压裂前注入 CO<sub>2</sub>,以发挥其增能、降黏及萃取原油的作用,提高产量。

### 3 国内外页岩油储层改造技术的差异

对比分析国内外页岩油储层改造技术发现,改造理念基本相同,改造技术大同小异,均为密切割强加砂分段压裂技术,仅在以下技术指标存在差异:

1) 水平段长度。国外水平段长,压裂段数多。目前国外水平段长 2 000.00~6 000.00 m,压裂段数 50~80 段;国内水平段长 1 000.00~2 000.00 m,压裂段数 20~30 段。

2) 射孔簇数。国外射孔簇数多在 5~15 簇,国内射孔簇数多在 3~6 簇。

3) 压裂液。国外采用变黏一体化压裂液,国内采用组合压裂液,用液强度略高于国外。

4) 支撑剂。国外支撑剂以石英砂为主,国内采用“石英砂+陶粒”组合支撑剂,加砂强度部分区块略高于国外。

## 4 技术启示与发展建议

### 4.1 国内外页岩油储层改造技术启示

综合分析国外海相页岩油和国内陆相页岩油的储层条件、改造技术特点,可以得到以下启示:

1) 国内陆相页岩油地质条件与北美海相页岩油不具可比性。因此,要发展适合我国陆相页岩油储层特征和流体条件的增产改造技术体系。

2) 工程与地质一体化。我国陆相页岩油储层条件更复杂,压裂裂缝扩展的复杂性远超我们的认知程度,进行工程与地质一体化,需加强基础理论研究。

3) 单井累计采出量低和综合开发成本高是制约国内陆相页岩油经济开发的主要障碍,美国页岩油 3 大盆地单井累计产量可达到  $3.0 \times 10^4$  t 以上,而在原油价格为 55 美元/桶条件下,开发鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段、准噶尔盆地二叠系芦苇沟组和渤海湾盆地沙河街组的页岩油,单井累计产量要达到  $(1.4 \sim 4.2) \times 10^4$  t 才能达到盈亏平衡<sup>[5]</sup>,经济开发难度很大。欲经济开发陆相页岩油,须提高初期产量、降低产量递减率和开发成本。

4) 产量递减快是陆相页岩油最典型特征之一,但递减的机制有待分类查明。地层压力、流体性质

等储层条件,压裂液伤害、裂缝复杂性等裂缝特性,以及盐析出与凝析、反凝析等排采问题,均是造成产量递减的因素。因此,要弄清主控因素,为采取措施提供依据。

### 4.2 国内储层改造技术发展建议

大规模开发陆相页岩油是我国油气资源战略接替的重要途径,而国内陆相页岩油地质条件非常复杂,稳产难度大、单井累计采出量低和综合开发成本高等问题十分突出,大规模效益开发还面临着诸多挑战<sup>[30]</sup>,除地质上要进一步寻找中高成熟度页岩油高产富集区带<sup>[31]</sup>,确立“双甜点”<sup>[32-33]</sup>标准外,还要进行钻井、压裂与完井等方面的技术攻关,形成具有自主知识产权的陆相页岩油开发技术。为此,陆相页岩油在压裂方面要重点解决裂缝纵向上的穿透性、横向上的复杂性以及原油长期流动性等问题<sup>[34]</sup>,延长稳产期和提高累计产油量,同时大幅降低开发成本,形成压-驱-采一体化技术体系,建议持续进行以下技术攻关。

1) 强化陆相页岩油相关基础理论及机理研究。国内陆相页岩油分布在不同盆地的不同区块,其有机地化特征、岩性、矿物组分、黏土含量、原油流动特性、压力系统等各不相同,裂缝纵向扩展机理、复杂裂缝形成机制及储层伤害机理不清,产量递减主控因素不明。因此,要分区块研究清楚裂缝纵向扩展机理、复杂裂缝形成机制以及控制原油长期流动性的机理等,为压裂施工参数优化设计、压裂液体系选择和排采工作制度制定提供理论依据。

2) 开展工程与地质一体化研究。要综合利用地震、测井、录井、随钻测量等资料信息,研究复杂岩性储层“双甜点”精细识别技术,并依据不同区块储层成藏组合结构特征、水平井层理与页理发育特征和储层非均质性,提前预测压裂裂缝控制范围,研究水平井井网、井距、长度、穿行层位、井眼轨迹、完井方式、段簇间距等,流程化电驱动压裂泵拉链式压裂施工作业,控制成本并使压裂效果最优。

3) 进行多岩性界面储层穿层及复杂缝压裂技术攻关。充分动用纵向的页岩油和充分连通横向的孔隙是页岩油获得高产与稳产的有效途径,但因各岩性界面特性各异,穿层压裂难度大,要研究各个岩性层和岩性界面的岩石力学特性、地应力特性、断裂韧性等,探寻突破各个岩性界面的技术方法,优化压裂规模,尽可能实现穿层压裂,纵向上改造储层,增大供油高度。研究不同岩性条带复杂缝控制技术,连通储层横向上的孔隙。同时,需要攻关再

造井筒重复压裂技术,做好技术储备。

4)研究多功能压裂液与压力敏感型智能支撑剂。对于黏土含量高、原油黏度高、压力系数低的陆相页岩油,压裂液应同时具备增能、降黏、驱油和低伤害等多种功能。因此,要研发长效防膨纳米驱油复合滑溜水、高携砂 CO<sub>2</sub> 压裂液体系以及变黏、酸性滑溜水等压裂液体系,提高压裂液与地层岩石及原油的配伍性。研制应力敏感型智能支撑剂,使裂缝具有长期高导流能力。

5)进行排采技术研究。排采技术对陆相页岩油的稳产非常重要。加强陆相页岩油储层孔隙与裂缝中的渗流特征研究,研究 CO<sub>2</sub> 注入时机、方式与注入量,探索页岩油水平井对 CO<sub>2</sub> 注采技术的适应性,优化排采工作制度,降低凝析、结蜡、盐析出等伤害,以维持原油的长期流动性。

## 5 结束语

北美海相页岩油已得到规模有效开发,形成了成熟的储层改造技术。我国陆相页岩油储层与流体特征更为复杂,储层改造技术取得了阶段性进展,推动了页岩油试验区和示范区的建立,但页岩油大规模商业开发还面临巨大挑战,需要地质与工程的共同努力,持续寻找高产富集区,持续开展工程与地质一体化攻关,强化复杂缝形成机理及控制方法、多岩性界面穿层压裂技术、多功能压裂液体系、压力敏感型支撑剂、差异化排采与 CO<sub>2</sub> 注采技术等研究,形成压-驱-采一体化技术,进一步降本增效,推动陆相页岩油早日实现规模化商业开发。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 金之钧,白振瑞,高波,等.中国迎来页岩油气革命了吗[J].*石油与天然气地质*,2019,40(3):451-458.  
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 451-458.
- [2] 周庆凡,金之钧,杨国丰,等.美国页岩油勘探开发现状与前景展望[J].*石油与天然气地质*,2019,40(3):469-477.  
ZHOU Qingfan, JIN Zhijun, YANG Guofeng, et al. Shale oil exploration and production in the U. S. : status and outlook[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 469-477.
- [3] 杨雷,金之钧.全球页岩油发展及展望[J].*中国石油勘探*,2019,24(5):553-559.  
YANG Lei, JIN Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 553-559.
- [4] 王敏生,光新军,耿黎东.页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J].*石油钻探技术*,2019,47(5):1-10.  
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 1-10.
- [5] 赵文智,胡素云,侯连华,等.中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J].*石油勘探与开发*,2020,47(1):1-10.  
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 1-10.
- [6] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].*石油学报*,2020,41(1):1-12.  
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 1-12.
- [7] 章敬.非常规油藏地质工程一体化效益开发实践:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例[J].*断块油气田*,2021,28(2):151-155.  
ZHANG Jing. Effective development practices of geology-engineering integration on unconventional oil reservoirs: taking Lucaogou Formation shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin for example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(2): 151-155.
- [8] 席传明,史玉才,张楠,等.吉木萨尔页岩油水平井JHW00421井钻完井关键技术[J].*石油钻采工艺*,2020,42(6):673-678.  
XI Chuanming, SHI Yucui, ZHANG Nan, et al. Key technologies for the drilling and completion of shale oil horizontal well JHW00421 in Jimusaer[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(6): 673-678.
- [9] OZKAN E, BROWN M, RAGHAVAN R, et al. Comparison of fractured-horizontal-well performance in tight sand and shale reservoirs[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2011, 14(2): 248-259.
- [10] 柳伟荣,倪华峰,王学枫,等.长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术[J].*石油钻探技术*,2020,48(1):9-14.  
LIU Weirong, NI Huafeng, WANG Xuefeng, et al. Shale oil horizontal drilling technology with super-long horizontal laterals in the Longdong Region of the Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 9-14.
- [11] 李志明,芮晓庆,黎茂稳,等.北美典型混合页岩油系统特征及其启示[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2015,45(4):1060-1072.  
LI Zhiming, RUI Xiaoqing, LI Maowen, et al. Characteristics of typical hybrid shale-oil system in North America and its implications[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015, 45(4): 1060-1072.
- [12] 姜杉钰,王金,孙乃达.美国页岩油上游产业发展进程和经验启示[J].*中国矿业*,2020,29(8):42-46.  
JIANG Shayu, WANG Jin, SUN Naida. Shale oil upstream industry development process in USA and its enlightenments[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(8): 42-46.
- [13] CHONG K K, GRIESER W V, PASSMAN A, et al. A completions guide book to shale-play development: a review successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades[R]. *SPE 133874*, 2010.
- [14] 唐玮,梁坤,冯金德,等.低油价下美国页岩油困境对我国油田勘

- 探开发的启示 [J]. *石油科技论坛*, 2020, 39(4): 26–30.
- TANG Wei, LIANG Kun, FENG Jinde, et al. Enlightenment from dilemma of us shale oil development under low oil prices[J]. *Oil Forum*, 2020, 39(4): 26–30.
- [ 15 ] MILLER B A, PANEITZ J M, MULLEN M J, et al. The successful application of a compartmental completion technique used to isolate multiple hydraulic-fracture treatments in horizontal Bakken shale wells in north Dakota[R]. SPE 1164469, 2008.
- [ 16 ] STEGENT N A, WANGNER A L, MULLEN J, et al. Engineering a successful fracture-stimulation treatment in the Eagle Ford shale[R]. SPE 136183, 2010.
- [ 17 ] CRAFTON J W, HERNDON D, KAUL T. High performance ceramics in the Bakken[R]. SPE 169567, 2014.
- [ 18 ] SAPUTELLI L, LOPEZ C, CHACON A, et al. Design optimization of horizontal wells with multiple hydraulic fractures in the Bakken shale[R]. SPE 167770, 2020.
- [ 19 ] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 560–568.
- DU Jinhu, HU Suyun, PANG Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 560–568.
- [ 20 ] 许琳, 常秋生, 杨成克, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层特征及含油性 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 535–549.
- XU Lin, CHANG Qiusheng, YANG Chengke, et al. Characteristics and oil-bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 535–549.
- [ 21 ] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准葛尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 524–534.
- ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 524–534.
- [ 22 ] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组 7 段 3 亚段页岩油勘探前景探讨 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 558–570.
- LI Zhiming, TAO Guoliang, LI Maowen, et al. Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3<sup>rd</sup> sub-member of the Triassic Chang 7 Member in Binchang Block, southwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 558–570.
- [ 23 ] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳拗陷古近系陆相页岩油产量的影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 463–471.
- SONG Guoqi, XU Xingyou, LI Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 463–471.
- [ 24 ] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 225–235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 225–235.
- [ 25 ] 郝运轻, 宋国奇, 周广清, 等. 济阳拗陷古近系泥页岩岩石学特征对可压性的影响 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 489–495.
- HAO Yunqing, SONG Guoqi, ZHOU Guangqing, et al. Influence of petrological characteristics on fracability of the Paleogene shale, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(4): 489–495.
- [ 26 ] 慕立俊, 赵振峰, 李宪文, 等. 鄂尔多斯盆地页岩油水平井细分割体积压裂技术 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 626–635.
- MU Lijun, ZHAO Zhenfeng, LI Xianwen, et al. Fracturing technology of stimulated reservoir volume with subdivision cutting for shale oil horizontal wells in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 626–635.
- [ 27 ] 刘合, 匡立春, 李国欣, 等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议 [J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 489–496.
- LIU Ge, KUANG Lichun, LI Guoxin, et al. Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 489–496.
- [ 28 ] 苏建政, 李凤霞, 周彤. 页岩储层超临界二氧化碳压裂裂缝形态研究 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 616–625.
- SU Jianzheng, LI Fengxia, ZHOU Tong. Hydraulic fracture propagation behaviour and geometry under supercritical CO<sub>2</sub> fracturing in shale reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 616–625.
- [ 29 ] 张映红, 路保平, 陈作, 等. 中国陆相致密油开采技术发展策略思考 [J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(1): 1–6.
- ZHANG Yinghong, LU Baoping, CHEN Zuo, et al. Technical strategy thinking for developing continental tight oil in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 1–6.
- [ 30 ] 闫林, 陈福利, 王志平, 等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 63–69.
- YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 63–69.
- [ 31 ] 李浩, 陆建林, 王保华, 等. 陆相页岩油富集高产关键因素分析 [J]. *现代地质*, 2020, 34(4): 837–848.
- LI Hao, LU Jianlin, WANG Baohua, et al. Critical controlling factors of enrichment and high-yield of land shale oil[J]. *Geoscience*, 2020, 34(4): 837–848.
- [ 32 ] 刘喜武, 刘宇巍, 刘志远, 等. 陆相页岩油甜点地球物理表征研究进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 504–511.
- LIU Xiwu, LIU Yuwei, LIU Zhiyuan, et al. Progresses in geophysical characterization of continental shale oil sweet spots[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 504–511.
- [ 33 ] 董岩, 徐东升, 钱根葆, 等. 吉木萨尔页岩油“甜点”预测方法 [J]. *特种油气藏*, 2020, 27(3): 54–59.
- DONG Yan, XU Dongsheng, QIAN Genbao. Shale oil “sweet-spot” prediction in Jimusaer Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(3): 54–59.
- [ 34 ] 董民哲, 李亚军, 桑茜, 等. 页岩油流动的储层条件和机理 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 636–644.
- DONG Minzhe, LI Yajun, SANG Qian, et al. Reservoir conditions and mechanism of shale flow[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 636–644.