

文章编号: 0253-2697(2024)04-0672-11 DOI:10.7623/syxb202404005

中国东部陆相断陷盆地中—低成熟度页岩油立体开发技术 ——以济阳坳陷古近系沙河街组为例

杨勇^{1,2} 张世明^{2,3} 吕琦^{2,3} 杜玉山^{2,3} 李伟忠^{2,3} 程紫燕^{2,3} 吕晶^{2,3} 刘祖鹏^{2,3}

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 山东东营 257000; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室 北京 102206;
3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257000)

摘要: 济阳坳陷是中国东部陆相断陷盆地的典型代表,新生界古近系沙河街组沉积一套巨厚的中—低成熟度页岩,能否有效开发生用其页岩油对于认识同类型页岩油潜力意义重大。通过50余口取心井系统的岩相、储集性及含油性研究与评价,对比国内外不同盆地页岩油特征差异发现,济阳页岩油成化湖盆碳酸盐含量高,断陷盆地发育不同尺度裂缝,演化程度低导致储集空间以无机孔—缝为主,储集物性好但原油流动能力差。依据济阳页岩油地质特点,提出了以甜点立体综合评价、立体井网优化设计、立体压裂优化设计、全过程实施优化调控为核心的立体开发技术,建立了整体压裂同步投产、分批压裂逐步投产、立体滚动开发3种立体开发模式,矿场先导试验取得了突破,证实了中—低成熟度页岩油具有广阔的开发潜力。

关键词: 中—低成熟度;页岩油;立体开发;济阳坳陷;陆相断陷盆地

中图分类号: TE349

文献标识码: A

Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in eastern China: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression

Yang Yong^{1,2} Zhang Shiming^{2,3} Lü Qi^{2,3} Du Yushan^{2,3} Li Weizhong^{2,3}
Cheng Ziyang^{2,3} Lü Jing^{2,3} Liu Zupeng^{2,3}

(1. Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China)

Abstract: Jiyang depression is a typical continental faulted basin in eastern China, of which the Cenozoic Paleogene Shahejie Formation deposited a thick set of shale with low-medium maturity. Whether the shale oil can be effectively produced is crucial for understanding the potential of similar types of shale oil. The paper systematically studies and evaluates the lithologies, reservoir capabilities, and oil-bearing properties of more than 50 cored wells, and compares the differences in shale oil characteristics between different basins. The results indicate that the saline lacustrine basin of shale oil in Jiyang depression has a high carbonate content; various scales of fractures are developed in faulted basins; the reservoir space is dominated by inorganic pores and fractures due to a low degree of thermal evolution; the reservoir properties are good, and the flow capacity of crude oil is poor. Based on the geological characteristics of shale oil in Jiyang depression, this paper proposes a stereoscopic development technology focusing on the comprehensive stereoscopic evaluation of sweet spots, stereoscopic well pattern optimization design, stereoscopic fracturing optimization design, as well as the whole process optimization and control. Moreover, three stereoscopic development models have been established, including synchronous production of integral fracturing, step-by-step production by fracturing in batches, and stereoscopic scrolling development. Breakthroughs have been achieved in the pilot test of the field, confirming the broad development potential of shale oil with low-medium maturity.

Key words: low-medium maturity; shale oil; stereoscopic development; Jiyang depression; continental faulted basin

引用: 杨勇,张世明,吕琦,杜玉山,李伟忠,程紫燕,吕晶,刘祖鹏. 中国东部陆相断陷盆地中—低成熟度页岩油立体开发技术——以济阳坳陷古近系沙河街组为例[J]. 石油学报, 2024, 45(4): 672-682, 697.

Cite: YANG Yong, ZHANG Shiming, LÜ Qi, DU Yushan, LI Weizhong, CHENG Ziyang, LÜ Jing, LIU Zupeng. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in eastern China: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(4): 672-682, 697.

基金项目: 中国石油化工股份有限公司重点科技攻关项目“东营凹陷页岩油立体开发优化设计关键技术”(P23026)资助。

第一作者及通信作者: 杨勇,男,1971年2月生,2010年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司副总经理,主要从事油气田开发研究及管理工作。Email: yangyong. slyt@sinopec.com

美国页岩油历经 60 余年持续不断的攻关探索,依靠水平井高效钻井、体积改造技术的突破及大规模推广应用,先后建成 Barnett、Marcellus、Utica、Permian、Eagle Ford、Bakken 等页岩油气生产区。2022 年美国页岩油产量达到 4.0×10^8 t,占美国石油产量的 2/3,是世界上页岩油开发最成功的国家之一^[1-2]。

中国页岩油资源量为 $(800 \sim 1\,000) \times 10^8$ t^[3],主要分布在渤海湾、鄂尔多斯、松辽、准噶尔四大盆地,均为陆相沉积。与北美地区海相页岩油气相比,中国陆相页岩油具有非均质性强、热演化程度和地层能量差异大、单井产能变化快的特点^[4-8]。鄂尔多斯盆地延长组 7 段页岩形成时期,湖盆属于拗陷型淡水盆地,富有机质页岩夹持的薄层粉—细砂岩是页岩油富集的甜点段, R_o 为 0.8%~1.2%^[9]。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩受咸水环境影响,以砂质、白云质混积页岩为主, R_o 为 0.8%~1.1%^[10]。松辽盆地青山口组一段页岩形成于拗陷型微咸水环境,黏土矿物含量高、页理发育, R_o 为 0.8%~1.3%^[11-13]。与上述国内外盆地相比,济阳拗陷作为中国东部典型陆相断陷盆地单元,其古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)—沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)蕴藏着丰富的 R_o 为 0.6%~1.2% 的中—低成熟度页岩油^[14],初步估算资源量超 100×10^8 t,其中 $R_o < 0.9\%$ 的储量占总储量 60% 以上,国内外没有同类型页岩油大规模开发的先例。

北美地区页岩油开发取得突破后,胜利油田加大

了页岩油的探索与评价,2019 年 F159 井取得突破,牛庄、博兴地区等多口评价井实现了高产。随后,不同洼陷开展页岩油整体评价,累计取心超 13 000 m,进行约 13×10^4 块次的室内实验,突破 R_o 达到 0.9% 是页岩油勘探下限、中—低成熟度页岩油可动性差的认识。咸化—半咸化环境页岩富含灰质、无机孔—缝网络发育、地层压力高、渗透性好,决定了济阳页岩油具有较好的可动性,通过组合缝网压裂改造大幅提升人工裂缝控储体积,可以实现中—低成熟度页岩油的高产稳产。基于上述认识和实践,攻关形成了陆相页岩油立体开发技术。

1 济阳页岩油勘探开发简况

1.1 勘探开发历程

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部,隶属于渤海湾盆地的一个次级构造单元,东部为垦东—青坨子凸起,西部和北部为埕宁隆起,南部为鲁西隆起,发育东营、沾化、惠民和车镇 4 个凹陷(图 1),勘探面积约为 2.62×10^4 km²,是典型的陆相断陷盆地^[15],盆内常规油气资源十分丰富,资源量为 100×10^8 t 以上。

济阳拗陷页岩油先后经历了勘探偶遇、主动探索、创新突破、评价建产 4 个阶段^[16-17]:①1972 年,胜利油田多口井钻探过程中偶遇页岩油,其中 6 口探井累积产油量过万吨,展现出巨大的资源潜力。②2006 年,在学习北美地区页岩油开发经验基础上,部署了 4 口系统取心井,开展了上万块的样品系统测试分析,为推

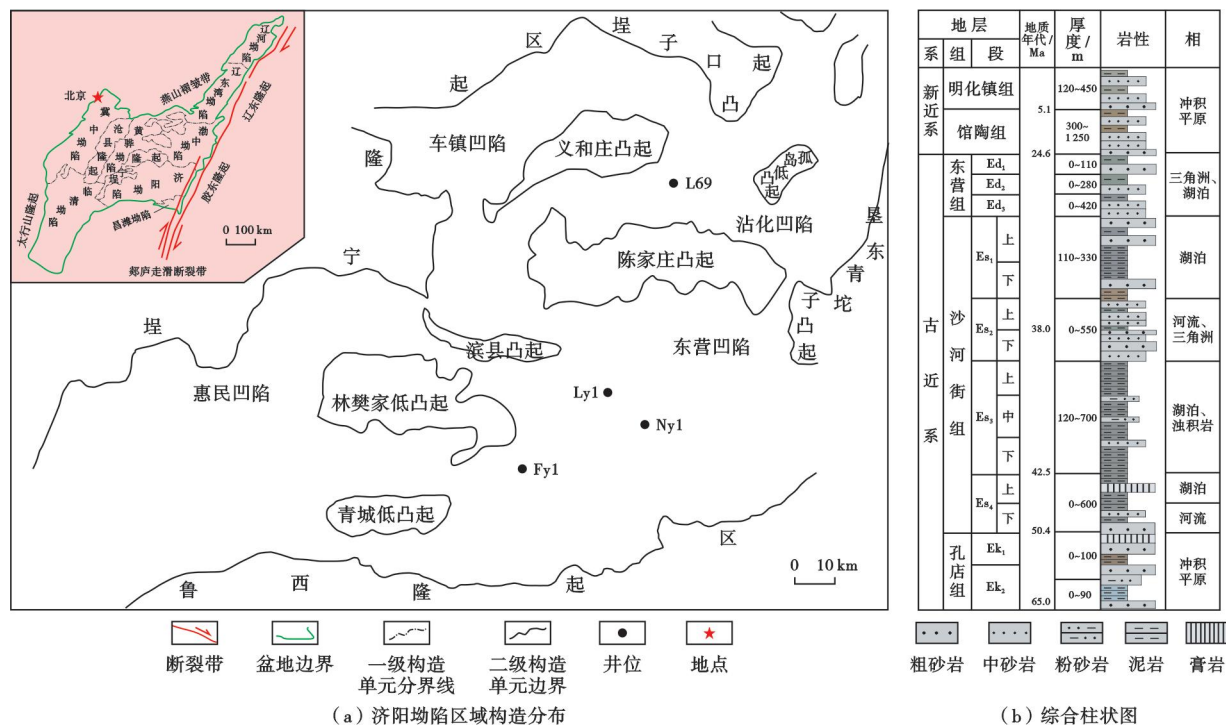


图 1 济阳拗陷构造位置及综合柱状图
Fig. 1 Regional structure and comprehensive stratigraphic column of Jiyang depression

动后续页岩油勘探开发进程奠定基础。③自2019年起,胜利页岩油探索方向由裂缝型转向基质型、由 $R_o > 0.9\%$ 转向 $R_o < 0.9\%$,在牛庄、博兴、渤南等洼陷设计多口专探井,FYP1井、YYP1井、BYP5井等均获得成功。④自2021年开始,在博兴、牛庄、民丰等洼陷开展立体开发先导实验,产量实现跨越式增长,标志着济阳页岩油逐渐进入评价建产阶段。

1.2 开发简况

2021年4月,在博兴洼陷开展3层楼9口井的页岩油开发先导试验,建成了中国石油化工股份有限公司首个 10×10^4 t级井组。2023年以来,在牛庄洼陷牛页一区完成了5层楼20口井的大平台立体开发试验井组的压裂,在民丰洼陷中带正在实施5个平台39口井。截至2023年12月,博兴、牛庄、民丰、渤南、利津5个洼陷共投产水平井69口,开井66口,产油量由2021年的100 t/d上升至1400 t/d以上,产量实现跨越式发展。民丰洼陷FEY1-1HF井峰值产油量为262.8 t/d,创中国页岩油井峰值日产油量纪录,106 d累积产油量超 1×10^4 t。2023年12月,以3 mm油嘴自喷生产,油压为19.7 MPa,产油量为34.4 t/d,含水率为18.0%,698 d累积产油量为 3.6×10^4 t。FEY1HF井峰值

产油量为229.5 t/d,80 d累积产油量过万吨。2023年12月,以3.5 mm油嘴自喷生产,油压为17.2 MPa,产油量为43.2 t/d,含水率为21.9%,545 d累积产油量为 4.0×10^4 t,展现出良好的开发前景。

2 济阳页岩油地质特点

济阳坳陷为典型的陆相断陷盆地,页岩油主要富集在古近系沙四上亚段和沙三下亚段,现今埋藏深度主要在3000~5500 m,地层厚度主要为300~500 m、洼陷中心局部厚度可达1500 m。热演化程度低, R_o 主要为0.6%~1.2%,原油密度为0.82~0.89 g/cm³,具有埋藏深、成熟度低、原油密度大等地质特征^[18-20]。

2.1 岩相特征

济阳坳陷沙三下亚段—沙四上亚段页岩形成于“咸水、断陷、多洼”的陆相断陷盆地中,“咸水”决定了高碳酸盐矿物含量的矿物组成,“断陷、多洼”决定了盆地不同洼陷、同一洼陷不同部位页岩的岩相差异。通过岩心、岩石薄片、扫描电镜等多尺度资料观察描述和X射线衍射矿物含量定量分析,共划分出6种主要岩相(图2)。不同洼陷岩相特征差异大,如博兴洼陷为

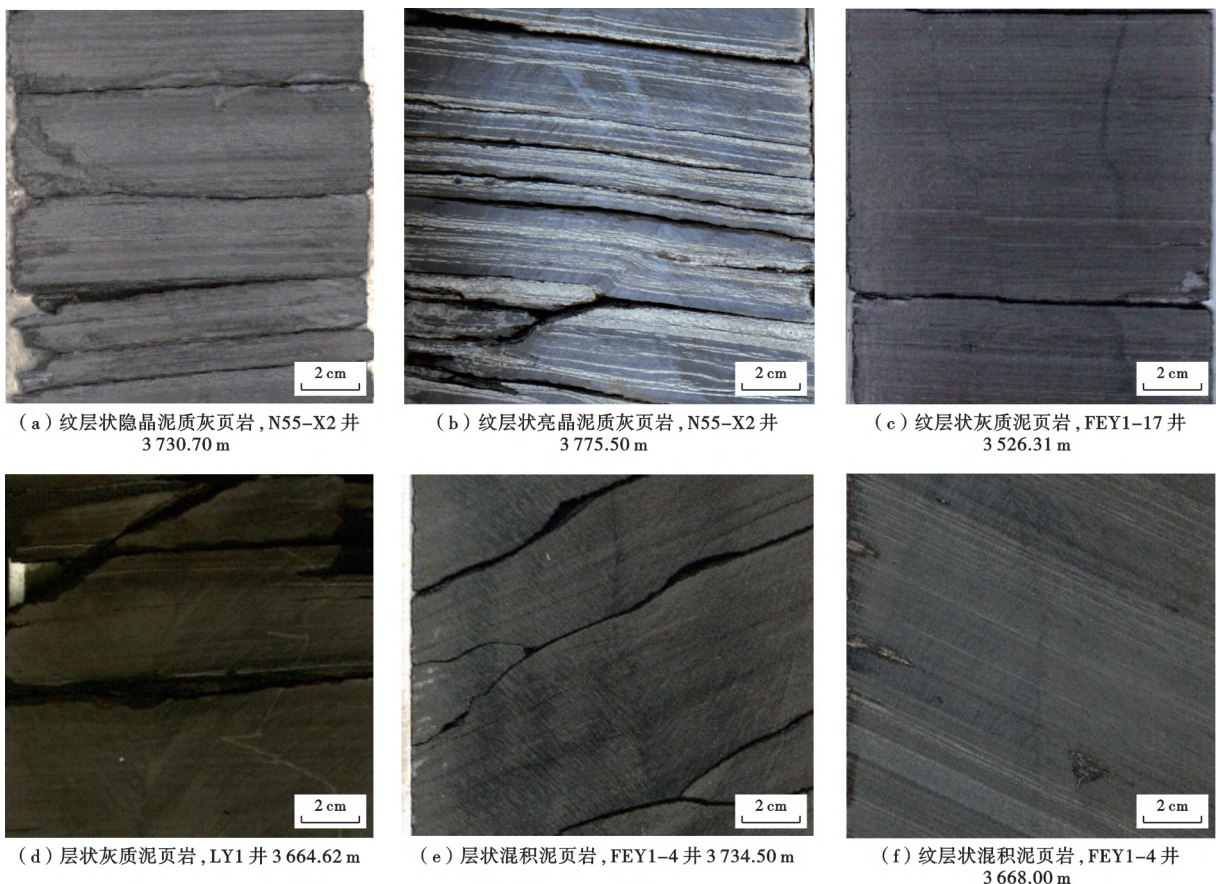


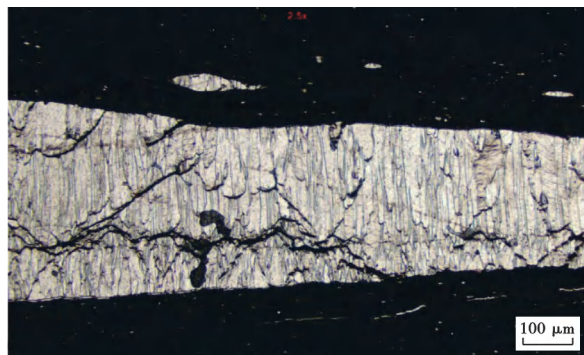
图2 济阳坳陷沙三下亚段—沙四上亚段页岩典型岩相类型

Fig. 2 Typical lithofacies types of shale in the lower sub-member of Member 3 and the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Jiyang depression

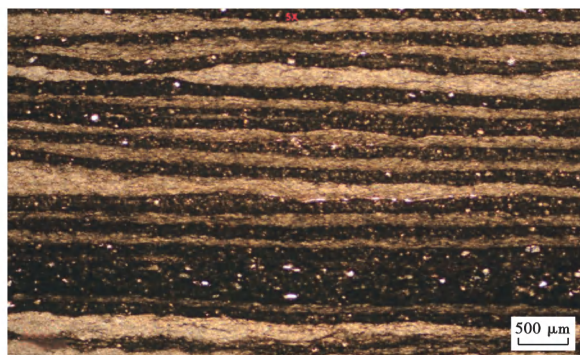
富灰型页岩,碳酸盐矿物含量高、平均超过 50%,以纹层状隐晶泥质灰页岩、纹层状亮晶泥质灰页岩、纹层状/层状灰质泥页岩为主。民丰洼陷靠近物源区,页岩岩相混积现象显著、无优势矿物类型,以纹层状隐晶泥质灰页岩、纹层状/层状混积泥页岩为主。

纹层结构是页岩矿物组成、颗粒结构差异的微观表现。济阳拗陷沙四上亚段—沙三下亚段页岩主要发育 4 种纹层结构(图 3)。季节性干湿气候交替环境下形成隐晶灰质—泥质纹层结构,其中,隐晶灰质纹层平

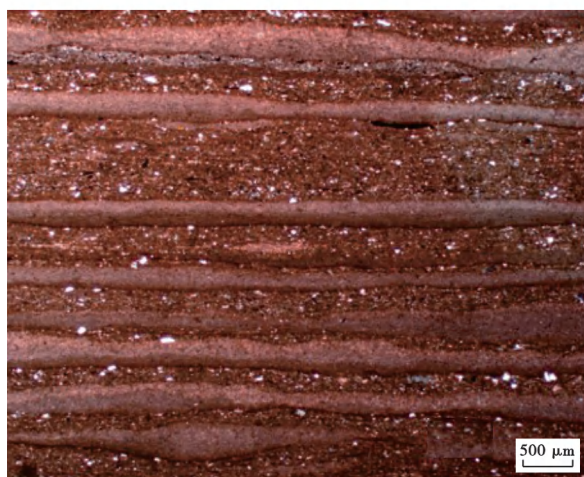
均厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 、泥质纹层平均厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 。成岩阶段经方解石重结晶作用改造形成隐晶/亮晶灰质—泥质纹层结构,亮晶灰质纹层厚度变化大、纹层厚度与晶粒粒径呈正相关。在沉积期强烈陆源输入和成岩期蒙脱石伊利石化的接续作用下形成含粉砂泥质—隐晶灰质纹层结构,泥质纹层厚度大、平均为 $500\ \mu\text{m}$,隐晶灰质纹层厚度薄、连续性差。相对稳定的气候背景和相对动荡的水动力条件形成层状结构,矿物成层性差、呈弱定向性。



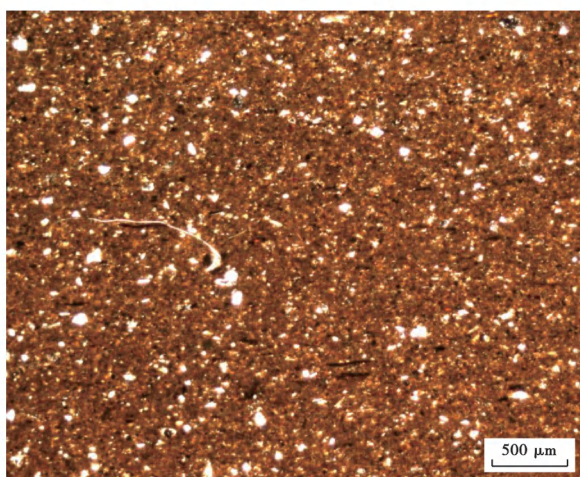
(a) 亮晶灰质—泥质纹层结构, N55-X2 井 3 504.43 m



(b) 隐晶灰质—泥质纹层结构, N55-X2 井 3 746.90 m



(c) 含粉砂泥质—隐晶灰质纹层结构, FEY1-4 井 3 641.20 m



(d) 层状结构, FEY1-12 井 3 230.80 m

图 3 济阳拗陷沙三下亚段—沙四上亚段页岩典型微观组构

Fig. 3 Typical microscopic fabric of shale in the lower sub-member of Member 3 and the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Jiyang depression

2.2 储集特征

2.2.1 微观孔隙特征

受咸化湖盆物质基础和中和—低成熟度热演化阶段影响,与海相页岩气储层相比,济阳页岩油储层以微米—纳米级无机孔为主、占比高达 95%。不同类型纹层的孔隙类型差异明显[图 4(a)—图 4(d)],隐晶灰质纹层以隐晶方解石晶间孔、溶蚀孔为主,亮晶灰质纹层以亮晶方解石晶间孔/缝为主,泥质纹层则以粒间孔、粒缘缝、黄铁矿晶间孔为主。

2.2.2 裂缝特征

济阳拗陷沙三下亚段—沙四上亚段页岩发育多尺

度裂缝[图 4(e)—图 4(g)],可分为构造裂缝和非构造裂缝。多期次断陷活动有利于构造裂缝发育,岩心可见厘米—米级高角度构造缝,裂缝多未充填,能够显著提升地层的渗流能力。非构造裂缝包括超压缝和层理缝。厘米级超压缝常发育在泥质含量较高的岩相中,呈蛇曲状高角度斜交于纹层界面,缝面多充填泥质或沥青质,具有一定的垂向渗流能力。毫米—微米级层理缝多见于具有不同矿物组成、有机质含量、岩石力学特征的纹层间,呈断续或连续状,是济阳页岩油主要的水平渗流通道。

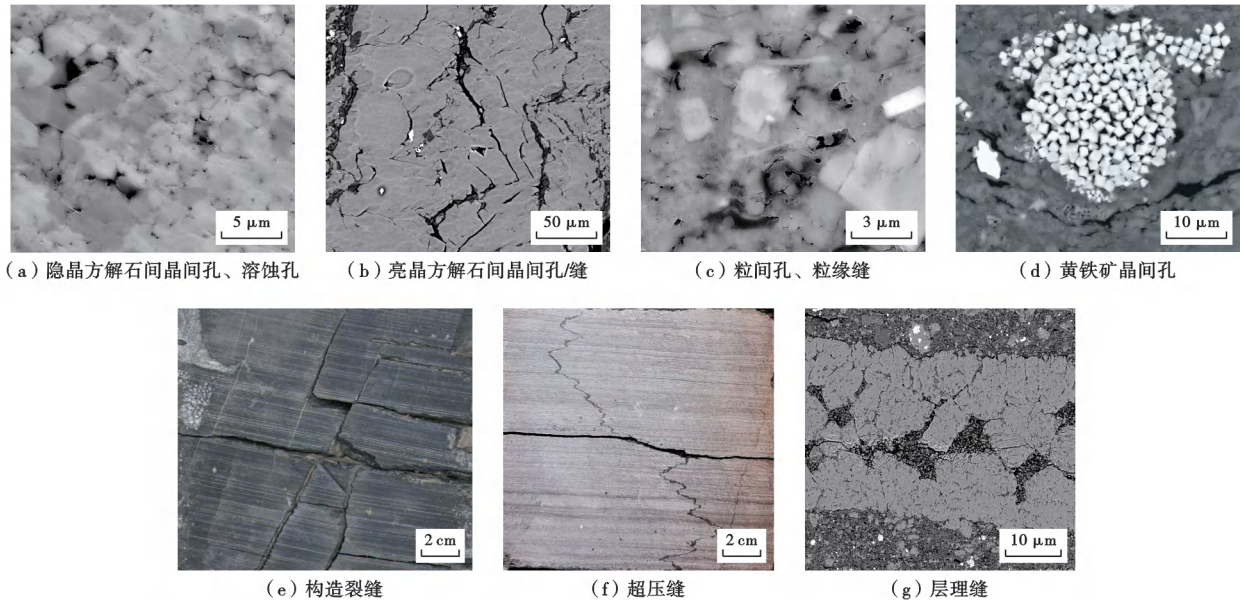


图4 济阳页岩油微观孔隙—裂缝特征

Fig. 4 Microscopic pore-fracture characteristics of shale in Jiyang depression

2.2.3 储层物性特征

济阳坳陷沙四上亚段—沙三下亚段页岩具有明显的“大孔优势”，即连通孔隙以介孔和宏孔为主，且微裂缝发育。主要岩相的储集性能具有“亮晶优于隐晶，纹层优于层状”的特征，纹层状亮晶泥质灰页岩和隐晶泥质灰页岩的物性最优。纹层状亮晶泥质灰页岩孔隙度主要为8%~15%，连通孔隙以介孔—宏孔为主、占比可达40%，层理缝发育，水平渗透率高、主要为0.5~10.0 mD；纹层状隐晶泥质灰页岩孔隙度变化范围大、主要为6%~12%，连通孔隙以介孔为主、占比为20%~30%，水平渗透率普遍<1 mD、主要为0.01~0.50 mD。

2.2.4 孔-缝组合特征

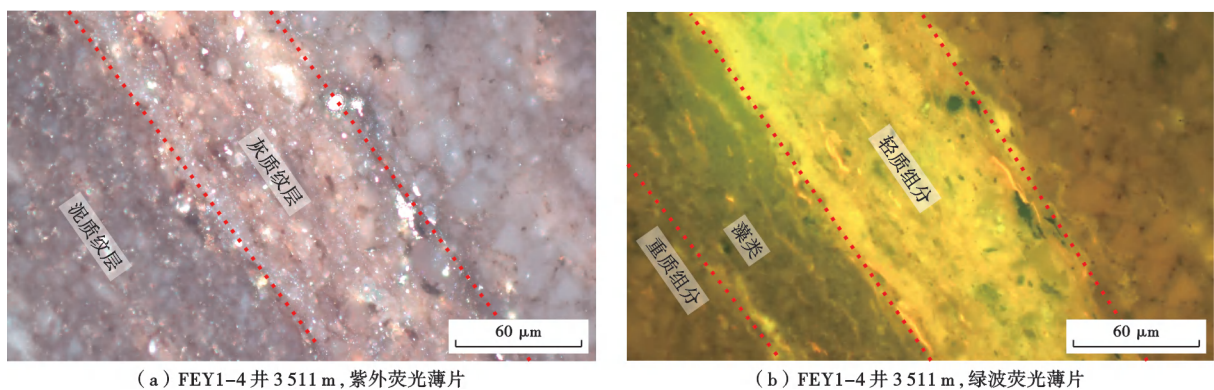
以纹层结构为单元，耦合扫描电镜提取孔隙特征和多方法孔径分布特征，建立主要岩相类型的孔-缝组

合发育模式。纹层状亮晶泥质灰页岩发育“高孔高渗”的孔-缝组合模式，包含亮晶灰质纹层中的亮晶方解石晶间孔/缝和纹层间连续分布的层理缝。纹层状隐晶泥质灰页岩发育“较高孔渗”的孔-缝组合模式，即通过层理缝沟通隐晶灰质纹层和泥质纹层中的多尺度多类型孔/缝。

2.3 含油特征

2.3.1 页岩油微观分布

荧光薄片图像显示(图5)，济阳页岩油在纹层尺度呈现差异分布特征：泥质纹层中重质组分含量高，部分为沥青质、发棕褐色荧光，可见细小的藻类体等显微组分，是主要的生烃单元；灰质纹层中页岩油呈亮黄色荧光，反映含油性相对好、以轻质组分为主，主要为经过短距离运移的可动烃。



(a) FEY1-4井3511 m, 紫外荧光薄片

(b) FEY1-4井3511 m, 绿波荧光薄片

图5 济阳页岩油不同纹层微观分布特征

Fig. 5 Microscopic distribution characteristics of different laminae in shale of Jiyang depression

2.3.2 含油饱和度

由于泥页岩特殊的物质组成及流体赋存方式,以及取心、保存和实验过程中轻烃的损失,使得页岩油原始含油饱和度难以准确测量。利用3口井保压和密闭取心样品,建立了基于核磁共振实验的济阳页岩油油水饱和度校正方法,即相比于保压取心,常规取心样品的油水损失约20%,其中水占19.6%、油占80.4%。对比不同注陷,民丰注陷的含油饱和度最高、可达72%,牛庄、博兴、利津注陷相差不大、主要为51%~57%。不同纹层结构的含油饱和度存在差异,纹层状页岩的游离油饱和度更高、游离油孔径下限更低(表1),显示出更优的富集条件。

表1 济阳页岩油不同岩相含油饱和度

Table 1 Oil saturation of shale oil with different lithofacies in Jiyang depression

类型	层状结构		纹层结构	
	孔隙体积占比/%	孔隙直径下限/nm	孔隙体积占比/%	孔隙直径下限/nm
游离油	25.22	40	34.75	20
吸附油	26.17	1	14.03	1
干酪根	14.92	2	15.34	2
束缚水	27.05	4	26.10	4

2.4 储层润湿性特征

润湿性影响了流体在地层中的分布和运移,是页岩油开发过程中渗吸置换的地质基础。利用润湿角法、核磁共振监测下的自吸驱替法等多种方法表征了济阳坳陷沙四上亚段—沙三下亚段页岩的润湿性,19块岩心样品中12块呈水湿、4块呈中性,呈现出整体亲水的特征,与济阳页岩油热演化程度低、无机孔/缝为主有关,水湿有利于促进页岩油的自发渗吸。

表2 济阳页岩油开发甜点分级评价标准

Table 2 Grading evaluation standards of sweet spots for shale oil development in Jiyang depression

甜点分类	地质评价指标							工程评价指标					
	埋藏深度/m	成熟度/%	压力系数	断层密度/(条/km ²)	有利岩相厚度占比/%	TOC/%	S ₁ /(mg/g)	孔隙度/%	裂缝发育程度	脆性矿物含量/%	隔层厚度/m	应力差/MPa	地层倾角/(°)
I类	3500~3900	0.7~1.0	>1.4	<0.5	>60	>3	>3	>5	发育	>65	<2	<5	<10
II类	3200~3500/ 3900~4200	0.6~0.7/ 1.0~1.2	1.3~ 1.4	0.5~ 2.0	40~60	1~3	1~3	3~5	中等	40~65	2~3	5~10	10~20
III类	<3200/>4200	<0.6/>1.2	<1.3	>2.0	<40	<1	<1	<3	不发育	<40	>3	>10	>20

3.1.2 甜点空间分布

济阳陆相断陷盆地页岩构造形态复杂、岩相类型多变,甜点非均匀分布,为实现甜点空间有效刻画,构建井点—平面—立体的评价思路。井点甜点评价,依据系统取心井,构建包含岩性、电性、储集性、含油性、可动性、可压性等要素的典型井综合柱状图,明确甜点

3 济阳页岩油立体开发关键技术

页岩油立体开发的内涵是针对陆相页岩油岩相复杂、储集空间多样、非均质性强、烃源岩厚度大的特点,在甜点精细评价基础上,综合应用优快钻井、体积压裂等工程工艺技术,构建纵向多层立体人造箱体,地质—工程一体化充分改造储层,通过“井—组—台”高效协同,“钻—压—投”全程优化调控,实现“层—缝—网”三维空间适配,最大程度提高储量动用程度^[21-24],达到采收率和经济效益最大化的目标。

3.1 甜点立体综合评价

3.1.1 甜点分级评价标准

矿场生产实践证实,钻遇I类甜点的水平井产能仍有高低之分。如牛庄注陷NY1-3HF井与NY1-6HF井,依据含油性、储集性、可动性及可压性等页岩四性参数评价均为I类甜点。从生产效果来看,NY1-3HF井见油时间早(4d),见油返排率低(0.87%),稳定含水低(11.9%),生产过程中能量保持水平高,但NY1-6HF井压力下下降快,稳定含水高(52.5%)。

为进一步明确高产井地质特征及甜点基础,总结40余口水平井动态规律,综合考虑不同水平段长、生产时间、改造规模、初期压力等差异,将济阳页岩油井按产能划分为高、中、低3类。其中,高产井具有初产高、含水低、压降缓慢的特点。系统分析3类井地质及工程参数差异,高产井钻遇甜点具有埋藏深、有利岩相组合厚度大、压力系数高、脆性矿物含量高特征。利用聚类分析、机器学习等方法优选评价参数、确定分级界限,将济阳页岩油甜点划分为I级、II级和III级(表2)。其中,I级甜点埋藏深度为3500~3900m、R₀为0.7%~1.0%、裂缝发育且两向应力差小于5MPa,是目前济阳页岩油效益开发的主要目标区。

纵向变化规律。平面甜点评价,井—震结合预测有利岩相,高分辨率反演预测甜点要素分布,实现甜点平面分布有效预测,甜点预测结果与实钻井吻合度大于80%。立体甜点评价,搭建“四梁八柱”构造格架,考虑构造、岩相、成熟度、压力系数等地质条件,构建三维地质模型,结合甜点分级评价标准,明确甜点空间展布。按照以

上甜点立体评价思路,在民丰洼陷坡、梁、洼不同构造部位部署 11 口系统取心井开展甜点立体评价,划分 7 个 I 级甜点层,主要分布于民丰洼陷中区,厚度为 230~310 m,以混积型页岩为主,平面面积约为 54 km²,占民丰洼陷总面积的 45%。

3.2 立体井网优化设计

3.2.1 合理开发层系划分

济阳页岩油纵向厚度主要在 300~500 m,部分厚度可达上千米,不同层段岩相、天然裂缝、流体相态、应力环境等地质条件差异大。通过国内外页岩油立体开发调研,结合博兴、牛庄、民丰等洼陷立体开发实践,在综合考虑地质条件与当前压裂工艺基础上,将具有相似岩相组合、甜点类型、温压大小、应力水平的地层划分为一套开发层系,层系内原油相态及性质、层理缝及天然裂缝发育情况相近,保障压裂均衡改造、储量均衡动用。根据上述开发层系划分方法,结合甜点分级评价,将牛庄洼陷划分为沙三下亚段、沙四上亚段纯上次亚段 2 套开发层系,其中,沙四上亚段纯上次亚段开发层系厚度为 150~200 m,根据压裂缝高部署 4 层水平井。

3.2.2 布井方式

济阳坳陷按页岩油构造位置、岩相、断裂系统等地质特征,划分复杂断块型、洼陷稳定型、陡坡深陷型 3

种类型,不同类型页岩的断裂发育、构造起伏特征各不相同,水平井立体布井方式差异极大。复杂断块型以博兴洼陷为代表,其主要特征为不同级别断层普遍发育,断层发育区面积约占 3/4,形成众多零散小断块,块间距为 500~900 m。水平井穿过断层后,需要调整井斜重新进入靶盒,造成不可避免的有利甜点损失。因此,将因穿断层造成的有利甜点丢失井段与水平段的总长度比值定义为甜点损失率。根据有利甜点发育厚度与断层两盘的对接关系,建立跨断层追层布井甜点损失率图版[图 6(a)]。如在断层断距与甜点厚度差值为 24 m 处,水平井以高于构造倾角 4° 穿过断层后,水平段轨迹追回原层位时的甜点损失率为 20%。针对断层断距远大于甜点厚度,无法实现跨断层布井的情况,依托数值模拟,建立不同改造规模条件下水平井方位与最大水平主应力呈不同夹角时的储层改造体积变化曲线,通过其与不同块间距条件下水平段长度曲线交会,建立不同夹角与无因次压裂改造体积的关系图版[图 6(b)],确定不同断块的最小夹角。相同块间距条件下,提高改造体积可减小块间距布井角度界限,达到小块间距大角度同样的改造效果。如块间距为 900 m,无因次压裂改造体积由 1.0 提高至 1.2 时,水平井方位与最大主应力夹角最小可降低至 51°。

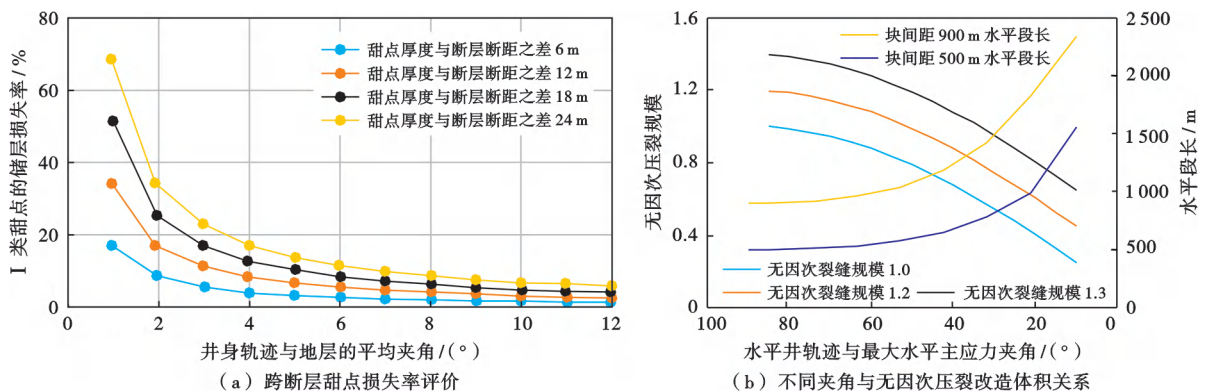


图 6 复杂断块水平井跨断层布井合理技术界限图版

Fig. 6 Reasonable technical boundary chart for horizontal well layout crossing faults in complex fault blocks

博兴洼陷按照断距大小、甜点发育厚度、块间距等地质特征,形成了断距小于 30 m 的小断层追层布井、断距为 30~50 m 的大断层跨层布井、断距大于 50 m 的断块内小角度夹角布井 3 种布井模式。FYP1 井组中,FY1-5HF 井采用跨断层追层布井,生产 439 d 累积产油量为 1.2×10^4 t, FY1-8HF 井采用块内小角度布井,生产 431 d 累积产油量为 1.65×10^4 t,均取得较好开发效果。

洼陷稳定型以牛庄洼陷中区为代表,此类地层的单层厚度平均为 20~40 m,平面延展相对稳定。

布井时主要考虑构造变化,立体井组采用“W”形交错布井[图 7(a)],压裂时可有效减少纵向井间干扰,实现纵向储量控制最大化。牛庄洼陷牛页一区立体井组采用该布井方式,部署层位为沙四上亚段纯上次亚段 C1、C3、C5、C7 层和沙三下亚段 3 层组,共 5 层 20 口水平井。2023 年 9 月井组完成立体压裂,逐步投产。2023 年 10 月 20 口井均已见油。

陡坡深陷型以民丰、渤南以及利津北带为代表,地层厚度大于 1000 m,单层厚度变化大,坡梁洼发育,流体相态随埋藏深度增加逐渐从油相转变为气相。此类

页岩油布井首先考虑相态变化,避免水平井段穿相态。其次考虑构造起伏,采用双“W”方式布井[图7(b)],即同层井纵向错位,不同层井平面错位,以适应构造及

有利岩相变化。民丰洼陷中带整体规划11个平台,单平台水平井数为30~40口,已部署1—5号平台的43口井,目前正处于钻井施工阶段。

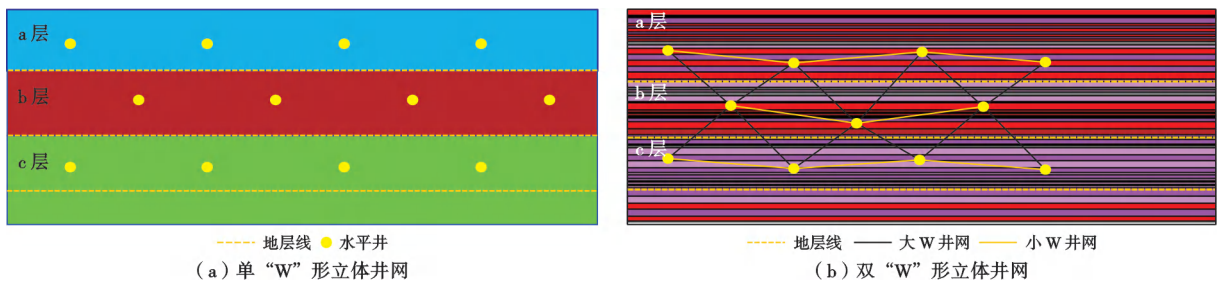


图7 页岩油立体井网部署剖面
Fig. 7 Stereoscopic deployment profile of well pattern for shale oil

3.2.3 井距层距

实践表明,压裂是页岩油弹性开发储量动用的关键。评价阶段根据两倍半缝长确定平面井距、两倍半缝高确定纵向层距。随着开发进程不断推进,井组井间干扰、套变套损情况初显,需进一步优化井距层距。

(1) 合理平面井距。综合考虑不同尺度人工缝网延展及渗流规律,将单井控制范围由内至外划分为易流区、缓流区和滞流区。其中,易流区与缓流区的产油贡献率超过98%,以缓流区边界作为极限泄油半径。在多尺度裂缝发育、渗透率高的储层中,页岩油流动能力强,其泄油半径明显大于裂缝半长,采用平面井距两倍半缝长方案,井间存在泄油重叠区域。在保障安全施工的前提下,将井距提高到2倍的半缝长和极限泄油半径之间,单井EUR有明显提升。

(2) 合理纵向层距。根据有利甜点纵向分布,以减小层间干扰、最大化动用储量为原则,确定层系内可部署的立体井组层数。考虑页岩岩相、天然裂缝、应力水平及隔层厚度等差异,对不同空间位置纵向层距采用差异化设计,适配页岩储层非均质性。牛庄洼陷牛页一区采用上述方式部署立体井网,优化平面井距为300~500 m,纵向层距为42~47 m,实现了立体开发储量有效控制。

3.3 立体均衡压裂优化设计

压裂改造是页岩油高产的关键。受复杂地质条件影响,井组压裂存在部分段簇间、井间人工裂缝扩展不均衡的现象,制约了立体井组的开发效果。通过优化段簇分布、规模、排量,统筹压裂施工顺序,实现段簇均衡起裂、井间均匀改造。

3.3.1 立体压裂参数优化

为提高立体井组的压裂改造效果、控制井间干扰程度、降低套损套变风险,需优化3个方面:①根据钻遇岩相类型和脆性指数,考虑断层断距优化段长、簇数

以及射孔方位,优化压裂段簇;②根据井网井距、岩相类型、段簇设计、破裂压力和井间干扰情况,确定合理施工排量和规模;③在单井优化的基础上,考虑立体井组井间干扰和压窜影响优化施工顺序。

牛页一区井组压裂过程中,综合考虑井位空间位置、断层裂缝发育、岩相变化等特征,开展差异化压裂优化设计。如针对断层裂缝附近取消前置CO₂、优化施工排量为14~16 m³/min、压裂液量为1 200~1 600 m³,降低断层裂缝激活风险;对泥质含量较高的压裂段优化压裂液配方,提高扩缝能力;优化井组实施顺序,平面上先内后外保障压裂过程中应力充分释放,纵向上先上后下构建压力墙避免纵向压窜,实现立体井组有效改造。

3.3.2 立体压裂风险防控

井间干扰和压窜是制约立体井组压裂施工安全和改造效果的重要因素,压裂风险超前防控具有重要意义。利用数值模拟方法实时跟踪应力场—压力场—饱和度场等多场空间演化,实时监测压裂施工对邻井的干扰,超前预判应力集中点、压窜风险点、套变风险点,及时优化调整压裂施工参数,降低立体压裂压窜、套变等风险。

牛页一区井组压裂初期,受本井及邻井压力冲击影响,部分井段发生套变。因此,立足全平台井组综合施策,正压井通过减排量降低套管承压、减规模控制缝网扩展、简化短段密切割工艺、优化拉链施工节奏等措施,有效降低套管疲劳受损程度,缓和井组局部应力集中。已压井根据高压区分布特征,采用压后适度放喷泄压措施,均衡立体改造空间压力—应力水平,减小对待压井的压力、应力干扰,达到预防待压井套变的目的。通过超前风险预警、优化压裂规模和顺序以主动规避风险,百段套变段数由早期的8段逐渐降低至后期的0.8段,保障牛页一区的立体改造顺利完成。

3.4 全过程优化调控

页岩油立体开发是一项系统工程,需要地质工程紧密结合,建模数模一体化全流程优化,实现钻井、压裂、投产等跟踪优化,支撑页岩油立体开发高效实施、建产。

3.4.1 钻井跟踪优化

黄金靶体是指资源丰富、物性良好、构造稳定、地层连续的区域,是效益开发的靶层,厚度通常为7~12 m。钻井轨迹跟踪调控是以井轨迹平稳穿行黄金靶体为目标,实时跟踪轨迹方位,提前预判水平井沿程裂缝、岩相的变化情况,保障水平井高效钻进。

通过水平井钻井跟踪实践,形成“钻井轨迹跟踪四步法”,包括:①构建地质导向模型,基于精细三维速度场,建立构造、地层、岩相、属性等三维地质模型;②明确靶前标志层,根据标准井,明确A靶前各钻遇层段的典型标志,为地质模型的动态调整提供依据;③逐层标定准确中靶,对比标准井,明确各标志层深度,精准预测A靶深度和地层倾角,提前优化待钻轨迹,确保顺利中靶;④平稳穿行黄金靶体,合理预判断距和过断层位置,考虑断层两盘对接关系,过断层前降斜,过断层后追层,保证平稳穿行。

3.4.2 压裂跟踪优化

立体压裂过程中,大规模压裂液和支撑剂注入地层,地下应力场非均匀扩展易造成局部应力集中,使井筒出现不同程度变形,不仅延误压裂施工进度,也会对后期的生产与施工作业产生严重影响。系统分析页岩油立体井组水平井套变主控因素,形成了“立体压裂四步法”跟踪优化方法,包括:①地质风险多因素判识,重点关注断层、裂缝和岩石力学性质等地质条件差异,提前判识可能发生地层滑移的区域;②压裂施工压力分析,压裂时人工缝网沟通天然裂缝,导致施工压力异常,缝网延展差异大,通过分析已实施段停泵压力、破裂压力等,优化后续待压段排量、规模;③邻井压力激动分析,通过分析邻井压力变化时机、变化幅度和变化率,判断井间压力干扰程度,确定压力窜扰位置及窜扰路径;④空间多场耦合评价,基于地质工程一体化实时跟踪模拟压裂不同阶段的压力、应力、饱和度场分布,明晰井组空间压力—应力局部集中区域,迭代优化后续施工参数,提出风险预警。

3.4.3 生产制度优化

为了最大化利用地层能量和压裂增能,建立了立体井组生产优化方法。首先,考虑井组整体施工进度和井间干扰情况,优化焖井时间,提高压裂液渗吸效率;考虑压后多场非均匀分布特征,差异化设计放喷顺序,合理控压降低应力敏感;实时跟踪井组生产动

态,分析空间多场变化规律,及时调整生产制度。例如,牛页一区井组充分考虑地质条件、井距层距和压后多场分布等因素,形成了“从上到下投产、实时优化调控”的投产方案,优化单井合理焖井时间为15~20 d,差异化调控不同井间、层间油嘴大小,促进立体井组均衡动用。

4 济阳页岩油立体开发实践及攻关方向

4.1 济阳页岩油立体开发实践与成效

济阳坳陷在5个洼陷均实现了突破,页岩油产量实现跨越式增长。截至2023年12月,共投产页岩油水平井69口,开井66口,产油量由2021年的100 t/d上升到1400 t/d以上,累积产油量突破 50×10^4 t,2023年累积产油量为 32.6×10^4 t。其中,22口井峰值日产油量超百吨,23口井累积产油量超 1×10^4 t,9口井累积产油量超 2×10^4 t,3口井累积产油量超 3×10^4 t,探索形成了整体压裂同步投产、分批压裂分步投产、立体滚动开发3种不同的立体开发模式。

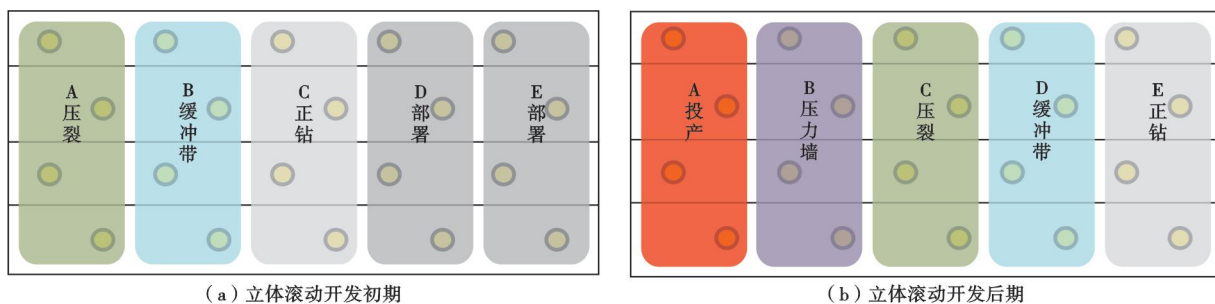
博兴洼陷樊页平1井组采用整体压裂同步投产模式,即井组所有井完钻后,逐井压裂施工,压裂完成后同期投产。该井组在C5层部署6口井(井距平均为400 m),C8层、沙三下亚段各部署1口井。井组压裂过程中,C5层相邻井间存在一定程度的正向干扰,表现为本井压裂为邻井补充地层能量,邻井井口压力上涨。随着井组各井逐步投产,井间干扰作用减弱,井组生产逐渐稳定。樊页平1井组于2022年9月全面投产,5口井峰值日产油量过百吨,6口井8个月单井累积产油量超 1×10^4 t。截至2023年12月底,井组产油量为170 t/d,累积产油量为 15.2×10^4 t,先导试验取得成功。

牛庄洼陷牛页一区采用分批压裂逐步投产模式,即大平台部署20口新井,20口井完钻后拉链式压裂分批次投产。该模式优势在于通过一次改造,储量动用程度高,但大规模立体开发在井组施工、钻井压裂和投产方面存在压窜和套变风险。牛页一区施工初期大规模压裂,压窜时压力传播速度快,为80~150 m/h;邻井受到压力冲击作用后井口压力快速上升,上升速度普遍大于0.2 MPa/h。施工中期通过持续优化压裂泵注程序、施工顺序、施工规模等,压窜、套变等异常情况大幅降低。2023年9月牛页一区20口井有序放喷投产,10月各井均见油,含水逐渐下降。截至2023年12月,井组产油量为300 t/d并持续上升,累积产油量超 1.8×10^4 t,开发态势良好。

民丰洼陷构造起伏大、厚度变化快,借鉴北美地区立体开发理念,建立了钻井、压裂、投产同步进行的立

体滚动开发模式。以2号台井组为例,纵向划分5个实施单元,分别为A列到E列,立体井组自左向右逐步实施。初期实施时,首先完成A、B两列的钻完井施工,A列实施压裂的同时C列钻井,B列作为缓冲带不压裂,阻隔A列对C列的影响[图8(a)]。A列完成压裂、C列完成钻井后,施工进度向右平移,此时A列逐步放喷,B列压裂、C列缓冲,D列钻井。随后,A列正式投产,C列压裂,B列完成压裂后焖井,作为压力墙

阻隔C列对A列影响[图8(b)],以此类推直到立体井组全部改造完成。相较博兴、牛庄立体开发模式,立体滚动开发模式通过系统优化井台内钻压投实施顺序、井台间工厂化多机组流水作业、矿场实时跟踪调整,有效避免立体井组压窜风险,实现批钻批投、快速建产。截至2023年12月,民丰2号台A列已完成4口井压裂改造,改造期间未发生压窜情况,现场施工有序进行。



(a) 立体滚动开发初期

(b) 立体滚动开发后期

图8 民丰洼陷立体滚动开发实施模式

Fig. 8 Implementation mode of rolling development in Minfeng depression

4.2 下一步攻关方向

济阳页岩油开发实践时间短,目前仍处于评价试验阶段,立体开发实施过程中井间干扰、压窜、套变套损等认识仍不完善,需要在立体开发基础研究、开发关键技术、开发技术政策界限等方面进一步攻关,丰富立体开发关键技术体系,为规模效益开发提供理论和技术支撑。

4.2.1 立体开发基础研究

陆相页岩油的地质特征复杂,地质基础认识、开发基础规律等有待于进一步深化。聚焦页岩油立体开发关键问题,深入开展甜点分级分类评价体系、页岩油储量计算方法、页岩油可动界限、复杂流体相态表征、多尺度渗流规律、岩石力学与地应力等方面的研究,助力页岩油高效开发。

4.2.2 立体开发技术体系

围绕立体井组最大程度控制储量、最大程度改造储层、最大程度提高产能的目标,重点攻关裂缝预测及三维精细地质建模技术、复杂应力描述技术、立体井网构建技术、多井协同压裂技术等关键技术,指导立体井组高效实施。

4.2.3 立体开发技术政策界限

胜利油田在博兴洼陷、牛庄洼陷、民丰洼陷均部署了立体开发试验井组,初步明晰了立体开发产能主控因素。持续深化立体井组开发特征及渗流规律认识,形成立体井组放喷投产工作制度优化方法,建立不同洼陷页岩油立体开发模式及技术政策,为实现页岩油规模效益开发奠定坚实基础。

5 结论

(1) 济阳坳陷为典型的陆相断陷盆地,具有页岩油埋藏深、成熟度低、原油密度大等地质特征,国内外没有可供借鉴的先例。通过深化基础研究、强化技术攻关、推进矿场实践,初步形成以甜点立体综合评价、立体井网优化设计、立体压裂改造、全过程实施优化调控为核心的立体开发技术系列,支撑了济阳页岩油高效开发。

(2) 博兴、牛庄、民丰等洼陷开展了立体开发先导试验,分别采用整体压裂同步投产、分批压裂逐步投产、立体滚动开发3种不同的立体开发模式,取得一定成效,证实了立体开发技术实践可行性,为实现中—低演化程度页岩油规模效益开发奠定坚实基础。但对比3种模式的运行效率、井间干扰、压窜风险、改造效果,立体滚动开发模式既符合济阳厚层页岩油开发背景,又满足效益开发的经济要求,具有更好的适应性。

(3) 陆相断陷盆地页岩油立体开发仍处于起步阶段,需要持续深化基础理论研究,完善立体开发关键技术系列,优化立体开发技术政策界限,从而实现陆相断陷盆地页岩油规模效益开发。

符号注释: R_0 —镜质体反射率; TOC—总有机碳含量; S_1 —生烃潜量, mg/g。

参考文献

- [1] 翁定为,雷群,管保山,等.中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J].石油学报,2023,44(12):2297-2307.

- WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, et al. Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2297-2307.
- [2] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [3] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 155-171.
- [4] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1-13.
SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [5] 李阳, 赵清民, 吕琦, 等. 中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 955-964.
LI Yang, ZHAO Qingmin, LÜ Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 955-964.
- [6] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 224-237.
HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 224-237.
- [7] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 801-819.
- [8] 王民, 石蕾, 王文广, 等. 中美页岩油、致密油发育的地球化学特征对比[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(3): 67-73.
WANG Min, SHI Lei, WANG Wenguang, et al. Comparative study on geochemical characteristics of shale oil between China and U. S. A. [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(3): 67-73.
- [9] 付金华, 李士祥, 侯雨庭, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 II 类页岩油风险勘探突破及其意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 78-92.
FU Jinhua, LI Shixiang, HOU Yuting, et al. Breakthrough of risk exploration of Class II shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 78-92.
- [10] 姜福杰, 黄任达, 胡涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油地质特征与分级评价[J]. *石油学报*, 2022, 43(7): 899-911.
JIANG Fujie, HUANG Renda, HU Tao, et al. Geological characteristics and classification evaluation of shale oil in Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 899-911.
- [11] 王小军, 宋永, 郭旭光, 等. 陆相咸化湖盆细粒沉积岩分类及其石油地质意义[J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 303-317.
WANG Xiaojun, SONG Yong, GUO Xuguang, et al. Classification of fine-grained sedimentary rocks in saline lacustrine basins and its petroleum geological significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 303-317.
- [12] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 110-124.
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 110-124.
- [13] 王跃文, 陈百军, 陈均亮, 等. 松辽盆地古龙页岩油层顶底板断层封闭性及油气聚集有利区优选[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 53-67.
WANG Yuewen, CHEN Baijun, CHEN Junliang, et al. Roof and floor faults seal of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin and optimization of favorable areas for oil and gas accumulation [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 53-67.
- [14] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(1): 1-20.
YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: a case study of Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 1-20.
- [15] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2141-2159.
LIU Huimin, GAO Yang, QIN Feng, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2141-2159.
- [16] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳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.
- [17] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 1-12.
- [18] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 789-802.
WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 789-802.