

文章编号: 0253-2697(2020)04-0467-11 DOI:10. 7623/syxb202004009

致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略

康毅力¹ 田 键¹ 罗平亚¹ 游利军¹ 刘雪芬^{1,2}

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610500; 2. 陇东学院能源工程学院 甘肃庆阳 745000)

摘要:致密油藏正在成为全球油气资源勘探开发热点领域。致密油藏开发效益在一定程度上反映了一个国家当代石油勘探开发的技术能力和水平。总体来看,全球范围内致密油藏平均采收率为 5%~10%,远低于常规油藏。中国致密油藏地质特征复杂,其开发关键技术尚处于突破前的准备阶段,美国相对成熟的致密油藏开发配套技术不能直接照搬应用。针对中国致密油藏采收率低和相关配套技术发展滞后的现状,概述了致密油藏开发和提高采收率的主要关键技术,剖析了待解决的理论认识与技术瓶颈等问题。分析认为,推行致密油藏开发地质工程、保护改造、增渗增能、洗油驱油“多维一体化”技术思路,协同大型水力压裂储层改造,实施界面修饰注水和储层原油氧化实现有效增能增注,开展多环节、多尺度、多场综合调控油水流动行为,显著增强油水流动能力,将是提高致密油藏采收率及开发综合效益的新途径。

关键词:致密油藏;多维一体化;多尺度渗流;界面修饰;提高采收率

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Technical bottlenecks and development strategies of enhancing recovery for tight oil reservoirs

Kang Yili¹ Tian Jian¹ Luo Pingya¹ You Lijun¹ Liu Xuefen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China; 2. College of Energy Engineering, Longdong University, Gansu Qingyang 745000, China)

Abstract: Tight oil reservoirs are becoming a hotspot in the exploration and development of global oil and gas resources. The development benefits of tight oil reservoirs reflect the technological capabilities and levels of oil exploration and development in a country to a certain extent. Overall, the average recovery of tight oil reservoirs around the world is about 5%-10%, and is much lower than that of conventional oil reservoirs. China's tight oil reservoirs have complex geological characteristics, and the key technologies for their development are still in the preparation stage before breakthrough. The relatively mature matching technology for the development of tight oil reservoirs from America cannot be directly copied and applied. Aiming at the current low recovery of tight oil reservoirs and the lagging development of relevant supporting technologies in China, the paper summarizes the main key technologies for the development and enhanced oil recovery of tight oil reservoirs, and analyzes such problems as theoretical understanding and technical bottlenecks to be resolved. According to the analysis, the new way to improve the recovery and comprehensive development benefits of tight oil reservoirs will include: carrying out the multi-dimensional technology thought integrating geological engineering, protection and reform, increasing seepage and energy enhancement, as well as oil washing and flooding; in combination with large-scale reservoir reform by hydraulic fracturing, implementing water injection by interfacial modification and crude oil oxidation in reservoirs to achieve an effective increase in energy and injection; carrying out multi-link, multi-scale, and multi-field comprehensive regulation of oil-water flow behavior, and significantly enhancing oil-water flow capacity.

Key words: tight oil reservoirs; multi-dimensional integration; multi-scale seepage; interfacial modification; enhanced oil recovery

引用:康毅力,田键,罗平亚,游利军,刘雪芬.致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略[J].石油学报,2020,41(4):467-477.

Cite: KANG Yili, TIAN Jian, LUO Pingya, YOU Lijun, LIU Xuefen. Technical bottlenecks and development strategies of enhancing recovery for tight oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 467-477.

致密油藏正在成为全球油气资源勘探开发热点领域。据统计全球致密油藏资源总储量约为 9.294×10^8 t,技术可采储量约为 460×10^8 t,其中 2/3 以上的致密油资源主要集中在俄罗斯、美国、中国、利比亚、阿

基金项目:国家自然科学基金项目“富有机质页岩氧化致裂增渗加速气体传输机理研究”(No. 51674209)、非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目(2016TD0016)和甘肃省高等学校科研项目“陇东超低渗透油藏降压增注及提高采收率方法研究”(2018A-097)资助。

第一作者:康毅力,男,1964 年 2 月生,1986 年获大庆石油学院学士学位,1998 年获西南石油学院博士学位,现为西南石油大学教授、博士生导师,主要从事储层保护、非常规天然气、油气田开发地质研究与教学。Email: cwctkyl@163.com

通信作者:游利军,男,1976 年 10 月生,2000 年获西南石油学院学士学位,2006 年获西南石油大学博士学位,现为西南石油大学教授、博士生导师,主要从事储层保护、非常规油气、岩石物理研究与教学。Email: youlj0379@126.com

根廷和澳大利亚 6 个国家^[1]。尽管全球致密油藏资源丰富,但普遍采收率低下。以北美 Bakken 组致密油藏开采为例,作为世界范围内开发致密油藏较早的区块之一,Bakken 组致密油藏自然衰竭开采平均采收率仅为 5%~10%^[1-2]。如何提高致密油藏采收率成了亟待解决的工程和技术难题。

2016 年美国致密油年产量就已达到 2.12×10^8 t, 占美国原油总产量的 52.6%, 同年美国石油对外依存度降至约 33%; 2018 年中国致密油年产量约为 105×10^4 t, 石油对外依存度已超过 60%^[3-5]。中国致密油藏开发起步较晚,基本上处于技术引进与消化阶段。美国致密油藏开发配套技术不能直接应用于中国致密油藏开发,其原因有^[4-6]: ①美国致密油藏多为海相沉积,油层普遍压力系数高,气油比高,原油流动性强,储层岩石脆性好,易于压裂。中国致密油藏多为陆相沉积,地层能量不足,气油比偏低,原油黏度高,岩石塑性矿物含量高,影响储层可压裂性。相比之下,中国致密油藏成藏地质环境更加复杂,储层物性条件相对更差,开发面临的技术挑战更为严峻。②当前中国还未形成应用于致密油藏经济开发的成熟配套的开发理论、经验及设备,致密油藏开发关键技术尚处于突破前的准备阶段^[5-7]。

针对致密油藏采收率偏低的现状,结合当前中国致密油藏开发实际,概述了用于提高致密油藏采收率的主要开发技术,并分析了待解决的技术瓶颈与挑战。同时,笔者对致密油藏提高采收率技术思路作了总体思考,探索了一种协同大型水力压裂改造的以界面修饰注水为途径,实施油藏原油氧化实现增能增注的提高致密油藏采收率技术,以期为中国致密油藏开发技术发展提供积极的思考方向。

1 开发现状

1.1 储层流体可动性差

致密油藏采收率特点表现在:①原油流动阻力大,动用程度低;②地层能量衰竭快,供能不足;③整体波及系数小,洗油效率低。储层岩石渗透率低,孔隙度小,毛细管力高,流体/岩石界面效应显著,储层流体可动性差,是致密油藏难以开采的重要原因。在致密油藏中,储层流体与岩石表面之间存在的固液界面效应会导致一部分流体成为束缚流体,而能够有效流动的可动流体占比变少^[8]。有学者研究指出,对于渗透率小于 1 mD 的储层,其平均可动流体百分数通常低于 20%,而绝大部分流体成为不可流动的束缚流体^[9]。束缚流体会在岩石孔喉表面吸附形成边界层,进一步降低油水有效流动通道,引起渗流附加阻力^[10-11]。致

密油藏储层岩石平均孔喉通常小于 $1 \mu\text{m}$, 部分喉道只有几十到几百纳米。微纳米级孔喉对流体流动会产生显著的毛细管效应,形成的水膜会进一步削弱储层渗流能力。流体可动性差导致致密油藏在生产开发过程中出现“外来流体注不进、地层流体采不出”的情况。因此,开发致密油藏和提高原油采收率,关键在于提高致密储层流体可动性。

1.2 致密油藏采收率低

提高致密油藏采收率需要进行储层去致密化和储层增能,用以提高致密油藏储层流体可动性。储层去致密化是以“水平井+体积压裂”为技术核心的储层改造手段,用以增加泄油面积和改善致密储层渗流能力,其中通过实施大型水力压裂进行整体缝网改造是该技术的关键^[3,12-17]。水力压裂技术是通过高压水柱打碎原致密岩石,形成复杂裂缝网络,缩短基块与裂缝之间渗吸采油作用距离,实现储层流体从基块到裂缝渗流路径和方式的转变,进而提高储层渗流能力^[18]。水力压裂已经成为当前开发致密油藏的主体技术,并取得了显著成效。结合致密油藏地质特征,水力压裂技术相应地发展出了多级压裂、重复压裂、同步压裂等技术,并在压裂理论、压裂材料和压裂工艺等方面提出了新的要求^[19]。

储层增能一般指注入外来流体用以补充地层能量^[3,20-21]。流体注入主要包括注水和注气。如表 1 统计所示,北美致密油藏多为海相沉积,原油黏度相对更低,地层压力系数相对更高,地层能量充足,因此开发早期多为自然衰竭开采。随着开发过程中地层能量下降,注气成了北美开发致密油藏的主要选择。注气能够进一步降低原油黏度,使得原油膨胀,提高原油流动性,其中以注 CO_2 吞吐采油应用最广^[22-30]。北美致密油藏油井附近气源充足,油井周边常伴有气田或是通过二氧化碳埋存形成邻近气源,而且储层均质性好,不容易发生气窜,因此注气开发在北美致密油藏中应用较广。相比之下,中国致密油藏成藏地质环境更加复杂,加上储层物性较差,特别是非均质性强的致密油藏,注气开发容易发生气窜,制约采收率的提高。此外,中国注气开发还面临着气源少,开发成本高等问题。考虑中国实际情况,注水仍是补充地层能量的首选方式。相比气体的高流动性和易注入性,致密油藏注水时高压欠注现象严重^[31-32],并因此发展出了界面修饰注水等降压增注技术^[33-34]。界面修饰注水是通过注入表面活性剂类功能性材料,改变储层岩石润湿性,降低或消除油水界面张力,从而实现降压增注。增注不一定增产。注水开发致密油藏需要综合提高水驱波及系数和洗油效率,需要克服水驱过程中出现的优势

渗流通道效应,提高细孔喉的波及程度,整体上降低残余油饱和度。当前用于克服优势通道的水驱调剖技术主要有聚合物凝胶技术、微球调驱技术、低矿化度注水技术等^[35-37]。提高洗油效率则可通过引入表面活性剂破坏吸附油膜来实现。

总体上,致密油藏注水常以水力压裂改造为前提,通过注水增加储层能量,既能够支撑裂缝开启,保护压

裂改造效果,又能够实现注水采油。在压裂基础上,中国延长和长庆等致密油田推广和发展了注水吞吐、同井缝间注采和异井异步注采等新技术,对于提产和稳产起到了促进作用^[38-41]。对于部分致密油藏,考虑储层应力敏感、原油性质、油藏厚度与埋深等,可通过实施超前注水补充地层能量,改善储层流体可动性,实现有效开发^[42]。

表 1 北美与中国致密油藏成藏条件与主要储层物性对比^[4-6]

Table 1 Comparison of reservoir geological formation conditions and main physical properties of tight oil reservoirs between North America and China

地区	沉积特征	烃源岩特征	储层特征	油藏流体特征
北美	①构造稳定,以海相沉积为主 ②主要分布在海相克拉通盆地 ③分布范围一般在几万平方千米	①以海相页岩为主,厚度一般几十米 ② TOC 含量主要分布在 2%~20%, <i>R_o</i> 值主要在 0.6%~1.7%,生烃能力强,原油成熟度较高	①储集层岩性以碳酸盐岩为主,其次为砂岩 ②岩石矿物以方解石、石英为主,可压性好 ③孔隙度范围一般为 5%~14%,原地渗透率一般≤1.0 mD ④储层厚度为 5~150 m	①原油密度为 0.71~0.87 g/cm ³ ,油质较轻 ②原油黏度一般低于 1 mPa·s,油气比较高,一般大于 120 m ³ /m ³ ③压力系数为 1.35~1.78,以超压为主 ④埋深主要在 3 500 m 以内
中国	①晚期构造活跃,以陆相沉积为主 ②在盆地、断陷、坳陷等均有分布 ③分布范围一般在几百至几千平方千米	①以湖相泥页岩为主,厚度变化大 ② TOC 含量主要分布在 0.4%~16%, <i>R_o</i> 值主要在 0.46%~1.4%,生烃能力一般,原油成熟度不高	①以砂岩为主,成岩作用和构造运动强烈,导致储集层横向非均质性突出 ②岩石矿物中长石和岩屑含量相对较高,可压性较海相砂岩差 ③孔隙度范围一般为 3%~12%,原地渗透率一般≤0.1 mD ④储层厚度一般在 3~80 m	①原油密度为 0.74~0.96 g/cm ³ ,原油品质差异大,流动性较差 ②原油黏度一般高于 1 mPa·s,油气比较低,一般小于 120 m ³ /m ³ ③压力系数为 0.70~1.80,以低压为主 ④埋深大多在 1 000~4 500 m

2 技术瓶颈

2.1 致密油藏水力压裂技术瓶颈

水力压裂是通过泵入高压流体形成人工裂缝来提高致密油藏储层岩石的渗透能力。压裂形成的缝网系统改善和缩短了原油从基块到井筒之间的传质路径,有助于充分发挥基块与裂缝之间的油水置换渗吸采油效能,提高采收率。

2.1.1 井网优化

“水平井+体积压裂”的增产改造模式实现了致密油藏的经济开采。水力压裂目的在于获得理想化的多

尺度裂缝网络,实现致密储层不同尺度渗流空间的梯级增渗目标。在实际施工过程中,水平井分段压裂需要防范邻井压窜带来的不利影响。邻井压窜是指在压裂目的井(注入井或生产井)时,相邻井(多为生产井)被同时压裂或干扰,形成连通的压裂带,造成压裂液侵入邻井,引起压裂失效(图 1)。邻井压窜现象在北美 Bakken 组致密油藏和中国鄂尔多斯盆地延长组致密油藏开发过程中均有发生^[19,43-47]。邻井压窜促使致密油藏工程地质特征进一步复杂化,为后期钻加密井、增产改造及实施注水采油等技术增加了难度。因此,致密油藏压裂井网布局优化显得至关重要。当井距设计

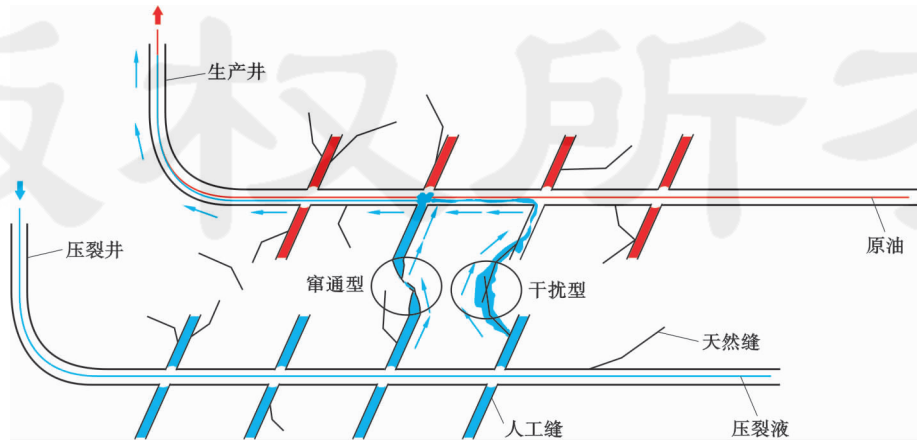


图 1 压裂过程邻井压窜与井间干扰示意

Fig. 1 Schematic diagram of fracturing channeling in adjacent wells and inter-well interference during fracturing

过小时,将会引起生产井过早见水或出现暴性水淹;当井距过大时,则会导致生产井见效慢,开采时间过长,水驱波及效率偏低^[48-50]。在充分认识地质状况和储层特征的基础上,做到合理控制裂缝半长、裂缝间距与裂缝条数,优化井网配置关系,有预防地控制缝网改造范围,防止层间干扰,为后续注入流体打好基础,是致密油藏水力压裂施工作业设计中必须重视的一环。

2.1.2 储层损害

储层天然裂缝和水力裂缝为压裂液沿着裂缝面侵向周围基块提供了便利。进入裂缝的压裂液在一定程度上可以维持和补充地层能量,对于保持裂缝开启和生产稳产有利,并且部分压裂液会在毛细管力作用下与周围基块发生原油渗吸置换,促使原油进入裂缝生产,提高原油采收率。同时,压裂液滞留引起的储层损害等问题不容忽视。致密油藏储层压裂液返排率通常只有 10%~50%。当储层压裂液不能及时有效返排时,滞留的压裂液将会大幅降低有效渗流面积,诱发水相圈闭等储层损害,削弱压裂改造效果^[51-52]。若压裂液中的支撑剂大量返排和失效,以及开采初期因开采速度控制不当导致油层流体压力下降过快,则会引起裂缝闭合,诱发应力敏感损害。压裂液滞留诱发的储层损害等负面效应是制约致密油藏经济开发的工程难题。如何有效发挥滞留压裂液的积极改造作用与采油效能,降低储层损害等消极后果,是压裂液研究与压裂施工设计的核心问题。

2.1.3 压后增能

中国致密油藏多为低压油藏,采用自然衰竭开采很难获得工业产量。在水力压裂改造的基础上注入外来流体补充地层能量是低渗透-致密油藏的有效开发模式^[53]。支撑裂缝开启和防止储层应力敏感损害均需要及时补充地层能量。但在流体注入过程中,由于裂缝的存在以及储层非均质性的影响,容易发生水窜或气窜。当注入流体与地层流体不配伍时,还会诱发储层流体敏感性、结垢、水相圈闭等储层损害。优化压裂施工范围,控制注入速度与注入用量,防止水窜或气窜,保证流体之间的配伍性,降低储层损害风险,从而实现压裂增渗和注流体增能同步改造,是致密油藏压后增能需要挑战的一大工程目标。

致密油藏水力压裂既是相对独立的作业环节,又是决定后续开发生产的重要环节。因此,致密油藏水力压裂施工需要同时解决储层损害和增渗改造两个问题,在保障储层改造的基础上为后续有效注水等技术的实施创造条件。

2.2 致密油藏注水开发技术瓶颈

致密油藏注水首先需要解决降压增注难题。在水

力压裂改善储层渗流条件的基础上,通过界面修饰技术改变储层岩石润湿性和降低界面张力,可有效实现致密油藏降压增注。

镇北油田长 8 油层组平均渗透率为 0.62 mD,平均孔隙度为 10.80%,主要采用注水开发。由于储层物性极差,黏土矿物含量高,注水过程中出现水敏性等储层损害,导致注水井注入压力高,部分井欠注或停注。2011 年 7 月,镇北油田 T214-16 井的注水压力为 18.5 MPa,配注量为 45 m³/d,实际注水量为 22~25 m³/d。2011 年 8 月采用质量浓度为 400 mg/L 的以双子表面活性剂 G12-3 为主要成分的降压增注体系溶液对该井进行注水,连续注入 3 个月,且平均降压幅度为 3.5 MPa,有效期超过半年,取得了较好的应用效果^[54]。

吴 72-71 井自 1998 年 12 月开始采用注水开发,注水后压力上升快,注水状况差。2006 年 11 月注水压力为 18 MPa,配注量为 60 m³/d,实际注水量为 30~40 m³/d。随后开始注表面活性剂体系,注表面活性剂前先进行酸化预处理,取得较好的降压增注效果。在顺利完成配注情况下,该井平均降压幅度为 3 MPa,有效期已接近半年,且目前仍有效^[55]。

WB2-32-2 注水井组地层平均渗透率仅为 0.59 mD,注水过程中表现出注入压力高,井口油压为 9.5 MPa,而设计最大允许注入压力为 10.4 MPa。注水井投注 1 年后,对应油井无动态反映,均表现为地层能量低,供液能力差。分析认为,由于井组储层物性差,原油流动度低,地层导压能力差,导致注入水驱替困难,而表现出注入压力高,对应油井注水不受效。WB2-32-2 井于 2014 年 11 月 15 日开始注入 OBS-03 型表面活性剂水溶液。该井在注入表面活性剂 1 月后,在日注量仍保持 10 m³时,井口油压由试验初期 10.0 MPa 降至目前的 8.2 MPa,且维持稳定,取得明显降压效果^[56]。

通过实施界面修饰注水,上述 3 口致密油井实现了有效降压增注。为了进一步提高采收率,在满足降压增注的同时,注水过程还需攻克若干技术挑战。

2.2.1 保障降压增注,兼顾渗吸采油

致密油藏通常水湿性强,或者表现为既亲水又亲油。当存在油水两相时,毛细管效应对致密油藏开发具有重要影响。毛细管力是致密油藏注水阻力;毛细管力又是渗吸采油动力。当注入水沿着裂缝或粗孔喉等相对高渗通道进入油层后,会在毛细管力作用下进入更细孔喉置换原油,即发生渗吸采油^[57-58]。毛细管渗吸采油已经成为提高裂缝性致密油藏采收率的一种主要机理,也是致密油藏压裂后注水吞吐期间发挥采油效益的重要途径。致密油藏界面修饰注水是以牺牲毛细管力为代价的,从而实现降压增注。过于消耗毛细管

力不利于裂缝和基块之间充分发生毛细管渗吸采油过程^[58]。有学者通过研究油藏注水采油发现,通过降低界面张力来实现有效注水并不能获得更高的采收率^[59]。致密油藏注水作业过程中毛细管力的合理使用和润湿反转时机选择需慎重考虑,即需要解决如何发挥毛细管力在降压增注与渗吸采油二者间的最佳效益问题。

2.2.2 克服优势通道,提高波及系数

致密油藏多为孔隙-裂缝双重介质,压裂后裂缝成为原油主要流动通道,基块则是原油主要赋存空间。孔隙-裂缝双重介质致密油藏原油流动存在多尺度通道特性^[60]。流动通道的多尺度性带来采油机理上的差异性。基块中的原油进入裂缝中主要依靠的是毛细管渗吸置换作用;原油从裂缝进入井筒则是通过地层压力驱替。由于非均质的影响,注入水会优先沿裂缝等相对高渗带快速流动,弱化并抑制毛细管渗吸驱油过程,使得基块与裂缝之间的水油置换过程不能充分进行,造成基块内原油采出程度偏低。此外,由于储层岩石喉道所需排驱压力存在差异,注水时粗孔喉内孔隙压力提升速度快,可以优先克服渗流阻力形成流动优势通道,而注水不能有效波及更细孔喉,出现整体波及系数低。针对非均质性强的致密油藏,合理控制注入速率和时间,调整水驱压力剖面,防止水驱优势指进,对于发挥毛细管渗吸采油和提高波及系数具有重要意义。

2.2.3 优化注水轮次,改善洗油效率

中国致密油藏技术可采储量约为 $44.8 \times 10^8 \text{ t}$,位居世界第 3 位^[61]。但中国致密油藏自然衰竭开发平均采收率仅约为 8%^[62]。洗油效率低是致密油藏采收率低下的主要原因之一。通过压力调剖开展多轮次注水,或引入表面活性剂等来提高水驱过程中的洗油效率,是当下注水开发致密油藏通用的作法。随着注水轮次增加,剩余原油分布变零散。分散后的原油没有连续流动时的引流、拖曳等作用,而赋存在孔喉角隅等位置的原油更难以动用,且分散的油滴可能引起贾敏等储层损害。从原油分布形态、流动特征和储层损害等角度综合来看,通过优化注水轮次与优选表面活性剂类型和用量,大幅提高水驱波及范围内原油的洗油效率,从而显著降低残余油量和提高原油采出程度是更值得推行的注水轮次选择。

致密油藏注水开发面临的技术挑战远不止这些,且相互影响。实现降压增注需以压裂改造和岩石界面修饰为前提;压裂形成的裂缝和界面修饰引起的润湿反转又会影响到毛细管渗吸采油和洗油效率。注水调剖提高波及系数的同时,但又要求注入流体与地层流体

的配伍性,防止储层损害而影响整体采油效果。注水开发致密油藏需要从整体设计出发,兼顾有效注水和储层保护,共同提高波及系数和洗油效率,促进基块渗吸采油和裂缝水驱采油效能最佳化,实现高效开发。

3 基于“多维一体化”思想的致密油藏开发技术

致密油藏开发是一项复杂的系统工程,需要有区别于常规方法与思路的开发理念和思想作指导。要实现致密油藏经济开发,保障压裂改造效果,提高采收率和降低作业成本,则需设计与执行致密油藏地质与工程一体化、储层保护与增渗改造一体化、压裂增渗与增能一体化、洗油驱油一体化。其中,地质与工程一体化是统领,用以指导各作业环节的科学有效执行;储层保护与增渗改造一体化是前提,克服和消除各作业环节带来的储层损害,保证储层增渗改造效果,确保储层“有产”的基本目标,进而实现储层“高产”、“增产”和“稳产”;压裂增渗与增能一体化是关键,改善致密储层渗透性,形成人工油气藏^[3],实现致密储层从基块到裂缝,再到井筒的多尺度渗流场的梯级增渗目标;洗油驱油一体化是保障,整体提高洗油效率和波及系数,实现增产提采。通过倡导推行“多维一体化”技术思路,探索多环节、多尺度、多场共同协调增渗增产机制,最终实现致密油藏提高采收率的目标(图 2)。

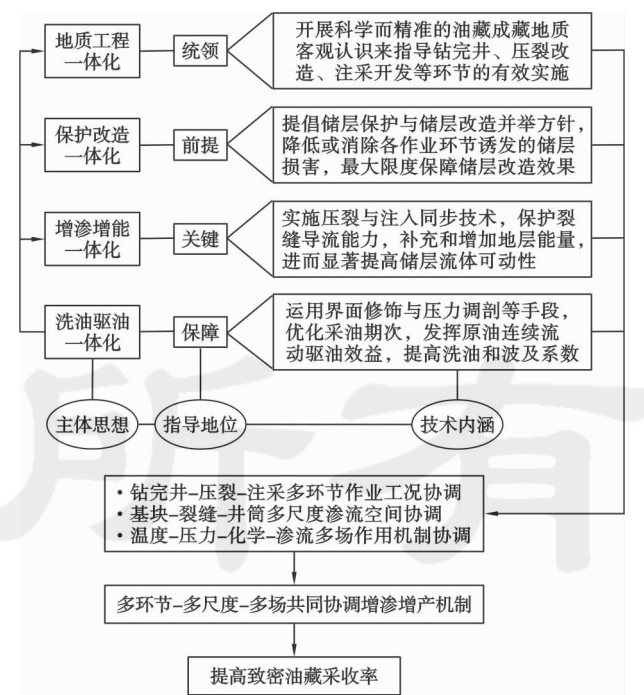


图 2 基于“多维一体化”思想的致密油藏开发技术构想
Fig. 2 Technical conception of the development of tight oil reservoirs based on the idea of “multi-dimensional integration”

地质与工程一体化是贯穿致密油藏勘探与开发全过程的工程技术,是以地质的客观认识为基础,以工程的科学实践为手段,最终实现致密油藏提产增效和经济开发^[63-65]。地质工程一体化的作业模式是一项涉及多环节、多工序、多学科的系统工程。通过前期高效而精准的地质勘探,进而指导钻完井方案的设计,以期实现最大限度提高完井后的投产能力。通过地震监测等手段,进行储层裂缝发育程度与展布情况识别,从而构造地应力分布场,确保压裂改造的有效执行。中国致密油藏成藏地质环境相对更为复杂,地质工程一体化将是开发致密油藏的必由之路^[64]。

储层保护与增渗改造一体化强调在致密油藏开发系统工程中,要实现储层保护和储层改造并举。储层增渗改造中通常也会伴生储层损害,实现增渗改造环节中的储层保护是开发致密油藏的有利保障^[66]。与常规油藏相比,致密油藏物性差,一旦发生储层损害,后果将会更加严重。储层保护既是独立的,又是系统的。从钻开储层到完井投产,从储层改造到提高采收率,各作业环节都要树立储层保护理念,做到任意单一工况环节的储层保护,防止将上一环节引发的储层损害积累到下一个作业环节中,为后续施工打好基础。

鉴于中国致密油藏多先天性地层能量不足,在压裂改造的基础上,补充储层能量成为了致密油藏经济开发的有效手段。储层压裂后会形成“主裂缝—支链裂缝—天然微裂缝”的裂缝系统,并由此建立起基块—裂缝—井筒的多尺度油水流动通道。为防止衰竭式开采过程中引发的裂缝闭合,可在压裂时适当注水,提高地层压力用以保持裂缝处于开启状态,且有助于裂缝的扩展和延伸,缓解或消除裂缝应力敏感损害,保障裂缝的渗流通道能力,进而实现压裂增渗与增能一体化,提高致密油藏流体的可动性^[67]。

为进一步提高原油采收率,通常在一次采油、二次采油的基础上,还要进行包括化学注入、微生物注入、聚合物驱等形式的三次采油,甚至还可能出现四次采油、五次采油等。增加采油期次(轮次)目的在于最大限度降低残余油饱和度,提高原油最终采收率。需要注意的是,随着采油期次的不断增加,油层内可动用的原油饱和度也随之降低,原油分布连续性变差。原油分布的不连续性增加了注水过程中贾敏、相圈闭等储层损害的风险性。原油分布零散和储层损害会显著影响波及效率的进一步提高。因此,通过进行技术调整来实施一次性采油,模糊采油期次界限,合理缩减注水次数,优化设计注入流体类型和功能,发挥油相连续性流动的惯性驱油作用,降低储层损害风险,从而提高洗油效率和波及系数。

4 界面修饰与氧化增能协同注水技术

4.1 界面修饰与原油氧化协同注水技术思路的提出

中国致密油藏开发存在动用程度低、产量递减快、采收率低等特点,还可能伴生储层损害等问题。防治储层损害与提高采收率都需要借助地层能量来提高致密油藏流体可动性。注水或注气能够维持和补充地层能量,对提高原油采收率具有积极效益。早在 1963 年,阿莫科石油公司就在美国内布拉斯加州的 Sloss 油田开展了小规模注空气试验,将该油田的采收率提高至 43%^[68]。美国 Williston 盆地 Buffalo 油田的 BRRU 注空气项目从 1979 年持续至今,取得较大成功,为注空气技术在油田开发生产的推广应用提供了现场经验^[69]。自 1980 年以来,中国先后在胜利油田、吐哈油田与辽河油田开展了油田注空气矿场试验,论证了注空气技术在低渗透油田开发应用的可行性。受限于油藏地质条件和作业成本,注水仍是目前中国致密油藏常用的能量补充方法。考虑致密油藏储层岩石致密、注入量受限、能量提升慢等问题,设想通过注入流体与储层流体/岩石之间发生物理化学作用来改变岩石表面润湿性与原油性质,释放热量与压力,降低油水流阻力和增加地层能量,从而提高油水的可动性,进而实现“注得进”、“驱得净”、“见效快”的目标。鉴于此,提出了基于水力压裂改造的致密油藏界面修饰与原油氧化协同注水技术设想。

界面修饰和原油氧化在致密油藏开发中具有广泛应用前景。界面修饰可以改变岩石表面粗糙程度及润湿性,使得油藏变为中间润湿(图 3)^[70-71],降低油水界面张力和毛细管力,消除非均匀驱替,从而实现致密油藏降压增注目的(图 4)^[72]。

当前现场试验开展较多的是注空气氧化采油^[73-75]。注空气氧化采油关键之一在于氧气能够和原油发生充分氧化反应,且使氧气含量降到满足现场安全生产的水平^[76]。室内研究表明^[77],将空气注入油藏中可促使其中的氧气与原油直接反应放热(原油氧化



图 3 界面修饰改变致密岩石润湿性^[71]

Fig. 3 Wettability of tight rocks changed by interfacial modification

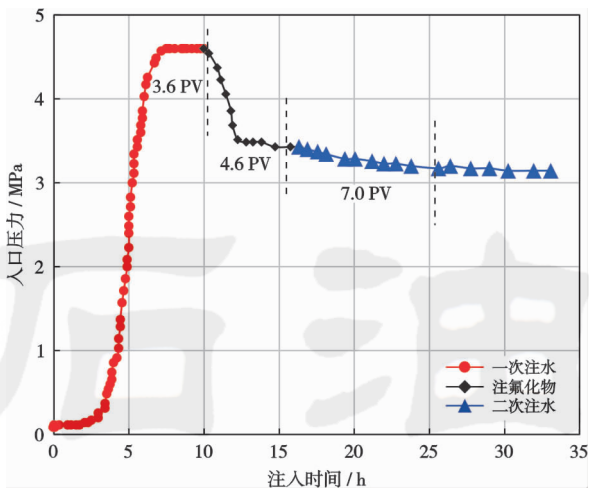


图 4 界面修饰在致密油藏降压增注中的应用^[71]

Fig. 4 Application of interfacial modification in the decreasing pressure and increasing injection of tight oil reservoirs

放热峰值温度可达 550℃),从而降低原油黏度与提高地层能量,进一步驱替水驱后形成的残余油,可大幅度提高原油采收率。原油氧化可以产生 CO₂ 气体,在降黏的同时可形成酸液与局部岩石发生酸化作用,促进岩石破裂和裂缝生成。综合来看致密油藏原油氧化具有 2 点有利条件:①储层岩石以微纳米级孔喉为主,岩石和流体膨胀空间有限,原油氧化可以在局部受限空间中快速憋压,有利于岩石膨胀致裂^[78-79];②绿泥石等含铁离子矿物能够作为原油氧化的催化剂,加快原油氧化进程^[80]。

依据界面修饰和原油氧化在致密油藏开发中的应用前景,设想出了界面修饰和原油氧化的增能增注配套工作液技术(图 5),通过界面修饰改变“油—水—岩石”系统界面性质,提高流体可动性,降低注入压力,发挥油藏最大注入潜力,提高驱替效率和波及系数。同时,通过原油氧化在解除压裂过程聚合物损害的同时,与部分原油及有机质原地反应释放热量并气化增压,降低原油黏度,缩短见效周期。该技术以大型水力压裂为基础,以注水为途径,以增强致密储层油水可动性为目标,最终实现提高致密油藏采收率。因此,在水力压裂改善致密储层渗透性的基础上,集成界面修饰与氧化增能的协同注水技术可以有效预防储层损害,增加油藏能量,进一步提高致密油层流体可动性,进而实现降压增注并最终提高致密油藏采收率在理论基础和技术方面上是可行的。

4.2 氧化增能

4.2.1 优选氧化剂

氧化剂优选既要考虑可以与原油发生氧化的首要条件,又要考虑能够有效增能的功能目的。当前可选

氧化剂类型通常有双氧水(过氧化氢)、二氧化氯、高锰酸钾等试剂。以双氧水为例,原油氧化是通过双氧水分解成氧气和水,再由氧气跟原油发生氧化反应。如何有效促进双氧水分解过程、保障原油氧化顺利进行是实现氧化增能的关键。

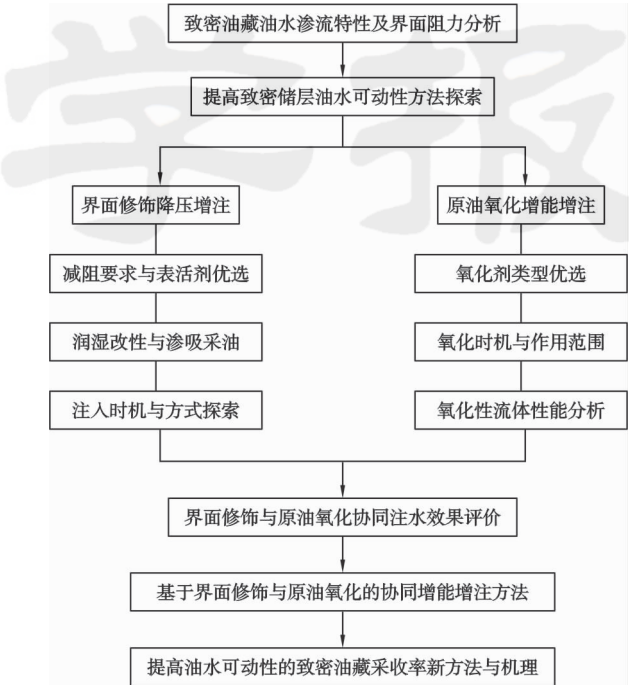


图 5 界面修饰与原油氧化协同注水提高致密储层油水可动性技术思路

Fig. 5 Technical ideas for improving oil-water mobility in tight reservoirs by interfacial modification and crude oil oxidation in combination with water injection

4.2.2 优化原油氧化作用范围

室内原油氧化实验研究都是基于岩心尺度,不能合理分析储层尺度下注氧化性流体大面积氧化原油的可行性。因此,研究原油氧化作用范围对于现场实施注氧化剂进行原油氧化具有指导意义。首先,需明确氧化剂进入储层内部后在岩石孔隙中的分布。其次,需掌握氧化剂发生氧化的条件和明确氧化反应持续时间、作用产物、生成热量和压力大小。最后,需探索生成的热量和压力在致密岩石多孔介质内部能否有效传递和导致原油膨胀致岩石骨架破裂等,同时探索适用于原油氧化的致密岩石物性范围、原油性质等。

4.2.3 保持处理剂在氧化环境下的功能稳定性

原油氧化的作用是有效增能,以界面修饰减阻为前提、并以注水为实施途径提出的基于界面修饰与氧化协同作用提高致密油可动性的技术设想。探索界面修饰和原油氧化协同作用须考虑界面修饰处理剂能否在氧化环境下保持功能稳定性,同时要形成相应的评价方法和指标等。

5 结 论

(1) 致密油藏是中国未来油气资源勘探开发的重要发展领域。中国致密油藏技术可采储量大,但依靠地层能量自然衰竭开发平均采收率仅为约 8%。致密油藏提高采收率技术一旦获得突破,将会缓解中国能源供给紧张局面,并为中国常规油藏开发技术提供借鉴。

(2) 中国致密油藏关键开发技术仍处于突破前的准备阶段。中国致密油藏存在相对更为复杂的成藏环境和发育相对更差的物性条件,致密油藏经济开发配套的关键技术还不成熟,亟需探索能够经济开发中国致密油藏开发的关键技术。

(3) 提高致密油藏采收率必须走勘探开发全过程“多维一体化”新路子。致密油藏经济开发是一项复杂的系统工程,倡导推行致密油藏地质与工程一体化、储层保护与增渗改造一体化、压裂增渗与增能一体化、洗油驱油一体化的“多维一体化”技术思路,探索多环节、多尺度、多场共同协调增渗增产机制,最终实现提高致密油藏采收率的目标。

(4) 基于界面修饰和原油氧化的协同注水模式将是提高致密油藏采收率的新途径。致密油藏开发以大型水力压裂改造为基础,基于界面修饰注水和油藏原油氧化实施油水流动多尺度渗流调控和改善油水可动性,实现储层增能增注,将是提高致密油藏采收率新的开发方式。

参 考 文 献

- [1] EIA. Tight oil remains the leading source of future U. S. crude oil production[EB/OL]. (2018-02-22). <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=35052>.
- [2] 刘新,安飞,陈庆海,等. 提高致密油藏原油采收率技术分析——以巴肯组致密油为例[J]. 大庆石油地质与开发,2016,35(6):164-169.
LIU Xin, AN Fei, CHEN Qinghai, et al. Analyses of the EOR techniques for tight oil reservoirs; taking Bakken-Formation as an example[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(6): 164-169.
- [3] 邹才能,丁云宏,卢拥军,等. “人工油气藏”理论、技术及实践[J]. 石油勘探与开发,2017,44(1):144-154.
ZOU Caineng, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Concept, technology and practice of “man-made reservoirs” development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 144-154.
- [4] 胡素云,朱如凯,吴松涛,等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):737-748.
HU Suyun, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 737-748.
- [5] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184.
ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [6] 李登华,刘卓亚,张国生,等. 中美致密油成藏条件、分布特征和开发现状对比与启示[J]. 天然气地球科学,2017,28(7):1126-1138.
LI Denghua, LIU Zhuoya, ZHANG Guosheng, et al. Comparison and revelation of tight oil accumulation conditions, distribution characteristics and development status between China and U. S. [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1126-1138.
- [7] 张君峰,毕海滨,许浩,等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J]. 石油学报,2015,36(2):127-137.
ZHANG Junfeng, BI Haibin, XU Hao, et al. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 127-137.
- [8] 肖佃师,卢双舫,姜微微,等. 基于粒间孔贡献量的致密砂岩储层分类——以徐家围子断陷为例[J]. 石油学报,2017,38(10):1123-1134.
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, JIANG Weiwei, et al. Classification of tight sandstone reservoirs based on the contribution of intergranular pores; a case study of Xujiaweizi fault depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1123-1134.
- [9] 贾培锋,杨正明,肖前华,等. 致密油藏储层综合评价新方法[J]. 特种油气藏,2015,22(4):33-36.
JIA Peifeng, YANG Zhengming, XIAO Qianhua, et al. A new method to evaluate tight oil reservoirs[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 33-36.
- [10] 李洋,雷群,刘先贵,等. 微尺度下的非线性渗流特征[J]. 石油勘探与开发,2011,38(3):336-340.
LI Yang, LEI Qun, LIU Xiangui, et al. Characteristics of micro scale nonlinear filtration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 336-340.
- [11] 白瑞婷,李治平,南珏祥,等. 考虑启动压力梯度的致密砂岩储层渗透率分形模型[J]. 天然气地球科学,2016,27(1):142-148.
BAI Ruiting, LI Zhiping, NAN Junxiang, et al. The fractal permeability model in tight sand reservoir accounts for start-up gradient[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 142-148.
- [12] 王永辉,卢拥军,李永平,等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报,2012,33(S1):149-158.
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 149-158.
- [13] 严向阳,李楠,王腾飞,等. 美国致密油开发关键技术[J]. 科技导报,2015,33(9):100-107.
YAN Xiangyang, LI Nan, WANG Tengfei, et al. Key technologies for tight oil development in the United States[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(9): 100-107.
- [14] 吴奇,胥云,张守良,等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报,2014,35(4):706-714.
WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 706-714.
- [15] 李忠兴,李健,屈雪峰,等. 鄂尔多斯盆地长7致密油开发试验及认识[J]. 天然气地球科学,2015,26(10):1932-1940.
LI Zhongxing, LI Jian, QU Xuefeng, et al. The experiment and recognition of the development of Chang 7 tight oil in Ordos Ba-

- sin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1932-1940.
- [16] 胡素云, 陶士振, 闫伟鹏, 等. 中国陆相致密油富集规律及勘探开发关键技术研究进展[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1083-1093.
HU Suyun, TAO Shizhen, YAN Weipeng, et al. Advances on continental tight oil accumulation and key technologies for exploration and development in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1083-1093.
- [17] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 352-358.
WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: connotation, optimization design and implementation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 352-358.
- [18] 赵惊蛰, 李书恒, 屈雪峰, 等. 特低渗透油藏开发压裂技术[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 93-95.
ZHAO Jingzhe, LI Shuheng, QU Xuefeng, et al. Fracturing technique of super-low permeability reservoir development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(5): 93-95.
- [19] 李忠兴, 屈雪峰, 刘万涛, 等. 鄂尔多斯盆地长7段致密油合理开发方式探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(2): 217-221.
LI Zhongxing, QU Xuefeng, LIU Wantao, et al. Development modes of Triassic Yanchang Formation Chang 7 member tight oil in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 217-221.
- [20] 张本艳, 党文斌, 王少朋. 鄂尔多斯盆地红河油田长8储层致密砂岩油藏注CO₂提高采收率[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 272-275.
ZHANG Benyan, DANG Wenbin, WANG Shaopeng, et al. CO₂-EOR in Chang 8 tight sandstone reservoir of Honghe oilfield in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 272-275.
- [21] 王国壮, 梁承春, 孙招锋, 等. 红河油田长6特低渗油藏多元复合酸降压增注技术[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(4): 96-101.
WANG Guozhuang, LIANG Chengchun, SUN Zhaofeng, et al. Decompression and augmented injection technology with poly-basic recombination acid for Chang-6 ultra-low permeability reservoir in Honghe oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(4): 96-101.
- [22] YU Wei, LASHGARI H R, WU Kan, et al. CO₂ injection for enhanced oil recovery in Bakken tight oil reservoirs[J]. *Fuel*, 2015, 159: 354-363.
- [23] IWERE F O, HEIM R N, CHERIAN B V. Numerical simulation of enhanced oil recovery in the middle Bakken and upper Three Forks tight oil reservoirs of the Williston Basin [R]. SPE 154937, 2012.
- [24] KURTOGLU B, SORENSEN J A, BRAUNBERGE J, et al. Geologic characterization of a Bakken reservoir for potential CO₂ EOR[R]. SPE 1619698, 2013.
- [25] SONG Chengyao, YANG Daoyong. Performance evaluation of CO₂ huff-n-puff processes in tight oil formations [R]. SPE 167217, 2013.
- [26] ADEKUNLE O O, HOFFMAN B T. Minimum miscibility pressure studies in the Bakken[R]. SPE 169077, 2014.
- [27] WANF Lei, TIAN Ye, YU Xiangyu, et al. Advances in improved/enhanced oil recovery technologies for tight and shale reservoirs [J]. *Fuel*, 2017, 210: 425-445.
- [28] GHADERI S M, CLARKSON C R, KAVIANI D. Evaluation of recovery performance of miscible displacement and WAG processes in tight oil formations[R]. SPE 152084, 2012.
- [29] HAWTHORNE S B, GORECKI C D, SORENSEN J A, et al. Hydrocarbon mobilization mechanisms from Upper, Middle, and Lower Bakken reservoir rocks exposed to CO₂[R]. SPE 167200, 2013.
- [30] TOVAR F D, EIDE O, GRAUE A, et al. Experimental investigation of enhanced recovery in unconventional liquid reservoirs using CO₂: a look ahead to the future of unconventional EOR [R]. SPE 169022, 2014.
- [31] 陆小兵, 王勇, 宋昭杰. 姬塬油田长8致密储层欠注机理研究及认识[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2014, 36(12): 236-239.
LU Xiaobing, WANG Yong, SONG Zhaojie. The mechanism of under-injection in Chang 8 dense reservoir in Jiyuan oilfield and its recognition[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2014, 36(12): 236-239.
- [32] 薛婷, 肖波, 刘云飞, 等. 姬塬油田黄3长8油藏欠注井治理对策[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(3): 100-102.
XUE Ting, XIAO Bo, LIU Yunfei, et al. Research on countermeasures for insufficient injectors of Huang-3 Chang-8 Reservoir of Jiyuan oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(3): 100-102.
- [33] 张翔, 蒋官澄, 郭海涛, 等. 表面活性剂降压增注机理及其在镇北油田的应用[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(2): 111-114.
ZHANG Shuo, JIANG Guancheng, GUO Haitao, et al. Mechanism of reducing injection pressure and increasing injection by surfactant and its application in Zhenbei oilfield[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013, 20(2): 111-114.
- [34] 付美龙, 王何伟, 罗跃, 等. 吴旗油田表面活性剂降压增注物模实验和现场试验[J]. *油田化学*, 2008, 25(4): 332-335.
FU Meilong, WANG Hewei, LUO Yue, et al. Mixed surfactant composition for injection well stimulation at low permeability Wuqi oil reservoirs: physical modelling and field trial results[J]. *Oilfield Chemistry*, 2008, 25(4): 332-335.
- [35] 朱焱, 高文彬, 李瑞升, 等. 变流度聚合物驱提高采收率作用规律及应用效果[J]. *石油学报*, 2018, 39(2): 189-200.
ZHU Yan, GAO Wenbin, LI Ruisheng, et al. Action laws and application effect of enhanced oil recovery by adjustable-mobility polymer flooding[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(2): 189-200.
- [36] 冯其红, 陈先超, 孙民笃. 聚合物驱后多元调驱体系提高采收率研究[J]. *油田化学*, 2012, 29(2): 231-235.
FENG Qihong, CHEN Xianchao, SUN Mindu. Experimental studies on multiple-profile control system to enhance oil recovery after polymer flooding[J]. *Oilfield Chemistry*, 2012, 29(2): 231-235.
- [37] 李海涛, 马启睿, 李东昊. 低矿化度注水提高砂岩储集层采收率的微观机理[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(2): 151-157.
LI Haitao, MA Qirui, LI Donghao. Microscopic mechanisms of low salinity water injection technology for sandstone reservoir EOR[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(2): 151-157.
- [38] 高涛, 赵习森, 党海龙, 等. 延长油田致密油藏注水吞吐机理及应用[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(4): 134-137.
GAO Tao, ZHAO Xisen, DANG Hailong, et al. Mechanism of cyclic water injection and its application in tight oil reservoirs in Yanchang oilfield[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2018, 25(4):

- 134-137.
- [39] 樊建明,王冲,屈雪峰,等.鄂尔多斯盆地致密油水平井注水吞吐开发实践——以延长组长7油层组为例[J].石油学报,2019,40(6):706-715.
- FAN Jianming, WANG Chong, QU Xuefeng, et al. Development and practice of water flooding huff-puff in tight oil horizontal well, Ordos Basin: a case study of Yanchang Formation Chang 7 oil layer [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(6): 706-715.
- [40] 程时清,汪洋,郎慧慧,等.致密油藏多级压裂水平井同井缝间注采可行性[J].石油学报,2017,38(12):1411-1419.
- CHENG Shiqing, WANG Yang, LANG Huihui, et al. Feasibility of inter-fracture injection and production for the same multistage fractured horizontal well in tight oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1411-1419.
- [41] 于海洋,杨中林,马恬,等.致密油藏多级压裂井异井异步注采可行性研究[J].石油科技通报,2018,3(1):32-44.
- YU Haiyang, YANG Zhonglin, MA Tian, et al. The feasibility of asynchronous injection alternating production for multistage fractured horizontal wells in a tight oil reservoir [J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(1): 32-44.
- [42] 赵继勇,樊建明,何永宏,等.超低渗—致密油藏水平井开发注采参数优化实践——以鄂尔多斯盆地长庆油田为例[J].石油勘探与开发,2015,42(1):68-75.
- ZHAO Jiyong, FAN Jianming, HE Yonghong, et al. Optimization of horizontal well injection-production parameters for ultra-low permeable-tight oil production: a case from Changqing Oilfield, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 68-75.
- [43] HAN Longyu, GU Yongan. Miscible CO₂ water-alternating-gas (CO₂-WAG) injection in a tight oil formation [R]. SPE 175108, 2015.
- [44] CHEN B, REYNOLDS A C. Ensemble-based optimization of the WAG injection process [R]. SPE 173217, 2015.
- [45] CHEN Yan, OLIVER D S, ZHANG Dongxiao. Efficient ensemble-based closed-loop production optimization [R]. SPE 112873, 2009.
- [46] 樊建明,杨子清,李卫兵,等.鄂尔多斯盆地长7致密油水平井体积压裂开发效果评价及认识[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):103-110.
- FAN Jianming, YANG Ziqing, LI Weibing, et al. Assessment of fracturing treatment of horizontal wells using SRV technique for Chang 7 tight oil reservoir in Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2015, 39(4): 103-110.
- [47] 樊建明,屈雪峰,王冲,等.超低渗透油藏水平井注采井网设计优化研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2018,40(2):115-128.
- FAN Jianmin, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Optimization study of the horizontal well and injection-production pattern in an ultra-low-permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2018, 40(2): 115-128.
- [48] 李忠兴,赵继勇,屈雪峰,等.超低渗透致密砂岩油藏水平井井网优化研究——以西峰油田长8油藏为例[J].西北大学学报:自然科学版,2015,45(5):787-794.
- LI Zhongxing, ZHAO Jiyong, QU Xuefeng, et al. The optimization for horizontal well injection-production pattern in ultra-low permeable tight reservoirs: a case of Chang 8 reservoir of Xifeng oilfield [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2015, 45(5): 787-794.
- [49] 赵继勇,何永宏,樊建明,等.超低渗透致密油藏水平井井网优化技术研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(2):91-98.
- ZHAO Jiyong, HE Yonghong, FAN Jianming, et al. Optimization technology for horizontal well pattern in ultra-low permeable tight reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(2): 91-98.
- [50] 司志梅,李爱芬,郭海莹,等.致密油藏压裂液滤液返排率影响因素室内实验[J].油气地质与采收率,2017,24(1):122-126.
- SI Zhimei, LI Aifen, GUO Haixuan, et al. Experimental study on the influencing factors of fracturing fluid flowback rate in tight reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 122-126.
- [51] ERWIN M D, BENNION D B. Brine imbibition damage in the Alpine/Colville River Field, Alaska [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2006, 45(6): 33-39.
- [52] 王洪伟.大规模压裂注水开发一体化技术在特低渗透油藏的应用[J].石油钻采工艺,2018,40(1):102-106.
- WANG Hongwei. Application of integrated large-scale fracturing and water flooding development technology in extra low permeability oil reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 102-106.
- [53] 洪亚飞.致密储集层补充能量方式分选及其界限[J].新疆石油地质,2018,39(3):340-344.
- HONG Yafei. Study on energy replenishment mode selection and its limit in tight oil reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(3): 340-344.
- [54] 薛建强,覃孝平,赖南君,等.超低渗透油田降压增注体系的研究与应用[J].岩性油气藏,2013,25(6):107-111.
- XUE Jianqiang, QIN Xiaoping, LAI Nanjun, et al. Research and application of depressurization and stimulation of injection well for ultra-low permeability oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 107-111.
- [55] 罗跃,陈文斌,郑力军,等.降压增注技术在低渗透油田的应用研究[J].断块油气田,2008,15(2):72-74.
- LUO Yue, CHEN Wenbin, ZHENG Lijun, et al. Application of depressurization and increasing injection rate technology in low permeability oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(2): 72-74.
- [56] 邓学峰,张永刚,赵静.渭北油田特低渗油藏表面活性剂降压增注矿场试验与评价[J].钻采工艺,2016,39(1):103-106.
- DENG Xuefeng, ZHANG Yonggang, ZHAO Jing. Evaluation and pilot test of depressurization and augmented injection by surfactant for low permeability Weibei oil reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 103-106.
- [57] 周福建,苏航,梁星原,等.致密油储集层高效缝网改造与提高采收率一体化技术[J].石油勘探与开发,2019,46(5):1007-1014.
- ZHOU Fujian, SU Hang, LIANG Xingyuan, et al. Integrated hydraulic fracturing techniques to enhance oil recovery from tight rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 1007-1014.
- [58] WANG Xiangzeng, PENG Xiaolong, ZHANG Shoujiang, et al. Characteristics of oil distributions in forced and spontaneous imbibition of tight oil reservoir [J]. Fuel, 2018, 224: 280-288.
- [59] 刘卫东,姚同玉,刘先贵,等.表面活性剂体系渗吸[M].北京:石油工业出版社,2007.

- LIU Weidong, YAO Tongyu, LIU Xiangui, et al. The surfactant flooding systems imbibition [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.)
- [60] 杨建, 康毅力, 李前贵, 等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 229-236.
- YANG Jian, KANG Yili, LI Qiangui, et al. Characters of micro-structure and percolation in tight sandstone gas reservoirs[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 229-236.
- [61] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [62] YU Haiyang, YANG Zhonglin, LUO Le, et al. Application of cumulative-in-situ-injection-production technology to supplement hydrocarbon recovery among fractured tight oil reservoirs: a case study in Changqing oilfield, China[J]. Fuel, 2019, 242: 804-818.
- [63] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1-5.
- HU Wenrui. Geology-engineering integration-a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [64] 章敬, 罗兆, 徐明强, 等. 新疆油田致密油地质工程一体化实践与思考[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 12-20.
- ZHANG Jing, LUO Zhao, XU Mingqiang, et al. Application of geology-engineering integration in development of tight oil in Xinjiang oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 12-20.
- [65] 王昕, 杨斌, 王瑞. 吐哈油田低饱和度油藏地质工程一体化效益勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 38-45.
- WANG Xin, YANG Bin, WANG Rui. Beneficial exploration based on geology-engineering integration in low-saturation oil reservoirs of Tuha oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 38-45.
- [66] 胡文瑞, 魏漪, 鲍敬伟. 中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 646-656.
- HU Wenrui, WEI Yi, BAO Jingwei. Development of the theory and technology for low permeability reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 646-656.
- [67] 罗平亚, 康毅力, 孟英峰. 我国储层保护技术实现跨越式发展[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 84-87.
- LUO Pingya, KANG Yili, MENG Yingfeng. China's reservoir protection technologies develop in leaps[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 84-87.
- [68] 姜帅, 宋兆杰, 李根, 等. 轻质油藏注空气提高采收率技术适应性探讨[J]. 中国矿业, 2016, 25(12): 82-86.
- JIANG Shuai, SONG Zhaojie, LI Gen, et al. Feasibility study on high-pressure air injection for EOR in light oil reservoirs[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(12): 82-86.
- [69] 李德祥, 魏东东, 张亮, 等. 胜利油田注空气二次采油技术评价研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(27): 49-53.
- LI Dexiang, WEI Dongdong, ZHANG Liang, et al. Air injection EOR for Shengli Oilfield: experimental and numerical simulation studies[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(27): 49-53.
- [70] 刘雪芬, 康毅力, 罗平亚, 等. 氟化物对致密砂岩气体渗流能力的影响[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 995-1003.
- LIU Xuefen, KANG Yili, LUO Pingya, et al. Impact of fluoride on seepage ability of tight sandstone gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 995-1003.
- [71] LIU Xuefen, LUO Pingya, KANG Yili, et al. Mechanisms of wetting modification by fluoride to mitigate phase trapping[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 494-501.
- [72] 刘雪芬. 超低渗透砂岩油藏注水特性及提高采收率研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- LIU Xuefen. Waterflood Characteristic and enhanced oil recovery for sandstone oil reservoirs with ultra low permeability [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [73] ZHAO Jinzhou, JIA Hu, PU Wanfen, et al. Sensitivity studies on the oxidation behavior of crude oil in porous media[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6815-6823.
- [74] YANG Jianjun, PU Wanfen, JIA Hu, et al. A comprehensive analysis of the properties of light crude oil in oxidation experimental studies [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 117(2): 979-984.
- [75] JIA Hu, NI Jihui, PU Wanfen, et al. New view on the oxidation mechanisms of crude oil through combined thermal analysis methods[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 118(3): 1707-1714.
- [76] HUANG S Y, JIA H, SHENG J J. Exothermicity and oxidation behavior of tight oil with cuttings from the Wolfcamp shale reservoir[J]. Petroleum Science and Technology, 2016, 34(21): 1735-1741.
- [77] 王正茂, 廖广志, 蒲万芬, 等. 注空气开发中地层原油氧化反应特征[J]. 石油学报, 2018, 39(3): 314-319.
- WANG Zhengmao, LIAO Guangzhi, PU Wanfen, et al. Oxidation reaction features of formation crude oil in air injection development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(3): 314-319.
- [78] CHEN Qiang, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Change in composition and pore structure of Longmaxi black shale during oxidative dissolution[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 172: 95-111.
- [79] 游利军, 康毅力, 陈强, 等. 氧化爆裂提高页岩气采收率的前景[J]. 天然气工业, 2017, 37(5): 53-61.
- YOU Lijun, KANG Yili, CHEN Qiang, et al. Prospect of shale gas recovery enhancement by oxidation-induced rock burst[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(5): 53-61.
- [80] 游利军, 杨鹏飞, 崔佳, 等. 页岩气层氧化改造的可行性[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 79-85.
- YOU Lijun, YANG Pengfei, CUI Jia, et al. Feasibility of oxidative stimulation in organic matter-rich shale gas reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 79-85.

(收稿日期 2019-02-19 改回日期 2019-11-24 编辑 王培玺)