

文章编号: 1000-0747(2017)01-0144-11 DOI: 10.11698/PED.2017.01.18

“人工油气藏”理论、技术及实践

邹才能^{1,2}, 丁云宏², 卢拥军², 刘先贵², 陈建军², 王欣², 杨正明²,
才博², 杨智¹, 何春明², 王臻², 骆雨田²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239000)

摘要: 低渗透、致密油气及页岩油气在全球能源格局中占据愈发重要的地位, 面临动用难度大、产量递减快、采收率低、开采成本高等亟需解决难题。为此提出“人工油气藏”开发新概念、新理念及技术方法新体系。提出以“甜点区”为基本单元, 对渗透性差的油气区采取压裂、注入与采出一体化方式, 形成一个“人工油气藏”, 以提高采收率并进行规模经济开发。通过井群开发、压裂造缝和针对性流体介质注入, 改变地下流体渗流环境和补充地层能量, 在“甜点区”单元内形成“人造高渗透区”与“重构渗流场”, 建立了“人工油气藏”地质、开发、生产、管理和决策综合信息管理系统, 实现低渗透、致密油气与页岩油气大规模、有效益、可持续开发。创建了基于大数据的三维地震地质“甜点区”评价技术、井群大平台开发技术、体积改造人工智能造缝技术、渗吸置换与能量补充开采技术、基于云计算的“人工油气藏”智能管理技术, 构建智慧油气田。在国内5大致密油气、页岩气区开展235井次先导性试验, 致密油压采效果比以往常规技术提高2倍, 页岩气实现商业开发, 展示出良好应用前景。图4表2参37

关键词: 致密油气; 页岩油气; 人工油气藏; 井群式开发; 体积改造; 渗吸置换; 提高采收率; 智能开发; 大数据; 云计算; 智慧油气田

中图分类号: TE3

文献标识码: A

Concept, technology and practice of “man-made reservoirs” development

ZOU Caineng^{1,2}, DING Yunhong², LU Yongjun², LIU Xiangui², CHEN Jianjun², WANG Xin²,
YANG Zhengming², CAI Bo², YANG Zhi¹, HE Chunming², WANG Zhen², LUO Yutian²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development - Langfang Branch, Langfang 065007, China)

Abstract: Oil and gas resources in low permeability and unconventional reservoirs are playing more and more important role in global energy supply, and are confronted with pressing problems in hard development, quick production decline, low recovery efficiency and high exploitation cost. Therefore, new development concept “man-made reservoirs” and a complete set of techniques and methods are proposed. With “sweet spots” as units, an integrated way of fracturing, injection and recovery is presented for the low permeability oil and gas resources to reconstruct the underground seepage field and petroleum output system and finally to realize enhancement of the recovery efficiency. Well-group development, fracturing and targeted fluid injection are applied to change the underground seepage field, supplement the formation energy, and form “man-made high permeability area” and “reconstructed seepage field”. By integration of information technology including big data, cloud computing, artificial intelligence etc., an integrated information management platform of “man-made reservoirs” including geology, development, production, management and decision has been set up, and large-scale, effective and sustainable development of this kind of resources are realized. Five series techniques are developed including 3D seismic geological evaluation for sweet spot area, well-group platform development, intellectual volume fracture, imbibition displacement and energy complement development, and intellectual management development based on cloud computing for “man-made reservoir”. In China, five blocks of shale gas and tight oil have been tested 235 times, and the effect of tight oil fracturing and output was 2 times better than that before, has achieved business development and showed bright perspectives.

Key words: tight oil and gas; shale oil and gas; man-made reservoir; well cluster development; volume stimulation; imbibition displacement; enhanced recovery; intellectual development; big data; cloud computing; smart field

引用: 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.

0 引言

低渗透、致密油气及页岩油气勘探开发面临三大难题：一是大面积低丰度，产量递减速度快，一般3年内产量递减达85%；二是能量补充难，采收率低，自然能量采收率仅1%~8%；三是开采成本高，高投入和低油价遏制了规模开发效益。中国乃至世界石油工业都面临资源劣质化与低油价运行双重压力。目前，致密油气、页岩油气勘探开发工业化刚刚起步；部分已开发常规低渗透老油田综合含水高达80%、可采储量采出程度达到75%；相当部分剩余储量通过传统二次采油、三次采油等技术难以有效动用开发。因此，研发低渗透、致密油气及页岩油气的经济有效开发理论及核心技术，对未来油气工业可持续发展具有意义。

笔者在2013年《非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学》一文中，侧重论述了非常规油气的地质内涵、资源潜力、方法技术、学科体系等方面的问题。近3年多来笔者在系统调研全球常规、非常规油气理论与勘探开发最新进展的基础上，结合致密油（页岩油）国家重点基础研究发展计划（973）等项目最新研究成果，2014年提出“人工油气藏”开发的概念与核心技术，组织中国石油勘探开发研究院廊坊分院等多学科团队，进行联合攻关研究、室内实验与工业化现场应用，推动“人工油气藏”创新工程取得显著效果。本文系统思考和阐述了“人工油气藏”开发的理论内涵、关键技术和应用实践，侧重论述了非常规、低品位油气资源有效产出、经济开发等方面的问题，力求为推动非常规、低品位油气资源有效益、可持续开发提供借鉴。

1 提出背景

低渗透与非常规油气资源在全球能源格局中占据愈发重要的地位。全球油气资源总量约 5×10^{12} t，其中低渗—致密石油达 4.495×10^8 t，占全球石油总量的48%^[1]；低渗—致密天然气 3.922×10^{12} m³，占天然气总量的89%。预计到2035年产量将分别占原油和天然气的10%和22%以上^[2]。低渗—致密油气已成为当前全球及未来能源发展的新领域，是重要油气接替资源^[2]。2015年，全球石油产量 43.6×10^8 t（其中非常规石油占11%），全球天然气产量 3.47×10^{12} m³（其中非常规天然气占23%），非常规油气的比例仍在逐步增加^[3-6]。在中国，低渗剩余储量、难动用储量以及非常规油气储量，已逐渐成为油气勘探开发的主体，中国近5年低渗—致密油气储量已占探明油气储量的70%~80%^[7-9]。

全球正在形成西半球的美国、东半球的中国两大主要非常规油气勘探开发区。美国经过30年的探索准备，突破常规油气地质开发理论技术，非常规油气成功实现对常规油气的“第一次革命”。美国页岩油气、致密油气等获得“革命性发展”，油气对外依存度大幅下降，持续推动美国“能源独立”战略实施。2015年致密气产量 1.317×10^8 m³，页岩气产量 4.217×10^8 m³，煤层气产量 3.95×10^8 m³，致密油产量 2.1×10^8 t，美国天然气基本实现自给，石油对外依存度已降至33%^[10-16]。形成3项革命性创新成果：①以纳米油气连续聚集为核心的地质理论革命；②以长水平井体积压裂为核心的工程技术革命；③以多井平台式“工厂化”开采的生产革命。页岩气勘探开发“黑色页岩革命”是石油工业“黑天鹅事件”，导致2014年全球油价暴跌并仍低位运行，出乎意料而又深刻地改变油气工业，深刻影响世界油气供给态势、能源格局和大国博弈战略。在低油价大态势下，美国非常规油气正在通过以“降成本、求生存”为重点的3个技术与管理创新，进行自我“第二次革命”，一是提高单井产量和采收率，实现技术创新降成本；二是打井不压井和只释放“甜点区”中的高产井，实现方法创新降成本；三是规模裁人与全面市场机制，实现管理创新降成本。美国非常规油气“两次革命”对世界石油工业科技、油气供给版图、新能源发展等将产生深远影响。

中国的非常规油气经过10年的攻关创新^[17-24]，致密油气及页岩气等获得“战略性突破”。2015年致密气产量 3.60×10^8 m³，发现了鄂尔多斯苏里格、四川须家河组2个万亿立方米级致密大气区。页岩气发现了涪陵、长宁、威远3个千亿立方米级海相页岩气大气田，已提交探明地质储量 5.441×10^8 m³。2015年页岩气产量 4.5×10^8 m³。落实了鄂尔多斯新安边、松辽扶余、准噶尔吉木萨尔3个亿吨级致密油大油区，2015年致密油产量 1.50×10^4 t。煤层气规模开发初见成效，形成沁水、鄂尔多斯2个生产基地，2015年煤层气产量 4.4×10^8 m³，中国非常规油气基本实现工业化发展。

中国的低渗透与非常规油气实现规模效益开采仍面临地质、开发等多方面挑战。由于主要是多旋回叠合盆地，非常规油气聚集的构造动力学、沉积环境、烃源岩分布、储集层非均质性、油气水关系、地层能量等方面都具有特殊性。致密油气面临储集层非均质性强、“甜点体”难刻画、水平井眼轨迹难控制、油气层测井难识别、致密储集层改造难度大等不利因素，需要创新具有中国特色的陆相非常规油气开发理论技术。页岩气面临地表条件复杂、埋藏深度大、管网设

施不完善、3 500 m 以深工程技术不具备、寒武系页岩热演化程度高、形成条件复杂、陆相—海陆过渡相页岩气未突破等挑战。煤层气面临气水分布复杂、富集规律不清、800 m 以深开采技术不具备、储集层改造难度大等问题。页岩油面临泥页岩非均质性强、黏土矿物含量高、有机质成熟度较低、原油流动性较差、水平井压裂技术不适用等难题。

全球油气勘探开发大趋势是高精度勘探、规模化开发、智能化与协同化发展。地震从二维地震,向大面积高分辨率三维大数据跨越。勘探从常规圈闭成藏,向非常规连续型“甜点区”延伸。开发从天然能量自然生产,向人工能量压裂驱替开采。工程从直井单井平台向水平井多井大平台“工厂化”生产转变。采油从多次提高采收率向一次性极限提高采收率发展。运行管理从多工种协调,向大数据云计算智能化协同发展;经费投入从单点与单环节考虑向全系统与多学科降低成本转化。这些变化趋势为非常规油气等资源规模效益开发提供新的技术路线。

高油价背景下,基于油气普遍在微纳米级孔喉系统大面积连续型聚集理论,利用水平井体积压裂技术,实现了部分非常规油气的动用。目前中低油价形势下,沿袭之前批量钻井、压裂、开发生产,递减快、收益慢,难以实现效益开发。以巴肯致密油为例,开发 3 年后,水平井单井年产量仅为初期产量的 15%,预计采收率 3.6%~8.4%。因此,亟需探索形成低成本、高效益、一体化开发理论和技术,推动低品位与非常规油气持续发展。

2 “人工油气藏”开发理论内涵

2.1 “人工油气藏”概念

低渗透与非常规油气有 3 个关键标志,一是油气大面积、低丰度连续分布,资源丰度低;二是渗流能力差,无自然稳定商业产量;三是储集层能量容易衰竭,能量补充较难。非常规的致密油气、页岩油气并没有常规油气藏的统一油、气、水边界和温度压力系统,这给开发带来更加严峻的挑战。为破解经济开采困局,提出“人工油气藏”概念和开发理念。即通过优选“甜点区”和压裂形成“人造高渗透区”,人工形成高丰度油气藏来进行开发。而常规油气是“自然”开发。

“人工油气藏”概念是:以油气“甜点区”为单元,在其范围内通过科学合理井群部署,用压裂、注入与采出一体化方式,形成“人造高渗区,重构渗流场”,改变岩石的润湿性、应力场、温度场、化学场及其油气的流动性,构建地下油气产出机制,大幅改变

地下流体渗流环境和补充地层能量,人工干预实现地下油气规模有效开发。简称油气“人工”开发。

“人工油气藏”改造过程中关键是在“甜点区”单元内形成“人造高渗透区”和“重构渗流场”。“人造高渗透区”是指通过压裂改造将极弱—弱渗流能力的油气储集体改造为缝网体系,提高油气流动能力。“重构渗流场”是“人工油气藏”开发的理论核心。通过地下渗流场的变化来导致地下应力场、化学场和温度场发生变化。图 1 为“人工油气藏”渗流场-应力场-化学场-温度场“四场”作用示意图。从图中可以看出:在造缝过程中,地下渗流场发生变化,裂缝内流体压力的变化改变了裂缝宽度和长度,而这种改变也产生了应力场的变化,而远场应力和裂缝诱导应力的变化也对缝宽和缝内流体压力形成约束。在压裂过程中酸-岩反应形成热源,影响“人工油气藏”温度场的变化,而温度的变化也影响化学反应速率及与矿物反应进程的化学稳定性。随压裂液进入地层的热源与储集层温度有差异,温度变化引起热应力以及与温度有关的岩石力学性质变化。压裂液在裂缝和基质中的渗流带动热量的迁移,形成对流换热,影响温度场的变化。温度场的变化影响流体性质,如流体密度、黏度随温度而变化。通过“四场”变化关系建立大井群式缝网控藏流动系统是“人工造藏”的重要途径。在“甜点区”单元特定面积体积范围内,通过井群式的“四场”联合变化,实现大区域范围内的裂缝控藏。在单井影响范围内,通过“人造高渗透区”的体积改造实现井控区域内的“人工造藏”;在单缝范围内,通过渗吸置换、流体改质等措施实现提高采收率目的。

常规圈闭油气藏具有明确的面积体积开采范围边界和较高渗流能力,流体流动遵循达西定律,具有统一

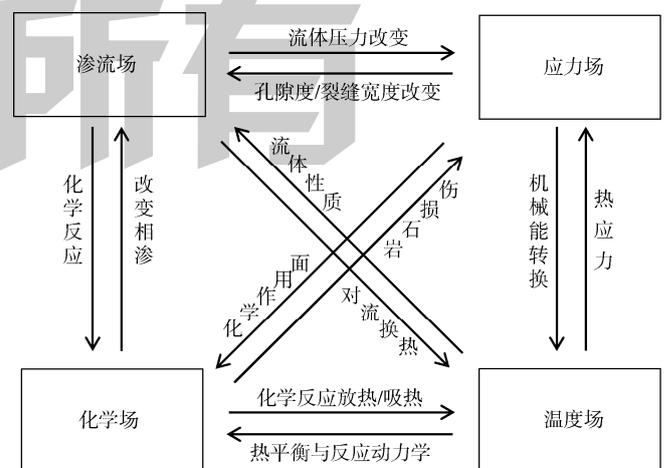


图 1 “人工油气藏”渗流场-应力场-化学场-温度场“四场”作用示意图

油气水界面，已有系统配套的高效经济开采技术体系。而非常规的致密油气、页岩气等虽然大面积、低丰度、没有统一的油气水边界和温度压力系统，但通过建造“人工油气藏”后，完全可以建立起类似于一套常规圈闭油气藏的开发技术方法体系，从而达到高效和有商业意义的储量开发，获得更多工业性油气产量。

2.2 “人工油气藏”开发理念

“人工油气藏”开发理念：是以低渗透及非常规

致密油气及页岩油气为对象，基于地震资料为核心的大数据地质甜点评价分析、井群为核心的“工厂化”大平台开采方式、云计算为核心的智能管理系统，将地下整个“甜点区”系统改为一个“人造油气藏”，利用造缝、蓄能、驱替、改质等技术措施，人工建立并形成较大储量规模区，以“甜点区”单元进行统一的开发采油设计部署，提高整个“甜点区”产量，同时大幅提高油气采收率。“人工油气藏”开发模式见图2。

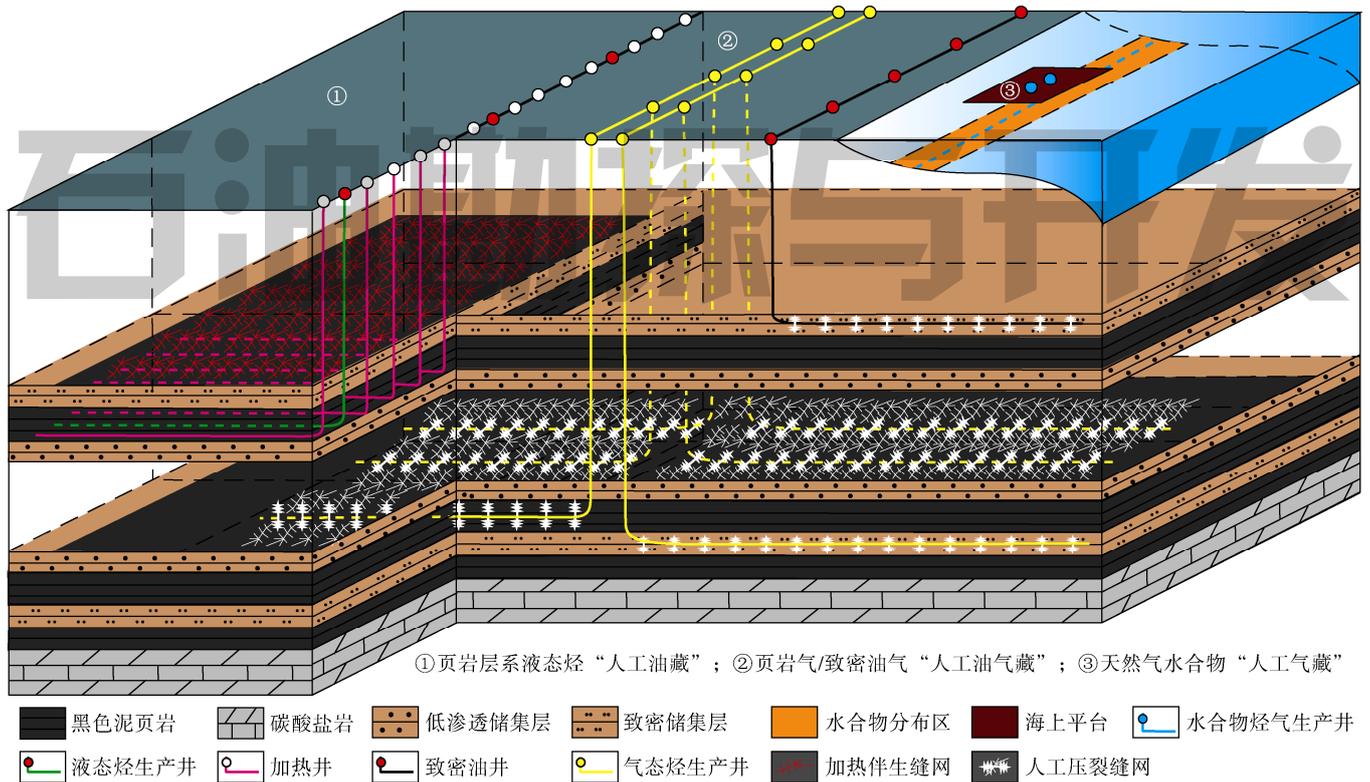


图2 “人工油气藏”开发模式

2.3 “人工油气藏”与常规油气藏开发区别

“人工油气藏”开发从低渗透及非常规油气分布特点出发，利用地震大数据、云技术、数字化等对其精细化评价，采用“勘探-开发-工程一体化”的理念，基于井群式开发模式，运用水平井体积压裂+渗吸置换、原位改质、多轮次蓄能等工程和技术手段，通过“人工”改造并合理利用渗流场、应力场、化学场、温度场“四场”变化，建立一体化的人工裂缝网络油气藏流动体系，形成“人造高渗透区”系统，使地下基质微纳米孔喉大面积相互连通，构成“人工化”的油气产出通道，进行人工智能化管理，最终实现低效储量的高效动用、无效储量的有效动用。

常规油气藏开发是在单个圈闭中，依靠储集层自身较高渗透率、天然能量和较易补充能量的技术实现油气“天然”开发，主要采取“控藏”开发。“人工油

气藏”开发是针对利用自身渗透率无法实现规模效益开发的非常规油气而提出，以往采用的单井单点的压裂改造方式对非常规致密油气、页岩油气等难以形成规模效益，同时无法进行系统能量补充，开发效益和采收率很低。采取“人工造藏”，可以形成大面积、高效益、高采收率、规模化的开发方式，为非常规致密油气、页岩油气开发提供了更加先进的理念、科学高效的开发方式，形成一条与目前非常规油气藏单井衰竭式开发技术完全不同的路线。

3 “人工油气藏”开发核心技术

经过攻关与实践，“人工油气藏”开发已形成5项核心技术系列。主要包括基于大数据的三维地震地质“甜点区”评价技术、井群大平台“人工造藏”技术、体积改造人工智能造缝技术、置换驱油与能量补充开

采技术、基于云计算的“人工油气藏”智能管理技术等,构建智慧油气田。

3.1 基于大数据的三维地震地质“甜点区”评价技术

在大面积三维地震资料解释基础上,通过地质评价为识别地下油气空间分布、井群部署、整体开发提供地质依据。中国陆上松辽、渤海湾、四川、鄂尔多斯等许多盆地已采用高精度三维地震采集,基本实现千平方千米乃至万平方千米级连片三维地震采集与资料处理,具有“人工油气藏”三维大数据地质的良好资料基础。

三维地震地质大数据“甜点区”评价技术,充分利用大数据信息技术^[25-30]和岩性、物性、烃源岩、含油性、脆性、地应力、各向异性等地质、测井参数标定,制作多参数岩石物理图版进行储集层地震预测,建立反映地下实际情况的地质模型来有效识别岩性、预测厚度、裂缝和脆性。对低品位、非常规油气储集层进行精细刻画,最终综合预测“甜点区”。运用三维可视化技术和虚拟现实系统,将油气藏地质体表面和内部详细信息直观、形象展示,帮助研究人员快速、全面掌握油气区地质结构,准确、高效解析地下地质现象和规律,构建每个时空实体局部的实时动态模型。全面掌握低渗透及非常规油气区地质信息,提高复杂地质环境下非常规油气勘探开发成功率。

三维地震地质大数据“甜点区”评价技术,核心是在系统三维地震资料分析研究及地质综合评价基础上,优选相对高孔渗储集层区、高含油气区及有利工程的脆性高地区等作为“甜点区”。在平面上刻画出开发井群的面积范围,在纵向上刻画出工程施工改造的有利井段。

3.2 基于大平台井群“人工造藏”开发技术

该技术是将致密油气、页岩油气分布区域划分为若干“甜点区”单元,每个“甜点区”单元系统作为一个造藏区,用一个大平台采用水平井、大斜度井等多井型,对不同层系、不同类型油气区进行开发井群设计,整体部署若干个井群,在整个造藏区科学系统地实施钻井、压裂和补充能量差异化设计与“工厂化”施工。在特定的面积、体积范围内将地下大面积、连通性不太好的含油气区进行人工改造,形成一系列连片的相对高渗透区,从而形成一个人工改造的“类油气藏”。进而用类似于常规油气藏的方法对非常规油气藏进行开发,实现井群的智能化管理,大幅度降低了开发工程费用,同时大幅提高油气采收率。

“甜点区”单元的分级划分就是在“有利区”范

围内再进行系统优化,选出地质条件更好、工程施工条件最优的作业单元。“甜点区”单元确定主要依据储集层参数综合评价。实验和矿场结果表明:脆性特征参数、混合润湿指数和地层压力系数越大,储集层开发效果越好,反之越差。在考虑“人工油气藏”研究对象的特征后,增加了脆性特征参数、混合润湿指数和地层压力系数3个参数,提出“人工油气藏”储集层“8参数”评价方法。研究表明:主流喉道半径、可动流体含量、地层压力系数、脆性特征参数和混合润湿指数与开发效果正相关,拟启动压力梯度、黏土矿物含量和原油黏度与开发效果负相关,对8个储集层评价参数进行归一化处理,得到其储集层综合评价系数 F_{cei} 为:

$$F_{cei} = \ln \frac{(S/S_{std})(R/R_{std})(B/B_{std})(P/P_{std})(I/I_{std})}{(\lambda/\lambda_{std})(M/M_{std})(\mu/\mu_{std})} \quad (1)$$

式中 B ——脆性指数,%; F_{cei} ——储集层综合评价系数,无因次; I ——混合润湿指数,无因次; M ——黏土矿物含量,%; P ——地层压力系数,无因次; R ——平均喉道半径, μm ; S ——可动流体含量,%; λ ——拟启动压力梯度, MPa/m ; μ ——原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。下标: std ——对应参数的标定值。

储集层综合评价系数越高,越有利于进行“人工油气藏”开发。因此,按照储集层综合评价系数,划分“甜点区”单元,进而确定井群部署方式。

井群“人工造藏”开发技术与常规井组开发技术不同:①“人工造藏”开发技术利用部署合理井群来“造藏”才能开发,而常规井组开发技术是通过合理井组部署来开发油藏;②“人工造藏”开发需综合考虑注入地下压裂液的能量、驱替和渗吸等作用来设计井群,后期调整难度大,需在井群内井网一次成型,充分发挥各井的协同作用,避免后期不断改进加密,以提高开发的整体性,而常规井组开发技术仅依据能量驱替作用而设计井组,后期调整余地大,生产过程中可以根据需要不断调整井网来提高其开发效果;③“人工造藏”开发面积、体积更大,对全油藏的整体改造避免了目前非常规油气区开发采用压裂井各井独立、人工改造体积较小而且非常规油气连通性不好的缺点;④“人工造藏”开发实现了从单井、井组到井群的跨越,可在全“甜点区”范围内科学、系统实施钻井、压裂和补充能量差异化设计,“工厂化”钻井、压裂和补充能量,实现井群的智能化管理,提升优化了决策科学性,大幅度降低了开发工程费用,实现规模效益开发。

3.3 体积改造人工智能造缝技术

该技术是从油气区整体化出发,利用大型岩石裂

缝扩展物理模拟和数值模拟等手段，在揭示人工裂缝扩展机理及主控因素基础上，进行低渗透及非常规油气区储集层裂缝体系预测、将精细控缝工艺和智能材料结合，进行体积改造造缝，最终完成人工智能造缝改造。

3.3.1 裂缝体系预测技术

利用大型岩石裂缝扩展物理模拟和数值模拟等手段，并结合压裂矿场实践，构建考虑天然裂缝发育程度、岩石脆性、两向水平应力差和压裂液流度的不同岩性储集层（页岩、致密砂岩、致密碳酸盐岩和煤岩等）压裂改造图版，如图3所示。从图中可以看出：滑溜水压裂液流度越低、水平主应力差越小、天然裂缝越发育，岩石脆性越高，人工造缝的裂缝形态越复杂，越容易形成缝网。使用该图一是在不同储集层条件下，使用不同压裂液流度来实现所需要的裂缝形态；二是将天然裂缝发育程度、岩石脆性、两向水平应力差等3参数相结合，确定在不同储集层条件下，形成不同裂缝形态所需要的条件。图3中分为4个压裂改造区域，分别为常规分段、细分切割、分支缝和缝网区域。在需要复杂裂缝，但受工程技术水平限制无法实现所需裂缝形态的区域，是科技进步需要进一步努力和解决的问题，即技术进步空间。改造图版在鄂尔多斯、松辽、渤海湾、四川等盆地应用，指导了每年千余口井的压裂改造。提出四川龙马溪组页岩储集层天然裂缝发育、脆性地层压裂的裂缝形态应以缝网系统为主，在设计和实施时主要考虑提高缝网中裂缝的复杂化程度；松辽盆地扶余油层天然裂缝不发育，压裂裂缝形态主要以双翼对称裂缝形态为主，压裂设计时主要考虑细分切割改造技术。

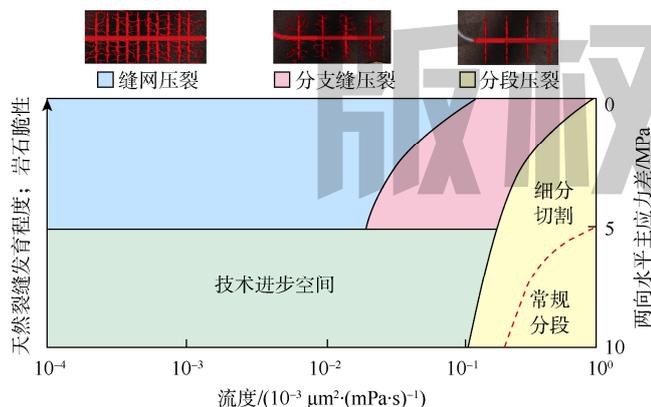


图3 不同岩性类型“四参数”人工压裂改造图版

3.3.2 体积改造造缝技术

该技术由单井人工智能造缝、钻井-完井-改造一体化造缝和井群“工厂化”压裂3部分组成。

单井人工智能造缝技术，是将人工裂缝精细改造^[31]与智能材料结合实现人工智能造缝。目前形成两种人工裂缝精细改造技术：一种是以“快钻桥塞组合簇射孔”为主的细分切割改造方式，主要针对不利于形成复杂裂缝的致密油储集层，通过分段多簇压裂，实现细分切割储集层改造；第二种是复杂裂缝压裂改造方式，主要针对天然裂缝发育的脆性储集层，采用大排量、暂堵转向等方式，通过水平井裂缝间距优化形成复杂裂缝系统，在不同特征储集层的缝端、缝内、缝口加入多种储集层改造智能材料体系，改变储集层岩石润湿性，实现定点位置的人工裂缝转向。

传统单纯从工程角度出发的压裂设计已无法满足低渗透及非常规油气地质、油藏与工程一体化的需求，必须进行钻井-完井-改造一体化造缝，要求设计人工裂缝与油气藏有机匹配。目前采用“逆向设计、正向实施”模式完成。逆向设计是从体积改造技术逆向追溯选择改造工具、完井方式、钻井方式和井型设计的路径进行选择，正向实施为从井型设计、钻井方式、完井方式、改造工具到压裂施工的路径进行。它改变了以往油气井依靠自然能量、钻井在前、改造在后的工程实施工作流程，实现了人工化改造为主的新思路，有利于选择地下最优储集层裂缝改造技术，通过最佳钻完井方案和采用大平台井组钻井最后精准控制地下“人工油气藏”人工裂缝系统。

井群“工厂化”压裂技术，主要考虑井间作用，实施整体区块的差异化井群压裂改造。目前现场有两种井组工厂化压裂技术。一是多井同步压裂，充分利用井间应力干扰和应力改向，促使水力裂缝扩展过程中相互作用，增加水力裂缝改造体积，获得连通多井井群式的复杂裂缝网络。二是拉链式压裂，主要是将两口平行、距离较近的水平井井口连接，共用一套压裂车组进行24h不间断的交替分段压裂，在对一口井压裂的同时，对另一口井实施分段、射孔作业。该技术可实现任意段数的压裂，段与段之间的等候时间在2~3h，作业效率提高3倍以上。新疆吉木萨尔凹陷致密油单井压裂水平段长1300m，单井总砂量1300m³，总液量16000m³，采用1平台4口水平井平均20段压裂作业，施工效率提高3倍，单井有效压裂体积达3000×10⁴m³，通过井组式压裂储集层改造的范围大幅度增加。

3.3.3 裂缝体系有效性评价技术

裂缝体系有效性评价关系到“人工油气藏”是否科学建成并影响后续开发，是“人工油气藏”渗吸置换与能量补充开采技术的基础。目前主要综合利用微地震监测、微形变和示踪剂等技术，分析压裂裂缝体

系的复杂程度，确定地下真实压裂裂缝体系。微地震监测技术分析由压裂诱发的岩石破裂或错动产生的微地震信号。通过微地震资料评价来监测岩石破裂，从而确定水力裂缝空间发育情况。该技术能够实时监测裂缝长度、高度和方位，并常用来评估储集层改造体积。微形变技术是利用水力裂缝张开引起的储集层变形，通过部署在地面和井下的高灵敏度设备监测水力裂缝诱发的变形场梯度，经过反演获得裂缝参数。示踪剂技术是通过压裂时注入示踪剂，对比注入前后裂缝高度或进液段长度的测量结果，来确定裂缝参数，主要获得井筒周围裂缝高度、宽度、方位和倾角。在此基础上，利用人工裂缝反演和数值模拟等技术，建立能够反映地下实际情况的压裂裂缝体系模型。根据该模型，可以评价体积改造的有效性、预测油气生产动态和补充能量开发方式。

3.4 渗吸置换与能量补充开采技术

渗吸置换和能量补充开采技术是大幅度提高“人工油气藏”开发效果的关键。

3.4.1 渗吸置换开采技术

储集层润湿性的评价是渗吸置换开采技术的基础。低渗及非常规油气储集层特点是储集层矿物成分的复杂性及其分布的随机性。这就决定了岩石孔隙表面的润湿性是不均匀的。据此提出了混合润湿概念，并利用核磁共振技术建立了低渗及非常规油气藏混合

润湿性测试方法。研究认为：低渗透及非常规油气储集层多为混合润湿性，即在储集层中有一部分为亲水储集层，另一部分为亲油储集层。如果亲水部分大于亲油部分，则储集层总体呈现为亲水性；如果亲油部分大于亲水部分，则储集层总体呈现为亲油性。研究表明中国典型致密油区总体润湿性多为弱亲水或弱亲油。根据储集层的混合润湿性特点，用注入表面活性剂或纳米材料来改变储集层的润湿性，将亲油界面转变成亲水界面来大幅度提高“人工油气藏”置换驱油速度和效率。研发的新型压裂液体系通过疏水缔合作用吸附于原油表面使岩心变为水湿状态；与原油形成离子对将原油增溶到表面活性剂胶束内，使原油剥离岩面降低油水界面张力，使得更多的原油成为可动油，从而提高原油的采收率。该体系在渗吸实验时，岩心渗吸效率达到 67.3%，比常规渗吸效率高出 10 个百分点。

渗吸置换技术贯穿于“人工油气藏”开发全生命周期，在压裂液蓄能开发和补充能量开发过程中起着重要作用。致密油压裂液渗吸置换的采油过程如图 4 所示。

压裂液渗吸置换技术包括压裂液注入、焖井、返排 3 个阶段和 4 个生产过程。在注入和焖井阶段中渗吸置换和驱替起主导作用，主要包含渗吸置换和缝间、段间驱替两个过程。在渗吸置换过程中（见图 4a），由于致密油储集层具有微纳米级喉道，孔喉半径小，引起的毛细管力大，在体积压裂注入大量压裂液形成

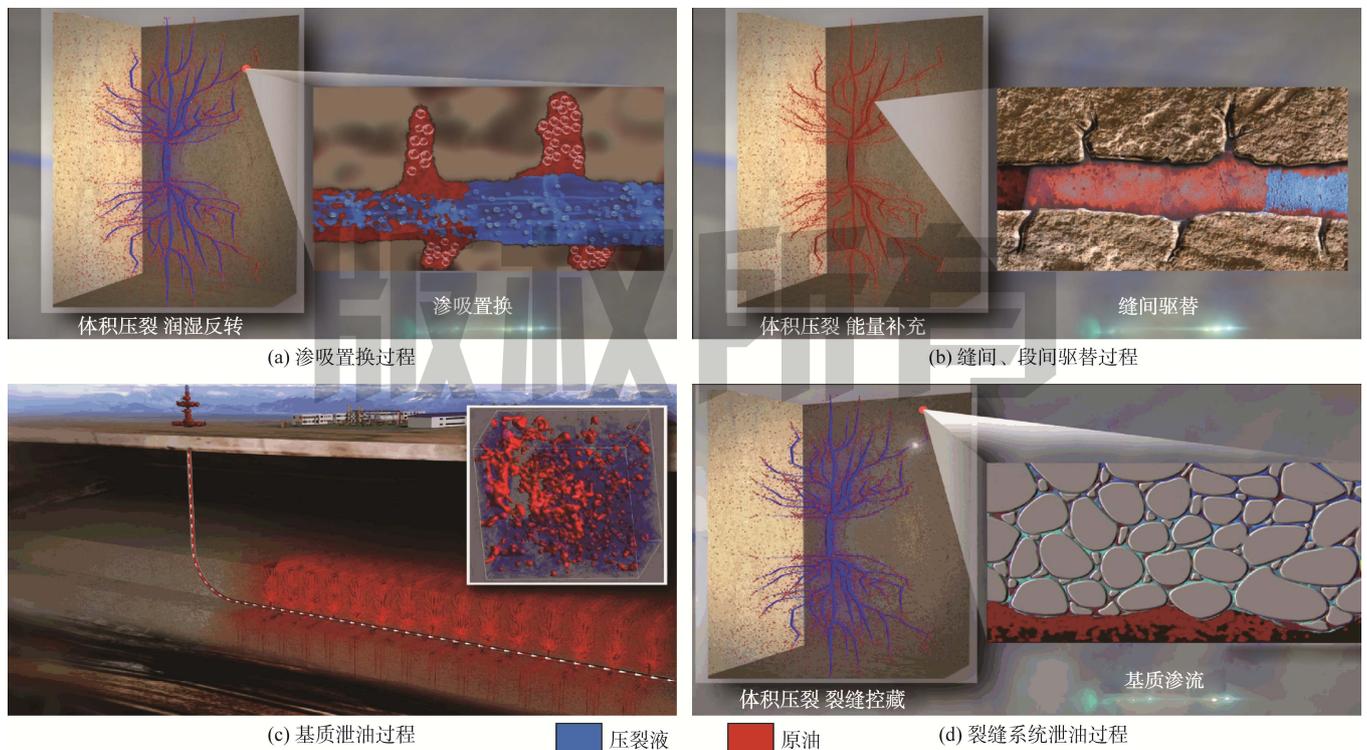


图 4 压裂液渗吸置换采油 4 个连续过程

复杂裂缝系统的同时，通过注入压裂液体系改变岩石的润湿性，使岩石由亲油逐渐转变成亲水，实现润湿反转。通过毛细管力引起渗吸效应，实现油与压裂液的渗吸置换作用，即将基质岩块内的油置换到人工裂缝系统，而把压裂液置换到基质系统。在缝间、段间驱替过程中（见图4b），由于储集层非均质特点，压裂液向裂缝和基质推进时，在不同压裂段间的流动存在流动压差和非均匀驱替，从而导致不同人工裂缝间和改造段间的相互驱替，将基质和裂缝中的油驱替出来，实现人工裂缝间的驱替作用。在返排阶段，主要包含基质和裂缝系统泄油2个过程（见图4c和图4d）。返排时，井筒和井口附近的人工裂缝系统压力下降较快处于相对低压区，而基质和远离井口端的微裂缝系统压力下降慢处于相对高压区，这些压差导致了原油从基质向微细分支裂缝、微细分支裂缝向人工压裂缝、人工压裂缝向井筒的渗流，将原油采出。通过大排量、大液量的渗吸置换，压裂液不但补充了地层能量，而且还提高了采出程度。

实验研究表明：对于不同渗透率级别的储集层，随着渗透率的降低，驱替采出程度降低，而渗吸采出程度明显增加（见表1）。通过矿场实践，研究确定储集层

润湿性、人工裂缝开启的接触面积、矿化度、黏度、表面活性剂、pH值是6项影响压裂液渗吸置换的主控因素。岩石越亲水，渗吸效果越好，由强水湿、中等水湿、弱水湿到油湿，渗吸效果逐渐变差。同等条件下人工裂缝开启的接触面积越大，渗吸效果越好；通过改变压裂液的矿化度、黏度、表面活性剂及pH值，可以提高渗吸作用效果。

表1 不同渗透性储集层渗吸及驱替采出程度对比

渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	总采出 程度/%	渗吸 采出程度/%	驱替 采出程度/%
>1	58.72~58.82	3.53~5.42	53.40~55.20
0.3~1.0	41.14~49.63	5.36~6.32	35.20~44.27
0.1~0.3	34.21~58.55	1.54~27.56	6.65~54.52
<0.1	39.81~54.29	4.26~35.89	10.55~44.73

结合中国典型致密油田岩心的渗透率、孔隙度、裂缝发育情况和储集层岩石润湿性特征，与物理模拟实验成果及压裂实践相结合，给出了中国典型致密油储集层渗吸置换技术决策模式（见表2）。该模式在准噶尔盆地玛湖等区块应用49口井，增产改造效果显著，压后效果比常规技术提高2倍，为数十亿吨低渗透及致密油储量有效开发提供技术保障。

表2 中国典型致密油储集层渗吸置换改造技术体系

储集层	储集层特征	润湿性特征	水力裂缝特征	渗吸置换改造技术决策模式
玛湖三叠系百口泉组	低渗、特低渗、裂缝不发育	弱亲水	单一裂缝	直井缝网-水平井分段，低界面张力液体体系，短关井时间
鄂尔多斯三叠系延长组	致密、裂缝发育	弱亲油	复杂裂缝	水平井复杂缝网体积改造，润湿反转液体体系，长关井时间
松辽盆地白垩系扶余油层	致密、裂缝不发育	弱亲水	单一裂缝	水平井细分切割体积改造，低界面张力液体体系，长关井时间
渤海湾束鹿凹陷古近系沙三段下亚段	致密、多层系、裂缝发育	弱亲油	复杂裂缝	水平井复杂缝网体积改造，直井分层缝网压裂，酸液+润湿反转液体体系，长关井时间
柴达木盆地西部古近系下干柴沟组上段	致密、裂缝发育	弱亲水	复杂裂缝	水平井复杂缝网体积改造，低界面张力液体体系，长关井时间
三塘湖盆地二叠系条湖组	致密、裂缝较发育	弱亲水	分支裂缝	水平井分支化体积改造，低界面张力液体体系，长关井时间

3.4.2 能量补充技术

“人工油气藏”经过压裂液补充能量、注水吞吐或注气吞吐、持续补充能量采油3个阶段，可大幅提高“人工油气藏”开发效果。第1阶段为体积压裂改造后，压裂液补充能量阶段。在对鄂尔多斯盆地致密油体积压裂过程中，大量压裂液的注入增加了近井地层压力。西峰油田西233区块YP1井地层压力增加了2.4 MPa，改善了近井地带的渗流环境。第2阶段为注水吞吐或注气吞吐采油阶段。当压裂液不能较好补充地层能量时，需要外界进行能量补充。致密油储集层由于微纳米级孔喉发育，用传统注采井网难以建立有效驱替压力体系，因而提出了“人工油气藏”注水吞

吐或注气吞吐来进行能量补充的开发方式。高压大模型物理模拟实验结果表明：注水吞吐或注气吞吐可以有效提高致密油的开发效果，注气（CO₂）吞吐的采收率为21.5%，比弹性驱采收率高12.5个百分点。第3阶段为持续补充能量采油阶段。当注入流体吞吐采油经过多轮次后，吞吐效果变差，而此时储集层经过多轮次吞吐后，储集层渗流阻力降低，通过补打加密井，建立有效驱动的注采井网体系，进行持续补充能量采油。目前鄂尔多斯盆地典型致密油区应用压裂液补充能量和注水吞吐补充能量技术，取得较好应用效果。

3.5 基于云计算的“人工油气藏”智能管理技术

基于云计算^[32-36]的“人工油气藏”智能管理技术

方法,统一协调管理大量油田计算资源和外部信息资源,形成集勘探-开发-工程-生产为一体的油田信息智能系统,为油气藏开发提供管理手段和科学决策依据。该技术充分利用“人工油气藏”的信息化资源,高效分析油气田内外部数据,引入专家诊断,实时监测油气田生产状态,优化生产开发方案,实现资源的高效配置,大幅度降低企业成本。可根据油田目前基础设施及系统架构,构建“人工油气藏”的混合云,即基础设施云、功能服务云和业务应用云,实现油气田智慧开发。

基础设施云以物联网技术为基础,综合油田内部生产数据和外部油价数据,使用大量信息采集设备和传输设备,集中油田各处的分散资源,有机结合油田产量控制与油价波动,高效调动生产资料。基础设施云负责采集传输两部分数据:一部分为内部因素数据,以油田储集层物性参数和生产参数为主,关系油气藏开发的难易程度;另一部分为外部因素数据,以原油价格和开采成本为主,关系油气藏开发的经济效益。

功能服务云提供油气藏有效经营管理服务,通过储集层分类评价和经济评价形成开发方案库,建立海量数据与开发方式的联系,数字化油气田储集层特征和生产过程。利用油气井生产参数反馈开发方案效果,比对方案库方案,传递最优方案给业务应用云,辅助决策生产。

业务应用云直接面向油田生产者,利用通信终端设备访问智能开发管理系统。用户只需登录油田局域网即可获取云平台的资源,包括油田数据采集、生产状况监控、开发方案制定等,实现各地各级专家对系统的管理与升级,结合评价系统优化调整开发方案。

4 工业试验成效及展望

预测 21 世纪石油工业可能将经历 3 次工业革命:2010 年前后的页岩气革命、2030 年前后的页岩油革命、2050 年前后的天然气水合物革命。3 次革命可能将是“人工油气藏”理论技术实践的典范。如图 2 所示,页岩气已依托水平井体积压裂技术,实现平台式“工厂化”井群开发;页岩油可能将依托“地下电加热轻质化”等技术,使黏稠液态烃轻质化、残余干酪根再转化,形成更多的新生液态烃,同时伴生形成新的地下缝网系统、超压环境,大幅提高石油采收率,实现规模经济开采,相当于“地下炼油厂”;天然气水合物将通过升温降压形成“人工气藏”,也可能实现规模安全开采。

“人工油气藏”技术是一项勘探-开发-工程-生产-

信息一体化集成技术系统,探索了大规模注液、能量补充和渗吸置换压裂的工业化试验,在国内致密油、页岩气等 5 大区块开展 235 井次先导性试验,致密油的开采效果比以非常规技术提高了 2 倍,页岩气实现商业开发,展示出良好应用前景,有望成为未来低渗、特低渗及非常规油气开发革命性理念和技术。

例如,在准噶尔盆地玛湖亿吨级储量油田,储集层以砂岩为主,埋深 3 750~3 900 m,厚度 3.4~23.0 m,平均孔隙度 9.8%,压力系数 1.6~1.8,储集层低孔、低渗特征明显,压前无自然产能,均需压裂改造提高单井产量。前期采用直井注水井网的开发模式,但压裂后单井产量只有 5 m³/d,压力衰竭快,有效期短(180 d),注水压力高、效果差,直井注水开发模式经济效益有限。2015 年以来,探索应用“人工油气藏”开发新理念,采用“地质甜点、工程甜点”一体化,逆向设计技术布井、一个平台布置 4 口水平井,优化水平井井间距 300 m,进行大规模快速注入,实现井间能量补充,水平井长度增加到 2 000 m,改造段数由以往 5~10 段增加到 10~20 段,大规模、细切割、能量补充压裂后,注入液量比以往高 1 倍,压力降低速度减小 33%,同期返排率降低 20%,实现了液体对地层能量的有效补充,累计产量提高 10%~20%,水平井日产原油最高达到 104 t,是以往同类井的 2~3 倍。渗吸置换驱油压裂技术在同等地质条件下、同等规模下,随着驱油剂与地层微细喉道中油的置换,压力比邻井更趋于平稳,同时累计产量有所增加,说明采用驱油压裂利于地层能量和产量的提高,为探索新模式提供依据。目前正开展水平井井间驱替、井间能量补充、多场变化研究,积极探索采用水平井井群式开发模式,采出程度可达 15%,高于同类储集层 5%~8%,将为“人工油气藏”开发新理念提供重要的示范意义。

在四川盆地海相页岩气工业化试验中,已具备 3 500 m 以浅页岩气体积压裂核心技术,形成“选准甜点区、打进甜点段、压开甜点层”技术系列,初步建立“人工造藏”理论技术支撑的井位部署-钻井-完井-压裂-开采的页岩气一体化开发系统。截至目前,在四川盆地五峰组—龙马溪组探明天然气地质储量 5 441×10⁸ m³,钻水平井 450 口,投产井 384 口,单井日产(12~33)×10⁴ m³/d,建成产能 107×10⁸ m³,年产量达近 80×10⁸ m³,累计生产 120×10⁸ m³。预测单井最终采出量为(0.8~1.6)×10⁸ m³。其中,中国石油页岩气共完成 107 口水平井的部署、完井、改造和生产。水平段长度 769~1 800 m,分压段间距 62~92 m,簇间距 20~30 m,

施工排量 7.0~15.2 m³/min, 平均单段液量 1 891 m³, 平均单段砂量 93.4 t, 平均砂液比 3.1%, 单井最大液量 51 607 m³, 单井最大加砂量 2 792 t, 形成了一个平台多口井的压裂改造方式, 增产改造效果显著, 压后平均测试产量 15.69×10⁴ m³/d, 实现了页岩气的商业化开发。

全球常规与非常规油气资源比例大约为 2:8, 未来非常规油气将逐渐成为“人工油气藏”开发的主体^[37]。中国非常规油气资源丰富, 中国非常规石油地质资源初步评价为 (223~263) ×10⁸ t, 天然气地质资源量 (890~1 260) ×10¹² m³。中国非常规油气资源勘探开发关键技术研发进展迅速。目前致密油气水平井规模压裂、页岩气 3 500 m 以浅大平台“工厂化”开采、800 m 以浅煤层气多井型开发、致密油气水平井工业试验等关键技术日趋成熟。中国致密油气及页岩气、煤层气等基本实现工业化发展, 非常规天然气的产量已占整个天然气 30%以上, 成为中国油气勘探开发重要接替领域。同时, 常规资源的剩余领域也同样面临资源品质变差、品位变低, 油气动用难度加大等难题, 也需要转变开发理念和技术。因此“人工油气藏”开发理论与技术, 可能将为常规剩余低与特低渗透油气、非常规油气等资源开辟一条全新的开发技术路线。

5 结论

提出“人工油气藏”开发概念和新理念, 是以低渗透及非常规油气为对象, 以渗流场、应力场、化学场、温度场“四场”作用为机制, 利用井群、体积压裂和注入流体等人工措施, 实现规模开发, 大幅度提高低渗透及非常规油气的采收率。

提出“人工油气藏”开发理论内涵、创建 5 套“人工油气藏”开发技术体系, 拟构建未来智慧油气田。

在国内 5 大致密油、页岩气区开展 235 井次先导性试验, 致密油压后开采效果比以非常规技术提高 2 倍, 页岩气规模应用实现商业开发, “人工油气藏”开发展示出良好应用前景。

理论技术创新是一项系统工程和长期过程。“人工油气藏”理念、理论和技术研究的时间较短, 需要持续创新与发展, 如有不妥之处, 希望读者批评指正。

致谢: “人工油气藏”理论技术创新工程是中国石油勘探开发研究院廊坊分院团队集体创新的重要成果之一, 在攻关研究中还有刘学伟、熊生春、何英、李海波、张亚蒲、崔伟香等参与了工作, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.
- [2] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [3] 童晓光. 世界石油供需状况展望: 全球油气资源丰富, 仍具有较强的油气供给能力[J]. 世界石油工业, 2007, 14(3): 20-25.
TONG Xiaoguang. World petroleum status of supply and demand: Global oil and gas resources is abundant, still has strong oil and gas supply capacity[J]. World Petroleum Industry, 2007, 14(3): 20-25.
- [4] 赵政璋, 胡素云, 李小地. 能源: 历史回顾与 21 世纪展望[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
ZHAO Zhengzhang, HU Suyun, LI Xiaodi. Energy: History review and 21st century prospecting[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [5] SCHMOKER J W. Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations[C]//GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. US Geological survey digital data series DDS-30: National assessment of United States oil and gas resources. Tulsa: USGS, 1995.
- [6] 耶金. 能源重塑世界[M]. 朱玉舜, 阎志敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2012.
YERGIN D. The quest: Energy, security, and the remaking of the modern world[M]. ZHU Yuben, YAN Zhimin, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [7] 关德师, 牛嘉玉, 郭丽娜, 等. 中国非常规油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
GUAN Deshi, NIU Jiayu, GUO Li'na, et al. Unconventional petroleum geology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [8] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics, and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [9] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [10] CANDLER H. What is unconventional resources?[R]. Long Beach, California: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012.
- [11] SPE, AAPG, WPC, et al. Petroleum resources management system[R]. Washington D C: IEA, 2007: 1-47.
- [12] RICHARD F M, EMIL D A. Heavy oil and natural bitumen: Strategic petroleum resources[R]. Tulsa: USGS, 2003.
- [13] SIEMINSK A, MAISONNEUVE C. Status and outlook for shale gas and tight oil development in the U.S.[R]. Houston, TX: Platts-North American Crude Marketing Conference, 2013.
- [14] USGS. World petroleum assessment[EB/OL]. [2013-03-01]. <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060>.
- [15] USGS. National assessment of oil and gas resources[EB/OL]. [2013-

- 03-01]. <http://energy.cr.usgs.gov/oilgas/noga/index.html>.
- [16] USGS. World petroleum assessment update[EB/OL]. [2013-03-01]. http://energy.cr.usgs.gov/oilgas/wep/assessment_updates.html.
- [17] 邱中建, 赵文智, 邓松涛. 中国致密砂岩气和页岩气发展前景和战略意义[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 4-8.
QIU Zhongjian, ZHAO Wenzhi, DENG Songtao. Development prospect and strategic significance of tight gas and shale gas in China[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 4-8.
- [18] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [19] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论: 内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5-13.
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, WANG Zecheng, et al. The intension and signification of “sag-wide oil-bearing theory” in the hydrocarbon-rich depression with terrestrial origin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 5-13.
- [20] 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.
- [21] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.
- [22] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.
ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399.
- [23] 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.
- [24] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198-205.
DU Jinhu, LIU He, MA Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 198-205.
- [25] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169.
MENG Xiaofeng, CI Xiang. Big data management: Concepts, techniques and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 146-169.
- [26] 程学旗, 靳小龙, 王元卓, 等. 大数据系统和分析技术综述[J]. 软件学报, 2014, 25(9): 1889-1908.
CHENG Xueqi, JIN Xiaolong, WANG Yuanzhuo, et al. Survey on big data system and analytic technology[J]. Journal of Software, 2014, 25(9): 1889-1908.
- [27] 段泽英, 蔡贤明, 滕卫卫, 等. 大数据分析技术在油田生产中的研究与应用[J]. 中国管理信息化, 2015(18): 64-65.
DUAN Zeying, CAI Xianming, TENG Weiwei, et al. Research and application of large data analysis technology in oilfield production[J]. China Management Informationization, 2015(18): 64-65.
- [28] 申龙斌. 油田勘探开发地质对象三维可视化关键技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
SHEN Longbin. The research of key technologies in 3D visualization for geological objects of oilfield exploration and development[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [29] 李智鹏, 许京国, 焦涛, 等. 如何运用大数据技术优化石油上游产业[J]. 石油工业计算机应用, 2015(1): 18-23.
LI Zhipeng, XU Jingguo, JIAO Tao, et al. How to use big data technology to optimize petroleum upstream industry[J]. Computer Applications of Petroleum, 2015(1): 18-23.
- [30] 李伟, 赵春宇. 油田勘探开发“大数据”管理及应用[J]. 信息技术, 2013(4): 196-198.
LI Wei, ZHAO Chunyu. The big data management and application for oil E&D[J]. Information Technology, 2013(4): 196-198.
- [31] 甘云雁, 张士诚, 刘书杰, 等. 整体压裂井网与裂缝优化设计新方法[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 290-294.
GAN Yunyan, ZHANG Shicheng, LIU Shujie, et al. A new method for well pattern optimization and integral fracturing design in low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 290-294.
- [32] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算: 体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 3-21.
LUO Junzhou, JIN Jiahui, SONG Aibo, et al. Cloud computing: architecture and key technologies[J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 3-21.
- [33] 朱正平. 面向数字油田的云数据服务架构研究[D]. 武汉: 长江大学, 2015.
ZHU Zhengping. Study on framework of cloud data service oriented digital oilfield[D]. Wuhan: Yangtze University, 2015.
- [34] AL-JASMI A, QIU Fangda, ALI Z. Digital oil field experience: An overview and a case study[R]. SPE 163718, 2013.
- [35] RECORDS L R, SHIMBO D T. Petroleum enterprise intelligence in the digital oil field[R]. SPE 127355, 2010.
- [36] 曹中, 陈景萍, 刘伟, 等. 云计算技术在大港油田的应用[J]. 中国管理信息化, 2013, 16(20): 56-58.
CAO Zhong, CHEN Jingping, LIU Wei, et al. Application of cloud computing technology in Dagang Oilfield[J]. China Management Informationization, 2013, 16(20): 56-58.
- [37] 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.

第一作者简介: 邹才能(1963-), 男, 重庆江北人, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师、博士生导师, 李四光地质科学奖获得者, 主要从事非常规油气地质学、岩性地层油气藏、天然气等地质理论技术及勘探生产实践等工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: zcn@petrochina.com.cn
收稿日期: 2016-09-26 修回日期: 2016-11-30

(编辑 许怀先 胡苇玮)