



## Views &amp; Comments

## 地质-工程一体化管理模式及应用

李阳<sup>a</sup>, 赵清民<sup>a,b</sup>, 薛兆杰<sup>a</sup><sup>a</sup> China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China<sup>b</sup> Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China

## 1. 引言

随着油气勘探开发不断深入,非常规油气藏、深层超深层油气藏、致密油气藏逐渐成为主要开发对象,油藏条件更加复杂,油气品质劣质化加重,勘探开发难度和成本不断加大。高温高压、高陡构造、强非均质、深水等新的复杂油藏环境对油气工程技术提出新的挑战。大部分油田经过多年开发,逐渐进入高含水、高可采储量采出程度、产量下降阶段,亟需破解提高采收率的难题。当前油价长期低位运行对油气行业效益开发冲击大,低成本开发更为迫切。综上所述,依靠单一的技术已无法解决当前油田发展中遇到的上述难题,需要地质-工程一体化深度融合,推动高效低成本技术的集成和创新,破解资源瓶颈,大幅度提高产能和采收率,大幅度降低勘探开发成本,实现油气资源的效益开发。

地质-工程一体化已在中国深层油气藏、页岩气、致密低渗等复杂油气藏开发中成功应用[1-6],推动了复杂油气藏“甜点”(“sweet spot”)评价、油藏工程、水平井钻井、分段压裂及提高采收率等技术的快速发展,促进了地质与工程技术的融合;地质-工程一体化变革了当前油藏开发管理模式,提高了工程效率和经济效益,已成为复杂油气藏商业开发的重要手段。

尽管地质-工程一体化在复杂油气藏领域取得了较好

的应用效果,但在大规模推广过程中仍面临很多问题。本文阐述了地质-工程一体化的内涵,提出了地质-工程一体化管理模式框架,总结了地质-工程一体化的应用实践成果,为推进地质-工程一体化发展提供理论支撑。

## 2. 地质-工程一体化的内涵及管理模式

## 2.1. 地质-工程一体化的内涵

一体化理论起源于系统论,该理论认为一体化系统是由很多个子系统组成的一个整体,各子系统之间是相互联系的,通过各子系统间的协同、合作,使组合的系统功能达到最大化[7]。在20世纪70年代以前,油气勘探开发基本采用传统的“直线”开发模式,即初探—油藏评价—开发方案编制—产能建设—采油。90年代以来,油气开发开始强调地质与工程的协同化。21世纪早期, Cosentino [8]提出了油藏评价一体化的概念,此后,勘探开发一体化成为油气勘探开发的一个新趋势。

地质-工程一体化是针对复杂油气藏开发提出的一种有效的管理模式。具体来讲,是针对某一油气田的产能建设、开发部署、开发调整或提高采收率等工作,通过技术和管理创新对地质、工程技术、专业人员、经济等各种要素进行统筹管理和集成优化,实现工程科技与管理的融合,实现提质、降本、增效的目标。

地质-工程一体化的内涵包括4个方面：

(1) 物化论：地质-工程一体化是各种要素集成、转化及物化的过程[9-10]，是将资源、技术、环境、人力等物质或非物质形态的事物转化为工程实践，工程实践是地质-工程一体化的具体体现。要通过工程实践检验一体化理论、方法和技术的合理性、先进性，并在实践中不断学习提升。

(2) 价值最大化：地质-工程一体化的目标是通过人、工程与环境协调发展，提升油气藏的价值[11]。对于一个具体油田来说，油气田价值体现在两个方面：一是高产、高效，实现油田高效益勘探、高效益开发；二是高采收率，采出地层中的每一滴原油。地质-工程一体化就是解决勘探开发过程中的不同阶段遇到的地质、工程经济和环境难题，把油田的内在价值转化为现实的产量和效益。

(3) 协同优化：地质-工程一体化具有多学科、多专业互动，多部门、多团队和多流程交叉的特点。通过把不同体系或技术整合为一个整体进行协同和管理，实现跨体系、部门或组织之间的相互补充、协同和提高。一方面对涉及的专业、技术进行整合集成、协调优化、聚优创新，形成拉动效应，发挥出1加1大于2的成效；另一方面对涉及的部门、团队进行整合优化、聚力攻坚，实现相互间的横向协同、纵向联动，从而最大限度发挥人力、技术、社会和环境优势和潜力，提高效率，协调运行。

(4) 创新驱动：创新是地质-工程一体化的核心，包括技术创新、管理创新和模式创新。通过基础理论创新、单一技术创新和技术集成创新实现技术最优化，推进一体化发展；通过管理创新解决体制机制约束问题，提高运行效率和效益；通过模式创新实现项目整体最优。

## 2.2. 地质-工程一体化的管理模式

油气开发是诸多地质和工程要素组成的结构与作用统一的整体，油气藏类型不同、开发阶段不同、市场环境不同，地质-工程一体化的运行模式有所差异。但地质-工程一体化的有力实施都离不开一体化目标、一体化数据平台、一体化理念的团队、一体化管理4个基本要素的支撑（图1）。

### 2.2.1. 一体化目标

地质-工程一体化要制定统一的目标，即追求产能、采收率、效率、效益、环境友好最大化目标，从而提高油气藏价值。要根据一体化项目面对的具体开发对象，统筹考虑资源、生产、经济、环境和社会等因素，制定相应的项目目标、周期、进度、质量、技术、成本和环境目标

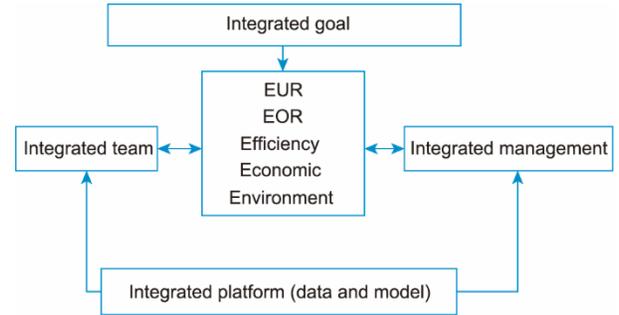


图1. 地质-工程一体化模式框架。

等，建立相应控制机制。

### 2.2.2. 一体化数据平台

油气藏是一个极为复杂的地质体，必须从各种角度，用大量的信息、数据去描述它的特性，油气勘探开发是一个由数据关联的工作过程。为了保证油藏认识和数据使用的连贯性、继承性和一致性，要建立一体化数据平台，实现数据的互通和共享。

建立一体化数据平台首先是数据的获取和分析，要充分利用现有的数据资源，同时要加强对地质、工程、实验、生产等一切与生产相关数据的全方位、高精度实时获取，减少不确定性；其次要加强数据的挖掘和应用，从数据中发现物理规律，建立相应的数学模型；再次要构建地质-工程一体化知识图谱，建立覆盖油气开发全过程、全产业链的知识库，建立认识油藏和开发油藏的知识与数据之间的联系，并基于油田开发特点开展统计学习及数据确定性分析；最后要对数据及时更新，保证数据的时效性、真实性。

### 2.2.3. 一体化理念的团队

在一体化实施过程中，除了建立一体化数据平台以外，还要实现不同学科技术人员的一体化，要建设一支具有一体化理念的工程团队。团队成员要注重学习与自我提升，不断提升团队技术水平、创新能力、研发活力和生产效率，保证目标和任务实现；要通过团队成员和资源有序组合，实现多学科的交叉融合，避免出现“学科偏见”；团队成员都要对一体化的工作流程和总体目标有充分认识，形成合力；责、权、利要明确清晰量化到团队每个员工。

### 2.2.4. 一体化管理

在“效率”和“效益”目标下，对各部门、专业、技术等要素按照最有效的方式进行整合、集成、协同与融合；要建立及时联系反馈的工作流程，实现各环节间的实

时/适时反馈与优化（图2）；同时，要避免“木桶效应”和“马太效应”，不能形成专业或技术短板，制约或影响整体的运行，又要避免资源过度集中于某个专业或某项技术，造成技术和资源低效与浪费。

地质-工程一体化是对传统运行模式和决策机制的变革，由专业业务应用变革为跨专业业务协同，打破了部门管理的“藩篱”；由分段式管理变为在线闭环式管理；由现场工作协调变为网络化在线协调，内部操作变为内湾联动式操作模式，全面提升处理、决策、执行的水平。

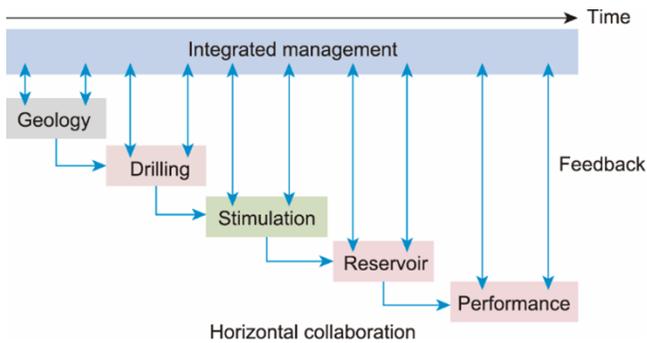


图2. 一体化管理运行模式。

### 3. 矿场应用

地质-工程一体化的理念已融入油气勘探开发过程中，不仅被用于油气田的整体开发，同时在产能建设和单井增

产措施中也被广泛应用，推动了复杂油气藏的经济有效开发。

#### 3.1. 低渗透油藏仿水平井开发技术

中国以陆相沉积为主的含油气盆地中，发育了丰富的低渗透油气资源，具有含油气层系多、油气藏类型多、分布区域广的特点，已成为近年来增储上产主阵地。

低渗透油藏在成藏过程中受到沉积作用、构造作用及压实、胶结、溶蚀等成岩作用的影响，储层类型比较复杂，储层物性较差，表现为孔隙度低，渗透率低，储层丰度低，非均质性强，裂缝发育。油藏天然能量不足，主要为常压或低压油藏，采用常规开发产能低、效益差。

为实现低渗透油藏有效开发，胜利油田针对低渗透油藏富集规律认识难、储层精细描述难、高效开发动用难等开发难题开展地质-工程一体化攻关研究，形成了低渗透油藏仿水平井开发技术，实现了低丰度、低渗透油藏的快速、高效开发。在地质-工程一体化模式的指导下，综合考虑史127区块油藏地质特征及前期压裂经验，优化压裂缝长、裂缝角度等改造参数，增大泄油面积，最大限度提高产能；考虑储层发育规律、压裂工艺参数、经济性等因素，优化开发井网，注采井距“转”注采排距，建立有效驱替系统，裂缝适配井网，提高波及体积，避免油水井水窜。

史127区块采用仿水平井注水开发（图3），取得了好的效果，平均单井日产油3 t，新建产能48 000 t（图4）。

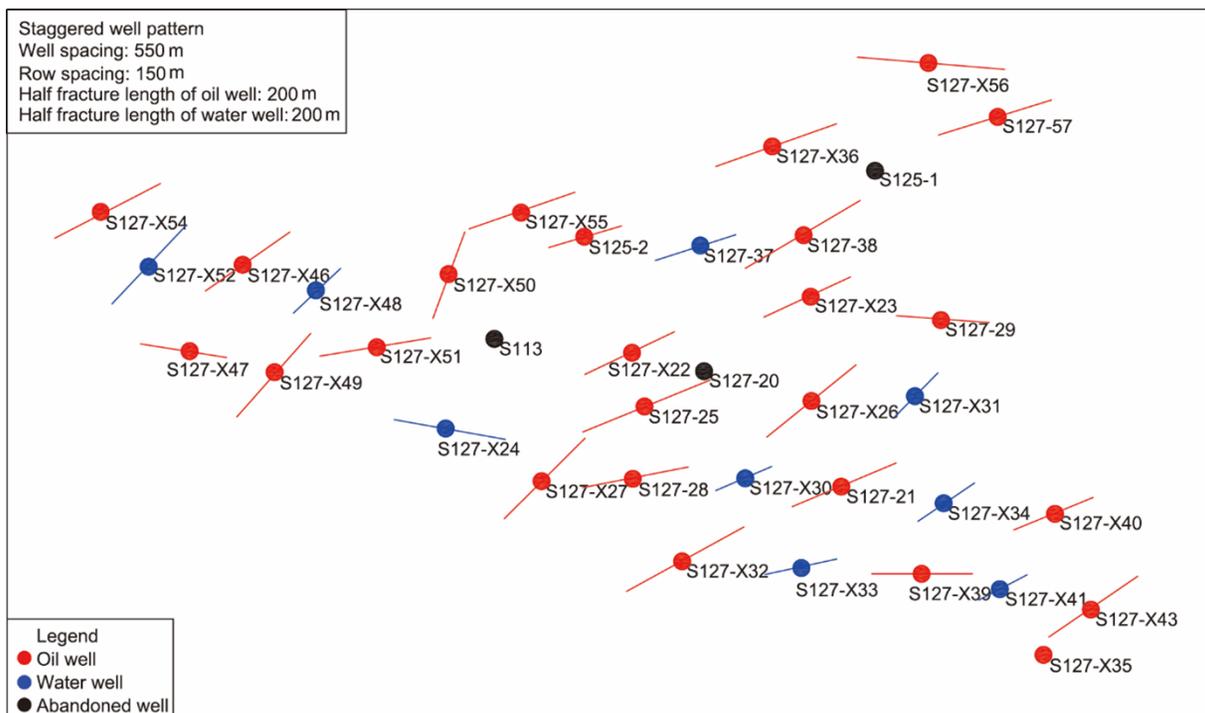


图3. 史127区块井网图。

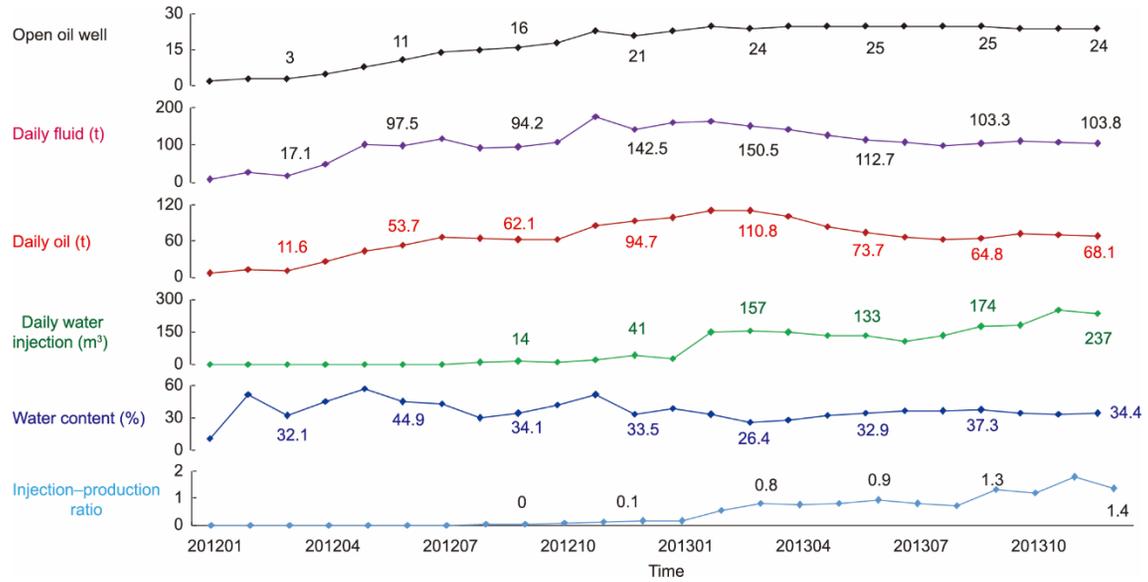


图4. 史127区块综合开发曲线。

### 3.2. 焦页4HF井重建井筒重复压裂技术

中国页岩气资源非常丰富，但与美国海相页岩气相比，中国页岩气地质条件更加复杂，页岩埋藏更深，有机质和脆性矿物含量较低，水平两向应力差值大，且闭合压力大，不易形成复杂缝[12-15]。涪陵页岩气田是中国首个大型页岩气田，2017年建成了百亿立方米产能，经过多年开发，涪陵页岩气田焦石坝区块老井已进入增压开采的长周期阶段，单井产量低。

为提高老井产能和采收率，涪陵页岩气公司成立地质、气藏、工程一体化团队，开展一体化设计和项目管理，完成了国内首口重建井筒重复压裂施工。项目以提高单井可采储量为目标，形成了以综合地质条件、工程规模

为基础的四指标、十参数的重复压裂选井标准；充分认识老井初次压裂改造效果，明确剩余资源分布，制定差异化的改造目标，充分挖掘剩余可采储量；精心研究开发方案，形成重建井筒重复压裂工艺优化设计参数体系；精准施工设计，在第1~12段通过暂堵转向工艺实现新老射孔的均匀改造，在第13~21段采用“密切割布缝+限流射孔”工艺，保证了工艺目的的有效实现；在现场施工过程中，团队实时分析工艺实施情况，不断优化调整工艺参数，提升工艺适应性。

2020年，经过12天的压裂施工，焦页4HF井完成21段重复压裂，准确高效地改造了老缝，增添了新缝，形成了有效的密集缝网（图5）。单井产量由压裂前日均

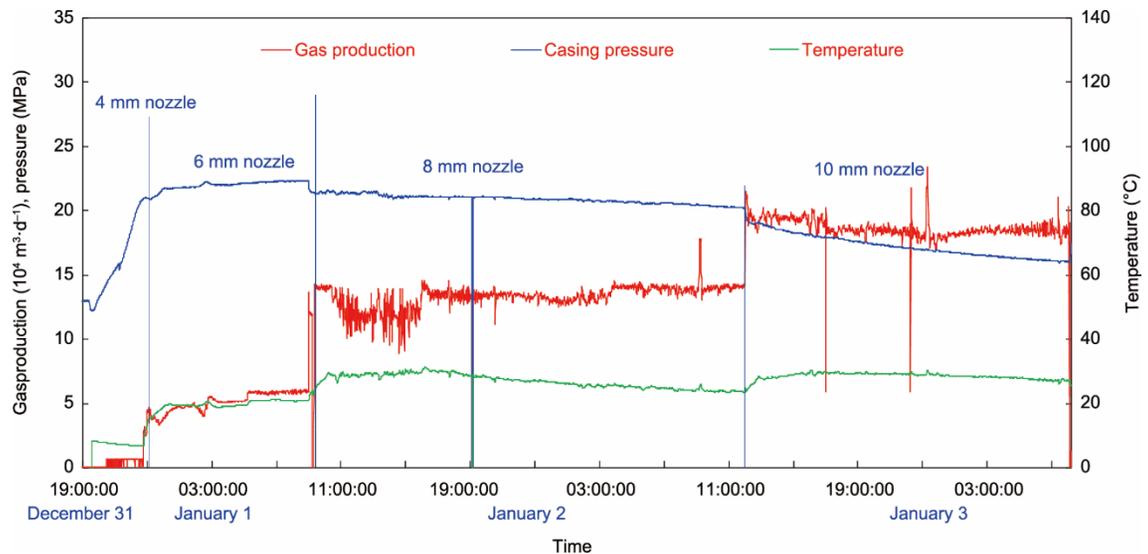


图5. 焦页4HF井重复压裂后生产曲线。

产气  $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$  提高到  $5.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 初期日产量提高超过 4 倍, 生产套压由 2~8 MPa 提高至 18~27 MPa, 取得较好的增产效果, 为提高气田老区采收率提供了新的技术模式和途径。

#### 4. 结论

地质-工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的有效技术管理模式和途径。经过多年的研究和开发实践, 提出了地质-工程一体化的内涵及管理模式框架, 将一体化管理模式应用到复杂油气藏开发中, 实现了组织生产方式的整合, 优化了生产的流程, 推动了地质工程技术的融合。

中国目前和未来油气资源的非常规性、多样性、非均质性特点显著, 在认识油藏、开发油藏、改造油藏等领域面临诸多挑战, 特别是油气行业降低成本、提升效益的迫切诉求, 提升了对于地质-工程一体化的需求。要进一步解放思想、突破界限、整合技术、深度融合, 推进地质-工程一体化在复杂油气藏的各个阶段发挥更大的作用, 为中国复杂油气藏提产增效发挥实质性支撑。

#### References

[1] Liao GL, Guo SS, Hu YT, Liang H, Gao YD, Wang SY, et al. Practice of the

- geology-engineering integration concept in high temperature and high pressure wells in South China Sea. *China Pet Explor* 2020;25(2):142-54. Chinese.
- [2] Wu Q, Liang X, Xian CG, Li X. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development. *China Pet Explor* 2014;19(6):14-23. Chinese.
- [3] Xie J, Zhang HM, She CY, Li QR, Fan Y, Yang Y. Practice of geology-engineering integration in Changning State Shale Gas Demonstration Area. *China Pet Explor* 2017;22(1):21-8. Chinese.
- [4] Wan XX, Xie GL, Ding YG. Exploration on geology-engineering integration of hard-to-recover reserves in Shengli Oilfield. *China Pet Explor* 2020;25 (2):43-50. Chinese.
- [5] Hu WR. Geology-engineering integration-a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs. *China Pet Explor* 2017; 22(1):1-5. Chinese.
- [6] Xie YH, Cai DS, Sun HS. Exploration and effect of exploration and development integration in unconventional gas of CNOOC. *China Pet Explor* 2020;25 (2):27-32. Chinese.
- [7] Wang Y. Application of integrative mode of collaborative management in large shale gas field. *J WUT (Information & management engineering)* 2015;37(2): 215-9.
- [8] Cosentino L. Integrated reservoir studies. Paris: Institut Franais du Petrole Publications; 2001.
- [9] He JS, Wang MJ, Wang QE. Theory parsing and system construction for engineering management. *Sci Technol Prog Policy* 2009;26(21):1-4. Chinese.
- [10] Zhu WH, Wang MJ, Zheng JW. Philosophical thought on engineering management. *Theory Mon* 2015;8:47-51. Chinese.
- [11] Du ZM, Xie D, Ren BS. Modern reservoir management. *J Southwest Pet Inst* 2002;24(1):1-6. Chinese.
- [12] Jia CZ, Zheng M, Zhang YF. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development. *Pet Explor Dev* 2012;39(2): 139-46.
- [13] Zou CN, Dong DZ, Wang SJ, Li JZ, Li XJ, Wang YM, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. *Pet Explor Dev* 2010;37(6):641-53.
- [14] Jin ZJ, Hu ZQ, Gao B, Zhao J. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the WufengLongmaxi formation, Southeastern Sichuan Basin. *Geosci Front* 2016;23(1):1-10.
- [15] Zou CN, Dong DZ, Wang YM, Li XJ, Huang J, Wang S, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II). *Pet Explor Dev* 2016; 43(2):182-96.