

引用: 张益, 卜向前, 齐银, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长 7 段页岩油藏地质工程一体化油藏开发对策: 以安 83 井区为例 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(5):116-129.  
Zhang Yi, Bu Xiangqian, Qi Yin, et al. Geology and engineering integrated development countermeasures of Chang 7 member shale oil reservoir in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin: a case study of An 83 well block[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5):116-129.

# 鄂尔多斯盆地姬塬油田长 7 段页岩油藏地质工程 一体化油藏开发对策——以安 83 井区为例

张 益<sup>1</sup> 卜向前<sup>2</sup> 齐 银<sup>2</sup> 杨永智<sup>3</sup> 陈亚舟<sup>4</sup> 侯晓云<sup>5</sup> 王 瑞<sup>1</sup> 张 斌<sup>1</sup> 同 松<sup>6</sup>

(1 西安石油大学石油工程学院; 2 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院; 3 中国石油勘探开发研究院; 4 中国石油长庆油田公司第三采油厂; 5 中国石油长庆油田公司第二采气厂; 6 中国石油长庆油田公司第九采油厂)

**摘 要:** 长 7 段油藏作为鄂尔多斯盆地姬塬油田重要生产层段, 具有埋藏深、油水关系复杂、储层非均质性强等特点, 地质工程一体化技术是提高其注水开发效果的必然手段。以地质工程一体化为指导, 采用室内实验建立的修正岩石力学参数计算模型进行参数修正, 利用岩心、测井等计算得到单井岩石力学参数和地应力参数, 采用随机建模方法建立区块三维力学模型和三维地应力场模型, 根据地应力分布刻画压裂裂缝展布方向。根据渗透率和地应力展布等优化设计开发井网, 利用数值模拟技术优化井网及开发技术政策, 以提高采收率为目标, 建立并持续更新模型, 形成了地应力分析—地质建模—油藏工程设计—数值模拟一体化技术方法。研究表明: 采用扁平化管理结构, 多学科协同能更高效开发油藏。精细地质描述与动态分析相结合可以持续更新地质模型, 建立更加逼近真实的地质模型。岩石力学实验、测井曲线计算与压裂施工等相结合, 采用随机建模方法构建的地应力场模型与动态具有很好的吻合性, 为动态分析、井网完善与部署提供了基础。动态井网优化与开发技术政策有效地指导了安 83 井区长 7 段储层开发, 该区重复改造时建议裂缝半长为 120m、缝宽为 30m、主裂缝导流能力为 15D·cm、次裂缝导流能力为 1D·cm, 优化后的 5 口井施工后均取得较好效果, 增油倍数明显高于邻井, 优化设计井较邻井能增产 30.46%。

**关键词:** 地质工程一体化; 油藏开发对策; 姬塬油田; 页岩油藏; 剩余油; 增产

中图分类号: TE319 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.05.011

## Geology and engineering integrated development countermeasures of Chang 7 member shale oil reservoir in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin: a case study of An 83 well block

Zhang Yi<sup>1</sup>, Bu Xiangqian<sup>2</sup>, Qi Yin<sup>2</sup>, Yang Yongzhi<sup>3</sup>, Chen Yazhou<sup>4</sup>, Hou Xiaoyun<sup>5</sup>, Wang Rui<sup>1</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>, Tong Song<sup>6</sup>

(1 College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University; 2 Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company; 3 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 4 No. 3 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company; 5 No. 2 Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company; 6 No. 9 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company )

**Abstract:** Chang 7 member oil reservoir is a major production layer in Jiyuan Oilfield in Ordos Basin, which is characterized by deep burial depth, complex oil-water contact and strong reservoir heterogeneity, so the technology of geology and engineering integration is a necessary method to improve the result of water injection development. Guided by the integration of geology and engineering, rock mechanic

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于高阶累积量和地应力约束下的多孔介质并行随机模拟方法研究”(51974247)。

第一作者简介: 张益 (1979—), 男, 陕西大荔人, 博士, 2009 年毕业于中国石油大学 (北京), 教授, 现主要从事油气藏渗流理论与数值模拟技术、油气田开发理论与方法等方面的研究工作。地址: 陕西省西安市电子二路 18 号西安石油大学石油工程学院, 邮政编码: 710065。E-mail: zhy@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2021-12-30; 修改日期: 2022-08-15

parameters are corrected in calculation model established by lab test results, and rock mechanic parameters and in-situ stress of single well are calculated by core and logging data, mechanic parameter and in-situ stress field models of the block are built by random modeling method, and the distribution direction of hydraulic fractures is characterized according to the in-situ stress distribution. The development well pattern is optimally designed based on permeability and in-situ stress distribution. The numerical simulation technology is used to optimize well pattern and development countermeasures, and the model is established and continuously updated with the goal of EOR, forming an integrated technology of in-situ stress analysis, geological modeling, oil reservoir engineering design, and numerical simulation. The research shows that the flat management structure and multidisciplinary cooperation enable to efficiently develop oil reservoir. The integration of fine geological description and dynamic analysis supports to continuously update the geological model and establish a model closer to the real geological condition. The random modeling method constructed in-situ stress field model by using rock mechanic data of core samples, logging data and fracturing engineering data shows good agreement with dynamic performance, which provides a basis for dynamic analysis, well pattern optimization and deployment. The dynamic well pattern optimization and development technology countermeasures effectively guided the development of Chang 7 member oil reservoir in An 83 well block. During the refracturing process, the engineering parameters were optimally designed, with the half length of fracture of 120 m, the width of fracture of 30 m, conductivity of the main fracture of 15 D·cm, and that of the secondary fracture of 1 D·cm. Good results were achieved from the five optimized wells after construction, with oil production increase multiple significantly higher than that of the adjacent well, and production capacity increase by 30.46% of the adjacent well.

**Key words:** geology and engineering integration, oil reservoir development countermeasure, Jiyuan Oilfield, shale oil reservoir, remaining oil, production increase

## 0 引言

随着国内新发现油气日趋以低品位复杂油气藏为主,勘探开发难度日益增加,高效开发这类复杂油气藏急需新理念与新工艺。随着地质工程一体化创新发展,以北美 Bakken、Eagle Ford 为代表的致密油藏,借助地质工程一体化思路,采用长水平段和多级压裂等技术实现了原来认为没有效益的低品位资源规模化效益开发,为国内复杂难动用油气藏开发提供了新的途径<sup>[1]</sup>。1994 年 Alderman<sup>[2]</sup>率先在油气领域引入“一体化管理体系”的概念,随后在实践过程中“勘探开发一体化”不断完善,形成了地质、工程、经济、管理一体化模式,成为新油气资源开发的主要方法。国外斯伦贝谢、哈利伯顿等服务公司先后提出一体化项目管理(PM 或 IPM)的概念并实践,2002 年哈利伯顿公司本着综合一体化服务高效共赢的理念重新定义了 IPM 作业服务模式,并在国外多个油气田勘探开发中进行了实践。

中国在 20 世纪 90 年代引入“一体化”理念,2015 年吴奇等<sup>[3]</sup>提出地质—工程一体化理念和“钻井品质”概念并在中国南方海相页岩气进行了实践,实现了中国南方海相页岩气的经济有效开发;2015 年陈颖杰等<sup>[4]</sup>利用开发地质、精细建模、井眼轨迹设计等一体化理念进行了页岩气地质工程一体化导向钻井探索。2016 年 5 月 31 日,由中国石油学会石油工程专业委员会等单位组织召开的“第一届油气地质工程一体化论坛”,极大地推动了国内地质工程一体化的深入研究。2017 年,胡文瑞院士<sup>[1]</sup>在对国内外开

发对比的基础上提出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。章敬等<sup>[5]</sup>基于多学科协同,采用地质与工程技术相结合,管理与工程相结合,探索出工程技术服务一体化总包模式开发新疆玛湖致密油。王昕等<sup>[6]</sup>提出以规模发现与效益动用为主线,聚焦从成藏研究到压裂参数优化的全过程地质工程一体化技术路线。鲜成钢等<sup>[7]</sup>利用岩心、地震等数据,基于单井约束、迭代逼近的方法建立了三维三应力模型。常少英等<sup>[8]</sup>将工程人员“嵌入”地质研究团队,实现了地质、钻井、油藏等学科协同工作,探索了剩余油挖潜研究中的地质工程一体化路线,实现了油田的高产稳产。2018 年,张以明等<sup>[9]</sup>根据超高温超深碳酸盐岩储层特点,建立了储层评价、改造工艺优选与设计等地质工程一体化体积改造技术。2019 年,张合文等<sup>[10]</sup>根据低渗透、薄层边际油藏难动用的问题,采用地质与钻完井、储层压裂改造和采油工程等的协同,实现了 Zanazour 油田水平井分段压裂有效开发。2020 年,杨智等<sup>[11]</sup>以致密油“甜点”识别为基础,根据储层精细刻画,分析了国内几种典型致密油油藏地质工程一体化的进展。冯张斌等<sup>[12]</sup>在储层开发地质精细描述的基础上,进行了鄂尔多斯盆地延长组 7 段致密油地质工程一体化建模和油藏数值模拟方面的研究,重点探索了水平井井眼轨迹设计与钻井优化方面的工作。2021 年,蒋廷学等<sup>[13]</sup>按照地质工程一体化理念,采用压前“甜点”预测储层评价、压裂大数据协同优化、渗吸实验评价和压后评估与管理等技术建立了体积压裂地质工程一体化技术。

目前,国内地质工程一体化在多学科交叉融合方面进行了大量探索,为国内多个复杂油气藏经济有效开发提供了坚实的基础,但是在储层精细描述—地应力场三维模型—井网优化—开发效果评价等多学科协同提高超低渗油藏开发方面仍有提升的空间,储层非均质性、地应力场、井网和改造技术一体化的研究在鄂尔多斯盆地页岩油藏的适用性仍需要进一步探索。

## 1 地质特征

姬塬油田位于鄂尔多斯盆地中西部,跨天环坳陷和伊陕斜坡两大构造单元,主要位于定边、吴起两县(图1)。姬塬油田构造平缓,为西倾单斜,坡降为6m/1000m左右,局部发育利于油气聚集的微构造。鄂尔多斯盆地延长组自下而上分为长10至长1共10个油层组<sup>[14-16]</sup>,主要生产层位是长6段及长7段。姬塬地区长9段和长7段的黑色页岩及暗色泥岩是主要烃源岩。长6段厚度在120m左右,自下而上可进一步划分为长6<sub>3</sub>、长6<sub>2</sub>和长6<sub>1</sub>共3个亚段。长7段厚度在110m左右,也已实现了规模建产,自下而上可进一步划分为长7<sub>3</sub>、长7<sub>2</sub>和长7<sub>1</sub>共3个亚段。

姬塬地区延长组发育一套典型的河流—湖泊沉积体系,姬塬油田长7段属三角洲前缘和半深湖—深湖沉积。长7段沉积期,鄂尔多斯湖盆鼎盛发育,半深湖—深湖范围为延长组沉积期最大<sup>[17]</sup>。长7段单砂体厚度分布以2~4m为主,个别砂体厚度可达20m以上,平均砂体厚度不超过10m,以零星分布为主;砂地比为27.88%~34.86%,其中长7<sub>2</sub>亚段最高,长7<sub>1</sub>亚段次之,长7<sub>3</sub>亚段砂体最不发育<sup>[18]</sup>。储层岩性以细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩为主,颗粒分选差,填隙物以绿泥石、高岭石和铁方解石为主,总含量平均为12.9%~14.7%<sup>[19]</sup>。长7段孔隙类型以粒间孔和溶蚀孔为主,喉道类型以弯片状和片状为主,发育微米—纳米级孔喉,半径在0.1~1.0μm之间的亚微米级喉道占比超64%,中值半径为0.16μm。研究区孔隙度为5.00%~16.95%,平均为8.86%,低孔占比约为69%;渗透率为0.01~1.65mD,平均为0.2mD,根据行业标准《油气储层评价方法》(SY/T 6285—2011),储层物性以低孔—特低孔、超低渗为主,孔隙度与渗透率整体呈正线性相关<sup>[20]</sup>。

岩心观察时发现一定数量裂缝,并且以高角度裂缝为主,裂缝倾角介于30°~90°,以60°~80°为主,

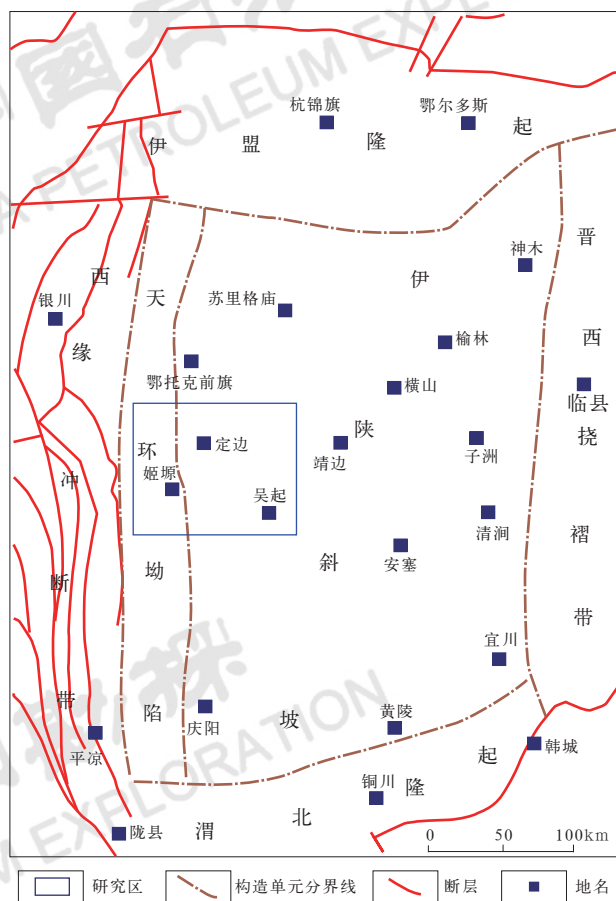


图1 鄂尔多斯盆地姬塬油田位置图

Fig.1 Structural location map of Jiyuan Oilfield in Ordos Basin

裂缝走向介于25°~180°,以75°~80°和85°~90°两个范围分布最多,裂缝走向玫瑰花图表明裂缝方向主要为北东东67.5°、北东东80°和北东东88°三个方向<sup>[21]</sup>。前期地质认识表明,长7段油藏为页岩油藏,单个油藏规模较小,没有统一油水界面,油水分布关系复杂;研究区长7<sub>3</sub>亚段、长6<sub>1</sub>亚段均有一定数量油藏发现。试油数据显示长6段油气更为富集,长6<sub>1</sub>亚段平均含油饱和度最高,长6段各亚段孔隙度、渗透率、有效厚度和含油饱和度平面分布趋势基本相同,表明研究区为主要受岩性控制的油藏;油藏平面呈条带状分布,纵向呈透镜体状分布,局部发育一定数量边水或零星水体<sup>[16]</sup>,少部分井为油水同产井或水井,研究区水型以CaCl<sub>2</sub>型地层水为主,少量分布Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>型和MgCl<sub>2</sub>型地层水,平均矿化度为61g/L。安83井区长7段油藏自2008年5月投产以来,已经成为姬塬油田长7段油藏试验区块,为长7段油藏开发部署提供了良好的指导,本文以安83井区长7段油藏为例进行研究。



## 2 面临挑战

### 2.1 砂体横向连通性差、纵向多期叠置, 常规规则井网适应性不足

安83井区长7段储层处于辫状河三角洲前缘亚相, 储层厚度变化大, 发育水下分流河道、分流间湾等沉积微相, 水下分流河道砂体厚度为5~25m, 单个水下分流河道宽度为12~23m。姬塬油田安83井区长7段砂体平面延伸距离长, 局部超16km, 纵向多层叠置厚度可达近30m。

受沉积环境影响, 长7段砂体普遍存在复杂的纵向、横向叠置关系, 平面上砂体展布方向、高渗条带展布方向与最大水平主应力方向不一致, 长7段砂体主要沿北东40°展布; 渗透率等值线整体沿北东40°展布, 但高渗条带以沿北东5°~北东10°展布为主; 最大水平主应力以北东70°展布为主, 局部存在最大水平主应力方向变化。用统一井排距和井排方向布井造成研究区储量控制程度低, 适应性不足。目前姬塬油田采用了矩形、菱形、正方形和水平井网等不同井网形式、6种不同井排距, 以菱形反九点井网为主要开发井网, 井排距约为480m×200m, 井排方向以北东60°~80°为主, 初期井网按照统一井排距在砂体范围内均匀分布, 后期部分井区逐步采用了水平井五点法井网, 井距为300~600m, 水平段长度为500~1000m。由于姬塬油田长7段砂体纵向多期叠置, 横向存在多砂体叠置展布, 造成现有开发井网控制程度不高。通过对安83井区部分井组计算表明, 其水驱控制程度平均为58.85%, 按照水驱储量控制程度评价标准可判断水驱控制程度差。注水开发区域能量补充不足, 造成其产量递减率偏高, 第一年递减率超

过20%, 水平井开发区年递减率甚至超过45%。

### 2.2 隔夹层发育与复杂油水关系叠加, 压裂改造控水、生产延缓见水难度大

姬塬油田长7段油藏普遍存在纵向多期砂体叠置, 各油层组砂体在油田不同区域呈现不同特征, 油田西部区块砂体规模小, 隔夹层发育, 优质储层横向连通性较好, 而中等储层和差储层横向连通性较差; 油田东部区块砂体横向规模大且连片性好, 纵向叠置厚度大; 油田中部区块砂体纵向以薄砂体为主, 具有隔夹层发育、横向连通性差、零散分布的特点。受沉积微相和水动力等影响, 长7段各亚段水下分流河道等沉积微相以北西向带状分布为主, 局部呈北东向带状分布, 通常存在多条水下分流河道并在局部交叉汇集, 孔隙度、渗透率平面上也以北西向带状分布为主, 局部存在一定弯折或其他走向, 沿砂体展布方向物性要好于垂直砂体展布方向。姬塬油田长7段油藏类型为岩性油藏, 没有统一油水界面, 但是在油藏中部区块砂体低部位、砂体边部及其他区块部分砂体局部低部位零散分布一定数量天然水体。由于研究区整体物性较差, 必须经过压裂才能工业化开发, 压裂过程中易与天然水体沟通, 造成部分井投产后即产水, 控水困难。此外, 井网采用统一井排距和井排方向在砂体范围内均匀布置, 井网设计时没有建立三维地应力场模型, 根据现有动态和压裂监测表明部分井区井排方向与裂缝展布方向不一致, 致使部分井组注水开发后过早见水。同时, 沿最大水平主应力北东70°设置的井排方向与砂体展布方向不一致, 没有建立起井网、储层改造压裂、砂体展布与渗透率展布之间的协同优化, 导致部分注水井区出现地层压力保持水平低, 油井暴性水淹, 控水困难(图2)。

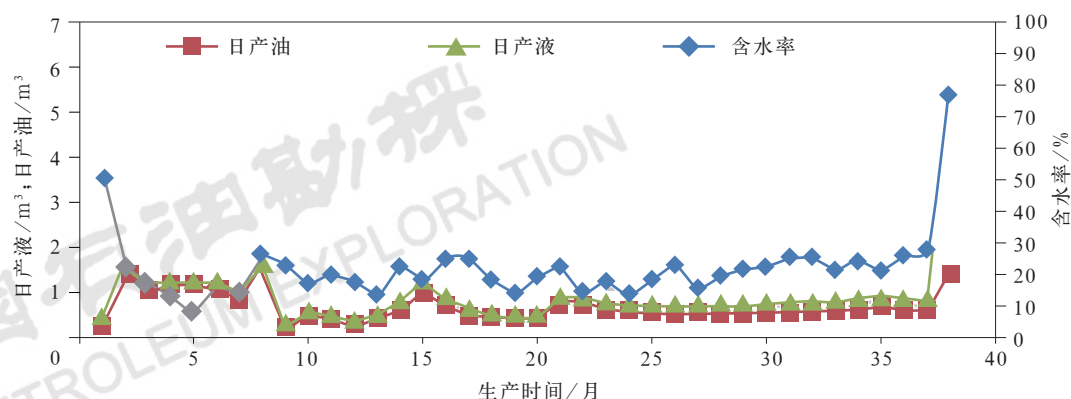


图2 安231-38井生产曲线图

Fig.2 Production curve of Well An 231-38

### 3 地质工程一体化实践

#### 3.1 地质工程一体化技术路线

地质工程一体化是对原有工作流程和结构的变革。实施地质工程一体化首先需要大油藏的概念，一切以油藏为中心，通过地质、油藏、工艺、经济等多学科技术协同，实现油藏最佳规模效益开发。根据地质工程一体化目标的需要，建议采用扁平化地质工程一体化组织结构（图3）和多学科协同地质工程一体化油藏工程研究流程（图4）。

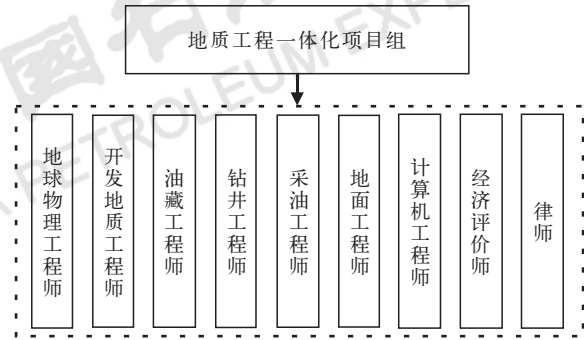


图3 地质工程一体化组织结构图

Fig.3 Organization chart with geology and engineering integration

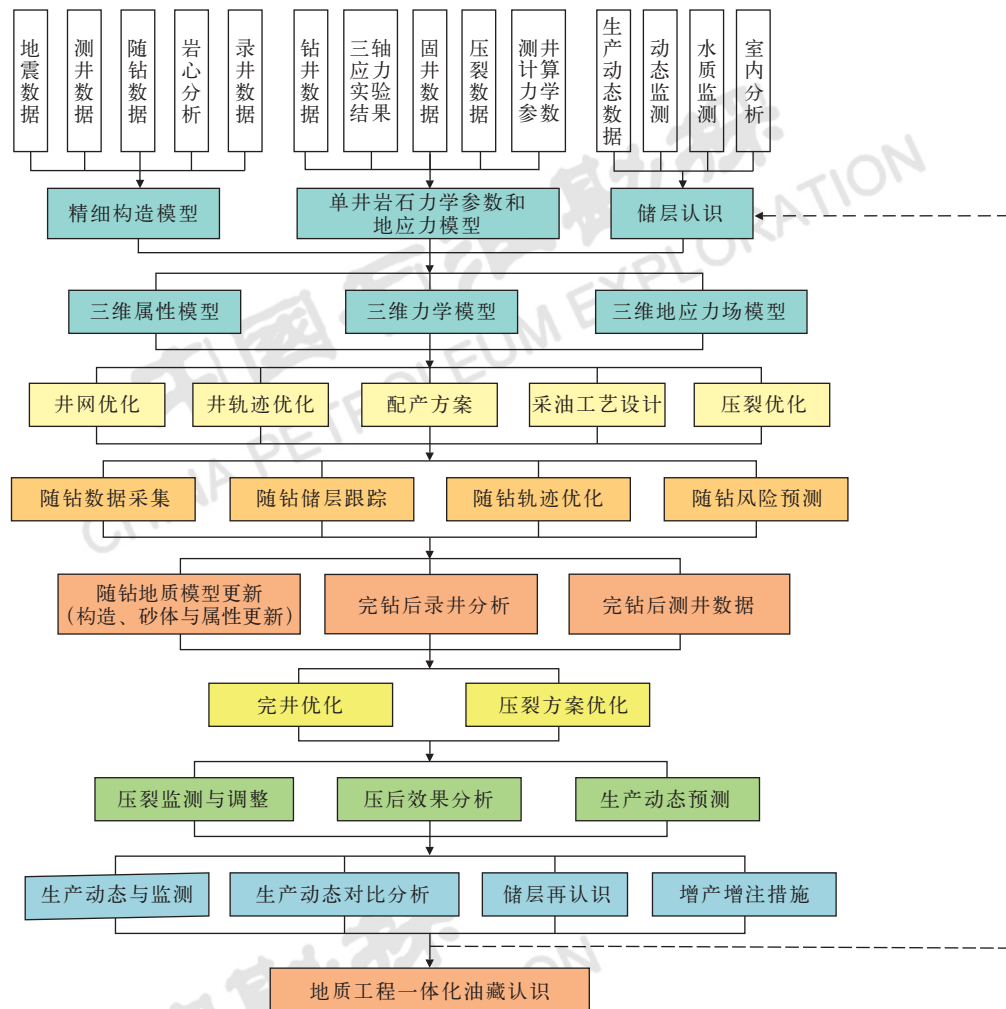


图4 地质工程一体化油藏工程研究流程图

Fig.4 Flow chart of oil reservoir engineering study with geology and engineering integration

地质工程一体化实践中采用扁平化管理，围绕油藏经济高效开发这一中心任务，坚持多学科协同解决问题，建立闭环地质工程与油藏开发一体化系统，通过对油藏进行持续跟踪与更新，持续优化井网与开发

技术对策，始终以最优化决策运用到油藏开发中。项目实施过程中，虽然不同阶段各学科工作量和重点工作有所不同，但均需要以决策目标为中心，整个流程中，围绕油藏模型，将地质研究作为基础环节，通过地震

数据、测井数据、岩心分析等,地球物理工程师和开发地质工程师能够建立精细构造模型。同时,开发地质工程师和油藏工程师等协同,利用钻井数据、三轴应力实验结果、测井计算力学参数等建立单井岩石力学参数和地应力模型。此外,根据生产动态数据、动态监测等,油藏工程师、采油工程师等对储层进行认识。通过以上基础模型,在综合地质研究基础上建立研究区三维属性模型、三维力学模型及三维地应力场模型,基于此开展井网优化、井轨迹优化部署和其他工艺设计,为后续随钻跟踪提供支撑。基于三维属性模型,根据随钻监测与跟踪数据,动态调整预测砂体变化,指导随钻调整,预测钻井风险,切实提高钻井砂体钻遇率,降低钻井风险。结合新钻井随钻数据、录井和测井数据进行储层评价,对三维属性模型进行实时调整,根据调整后的三维属性模型优化完井和压裂方案。进而根据压裂监测、压后效果分析调整完善三维属性模型、三维力学模型和三维地应力场模型,根据生产动态在油藏工程分析的基础上,利用油藏数值模拟进行历史拟合,持续优化更新,对储层进行再认识。针对开发存在的问题,根据油藏工程分析提出增产增注措施,利用油藏数值模拟等方法进行优化,再次更新储层认识,形成持续更新、以油藏高效开发为核心的地质工程一体化油藏工程研究体系。

### 3.2 精细描述

以三维属性模型为目标,通过地球物理、开发地

质、油藏等学科协同,开展油藏精细描述工作。根据地震断层解释结果进行断层建模。首先,在对岩心观察及地震反演属性等分析的基础上,以标志层识别为主线,借助现代沉积学理论,充分利用地震层位解释、测井标志层识别和生产动态裂缝识别等,进行研究区地层对比划分,建立研究区各储层的构造地质模型。姬塬油田延长组通常自下而上分布有K0—K9共10个标志层,其中位于长<sub>7</sub>亚段底部湖相黑色页岩(张家滩页岩)底部的凝灰岩为K1标志层,电性具有高声波时差、高电阻率、高自然伽马和低密度的“三高一低”特征,长6段和长7段交界的K2标志层则体现出高自然伽马、高声波时差、高自然电位、高电阻率的特征(图5)。其次,以细分亚段为单元,研究分层构造特征。参考区域沉积背景和早期沉积相研究资料,结合岩心观察,运用沉积学原理,通过油藏储层的地质沉积特征在各种测井信息上的具体分析,明确研究区沉积特征,建立起研究区单井测井相模式,绘制沉积微相剖面图和平面分布图。根据中国石油长庆油田公司勘探开发研究院研究表明,姬塬油田延长组物源方向主要为北东向和北西向,油田西部区块距离北西向物源近,而油田东部区块则主要受北东向物源控制。由于砂体受沉积相的控制,在沉积相研究的基础上可进一步落实油藏砂体分布规律,绘制砂体展布图。然后,在一次测井解释结果基础上,结合室内岩心分析结果,对实际开发油层性质校正并进行二次测

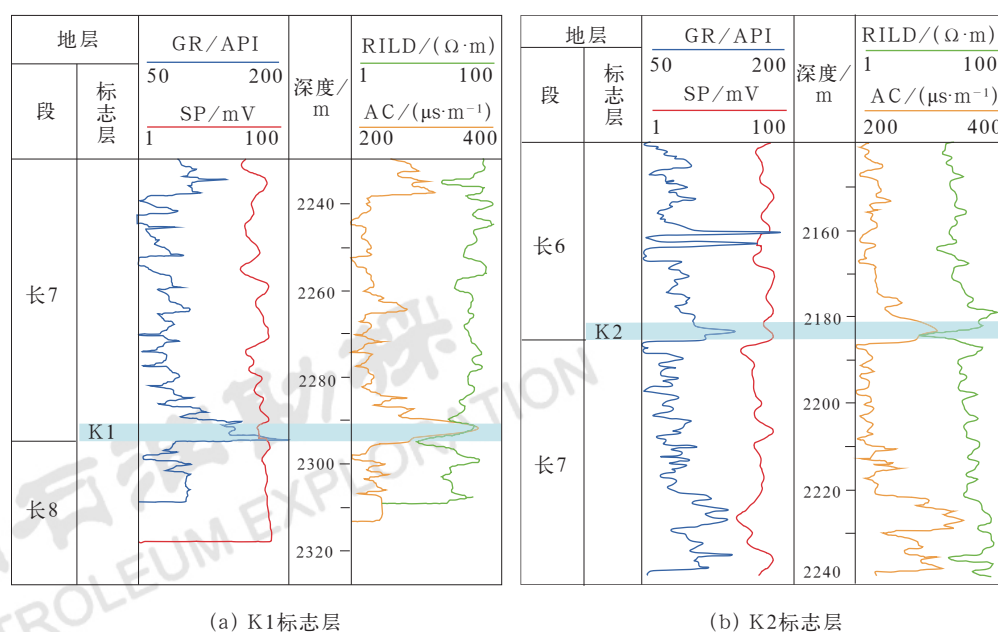


图5 研究区典型井地层划分测井响应图

Fig.5 Stratigraphic division and logging response in typical wells in the study area



井解释, 编绘油藏剖面图。随后, 开展储层物性分布特征及其非均质性、隔层的分布和油层连通状况、注采关系等研究, 分类评价储层物性分布与油井产能分布特征。最后, 应用油藏地质建模软件并采用多参

数协同砂体约束建模技术, 以尽可能进行精细的地质分层, 建立研究区描述构造、储层物性、流体空间分布的静态三维属性模型, 三维属性模型主要步骤建立流程见图6。

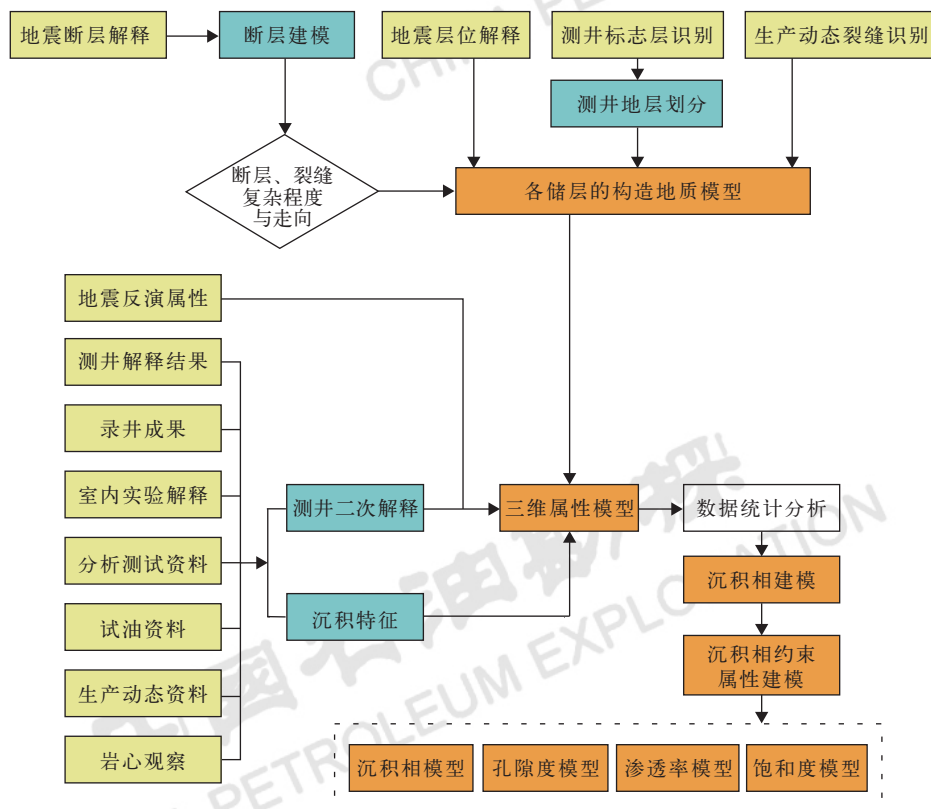


图6 研究区三维属性模型建立流程图

Fig. 6 Flow chart of 3D attribute modeling in the study area

### 3.3 基于多方法融合三维力学模型与三维地应力场模型

由于鄂尔多斯盆地储层相对稳定, 地应力方向相对单一, 长期开发中形成了以北东向为最大水平主应力方向的基本认识, 各区块布井过程中通常会根据部分井测试结果确定的某一最大水平主应力方向进行均匀井网设计, 而很少系统建立三维力学模型和三维地应力场模型。同时, 姬塬油田开展的岩石力学参数室内实验和矿场测试较少, 造成直接基于实验结果建立三维力学模型的复杂性和难度较高。为了建立可靠合理的三维力学模型和三维地应力场模型以指导油田开发, 本文综合利用室内实验、测井数据、岩石力学理论及压裂资料等, 采用随机建模方法建立了一套三维力学模型和三维地应力场模型, 同时利用钻井、压裂等资料对模型不断进行更新和完善, 持续提高模型的精度和可靠性。

首先, 开展室内岩心岩石力学实验, 确定区块岩石力学参数与地应力参数。其次, 将钻井数据、固井数据和压裂数据等相结合, 对已有的岩石力学参数和地应力参数计算模型进行修正, 随后利用修正后的计算模型和各井测井资料计算得到单井岩石力学参数和单井地应力参数, 建立单井剖面。接着, 基于单井岩石力学参数和单井地应力参数, 利用建模软件, 采用随机建模的方法, 建立三维力学模型和三维地应力场模型, 并根据已有监测井对多个实现进行优选。最后, 及时将新增数据和监测资料导入, 持续更新、修正并检验模型。多方法融合的三维力学模型和三维地应力场模型建立流程见图7。

#### 3.3.1 地应力参数确定

常规测井中声波时差测井通常为纵波, 而进行岩石力学参数计算时需要用到纵波和横波两种, 因此首先通过实验室测定研究区纵波与横波关系。实验时用波

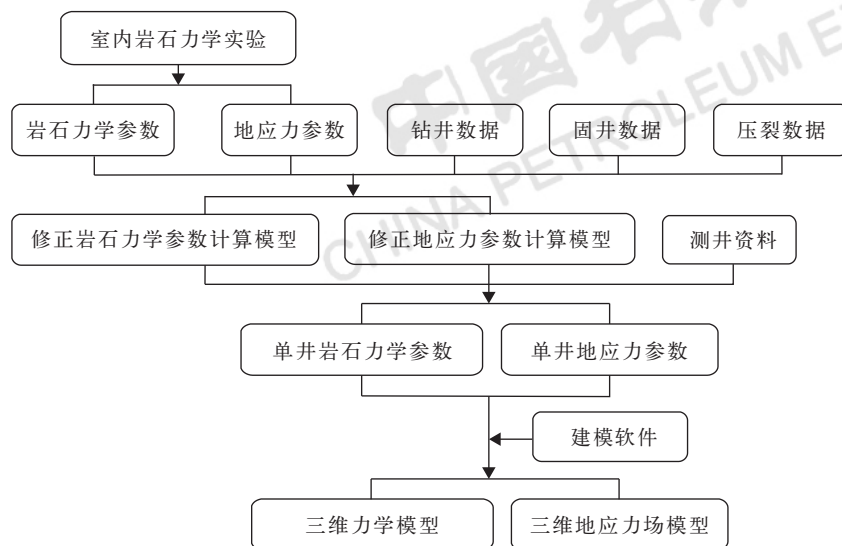


图 7 多方法融合三维力学模型和三维地应力场模型建立流程图

Fig.7 Flow chart of 3D mechanical modeling and 3D in-situ stress field modeling by fusing multi method

长为毫米级的超声波来反演推断地震波在地质体中的传播特征,根据岩样声学特征测试纵波和横波实验速度数据,可以建立研究区纵波与横波转化关系式。根据实验结果可以得到其纵波与横波关系如图 8 所示,该区纵波与横波转换方程为

$$v_s = 0.5163v_p + 253.5777 \quad (1)$$

式中  $v_s$ ——横波速度, m/s;  
 $v_p$ ——纵波速度, m/s。

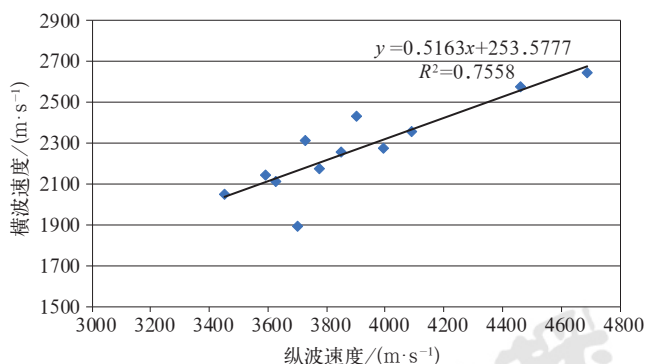


图 8 鄂尔多斯盆地安 83 井区纵波与横波转换关系图

Fig.8 P-S wave conversion diagram in An 83 well block in Ordos Basin

在此基础上可以利用测井资料计算岩石泊松比、杨氏模量、剪切模量、体积模量等弹性力学参数,相关模型可从相关资料获得。由于弹性力学参数模型计算时需要用到静态弹性模量等静态参数,而测井资料直接求取结果为动态弹性模量等动态参数,因此需要

根据相关室内实验建立动态与静态弹性模量等岩石力学参数转换关系。

利用“TAW-1000 深水孔隙压力伺服实验系统”对区块岩样进行岩石力学参数测定工作,实验内容包括密度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、三轴抗压强度、内聚力和内摩擦角等。可以根据实验结果和测井计算结果回归得到修正后的各岩石力学动态、静态弹性模量和泊松比之间的转换方程。

如修正后动态、静态弹性模量的转换公式为

$$E_s = 1.0259E_d - 6.4652 \quad (2)$$

式中  $E_s$ ——岩石的静态弹性模量, MPa;

$E_d$ ——岩石的动态弹性模量, MPa。

同时也可以根据内聚力和内摩擦角等实验结果,得到修正后岩石的抗压强度计算公式、抗压强度与抗拉强度的关系式、内聚力计算模型和内摩擦角模型。进而编写软件,利用测井曲线计算得到研究区各井强度参数和弹性参数等岩石力学参数。在黄荣樽模型的基础上,采用改进后弹簧组合模型来计算地应力<sup>[22]</sup>。基于以上模型,利用测井、压裂和室内实验结果等资料可以得到各井的单井岩石力学参数和地应力参数。

### 3.3.2 应力场模拟

考虑到成熟的三维地质建模软件建立的模型不仅可以忠实于控制点的实测数据,而且还可以对井间数据实现可靠精度下的内插和外推,因此本文基于单井计算得到的地应力参数,尝试利用三维地质建模软件建立区域三维地应力场模型。目前三维建模方法可分



为确定性建模方法和随机建模方法两大类<sup>[23-24]</sup>。考虑到实测中发现不同区域地应力变化的复杂性,因此采用基于象元的随机建模方法建立三维地应力场模型。

在建立储层模型的时候,要充分利用前期地质研究的成果,如考虑主应力方向,以建立正确的变差函数模型,并选择合适的模拟方法。将计算得到的单井地应力(三应力)作为新的测井数据,进而进行随机模拟,选用高斯模型和序贯高斯模拟方法建立研究区三维地应力场模型。图 9、图 10 为基于此方法建立的鄂尔多斯盆地姬塬油田安 83 井区最大水平主应力和最小水平主应力的三维模型。该区最大水平主应力方向主体为北东 60°~北东 80°,局部如安 233-36、安 231-38 等井最大水平主应力方向为北东 20°~北东 50°。

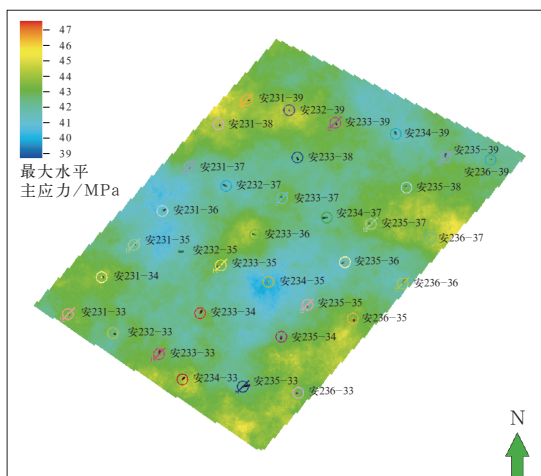


图 9 安 83 井区最大水平主应力三维图  
Fig.9 3D diagram of the maximum horizontal principal stress in An 83 well block

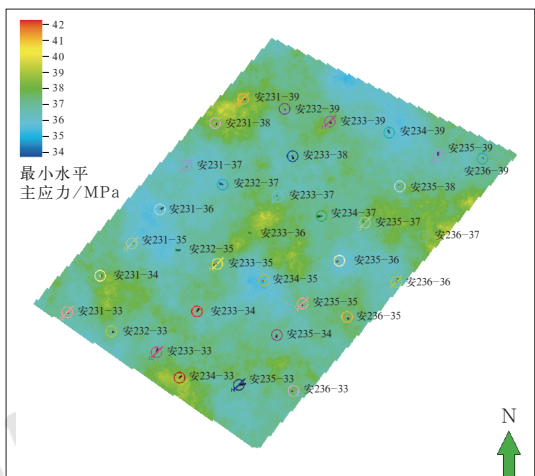


图 10 安 83 井区最小水平主应力三维图  
Fig.10 3D diagram of the minimum horizontal principal stress in An 83 well block

### 3.4 井网设计

鄂尔多斯盆地长 6 段、长 7 段油藏井网设计时,通常在砂体分布范围内以均匀分布井网为主,井排方向与最大水平主应力方向相同。以安 83 井区为例,该井区采用 6 套不同井排距开采,其中中部采用 450m×140m 矩形井网;北部采用 350m×150m 菱形井网;西部采用 220m×220m 正方形井网;中西部采用 400m×140m 矩形井网;东南部采用水平井井网;南部采用 480m×200m 菱形井网<sup>[25]</sup>。井网主要井排方向为北东 60°~北东 80°,与最大水平主应力方向(裂缝发育方向)平行,生产动态反映出压力保持水平低、主向井易水淹、水驱控制程度低、个别侧向井水淹等问题。针对实际开发出现的问题,考虑到压裂裂缝走向与地应力的关系,以及裂缝与砂体沉积、渗透率分布的关系,提出了基于动态三维属性模型和三维地应力场模型,综合考虑裂缝和砂体展布方向的井网部署方案。

首先,根据砂体展布方向、渗透率平面分布特征和室内岩心渗透率实验结果等,确定沿砂体展布方向的渗透率与垂直砂体展布方向渗透率的极差倍数,将极差倍数作为确定井排距关系的重要依据,同时建立归一化渗透率分布场。接着,根据三维地应力场模型,刻画压裂裂缝分布规律,确定人工裂缝展布方向,重点关注与研究区北东 60°~北东 80°方向不一致的最大水平主应力分布区域。然后,对三维最大水平主应力进行归一化处理,建立归一化最大水平主应力分布场。随后,结合其他区块压裂裂缝与原始储层渗透率等效处理关系,将归一化后的渗透率分布场和归一化最大水平主应力分布场进行矢量加和,将加和后的矢量分布方向作为井排方向。最后,根据渗透率的极差倍数和已开发井网效果分析结果,采用菱形反九点井网进行井网部署,后期根据动态特征可将菱形反九点井网调整成矩形井网;对于滚动开发井,根据动态三维属性模型和三维地应力场模型采用相同流程确定井网。

### 3.5 开发技术政策

#### 3.5.1 开发技术政策优化基本流程

地质工程一体化中的开发技术政策应该是整个一体化项目中的落脚点与新的起始点,围绕油藏高效开发的目标,充分借助地质工程一体化的理念,在精细描述和井网优化的基础上,先通过常规油藏工程分析,

进一步明确现有开发效果及存在问题,再借助油藏数值模拟技术,实现地质与油藏工程和压裂的耦合模拟<sup>[26]</sup>。

开发技术政策优化流程见图11。首先,通过常规油藏工程方法适时开展动态分析;通过区块生产曲线、井组生产曲线、单井生产曲线及时了解各部分生产动态;通过水驱储量控制程度计算井网与地质因素的匹配关系;通过水驱特征曲线、含水率变化关系等明确水驱开发效果;通过递减规律分析明确区块开发状况,及时了解区块开发状态和存在问题;通过对常规油藏工程各指标计算,对于出现含水率突然快速增加等情况,及时分析重点井组、井开发状态和可能见水层位、方向等。接着,根据建立的三维属性模型和三维地应力场模型,结合地质认识和裂缝系统认识,利用油藏数值模拟方法,将包含刻画后裂缝系统的粗化三维属性模型导入数值模拟软件。根据研究区

室内相渗及高压物性等实验、井史等建立油藏数值模型并根据动态认识和测试资料成果进行历史拟合,重点拟合中高含水井及含水暴性增加井,利用数值模拟方法确定地质裂缝等认识,定量确定研究区剩余油分布,明确剩余油富集规律。然后,根据修正后的油藏数值模型,对于新部署井或完善井网区域,进行井网优化部署模拟,确定合理井网,进而确定新布井开发层位、合理压裂改造参数;对于已开发井区,进行开发技术政策优化,进一步优化各井注入量、产量等开发参数;对于拟改造井或调整井,开展重复压裂、井网调整、层位调整等压裂参数优化,确定最佳改造井及改造措施。最后,将新的油藏数值模拟认识加载到三维属性模型中,持续更新模型,根据新钻井和生产动态新认识及时将新增数据和监测资料导入,持续更新、修正并检验三维属性模型和油藏数值模拟模型。

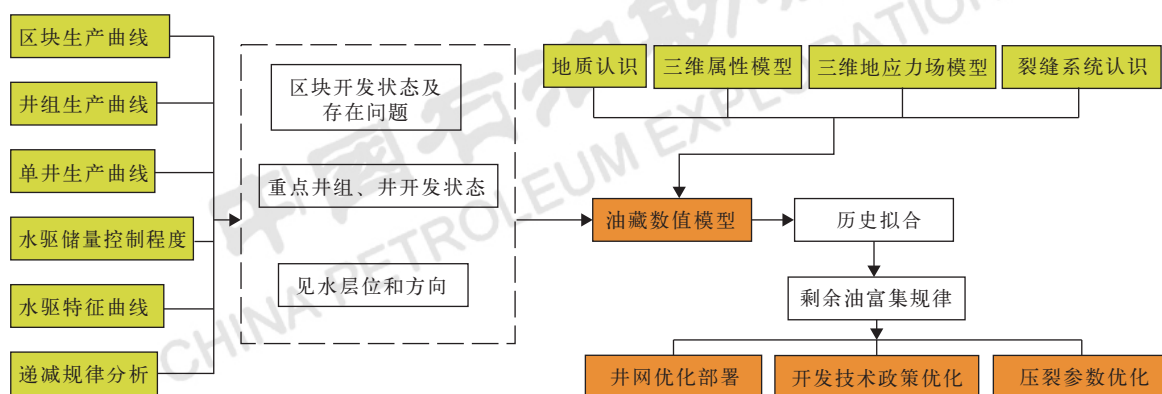


图11 地质工程一体化开发技术政策优化流程图

Fig.11 Flow chart of development countermeasure optimization with geology and engineering integration

### 3.5.2 开发技术政策优化实例

以安83井区为例,区内共有21口油井、13口注水井,最早投产的井是安236-39井和安234-33井,均于2010年9月投产,截至目前,两口井平均日产油量小于1t。井区内含水率以40%~80%最多,区块整体含水率为70%左右,安234-37井等4口井含水率均超过90%,采用连通关系统计法估算水驱储量控制程度,计算得出安83井区水驱控制程度为58.85%,可判断水驱控制程度差。通过对含水率与采出程度回归可知,研究区含水率呈“S”形变化,表现为早期含水率快速增长,随着油田的开发,中期含水率缓慢上升,后期也有明显的小幅度上升,含水率与采出程度关系如下

$$\frac{f_w}{1-f_w} = 22.25 R_K^{0.567} \quad (3)$$

式中  $f_w$ ——含水率;

$R_K$ ——可采储量采出程度。

根据Arps递减模型,安83井区月产量呈双曲递减,递减公式如下

$$Q = 3404.12658 \times (1 + 0.6 \times 0.24742t)^{-\frac{1}{0.6}} \quad (4)$$

式中  $Q$ ——月产量, t;

$t$ ——生产时间, 月。

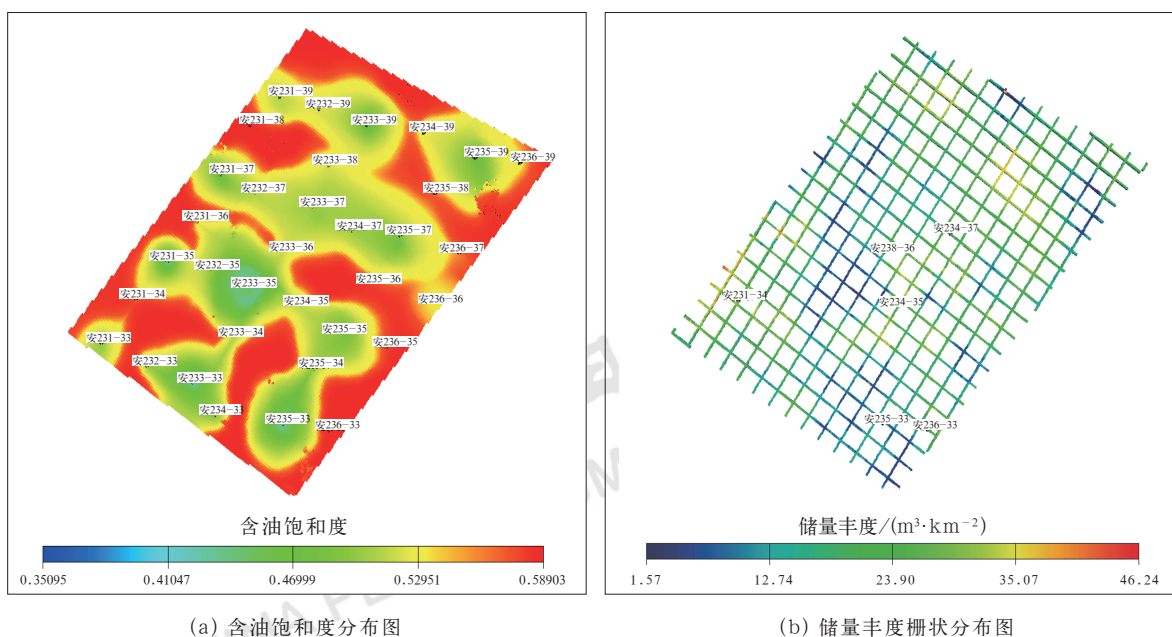
根据各井动态分析,特别是注水量波动和周边油井产量变化可知,安83井区在平面方向上存在方向

性见水,见水方向有两个方向,主要方向是北偏东方向,小部分见水方向是北偏西方向,局部存在裂缝性水淹。

根据油藏工程动态分析认识,结合三维属性模型、三维地应力场模型、室内实验结果,建立安 83 井区油藏数值模型。对于安 83 井区长 7 段油藏设置北西方向  $35^\circ$  为  $I$  轴,垂直此方向为  $J$  轴,网格步长沿  $I$ 、 $J$  方向均为 10m,纵向上划分为 5 个网格,网格数为  $N_I \times N_J \times N_K = 206 \times 161 \times 5 = 165830$ ,其中  $N_I$ 、 $N_J$ 、 $N_K$

分别为  $I$ 、 $J$ 、 $K$  轴方向的网格数。本文对安 83 井区长 7 段油藏 34 口油水井全部进行了拟合,采用的方式为:给定油井单井产液量、给定注水井注水量,重点拟合含水率等指标,拟合历史从 2010 年 8 月开始,模拟过程以 1 个月为一时间段。模拟区内 34 口井中 31 口井的拟合程度较高,拟合率达到 91.2%。

安 83 井区长 7 段油藏剩余油分布主要受到渗透率非均质性、压裂裂缝与井网系统、注采不平衡、岩性的影响。模拟区目前剩余油分布见图 12。



(a) 含油饱和度分布图

(b) 储量丰度栅状分布图

图 12 安 83 井区模拟区目前剩余油分布图

Fig.12 Distribution of remaining oil in the simulation area in An 83 well block

对于安 83 井区而言,目前各层动用情况不均衡,剩余油从纵向看主要集中在中下部;而从平面看,大部分井周边 30~100m 范围内的剩余油饱和度较低,含水率较高,但是不同井区差异较大,部分井区目前动用砂体周边基本水淹,如安 233-35 注水井周边剩余油饱和度较小,此外对于该区含水较高地带主要受区域内裂缝系统影响,整体沿裂缝方向含水突进比较明显。

为了进一步提高安 83 井区采收率,在井网优化

的基础上,对该井区采取重复体积压裂增产措施。考虑到裂缝半长、主裂缝导流能力和次裂缝导流能力等多个因素均会影响压裂效果,因此采用正交实验的方式模拟多因素对压裂效果的影响,以便选择最佳的施工参数。采用  $L_9(3^4)$  正交试验表(表 1),影响因素包括裂缝半长、缝宽、主裂缝导流能力和次裂缝导流能力 4 个,每种因素考虑 3 种水平。安 83 井区相关模拟结果见图 13。

表 1 安 83 井区注水开发下体积压裂优化正交方案设计参数表 ( $L_9(3^4)$ )

Table 1 Parameters of volume fracturing optimization orthogonal scheme by using water injection development in An 83 well block ( $L_9(3^4)$ )

因素	裂缝半长 /m	缝宽 /m	主裂缝导流能力 /(D · cm)	次裂缝导流能力 /(D · cm)
实验 1	100	30	15	0.4
实验 2	100	50	20	0.7



续表

因素	裂缝半长 /m	缝宽 /m	主裂缝导流能力 /(D · cm)	次裂缝导流能力 /(D · cm)
实验 3	100	70	25	1
实验 4	120	30	20	1
实验 5	120	50	25	0.4
实验 6	120	70	15	0.7
实验 7	140	30	25	0.7
实验 8	140	50	15	1
实验 9	140	70	20	0.4

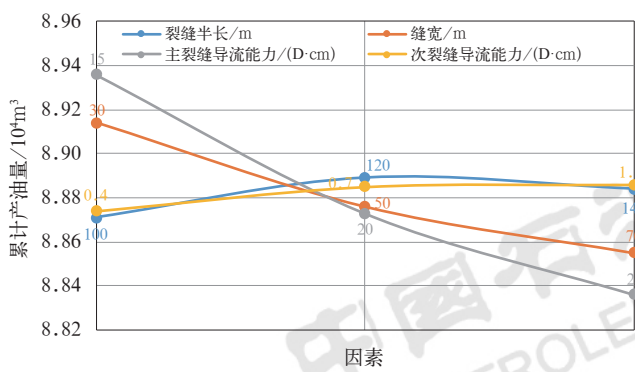


图 13 注水开发时安 83 井区体积压裂各方案 2015 年末  
累计产油效应分析曲线

Fig.13 Cumulative oil production analysis curve at the  
end of 2015 of each volume fracturing scheme during  
water injection development in An 83 well block

通过图 13 看，采用目前井网注水开发时，对于  
体积压裂各方案模拟结果表明，如果仅仅考虑模拟期

末累计产油量而不考虑其他因素，则最佳的组合应该  
是裂缝半长为 120m、缝宽为 30m、主裂缝导流能力  
为 15D · cm、次裂缝导流能力为 1D · cm。而从影响  
因素方面分析，主裂缝导流能力影响最大，次裂缝导  
流能力影响最小。可以看出，存在注水井时过长的裂  
缝可能会造成采油井过早见水，因此并不是主裂缝越  
长越好，适当的主裂缝长度尤为重要。此外由于裂缝  
并非直接与采油井处于同一连通方向，因此缝宽和主  
裂缝导流能力也不易过宽或过大，否则会增加油井过  
早见水的可能；而增加次裂缝导流能力则可扩大泄油  
面积，有利于提高采出程度。

根据优化流程，选择了安 231-44 等 5 口井进行  
重复压裂改造，改造前后效果见表 2。本次设计 5 口  
井进行施工，从施工前后对比看各井均取得了不错的  
效果，而与其他井相比也有更好的效果，目前本次优  
化设计井日产量较邻井增产 30.46%。

表 2 安 83 井区增产措施施工前后效果对比表  
Table 2 Comparison of production results before and after well stimulation in An 83 well block

井号	措施前			措施后		
	日产液 /m <sup>3</sup>	日产油 /t	含水率 /%	日产液 /m <sup>3</sup>	日产油 /t	含水率 /%
安 231-44	0.68	0.47	30.93	5.31	1.28	75.1
安 233-38	1.35	0.57	57.66	7.26	1.76	76.6
安 234-31	—	—	—	5.05	1.93	60.9
安 241-24	—	—	—	5.01	2.43	50.2
安 277-28	1.54	0.02	96.01	4.6	1.71	61.1

## 4 结论

(1) 基于岩心、测井资料和压裂施工监测相结合的单井岩石力学参数及地应力计算方法, 利用随机模拟方法建立储层三维地应力场, 确定了安 83 井区最大水平主应力方向主要为北东  $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$  左右, 而在安 231-38 等井附近最大水平主应力为北西  $30^{\circ}$  左右, 基于地应力分析设置人工裂缝后数值模拟结果与目前动态分析结果比较吻合。

(2) 形成了精细地质描述—地应力分析—地质建模—油藏工程设计—数值模拟一体化技术方法, 优化出安 83 井区注水开发时最佳的压裂工艺参数组合应该是裂缝半长为 120m, 缝宽为 30m, 主裂缝导流能力  $15\text{D} \cdot \text{cm}$ , 次裂缝导流能力为  $1\text{D} \cdot \text{cm}$ , 主裂缝导流能力影响最大, 而次裂缝导流能力影响最小, 优化后压裂井平均日产量较邻井增产 30.46%。

(3) 在动态地质模型的基础上, 利用油藏数值模拟方法持续优化井网和开发技术政策, 有效指导了安 83 井区等姬塬油田长 7 段高效开发。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Alderman J A, Donegani A. Development of integrated safety, environmental, and quality management systems for the oil and gas industries[C]. Jakarta: SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, 1994.
- [3] 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 等. 地质—工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J]. 中国石油勘探, 2015,20(4):1-23.  
Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, et al. Geoscience-to production integration ensures effective and efficient south China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(4):1-23.
- [4] 陈颖杰, 刘阳, 徐婧源, 等. 页岩气地质工程一体化导向钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2015,43(5):56-62.  
Chen Yingjie, Liu Yang, Xu Jingyuan, et al. Integrated steering drilling technology for geology engineering of shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(5):56-62.
- [5] 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.
- [6] 王昕, 杨斌, 王瑞. 吐哈油田低饱和度和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.
- [7] 鲜成钢, 张介辉, 陈欣, 等. 地质力学在地质工程一体化中的应用[J]. 中国石油勘探, 2017,22(1):75-88.  
Xian Chenggang, Zhang Jiehui, Chen Xin, et al. Application of geomechanics in geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(1):75-88.
- [8] 常少英, 朱永峰, 曹鹏, 等. 地质工程一体化在剩余油高效挖潜中的实践及效果: 以塔里木盆地 YM32 白云岩油藏为例[J]. 中国石油勘探, 2017,22(1):46-52.  
Chang Shaoying, Zhu Yongfeng, Cao Peng, et al. Application of geology-engineering integration in high-efficiency remaining oil potential tapping and its results: a case study on YM32 dolomite oil reservoirs in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(1):46-52.
- [9] 张以明, 才博, 何春明, 等. 超高温超深非均质碳酸盐岩储层地质工程一体化体积改造技术[J]. 石油学报, 2018,39(1):92-100.  
Zhang Yiming, Cai Bo, He Chunming, et al. Volume fracturing technology based on geo-engineering integration for ultra-high temperature and ultra-deep heterogeneous carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018,39(1):92-100.
- [10] 张合文, 崔明月, 张宝瑞, 等. 低渗透薄层难动用边际油藏地质工程一体化技术: 以滨里海盆地 Zanazour 油田为例[J]. 中国石油勘探, 2019,24(2):203-209.  
Zhang Hewen, Cui Mingyue, Zhang Baorui, et al. Geology-engineering integration for low-permeability and thin marginal reservoirs: a case study on Zanazour oilfield, Pre-Caspian Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(2):203-209.
- [11] 杨智, 唐振兴, 陈旋, 等. “进源找油”: 致密油主要类型及地质工程一体化进展[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):73-83.  
Yang Zhi, Tang Zhenxing, Chen Xuan, et al. “Exploring oil inside source kitchen”: main types of tight oil and progress of geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):73-83.
- [12] 冯张斌, 马福建, 陈波, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段致密油地质工程一体化解决方案: 针对科学布井和高效钻井[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):155-168.  
Feng Zhangbin, Ma Fujian, Chen Bo, et al. Geology-engineering integration solution for tight oil exploration of Chang-7 member, Ordos Basin: focusing on scientific well spacing and efficient drilling[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):155-168.
- [13] 蒋廷学, 卞晓冰, 左罗, 等. 非常规油气藏体积压裂全生命周期地质工程一体化技术[J]. 油气藏评价与开发, 2021,11(3):297-304.  
Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Zuo Luo, et al. Whole life cycle geology-engineering integration of volumetric fracturing

- technology in unconventional reservoir[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2021,11(3):297-304.
- [14] 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(5):1-11.  
Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, *et al.* Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(5):1-11.
- [15] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2005,7(1):34-44.  
Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin, *et al.* Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005,7(1):34-44.
- [16] 时保宏, 秦馨雨, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组6段油藏差异成藏因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021,42(5):1112-1123.  
Shi Baohong, Qin Xinyu, Zhang Caili, *et al.* Insights on factors causing differential enrichment of Chang 6 member in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5):1112-1123.
- [17] 申锦江, 唐振兴, 王博涛, 等. 姬塬油田西部延长组长6段沉积特征及沉积模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2020,35(3):1-9.  
Shen Jinjiang, Tang Zhenxing, Wang Botao, *et al.* Sedimentary characteristics and sedimentary model of Chang 6 member of Yanchang Formation in the west of Jiyuan Oilfield[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2020,35(3):1-9.
- [18] 沈志成, 赵沪春, 王为林, 等. 姬塬北长6—长8油层组成藏及勘探潜力分析[J]. *特种油气藏*, 2021,28(3):33-39.  
Shen Zhicheng, Zhao Huchun, Wang Weilin, *et al.* Analysis of hydrocarbon accumulation and exploration potential of Chang 6—Chang 8 pay zones of Yanchang Formation in north Jiyuan area[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021,28(3):33-39.
- [19] 刘广林, 王亚玲, 马爽, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长6油藏成藏条件和充注模式[J]. *沉积学报*, 2019,37(6):1152-1161.  
Liu Guanglin, Wang Yaling, Ma Shuang, *et al.* Reservoir forming conditions and filling models for Chang 6 oil reservoir of the Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019,37(6):1152-1161.
- [20] 徐会林. 鄂尔多斯盆地安83井区延长组长7储层相对高产富集区预测研究[D]. 荆州: 长江大学, 2016.  
Xu Huilin. Study on prediction of relatively high yield and enrichment area of Yanchang Chang 7 reservoir in An83 well block, Ordos Basin[D]. Jingzhou: Changjiang University, 2016.
- [21] 李秋德. 新安边油田安83长7致密油储层特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.  
Li Qiude. Study on tight oil reservoir characteristics of An83 Chang 7 in Xin'anbian Oilfield [D]. Xi'an: Northwestern University, 2016.
- [22] Zhang Y, Bai B, Shen L, *et al.* Research and application on simulation of oilfield 3D in-situ stress field by multi-information co-processing[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019,12(2):1-12.
- [23] 石善志, 于会, 孙正丽, 等. 新疆油田七东1区克下组地应力特征及人工裂缝延伸方向[J]. *科学技术与工程*, 2015,15(17):117-120.  
Shi Shanzhi, Yu Hui, Sun Zhengli, *et al.* The in-situ stress characteristics and fracture extension direction on lower Karamay Formation of Qidong-1 area in Xinjiang Oilfield[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015,15(17):117-120.
- [24] 舒红林, 王利芝, 尹开贵, 等. 地质工程一体化实施过程中的页岩气藏地质建模[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(2):84-95.  
Shu Honglin, Wang Lizhi, Yin Kaigui, *et al.* Geological modeling of shale gas reservoirs during the implementation process of geology-engineering integration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):84-95.
- [25] 李龙龙, 周创飞, 张博, 等. 胡尖山油田安83区块超低渗油藏井网适应性分析[J]. *石油化工应用*, 2013,32(3):51-54.  
Li Longlong, Zhou Chuangfei, Zhang Bo, *et al.* The oilfield safety Hujianshan 83 block of ultra-low permeability reservoirs well network adaptability analysis[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013,32(3):51-54.
- [26] 张益, 刘帮华, 胡均志, 等. 苏里格气田苏14井区二叠系下石盒子组盒8段多期砂体储层合理开发方式研究[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6):165-174.  
Zhang Yi, Liu Banghua, Hu Junzhi, *et al.* Study on development mode of multi-stage superimposed sandstone reservoir of He 8 member of the Permian Lower Shihezi Formation in Su 14 well block of Sulige Gasfield[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(6):165-174.