

油田开发实践与认识

袁庆峰 ◎ 著

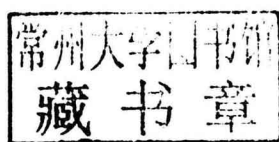
PRACTICE AND
UNDERSTANDING OF
OILFIELD
DEVELOPMENT

石油工业出版社



油田开发实践与认识

袁庆峰 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合大庆油田 50 多年的油田开发实践,以油藏地质认识和开发规律研究为基础,集油田开发技术、思维方式和方法论为一体,突出了大庆油田水驱和化学驱特色技术和创新成果。内容包括:油田开发规划计划、水驱油田开发晚期开发技术、聚合物驱油藏工程理论与技术、三元复合驱油藏工程研究与应用、注气提高采收率技术、油藏数值模拟技术等。

本书适合从事油气田开发人员、生产管理人员、工程技术人员、研究人员,以及高校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

油田开发实践与认识/袁庆峰著.

北京:石油工业出版社,2014.6

ISBN 978-7-5183-0238-3

I. 油…

II. 袁…

III. 油田开发-研究

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字-(2014)第 127632 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523735 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

710×1000 毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:395 千字

定价:68.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

大庆油田是世界上为数不多的大型陆相砂岩油田，也是中国最大的陆相砂岩油田。50 多年来，大庆油田始终坚持以《实践论》、《矛盾论》为指导，通过反复实践、反复认识，探索形成了陆相多油层砂岩油田注水开发理论和技术，创立了多油层油田储量“分步利用、多次布井、接替稳产”的开发模式，自主创新了具有世界领先水平的三次采油技术，建成了世界最大的三次采油基地，实现了原油 5000 万吨以上持续 27 年高产稳产，凝练形成了与“两弹一星”航天精神共同写入共和国史册的“爱国、创业、求实、奉献”的大庆精神铁人精神，为国民经济发展作出了巨大贡献。

大庆油田的历史是一部不断创新发展的历史。创新犹如阳光和土壤，是这片土地结出丰硕果实的生命基因。在 50 多年的油田开发实践中，大庆油田的开发工作者解放思想、挑战极限，勇攀世界石油科技高峰，不仅创新形成了一系列先进的油田开发技术，还积累了丰富鲜活的创新经验，其中包括推动油田科技进步的科学精神、指导油田科学实践的科学思想和确保油田高效开发的科学方法。这些创新成果与经验是一笔宝贵的精神财富，有力支撑和保证了大庆油田的勘探开发、长期高产稳产和持续有效发展。

《油田开发实践与认识》以油藏地质研究和油藏工程理论为基础，突出了大庆油田的开发特色，全面展示了大庆油田开发的新观念、新思维、新技术和新的管理经验，生动地再现了大庆油田开发的历程和艰苦探索的足迹，闪烁着大庆油田开发工作者智慧的光芒和思想的火花，可谓大庆油田开发建设历程的缩影。本书集理论与实践、思维方式与方法论、新技术与新成果为一体，提供了大量的经过实践检验的油田开发成功范例，条理清晰，思

路有序，令人耳目一新。

《油田开发实践与认识》旨在弘扬科学精神，倡导科学思想，传播科学方法。油田科技创新有规律可循，大多油田开发面临的基本问题和主要矛盾是相同的，只是技术具体应用不同而已。我们相信，作者的油田开发实践与认识能够成为突破油田开发瓶颈的一把“金钥匙”，对中国东部油田的深度挖潜和开发实践有所启示，对广大油田科技和管理工作者拓宽创新思路，激发创新活力，树立创新信心有所裨益。

创新既是古来有之的法宝，更是新时代腾飞的神器。大庆油田正在向“高水平、高效益、可持续”的宏伟目标迈进，这是一条创新之路，是一条充满希望的发展之路。我们期待，大庆油田加快创新型企业建设，进一步提升自主创新能力和核心竞争力，形成更多的创新成果和管理经验，创造出无愧于时代的辉煌业绩，为国家发展作出更大的贡献。

中国工程院院士

A large, stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Wang Kang, the Chinese Academy of Engineering Academician mentioned in the text.

2014 年 6 月

前 言

大庆油田属于大型河流——三角洲沉积形成的陆相多层非均质砂岩油田，其层数众多、单层厚度薄、层间差异大、平面微相变化复杂、油层内部不均一，在注水开发中表现出严重的层间、平面和层内非均质性。大庆油田在 50 多年的开发实践中，通过不断深化对储集层性质、渗流规律和开发规律的认识，不仅创新发展了适应陆相多层非均质砂岩油田特点的细分注水开发技术和三次采油技术，而且创立形成了适合陆相油田的开发理念、开发方法和管理经验，实现了原油 5000 万吨持续 27 年稳产和原油 4000 万吨 11 年连续稳产目标，创造了世界同类油田开发史上的奇迹。目前中国东部老油田普遍进入高含水和高采出程度的“双高”开发阶段，需要解决特高含水期水驱精细挖潜、聚合物驱和三元复合驱等一系列技术难题。大庆油田在中国东部老油田极具代表性，将大庆油田开发实践中形成的技术、成果、认识和经验进行总结提炼，对加快已有知识和经验传承，启迪开发领域科技创新，无疑是一件有意义的事情。

本书着眼于在油田开发过程中如何抓住主要矛盾，把握和利用油田开发规律，实现油田科学合理开发；如何在特高含水期通过精细挖潜，有效控制含水上升，减缓产量递减；如何在油田开发适当时机应用三次采油技术大幅度提高采收率，实现水驱产量合理接替。本书从油藏工程实践出发，介绍了从事油藏工程工作应掌握的油藏描述、渗流力学、油藏模拟和油田开发主要工作内容等基本知识、基础理论和基本技能；重点归纳总结了地下水运动基本规律、水驱油田开发基本规律和油田开发思维方式方法；以大庆油田为案例，介绍了当代油田开发代表性技术——水驱油田晚期开发技术、聚合物驱油技术、三元复合驱油技术和注

气提高采收率技术的研发与应用；结合大庆油田开发战略规划研究实践，总结了油田开发战略、规划和计划编制的重点内容、基本原则和论证程序。本书以期通过基础知识、基本规律、代表技术和战略管理四部分内容，展示大庆油田在水驱和化学驱开发技术上的创新成果，解读大庆油田持续高产稳产的轨迹，总结大庆油田开发的新思维、新观念、新技术以及新的管理模式，提出进一步深化研究的重点方向。

本书是在作者近年来所作学术报告和技术讲座讲稿的基础上整编而成，共八章。朱莉莉参加了第一章的编写工作，方艳君、孙景华、朱莉莉参加了第二章的编写工作，庞彦明、付百舟参加了第三章的编写工作，庞彦明、陆会民参加了第四章的编写工作，韩培慧、陈国、李洁参加了第五章的编写工作，李洁参加了第六章的编写工作，赵国忠参加了第七章和第八章的编写工作。本书的编写得到了大庆油田勘探开发研究院院长王宏伟、副院长庞彦明、副总规划师方艳君的大力支持和指导，也得到了大庆油田勘探开发研究院开发规划研究室全体人员和《大庆石油地质与开发》编辑部孙景华、李安峰的具体帮助，在此一并表示感谢。

本书在编写中，参阅了大量的油田内部研究报告，并对其中一些观点进行了梳理和提升。由于水平所限，书中谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2014年6月于大庆

目 录

第一章 油田开发基本知识	(1)
第一节 油田开发工作的主要内容	(1)
第二节 油田开发阶段划分	(7)
第三节 不同开发阶段调整措施和指标	(13)
第四节 油田开发主要技术系列	(22)
第二章 油田开发计划、规划和战略	(43)
第一节 油田开发计划	(43)
第二节 油田开发规划	(46)
第三节 油田开发战略	(53)
第三章 油藏工程概述	(62)
第一节 油藏工程师的主要工作	(62)
第二节 油藏工程基础——渗流力学简述	(64)
第三节 油藏工程研究的主要任务	(67)
第四章 特高含水期油田开发技术	(83)
第一节 剩余油描述	(83)
第二节 优势渗流通道描述与识别	(89)
第三节 储集层和流体性质变化	(93)
第四节 开发调整技术	(97)
第五节 对油田开发规律的认识	(105)
第五章 聚合物驱油藏工程理论与实践	(122)
第一节 驱油用聚合物性能及渗流特征	(122)
第二节 聚合物驱油藏工程	(141)
第三节 聚合物驱层系井网	(148)
第四节 聚合物驱阶段划分和动态反映	(150)
第五节 聚合物溶液与储集层的匹配关系	(159)

第六节	聚合物驱油存在的主要问题	(167)
第六章	三元复合驱油藏工程研究与应用	(171)
第一节	表面活性剂及其与驱油相关的性质	(171)
第二节	碱及其驱油作用	(178)
第三节	对三元体系化学剂溶液的要求	(179)
第四节	三元复合驱油机理	(187)
第五节	三元复合驱油体系配方	(190)
第六节	三元复合驱适应的油藏条件	(195)
第七节	三元复合驱在大庆油田的矿场试验	(198)
第八节	三元复合驱矿场动态反映	(204)
第九节	复合驱油技术未来展望	(219)
第七章	注气提高原油采收率技术	(221)
第一节	概述	(221)
第二节	黏性指进和界面张力对驱替效果的影响	(226)
第三节	常用气体的物理化学性质	(228)
第四节	注气的相态特征	(231)
第五节	注气驱油室内实验	(236)
第六节	注空气提高原油采收率技术基础	(240)
第八章	油藏模拟综述	(249)
第一节	传统的油藏动态预测方法	(249)
第二节	油藏数值模拟方法	(258)
参考文献		(284)

第一章 油田开发基本知识

第一节 油田开发工作的主要内容

为了充分利用和保护油气资源，必须对油田进行合理开发。合理开发油田必须贯彻全面、协调、可持续发展的方针。合理开发油田的标准：一是要取得最大的经济效益，二是要取得油田最高的采收率，三是要满足国民经济对石油的需求。

油田开发工作主要包括以油田开发地质为基础的油藏工程、钻井工程、采油工程、地面工程和经济评价等多种专业。油田开发工作必须进行多学科综合研究，发挥各专业协同的系统优势，实现油田科学、有效开发。油田开发要把油藏地质研究贯穿始终，及时掌握油藏动态，根据油藏特点及所处的开发阶段，制定合理的调控措施，改善开发效果，使油田达到较高的经济采收率。油田开发要合理配置各种资源，优化投资结构，实行精细管理，控制生产成本，提高经济效益，实现油田开发效益最大化。

一、油藏评价

含油构造或圈闭经预探提交控制储量或在有重大发现的基础上，经初步分析认为具有开采价值后，进入油藏评价阶段。油藏评价阶段的主要任务是编制油藏评价部署方案，进行油藏技术经济评价，对于具有经济开发价值的油藏，提交探明储量，编制油田开发方案。

油藏评价部署主要内容是评价目标概况、油藏评价部署、油田开发概念方案、经济评价风险分析和实施要求等。

油田开发概念方案包括油藏工程初步方案、钻采工艺主体方案、地面工程框架和开发投资估算。油藏工程初步方案应根据评价目标区的地质特点和已有的初步认识，提出油井产能、开发方

式及油田生产规模的预测；钻采工艺主体要提出钻井方式、钻井工艺、油层改造和开采技术等要求；地面工程框架要提出可能采用的地面工程初步设计；开发投资估算包括开发井投资估算和地面建设投资估算。

二、开发方案编制

油田开发方案是指导油田开发的重要技术文件，是油田开发产能建设的依据。油田投入开发必须有正式批准的油田开发方案。

油田开发方案的编制原则是确保油田开发取得好的经济效益和较高的采收率。

开发方案的主要内容有：

1. 总论

总论主要包括：油田地理与自然条件概况、矿权情况、区域地质与勘探简史、开发方案结论等。

2. 油藏工程方案

油藏工程方案主要包括：油田地质、开发原则、开发方式、开发层系、井网和注采系统、监测系统、指标测算、经济评价、多方案的经济优选及综合优选和实施要求。油藏工程方案应以油田或区块为单元进行编制。

3. 钻井工程方案

钻井工程方案的编制要充分了解油藏特征及油田开发时对钻井工程的要求，依据油藏类型和开采方式的不同确定开发井的钻井、完井程序及工艺技术方法。

4. 采油工程方案

采油工程方案主要包括：油藏工程方案要点，储集层保护措施，采油工程完井设计，采油方式和参数优化设计，增产、增注技术，对钻井和地面工程的要求，健康、安全和环境要求，采油工程投资概算及其他配套技术。

5. 地面工程方案

地面工程方案主要包括：油藏工程方案要点，采油工程方案

要点,地面工程建设规模和总体布局,地面工程建设工艺方案,总图和建筑结构方案,防腐防垢工程、生产维修、组织机构和定员方案,健康、安全、环境和节能等方案,主要设备选型及工程用量,地面工程占地面积、总建筑面积及地面工程投资估算。

6. 经济评价

经济评价主要包括:投资估算与资金筹措、成本费用估算、钻售收入与流转税金估算、损益表编制、相关经济评价指标计算、现金流量与相关经济评价指标计算、不确定性分析和经济评价结论。

7. 方案优选

油田开发方案的优选要以油藏工程方案为基础,结合钻井、采油和地面工程方案配套形成2~3个方案,进行投资估算和经济评价,方案比选的主要指标为净现值,也可采用多指标综合比选。

三、产能建设

新油田开发方案和老油田调整方案经批准并列入产能建设项目计划后,进入产能建设阶段。产能建设要坚持整体建设的原则,其主要任务是按开发方案要求完成钻井、测井、完井、采油和地面建设等工程,建成开发方案设计产能并按时投产。

产能建设过程中要依据钻井工程方案编制单井钻井设计,根据地质情况确定钻井次序,必须按要求取全取准测井、录井资料。要根据油藏工程方案和开发井完钻后的新认识,编制射孔方案,确保油田注采系统的合理性,并按方案要求取全取准各项资料。要根据采油工程方案做好完井工作,达到储集层保护、完井方式、射孔工艺和投产方式的要求。地面建设工程要严格履行基本建设程序,分前期准备、工程实施、投产试运和竣工验收,实行规范化管理。油田产能建设必须建立健全质量管理体系,实行项目全过程质量监督和监理制。

四、开发过程管理

油田产能建设项目建成投产后,进入生产阶段,开始实施油

田开发过程管理。

1. 主要任务

(1) 实现开发方案或调整方案确定的技术经济指标和油藏经营管理目标。

(2) 确保各种生产设施安全、平稳运行，搞好伴生气的管理，控制原油成本，节能降耗，完成年度生产计划和经营指标。

(3) 开展油藏动态监测、油田动态跟踪分析和阶段性精细油藏描述工作，搞好油田注采调整和综合治理，实现油藏调控指标。

(4) 按照健康、安全和环境管理的要求，组织生产运行、增产措施落实及维护性生产作业。

(5) 根据设备管理的规定，做好开发设备及设施的配备、使用、保养、维修、更新和改造等工作。

2. 主要工作内容

1) 油藏描述

把油藏描述工作贯穿于油田开发的各个阶段，充分利用已有的静态资料，对油藏特征作出新的认识和评价，建立三维地质模型，通过油藏数值模拟量化剩余油分布，为开发调整和综合治理提供可靠的地质依据。

2) 数据录取

做好动态监测资料的录取和质量监督工作。根据油藏特点、开发阶段及井网情况，建立油藏动态监测系统。根据不同开发阶段动态监测内容和工作量要求进行油、水井动态监测，录取有代表性的正确资料。

3) 动态分析

在生产过程中，根据不同管理层次要求，进行月、季度生产动态和年度油藏动态及阶段油田开发分析，编制分析报告。月、季度生产动态分析为完成全年原油生产任务和开发调控指标提供技术支撑；年度油藏动态分析对油藏一年来的开发状况进行评估，为下年度的油田配产、配注方案编制提供依据；阶段油田开

发分析为编制五年开发规划和油田开发调整方案提供依据。

4) 规划编制

要编制油田开发中长期业务发展规划,指导油田长期开发和业务发展,并提出下阶段油田开发战略、工作目标、发展重点和重大举措;要编制年度综合调整方案,落实油田年度生产任务和调控指标,针对油田开发产生的矛盾确定相应的调整措施,将油田原油生产和注水任务全面分配到开发区块,层层落实到单井。

5) 指标调整

(1) 含水上升率。一般根据油藏有代表性的相对渗透率曲线和水驱曲线确定。

(2) 自然递减率和综合递减率。一般根据油藏类型和所处的开发阶段确定。

(3) 剩余可采储量采油速度。一般控制在 $8\%\sim 11\%$ 。

(4) 油藏压力系统。水驱油田高饱和油藏地层压力应保持在饱和压力以上,低渗、低压油藏地层压力一般保持在原始地层压力以上,注水压力不超过油层破裂压力,油井井底流动压力要满足抽油泵有较高的泵效。

(5) 注采比。水驱开发油田原则上保持注采平衡。

五、开发调整与提高采收率

油田开发调整与提高采收率是油田开发中后期改善开发效果的重要措施。油田开发调整的主要内容为井网、层系和注采系统调整。提高原油采收率技术包括改善二次采油和三次采油,目的是通过一系列技术措施,不断改善开发效果,增加可采储量,进一步提高资源利用率。

在进行油田开发动态分析及阶段开发效果评价时,如果发现由于原开发方案不符合油藏实际情况或当前油田开发系统已不适应开发阶段变化的需要,导致井网对储量控制程度低、注采系统不协调、开发指标明显变差并与原方案指标存在较大差距,应及时对油田开发系统进行调整。

编制油田开发调整方案应对调整区进行精细地质研究和开发

效果分析评价，找出影响开发效果的主要问题，搞清剩余油分布和调整潜力，确定调整方向和主要技术措施。必要时开展矿场先导性试验，并以其成果作调整依据。

改善二次采油技术的主要措施有：利用精细油藏描述技术建立三维地质模型，搞清剩余油分布，完善注采系统，改变液流方向，扩大注入水波及体积；应用先进的堵水调剖技术，减少低效和无效水循环，提高注水利用率；采用水平井、侧钻井等复杂结构井技术，在剩余油富集区钻“高效调整井”，提高水驱采收率。

三次采油提高采收率幅度较大，主要包括聚合物驱、化学复合驱和、气体混相驱、蒸汽驱和微生物驱等。进行三次采油时，要优先选择有明显商业价值并具有良好的应用前景的三次采油新技术、新方法，开展试验和应用。

三次采油技术的推广应用，应按照提高采收率方法筛选、室内实验、先导性矿场试验、工业化矿场试验和工业化推广应用的程序循序渐进。编制三次采油工业化推广应用方案应进行不同方案的对比。经济评价应遵循“有无对比法”的原则进行经济效益分析，以确保方案的技术经济合理性。项目实施两年后要实施效果评估。

六、储量管理

开发过程中要建立以经济可采储量为核心、探明地质储量和技术可采储量为基础的储量管理体系。油田开发中的储量管理主要内容包括：在油藏评价、产能建设和开发生产各阶段对石油和溶解气地质储量进行新增、复算、核算和结算，已开发可采储量标定，已探明未动用储量分类评价，上市储量资产评估和储量动态管理等工作。

油藏评价阶段结束后应计算新增石油和溶解气探明储量。新增探明储量要与开发方案设计近期动用的储量相一致。油田投入开发后，应结合开发生产过程对探明地质储量实施动态计算。当独立开发单元或油田主体部位开发方案全面实施三年后或储量计算参数发生明显变化时，必须对探明地质储量进行复算。生产过

程中应根据开发调整情况及时进行探明地质储量核算。油田或区块在废弃前，应编制储量结算报告。

必须对可采储量定期进行标定。已开发油田或区块的可采储量年度标定每年一次，系统的阶段标定每五年一次。要加强可采储量标定方法研究，提高可采储量计算的准确性。

第二节 油田开发阶段划分

油田开发是一个漫长的过程，开发过程中各种开发指标不断发生变化，不同开发时期和不同开采方法具有不同的开采特点。为了便于开发调整，按油田开发特点或开采方法划分开发阶段。国内外划分开发阶段的方法很多，根据阶段划分的依据不同，有代表性的大体有 3 种。

一、按开发方法划分

石油的开发方法大体经历了三代。

1. 一次采油

20 世纪 40 年代以前靠天然能量采油。人类对油藏的作用只限于钻出井筒为油藏提供通道，可以说是第一代“靠天”采油或一次采油阶段。所谓天然能量，主要是地下原油和与其共生水的弹性能量及原油中溶解气的膨胀能量。由于油层埋藏深，石油黏度大，油藏蓄能低，因此一次采油的采收率低，而且开发年限长。苏联的古比雪夫和阿塞拜疆有 124 个黏度较高的油藏，其一次采收率一直未超过 15%。

2. 二次采油

20 世纪 40 年代以后，发展了第二代注水（注气）采油方法，其特点是“靠水”弥补采油的亏空体积，以恢复和保持油藏的能量，分为早期注水及中晚期注水，即为二次采油阶段。人类对油藏的作用范围已扩至地层深处，但所依赖的主要是水（气）势能的物理作用。由于水源较易解决，井筒的水柱可提供注水的压头，工程价格较低，所以注水采油成为国内外迄今最盛行的办

法。但是由于油水的黏度差别往往较大，油水一般不互溶而存在界面张力，从宏观到微观都是非均质的多孔或裂缝性油藏，流度比过大使平面和垂向的波及效率降低，而毛细管力的存在则进一步使波及区域内的驱油效率降低，以致一般人工注气采收率不到 35%，人工注水的油藏采收率只能达到 40%~50%。尽管如此，注水开发仍是石油史上的一大进步，目前国内外大多数油田都在采用。美国靠注水开发的油藏占 70% 以上，苏联几乎 90% 的原油是靠注水采出的。

3. 三次采油

第二代注水开发采油虽然大幅度提高了油田采收率，但也存在两大问题：一是高黏度油藏一般不利于注水；二是已注水的各类油藏，因受黏度、重力、界面张力和毛细管力的不利影响，油藏非均质的不良影响加剧，以致在地下遗留了 50% 以上的储量。因此，20 世纪 50 年代以来，针对油藏具体情况，提出了各种第三代提高采收率新方法、新工艺和新理论，也就是所谓的三次采油。近 60 年来，平均每 3~5 年就出现一种新的开发方法。新方法之所以层出不穷，是因为要采出稠油和水淹残余油并非易事。三次采油的特点是：

(1) 以注入化学剂为中心，形成靠化学物理作用而有助于驱油的方法。如设法使原油降黏、使水增黏、消除界面张力以及毛细管力，甚至促使地层油相态转化等。通常注入各种无机或有机溶剂，如 CO_2 、醇类、液化石油气和高压烃类气体等。

(2) 以改善注水和回收水淹残余油为目的，出现了多种以化学改性的水溶液为驱油剂的新方法。诸如注入溶有无机碱性化合物的碱性水，无机酸性化合物的 CO_2 水，有机合成和生物化学制备的高分子聚合物水溶液，尤其是表面活性剂为主而衍生的活性水、乳化液、微乳液和胶束溶液及复合驱油剂等。

(3) 利用热化学作用使原油降黏、分馏和凝析的方法。这就是使原油在地下燃烧的各种正烧、反烧、水火相容的火驱与注水相结合的方法以及注热水、注蒸汽和注空气的办法。此类方法也