



中国石油大学(华东)“211工程”建设

复杂油气藏物理-化学强化开采
工程技术研究与实践丛书

卷三

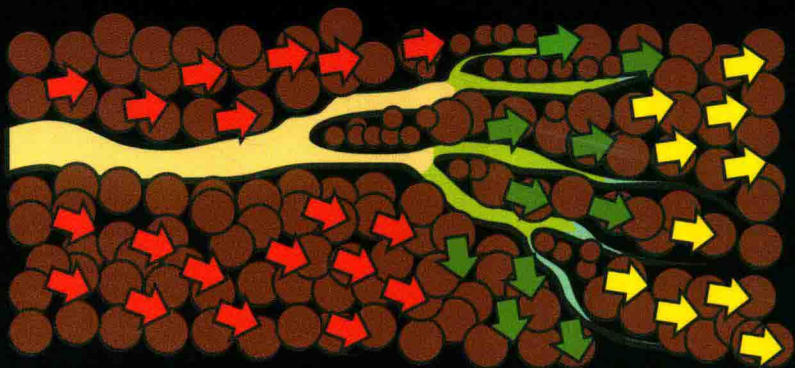
裂缝性特低渗油藏 水窜水淹调控高效驱油技术

WATER FLOODING CONTROL AND HIGH EFFICIENCY OIL DISPLACEMENT TECHNOLOGY
OF FRACTURED EXTRA-LOW PERMEABILITY RESERVOIR

蒲春生 高瑞民 刘 静 王成俊 著

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



中国石油大学(华东)“211 工程”建设
重点资助系列学术专著

复杂油气藏物理-化学强化开采
工程技术研究与实践丛书

卷三

裂缝性特低渗油藏 水窜水淹调控高效驱油技术

WATER FLOODING CONTROL AND HIGH EFFICIENCY OIL DISPLACEMENT TECHNOLOGY
OF FRACTURED EXTRA-LOW PERMEABILITY RESERVOIR

蒲春生



图书在版编目(CIP)数据

裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控高效驱油技术/蒲春生等著. —东营:中国石油大学出版社,2015.12

(复杂油气藏物理-化学强化开采工程技术与实践丛书;3)

ISBN 978-7-5636-4962-4

I. ①裂… II. ①蒲… III. ①裂缝性油气藏—低渗透油气藏—水窜—化学封堵—研究 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 313414 号

书 名:裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控高效驱油技术
作 者:蒲春生 高瑞民 刘 静 王成俊

责任编辑:王金丽(电话 0532—86983567)

封面设计:悟本设计

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者:山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本:185 mm×260 mm 印张:17.75 字数:422 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:95.00 元

“211工程”于1995年经国务院批准正式启动,是新中国成立以来由国家立项的高等教育领域规模最大、层次最高的工程,是国家面对世纪之交的国内国际形势而做出的高等教育发展的重大决策。“211工程”抓住学科建设、师资队伍建设等决定高校水平提升的核心内容,通过重点突破带动高校整体发展,探索了一条高水平大学建设的成功之路。经过17年的实施建设,“211工程”取得了显著成效,带动了我国高等教育整体教育质量、科学研究、管理水平和办学效益的提高,初步奠定了我国建设若干所具有世界先进水平的一流大学的基础。

1997年,中国石油大学跻身“211工程”重点建设高校行列,学校建设高水平大学面临着重大历史机遇。在“九五”“十五”“十一五”三期“211工程”建设过程中,学校始终围绕提升学校水平这个核心,以面向石油石化工业重大需求为使命,以实现国家油气资源创新平台重点突破为目标,以提升重点学科水平,打造学术领军人物和学术带头人,培养国际化、创新型人才为根本,坚持有所为、有所不为,以优势带整体,以特色促水平,学校核心竞争力显著增强,办学水平和综合实力明显提高,为建设石油学科国际一流的高水平研究型大学打下良好的基础。经过“211工程”建设,学校石油石化特色更加鲜明,学科优势更加突出,“优势学科创新平台”建设顺利,5个国家重点学科、2个国家重点(培育)学科处于国内领先、国际先进水平。根据ESI 2012年3月更新的数据,我校工程学和化学2个学科领域首次进入ESI世界排名,体现了学校石油石化主干学科实力和水平的明显提升。高水平师资队伍建设取得实质性进展,培养汇聚了两院院士、长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者、国家“千人计划”和“百千万人才工程”入选者等一

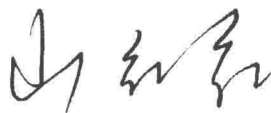
批高层次人才队伍,为学校未来发展提供了人才保证。科技创新能力大幅提升,高层次项目、高水平成果不断涌现,年到位科研经费突破4亿元,初步建立起石油特色鲜明的科技创新体系,成为国家科技创新体系的重要组成部分。创新人才培养能力不断提高,开展“卓越工程师教育培养计划”和拔尖创新人才培育特区,积极探索国际化人才的培养,深化研究生培养机制改革,初步构建了与创新人才培养相适应的创新人才培养模式和研究生培养机制。公共服务支撑体系建设不断完善,建成了先进、高效、快捷的公共服务体系,学校办学的软硬件条件显著改善,有力保障了教学、科研以及管理水平的提升。

17年来的“211工程”建设轨迹成为学校发展的重要线索和标志。“211工程”建设所取得的经验成为学校办学的宝贵财富。一是必须要坚持有所为、有所不为,通过强化特色、突出优势,率先从某几个学科领域突破,努力实现石油学科国际一流的发展目标。二是必须坚持滚动发展、整体提高,通过以重点带动整体,进一步扩大优势,协同发展,不断提高整体竞争力。三是必须坚持健全机制、搭建平台,通过完善“联合、开放、共享、竞争、流动”的学科运行机制和以项目为平台的各项建设机制,加强统筹规划、集中资源力量、整合人才队伍,优化各项建设环节和工作制度,保证各项工作的高效有序开展。四是必须坚持凝聚人才、形成合力,通过推进“211工程”建设任务和学校各项事业发展,培养和凝聚大批优秀人才,锻炼形成一支甘于奉献、勇于创新的队伍,各学院、学科和各有关部门协调一致、团结合作,在全校形成强大合力,切实保证各项建设任务的顺利实施。这些经验是在学校“211工程”建设的长期实践中形成的,今后必须要更好地继承和发扬,进一步推动高水平研究型大学的建设和发展。

为更好地总结“211工程”建设的成功经验,充分展示“211工程”建设的丰富成果,学校自2008年开始设立专项资金,资助出版与“211工程”建设有关的系列学术专著,专款资助石大优秀学者以科研成果为基础的优秀学术专著的出版,分门别类地介绍和展示学科建设、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。相信这套丛书能够从不同的侧面、从多个角度和方向,进一步传承先进的科学研究成果和学术思想,展示我校“211工程”建设的巨大成绩和发展思路,从而对扩大我校在社会上的影响,提高学校学术声誉,推进我校今后的“211工程”建设发挥重要而独特的贡献和作用。

最后,感谢广大学者为学校“211工程”建设付出的辛勤劳动和巨大努力,感谢专著作者孜孜不倦地整理总结各项研究成果,为学术事业、为学校 and 师生留下宝贵的创新成果和学术精神。

中国石油大学(华东)校长



2012年9月

在世界经济发展和国内经济保持较快增长的背景下,我国石油需求持续大幅度上升。2014 年我国石油消费量达到 5.08×10^8 t,国内原油产量为 2.1×10^8 t,对外依存度接近 60%,预计未来还将呈现上升态势,国家石油战略安全的重要性愈加凸显。

经过几十年的勘探开发,国内各大油田相继进入开采中后期,新发现并投入开发的油田绝大多数属于低渗、特低渗、致密、稠油、超稠油、异常应力、高温高压、海洋等难动用复杂油气藏,储层类型多、物性差,地质条件复杂,地理环境恶劣,开发技术难度极大。多年来,蒲春生教授率领课题组在异常应力构造油藏、致密砂岩油藏、裂缝性特低渗油藏、深层高温高压气藏和薄层疏松砂岩稠油油藏等复杂油气藏物理-化学强化开采理论与技术方面进行了大量研究工作,取得了丰富的创新性成果,并在生产实践中取得了良好的应用效果。尤其在异常应力构造油藏大段泥页岩井壁失稳与多套压力系统储层伤害物理-化学协同控制机制、致密砂岩油藏水平井纺锤形分段多簇体积压裂、水平井/直井联合注采井网渗流特征物理与数值模拟优化决策、深层高温高压气藏多级脉冲燃爆诱导大型水力缝网体积压裂动力学理论与工艺技术、裂缝性特低渗油藏注水开发中后期基于流动单元/能量厚度协同作用理论的储层精细评价技术和裂缝性水窜水淹微观动力学机理与自适应深部整体调控技术、薄层疏松砂岩稠油油藏注蒸汽热力开采“降黏-防汽窜-防砂”一体化动力学理论与配套工程技术等方面的研究成果具有原创性。在此基础上,将多年科研

实践成果进行了系统梳理与总结凝练,同时全面吸收相关技术领域的知识精华与矿场实践经验,形成了这部《复杂油气藏物理-化学强化开采工程技术与实践丛书》。

该丛书理论与实践紧密结合,重点论述了涉及异常应力构造油藏大段泥页岩井壁稳定与多套压力系统储层保护问题、致密砂岩油藏储层改造与注采井网优化问题、裂缝性特低渗油藏水窜水淹有效调控问题、薄层疏松砂岩稠油油藏高效热采与有效防砂协调问题等关键工程技术的系列研究成果,其内容涵盖储层基本特征分析、制约瓶颈剖析、技术对策适应性评价、系统工艺设计、施工参数优化、矿场应用实例分析等方面,是从事油气田开发工程的科学研究工作者、工程技术人员和大专院校相关专业师生很好的参考书。同时,该丛书的出版也必将对同类复杂油气藏的高效开发具有重要的指导和借鉴意义。

中国科学院院士



2015 年 10 月

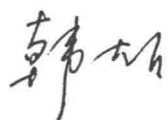
随着常规石油资源的减少,低渗、特低渗、稠油、超稠油、致密以及异常应力构造、高温高压等复杂难动用油气藏逐步成为我国石油工业的重要接替储量,但此类油气藏开发难度大且成本高,同时油田的高效开发与生态环境协调可持续发展的压力越来越大,现有的常规强化开采技术已不能完全满足这些难动用油气资源高效开发的需要。将现有常规采油技术和物理法采油相结合,探索提高复杂油气藏开发效果的新方法和新技术,对促进我国难动用油气藏单井产能和整体采收率的提高具有十分重要的理论与实践意义。

自20世纪90年代以来,蒲春生教授带领科研团队基于陕甘宁、四川、塔里木、吐哈、准噶尔等西部油气田地理条件恶劣、生态环境脆弱以及油气藏地质条件复杂的具体情况,建立了国内唯一一个专门从事物理法和物理-化学复合法强化采油理论与技术研究的“油气田特种增产技术实验室”。2002年,“油气田特种增产技术实验室”被批准为“陕西省油气田特种增产技术重点实验室”。2006年,开始筹建中国石油大学(华东)油气田开发工程国家重点学科下的“复杂油气开采物理-生态化学技术与工程研究中心”。经过多年的科学研究与工程实践,该科研团队在复杂油气藏强化开采理论研究和工程实践上取得了一系列特色鲜明的研究成果,尤其在异常应力构造大段泥页岩井壁稳定防控机制与储层伤害液固耦合微观作用机制、致密砂岩储层分段多簇体体积压裂、水平井与直井组合井网下的渗流传导规律及体积压裂裂缝形态的优化决策、深层高温高压气藏多级脉冲

深穿透燃爆诱导体积压裂裂缝延伸动态响应机制、裂缝性特低渗储层裂缝尺度动态表征与缝内自适应深部调控技术、薄层疏松砂岩稠油油藏注蒸汽热力开采综合提效配套技术等方面获得重要突破,并在生产实践中取得了显著效果。

在此基础上,他们将多年科研实践成果进行系统梳理与总结凝练,并吸收相关技术领域的知识精华与矿场实践经验,写作了这部《复杂油气藏物理-化学强化开采工程技术与实践丛书》,可为复杂油气藏开发领域的研究人员和工程技术人员提供重要参考。这部丛书的出版将会积极推动复杂油气藏物理-化学复合开采理论与技术的发展,对我国复杂油气资源高效开发具有重要的社会意义和经济意义。

中国工程院院士



2015 年 10 月

随着我国陆上主力常规油气资源逐渐进入开发中后期,复杂油气资源的高效开发对于维持我国石油工业稳定发展、保障石油供应平衡、支撑国家经济可持续发展、维护国家战略安全均具有重要意义。异常应力构造储层、致密砂岩储层、裂缝性特低渗储层、深层高温高压储层、薄层疏松砂岩稠油储层是近年来逐步投入规模开发的几类重要复杂油气资源。在这些油藏的钻井、储层改造、井网布置、水驱控制、高效开发各环节均存在突出的技术制约,主要体现在异常应力构造储层的井壁稳定与储层保护问题、致密砂岩储层的储层改造与井网优化问题、裂缝性特低渗储层的水驱有效调控问题、疏松砂岩储层的高效热采与有效防砂协调问题等。由于这些复杂油气藏自身的特殊性,一些常规开发技术方法和工艺手段的应用受到了不同程度的限制,而新兴的物理-化学复合方法在该类储层开发中体现出较强的适用性。由此,突破常规技术开发瓶颈,系统梳理物理-化学复合开发技术,完善矿场施工配套工艺等,对于提高复杂油气资源开发的效率和效益具有十分重要的意义。

基于上述复杂油气藏的地质特点和开发特征,将现有常规采油技术与物理法采油相结合,探索提高复杂油气藏开发水平的新思路与新方法,必将有效地促进上述几类典型难动用油气藏单井产量与采收率的提高,减少油层伤害与环境污染,提高整体经济效益和社会效益。1987年以来,作者所带领的科研团队一直致力于储层液/固体体系微观动力学、储层波动力学、储层伤害孔隙堵塞预测诊断与评价、裂缝性水窜通道自适应调控、高能气体压裂强化采油、稠油高效开发等复杂油气藏物理-化学强化开采基本理论与工程应用方面的

研究工作。在理论研究取得重要认识的基础上,逐步形成了异常应力构造泥页岩井壁稳定、储层伤害评价诊断与防治、致密砂岩油藏水平井/直井复合井网开发、深层高温高压气藏多级脉冲燃爆诱导大型水力缝网体积压裂、裂缝性特低渗油藏水窜水淹自适应深部整体调控、薄层疏松砂岩稠油油藏注蒸汽热力开采“降黏-防汽窜-防砂”一体化等多项创新性配套工程技术成果,并逐步在矿场实践中获得成功应用。特别是近十年来,项目组的研究工作被列入了国家西部开发科技行动计划重大科技攻关课题“陕甘宁盆地特低渗油田高效开发与水资源可持续发展关键技术研究(2005BA901A13)”、国家科技重大专项课题“大型油气田及煤层气开发(2008ZX05009)”、国家 863 计划重大导向课题“超大功率超声波油井增油技术及其装置研究(2007AA06Z227)”、国家 973 计划课题“中国高效气藏成藏理论与低效气藏高效开发基础研究”三级专题“气藏气/液/固体系微观动力学特征(2001CB20910704)”、国家自然科学基金课题“油井燃爆压裂中毒性气体生成与传播规律研究(50774091)”、教育部重点科技攻关项目“振动-化学复合增产技术研究(205158)”、中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目“低渗油田大功率弹性波层内叠合造缝与增渗关键技术研究(05E7038)”、中国石油天然气股份公司风险创新基金项目“电磁采油系列装置研究与现场试验(2002DB-23)”、陕西省重大科技攻关专项计划项目“陕北地区特低渗油田保水开采提高采收率关键技术研究(2006KZ01-G2)”和陕西省高等学校重大科技攻关项目“陕北地区低渗油田物理-化学复合增产与提高采收率技术研究(2005JS04)”,以及大庆、胜利、吐哈、长庆、延长、辽河、大港、塔里木、吉林、中原等石油企业的科技攻关项目和技术服务项目,使相关研究与现场试验工作取得了重要进展,获得了良好的经济效益与社会效益。在作者及合作者近 30 年研究工作积累的基础上,结合前人有关的研究工作,总结撰写出《复杂油气藏物理-化学强化开采工程技术与实践丛书》。在作者多年的研究工作和本丛书的撰写过程中,自始至终得到了郭尚平院士、王德民院士、韩大匡院士、戴金星院士、罗平亚院士、袁士义院士、李佩成院士、张绍槐教授、葛家理教授、张琪教授、李仕伦教授、陈月明教授、赵福麟教授等前辈们的热心指导与无私帮助,并得到了中国石油大庆油田、辽河油田、大港油田、新疆油田、塔里木油田、吐哈油田、长庆油田,中国石化胜利油田、中原油田,中海油渤海油田,以及延长石油集团等企业的精诚协作与鼎力支持,在此特向他们致以崇高的敬意和由衷的感谢。

本书为丛书的第三卷,全面系统地介绍了适用于裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油的技术理论体系及矿场试验效果。

我国低渗、特低渗油气资源分布广、储量丰富、开发难度大,其中裂缝性发育的特低渗油藏在低渗、特低渗资源中占有非常大的比例,其复杂的地质特点使得开发难度进一步加大。目前裂缝性特低渗油藏已在我国部分油田如大庆、胜利、长庆、新疆、延长、四川等油田进行了开发,并取得了较高的产量,以长庆、延长油田为代表的鄂尔多斯盆地浅层裂缝性特低渗油藏更是其中的开发典型。由于该类裂缝性特低渗油藏埋深浅、地层压力低、储层物性差、微裂缝发育,天然能量开发产量衰减速度快、采收率低,注水开发已被证实为该类储层高效开发的必由之路。然而,该类裂缝性特低渗油藏的特殊地质特征又导致在注水过程中会发

生要么注不进、要么暴性水窜的问题,严重制约了水驱开发效率,加上水资源短缺和新资源区块越来越少,更加迫切要求对现有开发区块进行注水开发效果的改善,通过精细层系开发、平面驱替调节干预、油水井改造、新技术引进与应用等来实现采收率的提高。裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术在此背景下显得尤为重要。

作者带领科研团队在裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术方面开展了大量系统的研究工作,并在以下方面取得了一些重要进展:

(1) 形成了一套改善裂缝性特低渗油藏水窜水淹状况并提高其采出程度的系统化技术体系,兼顾了横向调节与强化开发,综合了水井调驱技术、油井堵水技术、高效驱油技术、谐振波复合化学调驱技术等,评价了其对于裂缝性特低渗油藏的适应性。

(2) 系统结合并评价了空气泡沫深部调驱和自适应凝胶深部液流转向调驱两种水井调控技术在裂缝性特低渗油藏的应用效果,研发了适合该类油藏的调控化学药剂配方,揭示了其主控影响因素与作用机制,确定了其最优注入工艺参数。

(3) 建立了高渗窜流通道的泡沫水泥可渗透堵水技术,优化了适合该类油藏的堵水体系配方,室内预测了其动态封堵效果,给出了其经济可行性和适用条件。

(4) 开展了裂缝性特低渗油藏系列高效驱油技术研究,评价了注水开发、注气开发及气水交替注入开发的驱油效果,揭示了其主控影响因素与作用机制,确定了最优注入工艺参数,评价了相应开发方式的开发效果。

(5) 创新性地提出并系统研究了物理-化学复合调控驱油技术,探索性地揭示了谐振波复合空气泡沫调控驱油技术、谐振波复合自适应凝胶调控技术、谐振波复合表面活性剂驱油技术的作用机理,优化了谐振波复合化学调控驱油工艺参数,预测了谐振波复合调控驱油效果及经济可行性。

(6) 实现了裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术的先导性矿场试验,验证了系统化的裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术体系的增油降水、增压增注效果。

全书共分8章。第1章介绍裂缝性特低渗油藏、物理法采油技术、化学堵水技术的基本概念与理论;第2章简述裂缝性特低渗油藏地质特征与调控驱油系列关键技术,包括水井调驱技术、油井堵水技术、高效驱油技术、物理法采油技术、物理法复合化学调控驱油技术等对裂缝性特低渗油藏的适应性;第3章分析裂缝性特低渗油藏注水井空气泡沫调驱和自适应凝胶调驱技术的作用原理、作用效果的主控因素、施工工艺参数体系及经济性等;第4章介绍裂缝性特低渗油藏生产井近井带泡沫水泥可渗透封堵技术;第5章阐述提高裂缝性特低渗油藏开发效果的系列高效驱油技术,包含水驱开发、注气开发、气水交替注入等开发方式;第6章阐述大功率谐振波物理法采油技术、谐振波复合空气泡沫调控驱油技术、谐振波复合凝胶调控技术、谐振波复合表面活性剂驱油技术等物理-化学复合调控驱油技术理论体系;第7章介绍裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术的矿场试验实例;第8章简述裂缝性特低渗油藏水窜水淹高效驱油技术的发展趋势。

本书可供从事油气田开发工程、石油开发地质等方面工作的科研工作者和工程技术人员

员参考,也可以作为相关专业领域的博士、硕士研究生和高年级大学生的参考教材。

本书内容主要基于作者及所领导的科研团队取得的研究成果,同时也参考了近年来国内外同行专家在这一领域公开出版或发表的相关研究成果,相关参考资料已列入参考文献之中,特做此说明,并对这些资料的作者致以诚挚的谢意。

中国石油大学(华东)油气田开发工程国家重点学科“211工程”建设计划、985创新平台建设计划和中国石油大学出版社对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。本书的出版还得到了国家出版基金和中国石油大学(华东)“211工程”建设学术著作出版基金的支持,在此一并表示感谢。

目前,裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控驱油技术在诸多方面仍处于研究发展阶段,加之作者水平有限和经验不足,书中难免有缺点和错误,欢迎同行和专家提出宝贵意见。

作 者

2015年8月

第 1 章	裂缝性特低渗油藏水窜水淹特征及其调控问题	1
1.1	基础概念与油藏特征	1
1.1.1	裂缝性油藏	1
1.1.2	特低渗油藏	2
1.1.3	裂缝性特低渗油藏水窜水淹特征	4
1.2	国内外技术现状	4
1.2.1	裂缝性特低渗油藏采油技术方法	4
1.2.2	低渗油藏物理法采油技术	5
1.2.3	裂缝性特低渗油藏堵水技术	6
1.3	技术难点与对策	10
1.3.1	技术难点	10
1.3.2	技术对策	10
1.4	本书主要成果与矿场实践	11
第 2 章	裂缝性特低渗油藏地质特征与关键技术适应性分析	13
2.1	裂缝性特低渗油藏地质特征	13
2.2	裂缝性特低渗油藏试验区油藏特征	16
2.2.1	试验区简介	16
2.2.2	试验区储层特征及物性分析	22
2.3	裂缝性特低渗油藏提高采收率关键技术适应性分析	26
2.3.1	水井调驱技术适应性分析	27
2.3.2	油井堵水技术适应性分析	33
2.3.3	高效驱油技术适应性分析	34
2.3.4	低频谐振波复合化学调驱适应性分析	42

第 3 章	裂缝性特低渗油藏注水井深部调驱关键技术	45
3.1	裂缝性特低渗油藏注水井调驱技术	45
3.1.1	注水井空气泡沫调驱作用机理	45
3.1.2	注水井自适应凝胶调驱作用机理	46
3.2	注水井空气泡沫调驱技术优化与评价	46
3.2.1	空气泡沫调驱泡沫体系筛选	47
3.2.2	空气泡沫驱影响因素分析与注入参数优化	59
3.2.3	空气泡沫调驱在主力油层的应用性分析	64
3.3	注水井自适应凝胶调驱技术优化与评价	64
3.3.1	自适应凝胶配方与静态性能评价	64
3.3.2	自适应凝胶调驱主要影响因素分析与注入工艺参数优化	73
3.3.3	注水井自适应凝胶深部调驱优化结果	78
3.4	注水井深部调驱技术投入产出比评价	78
第 4 章	裂缝性特低渗油藏生产井有效封堵关键技术	81
4.1	泡沫水泥堵水机理与注入工艺分析	81
4.1.1	泡沫水泥堵水机理	81
4.1.2	泡沫水泥现场注入工艺分析	82
4.2	泡沫水泥体系研制与性能评价	82
4.2.1	起泡体系配方优选	83
4.2.2	不同水灰比下泡沫水泥体系性能评价	85
4.2.3	泡沫水泥体系外加剂的优选	88
4.3	泡沫水泥动态封堵性能评价	90
4.3.1	单管动态封堵性能评价	91
4.3.2	双管动态封堵性能评价	92
4.4	生产井有效堵水技术投入产出比评价	92
第 5 章	裂缝性特低渗油藏高效驱油关键技术	94
5.1	裂缝性特低渗油藏水驱开发分析	94
5.2	裂缝性特低渗油藏气驱技术	96
5.2.1	空气、氮气驱油机理	96
5.2.2	气驱效果分析	97
5.2.3	空气驱油影响因素	100
5.2.4	氮气驱油影响因素	104
5.3	裂缝性特低渗油藏水驱后气驱技术	108
5.3.1	水驱后气驱效果分析	108
5.3.2	水驱后空气驱油影响因素	111

5.3.3	水驱后氮气驱油影响因素	114
5.4	裂缝性特低渗油藏气水交替驱油技术	116
5.4.1	气水交注驱油机理	117
5.4.2	气水交注驱油效果分析	117
5.4.3	空气、水交注驱油影响因素	119
5.4.4	氮气、水交注驱油影响因素	122
5.5	裂缝性特低渗油藏高效驱油技术应用性分析与相关建议	125
5.5.1	裂缝性特低渗油藏高效驱油技术应用性分析	126
5.5.2	裂缝性特低渗油藏高效驱油技术投入产出比评价	130
5.5.3	裂缝性特低渗油藏高效驱油技术应用相关建议	137
第 6 章	裂缝性特低渗油藏低频谐振波-化学复合驱油关键技术	141
6.1	低频谐振波主控因素和影响规律	141
6.1.1	低频谐振波对水驱渗流规律的影响	142
6.1.2	低频谐振波对储层岩石的影响	148
6.1.3	低频谐振波对原油物性的影响	151
6.2	低频谐振波-空气泡沫复合调驱关键技术	154
6.2.1	低频谐振波对泡沫静态性能影响	155
6.2.2	低频谐振波对泡沫动态封堵性能影响	156
6.2.3	低频谐振波-空气泡沫调驱复合技术提高采收率效果分析	157
6.2.4	低频谐振波-空气泡沫调驱复合技术对矿场试验的指导	159
6.3	低频谐振波-凝胶复合调驱关键技术	159
6.3.1	低频谐振波对凝胶静态成胶规律影响	159
6.3.2	低频谐振波对凝胶动态封堵性能影响	164
6.3.3	低频谐振波-凝胶复合调驱提高采收率效果分析	164
6.3.4	低频谐振波-凝胶复合调驱对矿场试验的指导	166
6.4	低频谐振波-表面活性剂复合驱油关键技术	166
6.4.1	低频谐振波对表面活性剂静态洗油和乳化性能的影响	167
6.4.2	低频谐振波对表面活性剂驱动态吸附和扩散性能的影响	174
6.4.3	低频谐振波-表面活性剂复合驱油提高采收率效果分析	177
6.4.4	低频谐振波-表面活性剂复合驱油对矿场试验的指导	181
6.5	低频谐振波复合化学驱油技术集成分析	182
6.5.1	低频谐振波-化学驱油技术现场复合应用分析	182
6.5.2	低频谐振波矿场设备参数计算	184
6.6	低频谐振波复合化学驱油技术投入产出比评价	189
第 7 章	矿场试验与效果评价	193
7.1	GGY 油田	193

7.1.1	1355 井区	194
7.1.2	1380 井区	202
7.1.3	GDT 井区	206
7.2	YD 油田	213
7.2.1	H392 井区	213
7.2.2	H351 井区	219
7.2.3	J95 井区	224
7.3	CK 油田	229
7.3.1	试验区简介	229
7.3.2	C131 试验区矿场试验	229
7.4	WYB 油田	239
7.4.1	试验区简介	239
7.4.2	YM 试验区矿场试验	239
7.5	SH 油田	245
7.5.1	SH 8-1 试验区简介	245
7.5.2	SH8-1 井区矿场试验	247
第 8 章	裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控高效驱油理论与技术展望	252
8.1	裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控高效驱油研究成果总结	252
8.2	裂缝性特低渗油藏水窜特征与通道演化基础理论研究	253
8.3	裂缝性特低渗油藏水窜水淹调控、高效驱油技术与材料研究	254
8.4	低频谐振波技术及复合化学强化采油技术基础理论研究	255
参考文献		257