

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

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

卷五

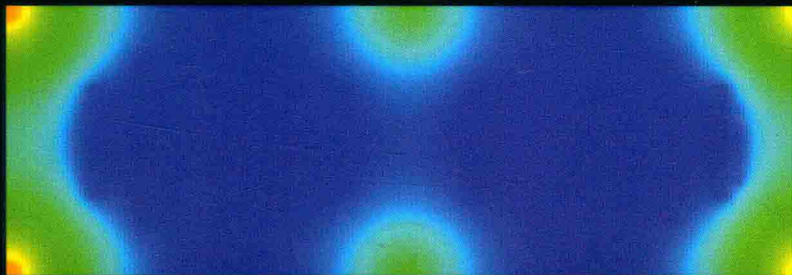
致密砂岩油藏水平井/直井 联合注采整体压裂优化技术

THE OVERALL FRACTURING OPTIMIZATION TECHNOLOGY OF JOINT INJECTION-PRODUCTION
WELL SPACING OF HORIZONTAL AND VERTICAL WELLS IN THE TIGHT SANDSTONE OIL RESERVOIR

蒲春生 石道涵 何举涛 张 兵 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

卷五

致密砂岩油藏水平井/直井 联合注采整体压裂优化技术

THE OVERALL FRACTURING OPTIMIZATION TECHNOLOGY OF JOINT INJECTION-PRODUCTION WELL
SPACING OF HORIZONTAL AND VERTICAL WELLS IN THE TIGHT SANDSTONE OIL RESERVOIR

蒲春生 石道涵 何举涛 张 兵 著



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

图书在版编目(CIP)数据

致密砂岩油藏水平井/直井联合注采整体压裂优化技术/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; 5)

ISBN 978-7-5636-4963-1

I. ①致… II. ①蒲… III. ①致密砂岩—砂岩油气藏—水平井—注采系统—压裂—技术 ②致密砂岩—砂岩油气藏—直井—注采系统—压裂—技术 IV. ①TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 313850 号

书 名: 致密砂岩油藏水平井/直井联合注采整体压裂优化技术
作 者: 蒲春生 石道涵 何举涛 张 兵

责任编辑: 袁超红(电话 0532—86981532)

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: 9.75 插页: 24 字数: 260 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 65.00 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”和拔尖创新人才培养特区,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

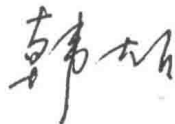
随着常规石油资源的减少,低渗、特低渗、稠油、超稠油、致密以及异常应力构造、高温高压等复杂难动用油气藏逐步成为我国石油工业的重要接替储量,但此类油气藏开发难度大且成本高,同时油田的高效开发与生态环境协调可持续发展的压力越来越大,现有的常规强化开采技术已不能完全满足这些难动用油气资源高效开发的需要。将现有常规采油技术和物理法采油相结合,探索提高复杂油气藏开发效果的新方法和新技术,对促进我国难动用油气藏单井产能和整体采收率的提高具有十分重要的理论与实践意义。

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、高效开发等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。

本书为丛书的第五卷,全面系统地介绍了鄂尔多斯盆地致密砂岩油藏成藏背景、储层渗流特征、水平井/直井联合井网开发模式、水平井分段压裂的基本理论和关键技术。

近年来,随着北美致密油资源的大规模成功开采,此类以往被忽视的非常规石油资源已经成为各国石油工业争相介入的热点领域。我国致密油分布广泛,资源丰富,总资源量达 $(110\sim 135)\times 10^8$ t,主要分布在鄂尔多斯、四川、松辽、渤海湾、准噶尔等盆地,其中鄂尔多斯盆地延长组油藏属于典型的致密砂岩油藏,致密油资源量达 61.8×10^8 t,已成为我国石油工业重要接替力量。水平井体积压裂技术作为近年发展起来的新技术,最早应用于美国页岩气藏。所谓体积压裂,是指在水力压裂过程中使天然裂缝不断扩张和脆性岩石产生剪切滑移,实现对天然裂缝、岩石层理的沟通,以及在主裂缝的侧向强制形成次生裂缝,并在次生裂

缝上继续分支形成二级次生裂缝,以此类推,形成天然裂缝与人工裂缝相互交错的裂缝网络,增大渗流面积及导流能力,提高初始产量和最终采收率。

作者带领科研团队以鄂尔多斯盆地储层为例,在致密砂岩油藏水平井体积压裂技术方面开展了大量研究工作,并在以下方面取得了一些重要进展:

(1) 制定了体积压裂可行性评价标准及评价方法,并利用此方法对鄂尔多斯盆地致密砂岩储层从岩石物性、脆性指数、裂缝发育状况和地应力条件四个方面进行研究,表明了鄂尔多斯盆地致密砂岩油藏可以实现体积压裂。

(2) 建立了裂缝参数可调的模拟水平井体积压裂的电模拟物理模型,揭示了相应的油水渗流机制,明确了分段纺锤形裂缝为致密砂岩油藏体积压裂裂缝几何参数的优化方向,并经数值模拟验证了该模拟方法的合理可靠性。

(3) 借助数值模拟技术,优化了鄂尔多斯致密砂岩油藏不同井网下的最佳体积压裂裂缝参数。借助 Meyer 压裂设计软件,对影响致密砂岩油藏体积压裂的地质及施工参数进行了定量分析,并优化了鄂尔多斯致密砂岩油藏体积压裂的前置液液量、排量及砂比等施工参数。

(4) 建立了致密砂岩油藏经济效益评价模型,利用该模型验证了水平井的预计投资回收期较短,经济效益较好。

(5) 给出了 5 口水平井分段多簇体积压裂的方案和措施效果分析,评价了优化后的缝网参数的作用效果。

全书共分 8 章。第 1 章概述致密砂岩油藏、水平井体积压裂技术及水电模拟实验等的概念、发展研究和应用状况,以及致密砂岩油藏的主要开发技术与难点;第 2 章简述致密砂岩油藏的储层地质特征,主要包含储层构造特征、沉积背景、沉积微相、储层物性及其渗流特征等;第 3 章分析致密砂岩油藏水平井体积压裂可行性,从岩石力学特征、储层天然裂缝发育状况、地应力条件等角度对鄂尔多斯盆地致密砂岩油藏体积压裂可行性进行定性评价,并在筛选出综合评价体积压裂可行性指标的基础上对体积压裂可行性进行定量综合评价;第 4 章根据水电相似原理建立考虑天然裂缝的电模拟实验模型,研究致密砂岩储层及近井区域的压力分布特征,并分析体积压裂水平井产能的影响因素;第 5 章结合矿场实际数据,运用油藏数值模拟方法,模拟不同水平段长度、不同注采井网下裂缝几何参数对致密砂岩油藏压裂水平井产能的影响;第 6 章分析体积压裂的主控因素,通过 Meyer 软件优化水平井体积压裂的具体工艺参数;第 7 章介绍矿场常用水平井分段压裂工艺,分析矿场试验案例,并建立水平井分段压裂经济评价模型;第 8 章阐述致密砂岩油藏水平井开采理论与技术展望。

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,致密砂岩油藏水平井体积压裂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,书中难免有不少缺点和错误,欢迎同行和专家提出宝贵意见。

作 者

2015 年 8 月

第 1 章 绪 论	1
1.1 致密砂岩油藏简述	1
1.2 致密砂岩油藏研究现状	3
1.2.1 压裂水平井渗流机理研究现状	3
1.2.2 裂缝参数对水平井产能影响敏感性研究现状	4
1.2.3 水平井体积压裂技术研究现状	5
1.2.4 水平井体积压裂技术在致密砂岩储层中的应用	6
1.2.5 水平井开发水电实验模拟研究	7
1.3 致密砂岩油藏主要开发技术及难点	7
1.3.1 开发技术	7
1.3.2 开发难点	9
1.4 本书主要研究成果及矿场实践	10
第 2 章 致密砂岩油藏储层地质特征	12
2.1 致密砂岩油藏区域构造背景	12
2.2 致密砂岩油藏区域沉积背景	14
2.2.1 沉积背景	15
2.2.2 成藏特征	15
2.2.3 地层划分	17
2.3 致密砂岩油藏储层沉积微相	20
2.3.1 沉积相特征及其相标志	21
2.3.2 相剖面分析	24
2.3.3 平面微相分布规律	24
2.3.4 沉积微相对油田注水开发的影响	26

2.4	致密砂岩油藏储层物性特征	32
2.4.1	岩石学特征	32
2.4.2	孔隙特征	34
2.4.3	油藏和流体物性	40
2.5	致密砂岩油藏储层渗流特征	40
第3章	致密砂岩油藏水平井体积压裂可压性评价	42
3.1	储层岩石力学特征	42
3.2	储层天然裂缝发育状况	45
3.3	体积压裂所需地应力条件	46
3.4	致密砂岩油藏体积压裂可行性综合评价	48
3.4.1	体积压裂可行性评价指标及评价标准的确定	48
3.4.2	体积压裂可行性评价指标——层次分析法确定权重	49
3.4.3	致密砂岩油藏体积压裂可行性评价结果	52
3.5	小 结	53
第4章	致密砂岩油藏水平井体积压裂渗流特征	54
4.1	致密砂岩油藏多裂缝水平井渗流特征电模拟实验装置及方法	54
4.1.1	电模拟实验装置	55
4.1.2	水电相似原理及模型参数确定	56
4.1.3	实验准备及步骤	57
4.2	分段射孔水平井渗流规律实验	60
4.3	等长分段多簇裂缝渗流规律分析	60
4.4	纺锤形分段多簇裂缝渗流规律分析	61
4.5	传统压裂与分段多簇压裂水平井渗流规律对比	61
4.6	小 结	62
第5章	致密砂岩油藏水平井体积压裂裂缝参数优化	64
5.1	模型建立与方案设计	64
5.1.1	油藏及流体参数	64
5.1.2	模型尺寸	64
5.1.3	裂缝几何参数优化方案设计	66
5.2	裂缝几何参数优化结果及讨论	69
5.2.1	五点井网 800 m 水平段模型	69
5.2.2	五点井网 1 500 m 水平段模型	76
5.2.3	七点井网 1 500 m 水平段模型	83
5.3	小 结	90

第 6 章 致密砂岩油藏水平井体积压裂工艺参数优化	92
6.1 改造体积计算方法及主控因素研究	92
6.1.1 体积压裂改造体积计算方法分析	92
6.1.2 储层体积压裂改造体积计算方法	94
6.1.3 体积压裂改造体积影响因素分析	95
6.2 体积压裂施工参数优化研究	100
6.2.1 前置液液量优化	101
6.2.2 排量优化	103
6.2.3 砂比优化	104
6.3 小 结	105
第 7 章 致密砂岩油藏水平井体积压裂工艺技术及矿场试验	106
7.1 体积压裂主体工艺技术	106
7.1.1 水力喷射分段多簇压裂工艺	106
7.1.2 水力泵注桥塞分段多簇压裂工艺	108
7.2 矿场试验分析	109
7.2.1 对比井分析	109
7.2.2 优化井分析	116
7.3 试验效果对比	120
7.4 经济效益评价	120
第 8 章 致密砂岩油藏水平井开采理论与技术展望	123
8.1 致密砂岩油藏水平井压裂技术存在的主要问题	123
8.2 致密砂岩油藏水平井压裂技术发展趋势	124
参考文献	127

第1章 绪 论

随着北美致密油资源的大规模成功开采,此类以往被忽视的非常规石油资源已成为各国石油工业争相介入的热点领域。致密砂岩油藏是指覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩、灰岩等储层所形成的油气聚集,具有原油大面积连片分布、储层孔喉细小(呈纳米级)、裂缝发育、原油运移距离短、原油物性好等特点^[1],规模开采需要水平井技术结合分段压裂技术才能有经济效益。我国致密砂岩油藏分布广泛,资源丰富,总资源量达 $(110 \sim 135) \times 10^8 \text{ t}$,主要分布在鄂尔多斯、四川、松辽、渤海湾、准噶尔等盆地,其中鄂尔多斯盆地延长组油藏属于典型的致密砂岩油藏,致密油储量达 $61.8 \times 10^8 \text{ t}$ ^[2]。目前,该油藏借鉴国外致密砂岩油藏水平井体积压裂技术,即由人造主裂缝沟通储层中的天然微裂缝并扩张天然裂缝,形成复杂的网状裂缝,扩大单井泄油面积,提高裂缝导流能力,进而提高储层产能^[3-4]。应用该技术在鄂尔多斯长7致密砂岩油藏进行试验,获得了很好的开发效果。但该油藏与北美同类油藏相比存在不同之处(油藏压力系数较低、脆性指数相对较小),开发难度大,照搬国外的理论和技术难以实现大规模有效开发^[5-15],因此对于体积压裂技术在致密砂岩油藏中的应用还需要进一步深入探讨^[16-20,226]。当前,此方面的理论研究十分欠缺,本书将通过电模拟实验以及油藏数值模拟研究,得到致密砂岩油藏水平井体积压裂渗流特征和不同水平段长度、不同注采井网下的水平井压裂裂缝几何参数及施工参数,为该类油藏水平井体积压裂开发提供理论指导和技术支持^[239,241]。

1.1 致密砂岩油藏简述

目前,国内外对致密砂岩油藏的讨论较少,美国一般将渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏称为低渗透油藏或致密砂岩油藏。前苏联将低渗透油藏的上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并将渗透率为 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层定义为致密层^[21]。2011年颁布的中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》(SY/T 6285—2011)同样将低渗透碎屑岩储层的渗透率上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、下限定为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并将 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层定义为特低渗储层,将小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层定义为超低渗储层。赵靖舟根据对鄂尔多斯盆地中生界油藏储层的研究,将小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透储层定义为致密储层。