



“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

卷六

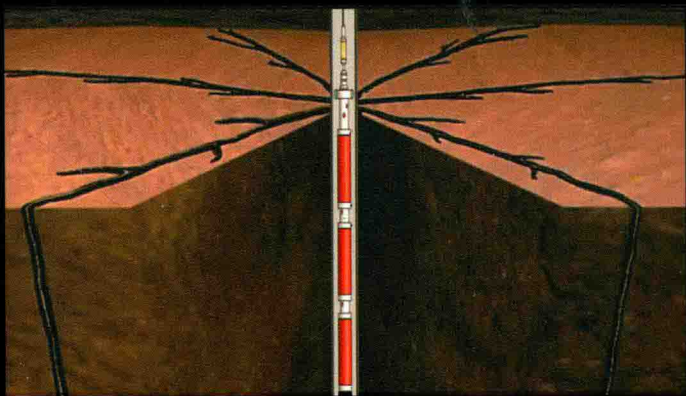
深层高温高压气藏 多级燃爆诱导压裂技术

MULTISTAGE COMBUSTION INDUCED FRACTURING TECHNOLOGY OF
DEEP HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE GAS RESERVOIR

蒲春生 任山 吴飞鹏 刘林 著

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



中国石化大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

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

卷六

深层高温高压气藏 多级燃爆诱导压裂技术

MULTISTAGE COMBUSTION INDUCED FRACTURING TECHNOLOGY OF
DEEP HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE GAS RESERVOIR

蒲春生 任 山 吴飞鹏 刘 林 著



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

图书在版编目(CIP)数据

深层高温高压气藏多级燃爆诱导压裂技术/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; 6)

ISBN 978-7-5636-4960-0

I. ①深… II. ①蒲… III. ①地层油气藏—油气开采—研究 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298343 号

书 名: 深层高温高压气藏多级燃爆诱导压裂技术
作 者: 蒲春生 任 山 吴飞鹏 刘 林

责任编辑: 高 颖(电话 0532—86983568)

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: 14.25 字数: 336 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 75.00 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

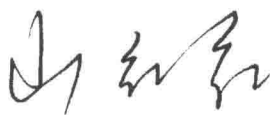
批高层次人才队伍,为学校未来发展提供了人才保证。科技创新能力大幅提升,高层次项目、高水平成果不断涌现,年到位科研经费突破4亿元,初步建立起石油特色鲜明的科技创新体系,成为国家科技创新体系的重要组成部分。创新人才培养能力不断提高,开展“卓越工程师教育培养计划”和拔尖创新人才培育特区,积极探索国际化人才的培养,深化研究生培养机制改革,初步构建了与创新人才培养相适应的创新人才培养模式和研究生培养机制。公共服务支撑体系建设不断完善,建成了先进、高效、快捷的公共服务体系,学校办学的软硬件条件显著改善,有力保障了教学、科研以及管理水平的提升。

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,专款资助石油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

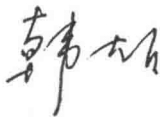
随着常规石油资源的减少,低渗、特低渗、稠油、超稠油、致密以及异常应力构造、高温高压等复杂难动用油气藏逐步成为我国石油工业的重要接替储量,但此类油气藏开发难度大且成本高,同时油田的高效开发与生态环境协调可持续发展的压力越来越大,现有的常规强化开采技术已不能完全满足这些难动用油气资源高效开发的需要。将现有常规采油技术和物理法采油相结合,探索提高复杂油气藏开发效果的新方法和新技术,对促进我国难动用油气藏单井产能和整体采收率的提高具有十分重要的理论与实践意义。

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和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研究与实践丛书》。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。

本书为丛书的第六卷,全面系统地介绍了深层高温高压气藏多级燃爆诱导压裂技术的理论研究、室内模型、耦合求解及现场应用。

作者带领科研团队在深层高温高压气藏多级燃爆诱导压裂技术方面开展了十余年的研究工作,并在以下方面取得了一些重要进展:

(1) 立足于已成熟的燃爆压裂机理和单级固体火药施工工艺技术,针对深层、高致密、超高压地层水力压裂难以形成多条裂缝甚至缝网构造的难题,筛选研发了新的不同燃速等级的火药配方,以高燃速、高加载速率火药为支点快速憋压制裂地层,形成不受地应力控制的多条随机相位预存裂缝,低燃速、长持压火药在前者基础上延伸主裂缝长度的同时,多余能量起裂预存裂缝壁以形成新的支裂缝,从而增大裂缝长度和地层破碎规模。

(2) 建立了燃爆压裂火药爆燃加载、压挡液柱运动、裂缝动态延伸动力学模型,在完善考虑井筒内压影响的套管射孔井周围应力分布模型的基础上,提出了可保障套管安全和顺利压开油层的极限压力计算模型,为燃爆压裂各子系统间的耦合提供了衔接条件。

(3) 建立了燃爆压裂优化决策系统,既可定量计算合理的装药量范围,也可对燃爆压裂的爆燃压力、裂缝形态进行定量动态预测,并研究了燃爆压裂中装药结构、装药量、压挡液柱高度、射孔密度、射孔孔径等关键参数对压裂效果的影响。

(4) 研发了适用于高温高压环境的高产热、低产气的点火药配方,研制了能起到延时作用的点火装置,对压裂弹的整体结构进行了设计,并对相关装置进行了强度校核计算,以研发一种结构设计合理、性能安全可靠,可实现延时点火、逐级燃烧、能量有序释放功能的压裂弹装配设备和技术。

全书共分 11 章。第 1 章简介燃爆气体压裂技术发展和应用的基本概况;第 2 章以川西深层高温高压气藏须四段储层为例,介绍深层高温高压气藏的地质与岩石力学特征,以及在该类地质条件下采用燃爆气体压裂技术的必要性和可行性;第 3 章简要论述燃爆气体压裂技术的作用机理;第 4 章阐述压裂弹药剂体系和配套工艺技术;第 5 章介绍火药爆燃过程动力学模型;第 6 章讨论燃爆气体压裂压挡液柱运动规律动力学模型;第 7 章讨论燃爆气体压裂裂缝系统动力学模型;第 8 章讨论燃爆气体压裂极限加载压力动力学模型;第 9 章阐述燃爆气体压裂过程耦合求解及因素敏感性研究;第 10 章讨论燃爆气体压裂措施后油井产能计算模型;第 11 章介绍燃爆气体压裂工艺参数优化设计及实例分析。

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,深层燃爆压裂技术动力学模型、多裂缝起裂机理、裂缝延伸过程能量损耗等研究领域还不完善,诸多方面仍处于探索阶段,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 深层高温高压储层燃爆压裂技术概述	1
1.1 深层高温高压气藏特征及开发难点	1
1.1.1 基本特征	1
1.1.2 基本开采状况	2
1.1.3 多级燃爆诱导压裂技术的提出	2
1.2 燃爆气体压裂基本原理	3
1.3 燃爆气体压裂推进剂发展研究	4
1.4 燃爆气体压裂技术适用范围	5
1.4.1 适用岩性	5
1.4.2 选井选层	5
1.5 燃爆气体压裂与爆炸压裂和水力压裂的比较	6
1.6 燃爆气体压裂与其他增产措施联作技术	7
1.6.1 燃爆气体压裂与射孔复合技术	7
1.6.2 超正压射孔技术	8
1.6.3 燃爆气体压裂与水力压裂及酸化复合技术	8
1.6.4 燃爆气体压裂与过氧化氢等其他化学解堵技术的联作	9
1.7 国内外燃爆气体压裂技术现状	9
1.7.1 高能火药爆燃规律研究进展	9
1.7.2 强动载岩石破坏研究进展	10
1.7.3 燃爆气体压裂套管安全校核研究进展	11
1.7.4 燃爆气体压裂过程耦合模型研究进展	12
1.7.5 燃爆气体压裂工艺技术及应用概况	13

1.7.6	燃爆气体压裂技术发展趋势分析	14
第 2 章	深层高温高压气藏储层特征及燃爆压裂可行性	17
2.1	储层区域构造背景	17
2.1.1	构造概况	17
2.1.2	构造演化特征	17
2.1.3	新场气田构造特征	18
2.2	储层区域沉积背景	19
2.2.1	地层特征	19
2.2.2	沉积特征	20
2.3	沉积相类型及特征	22
2.3.1	辫状河三角洲沉积体系	22
2.3.2	湖泊沉积体系	23
2.3.3	沉积相平面展布特征	24
2.4	储层物性特征	25
2.4.1	须四段储层物性特征	25
2.4.2	须四段储层孔渗关系	26
2.5	储层岩石学特征	26
2.5.1	岩石类型	27
2.5.2	岩石结构特征	28
2.5.3	碎屑组分特征	28
2.5.4	填隙物特征	29
2.6	深层致密储层燃爆压裂技术必要性分析	29
2.6.1	预存燃爆诱导缝对原始应力场的影响	29
2.6.2	诱导缝网对应力集中及水力压裂缝网体积的影响	40
2.7	深层致密储层燃爆压裂技术可行性评价	44
2.7.1	高能气体压裂技术的适应性分析	44
2.7.2	高能气体压裂技术对深层致密储层的适应性分析	45
2.7.3	深层致密储层岩石燃爆动载下的多缝起裂可行性评价	51
第 3 章	深层高温高压储层多级燃爆压裂作用机理	57
3.1	概 述	57
3.1.1	多裂缝成缝条件	57
3.1.2	裂缝自行支撑理论	59
3.2	HEGF 起裂机理研究	60

3.2.1	概 述	60
3.2.2	裂缝的力学边界条件	61
3.2.3	起裂分析的动力有限元法	61
3.2.4	裂纹分析	63
3.3	HEGF 裂缝传播能量分析	63
3.3.1	裂缝扩展临界应力的确定	63
3.3.2	裂缝传播过程分析	64
3.3.3	破缝能量分析	67
3.4	HEGF 裂缝传播状态分析	68
3.4.1	裂缝传播的简化模型	68
3.4.2	应力场	68
3.4.3	压裂机理分析	73
3.5	岩心动态力学性质分析	75
第 4 章	燃爆气体压裂压裂弹药剂体系和配套工艺技术	79
4.1	新型高温高压多级燃速可控燃爆诱导压裂弹药剂体系研制	79
4.1.1	火药综合性能要求	79
4.1.2	多级燃速可控燃爆诱导压裂复合用药室内实验	80
4.1.3	复合药剂包覆处理	84
4.1.4	复合推进剂耐温性、耐压性实验	85
4.2	点火控制系统技术研究	85
4.2.1	点火药选择设计	85
4.2.2	点火药静态点火试验	86
4.2.3	延时控制点火技术	86
4.3	多级燃速可控燃爆诱导压裂装置结构设计	88
4.3.1	多级燃速可控燃爆诱导压裂装置结构设计	88
4.3.2	泄气管强度设计及计算	88
4.3.3	井筒内多级燃速可控燃爆诱导压裂装置爆燃压力计算	90
4.3.4	压裂装置火药爆燃压力持压时间确定	91
第 5 章	燃爆气体压裂火药爆燃过程动力学模型	93
5.1	火药爆燃过程物理模型	93
5.2	火药爆燃过程数学模型	94
5.2.1	密闭空间火药爆燃段分析	94
5.2.2	火药爆燃完成后散热泄压段分析	97

5.3 火药爆燃过程动力学模型求解 98

第6章 燃爆气体压裂压挡液柱运动规律动力学模型 100

6.1 压挡液柱运动物理模型 100

6.2 压挡液柱运动规律数学模型 100

6.3 压挡液柱运动规律模型求解 104

第7章 爆燃气体缝内流动及压裂裂缝动态响应理论分析 107

7.1 爆燃气体在射孔预存裂缝内流动模型 108

7.2 半解析法求解气体压力分布 108

7.2.1 气体密度沿裂缝均匀分布分析 109

7.2.2 气体温度沿裂缝均匀分布分析 110

7.2.3 裂缝入口气体质量流速分析—— q_0 的确定 110

7.2.4 压裂装置装药模拟 111

7.2.5 裂缝内爆燃气体压力半解析法求解 113

7.3 数值迭代法求解气体压力分布 115

7.3.1 裂缝内气体压力分布函数 115

7.3.2 裂缝内气体质量守恒方程 116

7.3.3 裂缝内气体状态参数相互关系 117

7.3.4 裂缝、井筒及枪内气体流动关系 118

7.3.5 流动求解程序及其相关边界条件和初始条件 119

7.3.6 算例分析 121

7.4 燃爆气体压裂裂缝系统物理模型 123

7.5 射孔孔眼流体泄流模型 124

7.5.1 液体泄流模型 124

7.5.2 火药燃气泄流模型 125

7.6 裂缝内流体流动、渗漏模型 125

7.6.1 裂缝内流体压力分布 125

7.6.2 高压流体在裂缝壁面的渗漏 126

7.7 裂缝延伸动态响应模型研究 127

7.7.1 基本假定与分析模型建立 128

7.7.2 准静态裂缝扩展理论分析 129

7.8 考虑裂缝尖端动态响应的裂缝扩展理论分析 138

7.8.1 井壁裂缝体能量方程 139

7.8.2 动能增量近似计算 140

7.8.3	算例分析	141
7.9	裂缝动态延伸的耦合求解	142
7.9.1	质量守恒方程	142
7.9.2	能量守恒方程	143
第 8 章	燃爆气体压裂极限加载压力动力学模型	146
8.1	套管射孔井井周应力分布模型研究	146
8.1.1	基础数学模型	146
8.1.2	套管井周围应力分布	147
8.1.3	射孔孔眼周围应力分布	153
8.2	高加载速率下岩石破裂压力实验	156
8.2.1	实验装置及实验原理	156
8.2.2	冲击峰值压力计算分析及实验方案设计	157
8.2.3	实验结果分析	159
8.2.4	强动载岩石破裂压力模型回归及精度验证	160
8.3	套管受力分析及极限承载	163
第 9 章	燃爆气体压裂过程耦合求解及因素敏感性分析	165
9.1	燃爆气体压裂过程耦合求解	165
9.1.1	合理装药量范围确定	165
9.1.2	裂缝动态延伸计算	168
9.1.3	应用软件研制	168
9.2	燃爆气体压裂关键子系统变化规律研究	171
9.2.1	火药爆燃压力变化规律	172
9.2.2	压挡液柱运动规律	176
9.2.3	裂缝动态延伸规律	178
9.3	各因素对极限装药量和压裂效果的影响敏感性	182
9.3.1	装药结构的影响敏感性	182
9.3.2	装药量的影响敏感性	183
9.3.3	压挡液柱高度的影响敏感性	183
9.3.4	射孔参数的影响敏感性	184
第 10 章	燃爆气体压裂措施后油井产能计算模型	187
10.1	燃爆压裂油井产能模型	187
10.1.1	基本假设	187