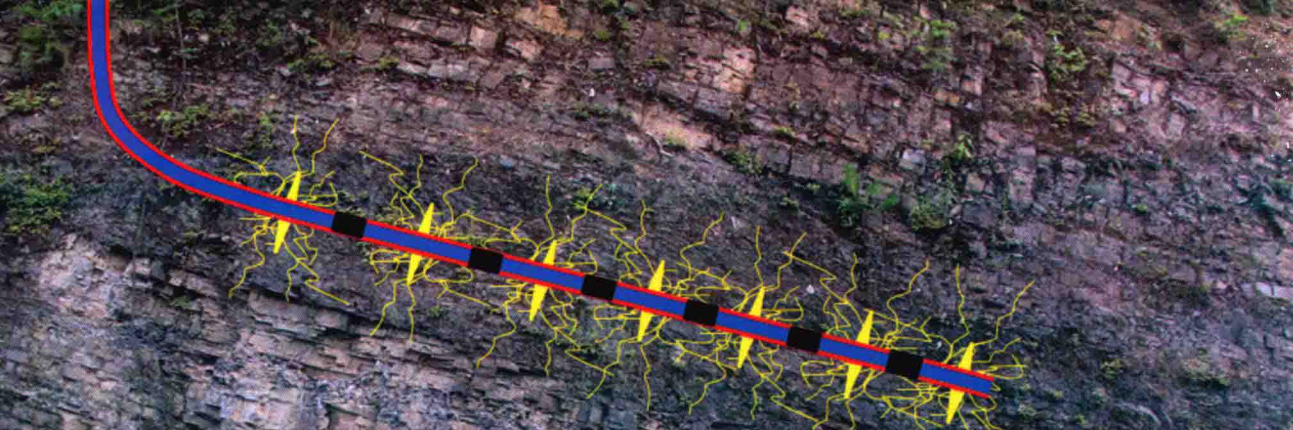




现代页岩油气水平井 压裂改造技术

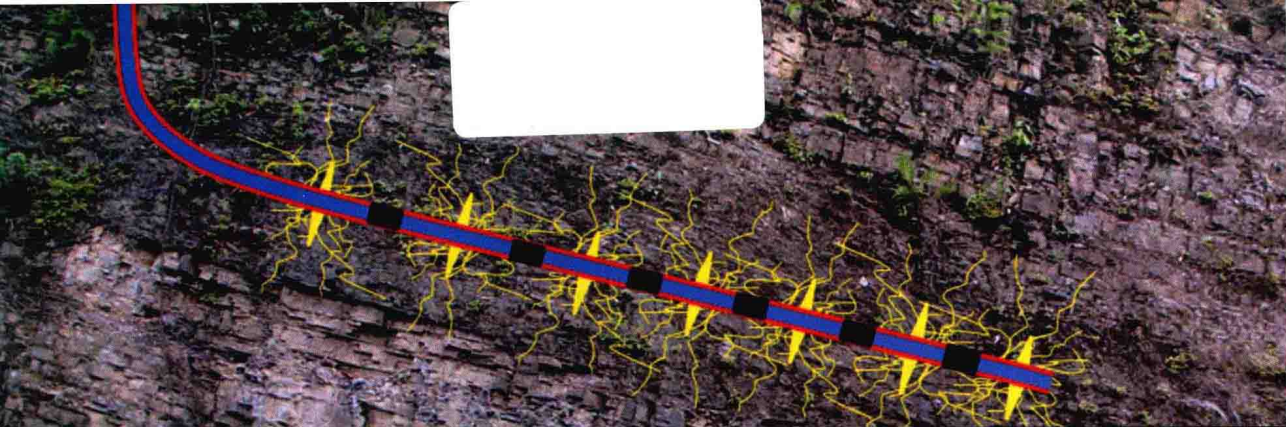
李宗田 苏建政 张汝生◎编著

MODERN FRACTURING TECHNOLOGY OF HORIZONTAL WELL IN SHALE



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



现代页岩油气水平井 压裂改造技术

李宗田 苏建政 张汝生◎编著

MODERN FRACTURING TECHNOLOGY OF
HORIZONTAL WELL IN SHALE



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书主要对页岩气水平井压裂改造技术及相关内容进行了研究探索,包括页岩储层基本特征、页岩体积裂缝形成机理、页岩气水平井压裂优化设计、水平井分段压裂管柱与施工工艺、压裂材料、页岩气压裂测试技术与压后评估方法、页岩油气压裂新技术和实例分析等内容。本书基本涵盖了当今页岩油气水平井分段压裂的全部技术,具有现实意义又有前瞻技术,既有理论又有实践,有很好的全面性、系统性和可操作性。

本书可供从事页岩油气水平井压裂技术的研究人员、从事现场作业的技术人员和管理人员参考或作为培训教材,也可供从事致密油气压裂的技术人员以及大专院校师生借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代页岩油气水平井压裂改造技术 / 李宗田, 苏建政, 张汝生编著.
—北京: 中国石化出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5114-3661-0

I. ①现… II. ①李… ②苏… ③张… III. ①油页岩—水平井—分层
压裂 IV. ①TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 302972 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 23 印张 534 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定价: 98.00 元

水力压裂是勘探开发的灵魂

Hydraulic fracturing is the soul of
petroleum exploration and development

谨以此书献给水力压裂的先驱

Dedicate this book to the pioneers of
hydraulic fracturing

前 言

根据美国能源信息署(EIA)的评价报告,全球页岩气技术可采资源量约为 $187.4 \times 10^{12} \text{m}^3$,基本相当常规天然气可采储量。中国、美国、阿根廷、墨西哥、南非、澳大利亚、加拿大、利比亚、阿尔及利亚和巴西等国家技术可采资源量约占全球的85%。美国、加拿大、中国等国页岩油气成功商业开发,证明了页岩油气资源丰富,开发前景广阔,影响深远,对解决未来人类能源问题有重要意义。

通过理论创新和技术的不探索创新,使得“页岩气革命”取得巨大成功,改变了美国的能源结构。页岩油气的成功开发得益于水平井钻井技术和水平井分段压裂技术的不断创新发展。20世纪末,水平井分段压裂技术应用于美国巴肯页岩区块,使其开发具有了经济性。进入21世纪,相继采用水平井分段压裂段内多簇射孔、大规模滑溜水及大排量等压裂工艺,以“打碎”储层形成体积裂缝的创新开发思维,建立了页岩油气“体积压裂”概念,形成了以网络裂缝为目标的压裂改造模式,使得美国页岩气开发取得突破,产量快速提升。2007年美国页岩气产量 $366.2 \times 10^8 \text{m}^3$,至2014年达到 $2727 \times 10^8 \text{m}^3$,约占美国天然气总产量的40%。美国页岩气的成功开发改变了美国能源结构,这场“革命”也将会改变全球能源格局。

中国页岩油气资源丰富,勘探开发潜力大。以涪陵和威远为代表的页岩气田亦将成功开发,建成规模生产能力。2014年中国页岩气产量 $13 \times 10^8 \text{m}^3$,预计2015年生产能力将超过 $60 \times 10^8 \text{m}^3$,这将使中国成为继美国、加拿大之后世界上第三个实现页岩气商业开发的国家。中国页岩气水平井分段压裂技术在引进、吸收、消化、应用和自主创新的基础上,形成了具有自主特色的水平井分段压裂工艺技术、压裂液体系、支撑剂体系及管柱工具等,在很多方面取得了重大的技术创新与进步,有力地支撑了我国页岩油气的开发和长远发展。

中国页岩气的成功开发和国家对清洁能源需求的快速增长,将使中国页岩气进入一个快速发展时期。为了适应页岩气勘探开发形势的发展,满足广大从事页岩气勘探开发技术人员和关心页岩气发展人士的迫切需求,我们认真调研

总结了多年来国内外页岩油气勘探开发的成功理念、先进技术和方法,探讨了理论认识创新与技术创新对页岩气成功开发和产量高速增长所起到的巨大作用,研究总结了近几年页岩油气水平井最新分段压裂技术和最新研究成果,进而编撰成书。

本书主要对页岩气水平井压裂改造技术及相关内容进行了研究探索。主要包括页岩储层基本特征、页岩体积裂缝形成机理、页岩气水平井压裂优化设计、水平井分段压裂管柱与施工工艺、压裂材料、页岩气压裂测试技术与压后评估方法、页岩油气压裂新技术和实例分析等内容。基本涵盖了当今页岩油气水平井分段压裂的全部技术,具有现实意义又有前瞻技术,既有理论又有实践,有很好的全面性、系统性和可操作性。本书可供从事页岩油气水平井压裂技术的研究人员、从事现场作业的技术人员和管理人员参考或作为培训教材,也可供从事致密油气压裂的技术人员以及大专院校师生借鉴参考。

本书由李宗田研究并拟定撰写提纲,由近几年参与页岩油气技术研究和实践的专业技术人员直接参加撰写,其中:绪论由李宗田撰写;第一章由孙志宇、李宗田撰写;第二章由李凤霞、刘长印撰写;第三章由刘长印、李凤霞撰写;第四章由孙良田、贺甲元、柴国兴撰写;第五章由郑承刚、孟祥龙、张汝生撰写;第六章由黄志文、苏建政撰写;第七章由贺甲元、李宗田撰写;第八章由杨科峰、杨道永、贺甲元、刘广仁撰写;前言和目录英文由孙志宇、张汝生、贺甲元翻译;全书由李宗田统稿审定完成。囿于编著者的学识和专业水平,书中某些观点或认识难免失之偏颇,甚至尚存不当之处,诚请广大读者不吝批评指正。

本书依托“页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室”和国家科技重大专项:2011ZX05002-005。

谨在此书付梓出版之际,特向各位进行研究和编撰、帮助和支持此书出版的同仁表示衷心感谢!

编著者

2015年12月

Foreword

According to the evaluation report of US Energy Information Administration (EIA), global shale gas technical recoverable resources is about $187.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, which is basically equivalent to conventional natural gas recoverable resources. The technical recoverable resources of these countries such as China, the United States, Argentina, Mexico, South Africa, Australia, Canada, Libya, Algeria and Brazil, can account for about 85% of the global shale gas resources. The successful commercial development of shale oil and gas in the United States, Canada, and China has proven that the development prospect of shale oil and gas is broad. And this will be important to solve the human energy problem in the future.

Through theoretical and technological innovation, the United States has achieved great success in "shale gas revolution". The successful exploitation of shale oil and gas is resulted from the development of horizontal well drilling technology and horizontal well fracturing technology. At the end of 20th Century, the horizontal well fracturing technology has been applied to in the United States, and this resulted that the Bakken shale was developed economically. Since 21th century, the new horizontal well fracturing technology including multi-cluster perforation, large scale slick water and big pump rate could break the reservoir formation more completely and form volume cracks. This technology have resulted in the rapidly development of shale gas. The shale gas production was up to at $366.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2007 and raised up to $2727 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2014 which accounted for about 40% of the total production of natural gas in the United States. The success of shale gas development have changed the energy structure of the United States, which will also change the global energy structure.

Shale oil and gas resource in China is rich and China has huge potentiality for exploration and development. China, the third country following the United States and Canada, has developed shale gas commercially. The typical representativeness of Fuling and Weiyuan shale gas have been developed successfully. The production of shale gas in China is $13 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2014 and is estimated to exceed $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ in

2015. On the basis of introduction, absorption, digestion, application and independent innovation of horizontal well fracturing technology for shale gas, China has formed the technology series with advantage and competitiveness, such as horizontal well staged fracturing technology, fracturing fluid system, system of proppant, string tools and so on. These progresses powerfully supported the development and long-term growth of the shale oil and gas in China.

The successful development of shale gas and the rapid demand growth for clean energy in China will result that shale gas will enter a period of rapid development in China. This book carefully reviewed the successful concept, advanced technologies, and methods from overseas and domestic, and discussed the immense contribution of theoretical and technology innovation to the successful development and production of the shale gas, and summarized the editors' latest research achievements in recent years. We hope this book can meet the demand of technician and other people who concerns about the development of shale oil and gas exploration. The whole book centers on the research of shale gas horizontal well fracturing technology and other related content including the basic characteristics of shale reservoir, the formation mechanism of shale network fracture, optimization design of shale gas horizontal well fracturing, fracturing string and operation technology, material, testing technology and post fracturing evaluation method, new fracturing technology, case analysis and so on. This book almost covers all horizontal well fracturing technologies and the prospective technologies of shale oil gas at present which has a wonderful comprehensive, systemic and operability both in theory and practice. This book is designed and recommended to researchers who study the horizontal well fracturing technology of shale oil and gas, and to the technicians and managers who engaged in the field operation, and to the technicians who engaged in the tight oil fracturing, as well as to the college teachers and students.

Li Zongtian proposed the compilation and listed the outline of this book. The total 8 chapters have been written by the professional and technical persons who have done lots of researches in shale oil and gas in recent years. Specific division is as followed: the introduction by Li Zongtian, the chapter 1 by Sun Zhiyu and Li Zongtian, the chapter 2 by Li Fengxia and Liu Changyin, the chapter 3 by Liu Changyin and Li Fengxia, the chapter 4 by Sun Liangtian, He Jiayuan and Chai Guoxing, the chapter 5 by Zheng Chenggang, Meng Xianglong and Zhang Rusheng, the chapter 6 by

Huang Zhiwen and Su Jianzheng, the chapter 7 by He Jiayuan and Li Zongtian, the chapter 8 by Yang Kefeng, Yang Daoyong, He Jiayuan and Liu Guangren. Sun Zhiyu, Zhang Rusheng and He Jiayuan translated foreword and contents. The whole book is approved by Li Zongtian. In view of writers' limited knowledge, some idea in this book may be imperfect, please readers put forward to criticism and correction.

This book strongly and effectively supported by "State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development" and the major projects of national science and technology(2011ZX05002 –005).

Special thanks to researches of SINOPEC and any persons for providing valuable information and critiques.

Author

December 2015

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 页岩储层基本特征	(5)
1.1 页岩地质特征	(5)
1.1.1 页岩沉积特征	(5)
1.1.2 页岩气赋存特征	(8)
1.1.3 页岩油气有机地化特征	(12)
1.1.4 页岩油气形成机理、条件及主控因素	(13)
1.2 页岩物理性质	(21)
1.2.1 页岩物理性质	(22)
1.2.2 岩石矿物学特征	(25)
1.3 页岩力学性质	(26)
1.3.1 物理实验方法	(27)
1.3.2 测井解释方法	(32)
1.4 页岩气资源评价	(36)
1.4.1 类比法	(36)
1.4.2 成因法	(37)
1.4.3 统计法	(38)
第 2 章 页岩体积裂缝形成机理	(42)
2.1 体积裂缝概念	(42)
2.2 体积裂缝形成机理	(44)
2.2.1 体积裂缝破裂机理	(45)
2.2.2 体积裂缝延伸规律	(47)
2.2.3 体积裂缝扩展计算模型	(55)
2.3 体积裂缝形成条件	(62)
2.3.1 地质条件	(62)
2.3.2 工程条件	(66)
2.4 体积压裂工艺设计	(70)
2.4.1 体积压裂工艺特征与方法	(71)
2.4.2 压裂材料特性与优化方法	(75)
第 3 章 页岩气水平井压裂优化设计	(80)
3.1 压裂“甜点”分析	(80)
3.1.1 “甜点”概念及影响因素	(80)
3.1.2 “甜点”测评方法	(84)

3.1.3 “甜点”综合分析	(89)
3.2 水平井分段压裂方案设计	(92)
3.2.1 射孔方案设计	(93)
3.2.2 裂缝形态模拟	(96)
3.2.3 压裂工艺参数优化	(97)
3.3 测试压裂分析	(98)
3.3.1 微注测试	(98)
3.3.2 平衡测试 + 校正压裂测试	(103)
3.3.3 诱导注入小型压裂测试	(106)
3.4 压裂液及支撑剂优选	(109)
3.4.1 压裂液优选	(109)
3.4.2 支撑剂优选	(110)
3.5 段塞设计	(111)
3.5.1 液体段塞数优化	(111)
3.5.2 支撑剂段塞量优化	(114)
3.6 施工设计	(116)
3.6.1 压裂设计思路	(116)
3.6.2 分段设计	(116)
3.6.3 裂缝长度与压裂规模设计	(117)
3.6.4 射孔参数设计	(118)
3.6.5 施工压力预测	(118)
3.6.6 压裂液	(119)
3.6.7 支撑剂	(119)
3.6.8 施工参数与泵注程序	(119)
3.7 产能预测	(121)
3.7.1 物理模型	(123)
3.7.2 数学模型	(123)
3.7.3 页岩气井产量递减规律	(127)
第4章 井下分段压裂管柱与施工工艺	(130)
4.1 射孔—桥塞联作水平井分段压裂管柱系统	(130)
4.1.1 工艺原理	(130)
4.1.2 管柱结构	(131)
4.1.3 关键技术	(132)
4.1.4 施工步骤	(133)
4.1.5 工艺优缺点分析	(133)
4.2 裸眼滑套封隔器分段压裂管柱系统	(134)
4.2.1 工艺原理	(134)
4.2.2 管柱结构	(135)
4.2.3 关键技术	(135)
4.2.4 施工步骤	(138)

4.2.5	工艺优缺点分析	(139)
4.3	多级滑套固井分段压裂完井管柱系统	(139)
4.3.1	工艺原理	(140)
4.3.2	管柱结构	(140)
4.3.3	关键技术	(140)
4.3.4	施工步骤	(144)
4.3.5	工艺优缺点分析	(144)
4.4	免钻桥塞多级分段压裂管柱系统	(145)
4.4.1	工艺原理	(145)
4.4.2	管柱结构	(145)
4.4.3	关键技术	(145)
4.4.4	施工步骤	(145)
4.4.5	工艺优缺点分析	(146)
4.5	丛式滑套多级分段压裂管柱系统	(146)
4.5.1	工艺原理	(146)
4.5.2	管柱结构	(146)
4.5.3	关键技术	(146)
4.5.4	施工步骤	(146)
4.5.5	工艺优缺点分析	(147)
4.6	连续油管水力喷射分段压裂管柱系统	(148)
4.6.1	水力喷砂射孔原理	(148)
4.6.2	水力喷射分段压裂工艺原理	(149)
4.6.3	管柱结构	(150)
4.6.4	流体摩阻计算	(150)
4.6.5	关键技术	(153)
4.6.6	施工步骤	(157)
4.6.7	工艺优缺点分析	(157)
4.7	分支水平井分段压裂管柱系统	(158)
4.7.1	完井技术	(158)
4.7.2	井身结构优化	(158)
4.7.3	管柱结构	(159)
4.7.4	关键技术	(159)
4.7.5	实例分析	(160)
4.8	水平井分段压裂管柱力学计算模型	(162)
4.8.1	动力学基本方程	(162)
4.8.2	数学力学模型分析	(164)
4.8.3	管柱基本效应的力学分析模型	(168)
4.8.4	管柱强度校核模型	(169)
4.8.5	管柱通过性计算模型	(170)

第5章 压裂材料	(179)
5.1 压裂液与添加剂	(179)
5.1.1 主要类型	(179)
5.1.2 添加剂种类与特性	(181)
5.2 支撑剂	(192)
5.2.1 支撑剂类型	(192)
5.2.2 支撑剂的物理性能及评价方法	(194)
5.2.3 影响因素分析	(198)
5.2.4 新型超低密度支撑剂	(199)
5.3 返排液处理技术	(202)
5.3.1 返排液处理分析	(202)
5.3.2 返排液处理技术	(203)
第6章 页岩气压裂测试技术与压后评估方法	(205)
6.1 页岩储层测录井技术	(205)
6.1.1 测井技术	(206)
6.1.2 随钻测井技术	(209)
6.1.3 录井技术	(215)
6.2 页岩气井压裂微地震监测技术	(218)
6.2.1 技术原理	(219)
6.2.2 监测方法	(223)
6.2.3 案例分析	(225)
6.3 页岩气水平井压后评估技术	(230)
6.3.1 压后返排示踪剂监测技术	(230)
6.3.2 井筒分布式裂缝监测技术	(233)
6.3.3 水平井生产剖面测试方法	(235)
6.3.4 压后试井评价技术	(239)
6.3.5 压后生产动态分析技术	(240)
第7章 页岩油气压裂新技术	(245)
7.1 “井工厂”压裂技术	(245)
7.1.1 “井工厂”技术特征	(246)
7.1.2 “井工厂”压裂设备组成	(247)
7.1.3 技术发展前景	(248)
7.2 同步压裂技术	(248)
7.2.1 技术应用特征	(248)
7.2.2 现场试验情况	(250)
7.2.3 技术发展前景	(251)
7.3 “拉链式”压裂技术	(251)
7.3.1 技术应用特征	(252)
7.3.2 现场试验情况	(252)
7.3.3 技术发展前景	(254)

7.4	爆燃压裂技术	(254)
7.4.1	技术特征	(254)
7.4.2	技术发展历程	(255)
7.4.3	现场应用情况	(256)
7.4.4	技术发展前景	(257)
7.5	气枪技术	(257)
7.5.1	技术特征	(257)
7.5.2	现场应用情况	(259)
7.5.3	技术发展前景	(260)
7.6	液态二氧化碳压裂技术	(260)
7.6.1	技术特征	(260)
7.6.2	应用特征	(260)
7.6.3	现场应用情况	(261)
7.6.4	技术发展前景	(266)
7.7	高速通道压裂技术	(266)
7.7.1	技术特征	(266)
7.7.2	技术实施方法	(267)
7.7.3	现场应用情况	(268)
7.7.4	技术发展前景	(268)
7.8	液化石油气(LPG)压裂技术	(269)
7.8.1	LPG 压裂液组成和性能	(269)
7.8.2	LPG 压裂施工技术	(272)
7.8.3	现场试验情况	(275)
7.9	多级滑套固井压裂技术	(276)
7.9.1	技术特征	(276)
7.9.2	现场试验情况	(276)
7.9.3	技术发展前景	(278)
第8章	实例分析	(279)
8.1	四川盆地涪陵地区 JY1 井	(279)
8.1.1	概况	(279)
8.1.2	地质特征	(279)
8.1.3	钻完井情况	(280)
8.1.4	射孔—桥塞联作分段压裂工艺技术	(282)
8.1.5	压后效果评价分析	(286)
8.2	泌阳盆地 BY1 井	(288)
8.2.1	概况	(288)
8.2.2	地质特征	(288)
8.2.3	钻完井情况	(289)
8.2.4	射孔—桥塞联作分段压裂工艺技术	(290)
8.2.5	压后效果评价分析	(291)

8.3 威远页岩区块 WY1 井	(292)
8.3.1 概况	(292)
8.3.2 地质特征	(292)
8.3.3 钻完井情况	(293)
8.3.4 压裂工艺技术	(294)
8.3.5 压后效果	(298)
8.4 美国吉丁斯(Giddings)页岩	(298)
8.4.1 地质构造和地层学	(298)
8.4.2 储层物性	(300)
8.4.3 压裂设计	(300)
8.4.4 油田应用进展	(302)
8.4.5 压裂效果评估	(303)
8.5 美国巴肯(Bakken)页岩	(303)
8.5.1 地质概况与地层学	(304)
8.5.2 储层物性	(306)
8.5.3 压裂设计	(306)
8.5.4 油田应用进展	(309)
8.5.5 压裂效果评估	(310)
8.6 美国马塞勒斯(Marcellus)页岩	(310)
8.6.1 地质背景与地层学	(311)
8.6.2 储层物性	(312)
8.6.3 压裂设计	(312)
8.6.4 油田应用进展	(313)
8.6.5 压裂效果评估	(314)
8.7 美国巴内特(Barnet)页岩	(314)
8.7.1 概况	(314)
8.7.2 地质特征	(315)
8.7.3 钻完井情况	(315)
8.7.4 同步压裂工艺技术	(316)
8.7.5 压后效果评价分析	(317)
8.8 美国威利斯顿盆地巴肯(Bakken)页岩	(318)
8.8.1 概况	(318)
8.8.2 地质特征	(319)
8.8.3 水平井开发技术	(322)
8.8.4 重复压裂工艺技术	(325)
8.8.5 压后效果评价分析	(326)
参考文献	(331)

Contents

Introduction	(1)
Chapter 1 The basic characteristics of shale reservoir	(5)
1.1 The geologic characteristics of shale	(5)
1.1.1 The depositional characteristics of shale	(5)
1.1.2 The occurrence characteristics of shale gas	(8)
1.1.3 The organic geochemical characteristics of shale oil and gas	(12)
1.1.4 The formation mechanism, conditions and main controlling factors of shale oil and gas	(13)
1.2 The physical properties and rock mineralogical characteristics of shale	(21)
1.2.1 The physical properties of shale	(22)
1.2.2 Rock mineralogical characteristics	(25)
1.3 The mechanical properties of shale	(26)
1.3.1 Physical experiment method	(27)
1.3.2 Log interpretation method	(32)
1.4 Shale gas resource evaluation	(36)
1.4.1 Analogy method	(36)
1.4.2 Genetic method	(37)
1.4.3 Statistical method	(38)
Chapter 2 The formation mechanism of network fracture in shale	(42)
2.1 The concept of network fracture	(42)
2.2 The formation mechanism of network fracture	(44)
2.2.1 The initiation mechanism of network fracture	(45)
2.2.2 The propagation rule of network fracture	(47)
2.2.3 Calculation model of network fracture extension	(55)
2.3 The formation conditions of network fracture	(62)
2.3.1 Geological conditions	(62)
2.3.2 Engineering conditions	(66)
2.4 The technological design of network fracturing	(70)
2.4.1 The technological characteristics and method of network fracturing	(71)
2.4.2 Fracturing material properties and optimization method	(75)
Chapter 3 Optimization design of Shale gas horizontal well fracturing	(80)
3.1 Fracturing "Dessert" analysis	(80)
3.1.1 The concept and influence factors of "Dessert"	(80)

3.1.2	"Dessert" assessment method	(84)
3.1.3	"Dessert" comprehensive analysis	(89)
3.2	Horizontal well staged fracturing design	(92)
3.2.1	Perforation design	(93)
3.2.2	Fracture morphology simulation	(96)
3.2.3	Fracturing technological parameters optimization	(97)
3.3	Test fracturing analysis	(98)
3.3.1	Micro – injection test	(98)
3.3.2	Balance test & correction fracturing test	(103)
3.3.3	Induced injection mini – fracturing test	(106)
3.4	Fracturing fluid and proppant optimization	(109)
3.4.1	Fracturing fluid optimization	(109)
3.4.2	Proppant optimization	(110)
3.5	Slug design	(111)
3.5.1	The optimization for liquid slug number	(111)
3.5.2	The optimization for proppant slug number	(114)
3.6	Operation design	(116)
3.6.1	Fracturing design idea	(116)
3.6.2	Design on fracturing section	(116)
3.6.3	Fracture length and fracturing scale design	(117)
3.6.4	Perforation parameter design	(118)
3.6.5	The operation pressure prediction	(118)
3.6.6	Fracturing fluid	(119)
3.6.7	Proppant	(119)
3.6.8	Operation parameters and pumping procedure	(119)
3.7	Productivity prediction	(121)
3.7.1	Physical model	(123)
3.7.2	Mathematical model	(123)
3.7.3	Shale gas well production decline rule	(127)
Chapter 4	Horizontal well staged fracturing string and operation technology	(130)
4.1	The string system of perforation – bridge plug clustering staged fracturing	(130)
4.1.1	Technical principle	(130)
4.1.2	String structure	(131)
4.1.3	Key technology	(132)
4.1.4	Operation procedure	(133)
4.1.5	Analysis of advantages and disadvantages	(133)
4.2	The string system of open hole sliding sleeve – packer staged fracturing	(134)
4.2.1	Technical principle	(134)
4.2.2	String structure	(135)
4.2.3	Key technology	(135)