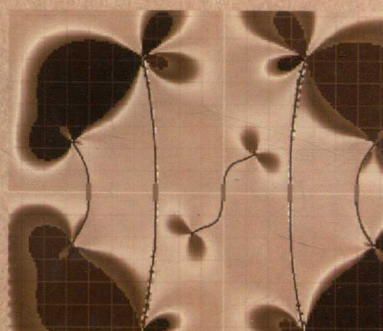
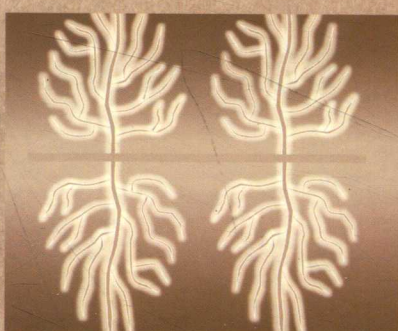
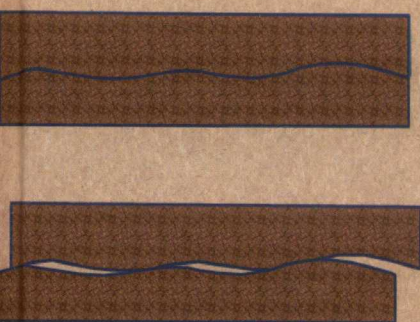


非常规油气储层体积改造 裂缝扩展与织网机理研究



周德胜 著



科学出版社

非常规油气储层体积改造裂缝扩展 与织网机理研究

周德胜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在系统介绍体积压裂理论、工艺技术、非常规储层岩石特征的基础上,应用边界元法和有限元法对裂缝起裂扩展规律及其相互作用机理、人工裂缝与天然裂缝相互作用以及裂缝缝网模态及其影响因素等进行模拟研究,同时使用缝网压裂模拟软件从工程角度和地质角度两方面对增加体积压裂动用体积的各影响因素进行优化分析。最后,基于作者研发的实验装置对单缝和双缝内支撑剂的输送规律进行研究。

本书可供从事压裂技术工作的科研人员和技术人员,以及高等院校石油工程专业的师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气储层体积改造裂缝扩展与织网机理研究 / 周德胜著. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-057514-2

I. ①非… II. ①周… III. ①储集层-裂缝延伸-研究 IV. ①TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 102942 号

责任编辑: 宋无汗 罗 娟 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

艺堂印刷(天津)有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 18 3/4 插页 12

字数: 378 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

非常规油气的有效开发已成为当前能源领域的热点研究问题，特别是致密储层及页岩储层，但由于其极低的渗透率及自生自储的成藏特点，常规的开采方法已经很难适用于该类油藏，必须采用一些特殊的增产技术才能高效开发。自 20 世纪 70 年代开始，美国就积极探索如何有效开发页岩气，特别是 21 世纪初，水平井钻井技术和水力压裂技术的成功应用，使美国成为世界上首个实现页岩气商业化开采的国家，由此引发了一场重大石油科技革命，掀起了全球开发非常规油气的热潮。21 世纪是我国推进全球化战略目标、全面踏入国际化舞台中心的关键时期，同时 21 世纪又是能源的时代。随着全面建成小康社会的到来，我国人民对能源的需求逐年攀升。与此同时，人们的环保理念也发生了变化，由煤炭到石油、再由石油到天然气已经成为不可逆转的趋势。然而，我国页岩油气、致密油气研究起步较晚，无论是勘探技术还是开采技术，都尚未形成体系。虽然近年来非常规油气产量已大幅度增加，但在整个化石能源领域所占的比例仍然很低。由此可见，形成一套适合我国非常规储层的开发技术对于提高我国石油与天然气的产量将是里程碑式的改变。

近几年来，作者的科研团队在多个科研项目，特别是在陕西省科技统筹创新工程计划项目的资助下，对体积压裂技术及织网机理开展了深入研究。本书第 1~3 章主要介绍体积压裂理论、工艺技术以及非常规油气储层的岩石特征，同时对未来体积压裂技术的发展方向进行展望。第 4 章主要介绍用于模拟压裂裂缝的数值模拟方法及其基本原理。第 5~10 章主要运用有限元法和边界元法对裂缝起裂扩展规律及其互作用机理、人工裂缝与天然裂缝互作用以及裂缝缝网模态及其影响因素等进行模拟研究，同时使用缝网压裂模拟软件从工程角度和地质角度两方面对增加体积压裂动用体积的各影响因素进行优化分析。第 11 章主要介绍作者研发的新装置，并基于此装置对单缝和双缝内支撑剂的输送规律进行研究。

本书由周德胜教授撰写与统稿，西安石油大学石油工程学院李欣儒老师参与了第 1 章与第 2 章部分内容的编写，特别需要指出的是作者的研究生郑鹏、赵超能和张争参与了部分资料的收集与文字整理、编排等工作。此外，研究生邵心敏、相智文、张博、贺沛、彭娇、邹易、惠峰、刘安邦、卫海涛、石豫等也对本书的科研成果与成稿做出贡献，对于他们的辛勤付出在此

表示真诚的感谢。

此外，在撰写本书过程中得到西安石油大学领导、专家的支持和帮助，得到西安石油大学优秀学术著作出版基金、陕西省科技统筹创新工程计划项目“陆相页岩气储层压裂改造工艺技术攻关”(2012KTZB03-03-02)、国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程——低渗透致密砂岩气藏压裂裂缝及参数优化”(2016ZX05050-009)的资助，在此一并表示感谢。

本书是对作者近五年教学、科研和指导研究生的过程中对页岩气、致密油气储层体积压裂技术研究成果的系统总结与概括，可供各石油院校、科研院所及企事业单位从事非常规油气开发的技术人员和科研人员参考。近年来，国内外专家学者对非常规储层体积压裂技术及织网机理进行了深入研究，但同时仍然存在许多理论和技术问题亟待解决。在此，期待通过同行的共同努力，在非常规油气开发研究以及相关领域中不断取得新的成果。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，欢迎各位读者批评指正。

作 者

2017年6月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 体积压裂简介	1
1.1.1 水力压裂技术发展历程	2
1.1.2 常规水力压裂模型及软件简介	4
1.1.3 储层改造体积概述	5
1.1.4 体积压裂概念发展	7
1.1.5 常规压裂与体积压裂区别	8
1.2 储层体积改造研究现状	11
1.2.1 物理实验研究	11
1.2.2 数值模拟研究	12
1.2.3 岩石起裂与裂缝扩展机理	14
1.2.4 主裂缝扩展及裂缝成网分析	15
1.3 油气储层体积改造地质基础	17
1.3.1 岩石脆性	17
1.3.2 天然裂缝发育特征	19
1.3.3 地应力特征	19
参考文献	19
第 2 章 非常规油气储层特征与室内实验	28
2.1 泥岩	28
2.1.1 泥岩储层的岩石矿物成分	29
2.1.2 泥岩储层物性	29
2.1.3 泥岩储层油气赋存与含油气性	29
2.2 页岩	30
2.2.1 页岩的岩石矿物成分	30
2.2.2 页岩物性	31
2.2.3 页岩储层的油气赋存与含油气性	32
2.3 致密砂岩	33
2.3.1 致密砂岩储层的岩石矿物成分	34
2.3.2 致密砂岩储层物性	34

2.3.3 致密砂岩储层油气赋存与含油气性	35
2.4 煤储层	37
2.4.1 煤储层的岩石矿物成分	37
2.4.2 煤储层物性	37
2.4.3 煤层气的赋存与煤层含气性	38
2.5 室内基础实验	39
2.5.1 室内测试内容概述	39
2.5.2 页岩气开发室内实验测试	41
参考文献	50
第3章 储层体积改造工艺技术	54
3.1 水平井分段压裂技术	54
3.1.1 常见水平井分段压裂技术	55
3.1.2 水平井分段压裂技术新发展	61
3.2 特殊压裂技术	63
3.2.1 控缝高技术	63
3.2.2 加砂技术	65
3.2.3 防砂技术	66
3.2.4 压裂液支撑剂相关技术	67
3.3 体积压裂技术	70
3.3.1 水平井分段体积压裂技术	71
3.3.2 水平井分段多簇体积压裂技术	71
3.3.3 重复压裂	72
3.3.4 同步压裂与拉链式压裂	73
3.4 体积压裂认识与展望	75
3.4.1 页岩体积压裂主要设计参数	75
3.4.2 体积压裂机理的几点认识与研究展望	79
3.4.3 体积压裂技术研究展望	90
3.5 压裂裂缝监测技术	93
3.5.1 微地震监测技术	93
3.5.2 测斜仪监测技术	95
3.5.3 井下电视裂缝监测技术	96
3.5.4 放射性示踪法裂缝监测技术	96
3.5.5 电磁成像裂缝监测技术	96
3.5.6 分布式声传感裂缝监测技术	97
3.5.7 裂缝监测技术对比	97

参考文献	98
第 4 章 压裂裂缝扩展模拟模型	103
4.1 边界元模型	103
4.1.1 基于边界元的位移不连续法	103
4.1.2 裂缝尖端附近的奇异场	109
4.1.3 裂缝尖端应力强度因子	111
4.1.4 复合型裂缝断裂及转向判据	112
4.2 有限元模型	114
4.2.1 有限元法概述	114
4.2.2 模型中的应力及等效应力	114
4.2.3 三维模型有限单元类型	116
4.2.4 二维模型有限单元	120
4.2.5 流体流动模拟	127
4.3 离散化缝网模型	130
4.3.1 模型假设	130
4.3.2 主裂缝扩展模型	132
4.3.3 次生裂缝扩展模型	135
4.3.4 离散缝网模型特征	137
4.3.5 离散化缝网扩展模型求解	140
参考文献	141
第 5 章 裂缝扩展及互作用机理研究	144
5.1 压裂过程中井筒应力分布	144
5.1.1 井筒有限元模型的建立	144
5.1.2 压裂前井壁受力及变形研究	149
5.1.3 压裂时井壁受力及变形研究	151
5.2 体积压裂裂缝扩展及织网边界元模拟软件	153
5.3 裂缝起裂扩展模拟研究	158
5.3.1 基本模拟模型	158
5.3.2 裂缝起裂扩展模拟	160
5.4 裂缝扩展方向与 H 评价因子	163
5.4.1 H 评价因子	163
5.4.2 评价因子数值模拟验证	164
5.4.3 评价因子和裂缝初始角度对裂缝扩展方向的影响	166
5.5 两簇裂缝扩展及互作用	167
5.5.1 两簇裂缝模型与扩展路径	167

5.5.2	裂缝扩展中应力阴影	169
5.5.3	应力阴影内应力值与方向变化	170
5.6	多簇裂缝扩展及互作用	172
5.6.1	多簇裂缝同时扩展及其应力阴影	172
5.6.2	多簇压裂时裂缝间的相互抑制作用	174
5.7	同步压裂裂缝扩展及互作用	177
5.7.1	同步压裂模拟模型	177
5.7.2	同步压裂裂缝交错分布	178
5.7.3	同步压裂裂缝对顶分布	183
	参考文献	187
第 6 章	裂缝参数对裂缝扩展轨迹的影响	188
6.1	裂缝初始角度对裂缝扩展轨迹的影响	188
6.2	裂缝缝内压力对裂缝扩展轨迹的影响	190
6.3	裂缝间距对裂缝扩展轨迹的影响	193
6.4	裂缝间距对裂缝宽度的影响	195
6.5	同步压裂水平井间距对裂缝扩展的影响	198
	参考文献	202
第 7 章	储层地质参数与裂缝缝宽及改造体积	203
7.1	杨氏模量与缝宽	203
7.2	泊松比与缝宽	205
7.3	脆性指数与储层改造体积	206
7.4	水平主应力差	209
7.4.1	水平地应力差对裂缝宽度的影响	209
7.4.2	水平地应力差对储层改造体积的影响	210
7.5	天然裂缝发育程度	211
	参考文献	214
第 8 章	人工主裂缝与天然微裂缝互作用研究	215
8.1	天然微裂缝扩展规律研究	215
8.1.1	两条天然微裂缝的起裂扩展研究	215
8.1.2	多条天然微裂缝的起裂扩展研究	217
8.2	人工裂缝与前方天然微裂缝的互作用	219
8.3	人工裂缝与前侧天然微裂缝的互作用	223
8.3.1	人工裂缝与天然微裂缝互作用	223
8.3.2	唤醒天然微裂缝影响因数研究	225
8.3.3	裂缝纵向间距对互作用影响研究	228

8.3.4 裂缝横向间距对互作用影响研究	231
8.3.5 天然微裂缝角度对互作用影响研究	235
8.4 同步压裂裂缝间互作用	238
参考文献	241
第 9 章 裂缝缝网模态及影响因素研究	242
9.1 裂缝缝网影响因素研究	242
9.1.1 人工裂缝压力对压裂缝网的影响	242
9.1.2 人工裂缝簇数对压裂缝网的影响	246
9.1.3 天然裂缝角度对压裂缝网的影响	250
9.2 体积压裂缝网模态	255
9.2.1 水波型	255
9.2.2 网格型	255
参考文献	256
第 10 章 影响储层改造体积的压裂施工参数	257
10.1 压裂液总量	257
10.2 施工排量	259
10.3 簇间距	261
10.4 前置液比例	266
10.5 平均砂比	267
10.6 压裂液黏度	268
参考文献	270
第 11 章 大排量滑溜水携砂实验研究	272
11.1 实验设备简介	272
11.1.1 注入系统	272
11.1.2 射孔段模拟系统	274
11.1.3 裂缝模拟系统	274
11.1.4 测量检测系统	275
11.1.5 数据采集处理系统	275
11.1.6 控制系统	276
11.1.7 实验固液回收处理系统	276
11.2 滑溜水携砂在单裂缝中输送规律	277
11.2.1 实验原理	277
11.2.2 实验方法	278
11.2.3 实验步骤	278
11.2.4 实验数据描述	279

11.2.5 实验方案设计·····	279
11.2.6 实验结果分析·····	280
11.3 支撑剂在双缝中的输送规律·····	285
参考文献·····	288

彩图

第1章 绪 论

随着社会经济的飞速发展,人们对能源的需求量逐步攀升,但常规油气资源可采储量在不断减少,且大多数老油田已进入中高含水期,产量短时间内难以大幅度提高,因而国内外学者逐渐将目光转向非常规油气资源。非常规油气藏是指油气藏特征、成藏机理及开采技术有别于常规油气藏的石油天然气矿藏。非常规油气资源的种类很多,非常规石油资源主要包括致密油、页岩油、稠油、油砂、油页岩等;非常规天然气资源主要包括致密气、页岩气、煤层气、甲烷水合物等。其中,资源潜力大、分布广,且在现有技术经济条件下最

有勘探开发价值的是致密油气(包括致密砂岩油气和致密碳酸盐岩油气)、页岩油气(包括页岩气和页岩油)和煤层气。非常规油气储层的典型特征是超低渗透,储层物性远低于常规储层,必须实施“压裂改造”才能使其具有一定的经济效益^[1,2]。

目前,我国在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地和松辽盆地相继发现了非常规油气。对于非常规油气,实施水力压裂改造是提高油气田产量的有效手段,压后形成的高导流能力裂缝不仅使油水井的增产、增注得到显著提高,而且从长远来看,会影响油藏的无水期采收率和最终采收率。因此,水力压裂技术在非常规油气开发中扮演着非常重要的角色^[3]。

为了充分发挥水力压裂的作用,又不至于使油井过早水淹或压裂裂缝过长引起水窜,本书以鄂尔多斯盆地为背景研究非常规油气藏的储层增产改造,借此指导非常规油气藏的井网部署和产能规划设计。

1.1 体积压裂简介

体积压裂(volume frac)又称缝网压裂(fracture network frac),我国学者习惯于使用前者,而后者主要在国外使用。本书中“压裂”一词主要是指施工工艺,“储层改造”一词主要是指储层内部渗流变化。体积压裂对应储层体积(stimulated reservoir volume, SRV)改造,缝网压裂对应储层复杂裂缝网络(complex fracture network)改造。储层改造体积用于量化体积压裂后储层改造体积或储层复杂裂缝网络体积。

体积压裂是在页岩气开发过程中建立起来的压裂的新概念。它是通过水力压裂对储层实施立体改造,在形成一条或者多条主裂缝的同时使天然裂缝不断扩张和脆性岩石产生剪切滑移,实现对天然裂缝和岩石层理的沟通,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,从而形成天然裂缝与人工裂缝相互交错的裂缝网络,以增大渗流面积,提高产量和最终采收率。综上所述,体积压裂的主要特征是在地层中造出复杂的裂缝网络。

1.1.1 水力压裂技术发展历程

水力压裂技术在石油与天然气工业中的应用起始于 20 世纪 30 年代,当时 Grebe 等^[4]发现,井眼内的流体压力可以使岩石结构发生变化并产生水力裂缝。美国于 1947 年对堪萨斯州 Hugoton 油田的一口气井进行水力压裂处理,这是水力压裂技术第一次用于气井生产^[5]。1988 年,美国得克萨斯州 Barnett 页岩的一口气井通过水力压裂作业成功提高了页岩气产量。

自 1947 年水力压裂技术首次使用至今,其在油气开发工业中的广泛应用使得相关理论技术得到了不断完善,现已成为常规油气井的重要增产措施,并在低渗透气藏、致密油气藏、页岩油气藏中得到广泛应用。

油气井水力压裂施工主要分两个阶段^[6],第一阶段用射孔弹射穿钻完井后的套管与水泥环,在井壁上产生射孔孔道,随后向井内泵入一种称为前置液(pad)的黏性流体,当井底压力超过地层破裂压力时,射孔段会产生裂缝并向周围储层延伸;第二阶段将掺有支撑剂的黏性液体泵入井中,目的是停泵泄压后支撑剂将压开的裂缝支撑起来,使其不完全闭合。压裂结束后向井内泵入一些化学剂,致使流体的分子结构被破坏,黏度降低,进而易于返排出井口,而充填有支撑剂的裂缝则为油气流向井筒提供了高导流能力的通道。这种高渗透通道的典型特征是窄且长,宽度一般在 10mm 左右,但从射孔段到裂缝尖端的长度可达 300m。整个施工过程耗时十几分钟到几个小时,具体取决于裂缝的设计尺寸以及要输送的支撑剂体积。现场压裂施工表明,一个成功的压裂作业可使产量增加 3 倍以上,由此可见该项技术具有很高的经济应用价值。

水力压裂增产的原理是通过在储层中形成具有一定几何尺寸和高导流能力的填砂裂缝,降低井底附近地层中流体的渗流阻力和改变流体的渗流状态,使得原来的径向流动变为油气层与裂缝的近似线性流动和裂缝与井筒的径向流动,消除了储层中油气的径向节流损失,减少了油气从储层流向井底的能量损耗,从而实现油气产量的大幅度提高。

根据常规与非常规储层特征,可将水力压裂增产技术分为常规压裂技术和

体积压裂(或称缝网压裂)技术。常规压裂技术主要应用于常规油气开采,按其施工目的可分为解堵型压裂和改造型压裂;体积压裂技术主要用于非常规油气开采中。根据井筒特性可将水力压裂技术分为直井压裂和水平井压裂。水力压裂压出的裂缝按其表面方位可分为水平缝与垂直缝,水平缝一般出现在浅层(井深1000m以内),其裂缝面基本呈圆形,近似平行于水平面;垂直缝的裂缝面基本呈半椭圆形,近似垂直于水平面,一般成对出现(双翼裂缝)。目前油气井深度一般大于1000m,因此压出的裂缝基本为垂直缝。

常规压裂技术利用双翼垂直裂缝改善储层渗流能力,但因储层垂向渗流能力未得到有效改善,故无法实现对储层整体渗流能力的改造。非常规油气资源主要采用水平井压裂技术,直井压裂主要用于新开发区块储层数据采集、压裂设计检验、压后效果分析等,目的是为大规模高效开发探索经验。体积压裂通过对储层实施全方位、立体式的改造,最终形成复杂网状裂缝。

水力压裂按其施工目的可分为解堵型压裂、改造型压裂和体积压裂,主要区别如下^[7,8]。

1) 解堵型压裂

解堵型压裂主要适用于渗透率较大的储层,压出人工裂缝,从而解除钻井过程中的污染,提高近井地带的渗流能力。施工方式是较大排量、高砂比,有时也配合端部脱砂等工艺进行压裂作业。此种压裂方式能够提高单井产量,由于裂缝尺寸小,对井网部署、注水开发、采收率等开发指标影响较小。

2) 改造型压裂

改造型压裂主要适用于低渗、特低渗储层。施工中采取大液量、高砂比的方式注入高黏度压裂液,最终在储层中形成几十米甚至上百米具有一定导流能力的填砂裂缝,可以增加储层泄油面积,提高单井产量。20世纪50年代以来,国际各大油气公司都将水力压裂作为提高油气井产能的主要手段之一。例如,北美的生产井中,大约有70%的气井和50%的油井都使用过水力压裂^[9]。随着其在油气田开发中的广泛应用,水力压裂技术得到迅速发展,由此促进了它在低渗透油气田开发中的成功运用,从而使以前不能有效开发的各种地质形态储层成为油气生产的有生力量,如低渗透油气储层、墨西哥海湾弱胶结的近海岸沉积、可以萃取甲烷的软煤层以及天然裂缝储层和几何结构复杂的透镜状地层等^[10]。

3) 体积压裂

体积压裂技术通过采用大排量、低黏度的施工方式以及转向材料与技术,在储层中开启并沟通天然裂缝,有效“打碎”储集体形成复杂裂缝网络,实现对储层长、宽、高方向的三维改造。目的是裂缝壁面最大化的接触储层基质,

使油气从储层基质的任意方向均能够以较短距离向裂缝渗流,大幅度提高储层整体渗透率,最大限度地增加储层动用率。自 1997 年至今,致密油气、页岩油气的迅速发展得益于体积压裂的成功运用。

水力压裂是一项较通用的技术,既适用于提高油气井产量,也适用于开采地热能量^[11]。它还有许多其他用途,如危险固体废料的处理^[12]、实地应力的测量^[13]、采矿中断层的激活^[14]、土壤和地下含水层的修复^[15]等。另外,在地表岩层,如接缝^[16,17]和岩浆驱替的堤坝^[18,19]中,也可发现主岩由受压流体诱导产生的水力裂缝;浮力驱动下原油的初次运移有可能在岩石中创造裂缝并通过其传播,此现象与水力压裂相似^[20]。

1.1.2 常规水力压裂模型及软件简介

常规水力压裂技术已较为成熟,目前主要研究成果有单一裂缝形成机理、裂缝延伸机理、压裂液滤失、压裂液在裂缝中的流动以及支撑剂在裂缝中的铺置规律等。Hubbert 等^[21]于 1957 年完成了水力压裂领域中首个系统模型的研究,得出水力压裂裂缝始终沿着垂直于最小水平主应力方向延伸的结论。目前比较有影响的模型有 Perkins 等^[22]运用 Green 等^[23]提出的弹性平面拉伸裂缝方法建立的 PK 模型;Nordgren^[24]对 PK 模型进行改进,并考虑液体滤失的影响,建立的 PKN 二维模型;Khristianovic 等^[25]与 Geertsma 等^[26]建立的 KGD 二维模型。

基于上述基本思想,国内外学者对常规水力压裂进行了广泛、深入细致的研究,主要体现在裂缝尖端、裂缝形状的拟三维和全三维、压裂液在裂缝中沿缝长方向的一维流动和裂缝面内的二维流动、压裂液体系、支撑剂在压裂液中的运移等方面,现已形成了较为成熟的理论技术体系,并研发了相应的数值模拟软件。

截至 2017 年底,国际上应用较为广泛的常规水力压裂数值模拟软件有 FracproPT、E-StimPlan 和 Gohfer,它们均集成了水力压裂中较成熟的研究成果。其中,FracproPT 软件基于拟三维裂缝模拟理论,可进行压裂设计、模拟、分析和优化等功能,实时数据管理和分析能力较强;E-StimPlan 软件是由压后压力分析专家 Nolte-Smith 开发的全三维压裂设计与分析软件,可进行压裂设计、压裂分析与诊断、压裂油藏模拟和经济优化评价、压前地层评估、压裂过程及压后压力实时数据采集与分析、压力历史拟合和压裂效果评价等工作;Gohfer 软件由 STIM-LAB 公司开发,采用三维网格结构算法进行动态计算和模拟三维裂缝的扩展,计算过程中考虑了地层各向异性、裂缝内二维多相流流动、支撑剂输送与铺置。

1.1.3 储层改造体积概述

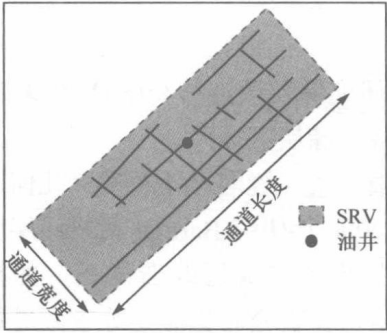
通过体积压裂实现储层的三维立体改造是在研究储层改造体积(SRV)的基础上发展起来的,储层改造体积表征了压裂改造涉及的储层区域^[27]。

Fisher 等^[28,29]研究了 Barnett 页岩开发中压裂液总量、缝网尺寸及裂缝几何形态与气井产能间的相关关系。Mayerhofer 等^[30]于 2006 年研究 Barnett 页岩储层压裂改造中微地震监测资料和裂缝扩展时,首次提出了“储层改造体积”的概念,并对不同 SRV 与累积产气量的关系、簇间距以及裂缝导流能力等参数进行了研究,最后提出通过增加水平井段长度、增大压裂液总量、增加压裂段数、使用转向剂、多口井同步压裂、老井重复压裂等方法增大储层改造体积、提高油井采出程度的技术方案。根据大量研究结果可知,储层改造体积越大,增产效果越明显,储层改造体积与增产效果具有显著的正相关关系。

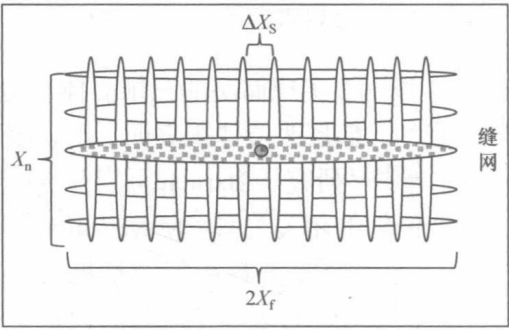
Mayerhofer 等^[31]于 2010 年首次正式提出“什么是储层改造体积”的问题,结合以往关于微地震监测结果的认识对储层改造体积进行了计算,并提出增大缝网体积、缩小簇间距、合适的裂缝导流能力是致密页岩储层获得较高产能的关键。Cipolla 等^[32]在评估页岩储层压裂效果时,分别对使用滑溜水和冻胶压裂时的储层改造体积进行了计算,经对比发现滑溜水具有很强的造缝能力,这为页岩储层体积改造优选压裂液提供了一定的依据,同时进一步验证了页岩储层压裂可以实现“体积改造”。Zimmer^[33]考虑到微地震事件位置的不确定性,对 Barnett 页岩储层改造体积进行了计算。Yu 等^[34]基于微地震监测结果,考虑各向异性孔隙弹性介质的各向扩散,建立了计算储层改造体积的三维解析模型。Astakhov 等^[35]利用测斜仪,根据监测到的地面微变形,提出了一种新的储层改造体积表征方法。

王文东等^[36]以长庆油田三叠系致密储层为例,对致密油藏直井体积压裂储层改造体积的影响因素进行了分析。Nassir 等^[37]通过耦合流体-地质力学模型对储层改造体积计算模型进行了修正。Hull 等^[38]将储层改造体积分为水力压裂改造体积、有效改造体积、生产改造体积。刘卫东等^[39]以昌吉油田二叠统芦草沟组致密油层为例,建立了水平井分段压裂仿真模型,并分析研究了天然裂缝发育、裂缝参数设计、裂缝几何形态等因素对储层改造体积以及油井产能的影响。

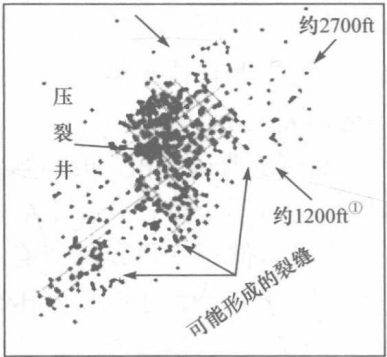
储层改造体积的表征方法很多,图 1-1 列出了几种常见的表征方法,表 1-1 为相应的计算公式。



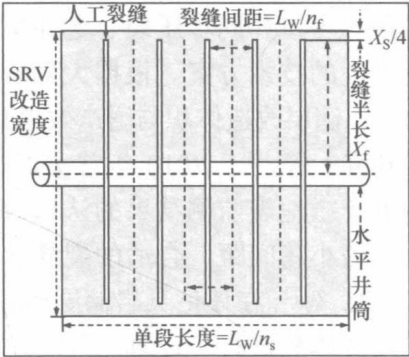
(a) Fisher方法



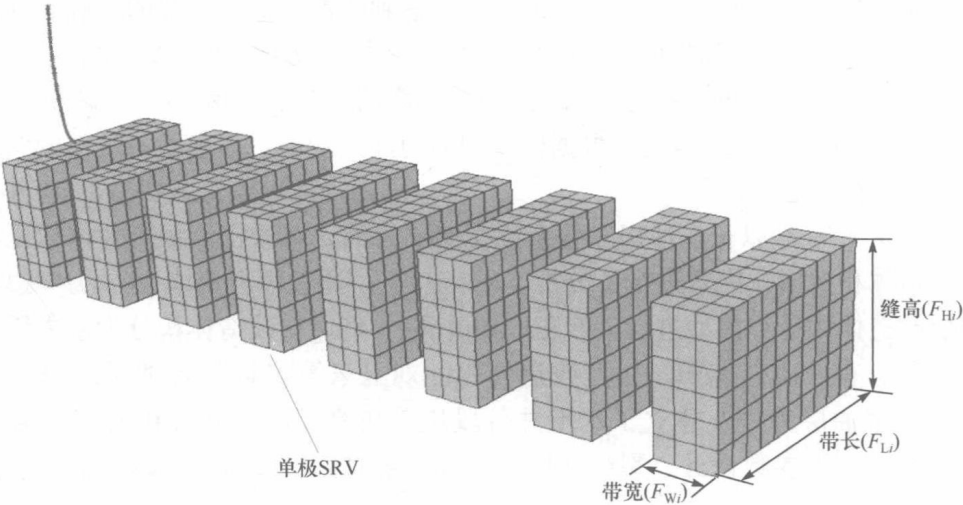
(b) Warpinski方法



(c) Mayerhofer方法



(d) Song方法



(e) 李宪文方法

图 1-1 储层改造体积计算表征图

ΔX_s 为簇间距; X_n 为缝网宽度; X_f 为单翼缝长; n_f 为人工裂数; n_s 为簇数; X_s 为裂缝间距; L_w 为水平井长度

① 1ft = 0.3048m。