

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助



复杂油气藏开发丛书

页岩气藏缝网压裂 数值模拟

赵金洲 等 编著



科学出版社

复杂油气藏开发丛书

页岩气藏缝网压裂数值模拟

赵金洲 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对目前页岩气水力压裂研究中页岩储层压裂裂缝起裂与延伸、缝网形成机制、页岩储层复杂裂缝模拟、裂缝系统微地震反演解释、渗流与产能等关键问题展开建模与解析,建立页岩储层压裂设计与优化的理论模型,并进行计算分析。

本书适合高等院校、科研院所(研究院)从事油气田开发相关专业的教师和研究生,油田企业技术和管理人员以及其他从事页岩气相关技术工作的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气藏缝网压裂数值模拟 / 赵金洲等著. —北京: 科学出版社, 2016.3

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042915-5

I. ①页… II. ①赵… III. ①油页岩-裂缝性油气藏-压裂-数值模拟-研究 IV. ①TE371

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 310005 号

责任编辑: 杨 岭 罗 莉 / 责任校对: 王翔

责任印制: 余少力 / 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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 243千字

定价: 99.00元

丛书编写委员会

主 编：赵金洲

编 委：罗平亚 周守为 杜志敏

张烈辉 郭建春 孟英峰

陈 平 施太和 郭 肖

丛 书 序

石油和天然气是社会经济发展的重要基础和主要动力，油气供应安全事关我国实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴中国梦的全局。但我国油气资源约束日益加剧，供需矛盾日益突出，对外依存度越来越高，原油对外依存度已达到 60.6%，天然气对外依存度已达 32.7%，油气安全形势越来越严峻，已对国家经济社会发展形成了严重制约。

为此，《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》对油气工业科技进步和持续发展提出了重大需求和战略目标，将“复杂油气地质资源勘探开发利用”列为位于 11 个重点领域之首的能源领域的优先主题，部署了我国科技发展重中之重的 16 个重大专项之一《大型油气田及煤层气开发》。

国家《能源发展“十一五”规划》指出要优先发展复杂地质条件油气资源勘探开发、海洋油气资源勘探开发和煤层气开发等技术，重点储备天然气水合物钻井和安全开采技术。国家《能源发展“十二五”规划》指出要突破关键勘探开发技术，着力突破煤层气、页岩气等非常规油气资源开发技术瓶颈，达到或超过世界先进水平。

这些重大需求和战略目标都属于复杂油气藏勘探与开发的范畴，是国内外油气田勘探开发工程界未能很好解决的重大技术难题，也是世界油气科学技术研究的前沿。

油气藏地质与开发工程国家重点实验室是我国油气工业上游领域的第一个国家重点实验室，也是我国最先一批国家重点实验室之一。实验室一直致力于建立复杂油气藏勘探开发理论及技术体系，以引领油气勘探开发学科发展、促进油气勘探开发科技进步、支撑油气工业持续发展为主要目标，以我国特别是西部复杂常规油气藏、海洋深水以及页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气资源为对象，以“发现油气藏、认识油气藏、开发油气藏、保护油气藏、改造油气藏”为主线，油气并举、海陆结合、气为特色，瞄准勘探开发科学前沿，开展应用基础研究，向基础研究和技术创新两头延伸，解决油气勘探开发领域关键科学和技术问题，为提高我国油气勘探开发技术的核心竞争力和推动油气工业持续发展作出了重大贡献。

近十年来，实验室紧紧围绕上述重大需求和战略目标，掌握学科发展方向，熟知阻碍油气勘探开发的重大技术难题，凝炼出其中基础科学问题，开展基础和应用基础研究，取得理论创新成果，在此基础上与三大国家石油公司密切合作承担国家重大科研和重大工程任务，产生新方法，研发新材料、新产品，建立新工艺，形成新的核心关键技术，以解决重大工程技术难题为抓手，促进油气勘探开发科学进步和技术发展。在基本覆盖石油与天然气勘探开发学科前沿研究领域的主要内容以及油气工业长远发展急需解决的主要问题的含油气盆地动力学及油气成藏理论、油气储层地质学、复杂油气藏地球物理

勘探理论与方法、复杂油气藏开发理论与方法、复杂油气藏钻完井基础理论与关键技术、复杂油气藏增产改造及提高采收率基础理论与关键技术以及深海天然气水合物开发理论与关键技术等方面形成了鲜明特色和优势，持续产生了一批有重大影响的研究成果和重大关键技术并实现工业化应用，取得了显著经济和社会效益。

我们组织编写的复杂油气藏开发丛书包括《页岩气藏缝网压裂数值模拟》《复杂油气藏储层改造基础理论与技术》《页岩气渗流机理及数值模拟》《复杂油气藏随钻测井与地质导向》《复杂油气藏相态理论与应用》《特殊油气藏井筒完整性与安全》《复杂油气藏渗流理论与应用》《复杂油气藏钻井理论与应用》《复杂油气藏固井液技术研究与应用》《复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践》《复杂油藏化学驱提高采收率》等 11 本专著，综合反映了油气藏地质及开发工程国家重点实验室在油气开发方面的部分研究成果。希望这套丛书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考资料，为提高我国复杂油气藏开发水平发挥应有的作用。

丛书涉及研究方向多、内容广，尽管作者们精心策划和编写、力求完美，但由于水平所限，难免有遗漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

国家《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》将稳步提高国内石油产量和大力发展天然气列为主要任务，迫切需要稳定东部老油田产量、实现西部增储上产、加快海洋石油开发、大力支持低品位资源开发、加快常规天然气勘探开发、重点突破页岩气和煤层气开发、加大天然气水合物勘探开发技术攻关力度并推进试采工程。国家《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》将非常规油气和深层、深海油气开发技术创新列为重点任务，提出要深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料，完善煤层气勘探开发技术体系，实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发；突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术，开展先导钻探和试采试验；掌握深—超深层油气勘探开发关键技术，勘探开发埋深突破 8000 m 领域，形成 6000~7000 m 有效开发成熟技术体系，勘探开发技术水平总体达到国际领先；全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力，实现 3000 m、4000 m 超深水油气田的自主开发。近日颁布的《国家创新驱动发展战略纲要》将开发深海深地等复杂条件下的油气矿产资源勘探开采技术、开展页岩气等非常规油气勘探开发综合技术示范列为重点战略任务，提出继续加快实施已部署的国家油气科技重大专项。

这些都是油气藏地质及开发工程国家重点实验室的使命和责任，实验室已经和正在加快研究攻关，今后我们将陆续把相关重要研究成果整理成书，奉献给广大读者。



2016 年 1 月

前 言

全球经济的迅速发展使世界对能源的需求更加强烈，油气供求关系越发紧张，以页岩气为代表的各类非常规油气资源的开发利用逐渐形成工业化和规模化。北美第一口工业意义上的页岩气井(1936年，密歇根(Michigan)盆地安特里姆(Antrim)页岩)钻成距今已近80年，但当时基础材料和技术装备的局限导致产量低、开采成本高，无法实现商业开采。进入20世纪70年代，两次全球性石油危机重创美国经济，传统天然气行业布局 and 开发利用难以使产量进一步高速提升，促使美国政府对水平钻井技术、大型水力压裂和微地震监测等页岩气开发关键技术进行大力资助，并颁布相关法规和财税优惠及补贴政策，极大促进了商业资本和相关技术人员在页岩气开发利用领域的聚集。以巴尼特(Barnett)页岩气开发为代表的非常规油气资源的成功开发在最近的二十年里从根本上改变和重塑了美国天然气供需关系和世界能源格局。2011年，整个美国仅页岩气产量就已经达到1700亿 m^3 ，远远超过了我国1011亿 m^3 的天然气总产量。

近年来，我国在四川、重庆、江西、贵州等地区相继发现大规模的页岩气资源。页岩气等非常规油气资源的综合开发利用已经展开，并逐步上升为国家能源战略。中国石油天然气集团公司(简称中石油)已建立四川长宁、威远，云南昭通页岩气开采示范区，并与荷兰皇家壳牌集团合作开发富顺—永川页岩区块，预计到2017年，年产气量可达50亿 m^3 ，到2020年可达120亿 m^3 。布局稍晚于中石油的中国石油化工集团公司(简称中石化)页岩气开采计划则显得更庞大。2014年3月，中石化宣布中国首个大型页岩气田——涪陵页岩气田提前进入规模化、商业化发展阶段，有望在2017年建成年产百亿立方米的页岩气田，相当于建成一个1000万吨级的大型油田。

页岩气成藏理论、赋集状态、开发模式、评价方法都与常规气田的开发有着本质的差别，因此在理论、方法、技术、材料、设备等方面的革新是保证此类非常规资源经济、高效开发的基础。水力压裂改造技术是页岩气高效开发的关键技术之一。在含有天然裂缝且脆性较强的页岩储层进行压裂必然会沟通或扩展天然缝而形成分支缝，并通过不断延伸和与更多的远井天然缝进一步相交，在储层中产生大规模的、不规则的复杂裂缝网络，导致目前页岩压裂施工中存在压力高、压力波动大、受排量影响的滤失难以预计及早期砂堵等突发事件。本书运用数学、力学基本原理，从理论上建立缝网形成机制、复杂裂缝网络系统的裂缝起裂模式与延伸、页岩储层复杂裂缝模拟、裂缝系统微地震反演解释、渗流与产能等模型，并对模型进行解析和分析，建立页岩储层压裂设计与优化的理论。该理论从流固耦合基本物理现象出发，建立压裂裂缝模拟有限元方法，探索复杂缝网模拟的新算法；基于模拟退火的非线性反演算法，根据声波时差数据实现快速、高

效的微地震震源坐标反演,在此基础上分析由压裂裂缝而诱导剪切滑移产生弹性波的力学条件,建立剪切破坏稳定性函数,探讨压裂诱导应力与诱发微地震事件的力学关系,通过剪切力学条件分析的方法校正和提高反演精度。优化设计理论是准确获取复杂网络裂缝系统信息和设计优化的基础,能拓展对页岩气压裂物理现象的认识,尽量减少和避免压裂施工突发事件,为研究人员和工程人员提供正确决策和实现对施工的科学指导。

鉴于页岩气储层的特殊性和复杂性,不能完全照搬国外的页岩气压裂技术和经验作为我国页岩气开发的技术蓝本,而应根据我国页岩储层实际情况,在压裂设计与优化基础理论指导下,有针对性开展研究工作,形成我国页岩气的压裂开发技术体系。本书建立较为系统的页岩储层缝网压裂的数值模拟基础理论模型,破解页岩气藏缝网压裂模拟和评价基础理论中的某些难点问题,为解决页岩压裂的工程问题提供理论依据。在论述过程中,本书尽可能做到基础理论和实际应用相结合,提供更多的算例分析并与实际加以对比,以便加深在页岩气压裂基础理论方面的认识,提高压裂技术水平。

本书是作者在长期教学,科学研究和指导硕士、博士研究生过程中对页岩压裂领域基础理论的系统总结与概括,适用于高等院校、科研院所(研究院)从事油气田开发相关专业的教师和研究生,油田企业技术人员,以及其他从事页岩气相关技术工作的技术人员。希望本书的出版面世对广大读者有所裨益。

本书各章节编写分工:前言和绪论由赵金洲编写,第1,2,5章由赵金洲、任岚编写,第3,4章由赵金洲、李勇明、王松编写。

作者

2015年6月15日

目 录

绪论	1
第 1 章 页岩储层水力裂缝的起裂理论	10
1.1 天然裂缝对水力裂缝起裂的影响	10
1.1.1 天然裂缝性岩体的强度特征	11
1.1.2 天然裂缝性岩体的剪切破裂分析	12
1.1.3 天然裂缝性岩体的张开破裂分析	13
1.2 页岩储层垂直井的起裂理论	13
1.2.1 射孔孔眼壁面主应力计算	14
1.2.2 天然裂缝与孔眼壁面主应力相对关系	17
1.2.3 页岩储层不同破裂模式下破裂压力计算	20
1.2.4 页岩储层垂直井水力裂缝起裂特征分析	22
1.3 页岩地层水平井的起裂理论	25
1.3.1 水平井筒局部坐标系的应力转换	25
1.3.2 水平井孔眼壁面主应力分布	26
1.3.3 水平井天然裂缝与孔眼壁面主应力相对关系	29
1.3.4 水平井页岩储层破裂模式及破裂压力计算	31
1.3.5 页岩储层水平井水力裂缝起裂特征分析	33
1.4 页岩储层径向缝网形成分析	34
主要参考文献	37
第 2 章 页岩储层水力裂缝的延伸理论	39
2.1 页岩储层的缝网扩展形态	39
2.2 页岩储层水力裂缝与天然裂缝的相交作用	41
2.2.1 相交作用实验分析	41
2.2.2 天然裂缝的剪切破裂及增产机理	42
2.2.3 水力裂缝穿过天然裂缝直接延伸分析	45
2.2.4 水力裂缝沿天然裂缝转向延伸分析	47
2.3 缝网裂缝延伸过程中的相互干扰作用	48
2.3.1 裂缝间相互干扰作用原理	48
2.3.2 水力裂缝诱导应力	50
2.3.3 裂缝的面力计算	50

2.3.4	裂缝扩展方向	54
2.3.5	裂缝相互作用计算分析	55
2.4	页岩储层缝网延伸模型及模拟方法	58
2.4.1	线网模型	58
2.4.2	非常规模型	61
2.4.3	离散裂缝网络模型	65
	主要参考文献	68
第3章	页岩气藏压裂裂缝模拟方法及应用	71
3.1	基于 ALE 描述的不可压黏性流体控制方程	71
3.1.1	雷诺输送方程	71
3.1.2	参考域内的质量守恒方程	73
3.1.3	参考域内的动量守恒方程	74
3.1.4	结构动力学方程	77
3.2	流固耦合 ALE 有限元算法	79
3.2.1	流域边缘处理	79
3.2.2	流域内部处理	82
3.2.3	网格剖分	86
3.2.4	网格更新	90
3.3	应用分析	93
3.3.1	水平井分段多簇射孔参数优化	93
3.3.2	页岩气藏压裂复杂裂缝模拟	101
3.4	本章小结	105
	主要参考文献	105
第4章	水力压裂微地震反演研究	107
4.1	基于模拟退火方法的微地震反演	107
4.1.1	微地震震源反演方法	108
4.1.2	模拟退火算法原理	109
4.1.3	模拟退火计算步骤	110
4.1.4	基于热浴退火的微地震震源反演	112
4.1.5	反演结果讨论	119
4.2	基于震源力学的微地震反演结果校正	119
4.2.1	水力压裂诱导微地震力学机理	119
4.2.2	微地震震源解释校正分析	126
4.2.3	校正分析的进一步讨论	129
4.3	本章小结	130
	主要参考文献	130

第5章 缝网展布下的页岩气渗流特征及产能评价	132
5.1 页岩气运移和产出特征	132
5.1.1 页岩气的吸附解吸机理	132
5.1.2 页岩气的扩散机理	133
5.1.3 页岩气的渗流及产出	134
5.2 页岩气藏压裂水平井渗流数学模型建立	135
5.2.1 求解模型的选择	135
5.2.2 假设条件	136
5.2.3 渗流方程	136
5.2.4 定解条件	137
5.3 数学模型的数值求解方法	138
5.3.1 裂缝渗流差分方程	138
5.3.2 基质系统渗流差分方程	139
5.3.3 网格的划分	140
5.3.4 井的处理	141
5.4 计算结果分析与讨论	141
5.4.1 气藏及裂缝基本参数	141
5.4.2 页岩气藏井产气量变化规律	142
5.4.3 裂缝参数对井产量的影响分析	143
5.4.4 地层参数对井产量的影响分析	146
主要参考文献	149

绪 论

页岩气水力压裂技术是目前提高低孔、超低渗页岩气井产量的关键开发技术之一，超低渗的储层物性决定了每口井要达到经济产量必须采用压裂改造。通过采用新型压裂工具材料、改进工艺措施、优化施工参数来实现沟通天然缝，促使缝间干扰以及形成非对称、非平面裂缝形态等手段，尽可能地在储层中形成大型的、复杂的、不规则的裂缝网络，提高裂缝网络与低渗储层的接触面积，缩短并减小游离气和吸附气向裂缝流动的距离和压降，从而实现页岩气井的合理开发。

以巴尼特页岩气开发为代表的非常规油气资源的成功开发在近二十年里从根本上改变和重塑了美国天然气组成结构，如图 0-1 所示。在 2011 年，整个美国仅页岩气产量就已经达到 1700 亿 m^3 ，远远超过了我国 1011 亿 m^3 的天然气总产量。

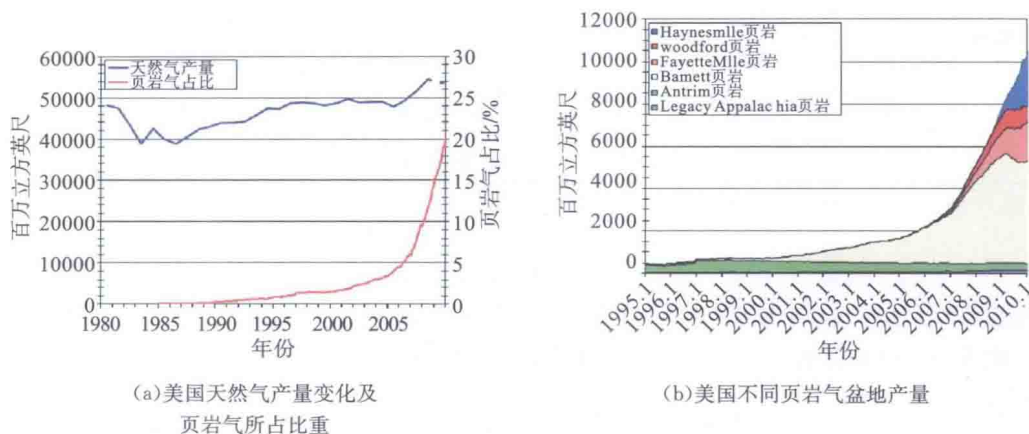


图 0-1

(注：1 立方英尺=0.0283168 m^3)

美国页岩气开发最显著的特点就是以水力压裂的技术革新和广泛应用为标志。在得克萨斯州(简称得州)北部的巴尼特页岩气的规模开发是压裂技术发展最典型的案例。

从表 0-1 中可以看出，页岩气发展初期也是采用常规压裂工艺和材料，仅是在泵注程序、施工参数上进行一定优化，其效果并不理想，1979~1995 年，页岩气产量低、井数增长缓慢。随着滑溜水大型压裂和微地震解释技术的广泛应用，大规模复杂裂缝形成，工作人员能根据实施监测调整施工参数，压裂效果显著提升。总的页岩气井数量开始爆炸性增长，页岩气开发迎来快速发展和技术成熟期。

表 0-1 美国巴尼特页岩开发历史

开发阶段	年份	总井数	压裂开发状态
发展期	1979	5	在得州 Wise 县发现页岩气流
	1981	6	采用 N ₂ 、CO ₂ 作为压裂液
	1984	17	10 万~20 万加仑液体
	1985	49	使用的液体量增长到 150 万加仑并伴注液氮
发展期	1988	62	前期效果欠佳, 开发重点转移至 Denton 县
	1991	96	开展第一口页岩水平井压裂施工
	1995	200	开始减少冻胶压裂液使用
	1997	300	开始采用滑溜水压裂, 初期液量大致为 50 万加仑
	1999	450	开始在压裂中采用测斜仪
	2001	750	微地震监测开始应用
	2002	1700	开始在核心区域外布井
	2003	2600	当年水平井 85 口, 定向井 117 口, 垂井 719 口
成熟期	2004	3500	完钻 150 口水平井, 采用 2~4 段压裂
	2005	4500	完钻 600 口水平井, 钻井显著周期缩短
	2006	5500	完井工具的快速发展, 压裂段数增加
	2007	7000	设备、材料进一步优化, 施工效率提升
	2008	9000	控制环境影响, 液体重复使用, 重复压裂

注: 1 加仑=3.7854118 L

基于从巴尼特页岩开发中汲取的经验和成果, 针对伍德福德(Woodford)页岩开采中出现的各类问题, 水力压裂技术工业化应用方面也取得了新的发展。

从表 0-2 中可以看出, 页岩气压裂现场施工中的难点及国外学者提出的各种应对方案如下。

(1) 由于页岩气非均质性较强, 当施工初期人工缝未与天然缝相交时, 低孔超低渗的储层介质滤失能力低, 直接导致施工压力上升并限制注入排量, 此时可通过酸化预处理, 解除近井污染, 降低破裂和近井起裂压力。

(2) 当与天然缝相交后, 由于天然缝数量规模和沟通程度难以预计, 极有可能造成压裂液滤失量突然增加。在压裂前期可采用泵注一定量小粒径支撑剂对天然缝进行封堵, 保证初始人工主缝宽度。

(3) 压裂中后期非均质影响更为明显, 施工压力波动剧烈会造成安全隐患。通过 100 目小粒径支撑剂封堵天然缝, 控制滤失量; 再控制泵注排量, 避免在低滤失的基质中压力陡增。

表 0-2 伍德福德页岩压裂技术发展

年份	实施规模/%	技术问题	解决措施
2003	40	注入压力高, 注入排量低	采用浓度 15% 的盐酸作为前置液
2004	45	注入压力高, 砂堵	采用浓度 15% 的盐酸作为前置液, 段塞
2005	60	受排量影响的滤失控制	发泡水泥固井, 段塞, 缓速提排量
2006	65	压裂段数优化	采用浓度 15% 的盐酸作为前置液, 段塞
2007	85		
2008	70	注入压力波动, 早期砂堵	采用浓度 15% 的盐酸作为前置液, 段塞, 缓速提排量, 支撑剂优化
2009	90	压裂段数优化	6% HCl+1.5% HF 作为前置液, 段塞, 缓速提排量, 采用 100 目支撑剂
2010	95	突发偶然事件处理	6% HCl+1.5% HF 作为前置液, 段塞, 缓速提排量, 采用 100 目支撑剂, 少量线性胶

从美国页岩气开发经验来看, 不同的页岩含气盆地都具有其独特的压裂开发方式以适应该储层的特殊性质, 表 0-3 总结了目前主要盆地的压裂工艺参数。

表 0-3 美国页岩气压裂施工参数总结

压裂参数	巴尼特	海恩斯维尔	马塞勒斯	伍德福德	巴肯	伊格尔福德
垂深/ft	7000~8000	10000~13500	6500~7500	7000~13000	7450~11010	6000~13000
水平段长度/ft	3000~5000	4000~7600	4000~5500	3000~5000	4000~10000	3500~4500
压裂段数	4~6	10~18	6~19	6~12	5~37	7~17
单段液量/桶	17100	10600	10000	17000	1800	12500
排量/(桶·min ⁻¹)	70~80	70	80	70~90	15~20	35~100
施工压力/Psi	3000~5000	10500~14000	6500~8700	5000~13000	2000~8000	9000~12500
砂浓度/(lbm·gal ⁻¹)	0.57	2.5	2.5	1.0	2.0~2.5	1.0~1.5
液体类型	滑溜水、线性胶	滑溜水、冻胶	滑溜水、线性胶、冻胶	滑溜水、线性胶	混合液体、冻胶	滑溜水、线性胶、冻胶
支撑剂类型	100 目、40/70 目、30/50 目石英砂	100 目陶粒、40/70 中强度支撑剂和树脂覆膜砂、30/50 目中强度支撑剂	100 目、40/70 目、30/50 目石英砂	100 目陶粒、40/70 石英砂和树脂覆膜砂	100 目、40/70 目石英砂、20/40 陶粒	100 目、40/70 目、30/50 目石英砂

注: 1 ft=0.3048 m

可以看出, 页岩气储层客观条件的差异形成了各具特色的压裂改造方法。因此, 不能完全照搬国外的页岩气开发经验作为我国页岩气开发的技术参考, 而应根据我国实际情况的特殊性开展工作, 形成具有针对性的压裂开发技术体系。

美国页岩气产量的迅速增长, 极大地降低了能源对外依存度, 相关的石化产业已经从“页岩气革命”中获得实质利益, 因此也进一步促进了技术的创新和推广。最为显著的就是水平井压裂理论、方法、工具、液体的迅速发展以及微地震监测技术的广泛应用, 形成了一套独有的、不同于常规砂岩和碳酸盐岩储层的评价、设计、优化的理论体系和

技术模式。本书针对目前页岩气水力压裂研究中面临的几个关键问题,展开理论探索,实现对基本现象、原理的深入认识和对工程问题的定量分析和解释。针对页岩气藏压裂复杂裂缝模拟和微地震解释所涉及的相关问题,本书拟在页岩压裂复杂缝网形成机理、复杂裂缝模拟、新型数值求解方法和微地震反演解释等方面开展研究,加深对页岩气压裂机理的认识,建立对天然裂缝影响下的复杂裂缝模拟,反演微地震震源坐标以及根据震源力学方法校正微震事件分布范围。

0.1 页岩气藏缝网压裂模拟研究进展

0.1.1 天然缝起裂与延伸

对于常规水力压裂裂缝模拟,一般是假设均质地层中不考虑天然缝存在,井眼两侧形成垂直于最小主应力方向的对称双翼平面缝。但由于构造作用和储层非均质性等因素,天然裂缝将以不同的几何尺寸、方位、密度等参数组合存在于压裂改造目的层中。从直接的矿井压裂测试到间接的微地震监测,都表明在天然裂缝发育的储层,特别是页岩气储层中,人工裂缝将产生大量分支缝,形成不对称的复杂裂缝网络。针对具有较低孔隙度、极低渗透率的页岩气储层,通过压裂施工尽可能多地沟通天然裂缝,使基质中解析、扩散的气体通过裂缝网络的沟通,提高渗流能力,最终在整个改造目的层位形成沟通页岩气藏和井底的大型复杂缝网系统,增大页岩储层改造体积。

在开展常规水力压裂模拟研究的同时,许多学者针对天然缝对人工主缝的扩张影响开展分析。实验测试表明,天然缝与人工主缝之间的夹角和水平应力差是影响主缝延伸方向的关键因素,且实际的压裂缝远比理论形态复杂。Renshaw 和 Pollard 基于线弹性力学理论建立判定准则,用以预测与天然缝垂直相交后的人工主缝能否继续延伸,并通过实验加以验证。Warpinski 提出新的裂缝延伸模式,采用线摩擦理论考虑作用在裂缝面的剪应力引起的剪切滑移破坏,并以摩尔库伦准则考虑作用在裂缝面的正应力引起的张性破坏。Beugelsdijk 等通过实验分析地应力差、排量、黏度等参数对天然裂缝性储层人工主缝延伸的影响,结果表明,当存在较大水平主应力差,或者液体黏度较高并且排量较大时,人工主缝的发育受天然缝的影响较小;而在较小应力差条件下,天然缝更易于和人工主缝相交。大量的物理实验和数学模拟表明,与天然缝相交后形成的裂缝网络复杂程度不仅与地应力相关,而且受到岩石力学参数、天然缝参数、压裂施工参数以及工作液物性所影响。

0.1.2 复杂裂缝模拟

体积压裂是近年来随着对页岩气、致密砂岩气高效、经济开发而形成的新兴水力压裂技术。目前国内只有少量的文献对页岩气体积压裂复杂裂缝模拟开展过尝试,但离形成商业软件仍有较大差距;而国外也是在 2009 年以后才逐步形成针对体积压裂复杂裂缝网络的数值模拟的两种思路:以线网模型(wire-mesh model)为代表的半解析模型,该模

型将压裂改造空间用规则的椭球型表征,并用平行于水平主应力方向且相互正交的垂直缝代表形成的裂缝网络;非常规裂缝模型(unconventional fracture model)着重考虑储层非均质性与缝网尺寸及其复杂性之间的联系,以不同的地质条件参数模拟得到更符合实际的非对称、不规则裂缝网络,计算结果也便于结合微地震测试数据进行拟合校正,但该方法也需借助 3D 地震解释、成像测井、声波测井等支撑技术获取可靠的输入地质参数。

线网模型模拟结果虽然有利于进一步开展压后复杂缝网进行产能模拟,网格划分和求解更为简便,但是规则的分支缝间距和对称的缝网结构与微震测试结果差异较大,并且没有考虑天然缝的影响也是该模型明显的不足。非常规裂缝模型以天然缝相互沟通、开启和扩展为研究重点,并结合常规拟三维裂缝模型,考虑分支缝间附加应力场影响,再耦合求解压降方程、缝宽方程、高度方程,所以该模型计算的分支缝参数更准确,裂缝网络形态与微震数据吻合程度更高。

虽然非常规裂缝模型优点明显,但是随着天然裂缝数量的增多,缝网复杂性加大,若对每一条分支裂缝都采取常规拟三维模型求解方法,计算难度将成倍增加,不利于推广及现场应用;并且缝网几何形态及复杂程度还受到天然裂缝分布、尺寸、倾角、岩石断裂韧性等新引入参数的影响,因此有必要探索复杂网络裂缝模拟的新思路和新方法。

0.1.3 压裂裂缝有限元研究

从水力压裂裂缝模拟的整个发展历程来看,最初的二维模型(包括卡特模型、PKN 模型、CGD 模型)把缝高设为定值,并考虑在缝内一维的层流条件下的多控制方程联立求解得到裂缝几何尺寸;在此基础上发展出了以 Palmer 模型为代表的、考虑缝高延伸的拟三维裂缝模型;而计算更为复杂的全三维模型则是在拟三维模型上,更为全面地考虑缝内流体二维流动。以上三类模型都是对固(岩石)液(压裂液)间的相互作用分别研究,建立相应的物理方程描述裂缝形成中的相关物理量,然后通过非常繁冗的迭代计算获得裂缝几何尺寸及缝内压力分布。

随着流固耦合理论、数值计算方法以及计算机性能的飞跃发展,越来越丰富的手段为我们进行裂缝模拟提供了条件。特别是针对页岩气压裂后所形成的复杂裂缝网络,准确地描述裂缝边界尺寸和计算缝内流场参数,并且实现能多线程快速计算分支缝同步延伸,是新型模拟方法所需要达到的基本目标。

1. 常规有限元裂缝模拟方法

早在 1982 年,Advani 等在研究美国东部泥盆纪页岩井压裂时就提出采用有限元方法分析多层和地应力影响下的垂直水力裂缝形态,在忽略缝高变化的条件下耦合求解缝宽方程和缝内一维流动方程,并采用 Newton-Raphson 方法在每一时步下求解非线性的缝宽和缝内压力。Heuze 等采用描述固体变形的有限元方法和隐式的液流方程相耦合,分析了当压裂缝与透镜体砂体相遇时的压力、尺寸变化。实验进一步证明,在非均质地层中的压裂缝并不会是平面形状,为描述缝面的不规则性,Rungamornrat 等提出对缝内非牛顿流体采用有限元格式离散,而对非平面的裂缝则采用边界元方法描述,同样采用

Newton-Raphson 方法求解缝内压力和裂缝面位移(缝宽), 整个模拟思路为复杂裂缝形态研究提供了很好的借鉴。由于有限元方法能有效处理不规则的裂缝形状, 并且离散和求解格式较为固定, 有利于算法推广和应用。但流固耦合求解计算量大, 网格数量多且处理困难, 常规有限元格式难以满足页岩气储层复杂的、多分支裂缝的模拟需求。因此新发展的有限元格式(XFEM 和 ALE)核心思想就是对裂缝进行网格优化处理, 要么回避对裂缝所在网格的剖分, 要么采用参考域跟踪裂缝动态边界变化, 最终目的都是为了实现简化算法, 提高编程效率。

2. 扩展有限元方法

扩展有限元方法(extended finite element method, XFEM)是对常规有限元方法的改进, 裂缝延伸过程中使其能够穿过网格并且独立于网格结构而变化, 采用解析和渐进的裂缝求解方式, 改进了单元计算形式(主要是通过增加裂缝所在单元节点的自由度而实现), 从而省略了在每个时步对裂缝网格的复杂剖分过程。2007年, Lecampion 等首次采用扩展有限元方法模拟水力裂缝在延伸中的线弹性变形下的几何尺寸。Taleghani 等考虑液体在缝内的黏性流动下和固体边界的耦合作用, 并采用能量释放率确定裂缝延伸条件。由于天然缝是脆性页岩地层较为普遍存在的薄弱面, 因此 Keshavarzi 等进一步将扩展有限元方法用于分析人工缝与天然缝相交后的物理状态(包括方向、压力变化)。

XFEM 在处理裂缝(天然缝或人工缝)时不用重新划分网格, 因此在油藏模拟方面也有成功应用。针对含有断层、沉积界面、天然缝和诱导缝的地层, Huang 等提出在有限元模拟的基础上引入改进方法, 包括对离散弱形式的修正和建立裂缝描述函数, 从而回避根据裂缝几何尺寸而构建网格的复杂过程, 实现对水力裂缝耦合模拟, 该方法在分析水力缝在附加应力场作用下延伸方向的变化时具有较好的适用性。Lamb 等将介质双重渗透特征(基质和裂缝)与延伸有限元方法结合, 实现多孔介质中流固耦合变形的模拟, 该方法能够计算含天然裂缝单元的不连续位物理场, 并且不需要对天然缝进行离散或设定与网格对齐。

XFEM 的最大局限就是通过对裂缝的重新描述来简化网格划分, 但是为实现数值模拟的可行性和经济性而在分析流体域时假定缝内为一维流动, 在很大程度上简化或省略了对流体区域动态网格的划分, 并且对 Navier-Stokes 方程中的对流项, 只需要在缝长(一维)方向上进行处理, 极大地简化了计算。由此所带来的问题就是在缝高流动方向上认为无压降, 而实际较厚的页岩储层中采用大排量压裂将形成较大的缝高或可能穿层。所以在以流固耦合界面位移为求解变量的扩展有限元应用中, 决定裂缝几何尺寸的关键流体场不应该被简化, 而是应改变思路, 以流体场模拟获得缝内压力、速度分布为目标, 在此基础上再耦合固体变形方程实现动态求解。

3. 任意拉格朗日-欧拉有限元方法

基于任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)的有限元方法能有效处理动态网格变化和进行对流项处理, 所以在近海工程、船舶工程、水利工程、冲塑