

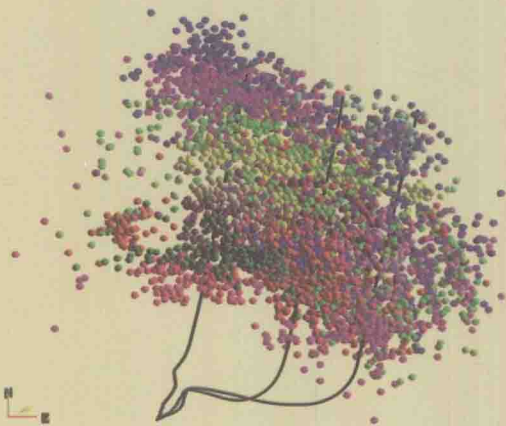
油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助



复杂油气藏开发丛书

页岩气渗流机理及 数值模拟

郭肖 编著



科学出版社

复杂油气藏开发丛书

页岩气渗流机理及数值模拟

郭 肖 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

实现页岩气高效开发,需要解决4项科学问题,即页岩气储层多尺度定量描述与表征、纳米级孔隙及微裂隙流体渗流规律、页岩气水平井井壁稳定机理、页岩气储层体积改造理论。本书主要聚焦于页岩气渗流机理及数值模拟研究。具体内容主要包括:页岩气藏特征、页岩气吸附模型和实验、页岩气赋存-运移机理、页岩气藏井底压力动态分析、页岩气体积压裂、页岩气藏渗流数学模型以及数值模拟研究。

本书可供油气田开发研究人员、油藏工程师以及油气田开发管理人员参考,同时也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气渗流机理及数值模拟 / 郭肖编著. —北京:科学出版社, 2016.3

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042924-7

I. ①页… II. ①郭… III. ①油页岩-渗流-数值模拟-研究

IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 309823 号

责任编辑:杨岭 罗莉 / 责任校对:陈敬

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

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:14

字数:332千字

定价:119.00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

及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

页岩气作为一种典型的非常规能源，在全球范围内分布广泛，开发潜力巨大。据测算，全球页岩气资源量约为 $456 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国富有机质页岩分布广泛，全国海相页岩气资源 $37.4 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中南方海相 $32 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其值略小于美国。与北美相比，南方海相页岩储层具有构造改造强、地应力复杂、埋藏较深、地表条件特殊等复杂特征。

页岩气以游离气和吸附气赋存于微米—纳米级孔隙及裂缝中，开采过程中存在吸附、滑脱、扩散等物理化学现象，同时由于压力场、温度场以及地应力场耦合作用，从而引起一系列非线性渗流复杂问题。常规测试手段不能正确揭示内在规律，传统意义上经典的渗流理论不再适应页岩气藏，建立在传统渗流理论基础上的数值模拟技术难以预测开发动态。

实现页岩气高效开发，需要解决 4 项科学问题，即页岩气储层多尺度定量描述与表征、纳米级孔隙及微裂隙流体渗流规律、页岩气水平井井壁稳定机理、页岩气储层体积改造理论。本书主要聚焦于页岩气渗流机理及数值模拟研究。具体内容主要包括：页岩气藏特征、页岩气吸附模型和实验、页岩气赋存-运移机理、页岩气藏井底压力动态分析、页岩气体积压裂、页岩气藏渗流数学模型以及数值模拟研究。本书理论与实际相结合，图文并茂，内容翔实。

本书撰写过程中得到国家重点基础研究发展计划（973 计划）“中国南方海相页岩气高效开发的基础研究”（2013CB228000）资助，本人研究生王伟峰、谢川、黄婷、任影、苏明、王彭、杜鹏斌、邹高峰等帮助整理部分稿件并参与校核工作，油气藏地质及开发工程国家重点实验室对本书提出了有益建议，在此一并表示感谢。

本书能为油气田开发研究人员、油藏工程师以及油气田开发管理人员提供参考，同时也可作为大专院校相关专业师生的参考书。限于编者的水平，本书难免存在不足和疏漏之处，恳请同行专家和读者批评指正。

编者

2015 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 页岩气藏开发科学问题	1
第二节 国内外研究进展	3
一、页岩气开发利用现状	3
二、页岩气储层物性参数测试方法研究进展	4
三、页岩气分子吸附、解吸与扩散动力学研究进展	5
四、页岩气藏多级压裂水平井试井分析与产能评价研究进展	5
五、页岩气渗流理论与数值模拟研究进展	6
第三节 章节内容安排	7
参考文献	8
第二章 页岩气藏基本特征	11
第一节 页岩气藏的成因	11
第二节 页岩气藏基本特征	12
一、页岩的岩石矿物特征	12
二、页岩的有机质特征	13
三、页岩的物性特征	14
四、页岩储层的储集空间特征	14
五、页岩气的赋存特征	15
六、页岩的沉积分布特征	15
第三节 页岩气的形成、储集与保存	16
一、页岩气的形成条件	16
二、页岩气的储集条件	19
三、页岩气的保存条件	20
第四节 页岩气储层评价标准	20
参考文献	21
第三章 页岩气吸附模型与实验研究	23
第一节 页岩气吸附模型	23
一、单组分吸附模型	23
二、多组分吸附模型	26
第二节 页岩气吸附模型对比	30

第三节 页岩气吸附影响因素分析	33
一、页岩有机碳含量的影响	35
二、热成熟度的影响	36
三、温度的影响	37
四、页岩矿物成分的影响	39
五、页岩孔隙结构的影响	40
六、页岩含水率的影响	42
七、压力的影响	43
第四节 页岩气解吸实验研究	44
一、解吸实验	44
二、模型拟合	45
参考文献	47
第四章 页岩气的赋存-运移机理	49
第一节 页岩气藏气体赋存方式	49
一、页岩气赋存机理	49
二、赋存方式的影响因素	52
第二节 页岩气的运移产出机理	53
一、页岩气藏微观运移特征	54
二、页岩气储层的多尺度流动	55
三、页岩气的 Darcy 渗流	58
四、页岩气的解吸机理	59
五、页岩气的扩散机理	60
六、页岩气非线性渗流机理	62
参考文献	69
第五章 页岩气井井底压力动态分析	72
第一节 双重介质模型	72
一、模型假设条件	73
二、数学模型的建立	74
三、数学模型的求解	76
四、井底压力动态影响因素分析	82
第二节 三重介质模型	85
一、假设条件	86
二、模型的建立与求解	86
三、井底压力动态影响因素分析	92
第三节 页岩气藏三线性渗流数学模型	95
一、模型假设条件	95
二、模型的建立与求解	96

三、敏感性参数分析	98
参考文献	101
第六章 页岩气藏数值模拟	102
第一节 页岩气藏气-水两相渗流数学模型	102
一、模型假设条件	102
二、裂缝系统气-水两相渗流数学模型	103
三、基质系统中气体的运移方程	105
四、模型的定解条件	106
第二节 页岩气藏气-水两相渗流数值模型	108
一、有限差分法介绍	108
二、建立数值模型	109
三、数值模型求解	114
四、参数处理	116
五、页岩气藏三维气-水两相渗流模拟程序	117
第三节 页岩气藏水平井开采机理	122
一、数值模拟器的选择	122
二、模型建立	123
三、页岩气井开采动态模拟	127
四、页岩气井开采影响因素分析	130
参考文献	141
第七章 页岩气藏体积压裂	143
第一节 页岩气藏体积压裂概念	143
一、体积压裂的概念与内涵	143
二、体积压裂适用地层条件	144
第二节 页岩气井压裂技术	145
一、水平井分段压裂	145
二、水力喷射压裂	145
三、重复压裂	146
四、同步压裂	146
五、缝网压裂	147
六、清水压裂	147
七、泡沫压裂	148
第三节 页岩气藏体积压裂缝网模型	148
一、离散化缝网模型	149
二、线网模型	150
第四节 页岩气藏压裂水平井产能模型	151
一、页岩气藏压裂水平井产能模型	151

二、分段体积压裂射孔簇数与加砂规模优化	156
三、改造体积计算方法	158
第五节 微地震监测技术	159
一、微地震监测的概念	159
二、微地震检测的机理	159
三、微地震裂缝监测技术	161
四、地面微地震监测实例	163
第六节 页岩气藏体积压裂应用实例	165
一、页岩气藏体积压裂模拟软件介绍	165
二、页岩气藏体积压裂模拟应用实例	168
参考文献	183
第八章 页岩气藏开发设计实例	186
第一节 区域基本特征	186
一、地层特征	186
二、页岩储层特征	186
三、地化特征	187
四、储层含气特征	187
五、温度压力特征	187
六、页岩脆性矿物特征和黏土矿物特征	187
七、岩石力学特征	188
第二节 气藏模型基本参数	188
一、基质裂缝扩散系数	188
二、流体高压物性参数	189
三、页岩储层的应力敏感参数	190
四、气水两相相对渗透率	190
五、页岩吸附特征	191
第三节 地质模型建立	192
一、地质模型建立	192
二、地质储量计算	195
第四节 压裂模拟	196
一、压裂模拟软件 Meyer	196
二、压裂液及支撑剂	197
三、注入方式与施工参数	197
四、泵序及压裂施工	198
五、压裂模拟与评价	198
第五节 微地震监测设计	199
第六节 开发方案的设计	201
一、开发层系划分	201

二、丛式井适应性分析	201
三、裂缝参数优化设计	202
四、开发方案设计	203
五、采收率确定	206
参考文献	207
索引	208

第一章 绪 论

第一节 页岩气藏开发科学问题

页岩气作为一种典型的非常规能源，在全球范围内分布广泛，开发潜力巨大。据测算，全球页岩气资源量约为 $456 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国富有机质页岩分布广泛，全国海相页岩气资源 $37.4 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中南方海相 $32 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其值略小于美国。与北美相比，南方海相页岩储层具有构造改造强、地应力复杂、埋藏较深、地表条件特殊等复杂特征。

页岩气以游离气和吸附气赋存于微米—纳米级孔隙及裂缝中，开采过程中存在吸附、滑脱、扩散等物理化学现象，同时由于压力场、温度场以及地应力场耦合作用，从而引起一系列非线性渗流复杂问题。常规测试手段不能正确揭示内在规律，传统意义上经典的渗流理论不再适应页岩气藏，建立在传统渗流理论基础上的数值模拟技术难以预测开发动态。

实现页岩气高效开发，一般需要解决四项科学问题，即页岩气储层多尺度定量描述与表征、纳米级孔隙及微裂隙流体渗流规律、页岩气水平井井壁稳定机理、页岩气储层体积改造理论。为解决这些科学问题，需要开展六个方面的基础研究和攻关，即页岩气储集空间定量描述与表征方法、页岩气藏非线性多场耦合渗流理论研究、页岩气储层水平井钻完井关键基础研究、页岩气储层增产改造基础理论研究、页岩气气藏工程理论与方法研究，以及南方古生界典型区块开发先导试验及关键技术应用研究(图 1-1)。

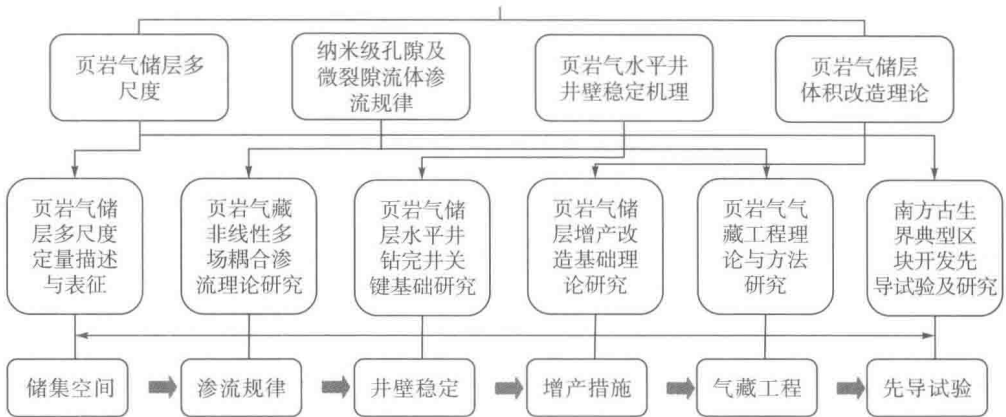


图 1-1 页岩气研究涉及科学问题和关键技术

(一) 页岩气储集空间定量描述与表征方法

通过页岩多重孔隙介质观测、宏观页岩岩相分析、岩石物理及岩石力学实验等研究

工作,解决多尺度多属性页岩储层表征参数体系与方法难题,揭示页岩储层孔隙、裂缝分布特征及控制因素、不同页岩岩相与物性参数间的关系、不同页岩的可改造程度及遇水膨胀性,建立页岩储层多尺度多属性表征方法、储层优选的物性参数体系、工程应用的判别标准及页岩储层地质建模方法,形成一套适合我国的页岩储层表征方法。

(二)页岩气藏非线性多场耦合渗流理论研究

针对影响页岩气藏开采的多尺度流体流动机理、多场耦合作用机理和分段压裂水平井非线性渗流理论等关键问题进行深入的研究,揭示页岩气纳米及微米裂隙介质尺度流动规律,搞清页岩裂隙介质气、水非线性渗流特征,阐明页岩介质在渗流场、应力场、温度场共同耦合作用机理,建立页岩气多尺度流动多场耦合非线性渗流理论,构建页岩储层多级压裂水平井非线性渗流理论,形成多场耦合非线性渗流数值模拟方法。

(三)页岩气储层水平井钻完井关键基础研究

通过对页岩力学参数和地应力、页岩理化性能及井壁围岩受力状态的分析,结合室内实验及机理模拟,综合研究多种因素耦合作用下的页岩井壁稳定性影响规律,揭示页岩井壁失稳机理,同时深入开展页岩水平井地质导向、钻井液、固完井相关基础理论研究,形成能够确保钻成优质页岩水平井眼的基础理论及关键技术。

(四)页岩气储层增产改造基础理论研究

针对我国南方页岩储层特征,开展页岩室内模拟和数模研究以及现场测试研究,揭示页岩气储层压裂裂缝起裂与扩展机理,认识形成压裂缝网的储层条件及其工程可控因素,通过室内岩心实验分析,阐明压裂流体与页岩储层作用机理,研发新型环保低损害、低成本压裂液体系;建立包括井层评估、改造体积优化和提高改造体积(stimulated reservoir volume, SRV)的页岩气藏体积改造设计方法;形成包括微地震裂缝诊断与解释、测斜仪测试及压裂压力分析的压后评估基础理论。

(五)页岩气气藏工程理论与方法研究

面向国内纳米级别渗透性的页岩气藏,立足于非常规井型的非规则井网立体式开发特点,通过试井基础理论、单井数值模拟方法、产能预测方法以及储层动用表征研究,建立适合我国页岩气高效开发的气藏工程基础理论与方法,力争在页岩气气藏工程理论上有所突破,在页岩气储层动用评价指标与方法上有创新,实现页岩气藏高效开采。

(六)南方古生界典型区块开发先导试验及关键技术应用研究

结合南方海相页岩气示范区页岩储层特征,采用自主研发与借鉴国外页岩气开发经验相结合,重点针对页岩气储层评价技术、页岩气储层有利区域优选现场试验、页岩气藏压裂技术、配套工艺技术及工具、压裂液体系等关键科学问题开展技术攻关及现场试验,加大关键工艺技术自主研发力度,最终形成具有自主知识产权的页岩气增产改造关键技术系列及配套工艺技术系列,突破提高单井产量的技术瓶颈,为页岩气规模有效开发提供技术支撑。

第二节 国内外研究进展

一、页岩气开发利用现状

随着美国页岩气开发革命的成功,全球非常规油气开发获得战略性突破,页岩气的勘探开发同时也成为世界关注的焦点,新的世界能源格局开始出现。据美国能源信息署(EIA)在2013年6月发布的全球页岩油气资源评价结果显示,页岩气资源在全球分布广泛,主要分布在北美、拉美、中亚、中国、非洲南部和中东等国家和地区。美国和加拿大已经实现了页岩气的商业性开发,中国、欧洲、拉美和中亚等其他国家正在加紧相关的研究工作。全球页岩气的技术可采资源量排名前十位的资源国页岩气资源量合计达 $163 \times 10^{12} \text{m}^3$,约占全球页岩气资源总量的79%,如表1-1所示。

表 1-1 2013 年全球页岩气技术可采资源量排名前十位国家(EIA 发布, 2013 年)

排名	国家	页岩气技术可采资源量/ $(\times 10^{12} \text{m}^3)$
1	中国	31.57
2	阿根廷	22.71
3	阿尔及利亚	20.02
4	美国	18.83
5	加拿大	16.23
6	墨西哥	15.43
7	澳大利亚	12.37
8	南非	11.04
9	俄罗斯	8.07
10	巴西	6.94

美国是率先对页岩气进行大规模商业性开采的国家,早在1821年美国第一口工业性页岩气井钻采成功,标志着美国开始进入页岩气开发的初始阶段。目前,美国的页岩气主要产自于五个盆地的页岩层,分别是沃斯堡(Fort Worth)盆地的巴尼特(Barnett)页岩、伊利诺伊(Illionois)盆地的新奥尔巴尼(New Albany)页岩、密歇根(Michigan)盆地的安特里姆(Antrim)页岩、圣古胺(San Juan)盆地的刘易斯(Lewis)页岩、阿巴拉契亚(Appalachian)盆地的俄亥俄(Ohio)页岩,其中沃斯堡盆地的巴尼特页岩是美国进行页岩气开采的主力层位。21世纪以来,随着美国在页岩气勘探开发理念认识上的突破,以及多段压裂、水平井等开发技术的创新与进步,美国的页岩气产量占天然气总产量的比重从2000年的2.1%上升至2011年的28%,预计在未来十年,页岩气所占比重将会达到50%左右。

作为北美地区的第二大天然气产出国,加拿大同时也是世界上第二个成功对页岩气进行商业性开发的国家。蒙特尼(Montney)页岩已于2001年开始进行商业性生产,最近

几年受美国页岩气大规模开采的启发,加拿大部分科研工作者对其西部的部分盆地进行了深入研究。目前,蒙特尼页岩和位于不列颠哥伦比亚的霍恩河(Horn River)盆地内的马斯夸(Muskwa)页岩已成为加拿大的页岩气开采热点地区,其中蒙特尼页岩得到了大规模开发,而霍恩河盆地内的马斯夸页岩还处于开发早期阶段,仅这两个页岩层在2009年的产量就达到了 $72.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据预测,到2020年,加拿大的页岩气年产量将达到 $620 \times 10^8 \text{ m}^3$,占加拿大天然气总产量的一半左右。

欧洲页岩气资源分布广泛,但不均匀,主要分布在法国、乌克兰、波兰和保加利亚,四国的技术可采资源总量约为 $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。2009年年初,德国国家地学实验室启动了“欧洲页岩项目”,对欧洲的页岩气资源储量进行评估。2010年,欧洲又新增启动了多个页岩气勘探开发项目。德国、波兰和乌克兰等国家均已开展不同程度的页岩气开发研究和试验性开采,多个跨国公司开始在欧洲展开页岩气勘探开发工作。2010年,埃克森美孚公司在匈牙利部署了第一口页岩气探井,法国道达尔石油公司与Devon能源公司建立合作关系,获得了在法国钻探页岩气的许可,波兰天然气公司于2014年对页岩气资源实现了工业性开采。

我国页岩气资源量虽然十分丰富,但由于我国对页岩气藏的勘探开发起步较晚,还处于初级阶段,页岩气勘探和开采的许多关键技术还不够成熟。近年来,我国加大了对页岩气的勘探开发力度,我国页岩气主要分布在四川、陕西、重庆等地,中石油、中石化等企业相继在长宁、威远、涪陵和昭通等地取得重大突破。目前,位于四川盆地的海相地层页岩气勘查工作已有了重大进展,四川盆地、柴达木盆地和鄂尔多斯盆地等陆相地层的页岩气勘查同样也取得了重要发现。2014年,中国页岩气的总产量为 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计到2015年有望达到或超过 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 年产气量的规划目标。通过近几年在页岩气开发生产过程中取得的经验和认识,我国在页岩气开采技术方面取得了一系列重大的突破。2014年,我国自主研发用于地下水平井分段的“分割器”——桥塞商用成功,这使我国成为世界上第三个能使用自主研发技术装备对页岩气进行商业开采的国家,中国已经进入了页岩气开发技术研究的热点阶段。

二、页岩气储层物性参数测试方法研究进展

目前室内页岩气岩心实验测试大多基于致密砂岩或煤层气的实验测试方法和流程,是否适合于页岩气还需要进一步探索^[1,2]。

美国 Intertek^[3,4] 实验室开展了页岩渗透率和孔隙度实验测试、特殊岩心分析与岩石学分析。特殊岩心分析主要包括毛管压力、相对渗透率、核磁测井标定、力学性质、流体敏感性/地层伤害、CT扫描评价;岩石学实验主要包括岩性描述、层理产状、扫描电镜、薄片鉴定、X衍射矿物学。近年来,国外学者^[5-7]开展了页岩储层孔隙结构特征及基础物性参数实验测试研究,但测试方法仍主要基于常规低渗储层物性参数测试方法。

国内吉利明^[8]等对黏土样品微孔隙进行了研究;邹才能^[9]等应用场发射扫描电子显微镜与纳米CT重构技术研究了我国非常规油气储层特征,首次发现了小于 $1 \mu\text{m}$ 的油气纳米孔,改变了微米级孔隙是油气储层唯一微观孔隙的传统认识。

美国得克萨斯州大学奥斯汀分校 Mehmani^[10]等基于扫描电子显微镜所获取的纳米级

图像构建了跨尺度(1nm~1 μ m)页岩微观孔隙模型,并研究了纳米级孔隙内的解吸迟滞现象的影响机理,同时也为微尺度下的气体流动机理研究奠定了基础。

三、页岩气分子吸附、解吸与扩散动力学研究进展

Chalmers 和 Bustin^[11] 2008 年开展了页岩气吸附实验,实验表明页岩中有机碳含量与页岩气的生气率具较好的正相关性;2010 年 Mengal^[12] 研究了页岩气吸附/脱附对生产动态的影响,研究表明如果忽略脱附的影响,动态分析结果将产生较大的偏差;2010 年, Song^[13] 建立了计算时间漂移的经验模型,研究了 Albany 页岩气脱附对生产动态的影响;2010 年 Tian^[14] 研究认为页岩气解吸是吸附的逆过程,与煤层气解吸机理类似;2010 年 Freeman 等^[15] 认为天然气以溶解态存储于干酪根内部,以表面扩散、晶体扩散等运移至干酪根表面,然后解吸、扩散、渗流到页岩气井;2011 年 Faruk^[16] 研究认为:由于页岩气藏有机物与无机物基质孔径分布范围较大,导致多种扩散机理在页岩气基质中运移同时存在,但主要以 Knudsen 扩散为主。

张金川等^[17] 认为现代概念的页岩气是主体上以吸附和游离状态同时赋存于具有生烃能力泥岩及页岩等地层中的天然气聚集,具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等地质特点;聂海宽等^[18] 开展了巴尼特页岩气藏特征研究,结果表明页岩气藏在钻井及压裂之前地层压力处于平衡状态,吸附气的孔隙压力等于岩石的毛细管压力,但钻井压裂之后平衡被打破,气体开始从页岩颗粒表面解吸进入裂缝,最终流入井筒产出地面。

刘洪林等^[19] 开展了页岩含气量测定过程中解吸温度、损失时间以及计算方法等因素对损失气量的影响研究;欧成华等^[20] 开展了页岩气吸附特征研究;王德龙等^[21] 建立了考虑吸附层体积变化的页岩气物质平衡方程,方程仍采用 Langmuir 吸附模型。

Liming Ji 等^[22] 研究了不同黏土矿物吸附甲烷的能力,发现吸附能力蒙脱石最强,高岭石次之,伊利石最弱,且甲烷吸附能力与比表面积呈良好的线性关系,朗格缪尔平衡常数的对数与温度的倒数呈良好的线性关系,计算得出黏土矿物吸附热和吸附熵比干酪根的小,干酪根对甲烷的吸附能力大于黏土矿物。

Santos 等^[23] 通过改变围压测量了不同有效应力条件下页岩岩样吸附气量及其渗透率;Ghanizadeh 等^[24] 使用氦气、氩气、甲烷和水作为流体介质,围压 5~30MPa 和温度 45 $^{\circ}$ C 条件下,研究了湿度、非均质性、各向异性、有效应力、孔隙压力对岩样渗透率的影响,实验表明氦气测定的渗透率比甲烷和氩气的高,氦气和甲烷测定的干岩样渗透率比湿岩样高 6 倍,湿度对岩样渗透率的影响大于有效应力,水平渗透率比垂向渗透率大超过 1 个数量级,并随着有效应力增大,岩样渗透率非线性降低,渗透率与有效应力呈良好的指数关系。

从以上分析中可以看出:有关页岩气吸附、解吸、扩散的研究工作主要集中在实验测试方面,有关理论模型主要借用 Langmuir 模型。目前页岩气解吸-扩散的动力学机理和作用规律认识尚不清楚。

四、页岩气藏多级压裂水平井试井分析与产能评价研究进展

Kucuk^[25] 于 1980 年首次提出了分析裂缝性储层参数的解吸模型,指出常规试井分析