

页岩气藏 压裂井流动规律研究

郭肖 黄婷/著



科学出版社

页岩气藏压裂井流动规律研究

郭 肖 黄 婷 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从页岩的孔隙结构特征及页岩气的储存机理出发,从不同尺度分别对页岩气的产出机理进行了物理描述及数学表征。针对页岩气的复杂储存及多尺度流动机理,建立压裂井稳定产能模型和非稳态渗流模型;然后建立适用于页岩气藏中连续流、滑脱流、过渡流和自由分子流等不同流态多尺度综合渗流方程,在考虑气体解吸、多重流动机制以及压裂水平井生产的基础上,建立页岩气藏多级压裂水平井气-水两相数值模型,探讨Knudsen 扩散和滑脱效应、等温吸附参数、气-水两相流动以及压裂增产措施对压裂水平井产量的影响,从而阐明页岩气藏压裂井流动规律。

本书可供油气田开发工程领域技术人员以及大专院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气藏压裂井流动规律研究 / 郭肖, 黄婷著. —北京:

科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-055477-2

I. ①页… II. ①郭… ②黄… III. ①油页岩-压裂井-研究
IV. ①TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 284474 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 王 翔
封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 罗 科

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

*

2017年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年11月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 246千字

定价: 99.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

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 $32 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，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—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用于页岩气藏，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。

页岩既是源岩又是储集层，因此页岩气具有典型的“自生自储”成藏特征。页岩储层具有孔隙度低和渗透率极低的物性特征，只有通过体积压裂形成压裂缝网才能获得有效产能。本书从页岩的孔隙结构特征及页岩气的储存机理出发，从不同尺度分别对页岩气的产出机理进行了物理描述及数学表征。针对页岩气的复杂储存及多尺度流动机理，建立了压裂井稳定产能模型和非稳态渗流模型；然后建立了适用于页岩气藏中连续流、滑脱流、过渡流和自由分子流等不同流态多尺度综合渗流方程，在考虑气体解吸、多重流动机制以及压裂水平井生产的基础上，建立了页岩气藏多级压裂水平井气-水两相数值模型，探讨了 Knudsen 扩散和滑脱效应、等温吸附参数、气-水两相流动以及压裂增产措施对压裂水平井产量的影响。

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，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，在此表示感谢。

笔者希望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，同时本书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，以便今后不断对其进行完善。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 页岩气开发利用现状	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 页岩气储存及运移机理研究现状	2
1.2.2 页岩气井稳态产能研究现状	5
1.2.3 页岩气井非稳态产能研究现状	5
1.2.4 页岩气数值模拟研究进展	8
1.3 章节内容安排	9
参考文献	10
第2章 页岩气藏储层特征及储集特征	15
2.1 页岩气藏的储层特征	15
2.1.1 矿物组成特征	16
2.1.2 地球化学特征	16
2.1.3 页岩储层物性特征	17
2.2 页岩气藏储层孔隙结构特征	18
2.2.1 纳米级孔隙	19
2.2.2 微米级孔隙	21
2.2.3 微裂缝	22
2.3 页岩气藏气体储存机理	22
2.3.1 游离态页岩气	23
2.3.2 吸附态页岩气	23
2.3.3 溶解态页岩气	23
2.4 本章小结	24
参考文献	25
第3章 页岩气多尺度运移及产出机理	27
3.1 页岩气藏中气体的流动形态	27
3.2 页岩中的气体流动	29
3.2.1 页岩气吸附-解吸	29
3.2.2 纳米级孔隙中的气体流动	32
3.2.3 微米级孔隙及裂缝中的气体流动	38
3.2.4 气体在页岩中的综合流动机理	39
3.3 人工裂缝对气体流动的影响	41

3.4	页岩气多尺度产出机理	42
3.5	本章小结	43
	参考文献	44
第4章	页岩气藏压裂井稳态产能模型	45
4.1	页岩中的多尺度非达西渗流模型	45
4.2	考虑多尺度流动的压裂井的稳态产能模型	48
4.2.1	压裂直井产能模型	49
4.2.2	压裂水平井产能模型	52
4.3	考虑多尺度流动的压裂井产能分析	53
4.4	页岩气压裂井的产能影响因素分析	55
4.4.1	压裂直井产能影响因素	56
4.4.2	压裂水平井产能影响因素	58
4.5	本章小结	61
	参考文献	61
第5章	页岩气藏压裂井单相气体非稳态渗流模型	63
5.1	点源函数方法	63
5.1.1	Laplace 空间中的点源解	63
5.1.2	不同侧向边界及顶底边界下点源的解	67
5.2	页岩气藏双重孔隙介质理论模型	70
5.2.1	物理建模	70
5.2.2	数学建模	71
5.2.3	数学模型的求解	76
5.2.4	典型曲线及流动阶段划分	81
5.2.5	影响因素分析	85
5.3	页岩气藏三重孔隙介质理论模型	96
5.3.1	模型理论基础	96
5.3.2	物理建模	97
5.3.3	数学建模	99
5.3.4	典型曲线及流动阶段划分	103
5.3.5	与双重孔隙介质模型的对比	105
5.4	本章小结	107
	参考文献	108
第6章	页岩气藏多级压裂水平井气-水两相数值模型	111
6.1	页岩中的多尺度非达西渗流模型	111
6.2	页岩气运输的数学模型	112
6.2.1	模型的基本假设	112
6.2.2	质量守恒方程	113
6.2.3	辅助方程	116

6.2.4 定解条件	116
6.3 页岩气运输的数值模型	117
6.3.1 模型的可解性分析	117
6.3.2 模型的求解方法	117
6.3.3 井的处理方法	122
6.4 页岩气运输的计算机模型	123
6.5 页岩气藏压裂水平井开采模型验证	124
6.5.1 与商业软件对比	124
6.5.2 与其他模型对比	125
6.5.3 现场数据验证	127
6.5.4 模型的稳定性研究	127
6.6 页岩气藏多级压裂水平井生产动态分析	129
6.7 页岩气压裂水平井的产量影响因素分析	131
6.7.1 Knudsen 扩散和滑脱效应对产量的影响	131
6.7.2 气体解吸对产量的影响	136
6.7.3 初始含水饱和度对产量的影响	137
6.7.4 多级压裂水平井主要因素对产量的影响	137
6.7.5 体积压裂参数对产量的影响	140
6.8 本章小结	143
参考文献	144
第 7 章 页岩气藏体积压裂与微地震监测	145
7.1 页岩气藏体积压裂概念	145
7.1.1 体积压裂的概念与内涵	145
7.1.2 体积压裂适用地层条件	146
7.2 页岩气藏体积压裂缝网模型	147
7.2.1 离散化缝网模型	147
7.2.2 线网模型	148
7.2.3 分段体积压裂射孔簇数与加砂规模优化	149
7.3 页岩气藏体积压裂模拟软件介绍	150
7.3.1 FracproPT 软件简介	150
7.3.2 Meyer 软件简介	151
7.4 微地震监测技术	153
7.4.1 微地震检测的概念	153
7.4.2 地面微地震监测实例	154
参考文献	155

第1章 绪 论

1.1 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。2014 年美国非常规天然气产量达到 $5.29\times10^{11}\text{m}^3$ ，占其天然气总产量的 70% 以上，其中页岩气产量达 $3.64\times10^{11}\text{m}^3$ ，约占美国天然气总产量的 50%^[1]。美国非常规天然气大规模开发利用，特别是近 10 年页岩气产量的迅猛增长，使美国再次成为全球第一产气大国，已经明显改变了其能源供应格局，并推动全球能源战略布局调整，影响深远。

我国非常规天然气资源比较丰富，据估算我国页岩气的经济可采储量约为 $26\times10^{12}\text{m}^3$ ，位居世界前列，经济价值巨大，世界市场前景广阔^[2]。中国页岩气生产始于 2010 年威 201 井，2012 年中国的页岩气产量即超过 $1.0\times10^8\text{m}^3$ ，2013 年涪陵页岩气田发现后，当年中国页岩气产量突破 $2.0\times10^8\text{m}^3$ 。随着威远、长宁、涪陵页岩气田的快速建产，2014 年中国页岩气产量跃升至 $12.5\times10^8\text{m}^3$ ，2015 年产量已超过 $40\times10^8\text{m}^3$ ，累计页岩气产量超过 $60\times10^8\text{m}^3$ ，基本实现了页岩气规模生产，成为全球第三大页岩气生产国^[2-5]（如表 1-1 所示）。

表 1-1 全球主要页岩气生产国家储量、产量统计表^[3]

国家	页岩气勘探开发起始年份	页岩气资源量/ 10^{12}m^3	钻井数量/口	探明储量/ 10^8m^3	年产量/ 10^8m^3
美国	1821	17.64	10 万左右	56543.95	3807
加拿大	2006	16.23	3000	—	320
中国	2005	31.57	700	5441.29	45
阿根廷	2012	22.71	300	—	$0.065\times10^8\text{m}^3/\text{d}$

中国石油化工集团公司（中国石化）立足于自主创新，形成中国南方海相页岩气富集规律新认识，研究勘探开发核心技术及关键装备，发现并成功开发了我国首个也是目前最大的页岩气田——涪陵页岩气田，使我国成为北美国家之外第一个实现规模化开发页岩气的国家，走出了中国页岩气自主创新发展之路。

中石化创新形成海相页岩气勘探理论和开发技术系列^[6]，为我国大规模勘探开发页岩气奠定了理论和技术基础。

（1）创新形成中国南方海相页岩气富集规律新认识。率先发现中国南方深水陆棚相页岩具有高碳富硅正相关耦合规律，揭示了页岩气“早期滞留，晚期改造”的动态保存机理，形成“深水陆棚相优质页岩发育是页岩气‘成烃控储’的基础，良好的保存条件是页岩气‘成藏控产’的关键”的新认识，建立了页岩气战略选区评价体系，明确了突破方向，指

导了涪陵气田的发现。

(2) 创新形成海相页岩气地球物理预测评价关键技术。突破川南地区碳酸盐岩山地页岩气地震采集、处理技术瓶颈, 获得高信噪比、高分辨率、高保真度地震成像资料; 创新形成有机碳含量、脆性指数、含气量高精度地震预测技术系列和页岩六性测井评价体系, 实现了页岩气层参数的精细预测和计算, 预测高产富集带 326km^2 , 94.4% 的井获日产超 10万 m^3 高产页岩气流。

(3) 创新形成页岩气开发设计与优化关键技术。构建了两种赋存状态、三种流动机制下的多因素耦合流动数学模型, 建立了多流态、多区域孔缝耦合流动的页岩气非稳态产能评价技术, 首次提出了山地丛式水平井交叉布井模式, 编制了我国首个 50亿 m^3 产能页岩气田开发方案, 开发井成功率 100%。

(4) 创新形成页岩气水平井高效钻井及压裂关键工程技术。揭示了海相页岩井壁失稳、裂缝起裂扩展机理, 研发低成本高稳定性油基钻井液、弹韧性水泥浆、速溶减阻水体系, 构建了水平井组优快钻完井技术和山地井工厂作业模式, 建立了“控近扩远、混合压裂、分级支撑”的缝网改造模式, 创新了水土资源保护和废弃物处理技术。支撑了涪陵气田高效、绿色开发。

(5) 创新研制页岩气开发关键装备和工具。创新千吨级 360° 快速自走式钻机、井控压力 70MPa 高压大负载带压作业、 6200m 大容量连续油管等地面作业成套装备, 首次研制页岩专用 PDC 钻头和耐油螺杆、 8kN 大功率测井牵引器、 105MPa 易钻桥塞系列井下工具, 实现规模应用, 形成页岩气装备与工具一体化解决方案, 提升了山地“井工厂”、长水平井施工能力和效率。

涪陵大型海相页岩气田示范区建成了我国第一个实现商业开发、北美以外首个取得突破的大型页岩气田。示范区高水平、高速度、高质量的开发建设, 是我国页岩气勘探开发理论创新、技术创新、管理创新的典范, 对我国页岩气勘探开发具有很强的示范引领作用, 显著提升了页岩气产业发展的信心, 展示了页岩气勘探开发的良好前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 页岩气储存及运移机理研究现状

1. 页岩气储存机理

许多学者按照气体的储存方式将页岩气分为游离气、吸附气和溶解气 3 种, 但是大部分学者认为页岩气主要由游离气和吸附气组成。张金川^[7]通过研究发现页岩孔隙和微裂缝中存在大量游离态气体, 页岩固体颗粒表面(包括有机质颗粒、黏土矿物颗粒及干酪根等)和孔隙表面存在大量吸附态气体。Montgomery 等^[8]认为页岩气中吸附气的含量一般变化范围为 $20\%\sim 80\%$, Lu 等^[9]则认为吸附气的含量通常可达 50% 以上。潘仁芳等^[10]也认为, 大多数页岩储层中气体以吸附态为主, 并且有些页岩储层中的吸附态气体可达到 80% 以上。此外, 许多学者^[8,11-17]还针对页岩吸附气量的影响因素进行了研究, 包括总有机碳含量、有机

质类型、有机质成熟度、矿物组成、孔隙结构、含水量、温度和压力等。

然而 Hill 和 Nelson^[18]在 2000 年提出,页岩气不仅存储在孔隙和天然裂缝中、吸附在孔隙表面上,并且还溶解在固体有机质中。Curtis^[19]在 2002 年也提出除了大部分气体以游离方式储存于孔隙及微裂缝中、以吸附状态储存于有机质和黏土矿物颗粒表面上之外,还有少部分气体呈溶解状态存在于干酪根、沥青和结构水中。Chalmers 和 Bustin^[20]通过实验发现,富含煤素质的煤在微孔体积较小的情况下测出的含气量较高,因此得出了甲烷溶解在煤颗粒中是造成这种现象的原因这一结论。Ross 和 Bustin^[21]通过类似的实验发现富含有机质的 Jurassic 页岩中也存在溶解气,并且压力和吸附气含量之间的线性关系表明溶解过程符合 Henry 定律。Javadpour 等^[22]也提出部分气体以溶解态存储于液烃或吸附在干酪根中的其他物质表面(如图 1-1 所示),并且从罐解气实验的结果中观测到气体从干酪根或黏土中向孔隙表面扩散的过程。

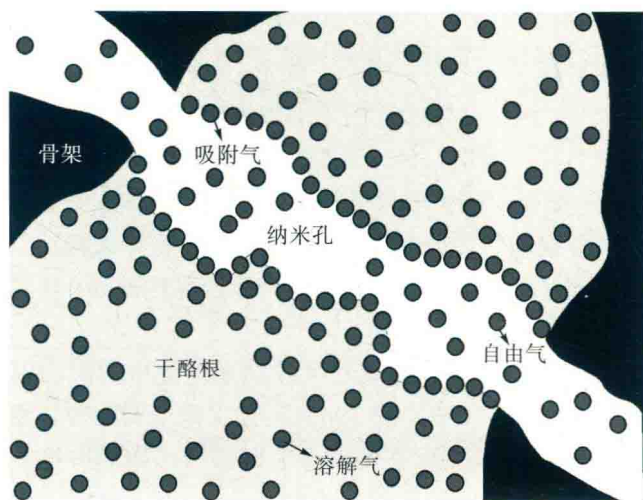


图 1-1 气体分子在页岩中的微观干酪根-骨架颗粒-孔隙系统示意图^[23]

Swami 和 Settari^[24]根据前人的研究以及实验结果,提出了气体从干酪根向纳米孔隙扩散的数学模型。Shabro 等^[25]也建立了考虑干酪根中的溶解气扩散、Langmuir 解吸和纳米孔隙中的非达西流的数值模型,结果表明干酪根表面的气体解吸和干酪根中的甲烷扩散是造成气井实际产量比预期要高的主要原因。Moghanloo 等^[26]计算了溶解在干酪根中的甲烷气体对原始地质储量和气井产量的影响,并且研究了干酪根尺寸、有效扩散系数和 TOC 等因素对页岩中溶解气扩散量的影响。

然而,以上研究只是通过实验证实了溶解气存在于页岩的干酪根中,在数学模型上也仅仅是对单根孔隙中溶解气的扩散进行了研究,并没有建立一个描述页岩气从微观尺度流向宏观大尺度(人工裂缝和井筒)的综合模型来考虑溶解气在干酪根中的扩散问题。

2. 页岩气渗流机理

通过对国内外相关文献调研发现,页岩气在储层中的运移及产出是一个复杂的多尺度

流动过程。Javadpour 等^[22]在 2007 年提出,非常规页岩气储层中纳米孔隙的数量较常规储层多,页岩气储层中孔隙直径一般分布在几纳米到几微米之间(如图 1-2 所示)。

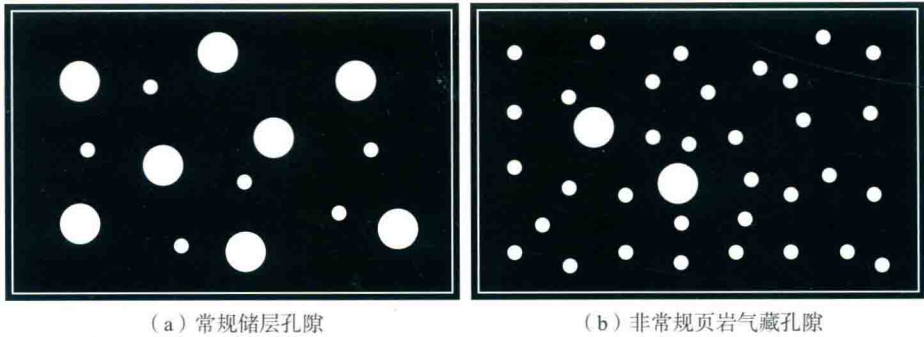


图 1-2 常规储层与页岩气藏的孔隙尺寸对比示意图^[22]

页岩中的纳米孔隙扮演了 2 个重要角色: 首先, 在孔隙体积相等的情况下, 纳米孔隙暴露的表面积大于微米孔, 因此从纳米孔的干酪根表面脱附的气量多, 则干酪根中出现大量的气体质量传递(图 1-1); 其次, 纳米孔隙中的气体流动与达西流动不同。Swami 和 Settari^[24]提出溶解气在干酪根中的扩散可以用 Fick 定律来描述, 并且给出了干酪根中溶解气扩散的物理模型和数学模型。而许多学者^[27-33]用 Fick 定律来描述气体从页岩基质系统流向裂缝系统的流动, 而忽视了在压力差作用下产生的黏性流动, 以及纳米孔隙中存在的扩散和滑脱效应。

目前, 国内外学者^[34-40]普遍认为, 页岩气在纳米孔隙中的流动包括: 黏性流、滑脱流和 Knudsen 扩散流。Klinkenberg^[41]在 1941 年首次提出利用修正系数(即 Klinkenberg 常数)来校正气测渗透率(k_a)过程中存在的气体滑脱效应, 随后有许多学者^[42-46]对关系式中的气体滑脱因子(b_k)展开了实验及理论研究, 如表 1-2 所示。以上研究校正了岩样的气测渗透率, Brown 等^[39]在 1946 年引入一个理论的无因次系数对管流中的滑脱速度进行了校正。

表 1-2 Klinkenberg 气体滑脱因子 b_k 的不同关系式^[41]

滑脱模型	公式	注释
Klinkenberg ^[41] (1941)	$b_k = 4c\lambda\bar{p}/r$	$c \approx 1$
Heid 等 ^[42] (1950)	$b_k = 11.419(k_\infty)^{-0.39}$	—
Jones 和 Owens ^[43] (1979)	$b_k = 12.639(k_\infty)^{-0.33}$	—
Sampath 和 Keighin ^[44] (1982)	$b_k = 13.851(k_\infty/\phi)^{-0.53}$	氮气测量
Florence 等 ^[45] (2007)	$b_k = \beta(k_\infty/\phi)^{-0.5}$	氮气($\beta=43.345$), 空气($\beta=44.106$)
Civan ^[46] (2010)	$b_k = 64.766(k_\infty/\phi)^{-0.5}$	氮气测量

单位: b_k (psi), k_∞ (md), p (psi), r (nm), β (psi), λ (nm), ϕ (小数)。

然而 Zhu 等^[47]提出通过实验测得低渗岩心的气测渗透率不再符合 Klinkenberg 的一阶近似方程, 推荐用更高阶近似方程(Tang 等^[48])。Javadpour^[23]在 Brown 等的模型基础上, 推导出考虑 Knudsen 扩散和滑脱效应的纳米孔隙质量通量方程, 计算结果与 Roy 等^[37]的纳米管实验结果拟合程度较高。Beskok 和 Karniadakis^[49]则提出了一个适用于整个 Knudsen 数范围(连续流、滑脱流、过渡流和自由分子流)的方程来预测不同尺寸圆管的流量, 并且通过其他理论方法(Direct-simulation of Monte Carlo, Linearized Boltzmann solution)以及实验结果验证了模型的可靠性。Ziarani 和 Aguilera^[40]基于 Beskok-Karniadakis 模型对不同孔隙尺寸多孔介质的渗透率进行了校正, 并通过 Mesaverde 致密气藏的砂岩数据对该模型进行了实例分析。

1.2.2 页岩气井稳态产能研究现状

由于页岩气的储存和运移机理过于复杂, 在页岩气压裂井稳态产能方面的研究尚少。蒋廷学等^[50]应用保角变换方法将求解带垂直裂缝的气井产量问题转化为简单的单向渗流问题, 然后通过质量守恒定律和达西运动方程对压裂直井的稳态产能方程进行了推导。汪永利等^[51]也应用保角变换原理, 再根据微元体流动分析, 结合非达西运动方程、质量守恒原理和压力耦合原理, 推导出裂缝内变质量流动时压力满足的二阶微分方程, 进而推导出不同缝长和裂缝导流能力的裂缝井产能公式, 并将计算结果与现场某气井压裂后产量进行了对比验证。

谢维扬和李晓平^[52]在 2012 年建立了页岩气藏多级压裂水平井后期稳定开采时的渗流模型, 通过运用等值渗流阻力方法, 考虑气体吸附解吸作用, 推导出水力压裂裂缝导流的页岩气藏水平井稳定渗流产能公式。王坤等^[53]针对页岩气藏中两条互相垂直裂缝井, 应用保角变换原理, 建立了考虑气体滑脱效应及有限导流压裂裂缝的页岩气藏压裂井稳态产能数学模型。袁淋等^[54]以常规压裂水平井产能研究理论为基础, 考虑了页岩气吸附解吸作用、气体在裂缝中高速非达西流动以及裂缝与井筒的耦合, 利用保角变换方法推导出页岩气藏压裂水平井的半解析产能模型。

Michel 等^[55]基于 Beskok-Karniadakis 方程推导出描述气体在致密纳米介质中的流动模型, 但是模型假定流动完全处于滑流阶段, 并不能应用到页岩气在储层中的整个流动阶段。Deng 等^[56]在 Michel 等人研究的基础上, 用考虑了不同气体流动形态(连续流、滑脱流、过渡流及自由分子流)的 Beskok-Karniadakis 方程来描述压力梯度和流量的关系, 建立了考虑扩散、滑脱效应和气体解吸的多尺度渗流模型, 并推导出考虑裂缝导流能力、裂缝穿透比和气体状态等影响因素的页岩气井稳态产能方程。

然而这些模型并没有全面地考虑页岩纳米孔隙中的扩散和滑脱效应, Deng 等虽然建立了考虑 Knudsen 扩散、滑脱效应和气体解吸的多尺度渗流模型, 但是并没有讨论 Knudsen 扩散系数随孔隙半径等参数变化的情况。

1.2.3 页岩气井非稳态产能研究现状

最早从 20 世纪 80 年代开始, 就陆续有国内外学者对页岩气的非稳态渗流模型进行研

究,其研究方法总体上可分为两大类:解析方法和数值模拟方法。解析方法不需要储层的详细信息就可以得到储层的流动特征以及获得井筒和储层的物性参数,而数值模拟方法则可以解决更为复杂的渗流问题,并且能够得到复杂情况下(比如:储层非均质性、各向异性以及气-水两相流动等)气井的生产动态。

1. 解析方法

由于页岩气藏中通常发育大量的微裂缝,因此国内外有很多研究学者^[28,57-61]基于经典的双重孔隙介质 Warren-Root 模型,并将页岩气独特的运移及采出机理耦合到模型中去,对页岩气的不稳定渗流进行了研究。

Kucuk 和 Sawyer^[58]在 Warren-Root 模型基础上,建立了考虑页岩气在基质纳微米孔隙中流动时产生的 Klinkenberg 效应以及气体吸附解吸作用的渗流模型,并指出由于吸附态页岩气的存在,传统的双孔介质渗流模型并不适合页岩气藏。Gatens 等^[62]运用 Lee 和 Gatens 1985 年提出的解吸方法,结合非稳态试井方法和生产数据对裂缝性页岩气藏进行了整体描述。Bumb 和 McKee^[63]通过岩心实测数据表明,页岩气的解吸过程遵循 Langmuir 等温吸附曲线,并首次提出“修正综合压缩系数”的方法来考虑吸附气体的解吸作用。Carlson 和 Mercer^[27]在常规的双孔介质模型基础上,建立了考虑 Langmuir 等温吸附理论来描述页岩气的解吸、Fick 定律来描述气体在基质中流动的渗流模型。

Ozkan^[57]在 Javadpour 等的渗流机理研究基础上,提出了描述页岩基质系统中的 Darcy 流和扩散流双重机理的双孔模型,同时考虑了裂缝系统的应力敏感的数学模型,但该模型没有考虑孔隙壁面的气体吸附解吸。Guo^[28]和 Zhao 等^[64]基于点源函数理论、Laplace 变换法对无限导流裂缝下的页岩气藏压裂水平井的不稳定压力进行研究,并给出了封闭页岩气藏多段压裂水平井的半解析解,但模型中并没有考虑纳米级孔隙中的扩散和滑脱效应。

国内在这方面的研究开展比较晚,段永刚和李建秋^[30-31]在考虑页岩气的吸附解吸作用的基础上,应用 Fick 拟稳态扩散定律来模拟基质系统向天然裂缝系统的流动,建立了基质和裂缝中单相气体非稳态流动的数学模型,最后推导出考虑无限导流人工裂缝的页岩气藏压裂井产能评价模型。任飞等^[65]借鉴适用于非常规煤层气的双孔模型,在考虑页岩气滑脱效应的条件下,建立了页岩气在双孔介质中渗流的数学模型。尹虎^[66]在前人研究的基础上,根据 Langmuir 等温吸附和 Fick 扩散,结合渗流理论建立了页岩气井单一介质、双孔介质、汽水两相渗流数学模型。

此外,有学者^[67-68]考虑裂缝性储层的非均质性,在常规的基质系统和裂缝系统基础上还考虑了微裂缝系统,建立了宏观裂缝-微裂缝-基质的三重孔隙介质模型。Tivayanonda 等^[69]建立了压裂裂缝-天然裂缝-基质的三重孔隙介质模型,但模型最后又简化为双重孔隙介质模型。Alharthy 等^[38]建立了大孔-中孔-微孔的三重孔隙介质模型,但模型在大孔道(50nm~1m)中也考虑解吸、Knudsen 扩散和滑脱效应是不合适的。Zhao 等^[70]在 2013 年也提出了裂缝-基质-吸附气的三重孔隙介质模型,考虑了吸附气的解吸以及人工压裂裂缝对气体流动的影响。

通过调研发现,双重孔隙介质模型并未全面考虑气体的吸附解吸、纳米级孔隙中的 Knudsen 扩散和滑脱效应;三重孔隙介质模型则大多主要针对储层的非均质性,极少考虑

纳米级孔隙中的 Knudsen 扩散和滑脱效应。

2. 数值模拟方法

由于压裂水平井本身对应的渗流问题就比较复杂,若再考虑页岩气藏中以多种方式赋存的页岩气、多尺度流动以及多相流动等问题的话,难以得到模型的解析解。因此,国内外也有许多学者采用数值模拟的方法对页岩气藏压裂水平井的生产特征展开研究。

Bustin 等^[71]为了得到裂缝间距和基质中的扩散及流动对页岩气生产的影响,开发了考虑不同裂缝模型的基质和裂缝中气体流动的二维的数值模拟模型。Freeman 等^[72-73]针对致密/页岩气藏构建了一个考虑一系列与以下相关的开采特征的数值模拟器,特别是:超低基质渗透率,压裂水平井,多重孔隙、渗透率场和解吸,并且识别及说明各流动阶段随时间的变化。Moridis 等^[74]用数值模拟方法分析了两种裂缝性致密气藏的流动机理和流动过程:页岩和致密砂岩储层。该数值模型把达西定律作为多相流的基础公式,精确地描述了储层流体的热物理性质,但是也包括其他已知的物理现象:非达西流、基质和裂缝中的应力敏感(孔隙度、渗透率、相对渗透率和毛管力)、气体滑脱效应(Klinkenberg)和非等温效应。Clarkson 等^[75]基于多机制流动的假设,在页岩气中加入了动态滑脱系数的概念。通过最近的研究发现页岩气藏中存在复杂的孔隙结构,首次结合动态滑脱系数给出了一个考虑非有机质孔和有机质孔的数值模型。Sun 等^[76]展示了一个综合的多重机制(解吸、扩散、滑流以及由压力差作用产生的流动)、多重孔隙(有机质、无机质和裂缝)和多重渗透率模型,该模型是用实验测得的页岩有机质和无机质的性质来预测页岩气藏生产动态。

上述学者主要对页岩气藏中的储存及流动机理进行研究,而下列学者则主要针对压裂裂缝及裂缝网络模型展开了研究。Cipolla 等^[77]应用油藏数值模拟技术,分析了不同裂缝网络模型下的导流能力分布、裂缝网络的复杂性和基质渗透率对气井产能和采收率的影响,并且分析了气体解吸对产量和气藏最终采收率的影响。Luo 等^[78]提出多级压裂水平井展现了一个独特的流动形态,在相邻裂缝产生干扰之后,储层到整个压裂裂缝存在线性流,这就是所谓的复合储层线性流(CFL)。Rubin^[79]通过一个网格细化过的单井模型(600 万~1400 万个网格)来分别模拟在显式的 SRV 复杂裂缝网络、二维的、有无压裂主缝、考虑应力敏感以及后期水平井在压裂情况下的达西和非达西流动。

国内学者于荣泽等^[32]在文献调研的基础上描述了页岩气在储层中的流动主要经历 3 个过程:解吸附、Fick 扩散和渗流,并分析了其影响因素和适用条件。程远方等^[33]基于页岩气储层特征和成藏机理,提出了页岩气藏三孔双渗介质模型,研究了页岩气解吸作用以及 Fick 扩散渗流规律,并利用数值模拟软件对页岩气产能进行了预测。姚军等^[80]基于常规的双孔介质模型,采用烟道气模型(DGM)建立了页岩气在基质和裂缝系统中的运动方程,基岩系统和裂缝系统中分别考虑黏性流、Knudsen 扩散、分子扩散以及气体在基岩孔隙表面的吸附解吸(仅基质中考虑),在此基础上求解出单相气体流动的垂直井的产气量。张平平^[81]基于有限元方法基本原理考虑了页岩气吸附解吸特性,并进行了页岩气藏三维压裂数值模拟研究。2013 年,李道伦等^[82]采用多段压裂水平井 PEBI 网格划分方法来模拟水平井及裂缝周围的流动特征,并将页岩气藏储层简化为均匀介质,建立了耦合井储的页岩气藏压裂水平井数学模型。此外,张小涛等^[83]、陆程等^[84]则利用 Eclipse

油藏数值模拟软件,建立了考虑页岩气吸附解吸作用的页岩气藏压裂水平井的单井数值模型。

综上所述,前人在考虑气体解吸、滑脱作用、扩散、渗流,以及压裂水平井模型的实现方面做了大量的工作,但是较少有模型同时考虑页岩纳米级孔隙中的 Knudsen 扩散和滑脱效应、气体的吸附-解吸作用、汽水两相以及压裂水平井的流动特征。

1.2.4 页岩气数值模拟研究进展

页岩气渗流数学模型按赋存-运移特征大致分为三类:经验模型、平衡吸附模型、非平衡吸附模型。

1. 经验模型

Lidine 模型、Aireg 模型及 McFall 模型等均为经验模型,其模型主要是对可观察的物理现象进行简要的数学描述,在模型应用时输入的参数较少,但此模型理论基础不足,精度较低。

2. 平衡吸附模型

Kissell 模型、Mckee 模型及 Bumb 模型等为平衡吸附模型,其中最典型的为 Bumb 模型,此模型假设储层介质为单孔隙介质,吸附气在页岩气藏数值模拟中不能被忽略,采用兰氏等温吸附方程对吸附页岩气进行描述,并假设气体扩散是瞬间完成的,即吸附气与游离气压力时刻保持平衡。但模型由于忽略了吸附页岩气的解吸过程,所以不能反映客观存在的解吸时间,其预测的产量高于实际产量。

3. 非平衡吸附模型

页岩气的吸附解吸、扩散和渗流为一个相互影响相互制约的整体过程,扩散模型认为扩散不可忽略。非平衡模型又可分为基于 Fick 第一扩散定律的拟稳态模型(包括 Psu-1 模型、Psu-2 模型、Psu-3 模型及 Comet 模型等)以及基于 Fick 第二扩散定律的非稳态模型(包括 Smith 模型、Sugarwat 模型、Chen 模型等)。

按多孔介质特征,页岩气数值模拟模型包括双重介质模型、多重介质模型和等效介质模型^[85]。其中双重介质模型采用得最多,模型假设页岩由基岩和裂缝 2 种孔隙介质构成。气体在页岩中以游离态和吸附态两种形式存在,裂缝中仅存在游离态气,基岩中不仅存在游离态气,还有部分气体吸附于基岩孔隙表面。模型一般假设页岩气在裂缝中流动是达西流动和高速非达西流(Forchheimer 流),在基岩孔隙中的运移机制是菲克扩散或考虑克林肯伯格效应的非达西流动。

Watson 等^[86]采用理想双孔隙介质模型对 Devonian 页岩气井产能进行研究,预测了页岩气井累积产气量随时间的变化规律;Ozkan 等^[87]采用双重介质模型对页岩气运移规律进行了研究;Wu 等^[88]建立了考虑应力敏感和克林肯伯格效应的致密裂缝性气藏多重介质模型,研究了克林肯伯格效应对产能的影响,并比较了双重介质模型和多重介质模型的差别;Moridis 等^[89]建立了考虑多组分吸附的页岩气等效介质模型,假设气体在介质中流动

是达西流或高速非达西流,考虑克林肯伯格效应和扩散的影响;Freeman 等^[72,90]基于 TOUGH+数值模拟器研究了超致密基岩渗透率、水力压裂水平井、多重孔隙和渗透率场等因素对气井生产的影响;Zhang 等^[91]利用 Eclipse 模拟器,在考虑多组分解吸和多孔隙系统基础上,分析了油藏参数和水力压裂参数对页岩气井产能的影响;Cipolla 等^[92]用油藏数值模拟软件分析了裂缝导流能力、裂缝间距及解吸等压裂参数对页岩气产能的影响。Huang 等^[93]基于水力压裂后纳米孔中解吸、扩散和滑脱规律提出了一种考虑解吸、扩散和滑脱的双孔隙模型,研究了页岩气天然裂缝性的储层气体运移规律。

1.3 章节内容安排

页岩气以游离气和吸附气赋存于微—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。

页岩既是源岩又是储集层,因此页岩气具有典型的“自生自储”成藏特征。页岩储层具有孔隙度低和渗透率极低的物性特征,页岩储层只有通过体积压裂形成压裂缝网才能获得有效产能。本书从页岩的孔隙结构特征及页岩气的储存机理出发,从不同尺度分别对页岩气的产出机理进行了物理描述及数学表征。针对页岩气的复杂储存及多尺度流动机理,建立了压裂井稳定产能模型和非稳态渗流模型;然后建立了适用于页岩气藏中连续流、滑脱流、过渡流和自由分子流等不同流态多尺度综合渗流方程,在考虑气体解吸、多重流动机制以及压裂水平井生产的基础上,建立了页岩气藏多级压裂水平井气-水两相数值模型,探讨了 Knudsen 扩散和滑脱效应、等温吸附参数、气-水两相流动以及压裂增产措施对压裂水平井产量的影响。

本书共分为七章。

第1章为绪论,主要阐述页岩气开发利用现状和国内外研究现状。

第2章为页岩气藏储层特征及储集特征,对页岩气藏的储层特征、储集特征进行部分实验研究以及理论研究。

第3章为页岩气多尺度运移及产出机理,分析气体在页岩气藏中的不同流动形态,分别对气体在纳米级孔隙、微米级孔隙及裂缝中的微观流动机理进行物理描述及相关数学表征,提出页岩气的多尺度产出机理。

第4章为页岩气藏压裂井稳态产能模型,基于适用于不同气体流态(连续流、滑脱流、过渡流和自由分子流)的 Beskok-Karniadakis 模型,建立考虑有限导流人工裂缝的页岩气藏压裂井稳态产能模型,并在模型中考虑 Knudsen 扩散系数随孔隙尺寸变化的情况,得到页岩气藏压裂井的 IPR 曲线图版,并分析不同孔隙尺寸和井底流压条件下 Knudsen 扩散和滑脱效应等因素对气井产能的影响。

第5章为页岩气藏压裂井单相气体非稳态渗流模型,在考虑页岩气在纳米孔隙中的气体解吸、Knudsen 扩散和滑脱效应、天然裂缝中的达西流动以及大尺度人工裂缝的基础上,

建立页岩气多尺度流动的非稳态渗流模型。在此双重孔隙介质模型的基础上建立一个考虑以溶解态储存在干酪根中的气体扩散过程的重三孔隙介质模型,对比分析两种模型的瞬态压力曲线和产量动态曲线,并进行敏感性因素分析。

第6章为页岩气藏多级压裂水平井气-水两相数值模型,针对页岩中孔隙尺寸分布范围较广、孔隙结构较为复杂的情况,建立一个适合多尺度页岩中不同流态的多尺度渗流模型,并且在综合考虑纳米孔隙中的 Knudsen 扩散和滑脱效应、吸附气解吸、气-水两相流动以及多级压裂水平井开采的基础上,通过编程建立页岩气藏三维计算机模型,并对压裂水平井存在整体缝网和局部缝网的情况进行研究。模拟结果分别与商业软件、其他模型和现场数据进行对比验证,并且进行敏感性因素分析。

第7章为页岩气藏体积压裂与微地震监测,主要介绍页岩气藏体积压裂概念、页岩气藏体积压裂缝网模型、体积压裂模拟软件以及微地震监测技术。

参 考 文 献

- [1] Energy Information Administration. Annual energy outlook 2015[EB/OL]. [2015-4-14].
- [2] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [3] 董大忠, 王玉满, 李新景, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.
- [4] Energy Information Administration. Natural gas: Data [EB/OL]. [2015-11-19].
- [5] Natural Resources Canada. Exploration and production of shale and tight resources [EB/OL]. [2015-12-16].
- [6] 王哲. 中国页岩气革命悄然而至[J]. 中国报道, 2016(2): 78-81.
- [7] 张金川, 薛会张, 德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [8] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [9] Lu X C, Li F C, Watson A T. Adsorption measurements in Devonian shales[J]. Fuel, 1995, 74(4): 599-603.
- [10] 潘仁芳, 陈亮, 刘朋丞. 页岩气资源量分类评价方法探讨[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(05): 172-174.
- [11] 张雪芬, 陆现彩, 张林峰, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597-604.
- [12] 于炳松. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 252-258.
- [13] Pollastro R M, Hill R J, Jarvie D M, et al. Assessing undiscovered resources of the Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend Arch-Fort Worth basin province, Texas[C]. AAPG Southwest Section Convention, Fort Worth, Texas, 2003.
- [14] 李武广, 杨胜来, 陈峰, 等. 温度对页岩吸附解吸的敏感性研究[J]. 矿物岩石, 2012, 2(2): 115-120.
- [15] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 349-361.
- [16] 熊伟, 郭为, 刘洪林, 等. 页岩的储层特征以及等温吸附特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 113-116.
- [17] 宋叙, 王思波, 曹涛涛, 等. 扬子地台寒武系泥页岩甲烷吸附特征[J]. 地质学报, 2013, 87(7): 1041-1048.
- [18] Hill D G, Nelson C R. Gas productive fractured shales: an overview and update[J]. Gas Tips. 2000, 6(3): 4-13.
- [19] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [20] Chalmers G R L, Bustin, R M. On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption[J]. International Journal