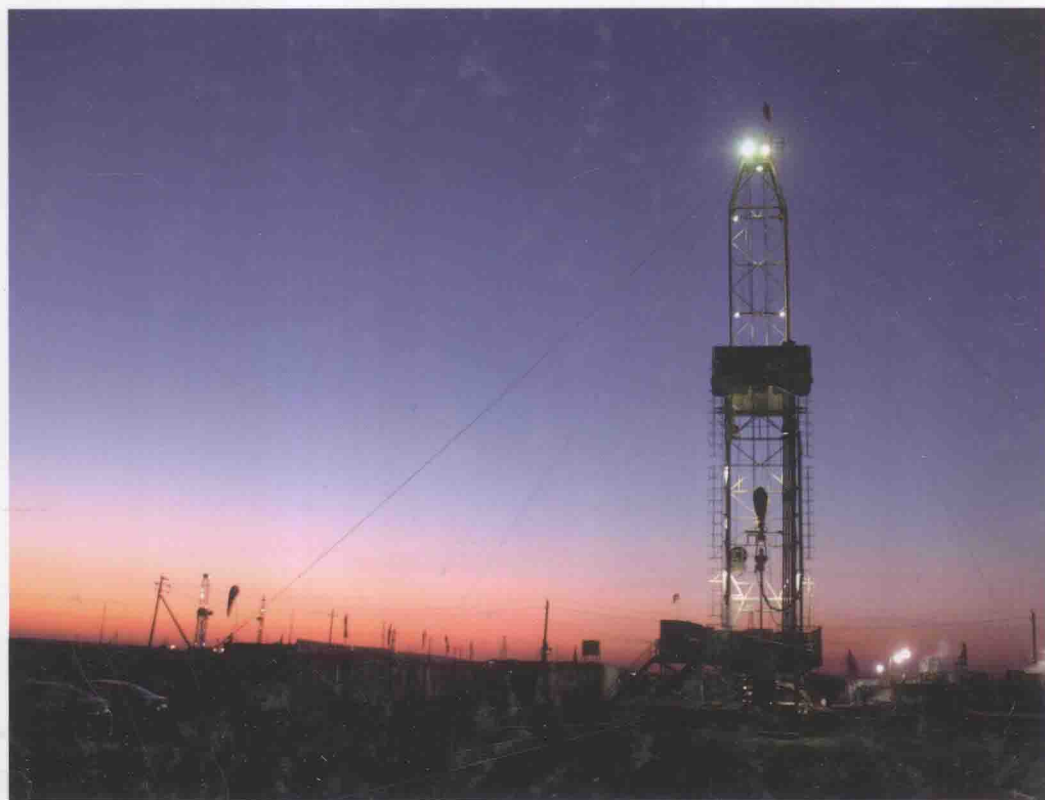


复杂气藏有效开发非线性 渗流理论和开发方法

朱维耀 朱华银 刘卫东 著



科学出版社

复杂气藏有效开发非线性 渗流理论和开发方法

朱维耀 朱华银 刘卫东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书通过实验、理论推导、数值模拟计算和现场实际应用相结合的方法建立了反映不同气藏渗流特征的非线性渗流理论。主要包括各种复杂渗流机理、渗流规律、各类稳定渗流、不稳定渗流和多相渗流非线性数学模型等。系统地构建了气藏有效开发的非线性渗流理论。

全书共分六部分:低渗透气藏有效开发非线性渗流理论,凝析气藏有效开发非线性渗流理论,低渗含硫气藏开发非线性渗流理论,含 CO_2 火山岩致密气藏开发非线性渗流理论,非常规气藏非线性渗流理论初步,非线性渗流理论与方法的应用等。

本书适合石油工程技术人员、科学技术工作者、高等院校教师、高年级本科生及研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂气藏有效开发非线性渗流理论和开发方法/朱维耀,朱华银,刘卫东著. —北京:科学出版社,2013. 11

ISBN 978-7-03-039008-0

I. ①复… II. ①朱… ②朱… ③刘… III. ①复杂地层-油气藏渗流力学-研究 IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 256658 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 高慧元 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencpp.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013 年 11 月第一次印刷 印张:34

字数:665 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国气藏类型很多,目前开发的气藏有低渗透气藏、凝析气藏、含硫气藏、高压气藏、火山岩气藏等,而煤层气藏刚进行小规模的开发,页岩气藏处于资源勘探及开发探索中。由于我国地质条件复杂、气藏类型多样,天然气开发中面临许多复杂渗流问题,如低渗致密气藏气体非达西流动、气-水流动非线性渗流、黏土膨胀水锁,凝析气藏相态变化变质量气-液-固复杂流动,高含硫气藏气-液-固复杂流动,火山岩气藏基质裂缝流-固耦合流动,煤层气藏气体解吸扩散渗流,页岩气纳米级孔隙、微米级孔隙裂隙、人工裂缝多尺度非线性流动等。为此,迫切需要适合于这些气藏的非线性渗流的新理论作为指导,以期对气藏的开发给出开采规律性的认识,为天然气藏的安全、高效、科学开发提供理论支撑。鉴于理论和实际的需要及读者的要求,特写此书奉献给广大读者。

本书是作者在跟踪国内外理论和技术研究的基础上,经多年积累和不断创新,通过室内渗流物理模拟实验、理论方程建立、数值模拟计算和现场实际应用相结合的方法,建立反映不同气藏渗流特征的非线性渗流理论,而取得的原创性成果的总结。相关理论经矿场大范围工业化应用和验证,取得了较好的气藏开发效果。因此,是一部反映最新科技研究成果的书籍,回答了目前气藏开发中认识不清的问题。希望此书的出版对气田的开发能起到推动作用。

全书共 25 章,第 1 章到第 7 章重点阐述低渗透砂岩气藏的流体的渗流机理、稳定渗流、不稳定渗流、两相渗流、压裂井、整体压裂、水平井压裂,以及混合井型整体压裂开发渗流数学模型;第 8 章到第 14 章重点阐述凝析气藏中流体变相态渗流机理、渗流特征和气-液-固复杂渗流理论;第 15 章和 16 章重点阐述低渗含硫气藏的渗流机理和有水含硫气藏具有硫沉积的复杂渗流数学模型;第 17 章到第 19 章重点阐述含 CO_2 火山岩致密气藏流体的流动规律和渗流数学模型,以及裂缝和底水对气藏开发效果的影响;第 20 章和第 21 章介绍煤层气藏、页岩气藏的最新理论成果;第 22 章到第 25 章介绍非线性渗流理论的实际应用。

目前已出版的渗流理论、油气藏工程类图书涉及上述内容的较少,因此希望本书在石油科技、工程技术人员、大专院校师生的油气藏开发学习和应用中能起到积极作用。

由于时间仓促及作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2013年3月20日

目 录

前言

第一部分 低渗透气藏有效开发非线性渗流理论

第 1 章 低渗透砂岩气藏开发的基本表征	3
1.1 低渗气藏的地质表征	3
1.1.1 低渗气藏的类型	3
1.1.2 低渗气藏的特点	11
1.1.3 低渗透砂岩气藏储层特征	13
1.2 低渗气藏开发的动态特征	19
1.2.1 低渗砂岩气藏总体开发特征	19
1.2.2 典型气田开发特征	22
第 2 章 低渗透气藏储层流体渗流机理	31
2.1 低渗透气藏滑脱效应	31
2.1.1 实验仪器及方法	31
2.1.2 测量结果及数据处理	31
2.1.3 气体滑脱效应对气藏生产的影响	33
2.2 低渗透气藏压敏效应	34
2.2.1 孔隙度变化规律	35
2.2.2 渗透率变化规律	37
2.3 储层岩石孔隙中可动水分析	42
2.3.1 岩石孔隙中水的赋存状态	42
2.3.2 不同压差气驱含水饱和度变化分析	44
2.3.3 储层岩石孔隙中的可动水分析	49
2.4 水相启动压力梯度对渗流的影响	55
2.4.1 水相流动启动压力梯度	55
2.4.2 启动压力梯度与渗透率和含水饱和度的关系	59
2.4.3 启动压力梯度在气藏开发中的应用	62
2.5 低渗透储层非线性渗流特征	63
2.5.1 单相气体渗流特征	63
2.5.2 有水条件下的渗流特征	65

2.6	裂缝对渗流的影响	68
2.6.1	微观可视化气驱水实验	68
2.6.2	气水两相平面径向微观渗流可视化实验	71
2.7	储层供气机理与生产动态物理模拟研究	74
2.7.1	物理模型的建立与实验方法	74
2.7.2	非均质低渗气藏储层供气机理与影响因素研究	76
第3章	低渗透气藏单相非线性稳定渗流理论	84
3.1	单相线性稳定渗流规律和数学模型	84
3.2	气体非线性稳定渗流方程及其典型解	86
3.2.1	气体平面单向稳定非线性渗流规律	86
3.2.2	气体平面径向稳定非线性渗流规律	86
3.2.3	非线性渗流与线性渗流的比较	87
3.2.4	直井产能模型方程	88
3.3	非达西条件下水平井单相气体稳定渗流	90
3.3.1	水平井单相气体稳定渗流方程	90
3.3.2	水平井产能方程	91
3.4	非达西条件下压裂井单相气体稳定渗流	93
3.4.1	低渗透气藏基质——裂缝耦合定常渗流数学模型	93
3.4.2	压裂井产能方程	97
3.5	压裂水平井的稳定渗流数学模型和产能方程	99
3.5.1	水平井横向缝产能模型	99
3.5.2	水平井纵向缝产能模型	101
3.6	考虑应力敏感性和滑脱效应的直井单相气体稳定渗流数学模型和产能方程	104
3.6.1	考虑应力敏感性的直井稳定渗流数学模型和产能方程	104
3.6.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的直井非稳态渗流数学模型和产能方程	105
3.6.3	产能因素分析	106
3.7	考虑应力敏感性和滑脱效应的水平井单相气体稳定渗流数学模型和产能方程	108
3.7.1	考虑应力敏感性的水平井稳定渗流数学模型和产能方程	108
3.7.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的水平井稳定渗流数学模型和产能方程	109
3.7.3	产能因素分析	109
3.8	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂井单相气体稳定渗流数学模型和产能方程	111
3.8.1	考虑应力敏感性的压裂井稳定渗流数学模型和产能方程	111

3.8.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂井稳定渗流数学模型和产能方程	112
3.8.3	产能影响因素分析	113
3.9	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂水平井单相气体稳定渗流数学模型和产能方程	115
3.9.1	考虑应力敏感性的压裂水平井稳定渗流数学模型和产能方程	115
3.9.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂水平井稳定渗流数学模型和产能方程	116
3.9.3	产能影响因素分析	116
第4章	低渗透气藏单相非线性不稳定渗流理论	119
4.1	单相不稳定渗流规律和数学模型	119
4.2	气体不稳定渗流直井产量变化规律数学模型	121
4.2.1	产能公式推导	121
4.2.2	产能影响因素分析	121
4.3	气体不稳定渗流水平井产量变化规律数学模型	124
4.3.1	产能公式推导	124
4.3.2	产能影响因素分析	126
4.4	气体不稳定渗流压裂井产量变化规律数学模型	127
4.4.1	产能公式推导	127
4.4.2	产能影响因素分析	128
4.5	气体不稳定渗流压裂水平井产量变化规律数学模型	130
4.5.1	模型假设	130
4.5.2	数学模型	130
4.5.3	产能影响因素分析	131
4.6	考虑应力敏感性和滑脱效应的直井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	133
4.6.1	考虑应力敏感性的直井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	133
4.6.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的直井不稳定渗流数学模型和产能方程	134
4.6.3	产能影响因素分析	136
4.7	考虑应力敏感性和滑脱效应的水平井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	137
4.7.1	考虑应力敏感性的水平井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	137
4.7.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的水平井不稳定渗流数学模型和产能方程	139
4.7.3	产能影响因素分析	141

4.8	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	143
4.8.1	考虑应力敏感性的压裂井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程 ...	143
4.8.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂井不稳定渗流数学模型和产能方程	144
4.8.3	产能影响因素分析	145
4.9	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂水平井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	146
4.9.1	考虑应力敏感性的压裂水平井单相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	146
4.9.2	考虑应力敏感性和滑脱效应的压裂水平井不稳定渗流数学模型和产能方程	147
4.9.3	产能影响因素分析	148
第5章	低渗透气藏两相非线性渗流理论	150
5.1	低渗透气藏气水两相渗流基本方程	150
5.2	低渗透气藏直井气水两相渗流数学模型	152
5.2.1	非线性渗流模型方程	152
5.2.2	影响因素分析	153
5.3	非达西条件下水平井气水两相渗流规律	156
5.4	非达西条件下压裂井气水两相渗流规律	158
5.4.1	人工压裂裂缝内的高速非达西渗流	158
5.4.2	裂缝控制椭圆范围内的达西流	158
5.4.3	远离裂缝位置的流体流入裂缝控制范围椭圆的达西流动	159
5.4.4	影响因素分析	159
5.5	压裂水平井的稳定渗流数学模型和产能方程	162
5.5.1	水平井横向缝产能模型	162
5.5.2	水平井纵向缝产能模型	163
5.5.3	影响因素分析	164
5.6	考虑应力敏感性和流动特性变化的单井两相气体渗流数学模型和产能方程	165
5.6.1	考虑应力敏感性的单井气水两相渗流数学模型和产能方程	165
5.6.2	考虑应力敏感性和滑脱效应及启动压力梯度的直井气水两相渗流数学模型和产能方程	165
5.6.3	影响因素分析	166

5.7 考虑应力敏感性和流动特性变化的水平井气水两相渗流数学模型和产能方程	168
5.7.1 考虑应力敏感性的水平井气水两相渗流数学模型和产能方程	168
5.7.2 考虑应力敏感性和滑脱效应及启动压力梯度的水平井两相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	169
5.7.3 影响因素分析	170
5.8 考虑应力敏感性和流动特性变化的压裂直井气水两相渗流数学模型和产能方程	171
5.8.1 考虑应力敏感性的压裂直井气水两相渗流数学模型和产能方程	171
5.8.2 考虑应力敏感性和滑脱效应及启动压力梯度的压裂直井两相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	173
5.8.3 影响因素分析	175
5.9 考虑应力敏感性和流动特性变化的压裂水平井气水两相渗流数学模型和产能方程	177
5.9.1 考虑应力敏感性的压裂水平井两相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	177
5.9.2 考虑应力敏感性和滑脱效应及启动压力梯度的压裂水平井两相气体不稳定渗流数学模型和产能方程	178
5.9.3 影响因素分析	180
第6章 低渗透非均质气藏有效动用计算方法	183
6.1 低渗透非达西渗流基本微分方程	184
6.2 低渗透非达西径向流方程解析解	185
6.3 低渗透基质动用模板	187
6.3.1 低渗透基质非达西渗流理论分析	189
6.3.2 压裂直井非达西渗流有效动用数学模型	191
第7章 低渗透气藏混合井型整体压裂开发渗流理论	199
7.1 直井排布产能计算方法	199
7.2 水平井和直井排布井网产能计算	200
7.3 垂直压裂井和直井排布产能计算方法	202
7.4 压裂水平井与直井排布产能计算方法	204
7.5 水平井与垂直压裂井排布产能计算方法	207
7.6 压裂水平井与垂直压裂井排布产能计算方法	209

第二部分 凝析气藏有效开发非线性渗流理论

第 8 章 我国主要凝析气田的基本特征	215
8.1 凝析气田的地质特征	215
8.1.1 凝析气藏分布特点	215
8.1.2 凝析气藏压力、温度特点	215
8.1.3 凝析气组成特征	215
8.1.4 凝析气藏析气井井流物性特征	216
8.2 凝析气藏的开发特征	217
第 9 章 凝析气藏流体的相态特征	220
9.1 凝析气-液二相相平衡	220
9.1.1 相变过程的观察	220
9.1.2 PVT 特性	221
9.2 含蜡凝析气的气-液-固三相相平衡	223
9.2.1 含蜡凝析油气体系析蜡实验	223
9.2.2 含蜡凝析油气体系的气-液-固三相相平衡理论	226
9.2.3 模拟计算	227
第 10 章 高温高压下凝析气-液微观渗流机理	228
10.1 高温高压下凝析气-液微观可视化实验方法	228
10.1.1 实验方法	228
10.1.2 高温高压下微观可视化模型	229
10.2 高温高压下凝析气-液微观渗流机理	230
10.2.1 高压玻璃微珠模型可观察流动模拟实验	230
10.2.2 高压光刻仿真微观模型可观察流动模拟实验	231
第 11 章 含蜡凝析气藏气-液-固变相态微观渗流机理	233
11.1 凝析气-液-固微观渗流实验方法	233
11.2 气-液-固相态变化和流动特征	233
11.2.1 高温、高压下液体析出及凝聚过程	234
11.2.2 高温、高压下蜡的析出及凝聚	235
11.3 孔隙介质中气-液-固(蜡)三相流动机理	237
第 12 章 凝析气藏变相态渗流特征	241
12.1 凝析气液两相渗流特征	241
12.1.1 凝析油形成过程及产状	241
12.1.2 凝析油流动方式	242
12.1.3 多孔介质对渗流的影响	243

12.2 蜡沉积气-液-固渗流特征	244
第13章 凝析气藏气-液变相态渗流理论	246
13.1 凝析油气藏气、油相渗透率	246
13.1.1 相对渗透率理论	246
13.1.2 凝析气藏油气相对渗透率曲线测试	247
13.2 凝析气液变相态渗流数学模型	248
13.2.1 渗流数学模型	248
13.2.2 模拟计算研究	252
13.3 凝析气变相态流-固-热耦合渗流数学模型	253
13.3.1 数学模型建立	253
13.3.2 数值模拟研究	258
第14章 含蜡凝析气藏气-液-固复杂渗流理论	263
14.1 具有蜡沉积的凝析气藏气-液-固微尺度相变渗流动力学模型方程	263
14.2 含蜡凝析气藏气-液-固变相态渗流理论	264
14.2.1 具有蜡沉积的凝析气藏复杂渗流数学描述	264
14.2.2 凝析气藏三区模型的建立	268
第三部分 低渗含硫气藏开发非线性渗流理论	
第15章 低渗含硫气藏硫沉积机理和渗流规律	277
15.1 我国主要含硫气藏的基本特征	277
15.1.1 我国高含硫气田的分布规律	277
15.1.2 我国高含硫气田地质特征	279
15.2 含硫气藏相态特征与沉积模型	280
15.2.1 含硫气藏相态特征	280
15.2.2 硫沉积机理	282
15.3 硫沉积-堵塞预测模型	285
15.3.1 固态硫沉积模型	285
15.3.2 颗粒悬浮条件	288
第16章 有水含硫气藏具有硫沉积的复杂渗流数学模型	292
16.1 变相态复杂渗流数学模型	292
16.1.1 多孔介质中气-液-固混合渗流模型	292
16.1.2 流动机理数学模型	295
16.2 数学模型方程的解	298
16.2.1 定产量解	298

16.2.2 产能方程	298
-------------------	-----

第四部分 含 CO₂ 火山岩致密气藏开发非线性渗流理论

第 17 章 我国含 CO₂ 火山岩致密气藏的基本特征	301
17.1 我国含 CO ₂ 火山岩天然气藏的地质特点	301
17.1.1 火山岩气藏的岩性、构造特征	301
17.1.2 火山岩气藏的储渗条件	301
17.2 储层储渗特征实验	302
17.2.1 岩石孔隙结构特征	302
17.2.2 储层物性特征	311
17.2.3 储层应力敏感性特征	319
17.2.4 大庆火山岩储层气水渗流特征	328
17.3 裂缝的分布特征	338
17.3.1 储层裂缝的分类	338
17.3.2 储层裂缝特征	342
17.3.3 裂缝类型与产量关系	347
17.4 底水分布模式、控制因素及水体能量	355
17.4.1 底水分布模式研究	355
17.4.2 水体能量研究	363
第 18 章 含 CO₂ 天然气藏的流体流动规律	366
18.1 储层渗流数学描述现状及分析	366
18.1.1 等效孔隙介质模型	366
18.1.2 多重介质模型	367
18.1.3 离散裂缝网络模型	369
18.1.4 混合网络模型	370
18.2 裂缝网络的渗透率模型	370
18.2.1 树枝状裂缝网络渗透率模型	370
18.2.2 网状裂缝网络渗透率模型	379
18.3 微裂缝储层相对渗透率计算	382
18.4 裂缝性气藏渗流数学模型	384
18.4.1 基本数学模型	384
18.4.2 直井解析解	386
18.4.3 水平气井产能模型	390
18.5 底水锥进井产量预测模型	392
18.5.1 直井水锥模型	392

18.5.2 水平井水脊模型	395
第 19 章 裂缝性气藏宏观尺度混合网络渗流理论	401
19.1 基质-裂缝组合渗透率连续可微表征	401
19.2 基质与树枝状裂缝的组合条件下的数学模型	402
19.3 基质与网状裂缝的组合条件下的数学模型	403
19.4 树枝状裂缝与网状裂缝的组合条件下的数学模型	404

第五部分 非常规气藏非线性渗流理论初步

第 20 章 煤层气藏非线性渗流理论初步	409
20.1 煤层气藏的基本特征	409
20.1.1 煤层介质的结构特性	409
20.1.2 煤层气的吸附特性	410
20.1.3 煤层气的输运特性	411
20.2 煤层气藏非线性渗流数学模型	412
20.2.1 有效动用控制方程推导	412
20.2.2 低速非达西径向渗流有效动用解析解	414
20.2.3 考虑启动压力梯度、应力敏感、解吸气的气井产能公式	416
第 21 章 页岩气藏非线性渗流理论初步	418
21.1 页岩气藏基本特征	418
21.1.1 页岩层微观孔隙结构特征研究	418
21.1.2 裂缝特征研究	420
21.1.3 页岩岩石物性研究	421
21.1.4 天然气富集状态及影响因素研究	423
21.2 页岩气藏非线性渗流数学模型	429
21.2.1 页岩气流动机理	429
21.2.2 页岩气藏流动规律及渗流模型	430
21.2.3 压裂水平井稳态渗流数学模型	439
21.2.4 实例分析	444

第六部分 非线性渗流理论与方法的应用

第 22 章 低渗透砂岩气藏的有效开发	457
22.1 模型建立和参数选取	457
22.2 数值模拟结果分析	459
22.2.1 非达西渗流对生产的影响	459
22.2.2 配产对生产的影响	462

22.2.3	外围渗透率变化对生产的影响	466
22.2.4	对三类气井的综合评价	468
第 23 章	凝析气藏的有效开发	470
23.1	地质模型	470
23.1.1	yh2-3 凝析气田地质概况	470
23.1.2	相态特征	470
23.1.3	数学地质模型	471
23.1.4	参数选取	472
23.2	石蜡沉积对凝析气田开发动态和生产的影响	473
23.2.1	枯竭式开采	473
23.2.2	循环注气开采	475
23.2.3	储层渗透率大小对开采效果的影响	476
23.2.4	凝析气重组分含量大小对开采效果的影响	477
23.3	示例计算	478
23.3.1	模拟参数选择	478
23.3.2	凝析气井近井地带地层油气渗流特征	479
23.3.3	产能计算	479
第 24 章	低渗含硫气藏的有效开发	481
24.1	气藏地质	481
24.1.1	气藏构造特征	481
24.1.2	地层及沉积相特征	482
24.1.3	储层特征	484
24.1.4	气藏流体、温度、压力系统及气水界面分析	494
24.2	产能分析	499
24.2.1	各气井无阻流量	499
24.2.2	气井产能分析	500
24.3	气藏数值模拟	501
24.3.1	模拟模型	501
24.3.2	数值模拟关键因素	501
24.3.3	气井出水分析	502
24.3.4	开发方案设计	502
24.3.5	开采方式	505
24.3.6	方案预测	505
第 25 章	含 CO₂ 火山岩致密气藏的有效开发	509
25.1	裂缝对底水气藏气井见水时间影响	509

25.1.1	cs1 井	509
25.1.2	cs1-2 井	510
25.1.3	cs 平 3 井	510
25.1.4	cs 平 4 井	511
25.1.5	xs14 井	511
25.1.6	xs23 井	513
25.1.7	xs27 井	513
25.2	储层开发特征对直井底水锥进影响分析	514
25.2.1	气层厚度影响分析	514
25.2.2	气层打开程度底水锥进分析	517
25.2.3	产气量对底水锥进影响	519
25.3	储层开发特征对水平井底水脊进影响分析	523
25.3.1	水平井避水高度影响分析	523
25.3.2	产气量对底水脊进影响分析	523
参考文献		526

第一部分 低渗透气藏有效开发 非线性渗流理论