

油气藏渗流理论与开发技术系列

凝析气藏相变传质渗流理论 和高效开发技术

朱维耀 江同文 焦玉卫 著



科学出版社

油气藏渗流理论与开发技术

凝析气藏相变传质渗流理论 和高效开发技术

朱维耀 江同文 焦玉卫 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。系统地构建了凝析气藏相变传质渗流理论。

全书共五部分:凝析气藏多场耦合相变传质渗流理论、三维四相多组分数值模拟及储层参数动态识别预测技术、循环注气过程中注入气超覆及调控技术、开采动态评价方法体系、相变渗流理论和高效开发技术的应用。

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、大学生、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

凝析气藏相变传质渗流理论和高效开发技术/朱维耀,江同文,焦玉卫著. —北京:科学出版社,2016

(油气藏渗流理论与开发技术系列)

ISBN 978-7-03-047365-3

I. ①凝… II. ①朱… ②江… ③焦… III. ①凝析气藏-油气藏渗流力学 ②凝析气藏-气田开发 IV. ①TE372

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 031034 号

责任编辑:耿建业 武 洲 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴 / 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.sciencep.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

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:401 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国凝析气藏复杂,为高温高压、高含蜡、地露压差小的特高凝析油含量的凝析气藏,此类型气藏储量规模大、气藏埋藏深、地层压力高、凝析油含量高、单井产能高、开发难度大,在国际上少有,且无开发先例可借鉴。自凝析气田开发采用枯竭式、循环注气开采以来,生产难题日渐突出。地层压力下降致使储层流体发生凝析和蜡的沉积,以往常用的流体相态理论无法针对高压循环注气的凝析气藏展开评价研究;反凝析液聚集在近井地带及蜡的沉积,造成气井表皮系数增大,产能下降;有水和有边底水凝析气藏开发产水影响凝析油、气采收率,采出程度低。缺乏凝析气藏相变渗流理论和高效开发技术对其应用进行指导。

为此,迫切需要建立凝析气藏相变传质渗流理论,解决其相关的科学与技术难题,以期改进凝析气田开发方法,给出开采规律性的认识,达到高效开发的目的。为凝析气藏的安全、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了反映各种凝析气藏渗流特征的非线性渗流理论,取得了原创性成果。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,是一部反映最新科技研究成果的书籍,回答了原凝析气藏开发中认识不清的问题。希望本书的发行对凝析气田的开发起到推动作用。

全书共五部分(二十章),第一部分凝析气藏多场耦合相变传质渗流理论(第1章~第4章),重点阐述相态特征、相变多相渗流规律、复杂渗流数学模型;第二部分凝析气藏三维四相多组分数值模拟及储层参数动态识别预测技术(第5章~第9章),重点阐述数值模拟及储层参数动态识别预测方法、试井解释方法,以及储层凝析油分布特征及剩余油气预测技术;第三部分循环注气过程中注入气超覆及调控技术研究(第10章~第12章),重点阐述循环注气过程中注入气超覆变化规律和循环注气优化调控方法;第四部分凝析气藏开采动态评价方法体系(第13章~第17章),重点阐述动态预测、监测、评价方法体系;第五部分渗流理论和高效开发技术的应用(第18章~第20章),重点介绍典型凝析气藏的实际应用。

目前已出版的渗流理论、油气藏工程类图书涉及上述部分内容的较少,因此希望本书能为石油科技、工程技术人员、大专院校师生在油气藏开发的学习和应用中起到积极的作用。

由于时间仓促及作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年7月20日

目 录

前言

第一部分 凝析气藏多场耦合相变传质渗流理论

第 1 章 凝析气藏的分类与相态特征	3
1.1 凝析气藏的分类	3
1.2 凝析气藏的相态特征	5
1.2.1 带油环凝析气藏相态特征	5
1.2.2 高含蜡凝析气藏相态特征	8
1.2.3 含水凝析气相态特征	9
1.2.4 近临界凝析气藏流体相态特征	11
1.2.5 循环注气凝析气藏相态特征	12
1.3 凝析气的开发特征	14
1.3.1 凝析气藏开发方式	15
1.3.2 凝析气藏开发特征	17
第 2 章 凝析气相变传质多相渗流规律	20
2.1 凝析气相变气-液-固渗流物理模拟方法	20
2.1.1 实验方法	20
2.1.2 微观仿真玻璃模型	21
2.1.3 实验流程	22
2.2 含蜡凝析气藏气液固相态变化规律	22
2.2.1 高温、高压下液体析出及凝聚过程	22
2.2.2 高温、高压下蜡的析出及凝聚	24
2.3 含蜡凝析气藏气液固相变渗流机理	26
2.4 凝析气相变复杂渗流特征	31
2.5 凝析气相变复杂渗流相对渗透率曲线	34
第 3 章 凝析气相变传质复杂渗流数学模型	37
3.1 凝析气相变传质复杂渗流多相渗流数学模型	37
3.2 凝析气相变传质复杂渗流相对渗透率理论模型	43
3.3 具有蜡沉积的气液固微尺度相变渗流动力学模型	44
3.3.1 气液固运动特性描述	44

3.3.2	界面作用相变化与物质迁移的耦合动力学模型	45
3.4	含蜡凝析气藏气液固相变渗流三区耦合数学模型	46
3.4.1	相变复杂渗流数学模型	46
3.4.2	流动机理数学模型	50
3.4.3	数学模型方程的解	54
3.4.4	示例计算	55
3.5	凝析气藏相变多相渗流流-固-热耦合数学模型	57
3.5.1	多相流-固-热耦合渗流数学模型的建立	57
3.5.2	数学模型的数值解法	60
3.5.3	实例计算及结果分析	61
3.5.4	小结	64
第4章	低渗致密砂岩凝析气藏相变传质渗流理论	65
4.1	致密砂岩凝析气藏启动压力梯度实验方法	65
4.1.1	单相流体启动压力梯度测定	65
4.1.2	两相流体存在时启动压力梯度测定	67
4.1.3	致密砂岩凝析气藏启动压力梯度测定	68
4.1.4	小结	71
4.2	致密砂岩凝析气藏油气水多相渗流特征实验方法	72
4.2.1	测定原理	72
4.2.2	仪器流程	72
4.2.3	三相相渗曲线特征与分析	73
4.2.4	小结	76
4.3	致密砂岩凝析气藏开采动态物理模拟实验	76
4.3.1	实验原理	76
4.3.2	仪器与流程	77
4.3.3	测定结果与分析	77
4.3.4	小结	80
4.4	致密砂岩凝析气藏油气水三相渗流数学模型	80
4.4.1	致密砂岩油气水三相渗流数学模型	80
4.4.2	致密砂岩凝析气藏三相渗流方程	84
4.5	致密砂岩凝析气藏产能预测方法	85
4.5.1	致密砂岩凝析气藏渗流连续性方程	86
4.5.2	致密砂岩凝析气藏渗流运动方程	87
4.5.3	致密砂岩凝析气藏渗流微分方程	88
4.5.4	致密砂岩凝析气藏单井产能方程	88

4.5.5 小结	92
----------------	----

第二部分 凝析气藏三维四相多组分数值模拟及储层参数 动态识别预测技术

第5章 含蜡凝析气藏气-油-水-固四相三维多组分数值模拟技术	95
5.1 模型的网格化与变量配置	95
5.2 模型的差分方法	96
5.3 差分方程	98
5.3.1 非相变区差分方程	98
5.3.2 相变区差分方程	98
5.4 模型迭代求解过程中的主要控制措施	99
5.4.1 动边界网格的处理	99
5.4.2 时间步长的选择	100
5.4.3 物质平衡检验	100
5.5 程序设计	100
5.5.1 程序的模块结构	101
5.5.2 主要模块的内部流程	101
5.5.3 主要模块内部子程序流程图及调用关系	106
5.6 本章小结	107
第6章 储层参数动态识别方法	109
6.1 二维两相流渗流数学模型	109
6.2 二维两相相渗曲线反演计算方法	110
6.2.1 油水相对渗透率曲线特征实验	110
6.2.2 计算函数型相渗曲线特征数学模型	110
6.2.3 计算函数型相渗曲线特征优化反演方法	113
6.2.4 计算数值型相渗曲线特征神经网络反演计算方法	115
6.2.5 实例分析	116
6.3 二维两相渗透率分布反演数学模型	118
6.3.1 二维两相渗透率分布反演数学模型	118
6.3.2 二维两相厚度分布反演数学模型	123
6.3.3 二维两相厚度和渗透率同时反演数学模型	127
6.3.4 三维两相渗流反演数学模型	129
6.3.5 数值模拟	131
6.4 本章小结	137

第 7 章 储层凝析油分布特征及剩余油预测技术	139
7.1 储层凝析油分布特征及定量评价	139
7.1.1 反凝析程度评价	139
7.1.2 纵向分布特征	139
7.1.3 平面分布特征	141
7.2 凝析油分布定量评价	144
7.2.1 牙哈 23E、K 凝析气藏	144
7.2.2 牙哈 23N1j 凝析气藏	146
7.3 反凝析液可动用性评价	148
第 8 章 凝析气井试井期间多相渗流特征	150
8.1 压力降落期间多相渗流特征	150
8.2 压力恢复期间多相渗流特征	152
8.2.1 储层渗流	152
8.2.2 井筒流动	154
8.3 凝析油分布对试井特征曲线的影响	155
8.4 复杂情况下的凝析油气井试井解释技术	156
8.4.1 循环注气凝析气井异常及预处理	156
8.4.2 循环注气过程中不同阶段的试处理方法	158
第 9 章 蜡凝析气藏开采中蜡沉积预测	165
9.1 数学地质模型	165
9.1.1 牙哈 2-3 凝析气田地质概况	165
9.1.2 相态特征	165
9.1.3 数学地质模型	166
9.1.4 参数选取	166
9.2 蜡沉积对凝析气藏开采特征的影响	167
9.2.1 枯竭式开采	168
9.2.2 循环注气开采	169
9.2.3 储层渗透率大小对开采效果的影响	170
9.2.4 凝析气重组分含量大小对开采效果的影响	171
9.3 本章小结	172

第三部分 循环注气过程中注入气超覆及调控技术

第 10 章 循环注气过程中注入气超覆变化规律	175
10.1 循环注气超覆机理	175
10.1.1 前期对注气驱替机理的认识	175
10.1.2 PVT 取样分析	177

10.1.3 生产气油比分析	177
10.2 循环注气超覆渗流数学理论模型	180
第 11 章 循环注气井位和开采部位优化调控方法研究	184
11.1 重力分异作用干气聚集范围分析	184
11.2 布井位置和开采部位调控研究	188
11.2.1 调控措施	188
11.2.2 调控方案	189
11.2.3 调控效果	192
第 12 章 防水、避水措施	195
12.1 气藏水体能量分析	195
12.2 底水侵入特征	197
12.3 边水侵入特征	203
12.4 有效防水、避水措施	205
第四部分 凝析气藏开采动态评价方法体系	
第 13 章 底水锥进动态预测方法	209
13.1 直井水锥动态及见水时间预测数学模型	209
13.2 水平井水锥动态及见水时间预测数学模型	211
13.3 水锥形态及见水预测应用实例	212
第 14 章 时间推移试井监测边水技术	214
14.1 时间推移试井技术	214
14.2 时间推移试井技术实例解释	215
14.3 数值模拟含水饱和度分析验证	217
第 15 章 开采动态监测技术	218
15.1 气体示踪剂监测技术	218
15.2 剩余油气饱和度监测	220
15.3 流体性质监测	220
第 16 章 气窜综合判别方法	223
16.1 压力气油比匹配法	223
16.2 气油比变化率判断法	224
16.3 气油比图版判断法	224
16.4 组分图版判断法	228
第 17 章 凝析气藏开发动态评价方法体系	231
17.1 总体架构	231
17.2 气藏地质特征分析	233
17.3 注采单井动态分析	237

17.3.1	气窜分析方法	237
17.3.2	气井产能变化分析方法	238
17.3.3	单井控制储量分析方法	253
17.3.4	单井井底流压计算方法筛选	257
17.3.5	单井携液能力分析方法	261
17.3.6	注入井动态分析方法	266
17.4	相态特征分析	267
17.4.1	相态特征指标分析	267
17.4.2	相态变化特征	268
17.5	气藏开发动态特征分析	278
17.6	循环注气开发水平分级界限	282
17.6.1	评价指标层次及级别研究	282
17.6.2	注采井开发效果评价指标分级研究	283
17.6.3	循环注气开发效果评价指标分级研究	286
17.6.4	循环注气凝析气藏综合开发水平评价	293
17.6.5	牙哈 23 总体开发水平评价	293

第五部分 渗流理论和高效开发技术的应用

第 18 章	高含蜡凝析气田循环注气高效开发	297
18.1	地质开发情况	297
18.2	应用效果	298
第 19 章	边底水凝析气田衰竭式开发(三相渗流)	299
19.1	地质开发情况	299
19.1.1	气藏基本情况	299
19.1.2	地质特征认识	299
19.2	开发调整方案设计	301
19.2.1	储层渗流物理特征	301
19.2.2	试油试采特征研究	302
19.2.3	产能评价	303
19.2.4	开发机理	303
19.2.5	开发概念设计	304
19.2.6	总体方案设计	304
19.3	应用效果	305
第 20 章	凝析气藏有效开发模式	306
参考文献		310

第一部分 凝析气藏多场耦合相变 传质渗流理论

第 1 章 凝析气藏的分类与相态特征

1.1 凝析气藏的分类

凝析气藏是一种特殊、复杂的气藏,是在原始地层条件下,地层温度介于临界温度和最高凝析温度之间的凝析油天然气藏。凝析油气体体系的特点一是具有高的气油比,原始气油比一般不低于 $600\text{m}^3/\text{m}^3$;二是凝析气藏油气体系中富含轻烃组分,这是凝析气藏的物质基础。在美国,凝析油气藏大致定义为凡能产出浅色或无色烃类液体,且其气油比在 $890.5\sim 17\,810.8\text{m}^3/\text{m}^3$,所产油密度为 450API 以上(即 $0.801\,7\text{g}/\text{cm}^3$ 以下)的气藏。凝析油成分介于油和气之间,它在地面条件下是密度小的液态天然汽油(相对密度小于 0.8)。但在原始地层压力、温度下,溶解于气体中,形成单一的气态或气态烃类矿藏。在油气双组分系统温压曲线图中,处于临界温度与临界凝析温度之间、露头曲线以上的气态区。

凝析气藏一般具有异常高压,有油藏和气藏的双重特征,经济开采价值很高。它在世界气田开发中占有特别重要的地位,20 世纪 30 年代初首先在美国被发现,随后世界上许多国家,如苏联、英国、加拿大、澳大利亚、挪威、阿拉伯联合酋长国(简称阿联酋)和中国等也相继发现了凝析气藏。在中国,发现的大中型凝析气藏主要集中在新疆塔里木、克拉玛依、吐哈等油田,总储量约为 $4\,000\times 10^8\text{m}^3$,占常规气层气的三分之一。因此,凝析气藏开发理论和高效开发技术的研究具有重大现实意义。

凝析气藏原始地层压力一般高于露点压力,气藏温度介于临界温度和临界凝析温度之间,在原始地层压力下呈单一的气相状态。不同的凝析气藏相态特征、地质情况、流体特征有一定的差异,按照不同的划分方式,凝析气藏类型不同。

1. 按相态特征划分

根据凝析气藏的相态特征,可将该区凝析气藏简单地分为两类,即纯凝析气藏(不带油环)和带油环的凝析气藏(包括凝析气顶型油藏)。

2. 按成藏原因划分

根据凝析气藏形成时圈闭中烃类相态变化,可以将凝析气藏分为原生凝析气藏和次生凝析气藏。原生凝析气藏是有机质直接生成凝析气,并以气相运移聚集成藏,成藏过程中不存在相态变化。次生凝析气藏是圈闭中轻质油溶解于天然气

中形成的凝析气藏,成藏过程中流体相态发生了变化。

3. 按圈闭类型划分

按圈闭类型划分一般可分为构造型凝析气藏、岩性型凝析气藏、地层型凝析气藏(包括地层不整合型、潜山型和地层超覆型)、复合型凝析气藏。

4. 按埋深划分

按埋深可分为超深层型(超过 4 570m)、深层型(3 000~4 570m)、中深层型(2 000~3 000m)、浅层型(埋深不足 2 000m)。

5. 按储集层岩性划分

根据凝析气藏储集层岩性,划分为砂岩凝析气藏和碳酸盐岩凝析气藏。

6. 按边底水划分

据有无边底水情况,可将凝析气藏划分为定容凝析气藏和有边底水凝析气藏。

7. 按储集层厚度划分

如果储集层厚度小于凝析气藏含气高度,则相对于气藏来说,储集层呈现层状特征,称为层状凝析气藏,边水凝析气藏就是层状凝析气藏。如果储集层厚度大于凝析气藏含气高度,则相对于气藏来说,储集层呈现块状特征,称为块状凝析气藏,底水凝析气藏就是块状凝析气藏。

8. 按工业储量划分

按天然气工业储量可以分为特大型(超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$)、大型($300 \times 10^8 \sim 500 \times 10^8 \text{ m}^3$)、中型($50 \times 10^8 \sim 300 \times 10^8 \text{ m}^3$)、小型(小于 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$)。

9. 按气油比和凝析油含量划分

按气油比和天然气中的凝析油含量,国际上较多的是按以下标准来划分不同类型的凝析气藏(表 1.1)。

表 1.1 根据气油比和凝析油含量划分凝析气藏类型

类型	气油比/(m^3/m^3)	凝析油含量/(g/m^3)
低含凝析油的凝析气藏	$5\,000 < \text{GOR} < 18\,000$	$45 < \text{CN} < 150$
中等含凝析油的凝析气藏	$2\,500 < \text{GOR} < 5\,000$	$150 < \text{CN} < 290$
高含凝析油的凝析气藏	$1\,000 < \text{GOR} < 2\,500$	$290 < \text{CN} < 675$
特高含凝析油的凝析气藏	$600 < \text{GOR} < 1\,000$	$675 < \text{CN} < 1\,035$

10. 按含蜡量划分

国内外在深层钻探中发现了越来越多的高压高温高含重烃组分的凝析气藏,中国在塔里木、渤海湾和南海海域等油气盆地中发现的牙哈、柯克亚深层、千米桥等凝析气田就属于这类气藏,在其深部储层中,流体中含有较多的蜡,含蜡量都高达7%~26%,这类凝析气藏开发往往具有异常复杂的相态变化,将这类凝析气藏称为高温高压高含蜡凝析气藏。

1.2 凝析气藏的相态特征

凝析气藏是在一定地质环境条件(储层、烃类组成、温度、压力等)下形成的,凝析气由于组成中含有标准条件下为液态的 C_5 以上烃,在降压过程中存在反凝析现象。它是介于油藏和纯气藏之间的复杂类型的特殊油气藏。在开发过程中储层和地面都会有凝析油析出,既产气又产油,降压方式开采导致一部分油资源损失在储层中难以采出。很多凝析气藏中气态烃与液态烃共存于同一系统中,形成带油环(或底油)凝析气藏或凝析气顶油藏。

当压力低于露点压力以后,凝析油会因为反凝析现象而从气相中析出,油、气的相态也会随之发生转变,凝析气藏的相变特性会导致温度场及孔隙流体压力分布改变,从而影响和改变气体渗流的特性和过程。对于含蜡量较高的凝析气藏情况更为复杂,在储层中同时存在气、液、固三相,因而出现了气、液、气、固、液、固界面。

由于重烃的存在,与湿气相比其包络区较宽,凝析气藏温度介于临界温度和临界凝析温度之间。当凝析气藏压力降到露点以下,气相中的重组分反凝析沉降,凝析油从气相中析出(图 1.1)。

随着压力的衰竭,凝析出来的液体量逐渐达到最大,然后又由于汽化蒸发而减小。这种性质可能意味着,将凝析气藏压力大幅度降低后,通过重新汽化可将部分凝析油采出。但是当压力降到露点以下时,随着生产过程中体系组成的变化,原始相图便不再适用了(图 1.2)。

凝析气藏的相态特征根据其自身类型有一定差异,针对不同的凝析气藏类型,分析其具体的相态特征。

1.2.1 带油环凝析气藏相态特征

运用流体相平衡热力学原理结合 PR 状态方程相图模拟技术,拟合带油环凝析气藏 SL15 井原始和目前地层饱和凝析气-油环油叠合相图(图 1.3 和图 1.4),

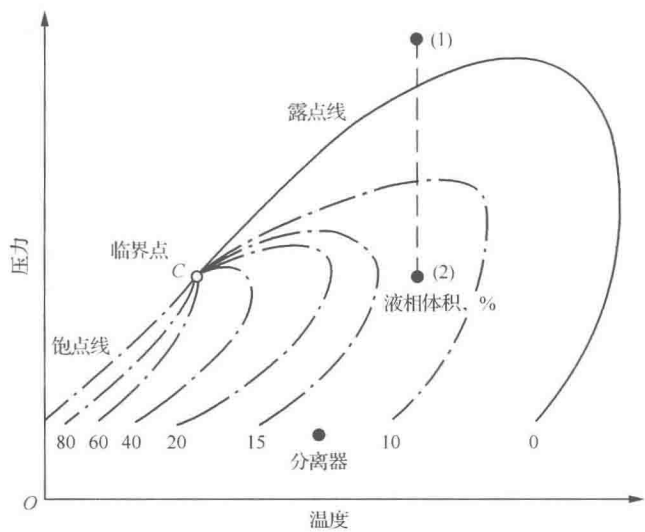


图 1.1 典型的凝析气相图

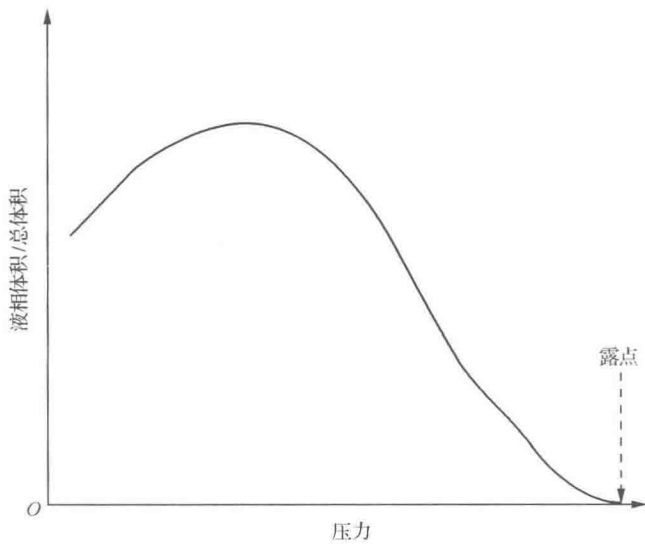


图 1.2 凝析气液析出行为曲线

从图 1.3 和图 1.4 中可以看出,SL15 井凝析气藏地层流体为典型凝析气相态特征,翼部和边部区可能存在油环,油环油呈现轻质油特征。原始油气体系满足 $P_{di}=P_{hi}=P_{fi}=40.08\text{MPa}$,目前地层油气体系满足 $P_{di}=P_{hi}=P_{fi}=11.17\text{MPa}$ 。

值得注意的是,从地层流体叠合相图中还可以看出,随着开采过程中地层压力的降低,地层原始饱和凝析气产生的反凝析液对油环油产生一定的稀释作用,使油