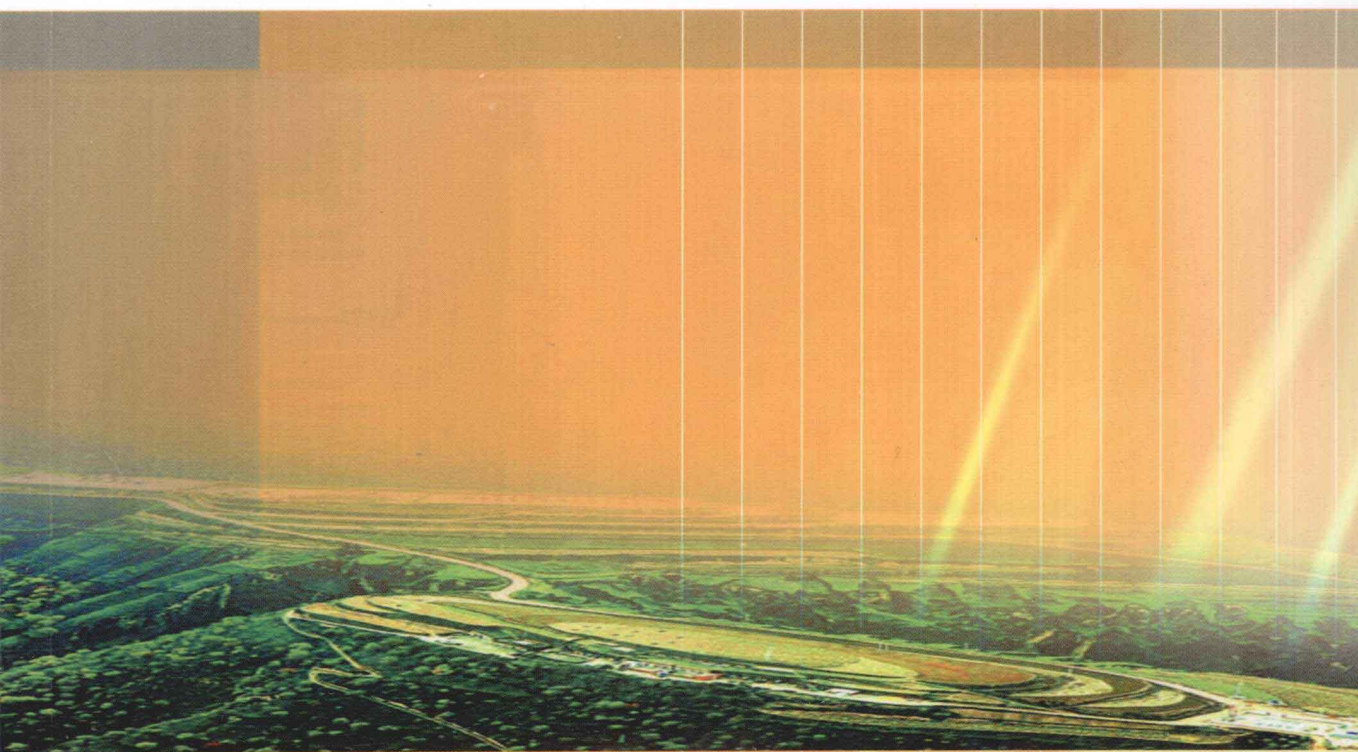


凝析气藏 循环注气开发 动态分析方法与实践

江同文 朱忠谦 熊 钰 阳建平 著



NINGXIQICANG
XUNHUAN ZHUQI KAIFA
DONGTAI FENXI FANGFA YU SHIJIAN

石油工业出版社

凝析气藏循环注气开发 动态分析方法与实践

江同文 朱忠谦 熊 钰 阳建平 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在对塔里木牙哈凝析气田开发多年动态分析的基础上完成的,共8个章节,即凝析气藏相态理论、牙哈凝析气藏的基本特征、注入气的运动规律与气窜动态、高温高压凝析气井井底压力的准确计算方法、凝析气藏循环注气条件下气井产能评价方法、凝析气藏试井资料解释方法、循环注气条件下的动储量计算方法、循环注气开发效果评价体系的建立。本书采用理论结合实际的方法,以方法建立为基础,结合现场实用的技术经验,具有较强的理论指导和实际应用价值。

本书可作为从事气田开发的中高级科技人员、经营管理者及石油大专院校相关专业师生的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

凝析气藏循环注气开发动态分析方法与实践/江同文等著.

北京:石油工业出版社,2013.1

ISBN 978-7-5021-9236-5

I. 凝…

II. 江…

III. 凝析气藏—循环注气—气田开发—动态分析

IV. TE372

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第197555号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523580 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12

字数:302千字

定价:36.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

目前全球已发现的凝析油气田(藏)超过 12200 个,主要分布于美国、俄罗斯、澳大利亚、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦以及东南亚等地区。由于技术条件及供气需求等的限制,高含凝析油的凝析气藏多采用衰竭式开发,从资料统计来看,目前国内外凝析气藏的开发效果大都不是很理想,如我国最早正式投入开发的板Ⅱ凝析气藏废弃时天然气、凝析油(包含底原油在内)的采出程度分别为 48.7%、37.21%,天然气、凝析油、原油的采出程度均较低。我国牙哈凝析气田复杂程度更高,高温、高压、高含凝析油、高含蜡,气藏埋深达到 5000m,地层压力高,地面回注压力超过 50MPa,凝析油储量达到 $2300 \times 10^4 \text{t}$,天然气储量达到 $250 \times 10^8 \text{m}^3$ 。规模如此之大的凝析气田采取高压循环注气开发在国内是首例,在国际上也寥寥可数。

与此类型气田开发相对应的高压循环注气气藏工程理论,国外起步略早,但也是在摸索中研究分析理论,特别是气藏动态分析方法、开发效果评价及开发水平分级评价方面均没有进行过系统的研究。国内牙哈凝析气田从 2000 年开始大规模循环注气保压开采,经过十多年开发实践,通过产学研结合研究,积累了大量宝贵的经验,建立了整套凝析气田循环注气开发相关理论及配套技术,均属国内首创;特别是首次发现了回注干气的超覆运动规律,其对类似气田的高效开发提供了新的理论基础,首次为循环注气开发凝析气藏的开发动态评价和开发水平分级建立了相应的技术手段和初步评价标准。

本书由江同文、朱忠谦、熊钰和阳建平合著,历经了四年时间。本书绪论、第 1~4 章由江同文、朱忠谦、阳建平、熊钰著,第 5~8 章由朱忠谦、熊钰著,全书由熊钰教授统稿。

本书的编著工作得到了中国石油塔里木油田公司、中国石油勘探开发研究院、西南石油大学、中国石油勘探开发研究院廊坊分院等单位领导和专家学者的指导、支持和帮助。同时,感谢孙安培、卢智慧、陈艳、丁钊、肖缙、石双等所做的部分研究工作,并对所有提供指导、关心、支持与帮助的单位领导和同事以及本书所引用参考资料的有关作者表示衷心的感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免存在错漏及不当之处,敬请读者批评指正。

著 者

2012 年 8 月

目 录

绪论	1
0.1 概述	1
0.2 国内外研究现状	2
0.2.1 关于地层凝析露点变化和气窜发生机理的研究现状	2
0.2.2 关于高温高压凝析气井井底压力计算的研究现状	3
0.2.3 关于反凝析污染对产能影响的研究现状	4
0.2.4 关于循环注气下动储量计算的研究现状	6
0.2.5 关于循环注气凝析气藏开发效果评价及采收率标定的研究现状	7
第1章 凝析气藏相态理论	8
1.1 相平衡理论	8
1.1.1 相平衡的基本概念	8
1.1.2 相平衡的计算	8
1.2 常用状态方程	11
1.2.1 范德华 (Van der Waals) 方程	12
1.2.2 Redlich 和 Kwong 方程 (简称 RK 方程)	13
1.2.3 Peng—Robinson 方程 (简称 PR 方程)	14
1.3 C_{n+} 馏分特征化	15
1.3.1 有 TBP 蒸馏实验数据的 C_{n+} 馏分特征化	15
1.3.2 没有 TBP 蒸馏实验数据的 C_{n+} 馏分特征化	16
1.4 本章小结	20
第2章 牙哈凝析气藏的基本特征	21
2.1 牙哈构造特征	21
2.1.1 牙哈地层层序	21
2.1.2 牙哈构造要素	21
2.2 牙哈沉积特征	23
2.3 牙哈岩石学特征	24
2.4 牙哈孔隙类型	25
2.5 牙哈储层物性特征	26
2.5.1 层内非均质性	26
2.5.2 层间非均质性	26
2.5.3 平面非均质性	27
2.6 牙哈储层综合类型	27
2.7 牙哈气藏特征	28
2.7.1 气藏温度压力系统	28

2.7.2 流体性质	30
2.7.3 气水关系	31
2.8 本章小结	37
第3章 注入气的运动规律与气窜动态	38
3.1 注入气的运动	38
3.1.1 组分梯度基本理论	38
3.1.2 注入气的驱替流动	40
3.1.3 注入干气的运动规律	41
3.2 气窜判断法	49
3.2.1 经验判断法	49
3.2.2 图版判断法	51
3.2.3 示踪剂判断法	54
3.3 本章小结	62
第4章 高温高压凝析气井井底压力的准确计算方法	63
4.1 井底压力计算的基本方法和原理	63
4.2 异常高温高压凝析气井井底压力计算耦合模型	66
4.2.1 模型假设	66
4.2.2 模型建立	66
4.2.3 模型求解	67
4.3 不稳定传热下的温度、压力耦合计算方法与改进	70
4.3.1 半稳定传热下的温度、压力耦合模型	70
4.3.2 非稳定传热下的温度、压力耦合模型	70
4.4 有水凝析气井的井底压力计算方法与改进	72
4.4.1 Hagedorn - Brown 方法与改进	72
4.4.2 气水界面张力的计算方法调整	76
4.5 本章小结	78
第5章 凝析气藏循环注气条件下气井产能评价方法	79
5.1 凝析气藏三区的特点	79
5.2 多孔介质中凝析油气两相渗流的数学模型	80
5.2.1 渗流微分方程	80
5.2.2 产能方程	83
5.3 基于油气两相流动区边界扩展的饱和度约束法	84
5.3.1 凝析气藏三区的拟压力方程	84
5.3.2 油气两相流动区的数学描述方程	85
5.3.3 动边界的求解	87
5.4 基于反凝析表皮系数法的产能试井解释方法	94
5.4.1 阻塞压降的计算	94
5.4.2 当量产量的计算	95

5.4.3 产能数据的处理	96
5.4.4 实例分析	96
5.5 本章小结	98
第6章 凝析气藏试井资料解释方法	99
6.1 凝析气藏三区油气分布理论回顾	99
6.2 凝析气井试井期间多相渗流特征	100
6.2.1 压力降落期间多相渗流特征	100
6.2.2 压力恢复期间多相渗流特征	101
6.3 凝析油分布对试井特征曲线的影响	103
6.4 复杂情况下的凝析油气井试井解释技术	105
6.4.1 循环注气凝析气井的异常及预处理	105
6.4.2 循环注气过程中不同阶段的试井处理方法	106
6.5 实例计算	111
6.5.1 YH2 井	111
6.5.2 YH23-1-6 井	115
6.6 本章小结	120
第7章 循环注气条件下的动储量计算方法	121
7.1 循环注气下的物质平衡方程	121
7.1.1 考虑注采比的物质平衡方程	121
7.1.2 有水气藏循环注气物质平衡方程	122
7.1.3 基于注采差异的物质平衡方程	124
7.2 基于水侵动态分析的储量计算方法	127
7.2.1 非线性物质平衡法	127
7.2.2 水体影响函数法	132
7.2.3 指示曲线法	133
7.3 本章小结	137
第8章 循环注气开发效果评价体系的建立	138
8.1 循环注气开发采收率的标定方法	138
8.1.1 影响采收率的因素	138
8.1.2 因素敏感性及参数团设计分析	141
8.1.3 数值模拟及采收率评价方法的建立	144
8.1.4 参数团曲面响应拟合的研究	146
8.1.5 凝析油采收率回归方程的建立	150
8.2 开发效果评价通用图版的建立	155
8.2.1 生产气油比评价图版	155
8.2.2 气窜程度评价图版	158
8.3 注气波及效率及利用率的分析	159
8.3.1 注气波及效率的计算方法	159

8.3.2 注气利用率评价的基本方法	164
8.4 循环注气开发效果评价指标	165
8.4.1 气藏地质参数指标的分析与筛选	165
8.4.2 相态评价参数指标的分析与筛选	167
8.4.3 气井产能评价参数的分析和筛选	168
8.4.4 气藏开发动态参数指标的分析与筛选	169
8.5 评价指标层次及级别研究	172
8.5.1 注采井开发效果评价指标分级研究	172
8.5.2 循环注气开发效果评价指标分级研究	175
8.5.3 循环注气凝析气藏综合开发水平评价	179
8.6 本章小结	181
参考文献	182

绪 论

0.1 概 述

在世界油气盆地范围内,具有大量的凝析气储量。据不完全统计,在地质储量超过 $1 \times 10^{12} \text{m}^3$ 的巨型气田中,凝析气田占 68%;在储量超过 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的大型气田中,凝析气则占 56%。1993 年我国在塔里木盆地库车构造带中发现了牙哈凝析气田,它是迄今为止我国发现和开发的埋藏深、压力高、凝析油含量丰富、高含蜡的凝析气藏,采用回注干气的方式进行注气开发,开发难度大。在国内外已有的凝析气田开发理论基础上,中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司结合国家“九五”、“十五”科技攻关研究,组织石油研究所和相关高校开展了 4 项专题 21 项子专题的研究,在此基础上,编制了牙哈凝析气田开发方案,并获得了成功实施,为我国注气开发凝析气田提供了更丰富、更全面的经验。随着开发的不断进行,由于在动态分析上缺乏相应的技术标准和要求,使其动态分析难以深入,造成生产管理上存在较大的困难。

与常规气田相比,深层凝析气藏的开发,由于压力和温度较高,导致井筒动态和井底压力的预测准确度偏低,使得在预测当井底流压低于露点压力时的产能时,产生较大偏离,生产过程中的气井产能测试异常而无法解释,导致难以准确分析由于近井地带凝析油的聚集而导致产能损失的程度,也难以正确分析气井的产能变化规律。即使采用了循环注气,但是随着生产的进行,在井筒附近仍然会出现反凝析现象。由于近井带凝析油聚集,使气井产能降低,而含油饱和度的大小和分布又很难确定,所以研究循环注气下凝析气井的产能成为一个难点。诸多学者主要采用干气方式处理或折算凝析油产量的计算方法,拟压力积分法和数值模拟方法也得到了一定的应用,其中又以两相拟压力法使用较多。但由于渗流过程中凝析油析出和堆积的机理还不太清楚,要定量描述很困难,因此如何正确评估凝析油析出对产能的影响是准确预测和评价凝析气井产能的关键。

为了减轻近井地带由于凝析油聚集而引起产能降低的问题以及较大地提高凝析气藏凝析油的采收率,主要采用循环注气保持压力开采(即把凝析气藏中采出的井流体进行分离,将分离出的干气重新注入凝析气藏)来减轻反凝析的影响。由于注入的烃类是采出物的轻质组分,而井流体包括气液两相,所以尽管采出与注入均为烃类流体,但这两种流体的组成和性质都存在较大差异。注入气的运动规律和驱替混合规律,除直接影响回注的保压效果和凝析油采收率外,还对动储量的计算产生较大影响。例如,在用物质平衡方程计算循环注气下的凝析气藏储量时,若直接将采出的凝析油折气后加上采出的干气,并扣除注入干气的值作为产气量,其计算结果与实际情况将存在很大的偏差。准确评价循环注气开发动态储量是正确评价开发效果的又一关键问题。

在大多数情况下,由于气体的黏度小,气驱过程中往往会发生严重的指进,导致气体在生产井中过早突破,降低了波及效率。因各单井注采井距、储层物性等方面都存在差异,各采气井气窜时间也不同,因此,为提高循环注气的整体开发效果,如何判断注气前缘是否突

破，并对相应的采气井进行生产、注入的调整显得尤为重要。同时由于凝析油气采收率的标定结果会直接影响我们的开发决策、动态分析及开发方案的调整，因此，建立一个能适用于循环注气凝析气藏凝析油气采收率的标定方法，对凝析气藏开发方案的制订和开发动态的分析有着重要的意义。

在现有的国外文献中，对凝析气藏的开发研究主要集中在 20 世纪 90 年代，大多数专家学者针对凝析气藏循环注气开采的研究主要集中在数值模拟预测、方案设计研究上，对动态分析的研究主要还是基于凝析气藏的组分数值模拟，系统地建立凝析气藏循环注气开发气藏动态分析理论和方法还较少或是没有进行过系统的整合研究工作。因此，探索并建立一套适用于循环注气，特别是关于高温高压井筒动态分析、凝析气井产能、动态储量的核查、凝析油可采储量和采收率的标定以及循环注气开发效果评价方法等系统的理论和方法，并形成相应的开发评价体系，对合理分析循环注气下凝析气田的开发动态具有明显的科学和工程实用价值。

0.2 国内外研究现状

循环注气开发的凝析气田通常都是将气田本身产的天然气经过凝析油回收和处理后，再回到气层。对于凝析气田来说，注气主要是保持地层压力，以免在开发过程中随着地层压力的下降，导致凝析油析出，造成凝析油的采出量减少，从而提高凝析油采收率。对于原油来说，注气最重要的机理之一就是注入气从油中汽化、萃取中间烃和轻质组分或注入气中的中间气态烃凝析到地层油中，达到非混相或混相状态，而循环注气的主要目的是保持地层压力，降低反凝析损失。凝析气藏循环注气时，从相态的角度来看，注入的干气与地下湿气（凝析气）混合后，使地层中的气体干度增加，从而使地层湿气中的凝析油量下降，使地层中反凝析现象减弱，甚至消失；从注气的运动角度来看，在较低的驱替压力梯度下，注入气在地层中的运动主要以热扩散、弥散为主，在较高的驱替压力梯度下以驱替运动和热扩散为主，在注入气驱替地带可能汽化反凝析油，在低驱替带主要靠保压作用来减少凝析油的析出。

0.2.1 关于地层凝析露点变化和气窜发生机理的研究现状

注干气开发凝析气藏，始于 20 世纪 30 年代的美国，现已成为成熟的开发技术。但在循环注气过程中，关于地层中气体的露点压力变化情况，还没有统一的认识。一部分研究者认为由于注入的干气会使地层凝析气的露点压力升高，另外一部分研究者认为注入干气会导致地层中凝析气的露点压力降低。

在关于气窜发生机理方面的认识主要停留在高渗薄层（thief zone），即认为注气井到生产井的气窜是因为注入井到生产井之间存在渗透率比储层平均渗透率高得多的薄层或是高导裂缝。一直到 2006 年 S. R. Shadizadeh（SPE99647）的研究、2010 年 B. Moradi（SPE13280）和 2011 年的 Indra Gunawan 等人（SPE145928），他们都认为高渗层是气窜的主要原因。S. R. Shadizadeh 主要采用人工裂缝岩心进行了关于裂缝性凝析气藏注气实验模拟，认为均质地层中高注入速度可提高凝析油采收率，裂缝性储层会导致气藏采收率降低，基质渗透率低时会导致早期气窜。同时，在国内的一些研究中，参考注气提高采收率方面的

研究也倾向于气体的气窜形成主要是由于高渗条带的存在使注入气沿高渗薄层的快速窜进。很少有学者在注入气的运动描述方面考虑组分梯度和重力超覆等的共同作用。

还有部分学者认为注入干气和地层凝析气是一种混相驱替问题,存在气驱前缘。因此,在实际工作中通常采用微地震等方法来检测气驱前缘的运动过程,并以此来推断气窜发生的方向和方位。对于气窜的判别没有一种统一的方法和标准。

0.2.2 关于高温高压凝析气井井底压力计算的研究现状

在异常高温的凝析气藏动态分析中,准确获得生产井的井底流压是准确评价气井动态、讨论气窜的主要信息来源之一。在考虑井筒传热方面,稳态换热方法是早期最常用的热交换计算方法,但在现场应用中与实际情况经常相差甚远。20世纪70年代,国外开始用非稳态方法计算换热量,该方法假设井筒温度是常数,提出了计算非稳态换热系数的一些经验公式,尽管现在有些仍被使用,但其局限性也很明显。

国内很多学者考虑井筒温度变化,提出了多种井筒与地层非稳态—瞬态换热的数值计算方法,但效果不甚理想,主要是由于异常高温高压气井关井过程中井筒温度并不恒定。针对这种情况,1995年冉新权等研究了高产纯气井井口压力动态异常机理及处理方法,认为续流和井筒储存效应的双重作用导致了井筒中的流体性质的显著改变,因此引入了相态闪蒸法来预测井筒中的流体性质,用井筒不稳定传热考虑井筒温度变化,取得了一定的成功,但没有考虑压力、温度、相态耦合情况。朱德武等在1998年针对凝析气井温度分布进行了研究;1999年,毛伟等在前人成果的基础上,研究了计算气井井筒温度、压力耦合的分析方法,但同样没有考虑相态变化;2002年喻西崇等研究了计算深部凝析气井井底压力计算模型,模型中考虑了流体相态和组分变化,但对井筒传热的考虑不够深入;近年来,廖新维、王晓影、杨雄文、郭春秋等也对井筒内流体温度剖面计算进行了相关研究。

气井井筒内流体相态及温度分布预测研究方面,国外在1991年A. R. Hasan等的文献中已经有了报道。在此之后,A. R. Hasan和C. S. Kabir等又陆续发表相关文献,论述了井筒两相流情况下的井筒热传递问题,并给出了井筒热流体能量平衡方程式以及热传递计算数学模型,但该研究很少涉及凝析气井的相态问题。1999年以及2000年L. Fan等研究了考虑传热影响的高温高压气井压力恢复测试的半解析解模型,用解析解和数值解相结合的方法研究了高温高压气井压力恢复异常的机理,该文献具有重要的参考价值,但遗憾的是该文献没有涉及凝析气井方面的论述。2003年Ryo Manabe等发表了垂直气液两相流热传导机理模型研究的文章,从实验研究的角度研究了不同流态下的气液两相热传导机理,但他们研究的是低压地面管道的热传导研究。此外,还有Y. V. Fairuzov, Hani Elshahawi, Shie - Way Wang, Song Wenjie, Arild Fossa, Boyun Guo, H. Bahrami, S. Livescu, Lincoln Paterson等都各自发表了关于井筒内传热的文章。

目前国内外使用公认较好的井底压力计算方法,有平均温度和平均偏差系数方法、Cullender和Smith计算方法。气井井底压力的计算经历了以下主要历程:

1945年Rzasa和Katz在假设整个井筒的气体温度和气体偏差系数为常数的条件下,选取井筒中气体平均温度 and 对应平均温度下的偏差系数进行气井静压计算,该方法通常称为平均温度和平均偏差系数方法。

1955年Sukkar和Cornell,在仅假设整个井筒的气体温度为常数的条件下,利用拟对比压力关系,编制了对比温度 and 对比压力条件下的数值积分表,利用此表可以进行气井静压

计算,该方法通常称为 Sukkar 和 Cornell 计算方法。

1956 年 Cullender 和 Smith 在假设整个井筒的气体温度、气体压力和气体偏差系数都不是常数的条件下,将井筒分为两段,通过积分方法来计算井底压力。该方法的最大进步是考虑了井筒中的温度和压力分布,从而成为一种使用范围较大的方法,该方法通常称为 Cullender 和 Smith 方法。

1974 年 Messer 将 Sukkar 和 Cornell 的思想进行发展,并利用了当时刚刚发展成熟的 DPR 高温气体 pVT 物性计算方法,将常规气井井底压力的计算方法发展推广到高温高压气井中,从那时起才真正有了高温高压气井的井底压力计算。在该方法中沿用了 Sukkar 和 Cornell 的对比压力 and 对比温度的关系,并将数值积分范围扩大到了 p_r 为 30 的范围,一般将此方法称为 Messer 方法。

1988 年 Redeiro 提出了考虑液相折算的修正平均温度和平均偏差系数方法。

国内在气井压力研究方面,早期主要利用单一计算公式进行计算,考虑因素相对较少。近年来随着凝析气藏的开发深入,在压力计算方面也开展了较多的研究工作。

喻西崇等在 2001 年,对凝析气藏气井的压降和温降进行了深入研究。2004 年,孙福街等对深层高温高压凝析气井压力分布提出了简便算法,在计算偏差系数上采用了流体相平衡理论。

另外,常志强等在 2005 年发表关于高温高压凝析气井内动态分析方法的文章。此方法通过气液比的大小,判断出拟单相流的计算方法适用于此类气藏,并采用平均温度系数法对各参数进行校正计算。

2006 年朱炬辉等对凝析气井井筒压力在相态变化影响下的变化进行了分析,重点研究了凝析液析出引起气液两相的质量传递问题。

在其他文献中,也针对井筒内流体压力分布计算给出了相关的研究内容。纵观现有国内外文献,多数学者均是从某一方面来讨论异常高温高压凝析气井的井筒物性参数计算,没有把续流、温度传热、相态和相关参数在高温高压下的特性等多方面综合起来研究。因此为了准确描述异常高温高压凝析气藏井筒内温度、压力的分布特征,在计算井底压力时必须考虑温度变化、流体相态分布、流体高温高压特性以及压力、温度耦合的影响,在机理研究的基础上建立相应的数学模型。

0.2.3 关于反凝析污染对产能影响的研究现状

1949 年 Muskat 在讨论循环注气的目的在于研究凝析堵塞问题时,引入了一个估算凝析堵塞半径的简单公式(堵塞半径为时间、产量、气藏岩石和流体性质的函数)。1967 年 O' Dell 和 Miller 首次给出了利用拟压力描述凝析堵塞的产能方程,但该方程对气藏压力显著高于露点压力时才有效。1973 年 Fetkovich 利用 Musket 的结果导出了一个依赖流量和时间的表皮系数,并把它用于标准产能方程。Fussell 利用径向组分模型,经研究表明:O' Dell—Miller 方程显著高估了凝析堵塞所造成的产能损失。

1995 年 Fevang 等人提出了随着井底流压降低,将凝析气井的流动区域分为三个区,并且采用简单的产能方程准确地预测出了凝析气井的产能。2000 年 Fawzi M. Guehria 等人提出了一种新的流入动态模型去预测衰竭式开发的凝析气井 IPR 曲线,他提出采用物质平衡来计算凝析气井的产能。这两个人都提出了计算衰竭式开发下凝析气井的产能方程,但他们都没有考虑循环注气的开发方式。2002 年 D. Marokane 等人提出了适时对凝析气藏进行注气

能够提高产能的观点，他提出将流动区域分为四个区，与 Fevang 等人提出的三个流动区域不同的是，他将近井地带（气液两相流动区域）划分为两个区域，多了一个由于凝析气的高速流动而引起低界面张力导致凝析油饱和度的降低区域。他通过在生产的不同时刻进行注气，发现随着注气时间的增加，最大临界饱和度也会逐渐降低。到注气末期，井筒附近将不再存在凝析气油两相流动区域。但他并不是采用油藏工程方法，而是采用数值模拟方法来进行预测的。

2001 年谢兴礼等人提出了凝析油气两相流的一个定解问题，并求得了给定时刻拟稳态形式的解析解。他提出的这个方程是个考虑因素较全的产能方程，其方程的达西项是一个拟稳态方程，其拟压力积分包含了自由凝析油、自由凝析气和溶解凝析油、溶解凝析气这四个部分的影响，此外该产能方程还包含了非达西项。但是求解该方程的油气两相流动区边界压力时，并没有考虑凝析油逐渐扩展这一特点。

2002 年 Sarfraz. A 等人也建立了凝析气井的流入动态关系式，通过对压恢试井过程中关井的瞬时压力进行积分来计算气井的产能。该方法避免了采用相渗曲线，因为试井数据可以用来估算油气相的有效渗透率，但他也没有考虑循环注气。

2003 年 K. Jessen 等人对凝析气藏循环注气过程中的混相能力和干气驱替前缘做了详细的分析，他指出采用一维的半解析方法来计算注气增加的凝析油采收率，通过半解析方法能够得出最佳的注入气量。该方法与细网格数值模拟模型的结果基本一致，然而数值模拟模型却不能反映凝析油聚集的影响。

2005 年 Vincent O. Eme 等人提出采用一种回归出的经验式方法去预测气井的产能，仅仅简单的几步就能求解出产能：

- (1) 根据 Coates 提出的公式估算气井的渗透率；
- (2) 通过回归得到各种油管尺寸下渗透率与原始气产量的关系式，从而得到原始气产量；
- (3) 回归得到不同井口压力下校正过的产气量与地层压力之间的关系式，得出不同井口压力对应的产气量；
- (4) 通过物质平衡方程得到累积产气量和累积生产时间；
- (5) 从定容衰竭（CVD）实验中得到相对气油比与相对压力之间的关系，求得凝析气油比，最终可算出凝析油含量。

这种方法固然简单易行，但不一定适用于每一个凝析气井，有时也会出现一些偏差。

2007 年朱绍鹏等人进行了反凝析对凝析气井产能的影响研究，他指出反凝析的存在对凝析气井产能影响严重，使得二项式产能方程比实际储层的产能要小，有时相差甚至会超过 30%，所以需要寻求新的合理的凝析气井产能方程。

2008 年 Nitin Chowdhury 等人采用半解析法来预测凝析气井的产能。在近井区域，井底流压和平均地层压力被假设为常数，由近井区域的油气相对渗透率控制。采用分相流理论来进行计算，每一相的饱和度和相对渗透率能通过相对渗透率模型计算出来。他指出用半解析法去建立凝析气井的产能模型能够更加准确地反映近井地带凝析油聚集的影响。采用这种方法建立的粗网格组分模型与达到稳态后运用细网格模型得到的产能一致，然而采用的也是数值模拟方法而不是油藏工程方法，并且没有考虑循环注气这一特殊的开发方式。

0.2.4 关于循环注气下动储量计算的研究现状

在循环注气的开采方式下,直接采用气藏物质平衡方程进行动储量核实将出现很大的偏差。针对这种情况,需要将气藏的物质平衡方程进行改进,以得到凝析气藏在注气开发方式下的物质平衡方程。但要想得到正确的循环注气下的凝析气井单井的控制储量,就必须首先判断出单井的气窜量。

1997年钟太贤等人提出了循环注气对凝析气藏凝析油的再蒸发作用,采用数值模拟研究并对柯克亚凝析气藏X₁(3)循环注气试验区现场注气后的情况进行了具体分析,得出凝析气藏循环注气可以使地层中的部分凝析油重新蒸发采出地面的结论,所以必须要考虑循环注气对凝析气井中凝析油的再蒸发作用。

2000年在柯克亚凝析气田先导试验区李玉冠等人提出利用气油比变化率超过20%和井流物中C₅₊含量降低45%来判断气窜;注入量的调整对气窜井效果不明显,应大幅度降低采气量或调整采气井网;对注气井防喷,可以有效地解除井底污染。但这种判断仅仅是通过柯克亚凝析气田数模得出的结果,可以算做是一种经验判断,却并不一定适用于其他凝析气田。

2002年生如岩等人提出了广义物质平衡计算方程,他提出的广义物质平衡计算方法,可用于黑油、干气藏、挥发油气藏和凝析气藏。该方法虽然适用性较广,但并没有考虑循环注气过程中注采的差异,因此不适用于循环注气下的凝析气井。

2004年杨广荣等人在考虑不同地层压力下,因井流物组分不同而引起的气体偏差因子变化和井流物相对密度不同而引起的气体当量体积变化这两个影响因素的基础上,提出了改进后的压降法,但该方法并没有考虑循环注气。程时清等人考虑了凝析气藏反凝析和产水的三相流特点,根据物质平衡方程,引入气、油、水三相流拟压力,建立了三相流产能方程。但该方法并没有考虑凝析油的扩展。

2005年唐恩高等人提出了裂缝性凝析气藏油气渗流机理,它与常规凝析气藏的不同之处在于循环注气开发过程中将表现出不同的开采特征,因此建立了考虑裂缝油气毛细管力影响的裂缝性凝析气藏循环注气数学模型。结果表明在注气驱替凝析油过程中,毛细管力表现为阻力作用,采用较低的注采比更有利于提高裂缝性凝析气藏的开发效果。陈玉祥等人提出了凝析气藏物质平衡方程新方法,该方法考虑了储层流体的组分、相态变化特征和干气、凝析油两相因素,而且还引入了凝析油体积系数这一概念,但该方法并没有考虑循环注气这一开发方式。

2006年张烈辉教授提出了一种新的凝析气井产能方程确定方法,他提出将凝析油气两相指数式方程中的拟压力积分分解为两个积分函数之积,一个积分函数与流体高压物性有关,另一个积分函数与流体有效渗透率有关,但该凝析气井产能方程也未能考虑凝析油的逐渐扩展。石德佩等人在稳态理论基础上,建立了考虑相态变化的多相流产能方程,在方程中引入了油气两相拟压力函数,从而计算出随压力分布的合理储层参数。魏云峰等人通过对柯克亚气田的井口油压、气油比、井流物中C₅₊的变化进行规律性总结,结合干气波及系数归纳出了判断注气前缘突破的4种方法,这些方法都是通过对柯克亚气田进行数值模拟得出的判别标准,该标准具有较好的通用性。

0.2.5 关于循环注气凝析气藏开发效果评价及采收率标定的研究现状

在凝析气藏循环注气开发效果方面,以前国内外的研究均把主要注意力放在了采收率的

评价上,对注气驱替过程中的措施调整评价也主要放在采收率的改善和提高上,缺乏类似于水驱效果评价一样的系统性研究,即使是在凝析气藏凝析油采收率计算方面,研究也相当少。

1965年,B. A. Eaton和R. H. Jacoby利用美国27个凝析气藏的 pVT 试验分析资料以及凝析气田完井测试的原始地层压力、地层温度、原始气油比和凝析油的相对密度等资料,在进行消耗式(即压降式)开采的动态计算之后,应用多元相关分析和回归计算,提出了确定的地下储层单位孔隙体积内天然气和凝析油的原始储量以及在消耗式开发条件下凝析油可采储量的相关经验公式。但是该方法不能用于计算循环注气下的凝析油采收率。直到在20世纪90年代后才陆续开始出现循环注气这种开发方式,又由于循环注气开采方式的特殊性,对循环注气凝析油采收率的计算公式很少。

2003年,杨广荣等通过分析大港油田凝析气藏的现场资料,对影响凝析油采收率的主要因素逐一回归,得出了4种计算凝析气藏凝析油采收率的公式。但是这4种方法都是根据衰竭式开发下单因素回归出来的采收率公式,不能反映各因素相互共同作用时的凝析油采收率变化。

2005年,C. S. Kabir在衰竭式开发干气采收率的基础上研究了凝析气藏凝析油气的采收率,提出了凝析油含量、渗透率、回注比和注采井距影响下的凝析油采收率,但是其标定结果小于实际开发中的凝析油采收率,如牙哈23的 N_{ij} 层目前已采出39%,而用该方法的标定结果为40%,这显然是不合理的。

第 1 章 凝析气藏相态理论

凝析气藏油气相态是开发的基础，在开发初期可用于油气藏类型的判断、储量计算、凝析气田地层反凝析油损失量的估计，从而为确定合理开发方式、提高凝析油采收率提供依据；在动态分析方面，可用于研究多相多组分烃类流体的渗流规律，为试井解释分析、气井产能分析提供依据。

1.1 相平衡理论

1.1.1 相平衡的基本概念

在一个烃类体系中，当多相处于平衡状态时，从宏观上来看，它们随时间的变化，观察不到任何客观上的变化时（换句话说，就是体系的性质不随时间而变化），这种状态就是相平衡状态。实际上，从微观上看，在平衡的气—液相界面附近，动能高于平均值较多的分子会克服液相表面的吸引而逸出，并进入气相中；反之，在气相中能量较低的分子在碰撞液相表面时也会进入液相中。只不过在平衡状态下，两个方向的分子传递速率相等而已。

从热力学观点来看，即当体系中气—液两相平衡时，每一项中各处的温度和压力一定是均匀的，而且两相的温度和压力是相等的。根据热力学第二定律，处于相同温度和压力的多相体系，平衡时各相中任意种组分在各相中的化学势相等。对气—液平衡体系来说：

$$\mu_{ig} = \mu_{il} \quad (1.1)$$

式中 μ_{ig} 、 μ_{il} ——分别为气、液相中组分 i 的化学势。

由于在恒温下，逸度 f_i 与化学势存在如下关系：

$$d\mu_i = RT d\ln f_i \quad (1.2)$$

根据上述定义，当系统处于平衡条件时，式 (1.2) 可以写成：

$$d\mu_{ig} = d\mu_{il} \quad (1.3)$$

$$RT d\ln f_i^g = RT d\ln f_i^l \quad (1.4)$$

所以

$$f_i^g = f_i^l \quad (1.5)$$

式中 f_i^g 、 f_i^l ——分别为气、液相混合物中组分 i 的逸度。

处于相同温度和压力的相平衡体系中，每一组分在两相中的逸度必定相等，这就是相平衡必须满足的条件。

1.1.2 相平衡的计算

要建立适合凝析气藏烃类体系的相平衡计算物料平衡方程，首先应给出以下基本假设条件：开发过程中，油气层温度保持不变；烃孔隙空间是定容的，即忽略岩石膨胀对烃孔隙空

间的影响；孔隙介质表面润湿性、吸附和毛细管凝聚现象对油气体系相态变化的影响可忽略不计；气藏中任一点处油气两相间的相平衡过程可在瞬间完成。

在气—液两相烃类系统中，假设 F 代表烃类系统的总的物质的量， V 代表系统中平衡条件下气相的物质的量， L 代表系统中平衡条件下液相的物质的量，则物质平衡方程表达式如下：

$$F = V + L \quad (1.6)$$

若假设 Z_i 表示某一组分 i 在整个体系中的摩尔分数； y_i 表示组分 i 在气相中的摩尔分数； x_i 表示组分 i 在液相中的摩尔分数，则其物质平衡方程如下：

$$Fz_i = Vy_i + Lx_i \quad (1.7)$$

为方便起见，假定 $F=1\text{mol}$ ，式 1.7 变为下列形式：

$$z_i = Vy_i + Lx_i \quad (1.8)$$

气—液平衡体系如图 1.1 所示。

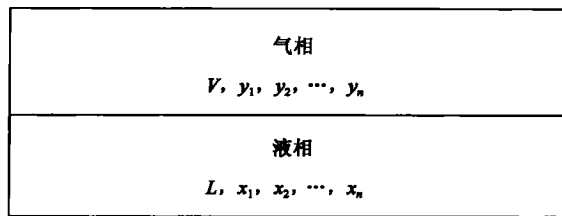


图 1.1 气—液平衡体系

平衡气液相的组成 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 及 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 应分别满足组成归一化条件：

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1 \quad (1.9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (1.10)$$

或

$$\sum_{i=1}^n (y_i - x_i) = 0 \quad (1.11)$$

任一组分在平衡气液相中的分配比例可用平衡常数来描述，平衡常数 K_i 等于相平衡中平衡比的概念：

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (1.12)$$

将式 (1.12) 代入式 (1.11) 得：

$$x_i = \frac{z_i}{1 + (K_i - 1)V} \quad (1.13)$$

$$y_i = \frac{K_i z_i}{1 + (K_i - 1)V} \quad (1.14)$$

在平衡条件下，某一组分在气相及液相中的摩尔分数之和应等于 1，即：

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{1 + (K_i - 1)V} = 1 \quad (1.15)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \frac{K_i z_i}{1 + (K_i - 1)V} = 1 \quad (1.16)$$