

DISHUI YOU CANG SHUI PING JING KAICAI  
DONGTAI FENXI FANGFA

郭 肖 / 编著

# 底水油藏水平井开采 动态分析方法



科学出版社

# 底水油藏水平井开采 动态分析方法

郭 肖 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书针对底水油藏水平井开采存在的主要问题,通过大量计算实例提供水平井开采底水油藏动态分析方法。具体内容包括:底水油藏水平井产能公式、水平井脊进机理、水平井临界产量公式、水平井见水时间、产量递减及含水上升规律以及底水油藏流线模拟研究。

本书可供从事油气田开发研究人员、油藏工程师以及油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

底水油藏水平井开采动态分析方法 / 郭肖编著. —北京:科学出版社, 2014.10

ISBN 978-7-03-042143-2

I. ①底… II. ①郭… III. ①底水油气藏-水平井-石油开采-动态分析-分析方法 IV. ①TE349

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 247378 号

责任编辑:张展罗莉 / 责任校对:邓利娜  
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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年10月第一版 开本:720×1000 B5

2014年10月第一次印刷 印张:9

字数:182千字

定价:45.00元

## 前 言

底水油藏在我国占有相当大的比例，水平井由于具有生产压差小、泄油面积大，并且能够有效抑制含水上升的特点，因此被广泛应用于开发底水油藏。但是目前采用水平井开采底水油藏尚存亟待解决的问题，如水平井产能公式预测结果与实际相差较大，临界产量计算值难以应用于实际以及含水上升和产量递减规律难以确定等。

本书针对底水油藏水平井开采存在的主要问题，通过大量计算实例提供了水平井开采底水油藏动态分析方法。具体内容主要包括：底水油藏水平井产能公式、水平井脊进机理、水平井临界产量公式、水平井见水时间、产量递减及含水上升规律以及底水油藏流线模拟研究。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“十二五”国家油气科技重大专项“高压水侵气田高效开发机理及高压气井压力系统监测方法”（2011ZX05015-002）资助和“高含硫气藏安全高效开发四川省青年科技创新研究团队”（2014TD0009）的支持，本人研究生唐林和张梦黎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，中海石油（中国）有限公司湛江分公司雷霄对第七章第五节提出了宝贵建议，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，以便今后不断对其进行完善。

编 者

2014年8月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 底水油藏开发存在问题 .....	1
第二节 底水油藏水平井产能及其合理参数研究进展 .....	2
一、水平井产能研究进展 .....	2
二、底水油藏临界产量研究进展 .....	6
三、产量递减模型研究进展 .....	8
四、水驱特征曲线研究进展 .....	9
第三节 流线模拟研究进展 .....	10
一、国外流线数值模拟方法研究进展 .....	10
二、国内流线数值模拟方法研究进展 .....	11
第四节 章节内容安排 .....	12
第二章 底水油藏水平井产能公式 .....	13
第一节 目前常用的底水油藏水平井产能公式 .....	13
一、Joshi(1988)公式 .....	13
二、程林松-范子菲(1993)公式 .....	14
三、窦宏恩(1997)公式 .....	15
四、陈元千(2008)公式 .....	15
第二节 底水油藏水平井产能公式的建立 .....	15
一、水平面内的产量 .....	15
二、垂直面内的产量 .....	17
三、底水油藏水平井产能公式 .....	18
第三节 底水油藏水平井产能公式的校正 .....	19
一、考虑各向异性的修正方法 .....	19
二、考虑地层非均质性的修正方法 .....	20
三、考虑表皮因子的修正方法 .....	21
四、考虑多相流的修正方法 .....	22
五、考虑井筒摩阻的修正方法 .....	22
第四节 各产能公式分析对比 .....	24

一、实例计算结果分析 .....	24
二、底水油藏产能影响因素分析 .....	26
三、敏感参数正交分析 .....	29
<b>第三章 底水油藏水平井脊进机理 .....</b>	<b>34</b>
第一节 底水油藏水脊稳定条件 .....	35
第二节 底水脊进机理 .....	36
一、常规地层的底水脊进 .....	36
二、带隔夹层的底水脊进 .....	37
<b>第四章 底水油藏水平井临界产量公式 .....</b>	<b>38</b>
第一节 目前常用的临界产量计算模型 .....	38
一、修正 Chaperon 方法 .....	38
二、Efras 方法 .....	39
三、Giger-Karcher 方法 .....	40
四、Ozkan 方法 .....	40
五、Joshi 方法 .....	40
六、窦宏恩方法 .....	41
七、程林松-范子菲方法 .....	41
第二节 水平井临界产量公式的建立 .....	41
一、地层中不带隔板时的临界产量公式 .....	41
二、地层中带隔板时的临界产量公式 .....	42
第三节 实例计算及影响因素分析 .....	48
一、实例计算 .....	48
二、影响因素分析 .....	49
第四节 水平井合理参数优化 .....	54
一、水平井垂向位置优化 .....	55
二、水平井水平段长度优化 .....	57
<b>第五章 底水油藏水平井见水时间 .....</b>	<b>60</b>
第一节 常见水平井见水时间计算方法 .....	60
一、程林松公式 .....	60
二、Papatzacos 公式 .....	60
第二节 影响因素分析 .....	61
一、日产液量 .....	61
二、水平段长度 .....	61

三、避水高度 .....	62
四、油层厚度 .....	62
五、水平渗透率 .....	63
六、地层各向异性比 .....	63
七、夹层位置 .....	64
八、夹层面积 .....	65
<b>第六章 底水油藏产量递减及含水上升规律 .....</b>	<b>66</b>
第一节 底水油藏水平井产量递减规律 .....	66
一、常用产量递减模型 .....	66
二、产量递减模型优选 .....	74
第二节 底水油藏水平井含水上升规律 .....	76
一、常用水驱特征曲线 .....	76
二、水驱特征曲线优选 .....	80
第三节 产量递减模型和水驱曲线联解 .....	81
一、广义翁氏模型和水驱特征曲线的联解模型 .....	81
二、HCZ 模型和水驱特征曲线的联解模型 .....	81
第四节 水侵量计算公式推导 .....	87
一、水驱特征曲线油水渗流关系推导 .....	87
二、水侵量计算模型的建立 .....	89
三、水驱曲线法的应用方法 .....	90
<b>第七章 底水油藏流线模拟 .....</b>	<b>93</b>
第一节 底水油藏油水两相流线法渗流数学模型 .....	93
一、模型假设 .....	93
二、基本微分方程 .....	93
三、渗流方程 .....	94
四、流线方法模型的辅助方程 .....	94
五、渗流模型的初始条件及边界条件 .....	95
第二节 底水油藏流线模型的压力方程及其数值求解 .....	95
一、压力方程 .....	95
二、流线模型压力方程的数值求解 .....	96
三、压力方程组的数值求解 .....	97
第三节 速度场及流线轨迹的确定 .....	97
第四节 流线模型的饱和度方程及其数值求解 .....	99
一、传播时间(TOF)的定义 .....	99

二、流线模拟中饱和度方程的建立 .....	99
三、流线模型饱和度方程数值求解 .....	100
第五节 底水油藏流线模拟实例 .....	103
一、三维地质模型建立 .....	104
二、网格模型的建立 .....	104
三、流体、相对渗透率参数及动态数据准备 .....	105
四、静态储量拟合 .....	107
五、动态历史拟合 .....	108
六、剩余油分布特征分析 .....	110
七、调整方案及开发指标预测 .....	117
参考文献 .....	129



# 第一章 绪 论

## 第一节 底水油藏开发存在问题

国内外各大油田中均含有大量的底水油藏，尤其在我国的华北油田、冀东油田、渤海油田、东海平湖油田以及新疆的塔河油田、克拉玛依油田、塔里木油田等均存在着大量的天然底水油藏。除此之外，很多油田在进入二次开采阶段之后，其开发特征也和底水油藏极为相似。

直井和水平井是开发底水油藏时所常采用的两种井型，但两者的开发动态却存在差异。直井开发底水油藏时，油井与油层是点接触的关系，在直井的底部会形成一个水锥，油藏的水侵方式以“锥进”为主，水侵速度较快；而运用水平井开发底水油藏时，油井与油层的接触方式是线接触关系，在水平井底部会形成一个水脊，此时，油藏的水侵方式以“脊进”为主。与直井相比，水平井具有如下优势：①增大油井和油藏的接触面积；②提高底水的波及范围和油田的采收率；③减弱底水的锥进趋势。因此，水平井是目前开发边、底水油藏最有效的手段之一，并且应用十分广泛。但利用水平井开发底水油藏过程中，仍然存在一些尚待解决的问题，主要有以下3方面的问题：

(1) 运用目前已有的底水油藏水平井产能模型对油藏产能进行评价时，发现模型的计算结果和实际产能差别较大，但原因不详；

(2) 目前理论上计算的底水油藏临界产量一般远少于油井的经济极限产量，现场实践很少会依照底水油藏的临界产量作为油井的工作制度；

(3) 水平井见水之后，含水上升速度快，产量递减迅速，但目前对含水上升规律和产量递减规律较难把握。

因此，如何有效预测底水油藏水平井的产能、确定合理的生产参数以及准确把握油井产量递减规律和含水上升规律对底水油藏的开发显得尤为重要。本书在以往各类水平井产能公式研究的前提下，建立了一个新的底水油藏水平井产能公式，并对水平井开发底水过程中的合理生产参数进行确定。又在前人对水驱特征曲线和产量递减规律的研究成果上，深入研究底水油藏的含水上升规律和产量递减规律，并利用二者的联解模型对油井的生产动态进行有效预测。

## 第二节 底水油藏水平井产能及其合理参数研究进展

### 一、水平井产能研究进展

水平井技术的概念是在 1928 年提出的,到 20 世纪 40~70 年代,美国、苏联等国家陆续打了一些水平井,试验的效果比较理想,其后,水平井技术得到了非常快速的发展。解析法和数值模拟方法是油藏水平井产能研究的两种重要方法,其中解析法是研究产能方程最基础和最直接的方法。解析法主要包括:①直接建立数学模型求解;②镜像反映原理;③等值渗流阻力法;④势函数的叠加方法。运用这些方法需满足两个条件:①地层流体是单相流;②流体是稳定流。数值模拟方法是利用数值模拟软件,模拟出水平井的产能、压力变化等。常用的数值模拟软件有 Eclipse、CMG、VIP 等。

根据文献调研,按不同油藏地质条件,目前常用的水平井产能计算方法主要包括:

- (1)顶、底封闭油藏水平井产能计算方法;
- (2)气顶油藏水平井产能计算方法;
- (3)边水油藏水平井产能计算方法;
- (4)气顶底水油藏水平井产能计算方法;
- (5)底水油藏水平井产能计算方法。

#### 1. 顶、底封闭油藏水平井产能计算方法研究

1958 年,苏联学者 Merkulov<sup>[1]</sup>最早发表论文对水平井产能公式的解析式作了详细研究。

1984 年, Borisov<sup>[2]</sup>系统归纳总结了水平井、斜井的发展历程与生产原理,建立了水平井的稳态产能模型,由此拉开了水平井产能方法研究的序幕。同年, Giger, Reiss 和 Jourdan<sup>[3,4]</sup>等人在 Borisov 公式的基础上,运用电模拟方法,对水平井油藏工程进行了相关研究,建立了水平井产量新公式,研究了地层非均质性和渗透率各向异性对油井产能的影响。对低渗透油藏, Giger<sup>[5]</sup>也采用类似的方法研究了压裂后水平井的产能,并给出了水平井的渗流场和压降的分布状况。

1988 年, Joshi<sup>[6-9]</sup>假设:①油藏均质;②地层各向同性。利用势的叠加理论将水平井渗流问题近似为垂直面和水平面内的二维平面渗流问题,得到水平井的稳态产能公式。同时在 Muskat<sup>[10]</sup>的研究基础上,考虑油井偏心距和地层各向异性的影响,对水平井产能方程进行修正,目前 Joshi 公式在油田的实际生产过

程中应用很广泛。Mutalik 和 Godbole<sup>[11]</sup>通过建立物理模型提出了矩形封闭油藏水平井位于矩形中心或偏离中心时的拟稳态的产量计算公式。

1989年, Babu<sup>[12]</sup>假设油藏上、下为封闭边界, 油藏的泄油面积为盒形, 提出了三维不稳定渗流条件下水平井的数学模型, 并利用物质平衡原理, 得到了水平井拟稳态产能公式, 该模型综合考虑了地层各向异性、水平井段垂向位置和油井的打开程度等因素的影响, 具有一定的使用价值, 但 Babu 模型的推导过程比较复杂, 实际应用效果也并不理想。

1991年, Mukherjee<sup>[13]</sup>运用等效井筒半径建立了无因次井筒半径与无因次裂缝半长、无因次裂缝导流能力的关系式, 得到了等效井筒半径和裂缝半长的关系式。在 Joshi 和 Giger 的研究成果之上, Renard 和 Dupuy<sup>[14]</sup>考虑表皮因子的影响, 对产能方程进行校正, 分析了水平井附近地层的伤害对产能的影响程度。研究表明, 相同情况下, 水平井受地层伤害的影响要比直井小。在地层受损的情形下, Renard<sup>[15]</sup>利用势的叠加理论对水平井产量公式进行研究, 并运用与直井流动效率类似的定义方法, 对水平井的流动效率进行定义, 得到其相关表达式, 并认为当各向异性值增大到一定程度后, 地层伤害对直井的影响要大于水平井, 地层受到严重损害后, 水平井的流动效率降低。我国学者刘慈群<sup>[16]</sup>和徐景达<sup>[17]</sup>也对水平井产量公式进行了研究。徐景达通过研究认为, Joshi 公式中假定的椭球泄油体只在理想条件下存在, 实际上, 该假设会减小流体运移到井筒的距离, 所以, Joshi 公式计算的产量要大于实际的产量, 他认为 Joshi 公式只能用于评价水平段长度较小的水平井产能。

1992年, 周继德<sup>[18]</sup>在 Joshi 和徐景达等人的研究成果上, 考虑油层岩性、油层多相流和表皮因子的影响, 对水平井产量公式进行了改进。

1993年, 郎兆新<sup>[19]</sup>把三维空间划分成垂直面和水平面的两个二维平面, 分别求得水平面和垂直面上的产能, 利用等值渗流阻力原理建立了多分支水平井产能模型。吕劲<sup>[20]</sup>通过理论证明, 在无供给边界地层中, 水平井的渗流场是以水平井的两个端点作为焦点的旋转椭球体, 它为利用二维近似方法分析水平井产能的合理性提供了理论依据。

1995年, 曲德斌<sup>[21]</sup>等人利用 Joshi 的方法, 结合等值渗流阻力原理, 推导出了水平井的产能方程。同年, 王德民<sup>[22]</sup>等推导出直井七点井网和水平井的产能方程。

1996年, 宋付权<sup>[23]</sup>借鉴吕劲的思想, 将水平井的渗流场看作是椭球体, 得到了水平井的产能公式。Elgaghad<sup>[24]</sup>等假设水平井的泄油体是由两个矩形与一系列半圆构成的, 并得到该泄油体下水平井的产能方程。Elgaghad 公式不需要对水平井泄油半径进行计算, 较其他方法简单。Economides<sup>[25]</sup>等人用半解析的方法, 得到水平井产量公式的解, 瞬时点源解析解在时间和空间上被数值集成, 可用于计算水平井在不同位置的稳定流入解。该公式用于早期的瞬时和稳态产

量的计算。

1997年,李培<sup>[26]</sup>等把一排水平井等效成带状区域中存在单一水平井的情形,利用多次保角变换和镜像反映原理,推导出单井排水平井的产能方程,该公式是 Muskat 公式的推广。王卫红<sup>[27]</sup>等人利用相同的方法得到了多分支水平井产能的计算式,并与 Joshi 公式进行对比,认为 Joshi 公式没有区分均匀流与无限导流之间的差别。

1999年,姚约东<sup>[28]</sup>在郎兆新<sup>[29]</sup>和曲德斌<sup>[21]</sup>的研究基础上,运用类似的方法建立了精度更高的水平井五点井网的产能方程。李远钦<sup>[30]</sup>在假定油藏较厚情况下,通过数值反演得到水平井不稳定渗流数学模型的解,并求得水平井的产能公式。他认为水平井各水平段的流量并不是均匀分布的,各水平段的流量分布受油层厚度、油藏边界以及导压系数的影响,若各水平段流量相等,需满足:①拟稳定流;②油层厚度较厚。该公式实际应用较差。

2003年, Furu<sup>[31]</sup>等假设:①水平井近井地带为圆形泄油区域;②远井地带泄油区域为椭圆形;③考虑到地层伤害引起的附加压降,分析了油藏中油层非均质性和地层伤害非均匀分布对表皮因子的影响。

2003年,郭肖<sup>[32]</sup>等提出 Joshi 公式在简化水平井渗流问题时,是直接简单相加而非矢量相加,指出 Joshi 公式的错误在于计算垂直面的产量时,所采用的复势和假设条件互相矛盾,并对 Joshi 公式进行修正。

2008年,陈元千<sup>[33]</sup>将水平段的长度看作是拟圆形生产坑道,运用等值渗流阻力原理得到水平井产能方程。同年,张枫<sup>[34]</sup>等人对陈元千公式的各向异性进行修正。李真祥<sup>[35]</sup>等假设:①油藏顶底封闭;②地层各向同性;③忽略井筒压降。利用 Joshi 的简化方法,推导出了上下边界封闭、油井裸眼完井条件下水平井的产能方程,并分析了表皮因子对产能的影响。

2009年,袁迎中<sup>[36]</sup>等基于稳定条件下,上下边界封闭的无限大油藏的井壁压力的解,利用贝塞尔积分,无穷级数求和等方法,推导出水平井的三维稳态产能方程。

2010年,刘文超<sup>[37]</sup>等人基于宋付权<sup>[38]</sup>的“等压旋转椭球”理论,结合水平井的稳态渗流特征,给出了与边界压力相关的非线性方程组,并通过求解得到水平井产能公式。陈小凡<sup>[39]</sup>等人回顾了水平井产能的发展历程,分析了目前产能公式的研究现状,并在此基础上,简化、分解水平井的泄油体,并采用等值渗流阻力原理,建立了计算水平井产量的新公式,通过实例分析验证了该模型的可靠性。李明忠<sup>[40]</sup>等针对砾石充填完井方式的水平井,应用质量、动量守恒定理,对井筒内的变质量流动压降方程进行推导,建立油藏渗流模型。提出油藏流体与井筒耦合的数学模型,并求得了模型的解。

2012年,龙明<sup>[41]</sup>等采用物理模型和数值分析相结合的方法,模拟了地层中水平井的渗流特征,认为水平井泄油区是胶囊型,并运用等值渗流阻力方法建

立了水平井产量新公式。该公式的可靠性也通过油田实际数据进行了验证。

2013年,袁淋<sup>[42]</sup>等对目前国内外学者提出的产能公式进行分析总结,并结合实例分析认为,Borisov公式、Giger公式、Renard-Dupuy公式、Fuirui公式和陈元千公式的适用性较强。

## 2. 气顶油藏水平井产能计算方法研究

1991年,KuChuk<sup>[43]</sup>等假设油藏上部恒压、下部封闭,对压力的处理近似于平均压力,而对于半径的处理,采用了针对各向异性地层等效井筒半径。运用余弦变换导出了在水平方向无限延伸油藏一口油井在径向流、中间线性流、稳定流阶段的产量计算式。

2006年,饶政<sup>[44]</sup>等采用镜像反映和势的叠加原理理论,建立了气顶油藏水平井的产能方程,并对水平井水平段垂向位置对油井产量、临界产量和气锥时间的影响进行研究,给出了在气顶油藏水平井开采中,水平井水平段最优垂向位置。

## 3. 边水油藏水平井产能计算方法研究

1994年,范子菲<sup>[45]</sup>等人建立了边水驱油藏的物理模型,模型中假设:①地层上部边界封闭、下部恒压边界;②油、水间有明显的界面;③油藏岩石流体性质均匀、各向同性;④流体是稳定流,油水密度和黏度是常数;⑤忽略毛管力、油水重力分异的影响。得到了水平井的产能公式。

2007年,郭宝玺<sup>[46]</sup>等人在点汇条件下,把水平井看作是无限导流线汇,利用傅里叶变换和势的叠加原理推导出水平井三维产能公式。

2011年,顾文欢<sup>[47]</sup>等运用油藏工程方法与数值模拟技术,研究了影响边水稠油油藏水平井产能的参数,得到影响产能参数的主次顺序依次为:避水高度、地层倾角、油层厚度、原油黏度、水平段长度、水平渗透率以及水体能量的大小。

## 4. 气顶底水油藏水平井产能计算方法研究

1991年,Papatzacos<sup>[48]</sup>对气顶底水油藏水平井产能进行研究,并且运用动边界方法,得到水平井临界产能的半解析解,很好地解决了预测水平井见水时间的问题。

1995年,范子菲<sup>[49]</sup>等利用Gringarten与Ramey<sup>[50]</sup>的瞬时源函数,并结合Newman乘积法<sup>[51]</sup>,建立了气顶底水油藏的水平井产能公式。该公式综合考虑了油水界面、油气界面、地层各向异性、水平井之间的距离以及水平段垂向位置等因素对水平井水平段压力分布的影响,并通过压力分布的无穷级数表达式求和,求得水平井的产能方程。

2001年,郭肖<sup>[52]</sup>等根据保角变换方法建立了油藏顶、底均存在供给边界的水平井产能公式,并对影响产能的油井偏心距、储层非均质性进行探讨。

## 5. 底水油藏水平井产能计算方法研究

1993年,在油藏顶部封闭、底部恒压边界的假设条件下,范子菲<sup>[53]</sup>利用复变函数中的保角变换方法以及势的叠加理论,给出了无限大地层中,计算底水油藏水平井产量的公式。并分析了地层各向异性、避水高度等因素对油井势能分布的影响。

1994年,程林松<sup>[54]</sup>等以镜像反映法与势的叠加法为依据,研究了底水油藏中水平井稳定渗流的情形,得到了水平井产能和见水时间的计算式,并分析了各自的影响因素。

1996年,窦宏恩<sup>[55]</sup>将水平井看作是一口竖直的垂直井,将水平段的长度视为油层厚度,利用势的叠加方法,建立了底水油藏的水平井产能计算模型。

1999年,宋付权<sup>[56]</sup>等考虑启动压力梯度的影响,采用近似处理的方法,得到了底水油藏水平井稳态产量的近似公式。

2007年,崔传智<sup>[57]</sup>等运用数值模拟方法,对底水水体大小、水平射孔段长度、油层各向异性、避水高度、油层厚度、水平渗透率、渗透率级差及原油的黏度等参数对水平井产能的影响进行分析,建立了计算底水油藏水平井产能的数学模型。

2009年,崔丽萍<sup>[58]</sup>等采用与Joshi类似的方法,简化了水平井渗流模型,分别应用保角变换、镜像反映方法以及势的叠加原理方法建立了底水油藏水平井的产能计算公式。

2011年,赵春森<sup>[59]</sup>等运用镜像反映及势的叠加原理,获得了在单相稳定油流下的底水油藏水平井产量的计算方法,又以单相流产能模型为基础,建立了考虑两相流的底水油藏水平井产量公式。

通过国内外大量的文献调研发现,虽然目前水平井产能模型众多,但大多数学者提出的模型都是基于Joshi采用的方法,或是对Joshi公式进行改进,并且Joshi公式在矿场上应用效果较好,使用较多。而在底水油藏水平井产能计算模型研究的方面,各模型计算的结果与现场实际差别较大,因此,有必要对其进行更为深入的研究。

## 二、底水油藏临界产量研究进展

1986年,Chaperon<sup>[60]</sup>对水平井底水脊进和直井锥进的临界产量作了对比,假设如下:①地层各向异性;②边界无穷大。研究了考虑地层各向异性的水脊变化规律,但是模型中假定条件为无穷大边界,不考虑不动水的流动约束,推

导出了临界产能的计算公式,而得到的临界产量要比理论值高。Giger<sup>[61]</sup>对见水前的水脊动态进行研究,并建立了水脊的二维数学模型。但由于模型中假定自由界面在无穷远处,因此难以准确获取模型中的一些参数。

1990年, Ozkan 和 Raghavan<sup>[62]</sup>在发表的文章中假设:①均质油藏;②无限大地层;③垂向和水平渗透率不同;④油水界面水平,具有统一的油水界面;⑤不考虑毛管压力的影响;⑥油水流量相同。建立了临界产量计算模型。

1991年, Joshi<sup>[63]</sup>用物理模拟方法对水平井和斜井的特性进行研究,分析了稳定流条件下,水脊剖面的动态变化,并得到了水平井的临界产量,通过与 Giger 的计算结果对比发现,实验结果和 Giger 公式的计算结果相差较大。同年, Kracher<sup>[64]</sup>等修正了 Giger 公式,但修正后的 Giger 公式只适用于泄油半径较小的油层。

1992年, Guo<sup>[65]</sup>等假设:①油藏均质并且各向同性;②油为不可压缩流体;③持续的稳定流状态;④不考虑毛管压力;⑤井筒是水平的和直的。在不稳定状态下,采用 Schwarz-Christoffel 保角变换导出了底水油藏水平井的临界产量模型,临界产量可以通过数值化计算得来,并在稳定流动条件下,对临界产量和水脊剖面的变化进行研究,得到了不同地质条件下的临界产量计算模型。

1993年,李传亮<sup>[66]</sup>考虑地层中存在隔板的情况,建立了直井的临界产量模型,他认为隔夹层会减缓底水上升的趋势。

1994年,范子菲<sup>[67]</sup>等在文章中假设:①油水界面为恒压边界;②油层顶部封闭。利用平面镜像反映法,结合 Muskat 提出的无穷大地层中单排井的表达式及势的叠加原理,得到了底水油藏中水平井的临界产量计算模型,定量分析了不同时间产量的变化规律。同年,程林松<sup>[68]</sup>研究了底水油藏水平井稳定渗流的问题,推导了水平井见水时间和产能的计算模型。并对两者的影响因素进行分析。

1996年, Perimadi<sup>[69]</sup>求得了描述二维两相渗流的偏微分方程的解,并分析了水平井水锥从开始形成、逐步发展到油井被完全水淹的全过程。

1997年, 窦宏恩<sup>[70]</sup>认为 Chaperon 对临界锥进高度的处理方法有误, Chaperon 推导过程中的无因次临界产量的表达式是错误的。因此, 窦宏恩修正了 Chaperon 公式。

2002年, 刘振宇<sup>[71]</sup>等通过研究认为, 水平井的合理位置应在油层的 0.7h 处。

2008年, Zhang<sup>[72]</sup>等运用数值模拟方法对带隔板的水平井临界产量进行研究,认为隔板能够在增大油井临界产量的同时降低含水率。

2010年, 陈元千<sup>[73]</sup>在以往研究成果的基础上,提出产量比的概念,并假设水平井的产量比等于直井的产量比,得到了能够预测气顶油藏、底水油藏以及气顶底水油藏的临界产量公式。

2011年,程晓军<sup>[74]</sup>等在分析水平井底水锥进机理的研究基础上,将水平井三维渗流场近似分解为内、外两个渗流场,给出了水平井临界产量的计算公式。

2012年,乐平<sup>[75]</sup>等对带隔板底水油藏水平井临界产量进行研究,认为隔板能够增大油井的临界产量并且延缓见水时间,并讨论了隔板大小、隔板位置对油井临界产量的影响。

通过调研发现,大多临界产量公式均是在产能公式的基础上结合底水脊进的临界条件得到的。而对于地层中存在隔夹层的情况,李传亮曾对带隔板的底水油藏直井临界产量进行研究,但关于水平井开发该类油藏的临界产量计算模型相对较少。

### 三、产量递减模型研究进展

1908年,Aronld和Anderson<sup>[76]</sup>最先对油田产量的递减规律进行研究,并提出了递减曲线的数学式。

1944年,Arps<sup>[77]</sup>在前人的研究成果上,运用矿场资料,建立了经典的Arps产量递减公式,并把递减规律划分为指数递减、双曲递减和调和递减三类,Arps递减模型常常用来分析油田的开发动态,并为后来递减规律的研究打下了坚实的基础。

1962年,Hubbert<sup>[78]</sup>首次提出Logistic曲线的预测方法,陈元千<sup>[79]</sup>等在1996年完成了模型的推导,目前该模型广泛应用于石油工业生产。

1980年,Fetkovich<sup>[80]</sup>根据油气藏的生产动态及渗流机理,并结合Arps产量递减模型绘出了产量递减分析典型曲线,通过拟合该曲线,可以对油井未来的产量进行动态预测。

1987年,黄伏生<sup>[81]</sup>等人对油田动态与生产时间关系进行了深入研究,并提出了以时间为自变量的“t模型”,该模型综合考虑了油田的非稳定开采动态。窦宏恩在其研究成果上,简化该模型的求解过程得到“T模型”。

1991年,翁文波<sup>[82]</sup>利用泊松旋回模型对生命的兴衰过程进行研究,提出了生命周期模型,该模型被称作泊松旋回或翁氏模型。他认为产量变化大多会经历上升、峰值和下降3个阶段。产量上升速度通常比较快,而下降却是一个相当漫长的过程。

1995年,胡建国<sup>[83]</sup>等人利用统计的方法对油气田累积产量随时间的变化关系进行研究,得到了预测油气田产量的模型,即HCZ模型。该模型能够对油气田的日产量、累产量和可采储量进行预测,除此之外,还可以预测油田的年最高产量和出现最高产量的年份。

1998年,李从瑞<sup>[84]</sup>等人对广义翁氏模型、Rayleigh模型<sup>[85]</sup>、Weibull预测模型<sup>[86]</sup>和t模型<sup>[87]</sup>进行研究,并建立了I类广义数学模型,又运用HCZ模型、



Hubbert 型<sup>[88]</sup>和莫尔模型<sup>[89]</sup>,建立了 II 类广义数学模型。这两类广义数学模型相对其他预测模型而言,在适应性与可靠性方面都有明显的提高。

2002 年,张宁<sup>[90]</sup>等以阿克库勒油田现场生产数据为例,对不同产量预测模型的优劣进行研究,建立了各个预测模型与广义模型的关系式,并对广义模型进行简化,使其能够更加方便、准确地对油井产量进行预测。

2004 年,阳兴华<sup>[91]</sup>等对 HCZ 模型等 12 种递减模型进行研究。

2008 年,陈元千<sup>[92]</sup>等研究了油田产量的递减规律,通过分析得到,虽然 Arps 在国内外应用非常多,但对俄罗斯的萨马特洛尔油田以及罗马的什金油田并不太适用,并在正态分布研究基础之上,给出了新的产量递减模型。

2012 年,邓畅<sup>[93]</sup>以陆梁油田陆 9 井区薄层底水油藏水平井为研究对象,对该区域 28 口水平井的产量递减规律进行研究,优选出 Arps 递减模型和 Weibull 模型最适合于预测薄层底水油藏水平井的产量。

通过调研发现,产量递减模型以油田现场生产数据为基础,可以对油田产量的变化趋势进行预测,但运用不同模型对同一油田进行预测的结果差异较大。因此,应该从众多产量递减模型中优选出适合底水油藏水平井的产量预测模型。

#### 四、水驱特征曲线研究进展

1959 年,苏联学者<sup>[94]</sup>基于室内水驱油的模拟试验数据,发现累产水量和累产油量具有规律性,并且是一条半对数曲线。该曲线可以用来预测油田的水驱采收率。

1981 年,童宪章<sup>[95]</sup>将水驱特征曲线引入我国,他借鉴苏美经验统计法,进行了大量的实用性研究工作,并将水驱特征曲线分成甲型、乙型、丙型和丁型,作为标定水驱油田可采储量和采收率的基本方法,该方法得到了广泛的应用。

1985 年,陈元千<sup>[96]</sup>利用油水两相流动的基本理论和方法对童氏命名的几种水驱特征曲线进行了数学推导,得到了水驱油田可采储量、采收率以及含水率和平均含水饱和度变化的基本关系式。

1999 年,我国颁布的《石油可采储量计算方法》<sup>[97]</sup>共规定了 6 种水驱特征曲线,它们分别是:甲型、乙型、丙型、丁型、张金庆和俞启泰水驱曲线。

2000 年,俞启泰<sup>[98]</sup>对甲、乙、丙、丁四种水驱特征曲线进行研究,并认为应该根据地层原油的黏度来选择适合预测油田的水驱特征曲线,但陈元千通过对几种水驱特征曲线的使用情况分析认为,水驱特征曲线的选择与地层原油的黏度并无太大关联。

2006 年,冉启佑<sup>[99]</sup>等运用 9 个油田的实际数据对各个水驱特征曲线的可靠性进行验证,得到丙型水驱曲线的预测效果最好,而当黏度相差较大时,相同水驱曲线方法得到的结果近似相同。