

THEORY AND APPLICATION OF PERFORATED COMPLETION
DESIGN IN COMPLEX CONFIGURATION WELLS

复杂结构井射孔完井 设计理论与应用

湖南科学技术出版社

李海涛 王永清 著

THEORY AND APPLICATION OF PERFORATED COMPLETION
DESIGN IN COMPLEX CONFIGURATION WELLS

复杂结构井射孔完井 设计理论与应用

李海涛 王永清

著

 湖南科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂结构井射孔完井设计理论与应用 / 李海涛, 王永清著. —长沙: 湖南科学技术出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-5357-5887-3

I. 复… II. ①李…②王… III. 射孔—完井 IV. TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 163391 号

复杂结构井射孔完井设计理论与应用

著 者: 李海涛 王永清

责任编辑: 徐 为 龚绍石

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

印 刷: 湖南东方速印科技股份有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市河西高新技术开发区 M1-3

邮 编: 410013

出版日期: 2009 年 9 月第 1 版第 1 次

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 307000

书 号: ISBN 978-7-5357-5887-3

定 价: 58.00 元

(版权所有 · 翻印必究)

内 容 简 介

本书以复杂结构井完井产能评价方法与设计理论为出发点,综合论述了复杂结构井开采油气藏的现状、优势及发展前景,介绍了利用三维连续点源格林函数求解油藏渗流问题的方法,阐述了不同完井方式下水平井以及多分支井考虑油藏和井筒耦合的完井产能综合评价半解析模型。同时论述了不同完井参数对复杂结构井产能的影响规律、完井工艺技术方案设计以及完井参数优化设计方法,提出了水平井完井参数优化的新思路,并给出了设计实例和应用分析。本书是一本系统介绍复杂结构井完井理论与技术的专著,内容丰富翔实,概念清楚,推导严谨,具有很好的实用价值。

本书可供从事油气田完井、采油和油田开发设计技术人员应用,也可供石油研究院、所和石油院校师生阅读和教学参考。

前言

由于水平井和大位移井等复杂结构井具有许多直井所无法比拟的优点,随着水平井技术、大位移井技术和多分支井技术的不断发展与完善,更多的油田都倾向于利用这些技术来开发油气田以提高经济效益。同时,由于石油开采技术的进步和世界经济对石油的需求增加,使得一些特殊油气藏也开始投入开发。如何利用复杂结构井高效开采油气藏是我们面临的巨大挑战,而水平井钻采技术是国内外的前沿研究课题,其中水平井的完井技术、固井技术、射孔技术、防砂技术、完井测试技术以及水平井的储层改造技术和举升技术都不同程度地存在与生产不相适应的各种问题。复杂结构井完井优化设计技术是水平井钻采配套技术的重点和难点之一,它制约着油气井的安全寿命和正常生产,是现代钻井到现代采油的中间环节。

目前,油井射孔完成对常规井来说已是一种工业规范,常规井砂岩油气藏的射孔完井优化设计理论已相当成熟,并在实际应用中发挥了重要作用,常规井裂缝性油藏的射孔参数优化理论研究业已完成。对水平井来说,射孔完成作为重要的完井方式之一,它具有能进行有效的层段分隔,避免层间窜通,可以进行有效的生产控制、生产检测和包括水力压裂在内的任何选择性增产增注作业的突出优点,已大量应用于水平井及大位移水平井的完井操作。在近几年的 SPE 会议上,有关水平井完井设计及完井优化的文章中,有 90% 以上是关于水平井射孔完井动态优化的,这说明了水平井的射孔产能优化理论性很强,而且对油井今后的开采动态起着十分关键的作用。

目前,在射孔工艺方面,大多采用了 TCP 周边射孔或低边射孔,而对射孔方位、射孔参数的选择却采用缺乏科学依据的简单传统做法。国外许多学者研究了“分段射孔完井”或“射孔段的长度和分布”对水平井产能的影响,一些学者提出了“优化完井”的新概念,特别对一些中高渗透层、相似或相异的多层作了有益的探索,联系井筒流阻及压降的射孔井动态研究受到了广泛的重视。

砂岩油藏水平井等复杂结构完井技术是亟待解决的技术难题。虽然国内各大油田都进行了相关现场实践,但水平井完井设计理论研究方面有明显的不足,经验性较强。砂岩油藏水平井完井技术的设计理论和方法需要进一步完善和加强,本书主要针对水平井自然完井特别是射孔完井的产能预测理论与完井参数设计方法进行阐述,因而对从事油气田完井、采油和油田开发的技术人员具有重要的指导意义。

编者

2009 年 7 月

CONTENTS 目录

第一章 绪论

第二章 基于格林函数的渗流微分方程基本解

第三章 水平井完井瞬态压力模型及其渐近解

第四章 油藏渗流与水平井井筒流动耦合模型研究

第五章 复杂结构井完井产能评价方法研究

第六章 复杂结构井产能影响因素与规律分析

第六节 影响产液剖面的主要因素分析	108
第七章 复杂结构井射孔设计方法	115
第一节 射孔工艺技术及其特点	115
第二节 射孔优化设计方法	119
第三节 水平井合理射孔负压	127
第四节 射孔液选择	130
第八章 水平井完井设计实例应用与分析	137
第一节 EXP-1H 水平井射孔设计及其效果评价	137
第二节 EXP-2H 井射孔优化设计	142
第三节 EXP-3H 水平井优化设计应用	157
第九章 水平井完井优化设计软件开发	179
第一节 软件总体结构	179
第二节 软件主要功能模块	179
参考文献	185

第一章 绪 论

水平井开采技术是 20 世纪 90 年代世界油田开发迅速发展的一项新技术。到 2005 年全世界已钻成水平井 2 万多口,我国 2005 年底已完钻 600 多口,水平井的地质设计、钻井、测井、完井、油藏工程和采油工程等都取得了不同程度的进展。目前世界上已有 20 多个产油国采用水平井开采油田,并形成了较大的工业规模。

基于水平井钻井技术不断进步而发展起来的复杂结构井(如侧钻水平井、大位移井及多井底分支井)也迅速受到重视,如何有效发挥水平井的优势进行高效开采也给石油工业界带来新的挑战。这就需要弄清这类井的开采机制,弄清不同完井方式下产能动态分析方法和完井参数优化设计理论与方法,以及相应配套的高效开采工艺技术。

水平井完井技术可分为三类,即自然完井、防砂完井和增产完井。自然完井包括裸眼完井、割缝衬管/预孔筛管完井和射孔完井;防砂完井包括绕丝筛管、预充填筛管以及砾石充填完井等;增产完井则包括压裂充填(Frac-Pack 或 Stim-Pack)等方法。这三类完井方法都在不同的油田得到不同程度的应用。本书将主要针对水平井自然完井特别是射孔完井的产能预测理论与完井参数设计方法进行研究,同时对裸眼完井和割缝衬管完井进行相应的分析和讨论,以形成较为系统的复杂结构井自然完井产能评价理论和完井参数优化设计方法。

第一节 复杂结构井发展概述

一般来讲,水平井、大位移井及多井底分支井等统称为复杂结构井。最早在 1929 年,美国在得克萨斯州从一口垂直井侧钻水平井,横向延伸 8m 并取得了增产效果。20 世纪 50 年代初期已钻成水平井段为 30m 长的水平井。1960 年,美国大约在 50 口直井侧钻了水平井,前苏联钻了 43 口水平井。由于技术水平和成本限制,全世界都感到水平井开采的经济效益差,故水平井钻井、开采技术长时间没有明显进展。但是由于石油危机后的油价上涨,以及随钻测量工具和井下模拟技术等进步,水平井钻井技术又得到发展。20 世纪 60 年代,美国 Arco 公司为解决油井产水问题,从 4 口直井中钻了短的水平井段;加拿大 ESSO 公司为了开采重质油钻了 3 口水平井;1979 年,法国 Elf Aquitaine 公司和国家石油研究院(IFP)在井深 700~2800m 钻成 4 口水平井,水平井段长 300~700m;1980 年美国已完钻水平井 100 多口。1981 年,Arco 公司使用特殊造斜工具钻成垂深 1906m、水平井段长 53m 的短曲率半径水平井。Texco 公司使用自动造斜工具钻了垂直深度为 1260m、水平井段为 334m 的水平井。尤其是 Elf 和 IFP 钻了垂深 702m、水平段长 366m 的水平井,使水平钻井技术向前发展了一步。1982 年,Elf 和 IFP 又成功地钻成垂深 1373m、水平段长 351m 的水平井,同年在罗斯坡莫尔油田钻

成水平井段长达 608m 的水平井, 日产油 608m^3 , 比直井高 5 倍。1984 年, 前苏联在萨拉托夫的依利诺斯基钻成 41 口水平井。美国 1987 年在北部钻成 35 口短曲率半径的水平井。

随着工业技术的发展、钻井技术的完善、钻井经验的积累以及人们对水平井开采技术认识的逐渐提高, 20 世纪 80 年代以来用水平井开发油田日益受到重视, 钻井数量高速增长。据统计, 到 2005 年世界上已钻成水平井 2 万多口, 我国 2005 年底已完钻 600 多口。

多分支井技术于 20 世纪 70 年代末期产生, 它是水平井技术的集成和发展, 指的是在一口主井眼(直井、定向井、水平井)中钻出若干进入油(气)藏的分支井眼, 其主要优点是能够进一步扩大井跟同油气层的接触面积, 减小各向异性的影响, 降低水锥水窜, 降低钻井成本, 而且可以进行分层开采。目前, 全世界已钻成上千口分支井, 最多的有 10 个分支。

多分支井可以从一个井眼中获得最大的总水平位移, 在相同或不同方向上钻穿不同深度的多层油气层, 特别是通过老井(死井)分支侧钻到由于水锥等原因造成的死油区和最上部射孔段以上油层中的“阁楼油”, 可大幅度增加油气层裸露面积和延长油气井寿命, 进而使死井复活, 提高油(气)采收率, 提高油(气)井产量。这类分支井井眼较短, 大部分是尾管和裸眼完井, 而且一般为砂岩油藏。

分支井技术是进入 20 世纪 90 年代后才发展起来的。从 1991 年开始, 在美国得克萨斯的奥斯汀白金构造上钻成反向对称的双水平井, 1993 年在加州近海的 Dos Cuadras 油田钻成三支井, 在加拿大的 Pelican 湖油田钻成开发薄层油藏的三支井, 1994 年又有加拿大的沙斯卡切望的 Midale 油田的反向对称双分支井。到 1995 年, 美国在各类型的 315 口井中完成了 852 口分支井, 平均每口井 27 个分支, 其中 72% 为采油井, 25% 为采气井, 2% 为注水井, 1% 为储气井。到 1999 年 3 月, 国外双分支水平井总水平段长度达到 45501m (井垂深 13899m), 多分支水平井总水平段长度达到 8318.9m (井垂深 1410m)。

中国是发展水平井和分支井钻井技术较早的几个国家之一。20 世纪 60 年代中期在四川打成了磨 3 井和巴 24 两口水平井, 但限于当时的技术, 未取得应有的效益。我国石油工业界在“八五”、“九五”、“十五”期间开展了对水平井各项技术的研究和应用, 并在不同类型油藏中开展了先导实验或推广应用, 取得了很多成果, 几乎包括了所有的油藏类型, 绝大部分水平井较直井显示了巨大的优越性, 并且已取得显著的规模效益。

由于水平井和分支井的独特优越性, 用水平井和分支井开发油气藏能解决用垂直井开发失败和效果不理想的问题。水平井和分支井开发油气藏应用范围日益扩大, 目前我国中石油正以每年 200~400 口水平井的速度递增。主要应用在以下方面:

(1) 裂缝性油藏的开采。由于水平井和大位移井在油层中的穿透距离较长, 因此, 它提供了更多穿透裂缝性油藏中裂缝的机会, 特别是天然垂直裂缝。由于天然垂直裂缝系统相互交错, 为水平井和大位移井提供了理想的应用条件。这一类型的井身剖面可以使产量提高 4~20 倍。埃尔夫·阿奎坦石油公司的 Rospo Mare 油田就是一个很好的例子, 其增产量最高的井比同一地区的垂直井提高了 20 倍。在垂直裂缝油藏中, 油气完全处在裂缝中, 裂缝之间的非生产底层一般 6~60m 厚。所以垂直井可能只钻到一个产层, 也可能一个产层也钻不到。而水平井和大位移井可以与产层垂直或斜交, 横向或斜

向钻穿产层中的裂缝,这样就比垂直井的开采量要高得多。

(2)水锥和气锥问题的解决。如果产层为水驱动,尤其是当原油粘度比水高得多时,垂直井可能会遇到水锥的问题。发生这一问题时,会连油带水一同产出。水平井可以在油层的中上部造斜,然后在生产层中钻一定长度的水平井段。水平井不仅减少水锥的可能性,而且每单位长度的产油段的压力降比垂直井产油段低,出水、出砂也比垂直井少。

(3)低渗透地层的开发。由于水平井和大位移井井筒穿越地层的距离比垂直井要大,泄流体积也大,因此,通过钻水平井可以提高低渗透层的产能。虽然直井通过压裂也能使低渗透油层达到一定的增产效果,但是如果在水平井和大位移井的基础上再进行压裂作业,造成多条裂缝生产,那么将会收到意想不到的效果。

(4)不规则地层的开发。有许多含油地层互不相连,孤立存在,地震测量也难以指定其准确位置,所以钻直井很难钻到这类油藏。通过钻水平井和大位移井很容易钻透直井所不能达到的含油气空洞和袋状油藏,在透镜状储层中效果更为明显。

(5)薄油层的开采。对于薄油层,通过在油层的上下边界之间钻一个水平井段可以大大地增加井与油层的接触表面积。水平井的开采指数反映了井眼与油层接触面积的增加,与同一地层所钻的垂直井相比,水平井的开采指数可以提高4倍,而在一定条件下甚至可以提高10倍。国内外研究表明:如果不考虑其他因素的影响,产量的增加幅度随着油层的厚度增加反而下降。因此对于厚油层可以优先选择成本较低的直井完井方法,对于薄的油层,水平井或大位移井则会取得更好的开采效果。

(6)层状油层的开发。水平井采油获得的产量增量取决于油层垂直渗透率的值。水平井适用于垂直渗透率与水平渗透率比值较大的情况。在垂直与水平渗透率的比值较低的情况下,采用大位移井可以取得更高的采油效率。

(7)提高采收率。水平井与油层具有较大的接触面积,有助于注入较大的蒸汽段塞或聚合物。因此,应用水平井进行蒸汽驱或聚合物驱所获得的原油采收率比应用直井时要高得多。

由于水平井和大位移井等复杂结构井具有诸多直井所不具有的优点,因此,它在油气田开发的很多领域都得到了广泛的应用。

第二节 国内外发展现状及趋势

一、复杂结构井稳态产能计算

20世纪50年代开始在实验室应用电模型研究水平井生产动态。1958年,前苏联首次报道了计算水平井产能的解析式,发表了《用水平井和斜井开发油田》的理论专著,比较系统地总结了斜井和水平井发展历程和生产原理。这些成果为以后进行水平井油藏工程研究奠定了良好基础。进入20世纪80年代以来,水平井钻井数目大增,同时许多研究者也开始研究水平井开发油气藏的有关理论问题。法国F. M. Giger以及A. P. Jourdan等(1984)率先开始研究水平井产能研究,推导出水平井产量预测公式。此后,美国S. D. Joshi和M. J. Economides等(1993)进一步阐述了水平井生产原理,提出了各种预测水平井产量计算公式,分析了水平井生产时流体渗流特征和压力分布特点以及影

响水平井产能的各种因素。Joshi 在推导产量计算公式时所用的思路与 Giger 相同。

针对底水驱油藏,国内刘慈群(1991)、范子非(1993)将水平井生产时的流动问题简化成二维流动问题,根据镜像反映或保角变换法及势叠加原理推导出了稳态产能计算公式;对于边水驱油藏,程林松等人(1993)利用类似方法导出了产量计算公式。

以上均是将三维渗流问题简化成二维问题得到的各种情况下稳态产能计算公式。在实际应用中,Giger 和 Joshi 公式使用较多。但 butler (1992)和李玺等人(1997)指出:Joshi 公式中分母第二项少了一个“ π ”,而 Joshi 认为这个小的差别对产量计算的影响并不明显。

吕劲(1995)认为:上述作了简化后导出的公式有较大局限性,因为油藏流体以三维全方位流入井筒内,除非假定水平井为无限长,否则任何二维简化都不能反映三维渗流本质。他将水平井视为三维线汇基于三维 Laplace 方程导出了无限大地层和有限旋转椭球体地层两种情况下三维稳态水平井产量解析公式。

F. Azar-Nejad (1996) 等人认为对实际油藏条件下的问题直接求解三维 Laplace 方程是不切实际的。他们提出一种称为 DFE 的方法,即将水平井分割成许多点汇,针对顶底均为封闭边界的无限大油藏列出各点汇的势方程。求解这些势方程组成的方程组,得到各点的势和流量,从而求出全井的产量。

应该注意到,以上研究内容均没有考虑水平井筒内的压降对产能的影响。刘想平(1998)提出将水平井看成由若干段线汇组成,把气体在气藏内向水平井的三维稳态渗流与其在水平井筒内的流动耦合起来,建立了气藏水平井稳态产能计算模型。窦宏恩(1996)假设将水平井竖立起来变成无限大地层中的一口直井,而水平井长度等于油层厚度,然后同样利用复势叠加原理和镜像反映原理,通过求取泄油边界与井底的势差推导出水平井的产量公式。

二、井筒水力学及其对水平井产能的影响研究

从 20 世纪 80 年代水平井技术被广泛的采用和大规模应用以来,石油工程师们开始对具有井壁质量交换的井筒压力降研究感兴趣。在 Dikken 提出不能忽略水平井筒压降之前,人们在研究水平井有关问题时都没有考虑水平井筒的压力降,都是把水平井筒假设为无限导流能力。Dikken 首次在理论上研究了水平井筒内的压力降对水平井生产特性的影响后,研究者们开始水平井井筒压力降的研究,特别是考虑井壁径向流入或流出的实验研究。

1. 井筒流动的实验研究

Asheim (1992)在假定忽略管壁侧流与井筒流体之间的动量交换基础上,提出了水平井筒摩擦阻力系数的新关系式,它考虑了沿井筒流动流体的动能损失。

Kloster (1990)研究了具有流体注入和没有注入的射孔井筒的流动阻力,研究的雷诺数范围为 60000~4500000。他发现井壁的注入引起摩阻系数的降低,这个现象用 Ouyang 等所描述的井壁质量交换的机制来分析就很容易解释。

Ouyang (1996, 1998)发表了单相和气液两相的水平井筒压力梯度计算模型,但模型并没有考虑孔眼或筛缝对摩擦系数的影响。

Ihara 等研究了井壁有质量交换的矩形水平井筒流动,从油藏模型直接连续流入水平井筒。Ihara 等认为由于井壁侧向流入和轴向流动的混合,实验区的压力降几乎是均

匀增加,他将总的压力损失分为摩擦损失和混合损失两部分。

对于单相流, Schulkes 和 Utvik 研究发现对于径向流入与轴向流动之比小的井筒流动,可被径向流入润滑,然而在径向流入与轴向流动之比大的时候,径向流入阻碍了轴向流动,因此增加了井筒压力降。

Harald Asheim (1992)等人、Zesu (1994)等人以及 H. Yuan (1996)等人都分别建立了自己的实验装置,对射孔完井的井筒内单相液流的压降进行了研究,并提出了各自相应的计算压降模型。由于问题的复杂性以及各自的实验装置和实验条件不一样,故没有得到比较一致的实验结果,提出的计算模型也没有得到大家的公认。但有一点可以肯定的是,水平井筒内的压降与普通水平管内的压降大小不一样。

2. 单相变质量流的井筒压力降的计算

水平井井筒内的流动与普通管道的流动不同,其主要区别为水平井井筒为变质量流,井筒压降来自油藏流体向井筒流入的影响。以前大多数研究者在计算时只按普通水平管来考虑计算压力降, Dikken (1989)在计算中也只考虑了水平井筒的摩擦压力降。后来的研究者 Ozkan (1992)、Novy (1994)等也沿用此法,且基本上沿用普通水平管中的摩擦压降计算公式。

Landman (1993)在计算中除了考虑摩擦压降以外,还简单地考虑了加速压降。Su (1994)等人提出了一个较为全面的考虑射孔水平井水平段中流动特点的压降计算模型,其中包括管壁摩擦、加速损失、孔眼粗糙度及混合影响造成的压降。但他们根据试验结果分析,得到由孔眼粗糙度造成的压降与由混合影响造成的压降有重叠现象,其机制有待于进一步深入研究。

周生田(1997)等人也提出一个水平井筒压降计算模型,考虑了管壁摩擦压降、加速及混合压降,但他无法得到混合压降的准确计算表达式。

Jang (1999)在 Yuan 研究的基础上继续进行了大量实验,以考察孔眼或筛缝对水平井筒压力降影响,获得了相关的表观摩擦系数计算关系式。本书将利用他的成果,计算考虑射孔孔眼的单相水平井筒变质量流的压力降。

三、复杂结构井井筒流动与油藏耦合的非稳态产能计算

目前,水平井、多分支井的产能预测研究主要是以非稳态产能预测为主,而预测非稳态产能一般比较困难,主要是由于井筒被钻井液和完井液污染,而且油藏中的流体流入流出时,使得产生的压力降很难准确预测。

Dikken (1990)是第一个指出水平井筒压力降将对裸眼水平井产能产生重大影响的学者。但他在耦合计算时,使用了水平井沿井筒流入流量均一分布的假设,而这一假设又恰好忽略了井筒压降的影响,因此他的预测计算结果与实际偏差很大。

Suzuki (1997)研究了井筒压力降对水平井瞬态流动产能的影响。Ozkan (1999)通过研究,利用沿水平井筒油藏砂面压力和流量与井筒压力和流量的连续性和物质平衡原理,获得了裸眼水平油井和气井的瞬态产能预测计算方法。

Penmatcha (1999)发表了箱形油藏水平井全部打开时油藏/井筒耦合的瞬态综合模型。Valvatne (2001)利用半解析耦合模型,研究了带井下油嘴控制的裸眼水平井产能预测与优化控制,以进行智能完井决策分析。

Penmatcha 通过应用 Ouyang (1998)等的摩擦相关式来考虑了井壁流入的影响,应

用 Babu 和 Odeh (1989) 的线源解来确定水平井的产能, 考虑了瞬态和稳态/拟稳态的储层流动。但 Penmatcha 的方法是最一般的解析或半解析耦合模型之一, 它不能用于水平井不平行于水平轴的储层。

Al-Qahtani (1996, 1997) 则研究了水平井打开程度和打开位置对水平井产能的影响, 提出了水平井选择性打开设计思路。但他并没有说明射孔参数与产能的关系。

Tang (2003) 利用 Ozkan 的研究方法, 研究了水平井射孔完井和筛管完井的产能动态的半解析模型, 分析了完井参数对产能的影响。但他的模型只能用于井筒平行于油藏边界的情况, 不能分析孔径、割缝宽度对产能的影响, 只能计算拟稳态或稳态产能。

在目前文献中提出的井筒流动和储层流动的耦合模型中存在以下不足:

(1) 所用的摩擦系数基本是基于普通管流的关系式, 忽略了流体井壁流入的对井筒压降的影响, 不能考虑射孔孔眼的影响。

(2) 没有考虑由于井壁流入引起的加速度压降, 这对高速流入将会导致较大误差。

(3) 都是考虑单相流动, 没有考虑两相流动的影响。

(4) 对于复杂多分支井考虑较少。

四、自然完井解析模型研究

相对而言, 射孔完井产能分析的解析模型不多, 一般都是采用有限元进行分析, 但是对水平井来讲, 由于水平段很长, 沿水平段射孔后, 不像直井那样有几何分流面的存在, 数值模拟方法必须采用全尺寸模拟, 为了考虑孔眼的特征参数, 其网格剖分后形成的刚度矩阵是十分庞大的, 求解十分费时, 极不方便。通过研究, 可以获得一些解决问题的思路方法。

Spivak (1982) 把割缝衬管完井的缝作为线源, 研究了垂直井的瞬态压力响应模型。而 Ahmed (1990) 利用格林函数研究垂直井射孔完井的解析模型, 其解析解中包含了 Bessel 函数及其导数。

Yildiz (1998, 2000) 将孔眼看成线源, 研究了直井射孔完井三维瞬态压力解析模型。Ozkan (1999) 则研究了斜井和水平井射孔完井的瞬态压力解析模型, 讨论了射孔参数对压力和压力导数曲线影响。研究表明, 油藏向孔眼汇流会极大地影响试井的早期流动特征, 他提出的三维模型和几何处理方法是这次研究水平井射孔完井产能半解析模型的基础。

Tang (2002) 利用 Ozkan 提出的射孔孔眼处理方法, 研究了射孔完井和衬管完井参数对水平井产能的影响, 获得拟稳定和稳定的半解析模型。

目前, 国内还没有相关的复杂结构井射孔或筛管完井产能评价的半解析模型研究成果, 为了弄清楚完井参数对复杂结构井产能的影响规律、优化完井设计、提高复杂结构井开采效率, 必须开展与之相关的配套设计理论和设计方法研究, 为复杂结构井完井优化提供依据。

五、水平井控水完井优化技术

水平井控水完井的基本思路是调整产液剖面 and 分段控制, 使水平井的水淹模式有利于提高水平井控制油藏的采收率。为了实现这一目标, 目前国内外发展了相应的水平井控水完井方法, 极大地提高了底水油藏水平井的控水能力。

国外水平井技术发展很快,相应的水平井控水完井的方式和完井工艺从常规的分段完井、恒流控水筛管的半智能完井发展到了智能完井,并在现场成功进行了大量试验,取得了明显效果。同时还发展了一些特殊的控水完井方法,比如 DWS 双管完井方法、中心管完井方法和特殊的控水设备。具体分为以下几类:

- (1) 常规完井:分段完井+变完井参数。
- (2) 半智能完井:分段完井+控水筛管。
- (3) 智能完井:分段完井+ICD 控制。
- (4) DWS 双管完井技术。
- (5) 中心管完井技术。
- (6) 特殊控水技术(EquiFlow Oil Selector 等)。

(一) 常规控水完井方法

常规控水完井方法的主要思想在分段完井的基础上,通过改变水平井各段的完井参数,达到控制水平井产液剖面、延缓水锥、提高油藏采收率的目的。比如对于射孔完井,先优化射孔打开程度、打开位置和段数,在此基础上预测出水平井产液剖面,根据产液剖面,制定水平井打开段各点的最优孔密。这种方法只能控制水平段油藏渗透率级差较小的情况,因为受水平井射孔工艺水平的限制,射孔参数的调整幅度和影响效果是相对有限的。

同样对于割缝衬管完井(调整割缝参数)和各种精密复合筛管完井(调整基管孔密)而言,通过调整完井参数,只能在一定程度上缓解水平井底水脊进的时间和改善水脊模式。

(二) 半智能控水完井方法

由于常规控水完井方法不能有效地控制底水脊进,特别是对于层间差异大、层内水平非均质严重的情况,常规控水完井已明显满足不了油田实际控水的需求。伴随完井工具的进步(特别是管外封隔器、遇油/遇水/遇气封隔器)和对底水油藏水平井控水机制认识的深入,现已研发出具有半智能水平井的恒流控水设备(ICD_s),例如 Schlumberger 的 ResFlow™设备、Halliburton 的 EquiFlow™控制设备等(图 1-1),可以很好地控制水平井突破时间和改善水淹模式。

对于大多数防砂油藏来说,完井主要的方式是:精密复合筛管+ECP(或遇油膨胀封隔器)+ICD_s。对于不防砂的油藏可采用:割缝衬管+ECP(或遇油膨胀封隔器)+ICD_s。如果采用射孔完井,则一般是根据固井质量和测井渗透率剖面进行分段射孔,然后下入油管+封隔器+ICD_s进行控制。需要注意的是,这种完井管柱中筛管的基管是不打孔的。

由于 ICD 是一种可调节各分段流压的设备,相当于限流装置,下井前必须根据预测的产液剖面,在地面预先调节好通过 ICD 装置的压力损失,一旦下井后不能更改,因此称为半智能设备及半智能控水完井方法。

(三) 智能控水完井方法

近两年来,随着井下电力控制和液压控制逐步完善,光纤技术逐渐成熟,以及各种井下仪表、井下滑套和井下安全阀的快速发展,基于智能完井的智能井技术近年来也发展迅速。它通过井下传感器和控制阀,实现单井多层、水平井及多分支井选择性生产和

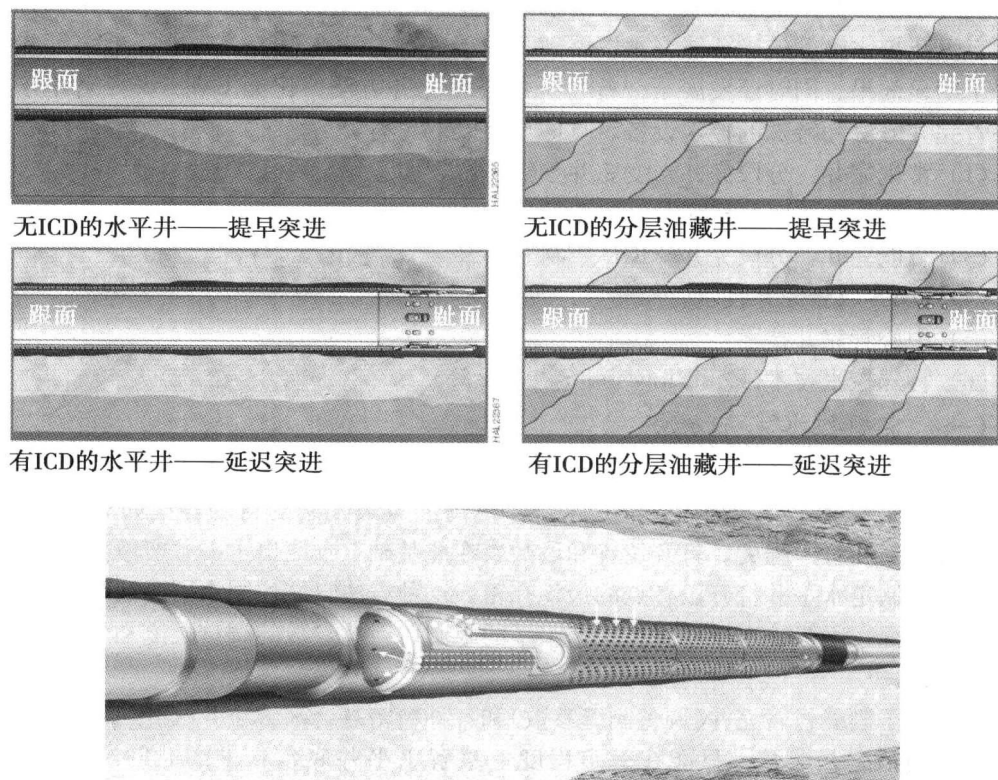


图 1-1 半智能完井控水示意图

注入，实时优化各层的流动和生产剖面，延缓和降低气水锥进，最终达到优化油藏经营和生产管理，提高采收率。

智能完井控水的主要机理是通过消除流动摩擦阻力对砂面压力剖面的影响（即在完井管布置流入控制装置 ICD_s），可以使流入筛管流入剖面得到很好的控制。具体做法是：每一打开段设置一个限流装置 ICD_s，如图 1-2 所示。通过控制每一个限流装置，使得通过沿程的节流装置压力损失逐步降低，从而平衡了水平管段内的管流沿程压力损失，这样就使得油藏井筒砂面压力近似相等，流入剖面线平直，也就使得油藏沿水平井井筒的流入剖面均匀。

同样，对于大多数出砂油藏来说，完井主要的方式是：精密复合筛管+ECP（或遇油膨胀封隔器）+ICD_s。对于不防砂的油藏可采用：割缝衬管+ECP（或遇油膨胀封隔器）+ICD_s。如果采用射孔完井，则一般是根据固井质量和测井渗透率剖面进行分段射孔，然后下入油管+封隔器+ICD_s进行控制。

由于 ICD_s 是一种可通过地面实时调节阀开启度的限流装置，因此下井可根据预测的产液剖面，预先调节好通过 ICD_s 装置的压力损失。如果生产过程中一旦检测到某段的产水太高，可以通过地面装置改变井下 ICD_s 阀的开启度，甚至关闭该段。因此称智能设备及智能控水完井方法。

（四）其他类型的控水完井方法

1. DWS 双管完井技术

DWS 双管完井技术包括两种：一种是用分支水平井开采油藏，用垂直主井筒开采

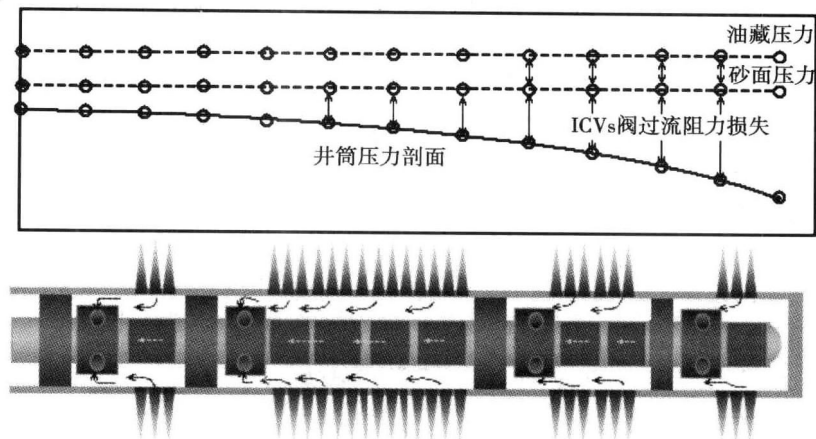


图 1-2 智能完井控制水脊原理图

底水层，简称为 TWS；另一种则是采用同向两分支水平井结构，上方水平井采油，底水层的水平井采水，简称为 BWS。双管完井控水设计井身结构示意图，见图 1-3。

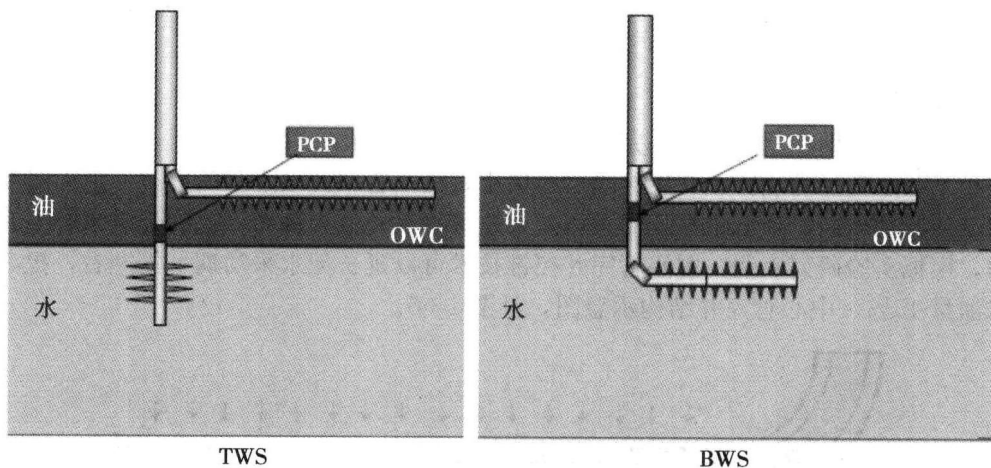


图 1-3 双管完井控水设计井身结构示意图

考虑到油水的粘度差和油层、水层厚度等影响，根据采油速度的大小合理调节排水速度，水区产生的压降可以平衡采油造成的压降，从而使油水界面成为一个油水分流面，保持油水界面稳定，防止水进入采油区，并且不使油进入采水区，这就是双管完井的目的。在相同条件下，采用双层完井方法能将采油速度提高 5 倍，采油率提高至 70%。

传统单管完井方式下，提高采收率必须通过延长生产时间来实现，而双管完井方法可以通过优化油水产量之比，在最短时间内达到最大的采收率。采出水的排放是通过将采出的无油污水直接回注到地层。由于不需要地面产出水处理设备，该方法比较适合用于海上采油。

2. 环空化学封隔与机械封隔法

环空化学封隔即是指应用连续油管(CT)和跨隔封隔器(ACP)将堵剂注入筛管或衬

管和岩石壁之间的环形空间，然后堵剂凝固形成不渗透的阻流环套，达到隔离环空区域的目的。然后配合管内封隔器，实现堵剂的定向注入。如果出水部位在水平井段上部或下部，需要设置 1 个 ACP；如果出水部位在水平井段中部，则需要设置 2 个 ACP。当过量水(气)的产出不是由于断层或裂缝引起时，可考虑采用 ACP 直接封隔出水(气)部位。

环空封堵控水设计井身结构示意图，见图 1-4。

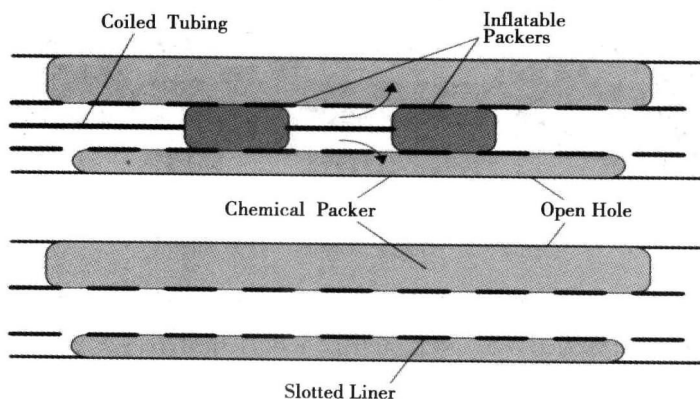


图 1-4 环空封堵控水设计井身结构示意图

3. 中心管完井控锥法

中心管完井即在常规水平井完井(筛管、衬管或射孔完井)基础上，向井眼中再挂一根小于井眼直径的油管，并用封隔器封堵小直径油管 and 井眼之间的环空，从而改变井筒内流体流动方向，降低跟端处的大压差，改善水平井流入剖面，达到延缓水脊上升的目的。模拟实验研究表明，中心管完井控锥技术可以延长无水采油期一倍左右，提高无水采油量 15%。中心管完井结构示意图，见图 1-5。

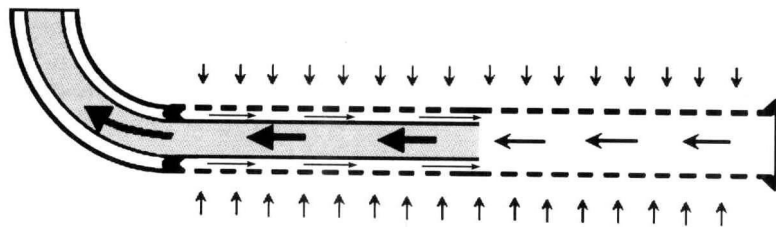


图 1-5 中心管完井结构示意图

4. 特殊控水设备

EquiFlow Oil Selector™ 是 Halliburton 专门针对底水水平井的控水而开发的特殊控水设备(图 1-6)。它与 ICDs 的不同点在于该设备没有采用使各段流量均衡的方法，而是使流体通过防砂层后进入专用的分流程管段，该段管从上到下分布有很多进孔，并预置了相同数量的封堵球，通过密度控制使其只能在水中悬浮。当产水量增大时，管段油水由于重力差异，管内油水界面上升，小球也将随着上升并逐渐封堵位于油水界面以下的进入孔，这样不但可以控制水进入管中心，并且不影响上部油的进入。产水越高，被封堵的流动孔道就越多，从而达到自然控水目的。