

国外油气勘探开发新进展丛书 (一)

GUO WAI YOU QI KAN TAN KAI FA XIN JIN ZHAN CONG SHU

Integrated Waterflood Asset Management

油田注水开发综合管理

Integrated Waterflood Asset Management

- 油田注水开发综合管理
- 油藏增产措施(第三版)
- 油藏工程手册
- 油气圈闭勘探
- 储层表征新进展

石油工业出版社

加内什 C. 萨克尔
阿卜杜勒·萨塔尔 著
王寿平 张正卿 等 译

国外油气勘探开发新进展丛书(一)

油田注水开发综合管理

(中文修订版)

[美] 加内什 C. 萨克尔 著
阿卜杜勒·萨塔尔

王寿平 张正卿 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了油田注水开发综合管理的发展现状,注水管理基础、注水管理步骤、注水开发动态以及储量预测、监督和经济评价等内容,并选取典型实例予以分析,同时就注水管理存在的问题提出了相应的改进措施。

该书既有系统的理论知识,又有较强的可操作性,对解决我国大多数油田注水方面存在的难题具有较强的借鉴价值。

图书在版编目(CIP)数据

油田注水开发综合管理(中文修订版)/(美)萨克尔(Thakur, G. C.),
(美)萨塔尔(Satter, A.)著;王寿平等译. —北京:石油工业出版社, 2001. 11
(国外油气勘探开发新进展丛书; 1)

书名原文: Integrated Waterflood Asset Management

ISBN 7-5021-3592-8

I. 油…

II. ①萨…②萨…③王…

III. 油田注水-综合管理

IV. TE357.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 080615 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 300 千字 印 1—1000

2001 年 11 月北京第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3592-8/TE·2645

定价: 35.00 元

“国外油气勘探开发新进展丛书”

编 委 会

主 任：罗英俊

副 主 任：刘宝和 闫存章 赵政璋 魏宜清

编 委：赵化昆 邓隆武 吴 奇 李海平

张正卿 吴国干 闫世信 岳登台

冉新权 刘德来 王元基 赵帮六

张卫国 周家尧 张仲宏

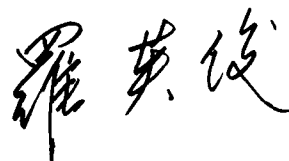
序

中国石油天然气股份有限公司上市以来,油气勘探、生产取得了很大的成绩,为股份公司的发展和价值提升做出了重大贡献。同时,我们应该清醒地看到,现在面临的勘探开发对象越来越复杂,工作难度越来越大,要进一步控制投资和降低成本,实现新的发展,必须在依靠科技进步上做文章;要坚持解放思想,实事求是,用创新思维指导油气田勘探开发工作;不断吸收国外先进的勘探开发技术,为我所用,以提高股份公司整体科技水平。

为了及时了解和跟踪国外油气勘探开发的新理论、新技术、新工艺,提高中国石油天然气股份有限公司油气勘探与生产的理论和技术水平,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司自2001年以来,组织了油气田勘探、开发方面的专家,对国外油气勘探开发方面的新技术、新理论、新成果进行调研。计划用5年左右的时间,以丛书出版的形式,系统地介绍国外油气田勘探与生产方面的理论和技术水平,以期能达到促进生产、更新知识、提高业务水平及技术水平的效果。

经过筛选,第一批翻译出版了国外最近出版的5本专著,即《油藏工程手册》、《油藏增产措施》(第三版)、《油田注水开发综合管理》、《油气圈闭勘探》、《储层表征最新进展》。这5本书都是国外最新出版的权威著作,从不同的方面系统地论述了油气田勘探开发的前沿技术及发展方向,从不同的角度反应了国外油气田勘探与生产方面的现有水平和技术发展趋势。

在这套丛书的出版过程中,中国石油天然气股份有限公司有关部门和研究院所的技术人员,以及石油工业出版社做了许多工作。希望大家认认真真读好这套丛书,同时在实践中应用之,这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用,为搞好油田勘探开发,实施低成本战略,创造更大效益做出贡献。



2001年10月

前 言

目前,我国绝大多数油田均采用人工注水保持压力的开发方式。自 20 世纪 60 年代大庆油田采用早期注水、分层开采获得成功以后,相继在东部渤海湾盆地、大港、胜利、辽河、中原等地区有大批新油田投入注水开发。近几十年来我国在注水开发油田方面进行了大量的科技攻关和研究试验,比较全面地掌握了陆相油田的地质特征、油水渗流机理和规律,形成了配套的工艺技术,积累了丰富的实践经验。现在我国注水开发油田的技术水平已处于世界油田开发的先进行列。

在过去的 40~50 年中,国外油公司的注水开发技术也取得了很大的进展,由于油田开发的技术和设备更为先进,经过改进的设计和经济评价技术已经投入使用,采用计算机的自动化系统有效地协助了数据的采集、分析、计算和管理。美国等西方国家油公司,近年来普遍采用了多学科联合工作的综合注水管理方法,取得了很大的成功。该方法采用集中的注水管理方法,配合最新的技术,使油公司能在注水开发阶段获得最大的开采利润。由于注水开发所获得的产量递减较慢,因此采用综合注水管理,可以有效地延长注水开采期。所以,对于我国大部分已进入高含水、高采出程度阶段的油田,本书在理论和实践上有一定的指导作用和参考价值。

《油田注水开发综合管理》一书内容丰富、涉及面广,系统介绍了油田注水开发综合管理的全过程。全书重点突出,理论与实践结合,通俗易懂,代表了当前国外油公司注水开发管理的主要作法,值得我国从事油田开发的技术人员和管理人员学习和借鉴。该书作者 Thakus 博士现就职于美国雪佛龙德士古公司的石油技术公司,担任高级技术咨询。他主管研究与发展部,负责咨询雪佛龙德士古公司全球作业油藏管理领域的技术服务。在油藏模拟、综合注水管理及作业优化方面,他发表了许多技术论文。针对国内外的作业,他制订并教授油藏工程、油藏模拟及注水课程。他还任职于 SPE 编辑审查委员会和论坛系列委员会。在注水管理方面是一位著名的教授,并在综合油藏管理方面执教 SPE 课程。

本书第一至第十二章分别由王寿平、史云清、王熙华、杨世刚、李铁成、马改正、刘长利、陈万江、李杰、刘新会、李会祥、侯高文翻译;其他章节及附录由张鹏、伏敏、王瑞宇、刘宴华、杜祥、黄展强、胡竹梅、王文忠、李琪、张爱国、周根先、刘新玲、王淑玉、赵卫红、腾春鸣、薛丽丽、黄爱君、朱跃民、曹洪涛、唐周怀等人翻译。全书由陈万江统稿,侯高文校订,张正卿、王寿平审定。

本书出版过程中得到了中国石油天然气股份有限公司副总裁、中国石油勘探与生产分公司总经理刘宝和和中国石油勘探与生产分公司副总经理闫存章的大力支持,张正卿、刘德来、张仲宏做了大量的组织工作。美国雪佛龙德士古公司徐宽雄经理和杨荣喜博士给予了很大的帮助,在此表示诚挚的谢意。

编 者

2001 年 10 月 20 日

版 权 声 明

本书经由美国 PennWell Publishing Company 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

目 录

第一章 导 论	(1)
第二章 油藏管理的概念、方法和注水评价技术	(4)
第一节 注水管理	(4)
第二节 注水采收率	(4)
第三节 注水远景评价	(7)
第三章 综合技术研究——地质学和工程学	(10)
第一节 收集和组织数据	(10)
第二节 地质输入	(16)
第三节 重新评价地下地质资料	(20)
第四节 利用老资料编制新图	(21)
第五节 死油	(22)
第六节 二次地质解释	(22)
第七节 油藏非均质性	(25)
第八节 地质与工程学的协同作用	(26)
第九节 综合勘探与开发技术	(27)
第十节 油藏描述设计	(30)
第四章 注水数据	(32)
第一节 室内数据	(32)
第二节 现场数据	(40)
第五章 注水采收率及其影响因素	(43)
第一节 五点井网注水实例——一次采油	(43)
第二节 注水的时限	(45)
第三节 地层渗透率变化	(46)
第四节 临界气饱和度	(47)
第五节 垂向渗透率	(48)
第六节 原油重度	(49)
第六章 加密钻井	(51)
第一节 为什么要加密钻井	(52)
第二节 选择加密井	(54)
第三节 实例	(56)
第七章 注水设计:地质、工程和操作	(57)
第一节 设计和操作	(57)
第二节 注水方案设计中应注意的问题	(62)

第三节	油藏特征	(63)
第四节	工艺和作业设计	(66)
第五节	设备设计	(68)
第六节	资料收集设计	(68)
第七节	经济评价	(69)
第八节	注水方案失败的原因	(69)
第九节	注水方案设计实例	(70)
第八章	注水开发动态和储量预测	(78)
第一节	容积法	(78)
第二节	经验法	(80)
第三节	传统方法	(80)
第四节	动态曲线分析	(82)
第五节	油藏数值模拟	(86)
第九章	注水监督技术	(89)
第一节	注水监督的主要因素	(89)
第二节	水质的维护	(94)
第三节	监测	(95)
第四节	实例	(96)
第十章	现场作业	(99)
第一节	水系、配伍性和水处理	(99)
第二节	地下和地面流体控制	(110)
第三节	注意事项	(118)
第四节	转注老井与钻新井	(119)
第五节	增注方法	(121)
第十一章	注水方案经济分析	(122)
第一节	经济标准	(122)
第二节	方案	(123)
第三节	资料	(123)
第四节	经济评估	(124)
第五节	风险和不确定性分析	(127)
第十二章	实例分析	(128)
第一节	埃尔克盆地麦迪逊油藏	(128)
第二节	丹佛开发区注水方案	(130)
第三节	米恩斯·圣·安德拉斯开发区	(132)
第四节	杰伊—小埃斯坎比亚溪油田	(136)
第五节	尼尼安油田	(139)
第十三章	当前及将来的任务	(143)
附录 A	油藏管理的概念和过程	(144)

第一节	油藏管理的定义	(144)
第二节	油藏管理的过程	(145)
第三节	合作和工作队	(148)
第四节	组织和管理	(149)
第五节	地学与工程的结合	(150)
第六节	油藏管理方案失败的原因	(151)
附录 B	油藏模型	(153)
第一节	油藏模型的作用	(153)
第二节	地学	(155)
第三节	Loudon 油田的表面活性剂先导性试验	(156)
第四节	地震资料	(159)
第五节	地质统计	(159)
第六节	采油工程	(161)
第七节	一体化	(161)
第八节	实例研究	(162)
附录 C	数据采集分析与管理	(164)
第一节	数据类型	(164)
第二节	数据采集和分析	(165)
第三节	数据的有效性	(166)
第四节	数据的储存与检索	(166)
第五节	数据应用	(166)
第六节	数据实例	(168)
附录 D	注水油藏工程	(172)
第一节	非混相驱	(172)
第二节	注采井网	(174)
第三节	油藏非均质性	(176)
第四节	采收率	(176)
第五节	注入速度	(178)
附录 E	生产监测中的其他相关内容	(179)
第一节	S_{or}/ROS 的确定	(179)
第二节	注入测井和生产测井	(180)
第三节	用于注水资产管理的井间示踪剂	(184)
附录 F	单位换算表	(189)

第一章 导 论

石油开采中的一次采油是利用天然开采机理,也就是利用液体和岩石的膨胀及溶解气驱开采石油。采用这种方法,约有 80% 以上的原始原油地质储量无法开采。图 1—1 和表 1—1 分别给出了一次采油的一些特点。

继一次采油之后,注水成了提高采收率最重要的方法,利用这种方法,人们已从地下开采出了数亿万桶的石油。然而,由于油价不稳定而导致提高采收率技术应用的不确定性,使得综合注水管理变得比以往任何时候都重要。这种管理并不仅限于最初的工程和地质评价、经济论证和项目的审批,而是从开始注水之前到二次采油变得不经济或要转为强化采油时,这些工作都一直在进行。

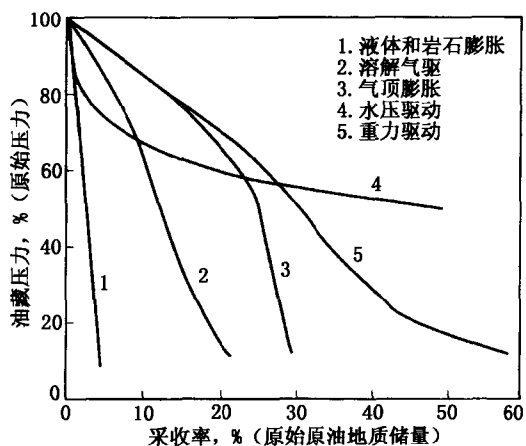


图 1—1 各种驱油机理特点

表 1—1 各种驱油机理特点

机 理	油藏压力	气油比	产水	效率	其他
液体与岩石膨胀	迅速并持续下降 $p_i(\text{原始压力}) > p_b$ (泡点压力)	保持很低且恒定	不产水(高含水饱和度和油藏除外)	1%~10% 平均 3%	
溶解气驱	迅速并持续下降	最初很低,然后上升到最大,再降低	不产水(高含水饱和度和油藏除外)	5%~35% 平均 20%	早期阶段需要抽油
气顶驱	缓慢并持续下降	上倾方向的井内持续上升	无水或忽略不计	20%~40% 平均 25% 以上	下倾部位的井内有气窜指示气顶驱
水压驱动	保持很高,压力对油、气、水的产出速率很敏感	在压力保持很高的情况下,保持很低	下倾部位的井产水较早,且产量会上升到很高	35%~80% 平均 50%	当忽略水侵时,按质量平衡计算的 N 值增加
重力驱动	迅速并持续下降	下倾部位的井内保持很低,而在上倾部位的井内保持很高	无水或可忽略不计	40%~80% 平均 60%	当 $K > 200\text{mD}$ 时,地层倾角 $> 10^\circ$, 且 μ_o 很低($< 5\text{cP}$)时

综合注水管理所涉及的内容包括油藏特性、油藏流体及其特性、井的建立与操作以及流体的地面处理等。这些均是一元化系统的相关内容(一元化系统如图 1—2 所示)。过去,人们往往把注意力重点放在油藏动态上。然而,随着油藏管理方法的应用,在注水管理中包括油水井、设备、水系统和野外操作等方面的管理内容已成为石油工业习惯的做法。

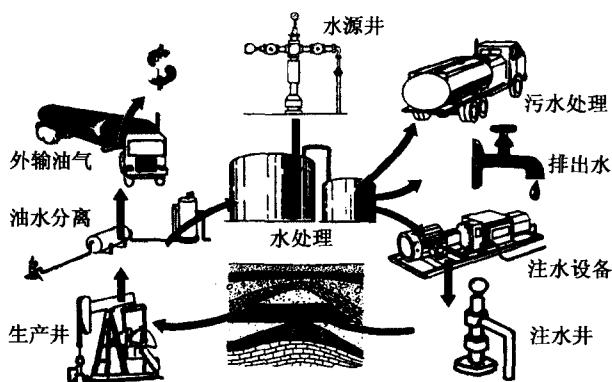


图 1—2 注水管理系统

一、为何要注水

注水之所以被广泛地应用于商业性开采石油,主要出于下列原因:

- (1)水易于获得；
- (2)水对于低相对密度和中等相对密度的原油是一种有效的驱扫媒介；
- (3)注水的投资和操作费用低,而利润大；
- (4)水注入地层相对容易；
- (5)水在油层中容易流动。

二、注水的历史

注水的历史可以追溯到 19 世纪中叶,自那时起逐步得到发展。第一次注水纯属偶然,它发生在美国的宾夕法尼亚州皮特霍尔(Pithole)城。许多早期注水都是由于从浅水砂层中的漏失造成的,或者是积聚的地表水进入井眼造成的。到 19 世纪末,注水的主要作用是保持油藏压力,使油井有一个比自然衰竭长的寿命。

最初的注水是先在一口井上进行,当邻井被水淹时,即转为注水井,从而形成“环状水驱”。随着注水的发展,又出现了“边缘水驱”和“线性水驱”。1924年,第一个“五点井网注水”方案在宾夕法尼亚的布拉德福德(Bradford)油田实施。

1931年,注水应用从美国宾夕法尼亚州发展到俄克拉何马,1936年又发展到得克萨斯州布朗郡的弗莱(Fry)油田。尽管如此,直到20世纪50年代初,注水才真正得到广泛应用。

三、綜合注水管理的重要性

现代注水管理不仅需要技术和经营技巧,而且还需要商务、政治和环境方面的知识。系统化的综合注水管理方案包括以下几个方面。

- (1)油藏衰竭与开发策略;
- (2)数据采集、分析与管理;
- (3)地质与地球物理评价;
- (4)油藏模拟和动态预测;
- (5)设备条件;
- (6)经济优化。

注水的设计、评价和管理在各相关部门(如地质和地球物理学、油藏与采油工程、设备工程、钻井、野外作业以及相关学科)相互配合时更为有效。完成这一方案还需要管理机构的支持,现场人员承担义务,以及多学科的协同工作。项目的成功取决于细心的监测与监督,对其动态进行彻底连续的评价,并适时采取必要的措施。

综合注水管理在创造油藏最大经济价值和石油采收率方面是必不可少的。

四、综合注水管理现状

在过去的 40~50 年中,注水管理取得了长足的进展。技术和设备更为先进,经过改进的设计和监督技术已经投入运用,采用计算机的自动化系统有效协助了数据的采集、分析和管理工作。

在美国,真正的多学科工作队配合一直很成功。注水管理采用集中的方法,配合最新的技术,使油公司能够在注水阶段获得最大的开采利润。由于注水所获得的产量递减较慢,因此,采用综合管理方法,可有效地延长注水开采,将具有普遍的意义。

五、综合注水管理的具体内容

综合注水管理包括制定目标、设计方案、监测、评价以及修改整个项目进程中的方案等,是成功操作的关键。本书将重点介绍以下几个方面的内容:

- (1)注水管理基础;
- (2)注水管理技术、实施和经济评价;
- (3)举例说明注水管理的最佳方案。

本书第一章重点介绍注水的原因、历史,综合注水管理的重要性及发展现状。

第二章介绍注水管理基础和注水评价标准。

综合技术包括地质、地质统计学、地球物理学和油藏工程,这在油藏描述研究方面具有很重要的作用。数据管理、影响注水开采的各种因素以及加密钻井等,都是注水管理的重要步骤。这些内容将在第三、四、五、六章中予以介绍。

第七章介绍根据地质、工程和操作进行注水设计,同时介绍注水设计实例。

有关注水的产量和储量预测、监督方法、野外作业和经济评价,将在第八、九、十、十一章中予以介绍,这些内容对于有效注水管理是必不可少的。

第十二章介绍注水管理的选择实例,其中,综合分析包括注水管理的主要成效、不足之处和未来作业方案。

第十三章说明注水管理目前存在的难题(包括技术上和组织上两个方面)、改进情况、发展前景和下一步所要采取的措施。

有关细节和补充材料列于附录。

第二章 油藏管理的概念、方法和注水评价技术

注水管理的目标是在最大程度地降低投资和作业费用的同时,通过优化开采把利润率提高到最大值。成功的注水管理需要制定目标、周密的设计、运作、动态监测以及油藏动态评价。

本章主要讨论油藏管理的定义、概念、方法以及各职能部门的协作配合和集中,同时还要介绍注水方案的筛选和评价方法。

第一节 注水管理

注水管理的作用是提供控制作业和获得最大可能经济开采所必需的论据、信息和资料。

注水管理准则应包括:

- (1)油藏特征;
- (2)估算可开采石油的产层面积;
- (3)分析井网动态;
- (4)数据采集;
- (5)试井和油藏压力监测;
- (6)油水井资料数据库。

就注水管理来说,很重要的就是要有一支包括地质与工程专家、野外人员和管理人员在内的综合管理队伍。要使作业成功,还需要:

- (1)研制一套经济可行的方案;
- (2)执行方案;
- (3)进行动态监测和评价;
- (4)修正方案与策略。

这些内容将在附录 A 中详细讨论。

第二节 注水采收率

总的注水采收率由下式计算:

$$E_{\text{RWF}} = E_{\text{D}} \cdot E_{\text{V}} \quad (2-1)$$

式中 E_{RWF} ——总的注水采收率, %;

E_{D} ——水波及体积以内的驱替效率, %;

E_{V} ——体积波及系数,实际被水波及的油藏体积的百分数。

一、驱替效率

驱替效率受岩石和流体性质与流通能力(注入水的孔隙体积)的影响。它可以通过实验室驱替试验、前缘推进理论和经验相关法确定(见第八章和附录 D)。影响驱替效率的因素见表 2—1。

表 2—1 影响注水效率的因素

驱替效率:

油与水的粘度
注水开始与结束时的油层体积系数
注水开始与结束时的含油饱和度
相对渗透率特性

波及系数:

油藏非均质性
(孔隙度、渗透率和流体性质在平面和垂直方向上的变化)
定向渗透性
地层不连续性(断层)
水平与垂直裂缝
地层深度
注水井网类型
改变注水方向
流通能力
油与水流量(有效渗透率与粘度)比

二、波及系数

体积波及系数定义为:

$$E_v = E_A \cdot E_I \quad (2-2)$$

式中 E_A ——平面波及系数;

E_I ——垂向波及系数。

波及系数与渗透率的变化、流体性质、流体分布、流体饱和度和裂缝体系有关。有害的渗透率变化会导致波及系数低、见水快和高含水。影响波及系数的因素见表 2—1。

图 2—1 所示是顶部为高渗透层的地层。沿最小阻力路径流动的水优先进入这一层,其结果是很快见水,而且,由于垂向波及效率低,造成大量的油遗留于地层。

鉴于渗透率的变化因素是通过岩心分析计算得出的,故在开始注水之前采集岩心数据极其重要。岩心数据还可用于解释高渗透层和高含水的主要原因。

注水采收率还可以按照以下公式计算:

注水采收率 = (原始石油地质储量 - 一次采油采收率 - 可波及面积内的残余油 - 不可波及面积内的剩余油) / 原始石油地质储量。该表达式的各部分由以下各式得出:

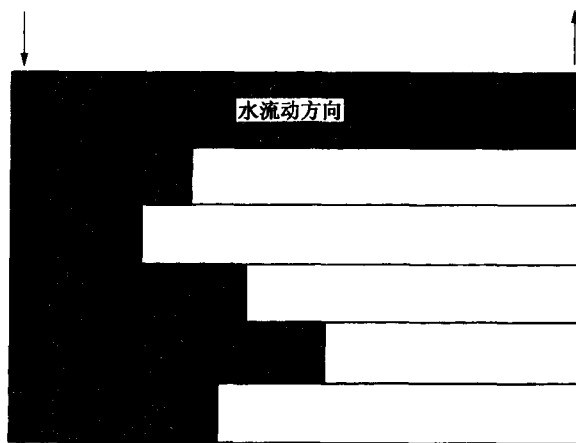


图 2—1 在可变渗透率系统中的驱替实验

$$\text{原始石油地质储量 (bbl/(acre} \cdot \text{ft))} = 7758 \phi (S_{oi}/B_{oi}) \quad (2-3)$$

$$\text{一次采油采收率 (bbl/(acre} \cdot \text{ft))} = 7758 \phi E_v (S_{oi}/B_{oi}) PRF \quad (2-4)$$

$$\text{残余油/可波及面积 (bbl/(acre}\cdot\text{ft))} = 7758\phi E_v (S_{oc}/B_{oc}) \quad (2-5)$$

$$\text{剩余油/不可波及面积 (bbl/(acre}\cdot\text{ft))} = 7758\phi (1 - E_v) (S_{onc}/B_{onc}) \quad (2-6)$$

式中 ϕ ——孔隙度, %;

S ——饱和度, %;

B ——油层体积系数(地层储量桶数/储罐桶数);

E ——波及系数, %;

PRF ——一次采油采收率, %。

角注 i, o, c, nc, v 分别表示“原始”、“油”、“可波及的”、“不可波及的”和“体积的”。

注意, 对于充满油和水的介质来说, $S_o = 1 - S_w$ (角注 w 表示水)。 S_{oc} 表示可波及面积或水淹面积中的残余油饱和度 (S_{or}), S_{onc} 是不可波及或未波及面积中的残余油饱和度, 约等于 $(1 - S_{wi} - S_g)$ 。式中 S_g 是一次开采后的游离气饱和度。鉴于可波及面积和不可波及面积条件下的压力实际上是一样的, 故认为 B_{oc} 和 B_{onc} 和 B_{or} 相同, 约等于 1。

根据公式(2-3)至式(2-6), 注水采收率可有以下形式:

$$E_{RWF} = \{ (S_{wi}/B_{oi}) (1 - PRF) - E_v (S_{or}/B_{or}) - (1 - E_v) \times [(1 - S_{wi} - S_{gi})/B_{or}] \} / [(1 - S_{wi})/B_{oi}] \quad (2-7)$$

这样看来, 注水采收率主要取决于 5 个变量: S_{wi} 、 S_{or} 、 B_{oi} 、 PRF 和 E_v 。在这些因素中, 如果其他一些因素都有利, 则其中一项有利与否将无关紧要。但如果有两个以上不利因素, 则将导致注水效率低下。如果这 5 个变量都有利, 可以期望获得较高的注水采收率。另外, 只要束缚水饱和度和波及系数有利, 注水仍然有可能获得成功。因此, 这两个变量最为重要, 需要给以非常严格的评价。

三、一次采油采收率

溶解气驱一次采油采收率受孔隙度、原始含水饱和度、原始或泡点压力下的油层体积系数、绝对渗透率、原始或泡点压力下的原油粘度、泡点或枯竭压力的影响。在计算最近已投入开发且有足够的油藏和生产数据的油田的一次采油采收率时, 通常没有大的问题。然而, 对于生产数据不可靠或采用不合理测井方法的老油田, 要估计一次采油采收率很困难。

影响注水采收率的因素列于表 2-2。

表 2-2 影响注水采收率的因素

主要变量	其他变量
原始含水饱和度	孔隙度
残余油饱和度 (驱替效率)	绝对和相对渗透率特性
油层体积系数 (原油收缩率)	油与水粘度
一次采油采收率	原始压力
体积波及系数	一次开采后的枯竭压力
平面波及	构造特性
垂向波及	油藏非均质性
	注水井网

续表

主要变量	其他变量
	注水时间 经济因素 井距 油藏深度 油价 水可获得性 作业费用

第三节 注水远景评价

表 2—3 给出了一些有关快速评价标准的经验法则,包括注水和注水见效的经验性能因数。

表 2—3 快速评价的经验筛选标准

注水的经验性能因素	数值范围	平均设计系数	注 释	使 用 指 南
注入速度 —井网注水 —边缘注水	2~5bbl/(ft·d) 5~15bbl/(ft·d)		根据实际吸水能力试验、经验图表或现场经验估算	目的: 计算开始注水前的含油饱和度(S_o) 孔隙体积的百分数 用法: $S_o = (1 - S_w) \times \left(1 - \frac{N_p}{N}\right) \left(\frac{B_o}{B_{\alpha}}\right)$ 式中 S_w——开始注水前的含水饱和度; N_p/N——开始注水时的累积采油量/储罐原油地质储量; B_o——开始注水时的体积系数; B_{α}——原始油层体积系数,地层储量桶数/储罐桶数。 注意事项: (1)检查油藏,搞清所有注水区的泄油面积是否相等。这种检查可以确保水淹区的含油饱和度不会低于油藏的平均数; (2)含油饱和度小于40%的地区,注水前景不好; (3)S_o为40%~67%的数值范围
最终注水量	0.9~2.0 倍孔隙体积	1.5		
最终注水量与最终增产原油之比	5.6~70.8	15		
注水见效 —见水时间 —见水时的充满程度	2/3 的充满程度 0~45mon 0.20~0.67 倍孔隙体积	0.5 倍孔隙体积	对于非均质层状油藏采用低值	
达到最高产油量的时间 —最高产油量时的充满程度	0.54~3.24 倍孔隙体积	1 倍孔隙体积	充满时很快达到最高产量,但对于非均质层状油藏比较低	
产油高峰期的持续时间	6~49mon		如果注入能力差,产量高峰期会更长	
最高产油期结束时,注水累积产油与注水最终产油量之比	0.33~0.63	0.45		
最高产油量与注入量之比	0.03~0.55	0.2		
最高产油量之前的采收率	剩余一次和二次采收率的1/2			
最高产油量之后的递减速度	每年10%~25%			
总产量	注水量的80%(注水效率)			
二次与一次采收率之比	1/2~1		取决于渗透率、戴克斯特拉—帕森斯系数、油水粘度比和井距	
最终产水量	最终注入量的 $1/2 \sim 3/4$		由于气顶充满和层外注水而有损失	
注水开始时的最小含油饱和度	50%(最小40%)			