

油田注水开发效果 评价方法

YOUTIAN ZHUSHUI
KAIFA XIAOGUO
PINGJIA FANGFA

张锐·著

石油工业出版社

油田注水开发效果评价方法

张 锐 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以砂岩油田(油藏)为评价对象,系统地提出了油田注水开发效果的评价方法,主要内容包括含水上升率及耗水量评价分析、注水利用率评价分析、注入水波及体积评价分析、注采压力系统评价,以及储量动用程度、产能变化规律评价分析。

本书可供从事油田开发的工程技术人员及管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油田注水开发效果评价方法/张锐著.

北京:石油工业出版社,2010.4

ISBN 978-7-5021-7606-8

I. 油…

II. 张…

III. 油田注水-油田开发-效果-评价

IV. TE357.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 002084 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:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

850×1168 毫米 开本:1/32 印张:4.625

字数:86 千字 印数:1—3000 册

定价:20.00 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

我国砂岩油田注水开发达到了较高水平,诸多专家已出版了各种著作,从理论到实践阐明了砂岩油田注水开发的规律性,评价了油田开发效果,提出各类综合调整措施以求不断提高原油采收率等。作者于 20 世纪 70 年代末对油田开发阶段划分及其开采特点进行过简要的评价分析,80 年代中提出了评价砂岩油田注水开发效果的五套方法。当时,有关领导曾提出整理出版,由于种种原因未能实现,现重新整理、修改、出版。

鉴于我国已投入开发的油田,绝大部分采用人工注水的开采方法。注水效果的好坏,不仅直接影响到油田开发效果、水驱采收率的大小,而且还将直接影响到原油产量的增长速度及产量的稳定程度。我国注水开发油田为陆相沉积,油层非均质严重,储层结构复杂,原油性质较差,这种宏观、微观非均质以及原油黏度较高的特征,往往造成注入水不均匀推进,注入水在多孔介质中驱油效率低,采油的同时排出水量大,导致一半多的石油储量滞留地下。对此,必须及时地调整开发系统,保持油田开发的科学性、预见性,才能不断地改善开发效果。由此说来,系统地提出一套评价油田注水开发效果的方法和鉴别的标准,就具有重要的意义。

评价油田注水效果,贯穿于油田开发过程的始终。

由于油田地质特点不同、开采条件不同、开发阶段不同，因而开发指标有较大的差别。因此，评价油田注水开发效果的方法和鉴别标准是一个涉及面广、问题比较深入而又比较复杂的综合性研究题目。这里仅以砂岩油田（油藏）为评价对象，采用与理论值比较和同类型进行比较的方法，分类、分阶段地进行评价分析。

评价油田注水开发效果好坏的重要指标是水驱采收率的大小，这项内容已有很多专著，这里不再涉及，本书初步考虑评价以下几项内容：

- （1）不同开发阶段，含水上升率大小的对比评价；
- （2）不同开发阶段，耗水量（累积水油比）大小的对比评价；
- （3）不同开发阶段，存水量多少的对比评价；
- （4）注入相同体积条件下，采出程度高低的对比评价；
- （5）不同注水状况条件下，波及体积大小的评价分析；
- （6）不同开发阶段，油井产能变化规律的分析；
- （7）不同类型油田，产量变化规律分析；
- （8）油藏能量保持和利用状况分析。

本书共分五章：第一章“含水上升率及耗水量评价分析”，主要介绍无因次注入曲线（累积注水量、采油量之比和采出程度关系曲线）和无因次采出曲线（累积采水量、采油量之比和采出程度关系曲线）的统计、使用；

此外介绍评价油田含水变化规律的两种经验公式和对比图版。第二章“注水利用率评价分析”，主要介绍不同类型油田存水率标准曲线的确定方法，不同类型油田注入倍数与采出程度关系曲线的统计和使用。第三章“注入水波及体积评价分析”，其中包括有矿场资料的统计、分析，也包括有室内水驱油成果的应用。第四章“注采压力系统评价”，主要介绍了在油田流入、流出最佳配合条件下考虑注采压力平衡，注采工艺技术的合理性、可行性基础上分析并提出了针对油田（油藏）特点的合理的压力系统。第五章“储量动用程度、产能变化规律评价分析”，主要分析不同开发阶段，油井产能变化规律，分析影响油田稳产的主要因素。

由于评价砂岩油田注水效果的五套方法是在对油田矿场资料、数值模拟资料、室内试验资料进行整理、分析的基础上于20年前提出的，使用的都是当时的资料和数据，这次整理仅做文字方面的推敲改动，资料和数据很难补充修改，好在提出的方法追求的是科学性和实用性，但愿在这方面对读者有所启发。本书五套方法中，第四章方宏长、王蔚同志参与了研究工作，第五章第三节邢瑞林、陈元千等同志参加了研究工作，在此表示谢意。限于当时所掌握的资料，更主要的是限于作者水平，本书难免有不足和错误，恳请广大读者批评指正。

在本书出版之际，衷心感谢中国石油天然气股份公司总地质师、中国石油勘探开发研究院王道富院长现今

提出传承技术的要求,感谢原石油工业部闵豫副部长、谭文彬司长当年对本书中相关部分的肯定,才有了对本书重新进行整理、修改、出版的愿望。衷心感谢中国石油勘探开发研究院专家室主任丁树柏的鼓励与支持,感谢韩大匡院士、以及孙希文、朴晶明、邓明等同志对本书出版工作的支持和帮助!感谢石油工业出版社同志对本书的大力支持。

作 者

初稿于1988年9月

2009年5月完稿

目 录

第一章 含水上升率及耗水量评价分析	(1)
第一节 无因次注入曲线、无因次采出	
曲线法	(1)
一、基本公式	(2)
二、方法应用	(6)
三、方法验证	(19)
第二节 综合含水率与采出程度关系	
曲线法	(26)
一、与理论曲线对比法	(26)
二、经验公式法(同类型油田对比法)	(28)
第二章 注水利用率评价分析	(41)
第一节 存水率统计法	(41)
一、基本公式	(42)
二、方法应用	(44)
第二节 相同注入倍数下采收率对比法	(52)
一、相同注入倍数下影响采收率的	
主要因素	(52)
二、同类型油田对比评价注水开发效果	(59)
第三章 注入水波及体积评价分析	(65)
第一节 矿场资料统计法	(65)

第二节 水驱油实验资料统计法	(66)
一、室内水驱油实验资料整理 及其统计分析	(66)
二、评价油田注入水波及体积	(70)
第三节 由注入水体积波及系数大小评价井网 适应性	(71)
一、相关公式及其井网适应性评价步骤	(71)
二、油田实例	(73)
第四章 注采压力系统评价	(77)
第一节 评价准则及评价方法、步骤	(77)
一、评价准则	(77)
二、评价方法和步骤	(78)
第二节 评价曲线的计算与标定	(81)
一、流入生产特征曲线(IPR 曲线)计算	(81)
二、举升曲线计算	(85)
三、注入生产特征曲线(IIR 曲线)计算	(90)
四、破裂压力计算	(93)
第三节 实例	(94)
一、基本情况及注采压力系统曲线绘制	(94)
二、目前压力系统评述	(96)
三、注采压力系统调整意见	(97)
第五章 储量动用程度、产能变化规律 的统计分析	(101)
第一节 水驱控制储量、动用储量 矿场统计分析	(101)

一、水驱控制储量统计	(101)
二、动用储量统计	(102)
第二节 油井产能变化规律的统计分析	(103)
第三节 油田产量变化规律及主要影响 因素	(109)
一、油田开发阶段划分及其开采特点	(110)
二、稳产期采出程度和第三阶段递减 幅度的初步分析	(113)
参考文献	(134)

第一章 含水上升率及 耗水量评价分析

注水开发油田在无水采油期结束之后,将进入含水采油期。随着含水率的逐步上升,油田稳产将受到严重影响,而含水上升速度的快慢,还将影响着油田开发效果的好坏和经济效益的高低。因此,评价、分析含水上升率以及耗水量(累积水油比)是评价油田注水效果的重要内容。

第一节 无因次注入曲线、 无因次采出曲线法

评价油田开发效果,预测油田动态,矿场使用较多的是各种驱替特征曲线系列的方法。该方法表达了水驱油田进入中高含水期之后,当含水继续上升,累积产水量(W_p)、累积产油量(N_p)之间存在着一种统计关系。1959年,(前苏)M. И. Максцмов 表示为^[1]:

$$W_p = ae^{bN_p} \quad (1-1)$$

式中 a, b ——统计常数。

1958年,F. F. Wright(美)在半对数坐标纸上描绘了水油比(WOR)与累积采油量(N_p)的直线关系^[2]。1971年,E. H. Timmermon 统计了美国一些水驱油田,提出月度油水比(OWR)与累积采油量(N_p)间的统计规律^[3]:

$$\lg OWR = aN_p + b \quad (1-2)$$

我国许多学者、专家,深入研究国内外水驱油藏动态,完善并发展了驱替特征曲线的方法,相继提出的相关公式仅举下例^[4~8]:

$$\lg W_p = bN_p + a \quad (1-3)$$

$$\lg WOR = mR + n \quad (1-4)$$

$$\lg \Omega_p = A + BN_p \quad (1-5)$$

式中 WOR ——生产水油比;

R ——采出程度;

Ω_p ——累积采液量, 10^4 m^3 ;

a, b, m, n, A, B ——统计常数。

驱替特征曲线方法中所表达的是采出量(油、水、液)之间的关系。在此基础上,从物质平衡的最基本原理考虑,本次提出从油田注入状况和采出状况间进行评价、分析和预测。

无因次注入曲线指累积注水量、累积采油量之比(质量比,简称累积注入比)与采出程度间的关系曲线;无因次采出曲线指累积采水量、累积采油量之比(质量比,简称累积水油比)与采出程度间的关系曲线。统计发现,当油田进入中高含水采油期后,两条曲线在半对数坐标纸上均呈直线关系(累积注入比、累积水油比取对数)。

一、基本公式

油田进入中高含水期后,无因次注入曲线、无因次

采出曲线具有以下统计规律：

$$\ln \frac{W_i}{N_p} = a_1 + b_1 R \quad (1-6)$$

$$\ln \frac{W_p}{N_p} = a_2 + b_2 R \quad (1-7)$$

式中 W_i ——累积注入量, 10^4 m^3 ;

N_p ——累积采油量, 10^4 t ;

W_p ——累积采水量, 10^4 m^3 ;

R ——采出程度, %;

a_1, a_2, b_1, b_2 ——统计常数。

预测水驱采收率, 由式(1-6) ~ 式(1-7)得:

$$\ln \frac{\left(\frac{W_i}{N_p}\right)}{\left(\frac{W_p}{N_p}\right)} = (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2)R \quad (1-8)$$

油田注水开发后期, 随含水上升, 注入水作为驱油介质的作用逐步降低, 含水越高, 作用越小, 当 $\left(\frac{W_i}{N_p}\right)$ 趋近于 $\left(\frac{W_p}{N_p}\right)$, 即 $\left(\frac{W_i}{W_p}\right) \approx 1$ 时 (油田开发实践中是不可能的, 经济上也是不允许的), 油田含水将达到经济界限的极限值, 注入水大量被排出, 这时与之对应的采出程度认为是水驱采收率 (E_R)。由公式(1-8)得:

$$E_R \approx \frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2} \quad (1-9)$$

预测某一时刻的累积注采比和累积水油比时,则:

$$\left(\frac{W_i}{N_p}\right)_2 = \left(\frac{W_i}{N_p}\right)_1 e^{b_1(R_2-R_1)} \quad (1-10)$$

$$\left(\frac{W_p}{N_p}\right)_2 = \left(\frac{W_p}{N_p}\right)_1 e^{b_2(R_2-R_1)} \quad (1-11)$$

当 R_2 为已知时,即可求出所对应的 $\left(\frac{W_i}{N_p}\right)_2$ 和 $\left(\frac{W_p}{N_p}\right)_2$, 当 $R_2 = E_R$ 时,即可求出最终 $\left(\frac{W_i}{N_p}\right)_{\max}$ 和 $\left(\frac{W_p}{N_p}\right)_{\max}$

预测某一阶段注入量:

$$\Delta W_i = W_{i2} - W_{i1} = \left(\frac{W_i}{N_p}\right)_2 NR_2 - \left(\frac{W_i}{N_p}\right)_1 NR_1 \quad (1-12)$$

式中 ΔW_i ——阶段注入量, 10^4 m^3 ;

N ——地质储量, 10^4 t 。

将式(2-10)代入式(2-12),整理后得:

$$\Delta W_i = W_{i1} \left[\frac{R_2}{R_1} e^{b_1(R_2-R_1)} - 1 \right] \quad (1-13)$$

将公式(1-7)对时间求导数:

$$\frac{1}{\frac{W_p}{N_p}} \cdot \frac{d\left(\frac{W_p}{N_p}\right)}{dt} = b_2 \cdot \frac{dR}{dt} \quad (1-14)$$

$$\begin{aligned}\frac{d\left(\frac{W_p}{N_p}\right)}{dt} &= \frac{1}{dt} \left[\frac{N_p dW_p - W_p dN_p}{N_p^2} \right] \\ &= \frac{Q_o}{N_p} \left[\left(\frac{Q_w}{Q_o} \right) - \left(\frac{W_p}{N_p} \right) \right] = \frac{Q_o}{N_p} \left[F - \left(\frac{W_p}{N_p} \right) \right] \quad (1-15)\end{aligned}$$

式中 Q_o ——年产油量, 10^4t ;

Q_w ——年产水量, 10^4m^3 ;

WOR ——水油比。

将式(1-15)代入式(1-14),得:

$$\frac{Q_o}{N_p} \left[WOR - \left(\frac{W_p}{N_p} \right) \right] = b_2 \left(\frac{W_p}{N_p} \right) v_{op}$$

$$\text{因} \quad W_p = \frac{W_p}{N_p} \cdot R \cdot N$$

$$v_{op} = \frac{Q_o}{N}$$

$$\text{则} \quad WOR = \left(\frac{W_p}{N_p} \right) (b_2 R + 1) \quad (1-16)$$

$$f_w = \frac{WOR}{1 + WOR} \quad (1-17)$$

式中 v_{op} ——采油速度, %;

N ——地质储量, 10^4t ;

f_w ——综合含水率, 小数。

二、方法应用

1. 预测逐年开发指标和最终开发指标

1) 应用矿场资料进行回归统计

应用本方法解剖分析了 4 个油田和 3 个区块, 这些油田(区块)地质条件有较大差别, 平均空气渗透率为 140 ~ 2500mD, 地下原油黏度为 3.25 ~ 80.0mPa · s(见表 1-1)。

表 1-1 油田(区块)地质参数表

油田(区块) 代号	平均空气 渗透率 mD	地层原 油黏度 mPa · s	孔隙度 %	厚度 m	油水黏度比
1-1(D 油田)	666	8.36	25.6	26.5	13.9
1-2(Sh 油田)	2500	20.0	28.0	17.2	50.0
1-3(L 油田)	618	3.25	23.0	11.9	4.19
1-4(K 油田)	140	17.83	18.8	10.2	24.9
1-5	2280	63.6	12.9	12.9	150.0
1-6	1014	11.3	31.5	31.5	18.8
1-7	340	80.0	18.8	18.8	80.1

油田(区块)开发初期即采用人工注水的开发方式, 目前已处于中高含水期, 综合含水已高达 50% 以上, 采出程度一般大于 15%(见表 1-2)。

表 1-2 油田(区块)开发数据表

油田(区块) 代号	采出程度 %	综合含水 %	累积注入比 $\frac{W_i}{N_p}, \text{m}^3/\text{t}$	累积水油比 $\frac{W_p}{N_p}, \text{m}^3/\text{t}$
1-1(D 油田)	26.25	71.07	2.25	0.97
1-2(Sh 油田)	27.67	77.45	1.96	1.49
1-3(L 油田)	35.36	88.00	2.54	1.55
1-4(K 油田)	14.64	48.73	2.11	0.47
1-5	16.87	61.40	1.59	0.62
1-6	17.52	58.72	1.94	0.62
1-7	15.80	68.60	2.17	0.78

根据油田(区块)历年开发数据,分年计算出对应于当时采出程度条件下的累积注入比 $\left(\frac{W_i}{N_p}\right)$ 、累积水油比 $\left(\frac{W_p}{N_p}\right)$,将数据——对应绘制在半对数坐标纸上,即可得到该油田(区块)的无因次注入曲线和无因次采出曲线(图 1-1 和图 1-2)。由曲线可以看出,当油田进入中高含水阶段后,呈明显的直线关系,按照式(1-6)和式(1-7),利用线性回归方法,可得到直线的截距、斜率和相关系数(见表 1-3)。由表 1-3 中可以看出,由于关系曲线的相关系数很高,因此,由式(1-6)和式(1-7)所表达的直线关系对于水驱砂岩油田是正确的。