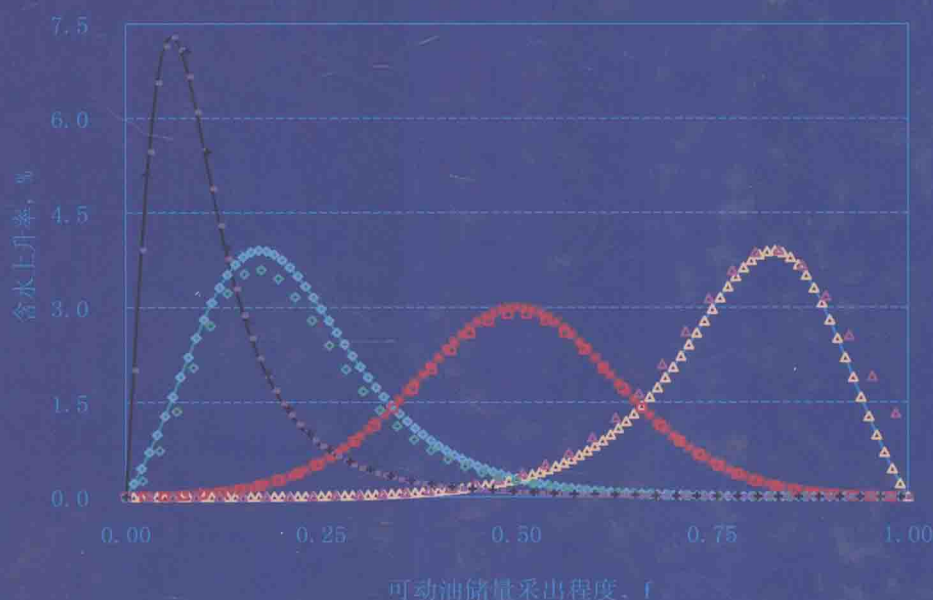




水驱油田产量预测模型

SHUIQU YOUTIAN CHANLIANG YUCE MOXING

■ 张金庆 著



$\text{---} \blacksquare \text{---}$ $n_w, n_o, M=3, 3, 1$ $\text{---} \bullet \text{---}$ $n_w, n_o, M=2, 2, 100$ $\text{---} \diamond \text{---}$ $n_w, n_o, M=2, 4, 10$ $\text{---} \triangle \text{---}$ $n_w, n_o, M=4, 2, 0, 1$
 $\text{---} \blacksquare \text{---}$ 广适3, 3, 1 $\text{---} \bullet \text{---}$ 广适2, 2, 100 $\text{---} \diamond \text{---}$ 广适2, 4, 10 $\text{---} \triangle \text{---}$ 广适4, 2, 0, 1

石油工业出版社

水驱油田产量预测模型

张金庆 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书基于油水两相相渗曲线的指数表达式和分流量方程,从理论上揭示了水驱油田含水上升规律和递减规律及两者之间的内在联系,分析了目前常用预测模型的含水上升特征或递减特征,并讨论了其局限性,提出了新的水驱曲线、递减曲线、增长曲线和采收率预测模版等产量预测模型,形成了一套提液增油和稳油控水的方法,同时对油藏工程师感兴趣的一些内容进行了讨论。

本书可供油藏工程技术人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水驱油田产量预测模型/张金庆著.

北京:石油工业出版社,2013.2

ISBN 978-7-5021-9397-3

I. 水…

II. 张…

III. 水驱油田-采油量-产量预测-模型

IV. TE341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 300830 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://www.petropub.com.cn>

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.25

字数:288 千字

定价:80.00 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

1998 年笔者在《石油勘探与开发》发表了《一种简单实用的水驱特征曲线》一文。文中提出的水驱曲线虽可以描述含水率与可动油储量采出程度的各种关系,如凸型、S 型和凹型等,但在应用过程中发现,该曲线适用的油藏类型有限,预测的精度通常不够理想。原因何在?

2003 年至 2004 年笔者参与了“我国海上石油和天然气开发形势及可持续发展战略规划研究(2005—2050)”项目工作,在学习翁文波先生所著的《预测论基础》时,得知用翁氏旋回模型预测的产量比一些估计值低。偏低的原因是什么?

2006 年笔者参与了“海上不同类型油藏产量递减规律及预测技术研究”项目工作,统计发现单井或油田的递减规律五花八门。有的是指数递减、有的是调和递减、有的是双曲递减,还有的递减指数为负数,不同油藏、不同单井、不同含水阶段的递减规律迥异。什么因素控制着递减规律?

2007 年至 2009 年笔者参与了“中国海上油田开发规律及技术政策研究”项目工作,统计发现含水上升率随含水率的关系先上升后下降。含水上升率的高峰值有的大有的小,含水上升率出现的时机有的早有的晚。其影响因素是什么?

2009 年至 2010 年笔者参与了“海上三低油田开发关键技术评价研究”项目工作,在文献调研时获知,童氏采收率预测图版中常数“7.5”不能直接用于低渗透油田,低渗透油田若用动态法标定的采收率进行反推,其常数远大于 7.5。那么童氏采收率预测图版中的常数大小取决于什么因素呢?

2012 年笔者参与了“海上在生产油田水驱开发潜力及调整策略研究”项目工作,统计发现单井提液幅度有的高有的低,提液效果有的好有的差,如何判断提液时机和提液幅度?油田的提液幅度是有限的,在保持液量不变的条件下,如何通过优化单井产液量,确保油田产油量最大?

在工作过程中还碰到许许多多的问题,带着这些问题,笔者一直在进行探索,希望通过基础理论研究进行回答,并试图提出符合理论的产量预测模型,再利用数学近似方法对模型进行简化变得易于使用,最终形成了此书的写作思路。

全书共分5章。第1章从油水两相相渗曲线的指数表达式和分流量方程出发,揭示了水驱油田的含水上升规律、递减规律及其两者之间的关系;第2章对常用的预测模型的含水上升特征或递减特征进行了分析解剖,指出了这些模型的适用条件和局限性;第3章根据理论含水上升规律或递减规律,提出了新的适用范围更广、预测精度更高的产量预测模型;第4章论述了新的水驱曲线在提液增油和稳油控水中的应用;第5章对一些常见问题进行了探讨。

本书在研究过程中得到了张凤久和孙福街的指导和支持,在成稿过程中又得到了安桂荣、许家峰、甘云雁、罗银富、梁斌、李珂、刘新光和杨仁锋等同志的帮助,在此表示衷心的感谢!同时,深深感谢石油工业出版社有关同志为本书出版付出的辛勤劳动。在研究过程中,笔者占用了大量的业余时间,因此,特别要感谢家人的理解和支持。

由于笔者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝赐教。

目 录

1 水驱油田含水上升规律和产量递减规律	(1)
1.1 油水两相相对渗透率曲线和分流量方程	(1)
1.2 水驱油田含水上升规律	(2)
1.2.1 含水率与可动油储量采出程度的关系	(2)
1.2.2 可动油储量采出程度与含水率的关系	(2)
1.2.3 含水上升率与可动油储量采出程度的关系	(4)
1.2.4 含水上升率与含水率的关系	(8)
1.3 无因次采油采液指数变化规律	(8)
1.3.1 无因次采油指数变化规律	(9)
1.3.2 无因次采液指数变化规律	(10)
1.3.3 无因次采液指数变化规律的分类	(12)
1.4 产量递减规律	(14)
1.4.1 定液量生产条件下的产量递减规律	(15)
1.4.2 定压差生产条件下的产量递减规律	(15)
符号说明	(17)
参考文献	(18)
2 常用产量预测模型的适用性分析	(19)
2.1 常用水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(19)
2.1.1 甲型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(22)
2.1.2 乙型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(29)
2.1.3 丙型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(34)
2.1.4 丁型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(38)
2.1.5 张型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(43)
2.1.6 俞型水驱曲线的含水上升特征及适用性分析	(48)
2.2 Arps 递减曲线的递减特征及适用性分析	(54)
2.2.1 Arps 递减曲线的关系式	(54)
2.2.2 Arps 递减曲线参数与相渗曲线参数的关系	(55)
2.2.3 Arps 递减曲线的递减特征	(55)
2.2.4 Arps 递减曲线的适用性分析	(56)
2.3 常用增长曲线的递减特征及适用性分析	(56)

2.3.1	Weibull 模型的特征及适用性分析	(57)
2.3.2	Hubbert 模型的特征及适用性分析	(58)
2.3.3	Gompertz 模型的特征及适用性分析	(61)
2.3.4	广义翁氏模型的特征及适用性分析	(63)
2.3.5	Rayleigh 模型的特征及适用性分析	(66)
2.4	童氏预测模型的特征及适用性分析	(68)
2.4.1	童氏图版法的数学模型	(68)
2.4.2	童氏预测模型的推导	(68)
2.4.3	童氏图版法的适用性分析	(69)
	符号说明	(69)
	参考文献	(70)
3	产量预测模型研究	(71)
3.1	水驱曲线研究	(71)
3.1.1	近似理论水驱曲线的推导	(71)
3.1.2	广适水驱曲线的提出	(72)
3.1.3	简化的水驱曲线	(77)
3.1.4	改进的甲乙型水驱曲线	(79)
3.1.5	不同水驱曲线预测精度对比	(85)
3.2	递减曲线研究	(92)
3.2.1	广适水驱曲线对应的递减曲线	(92)
3.2.2	简化水驱曲线对应的递减曲线	(93)
3.2.3	改进甲乙型水驱曲线对应的递减曲线	(94)
3.2.4	递减曲线的应用	(95)
3.3	增长曲线研究	(101)
3.3.1	新型增长曲线的提出	(101)
3.3.2	新型增长曲线的特征	(103)
3.3.3	新型增长曲线的应用	(105)
3.4	采收率预测模型研究	(107)
3.4.1	相渗曲线与可动油储量采出程度的关系	(108)
3.4.2	油水相对渗透率比值与可动油储量采出程度的关系	(108)
3.4.3	油水相对渗透率比值参数与水相指数和油相指数的关系	(108)
3.4.4	相渗曲线和水驱曲线与水驱地质储量的关系	(110)
	符号说明	(111)
	参考文献	(112)

4 提液增油及产液结构优化调整方法	(113)
4.1 提液时机和提液幅度判断	(113)
4.1.1 判断含水上升率峰值出现的时机	(113)
4.1.2 无因次采液指数为1时的含水率	(116)
4.1.3 无因次采液指数为任意值 J_{DL} 时的含水率	(118)
4.2 利用水驱曲线计算水油流度比和相渗曲线参数	(120)
4.2.1 利用广适水驱曲线计算水油流度比和相渗曲线参数	(120)
4.2.2 利用近似理论水驱曲线计算水油流度比和相渗曲线参数	(124)
4.3 单井产液结构优化方法	(128)
4.3.1 可采储量和剩余可采储量的计算	(128)
4.3.2 根据累计产液量预测累计产油量	(131)
4.3.3 单井产液结构优化	(131)
符号说明	(132)
参考文献	(133)
5 常见问题讨论	(134)
5.1 相渗曲线的指数表达式是否具有合理性	(134)
5.2 常用水驱曲线预测值大小为何不同	(138)
5.2.1 甲型水驱曲线与乙型水驱曲线预测结果的关系	(140)
5.2.2 丙型水驱曲线与丁型水驱曲线预测结果的关系	(141)
5.3 常用水驱曲线对原油黏度是否存在选择性	(142)
5.4 甲型乙型水驱曲线上翘时机分析	(154)
5.5 是否可用甲型水驱曲线计算油水相对渗透率曲线	(156)
5.6 水驱曲线和增长曲线是否可联立求解	(159)
5.7 Arps 递减曲线的递减指数为何出现负数	(163)
5.8 相关系数越大预测产量精度是否越高	(166)
5.9 水相指数油相指数在特殊值下的含水上升规律	(168)
符号说明	(170)
参考文献	(171)

1 水驱油田含水上升规律和产量递减规律

含水上升规律是水驱油田的固有规律,它可以由含水上升率随可动油储量采出程度的变化规律进行描述。影响含水上升规律的主要地质油藏因素是水油流度比和油水两相相对渗透率曲线的水相指数及油相指数。水驱油田的产量递减规律受工作制度和含水上升规律的双重控制,在定产液量的工作制度下,产量递减规律取决于含水上升规律。

1.1 油水两相相对渗透率曲线和分流量方程

油水两相相对渗透率曲线可以由多种形式表示^[1-2],广泛应用的是如下表达式:

$$K_{rw} = K_{rw}(S_{or})S_{wd}^{n_w} \quad (1-1)$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_{wi})(1 - S_{wd})^{n_o} \quad (1-2)$$

其中

$$S_{wd} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (1-3)$$

根据分流量方程,在不考虑重力和毛细管力影响的条件下,含水率可以表示为^[2]:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w K_{ro}}{\mu_o K_{rw}}} \quad (1-4)$$

这是地层条件下的含水率,通过体积系数可以换算成地面条件下的含水率:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w B_w K_{ro}}{\mu_o B_o K_{rw}}} \quad (1-5)$$

把式(1-1)、式(1-2)的 K_{rw} 、 K_{ro} 代入式(1-5),并令:

$$M = \frac{\mu_o B_o K_{rw}(S_{or})}{\mu_w B_w K_{ro}(S_{wi})} \quad (1-6)$$

则含水率可表示为:

$$f_w = \frac{MS_{wd}^{n_w}}{MS_{wd}^{n_w} + (1 - S_{wd})^{n_o}} \quad (1-7)$$

M 是水油流度比与油水体积系数比的乘积;对不同油藏来说,水油流度比变化范围大,而油水体积系数比变化范围相对较窄,因此 M 值主要取决于水油流度比的大小。为简便起见,还将 M 称为水油流度比。

1.2 水驱油田含水上升规律

含水上升规律即含水率与可动油储量采出程度的关系,一般可划分为3种类型^[3],分别为凸型、S型和凹型。这种分类方法不能完全描述含水上升规律。而含水上升率的变化规律可以更加细致地刻画含水上升规律。含水上升率通常随可动油储量采出程度的增加而先上升(对应含水率随可动油储量采出程度为凹型上升)后下降(对应含水率随可动油储量采出程度为凸型上升)。

1.2.1 含水率与可动油储量采出程度的关系

根据 S_{wd} 的定义, S_{wd} 其实就是可动油储量采出程度 R_f 。因此式(1-7)可改写为:

$$f_w = \frac{MR_f^{n_w}}{MR_f^{n_w} + (1 - R_f)^{n_o}} \quad (1-8)$$

由此可得水油比的表达式:

$$\frac{f_w}{1 - f_w} = \frac{MR_f^{n_w}}{(1 - R_f)^{n_o}} \quad (1-9)$$

通常情况下,水相指数 n_w 、油相指数 n_o 的值在 2~4 之间^[1]。根据不同的 M , n_w 和 n_o 值,可以通过式(1-8)绘出含水率与可动油储量采出程度的关系(图 1-1)。可见影响含水率变化规律的地质油藏因素是水油流度比、水相指数和油相指数。当水油流度比在 0.1~100,水相指数和油相指数在 2~4 的范围内时,含水率与可动油储量采出程度的关系均为 S 型,即含水率随可动油储量采出程度的增加先凹型上升后凸型上升。水油流度比越大、水相指数越小、油相指数越大,含水率与可动油储量采出程度的关系越偏向凸型;水油流度比越小、水相指数越大、油相指数越小,含水率与可动油储量采出程度的关系越偏向凹型。水相指数、油相指数之和越小,在相同可动油储量采出程度下,含水率随水油流度比的变化范围就越大;反之则越小。可动油储量采出程度为 0 和 1 时,含水率也为 0 和 1。

但在一些特殊情况下(见第 5 章),含水率与可动油储量采出程度的关系是完全凸型或完全凹型的。

1.2.2 可动油储量采出程度与含水率的关系

以凸型、S型和凹型为主的各种含水率变化规律(图 1-1),可由式(1-8)描述。含水率与可动油储量采出程度的变化关系可由式(1-8)表示,那么是否可以通过式(1-8)得到可动油储量采出程度随含水率的变化关系呢?

如果 $n_w = n_o = n$,根据式(1-9)可得可动油储量采出程度与含水率的关系式:

$$R_f = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1 - f_w} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (1-10)$$

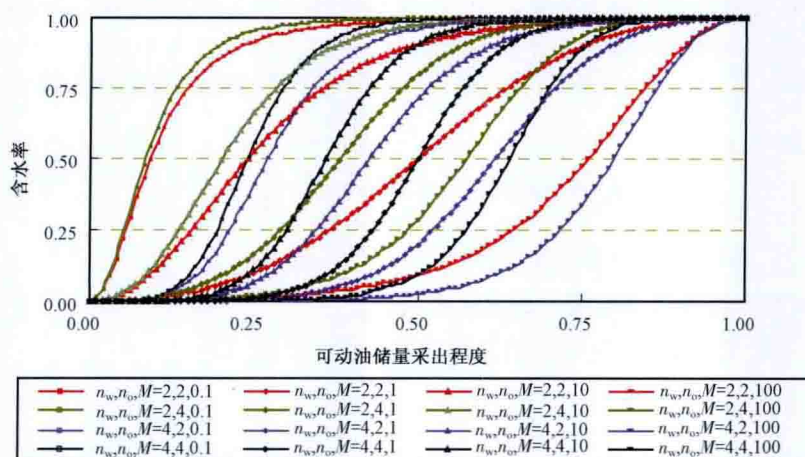


图 1-1 含水率与可动油储量采出程度的关系

当 $n_w \neq n_o$ 时,可动油储量采出程度与含水率的关系是否可以近似表示为:

$$R_f = 1 - \frac{1}{\left[1 + b \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1 - f_w}\right)^q\right]^p} \quad (1-11)$$

式(1-11)变形可得:

$$\ln \left[\left(\frac{1}{1 - R_f} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right] = \ln b + q \ln \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1 - f_w} \right) \quad (1-12)$$

根据式(1-9),式(1-12)可以改写为:

$$\ln \left[\left(\frac{1}{1 - R_f} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right] = \ln b + q \ln \frac{R_f^{n_w}}{(1 - R_f)^{n_o}} \quad (1-13)$$

如果已知 p 值,通过线性回归,可得 b 和 q 值。

$$\text{令:} \quad p = \frac{n_w}{n_o} \quad (1-14)$$

根据不同的 n_o 、 n_w ,通过线性回归($0.2 \leq R_f \leq 0.8$)可得相应的 b 和 q 值,回归的相关系数都能达到 0.995 以上(表 1-1)。当水相指数和油相指数的比值在 $1/3 \sim 3$ 范围内时,相关系数更高,因此,可以认为式(1-14)成立。

在分析 q 、 b 和 M 、 n_o 、 n_w 的变化规律并进行试算后可得 q 、 b 和 M 、 n_o 、 n_w 的相关公式:

$$q = \frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)} \quad (1-15)$$

$$b = 0.006738 \exp \left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o} \right) \quad (1-16)$$

当水相指数和油相指数的比值在 1/3 ~ 3 范围内时,式(1-15)和式(1-16)计算的 b 、 q 值与表(1-1)中的值相对误差一般不超过 3%。

把 p 、 q 、 b 代入式(1-11)可得可动油储量采出程度与含水率的近似关系式:

$$R_f = 1 - \frac{1}{\left[1 + 0.006738 \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}} \right]^{\frac{n_w}{n_o}}} \quad (1-17)$$

式(1-17)是式(1-8)的近似反函数。

1.2.3 含水上升率与可动油储量采出程度的关系

含水上升率定义为采出 1% 可动油储量的含水率上升值,即:

$$f'_w = \frac{df_w}{dR_f} \quad (1-18)$$

将式(1-8)代入式(1-18)可得:

$$f'_w = \frac{MR_f^{n_w-1} (1-R_f)^{n_o-1} [n_w(1-R_f) + n_o R_f]}{[MR_f^{n_w} + (1-R_f)^{n_o}]^2} \quad (1-19)$$

可以通过式(1-19)绘出含水上升率与可动油储量采出程度的关系(图 1-2)。

表 1-1 系数 b 和 q 的线性回归值

水相指数	油相指数	系数 b 值	系数 q 值	相关系数 R^2
0.5	0.5	1.0000	2.0000	1.0000
0.5	1.0	1.6111	1.7947	1.0000
0.5	1.5	2.1263	1.7420	0.9998
0.5	2.0	2.5502	1.7385	0.9996
0.5	3.0	3.1516	1.7696	0.9992
0.5	4.0	3.5165	1.8051	0.9992
1.0	0.5	0.6221	1.1315	0.9996
1.0	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
1.0	1.5	1.3194	0.9327	1.0000
1.0	2.0	1.6111	0.8973	1.0000
1.0	3.0	2.1263	0.8710	0.9998
1.0	4.0	2.5502	0.8693	0.9996
1.5	0.5	0.4637	0.8007	0.9987
1.5	1.0	0.7593	0.7181	0.9999
1.5	1.5	1.0000	0.6667	1.0000
1.5	2.0	1.2167	0.6337	1.0000
1.5	3.0	1.6111	0.5982	1.0000
1.5	4.0	1.9646	0.5838	0.9999
2.0	0.5	0.3719	0.6215	0.9978
2.0	1.0	0.6221	0.5657	0.9996

续表

水相指数	油相指数	系数 b 值	系数 q 值	相关系数 R^2
2.0	1.5	0.8228	0.5272	1.0000
2.0	2.0	1.0000	0.5000	1.0000
2.0	3.0	1.3194	0.4663	1.0000
2.0	4.0	1.6111	0.4487	1.0000
3.0	0.5	0.2677	0.4304	0.9965
3.0	1.0	0.4637	0.4003	0.9987
3.0	1.5	0.6221	0.3772	0.9996
3.0	2.0	0.7593	0.3590	0.9999
3.0	3.0	1.0000	0.3333	1.0000
3.0	4.0	1.2167	0.3168	1.0000
4.0	0.5	0.2095	0.3294	0.9956
4.0	1.0	0.3719	0.3108	0.9978
4.0	1.5	0.5059	0.2955	0.9990
4.0	2.0	0.6221	0.2829	0.9996
4.0	3.0	0.8228	0.2636	1.0000
4.0	4.0	1.0000	0.2500	1.0000

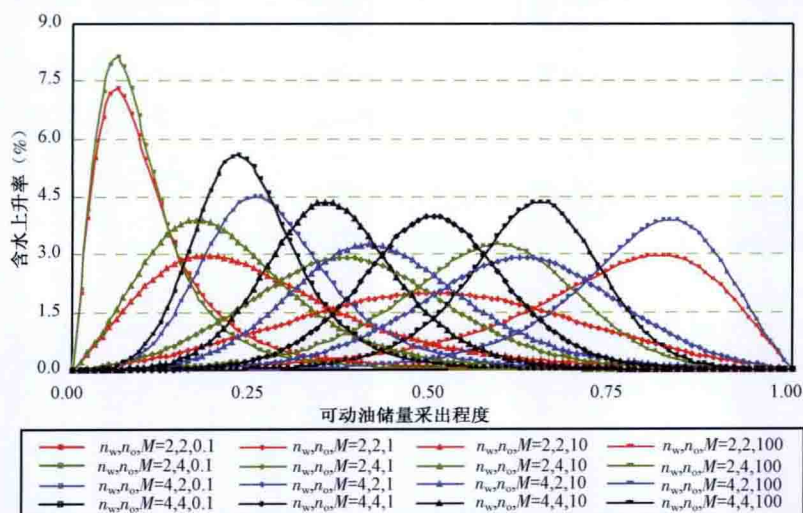


图 1-2 含水上升率与可动油储量采出程度的关系

当水油流度比在 0.1 ~ 100, 水相指数和油相指数在 2 ~ 4 的范围内时, 含水上升率随可动油储量采出程度的增加都是先升后降的。在一些特殊情况下 (见第 5 章), 含水上升率随可动油储量采出程度的增加可以是单调上升或单调下降的。

由图 1-1 和图 1-2 可见, 若含水上升率随可动油储量采出程度的增加而增加, 那么含水率随可动油储量采出程度的增加而凹型上升; 若含水上升率随可动油储量采出程度的增加而下降, 那么含水率随可动油储量采出程度的增加而凸型上升。在通常情况下, 可动油储量采出

程度为 0 和 1 时,含水上升率都为 0。

由图 1-2 可见,含水上升率随可动油储量采出程度的增加通常先凹型上升后凸型上升,上升到高峰值后开始下降,先凸型下降后凹型下降。

含水上升率达到高峰值时满足如下条件^[4]:

$$f_w'' = 0 \tag{1-20}$$

含水上升率由凹型上升转凸型上升或由凸型下降转凹型下降时满足如下条件^[4]:

$$f_w''' = 0 \tag{1-21}$$

求解式(1-20)和式(1-21),可得到含水上升率由凹型上升转凸型上升、由上升到下降及由凸型下降转凹型下降时的可动油储量采出程度,再代入式(1-8)和式(1-19)可得到对应的含水率和含水上升率(表 1-2)。根据式(1-9)和表 1-2 结果,可得如下结论:

(1)水油流度比越大,含水上升率由凹型上升转凸型上升、由上升到下降、由凸型下降转凹型下降时的可动油储量采出程度和含水率就越低;反之越高。

(2)水相指数与油相指数之和越大,含水上升率的高峰值就越大;反之越小。

(3)在水油流度比为 1 的条件下,若水相指数和油相指数相等,那么含水上升率的高峰值与水相指数或油相指数相同,含水上升率在高峰值时的含水率和可动油储量采出程度均为 0.50;若水相指数和油相指数不等,那么含水上升率的高峰值近似于水相指数与油相指数之和的平均值,含水上升率在高峰值时的含水率在 0.50 附近,但可动油储量采出程度变化范围稍大。

(4)在水相指数与油相指数相等的条件下,以水油流度比 1 为界,水油流度比无论是增加还是减少,含水上升率的高峰值都增加。水相指数与油相指数不等,同样存在某个水油流度比,若水相指数小于油相指数,那么该水油流度比小于 1;反之,大于 1,以此为界,水油流度比无论是增加还是减少,含水上升率的高峰值都增加。

(5)无论在何种条件下,含水上升率的高峰值均大于等于 1%。

表 1-2 不同流体和不同相渗参数下的含水上升特征

水油流度比	水相指数	油相指数	含水上升率高峰值(%)	含水上升率达高峰值时的可动油储量采出程度	含水上升率达高峰值时的含水率	含水上升率凹型上升转凸型上升时的含水上升率(%)	含水上升率凹型上升转凸型上升时的可动油储量采出程度	含水上升率凹型上升转凸型上升时的含水率	含水上升率凸型下降转凹型下降时的含水上升率(%)	含水上升率凸型下降转凹型下降时的可动油储量采出程度	含水上升率凸型下降转凹型下降时的含水率
0.1	2	2	2.977	0.814	0.657	2.158	0.699	0.349	1.024	0.954	0.977
0.1	2	3	2.990	0.679	0.582	2.085	0.564	0.277	1.732	0.800	0.889
0.1	2	4	3.251	0.590	0.552	2.230	0.485	0.250	2.005	0.698	0.854
0.1	3	2	3.443	0.821	0.632	2.448	0.718	0.319	1.484	0.939	0.957

续表

水油流度比	水相指数	油相指数	含水上升率高峰值(%)	含水上升率达高峰值时的可动油储量采出程度	含水上升率达高峰值时的含水率	含水上升率凹型上升转凸型上升时的含水上升率(%)	含水上升率凹型上升转凸型上升时的可动油储量采出程度	含水上升率凹型上升转凸型上升时的含水率	含水上升率凸型下降转凹型下降时的含水上升率(%)	含水上升率凸型下降转凹型下降时的可动油储量采出程度	含水上升率凸型下降转凹型下降时的含水率
0.1	3	3	3.522	0.702	0.567	2.430	0.604	0.263	2.102	0.804	0.874
0.1	3	4	3.825	0.623	0.543	2.606	0.533	0.242	2.398	0.714	0.844
0.1	4	2	3.902	0.828	0.614	2.743	0.738	0.301	1.894	0.930	0.939
0.1	4	3	4.027	0.722	0.559	2.764	0.637	0.255	2.452	0.810	0.863
0.1	4	4	4.363	0.649	0.537	2.964	0.571	0.238	2.760	0.728	0.837
1	2	2	2.000	0.500	0.500	1.207	0.293	0.147	1.207	0.707	0.854
1	2	3	2.479	0.426	0.490	1.554	0.273	0.162	1.586	0.578	0.816
1	2	4	2.929	0.377	0.486	1.861	0.252	0.169	1.909	0.501	0.802
1	3	2	2.479	0.574	0.510	1.587	0.422	0.184	1.553	0.728	0.839
1	3	3	3.000	0.500	0.500	1.944	0.381	0.188	1.942	0.620	0.812
1	3	4	3.485	0.449	0.496	2.268	0.348	0.190	2.285	0.550	0.801
1	4	2	2.929	0.623	0.514	1.910	0.499	0.199	1.860	0.748	0.832
1	4	3	3.485	0.551	0.505	2.286	0.451	0.199	2.266	0.652	0.810
1	4	4	4.000	0.500	0.500	2.630	0.414	0.199	2.628	0.586	0.801
10	2	2	2.977	0.186	0.343	1.026	0.047	0.023	2.157	0.302	0.651
10	2	3	3.443	0.180	0.368	1.486	0.061	0.043	2.447	0.282	0.682
10	2	4	3.902	0.172	0.386	1.897	0.070	0.062	2.741	0.263	0.700
10	3	2	2.990	0.321	0.418	1.733	0.200	0.112	2.084	0.437	0.724
10	3	3	3.522	0.298	0.433	2.104	0.196	0.127	2.428	0.396	0.738
10	3	4	4.027	0.278	0.442	2.455	0.190	0.137	2.762	0.363	0.745
10	4	2	3.251	0.410	0.448	2.007	0.302	0.146	2.229	0.515	0.750
10	4	3	3.825	0.378	0.457	2.400	0.287	0.157	2.604	0.467	0.758
10	4	4	4.363	0.351	0.463	2.763	0.272	0.164	2.961	0.429	0.762
100	2	2	7.297	0.059	0.279	1.010	0.005	0.003	5.519	0.100	0.550
100	2	3	7.708	0.059	0.292	1.513	0.007	0.006	5.786	0.099	0.570
100	2	4	8.124	0.059	0.303	1.996	0.010	0.010	6.046	0.097	0.588
100	3	2	4.911	0.161	0.372	2.673	0.091	0.083	3.543	0.227	0.661
100	3	3	5.406	0.156	0.385	3.017	0.091	0.092	3.866	0.216	0.678
100	3	4	5.892	0.151	0.396	3.352	0.091	0.100	4.180	0.207	0.690
100	4	2	4.515	0.251	0.413	2.695	0.175	0.121	3.182	0.324	0.706
100	4	3	5.055	0.239	0.424	3.060	0.171	0.130	3.534	0.304	0.718
100	4	4	5.577	0.228	0.432	3.415	0.167	0.137	3.879	0.288	0.727

1.2.4 含水上升率与含水率的关系

含水上升率与含水率的关系(图1-3)可根据式(1-8)和式(1-19)得出。通常情况下含水上升率随含水率的增加先上升后下降,整体上呈凸型。

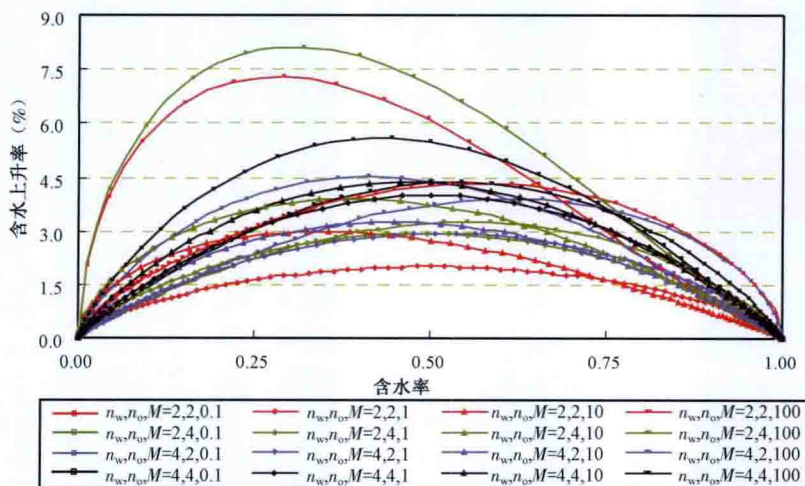


图 1-3 含水上升率与含水率的关系

式(1-17)对含水率求导,简化后可得:

$$\frac{dR_f}{df_w} = \frac{0.006738 \frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_o(n_w + n_o)} \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}}}{f_w(1-f_w) \left[1 + 0.006738 \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}} \right]^{\frac{n_w}{n_o} + 1}} \quad (1-22)$$

即含水上升率与含水率的近似关系式为:

$$f'_w = \frac{f_w(1-f_w) \left[1 + 0.006738 \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}} \right]^{\frac{n_w}{n_o} + 1}}{0.006738 \frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_o(n_w + n_o)} \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}}} \quad (1-23)$$

1.3 无因次采油采液指数变化规律

无因次采油、采液指数是表示油井生产能力的指标,其变化规律主要取决于水油流度比和相渗曲线。无因次采油指数与可动油储量采出程度的变化关系,仅与油相指数有关,但与含水率的变化关系除了与油相指数有关外还与水相指数和水油流度比有关;无因次采液指数无论与可动油储量采出程度的关系还是与含水率的关系,都与水油流度比、水相指数和油相指数有关。无因次采油指数随可动油储量采出程度或含水率的增加是单调下降的;无因次采液指数

随可动油储量采出程度或含水率的增加先下降后上升。

1.3.1 无因次采油指数变化规律

根据定义,采油指数可以表示如下^[5]:

$$J_o = \frac{Q_o}{\Delta p} \quad (1-24)$$

根据平面径向流公式,采油指数可以表示为:

$$J_o = \frac{542.87 K_{ro} Kh}{B_o \mu_o [\ln(r_e/r_w) + S]} \quad (1-25)$$

无因次采油指数是指采油指数与初始采油指数之比,即:

$$J_{DO} = \frac{K_{ro}}{K_{ro}(S_w)} \quad (1-26)$$

将式(1-2)代入式(1-26)并把 S_{wi} 换成 R_f 可得:

$$J_{DO} = (1 - R_f)^{n_o} \quad (1-27)$$

无因次采油指数与可动油储量采出程度的关系仅受油相指数影响。无因次采油指数随可动油储量采出程度的增加是单调下降的,通常以凹型下降(图1-4)。当 n_o 为1时,以直线下降;当 n_o 小于1时,以凸型下降。

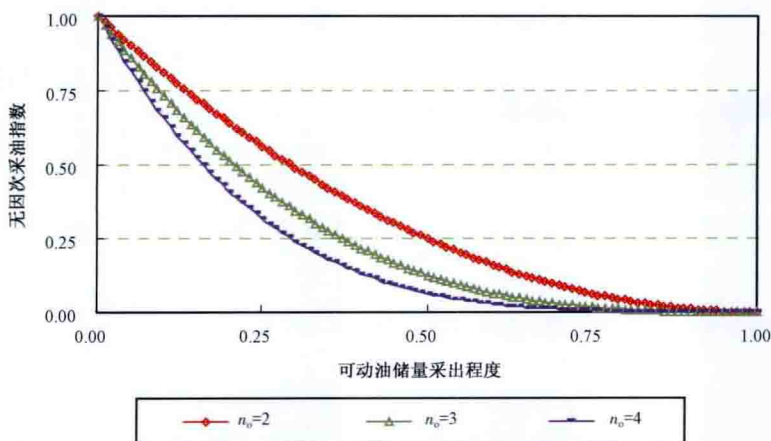


图1-4 无因次采油指数与可动油储量采出程度的关系

根据式(1-27)和式(1-8)可以绘出无因次采油指数与含水率的关系曲线(图1-5)。无因次采油指数随含水率的增加始终是下降的,在通常情况下,无因次采油指数随含水率的增加先凹型下降后凸型下降。

将式(1-17)代入式(1-27)可得无因次采油指数与含水率的近似关系式:

$$J_{DO} = \frac{1}{\left[1 + 0.006738 \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \frac{f_w}{1-f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}} \right]^{n_w}} \quad (1-28)$$