

常用油藏工程方法 改进与应用

孙玉凯 高文君 著



石油工业出版社

常用油藏工程方法改进与应用

孙玉凯 高文君 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者近年来在油藏工程方面研究成果的系统总结,详细阐述了油井流入动态方程、产量(递减)方程、水驱特征曲线(含水上升规律)、合理井网密度等方面的理论、方法和进展,以及在油田的应用效果。

本书可供从事油藏工程研究、现场动态分析技术人员和油田开发管理人员参考,也可供相关专业大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

常用油藏工程方法改进与应用/孙玉凯等著.

北京:石油工业出版社,2007.5

ISBN 978-7-5021-5970-2

I. 常…

II. 孙…

III. 油田开发

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 030635 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

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 9

字数: 230 千字 印数: 1—1000 册

定价: 40.00 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

油藏工程学开始于 20 世纪 60 年代,其涉及范围很广,如油层物理、渗流力学、提高采收率、动态分析及预测、经济评价等等。随着近年来研究工作的逐步深入,油藏工程的许多理论方法得到了改进和完善,这为更好地认识油藏和控制油藏提供了有效的技术支持。本书只是其中的一小部分。

全书共分四章。第一章主要建立了 6 种油井流入动态方程的理论,并优选出了斜井(水平井)流入动态方程;第二章重点研究了 3 种递减方程(Arps 递减、Logistic 递减、广义反正切微分分布递减)的渗流理论、方程特性、参数求解、递减率多因素分析以及合理储采比下限值的确定,归纳、提炼出了最理想的广义产量递减方程,不仅解决了递减率出现单调递减的问题,而且也能解决递减率先单调递增、后单调递减的问题;第三章重点从不同角度建立了水驱特征曲线的渗流理论,概括出了 5 种过渡型水驱曲线,反演出了 19 种不同水驱特征曲线所对应的含水规律曲线(含水与采出程度曲线),从理论和开发特征上分别建立了水驱特征曲线与递减方程的关系;第四章研究了注采井网对水驱采收率的影响和合理井网密度、合理注采井数比的确定。以上这些研究是作者近年来的科研理论研究成果,很具实用性,值得油藏工程者参考和借鉴。

书中给出了各曲线的求解方法或曲线间转换时的参数变化式,并列举了较多的实例予以应用,很容易为油藏工程人员所掌握。

在编写过程中,徐君、朱维耀等同志对本书提出了许多宝贵意见和建议,在此深表感谢。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。

由于水平有限,书中难免存在某些缺点和错误,恳请读者能够提出批评和指正。

作者

2006 年 10 月

目 录

第一章 油井流入动态方程研究	(1)
第一节 油井流入动态方程的理论基础	(1)
第二节 斜井/水平井 IPR 方程的最优选择	(6)
参考文献	(10)
第二章 产量递减分析方法	(11)
第一节 产量递减方程理论基础	(11)
第二节 递减率特性分析	(23)
第三节 递减期累积产油量与时间的关系	(27)
第四节 递减期累积产量与产量的关系	(28)
第五节 递减方程参数的求解	(29)
第六节 递减率多因素分析	(34)
第七节 合理储采比下限值的确定	(37)
第八节 产量预测模型的修正与完善	(42)
参考文献	(51)
第三章 水驱特征曲线研究	(53)
第一节 从拟相渗到水驱特征曲线理论的推导	(53)
第二节 从岩心实验到水驱特征曲线理论的推导	(65)
第三节 利用水驱特征曲线确定活塞式驱程度指数	(70)
第四节 过渡型水驱特征曲线的建立	(75)
第五节 几种主要水驱特征曲线反演及应用	(82)
第六节 产量递减规律与水驱特征曲线的关系	(96)
第七节 时变结构预测模型的建立及应用	(102)
第八节 水驱特征曲线系统分类研究	(108)
第九节 两种水驱曲线特性对比	(114)
第十节 理想型水驱特征曲线研究	(118)
参考文献	(127)
第四章 注采井网与井网密度	(129)
第一节 注采井网对水驱采收率的影响研究	(129)
第二节 合理井网密度和合理注采井数比的确定	(134)
参考文献	(139)

第一章 油井流入动态方程研究

油井流入动态方程是指在一定的地层压力条件下, 油井产量与井底流动压力之间的关系。它不仅是分析、预测油井生产动态的基础, 也是确定油井合理工作制度的依据。目前, 从其使用范围来讲, 它不仅可适用于溶解气驱油藏(或饱和油藏)的油井, 而且也适用于地层压力高于饱和压力、流动压力低于饱和压力的水驱或弹性驱未饱和油藏的油井。正是由于油井流入动态方程具有以上这些特性, 因而在国内外油田开发中得到了较为广泛的重视与应用。

第一节 油井流入动态方程的理论基础

当油藏压力低于饱和压力时, 油藏孔隙中存在油、气、水三相。其中油、气两相参与流动, 而水相以束缚水的形式存在。那么, 在拟稳态条件下油相产量的一般式为

$$Q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \int_{p_{wf}}^{p_r} K_{ro}/(B_o\mu_o) dp \quad (1-1-1)$$

一、Klins-Majcher 方程^[1]

1. 饱和油藏油井流入动态方程

设 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = f(p) = a_1 + b_1 p^m \quad (1-1-2)$$

将式 (1-1-2) 代入式 (1-1-1), 可得

$$Q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \left[a_1 (p_r - p_{wf}) + \frac{b_1}{m+1} (p_r^{m+1} - p_{wf}^{m+1}) \right] \quad (1-1-3)$$

由上式可知, 当 $p_{wf} = 0$ 时, 油井最大无阻产油量为

$$Q_{\infty} = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \left(a_1 p_r + \frac{b_1}{m+1} p_r^{m+1} \right) \quad (1-1-4)$$

将式 (1-1-3) 除以式 (1-1-4), 并令 $V_1 = \left(1 + \frac{b_1}{a_1(m+1)} p_r^m \right)^{-1}$, $n = m+1$, 则有

$$\frac{Q_o}{Q_{\infty}} = 1 - V_1 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right) - (1 - V_1) \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^n \quad (1-1-5)$$

显然, 当 $V_1 = 0.2$, $n = 2$ 时, 上式即为经典的 Vogel 方程; 当 $V_1 = 0$, $n = 2$ 时, 上式即为 Fetkovich 方程; 当 $n = 2$ 时, 上式即为推广的 Vogel 方程; 当 $V_1 = 0.295$ 时, 上式即为文献 [1] 的 Vogel 方程。因此, 式 (1-1-5) 包含了已有的经典油井流入动态方程的特

性。同时, V 值与地层压力的关系可以明显地反映出, 对于均质地层, 随地层压力的下降, 饱和油藏油井流入动态方程中的 V 值将进一步增大 (如图 1-1-1)。

2. 未饱和油藏油井流入动态方程

1) 流动压力高于饱和压力

当油藏压力、流动压力均高于饱和压力, 水相以束缚水的形式存在时, 油层只存在原油单向流动。一般在此条件下, $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

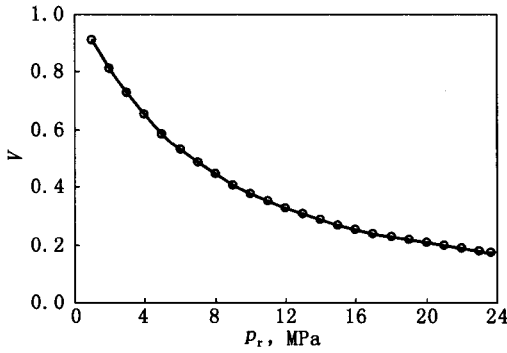


图 1-1-1 QL 油田地层压力保持
水平与 V 值理论曲线

($a = 0.1737$, $b = 0.03781$, $m = 1.2275$, $p_r < 23.7 \text{ MPa}$)

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = f(p) = a_2 + b_2 p \quad (1-1-6)$$

那么, 油相产量为

$$\begin{aligned} Q_o &= \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \int_{p_{wf}}^{p_r} (a_2 + b_2 p) dp \\ &= \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} [a_2 (p_r - p_{wf}) \\ &\quad + 0.5b_2 (p_r^2 - p_{wf}^2)] \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

与达西公式相比, 上式多了 $(p_r^2 - p_{wf}^2)$ 这项。究其原因是: 符合达西公式的流体为牛顿流体, 而实际流体是可压缩的, 粘度也并非为一常数。但由于 b_2 值很小, 因此在实际油田运用中常常将上述产量方程近似简化为达西公式

$$Q_o \approx J_o (p_r - p_{wf}) \quad (1-1-8)$$

式中

$$J_o = \frac{2\pi K h a_2}{\ln(r_e/r_w) - 0.75}$$

对式 (1-1-7) 两边同除以 $Q_s = \frac{2\pi Kh (a_2 p_r + 0.5b_2 p_r^2)}{\ln(r_e/r_w) - 0.75}$, 并令 $V_2 = \left(1 + \frac{b_2}{2a_2} p_r\right)^{-1}$, 得

$$\frac{Q_o}{Q_s} = 1 - V_2 \left(\frac{p_{wf}}{p_r}\right) - (1 - V_2) \left(\frac{p_{wf}}{p_r}\right)^2 \quad (1-1-9)$$

2) 流动压力低于饱和压力

当油藏压力高于饱和压力、流动压力低于饱和压力时, 油井附近存在油、气、水三相。其中油、气两相参与流动, 而水相以束缚水的形式存在。设 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = f(p) = \begin{cases} a_1 + b_1 p^m & (p \leq p_b) \\ a_2 + b_2 p & (p > p_b) \end{cases} \quad (1-1-10)$$

令 $Q_c = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} [a_2 (p_r - p_b) - 0.5b_2 (p_r^2 - p_b^2)]$, 那么, 在此情况下油相产量为

$$Q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \left[\int_{p_b}^{p_r} (a_2 + b_2 p) dp + \int_{p_{wf}}^{p_b} (a_1 + b_1 p^m) dp \right]$$

$$= Q_C + \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \left[a_1 (p_b - p_{wf}) + \frac{b_1}{m+1} (p_b^{m+1} - p_{wf}^{m+1}) \right] \quad (1-1-11)$$

$$\text{即} \quad Q_o - Q_C = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} \left[a_1 (p_b - p_{wf}) + \frac{b_1}{m+1} (p_b^{m+1} - p_{wf}^{m+1}) \right] \quad (1-1-12)$$

取 $p_{wf}=0$, 代入式 (1-1-12), 得

$$Q_m - Q_C = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} (a_1 p_b + \frac{b_1}{m+1} p_b^{m+1}) \quad (1-1-13)$$

将式 (1-1-12) 除以式 (1-1-13), 并令 $V_3 = \left(1 + \frac{b_1}{a_1(m+1)} p_b^{m+1}\right)^{-1}$, $n = m+1$ 。则有

$$\frac{Q_o - Q_C}{Q_m - Q_C} = 1 - V_3 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - (1 - V_3) \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^n \quad (1-1-14)$$

若把 $p_{wf} > p_b$ 情况下的产量近似处理为达西公式, 则上式可改写为

$$\frac{Q_o - Q_b}{Q_m - Q_b} = 1 - V_3 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - (1 - V_3) \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^n \quad (1-1-15)$$

其中

$$Q_b = J_o (p_r - p_b)$$

显然, 如果 $n=2$, 那么式 (1-1-15) 即可转化为文献 [2] 中提出的 $p_r > p_b$ 时的油井流入动态方程:

$$\frac{Q_o - Q_b}{Q_m - Q_b} = 1 - V_3 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - (1 - V_3) \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^2 \quad (1-1-16)$$

3. Klins - Majcher 油井流入动态方程通式

将上述导出的饱和油藏和未饱和油藏油井不同流压范围下的流入动态方程, 即式 (1-1-5)、式 (1-1-9) 和式 (1-1-14), 写成通式, 即为

$$\frac{Q_o - Q_C}{Q_m - Q_C} = 1 - V \left(\frac{p_{wf}}{p}\right) - (1 - V) \left(\frac{p_{wf}}{p}\right)^n \quad (1-1-17)$$

其中, 当 $p_b \geq p_r > p_{wf}$ 时, $Q_C = 0$, $p = p_r$; 当 $p_r > p_{wf} \geq p_b$ 时, $Q_C = 0$, $n = 2$, $p = p_r$; 当 $p_r > p_b > p_{wf}$ 时, $Q_C = Q_b$, $p = p_b$ 。

4. 实例应用及分析

QL 油田 L2 井、L3 井、L5 井、L24 井分别做了原油 PVT 和相渗分析。通过对其实验数据进行分析, 发现其 $K_m / (B_o \mu_o)$ 与压力的关系符合式 (1-1-10), 结果见表 1-1-1。从计算的结果分析, 在流动压力小于饱和压力、地层压力大于饱和压力的前提下, QL 油田 J_{2s} 组的 n 值要小于 J_{2x} 组, V 值要大于 J_{2x} 组。分析其原因, 主要是在原油物性基本相近的条件, J_{2x} 组的地层压力、饱和压力要高于 J_{2s} 组所造成的。另外, 通过对 QL 油田 L5 井实

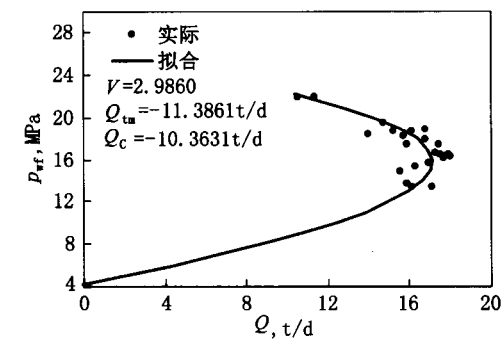


图 1-1-2 QL 油田 L5 井流入动态曲线

际试采资料的应用（图 1-1-2），其产量与流动压力的关系也符合式（1-1-17），只是 V 值、 n 值与实验分析得到的数值相差较大。究其原因，主要是射开油层层数多，储层层间、层内非均质性强以及存在启动压力等因素所造成的。

二、Vogel 方程

设饱和油藏 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为^[3]

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = f(p) = a_1 + b_1 p \tag{1-1-18}$$

同理，可得

(1) Vogel 饱和油藏油井流入动态方程：

$$\frac{Q_o}{Q_{tm}} = 1 - V_1 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right) - (1 - V_1) \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \tag{1-1-19}$$

式中

$$V_1 = \left(1 + \frac{b_1}{2a_1} p_r \right)^{-1}$$

- (2) 未饱和油藏流动压力高于饱和压力时，油井流入动态方程见方程式（1-1-9）；
- (3) 未饱和油藏流动压力低于饱和压力时，油井流入动态方程：

$$\frac{Q_o - Q_b}{Q_{tm} - Q_b} = 1 - V_3 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right) - (1 - V_3) \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \tag{1-1-20}$$

表 1-1-1 QL 油田 4 口井特征参数数据表

井号		L2 井	L5 井	L3 井	L24 井
油层组		J ₂ s II	J ₂ s I	J ₂ s I	J ₂ x
p_r		26.08	27.03	24.62	27.84
p_b		24.81	22.17	22.55	23.70
$p > p_b$	b_2	-0.0097	-0.0156	-0.0150	-0.0143
	a_2	2.2789	2.2431	2.4076	2.3881
	相关系数	0.9389	0.9947	0.9993	0.9997
$p \leq p_b$	m	1.2560	1.2050	1.2226	1.9121
	b_1	0.0329	0.0411	0.0394	0.0041
	a_1	0.1327	0.1375	0.2511	0.2589
	相关系数	0.9990	0.9996	0.9996	0.9995
	V	0.1387	0.1499	0.2388	0.2996
	n	2.2560	2.2050	2.2226	2.9121

式中
$$V_3 = \left(1 + \frac{b_1}{2a_1} p_b\right)^{-1}$$

(4) Vogel 油井流入动态方程通式:

$$\frac{Q_o - Q_c}{Q_{um} - Q_c} = 1 - V \left(\frac{p_{wf}}{p} \right) - (1 - V) \left(\frac{p_{wf}}{p} \right)^2 \quad (1-1-21)$$

式中
$$Q_{um} = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} (a_1 p_b + 0.5b_1 p_b^2) + Q_c$$

其中, 当 $p_b \geq p_r > p_{wf}$ 时, $Q_c = 0$, $p = p_r$; 当 $p_r > p_{wf} \geq p_b$ 时, $Q_c = 0$, $n = 2$, $p = p_r$; 当 $p_r > p_b > p_{wf}$ 时, $Q_c = Q_b$, $p = p_b$ 。

三、Fetkovich 方程^[4]

设饱和油藏 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = f(p) = b_1 p \quad (1-1-22)$$

同理, 先可得 Fetkovich 饱和油藏油井流入动态方程

$$\frac{Q_o}{Q_{um}} = 1 - \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \quad (1-1-23)$$

式中
$$Q_{um} = \frac{\pi K h b_1}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} p_r^2$$

再考虑到非达西流(紊流)的可能性, 在方程中引入流态指数 n 得到:

$$\frac{Q_o}{Q_{um}} = \left[1 - \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \right]^n \quad (1-1-24)$$

式中, n 值在 0.5~1 之间变化, 完全层流时为 1, 高度紊流时为 0.5。

四、Bendakhli-Aziz 方程^[5]

Bendakhli 和 Aziz (1989) 将前面提到的 Vogel 方程和 Fetkovich 方程合并得到如下的方程

$$\frac{Q_o}{Q_{um}} = \left[1 - V \frac{p_{wf}}{p_r} - (1 - V) \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \right]^n \quad (1-1-25)$$

五、Wingings-Russell-Jennings 方程^[6]

设饱和油藏 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

$$K_{ro}/(B_o\mu_o) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 \quad (1-1-26)$$

同理, 可得

$$\frac{Q_o}{Q_{um}} = 1 - V_1 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right) - V_2 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 - V_3 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^3 - V_4 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^4 \quad (1-1-27)$$

式中
$$Q_{um} = \frac{2\pi Kh}{\ln(r_e/r_w) - 0.75} (a_0 p_r + a_1 p_r^2/2 + a_2 p_r^3/3 + a_3 p_r^4/4)$$

$$\begin{aligned} V_1 &= a_0 p_r / (a_0 p_r + a_1 p_r^2 / 2 + a_2 p_r^3 / 3 + a_3 p_r^4 / 4) \\ V_2 &= a_1 p_r^2 / (2a_0 p_r + a_1 p_r^2 + 2a_2 p_r^3 / 3 + a_3 p_r^4 / 2) \\ V_3 &= a_2 p_r^3 / (3a_0 p_r + 3a_1 p_r^2 / 2 + a_2 p_r^3 + 3a_3 p_r^4 / 4) \\ V_4 &= a_3 p_r^4 / (4a_0 p_r + 2a_1 p_r^2 + 4a_2 p_r^3 / 3 + a_3 p_r^4) \\ V_1 + V_2 + V_3 + V_4 &= 1 \end{aligned}$$

六、Harrison 方程^[7]

设饱和油藏 $K_{ro} / (B_o \mu_o)$ 与压力之间的函数关系为

$$K_{ro} / (B_o \mu_o) = \exp [b (p - p_r)] \quad (1-1-28)$$

同理, 可得

$$\frac{Q_o}{Q_m} = (1 + V) - V \exp \left(C \frac{p_{wf}}{p_r} \right) \quad (1-1-29)$$

式中

$$V = 1 / [\exp (-b p_r) - 1]$$

$$C = b p_r$$

$$Q_m = \frac{2\pi K h}{b [\ln (r_e / r_w) - 0.75]} [1 - \exp (-b p_r)]$$

第二节 斜井/水平井 IPR 方程的最优选择

目前, 在进行斜井/水平井产能分析、合理工作制度确定和举升工艺设计时, 主要依据 1990 年 Cheng^[8] 在油藏数值模拟基础上提出不同井斜角下的一系列 Vogel 型 IPR 方程^[9]。在此前后, 也有一些研究工作者曾提出了许多其他类型的 IPR 方程, 如上一节提到的 1989 年的 Klins - Clark 方程和 Bendakhlia - Aziz 方程, 1992 年的 Winggins - Russell - Jennings 方程等^[3~6]。那么, 对于这些 IPR 方程是否也适用于斜井或水平井, 在油藏工程界还一直没有明确的论述^[10]。

一、油井流入动态无量纲方程类型

令 $Q_D = Q_o / Q_m$ 、 $p_D = p_{wf} / p_r$, 可分别将式 (1-1-5)、(1-1-19)、(1-1-24)、(1-1-25)、(1-1-27) 和式 (1-1-29) 简化为:

(1) Vogel 方程 (简称类型 1):

$$Q_D = 1 - V p_D - (1 - V) p_D^2 \quad (1-2-1)$$

(2) Klins - Majcher 方程 (简称类型 2):

$$Q_D = 1 - V p_D - (1 - V) p_D^3 \quad (1-2-2)$$

(3) Fetkovich 方程 (简称类型 3):

$$Q_D = (1 - p_D^2)^n \tag{1-2-3}$$

(4) Bendakhlia - Aziz 方程 (简称类型 4)

$$Q_D = [1 - V p_D - (1 - V) p_D^2]^n \tag{1-2-4}$$

(5) Wiggins - Russell - Jennings 方程 (简称类型 5)

$$Q_D = 1 - V_1 p_D - V_2 p_D^2 - V_3 p_D^3 - V_4 p_D^4 \tag{1-2-5}$$

(6) Harrison 方程^[11] (简称类型 6)

$$Q_D = (1 + V) - V \exp(C p_D) \tag{1-2-6}$$

二、回归分析及优选

选取的数据是文献 [9] 提供的 IPR 标准化数据 (见表 1-2-1)。这些数据是 16 种油藏条件的平均值, 具有很强的置信度, 是油藏工程研究和分析的经典基础数据。

表 1-2-1 不同井斜角的平均标准化 Q_D 值^[9]

p_D	0°	15°	30°	45°	60°	75°	85°	88.56°	90°
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.1	0.972	0.970	0.975	0.982	0.986	0.989	0.990	0.990	0.995
0.2	0.927	0.924	0.935	0.947	0.957	0.962	0.964	0.964	0.974
0.3	0.868	0.864	0.879	0.897	0.910	0.918	0.921	0.921	0.935
0.4	0.791	0.786	0.806	0.828	0.844	0.854	0.856	0.857	0.875
0.5	0.700	0.695	0.717	0.742	0.760	0.771	0.774	0.775	0.796
0.6	0.592	0.587	0.611	0.636	0.655	0.666	0.669	0.669	0.692
0.7	0.468	0.464	0.486	0.510	0.527	0.537	0.540	0.540	0.562
0.8	0.328	0.325	0.343	0.362	0.377	0.385	0.387	0.387	0.405
0.9	0.172	0.171	0.182	0.194	0.202	0.207	0.209	0.209	0.219
1.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

利用上述 6 种模型对表 1-2-1 中的数据逐一进行回归分析 (表 1-2-2):

表 1-2-2 不同类型不同斜井流入动态方程 Vogel 参数确定

类型	参数	井斜角								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	85°	88. 56°	90°
1	方程	$Q_D = V_0 - V_1 p_D - V_2 p_D^2$								
	V_0	0. 99981	0. 99980	0. 99691	0. 99455	0. 99257	0. 99152	0. 99151	0. 99141	0. 98845
	V_1	0. 20080	0. 22095	0. 12536	0. 02214	- 0. 05487	- 0. 10023	- 0. 11199	- 0. 11411	- 0. 20545
	V_2	0. 79883	0. 77832	0. 86818	0. 96632	1. 03951	1. 08287	1. 09417	1. 09639	1. 18182
	R^2	1. 00000	1. 00000	0. 99996	0. 99986	0. 99976	0. 99970	0. 99969	0. 99970	0. 99943

续表

类型	参数	井斜角								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	85°	88.56°	90°
2	方程	$Q_D = V_0 - V_1 p_D - V_2 p_D^n$								
	V_0	0.99998	1.00006	1.00040	1.00079	1.00087	1.00084	1.00095	1.00086	1.00136
	V_1	0.20447	0.22677	0.19835	0.14755	0.10807	0.08101	0.07164	0.06974	0.03726
	V_2	0.79546	0.77296	0.80146	0.85221	0.89170	0.91867	0.92781	0.92983	0.96297
	n	2.00612	2.01001	2.12511	2.20695	2.26093	2.28354	2.28453	2.28418	2.37119
	R^2	1.00000	1.00000	1.00000	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999
3	方程	$Q_D = V_0 (1 - p_D^2)^n$								
	V_0	0.97383	0.97125	0.97901	0.98918	0.99729	1.00252	1.00412	1.00440	1.01443
	n	1.07623	1.08297	1.03468	0.98651	0.95291	0.93416	0.92877	0.92869	0.88890
	R^2	0.99873	0.99845	0.99926	0.99983	0.99996	0.99989	0.99986	0.99984	0.99928
4	方程	$Q_D = (V_0 - V_1 p_D - V_2 p_D^2)^n$								
	V_0	0.99983	1.00005	0.99893	0.99812	0.99722	0.99668	0.99719	0.99727	0.99537
	V_1	0.20105	0.22471	0.15410	0.06921	0.00311	-0.03811	-0.04439	-0.04432	-0.12852
	V_2	0.79864	0.77528	0.84536	0.92983	0.99547	1.03633	1.04371	1.04430	1.12610
	n	1.00021	1.00311	1.02495	1.04322	1.05571	1.06141	1.06741	1.06974	1.08173
	R^2	1.00000	1.00000	0.99999	0.99998	0.99996	0.99995	0.99995	0.99995	0.99990
5	方程	$Q_D = V_0 - V_1 p_D - V_2 p_D^2 - V_3 p_D^3 - V_4 p_D^4$								
	V_0	1.00010	0.99997	0.99994	1.00005	0.99986	0.99990	0.99982	0.99983	1.00001
	V_1	0.20626	0.22125	0.17161	0.10591	0.05577	0.03011	0.01329	0.01690	-0.02625
	V_2	0.78106	0.78794	0.75557	0.76221	0.77188	0.75318	0.79508	0.76495	0.73091
	V_3	0.01865	-0.02681	0.05808	0.10548	0.13423	0.19600	0.14161	0.19716	0.26321
	V_4	-0.00583	0.01748	0.01457	0.02622	0.03788	0.02040	0.04953	0.02040	0.03205
	R^2	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
6	方程	$Q_D = V_0 - V_1 \exp(C p_D)$								
	V_0	1.28731	1.29955	1.25344	1.19596	1.17106	1.15712	1.15336	1.13851	1.13049
	V_1	0.26947	0.28265	0.23318	0.17532	0.14796	0.13282	0.12868	0.11810	0.10358
	C	1.57272	1.53367	1.68847	1.92981	2.07920	2.17630	2.20507	2.28252	2.40374
	R^2	0.99911	0.99920	0.99909	0.99888	0.99864	0.99844	0.99838	0.99824	0.99806

(1) 不同 IPR 方程对各井斜角数据整体拟合程度: Winggins - Russell - Jennings 方程 (类型 5)、Klins - Majcher 方程 (类型 2) 等方程复相关系数几乎均接近于 1, 表现出对于不同角度的斜井具有较强的适应性; Vogel 方程 (类型 1) 次之, Fetkovich 方程、Bendakh-lia - Aziz 方程和 Harrison 方程 (类型 3、类型 4 和类型 6) 相对较差。

(2) 不同井斜角度下各数据点误差分析: Winggins - Russell - Jennings 方程拟合精度最好, 最大相对误差不超过 $\pm 0.8\%$; Klins - Majcher 方程次之, 最大相对误差不超过 $\pm 1.0\%$; Vogel 方程较差, 最大相对误差不超过 $\pm 2.0\%$; Harrison 方程最大相对误差不超

过 $\pm 5.0\%$ ；而 Bendakhlia - Aziz 方程和 Fetkovich 方程最差，最大相对误差接近 $\pm 18\%$ ，且误差的特点为：Bendakhlia - Aziz 方程表现为随倾斜角度或无量纲压力的增大，相对误差增大，而 Fetkovich 方程与之相反。

进一步分析其原因，主要是产生在 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 函数关系式上。换句话说，理想的直线或指数型 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 函数关系，并不能完全反映实际油田的 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 与压力之间的关系。原因是 K_{ro} 、 B_o 、 μ_o 一般均是压力的非线性函数，组合成复合函数 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 的关系式相当复杂、多变。因此，从 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 为直线关系或指数关系得到的（或者组合的）IPR 方程，也就不能完全、真实地反映油井的流入动态特征。另一方面，从纯数学角度讲，对于一个复杂的单变量（压力）函数，一般可以转化为等效的多次多项式或者是幂函数来代替，这也是工程研究上常采用的处理方法之一。如 $K_{ro}/(B_o\mu_o)$ 取 5 次多项式，其对应的 6 次方 IPR 方程为：

$$Q_D = 1 - V_1 p_D - V_2 p_D^2 - V_3 p_D^3 - V_4 p_D^4 - V_5 p_D^5 - V_6 p_D^6 \quad (1-2-7)$$

利用上式对表 1-2-1 数据进行拟合，精度非常高，其最大误差小于 $\pm 0.2\%$ （表 1-2-3）。这也进一步说明了 Winggins - Russell - Jennings 方程较 Vogel 方程拟合精度高的原因。

表 1-2-3 不同角度 6 次方流入动态方程相对误差数据

p_D	0°	15°	30°	45°	60°	75°	85°	88.56°	90°
0.0	0.00245	0.00027	-0.00415	-0.00043	-0.00549	-0.00234	-0.00582	-0.00438	-0.00564
0.1	-0.01662	-0.00672	0.01722	-0.00336	0.02506	0.00851	0.02058	0.01692	0.02368
0.2	0.04813	0.03535	-0.01582	0.02725	-0.03272	-0.00100	-0.00091	-0.00784	-0.02222
0.3	-0.07557	-0.08246	-0.02646	-0.06399	-0.01633	-0.03706	-0.09110	-0.05758	-0.04274
0.4	0.06684	0.09635	0.04837	0.05717	0.06967	0.05968	0.14350	0.11229	0.10313
0.5	-0.02797	-0.04765	0.01968	0.00155	-0.02122	-0.00822	-0.03385	-0.05982	-0.04847
0.6	-0.00165	0.00392	-0.08040	-0.01023	-0.07465	-0.06312	-0.08712	-0.02445	-0.04644
0.7	0.00628	-0.02695	0.01258	-0.07690	0.07265	0.05906	0.02075	0.00539	0.03093
0.8	-0.00149	0.07145	0.10367	0.15533	0.01153	0.00021	0.13054	0.07533	0.05793
0.9	-0.00041	-0.07902	-0.14212	-0.15040	-0.06464	-0.03706	-0.18357	-0.10725	-0.09998
平均	0.00000	-0.00035	-0.00067	-0.00064	-0.00036	-0.00021	-0.00087	-0.00051	-0.00050

符 号 说 明

- a_1 ——待定参数，f；
- a_2 ——待定参数，f；
- b_1 ——待定参数，f；
- b_2 ——待定参数，f；
- n ——待定参数，f；
- h ——油层厚度，m；
- K ——油层有效渗透率， μm^2 或 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；
- K_{ro} ——油相相对渗透率；无量纲；
- p ——待定压力，MPa；

p_r ——地层压力, MPa;
 p_b ——饱和压力, MPa;
 p_{wf} ——流动压力, MPa;
 Q_b ——饱和压力下产油量, 10^4t 或 t ;
 Q_o ——流动压力下产油量, 10^4t 或 t ;
 Q_{tm} ——最大无阻产油量, 10^4t 或 t ;
 r_w ——井筒半径, m;
 r_e ——泄油半径, m;
 B_o ——压力为 p 时的原油体积系数, m^3/m^3 ;
 μ_o ——压力为 p 时的原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;
 V_1 ——待定沃格尔系数, 小数;
 V_2 ——待定沃格尔系数, 小数;
 V_3 ——待定沃格尔系数, 小数;
 V ——待定沃格尔系数, 小数;
 J_o ——采油指数; t/MPa 。

参考文献

- [1] M. A. Klins, M. W. Majcher. Inflow Performance Relationships for Damaged or Improved Wells Producing Under Solution - Gas Drive. SPE 19852, 1989
- [2] T. E. W. 宁德著. 万龙贵, 崔天荣译. 油气藏和油气井的动态特征. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1992: 277~317
- [3] 王宏伟, 桑广森, 姜喜庆等. 油气藏动态预测方法. 北京: 石油工业出版社, 2001: 1~8
- [4] Fetkovich M J. The Isochronal Testing of Oil Wells. SPE 4529, 1973
- [5] Bendakhlia H, Aziz K. IPR for Solution - Gas Drive Horizontal Wells. SPE 19823, 1989
- [6] Wiggins M L, Russell J E, Jennings J W. Analytical Development of Vogel - Type Inflow Performance Relationships. SPE 23580, 1992
- [7] K. E. 布朗. 升举法采油工艺 (卷四). 北京: 石油工业出版社, 1990: 110~135
- [8] Cheng A M. Inflow Performance Relationships for Solution - gas - Drive Slanted/Horizontal Wells. SPE 20720, 1990
- [9] Vogel J V. Inflow Performance Relationships for Solution - gas Drive Wells. JPT, Jan. 1986: 83~92
- [10] 刘成, 高文君, 宋文礼等. 斜井、水平井 IPR 方程的最优选择. 新疆石油地质, 2006, 27 (2): 208~209
- [11] 高文君, 尹永光, 胡仁权等. 油井流入动态方程理论研究及应用. 新疆石油地质, 2005, 26 (1): 87~89

第二章 产量递减分析方法

一个油田经过产量的上升和稳定开发阶段后，必然要进入产量递减阶段。在此阶段，由于油田地质条件和开发情况的差异，其递减规律、递减幅度大小以及对最终采收率的影响也千差万别。因此研究它们的递减规律，将使人们能够更好地预测今后产量的变化及可采储量的大小。

第一节 产量递减方程理论基础

不同储层及其驱动类型的油田有其不同的渗流机理，投入开发后产量递减类型也不一样^[1,2]。

一、弹性驱油田

对物质平衡方程 $N_p B_o = C_e N B_i (p_i - p_r)$ 两边时间求导^[3]，得

$$Q_t = \frac{dN_p}{dt} = -C_e N \frac{B_i}{B_o} \cdot \frac{dp_r}{dt} \quad (2-1-1)$$

式中

$$C_e = C_o + \frac{S_w}{S_o} C_w + \frac{1}{S_o} C_p$$

对（拟）稳定流达西式 $Q_t = J_o (p_r - p_{wf})$ 两端对时间求导（井间差异不大， p_{wf} 保持基本稳定且井底附近未脱气），得

$$\frac{dQ_t}{dt} \approx J_o \frac{dp_r}{dt} \quad (2-1-2)$$

式中 $J_o = \frac{2\pi h K \cdot n_o}{\mu_o \left[\ln \frac{\sqrt{A_o}}{\sqrt{n_o} \pi r_w} - 0.75 + S \right]}$ ， n_o 随时间 t 变化。

从式（2-1-1）求得 $\frac{dp_r}{dt}$ 代入式（2-1-2），定积分有

$$\int_{Q_i}^{Q_t} \frac{1}{Q_t} dQ_t = - \int_0^t \frac{J_o B_o}{C_e N B_i} dt \quad (2-1-3)$$

即

$$Q_t = Q_i \exp \left[- \frac{B_o}{C_e N B_i} \int_0^t J_o dt \right] \quad (2-1-4)$$

式中， $\int_0^t J_o dt$ 为累积生产能力特征值。

按递减率定义式可知

$$D_t = - \frac{dQ_t}{Q_t dt} \quad (2-1-5)$$

将式 (2-1-4) 代入式 (2-1-5), 得

$$D_t = \frac{J_o B_o}{C_e N B_i} \quad (2-1-6)$$

若油井开井数 n_o 保持不变, $B_o \approx B_i$, 那么 D_t 为一常数, 恒等于初始递减率 D_i , 那么式 (2-1-4) 即为

$$Q_t = Q_i \exp(-D_i t) \quad (2-1-7)$$

从以上推演可知, 在 $B_o \approx B_i$ 的情况下, 弹性驱油田产量递减类型属指数递减, 其递减率随油井开井数 n_o 变化而变化, 在油井开井数一定的条件下, 递减率为一常数。

应用1: 马岭油田在试采阶段油井平均采油指数 J_o 为 $0.6036 \text{ t}/(\text{MPa} \cdot \text{d})$, 单井平均控制地质储量近 $60 \times 10^4 \text{ t}$, 综合压缩系数为 $2.09 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$, 若原油体积系数 $B_o \approx B_i$, 则按式 (2-1-6)、式 (2-1-7) 可确定:

初始递减率: $D_i = 0.04813$

产量递减方程: $Q_t = Q_i \exp(-0.04813t)$

这与马岭油田在试采阶段未压自喷井生产资料统计得到的产量递减方程^[4] $Q_t = Q_i \exp(-0.05045t)$ 相比较, 方程形式一致, 递减率大小相近。

二、水驱油田

先对含水饱和度进行标准化处理, 转化成可流动流体无量纲流动区间, 有

$$\bar{S}_{wd} = \frac{\bar{S}_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (2-1-8)$$

对式 (2-1-8) 两边时间求导, 有

$$\frac{d\bar{S}_{wd}}{dt} = \frac{1}{1 - S_{wi} - S_{or}} \cdot \frac{d\bar{S}_w}{dt} \quad (2-1-9)$$

依据物质平衡方程, 油藏平均含水饱和度可表示如下

$$\bar{S}_w = \frac{N_p}{N} (1 - S_{wi}) + S_{wi} \quad (2-1-10)$$

将式 (2-1-10) 代入式 (2-1-9), 得

$$\frac{d\bar{S}_{wd}}{dt} = \frac{1 - S_{wi}}{(1 - S_{wi} - S_{or}) N} \cdot Q_t \quad (2-1-11)$$

按 (拟) 稳定流达西式, 在不考虑井间差异的条件下, 有

$$Q_t = Q_{0i} K_{ro(\bar{S}_{wd})} \quad (2-1-12)$$

式中, $Q_{0i} = \frac{2\pi K h n_o}{\mu_o \left[\ln \left(\frac{\sqrt{A_o}}{\sqrt{n\pi r_w}} \right) - 0.75 + S \right]} \cdot (\Delta p - \delta p)$, n_o 随时间 t 变化。