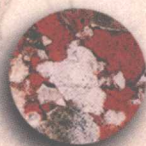
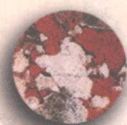


油气藏动态研究与预测

隋 军 戴跃进 王俊魁 刘青年 等著



755083

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收集了作者历年来发表的油气藏工程论文 27 篇,论述了对油气藏开发中各种动态规律的研究,以及应用各种方法对油气藏开采动态的预测。书中还涉及了油气藏开发设计、开发技术、三次采油和油气渗流力学等问题。

本书可供从事油气藏开发的管理干部、工程技术人员和石油院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气藏动态研究与预测 / 隋军等著 .
北京:石油工业出版社,2000.7
ISBN 7-5021-3032-2

I. 油…

II. 隋…

III. ①油气藏-油田动态-分析-文集

②油气藏-气田动态-分析-文集

IV. TE33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 63855 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)
北京施奈德排版中心排版
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 14 印张 350 千字 印 1—1000

2000 年 7 月北京第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3032-2/TE·2339

定价:22.00 元

前 言

《油气藏动态研究与预测》的内容包括:油气藏开发中各种动态规律的研究,油水、油气渗流过程中某些具体问题的求解方法,低渗透油气藏开发设计和开发技术等。书中较多的内容涉及到了应用各种数学、力学方法预测油气藏未来开采动态的问题。

书中论文注重理论联系实际。在阐述基本理论和方法的同时,用较多的实例说明了油气藏开发中的某些具体问题和解决方法,使读者易于掌握和应用。

有一部分论文是油气藏工程研究领域中具有学术水平和应用价值的文献,例如预测油气藏产量变化动态的一种新模型,非自喷井流入动态曲线解释方法等;还有一部分是专业性较强的学术论文,例如用群论方法求不稳定渗流的自模拟解,(用小扰动方法研究)边水气藏气水分界面运动的稳定性等。这些论文都是值得油藏工程师们借鉴和参考的。

值此世纪之交和大庆油田开发建设 40 周年之际,作者愿将此奉献给从事油气藏工程研究的同行们,希望他们从中能够得到一点点裨益和收获。

由于水平有限,书中难免会有某些缺点和失误,恳请读者能够提出批评和指正。

作者

2000 年于大庆油田

目 录

油井的流入动态曲线及其应用·····	(1)
油田产量递减规律的研究与应用·····	(26)
气井产量递减规律与动态预测(一)·····	(39)
气井产量递减规律与动态预测(二)·····	(45)
预测油气田产量变化动态的一种新模型·····	(51)
四种水驱特征曲线的比较与应用·····	(63)
水驱特征曲线与产量预测模型的联合应用·····	(77)
采油井合理流动压力的经验确定方法·····	(82)
陆相砂岩油田开发中地层压力的保持与控制·····	(85)
大庆油区天然气藏开发技术研究·····	(94)
大庆外围低、特低渗透油藏注水开发设计方法·····	(102)
大庆油田砂岩的孔隙结构特征·····	(124)
小井距试验油层温度的研究·····	(136)
对小井距试验油层水驱最终采收率的认识·····	(141)
胶束溶液同油水混相过程特点及其对驱油效率的影响·····	(149)
胶束驱油机理研究及其在矿场增产增注中的应用·····	(157)
油田开发中的运筹学思维和实践·····	(167)
制定增产计划的优化方法·····	(169)
灾变预测方法的一个应用·····	(174)
应用灰色系统理论预测油田套管损坏趋势·····	(180)
用递推残差辨识预测模式预测油田产量及综合含水率·····	(185)
油田注水动态整体预测的数学模型·····	(191)
油水前沿饱和度跃变与激波理论的比拟·····	(199)
用群论方法求不稳定渗流的自模拟解·····	(202)
边水气藏气水分界面(线)运动的稳定性·····	(207)
关于在采油过程中应用两种群生物竞争数学模型的问题·····	(214)
滤波计算中某些向量运算的列表方法·····	(217)

油井的流入动态曲线及其应用

摘 要 在介绍几种典型油井流入动态曲线的基础上,对近年来试井所得到的“拐弯型”流入动态曲线和低产不喷井的流入动态曲线进行了理论推导,得到了这些曲线的流入动态方程,为系统试井和地层测试资料的正确解释提供了方法。文中还用大量实例说明了这些方法的具体应用。

油井流入动态特征,是指原油从油层内向采油井底流动过程中,产量与流动压力之间的变化特征。这种变化特征是预测油井产能、确定采油井合理工作制度以及分析油井产能变化规律的主要依据。

油井的流入动态特征主要决定于油藏的驱动类型和采油井底各相流体的流动状态。油井的流入动态方程,则是描述油井流入动态特征的主要油藏工程方法。油藏驱动类型不同,油井井底流体的流动特征不同,描述油井流入动态特征的方程也就不同。

一、几种典型的油井流入动态方程

1. 达西直线流动方程

在实际油田上,每口井附近的渗流都近似于平面径向流。根据达西直线渗流定律,渗流速度可以表示为

$$\frac{q}{F} = \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (1)$$

式中 q ——油井产量;

K ——油层渗透率;

μ ——流体流动粘度;

F ——渗流截面积, $F = 2\pi rh$;

$\frac{dp}{dr}$ ——距井底 dr 处的压力梯度。

对上式分离变量进行积分

$$\int_{p_{wf}}^{p_R} dp = \frac{q\mu}{2\pi Kh} \int_{r_w}^{r_G} \frac{dr}{r}$$

则得到

$$q = \frac{2\pi Kh (p_R - p_{wf})}{\mu \ln \frac{r_G}{r_w}} \quad (2)$$

式(2)即为平面径向流时油井的产量公式。

令

$$J_o = \frac{2\pi Kh}{\mu \ln \frac{r_G}{r_w}} \quad (3)$$

并定义 J_o 为油井的采油指数,则有

$$q_o = J_o(p_R - p_{wf}) \quad (4)$$

式(4)就是采油井的直线流动方程,亦称裘比公式。

式(4)表明,在单相渗透条件下($p_{wf} \geq p_b$),油井产量与生产压差成线性关系。油井采油指数表示单位压降下油井的产量,它主要决定于油井的流动系数。当在矿场上改变油井工作制度进行稳定试井时。在 $q - p_{wf}$ 直角坐标中将会得到一条近似的直线,直线斜率的倒数就是油井的采油指数,如图 1。

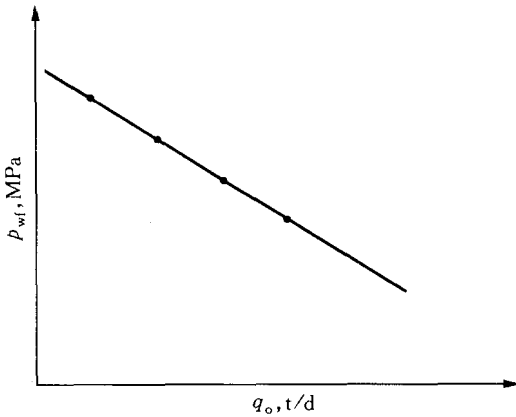


图 1 油井产量与流动压力关系曲线

在试井过程中,若井底流动压力较低,油井流量较大,就会破坏直线渗流规律,而使指示曲线向压力轴偏转,此时就不能再用式(4)来解释试井资料了。

2. 费特科维奇的油井流入动态方程

方程(4)只是在开采理想的、遵循达西定律的均质流体时才成立,对于不饱和油藏的油井,一般会存在这种条件。当油藏压力接近饱和压力或处在饱和压以下时,生产井的流入动态就不再遵循这个简单的方程。

1973 年费特科维奇发表文章^[1]指出,分析 40 口采油井的等时试井和变流量稳定试井结果表明,油井的流入动态特征与气井是相似的,可以用与气井相同的流动方程来进行解释,即

$$q_o = J'_o(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \quad (5)$$

进行试井的油藏,为在原始油层压力下的极不饱和油藏、饱和油藏以及部分枯竭油藏(其含气饱和度大于临界饱和度)。对所有这三种油藏流动状态下所进行的试井,都发现方程(5)是正确的。这些油藏的渗透率变化范围为 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到大于 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

马斯凯特(Maskat)首先推导出了径向稳定流动状态下的理论采油指数,为考虑所观察到的油井非线性流动状态,并给出了下面的方程:

$$q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \int_{p_{wf}}^{p_R} f(p) dp \quad (6)$$

式中 $f(p) = \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o}$;

K_{ro} ——油相相对渗透率;

μ_o ——原油地下粘度;

B_o ——原油体积系数。

根据典型油藏的流体性质,用式(6)计算表明,当油藏压力一定时,采油指数随压差的增加而减小。

图 2 为未饱和油藏的压力函数。根据图 2,式(6)右端压力函数 $f(p)$,其积分可以用两部分来计算,即

$$q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \left[\int_{p_{wf}}^{p_b} \frac{K_{ro}(S, p) dp}{\mu_o B_o} + \int_{p_b}^{p_R} \frac{K_{ro}(p)}{\mu_o B_o} dp \right] \quad (7)$$

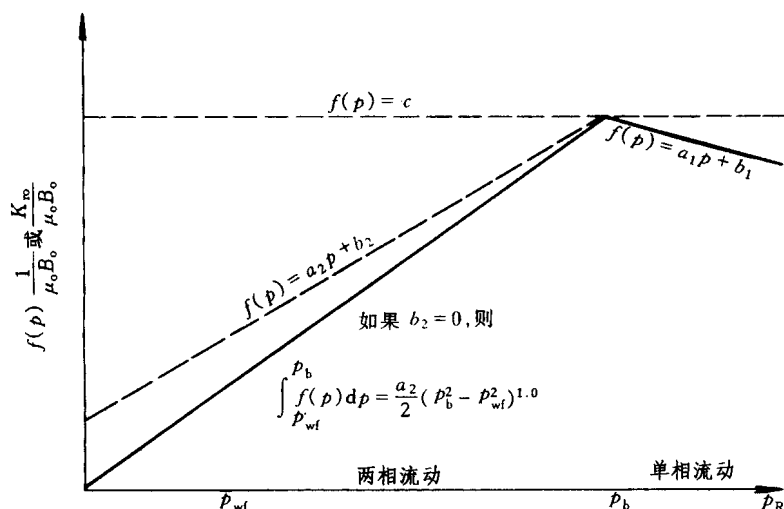


图2 未饱和油藏的压力函数

对于 $p_{wf} > p_b$ 区域内的流动,可忽略压力对渗透率的影响,因此可假定 $K_{ro}(p) = 1$ 。
 $\mu_o B_o$ 值则可用平均压力 $\frac{p_b + p_R}{2}$ 进行估计,这样上式可写成

$$q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \left[\int_{p_{wf}}^{p_b} \frac{K_{ro}(S, p)}{\mu_o B_o} dp + \frac{p_R - p_b}{(\mu_o B_o)} \right] \quad (8)$$

对于 $p_{wf} < p_b$ 的流动区域,压力函数 $f(p) = \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o}$ 则可用 $f(p) = a_2 p + b_2$ 来表示,如果 $b_2 = 0$,则有

$$\int_{p_{wf}}^{p_b} f(p) dp = \frac{a_2}{2} (p_b^2 - p_{wf}^2) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),得到在整个压力段内,油(或气)的近似流动方程:

$$q_o = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \left[\frac{a_2}{2} (p_b^2 - p_{wf}^2) + \frac{p_R - p_b}{(\mu_o B_o)} \right] \quad (10)$$

即

$$q_o = J'_o (p_b^2 - p_{wf}^2) + J_o (p_R - p_{wf}) \quad (11)$$

对所有压降都低于饱和压力的情况, $J_o (p_R - p_b)$ 为一常数,而其余项则随流动压力呈非线性变化,整个影响引出如下形式的流动方程:

$$q_o = C(p_b^2 - p_{wf}^2)^n \quad (12)$$

费特科维奇在分析了 40 口油井的稳定试井结果后认为,油井的动态曲线可用较一般的、更熟悉的方程来表达,这个方程与计算气井曲线所用的方程类似,即前面提到的式(5)。通过 40 口油井回压试井表明,指数 n 的变化范围为 0.57~1.0。

其中油藏为溶解气驱的油井有 16 口,在试井时油藏平均含气饱和度大于临界含气饱和度和。试井结果表明, q_o 与 Δp^2 在双对数坐标中成直线关系,其斜率 $n = 1$ 的井有 12 口, $n < 1$ 的井仅 4 口。

例如 A6 井,稳定试井资料如表 1。

表 1 A6 井稳定试井数据表

测试序号	0	1	2	3	4	5	6	7
$q_o, \text{m}^3/\text{d}$	0	10.49	21.30	21.78	36.41	14.78	51.03	54.21
p_{wf}, MPa	9.458	8.734	8.031	7.897	6.477	8.284	5.056	4.487

将 q_o 与 Δp^2 在双对数坐标中作图,数据点基本成直线关系,如图 3。直线斜率 $n = 1.0$, 常数项 $C = 0.8$,流入动态方程为

$$q_o = 0.8(p_R^2 - p_{wf}^2)^{1.0}$$

在饱和油藏上,应用等时测试与回压测试共试井 21 口。结果表明,由这些井得到的流入动态曲线都符合式(5)。流入曲线的斜率 $n = 0.568 \sim 0.875$,没有 1 口井的斜率像溶解气驱油藏那样,大部分为 1.0。

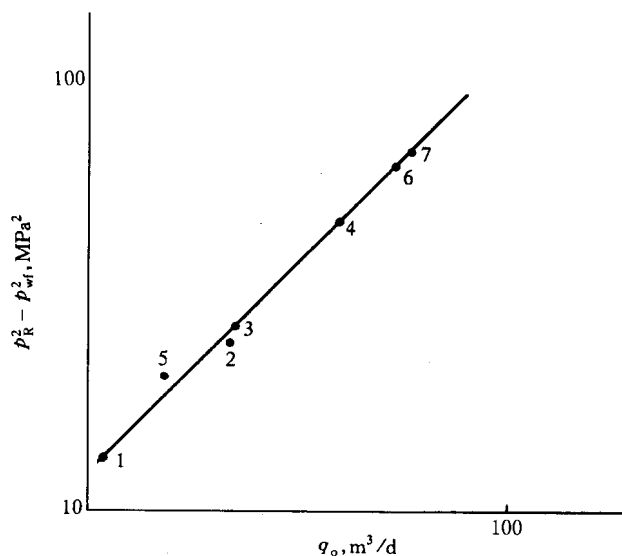


图 3 A6 井流入动态曲线

例如 H1 井 4h 等时测试结果如表 2。

表 2 H1 井 4h 等时测试数据表

流动序号	1	2	3	4	5	6	7
p_R, MPa	24.41	/	24.39	24.35	24.35	24.35	24.36
p_{wf}, MPa	22.96	23.28	23.02	23.23	23.73	24.11	24.24
$q_o, \text{m}^3/\text{d}$	417.5	360.9	409.2	350.2	232.9	121.5	76.3

将 q_o 与 Δp^2 在双对数坐标中作图,流入曲线为一条很好的直线(图 4),其斜率 $n = 0.684$, $C = 22.85$,流入动态方程为

$$q_o = 22.85(p_R^2 - p_{wf}^2)^{0.684}$$

油井绝对敞喷流量为 $1803.5 \text{m}^3/\text{d}$ 。

在所进行的所有试井中,仅有两口井油藏压力高于饱和压力,为低饱和油藏,在双对数图中, q 与 Δp^2 亦成直线关系,其斜率为 0.793 与 0.712。其中 G1 井的试井数据如表 3。

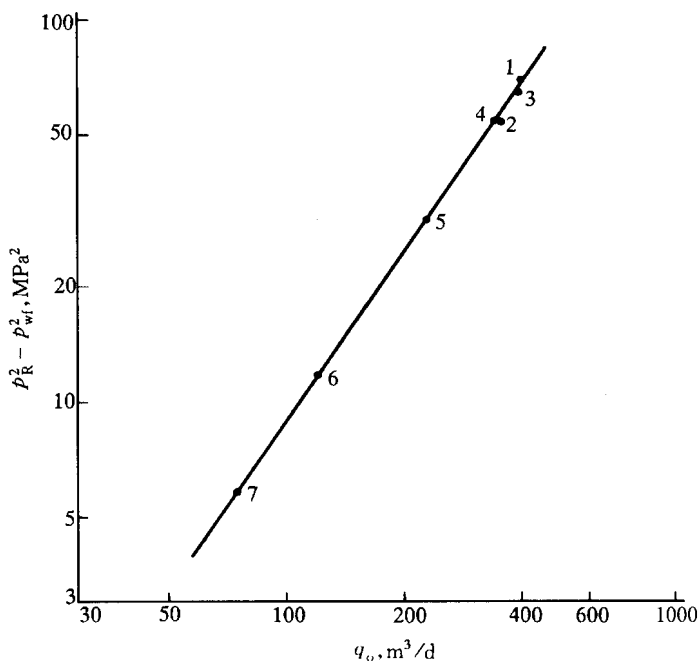


图4 H1井流入动态曲线

表3 G1井稳定试井数据表

流动序号	1	2	3	4	5	6	7	8
p_R , MPa	45.28	/	45.20	45.24	45.20	45.20	45.20	45.20
p_{wf} , MPa	39.76	43.24	44.32	39.80	41.82	43.47	43.95	44.45
q_o , m ³ /d	472.7	211.1	114.8	456.4	337.0	196.5	157.7	105.7

该井的流入动态曲线如图5,流入动态方程为:

$$q_o = 3.598(p_R^2 - p_{wf}^2)^{0.793}$$

该井饱和压力为32.9MPa,在测试中,当流量为472.7m³/d时,测得的最低流压为39.76MPa。分析认为,该井存在非达西流动的主要原因是,试井时流速较高,出现了紊流流动。例如当流量达到472.7m³/d时,计算的雷诺数 $Re = 8$,而雷诺数大于1时即为紊流。

3. 溶解气驱油井的流入动态方程

没有外来能量补充的油田,在开发过程中由于油藏能量不断消耗,压力将不断下降。当地层平均压力降低到饱和压力以下时,油田将会出现油气两相流动,这就是通常所说的溶解气驱开采方式。这种开采方式,随着开发时间的推移,油井产能系数将会不断下降。

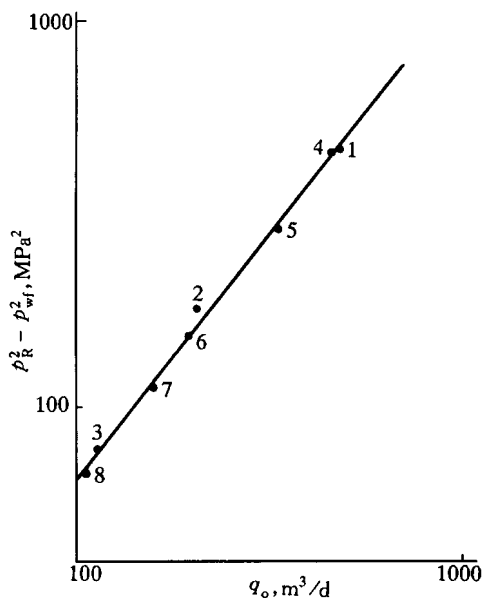


图5 G1井流入动态曲线

在溶解气驱方式下,混气原油向采油井底渗流时,其流动状态是不稳定的,油井产量随时间而变化,但是可以把渗流过程的每一瞬时近似看成稳定状态。在这一瞬时认为压力及含油饱和度不随时间而变化。即渗流处于相对稳定状态,而把总过程的不稳定状态看成是无数多个稳定状态的累加,从而求得油井产量。

在某一瞬时油井的产量

$$q_o = F \cdot \frac{K_o}{\mu_o B_o} \frac{dp}{dr} \quad (13)$$

式中 F ——渗流截面积, $F = 2\pi rh$;

K_o ——油气两相流时,油的有效渗透率。

引入相渗透率概念 $K_{ro} = \frac{K_o}{K}$, 将其代入式(13), 则有

$$q_o = \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} 2\pi Khr \frac{dp}{dr} \quad (14)$$

由于 μ_o 、 B_o 、 K_{ro} 与压力有关, 因此可引入一个压力函数, 即

$$\frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} = f(p) \quad (15)$$

根据原油粘度、体积系数、含油饱和度与压力的关系, 可以近似把式(15)表示为

$$\frac{K_{ro}(S)}{\mu_o(p)B_o(p)} = A + Bp \quad (16)$$

将式(16)代入式(14), 分离变量进行积分

$$\frac{q}{2\pi Kh} \int_{r_w}^{r_G} \frac{dr}{r} = \int_{p_{wf}}^{p_R} (A + Bp) dp$$

得到

$$q = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \left[\frac{B}{2} (p_R^2 - p_{wf}^2) + A(p_R - p_{wf}) \right] \quad (17)$$

当 $p_{wf} = 0.1 \text{ MPa}$ 时, 由于 $p_R \gg 0.1$ 、 $p_R^2 \gg 0.01$, 因此油井敞喷流量为:

$$q_m = \frac{2\pi Kh}{\ln \frac{r_G}{r_w}} \left(\frac{B}{2} p_R^2 + A p_R \right) \quad (18)$$

将式(17)除以式(18), 得

$$\frac{q_o}{q_m} = \frac{\frac{B}{2} p_R^2 + A p_R - \left(\frac{B}{2} p_{wf}^2 + A p_{wf} \right)}{\frac{B}{2} p_R^2 + A p_R}$$

简化上式后得

$$\frac{q_o}{q_m} = 1 - C_1 \left(\frac{p_{wf}}{p_R} \right) - C_2 \left(\frac{p_{wf}}{p_R} \right)^2 \quad (19)$$

式中 $C_1 = 1 / \left(1 + \frac{B p_R}{2A} \right)$, $C_2 = 1 / \left(1 + \frac{2A}{B p_R} \right)$

可以证明: $C_1 + C_2 = 1$, $C_1 / C_2 = \frac{2A}{B p_R}$

式(19)就是溶解气驱油藏油井的流入动态方程,它给出了油井产量与流动压力的数学关系式。

1968 年沃格尔对 21 个不同类型的油藏,在溶解气驱条件下的产量—压力变化进行了计算研究^[2],当把产量、压力无因次化以后发现,不同采出程度、不同原油粘度和不同相渗透曲线油藏的流入动态都具有相同的特征,即

$$\frac{q_o}{q_m} = 1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right)^2 \tag{20}$$

上述方程仅适用于溶解气驱油藏油气两相流动的油井,若用于三相流动,则需对公式加以修正。

例如某井试井数据如表 4。

表 4 某井试井数据表

流动序号	0	1	2	3
p_R, MPa	8.53			
p_{wf}, MPa		6.77	6.25	5.71
$q, \text{m}^3/\text{d}$		51.0	64.0	80.5

该井饱和压力为 8.9MPa,为溶解气驱油井。

根据式(20)

$$q_m = q_o / \left[1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right)^2 \right]$$

将表 4 中测试数据分别代入上式得

$$q_{m1} = 151.2, q_{m2} = 150.9, q_{m3} = 158.6$$

该井最大理论产量

$$q_m = \frac{1}{3}(q_{m1} + q_{m2} + q_{m3}) = 153.6 \text{m}^3/\text{d}$$

由此得到该井的流入动态方程为

$$q = 153.6 \left[1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right)^2 \right]$$

将测试点画在无因次流入动态曲线上(图 6),可以看出,测试数据与理论曲线符合较好。

式(19)与式(20)仅适用于 $p_b > p_R > p_{wf}$ 条件下的溶解气驱的油井。根据试井资料,当油井 $p_R > p_b > p_{wf}$ 时,试井所得到的 $p_{wf} - q$ 曲线,在饱和压力点以上为直线,在饱和压力点以下为曲线。

对于直线段,其流动方程为式(4)。

对于曲线段,由方程(19),可以直接写出下式,即

$$\frac{q_o - q_b}{q_c} = 1 - C_1 \frac{p_{wf}}{p_b} - C_2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \tag{21}$$

$$\text{式中 } q_b = J_o(p_R - p_b) \tag{22}$$

文献[3]给出了 q_c 的计算公式

$$q_c = J_o p_b / 1.8 \tag{23}$$

因此,只要测得直线渗流段某一点处的压力和产量, q_c 就不难求出。

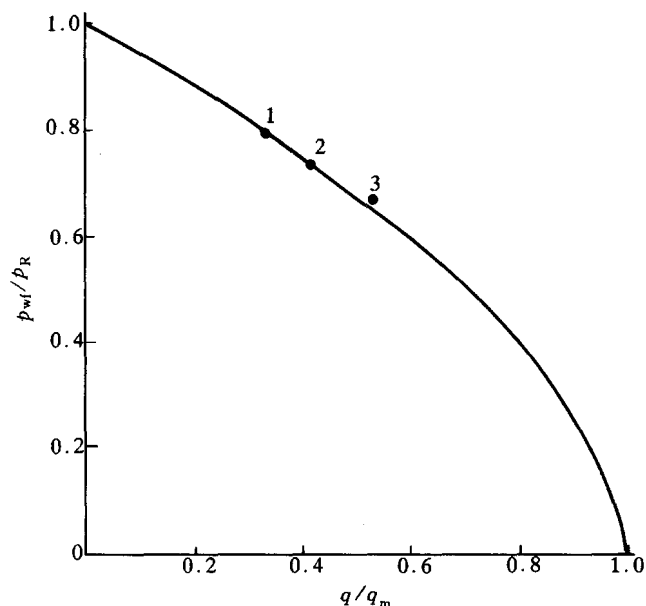


图6 某井无因次流入动态曲线

如果测试点的流压与产量处于曲线渗流段,由于 q_b 无法直接求出,此时可由下式先求 q_c :

$$q_c = q_b \left/ \left[(C_1 + 2C_2) \frac{p_R}{p_b} - (C_1 + 2C_2) + 1 - C_1 \frac{p_{wf}}{p_b} - C_2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right] \right. \quad (24)$$

然后再由下式求 q_b :

$$q_b = 1.8 \left(\frac{p_R}{p_b} - 1 \right) q_c \quad (25)$$

例如:有一组试井资料,如表5。

表5 一组试井资料

流动序号	0	1	2	3	4	5
p_{wf}, MPa	9.71	9.33	8.95	8.50	7.96	6.58
$q_o, \text{m}^3/\text{d}$	0	22.5	43	66	89	131
$q_o(\text{预测}), \text{m}^3/\text{d}$	/	22.0	44.0	67.3	86.3	133.8

该井饱和压力 $p_b = 8.6 \text{MPa}$ 。在饱和压力点以上有2个测试点。

用第一测试点计算, $J_o = 59.21 \text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$;

用第二测试点计算, $J_o = 56.58 \text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$;

取其平均值为 $J_o = 57.9 \text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

将 J_o 代入式(4)中,得到直线段的流动方程

$$q_o = 57.9(p_R - p_{wf}) \quad (26)$$

同时由式(22)得到 $q_b = 64.3 \text{m}^3/\text{d}$ 。

将采油指数 J_o 代入式(23)得

$$q_c = 57.9 \times 8.6 / 1.8 = 276.6 \text{m}^3/\text{d}$$

如果用曲线流动段的 3 个测试资料计算 q_c , 由式(24)知

$$\begin{cases} \frac{66}{q_c} = 1 - 0.85927C_1 - 0.91867C_2 & \text{①} \\ \frac{89}{q_c} = 1 - 0.79648C_1 - 0.59850C_2 & \text{②} \\ \frac{131}{q_c} = 1 - 0.63602C_1 - 0.32720C_2 & \text{③} \end{cases}$$

由式①、②联解, 消去 C_1 后得:

$$\frac{30.0163}{q_c} = 0.07883 + 0.27299C_2 \quad \text{④}$$

由式②、③联解, 消去 C_1 后得:

$$\frac{75.05}{q_c} = 0.25229 + 0.18875C_2 \quad \text{⑤}$$

由式④和式⑤联解, 消去 C_2 得:

$$q_c = 274.5 \text{ m}^3/\text{d}$$

可以看出, 应用式(24)计算的 q_c 值与式(23)计算结果非常接近。

将 q_c 值代入式(25)得

$$q_b = 1.8 \times \left(\frac{9.71}{8.6} - 1 \right) \times 274.5 = 63.8 \text{ m}^3/\text{d}$$

计算结果与式(22)的计算值亦非常相近。

将 q_c 值代入式④或式⑤得 $C_2 = 0.1118$ 。由于 $C_1 + C_2 = 1$, 所以 $C_1 = 0.8882$ 。

将 q_c 、 C_1 、 C_2 值代入式(21), 得到曲线段的流入动态方程:

$$\frac{q_o - 63.8}{274.5} = 1 - 0.8882 \frac{p_{wf}}{p_b} - 0.1118 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \quad (27)$$

根据式(26)和式(27)对表 5 中不同流动压力下的产量进行了计算, 结果与实测值很接近。应用这些公式还可测算任意流动压力下油井的产量。

二、一种新型的油井流入动态方程

1. 问题的提出

近年来, 越来越多的试井资料证实, 注水保持压力开发的油田, 当井底流动压力低于饱和压力以后, 指示曲线向压力轴偏转, 并出现最大产量点, 此时就不能用直线流动方程和沃格尔方程来计算油井的产量了。

图 7 为前苏联罗马什金、巴夫雷和康杜兹林油田, 通过 34 口 124 次稳定试井资料绘制的油井流入动态曲线^[4]。

对罗马什金和巴夫雷油田 250 口油井实际开采资料进行统计, 得到了同样的结果^[5]。大港油田马西深层, 吉林红岗油田和大庆油田的开采资料和试井资料也表明, 当流动压力低于饱和压力以后, 油井采油指数就急剧下降; 一些文献也都叙述了这种类型的流入动态曲线。

2. 流入动态方程的建立

文献[6]在研究井底附近油层中油、气、水三相流动以后, 得到井底附近油层中油的相对流动能力为

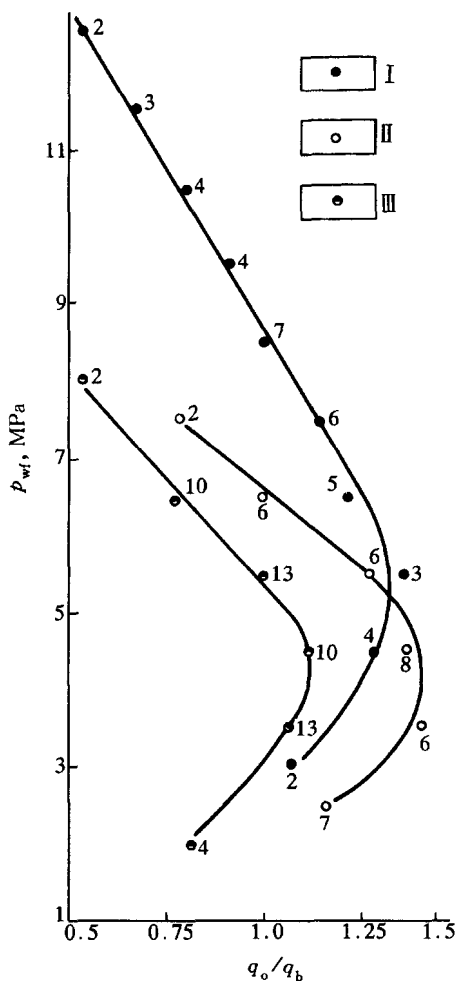


图 7 平均无因次产量 q_o/q_b 与井底压力 p_{wf} 关系曲线

I—阿布拉赫曼区；II—康杜兹林油田；III—巴夫雷油田

$$\frac{V_o}{V_m} = \frac{1 - f_w}{1 + (1 - f_w)R} \quad (28)$$

$$\text{式中 } V_m = V_o + V_g + V_w \quad (29)$$

V_o 、 V_g 、 V_w 分别为油层出口端油、气、水的体积流量。

采出 1t 地面油时，井底条件下的油、气、水体积流量可以分别用下述各式进行计算：

$$V_o = B(p_b) = \beta(p_b - p_{wf}) \quad (30)$$

$$V_g = 0.1033 \frac{ZT}{293 D_o} \frac{\alpha}{1 - f_w} (p_b - p_{wf}) / p_{wf} \quad (31)$$

$$V_w = \frac{f_w}{1 - f_w} \quad (32)$$

式中 $B(p_b)$ ——饱和压力下原油体积换算系数， m^3 ；

β ——原油体积换算系数变化率， m^3/MPa ；

p_b ——饱和压力, MPa;
 p_{wf} ——流动压力, MPa;
 Z ——气体偏差系数;
 T ——井底油层温度, K;
 α ——天然气溶解系数, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$;
 D_o ——地面油密度, t/m^3 ;
 f_w ——油井含水率, 小数。

式(28)中的 R 为井底附近油层出口端气油比。

$$R = \frac{V_g}{V_o} = 0.1033 \frac{ZT}{293 D_o} \frac{\alpha}{(p_b - p_{wf})} / \{ p_{wf} \cdot [B(p_b) - \beta(p_b - p_{wf})] \} \quad (33)$$

如果井底压力大于饱和压力, 则 $R=0$ 。

井底三相流动中, 液相(油和水)的相对流动能力为

$$\frac{V_o + V_w}{V_m} = \frac{1}{1 + (1 - f_w)R} \quad (34)$$

分析式(34)看出:

- (1)当井底压力大于饱和压力, 且含水率为零时, 油的相对流动能力为 1。
- (2)当井底压力大于饱和压力, 且为油水两相流时, 液相的相对流动能力亦为 1。
- (3)当井底压力低于饱和压力, 且含水率为零时, 油的相对流动能力为

$$\frac{V_o}{V_m} = \frac{1}{1 + R} \quad (35)$$

可以看出:随着井底气油比增加, 油的相对流动能力下降。

由式(28)可以看出, 随油井含水率和井底气油比上升, 油的相对流动能力下降; 由式(34)看出, 随气油比上升, 液相流入能力下降; 随含水率上升, 液相流入能力增加。

上述分析表明, 当井底压力低于饱和压力时, 油井的流入动态方程可以通过式(28)或式(34)对油井的初始流动能力进行修正而得到。即油的流入动态方程为

$$q_o = \frac{(1 - f_w)J_o}{1 + (1 - f_w)R} (p_R - p_{wf}) \quad (36)$$

而油、水两相的流入动态方程则为

$$q_l = \frac{J_o}{1 - (1 - f_w)R} (p_R - p_{wf}) \quad (37)$$

式中 J_o 为油井 $f_w=0$, $p_{wf} \geq p_b$ 时油井的采油指数。

方程(36)和(37)既适用于井底压力低于饱和压力的计算, 也适用于井底压力高于饱和压力的计算, 使油井流入动态的计算更符合实际。

3. 流入动态曲线的特征与应用

图 8 是根据式(36)绘制的油井无因次流入动态曲线, 其结构形态与图 7 完全一致。曲线可以分为直线段和曲线段两个部分。在直线段范围内, 相对采油指数稳定不变, 流动符合达西公式。在流入曲线段的弯曲部分, 有两个特征点: 第一点是直线开始弯曲的始点, 该点处的流动压力等于饱和压力, 流动压力低于该点以后, 采油指数降低, 产量增长速度减慢; 第二个特征点为最大产量点, 该点对应的压力可称为油井最低允许流动压力, 流动压力低于该点以后, 产量开始降低, 显然油井以这种压力生产是毫无意义的。

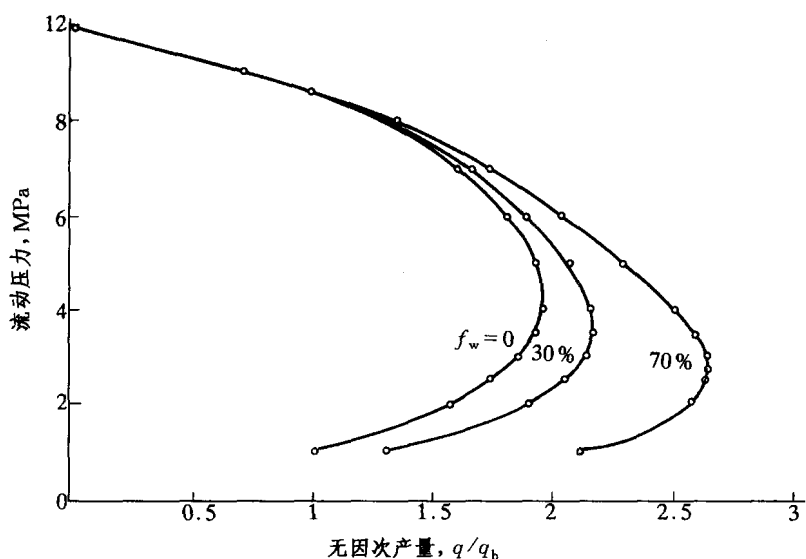


图8 不同含水率油井注入动态曲线

由式(36)的计算过程看出,产生最大产量点的主要原因是:流动压力下降到一定程度以后,井底附近可能出现油气两相流动,使油相的流动能力急剧下降。生产压差对产量的贡献已经小于采油指数下降对产量所产生的影响。

流入动态曲线上最大产量点所对应的流动压力,可以用作图法得到,也可以用数学解析法来确定。

在式(33)中,由于 $\beta(p_b - p_{wf}) \ll B(p_b)$, 因此可以略去 $\beta(p_b - p_{wf})$ 项。将式(33)代入式(37)。对该式求一阶导数并令其为零,便得到最低允许流动压力方程

$$(1 - n)p_{wfmin}^2 + 2np_b p_{wfmin} - np_b p_R = 0 \quad (38)$$

解式(38)得油井最低允许流动压力

$$p_{wfmin} = \frac{1}{1 - n} \{ [n^2 p_b^2 + (1 - n) \cdot np_b p_R]^{0.5} - np_b \} \quad (39)$$

$$\text{式中 } n = \frac{\alpha \bar{t}}{B_o} (1 - f_w); \quad (40)$$

$$\bar{t} = 0.1033 \frac{ZT}{293};$$

B_o ——原油体积系数。

例如萨尔图油田萨96井:

$$\bar{t} = 0.1139, \quad p_b = 10.3, \quad \alpha = 4.17, \quad D_o = 0.8573$$

$$B(p_b) = 1.378, \quad B_o = 1.1814, \quad p_R = 12, \quad J_1 = 10, \quad f_w = 0$$

由式(40)得 $n = 0.402$, 将其代入式(39), 得到 $p_{wfmin} = 4.52 \text{ MPa}$ 。

应用式(39)可以确定不同地层压力和含水率下油井的最低允许流动压力,作为油井定产时的依据。

图9是应用大庆外围高西油田资料所做的油井最低允许流动压力曲线。可以看出,在饱和压力一定的条件下,随着地层压力的上升,油井最低允许流压亦随之升高;油井见水后,随着含水率上升,最低允许流压下降,地层压力越高,其下降幅度也越大。罗马什金与巴夫雷油田

根据 250 口井统计分析,油井含水率大于 60% 以后,与无水期比较,最低允许流动压力下降 1.0MPa 左右。最低允许流动压力下降,主要是由于含水率上升,脱气影响相对减小的结果。

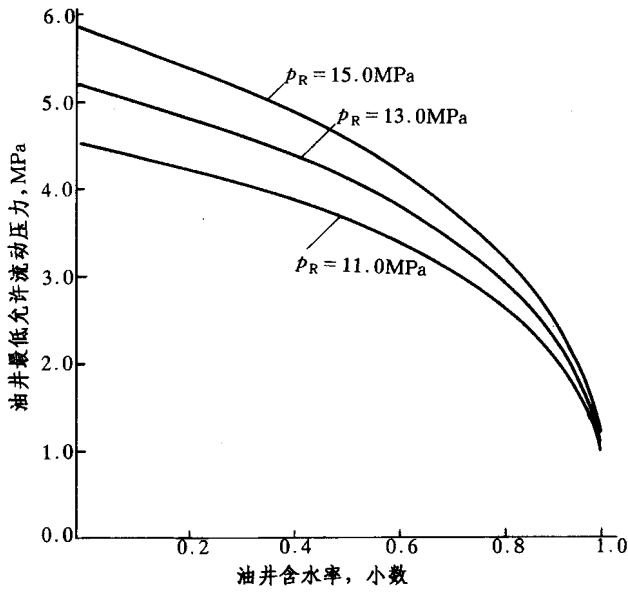


图 9 油井最低允许流动压力与含水率关系曲线

应用式(36),只需通过一点稳定测试资料,就可以建立油井流入动态曲线方程。当测点流动压力大于饱和压力时,将 (q_o, p_{wf}) 代入下式来求油井的初始流动能力:

$$J_o = \frac{q_o}{(1 - f_w)(p_R - p_{wf})}$$

当测点流动压力小于饱和压力时,将 (q_o, p_{wf}) 代入下式来求油井的初始流动能力:

$$J_o = \frac{1 + (1 - f_w)R}{1 - f_w} \frac{q_o}{p_R - p_{wf}}$$

然后将 J_o 代入式(36),流入动态方程就建立起来了。

方程(36)、(37)较好地描述了油井的流入动态特征,应用它既可以确定油井的合理工作制度,又可以预测油井不同含水率、不同流动压力条件下的产油量。

应用实例 1: 萨尔图油田北 2-丁 1-62 井稳定试井数据如表 6。应用式(37)建立该井的流入动态方程。

表 6 北 2-丁 1-62 井稳定试井数据表

流动序号	0	1	2	3	4	5
p_{wf}, MPa	12.3	6.01	4.99	3.99	3.86	3.24
$q_1, \text{t/d}$	/	226	255	261	271	242

该井的一些其他参数如下:

$$B_o = 1.121, \alpha = 3.97, T = 49, D_o = 0.848, B(p_b) = 1.3219, \\ p_b = 10.4, f_w = 63.0\%$$