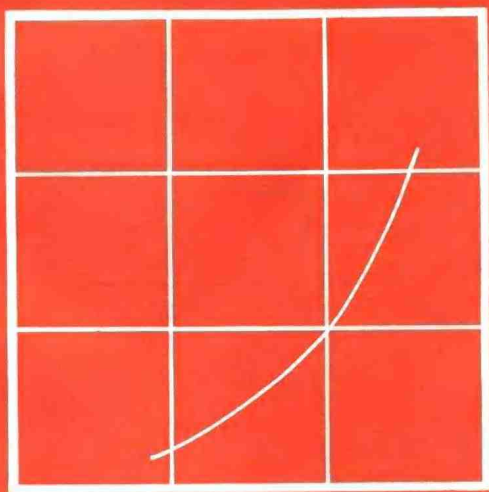


美国石油工程师学会教科书丛书



试井

〔美〕李约翰 著



石油工业出版社

86
TB353
8
3

美国石油工程师学会教科书丛书 1

试 井

[美] 李 约 翰 著

王福松 董恩环 译

67/28/25



石油工业出版社

B 134284

内 容 提 要

本书是美国得克萨斯州A&M大学石油工程教授W. JOHN LEE所著,由美国石油工程师学会组织出版。

书中较系统地介绍了油气井各种试井理论与方法、资料整理、计算分析和解释应用,并附有附录A~G,为读者进行试井资料整理、分析计算及解释应用提供了公式和图表,在每章中还安排有例题和练习题,很适于试井工程技术人员参考使用。

书中第一、二、五、六章及附录由王福松同志翻译,第三、四章由董恩环同志翻译,并由王福松同志作了校正。

W. JOHN LEE
SPE TEXTBOOK SERIES VOL. 1
WELL TESTING

Society of Petroleum Engineers of AIME New York 1982, Dallas

美国石油工程师学会教科书丛书 1

试 井

〔美〕李约翰 著

王福松 董恩环 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 13¹/₄印张 326千字 印1—1,860

1986年1月北京第1版 1986年1月北京第1次印刷

书号: 15637·2568 定价: 2.65元

前 言

本书介绍如何应用油井压力和流量来评价测试井周围地层的情况。这一讨论的基础是掌握流体在孔隙介质中的流动理论,以及我们实际感兴趣的流体体系的压力-体积-温度(pVT)关系。本书基本上是以总结的形式介绍了这些基本概念。

试井的一个主要目的是确定地层生产油藏流体的能力。然而,确定油井产能的依据是重要的。如果试井的设计、施工和分析得当,通常能够提供有关地层渗透率、油井堵塞或增产处理的范围、油藏压力(也许还有)、油藏边界和非均质地区等的资料。

基本的试井方法是在井眼中造成压力降,从而使地层流体流入井眼。如果我们测量油井生产期间井眼中的流量和压力,或者在生产之后关井期间的压力,我们一般将取得足够的表征测试井特点的资料。

本书一开始先讨论描述孔隙介质中流体非稳态流动的基本方程。接着讨论压力恢复试井、压降试井、其他流量试井、样板曲线分析法、气井试井、干扰和脉冲试井、中途测试和电缆地层测试器测试。本书重点介绍基本原理,并不想把预料中的一部分读者——石油工程系的大学生带往本课目的尖端。其他著作可以更好地起到这种作用,如石油工程师学会的试井专著^[1,2],以及阿尔伯达能源资源保护委员会的气井试井手册^[3]。

基本方程和实例使用工程单位。然而,为了适应石油工业将逐渐过渡到使用国际单位制这种情况,在附录F中介绍了国际单位制并用国际单位制重新列出了主要方程。另外,对本文中的实例在附录F中用国际单位制列出了答案。

1. Matthews, C.S. and Russell, D.G.: *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, Monograph Series, SPE, Dallas (1967) 1.
2. Earlougher, R.C. Jr.: *Advances in Well Test Analysis*, Monograph Series, SPE, Dallas (1977) 5.
3. *Theory and Practice of the Testing of Gas Wells*, third edition, Pub. ECRB-75-34, Energy Resources and Conservation Board, Calgary, Alta. (1975).

目 录

前言

第一章 孔隙介质中的流体流动	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 理想的油藏模型	(1)
1.3 扩散方程的解	(2)
1.4 测试半径	(17)
1.5 叠加原理	(20)
1.6 Horner近似法	(22)
第二章 压力恢复试井	(27)
2.1 引言	(27)
2.2 理想的压力恢复试井	(27)
2.3 实际的压力恢复试井	(30)
2.4 与理想试井理论假设条件的偏差	(31)
2.5 现场试井的定性动态	(33)
2.6 续流的影响和时间	(34)
2.7 确定渗透率	(38)
2.8 油井堵塞和增产处理	(40)
2.9 周围地层中的压力水平	(46)
2.10 油藏探边试井	(54)
2.11 适用气井的试井方程	(56)
2.12 适用多相流动方程	(60)
第三章 流动测试	(68)
3.1 引言	(68)
3.2 压降试井	(68)
3.3 多种流量试井	(74)
第四章 用样板曲线进行试井分析	(86)
4.1 引言	(86)
4.2 样板曲线的基本原理	(86)
4.3 Ramey样板曲线	(87)
4.4 Mckinley样板曲线	(93)
4.5 Gringarten等人用于裂缝井的样板曲线	(98)
第五章 气井的试井	(104)
5.1 引言	(104)
5.2 气藏中气体流动的基本理论	(104)
5.3 多种流量试井(或多次改变流量试井)	(106)
5.4 等时试井	(109)
5.5 改型等时试井	(114)

5.6 气井试井分析中拟压力的应用	(116)
第六章 其他的试井方法	(123)
6.1 引言	(123)
6.2 干扰试井	(123)
6.3 脉冲试井	(126)
6.4 中途测试	(131)
6.5 电缆地层测试	(133)
附录A 描述孔隙介质中流动的微分方程的推导	(135)
引言	(135)
三维流动连续方程	(135)
径向流动连续方程	(135)
流动定律	(136)
微压缩流体的单相流动	(136)
单相气体流动	(137)
油、水、气同时流动	(138)
附录B 无因次参数	(140)
引言	(140)
微压缩流体的径向流动	(140)
井底压力为常压的径向流动	(142)
附录C Van Everdingen和Hurst的扩散方程的解	(145)
引言	(145)
内边界上流量为常数, 没有液流通过外边界	(145)
内边界上流量为常数, 外边界上的压力为常数	(147)
内边界上为常压, 无液流通过外边界	(152)
附录D 岩石和流体的性质的相关关系	(162)
引言	(162)
液态烃的拟临界温度和压力	(162)
原油的泡点压力	(162)
溶解油气比	(163)
原油的地层体积系数	(163)
欠饱和原油的压缩系数	(164)
饱和原油的压缩系数	(165)
原油粘度	(167)
气体在水中的溶解度	(169)
水的地层体积系数	(169)
欠饱和油藏中水的压缩系数	(170)
饱和油藏中水的压缩系数	(170)
水的粘度	(171)
气体的拟临界性质	(172)
气体定律偏差系数(z 系数)和气体地层体积系数	(172)
气体的压缩系数	(173)
气体的粘度	(175)
地层的压缩系数	(177)
附录E 试井的通用理论	(180)

附录F 试井方程国际单位制的应用	(185)
附录G 一部分练习的答案	(198)
公式符号说明	(201)

第一章 孔隙介质中的流体流动

1.1 引言

在这开头的一章里,我们介绍孔隙介质中流体的流动。我们开始讨论最经常用来模拟非稳态流动的微分方程。在正文中简单地介绍这些方程;而有关这些方程的数学推导细节则列在附录A中,供希望进一步了解这些方程的教师和学生参考。紧接这些方程之后,是讨论有关这些方程的某些最有用的解,特别是讨论了描述径向非稳态流动的指数积分解。在附录B中讨论了无因次变数,这对某些读者了解掌握径向流动的解是会有帮助的。

在这一章还讨论测试半径的概念和叠加原理。在多井无限油藏中证明的叠加法,用来模拟简单的油藏边界,还用来模拟变流量生产史。在本章的最后介绍叠加法的另外一种近似法,即Horner“假生产时间”法。

1.2 理想的油藏模型

为了对试井提出分析和设计技术,我们首先必须对模拟的油井和油藏作出某些简化假设。提出适量的简化假设,是为了对描述有关流态的方程求得简单而有用的解所必需的。当然我们不能作过多的假设,但显然也不能少作一些假设。按需要作出一些假设,是为了结合应用(1)质量守恒定律、(2)达西定律和(3)状态方程,以达到我们的各项目标。关于这个问题在本章只作简单介绍,有关细节请参考附录A和有关参考文献。

我们来考虑在圆形油藏中朝向一口井的径向流动。如果我们结合应用质量守恒定律和达西定律,来研究压缩系数小和为常数的流体的等温流动(这对油藏的单相流动来讲是很符合要求的一种模式),那么我们就求得一偏微分方程。如果我们进一步假设压缩系数 c 很小并且与压力无关,渗透率 k 为常数并且各向同性,粘度 μ 与压力无关,孔隙度 ϕ 为常数,并且假设基本微分方程中的一些项(包括平方压力梯度项)可以忽略不计,那么偏微分方程经简化以后可变为以下形式:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{0.000264k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.1)$$

这一方程称作扩散方程(diffusivity equation); $0.000264k/\phi\mu c$ 项称作水力扩散系数(hydraulic diffusivity),并常常用符号 η 表示。

方程1.1各项用油田单位表示。压力 p 为磅/英寸²;距离 r 为英尺;孔隙度 ϕ 为小数;粘度 μ 为厘泊;压缩系数 c 为体积/体积/磅/英寸²($c = (1/p)(dp/dp)$);渗透率 k 为毫达西;时间 t 为小时;水力扩散系数 η 为英尺²/小时。

对于非理想气体的径向流动可以提出类似的方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\mu z} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi}{0.000264k} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{z} \right) \quad (1.2)$$

式中 z 为气体定律偏差系数。

对于油、气和水同时流动,

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi c_t}{0.000264 \lambda_i} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.3)$$

式中 c 为总的压缩系数:

$$c_t = S_o c_o + S_w c_w + S_g c_g + c_r \quad (1.4)$$

而 λ 是总流度, 它等于各相的流度之和:

$$\lambda_t = \left(\frac{k}{\mu_o} + \frac{k_g}{\mu_g} + \frac{k_w}{\mu_w} \right) \quad (1.5)$$

在方程1.4中, S_o 指油相饱和度, c_o 指油相压缩系数, S_g 和 c_g 指气相的, S_w 和 c_w 指水相的; c_r 是地层的压缩系数。在方程1.5中, k_o 是指有其它相存在时对油的有效渗透率, μ_o 指油的粘度; k 和 μ 指气相的; k_w 和 μ_w 指水相的。因为考虑到地层是可压缩的(也就是说孔隙体积随压力的降低而降低), 方程1.3中的孔隙度不象在方程1.1和1.2中所假设的是常数。

1.3 扩散方程的解

这一节介绍描述孔隙介质中微压缩液体流动的扩散方程(见1.2节)的一些有用解。我们还要对方程1.2和1.3的解作某些说明。

方程1.1对试井特别有用的解有四个: 有边界的圆柱形油藏的解; 考虑一口井为线源并且井眼半径为零的无限油藏的解; 准稳态解; 包括无限油藏中一口井的井眼储存的解。然而, 在讨论这些解之前, 我们首先总结一些推导方程1.1必需使用的假设: 均匀厚度的均质和各向同性的孔隙介质; 岩石和流体的性质与压力无关; 压力梯度小; 径向流动; 达西定律(有时称作层流)适用; 重力忽略不计。为了求得方程1.1的解, 我们还将还要作一些假设。

有边界的圆柱形油藏

方程1.1的解要求我们指定2个边界条件和一个原始条件。如果我们作出如下假设, 我们就能求得一个可靠的和实用的解。这些假设是: (1) 流入井眼的流量为 qB , 油井以此不变的流量生产(q 指井下砂层条件下以标准桶/日表示的流量, B 是地层体积系数, 地下桶/标准桶); (2) 井眼半径为 r_w 的一口井位于半径为 r_e 的圆柱形油藏的中心, 并且没有液流通过油藏的外边界; (3) 开始生产以前油藏处于均匀的压力 p_i 之下。所求解的最有用的形式是把砂层表面的流压 p 与时间、与油藏岩石和流体的性质相关起来, 即所求解为(1)

$$p_{wf} = p_i - 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left\{ \frac{2t_D}{r_e^2} + \ln r_{eD} - \frac{3}{4} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_n^2 t_D} J_1^2(\alpha_n r_{eD})}{\alpha_n^2 [J_1^2(\alpha_n r_{eD}) - J_1^2(\alpha_n)]} \right\} \quad (1.6)$$

其中, 为了效率和方便, 我们引入了无量纲变数:

$$r_{eD} = r_e / r_w$$

和

$$t_D = 0.000264 kt / \phi \mu c_t r_w^2$$

其中 α_n 为下式的根:

$$J_1(\alpha_n r_{eD}) Y_1(\alpha_n) - J_1(\alpha_n) Y_1(\alpha_n r_{eD}) = 0;$$

J_1 和 Y_1 为 Bessel (贝塞尔) 函数。(在本章的所有方程中都使用总的压缩系数, 因为即使只生产单相油的地质层也含有束缚水并且地质层本身也具有压缩性。)

不熟悉Bessel函数的读者不要因这一方程而惊慌。为了计算 p_{in} 的数值并不一定需要使用方程1.6的完整形式；相反，我们在大部分计算中将使用它的有限形式。关于方程1.6的最重要的事实，是在推导所用的假设条件下它是方程1.1的精确解。它有时被称作van Everdingen-Hurst常数临界流量解^[2](Constant-terminal-rate solution)。附录c更全面地讨论了这个解。因为它精确，因此就可以作为标准，我们把其他更有用(但也更近似)的解与之进行比较。下面介绍的就是这样一个近似解。

带有线源井的无限大圆柱形油藏

假设：(1)油井以不变的流量 qB 生产；(2)井眼半径为零；(3)油藏处于均匀的压力 p_i 之下(在开始生产前)；(4)油井排油面积无限大(即 $r \rightarrow \infty$ 时 $p \rightarrow p_i$)。在这些条件下，方程1.1的解为

$$p = p_i + 70.6 \frac{qB\mu}{kh} \text{Ei} \left(\frac{-948\phi\mu c_i r^2}{kt} \right) \quad (1.7)$$

其中 p 是新符号，它代表在时间 t (小时)时离油井 r 距离(英尺)处的压力(磅/英寸²)；而

$$\text{Ei}(-x) = - \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Ei函数或指数积分。

在我们检验方程1.7的性质和内含之前，我们必须答复一个逻辑上的问题。因为方程1.6是一个精确解，同时因为方程1.7显然是以理想化的边界条件为基础的，那么在什么时候，由方程1.7计算的在半径 r_w 上的压力满意地近似于由方程1.6算出的压力？这些解的分析表明^[3]，当 $3.79 \times 10^8 \phi\mu c_i r_w^2 / k < t < 948 \phi\mu c_i r_w^2 / k$ 时，Ei函数解十分接近更精确的解。当时间小于 $3.79 \times 10^8 \phi\mu c_i r_w^2 / k$ 时，井眼半径等于零的假设(即假设井为线源或线汇)限制方程的精确性；当时间大于 $948 \phi\mu c_i r_w^2 / k$ 时，油藏的边界开始影响油藏中的压力分布，从而使油藏不再是无限作用的油藏。

进一步简化流动方程的解是可能的：对于 $x < 0.02$ 来讲， $\text{Ei}(-x)$ 可用下式以小于0.6%的误差近似表示：

$$\text{Ei}(-x) \approx \ln(1.781x) \quad (1.8)$$

为了估算Ei函数，对于 $0.02 < x \leq 10.9$ 来讲，我们可以用表1.1；对于 $x \leq 0.02$ ，可用方程1.8；对于 $x > 10.9$ ，在试井中应用可以考虑 $\text{Ei}(-x)$ 为零。

在实际工作中，我们发现大部分油井由于钻井或完井作业而在井眼附近造成渗透率下降(油层被堵塞)。而另有许多油井则经过酸化或水力压裂处理。方程1.7无法恰当地模拟这样一些油井；因为该方程的推导显然是假设油井的整个排油区(包括井眼附近)在渗透率上是均匀的。Hanks^[4]指出：如果我们把堵塞的或处理过的井底附近地区看作与一个发生了变化的地带(其渗透率为 k_s ，且均匀分布，其外部半径为 r_s)等效，那么我们就能用一稳态径向流动方程来模拟通过这一地区的附加压降(Δp_s)，见图1.1。因此，

$$\begin{aligned} \Delta p_s &= 141.2 \frac{qB\mu}{k_s h} \ln(r_s/r_w) - 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \ln(r_s/r_w) \\ &= 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln(r_s/r_w) \end{aligned} \quad (1.9)$$

方程1.9简要表明，已变化地带的压力降是与 k_s 而不是 k 成反比，并且必须对这一地带(原来假设其渗透率为 k ，与油藏的其他部分相同)的压力降进行校正。结合方程1.7和1.9，

表1.1 指数积分 $-Ei(-x)$ 的值①

$0.000 < 0.209$, 间距 ~ 0.001										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0.00	4.000	6.332	5.639	5.235	4.948	4.726	4.545	4.392	4.259	4.142
0.01	4.038	3.944	3.858	3.779	3.705	3.637	3.574	3.514	3.458	3.403
0.02	3.355	3.307	3.261	3.218	3.176	3.137	3.098	3.062	3.026	2.992
0.03	2.959	2.927	2.897	2.867	2.838	2.810	2.783	2.756	2.731	2.706
0.04	2.681	2.658	2.634	2.612	2.590	2.568	2.547	2.527	2.507	2.487
0.05	2.468	2.449	2.431	2.413	2.395	2.377	2.360	2.344	2.327	2.311
0.06	2.295	2.279	2.264	2.249	2.235	2.220	2.206	2.192	2.178	2.164
0.07	2.151	2.138	2.125	2.112	2.099	2.087	2.074	2.062	2.050	2.039
0.08	2.027	2.015	2.004	1.993	1.982	1.971	1.960	1.950	1.939	1.929
0.09	1.919	1.909	1.899	1.889	1.879	1.869	1.860	1.850	1.841	1.832
0.10	1.823	1.814	1.805	1.796	1.788	1.779	1.770	1.762	1.754	1.745
0.11	1.737	1.729	1.721	1.713	1.705	1.697	1.689	1.682	1.674	1.667
0.12	1.660	1.652	1.645	1.638	1.631	1.623	1.616	1.609	1.603	1.596
0.13	1.589	1.582	1.576	1.569	1.562	1.556	1.549	1.543	1.537	1.530
0.14	1.524	1.518	1.512	1.506	1.500	1.494	1.488	1.482	1.476	1.470
0.15	1.464	1.459	1.453	1.447	1.442	1.436	1.431	1.425	1.420	1.415
0.16	1.409	1.404	1.399	1.393	1.388	1.383	1.378	1.373	1.368	1.363
0.17	1.358	1.353	1.348	1.343	1.338	1.333	1.329	1.324	1.319	1.314
0.18	1.310	1.305	1.301	1.296	1.291	1.287	1.282	1.278	1.274	1.269
0.19	1.265	1.261	1.256	1.252	1.248	1.243	1.239	1.235	1.231	1.227
0.20	1.223	1.219	1.215	1.210	1.206	1.202	1.198	1.195	1.191	1.187
$-Ei(-x)$, $0.00 < x < 2.09$, 间距 ~ 0.01										
0.0	4.000	4.038	3.333	2.959	2.681	2.468	2.295	2.151	2.027	1.919
0.1	1.823	1.737	1.660	1.589	1.524	1.464	1.409	1.358	1.309	1.265
0.2	1.223	1.183	1.145	1.110	1.076	1.044	1.014	0.985	0.957	0.931
0.3	0.906	0.882	0.858	0.836	0.815	0.794	0.773	0.755	0.737	0.719
0.4	0.702	0.686	0.670	0.655	0.640	0.625	0.611	0.598	0.585	0.572
0.5	0.560	0.548	0.536	0.525	0.514	0.503	0.493	0.483	0.473	0.464
0.6	0.454	0.445	0.437	0.428	0.420	0.413	0.404	0.396	0.388	0.381
0.7	0.374	0.367	0.360	0.353	0.347	0.340	0.334	0.328	0.322	0.316
0.8	0.311	0.306	0.300	0.295	0.289	0.284	0.279	0.274	0.269	0.265
0.9	0.260	0.256	0.251	0.247	0.243	0.239	0.235	0.231	0.227	0.223
1.0	0.219	0.216	0.212	0.209	0.205	0.202	0.198	0.195	0.192	0.189
1.1	0.186	0.183	0.180	0.177	0.174	0.172	0.169	0.166	0.164	0.161
1.2	0.158	0.156	0.153	0.151	0.149	0.146	0.144	0.142	0.140	0.138
1.3	0.135	0.133	0.131	0.129	0.127	0.125	0.124	0.122	0.120	0.118
1.4	0.116	0.114	0.113	0.111	0.109	0.108	0.106	0.105	0.103	0.102
1.5	0.1000	0.0985	0.0971	0.0957	0.0943	0.0929	0.0915	0.0902	0.0889	0.0876
1.6	0.0863	0.0851	0.0838	0.0826	0.0814	0.0802	0.0791	0.0780	0.0768	0.0757
1.7	0.0747	0.0736	0.0725	0.0715	0.0703	0.0695	0.0685	0.0675	0.0666	0.0656
1.8	0.0647	0.0638	0.0629	0.0620	0.0612	0.0603	0.0595	0.0586	0.0578	0.0570
1.9	0.0562	0.0554	0.0546	0.0539	0.0531	0.0524	0.0517	0.0510	0.0503	0.0496
2.0	0.0489	0.0482	0.0476	0.0469	0.0463	0.0456	0.0450	0.0444	0.0438	0.0432

2.0 < x < 10.9, 间距 = 0.1

x	0	1	2	3	4
2	4.89×10^{-2}	4.26×10^{-2}	3.72×10^{-2}	3.25×10^{-2}	2.84×10^{-2}
3	1.30×10^{-2}	1.15×10^{-2}	1.01×10^{-2}	8.91×10^{-3}	7.89×10^{-3}
4	3.78×10^{-3}	3.35×10^{-3}	2.97×10^{-3}	2.64×10^{-3}	2.34×10^{-3}
5	1.15×10^{-3}	1.02×10^{-3}	9.08×10^{-4}	8.03×10^{-4}	7.19×10^{-4}
6	3.60×10^{-4}	3.21×10^{-4}	2.86×10^{-4}	2.55×10^{-4}	2.28×10^{-4}
7	1.15×10^{-4}	1.03×10^{-4}	9.22×10^{-5}	8.24×10^{-5}	7.36×10^{-5}
8	3.77×10^{-5}	3.37×10^{-5}	3.02×10^{-5}	2.79×10^{-5}	2.42×10^{-5}
9	1.24×10^{-5}	1.11×10^{-5}	9.99×10^{-6}	8.95×10^{-6}	8.02×10^{-6}
10	4.15×10^{-6}	3.73×10^{-6}	3.34×10^{-6}	3.00×10^{-6}	2.68×10^{-6}
x	5	6	7	8	9
2	2.49×10^{-2}	2.19×10^{-2}	1.92×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.48×10^{-2}
3	6.87×10^{-3}	6.16×10^{-3}	5.43×10^{-3}	4.82×10^{-3}	4.27×10^{-3}
4	2.07×10^{-3}	1.84×10^{-3}	1.64×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.29×10^{-3}
5	6.41×10^{-4}	5.71×10^{-4}	5.09×10^{-4}	4.53×10^{-4}	4.01×10^{-4}
6	2.03×10^{-4}	1.82×10^{-4}	1.62×10^{-4}	1.45×10^{-4}	1.29×10^{-4}
7	6.58×10^{-5}	5.89×10^{-5}	5.20×10^{-5}	4.71×10^{-5}	4.21×10^{-5}
8	2.16×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.73×10^{-5}	1.55×10^{-5}	1.39×10^{-5}
9	7.18×10^{-6}	6.44×10^{-6}	5.77×10^{-6}	5.17×10^{-6}	4.61×10^{-6}
10	2.41×10^{-6}	2.16×10^{-6}	1.94×10^{-6}	1.74×10^{-6}	1.56×10^{-6}

① 根据《石油工程师》1956年8月B171—173 Nisile, R. G. “如何使用指数积分”一文改编。

我们求得井眼处的总压降为:

$$\begin{aligned}
 p_i - p_{wf} &= -70.6 \frac{qB\mu}{kh} \cdot \text{Ei} \left(-\frac{948\phi\mu c_i r_w^2 w}{kt} \right) - \Delta p_s \\
 &= -70.6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\text{Ei} \left(-\frac{948\phi\mu c_i r_w^2 w}{kt} \right) \right. \\
 &\quad \left. - 2 \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \right]
 \end{aligned}$$

对于 $r = r_w$ 来讲, Ei函数的自变量在一短时间之后就非常小了, 因而我们可以使用对数近似式。因此压降变为:

$$p_i - p_{wf} = -70.6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\text{Ei} \left(-\frac{1688\phi\mu c_i r_w^2 w}{kt} \right) - 2 \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \right]$$

这样, 确定井壁阻力系数 (skin factor, 也常译作表皮因数或趋肤系数) S 是方便的, 它可用等效的已变化地带的性质表示:

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (1.10)$$

因此, 压力降变为

$$p_i - p_{wf} = -70.6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\text{Ei} \left(-\frac{1688\phi\mu c_i r_w^2 w}{kt} \right) - 2s \right] \quad (1.11)$$

方程1.10在某种程度上说明了井壁阻力系数符号的物理意义。如果油井有堵塞 ($k_s < k$), s 将是正值, 并且 k_s 和 k 之间的差别越大, 油层堵塞的深度越大, s 的值将越大。 s 没有上限。某些新钻油井在增产处理前根本不出油; 对这些油井来说, $k_s \approx 0$, 并且 $s \rightarrow \infty$ 。如果一口油

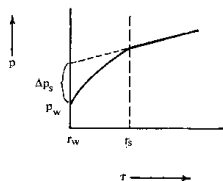


图1.1 井眼附近压力分布图

井经过增产处理 ($k_w > k$), s 将是负值, 并且处理深度越大, s 的绝对值也越大。一口处理过的井, 其井壁阻力系数难得小于 -7 或 -8, 只有那些具有深穿透高导流能力的水力裂缝的油井才会达到这样的井壁阻力系数。最后我们应当指出的是, 如果一口井既未堵塞又未作过增产处理 ($k = k_w$), 则 $s = 0$ 。我们告诫读者, 方程 1.10 最好用来进行定性分析; 因为实际的油井很难用一个简化的模式精确地表征其特点。

在结束井壁阻力的讨论之前, 应当指出, 一口特定油井附近渗透率变化了的地带只对这一口井附近的压力有影响, 也就是说, 油井外围渗透率未变化地层中的压力并不受这一变化地带的存在的影响。换句话说, 我们应用方程 1.11 来计算渗透率变化地带内的油井砂面上的压力, 而用方程 1.7 计算油井周围地层中变化地带以外的压力。我们现在还没有能用来计算半径 r ($r_w < r < r_e$) 处压力的简单方程, 但这对试井分析来讲将不会造成什么困难。

实例 1.1 应用 Ei 函数解计算井眼以外的压力

问题 一口井和一个油藏具有以下特征: 这口井只出油; 它以不变的流量 20 标准桶/日生产。油井和地层的有关参数如下:

$$\mu = 0.72 \text{ 厘泊};$$

$$k = 0.1 \text{ 毫达西};$$

$$c_i = 1.5 \times 10^{-5} (\text{磅/英寸}^2)^{-1};$$

$$p_i = 3000 \text{ 磅/英寸}^2;$$

$$r_e = 3000 \text{ 英尺};$$

$$r_w = 0.5 \text{ 英尺};$$

$$B_o = 1.475 \text{ 地下桶/标准桶};$$

$$h = 150 \text{ 英尺};$$

$$\phi = 0.23;$$

$$s = 0。$$

要求计算生产 3 小时以后在半径 1 英尺处的油藏压力; 然后计算生产 3 小时后在半径 10 和 100 英尺处的压力。

求解 直到 $t > 3.79 \times 10^5 \phi \mu c_i r_w^2 / k$ 以前, Ei 函数都不是流动方程的精确解。这里

$$\begin{aligned} \frac{3.79 \times 10^5 \phi \mu c_i r_w^2}{k} &= (3.79 \times 10^5) (0.23) (0.72) \cdot (1.5 \times 10^{-5}) (0.5)^2 / (0.1) \\ &= 2.35 < t = 3 \text{ 小时} \end{aligned}$$

因此, 如果油藏在此时仍是无限作用的, 我们就能应用方程 1.7 得到满意的精确度。直到 $t > 948 \phi \mu c_i r_e^2 / k$ 以前, 油藏都将和无限大油藏一样起作用。

在这里

$$\frac{948 \phi \mu c_i r_e^2}{k} = (948) (0.23) (0.72) \cdot (1.5 \times 10^{-5}) (3000)^2 / 0.1 = 211900 \text{ 小时}$$

因此, 对于时间小于 211900 小时来说, 我们可以用方程 1.7。在半径 1 英尺处的压力

$$\begin{aligned} p &= p_i + 70.6 \frac{q B_o}{k h} \text{Ei} \left(\frac{-948 \phi \mu c_i r^2}{k t} \right) = 3000 + \frac{(70.6) (20) (1.475) (0.72)}{(0.1) (150)} \\ &\quad \cdot \text{Ei} \left[\frac{-(948) (0.23) (0.72) (1.5 \times 10^{-5}) (1)^2}{(0.1) (3)} \right] \\ &= 3000 + (100) \text{Ei}(-0.007849) \\ &= 3000 + 100 \ln[(1.781) (0.007849)] \end{aligned}$$

$$= 3000 + (100)(-4.27) \\ = 2573 \text{ 磅/英寸}^2$$

在半径10英尺处

$$p = 3000 + 100 \cdot \text{Ei} \left[\frac{-(948)(0.23)(0.72)(1.5 \times 10^{-5})(10)^2}{(0.1)(3)} \right] \\ = 3000 + 100 \text{Ei}(-0.7849) \\ = 3000 + (100)(-0.318) \\ = 2968 \text{ 磅/英寸}^2$$

在这一计算中, 我们由表1.1求得Ei函数值。注意, 正如表中指出的, 它是一个负的量值。
在半径100英尺处的压力

$$p = 3000 + 100 \cdot \text{Ei} \left[\frac{-(948)(0.23)(0.72)(1.5 \times 10^{-5})(100)^2}{(0.1)(3)} \right] \\ = 3000 + 100 \text{Ei}(-78.49) \\ = 3000 \text{ 磅/英寸}^2$$

在这里我们指出, 对于自变量78.49来讲, Ei函数基本上等于零。

假稳态解(Pseudosteady-State Solution)

现在我们讨论我们将广泛用于试井分析的径向扩散方程的另一个解。实际上, 这个解(即准稳态解)并不是什么新解。它只是方程1.6(该方程描述半径为 r_e 的圆柱形油藏中心一口井的压力随时间的变化)的一个有限形式。这一有限形式对大部分时间都是适用的, 因此包括指数和Bessel函数的求和项可以忽略不计。在这一时间($t > 948 \phi \mu c_i r_e^2/k$)之后,

$$p_{wf} = p_i - 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left(\frac{2t}{r_e^2} + \ln r_{iD} - \frac{3}{4} \right)$$

或

$$p_{wf} = p_i - 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\frac{0.000527kt}{\phi \mu c_i r_e^2} + \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right] \quad (1.12)$$

注意, 在这一时间阶段, 对方程1.12求导, 我们发现

$$\frac{\partial p_{wf}}{\partial t} = - \frac{0.0744qB}{\phi c_i h r_e^2}$$

因为液体充满的油藏孔隙体积 V_p (英尺³)是

$$V_p = \pi r_e^2 h \phi$$

故而

$$\frac{\partial p_{wf}}{\partial t} = - \frac{0.234qB}{c_i V_p} \quad (1.13)$$

因此, 在这一时间阶段, 压力降的速度与液体充满的孔隙体积 V_p 成反比。这一结果导致一种试井形式, 有时把它称作油藏边界试井。这种试井是根据非稳态压力降速度与时间的关系探讨确定油藏的大小。

方程1.12的另一种形式在某些情况下也是很有用的。它包括用油井排油体积内的平均压力 $\bar{p}$ 取代原始油藏压力。

油井排油体积内的体积平均压力可由物质平衡方程求得。由于 t 小时驱出 qB 地下桶/日的流体(驱出流体的总体积为 $5.615qB(t/24)$ 英尺³)而造成的压力降($p_i - \bar{p}$)为:

$$p_i - \bar{p} = \frac{\Delta V}{c_i V} = \frac{5.615qB(t/24)}{c_i (\pi r_e^2 h \phi)} = \frac{0.0744qBt}{\phi c_i h r_e^2} \quad (1.14)$$

代入方程1.12得:

$$p_{wf} = \bar{p} + \frac{0.0744qBt}{\phi c_i h r^2} = \frac{0.0744qBt}{\phi c_i h r^2} + 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right]$$

或

$$\bar{p} - p_{wf} = 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (1.15)$$

方程1.12和方程1.15如果包括井壁阻力系数项,以考虑大部分油井被堵塞或经过增产处理这个事实,那么它们在实际工作中就变得更为有用了。例如,在方程1.15中

$$\bar{p} - p_{wf} = 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] + (\Delta p)_s$$

$$\bar{p} - p_{wf} = 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s \right] \quad (1.16)$$

和

$$p_i - p_{wf} = 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\frac{0.000527kt}{\phi \mu c_i r^2} + \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s \right] \quad (1.17)$$

进而我们能够确定平均渗透率 k 。由于

$$\bar{p} - p_{wf} = 141.2 \frac{qB\mu}{k_j h} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] = 141.2 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s \right]$$

由此得

$$k_j = k \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] / \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s \right] \quad (1.18)$$

这一平均渗透率 k_j ,正如我们将在后面看到的,在试井分析中具有相当的价值。注意,对于一口堵塞的井来讲,平均渗透率 k_j 低于真正的总的地层渗透率 k ;实际上,这两个量值只有当井壁阻力系数 s 为零时才相等。由于我们有时根据采油指数(PD)测量结果估算一口井的渗透率,并且由于一口井的采油指数 J (标准桶/日/磅/英寸²)定义如下:

$$J = \frac{q}{p - p_{wf}} = \frac{k_j h}{141.2 B\mu \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right]} \quad (1.19)$$

这一方法未必能可靠地估算地层的渗透率 k 。因此,除了应用PI数据外,我们还需要更完善的表征油井的方法。

实例1.2 根据采油指数试井资料分析油井

问题 有一口油井的日产量为100标准桶,测得的井底流压为1500磅/英寸²。最近的压力测量表明,平均油藏压力为2000磅/英寸²。测井曲线表明,纯砂层厚度为10英尺。该井排油区的半径 r_e 为1000英尺;井眼半径为0.25英尺。流体取样分析表明,在目前油藏压力下原油粘度为0.5厘泊,地层体积系数为1.5地下桶/标准桶。

1. 对所试油井估算采油指数;
2. 由这些资料估算地层的渗透率;
3. 油井取芯分析表明对油的有效渗透率为50毫达西。这意味着油井是被堵塞或是进行了增产处理?视井壁阻力系数是多少?

求解

1. 为了估算采油指数,我们应用方程1.19:

$$J = \frac{q}{p - p_{wf}} = - \frac{100}{(2000 - 1500)} = 0.2 \text{ 标准桶/磅/英寸}^2 \cdot \text{日}$$

2. 我们没有足够的资料来估算地层渗透率；我们只能计算平均渗透率 k ，该值未必与地层渗透率 k 十分相近。由方程 1.19

$$k_J = \frac{141.2 B \mu \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right]}{h} = \frac{(141.2)(0.2)(1.5)(0.5) \left[\ln \left(\frac{1000}{0.25} \right) - 0.75 \right]}{10} = 16 \text{ 毫达西}$$

3. 岩芯分析提供的地层渗透率，常常比由采油指数计算得出的渗透率更好一些，特别对于严重堵塞的油井更是如此。因为岩芯分析表明渗透率为 50 毫达西，我们的结论是这口井被堵塞。方程 1.18 提供了估算井壁阻力系数 s 的方法：

$$s = \left(\frac{k}{k_J} - 1 \right) \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right] = \left(\frac{50}{16} - 1 \right) \left[\ln \left(\frac{1000}{0.25} \right) - 0.75 \right] = 16$$

一般化油藏几何形态的流动方程

方程 1.16 适用于圆形排油面积中心的一口井。在更一般的油藏形状下模拟准稳态流动的类似方程⁵如下：

$$\frac{q}{p - p_{wf}} = 141.2 \frac{q B \mu}{k h} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10.06 A}{C_A r_w^2} \right) - \frac{3}{4} + s \right] \quad (1.20)$$

式中 A ——排油面积，英尺²；

C_A ——特定的排油区形状和井位的形状系数，无因次。

C_A 值列在表 1.2 中； C_A 值来源的进一步解释见第二章。

对于一般的排油区几何形态来讲，采油指数 J 可表示如下：

$$J = \frac{q}{p - p_{wf}} = - \frac{0.00708 k h}{B \mu \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10.06 A}{C_A r_w^2} \right) - \frac{3}{4} + s \right]} \quad (1.21)$$

利用表 1.2 中所列的其他数字我们能够计算：(1) 油藏保持无限作用所经历的最长的时间（在此期间可以使用 Ei 函数解）；(2) 使用准稳态解能以 1% 以内的精确度预测压力降所要求的时间；(3) 使用准稳态解能精确预测所要求的时间。

对于给定的油藏几何形态来讲，油藏为无限作用的最长时间，可用表 1.2 最右栏确定，即“应用无限系统解误差小于 1% 对 $t_{DA} <$ ”。因为 $t_{DA} = 0.000264 k t / \phi \mu c A$ ，这意味着以小时表示的时间可由下式计算：

$$t < \frac{\phi \mu c A t_{DA}}{0.000264 k}$$

准稳态方程精确度在 1% 以内所要求的时间，由表 1.2 表头为“误差小于 1% 对 $t_{DA} >$ ”栏求得，其关系式为：

$$t > \frac{\phi \mu c A t_{DA}}{0.000264 k}$$

最后，准稳态方程精确预测所要求的时间，根据表头为“精确，对于 $t_{DA} >$ ”栏确定。

图解表示在不同时间发生的流动方式对解决上面的问题是有帮助的。图 1.2 和图 1.3 表示

以不变流量生产时井底流压 p_{wf} 与时间的函数关系曲线，其座标为对数和线性座标两种。

在不稳定区段，油藏是无限作用的，由方程1.11来模拟，这意味着 p_{wf} 与对数 t 是直线函数关系。在准稳态区段，在一般情况下，油藏由方程1.20模拟，或者在特殊情况下，即油井位于圆柱形油藏的中心，油藏由方程1.15和1.12描述。方程1.12表示准稳态时 p_{wf} 与 t 之间的线性关系。在一般化的油藏几何形态中也存在这种线性关系。

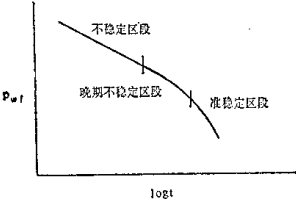


图1.2 半对数座标纸上流动区段

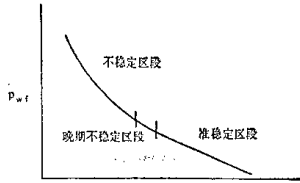


图1.3 笛卡尔座标纸上流动区段

在不稳定区段结尾和准稳态区段开始之间这段时间，这是流动的过渡区段，有时称作晚期不稳定区段，见图1.2和1.3。没有可用的简单方程来预测这一区段的井底流压与时间之间的关系。正如表1.2所示，对于在圆形、正方形或六边形排油面积中心一口井来说，这一区段是很小的(或者对实用目的来讲是不存在的)。然后，当油井偏离排油区中心的时候，也如表1.2所示，晚期不稳定区段可能占的时间相当长。

注意，确定什么时候不稳定区段结束和什么时候准稳态区段开始是带有某些主观性的。例如，关于应用方程1.7和1.12的限制(如本章前面所述)，与表1.2给出的并不完全相同，但差别并不大。其他作者^[1]认为，对 $t > 379\phi\mu c_r r_w^2/k$ 来说，方程1.7的误差已相当大，因此在这一下限和 $1136\phi\mu c_r r_w^2/k$ 上限之间就是对于圆柱形油藏中心的井也存在晚期不稳定区段。这些显然互相矛盾的看法，实际上反映了对如下问题的不同判断：在什么时候可以把方程1.7和1.12这些近似解看作与方程1.6精确解等同。

这些概念在实例1.3中说明。

实例1.3 一般化油藏几何形态的流动分析

问题 1. 假设有以下几种油藏几何形态：(1)油井位于圆形排油面积的中心；(2)油井位于正方形排油面积的中心；(3)油井位于正方形排油面积一个象限的中心。要求对以上每一种油藏几何形态计算如下几种以小时表示的时间：(a)油藏为无限作用的；(b)准稳态是精确的；(c)准稳态方程的精确度在1%以内。

对上述每一油藏几何形态来讲

$$A = 17.42 \times 10^6 \text{ 英尺}^2 (40 \text{ 英亩});$$

$$\phi = 0.12;$$

$$\mu = 1 \text{ 厘泊};$$

$$c_r = 1 \times 10^{-3} (\text{磅/英寸})^{-1};$$

$$k = 100 \text{ 毫达西}.$$

2. 对于上面第一部中的每口井估算 $\bar{p} - p_{wf} = 500 \text{ 磅/英寸}^2$ 的采油指数(PI)和稳定的产量，