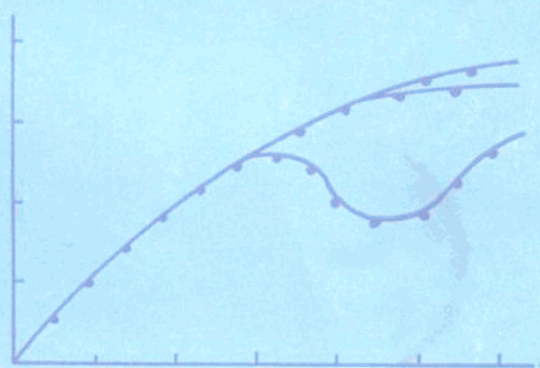


实用现代试井 解释方法

第二版

刘能强 编著 童宪章 审订



石油工业出版社

TE35: 017(2)
008(2)

069894



实用现代试井解释方法

第 二 版

刘能强 编著 童宪章 审订



200420687

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书第一版简明扼要地介绍了不稳定试井的原理及其公式推导等内容,重点介绍了应用解释图版及样板曲线进行试井解释的现代方法。本版在原书基础上又增加了均质油藏中垂直裂缝井的压力导数解释方法、双重渗透介质油藏的试井解释、水平井试井解释、气井现代试井解释方法等内容。是一本实用性很强的试井参考书。适合具有一般常规试井和解释方法知识的油藏地质及工程技术人员学习参考,亦可作为现场试井人员培训教材。

074061

实用现代试井解释方法

第 二 版

刘能强 编著 童宪章 审订

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 13印张 320千字 印 1—1,200

1992年9月北京第二版 1992年9月北京第一次印刷

ISBN 7-5021-0768-1/TF·724

定价: 8.20元

序 言

童 宪 章

油气田试井是油藏工程分析及研究工作的关键手段。20世纪50年代开始应用不稳定试井的理论和解释方法，在油气藏动态和油气井的产状分析方面形成了重要的突破。进入70年代后，在应用解释图版或样板曲线分析方法方面又有新的跃进，到目前已形成一套相当完善的现代试井解释方法。为了使我国从事油藏工程研究和管理的技术人员及时掌握这一领域的新知识及工作方法，本书作者编写了这本教材和参考资料。在内容方面应用精炼的语言，系统扼要地介绍了不稳定试井方法的主要部分，特别着重于新的成就。书中对原理和公式推导只作了简明扼要的介绍，使读者能迅速地掌握和应用。本书于1987年出版第一版，颇受读者欢迎，很快销售一空。本次修订对第一版作了相当多的补充和修改，增添了若干新的内容，包括一些本书第一版出版之后发表的新的研究成果，纠正了第一版中的错误，并全部使用法定计量单位制。本书适用于已具有一般常规试井知识和解释方法的油藏地质及工程技术人员，是一本适合广大范围油田开发工作人员使用的培训教材和参考资料。

作者的话

1987年出版的本书第一版是根据我在法国弗洛彼托公司 (Flopétrol Technique Services, 旧译佛罗石油技术服务公司) 进修期间参加该公司的试井解释培训班所学习的内容, 结合自己从事试井工作多年的一些体会编写而成的。编写的目的是向我国试井界介绍弗洛彼托公司所使用的现代试井解释方法, 希望能在学习外国先进技术, 提高我国试井解释水平方面, 起到抛砖引玉的作用。

本书第二版与第一版的主要不同之处是:

一、第一版出版时, 考虑到全国各油田仍广泛使用实用单位制, 为了迅速推广, 书中除特别说明 (主要是推导公式时) 使用达西单位制外, 均使用实用单位制。现在, 法定计量单位制已在全国普遍使用, 故第二版全部改用法定计量单位。

二、本次修订增加了如下内容:

1. 均质油藏中垂直裂缝井的压力导数解释方法 (第六章 §3);
2. 双重渗透介质油藏的试井解释 (第七章);
3. 水平井试井解释 (第八章);
4. 气井的现代试井解释方法 (第九章)。

其中第八章“水平井试井解释”是我和南海东部石油公司郭元耿高级工程师合作, 由我执笔编写的。

此外, 对第一版在内容和文字上作了若干修改和补充。

运用本书中所介绍的现代试井解释方法, 最好能用计算机和试井解释软件进行。但本书的基本立足点在于用手工进行解释。这就需要可供实际拟合的解释图版。石油工业出版社1985年出版的《现代试井解释图版》(姚振年、庄惠农编译) 包括了本书所介绍的解释图版中的大部分, 可以作为实际拟合的工作用图。这套图版仍保留弗洛彼托公司原图版中的英制单位公式, 但在说明中附上了不同单位制 (包括实用单位制和法定计量单位制) 的公式。在实际解释时, 可按本书中所述方法绘制法定计量单位制的实测曲线, 用这套以英制标出的解释图版进行拟合, 得到各种拟合值, 然后用本书中所给出的公式进行计算, 得到法定计量单位制的各项参数。

为了照顾多种不同的需要, 本版又增写了几个附录: 附录1“符号及单位表”中列出了各参数在四种单位制的单位; 附录2“不同单位制下的试井解释常用公式”列出了68组(条) 常用公式在四种不同单位制的形式; 附录3“单位换算系数表”列出了长度、体(容)积、压力、温度、产量、密度和渗透率等物理量的几种常用不同单位的换算系数。希望这几个附录能给读者提供一个方便的工具。

附录4“公式的单位变换”是为满足一些对公式的单位变换 (俗称“倒公式”) 不很熟悉的同志的要求而写的。希望能用这简短的篇幅说清楚“倒单位”的具体做法以及这样做的理由, 使这些同志对“倒单位”不再感到棘手。

本书是在中国石油天然气总公司李天相副总经理的关怀、鼓励和支持下写成和出版的。

中国科学院技术科学部学部委员、中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院童宪章总工程师在本书的整个编写和修改过程中，给予了极大的关怀和支持，不仅对本书第一版和第二版的初稿和修改稿作了逐字逐句的审阅和校订，提出了许多宝贵的意见，改正了不少错误，而且亲自为本书写了序言。秦同洛教授和陈元千高级工程师也曾审阅本书第一版的初稿。在誊抄第一版书稿和清绘插图等工作中，曾得到南海西部石油公司开发部黄石追、江汉石油管理局勘探开发研究院高炳泉、余增援、高纯福、程永茂和杜山高等同志的大力帮助。本版的大部分插图是南海西部石油公司勘探开发科学研究院沈晓红同志帮助清绘的。石油工业出版社和试井界许多同志也对本书的编写和出版给予了很大的鼓励、支持和指导。在此谨向他们一并致以衷心的感谢。

由于理论水平和实践经验所限，本书可能有不少错误或不当之处，敬请方家读者指正。

刘能强

1991年2月于南海西部

石油公司勘探开发科学研究院

目 录

第一章 预备知识	(1)
§ 1 试井解释的理论基础	(2)
一、基本微分方程和压降公式	(2)
二、迭加原理	(4)
三、压力恢复公式	(5)
四、由压降曲线或压力恢复曲线求参数	(7)
五、变产量情形的处理	(8)
§ 2 一些重要的基本概念	(11)
一、无因次量	(11)
二、井筒储集常数	(14)
三、表皮效应与表皮系数	(16)
四、流动阶段及从每一流动阶段可以获得的信息	(17)
第二章 试井解释方法	(19)
§ 1 从系统分析看试井解释	(20)
§ 2 试井解释模型	(22)
§ 3 流动阶段的识别	(23)
一、早期阶段	(23)
(一) 井筒储集	(23)
(二) 无限导流性垂直裂缝切割井筒的情形	(25)
(三) 有限导流性垂直裂缝切割井筒的情形	(26)
二、无限作用径向流动阶段	(27)
三、外边界反映阶段 (晚期阶段)	(28)
(一) 恒压边界	(28)
(二) 不渗透边界	(29)
(三) 封闭系统	(34)
§ 4 识别油 (气) 藏类型的重要性	(36)
第三章 均质油藏的试井解释	(37)
§ 1 试井解释图版及图版拟合方法简介	(37)
一、Ramey (雷米) 图版及图版拟合方法	(37)
二、Earlougher (厄洛赫) 图版	(43)
三、McKinley (麦金利) 图版	(46)
§ 2 均质油藏中具有井筒储集和表皮效应的油井的压降分析	(49)
§ 3 均质油藏中具有井筒储集和表皮效应的油井的恢复分析	(57)
一、用压降解释图版进行恢复分析	(57)

二、恢复分析的步骤	(59)
三、压力恢复资料的校正处理	(63)
第四章 双重孔隙介质油藏的试井解释	(69)
§1 双重孔隙介质油藏的有关概念	(69)
§2 基岩向裂缝的流动为拟稳定流动模型	(71)
§3 基岩向裂缝的流动为不稳定流动模型	(81)
§4 几点重要的注释	(84)
第五章 均质油藏中垂直裂缝井的试井解释	(86)
§1 无限导流性垂直裂缝模型	(86)
一、模型的基本假定	(86)
二、模型的流动阶段	(86)
(一)线性流动阶段	(86)
(二)径向流动阶段	(87)
三、拟合分析	(88)
§2 有限导流性垂直裂缝模型	(93)
一、模型的基本假定	(93)
二、模型的流动阶段	(93)
(一)线性流动阶段	(93)
(二)拟径向流动阶段	(93)
第六章 用压力导数进行试井解释的方法	(98)
§1 均质油藏的压力导数解释方法	(98)
一、压降分析	(98)
二、恢复分析	(103)
三、复合图版的应用	(105)
§2 双重孔隙介质油藏的压力导数解释方法	(111)
一、介质间拟稳定流动模型	(111)
二、介质间不稳定流动模型	(113)
§3 均质油藏中垂直裂缝井的压力导数解释方法	(117)
第七章 双重渗透介质油藏的试井解释	(120)
§1 双重渗透介质油藏的有关概念	(120)
§2 双对数曲线的特性和解释图版	(121)
§3 解释方法	(123)
第八章 水平井试井解释	(129)
§1 水平井的压力变化特性	(129)
一、初始径向流动(垂直径向流动)阶段	(130)
二、拟径向流动阶段	(132)
三、水平井压力资料的半对数曲线分析	(134)
§2 压力导数和重整压力分析	(134)
一、压力解释图版拟合分析	(135)

二、压力导数分析	(135)
三、重整压力分析	(136)
§ 3 水平井试井解释步骤	(138)
§ 4 底水油藏水平井的试井解释	(143)
第九章 气井的现代试井解释方法	(150)
§ 1 拟压力的计算方法	(150)
§ 2 试井解释方法	(151)
一、Gringarten (格林加坦) 图版拟合分析	(152)
二、Bourdet (布德) 图版拟合分析	(154)
三、试井解释步骤	(156)
§ 3 拟压力的简化	(157)
第十章 井间干扰试井解释	(160)
§ 1 均质油层中干扰试验的极值点分析法	(160)
§ 2 均质油层干扰试井的图版拟合分析法	(162)
§ 3 双重孔隙介质油藏干扰试井的图版拟合分析法	(166)
一、介质间拟稳定流动模型	(166)
二、介质间不稳定流动模型	(167)
附录1 符号及单位表	(170)
附录2 不同单位制下的试井解释常用公式	(174)
附录3 单位换算系数表	(194)
附录4 公式的单位变换	(197)
参考文献	(199)

第一章 预 备 知 识

所谓“试井”，顾名思义，就是对油井、气井或水井进行测试。测试的内容包括产量、压力、温度和取样等等。试井是一种以渗流力学理论为基础，以各种测试仪表为手段，通过对油井、气井或水井生产动态的测试来研究油、气、水层和测试井的各种物理参数、生产能力，以及油、气、水层之间的连通关系的方法。

试井可分为产能试井 (Deliverability Test) 和不稳定试井 (Transient Test) 两大类。产能试井 (包括稳定试井和等时试井等) 是改变若干次油井、气井或水井的工作制度，测量在各个不同工作制度下的稳定产量及与之相对应的井底压力，从而确定测试井 (或测试层) 的产能方程 (Deliverability Equation) 和无阻流量 (Open Flow Potential 或 Absolute Open Flow Potential, 简称 OFP 或 AOF); 而不稳定试井则是改变测试井的产量，并测量由此而引起的井底压力随时间的变化。这种压力变化同测试过程中的产量有关，也同测试层和测试井的特性有关。因此，运用试井资料，即测试过程中的井底压力和产量资料，结合其他资料，可以测算测试层和测试井的许多特性参数，包括估算测试井的完井效率、井底污染情况，判断是否需要采取增产措施 (如酸化、压裂)、分析增产措施的效果，估算测试井的控制储量、地层参数、地层压力，以及探测测试井附近的油 (气) 层边界和井间连通情况等等。因此，试井成了油 (气) 田勘探开发过程中认识地层和油 (气) 井特性并确定油 (气) 层参数的不可缺少的重要手段。试井资料对于制订油 (气) 田开发方案、进行油 (气) 藏动态预测和检验等等，都有着非常重要的作用。值得特别指出的是：在我们所能取得的各种资料，如岩心分析、电测解释和试井等资料当中，只有试井资料才是在油 (气) 藏的动态条件下测得的，由此求得的参数能够较好地表征油 (气) 藏动态条件下的特性。正是因为这个原因，试井资料的解释和应用，已成为每个油藏工程师和有关科技人员所必备的基本知识和技能。

显然，试井资料的测取和运用是试井工作的两个重要组成部分。前者即现场测试，为的是取得足够的可靠的资料；后者即试井解释，要求通过分析测得的资料，得到尽可能多的关于地层和测试井的可靠信息。

最近十多年来，随着现代科学技术的飞速发展，特别是电子计算机的广泛使用和高精度电子压力计的研制成功和推广应用，试井技术有了新的重大突破，逐步形成了一整套“现代试井技术”。

所谓“现代试井技术”，主要包括下列 3 个方面的内容：

1. 用高精度测试仪表测取准确的试井资料；
2. 用现代试井解释方法解释试井资料，得到更可靠的解释结果；
3. 测试过程控制、资料解释和试井报告编制的计算机化。

在测试过程的控制方面，在测试现场，使用地面直读电子压力计测试时，可以用计算机处理资料、绘制各种图件，进行实时解释，以确保测试的圆满成功。

在资料解释方面，国内外都已研制成功许多试井解释软件，用计算机进行试井解释，并

用计算机绘制各种图件、编制各种数据表和试井报告。

本书将对其中的第二方面，即现代试井解释方法，作比较详细的介绍。

§1 试井解释的理论基础

试井解释建立在一整套理论之上，要涉及许多相当复杂的数学问题。这里仅对其理论基础作个简要的介绍。

一、基本微分方程和压降公式

单相弱可压缩且压缩系数为常数的液体在水平、等厚、各向同性的均质弹性孔隙介质中渗流，其压力变化服从如下偏微分方程（扩散方程）：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6K} \frac{\partial p}{\partial t}$$

或

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

设在无限大地层中有一口井。在这口井开井生产前，整个地层具有相同的压力 p_i ——在勘探初期，这就是原始地层压力。从某一时刻 $t=0$ 开始，这口井以恒定产量 q 生产。则容易列出如下定解条件：

$$\left. \begin{aligned} p(t=0) &= p_i \\ p(r=\infty) &= p_i \\ \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} &= \frac{q \mu B}{172.8 \pi K h} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $p = p(r, t)$ —— 距离井 r (m)处在 t (h)时刻的压力，MPa；

p_i —— 原始地层压力，MPa；

r —— 离井的距离，m；

t —— 从开井时刻起算的时间，h；

K —— 地层渗透率， μm^2 ；

h —— 地层厚度，m；

μ —— 流体粘度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

ϕ —— 地层孔隙度，无因次；

C_t —— 地层及其中流体的综合压缩系数， $(\text{MPa})^{-1}$ ，其定义为

$$C_t = C_r + C_o S_o + C_w S_w + C_g S_g$$

其中 C_r 、 C_o 、 C_w 和 C_g 分别为岩石、油、水和气的压缩系数， $(\text{MPa})^{-1}$ ， S_o 、 S_w 和 S_g 分别为地层的含油饱和度、含水饱和度和含气饱和度（无因次）。

r_w —— 井的半径，m；

q —— 井的地面产量， m^3/d ；

B —— 原油的体积系数，无因次；

$\eta = \frac{K}{\phi \mu C_t}$ —— 导压系数， $\mu\text{m}^2 \cdot \text{MPa} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

导压系数是一个表征地层和流体“传导压力”难易程度的物理量。假定一口井以某一固定产量 q 开井生产，在离这口井一定距离（譬如说1000米）的地方，压力因此而下降某一数值（譬如说 10^{-8} MPa）所需的时间，将因导压系数的不同而不同：导压系数越大，所需时间就越短；导压系数越小，所需时间就越长。

方程（1）在定解条件（2）下的解为

$$p = p(r, t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei}\left(-\frac{r^2}{14.4\eta t}\right) \right] \quad (3)$$

式中Ei是幂积分函数(Exponential Integral Function):

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

当 $x < 0.01$ 时，有

$$\text{Ei}(-x) \approx \ln x + 0.5772 \approx \ln(1.781x)$$

由（3）可得井底流动压力 $p_{wf}(t) = p(r_w, t)$ 为

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei}\left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta t}\right) + 2S \right] \quad (4)$$

式中附加了一项由于井壁阻力所引起的附加压力降 $\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \cdot 2S$ ，其中 S 为表皮系数，它的意义将在下一节详细介绍。

把（4）写成压差的形式，得

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) = \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei}\left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta t}\right) + 2S \right] \quad (5)$$

当 $\frac{r_w^2}{14.4\eta t} < 0.01$ 时（这个条件很容易满足），有

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[\ln \frac{8.085\eta t}{r_w^2} + 2S \right] \quad (6)$$

换成常用对数，得

$$\begin{aligned} p_{wf}(t) &= p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[2.303 \lg \frac{8.085\eta t}{r_w^2} + 2S \right] \\ &= p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{Kt}{\phi\mu C_i r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \\ &= -\frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg t + \left[p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \right. \\ &\quad \left. \times \left(\lg \frac{K}{\phi\mu C_i r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

或写成压差形式:

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg t + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{K}{\phi\mu C_i r_w^2} \right.$$

$$+ 0.9077 + 0.8686S) \quad (8)$$

式 (4)、(5) 或 (6)、(7)、(8) 可称为“压降公式”，因为它们描述的是测压力降落曲线过程中的井底压力变化。

二、迭加原理

应用迭加原理，可以得到多井情形和变产量情形的各种压力变化公式。

所谓“迭加原理”就是：如果某一线性微分方程的定解条件也是线性的，并且它们都可以分解成为若干部分，即分解成若干个定解问题，而这几个定解问题的微分方程和定解条件相应的线性组合，正好是原来的微分方程和定解条件，那末，这几个定解问题的解相应的线性组合就是原来的定解问题的解。举个最简单的例子：定解问题

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \\ y(t=0) = x \\ y(x=0) = -t \end{cases} \quad (9)$$

可以分解为以下两个定解问题，即

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial y_1}{\partial t} = 1 \\ y_1(t=0) = x \\ y_1(x=0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

和

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x} + \frac{\partial y_2}{\partial t} = -1 \\ y_2(t=0) = 0 \\ y_2(x=0) = -t \end{cases} \quad (11)$$

容易验证：定解问题 (10) 和 (11) 的微分方程的线性组合

$$\left(\frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial y_1}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial y_2}{\partial x} + \frac{\partial y_2}{\partial t} \right) = 1 + (-1) = 0$$

即

$$\frac{\partial(y_1 + y_2)}{\partial x} + \frac{\partial(y_1 + y_2)}{\partial t} = 0$$

和定解条件的同一线性组合

$$y_1(t=0) + y_2(t=0) = (y_1 + y_2)_{t=0} = x + 0 = x$$

$$y_1(x=0) + y_2(x=0) = (y_1 + y_2)_{x=0} = 0 - t = -t$$

恰与定解问题 (9) 完全一样。也很容易验证：

$$y_1 = x$$

和

$$y_2 = -t$$

分别是定解问题 (10) 和 (11) 的解。由迭加原理知

$$y = y_1 + y_2 = x - t$$

就是定解问题 (9) 的解。这一点在上面已经得到验证。

三、压力恢复公式

现在我们来讨论如何应用迭加原理导出压力恢复公式。假定油井A在以恒定产量 q (m^3/d) 生产 t_p (h) 后关井, 关井时间用 Δt (h) 表示 (图1之(1))。显然, 这时定解问题是

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p}{\partial (\Delta t)} \\ p(\Delta t = -t_p) = p_i \\ p(r = \infty) = p_i \\ \left(r \frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=r_w} = \begin{cases} \frac{q\mu B}{172.8\pi K h} & -t_p \leq \Delta t \leq 0 \\ 0 & \Delta t > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

我们设想:

1. 井A在关井后继续以恒定产量 q 一直生产下去 (即设想井A并不关井);

2. 有一口井B, 它与井A同井眼, 从井A关井的时刻开始, 以恒定的注入量 q 注入, 或以恒定产量 $-q$ 生产 (图1之(2))。

则从井A关井的时刻开始, 井A和井B的产量之代数和为 $q + (-q) = 0$, 即相当于关井。这就是说, 我们可以把定解问题 (12) 分解为下面两个定解问题:

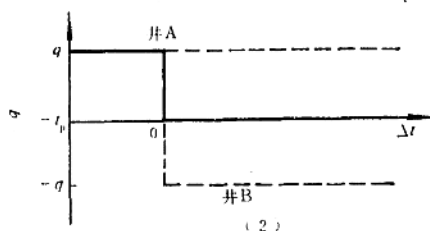
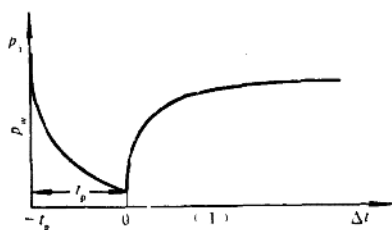


图1 迭加原理示意图

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p_1}{\partial (\Delta t)} \\ p_1(\Delta t = -t_p) = p_i \\ p_1(r = \infty) = p_i \quad \Delta t > -t_p \\ \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r=r_w} = \frac{q\mu B}{172.8\pi K h} \end{cases} \quad (13)$$

和

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_2}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p_2}{\partial (\Delta t)} \\ p_2(\Delta t = 0) = 0 \\ p_2(r = \infty) = 0 \quad \Delta t > 0 \\ \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r}\right)_{r=r_w} = -\frac{q\mu B}{172.8\pi K h} \end{cases} \quad (14)$$

由前述可知, 定解问题 (13) 的解为

$$p_1(\Delta t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left\{ -\text{Ei} \left[-\frac{r_w^2}{14.4\eta(t_p + \Delta t)} \right] \right\}$$

而定解问题 (14) 的解为

$$p_2(\Delta t) = -\frac{(-q)\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta\Delta t} \right) \right]$$

故定解问题 (12) 的解应为 (我们用 p_{ws} 表示井底关井压力):

$$\begin{aligned} p_{ws}(\Delta t) = p_1 + p_2 = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left\{ -\text{Ei} \left[-\frac{r_w^2}{14.4\eta(t_p + \Delta t)} \right] \right. \\ \left. + \text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta\Delta t} \right) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

或

$$\begin{aligned} \Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left\{ -\text{Ei} \left[-\frac{r_w^2}{14.4\eta(t_p + \Delta t)} \right] \right. \\ \left. + \text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta\Delta t} \right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

若用对数表达式近似表示Ei函数, 则有

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (17)$$

或

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (18)$$

式 (15)、(16) 或 (17)、(18) 就是“压力恢复公式”。(17) 和 (18) 又称为赫诺 (Horner) 公式。

由 (7) 有

$$p_{ws}(\Delta t = 0) = p_{wf}(t = t_p) = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{Kt_p}{\phi\mu C_i r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right)$$

式 (17) 与上式相减得:

$$\begin{aligned} p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(-\lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} + \lg \frac{Kt_p}{\phi\mu C_i r_w^2} \right. \\ \left. + 0.9077 + 0.8686S \right) \end{aligned}$$

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left[\lg \left(\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_i r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + \Delta t} \right) + 0.9077 + 0.8686S \right] \quad (19)$$

如果关井前生产时间 t_p 比最大关井时间 Δt_{max} 长得多, 即 $t_p \gg \Delta t_{max}$, 则

$$t_p + \Delta t \approx t_p$$

$$\frac{t_p + \Delta t}{t_p} \approx 1$$

此时有

$$\begin{aligned} p_{ws}(\Delta t) &\approx p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \left(\lg \frac{K \Delta t}{\phi \mu C_i r_w^2} + 0.9077 + 0.8686 S \right) \\ &= \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \lg \Delta t + \left[p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \left(\lg \frac{K}{\phi \mu C_i r_w^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 0.9077 + 0.8686 S \right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

有人称上式为简化的压力恢复公式。它在形式上与压降公式 (7) 非常相似, 均称为 Miller-Dyes-Hutchinson 公式, 简称作 MDH 公式。

四、由压降曲线或压力恢复曲线求参数

由式 (7)、(17) 和 (20) 可知, 在压降情形, $p_{wf}(t)$ 与 $\lg t$ 成一直线; 在恢复情形, $p_{ws}(\Delta t)$ 与 $\lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ 或 $\lg \Delta t$ ($t_p \gg \Delta t_{max}$ 时) 成一直线, 直线的斜率均为 $\frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh}$ 或 $-\frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh}$ 。为了方便起见, 我们用 m 表示斜率的绝对值, 即

$$m = \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \quad (21)$$

当我们画出压力降落曲线 ($p_{wf} - \lg t$ 曲线, 称为 MDH 曲线), 或压力恢复曲线 ($p_{ws} - \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ 曲线, 称为 Horner 曲线; 或在 $t_p \gg \Delta t_{max}$ 时, 画出 $p_{ws} - \lg \Delta t$ 曲线, 称为 MDH 曲线), 并量出其直线段的斜率, 就可以算出

$$\text{流动系数 } \frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} q B}{m} \quad (22)$$

$$\text{地层系数 } Kh = \left(\frac{Kh}{\mu} \right) \times \mu = \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{m} \quad (23)$$

$$\text{有效渗透率 } K = \left(\frac{Kh}{\mu} \right) \times \frac{\mu}{h} = \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{mh} \quad (24)$$

由式 (7) 还可知, 若在直线段 (或其延长线) 上取一点, 设其对应时间为 t_0 , 压力值为 $p_{wf}(t_0)$, 便可算出表皮系数:

$$S = 1.151 \left[\frac{p_i - p_{wf}(t_0)}{m} - \lg \frac{K t_0}{\phi \mu C_i r_w^2} - 0.9077 \right] \quad (25)$$

在压力恢复情形, 由 (19) 式可得:

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0) - p_{ws}(0)}{m} - \lg \left(\frac{K \Delta t_0}{\phi \mu C_i r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + \Delta t_0} \right) - 0.9077 \right] \quad (26)$$

如果 $t_p \gg \Delta t_0$, 则上式可简化为

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0) - p_{ws}(0)}{m} - \lg \frac{K \Delta t_0}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077 \right] \quad (27)$$

其中 Δt_0 亦为直线段或其延长线上任意一点, $p_{ws}(0) = p_{wf}(t_p)$ 。

为简便起见, 通常取 $t_0 = 1h$, $\Delta t_0 = 1h$, 式 (25)、(26) 和 (27) 分别写成:

$$S = 1.151 \left[\frac{p_i - p_{wf}(1h)}{m} - \lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077 \right] \quad (25')$$

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{ws}(1h) - p_{ws}(0)}{m} - \lg \left(\frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + 1} \right) - 0.9077 \right] \quad (26')$$

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{ws}(1h) - p_{ws}(0)}{m} - \lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077 \right] \quad (27')$$

上面各式中, $p_{wf}(1h)$ 和 $p_{ws}(1h)$ 必须在压降曲线和压力恢复曲线的直线段上或它们的延长线上取值。但必须指出: 并不是一定要取 $t_0 = 1h$, $\Delta t_0 = 1h$, 这样做只不过是使计算稍为简单而已。

由式 (17) 还可看出: 当关井时间 $\Delta t \rightarrow \infty$ 时, $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \rightarrow 1$, $\lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \rightarrow 0$, $p_{ws}(\Delta t) \rightarrow p_i$ 。

因此, 把直线段延长, 使它与 $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = 1$ 相交, 交点所对应的压力值就是 p_i 。在实际资料

解释中, 这一压力值称为外推压力, 用 p^* 表示。对尚未投入开发的油藏, 它就是原始地层压力; 而已投入开发的油藏, 则是油藏的视平均压力。

这一套方法称作“半对数曲线分析法”, 早已在我国各油田广泛使用。

除了计算流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$ 、地层系数 Kh 、有效渗透率 K 、表皮系数 S 和地层压力 p_i 之外,

试井资料还有许多用处, 我们将在以后的章节中予以介绍。

五、变产量情形的处理

上面讨论的压降曲线, 是在井以稳定产量生产的过程中测得的; 压力恢复曲线, 也是在井以稳定产量生产相当长时间之后关井期间测得的。实际上, 在许多情形, 产量是随时间变化的, 有时为了了一定的目的, 还要人为地改变井的产量, 如进行稳定试井就是这样。如果在整个生产期间, 产量只是略有波动, 则可取产量的平均值作为产量, 取实际生产时间作为生产时间进行解释; 如果在压力恢复情形, 整个生产阶段的产量不稳定, 但在关井前的一段时间, 产量比较稳定 (设为 $q \text{ m}^3/\text{d}$), 则可把这一稳定产量 q 作为整个生产期间的产量, 而取

$$t_p = \frac{24Q}{q}$$

为关井前的生产时间, 称为折算生产时间, 上式中 Q 是关井前整个生产阶段的累计产量 (m^3), 折算生产时间 t_p 的单位是 h 。

如果产量变化的幅度相当大, 则必须采用变产量, 通过迭加的方法进行处理。通常把变化的产量划分作若干个“台阶”, 即把生产过程分成若干个时间段, 在每一个时间段中, 产量变化不大, 近似地看作是个常数, 如图2之左图中, 把生产过程分作 n 个时间段, 在第 i 个时间段中产量为 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 即