

试井分析方法

〔美〕小罗伯特C. 厄洛赫著

石油工业出版社

86
TE353
7
5

美国石油工程师学会专论丛书

试井分析方法

〔美〕小罗伯特C.厄洛赫 著

康志安 吴玉树 胡征修 译

葛家理 译校



石油工业出版社

B184.855

内 容 提 要

本书系美国石油工程师学会专论丛书之一,它总结了近几年试井技术的现状和试井分析方法的最新进展,为广大读者提供了比较系统的参考资料。本书理论阐述简练,没有繁杂的推导,着重从概念上搞清各分析方法以及确定其适用范围,并以实际例证进行具体分析,有助于读者更好地掌握本书内容。

本书内容包括:不稳定试井分析、压力降试井、压力恢复试井以及注入井试井等各种试井方法及分析。同时还介绍了油藏非均质性和井筒条件等对压力动态的影响,以及电势在试井中的应用、试井设计和应用等内容。书后还有大量附录。

本书可供从事油藏工程各专业的技术人员及各有关院校师生参考。

ROBERT C. EARLOUGH, JR.

ADVANCES IN WELL TEST ANALYSIS

HENRY L. DOHERTY MEMORIAL FUND OF AIME

Society of Petroleum Engineers of AIME

New York 1977 Dallas

美国石油工程师学会专论丛书

试井分析方法

[美] 小罗伯特C.厄洛格著

秦志安 吴玉树 胡祖修译

葛家理 译校

石油工业出版社出版

(北京宣武门外大街石印厂3号)

轻工业出版社印刷厂印刷

北京通县张家湾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 17¹/₄印张 24插页 435千字 印1—1,950

1985年10月北京第1版 1985年10月北京第1次印刷

书号: 15037·2506 定价: 3.75元

前 言

大约截止到1973年，试井分析方面的进展很快，新发表的著作非常多，足以说明对C. S.马修斯和D. G.拉赛尔的专著《压力恢复和流动试井》进行某种方式的修改和更新是必要的。

专著委员会要我写一本材料充分且具有自己特色的最新专著，而不仅仅对马修斯——拉赛尔著作做些补充和修正。虽然，这本书在《油层压力恢复和油气井测试》中引用了大量资料，我相信可以利用它来分析大多数试井情况，而不再要其它材料。

在六十年代中期，当马修斯和拉赛尔写作的时候，油藏模拟，特别是油藏模拟在试井中的应用还处于萌芽阶段。后来，试井知识有一个重大发展，这个发展主要是由于应用油藏模拟的结果。出版本专著并不意味着有试井技术不再继续进展的看法，这个进展肯定要继续下去。希望今后在一定时间间隔内都将有适应新的要求的试井专著。

本书的宗旨既要有广泛性又带有综合概括性，很难对它给予既全面又简要的说明。我力求提出一个有效而实用的材料范围，而不去做内容十分广泛的论述，因此，有许多地方是采取了综合处理（它要求几倍于现在的篇幅）方法。

为了提供切实可行的处理方法，有时要放弃并非总是可以做到的技术上的高精度。许多现行的测试和分析技术仅仅注明了资料的出处，另外一些只发表了方法的实质而没有考虑次要的限制条件和特殊条件。在编写本书时，我不仅对于某一具体技术的精确度和有效性做了许多鉴定，而且也对这些技术对工程师的实用价值做了评价工作。

总之，我力图提供能便于解决实际问题的资料，本书的许多

部分给出了各种分析适用范围的准则。一组用于所有形式试井的术语表。指出了各种不同试井之间的内在联系和次要区别，我把一个比较表归纳在附录Ⅱ中，它对经常使用的人是很有用处的。

本专著不是写成一本教科书或提供理论的背景，这里没有介绍公式的推导，虽然也指出了某些方程式的推导途径。读者可以由所引用的原始材料去找推导过程。

做出来的实例是本书一个重要部分——包括有五十多个实例用来阐明本书所提出来的各种试井分析技术，并用来强调常常在试井分析工作中出现的实际问题。

相信大多数读者会发现这本书在编排组织上是有逻辑性的。同时可以发现它能方便地用来解决实际问题。尽管如此，还会出现很多在本书中找不到解答的情况。这就是希望所涉及的题目在下一卷中包括有新的答案。

小罗伯特C.厄洛赫

1976年2月

目 录

第一章	引论	(1)
1.1	目的	(1)
1.2	不稳定试井方法在油藏工程中的应用	(2)
1.3	内容安排, 范围和目的	(3)
1.4	专业术语和单位	(5)
第二章	不稳定试井分析原理	(7)
2.1	引言	(7)
2.2	流体流动基本方程	(7)
2.3	流动方程的无量纲形式解	(8)
2.4	无限大地层中流动的无量纲压力	(13)
2.5	井筒污染和改善的效果	(17)
2.6	井筒储集效应	(23)
2.7	拟稳态流动期间无量纲压力特征	(31)
2.8	稳定流动	(35)
2.9	迭加原理	(36)
2.10	流动方程在气藏中的应用	(44)
2.11	流动方程在多相流中的应用	(46)
2.12	供油半径和稳定时间	(47)
2.13	扩散方程的数值解	(49)
2.14	小结——物理基础	(50)
第三章	压力降试井	(56)
3.1	引言	(56)
3.2	无限大地层中压力降试井分析	(57)
3.3	压力降试井分析——典型曲线拟合法	(61)
3.4	已开发油藏中的压力降试井	(70)
3.5	油藏探边测试	(76)
3.6	影响压力降试井的因素	(79)

第四章	多级流量试井	(81)
4.1	引言	(81)
4.2	多级流量试井分析的一般方法	(81)
4.3	两级流量试井	(88)
4.4	短时关井后的压力降试井	(98)
4.5	油藏开发的影响	(100)
4.6	定压流量测试	(103)
4.7	变流量油藏探边测试	(109)
4.8	油井产能测试	(112)
4.9	多级流量试井的影响因素	(117)
第五章	压力恢复试井	(120)
5.1	引言	(120)
5.2	无限大地层压力恢复试井分析	(121)
5.3	有界油藏和已开发油藏中压力恢复试井分析	(130)
5.4	试井前流量变化的压力恢复试井分析	(148)
5.5	分析方法选择	(151)
5.6	压力恢复试井的影响因素	(153)
第六章	平均地层压力计算	(157)
6.1	引言	(157)
6.2	供油体积计算	(158)
6.3	供油区平均压力计算	(160)
6.4	水驱油藏	(172)
6.5	平均地层压力计算的影响因素	(182)
第七章	注入井试井	(185)
7.1	引言	(185)
7.2	只含液体, 流度比为 1 的油藏中注入能力试井分析	(186)
7.3	只含液体, 流度比为 1 的油藏中压力降试井分析	(193)
7.4	平均地层压力和井间压力	(203)
7.5	复合地层试井——流度比不为 1 情况	(206)
7.6	注入井压力降试井分析的实用方法	(215)
7.7	逐次稳态分析	(217)
7.8	阶梯式流量注入试井	(220)

第八章 地层测试器试井	(226)
8.1 引言	(226)
8.2 地层测试器试井方法及其工具	(228)
8.3 DST 试井压力数据的分析	(233)
8.4 地层测试器试井压力卡片故障检查	(255)
8.5 电缆式地层测试装置	(258)
第九章 多井试井	(261)
9.1 引言	(261)
9.2 干扰试井分析	(264)
9.3 脉冲试井	(279)
9.4 地层非均质和各向异性油藏	(293)
第十章 油藏非均质性对压力动态的影响	(303)
10.1 引言	(303)
10.2 直线状的不连续——断层或屏障	(305)
10.3 渗透性的各向异性	(313)
10.4 复合系统	(316)
10.5 多层油藏系统	(318)
10.6 天然裂缝油藏	(325)
10.7 压力对岩石性质的影响	(330)
10.8 垂直方向渗透率的测试	(334)
10.9 小结	(361)
第十一章 井筒条件对压力动态的影响	(366)
11.1 引言	(366)
11.2 井筒储集能力的变化	(366)
11.3 压裂井的试井	(377)
11.4 地层局部钻开和局部完井	(394)
第十二章 电子计算机在试井中的应用	(400)
12.1 引言	(400)
12.2 计算机试井分析方法	(401)
12.3 用计算机进行试井设计	(409)
12.4 油藏模拟	(410)
第十三章 试井设计和仪器	(415)

13.1	引言	(415)
13.2	试井类型的选择	(416)
13.3	设计计算	(418)
13.4	试井数据和操作方面的要求	(428)
13.5	压力计	(430)
13.6	流量的测量	(444)
附录A	单位制和换算	(448)
A.1	引言	(448)
A.2	国际 (SI) 单位制	(448)
A.3	常数和换算系数	(449)
附录B	利用迭加原理求无量纲压力	(458)
B.1	引言	(458)
B.2	所用的无量纲压力	(458)
B.3	不流动和常压边界的构造	(458)
B.4	利用镜像法构造多边界和封闭地层系统	(461)
B.5	正方形供油地层系统的迭加问题	(463)
B.6	反迭加原理	(465)
B.7	变流量条件下的迭加	(467)
附录C	无量纲压力解	(471)
C.1	引言	(471)
C.2	无限大地层	(471)
C.3	封闭地层系统	(475)
C.4	常压供给地层	(490)
附录D	岩石和流体性质的一些关系	(493)
D.1	引言	(493)
D.2	PVT性质 (高压物性)	(493)
D.3	岩石孔隙体积的压缩性	(498)
D.4	原油的压缩性	(501)
D.5	水的压缩性	(505)
D.6	天然气的压缩性	(506)
D.7	天然气的粘度	(510)
D.8	原油的粘度	(514)

D.9 水的粘度	(516)
附录E 试井分析方法综述	(519)
E.1 引言	(519)
E.2 压力恢复曲线的形状	(519)
E.3 试井分析的一些方程	(520)
名词注释	(525)

第一章 引 论

1.1 目 的

一九六七年，马修斯 (Matthews) 与拉赛尔 (Russell) 发表了第一部完整和系统地论述试井与试井分析的专著^{[1]①}。此后，这本专著便成为许多石油工程师们的标准参考书。自从马修斯和拉赛尔的专著问世以来，又发表过 150 多篇关于试井分析方法的论文。这些论文扩大了试井分析的范围，提出许多以前尚未得到的解，而且不同程度地改进了试井分析方法。因此有必要提供一部更新的专著来总结最近的试井技术状况，探讨一下在试井分析方面所取得的进展。

本书提供了足够的资料，可以单独使用，而不是仅作为马修斯和拉赛尔专著的补充。马修斯和拉赛尔已经论述过试井应用的历史状况及流体流动的理论基础，并推导了大量用于试井分析的方程。因此，本书对这些内容不详加讨论，但采用更严格的解释。由于详细了解试井分析方程的数学推导对于正确的工程应用并不必要，因此，本书中理论部分很简要，推导部分也很少。不过为了在工程中正确的应用，了解所用的试井方法的物理意义常常是必要的。本书目的之一就是从概念上搞清楚各种分析方法，以及确定它们的适用范围。对于大多数分析方法书中都给出例题进行说明。

① 见中译本《油层压力恢复和油气井测试》，石油工业出版社，1983年出版。

1.2 不稳定试井方法在油藏工程中的应用

在油藏工程中的许多方面，可靠的地下油藏资料都是很重要的。为了准确分析油藏动态和预测各种开采方式下的生产趋势，油藏工程师必须掌握大量的油藏资料。采油工程师也要了解生产井和注入井生产条件才能在油藏最佳动态情况下进行开采。这些所需资料大部分可以通过不稳定试井得到。

不稳定试井方法，例如压力恢复，压降，注入能力测试，注入井压降测试和干扰试井等都是油藏工程和采油工程的一个重要方面。正如本书所述，不稳定压力试井包括在井底造成压力改变和测量这种压力改变随时间的变化，然后估算出岩石、流体和井的特性参数。从不稳定试井获得的实际资料包括井筒体积，井底污染和改善，地层压力，渗透率，孔隙度，储量，油藏和流体的非均质性和其它有关数据。所有这些资料都有助于用来分析，改进和预测油藏动态。

对不稳定试井和分析的作用估计过高或过低都是不正确的。不稳定试井方法是一种很重要的识别工具，在一些情况下对正确分析油井和油藏动态是不可缺少的。例如：在确定井底附近和井间地层条件中，会不同于用稳定状态的采油指数所表示的综合特征。在另外一些情况下，解决某一具体问题或许只需要用一种简单方法，或其它的方法，也可能需要把几种方法综合起来才行。

如果我们考虑一口产量不断递减的抽油井，在还没有确定是否只是由于抽油泵磨损，或工作液面高度，或其它一些机械的原因引起的之前，进行压力恢复试井是不合适的。如果用简单方法判别不了，而产量递减的原因是由于井底或近井区地层层面污染而不是由于油藏迅速衰竭，这时必须采用压力恢复试井方法才能

判别。

另一方面，即使对不稳定试井资料分析得很准确，如果不结合其它资料，常常得不出唯一的结果。干扰试井或脉冲试井可以判断油藏中可能存在的直裂缝及其方位。不过要判断定向渗透率和裂缝的方向性，或估计裂缝是人工裂缝还是天然，还要用到其它一些资料（例如，压力剖面观测图，生产测井曲线，油层增产措施历史记录，生产井开采试验，井下声波电视观测图模印派克测试，岩心描述和其它关于油层岩性和分布的地质资料）。

实际上，不稳定试井方法在工程应用中常常受到下述限制：

1. 资料收集不充分；2. 使用的分析方法不合适；3. 没能收集其它一些可用或备用资料。大多数矿场工程师都知道，有些情况由于缺少早期精确的压力和产量数据，或者缺少上述进行比较的资料，无法进行确切的分析。

在生产井完井后时间较短或注入井适当地注入一段时间之后，进行基础的压力不稳定试井一般比较好。这样，有许多问题可以及早地发现和进行补救，其中唯一最明显的问题是不适当的增产措施。这种试井也可以为油藏模拟提供地下数据，以及当油藏或生产井发生问题时提供对比的依据。

1.3 内容安排，范围和目的

本专著是为了使石油工程师能够设计、实施和分析不稳定试井，以得到有关油藏和油井条件的可靠资料。每一章尽可能作为独立的单元。第一章中简略地讨论了单位换算系数和公制单位制(SI)。附录A中给出一个换算系数表，并且对一些较重要的方程，分别给出实用的矿场单位，地下水单位和三种公制单位系列的表达式。

第二章总结了流体不稳定渗流特征，为本书中各种不稳定试井分析方法提供理论基础。为了使读者能够推导一些试井分析方

法和预测油田不稳定动态，本书的内容安排尽量实用。由于近年来试井的进展已经改进了许多老的分析方法，我们试图收集和提供当前工程中应用最普遍的方法。许多研究工作本身并不适用于判别或核对其它工作的可靠性，不一定适用于直接在现场应用。另外一些研究尽管可能复杂，但却可以给出一些计算油藏重要参数的计算方法。如果使用简单方法能够得到误差很小的结果，则优先考虑采用简单方法。不过即使读者未完全理解第二章的内容，也可以使用本专著中的试井分析方法。附录B中提供了如何使用迭加原理求得新解的详细理论推导过程，这对某些读者或许是有用的。附录C中给出了不同几何形状和边界条件的无量纲形式解。

第三章及以后各章都根据第二章的渗流理论讨论基本试井方法和分析方法，但各章内容相互独立。本书主要是为矿场工程师们编写的，因此作了一些努力来确定各种解或分析方法的适用范围。第三章讨论压降试井方法，这在理论上是一种最简单的不稳定试井方法。第三章中引入了典型曲线拟合法，这对油藏工程来说还是一种比较新的试井分析方法。当其它简单分析方法失效时，工程师们可以使用一些更完善的解（如考虑井筒储集效应，深度压裂或复杂边界条件的解）来进行典型曲线拟合。

第四章包括变流量试井问题，讨论了当流量变化时，迭加原理如何使用。第五章讨论压力恢复试井分析。第六章给出计算生产井供油面积内和整个油藏的平均压力的方法。第七章探讨了注入井试井问题，这种试井方法日益重要。第八章讨论地层测试器试井分析问题。

第九章提供了多井不稳定试井方法。第十章讨论了油层非均质性对压力动态的影响。第十一章更详细地讨论井筒储集效应和压裂裂缝对不稳定压力动态的影响。第十二章简单讨论了计算机方法的应用。第十三章讨论了怎样作不稳定试井设计和仪器的选用。

附录D中提供了计算油层岩石和流体性质参数的方法和关系式。附录E对试井分析方程作了总结。

1.4 专业术语和单位

本书中尽量采用美国矿冶工程师学会 (AIME) ——石油工程师学会 (SPE) 规定的标准符号^[2~4]。在方程中全部使用“油矿单位”，流量 q 的单位为标准桶/天；渗透率 k 为毫达西；时间 t 为小时；粘度 μ 为厘泊；压缩系数 c 为体积/体积/磅/英寸²；孔隙度 ϕ 用小数表示。单位都在术语表中列出。有些地方也使用一些和其它工业一致的单位，但都给予注明。

本书中，正流量 $q > 0$ ，表示开采；而负流量 $q < 0$ ，表示注入。改变符号是为了使各种资料曲线斜率的符号正确。因此，书中的一些方程与有关文献中常见的形式略有不同。不过这正是实际进行不稳定试井分析所采用的方法。

我们希望在工程界最终将全部采用公制单位。为此，附录A中给出了重量和测量的SI单位的定义，以及提供了把传统单位换算成SI单位的换算系数。SI表示国际单位制 (les Systéme International d'Unités)，是通用语言 (in all Languages) 的正式缩写形式。国际单位制既不是厘米-克-秒制(cgs)，也不是米-公斤-秒制(mks)，而是一种现代化的改进了的mks制。在文献(5)中，胡普金 (Hopkins) 完整地描述了SI单位制。美国石油工程师学会也提出一套石油工业中应用的公制标准^[6]。大多数国家都倾向于只使用SI单位制、因此在附录A的换算表中，把SI单位总放在前面。

表A1，表A2中提供了SI单位制的基本单位、名称和符号表达等。表A3给出了石油工程中使用的物理常数值。表A4中给出一般换算系数。表A5中给出渗透率的单位换算系数。表A6中提供了各种温度标度及其换算关系式。。表A7对试井中使用的五

种单位制的单位和方程作了比较。本书中其它章节都仅使用油矿单位。

在本书中，虽然有些地方使用流度 (k/μ) 或流度与厚度的乘积 (kh/μ) 更合适一些，但我们还是只用渗流率 (k) 这个术语进行说明，因为渗透率是表示岩石的性质，而不是岩石与流体的综合性质。即使做了这个规定，也应知道在渗流和不稳定试井分析方程中，流度和厚度乘积总是作为一个量出现的。同样，孔隙度 (ϕ) 也是如此使用，而不使用孔隙度与厚度的乘积 (ϕh)，或孔隙度、压缩系数与厚度的乘积 ($\phi c_i h$)。

参 考 文 献

1. Matthews, C. S and Russell, D. G., *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas (1967) 1.
2. "Letter Symbols for Petroleum Reservoir Engineering, Natural Gas Engineering, and Well Logging Quantities." Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas (1965).
3. "Supplements to Letter Symbols and Computer Symbols for Petroleum Reservoir Engineering, Natural Gas Engineering, and Well Logging Quantities," Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas (1972).
4. "Supplements to Letter Symbols and Computer Symbols for Petroleum Reservoir Engineering, Natural Gas Engineering, and Well Logging Quantities." Society of Petroleum Engineering of AIME, Dallas (1975).
5. Hopkins, Roben A., *The International (SI) Metric System and How It works*, Polymetric Services, Inc., Tarzang Calif (1974).
6. "Conversion of Operational and Process Measurement Unit to the Metric (SI) System," *Manual of Petroleum Measurement Standards*, Pub. API 2564, American Petroleum Institute (March 1974) Chap. 15, Sec. 2.

第二章 不稳定试井分析原理

2.1 引言

本章总结了本书中提出的有关试井及其分析方法的不稳定渗流理论。理解本章内容有助于掌握后面章节中提出的试井分析方法，也可以启发读者自己去推导一些新的分析方法。但是，即使没有完全阅读和理解本章的内容，也可以使用第三章到第十一章中的方法。

本章概括地论述了全书中所需的全部基本理论。我们既没有推导基本渗流方程，也没有指明如何求解这些方程，而是利用表达不稳定压力特征的通用方程，给出特定条件下的无量纲形式解。本章和附录C中提供了一些重要的无量纲形式解，同时也指出有关的参考文献。无量纲压力方法是一种可以使用各种单位制计算压力特征和进行不稳定试井分析的方法。

本章中有几节考虑了续流效应、井筒污染及改善等因素，因为这些因素对生产井不稳定动态特征有很大影响。建议读者认真读一下这几节的内容，即使对其余几节浏览一下也可以。第十一章还要进一步讨论这两个因素的影响。

2.2 流体流动基本方程

流体在多孔介质中流动的微分方程，即扩散方程，是物质守恒定律，状态方程和达西定律^[1~4]的结合。如果用极坐标表示，扩散方程为，

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{0.0002637} \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.1)$$