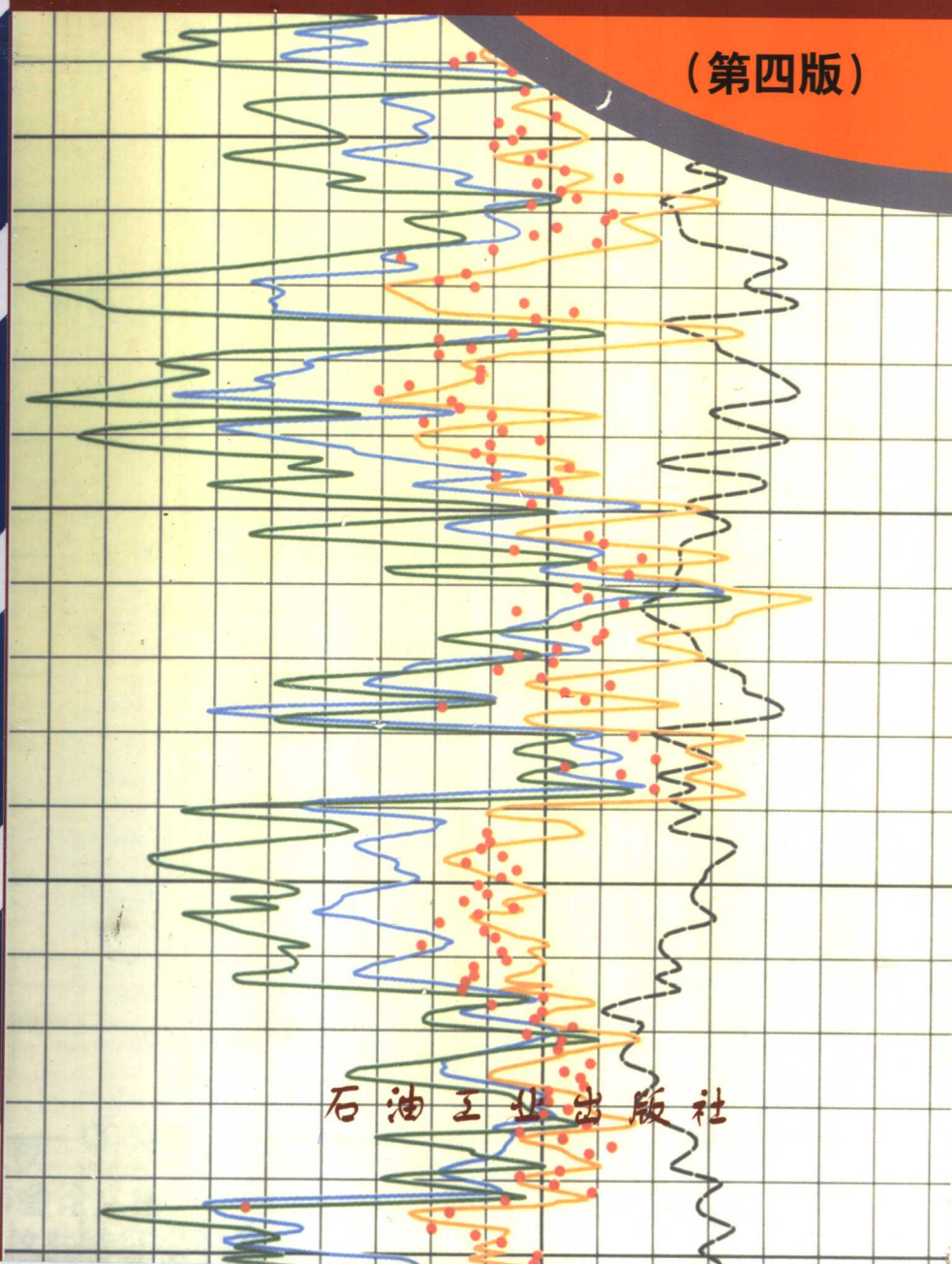


刘能强 编著 庄惠农 审校

实用现代试井 解释方法

(第四版)



石油工业出版社

实用现代试井解释方法

(第四版)

刘能强 编著
庄惠农 审校

石油工业出版社

内 容 提 要

应用压力和压力导数解释图版进行拟合分析并结合“常规试井解释”的现代试井解释方法,已经成了当今世界新的常规试井解释方法。本书系统地介绍了现代试井解释方法,以及运用这种技术对均质油藏、双重介质油藏各种井(包括垂直裂缝井、水平井等)的试井资料以及井间干扰试井资料进行解释的方法,并对试井解释软件的有关问题进行了阐述。本书为第四版,对第三版的内容和结构作了很大调整,增加了一些内容和我国油田的若干实例,使本书更贴近于实际,更易于学习掌握。

本书实用性强,可供油藏地质、油藏工程、油田开发等专业的工程技术人员参考,也可作为试井技术人员,特别是试井解释人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

实用现代试井解释方法/刘能强编著. —4版
北京:石油工业出版社, 2003.6
ISBN 7-5021-4219-3
I. 实…
II. 刘…
III. 试井—解释—方法
IV. TE353
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 027250 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)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 349 千字 印 1—2000
2003 年 6 月北京第 1 版 2003 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-4219-3/TE·2968
定价: 38.00 元

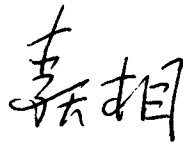
第四版序言

刘能强同志的著作《实用现代试井解释方法（第四版）》出版了。在石油工业出版社出版的石油科技图书中，一再修订再版，出到第四版的图书并不多见，足见这部著作比较适用，符合需要。事实上正是刘能强同志这部著作和姚振年、庄惠农、高锡五、陈元千等同志的几部著作和论文，以及胡湘炯教授和其他几位教授、现场专家的工作为高精度试井在石油勘探开发领域的扩大应用做出了贡献。

刘能强同志，毕业于中山大学数学系，基础科学功力比较扎实，多年在江汉油田地质研究院工作，有较丰富的现场实际工作经验。1981年通过国家教委主持的出国留学生考试，应聘于法国弗洛彼托公司（现为斯伦贝谢公司的试井作业部门），先接受该公司的试井技术培训，随即被派往欧洲北海各油田担任试井作业及试井解释工作。1984年回国，继续在江汉油田工作，后被调往中国海洋石油总公司南海西部公司继续从事试井等工作，并且参加过多个油田的试井解释工作，积累了丰富经验。我国石油界从事试井工作的专家中，拥有著名大学数学力学系和数学系毕业学历的还有好几位，但是在国内外的油田都做过实际试井作业和解释工作的，可能他还是第一位。

刘能强同志这部著作的初稿是他在原石油工业部开发司举办的试井培训班讲课的讲义，以后几经修改后成书，于1987年由石油工业出版社出版，是为本书的第一版。由于销售迅速，石油工业出版社又邀请刘能强同志两次修订，出了第二版和第三版。这部第四版，作者对书的结构又做了较大的调整，内容也做了一些补充，主要是增加了不少我国的试井解释实例，便于读者更加贴近我国的油气田实际。这部著作也有助于从事石油勘探工程和开发采油工作的同志了解试井可以解决的问题及其限度。

我国石油界的前辈专家，中国科学院院士童宪章先生生前对刘能强同志的工作倍加爱护，曾经逐字逐句审阅本书的第一版书稿，对一些提法，单个的用词，单个的字，以至标点、符号，做了多处“存疑”，一一列成表，交给作者推敲，帮助作者提高了出书质量。童老先生还为本书第一、二、三版做序。如今本书第四版出书，童宪章先生已溘然长逝，本书作者和为本书第四版写推荐出版意见的两位试井专家，北京石油勘探开发研究院廊坊分院的庄惠农同志和华北油田研究院的朱亚东同志深刻怀念童老先生的严谨治学态度和高度认真的精神，他们的心意是以此书第四版的出版再次表示对童老先生由衷的敬意。



李天相 谨识

2002年1月

编著者的话

1982~1984年,我作为访问学者赴法国斯伦贝谢公司(Schlumberger)专营试井技术服务的弗洛彼托公司(Flopetrol Technique Services)^①进修试井技术,1983年底至1994年初参加了该公司的试井解释培训班。斯伦贝谢—弗洛彼托公司的试井技术在全球享有盛誉,现代试井解释方法的最主要代表人物格林加登(Gringarten)和布德(Bourdet)等就是该公司试井解释中心的专家,他们所创造的试井解释图版,即格林加登图版和布德图版,以及该公司所首创的电子压力计等,均已在全世界石油工业中普遍使用。所以该公司的水平确实代表了当代世界的最先进水平。1987年出版的本书第一版,就是根据我在该公司的试井解释培训班所学习的内容以及后来所发表的一些新成果,结合自己从事试井工作几十年的一些心得体会编写而成的。编写的目的,是向我国试井界介绍主要由弗洛彼托公司所创立、在世界上广泛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。令我感到非常欣慰的是,在原石油部和中国石油天然气集团公司有关领导和全国试井界同仁的共同努力下,这一目的可说是已经达到了。由于原石油部和中国石油天然气集团公司有关领导、全国试井界的老前辈和朋友们的热情鼓励 and 大力支持,本书于1992年出版了第二版,1996年出版了第三版,现在又出版第四版。

运用本书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。现在,计算机已经普及,试井解释软件也已如雨后春笋般涌现出来,各个油田的试井解释人员都在熟练地使用计算机进行试井解释。但本书的基本“立足点”,却仍是用手工进行解释。这是因为,如我在第十章中所说,现在的试井解释软件,基本上都是在计算机上重演手工操作。操作者首先学会用手工进行解释,对于透彻地理解程序、指令和操作步骤,自如地用计算机做出最佳解释,会有很好的作用。当年弗洛彼托公司的试井解释培训班的第一阶段,我们学员一律不准使用计算机,全部用手工解释。经过这一阶段的实践,对解释的理论、方法以及手工操作的具体步骤等都有了较深刻的了解,然后进入第二阶段,则一律使用计算机进行解释。我从实践中体会到,这种做法确实是很有道理、很有好处的,建议初学者也能这样做。用手工进行解释,需要可供实际拟合使用的试井解释图版。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)包含了本书所介绍的部分解释图版,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,得到各项参数在法定计量单位制下的数值。

本书第四版对第三版的内容和章节安排作了较大的修订。前三版的试井解释部分(即原第三章至第六章)均按方法的发展史为序,先介绍压力解释图版及其拟合分析方法,以及在均质、非均质油藏的应用,然后再介绍压力导数解释图版拟合分析方法及其应用,最后介绍

^① 弗洛彼托公司(Flopetrol Technique Services),旧译“佛罗石油技术服务公司”,现为斯伦贝谢公司的试井作业部门。

这两种图版的结合（复合图版）及其应用。但是，如今各油田均已广泛使用复合图版拟合分析方法。所以，第四版将这部分修改为：原第三版第六章的基本内容移入第三章，即在介绍了压力解释图版及其拟合分析方法之后，立即介绍压力导数图版和复合图版拟合分析方法。然后在第四、五、六、七章（原第四、五、七、八章）叙述各种情形的解释方法时，均将两种图版以及复合图版的应用“一气呵成”，让复合图版的应用“一步到位”。这样安排，更贴近现场使用的实际，更便于学习和掌握，特别是在同时学习试井解释软件和本书时，容易互相对照。

本书第二、第三版的第八章“水平井试井解释”中，介绍了相关的相当繁难而复杂的理论、公式、图版和分析方法。考虑到这部分内容并不实用，而且全国各油田所使用的水平井试井解释软件，均采用与直井类似的解释方法，所以在修订本版时，对“水平井试井解释”（第七章）作了较大修改：删除了不实用的内容，对“重整压力（Normalized Pressure）分析方法”仅作了非常简单的介绍，而只着重介绍与直井类似的解释方法。

此外，本版还增补了我国油田的若干实例，补充了斯伦贝谢公司新培训教材中的某些内容。本版中的例子除例 3-1 和例 4-1 是假想的之外，所有的例子均是我国油气田的实例，其中例 4-2、5-1、5-2 和例 8-3 引自文献 [4]，其余实例（例 3-5、3-6、3-7、6-1、7-1、8-1 和例 8-2 等）均为本人所解释。

为了照顾多种不同的需要，本版仍保留了几个附录。其中附录 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单位之间的换算系数。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“倒公式”的具体做法以及这样做的理由（但未介绍其理论推导），使这些同志对“倒公式”不再感到棘手。

在本书出版第四版之际，回顾 20 年来的工作和本书编写、出版和再版的历程，我要特别感谢原石油工业部副部长李天相先生，原中国科学院院士、我国石油界的老前辈、老专家童宪章先生，原石油科学研究院院长秦同洛教授、陈元千教授、庄惠农教授、朱亚东教授、韩永新博士以及其他许多同志。

李天相副部长对试井工作十分关心，十分重视。他以一个战略家的慧眼和胆识，狠抓了试井工作，使我国的试井技术从 20 世纪 80 年代以来突飞猛进，迅速赶上了世界先进水平。在我出国进修期间，他曾专门作过指示，要我特别注意学习现代试井解释方法，并在遵守外国公司保密规定的前提下，尽可能多收集一些有关资料。我学完回国之后，又是他鼓励和支持我，将为原石油部开发司举办的试井培训班编写的讲义“现代试井解释方法”修订成书出版，这就是本书的第一版。在本书第二、第三版修订出版过程中，也得到了他很多的关怀、鼓励和帮助，使本书的整个质量得以提高。在本书出版之际，他又欣然命笔为之作序。

童宪章总工程师生前对后一辈石油科技工作者非常关怀，对试井工作者尤为爱护，对我也是如此。我赴弗洛彼托公司进修期间，曾多次将碰到的问题写信向童老先生请教，他每次都抽出时间回信给予指点和鼓励。回国后，童老先生鼓励和指导我编撰了一本《英汉试井新词词典》，并亲自审定新词的中文译名，对一些我无法确定准确中文译名的新词，他与秦同洛教授一起商量确定了其译名。在他们的帮助下，这本《英汉试井新词词典》终于顺利编成，成为全国试井技术人员阅读试井英文文献的有用工具。童老先生和秦同洛教授也鼓励和支持我将在国外所学到的现代试井解释方法编写成本书。童老先生并应我的请求亲自审校本书第一、二、三版书稿，并为各版撰写了序言。他怀着对后一辈科技工作者的无限关怀，以

高度负责的工作态度，对本书第一版书稿逐字逐句审阅，连一个标点也不放过，然后用工工整整的笔迹，在热情肯定该书的价值和优点的同时，造表列出了 30 多处可能的错误或不当之处，或提出具体的修改意见，或要我再仔细推敲斟酌。童老先生的负责精神和严谨态度，使本书减少了错误，提高了质量，也使我深受感动和教育。本书的第二、第三版，也是由他认真审校的。如今本书出版第四版，童老先生却已永远离开了我们。但他那热爱祖国石油事业，尤其是高度重视试井工作，并倾毕生精力为之奋斗的精神，他那严谨的治学态度，他那诲人不倦、循循善诱的长者风范，以及他那平易近人、和蔼可亲的音容笑貌，将永远留在我们的心中，并将激励后一代试井工作者继续为发展我国试井事业而努力奋斗。现仅以第四版的《现代试井解释方法》，再次表达我对童老先生深深的敬意和怀念之情，以及报答他给予我的教诲和培育。

陈元千教授也曾审阅本书第一版的初稿。庄惠农教授、朱亚东教授和韩永新博士在本版的修订和审定过程中给予了大力支持和帮助。本版由庄惠农教授审校，他逐字逐句审阅了书稿，审查了每一张插图，提出了很多很中肯的修改意见，使本版的质量在原有的基础上得以进一步提高。参加最后审定工作的还有朱亚东教授、韩永新博士和刘振庆工程师。

原石油部有关司（局）、石油工业出版社，我原所在单位江汉石油管理局、南海西部石油公司和南方石油勘探开发公司的有关领导，以及试井界许多同志，对本书各版的编写和出版给予了很大的鼓励、支持和帮助。在各版书稿的誊写和插图的清绘等工作中，还曾得到南海西部石油公司黄石追、沈晓红，江汉石油管理局高炳泉、余增援、高纯福、程永茂和杜山高等同志的大力帮助。本版中经修改和新增加的图幅均由南方石油勘探开发公司马庆林同志协助绘制。本版例 4-2、5-1、5-2 和例 8-2 的原解释者蒋沛然、丘永新、宋黎明、王维君、张家富和高曼萍等同志做了出色的工作，使本书能编入很好的实例。

在此谨向他们一并致以衷心的感谢。

虽然几经修订，但由于本人理论水平和实践经验有限，本书可能还有不当之处甚至错误，敬请专家、读者批评指正。

人生苦短，在修订本书第四版时我已退休多年。这也许是我在试井方面所能做的最后一项工作。我深切希望现正从事或将要从事试井工作的同仁们，继续努力奋斗，把我国的试井事业搞上去，使我国的试井技术居于世界前列，为我国石油工业的发展做出更大的贡献。

刘能强 谨识

2002 年 10 月

于南方石油勘探开发公司

目 录

第一章 预备知识	(1)
第一节 试井解释的理论基础.....	(2)
第二节 一些重要的基本概念	(13)
第二章 试井解释方法	(21)
第一节 从系统分析看试井解释	(22)
第二节 试井解释模型	(24)
第三节 流动阶段的识别	(25)
第四节 识别油(气)藏类型的重要性	(40)
第三章 均质油藏的试井解释	(42)
第一节 压力图版及图版拟合方法简介	(42)
第二节 均质油藏中具有井筒储集和表皮效应的井的压降分析	(55)
第三节 均质油藏中具有井筒储集和表皮效应的井的恢复分析	(62)
第四节 压力导数图版及拟合分析方法	(72)
第四章 双重孔隙介质油藏的试井解释	(97)
第一节 双重孔隙介质油藏的有关概念	(97)
第二节 基岩向裂缝的流动为拟稳定流动的模型	(99)
第三节 基岩向裂缝的流动为不稳定流动的模型.....	(114)
第四节 几点重要的注释.....	(118)
第五章 均质油藏中垂直裂缝井的试井解释	(121)
第一节 无限导流性垂直裂缝模型.....	(121)
第二节 有限导流性垂直裂缝模型.....	(133)
第六章 双重渗透介质油藏的试井解释	(141)
第一节 双重渗透介质油藏的有关概念.....	(141)
第二节 双对数曲线的特性和解释图版.....	(142)
第三节 解释方法.....	(144)
第七章 水平井试井解释	(149)
第一节 水平井的流动阶段和压力变化特征.....	(149)
第二节 水平井试井资料的解释.....	(153)
第八章 气井的现代试井解释方法	(157)
第一节 拟压力的计算方法.....	(157)
第二节 试井解释方法.....	(158)
第三节 拟压力的简化.....	(166)
第九章 井间干扰试井解释	(169)
第一节 均质油层干扰试井的极值点分析法.....	(169)
第二节 均质油层干扰试井的图版拟合分析法.....	(171)

第三节 双重孔隙介质油藏干扰试井的图版拟合分析法·····	(173)
第十章 试井解释软件有关问题·····	(178)
附录1 符号及单位表·····	(180)
附录2 不同单位制下的试井解释常用公式·····	(184)
附录3 单位换算系数表·····	(206)
附录4 公式的单位变换·····	(208)
参考文献·····	(210)

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。测试的内容包括测量产量、压力、温度及其变化，以及取样（包括油样、气样和水样）等等。试井是一种以渗流力学为基础，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、水层和测试井的生产能力、物理参数，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)、无阻流量 (Open Flow Potential 或 Absolute Open Flow Potential, 简称 OFP 或 AOFP)、井底流入动态曲线 (Inflow Performance Relationship, 简称 IPR) 和合理产量 (即合理工作制度) 等；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，即测试过程中的产量和井底压力资料，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，以及测试井附近的油 (气) 层边界情况以及井 (层) 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、确定油 (气) 层参数的不可缺少的重要手段。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，许多资料都是在油 (气) 藏的静态条件下测取的，只有试井资料才是在油 (气) 藏的动态条件下测得的，由此算得的参数能够较好地表征油 (气) 藏在动态条件下的特征；许多资料只能反映井眼或其附近 [即油 (气) 藏中的“一个点”] 的地层特性，而只有试井资料可以反映测试井及其周围广大范围 (即所谓“测试影响范围”) 内的地层特性。正因为这个原因，试井资料对于制定油 (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。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，得到尽可能多且尽可能可靠的关于地层和测试井的信息。

最近 20 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及推广应用，试井技术已经有了新的重大突破，在传统的试井技术的基础上，逐步形成了一整套“现代试井技术”。

所谓“现代试井技术”，主要包括下列三个方面的内容：

- (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，得到更多更可靠的解释结果；
- (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，可以一边进行

测试,一边用计算机对已测得的和正在测取的资料进行实时处理 (Real Time Processing)、绘制出各种图件 (实时曲线, Real Time Plots), 进行实时解释 (Real Time Interpretation), 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。

第一节 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

经过简化,油或水在岩层中渗滤流动,可以看成是一种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)^①:

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

或

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

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:

$$\left. \begin{aligned} p(t=0) &= p_i && \text{(初始条件)} \\ p(r=\infty) &= p_i && \text{(外边界条件)} \\ \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} &= \frac{q\mu B}{172.8\pi Kh} && \text{(内边界条件)} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

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, 无量纲;

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

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

① 基本微分方程的导出和求解见参考文献 [1]。

其中 C_i 、 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 (无量纲)。

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, 无量纲;

$\eta = \frac{K}{\phi\mu C_t}$ ——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 1000m) 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。^①

方程 (1-1) 在定解条件 (1-2) 下的解为

$$p = p(r, t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r^2}{14.4\eta t} \right) \right] \quad (1-3)$$

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

$$\text{Ei}(-x) \approx \ln x + 0.5772 \approx \ln(1.781x) \quad (1-4)$$

由式 (1-3) 可知, 地层中的压力 p 是离井的距离 r 和时间 t 的函数。在离井的距离相同 (设为 r_0) 的地方, 在同一时刻 (设为 t_0), 压力的数值相等:

$$p(r_0, t_0) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r_0^2}{14.4\eta t_0} \right) \right]$$

因此, 在地层中任何一个与井筒相垂直的平面上的任何一个以井轴为圆心的圆周上, 压力处处相等。也就是说, 这些圆都是等压线, 而其流线与等压线正交, 则是指向井筒并向井筒汇集的直线。这表明: 地层中的原油 (或水) 从井的四面八方沿水平面的半径方向流向井筒, 如图 1-1 所示。这种流动称为平面径向流动。因为这是在“地层是无限大的”这一假定下得出的解, 所以还常称为“无限作用径向流动” (Infinite Acting Radial Flow), 简称作“径向流”。

在井筒, $r = r_w$ 。由式 (1-3) 可得径向流动情

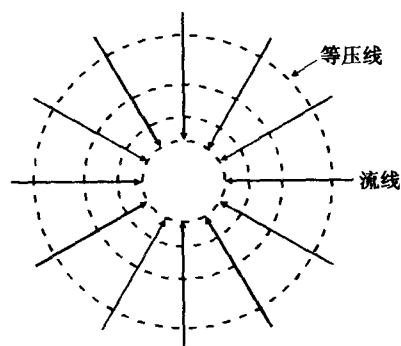


图 1-1 径向流动示意图

① 有人根据导压系数的量纲为 $[l^2/t]$ 认为: 导压系数的物理意义就是“压力在单位时间内传播的面积”。这是不正确的。

形下的井底流动压力 $p_{wf}(t) = p(r_w, t)$ 为

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta t} \right) + 2S \right] \quad (1-5)$$

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，它们的意义将在下一节详细介绍。

把式 (1-5) 写成压差的形式，得

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) = \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta t} \right) + 2S \right] \quad (1-6)$$

当 $\frac{r_w^2}{14.4\eta t} < 0.01$ 时（这个条件很容易满足），由式 (1-5) 有

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[\ln \frac{8.085\eta t}{r_w^2} + 2S \right] \quad (1-7)$$

换成常用对数，得

$$\begin{aligned} p_{wf}(t) &= p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[2.303 \lg \frac{8.085\eta t}{r_w^2} + 2S \right] \\ &= p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \\ &= -\frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg t + \left[p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \right. \\ &\quad \left. \times \left(\lg \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \right] \end{aligned} \quad (1-8)$$

或写成压差形式：

$$\begin{aligned} \Delta p = p_i - p_{wf}(t) &= \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg t + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \\ &\quad \times \left(\lg \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式 (1-5)、(1-6) 或式 (1-7)、(1-8)、(1-9) 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、叠加原理

应用叠加原理，可以得到多井情形和变产量情形（包括关井，即压力恢复情形）的各种压力变化公式。

所谓“叠加原理”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，那么，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

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

可以分解为以下两个定解问题，即

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial y_1}{\partial t} = 1 \\ y_1(t=0) = x \\ y_1(x=0) = 0 \end{cases} \quad (1-11)$$

和

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x} + \frac{\partial y_2}{\partial t} = -1 \\ y_2(t=0) = 0 \\ y_2(x=0) = -t \end{cases} \quad (1-12)$$

容易验证：定解问题式 (1-11) 和式 (1-12) 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

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

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

恰与定解问题式 (1-10) 完全一样。也很容易验证

$$y_1 = x$$

和

$$y_2 = -t$$

分别是定解问题式 (1-11) 和式 (1-12) 的解。由叠加原理知

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

就是定解问题式 (1-10) 的解。这一点在上面已经得到验证。

三、压力恢复公式

现在我们讨论如何应用叠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，把关井时刻的时间定为 0，关井时间用 Δt (h) 表示 (图 1-2a)。显然，这时定解问题是

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p}{\partial (\Delta t)} \\ p(\Delta t = -t_p) = p_i \\ p(r = \infty) = p_i \\ \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} = \begin{cases} \frac{q\mu B}{172.8\pi Kh} & -t_p \leq \Delta t \leq 0 \\ 0 & \Delta t > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1-13)$$

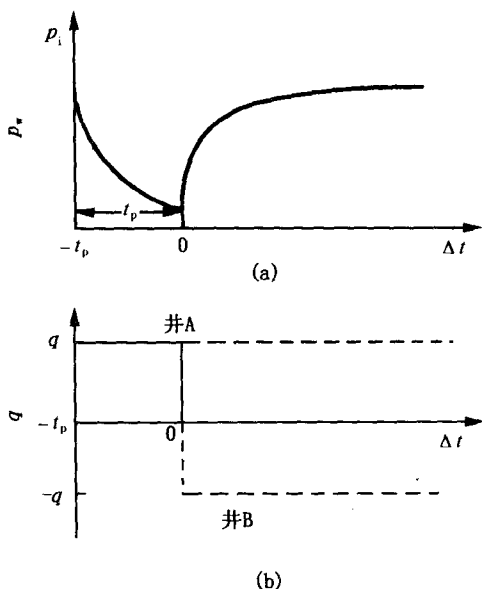


图 1-2 叠加原理示意图

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 1-2b）。

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（1-13）分解为下面两个定解问题：

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

(1-14)

和

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_2}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p_2}{\partial (\Delta t)} \\ p_2(\Delta t = 0) = 0 \\ p_2(r = \infty) = 0 \quad \Delta t > 0 \\ \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right)_{r=r_w} = -\frac{q\mu B}{172.8\pi Kh} \end{cases} \quad (1-15)$$

由前述可知，定解问题式（1-14）的解为

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

而定解问题式（1-15）的解为

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

故定解问题式（1-13）的解应为（我们用 p_{ws} 表示井底关井压力）

$$p_{ws}(\Delta t) = p_1 + p_2 = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left\{ -\text{Ei} \left[-\frac{r_w^2}{14.4\eta(t_p + \Delta t)} \right] + \text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta\Delta t} \right) \right\} \quad (1-16)$$

或

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left\{ -\text{Ei} \left[-\frac{r_w^2}{14.4\eta(t_p + \Delta t)} \right] + \text{Ei} \left(-\frac{r_w^2}{14.4\eta\Delta t} \right) \right\} \quad (1-17)$$

若用对数表达式近似表示 Ei 函数, 则有

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (1-18)$$

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \quad (1-18')$$

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (1-19)$$

或

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = -\frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \quad (1-19')$$

式 (1-16)、(1-17) 或式 (1-18)、(1-18')、(1-19)、(1-19') 就是“压力恢复公式”。式 (1-18)、(1-18')、(1-19) 和式 (1-19') 又称为赫诺 (Horner) 公式。

由式 (1-8) 有

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

式 (1-18) 与上式相减得

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

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left[\lg \left(\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + \Delta t} \right) + 0.9077 + 0.8686S \right] \quad (1-20)$$

如果关井前生产时间 t_p 比最大关井时间 $\Delta t_{\max}$ 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

$$\begin{aligned}
p_{ws}(\Delta t) &\approx p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \\
&= \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \Delta t + \left[p_{wf}(t_p) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \right. \\
&\quad \left. \times \left(\lg \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right) \right] \quad (1-21)
\end{aligned}$$

有人称式 (1-21) 为简化的压力恢复公式。它在形式上与压降公式 (1-8) 非常相似, 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 (1-8)、(1-18) 或 (1-18') 和式 (1-21) 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 $\lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t}$) 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 $-\frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}$ (见图 1-3)。为了方便起见, 我们用 m 表示斜率的绝对值, 即

$$m = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \quad (1-22)$$

当我们画出压力降落曲线 ($p_{wf}-\lg t$ 曲线), 或压力恢复曲线 ($p_{ws}-\lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ 曲线或 $p_{ws}-\lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t}$ 曲线。称为赫诺曲线^①; 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

$$\text{流动系数 } \frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m} \quad (1-23)$$

$$\text{地层系数 } Kh = \left(\frac{Kh}{\mu} \right) \times \mu = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{m} \quad (1-24)$$

$$\text{有效渗透率 } K = \left(\frac{Kh}{\mu} \right) \times \frac{\mu}{h} = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh} \quad (1-25)$$

由式 (1-8) 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

$$S = 1.151 \left[\frac{p_i - p_{wf}(t_0)}{m} - \lg \frac{K t_0}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077 \right] \quad (1-26)$$

在压力恢复情形, 由式 (1-20) 可得

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0) - p_{ws}(0)}{m} - \lg \left(\frac{K \Delta t_0}{\phi\mu C_t r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + \Delta t_0} \right) - 0.9077 \right] \quad (1-27)$$

如果 $t_p \gg \Delta t_0$, 则上式可简化为

① 在国外, 常用 $p_{ws}-\lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ 曲线, 而在我国, 常用 $p_{ws}-\lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t}$ 曲线。显然, 它们实质上是完全一样的, 只是曲线的走向不同而已。