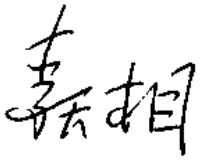
第四版序言

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和大力支持，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。本版中经修改的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

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

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：

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

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，mPa·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，$(MPa)^{-1}$，其定义为：

$$C_t=C_f+C_oS_o+C_wS_w+C_gS_g$$

[1] 基本微分方程的导出和求解见参考文献［1］。

其中 C_f、C_o、C_w 和 C_g 分别为岩石、油、水和气的压缩系数，$(MPa)^{-1}$；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；

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

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。❶

方程（1－1）在定解条件（1－2）下的解为

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

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

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

当 $x<0.01$ 时，有

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

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：

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

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”。

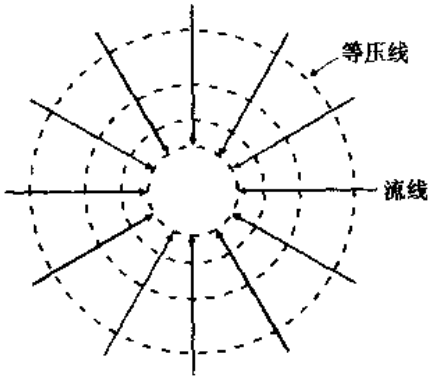


图 1－1　径向流动示意图

在井筒，$r = r_w$。由式（1－3）可得径向流动情

❶ 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

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

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

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

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

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

换成常用对数，得

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

或写成压差形式：

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

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

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

可以分解为以下两个定解问题，即

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

和

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

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

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

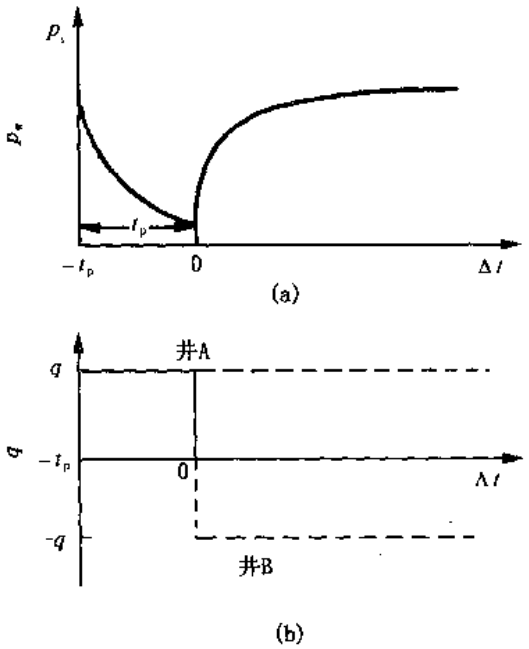


图 1-2　叠加原理示意图

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：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p_1}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial p_1}{\partial r}=\dfrac{1}{3.6\eta}\dfrac{\partial p_1}{\partial(\Delta t)} \\ p_1(\Delta t=-t_p)=p_i \\ p_1(r=\infty)=p_i \qquad \Delta t>-t_p \\ \left(r\dfrac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Kh}\end{cases} \tag{1-14}$$

和

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

由前述可知，定解问题式（1-14）的解为

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

而定解问题式（1-15）的解为

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

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）

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

或

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

若用对数表达式近似表示 Ei 函数，则有

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{1-18}$$

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{\Delta t}{t_p+\Delta t} \tag{1-18'}$$

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{1-19}$$

或

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = -\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{\Delta t}{t_p+\Delta t} \tag{1-19'}$$

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

$$p_{ws}(\Delta t=0) = p_{wf}(t=t_p) = p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt_p}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

式（1-18）与上式相减得

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\times\left(-\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} + \lg\frac{Kt_p}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left[\lg\left(\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot\frac{t_p}{t_p+\Delta t}\right) + 0.9077 + 0.8686S\right] \tag{1-20}$$

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

$$p_{ws}(\Delta t)\approx p_{wf}(t_p)+\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2}+0.9077+0.8686S\right)$$

$$=\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\Delta t+\left[p_{wf}(t_p)+\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\right.$$

$$\left.\times\left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2}+0.9077+0.8686S\right)\right] \qquad (1-21)$$

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 $\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}$ 或 $-\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}$（见图 1－3）。为了方便起见，我们用 m 表示斜率的绝对值，即

$$m=\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh} \qquad (1-22)$$

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●；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

$$\text{流动系数}\frac{Kh}{\mu}=\frac{2.121\times10^{-3}qB}{m} \qquad (1-23)$$

$$\text{地层系数 }Kh=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\mu=\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{m} \qquad (1-24)$$

$$\text{有效渗透率 }K=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\frac{\mu}{h}=\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{mh} \qquad (1-25)$$

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

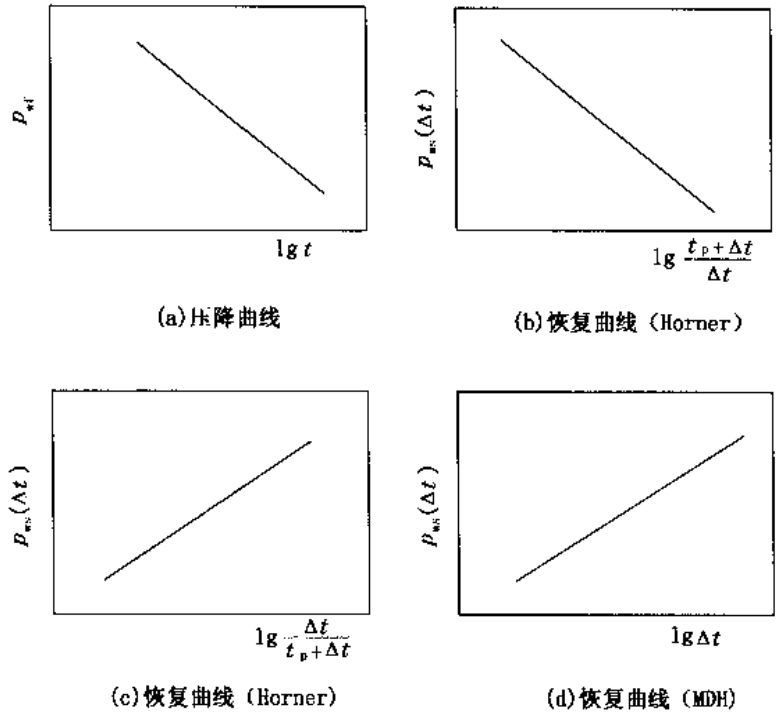
$$S=1.151\left[\frac{p_i-p_{wf}(t_0)}{m}-\lg\frac{Kt_0}{\phi\mu C_t r_w^2}-0.9077\right] \qquad (1-26)$$

在压力恢复情形，由式（1－20）可得

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

如果 $t_p\gg\Delta t_0$，则上式可简化为

● 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。



(a)压降曲线　(b)恢复曲线（Horner）

(c)恢复曲线（Horner）　(d)恢复曲线（MDH）

图 1－3　压降曲线和压力恢复曲线

$$S = 1.151\left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0) - p_{ws}(0)}{m} - \lg\frac{K\Delta t_0}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] \tag{1-28}$$

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 $t_0 = 1\text{h}, \Delta t_0 = 1\text{h}$，式（1－26）、（1－27）和式（1－28）分别写成

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

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

$$S = 1.151\left[\frac{p_{ws}(1\text{h}) - p_{ws}(0)}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] \tag{1-28'}$$

上面各式中，$p_{wf}(1\text{h})$ 和 $p_{ws}(1\text{h})$ 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 $t_0 = 1\text{h}, \Delta t_0 = 1\text{h}$，这样做只不过是为了使计算稍为简单而已。

由式（1－18）和式（1－18′）还可看出：当关井时间 $\Delta t \to \infty$ 时，$\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \to 1$，$\frac{\Delta t}{t_p+\Delta t} \to 1$，$\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \to 0$，$\lg\frac{\Delta t}{t_p+\Delta t} \to 0$，故 $p_{ws}(\Delta t) \to p_i$。因此，把直线段延长，使它与 $\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} = 1$ 或 $\frac{\Delta t}{t_p+\Delta t} = 1$ 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

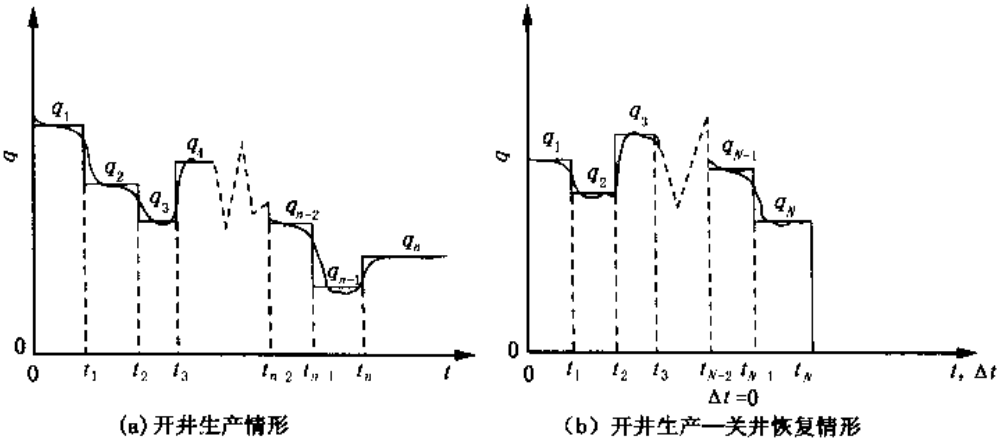
上面讨论的压降曲线，是在井以稳定产量生产的过程中测得的；压力恢复曲线，也是在井以稳定产量生产相当长时间之后关井期间测得的。实际上，在许多情形，产量是随时间变化的，有时为了一定的目的，还要人为地改变井的产量，如进行产能试井就是这样。如果在整个生产期间，产量只是略有波动，则可取产量的平均值作为产量，取实际生产时间作为生产时间进行解释；如果在压力恢复情形，整个生产阶段的产量不稳定，但在关井前的一段时间，产量比较稳定（设为 q，单位为 m^3/d），则可把这一稳定产量 q 作为整个生产期间的产量，而取

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

作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，通过叠加的方法进行处理。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，近似地看做是个常数，如图 1－4a 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（$i=1, 2, \cdots, n$），即

$$\begin{aligned}
q &= q_1 \quad 0 \leqslant t < t_1 \\
q &= q_2 \quad t_1 \leqslant t < t_2 \\
q &= q_3 \quad t_2 \leqslant t < t_3 \\
&\cdots\cdots \\
q &= q_{n-1} \quad t_{n-2} \leqslant t < t_{n-1} \\
q &= q_n \quad t \geqslant t_{n-1}
\end{aligned}$$



(a) 开井生产情形　　(b) 开井生产—关井恢复情形

图 1－4　产量变化处理示意图

在第一个时间段，由式（1－8）有

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q_1\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

$$(0 < t \leqslant t_1)$$

在第二个时间段，由叠加原理可导出

$$\begin{aligned}p_{wf}(t) = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q_1\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\\ & - \frac{2.121\times10^{-3}(q_2-q_1)\mu B}{Kh}\left[\lg\frac{K(t-t_1)}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right]\\ = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}\mu B}{Kh}\left[q_1\lg t + (q_2-q_1)\lg(t-t_1)\right.\\ & \left. + q_2\left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\right]\end{aligned}$$

$$(t_1 < t \leqslant t_2)$$

同理，在第三个时间段，有

$$\begin{aligned}p_{wf}(t) = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q_1\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\\ & - \frac{2.121\times10^{-3}(q_2-q_1)\mu B}{Kh}\left[\lg\frac{K(t-t_1)}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right]\\ & - \frac{2.121\times10^{-3}(q_3-q_2)\mu B}{Kh}\left[\lg\frac{K(t-t_2)}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right]\\ = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}\mu B}{Kh}\left[q_1\lg t + (q_2-q_1)\lg(t-t_1) + (q_3-q_2)\lg(t-t_2)\right.\\ & \left. + q_3\left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\right]\end{aligned}$$

$$(t_2 < t \leqslant t_3)$$

在第 n 个时间段有

$$\begin{aligned}p_{wf}(t) = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}\mu B}{Kh}\left[q_1\lg t + (q_2-q_1)\lg(t-t_1) + (q_3-q_2)\lg(t-t_2)\right.\\ & \left. + \cdots + (q_n-q_{n-1})\lg(t-t_{n-1}) + q_n\left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\right]\\ = {} & p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q_n\mu B}{Kh}\left[\sum_{j=1}^{n}\frac{q_j-q_{j-1}}{q_n}\lg(t-t_{j-1})\right.\\ & \left. + \left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\right] \qquad (t > t_{n-1})\end{aligned}$$

式中 $t_0=0$；

$q_0=0$。

由上式可见：在直角坐标系中，$p_{wf}(t)$ 与 $\sum_{j=1}^{n}\frac{q_j-q_{j-1}}{q_n}\lg(t-t_{j-1})$ 成一直线，其斜率（取绝对值）为

$$m' = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_n \mu B}{Kh}$$

纵截距为

$$a = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q_n \mu B}{Kh}\left(\lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

如果画出 p_{wf} 与 $\sum_{j=1}^{n} \frac{q_j - q_{j-1}}{q_n} \lg(t - t_{j-1})$ 的关系曲线，称为产量叠加曲线或时间叠加曲线，量出其直线段的斜率 m' 和截距 a（图 1－5a），便可算出

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_n B}{m'}$$

$$Kh = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_n \mu B}{m'}$$

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_n \mu B}{m' h}$$

$$S = 1.151\left(\frac{p_i - a}{m'} - \lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077\right)$$

如果油井以变产量生产后关井进行压力恢复测试，关井前的产量可分作 N 个台阶，即设想成把全部产量分成 $N+1$ 个时间段，其中第 $N+1$ 段的产量为 0（图 1－4b），则关井后的井底压力为

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q_N \mu B}{Kh}\left[\sum_{j=1}^{N} \frac{q_j - q_{j-1}}{q_N} \lg(t_N - t_{j-1} + \Delta t) - \lg \Delta t\right]$$

或

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_N) - \frac{2.121 \times 10^{-3} q_N \mu B}{Kh}\left[\sum_{j=1}^{N} \frac{q_j - q_{j-1}}{q_N} \lg \frac{t_N - t_{j-1} + \Delta t}{t_N - t_{j-1}} - \lg \Delta t - \left(\lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)\right]$$

式中的 Δt 是关井时间。

因此，在直角坐标系中，画出关井压力 $p_{ws}(\Delta t)$ 与 $\left[\sum_{j=1}^{N} \frac{q_j - q_{j-1}}{q_N} \lg(t_N - t_{j-1} + \Delta t) - \lg \Delta t\right]$ 的关系曲线（产量叠加曲线），应得一条直线（图 1－5b），其斜率为

$$m' = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_N \mu B}{Kh}$$

纵截距为 p_i。所以，若延长直线段与 p_{ws} 轴相交，交点对应的压力就是 p_i（实际资料解释时为 p^*）；量出斜率 m'，便可算出 $\frac{Kh}{\mu}$、Kh 和 K。

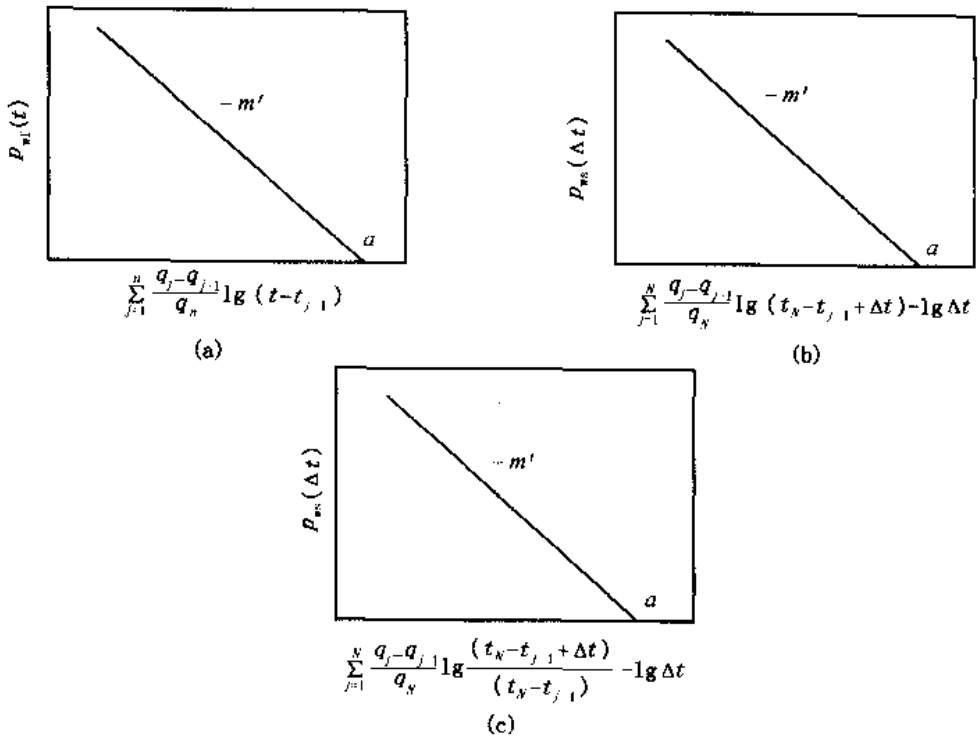


图 1－5　产量叠加曲线

也可以在直角坐标系中画出 $p_{ws}(\Delta t)$ 与 $\left[\sum_{j=1}^{N}\frac{q_j-q_{j-1}}{q_N}\lg\frac{t_N-t_{j-1}+\Delta t}{t_N-t_{j-1}}-\lg\Delta t\right]$ 的关系曲线（图 1－5c）。其斜率亦为

$$m'=\frac{2.121\times10^{-3}q_N\mu B}{Kh}$$

纵截距为 $a=p_{wf}(t_N)+\frac{2.121\times10^{-3}q_N\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2}+0.9077+0.8686S\right)$

量出斜率 m' 和纵截距 a，便可计算 $\frac{Kh}{\mu}$、Kh 和 K（公式同上），以及 S：

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

第二节　一些重要的基本概念

一、无量纲量（Dimensionless Quantities）

一般的物理量都具有量纲，并可用基本量纲表示出来。例如：面积具有长度平方［L^2］的量纲，产量（即流率）的量纲为［L^3/t］，压力（实际上是压强）的量纲为［m/Lt^2］等。

但是也有一些量却不具有量纲（即量纲为 1）。例如原油体积系数、含油饱和度、孔隙度、相对渗透率、表皮系数、赫诺公式中的 $\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 等，都是无量纲量。

为了一定的目的，我们常常要把某些具有量纲的物理量无量纲化，即引进新的无量纲

量。我们用下标 D 表示“无量纲”，如用 p_D 表示无量纲压力，t_D 表示无量纲时间。一般说来，引进的无量纲物理量是这些物理量与别的一些物理量的组合，并和这些物理量本身成正比。譬如，我们进行试井解释常用的无量纲量中，无量纲压力 p_D 与压差 Δp 成正比[1]：

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}\Delta p \tag{1-29}$$

无量纲时间 t_D 与开井时间 t（或关井时间 Δt）成正比：

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2} t = \frac{3.6\eta}{r_w^2} t \tag{1-30}$$

或

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}\Delta t = \frac{3.6\eta}{r_w^2}\Delta t \tag{1-31}$$

无量纲井筒储集系数 C_D 与井筒储集系数 C 成正比：

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} \tag{1-32}$$

无量纲距离 r_D 与距离 r 成正比：

$$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{1-33}$$

如此等等。上面各式中，

p_D——无量纲压力，无量纲；

Δp——压差，MPa；

t_D——无量纲时间，无量纲；

t——开井生产时间，h；

Δt——关井时间，h；

C_D——无量纲井筒储集系数，无量纲；

C——井筒储集系数，m^3/MPa（定义见下一段）；

r_D——无量纲距离，无量纲；

其余符号的意义和单位同前。

无量纲化的方法不是惟一的。人们往往根据不同的需要，用不同的方法来定义同一个无量纲量。例如，我们将在不同的场合，使用不同的无量纲时间，有用井的半径 r_w 定义的：

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2} t$$

有用井的有效半径或折算半径 r_{we} 定义的：

---

[1] “无量纲压力”实际上是“无量纲压差”。但鉴于英文原文“Dimensionless Pressure”及已据此译成“无量纲压力”，我们也不改用“无量纲压差”，而沿用“无量纲压力”。但应记住其实质是无量纲压差。

$$t_{De} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_{we}^2} t \tag{1-34}$$

有用油藏面积 A 定义的：

$$t_{DA} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t A} t \tag{1-35}$$

还有用裂缝半长 x_f 定义的：

$$t_{Df} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t x_f^2} t \tag{1-36}$$

等等。上列式中，

r_{we}——井的有效半径（或称折算半径），m；

A——油藏面积，m^2；

x_f——裂缝长度之半，m。

用无量纲量来讨论问题有许多好处，例如：

（1）由于若干有关的因子已经包含在无量纲量的定义之中，所以往往使得关系式变得很简单，因而易于推导、记忆和应用。譬如，在无量纲形式下，上节中的式（1-1）、（1-2）、（1-3）、（1-6）和式（1-9）分别写成式（1-1′）、（1-2′）、（1-3′）、（1-6′）和式（1-9′）：

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \tag{1-1′}$$

$$\left.\begin{aligned} p_D(t_D = 0) &= 0 \\ p_D(r_D = \infty) &= 0 \\ \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D}\right)_{r_D = 1} &= -1 \end{aligned}\right\} \tag{1-2′}$$

$$p_D = \frac{1}{2}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_D^2}{4t_D}\right)\right] \tag{1-3′}$$

$$p_D = \frac{1}{2}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{1}{4t_D}\right) + 2S\right] \tag{1-6′}$$

$$p_D = \frac{1}{2}[\ln t_D + 0.80907 + 2S] \tag{1-9′}$$

可以看到，这些式子与油藏和油井的实际物理参数如 K，h，μ，q 和 ϕ 等都没有直接关系，实际上，它们之间的关系已经隐含在无量纲量的定义之中了。

（2）由于使用的是无量纲量，所以导出的公式不受单位制的影响和限制，因而使用更为方便。

（3）可以使得在某种前提下进行的讨论具有普遍的意义。这就是说，使得讨论的结果可

以适用于满足该前提的任何实际场合。譬如，某种物理或数学模型的无量纲解，可以适用于符合这种物理或数学模型的任何油藏中的任何一口井，而不管它的特性参数如 K、ϕ、μ、h、q 等为何值。在得到最后结果后，再由无量纲量与实际物理量之间的关系换算成我们需要的实际数值，而这是非常容易的。现代试井解释中所使用的解释图版，绝大多数都是无量纲量的关系曲线，即无量纲曲线。正是因为这个原因，使得这些解释图版可以到处通用。

二、井筒储集系数（Wellbore Storage Coefficient）

油井刚开井或刚关井时，由于原油具有压缩性等多种原因，地面产量 q_1 与井底产量 q_2 并不相等，如图 1－6 所示。以井筒充满单相原油的情形为例，当油井一打开，从井口采出原油（产量 q）完全是靠充满井筒的压缩原油的膨胀（井筒卸压）而采出的，还没有原油从地层流入井筒。这时，井底产量 $q_2=0$，地面产量 $q_1=q$。然后，随着井筒中原油弹性能量的释放，井底产量逐渐增加，过渡到与地面产量相等，即 $q_1=q_2=q$（图 1－6a）。

在关井情形，当油井一关闭，地面产量 q_1 立即由 q 变为 0，但在井底，原油仍然源源不断地由地层流入井筒，使井筒压力逐渐增加（载压），直到最后与井筒周围地层的压力达到平衡。到了这个时候，井底产量才变为 0，即 $q_1=q_2=0$，真正实现了井底关井。显然，这就是我们所熟悉的“续流效应”（图 1－6b）。

上述当油井刚开井或刚关井时所出现的现象，就叫做“井筒储存效应”，或“井筒储集效应”。$q_2=0$（开井情形）或 $q_2=q$（关井情形）的那一段时间，称为“纯井筒储集”阶段，简写作 PWBS（Pure Wellbore Storage）。

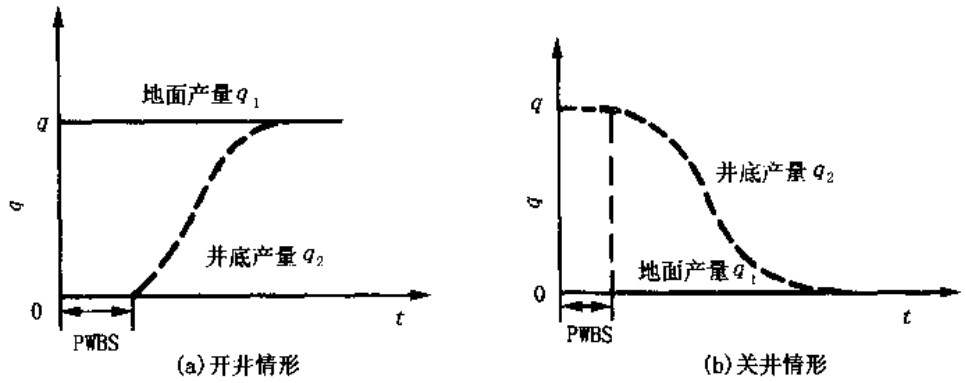


图 1－6　井筒储集效应示意图

我们用“井筒储集系数”来描述井筒储集效应的强弱程度，即井筒靠其中原油的压缩等原因储存原油或靠释放井筒中压缩原油的弹性能量等原因排出原油的能力，并用 C 代表：

$$C=\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}p}\approx\frac{\Delta V}{\Delta p}$$

其中 ΔV 是井筒中所储原油体积的变化，Δp 是井筒压力的变化。显然，井筒储集系数 C 的物理意义，在关井情形，是要使井筒压力升高 1MPa，必须从地层中流进井筒 C（m^3）原油；在开井情形，是当井筒压力降低 1MPa 时，靠井筒中原油的弹性能量可以排出 C（m^3）原油。一般情形，井筒储集系数是个常数，故常称为井筒储集常数。

显然，我们希望能尽量消除或降低井筒储集效应。于是提出了“井底关井”的方法，

“井底关井器”也就应运而生，并且已经得到了广泛的应用。

我们仍假定原油充满整个井筒。在开井或关井 t 小时内，井筒中原油体积的变化为

$$\Delta V = \frac{|q_1 - q_2|t}{24}(\mathrm{m}^3)$$

式中 q_1、q_2 分别为地面产量（折算到井底）和井底产量，单位为 m^3/d。因此

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{|q_1 - q_2|t}{24\Delta p}$$

在纯井筒储集阶段，有 $q_2=0$，$q_1=q$（开井情形）或 $q_1=0$，$q_2=q$（关井情形），故

$$|q_1 - q_2| = \begin{cases} q_1 = q & \text{开井情形} \\ q_2 = q & \text{关井情形} \end{cases}$$

这就是说：在开井情形，$|q_1-q_2|$ 为油井的稳定产量 q，在关井情形，$|q_1-q_2|$ 为关井前的稳定产量 q。所以，在纯井筒储集阶段有

$$\Delta V = \frac{qt}{24}$$

故

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{qt}{24\Delta p} \tag{1-37}$$

$$\Delta p = \frac{q}{24C} \cdot t \tag{1-38}$$

注意：在这一段里，为了方便起见，对井底产量与地面产量不加区别，都以 q 表示。在实际测试中，我们测得的是地面产量。在本书的其他部分，q 用来代表地面产量，井底产量应为 qB。

如果原油是单相的（譬如在井口压力高于饱和压力的情况下），则

$$\Delta V = VC_o\Delta p$$

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{VC_o\Delta p}{\Delta p} = VC_o \tag{1-39}$$

式中 V 为井筒容积（m^3），C_o 为井筒中原油的压缩系数。

由式（1-39）计算的井筒储集系数称为“由完井资料计算的井筒储集系数”，记作 $C_{完井}$。它是在井筒充满单相原油、封隔器（如果有的话）密封、井筒周围没有与井筒相连通的裂缝等条件下算得的，因此是井筒储集系数的最小值。由于下列原因，实际井筒储集系数往往大于这个数值：

（1）井筒中有自由气时，由于气体的压缩系数比油的压缩系数大得多，所以 C 值将增大。

（2）如果封隔器不密封，井筒容积将大大增加，因而使得 C 值增大。

（3）在双重孔隙介质油藏情形，有效井筒容积将由于与井筒相连通的裂缝的影响而增大，因而使 C 值增大。

最后，对于液面不到井口（井筒不充满）的情形，C 值将会更大。假设每米油管的容积为 V_u（m^3）（也就是说，油管内横截面面积为 V_u（m^2），油管中原油的密度为 ρ（g/

cm^3），液面高度变化（上升或下降）值为 l（m），而相应的压力变化值为 Δp（MPa），则

$$\Delta V = V_u l(m^3)$$

$$\Delta p = 9.80665 \times 10^{-3} l\rho$$

故

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{V_u l}{9.80665 \times 10^{-3} l\rho} = \frac{V_u}{9.80665 \times 10^{-3}\rho}(m^3/MPa) \qquad (1-40)$$

如果在井筒储集效应阶段，井筒中发生相态改变的现象，则井筒储集系数也将发生变化。假如在压降测试中，开始时井口压力稍高于饱和压力，井筒中原油呈单相状态。此时井筒储集系数 C 与原油的压缩系数成正比。开井后，井口压力很快下降到低于饱和压力，井筒中原油开始脱气。此时，由于流体（原油和自由气）的压缩系数增大，井筒储集系数 C 也随之增大。反之，如果在压力恢复的井筒储集阶段，井口压力由稍低于饱和压力迅速上升到高于饱和压力，井筒储集系数 C 则将变小。

三、表皮效应（Skin Effect）与表皮系数（Skin Factor）

设想在井筒周围有一个很小的环状区域。由于种种原因，譬如钻井液的侵入、射开不完善、酸化、压裂见效等，这个小环状区域的渗透率与油层不相同。因此，当原油从油层流入井筒时，在这里产生一个附加压力降。这种现象叫做表皮效应（或趋肤效应）。把这个附加压降（用 Δp_s 表示）无量纲化，得到无量纲附加压降，用它来表征一口井表皮效应的性质和严重程度，称之为表皮系数（或趋肤因子，污染系数等），用 S 表示：

$$S = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}\Delta p_s \qquad (1-41)$$

图 1-7 表示在均质地层中一口井 $S=0$、$S>0$ 和 $S<0$ 三种情形的附加压降，它们分别表征均质油藏中的井未受污染、受污染和增产措施见效的情形，而 S 的数值则表示污染或增产措施见效的程度。这就是说，如果 $S>0$，数值越大，表示污染越严重；如果 $S<0$，绝对值越大，表示增产措施的效果越好。

上一节，我们在式（1-7）中附加上一项表示表皮效应的附加压降

$$\Delta p_s = \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \cdot 2S$$

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

这个式子可改写成

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

$$= p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\ln\frac{8.085\eta t}{(r_w e^{-S})^2}$$

令

$$r_{we} = r_w e^{-S} \qquad (1-42)$$

则

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\ln\frac{8.085\eta t}{r_{we}^2} \qquad (1-43)$$

如果把油井半径看做 r_{we}，则式中不再出现表皮系数 S，而表皮效应的影响已包含在 r_{we}之中。r_{we}称为折算半径或有效半径，其意义如图 1－7 所示。折算半径 r_{we}与油井半径 r_w 之间的关系完全反映了井筒附近污染的情况：

$r_{we}=r_w$：即 $S=0$，井未受污染。

$r_{we}<r_w$：即 $S>0$，井受污染，r_{we}越小，污染越严重。

$r_{we}>r_w$：即 $S<0$，井的增产措施见效，r_{we}越大，措施效果越好。

四、流动阶段及从每一流动阶段可以获得的信息

把压力降落或压力恢复的压差数据画在双对数坐标系中，可得一条曲线，称作“双对数曲线”。整个曲线可分为四个阶段（图 1－8）。

第四阶段——这是早在 20 世纪 20 年代就已为人们所研究的阶段。把生产井关闭，下入压力计测压，由此获得平均地层压力，然后用物质平衡法估算油藏的储量。但人们很快就认识到：所测压力值取决于关井时间的长短。油层的渗透率越低，达到平均地层压力所需的关井时间就越长。在现代试井解释中，把这一阶段称作第四阶段，从这一阶段的资料可以计算测试井到附近油层边界的距离 d、排油半径 r_e 和排油面积 A，以及控制储量 N、平均地层压力 $\bar{p}$ 等。

第三阶段——径向流动阶段。20 世纪 50 年代，不稳定试井方法发展起来。这种方法是测量压力降落曲线或压力恢复曲线，从而计算地层系数 Kh（或流动系数$\frac{Kh}{\mu}$或渗透率 K）、表皮系数 S 和地层压力 p^* 等，但得不到有关测试井井筒周围的情况和有关油藏类型的信息。

第二阶段——井筒附近油层的情况（如是否形成与井筒相连通的压裂裂缝，有无与井筒相连通的天然大裂缝，测试井是否完善等），以及油藏的类型（如油藏是均质的还是非均质的，属何种非均质）等等信息，只有从这一阶段的资料才能得到。从这一阶段的资料可以得到的参数有裂缝半长 x_f（井被裂缝切割情形）、储能比 ω（裂缝系统储油能力占总储油能力的比例）和表征原油从基岩系统流到裂缝系统的难易程度的窜流系数 λ（双重介质情形）等等。

第一阶段——即刚刚开井（压降情形）或刚刚关井（恢复情形）的一段短时间。分析这一阶段可以得到井筒储集系数 C。

要进行第二和第一阶段的分析，必须使用高精度压力计，测得早期资料，即刚刚开井或刚刚关井时的压力变化数据。

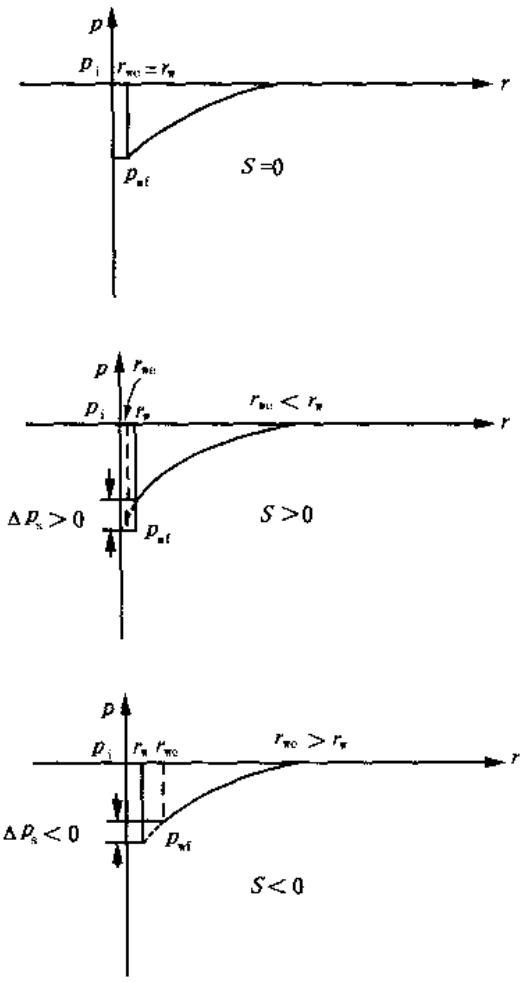


图 1－7　表皮效应和折算半径示意图

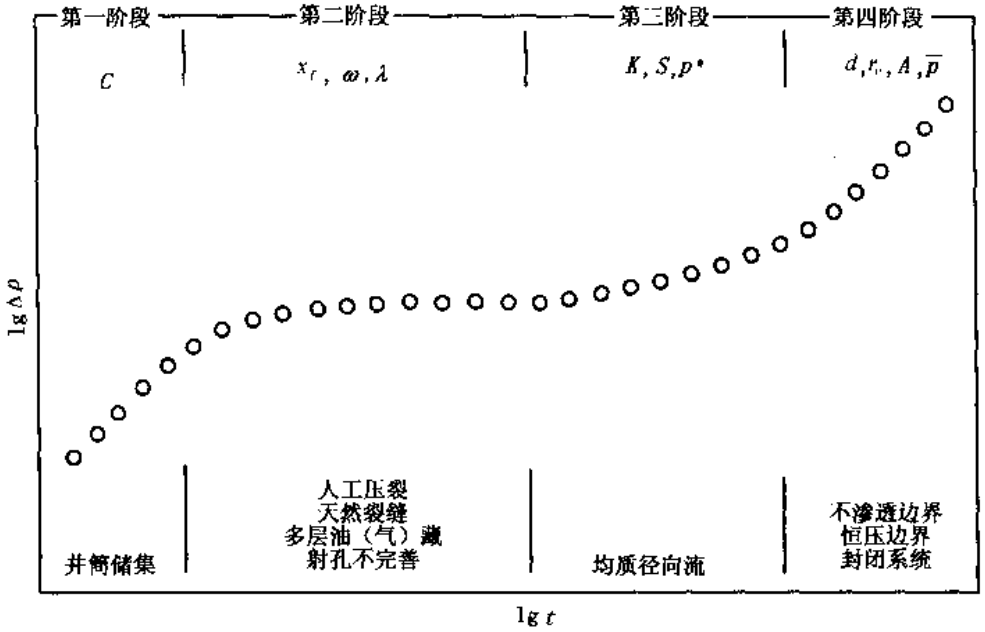


图 1－8　双对数曲线及流动阶段示意图

第二章　试井解释方法

如前所述，试井解释就是根据试井中所测得的资料，包括产量和压力变化等，结合其他资料，来判断油（气）藏类型、测试井类型和井底完善程度，并计算油（气）层及测试井的特性参数，如渗透率、储量、地层压力等，以及判断测试井附近的边界情况、井间连通情况等。

20世纪50～60年代，世界上普遍使用半对数曲线分析方法（包括MDH法和Horner法）来进行试井解释。这就是所谓“常规试井解释方法”（Conventional Well Test Interpretation Method），其主要内容已经在第一章第一节简单介绍过了，在以后的章节中还要进一步介绍和运用。

常规试井解释方法起过并且还在起着很好的作用，但也有很大的局限性。譬如，当测不到半对数直线段时，常规试井解释就无能为力了。到底半对数曲线是否出现了直线段，直线段从何时开始，在似乎出现两条以上直线段的情形，到底哪一条才是真正的直线段，有时也很难判断。

20世纪70年代以来，随着科学技术的飞速发展，特别是计算机和高精度测试仪表的发展，试井解释方法，在原来的常规试井解释方法的基础上，得到了很大的进步和发展，各国试井专家研制成功了许多试井解释图版，图版拟合分析方法引起了人们广泛的兴趣和高度的重视，特别是压力导数解释图版及其拟合分析方法的创立，使试井解释进一步取得突破性的重大发展。有专家指出：压力图版拟合分析方法的应用是现代试井解释方法创立的标志，而压力导数图版拟合分析方法的创立则是试井解释方法的“一次革命性的飞跃”。这一论断是很中肯的。现在，一套比较完整的所谓“现代试井解释方法”（Modern Well Test Interpretation Method）已经建立起来，并正在日臻完善。

概括起来，现代试井解释方法具有以下几个特点：

（1）运用了系统分析的概念和数值模拟的方法，大大丰富了试井解释的思想方法和实际内容。

（2）建立了双对数分析方法，用以识别测试层（井）的类型及划分流动阶段；确立了早期（第一、第二阶段）资料的解释，从过去认为无用的数据中得到了许多很有用的信息；通过图版拟合分析和数值模拟（即压力史拟合），从试井资料的总体上进行分析研究。

（3）包括了并进一步完善了常规试井解释方法，可以判断是否出现了半对数直线段，并且给出了半对数直线段开始的大致时间，提高了半对数曲线分析的可靠性。

（4）引用了直角坐标图，以进一步验证测试层（井）的类型、流动阶段和特性参数。这就是说，现代试井解释方法使用了三种曲线图，即：双对数曲线图［用以识别测试层（井）类型和确定流动阶段］、半对数曲线图及直角坐标图［用以验证测试层（井）类型、流动阶段和计算特性参数］。

（5）不仅适用于油、水井，也适用于气井；可以解释各种不稳定试井的资料，如中途测试（DST）、生产测试、压降测试、压力恢复测试的资料等。

（6）整个解释过程是一个“边解释边检验”的过程。几乎每一个流动阶段的识别、每个

参数的计算，都要从两种不同的分析方法分别进行，再对比结果。在用两种不同方法进行解释得到一致的结果之后，还要经过无量纲赫诺曲线拟合检验和压力史拟合检验。靠这一套边解释边检验的解释程序，使每一步骤都做得扎实、可靠，从而保证了整个解释的可靠性。

现代试井解释方法已经成为当今世界上新的常规试井解释方法。国内外各石油公司或油田都已经将它正式列入试井解释的规程、技术规范或技术标准之中。

第一节　从系统分析看试井解释

任何一个研究对象，都可以看做是一个系统（System，用 S 表示）。给系统一个“激动”，或称作输入（Input，用 I 表示），则系统就会出现相应的“反应”，即输出（Output，用 O 表示），如图 2－1 所示。

系统分析中有两类问题。一类是已知系统 S 的结构和输入讯号 I，而要求出未知的输出 O。这称为正问题（Direct Problem），用式子表示为

$$I \times S \rightarrow O$$

另一类则是系统 S 为未知，而要由已知的输入讯号 I 和输出讯号 O 反求该系统 S 的结构。这称为反问题（Inverse Problem），用式子表示为

$$O/I \rightarrow S$$

现在，把油（气）藏和测试井看做是一个系统 S。测试过程中，给 S 一个输入讯号 I——从测试井以恒定产量采出一定数量的原油或天然气；由此引起 S 中的压力发生变化——这就是 S 的输出讯号 O，见图 2－2。

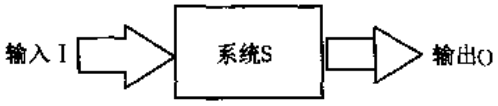


图 2－1　系统分析示意图

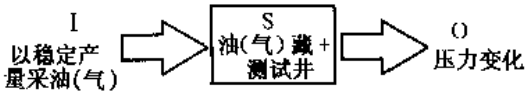


图 2－2　试井分析示意图

试井的过程，就是计量采出的原油或天然气并测量井底压力的变化，即测取系统的输入和输出讯号。试井解释的任务，就是由这些资料，即输入 I（产量）和输出 O（压力变化），加上某些初始条件和边界条件，及由其他测试手段所取得的油（气）藏和测试井的有关资料，来识别系统 S［油（气）藏和测试井的特性和参数］。也就是说，要解一个反问题。

如何解这个反问题呢？

我们知道：对于一个系统，施加某一输入，一定得到某一输出；对于不同的系统，施加同样的输入，一般说来将得到不同的输出。因此，我们可以用不同系统对于一定输入的反应，即输出，来识别系统本身。

具体说来，就是先找出各种不同系统［即油（气）藏和油（气）井的理论模型，也就是各种相应的微分方程或微分方程组及其定解条件］对于某种输入（即产量及其变化）的反应或输出（即压力变化）——实质上这就是解各种正问题；而从方法上说，则是解相应的微分方程或微分方程组。把得到的解，即各种类型油（气）藏和油（气）井的压力变化，分别画成曲线，这就是样板曲线或解释图版。大多数解释图版都是无量纲压力或无量纲压力对无量纲时间的导数与无量纲时间（或无量纲时间与其他无量纲量的组合）的双对数曲线。

在进行试井解释时，把实测压力变化画在透明双对数坐标纸上（注意：坐标尺寸必须与

所用解释图板的坐标尺寸相同），得到实际压差与时间的双对数曲线。然后把这条曲线与解释图版相对比，相拟合，看它与哪一类模型的解释图版中的哪一条样板曲线拟合得最好，从而识别油藏的类型，并从各种拟合数值——压力拟合值、时间拟合值和曲线拟合值计算油（气）藏和测试井的特性参数。之所以能够这样做，是因为无量纲压力与压差、无量纲时间与时间均成正比，而其比例系数只与油（气）藏和测试井的某些特性参数有关［式（1－29）、（1－30）］：

$$p_D = \frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}\Delta p$$

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot t$$

于是有

$$\lg p_D = \lg\Delta p + \lg\frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}$$

$$\lg t_D = \lg t + \lg\frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}$$

因此，当我们选用正确的试井解释模型时，一般说来也只有在这时，实际曲线与解释图版的样板曲线具有完全相同的形状，无量纲压力与实测压差、无量纲时间与实际时间，经取对数之后，都只相差一个常数：

$$\lg p_D - \lg\Delta p = \lg\frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B} = 常数$$

$$\lg t_D - \lg t = \lg\frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2} = 常数$$

所以，通过上下、左右平移，可以使实际曲线与样板曲线互相迭合，而且此时对应的坐标之差便是 $\lg\frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}$ 和 $\lg\frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}$，由此便可计算出渗透率 K 以及其他有关的参数。具体做法将在后面的章节详细叙述。

必须指出：确实存在这样的不同的系统，当施加同样的输入时，却得到相同的输出。这就意味着试井解释可能存在着多解性。不过，随着输出信息的增加，加上结合其他方面的研究成果进行综合解释，可能的解的数目就会减少，直至得到惟一的解。

还必须强调指出：准确地计量测试过程中的产量是非常重要的。事实上，在我们通常进行的油（气）井试井解释这一系统分析当中，产量是惟一的输入讯号。如果产量不准确，或者开井生产时间不够长，就绝对无法取得成功的试井解释。在进行试井设计和现场测试当中，对这一点必须予以高度注意和重视。

另外，在图版拟合分析中，我们要使用的实测曲线是压差与测试时间的双对数曲线，即在压降情形的 $\Delta p_{wf}(t) = p_i - p_{wf}(t)$ 与 t 的双对数曲线，在压力恢复情形的 $\Delta p_{ws}(\Delta t) = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(0) = p_{ws}(\Delta t) - p_{wf}(t_p)$ 与 Δt 的双对数曲线。因此，除了必须准确测量压降或压力恢复期间的压力值 $p_{wf}(t)$ 或 $p_{ws}(\Delta t)$ 及它们所对应的开井时间 t 或关井时间 Δt 之外，还必须准确测量开井前的井底静压 p_i 或关井前的井底流压 $p_{wf}(t_p)$。

什么样的试井解释才算得上“成功的”呢？

第一，解释的结果必须正确可靠。这就是说，油（气）藏和油（气）井类型的识别必须正确，各项参数的计算都必须准确可靠。就参数计算而言，如果用手工操作，误差应小于

10%；如果用计算机解释，误差应更小。

第二，要从测试资料中得到尽可能多的信息。

要得到成功的试井解释，测试前必须依据试井的目的做出切实可行的试井设计；测试时按照设计要求测得齐全、准确、可靠的产量和压力数据；还要有准确可靠的基础数据如 μ，ϕ，C_t 等；解释时采用先进的试井解释方法和试井解释软件。此外还要靠试井解释人员的丰富经验。现在，试井设计、资料采集、资料解释等都已经有了行业标准，有的油田还制订了自己的企业标准。严格执行这些标准，将对提高测试水平和质量、保证试井解释成功起到很好的作用。

第二节　试井解释模型

试井解释理论模型由下面三部分组成：基本模型、内边界条件和外边界条件。

一、基本模型

基本模型即油（气）藏的基本特性。可分为两大类：

（1）均质油（气）藏，即整个油（气）藏具有相同的性质；

（2）非均质油（气）藏，可分为若干种，最简单和常用的有双重孔隙介质油（气）藏和多层油（气）藏等等。

不论是哪一类油（气）藏，一般都作如下假定：

（1）油（气）层在平面上是无限的；

（2）油（气）层上、下均具有不渗透隔层。

另外，还假定：开井生产前整个油（气）藏具有相同的初始压力（初始条件）。

二、内边界条件

内边界条件是指井筒及其附近的情况。通常考虑的因素有：

（1）井筒储集效应；

（2）表皮效应；

（3）裂缝切割井筒。

三、外边界条件

外边界条件即油（气）藏外缘的情况。常见的有：

（1）无限大地层（无外边界）；

（2）不渗透边界；

（3）恒压边界；

（4）封闭系统。

任何理论模型都必须包括上述三个部分。反过来，这三个部分中各种情形的任一组合，都可构成一个理论模型。譬如：

（1）基本模型：均质油藏；

（2）内边界条件：具有井筒储集和表皮效应；

（3）外边界条件：地层无限大，无穷远处保持恒压。

这就是一个最常用的模型，其数学表达式是：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \dfrac{1}{r_D}\dfrac{\partial p_D}{\partial r_D} = \dfrac{\partial p_D}{\partial t_D} \\ p_D(r_D,0) = 0 \\ p_D(\infty,t_D) = 0 \\ C_D \dfrac{\mathrm{d}p_{wD}}{\mathrm{d}t_D} - \left(\dfrac{\partial p_D}{\partial r_D}\right)_{r_D=1} = 1 \\ p_{wD} = \left[p_D - S\left(\dfrac{\partial p_D}{\partial r_D}\right)\right]_{r_D=1} \end{cases}$$

第三节　流动阶段的识别

在双对数曲线 $\lg\Delta p$—$\lg t$ 上，各种不同类型的油（气）藏，它们在各个不同的流动阶段，均有各不相同的形状。因此，我们可以通过双对数曲线分析来判断或识别某些油（气）藏类型，并且区分或识别各个不同的流动阶段。由于这个缘故，双对数曲线被称作“诊断曲线”（Loglog Diagnosis）。稍后我们将会看到，压力导数曲线（它也是双对数曲线）是更有效的诊断曲线。

另外，每一个不同的情形或不同的流动阶段，都有其独特的特性，因此具有其独特的曲线图。这种在某一情形或某一流动阶段在某种坐标系（半对数坐标系或直角坐标系）下的独特的曲线，称为“特种识别曲线图”（Specialized Plot）。靠诊断曲线和特种识别曲线，可以比较准确地识别不同的情形和不同的流动阶段。

一、早期阶段

这里所说的早期阶段，包括了图 1－8 中所标示的第一、第二阶段。

1. 井筒储集

在纯井筒储集阶段，由于

$$\Delta p = \frac{qB}{24C} \cdot t \tag{2-1}$$

参看式（1－38）。但此处 q 为地面产量，故式子右边比式（1－38）多了一个因子 B，故

$$\lg\Delta p = \lg t + \lg\frac{qB}{24C}$$

由此可见，$\lg\Delta p$ 和 $\lg t$ 成线性关系，在直角坐标系中，$\lg\Delta p$ 与 $\lg t$ 成直线（或在双对数坐标系中，Δp 与 t 成直线），且其斜率为 1。因此，在纯井筒储集阶段，双对数曲线呈斜率为 1 的直线（因为在横坐标和纵坐标对数周期长度相同时，它与横坐标轴的夹角是 45°，因此，为简便起见，我们也常称它为 45°线）。早期资料斜率为 1 的双对数曲线，即 45°线，就是井筒储集的“诊断曲线”（图 2－3）。

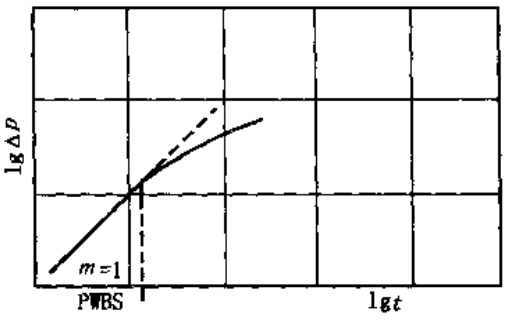


图 2－3　纯井筒储集的诊断曲线

如果井筒储集系数发生变化（详见第一章第

二节），双对数曲线将如图 2－4 所示。但在所有的解释图版中，都假定井筒储集系数 C 是一个常数。

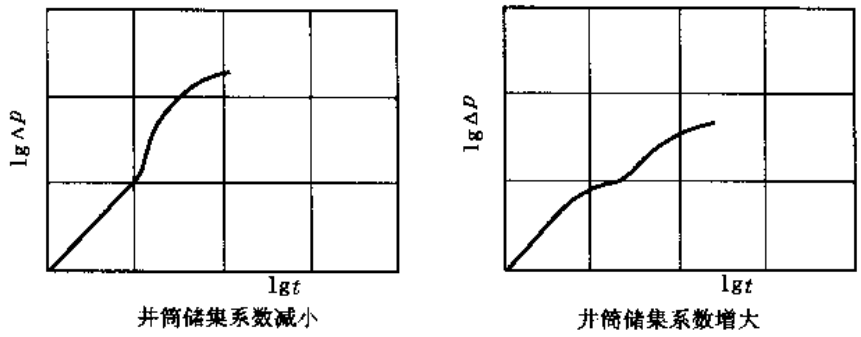


图 2－4　井筒储集系数发生变化时的诊断曲线

在纯井筒储集阶段（即双对数曲线呈斜率为 1 的直线的阶段），Δp 与 t 成正比［见式（2－1）］。所以在直角坐标系中，Δp 与 t 成一条过原点的直线，其斜率为 $m=\frac{qB}{24C}$（图 2－5）。这就是井筒储集阶段的特种识别曲线。由它的斜率 m 容易算出井筒储集系数 C：

$$C=\frac{qB}{24m} \tag{2-2}$$

井筒储集效应的特种识别曲线还有另外一个用途，就是识别和纠正时间误差。

有时，记录的开（关）井时间有误差，使得用早期资料画成的特种识别曲线不通过原点，或双对数曲线不呈 45°线。这时，可以利用图 2－5 加以纠正。办法是将直线平移到通过原点，就是说，若此特种识别曲线与横坐标轴（$\Delta p=0$）的交点的横坐标为 a（一般地说，$a>0$），则将此特种识别曲线向左平移 a，即将每一个点的时间值都减去 a，如图 2－6 所示。但必须注意：时间误差一般只可能是很小的；另外，不要将非 PWBS 的点误认为是 PWBS 的点而加以处理。

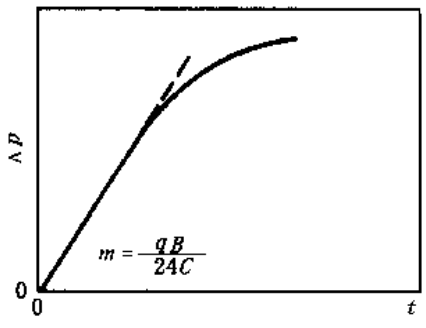


图 2－5　井筒储集的特种识别曲线

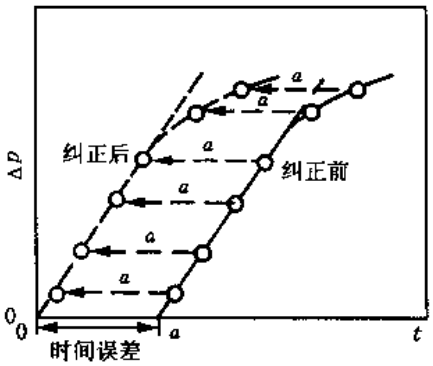


图 2－6　用井筒储集特种识别曲线纠正时间误差示意图

例 2－1　用上述方法判断下列测试早期数据是否存在时间误差，如果存在，试纠正之（已知 $p_i=26.714$MPa）：

t（h）	p（MPa）
0	26.714
0.0337	26.255
0.0370	26.145
0.0455	25.878
0.0540	25.621
0.0709	25.134
0.0879	24.683
⋮	⋮
⋮	⋮

首先算出各时刻的压差 $\Delta p = p_i - p$（下表中第 3 列）：

t（h）	p（MPa）	Δp（MPa）	纠正后时间 t'（h）
0	26.714	—	−0.0195
0.0337	26.255	0.459	0.0142
0.0370	26.145	0.569	0.0175
0.0455	25.878	0.836	0.0260
0.0540	25.621	1.093	0.0345
0.0709	25.134	1.580	0.0514
0.0879	24.683	2.031	0.0684
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮

把压差 Δp 与时间 t 画成双对数曲线，根本不是 45°线（图 2－7 中的“·”点）。画出直角坐标图，直线不通过原点（图 2－8）。这说明很可能存在时间误差，且此误差为 0.0195h。将直线平移到通过原点，实质上就是把每个时刻的时间值统统减去 0.0195h，就得到纠正后时间值（上表中最后一列）。用这些数值重新画双对数曲线，得 45°线（图 2－7 中“×”点）。这说明此误差是时间误差。

2. 无限导流性垂直裂缝切割井筒的情形（线性流动）

所谓“无限导流性垂直裂缝”（Infinite Conductivity Vertical Fracture），是指具有一条垂直裂缝的模型，这条裂缝的宽度为 0，沿着裂缝没有任何压力损失，详见第五章第一节。在这一情形，在早期，出现线性流动。所谓线性流动，是指在某一区域内，流体流动方向相同，流线为互相平行的直线，如图 2－9 所示。线性流动的特征是：压差与时间的二次方根

成正比［详见第五章式（5－2）和式（5－3）］：

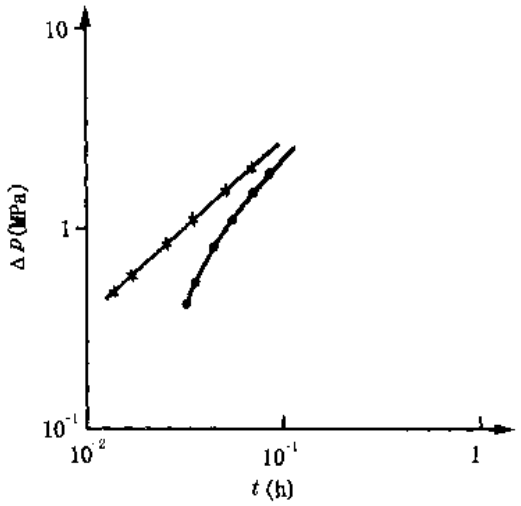


图 2－7　双对数曲线图（例 2－1）

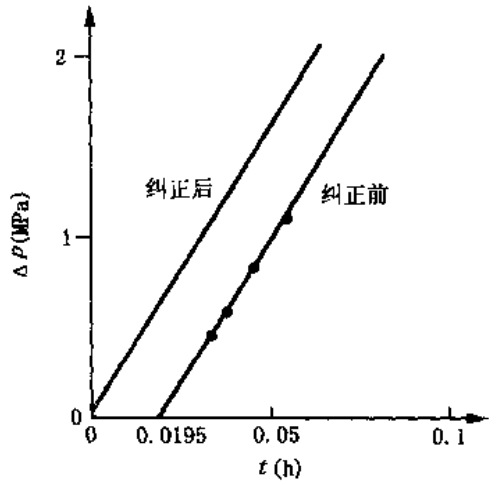


图 2－8　井筒储集特种识别曲线（例 2－1）

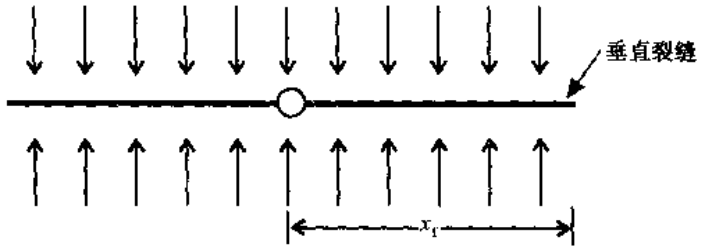


图 2－9　无限导流垂直裂缝井初期线性流动示意图

$$\Delta p = L\sqrt{t}$$

故

$$\lg\Delta p = \frac{1}{2}\lg t + \lg L$$

其中 L 为一正常数。所以，早期双对数曲线呈现斜率为$\frac{1}{2}$的直线（图 2－10a）。而在直角坐标系中，Δp 与$\sqrt{t}$成一条通过原点的直线（图 2－10b）。图 2－10 a 图和 b 图就分别是这一情形的诊断曲线和特种识别曲线。

3．有限导流性垂直裂缝切割井筒的情形（双线性流动）

“有限导流性垂直裂缝”（Finite Conductivity Vertical Fracture），指的是具有一条垂直裂缝的模型，这条裂缝有一定宽度（不为 0），沿着裂缝有压力损失（详见第五章第二节）。在这一情形，在早期，出现双线性流动：地层中垂直于裂缝的线性流动和沿着裂缝的线性流动，如图 2－11 所示。双线性流动的特征是：压差与时间的四次方根成正比［详见第五章式（5－14）和式（5－15）］：

$$\Delta p = L'\sqrt[4]{t}$$

$$\lg\Delta p = \frac{1}{4}\lg t + \lg L'$$

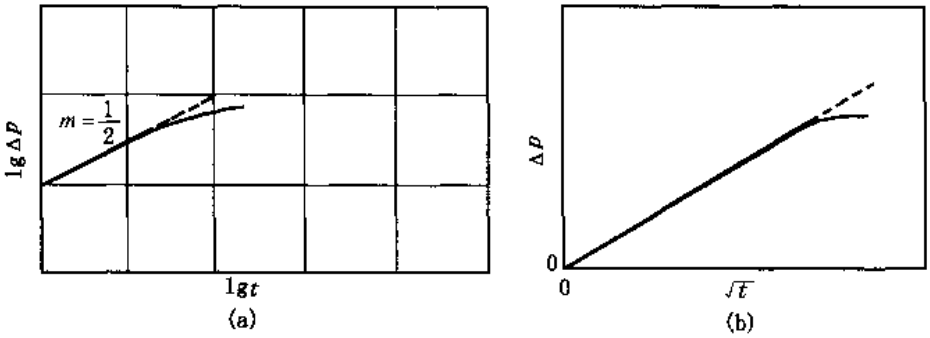


图 2－10　线性流动的诊断曲线和特种识别曲线

式中 L' 是一常数。因此，这一情形的诊断曲线是斜率为 $\frac{1}{4}$ 的双对数直线（图 2－12a），特种识别曲线则是直角坐标系中 Δp 与 $\sqrt[4]{t}$ 的过原点的直线（图 2－12b）。

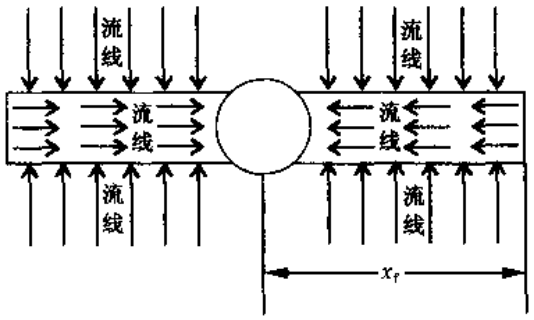


图 2－11　有限导流垂直裂缝井双线性流动示意图

4．半球形流和球形流动

有时，由于某些原因，只打开油层极小的局部。如底水油藏中的井为了防止或减缓底水锥进，只打开厚油层顶部，此时油层中流体，类似于从半球体的四面方向流向油层顶部的打开部分，其流线如图 2－13 所示。这种流动称

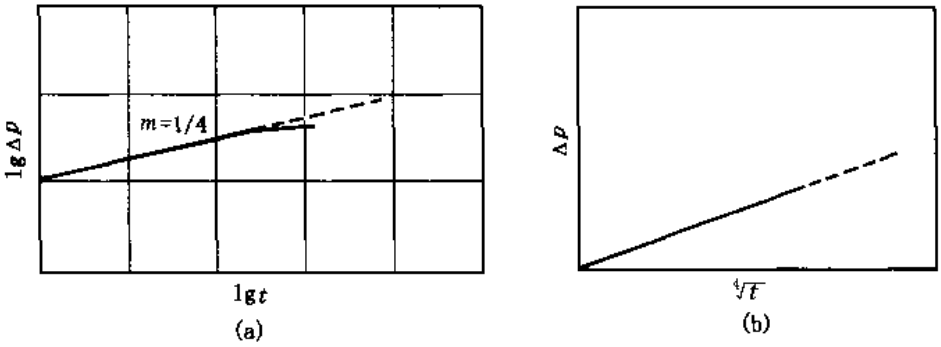


图 2－12　有限导流性垂直裂缝的诊断曲线和特种识别曲线

为半球形流动。

有时只在厚油层的某一部位打穿一个或若干孔眼，此时油层中流体从孔眼的上下、左右、前后四面八方流入孔眼，其流线如图 2－14 所示。这种流动称为球形流动。RFT 测试过程中的流动就是典型的球形流动。实际上，不论球形流动或半球形流动，从某一局部看，具有相同的流态，具有类似的压力变化规律。

在球形流动过程中，井底压力服从

$$\Delta p(t) = p_i - p_{wf}(t) = A - mt^{-\frac{1}{2}}$$

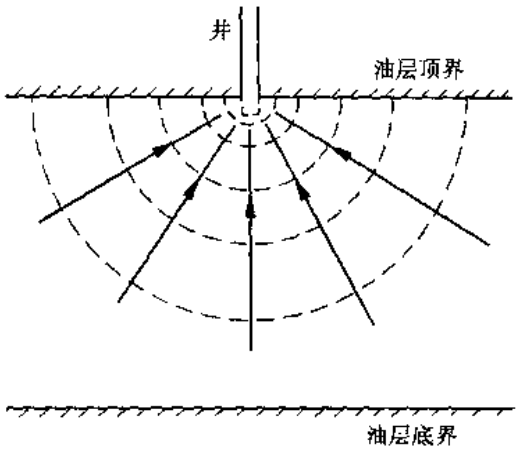


图 2－13　半球形流动流线方向示意图

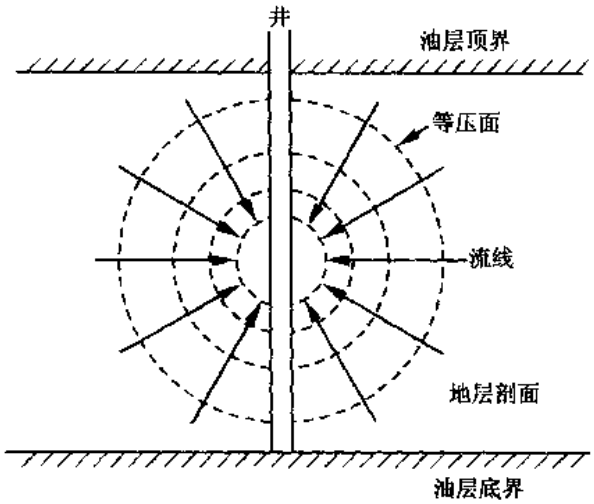


图 2－14　球形流动流线方向示意图

式中　$A=\dfrac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{r_w K}$

$$m=0.7184\frac{q\mu B}{r_w K}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t}{K}}$$

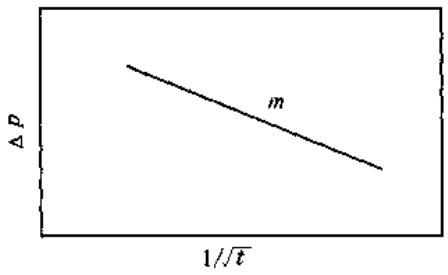


图 2－15　球形流动识别曲线

因此，在直角坐标图中，Δp 与 $\dfrac{1}{\sqrt{t}}$ 呈一直线，如图 2－15 所示。这就是球形流动的特种识别曲线。其诊断要用压力导数曲线，见第三章。

二、无限作用径向流动阶段（Infinite Acting Radial Flow Period）

这是图 1－8 中的第三阶段，也就是我们所熟悉的半对数曲线（MDH 曲线或赫诺曲线）呈直线的阶段。压降试验中，在这一阶段，“压降漏斗”径向地向外扩大，边界的影响还非常小，可以忽略，流动状态与无限大地层径向流动毫无两样，所以称作“无限作用径向流动阶段”，但一般都简称作“径向流动阶段”。这一阶段，如果油藏是均质的，双对数曲线呈现如图 2－16 的形状；如果油藏是非均质的，则呈现如图 2－17 的形状。

在压力导数曲线上，径向流动阶段具有十分明显的特征。压力导数曲线已经成为最主要的诊断工具，我们将在第三章详细介绍。

径向流动阶段的特种识别曲线就是井底流压 p_{wf}（t）与生产时间 t 的半对数曲线（压降情形），或井底关井压力 p_{ws}（Δt）与关井时间 Δt 或其函数 $\dfrac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$（或 $\dfrac{\Delta t}{t_p+\Delta t}$）的半对数曲线（压力恢复情形）。这就是我们通常所说的压降曲线和压力恢复曲线（图 2－18）。由第一章知：在径向流动阶段，它们呈现一条直线，其斜率为 $m=\dfrac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}$。量出这个斜率后，很容易由式（1－23）、（1－24）和式（1－25）算出 $\dfrac{Kh}{\mu}$、Kh 和 K，由式（1－26′）、（1－27′）或式（1－28′）算出 S。

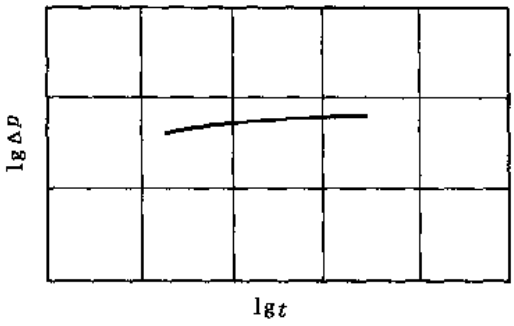


图 2－16　均质油藏径向流动阶段的双对数曲线

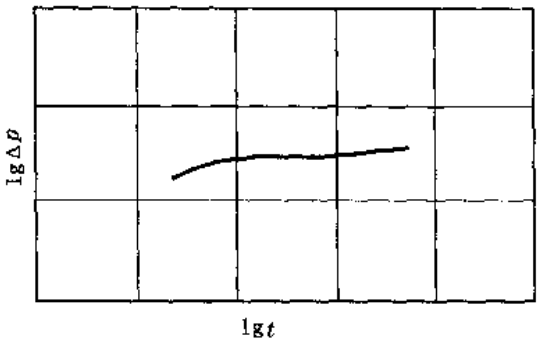


图 2－17　非均质油藏径向流动阶段的双对数曲线

与图 1－3 相比，图 2－18 加上了早期段，即由于井筒储存和表皮效应的影响，曲线偏离了直线而形成了弯曲的形状。

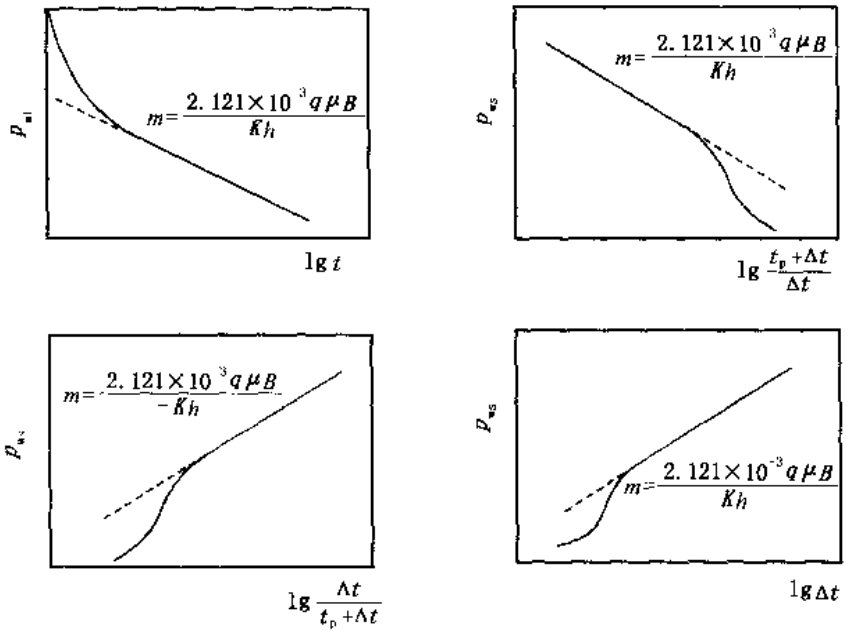


图 2－18　径向流动阶段的特种识别曲线

三、外边界反映阶段（晚期阶段）

1．恒压边界

对于油层来说，很大的气顶，非常活跃的边水或充分的边缘注水，都可能形成恒压边界。在恒压边界情形，到了后期，流动将达到稳定（即$\frac{\partial p}{\partial t}=0$），即所谓达到“稳定流动状态”（Steady State）。也就是说，压力这时只与距离（离井的远近）有关，而与时间无关；对于某一固定点而言，压力则是个常数。因此，在双对数曲线或半对数曲线上，都出现一条水平直线（图 2－19）。这就是恒压边界的诊断曲线和特种识别曲线。

2．不渗透边界

1）镜象原理

在讨论不渗透边界之前，先介绍一个很有用的“镜象原理”。所谓“镜象原理”，说的是

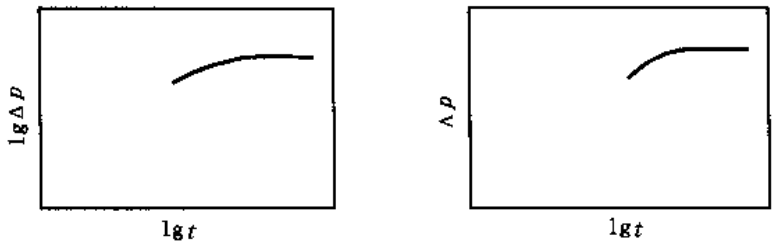


图 2－19　恒压边界的诊断曲线和特种识别曲线

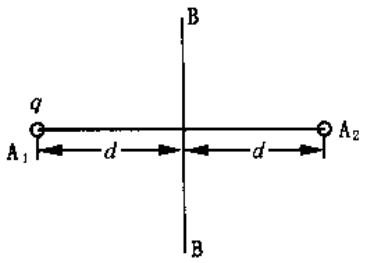


图 2－20　镜象原理示意图
（单条直线断层情形）

如果在一条密封直线断层 BB 附近，有一口油井 A_1 以产量 q 生产（图 2－20），由此所形成的压力变化，等价于不存在此断层 BB 时，该井 A_1 和另一口井 A_2 所造成的压力变化的叠加，而井 A_2 在与 A_1 对于断层 BB 成轴对称的位置上，且 A_2 的产量恰与 A_1 完全一样（图 2－20）。这就好像断层是一面镜子，A_2 是 A_1 的象一样。我们称井 A_1 为原井，井 A_2 为象井。

如果井 A_1 位于两条互相垂直的密封直线断层 BB 和 B′B 附近，则有 A_2、A_3 和 A_4 三口象井，就好像有两面互相垂直的镜子一样（图 2－21）。在断层呈更复杂的形状时，则象井数目将会更多，甚至多达无限多口。

我们只来考虑有一条密封直线断层的情形。这样选取坐标系：以 A_1、A_2 的连线为 x 轴，断层 BB 为 y 轴（图 2－22）。假设 A_1 与断层 BB 的距离为 d，则 A_1、A_2 的坐标分别为 $(-d, 0)$ 和 $(d, 0)$；而直线 BB 为 $x=0$。

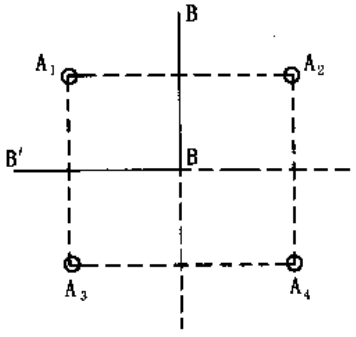


图 2－21　镜象原理示意图
（垂直相交断层情形）

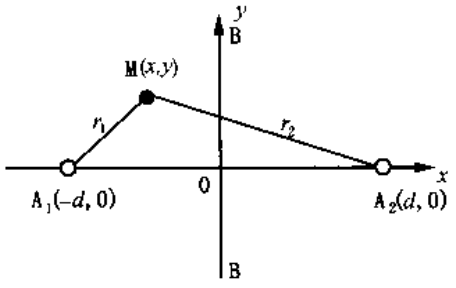


图 2－22　坐标系示意图

BB 既为不渗透边界，故沿着它没有水平方向的流动发生，即沿着 $x=0$ 渗滤速度 $\vec{V}$ 的水平分量 $V_x=0$：

$$V_x(x=0) = -\frac{K}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0} = 0$$

即

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \qquad (2-3)$$

式（2－3）就是不渗透边界的特征或充分必要条件。

设整个地层保持原始压力 p_i，井 A_1 自 $t=0$ 开始以稳定产量 q 生产，则我们原来的问题可归结为这么一个定解问题：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 p}{\partial y^2}=\dfrac{1}{3.6\eta}\dfrac{\partial p}{\partial t} & x<0 \\ p(t=0)=p_i \\ p(x=-\infty)=p(|y|=\infty,x<0)=p_i \\ \left(\dfrac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0}=0 \\ \left(\dfrac{\partial p}{\partial r_1}\right)_{r_1=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Khr_w} \end{cases} \tag{2-4}$$

镜象原理就是：定解问题式（2－4）的解与下面的定解问题式（2－5）在左半平面的解完全一致：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 p}{\partial y^2}=\dfrac{1}{3.6\eta}\dfrac{\partial p}{\partial t} \\ p(t=0)=p_i \\ p(|x|=\infty)=p(|y|=\infty)=p_i \\ \left(\dfrac{\partial p}{\partial r_1}\right)_{r_1=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Khr_w} \\ \left(\dfrac{\partial p}{\partial r_2}\right)_{r_2=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Khr_w} \end{cases} \tag{2-5}$$

其中 $r_1=\sqrt{(x+d)^2+y^2}$ 和 $r_2=\sqrt{(x-d)^2+y^2}$ 分别是点 M（x，y）到 A_1（$-d$，0）和 A_2（d，0）的距离（图 2－22）。

用叠加原理很容易解出式（2－5）。事实上，式（2－5）可以分解为如下两个定解问题式（2－6）和式（2－7），即

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p_1}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 p_1}{\partial y^2}=\dfrac{1}{3.6\eta}\dfrac{\partial p_1}{\partial t} \\ p_1(t=0)=p_i \\ p_1(|x|=\infty)=p_1(|y|=\infty)=p_i \\ \left(\dfrac{\partial p_1}{\partial r_1}\right)_{r_1=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Khr_w} \end{cases} \tag{2-6}$$

和

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p_2}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 p_2}{\partial y^2}=\dfrac{1}{3.6\eta}\dfrac{\partial p_2}{\partial t} \\ p_2(t=0)=0 \\ p_2(|x|=\infty)=p_2(|y|=\infty)=0 \\ \left(\dfrac{\partial p_2}{\partial r_2}\right)_{r_2=r_w}=\dfrac{q\mu B}{172.8\pi Khr_w} \end{cases} \tag{2-7}$$

而式（2－6）和式（2－7）的解 p_1 和 p_2 的和 $p=p_1+p_2$ 就是式（2－5）的解。

容易解得

$$p_1=p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_1^2}{14.4\eta t}\right)$$

$$p_2=\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_2^2}{14.4\eta t}\right)$$

故

$$p=p_1+p_2=p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left[\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_1^2}{14.4\eta t}\right)+\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_2^2}{14.4\eta t}\right)\right]$$

不难证明，沿着断层 BB，即 $x=0$，成立$\dfrac{\partial p}{\partial x}=0$。事实上，

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{2q\mu B}{345.6\pi Kh}\left[\frac{x+d}{r_1^2}\exp\left(\frac{r_1^2}{14.4\eta t}\right)+\frac{x-d}{r_2^2}\exp\left(\frac{r_2^2}{14.4\eta t}\right)\right]$$

注意到沿着 $x=0$ 有 $r_1=r_2$，故

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0}=0$$

这就证明了镜象原理的正确性。

2）用镜象原理处理不渗透边界问题

现设测试井附近有一条不渗透边界，譬如说封闭的直线断层。则由镜象原理可知，在测压降曲线过程中，压力分布剖面的变化将如图 2－23 所示。图 2－23a 中的曲线，以及图 2－23b、c 中上方的曲线 a 代表没有不渗透边界时的压力分布剖面，虚线代表由于不渗透边界的影响而产生的压降，位于图 2－23b、c 中下方的曲线 b 则是在不渗透边界影响下的压力分布剖面图。

很清楚，在不渗透边界的影响到达井筒后●，井底压降加快，因此，压降和时间的双对数曲线和半对数曲线都变陡，即出现“上翘”现象（图 2－24）。半对数曲线呈现两个直线段，它们的斜率之比为 1:2，由两条直线段的交点所对应的时间 t_x，可以计算测试井到直线断层的距离 d（图 2－24）：

$$d=1.423\sqrt{\frac{Kt_x}{\phi\mu C_t}} \tag{2-8}$$

● 严格地说应为“在不渗透边界对井底压力的影响足够大之后”，下同。

事实上，在测试井附近有一条密封直线断层的情形，由镜象原理和叠加原理有（不考虑表皮效应）：

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

其中 d 为测试井到断层的距离（m），而 $2d$ 则为测试井到其象井的距离（图 2－20）。

在开井后的一段时间里，t 相当小，并且 $2d \gg r_w$，$\mathrm{Ei}\left[-\frac{(2d)^2}{14.4\eta t}\right]$ 可以忽略不计。此时，

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

这与式（1－5）相一致。这一段时间也就是图 2－23a 和 b 所示的“断层影响尚未到达井筒”的阶段。在这一阶段，测试井井底压力的变化与不存在断层时一样。如前所述，由于 r_w 很小，条件 $\frac{r_w^2}{14.4\eta t} < 0.01$ 很容易满足，于是上式写成

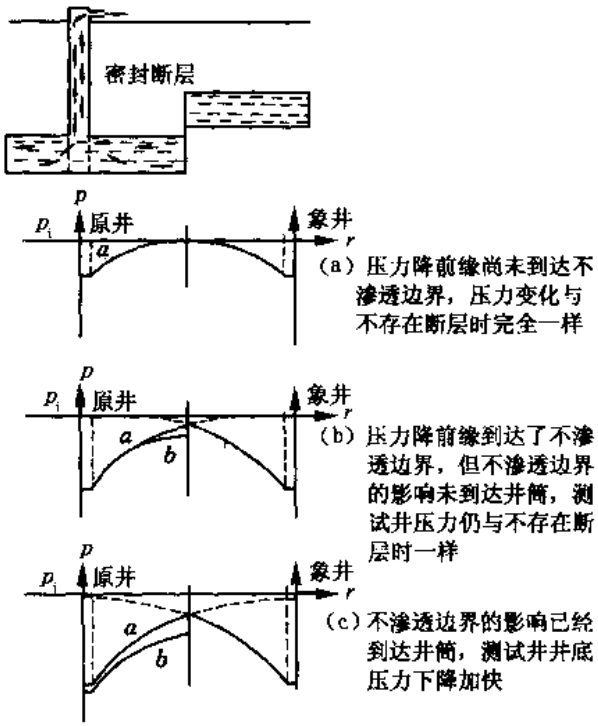


图 2－23　断层影响示意图

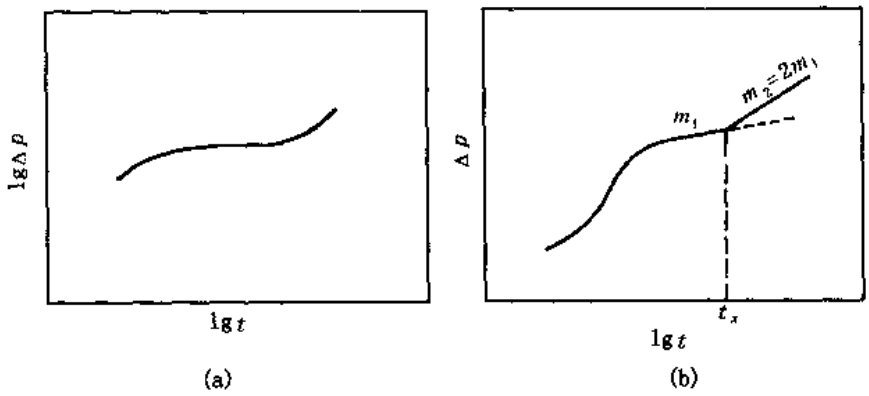


图 2－24　不渗透边界在双对数曲线和半对数曲线上的反应

$$p_{wf}(t) \approx p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}\lg\frac{8.085\eta t}{r_w^2}$$

$$= p_i - m\lg\frac{8.085\eta t}{r_w^2} = -m\lg t + \left(p_i - m\lg\frac{8.085\eta}{r_w^2}\right)$$

然而，当 t 值增大到一定数值后，断层的影响到达了测试井（图 2－23c），$\mathrm{Ei}\left[-\frac{(2d)^2}{14.4\eta t}\right]$ 不能再忽略不计，且当 $\frac{(2d)^2}{14.4\eta t} < 0.01$ 时，

$$p_{wf}(t) \approx p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left[\lg\frac{8.085\eta t}{r_w^2} + \lg\frac{8.085\eta t}{(2d)^2}\right]$$

$$= p_i - m\lg\left(\frac{8.085\eta t}{2r_w d}\right)^2 = -2m\lg t + \left(p_i - 2m\lg\frac{8.085\eta}{2r_w d}\right)$$

因此，压降半对数曲线（p_{wf}—lg$t$ 曲线）的前一阶段，呈斜率为 $-m$ 的直线段，而其后一阶段，呈斜率为 $-2m$ 的直线段。（若画 $\Delta p_{wf} = p_i - p_{wf}$与 lg$t$ 的关系曲线，则前一段为斜率为 m 的直线段，后一段为斜率为 $2m$ 的直线段，即所谓“上翘”，如图 2-24 所示）。

设两条直线段的交点对应的时间为 t_x（图 2-24b），则有

$$p_i - m\lg\frac{8.085\eta t_x}{r_w^2} = p_i - 2m\lg\frac{8.085\eta t_x}{2r_w d}$$

由此可得式（2-8）

$$d = 1.423\sqrt{\eta t_x} = 1.423\sqrt{\frac{Kt_x}{\phi\mu C_t}}$$

在压力恢复情形，若关井前的生产时间 t_p 比最大关井时间 Δt_{max}长得多，即 $t_p \gg \Delta t_{max}$，则上述说明和推导可以完全搬用，式（2-8）也可用来计算测试井到断层的距离

$$d = 1.423\sqrt{\frac{K\Delta t_x}{\phi\mu C_t}} \tag{2-9}$$

其中 Δt_x 则是在压力恢复 MDH 曲线（p_{ws}—lgΔt 曲线）上两直线段交点对应的时间。

在一般情形，即不一定成立 $t_p \gg \Delta t_{max}$的情形，由镜象原理和叠加原理有

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

$$+ \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left\{\mathrm{Ei}\left[-\frac{(2d)^2}{14.4\eta(t_p+\Delta t)}\right] - \mathrm{Ei}\left[-\frac{(2d)^2}{14.4\eta\Delta t}\right]\right\}$$

$$\approx p_i - \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} + \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left\{\mathrm{Ei}\left[-\frac{4d^2}{14.4\eta(t_p+\Delta t)}\right]\right.$$

$$\left. - \mathrm{Ei}\left(-\frac{4d^2}{14.4\eta\Delta t}\right)\right\}$$

当 Δt 很小时，$\mathrm{Ei}\left(-\frac{4d^2}{14.4\eta\Delta t}\right)$可以忽略，且 $t_p+\Delta t \approx t_p$，故

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{4d^2}{14.4\eta t_p}\right) - \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$$

$$= p_i + \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right) - m\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$$

而当 Δt 很大时，$\mathrm{Ei}\left(-\frac{4d^2}{14.4\eta\Delta t}\right)$不能忽略，有

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - 2m\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$$

因此，在赫诺曲线上，也出现两个直线段，它们的斜率之比也为1:2。设它们的交点对应的赫诺时间值为$\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_x$，则

$$p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right)-m\lg\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_x=p_i-2m\lg\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_x$$

由此可得

$$2.303\lg\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_x=-\mathrm{Ei}\left(-\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right)$$

对 d 求解此方程，便得到测试井到断层的距离。其做法是：首先计算左边，然后通过查Ei函数曲线或Ei函数表，由 $\mathrm{Ei}\left(-\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right)$ 值反求 $\frac{d^2}{3.6\eta t_p}$ 值，最后计算出 d：

$$d=\sqrt{\left(\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right)\times 3.6\eta t_p}=\sqrt{\left(\frac{d^2}{3.6\eta t_p}\right)\times\frac{3.6Kt_p}{\phi\mu C_t}} \tag{2-10}$$

还有一种用无量纲曲线和恢复曲线来计算测试井到断层的距离的方法，将在第三章第三节中叙述。

在压力导数曲线上，不渗透边界有非常明显的特征，详见第三章第四节。

3. 封闭系统

由不渗透边界所围成的油藏称为封闭系统。在测压降曲线过程中，当所有的不渗透边界影响都到达井筒以后，油藏中的压力（或压差）随时间的变化率将固定不变，即

$$\frac{\partial p}{\partial t}=\text{常数}\neq 0$$

油层中不同时刻的压力分布曲线彼此平行，如图2-25所示。因此，在这一阶段，压降（或压力）与时间成线性关系，即所谓达到了“拟稳定流动状态”（Pseudo-Steady State）。

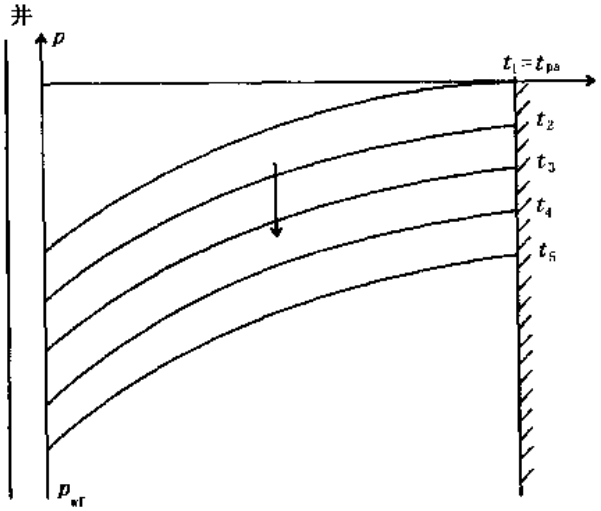


图2-25 拟稳定流动压力分布示意图

在拟稳定流动阶段，从油井中产出原油，全靠整个油藏中的弹性能量。设在 $\mathrm{d}t$（h）时间内压力下降了 $\mathrm{d}p_{wf}$（MPa），则

$$\frac{qB}{24}=-V_pC_t\frac{\mathrm{d}p_{wf}}{\mathrm{d}t}$$

其中 V_p 为油藏的孔隙体积（m^3）。故

$$\frac{\mathrm{d}p_{wf}}{\mathrm{d}t}=-\frac{qB}{24V_pC_t} \tag{2-11}$$

积分，得

$$p_{wf} = -\frac{qB}{24V_pC_t}t + p_{wfint} \tag{2-12}$$

或

$$\Delta p_{wf} = \frac{qB}{24V_pC_t}t + \Delta p_{int} = \frac{qB}{24Ah\phi C_t}t + \Delta p_{int} \tag{2-13}$$

式中 A 为封闭系统的面积（m^2）。可以看到，在直角坐标系中，p_{wf}与 t（同样，Δp_{wf}与 t）成一直线，其斜率为 $-\frac{qB}{24V_pC_t}$（在 Δp_{wf}—t 曲线情形为$\frac{qB}{24V_pC_t}$），为方便起见，用 m^* 表示斜率的绝对值：$m^* = \frac{qB}{24V_pC_t}$。这就是封闭系统的特种识别曲线（图 2-26b 或 c）。p_{wfint}和 Δp_{int}分别为直线 p_{wf}—t 和 Δp_{wf}—t 的纵截距，而 $\Delta p_{int} = p_i - p_{wfint}$。由斜率的绝对值 m^* 可以求得该封闭系统的可采储量 N_R：

$$N_R = V_pS_o = \frac{qBS_o}{24m^*C_t} \tag{2-14}$$

其中 S_o 为含油饱和度，m^* 的单位是 MPa/h，N_R 的单位是 m^3。

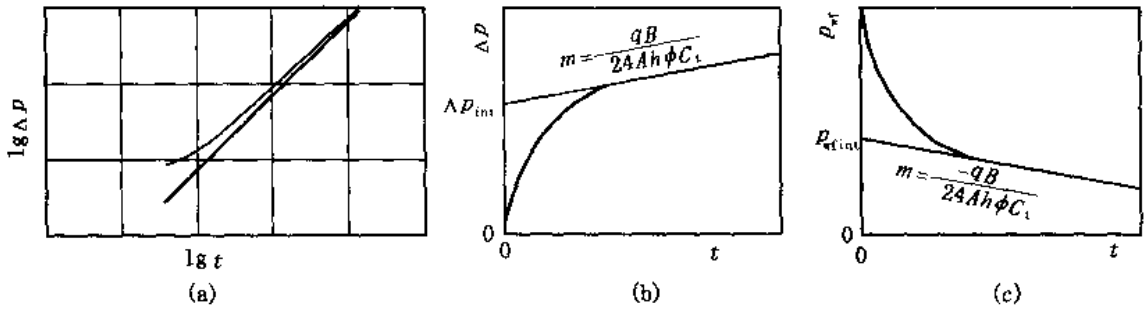


图 2-26　封闭系统的诊断曲线和特种识别曲线

（a）拟稳定流动阶段的压差曲线（双对数曲线）；

（b）拟稳定流动阶段的压差曲线（直角坐标图）；

（c）拟稳定流动阶段的流压曲线（直角坐标图）

为了求出一个封闭系统的储量而专门进行的压降试井，称为“油藏探边测试”（Reservoir Limit Testing，简称 RLT）。对于任何封闭系统（如小断块油、气藏），用探边测试均可比较准确地求出其可采储量。尤其是对于那些很难确定其含油气面积、有效厚度和孔隙度的特殊油（气）藏［例如裂缝性油（气）藏］，计算储量的容积法不灵验了，但探边测试方法却可以奏效，这是其特别优越之处。

在此情形，定义无量纲时间为［式（1-35）］：

$$t_{DA} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_tA}t$$

把式（2-13）写成无量纲形式，得

$$p_D - p_{Dint} = 2\pi t_{DA} \tag{2-15}$$

两边取对数得

$$\lg(p_D - p_{Dint}) = \lg t_{DA} + \lg(2\pi)$$

故 $\lg(p_D - p_{Dint})$ 与 $\lg t_{DA}$ 成一直线，其斜率为 1。而当 t 增大时，$\lg(p_D - p_{Dint})$ 与 $\lg p_D$ 之差将变小，$\lg p_D$ 与 $\lg t_{DA}$ 的关系曲线将接近于一条斜率为 1 的直线。

同样，由式（2－13）可得

$$\lg(\Delta p_{wf} - \Delta p_{int}) = \lg t + \lg \frac{qB}{24Ah\phi C_t} \tag{2-16}$$

当 t 增大时，$\lg(\Delta p_{wf} - \Delta p_{int})$ 与 $\lg \Delta p_{wf}$ 之差将变小，$\lg \Delta p_{wf}$ 与 $\lg t$ 的关系曲线将接近于一条斜率为 1 的直线。由此可知：封闭系统拟稳定流动阶段的样板曲线，是双对数坐标系中 p_D 与 t_{DA} 的斜率接近 1 的直线；同样，Δp_{wf} 与 t 的关系曲线也将接近于一条斜率为 1 的直线（图 2－26a），这就是拟稳定流动阶段的诊断曲线。

例 2－2 海南金凤构造的一个小断块中打了一口探井，钻至一个泥岩裂缝段时发生井涌，涌出油和天然气。此泥岩裂缝段的厚度为 4m（电测解释结果），含油面积和孔隙度等参数难于确定。经过常规试油认定此层具有一定产能。为了落实其储量，决定再进行油藏探边测试。用 3mm 油嘴开井，下入电子压力计测量井底流动压力，测得的井底流压变化（直角坐标）曲线及其双对数曲线分别见图 2－27 和图 2－28。开井 50 多小时后，压差曲线和导数曲线（导数曲线将在第三章第四节详细介绍）均呈斜率大致相同的直线（图 2－28）；流压 p_{wf} 与开井时间 t 呈一条很好的直线，其斜率（取绝对值）为 $m^* = 0.02\text{MPa/h}$（图 2－27）。其他参数如下：

$$q_o = 27.19\text{m}^3/\text{d}$$

$$B_o = 1.568\text{m}^3/\text{m}^3$$

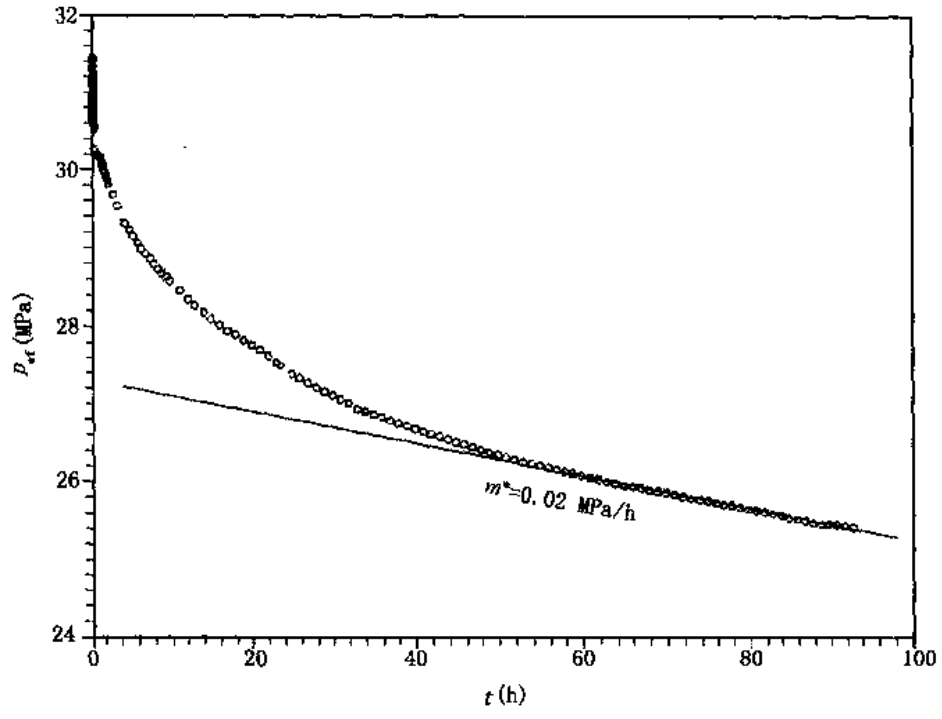


图 2－27　金凤 6 井探边测试曲线（例 2－2）

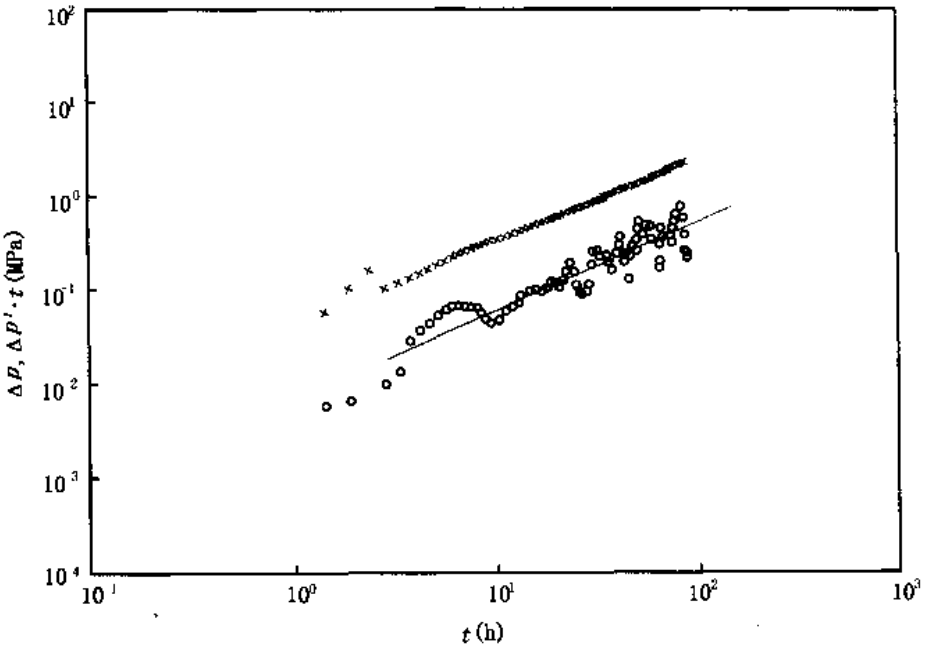


图 2－28　金凤 6 井探边测试压差和导数曲线（例 2－2）

$$S_o \approx 1.0$$

$$C_t \approx C_o = 1.2417 \times 10^{-3}\text{MPa}^{-1}$$

代入式（2－14）便得到与本井相连通的裂缝系统的可采储量：

$$N_R = \frac{qB_oS_o}{24m^* C_t} = \frac{27.19 \times 1.568 \times 1}{24 \times 0.02 \times 1.2417 \times 10^{-3}} = 71407\text{m}^3$$

后来试采证明：该断块的储量确实很小。

第四节　识别油（气）藏类型的重要性

综上所述，双对数曲线（诊断曲线）的各个部分分别表征各个不同流动阶段的特性；各个不同的流动阶段各自有不同的特种识别曲线；从各个不同的流动阶段可以求出部分特性参数。把诊断曲线各个阶段的特征、对应的特种识别曲线及可求得的参数在一张图上标出，得示意图 2－29。

在试井解释中，油（气）藏类型的识别是头等重要的。如果油（气）藏类型识别错了，一切都将是错的。不仅如此，对不同类型的油（气）藏，我们通常用半对数分析所得的参数的意义也不相同。例如渗透率 K，在均质油（气）藏情形，无疑就是油（气）藏的渗透率；在双重介质油（气）藏情形，它却是裂缝系统的渗透率，常用 K_f 表示；而在多层油（气）藏情形，它表示的是各层的综合平均值，即 $\overline{K}$。又如表皮系数 S，在均质油（气）藏情形，$S>0$、$S\approx0$ 和 $S<0$ 分别象征着油（气）层受污染、不受污染和措施见效，而在非均质油（气）藏却不然。一般说来，在双重孔隙介质油（气）藏情形，正常井的表皮系数为负值，措施见效井的表皮系数 $S<-3$。再如井筒储集系数 C，在均质油（气）藏情形，如果井筒

中充满单相流体，则

$$C_{完井} \approx C_{试井}$$

而在双重孔隙介质油（气）藏，则往往

$$C_{完井} \ll C_{试井}$$

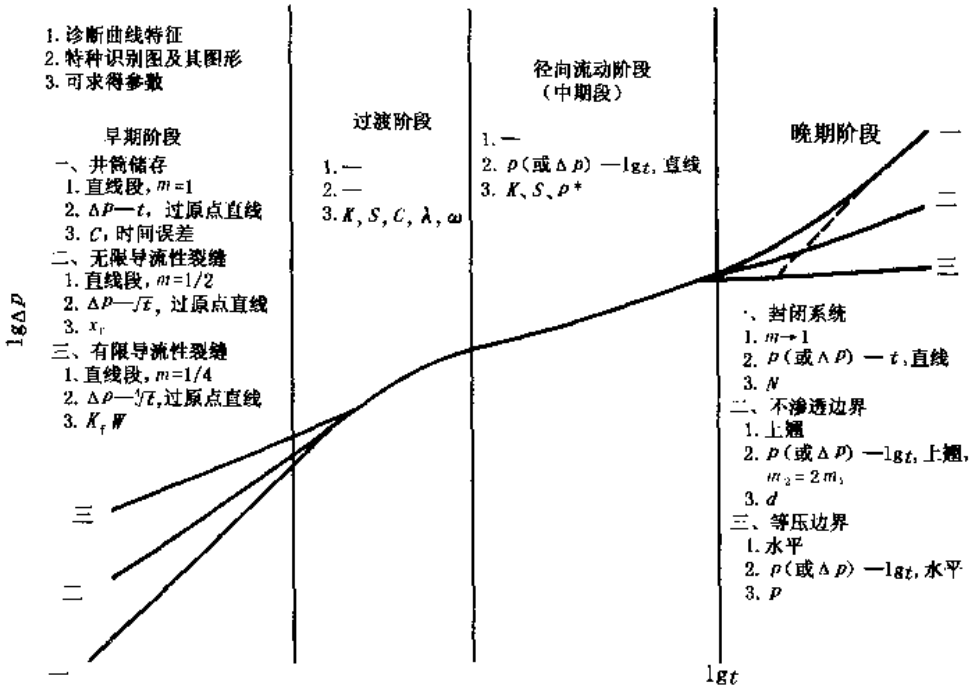


图 2-29　各个流动阶段特性图

识别油（气）藏类型，除了靠上面所介绍的诊断曲线和特种识别曲线之外，更主要的是要靠压力导数曲线，详见第三章第四节。

第三章　均质油藏的试井解释

第一节　压力图版及图版拟合方法简介

现代试井解释方法的重要手段之一是解释图版拟合，或称为样板曲线拟合（Type Curve Match）。通过图版拟合，可以得到关于油藏及油井类型、流动阶段等多方面的信息，还可以算出 K，S，C 等参数。

如第二章第一节所述，试井解释图版就是在某种坐标系中画好的一组或若干组曲线，即样板曲线。在绘制解释图版时选取的变量不同，得到的图版也就不一样；考虑的因素不同，得到的图版也不相同。现在已经发表了许多试井解释图版，新的试井解释图版可能还将不断涌现。我们将从下一节开始，着重介绍弗洛彼托石油公司 Gringarten（格林加登）和 Bourdet（布德）图版的应用，这一节先简单介绍几种别的较重要的或较常用的图版。

一、Ramey（雷米）图版及图版拟合方法

雷米图版是无限大均质地层中一口具有井筒储存和表皮效应的井的解释图版（图3－1）。

在双对数坐标系中，纵坐标表示无量纲压力 p_D［定义见式（1－29）］，横坐标表示无量纲时间 t_D［定义见式（1－30）和式（1－31）］；每一组曲线对应一个无量纲井筒储集系数 C_D 值［定义见式（1－32）］，各组中的每一条曲线对应一个表皮系数 S 值。

在纯井筒储集阶段，如前所述，曲线呈现斜率为 1 的直线。然后逐渐过渡到与 $C_D=0$ 的曲线相重合。前一段 $C_D\neq0$ 的曲线与后一段 $C_D=0$ 的曲线的分界点，即 $C_D\neq0$ 的曲线与 $C_D=0$ 曲线的结合点，就是径向流动阶段的开始（也就是井筒储集阶段的终止）。

解释图版拟合的方法是：

第一步：在尺寸与图版完全一样的透明双对数纸上画出实测压差 $\Delta p=p_i-p_{wf}(t)$ 和时间 t 的关系曲线（注意：要用压差 Δp，而不能用压力 p_{wf}，这是因为我们使用的无量纲压力实质上是无量纲压差）。若没有这种透明双对数坐标纸，可用普通透明纸蒙在图版上（图 3－2a），在透明纸上画出与图版完全一样的对数周期框格（图 3－2b），依据实测资料选用并标定坐标（图 3－2c），再按图版的坐标网格，在透明纸上画出实测曲线（图 3－2d）。画实测曲线时，一般只画出数据点而不连线。

第二步：把画好的实测曲线图在解释图版上作上下平移和左右平移（注意：平移过程中一定要保持两张图的对应坐标轴分别互相平行），在图版中找出一条与实测曲线最相吻合的样板曲线（图 3－2e）。一般来说，在进行拟合之前已经算出 C 和 C_D 值（见第二章第三节），故拟合时只需在已知的 C_D 值那一组样板曲线当中进行。拟合好以后，选择一点（任何一点都行，但为了简便起见，选择一个容易读数的点，如实测曲线图的对数周期框格点），读出“拟合值”，即从解释图版上读出这一点的 p_D 值和 t_D 值，并从实测曲线图上读出这一点的 Δp 值和 t 值。这一点称为“拟合点”，$\frac{p_D}{\Delta p}$ 和 $\frac{t_D}{t}$ 分别称为“压力拟合值”和“时间拟合值”，记作 $(\frac{p_D}{\Delta p})_{拟合}$ 和 $(\frac{t_D}{t})_{拟合}$。另外，从拟合的样板曲线上读出 S 值，这称作“曲线拟合值”。

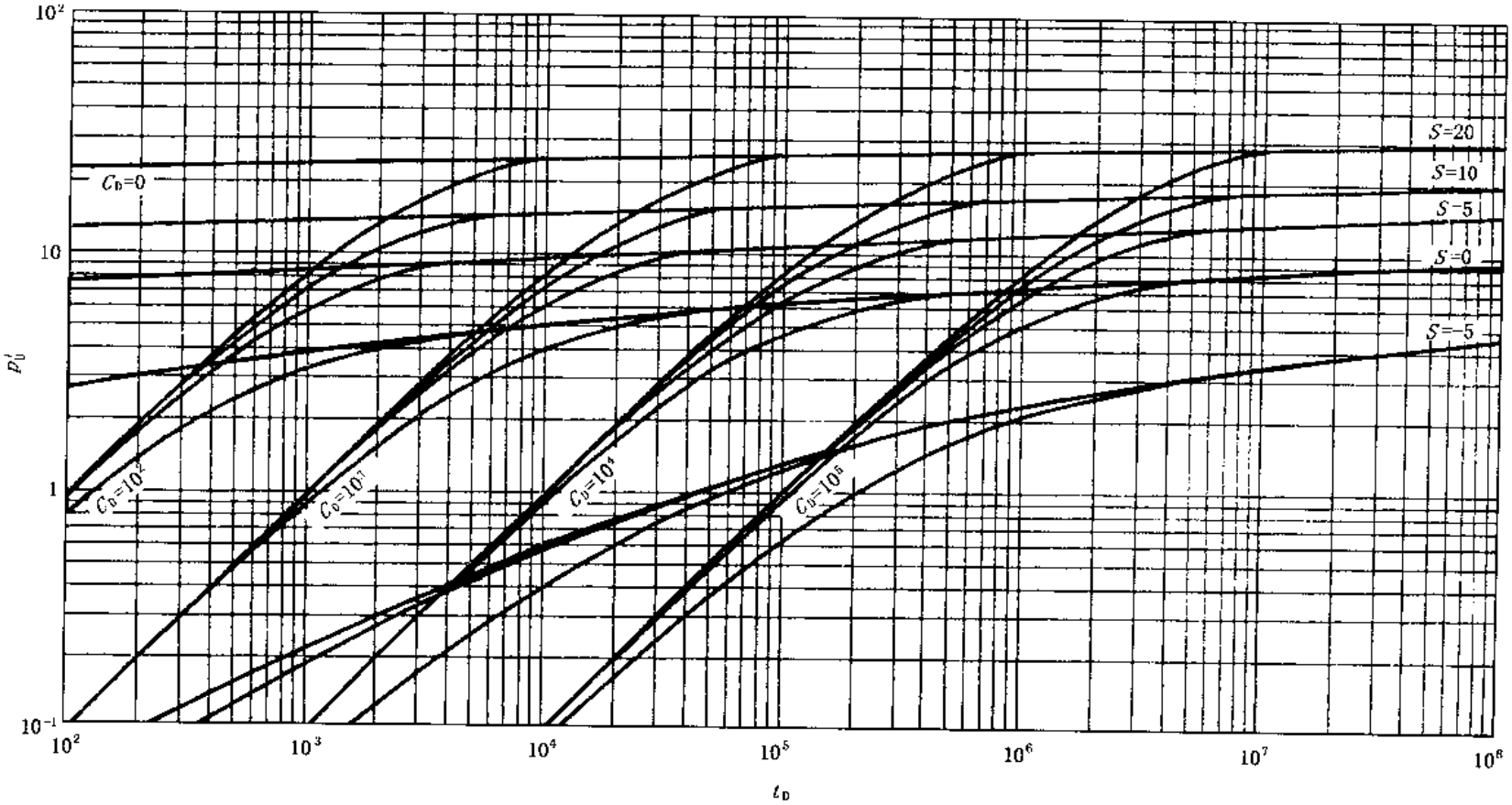

10^2
10
1
10^{-1}
p_D'
C_D=0
$C_D=10^2$
$C_D=10^3$
$C_D=10^4$
$C_D=10^5$
S=20
S=10
S=5
S=0
S=-5
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
10^8
t_D

图 3－1　雷米图版

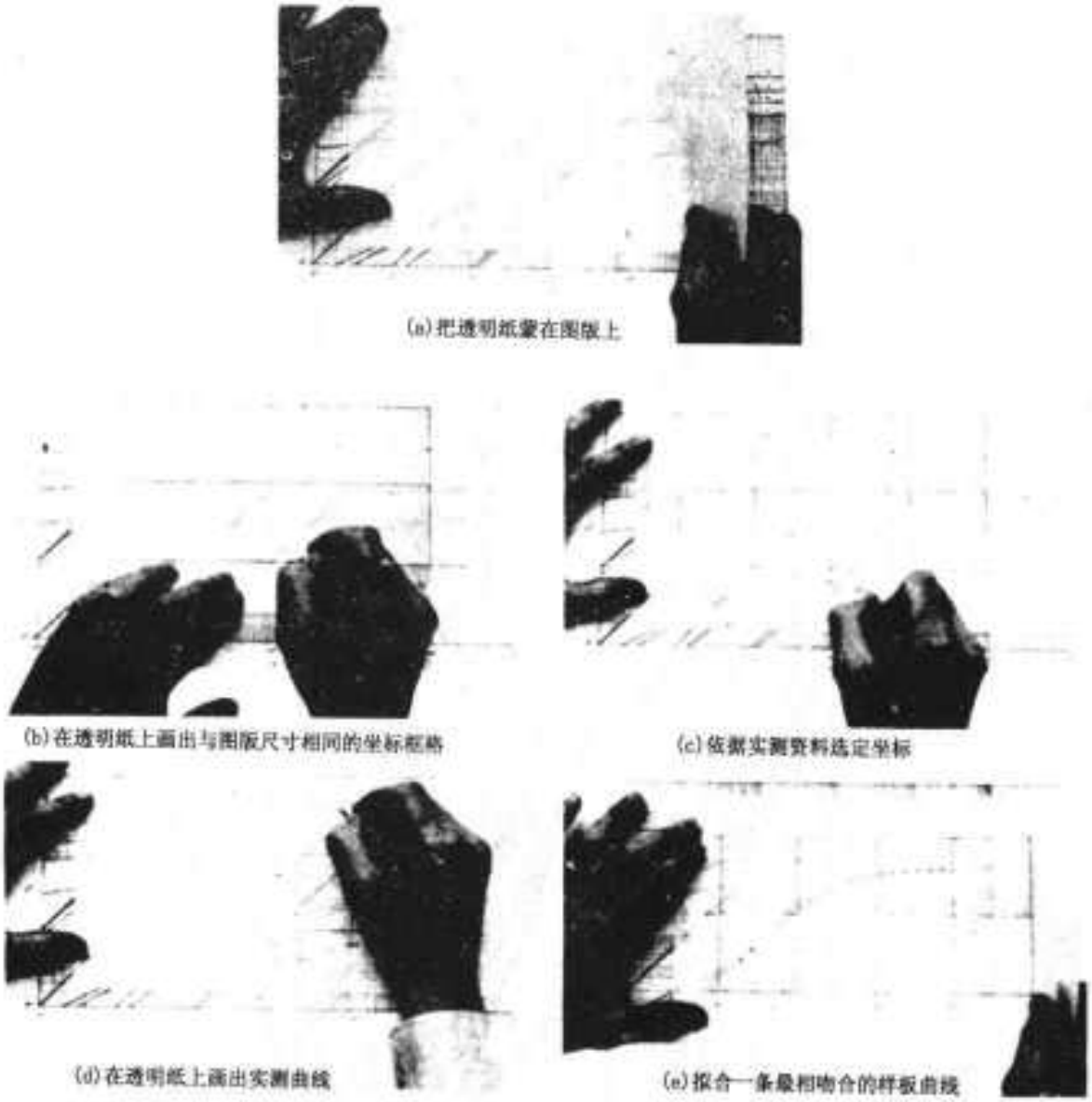


图 3-2　图版拟合的步骤

如果 C 值为未知，则还需读出 C_D 值。

第三步：由压力拟合值

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}=\frac{(p_D)_{拟合点}}{(\Delta p)_{拟合点}}$$

和时间拟合值

$$\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合}=\frac{(t_D)_{拟合点}}{(t)_{拟合点}}$$

计算流动系数

$$\frac{Kh}{\mu}=1.842\times10^{-3}qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{3-1}$$

地层系数

$$Kh = 1.842 \times 10^{-3} q\mu B \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{3-2}$$

有效渗透率

$$K = 1.842 \times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h} \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{3-3}$$

和 $\phi h C_t$ 值

$$\phi h C_t = \frac{3.6Kh}{\mu r_w^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合}} \tag{3-4}$$

如果井筒储集系数 C 为未知，则可由曲线拟合值 C_D 算出

$$C = 2\pi\phi C_t h r_w^2 (C_D)_{拟合}$$

另外，从曲线拟合值还可得到表皮系数 S 值。

很显然，拟合点可以任意选取，这对计算结果毫无影响。但为了简便起见，可尽量选取容易读数的拟合点，譬如选 $\Delta p = 1$MPa，$t = 1$h。这个点（1，1）就在实测曲线图的对数周期框格的交点上，不但读数特别容易，而且用来计算拟合值或计算参数也特别简单。

雷米图版还适用于井筒储集系数发生变化的情形。这时，曲线拟合如图 3-3 所示。

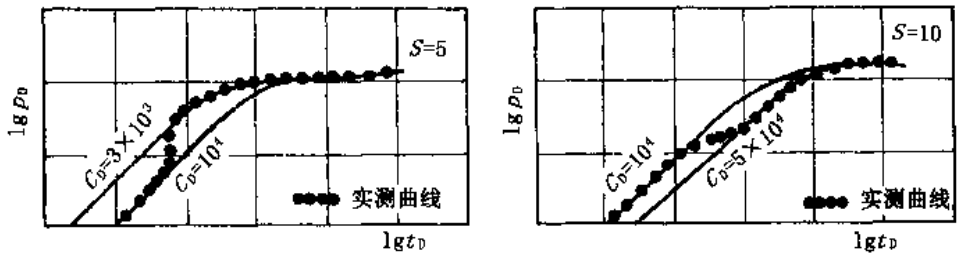


图 3-3　井筒储集系数发生变化时的雷米图版拟合

雷米图版的缺点是：在事先无法算出 C_D 值的情形，拟合比较困难，误差也比较大。

例 3-1　表 3-1 是均质油藏中一口井的压力降落数据。其他资料如下：

$p_i = 24.148$MPa

$q = 143.09\text{m}^3/\text{d}$

$B = 1.2$

$\phi = 0.15$

$\mu = 1.6\text{mPa} \cdot \text{s}$

$C_t = 1.422 \times 10^{-3}(\text{MPa})^{-1}$

$h = 16.15$m

$r_w = 0.0878$m

表 3－1　压降数据表（例 3－1）

t（h）	p_{wf}（MPa）	t（h）	p_{wf}（MPa）
0.00127	23.957	0.127	19.184
0.00169	23.896	0.169	18.846
0.00254	23.779	0.254	18.432
0.00339	23.666	0.339	18.172
0.00424	23.558	0.424	17.984
0.00508	23.453	0.508	17.837
0.00678	23.254	0.678	17.613
0.00847	23.067	0.847	17.445
0.0127	22.647	1.271	17.149
0.0169	22.283	1.695	16.943
0.0254	21.636	2.542	16.657
0.0339	21.219	3.390	16.457
0.0424	20.846	4.237	16.303
0.0508	20.541	5.084	16.177
0.0678	20.075	6.780	15.979
0.0847	19.736	8.475	15.826

试用雷米图版拟合法做出试井解释。

第一步：计算压差（表 3－2）。

表 3－2　压差数据表（例 3－1）

t（h）	p_{wf}（MPa）	Δp（MPa）	t（h）	p_{wf}（MPa）	Δp（MPa）
0.00127	23.957	0.191	0.127	19.184	4.964
0.00169	23.896	0.252	0.169	18.846	5.302
0.00254	23.779	0.369	0.254	18.432	5.716
0.00339	23.666	0.482	0.339	18.172	5.976
0.00424	23.558	0.590	0.424	17.984	6.164
0.00508	23.453	0.695	0.508	17.837	6.311
0.00678	23.254	0.894	0.678	17.613	6.535
0.00847	23.067	1.081	0.847	17.445	6.703
0.0127	22.647	1.501	1.271	17.149	6.999
0.0169	22.283	1.865	1.695	16.943	7.205
0.0254	21.686	2.462	2.542	16.657	7.491
0.0339	21.219	2.929	3.390	16.457	7.691
0.0424	20.846	3.302	4.237	16.303	7.845
0.0508	20.541	3.607	5.084	16.177	7.971
0.0678	20.075	4.073	6.780	15.979	8.169
0.0847	19.736	4.412	8.475	15.826	8.322

第二步：在透明双对数坐标纸上画实测 Δp—t 曲线，得图 3－4。注意：画实测曲线必

须用压差 $\Delta p = p_i - p_{wf}$对时间 t 作图。

第三步：计算 C_D 值。首先由表 3－2 中的早期数据画出井筒储集特种识别曲线，并计算 C 值（方法见第二章第三节；我们将在本章第二节例 3－4 中用表 3－1 中的早期数据进行这个计算），得 $C = 4.83 \times 10^{-2} m^3/MPa$。然后计算 C_D 值［式（1－32）］：

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi h C_t r_w^2}$$

$$= \frac{4.83 \times 10^{-2}}{2\pi \times 0.15 \times 16.15 \times 1.422 \times 10^{-3} \times 0.0878^2}$$

$$= 290$$

第四步：图版拟合。已经算得 $C_D = 290$，我们只需在最接近这个数值的 C_D 曲线组，即 $C_D = 100$ 那一组样板曲线中进行拟合。结果实测曲线与该组中 $S = 0$ 的样板曲线相重合，拟合点为（图 3－4）：

$$p_D = 0.78, \Delta p = 1MPa$$

$$t_D = 1.3 \times 10^4, t = 1h$$

故得压力拟合值 $\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} = \frac{0.78}{1} = 0.78$

时间拟合值 $\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合} = \frac{1.3 \times 10^4}{1} = 1.3 \times 10^4$

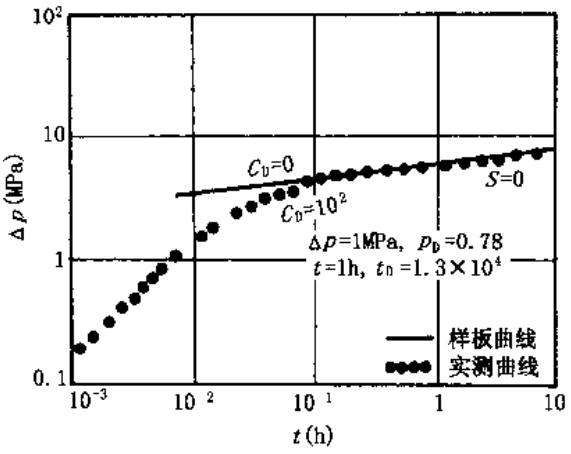


图 3－4 实测曲线与样板曲线拟合图（例 3－1）

曲线拟合值 $S = 0$

由式（3 1）、式（3 2）和式（3－3）得

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$= 1.842 \times 10^{-3} \times 143.09 \times 1.2 \times 0.78 = 0.2467 \left(\frac{\mu m^2 \cdot m}{mPa \cdot s}\right)$$

$$Kh = \left(\frac{Kh}{\mu}\right) \cdot \mu = 0.2467 \times 1.6 = 0.3947(\mu m^2 \cdot m)$$

$$K = \frac{Kh}{h} = 0.3947 \div 16.15 = 0.02444(\mu m^2)$$

如果我们并不知道 C，ϕ，h，C_t 的数值，因而在进行拟合前无法算出 C_D，拟合就得在各组 C_D 曲线中进行，当然就更困难了。这种情形下，可由时间拟合值计算（$\phi h C_t$）的数值［式（3－4）］：

$$\phi\mu C_t = \frac{3.6Kh}{\mu r_w^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合}}$$

$$= \frac{3.6 \times 0.2467}{0.0878^2} \times \frac{1}{1.3 \times 10^4}$$

$$= 8.86 \times 10^{-3} (m^3/MPa)$$

雷米图版的手工拟合可能产生较大的误差。这是因为，图版中只有 $C_D=10^2$，10^3，10^4…的样板曲线，而想靠眼睛估计，在 $C_D=100$ 和 $C_D=1000$ 中内插一组 $C_D=290$ 的样板曲线，再与实测曲线拟合，又非常困难。因此，我们只能在 $C_D=100$ 曲线组中找一条样板曲线拟合 $C_D=290$ 的实测曲线。这就使得拟合值（主要是时间拟合值）很不准确。本例中计算的 $\phi\mu C_t$ 误差很大，就是因为这个缘故。

从图版拟合可知，压降进入了径向流动阶段。后面 14 个点已落在 $C_D=0$ 曲线上，表明它们已在径向流动阶段，它们在半对数坐标系中呈一直线，可用来进行半对数曲线分析。

还要指出：表 3－1 是很理想的压降数据。由于影响因素很多，实测数据千变万化，有时使得图版拟合相当困难，特别是在下列情形更是如此：

1．没有测到完整的（从早期到晚期）各流动阶段的资料；

2．由于测试或（及）测试井附近地层情况复杂，使得某些流动阶段被掩盖，或其特征被掩盖。但通过不断实践，积累相当的经验，就可以做出成功的拟合。

二、Earlougher（厄洛赫）图版

厄洛赫图版也是无限大均质地层中一口具有井筒储集和表皮效应的井的解释图版。它也是在双对数坐标系中，但画的是无量纲量 $\frac{p_D C_D}{t_D}=\frac{24C}{qB}\cdot\frac{\Delta p}{t}$（纵坐标）和有量纲量 76656 $\frac{Kh}{\mu}\cdot\frac{t}{C}$（横坐标）的关系曲线，每一条样板曲线对应一个 C_De^{2S} 值（图 3－5）。

图版拟合的方法与 Ramey 图版基本相同。在与图版尺寸相同的透明双对数纸上，以 $\frac{\Delta p}{t}$ 为纵坐标、t 为横坐标，画出实测曲线（Δp 和 t 分别以 MPa 和 h 作单位），同图版相拟合。由拟合点的纵坐标拟合值 $\left[\left(\frac{24C}{qB}\cdot\frac{\Delta p}{t}\right)\Big/\left(\frac{\Delta p}{t}\right)\right]_{拟合}$ 可算出井筒储集系数 C：

$$C=\frac{qB}{24}\left[\left(\frac{24C}{qB}\cdot\frac{\Delta p}{t}\right)\Big/\left(\frac{\Delta p}{t}\right)\right]_{拟合} \tag{3-5}$$

由横坐标拟合值（时间拟合值）可算出流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$、地层系数 Kh 和渗透率 K：

$$\frac{Kh}{\mu}=\frac{C}{76656}\left[\frac{\left(76656\frac{Kh}{\mu}\cdot\frac{t}{C}\right)}{t}\right]_{拟合} \tag{3-6}$$

$$Kh=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\mu=\frac{C\mu}{76656}\left[\frac{\left(76656\frac{Kh}{\mu}\cdot\frac{t}{C}\right)}{t}\right]_{拟合} \tag{3-7}$$

$$K=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\frac{\mu}{h}=\frac{C\mu}{76656h}\left[\frac{\left(76656\frac{Kh}{\mu}\cdot\frac{t}{C}\right)}{t}\right]_{拟合} \tag{3-8}$$

由曲线拟合值可算出表皮系数 S：

$$S=\frac{1}{2}\ln\left[\frac{(C_De^{2S})_{拟合}}{C_D}\right] \tag{3-9}$$

其中的 C_D 由已求得的 C 计算［式（1－32）］：

$$C_D=\frac{C}{2\pi\phi hC_tr_w^2}$$

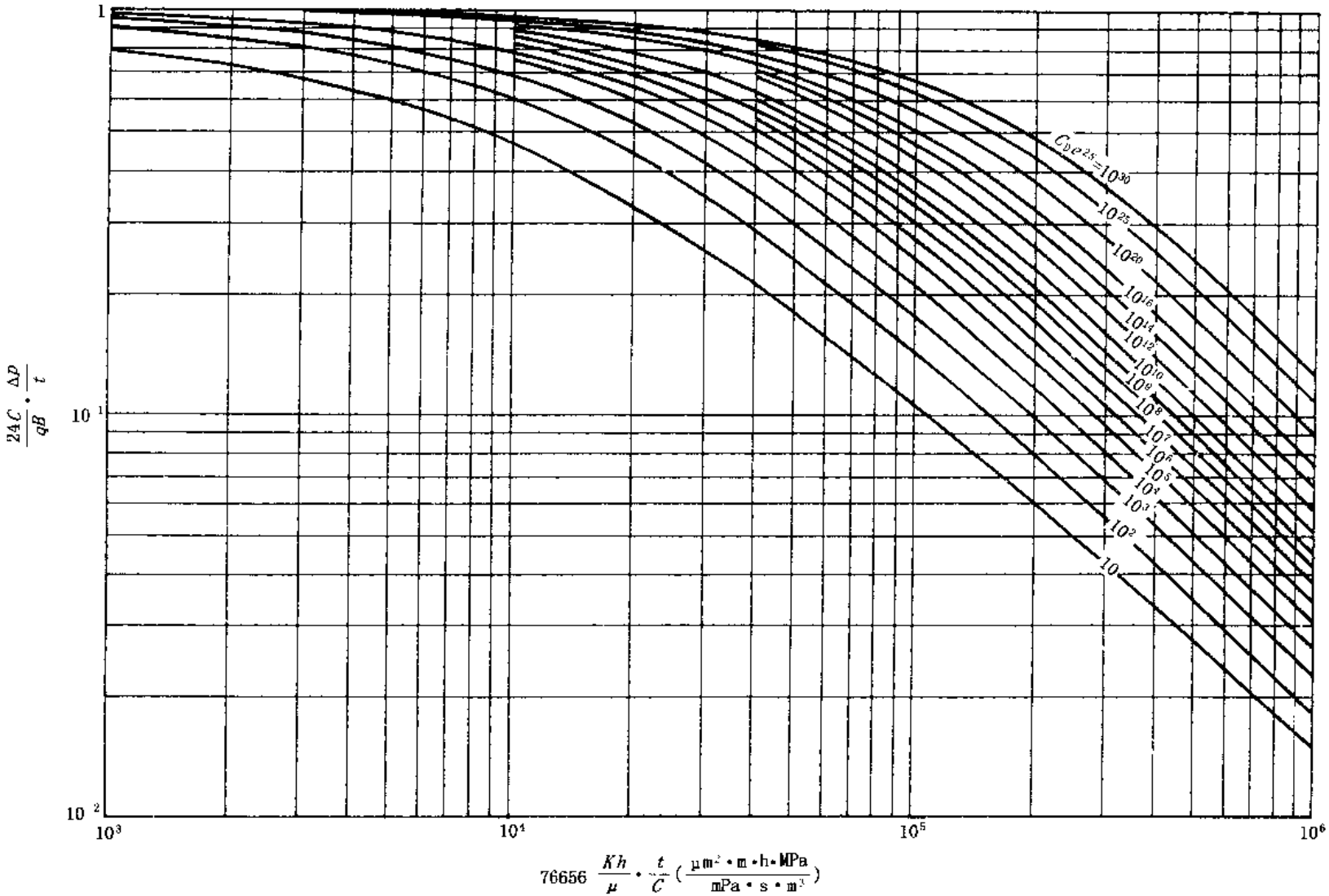

1
10^{-1}
10^{-2}
10^{3}
10^{4}
10^{5}
10^{6}
$\frac{24C}{qB}\cdot\frac{\Delta p}{t}$
$76656\ \frac{Kh}{\mu}\cdot\frac{t}{C}\left(\frac{\mu m^2\cdot m\cdot h\cdot MPa}{mPa\cdot s\cdot m^3}\right)$
$C_{De^{2s}}=10^{30}$
10^{25}
10^{20}
10^{16}
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{9}
10^{8}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
10^{3}
10^{2}
10^{1}

图 3－5　厄洛赫图版

厄洛赫图版没有考虑 $C_De^{2S}<10$ 的情形，也没有区分流动阶段。另外，要对每一个测点计算$\frac{\Delta p}{t}$，然后才能画出实测曲线，比较麻烦。

例 3－2 仍用例 3－1 中表 3－1 的数据，用厄洛赫图版进行解释。

第一步：计算$\frac{\Delta p}{t}$

表 3－3 数据计算表（例 3－2）

t (h)	Δp (MPa)	$\frac{\Delta p}{t}$ ($\frac{\text{MPa}}{\text{h}}$)	t (h)	Δp (MPa)	$\frac{\Delta p}{t}$ ($\frac{\text{MPa}}{\text{h}}$)
0.00127	0.191	150.39	0.127	4.964	39.09
0.00169	0.252	149.12	0.169	5.302	31.37
0.00254	0.369	145.28	0.254	5.716	22.50
0.00339	0.482	142.18	0.339	5.976	17.63
0.00424	0.590	139.15	0.424	6.164	14.54
0.00508	0.695	136.81	0.508	6.311	12.42
0.00678	0.894	131.86	0.678	6.535	9.639
0.00847	1.081	127.63	0.847	6.703	7.914
0.0127	1.501	118.19	1.271	6.999	5.507
0.0169	1.865	110.36	1.695	7.205	4.251
0.0254	2.462	96.93	2.540	7.491	2.949
0.0339	2.929	86.40	3.390	7.691	2.269
0.0424	3.302	77.88	4.237	7.845	1.852
0.0508	3.607	71.00	5.084	7.971	1.568
0.0678	4.073	60.07	6.780	8.169	1.205
0.0847	4.412	52.09	8.475	8.322	0.9819

第二步：在透明双对数坐标纸上画实测$\frac{\Delta p}{t}$—t 曲线，得图 3－6。

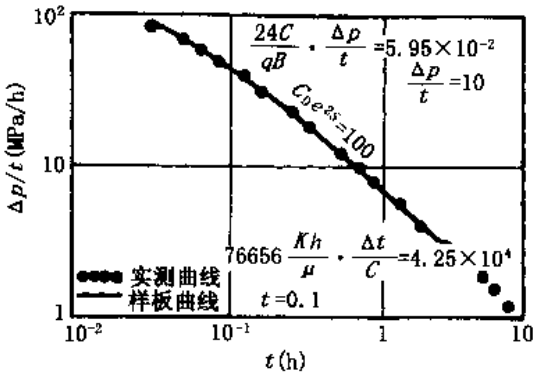


图 3－6 实测曲线与厄洛赫样板曲线拟合（例 3－2）

第三步：图版拟合。得

压力拟合点 $\frac{24C}{qB}\frac{\Delta p}{t}=5.95\times10^{-2}$，$\frac{\Delta p}{t}=10$

时间拟合点 $76656\frac{Kh}{\mu}\frac{t}{C}=4.25\times10^4$，$t=0.1$

曲线拟合值 $C_De^{2S}=100$

由此得［式（3－5）、（3－6）、（3－7）、（3－8）、（1－32）和式（3－9）］

$$C=\frac{qB}{24}\left(\frac{24C}{qB}\frac{\Delta p}{t}\Big/\frac{\Delta p}{t}\right)_{\text{拟合}}$$

$$= \frac{143.09 \times 1.2}{24} \times \frac{5.95 \times 10^{-2}}{10}$$

$$= 4.257 \times 10^{-2}(\mathrm{m^{-3}/MPa})$$

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{C}{76656}\left[\frac{76656\dfrac{Kh}{\mu} \cdot \dfrac{t}{C}}{t}\right]_{拟合}$$

$$= \frac{4.257 \times 10^{-2}}{76656} \times \frac{4.25 \times 10^{4}}{0.1}$$

$$= 0.2360\left(\frac{\mu\mathrm{m^2 \cdot m}}{\mathrm{mPa \cdot s}}\right)$$

$$Kh = \left(\frac{Kh}{\mu}\right) \times \mu = 0.2360 \times 1.6 = 0.3776(\mu\mathrm{m^2 \cdot m})$$

$$K = \frac{(Kh)}{h} = 0.3776 \div 16.15 = 0.02338(\mu\mathrm{m^2})$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi h C_t r_w^2}$$

$$= \frac{4.257 \times 10^{-2}}{2\pi \times 0.15 \times 16.15 \times 1.422 \times 10^{-3} \times 0.0878^2}$$

$$= 255.14$$

$$S = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D} = \frac{1}{2}\ln\frac{100}{255.14} = -0.47$$

三、McKinley（麦金利）图版

这是在无限大均质地层中一口具有井筒储集效应，但不存在表皮效应（即 $S=0$）的井的压力恢复解释图版。它是一种有量纲的图版。用的也是双对数坐标系，纵坐标为关井时间 Δt（min），横坐标为 $\frac{5.6146C}{qB}\Delta p\left(\frac{\mathrm{m^3/MPa}}{\mathrm{m^3/d}} \cdot \mathrm{MPa} = \mathrm{d}\right)$。每一条样板曲线对应一个 $\left(\frac{13653}{C} \cdot \frac{Kh}{\mu}\right)$ 值 $\left(\frac{\mu\mathrm{m^2 \cdot m}}{\mathrm{mPa \cdot s \cdot m^3\ (MPa)^{-1}}}\right)$（图 3－7）。制作这个图版共作了如下三个假定：

（1）$S=0$

（2）$\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} = 732.44\left(\frac{\mu\mathrm{m^2 \cdot MPa}}{\mathrm{mPa \cdot s \cdot m^2}}\right)$

（3）$p|_{r=2000r_w}$ = 常数

在尺寸与图版相同的双对数透明纸上画出实测曲线，纵坐标为实际关井时间 Δt（min），横坐标为压力恢复值 $\Delta p = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t=0)$（MPa），$p_{ws}(\Delta t=0)$ 就是关井前流压。进行拟合时，将实测曲线的纵坐标与图版的纵坐标对好——1 分钟对 1 分钟，10 分钟对 10 分钟，如此等等；然后水平移动实测曲线图，直到找到一条拟合得最好的样板曲线为止。因为解释图版没有考虑表皮效应的影响，所以，如果测试井具有表皮效应，则实测曲线无法与样板曲线完全拟合，如图 3－8 所示，其中“。”点线为 $S>0$ 的情形，“·”点线为 $S<0$ 的情形。此时可先找出与前一段实测曲线相拟合的样板曲线，由拟合值计算井筒储集系数 C 和井筒附近受表皮效应影响区域内的流动系数 $\left(\frac{Kh}{\mu}\right)_{WB}$ 和井筒附近表皮效应影响区的渗透

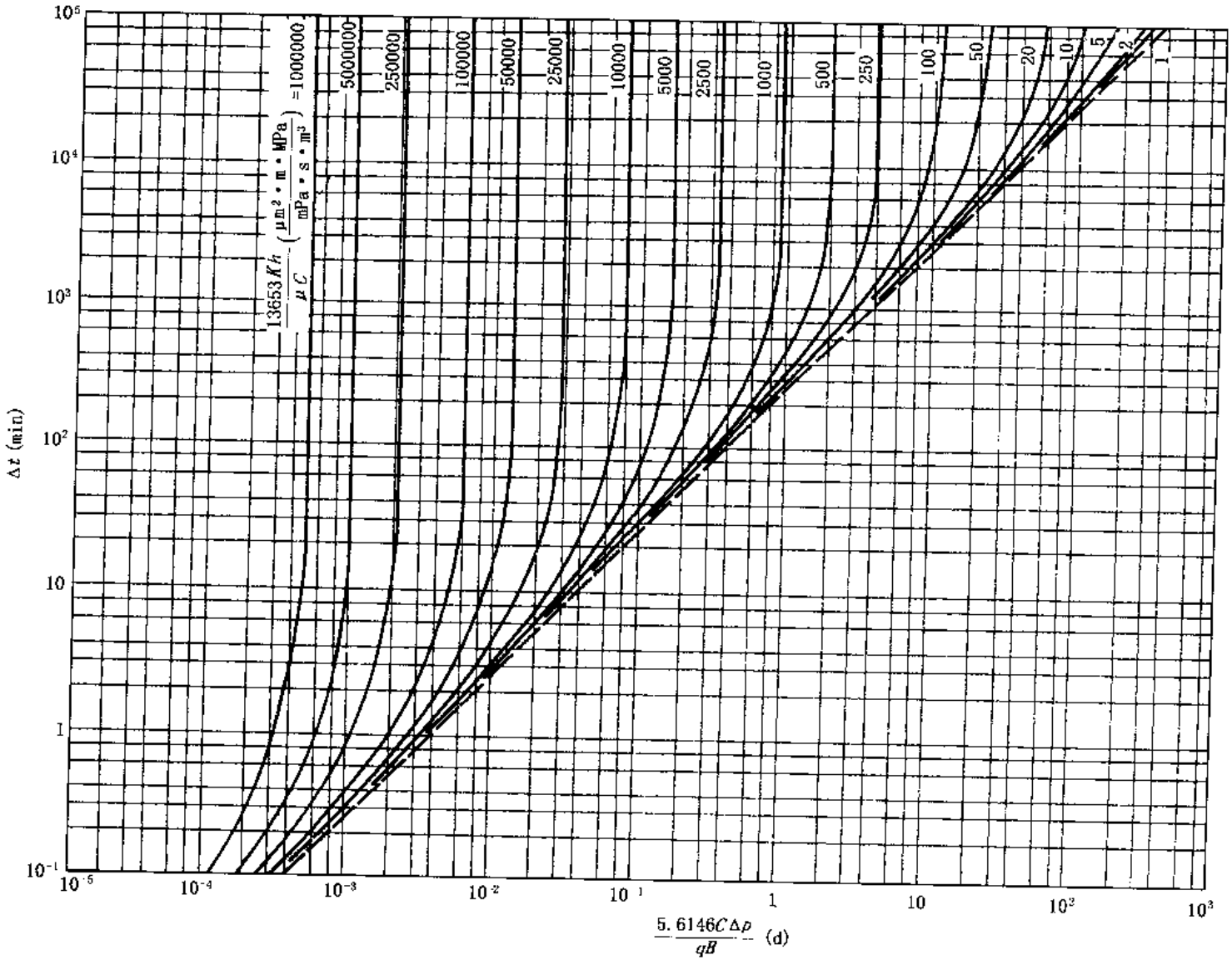

10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
Δt (min)
$\frac{13653Kh}{\mu C}\left(\frac{\mu m^2 \cdot m \cdot MPa}{mPa \cdot s \cdot m^3}\right)$ =1000000
5000000
2500000
1000000
500000
250000
100000
50000
25000
10000
5000
2500
1000
500
250
100
50
20
10
5
2
1
10^{-5}
10^{-4}
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
1
10
10^2
10^3
$\frac{5.6146C\Delta p}{qB}$ (d)

图 3－7　麦金利图版

率 K_{WB}：

$$C=\left[\frac{\left(\frac{5.6146C}{qB}\Delta p\right)}{\Delta p}\right]_{拟合}\times\frac{qB}{5.6146} \tag{3-10}$$

$$\left(\frac{Kh}{\mu}\right)_{WB}=\left(\frac{13653}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(前段)}\times\frac{C}{13653} \tag{3-11}$$

$$K_{WB}=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)_{WB}\times\frac{\mu}{h}=\left(\frac{13653}{C}\cdot\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(前段)}\times\frac{C\mu}{13653h} \tag{3-12}$$

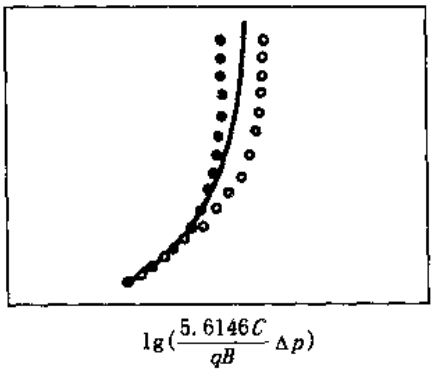


图 3-8 测试井具有表皮效应时的麦金利图版拟合

然后找出与实测曲线后一段相拟合的样板曲线，再由曲线拟合值计算地层的流动系数和渗透率

$$\frac{Kh}{\mu}=\left(\frac{13653}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(后段)}\times\frac{C}{13653} \tag{3-13}$$

$$K=\left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\frac{\mu}{h}=\left(\frac{13653}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(后段)}\times\frac{C\mu}{13653h} \tag{3-14}$$

式（3-11）、(3-12)、(3-13）和式（3-14）中的 C 都是由式（3-10）所计算的数值。

比较 K_{wb}和 $K\left[或\left(\frac{Kh}{\mu}\right)_{wb}和\frac{Kh}{\mu}\right]$的数值，可以估计测试井附近的污染或改善情况。

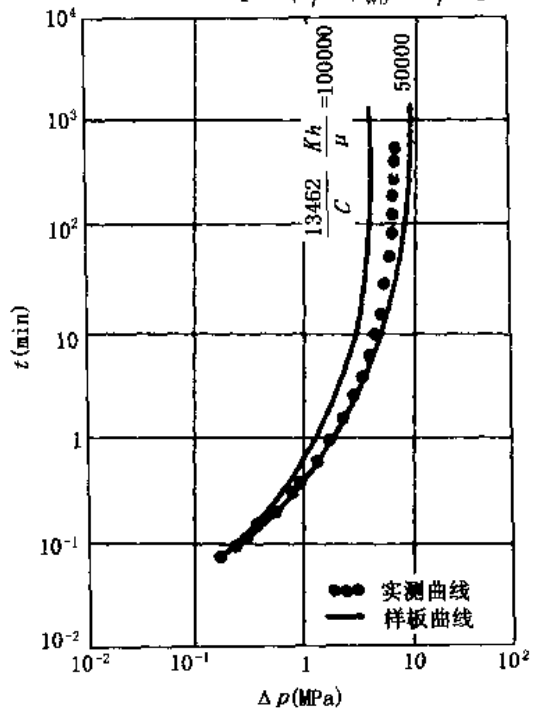


图 3-9 实测曲线与样板曲线拟合（例 3-3）

麦金利图版的纵坐标是实际时间，因此比较容易使用。它还适用于分析只出现续流段而不出现半对数直线段（因而用常规试井解释方法无法解释）的恢复资料，并且可以用来分析压力降落资料［此时纵坐标应为实际开井时间 t (min)］。但它无法区分流动阶段，又因为没有考虑表皮效应的影响，固定了 $\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2}$ 的数值 $\left\{等于\ 723.44\ \frac{\mu m^2 MPa}{mPa\cdot s\cdot m^2}\right\}$，假定了 $p|_{r=2000r_w}$ = 常数，所以解释结果的误差较大。

例 3-3 用麦金利图版解释例 3-1 中表 3-1 的压降数据。

因为麦金利图版的纵坐标是实际时间，以分作单位，而表 3-1 中的时间以小时为单位，须将它换算为分。

然后在透明双对数坐标纸上画 t—Δp 曲线，得图 3-9。

表 3－4　压差数据表（例 3－3）

t (h)	t (min)	Δp (MPa)	t (h)	t (min)	Δp (MPa)
0.00127	0.076	0.191	0.127	7.62	4.962
0.00169	0.101	0.252	0.169	10.14	5.302
0.00254	0.152	0.369	0.254	15.24	5.716
0.00339	0.203	0.482	0.339	20.34	5.976
0.00424	0.254	0.590	0.424	25.44	6.164
0.00508	0.305	0.695	0.508	30.48	6.311
0.00678	0.407	0.894	0.678	40.68	6.535
0.00847	0.508	1.081	0.847	50.82	6.703
0.0127	0.762	1.501	1.271	76.30	6.999
0.0169	1.014	1.865	1.695	101.7	7.205
0.0254	1.524	2.462	2.540	152.4	7.491
0.0339	2.034	2.929	3.390	203.4	7.691
0.0424	2.544	3.302	4.237	254.2	7.845
0.0508	3.048	3.607	5.084	305.0	7.971
0.0678	4.068	4.073	6.780	406.8	8.169
0.0847	5.082	4.412	8.475	508.5	8.322

最后进行图版拟合，得拟合点

$$\frac{5.6146C\Delta p}{qB} = 1.6\times 10^{-4} \qquad (\Delta p = 0.1\text{MPa})$$

由此得［式（3－10）］

$$C = \left[\frac{\dfrac{5.6146C\Delta p}{qB}}{\Delta p}\right]_{\text{拟合}} \times \frac{qB}{5.6146}$$

$$= \frac{1.6\times 10^{-4}}{0.1}\times\frac{143.09\times 1.2}{5.6146}$$

$$= 4.89\times 10^{-2}(\text{m}^3/\text{MPa})$$

由图版拟合得曲线拟合值 $\left(\dfrac{13653}{C}\dfrac{Kh}{\mu}\right)_{\text{拟合}} = 60000$（目测插值），由此得［式（3－13）、式（3－14）］

$$\frac{Kh}{\mu} = \left(\frac{13653}{C}\cdot\frac{Kh}{\mu}\right)_{\text{拟合}}\times\frac{C}{13653}$$

$$= 60000\times\frac{4.89\times 10^{-2}}{13653} = 0.2149\left(\frac{\mu\text{m}^2\cdot\text{m}}{\text{mPa}\cdot\text{s}}\right)$$

$$K = \left(\frac{Kh}{\mu}\right)\times\frac{\mu}{h} = 0.2149\times\frac{1.6}{16.15} = 0.02129(\mu\text{m}^2)$$

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

下面我们着重讨论格林加登解释图版和布德图版。格林加登图版是在雷米图版的基础上改进而得的，具有较多的优点，如容易区分流动阶段，较易选到惟一的拟合曲线，适用范围（对 C_De^{2S}的变化范围而言）比较大，等等。这种解释图版已经在全世界包括我国普遍使用。格林加登图版可以用于油、水井试井解释，也可以用于气井试井解释。这里先讨论油井试井解释（水井情形与油井相同），气井试井解释将在第八章专门讨论。本书下文中所说的“压力图版”均指格林加登图版。

式（1－9′）

$$p_D = \frac{1}{2}\left[\ln t_D + 0.80907 + 2S\right]$$

可改写为

$$p_D = \frac{1}{2}\left[\ln\left(\frac{t_D}{C_D}\right) + 0.80907 + \ln(C_De^{2S})\right] \qquad (1-9'')$$

上式表明，产量变化所引起的油（气）藏动态，可以用 p_D、$\frac{t_D}{C_D}$和 C_De^{2S}这三个无量纲变量组合来描述。格林加登图版就是这三者的关系曲线。它是在双对数坐标系中，以无量纲压力 p_D 为纵坐标，无量纲时间 t_D 和无量纲井筒储集系数 C_D 的比值$\frac{t_D}{C_D}$为横坐标、C_De^{2S}为参变量的曲线图。图 3－10 就是这一图版，实际解释时用《现代试井解释图版》[1] 图 1。如前所述，

$$p_D = \frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}\cdot\Delta p$$

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot t$$

$$C_D = \frac{1}{2\pi\phi C_t h r_w^2}C$$

于是

$$\frac{t_D}{C_D} = 7.2\pi\cdot\frac{Kh}{\mu}\frac{t}{C} \qquad (3-15)$$

$$C_De^{2S} = \frac{Ce^{2S}}{2\pi\phi C_t h r_w^2} \qquad (3-16)$$

图版中每一条样板曲线对应一个 C_De^{2S}值，它表征井筒及其周围的情况。一般说来，

污染井：$C_De^{2S}>10^3$

未受污染井：$5<C_De^{2S}\leqslant10^3$

酸化见效井：$0.5<C_De^{2S}\leqslant5$

压裂见效井：$C_De^{2S}\leqslant0.5$

---

[1] 姚振年、庄惠农编，石油工业出版社 1985 年版。

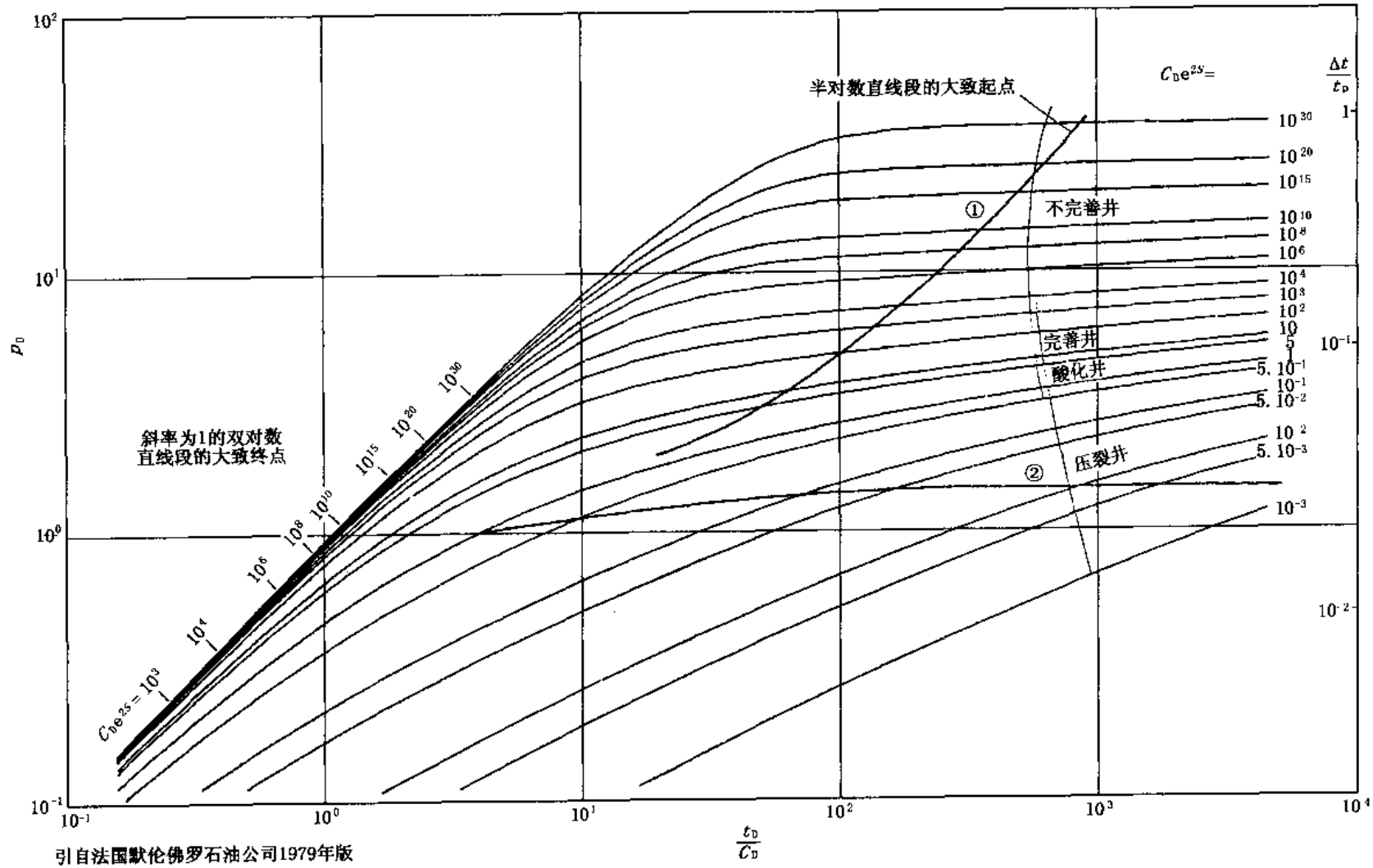


图 3 · 10　均质油藏中具有井筒储集和表皮效应的井的解释图版

如果在某个均质油藏中有两口井，它们的 C_D 值和 S 值各不相同，即 $C_{D1} \neq C_{D2}$，$S_1 \neq S_2$，其中下标 1，2 表示不同井别，然而它们的 $C_D e^{2S}$ 值却相等，即 $C_{D1}e^{2S_1} = C_{D2}e^{2S_2}$，则它们将拟合同一条曲线。但通过解释可以把它们各自的 C_D 和 S 分别计算出来。

图版（图 3－10）中还有两条曲线①和②，《现代试井解释图版》图 1 中则是两条红线，它们标出半对数直线段开始的大致时间，也就是径向流动阶段开始的大致时间。此外，还标出了双对数曲线上斜率为 1 的直线段（45°线）终止的大致时间，即纯井筒储集阶段结束的大致时间。

图版的右边有一列$\frac{\Delta t}{t_p}$数值，还要留待压力恢复分析时再加以讨论。

压降分析可分作三步进行：

第一步：初拟合（Initial Match）。

（1）在尺寸与图版相同的透明双对数坐标纸上画实测曲线，其纵坐标为压差 $\Delta p = p_i - p_{wf}$，横坐标为时间 t。

（2）把实测曲线图放在解释图版上，通过上下和左右平移，找出一条与实测曲线最相吻合的样板曲线（称为初拟合），并读出其 $C_D e^{2S}$ 值。

（3）读出并标出纯井筒储集阶段终止的大致时间和径向流动阶段开始的大致时间（称为“划分流动阶段”）。

这一步的主要任务是正确划分流动阶段，以便下一步分析的顺利进行。

第二步：特种识别曲线分析。

（1）早期纯井筒储集阶段的特种识别曲线分析。在直角坐标系中，用初拟合中所划分出的纯井筒储集阶段的数据（双对数曲线中落在斜率为 1 的直线段上的数据点）画出直线，由这个直线段的斜率 m 计算井筒储集系数 C［见式（2－2）］：

$$C = \frac{qB}{24m}$$

如果直线不通过原点，则可能存在时间误差，应进行校正（第二章第三节）。

（2）径向流动阶段的特种识别曲线分析（半对数曲线分析）。画 p_{wf} 与 $\lg t$ 的关系曲线，即在半对数坐标纸上，画出所有的数据点，用初拟合中所划分出的径向流动阶段的数据点，画出 p_{wf} 和 t 的半对数直线段。由直线段的斜率的绝对值 m 算出流动系数和渗透率［式（1－23）和式（1－25）］

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m}$$

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh}$$

在直线段或其延长线上，读出 p_{wf}（$t = 1\text{h}$），算出表皮系数［式（1－26′）］

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

（第一章第一节）。

（3）拟稳定流动阶段特种识别曲线分析。如果油藏是个封闭系统，而且流动达到了拟稳定流动阶段，则可以画出这个阶段的特种识别曲线图，即直角坐标系中 p_{wf}（或 Δp_{wf}）与 t 的关系曲线图。由直线段的斜率的绝对值 m^* 可以算出该封闭系统的可采储量 N_R［见式（2－14）］

$$N_R = \frac{qBS_o}{24m^* C_t}$$

(第二章第三节)。

在进行特种识别曲线分析时必须特别注意的是：用来画特种识别曲线的点，应当是诊断曲线（双对数曲线）所划分的相应流动阶段的数据点。

通过半对数曲线分析而得到半对数直线段的斜率的绝对值 m 后，我们可以很容易地确定压力拟合值。事实上，由于

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}\Delta p$$

故

$$\frac{p_D}{\Delta p} = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} = \frac{1.151}{\frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}} = \frac{1.151}{m} \qquad (3-17)$$

即用 1.151 除以半对数直线段斜率的绝对值 m，就得到压力拟合值。我们可以用这个压力拟合值来修正初拟合——这就是下一步“终拟合”。

第三步：终拟合 (Final Match)。

现在，压力拟合已经由式 (3-17) 确定，只需进行时间拟合了。也就是说，只需进行左右平移而不需进行上下平移了。

同初拟合一样，选择最佳拟合曲线。选一个容易读数的点，读出拟合值，即从解释图版上读出拟合点的 p_D 和 $\frac{t_D}{C_D}$ 值，从实测曲线上读出该点的 Δp 和 t 值，再从拟合的样板曲线上读出 $C_D e^{2S}$ 值。同样称 $\frac{p_D}{\Delta p}$ 为压力拟合值，$\frac{\frac{t_D}{C_D}}{t}$ 为时间拟合值，$C_D e^{2S}$ 为曲线拟合值。

由所得到的三种拟合值，计算下列参数：

由压力拟合值计算流动系数、地层系数和渗透率 [式 (3-1)、式 (3-2) 和式 (3-3)]：

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$Kh = 1.842 \times 10^{-3} q\mu B\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$K = 1.842 \times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

由时间拟合值计算井筒储集系数 [式 (3-15)]：

$$C = 7.2\pi \cdot \frac{Kh}{\mu} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}}$$

其中 $\frac{Kh}{\mu}$ 已由压力拟合值算出。再用式 (1-32) 由 C 算出 C_D 值：

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$$

最后，由曲线拟合值计算表皮系数：

$$S = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D}$$

在第二步和第三步，我们用不同的方法算出了 K，S 和 C 的数值，它们必须彼此相符，如果用手工操作，K，C 值相差不得超过 10%，S 值相差不得超过 2。必须指出：就计算参数而言，特种识别曲线分析的结果要比图版拟合分析更为准确可靠。但如果用不同的方法算出的同一参数相差超过 10%，则表明解释过程中出了问题，必须重新检查。

如果用手工进行解释，只能做到这里就结束了。但如果有试井解释软件，用计算机进行解释，则还需进行下列步骤：

第一步：用所得参数计算样板曲线，与实测曲线进行拟合。可以选择最佳 $C_D e^{2S}$ 值。用手工解释时，因图版中样板曲线有限，可以内插，例如只有 $C_D e^{2S}=1$ 和 $C_D e^{2S}=5$ 的样板曲

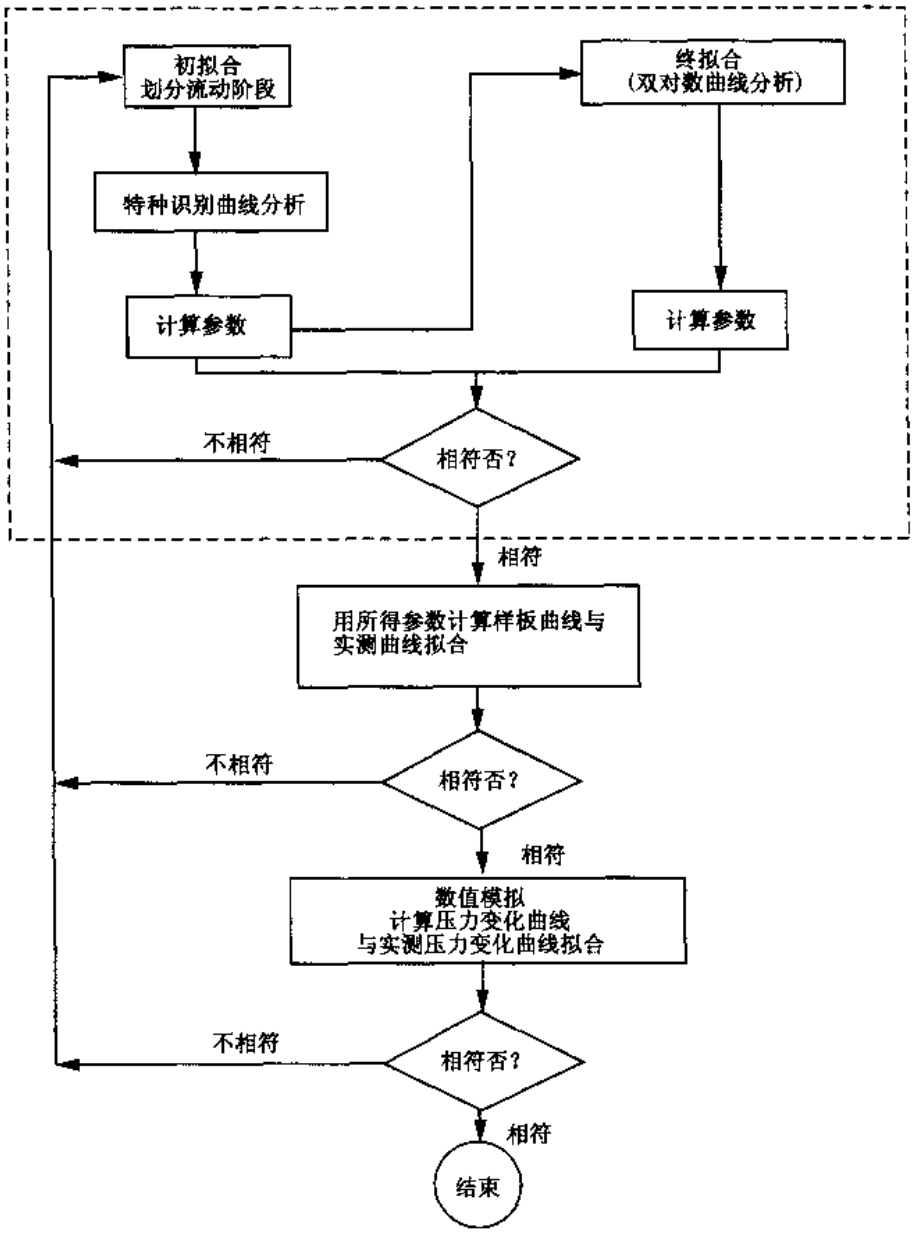


图 3－11　试井解释过程框图

线，而没有 $1<C_De^{2S}<5$ 的样板曲线，若 $C_De^{2S}=1$ 显得太小，$C_De^{2S}=5$ 又显得太大，此时可根据实测曲线的形态和压力拟合值等，拟合 $C_De^{2S}=2$，或 $C_De^{2S}=3$ 等的样板曲线。这当然只能靠目测。用计算机解释时，则可以让计算机产生 $C_De^{2S}=2$，2.5，3…的样板曲线，使得拟合非常精确，从而求出更准确的参数数值，进而得到很好的拟合。如果得不到比较好的拟合，则表明前面的解释步骤中有问题，必须重新检查。

第二步：用解释的结果和实际生产过程进行数值模拟，或称为压力史拟合。即用解释所识别的油藏类型、油井类型和算得的各个参数，以及实际的产量、生产时间等资料来计算理论压力变化。这实际上又是解一个正问题。将计算的压力变化和实测压力变化相对比，如果解释结果正确，则它们应能很好地互相拟合；如果拟合不好，则表明上述解释有问题，必须重新检查。

整个解释过程可用图 3－11 表示，其中虚线框内的部分可用手工进行，而其他部分则只有用计算机才能进行。

从图 3－11 可以看出：这个解释过程具有一边解释一边检验的特点，由于这个特点，每一步都要求做得扎实可靠，从而保证整个解释的准确可靠。

例 3－4 用格林加登图版对本章第一节例 3－1 中表 3－1 的数据进行压降分析。

第一步：初拟合。

（1）换算压差。一般说来，原始测压数据是压力 p_{wf}和实际时间的对应数值，但画实测曲线必须用压差 $\Delta p=p_i-p_{wf}$和时间 t 作图，所以首先要将压力换算成压差。这一步在例 3－1中已经做好，见表 3－2。

（2）画实测曲线，得图 3－12。

（3）初拟合，划分流动阶段，见图 3－12。图中的斜线即为解释图版中半对数直线段开始的大致时间。曲线初拟合值为 $C_De^{2S}=10^2$，纯井筒储集阶段结束的大致时间在解释图版中没有标出，但从曲线拟合情况可以判断，最多只有三四个点会落在纯井筒储集特种识别曲线上。本次测试没有达到拟稳定流动阶段。

第二步：特种识别曲线分析。

（1）用早期资料画 Δp—t 曲线，如图 3－13。

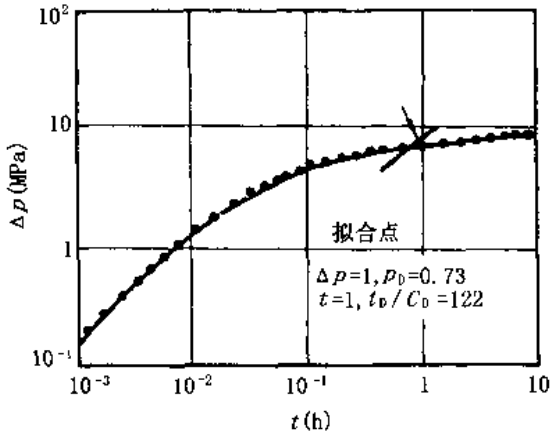


图 3－12 实测曲线与样板曲线拟合（例 3－4）
（$C_De^{2S}=100$）

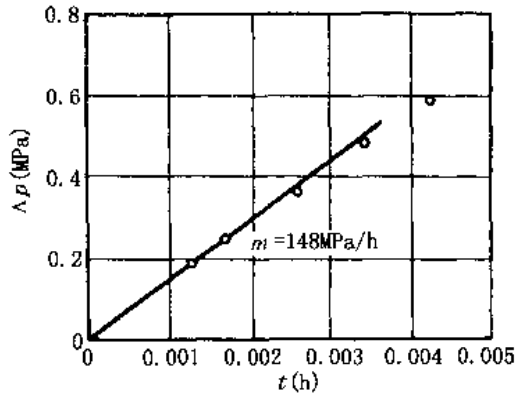


图 3－13 井筒储集特种识别曲线（例 3－4）

量得斜率 $m=148$MPa/h，由此算出［式（2－2）］

$$C = \frac{qB}{24m} = \frac{143.09 \times 1.2}{24 \times 148} = 4.834 \times 10^{-2}(\mathrm{m^3/MPa})$$

(2) 画 p_{wf}—lg$t$ 曲线，并用径向流动阶段的数据点（最后九个点）画出直线段（图3-14）。量同其斜率为1.6MPa/对数周期，Δp（$t=1$h）=6.82MPa，由此算得［式（1-23）、(1-24)、(1-25）和式（1-26′)］。

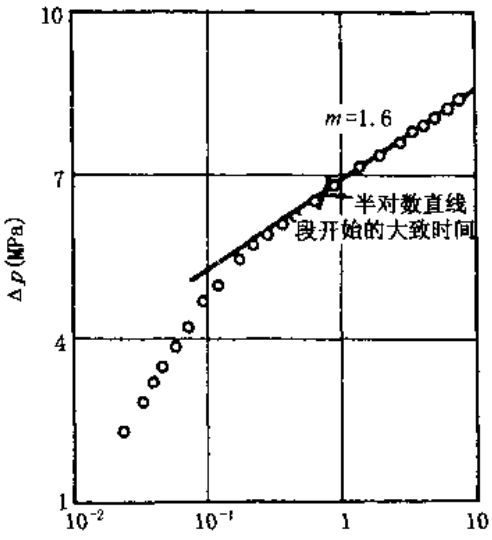


图3-14 半对数曲线（例3-4）

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m}$$

$$= \frac{2.121 \times 10^{-3} \times 143.09 \times 1.2}{1.6}$$

$$= 0.2276\left(\frac{\mu\mathrm{m^2 \cdot m}}{\mathrm{mPa \cdot s}}\right)$$

$$Kh = \left(\frac{Kh}{\mu}\right) \times \mu$$

$$= 0.2276 \times 1.6$$

$$= 0.3642(\mu\mathrm{m^2 \cdot m})$$

$$K = \left(\frac{Kh}{h}\right)$$

$$= 0.3642 \div 16.15$$

$$= 0.02255(\mu\mathrm{m^2})$$

$$S = 1.151\left(\frac{\Delta p_{1h}}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right)$$

$$= 1.151\left(\frac{6.82}{1.6} - \lg\frac{0.02255}{0.15 \times 1.6 \times 1.422 \times 10^{-3} \times 0.0878^2} - 0.9077\right)$$

$$= -0.67$$

由半对数直线段的斜率 m 还可算出压力拟合值［见式（3-17)］

$$\frac{p_D}{\Delta p} = \frac{1.151}{m} = \frac{1.151}{1.6} = 0.7194$$

第三步：终拟合。

由上一步得 $\frac{p_D}{\Delta p} = 0.7194$，所以，实测曲线上的直线 $\Delta p = 1$ 应与解释图版上 $p_D = 0.7194 \times 1 = 0.7194$ 相拟合，故只需将 $\Delta p = 1$ 蒙在 $p_D = 0.72$ 上。鉴于测量斜率等难免有些误差，所以应当容许对比值稍作调整，但主要的还是进行水平平移，即进行时间拟合。最后发现，实测曲线与 $C_D e^{2S} = 10^2$ 的样板曲线相吻合。选拟合点（见图3-12）

$$\Delta p = 1\mathrm{MPa}, p_D = 0.73$$

$$t = 1\mathrm{h}, \frac{t_D}{C_D} = 118$$

由压力、时间和曲线拟合值算得

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$= 1.842 \times 10^{-3} \times 143.09 \times 1.2 \times \frac{0.73}{1}$$

$$= 0.2309\left(\frac{\mu m^2 \cdot m}{mPa \cdot s}\right)$$

$$Kh = \left(\frac{Kh}{\mu}\right) \times \mu = 0.2309 \times 1.6 = 0.3694(\mu m^2 \cdot m)$$

$$K = (Kh) \div h = 0.02287(\mu m^2)$$

$$C = 7.2\pi \cdot \frac{Kh}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}} = 7.2\pi \times 0.2309 \times \frac{1}{118} = 0.04426(m^3/MPa)$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} = \frac{0.04426}{2\pi \times 0.15 \times 1.422 \times 10^{-3} \times 16.15 \times 0.0878^2} = 265.3$$

$$S = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D} = \frac{1}{2}\ln\frac{100}{265.3} = -0.49$$

通过上面的分析，我们得到：

项　目	K (μm^2)	C (m^3/MPa)	S
双对数曲线分析	0.02287	0.04426	-0.49
特种识别曲线分析	0.02255	0.04834	-0.67

用不同方法得到的数值已大体相符。由试井解释可知：本井是在均质油藏中的一口非污染井（$C_D e^{2S} = 100$；$S = -0.6$），具有井筒储集效应（$C = 0.04426 m^3/MPa$）。没有测得任何外边界反映。

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

压降分析虽然比较简单，但是，要在一段相当长的时间内保持产量稳定不变却不容易。因此，在矿场上常常进行压力恢复测试以达到相同的目的。

一、用压降解释图版进行恢复分析

假定测试井以稳定产量 q 生产了 t_p 小时，已进入径向流动阶段，然后关井测压力恢复。用 Δt 表示从关井时刻起算的“压力恢复时间”，$p_{ws}(\Delta t)$ 表示关井 Δt 小时时刻的井底压力，如图 3-15 所示。

如第一章所述，压力恢复期间的压差为

$$\Delta p(\Delta t) = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}\{p_D[(t_p + \Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)\}$$

但是，我们通常并不使用这个压差，而使用压力恢复值 $\Delta p_{恢复}$（图 3-15）：

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t) = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t = 0) = \Delta p(\Delta t = 0) - \Delta p(\Delta t) = C - \Delta p(\Delta t)$$

式中

$$C = \Delta p(\Delta t = 0) = \Delta p(t = t_p) = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} p_D[(t_p)_D]$$

故

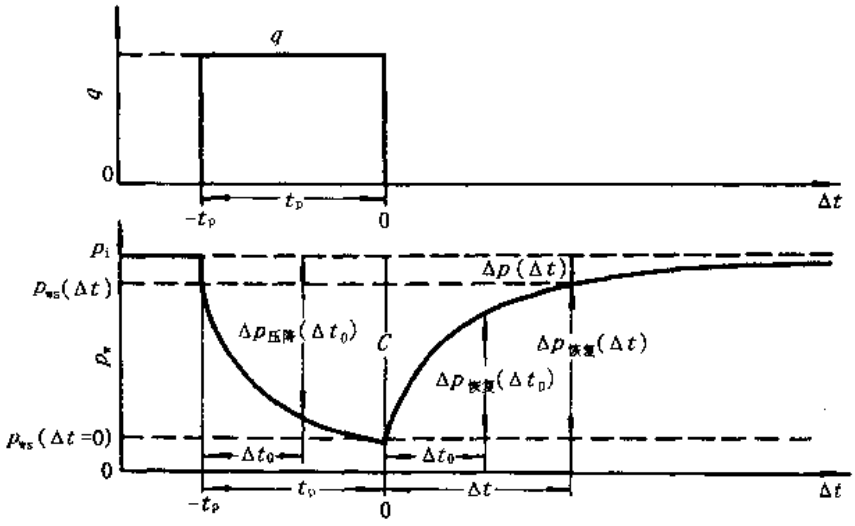


图 3－15　压力恢复示意图

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t)=\frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\{p_D[(t_p)_D]-p_D[(t_p+\Delta t)_D]+p_D(\Delta t_D)\} \tag{3-18}$$

由于对任一时刻，都有

$$p_D[(t_p)_D]<p_D[(t_p+\Delta t)_D]$$

故

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t)<\frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{Kh}p_D(\Delta t_D)=\Delta p_{压降}(\Delta t)$$

这就是说，在相同条件下关井 Δt_0 小时的压力恢复值 $\Delta p_{恢复}$（Δt_0），必定小于开井相同时间（Δt_0 小时）的压降值 $\Delta p_{压降}$（Δt_0），即

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t_0)<\Delta p_{压降}(\Delta t_0) \tag{3-19}$$

（图 3－15 和图 3－16）。因此，一般说来，压力恢复曲线与压降曲线不一样，压力恢复分析应当使用以实际生产时间 t_p 用下式产生的样板曲线：

$$p_{D恢复}=p_D[(t_p)_D]-p_D[(t_p+\Delta t)_D]+p_D(\Delta t_D)$$

但是，我们无法做出各种不同生产时间 t_p 的压力恢复样板曲线，或压力恢复解释图版。那么，我们能不能借用压降解释图版来解释压力恢复资料呢？回答是肯定的。

我们分两种情形来考虑：

（1）$t_p\gg\Delta t_{max}$，其中 Δt_{max}表示测量压力恢复的最大关井时间。

由于 $t_p\gg\Delta t$，故

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

$$p_D[(t_p+\Delta t)_D]\approx p_D[(t_p)_D]$$

此时式（3－18）可写成

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t)\approx\frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{Kh}p_D(\Delta t_D)$$

即

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t) \approx \Delta p_{压降}(\Delta t)$$

这就是说：当关井前的生产时间 t_p 比关井测压力恢复的整个时间 Δt_{max} 长得多时，关井 Δt 小时的压力恢复值 $\Delta p_{恢复}$（Δt），与开井 Δt 小时的压降值 $\Delta p_{压降}$（Δt）大致相等。因此，整条压力恢复曲线非常近似于压降曲线，我们可以用压降样板曲线来拟合恢复曲线、或者说用压降分析的方法来进行压力恢复分析。

（2）$t_p \gg \Delta t_{max}$ 这一条件不满足。此时要整条恢复曲线与压降样板曲线相拟合已不可能。但在刚刚关井的一段时间里，Δt 很小，$t_p \gg \Delta t$ 成立，因此有

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t) \approx \Delta p_{压降}(\Delta t)$$

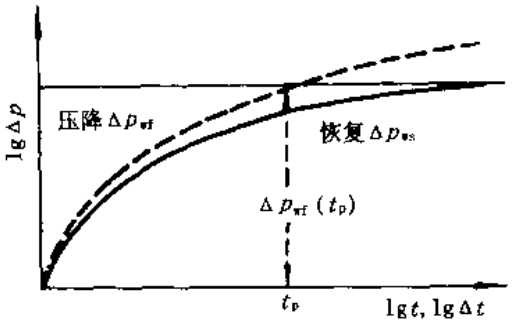


图 3－16　压力恢复与压降曲线对比图

这就是说，压力恢复早期非常近似于压降早期，这一段压力恢复曲线可以和压降样板曲线相拟合。不过，其余部分的恢复曲线则不能和压降样板曲线相拟合。并且，关井前生产时间 t_p 越短，恢复曲线开始偏离压降样板曲线的时间就越早，与压降样板曲线偏差也越大。另外，由式（3－19）可知，恢复曲线一定在相应压降曲线的下方（图 3－16），因此，只能选取在实测恢复曲线上方的压降样板曲线来进行拟合。

既然压力恢复的早期段可以与压降样板曲线相拟合，而其余部分则应在相应压降样板曲线的下方，那么，到底什么时候开始偏离呢？在压降样板曲线的右边，标有 $\frac{\Delta t}{t_p}$ 的数值，这就是用压降样板曲线来拟合压力恢复曲线时开始出现偏离的时间的近似数值。具体地说，当用某一条压降样板曲线来拟合恢复曲线时，可以从实测曲线图上读出开始偏离处的 Δt 值，关井前的生产时间 t_p 是已知的，故可算出 $\frac{\Delta t}{t_p}$ 值，如果它与解释图版右边所标的数值满足

$$\left(\frac{\Delta t}{t_p}\right)_{实际} \leqslant \left(\frac{\Delta t}{t_p}\right)_{图版} \tag{3-20}$$

则说明所选用的样板曲线是对的；反之，如果上式不满足，则表明选用的样板曲线不对，应当重选。举个例子：选用压降解释图版中 $C_De^{2S}=5$ 的样板曲线来拟合压力恢复曲线（图 3－17），前一阶段拟合得很好，而在 $\Delta t = 5h$ 处，实测恢复曲线开始偏离压降样板曲线。已知关井前生产了 52h。所以 $\frac{\Delta t}{t_p}=\frac{5}{52}=0.096$，而与解释图版右边所对应的 $\frac{\Delta t}{t_p}$ 值为 0.1，满足式（3－20）。这表明：选用 $C_De^{2S}=5$ 这条样板曲线是正确的。

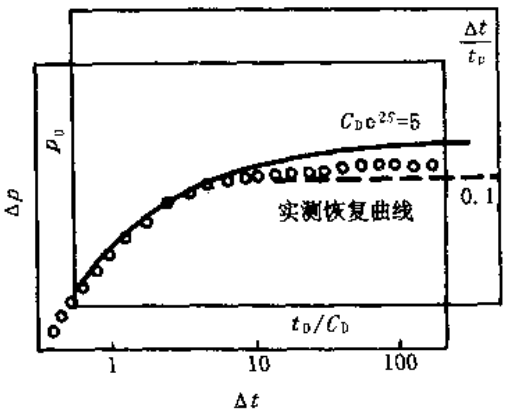


图 3－17　用压降样板曲线拟合恢复曲线示意图

最后，当 $\Delta t \gg t_p$ 时，$t_p+\Delta t \approx \Delta t$，$p_D[(t_p+\Delta t)_D] \approx p_D(\Delta t_D)$，故［参看式（3－18）和图（3－16）］

$$p_{\text{D恢复}}(\Delta t_{\text{D}}) \approx p_{\text{D压降}}[(t_{\text{p}})_{\text{D}}]$$

即

$$\Delta p_{\text{恢复}}(\Delta t) \approx \Delta p_{\text{压降}}(t_{\text{p}})$$

或

$$p_{\text{ws}}(\Delta t) - p_{\text{ws}}(\Delta t = 0) \approx p_{\text{i}} - p_{\text{wf}}(t = t_{\text{p}})$$

故

$$p_{\text{ws}}(\Delta t) \approx p_{\text{i}}$$

这就是说，第一，当关井时间很长时，关井压力趋于原始压力 p_{i}；第二，压力恢复值不可能超过关井前生产 t_{p} 时间所产生的压降值。这再次说明压力恢复值必定小于相应压降值的道理。

二、恢复分析的步骤

恢复分析的步骤与压降分析大致相同。

第一步：初拟合（双对数曲线分析）。

做法与压降分析相同，但实测曲线为压力恢复值 $\Delta p = [p_{\text{ws}}(\Delta t) - p_{\text{ws}}(\Delta t = 0)]$ 和关井时间 Δt 的关系曲线。要特别注意的是用 $\frac{\Delta t}{t_{\text{p}}}$ 值判断是否选用了正确的样板曲线。

第二步：特种识别曲线分析。

井筒储集效应的特种识别曲线及其分析方法与压降情形相同，即在直角坐标系中，画出压差（即压力恢复值）

$$\Delta p_{\text{ws}} = p_{\text{ws}}(\Delta t) - p_{\text{ws}}(0) = p_{\text{ws}}(\Delta t) - p_{\text{wf}}(t_{\text{p}})$$

与关井时间 Δt 的关系曲线，应得一条过原点的直线，由其斜率 m 可以计算井筒储集系数；同样可以识别是否存在时间误差，如果存在，也可同样进行校正，详见上一节。

压力恢复情形不能像压降情形那样进行晚期拟稳定流动阶段的特种识别曲线分析。

在径向流动阶段，根据关井前生产时间 t_{p} 的长短，可分为两种情况：

（1）关井前生产时间很长，$t_{\text{p}} \gg \Delta t_{\max}$ 成立，压力恢复曲线与压降样板曲线能够很好拟合。这种情形下，可以像压降情形一样，用 Δp_{ws}—$\lg\Delta t$（或 p_{ws}—$\lg\Delta t$）曲线（即 MDH 曲线）作为其特种识别曲线。这是因为在这一情形，$t_{\text{p}} + \Delta t \approx t_{\text{p}}$，$\frac{t_{\text{p}} + \Delta t}{t_{\text{p}}} \approx 1$，从而有［见式（1－21）］

$$p_{\text{ws}}(\Delta t) \approx p_{\text{ws}}(\Delta t = 0) + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_{\text{t}} r_{\text{w}}^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

这与压降方程（1－8）

$$p_{\text{wf}}(t) = p_{\text{i}} - \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_{\text{t}} r_{\text{w}}^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

非常相似。

（2）$t_{\text{p}} \gg \Delta t_{\max}$ 不成立，但关井前的生产仍达到了径向流动阶段的情形。此时，不能用 MDH 曲线，而应该用赫诺曲线，即 p_{ws}—$\lg\frac{t_{\text{p}} + \Delta t}{\Delta t}$（或 p_{ws}—$\lg\frac{\Delta t}{t_{\text{p}} + \Delta t}$）曲线，作为特种识别曲线。

由 MDH 曲线或赫诺曲线的直线段斜率的绝对值 m 计算流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$、渗透率 K 和压力

拟合值 $\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)$ 等，均与压降分析一样：

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121\times10^{-3}qB}{m}$$

$$K = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{mh}$$

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} = \frac{1.151}{m}$$

计算表皮系数 S 应用式（1－27′）

$$S = 1.151\left[\frac{\Delta p_{ws1h}}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077 + \lg\frac{t_p+1}{t_p}\right]$$

若关井前生产时间 t_p 很长，则 $\lg\frac{t_p+1}{t_p}\approx0$，

$$S = 1.151\left[\frac{\Delta p_{ws1h}}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right]$$

见式（1－28′）。这又与压降分析所用公式（1－26′）相一致。但这里的压差应为

$$\Delta p_{ws1h} = p_{ws}(\Delta t = 1h) - p_{ws}(\Delta t = 0)$$

其中 p_{ws}（$\Delta t = 1h$）也应在直线段或其延长线上取值。

第三步：终拟合。

这也和压降分析同样进行。

计算出各项参数后，应与特种识别曲线分析结果相对比，如果相差太大，则表明解释过程中出了错误，应当进行检查。

如果用手工进行解释，到此即告结束。

如果用计算机进行解释，则可由计算机用实际生产时间等资料计算一条压力恢复样板曲线，再进行拟合。而且还可以（也必须）进行下列步骤：

（1）用所得参数和关井前实际生产时间 t_p 计算无量纲赫诺曲线，与实测曲线相拟合。如果拟合不好，则证明解释过程有问题，必须重新检查。

所谓无量纲赫诺曲线，是指 $|p_D[(t_p+\Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)|$ 与 $\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 的关系曲线。由于在压力恢复过程中有

$$\begin{aligned}\Delta p(\Delta t) &= p_i - p_{ws}(\Delta t)\\ &= \frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{Kh}|p_D[(t_p+\Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)|\\ &= \frac{m}{1.151}|p_D[(t_p+\Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)|\end{aligned}$$

又由于

$$\frac{1.151}{m} = \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

故

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}[p_i - p_{ws}(\Delta t)] = p_D[(t_p+\Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)$$

因此，$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}[p_i - p_{ws}(\Delta t)]$ 与 $\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 的关系曲线（实测曲线），应当同无量纲赫诺曲线——$\{p_D[(t_p+\Delta t)_D] - p_D(\Delta t_D)\}$ 与 $\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 的关系曲线完全相同，或互相重合，如图 3－18 所示。该图中实线为无量纲赫诺曲线，圆点为由实测数据计算的 $\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}[p_i - p_{ws}(\Delta t)]$ 与 $\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 的关系曲线。这种曲线有个特点，就是当 Δt 很大时成斜率为 1.151 的直线。

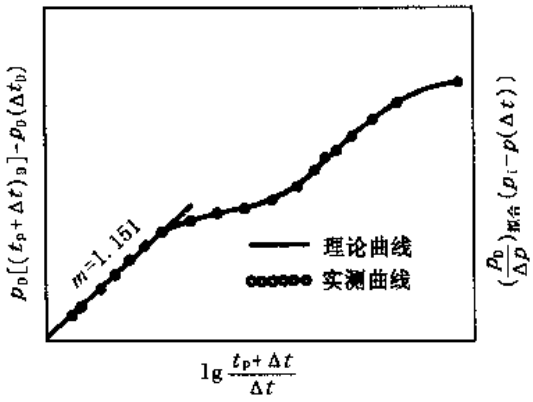


图 3－18　无量纲赫诺曲线拟合示意图

我们可以用这种曲线来检验解释的正确与否。如果解释正确，上述两条曲线就互相重合。若两条曲线不重合，但具有一致的形状（图 3－19），则表明所推算的 p_i 不对，必须检查并纠正。若两条曲线的形状不一致（图 3－20），则表明所选用的理论模型不对，必须重新进行解释。

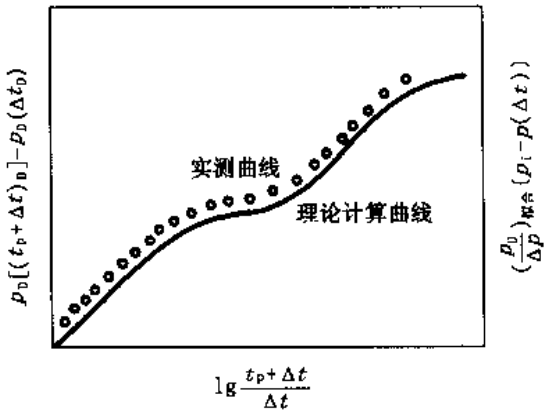


图 3－19　推算 p_i 数值不对的情形，无量纲赫诺曲线不能拟合

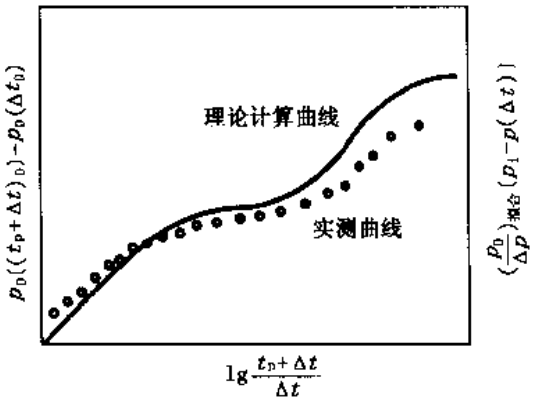


图 3－20　选用模型不对的情形，两条曲线的形状不相同

（2）用解释结果、实际产量和生产时间等资料进行数值模拟，得到理论计算压力变化曲线（包括压降曲线和压力恢复曲线），再与实测压力变化曲线（同样包括压降曲线和压力恢复曲线）相拟合，即压力史拟合（图 3－21）。

如果拟合不好，则证明解释过程有问题，必须重新检查。

整个解释过程，除增加无量纲赫诺曲线分析之外，也如图 3－11 所示。

如果测试井附近有不渗透边界，假定为直线断层，压力恢复曲线同样会出现上翘，两个直线段的斜率之比亦为 1:2，设两直线段交点对应的 $\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 值为 $\left[\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right]_x$（图 3－22），除可用第二章第三节所述方法计算测试井到断层的距离外，还可通过下列步骤求出测试井到断层的距离。

（1）求出 $(p_D)_x = \frac{1}{2}\ln\left[\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right]_x$。

(2) 在 Theis 样板曲线（图 3－23）上，由第一步算出的 $(p_D)_x$ 查出相对应的 $\left(\frac{t_D}{r_D^2}\right)_x$。查图时要选用一个 r_D 值，一般说来，断层距离比井的半径要大得多，所以可选用 $r_D \geqslant 20$，即最下方那一条样板曲线，也就是幂积分函数曲线。第九章图 9－2 是放大了的这条曲线，可用作实际解释。

(3) 用下式计算测试井到断层的距离 d：

$$d = 0.9487\sqrt{\frac{Kt_p}{\phi\mu C_t\left(\frac{t_D}{r_D^2}\right)_x}} \tag{3-21}$$

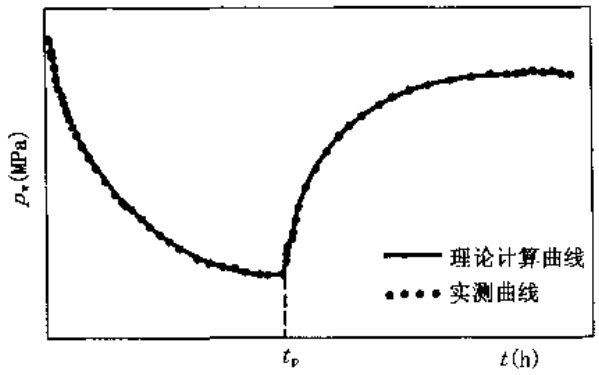


图 3－21　压力史拟合示意图

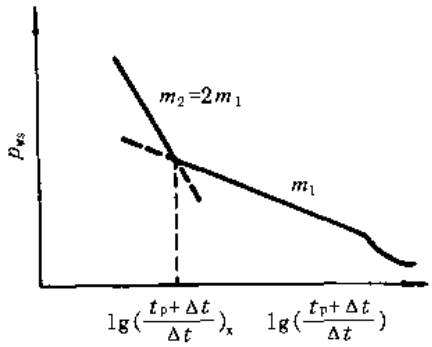


图 3－22　压力恢复曲线上的断层反映

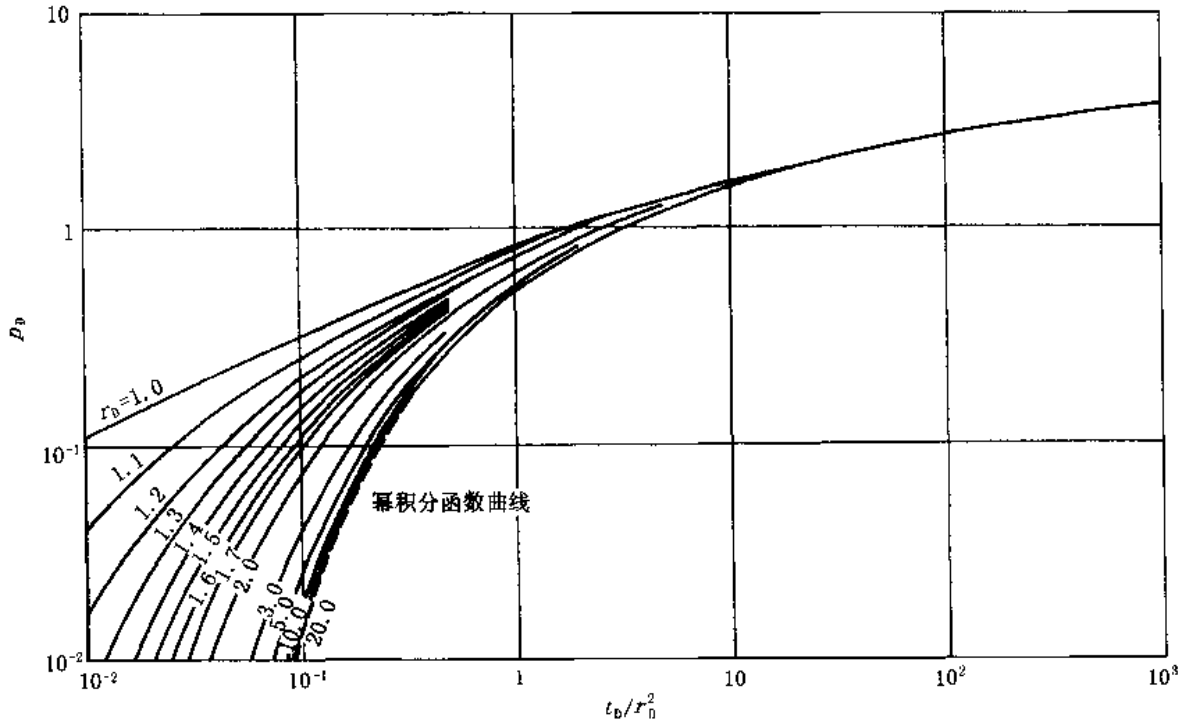


图 3－23　Theis 样板曲线

三、压力恢复资料的校正处理

上一节详细说明了压力恢复值与相应的压力降落值不相同。因此，一般说来，恢复曲线不能用压降样板曲线来分析。但是，我们可以将压力恢复曲线的资料加以校正处理，使它恰与压降曲线完全一致。

我们知道，压降公式为［式（1－9）］

$$\Delta p_{压降}(t) = p_i - p_{wf}(t) = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

$$= m\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

而压力恢复公式为［式（1－20）］

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t) = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t = 0)$$

$$= \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} - \lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

$$= m\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} - \lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p} + 0.9077 + 0.8686S\right)$$

显然，当开井时间 t 和关井时间 Δt 相等时，$\Delta p_{恢复}$（Δt）和 $\Delta p_{压降}$（t）之间只相差 δ：

$$\delta = \Delta p_{压降}(t) - \Delta p_{恢复}(\Delta t) = m\lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p} \qquad (\Delta t = t)$$

如果在 $\Delta p_{恢复}$（Δt）中加上这个 δ 值，它就和 $\Delta p_{压降}$（t）相等：

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t) + m\lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p} = \Delta p_{压降}(t) \qquad (\Delta t = t) \qquad (3-22)$$

因此，若把每一个压力恢复数据都加上相应的 $\delta = m\lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p}$ 值，就可得到能够与压降解释图版完全拟合的恢复曲线。换句话说：经过上述校正处理之后，就可以使用压降分析方法来进行压力恢复分析。

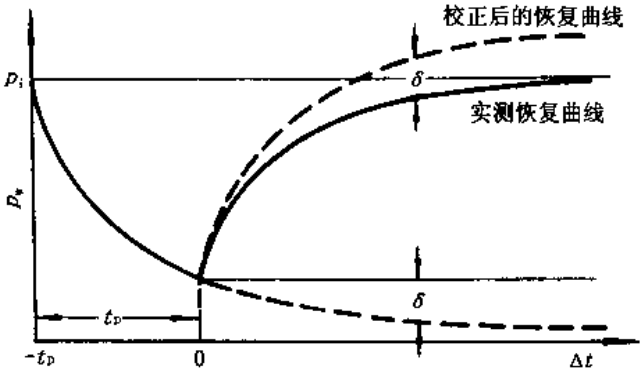


图 3－24　压力恢复曲线的校正处理示意图

图 3－24 表示校正前后的压力恢复曲线，并说明 δ 值的意义。需要指出的是：只有当 t_p，$t_p+\Delta t$ 和 Δt 三者都在径向流动阶段时，校正公式（3－22）才适用。

例 3－5　表 3－5 是某油井的压力恢复数据。其他有关参数是

$t_p = 22.45\text{h}$

$q = 127.2\text{m}^3/\text{d}$

$h = 9.14\text{m}$

$B = 1.25$

$\mu = 1.1\text{mPa}\cdot\text{s}$

$$\phi = 0.15$$

$$C_t = 1.45 \times 10^{-3}(\text{MPa})^{-1}$$

$$r_w = 0.091\text{m}$$

赫诺曲线如图 3－25，其直线段斜率 $m = 0.492$MPa/对数周期，直线段与 $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = 1$ 的交点对应的纵坐标为 $p^* = 22.429\text{MPa}$，$p_{ws}(\Delta t = 1\text{h}) = p_{ws}\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = 23.45\right) = 21.76\text{MPa}$。

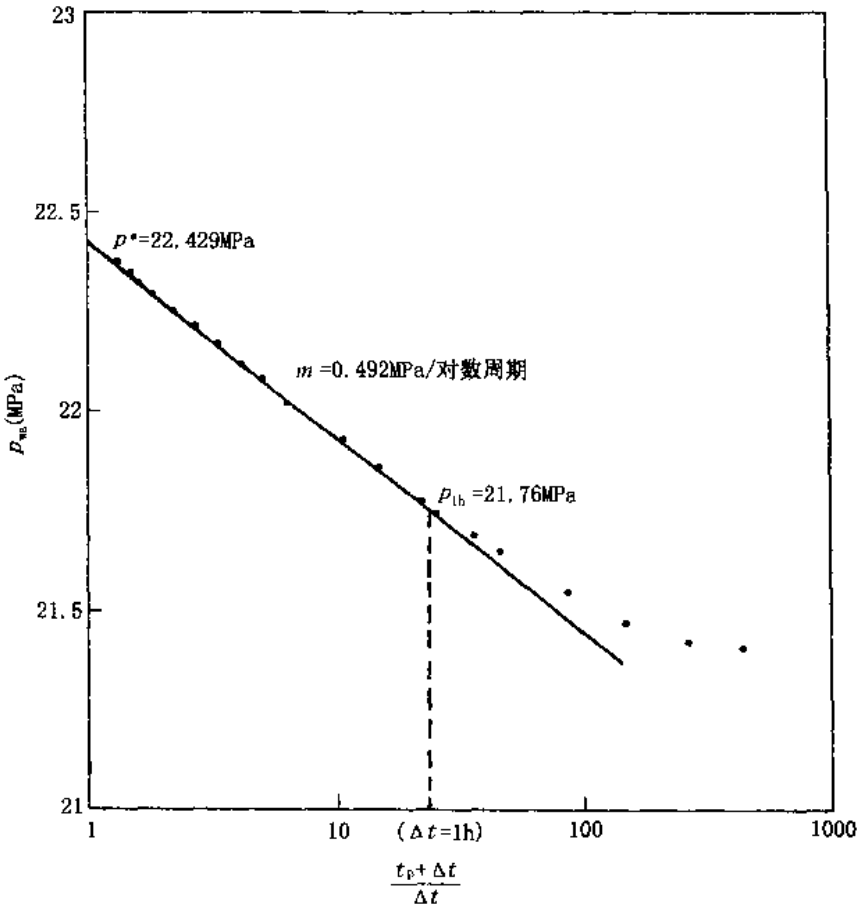


图 3－25　赫诺曲线（例 3－5）

用赫诺曲线直线段的斜率值进行压力恢复资料的校正处理（表 3－5）。用实测压力恢复数据和校正后的数据绘制的双对数曲线分别见图 3－26 中的“·”线和“×”线，可以看到它们之间有明显的差异。用校正后的曲线进行拟合分析，得拟合值

表 3－5　某井压力恢复数据表

Δt (min)	Δt (h)	p_{ws} (MPa)	$\Delta p = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t = 0)$ (MPa)	$\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$	$\delta = m \lg \frac{t_p + \Delta t}{t_p}$ (MPa)	$\Delta p + \delta$ (MPa)
0	0	21.353				
3	0.05	21.408	0.055	450.0	0.000475	0.055
5	0.0833	21.429	0.076	270.4	0.000792	0.077
9	0.15	21.477	0.124	150.7	0.001423	0.125
16	0.267	21.546	0.193	85.2	0.002523	0.196

续表

Δt (min)	Δt (h)	p_{ws} (MPa)	$\Delta p = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t=0)$ (MPa)	$\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$	$\delta = m\lg\frac{t_p+\Delta t}{t_p}$ (MPa)	$\Delta p + \delta$ (MPa)
30	0.5	21.643	0.290	45.9	0.00471	0.295
40	0.667	21.691	0.338	34.7	0.00625	0.344
66	1.1	21.780	0.427	21.4	0.01022	0.437
100	1.667	21.863	0.510	14.5	0.0153	0.525
138	2.3	21.925	0.572	10.8	0.0208	0.593
252	4.2	22.029	0.676	6.35	0.0366	0.713
334	5.567	22.084	0.731	5.03	0.0473	0.778
423	7.05	22.118	0.765	4.18	0.0584	0.823
574	9.567	22.173	0.820	3.35	0.0758	0.896
779	12.98	22.215	0.862	2.73	0.0975	0.960
1092	18.2	22.256	0.903	2.23	0.1269	1.030
1674	27.9	22.298	0.945	1.81	0.1726	1.118
2186	36.4	22.325	0.972	1.62	0.2060	1.178
2683	44.7	22.353	1.000	1.50	0.2342	1.234
3615	60.3	22.380	1.027	1.37	0.2786	1.306
4281	71.4	22.380	1.027	1.32	0.3055	1.333

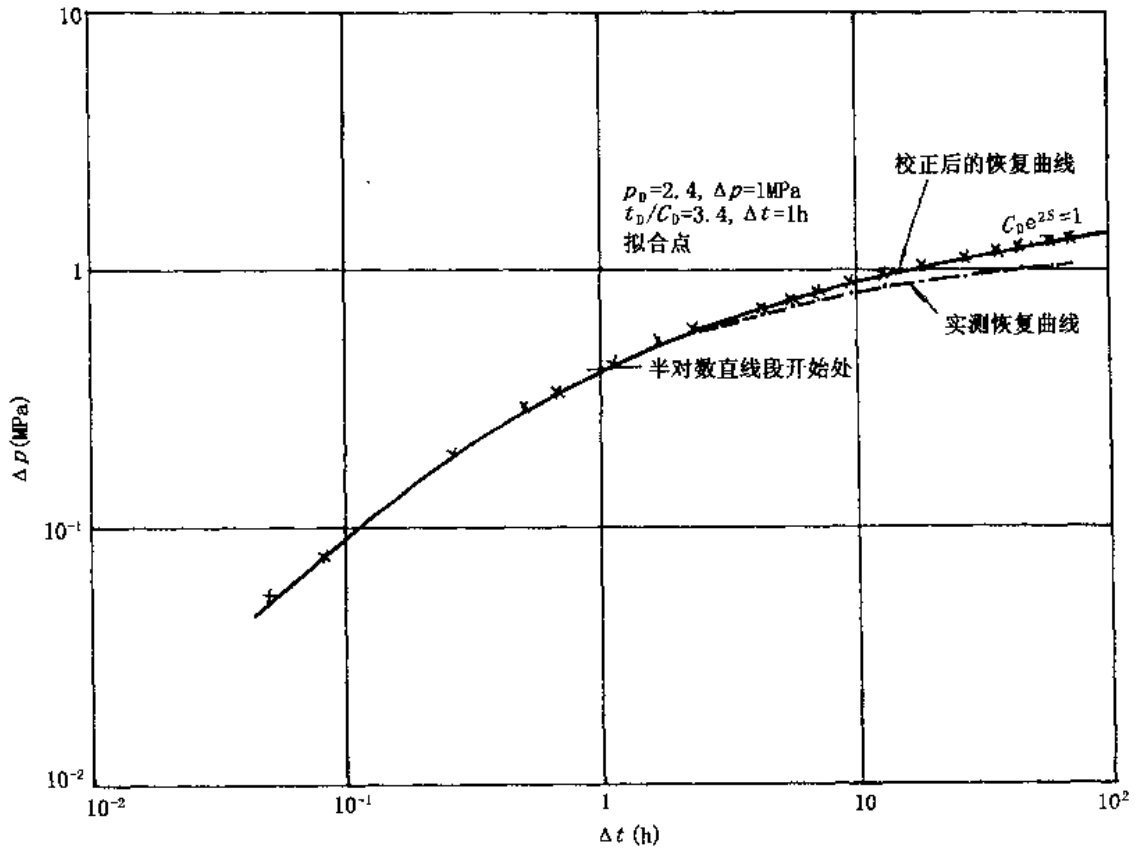


图 3－26　实测的和经校正的双对数曲线（例 3－5）

$$p_D = 2.4, \Delta p = 1\text{MPa}$$

$$\frac{t_D}{C_D} = 3.4, \Delta t = 1\text{h}$$

$$(C_D e^{2S})_{拟合} = 1$$

由曲线拟合还可确定：半对数曲线的直线段自第七个点开始，这和图 3－25 所画相一致；而纯井筒储集阶段没有测到。

由压力拟合值算得

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$= 1.842 \times 10^{-3} \times 127.2 \times 1.25 \times \frac{2.4}{1} = 0.7029 \ \frac{\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}}{\text{mPa} \cdot \text{s}}$$

$$Kh = \left(\frac{Kh}{\mu}\right) \times \mu = 0.7029 \times 1.1 = 0.7732 \ \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$$

$$K = \frac{(Kh)}{h} = \frac{0.7732}{9.14} = 0.08459 \ \mu\text{m}^2$$

由时间拟合值算得

$$C = 7.2\pi \frac{Kh}{\mu} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{拟合}} = 7.2\pi \times 0.7029 \times \frac{1}{\frac{3.4}{1}} = 4.676 \ \text{m}^3/\text{MPa}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} = \frac{4.676}{2\pi \times 0.15 \times 1.45 \times 10^{-3} \times 9.14 \times 0.091^2} = 45207$$

$$S = \frac{1}{2} \ln \frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{45207} = -5.36$$

由赫诺曲线分析得

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m} = \frac{2.121 \times 10^{-3} \times 127.2 \times 1.25}{0.492} = 0.6854 \ \frac{\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}}{\text{mPa} \cdot \text{s}}$$

$$Kh = 0.7540 \ \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$$

$$K = 0.08249 \ \mu\text{m}^2$$

$$S = 1.151 \left[\frac{p_i - p_{ws}(\Delta t = 1\text{h})}{m} - \lg \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077 + \lg \frac{t_p + 1}{t_p}\right]$$

$$= 1.151 \times \left(\frac{22.429 - 21.76}{0.492} - \lg \frac{0.08249}{0.15 \times 1.1 \times 1.45 \times 10^{-3} \times 0.091^2}\right.$$

$$\left. - 0.9077 + \lg \frac{22.45 + 1}{22.45}\right) = -4.77$$

图版拟合分析和赫诺曲线分析结果基本一致。

第四节　压力导数图版及拟合分析方法

我们知道，压力变化所服从的扩散方程式（1－1）是描述压力随时间的变化率，即压力对时间的导数与其他量之间的关系。但由于过去机械式压力计精确度不高，很难（甚至不可

能）用它所测得的压力资料计算和研究压力的导数，人们不得不在分析压力变化的基础上进行试井解释。事实上，压力随时间的变化率显然比压力的变化值更能说明问题，或者说更有意义。比如说“某井关井 100h，压力恢复了 25MPa”，这并不能使我们对该井的压力变化有多少认识，更谈不上对油层的性质能有什么印象；但如果知道“该井在关井 100h 后，压力仍在以 0.2MPa/h 的速度继续恢复”，则我们对该井的压力变化情形，以至对油层的性质，就会有一定的印象了。因此，很明显，利用压力导数进行试井解释，定会更加优越。

近年来，电子计算机和高精度电子压力计的应用，使得计算实测压力对时间的导数成为可行。Bourdet（布德）等人于 1983 年创立了压力导数解释图版及其拟合分析方法，使试井解释进一步取得了突破性的重大进步。实践已经证明：压力导数比压力本身更加敏感，对于一般压力分析不明显而常常被忽略的微小变化，压力导数却把它们放大而有了明显的反应，从而可以加以判别和解释。某些在压差双对数曲线上并没有什么明显特征的流动状态，在压力导数曲线上却有着非常明显的特征。特别是对于非均质地层，压力导数曲线具有非常特殊的特征，因而很容易识别，使得试井解释更加准确、更加容易。压力导数解释图版拟合分析更进一步提高了试井解释结果的可靠性。压力导数曲线的这些内在的优越性，使得它成了试井解释最重要的诊断工具。正是因为这个原因，压力导数图版拟合分析方法一问世，就非常迅速地在全世界广泛使用。本节将对压力导数解释图版及利用压力导数进行试井解释的方法作简单的介绍。

一、压降分析

如前所述，在纯井筒储集阶段，有［式（2－1）］

$$\Delta p = \frac{qB}{24C} \cdot t$$

或

$$p_D = \frac{t_D}{C_D}$$

故

$$p'_D = \frac{dp_D}{d(\frac{t_D}{C_D})} = 1 \tag{3-23}$$

$$\lg p'_D = 0 \tag{3-24}$$

而在径向流动阶段，有［式（1－9″）］

$$p_D = \frac{1}{2}[\ln \frac{t_D}{C_D} + 0.80907 + \ln(C_D e^{2S})]$$

故

$$p'_D = \frac{dp_D}{d(\frac{t_D}{C_D})} = \frac{1}{2}\frac{C_D}{t_D} \tag{3-25}$$

$$\lg p'_D = \lg \frac{1}{2} - \lg \frac{t_D}{C_D} \tag{3-26}$$

因此，在双对数坐标系中，若以 p'_D 为纵坐标，$\frac{t_D}{C_D}$ 为横坐标，则在早期的纯井筒储集阶段，曲线呈现一条水平的直线段［见式（3－23）或（3－24）］；在径向流动阶段，则呈现一条斜

率为－1的直线段［见式（3－26）］。而在这两个直线段之间，则是对应于不同的C_De^{2S}值的一组曲线（图3－27）。

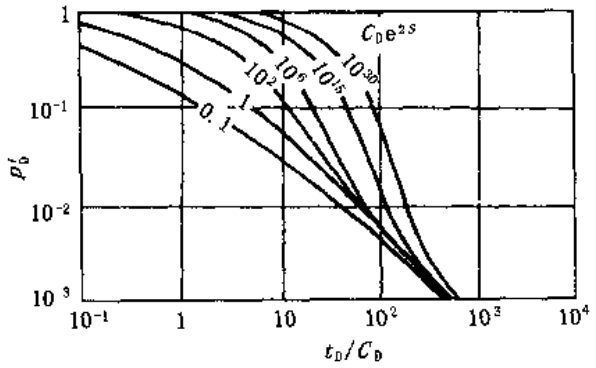


图3－27　均质油藏无量纲压力导数曲线
（p'_D与t_D/C_D的双对数曲线）

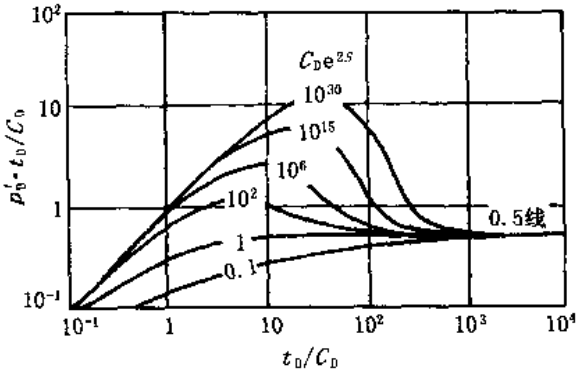


图3－28　均质油藏压力导数解释图版
（$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}$与$\frac{t_D}{C_D}$的双对数曲线）

图3－27还可以略加改进而成为更为适用的解释图版。仍是在双对数坐标系中，以$(p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D})$为纵坐标，而横坐标仍为$\frac{t_D}{C_D}$，则得图3－28。在早期纯井筒储集阶段，由于［式(3－23)］

$$p'_D = 1$$

故

$$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D} = \frac{t_D}{C_D}$$

$$\lg\left(p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}\right) = \lg\frac{t_D}{C_D}$$

这是斜率为1的直线段（即45°线），恰与前面所介绍的p_D—$\frac{t_D}{C_D}$图版（图3－10）完全一致。而在径向流动阶段，由于［式（3－25）］

$$p'_D = \frac{1}{2}\frac{C_D}{t_D}$$

故

$$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D} = 0.5$$

$$\lg\left(p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}\right) = \lg 0.5$$

这是一条水平直线段，为方便起见，让我们简称它为0.5线。

在45°线和0.5线之间，是一组对应于不同C_De^{2S}值的曲线，这些曲线形如一侧平缓、另一侧陡峭的山峰，对应的C_De^{2S}值越大，“山峰”隆起的幅度就越大，“峰顶”也就越高。

图3－28是以$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}$为纵坐标、$\frac{t_D}{C_D}$为横坐标的双对数曲线族，族中每一条曲线对应一个$C_De^{2S}$值。这就是压力导数解释图版，也常称作布德（Bourdet）图版。

用压力导数进行试井解释，可用《现代试井解释图版》一书中的图 6。该图中的一组红线即为压力导数样板曲线（图 3－28），而另一组黑线则是我们早已熟悉的 p_D—$\frac{t_D}{C_D}$样板曲线（图 3－10）。这就是说，这一图版是把 p_D—$\frac{t_D}{C_D}$曲线和（$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}$）—$\frac{t_D}{C_D}$曲线画在一起的复合图版。关于复合图版的应用，我们将在本节的下文中叙述。

进行压力导数解释图版拟合分析时，首先在与解释图版尺寸相同的双对数坐标纸上，画出实测压差对时间的导数 $\Delta p' \approx \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta t}$● 与时间 t 的乘积（$\Delta p' \cdot t$）与时间 t 的实测曲线（图 3－29），然后与解释图版相拟合。显然，由于现在有两个直线段——早期纯井筒储集阶段斜率为 1 的直线段（45°线）和径向流动阶段的水平直线段（0.5 线），可以控制实测曲线的拟合位置，图版拟合要比前面各种图版的拟合容易得多，而且易于得到惟一的拟合。事实上，如果测得的资料很可靠，而且包含了纯井筒储集和径向流动这两个阶段，则在实际拟合时，几乎只需把实测曲线往解释图版上一放，让径向流动阶段的水平直线段与图版上的 0.5 直线相重合，纯井筒储集阶段的直线段与图版上的 45°线相重合，就得到了惟一的拟合，剩下的事情只是看看中间过渡段与图版上哪一条山峰状的样板曲线相重合，从而得到曲线拟合值 $C_D e^{2S}$。

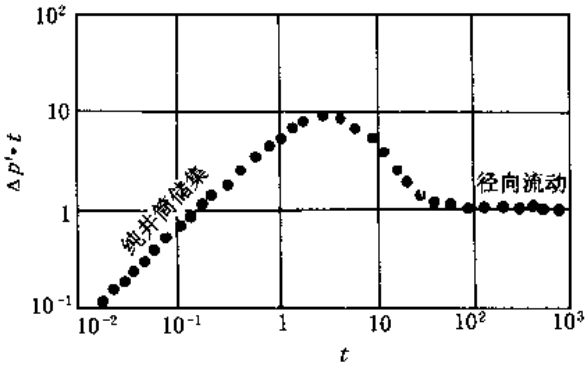


图 3－29　均质油藏实测压力导数曲线

由于

$$p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D} = \frac{dp_D}{d\left(\frac{t_D}{C_D}\right)} \cdot \frac{t_D}{C_D} = \frac{dp_D}{dt} \frac{C_D}{\frac{dt_D}{dt}} \cdot \frac{t_D}{C_D}$$

$$= \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \frac{d(\Delta p)}{dt} \cdot \frac{\phi\mu C_t r_w^2}{3.6K} \cdot \frac{3.6Kt}{\phi\mu C_t r_w^2}$$

$$= \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \frac{d(\Delta p)}{dt} \cdot t = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \cdot \Delta p' \cdot t \qquad (3-27)$$

故由纵坐标拟合值（为方便起见，称作压力导数拟合值）可得

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left[\frac{p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\Delta p' \cdot t}\right]_{拟合} \qquad (3-28)$$

$$Kh = 1.842 \times 10^{-3} q\mu B \left[\frac{p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\Delta p' \cdot t}\right]_{拟合} \qquad (3-29)$$

● 这里用差商$\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta t} = \frac{\Delta p_i - \Delta p_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$来近似计算导数$\frac{d(\Delta p)}{dt}$，实际上还可简化为$\frac{d(\Delta p)}{dt} = -\frac{dp}{dt} \approx \frac{p_{i-1} - p_i}{t_i - t_{i-1}}$。

$$K = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{h} \left[\frac{p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\Delta p' \cdot t}\right]_{拟合} \tag{3-30}$$

由时间拟合值可得

$$C = 7.2\pi \frac{Kh}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}}$$

由此进而算出

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$$

再由曲线拟合值得

$$S = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D}$$

画实测曲线时，首先要计算实测压力的导数。表 3-6 是简单地用差分代替微分近似计算实测压力的导数，即

表 3-6　用差分法计算压力导数

j (序号)	t_j (h)	$\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$	p_j (MPa)	$\Delta p_j = p_{j-1} - p_j$	$\Delta p'_j \approx \frac{\Delta p_j}{\Delta t_j}$	$\Delta p'_j \cdot t_j$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6) $=\frac{(5)}{(3)}$	(7) = (6) × (2)
1	0.01		35.06			
2	0.03	0.02	34.84	0.22	11	0.33
3	0.05	0.02	34.64	0.20	10	0.50
4	0.08	0.03	34.43	0.21	7	0.56
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

$$\Delta p'_j = \left[\frac{d(\Delta p)}{dt}\right]_j \approx \left[\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta t}\right]_j = \frac{(p_i - p_j) - (p_i - p_{j-1})}{t_j - t_{j-1}} = \frac{p_{j-1} - p_j}{t_j - t_{j-1}}$$

$$\Delta p'_j \cdot t_j = \frac{p_{j-1} - p_j}{t_j - t_{j-1}} \cdot t_j$$

表 3-7 则是先用差分法计算左导数和右导数，然后再进行加权平均而计算实测压力的导数，即

$$\Delta p'_j = \left[\frac{d(\Delta p)}{dt}\right]_j = \left[\frac{p_{j-1} - p_j}{t_j - t_{j-1}}(t_{j-1} - t_j) + \frac{p_j - p_{j+1}}{t_{j+1} - t_j}(t_j - t_{j-1})\right] \div (t_{j+1} - t_{j-1})$$

$$\Delta p'_j \cdot t_j = \left[\frac{p_{j-1} - p_j}{t_j - t_{j-1}}(t_{j+1} - t_j) + \frac{p_j - p_{j+1}}{t_{j+1} - t_j}(t_j - t_{j-1})\right] \times \frac{t_j}{t_{j+1} - t_{j-1}}$$

表 3-7　用左、右导数加权平均方法计算压力导数

j	t_j (h)	Δt_j (h)	p_j (MPa)	Δp_j (MPa)	$\frac{\Delta p_j}{\Delta t_j}$	$\frac{\Delta p_j}{\Delta t_j}\Delta t_{j-1}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		$(2)_j-(2)_{j-1}$		$(4)_{j-1}-(4)_j$	$(5)_j\div(3)_j$	$(6)_j\times(3)_{j-1}$
0	0		35.17			
1	0.01	0.01	35.06	0.11	11.00	
2	0.03	0.02	34.84	0.22	11.00	0.1100
3	0.05	0.02	34.64	0.20	10.00	0.2000
4	0.08	0.03	34.43	0.20	6.667	0.1333
5	0.12	0.04	34.24	0.19	4.750	0.1425
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

j	$\frac{\Delta p_{j-1}}{\Delta t_{j-1}}\Delta t_j$	$\frac{\Delta p_{j-1}}{\Delta t_{j-1}}\Delta t_j+\frac{\Delta p_j}{\Delta t_j}\Delta t_{j-1}$	$\Delta t_{j-1}+\Delta t_j$	$\Delta p'_j$	$\Delta p'_j\cdot t_j$
(1)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	$(6)_{j-1}\times(3)_j$	$(7)_j+(8)_j$	$(3)_{j-1}+(3)_j$	$(9)_j\div(10)_j$	$(11)_j\times(2)_j$
0					
1					
2	0.2200	0.3300	0.03	11.00	0.3300
3	0.2200	0.4200	0.04	10.50	0.5250
4	0.3000	0.4333	0.05	8.666	0.6933
5	0.2667	0.4092	0.07	5.846	0.7015
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

在时间间隔 $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ 不均匀时，这种方法可起到某种匀整化的作用。

用手工计算实测压力的导数相当麻烦，可编制程序用计算机计算。

二、恢复分析

用压力导数方法进行试井解释的又一个优越之处，在于可以非常简便地用压降解释图版来拟合压力恢复曲线，即进行恢复分析，而不会出现任何偏离。

在纯井筒储集阶段，压力恢复情形与压降情形完全一样，无需多加讨论。这里只讨论径向流动阶段。

我们在前一节讨论过，关井 Δt 时刻的压力恢复值为［式 (3-18)］

$$\Delta p_{恢复}(\Delta t)=\frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\{p_D[(t_p)_D]-p_D[(t_p+\Delta t)_D]+p_D(\Delta t_D)\}$$

或

$$p_{D恢复}(\Delta t_D)=p_D[(t_p)_D]-p_D[(t_p+\Delta t)_D]+p_D(\Delta t_D)$$

式中 t_p 为关井前的生产时间。于是有

$$\frac{\mathrm{d}p_{D恢复}(\Delta t_D)}{\mathrm{d}(\frac{\Delta t_D}{C_D})} = -\frac{\mathrm{d}p_D[(t_p+\Delta t)_D]}{\mathrm{d}(\frac{\Delta t_D}{C_D})} + \frac{\mathrm{d}p_D(\Delta t_D)}{\mathrm{d}(\frac{\Delta t_D}{C_D})} \tag{3-31}$$

由前面讨论［式（3－25）］知，在径向流动阶段，压降情形有

$$p'_D = \frac{\mathrm{d}p_D(t_D)}{\mathrm{d}(\frac{t_D}{C_D})} = 0.5\frac{C_D}{t_D} = \frac{0.5}{\frac{t_D}{C_D}}$$

在恢复情形则应有［式（3－31）］：

$$\begin{aligned} p'_{D恢复} &= \frac{\mathrm{d}p_{D恢复}(\Delta t_D)}{\mathrm{d}(\frac{\Delta t_D}{C_D})} = \frac{0.5}{\frac{\Delta t_D}{C_D}} - \frac{0.5}{\frac{(t_p+\Delta t)_D}{C_D}} \\ &= \frac{0.5C_D[(t_p+\Delta t)_D - \Delta t_D]}{\Delta t_D \cdot (t_p+\Delta t)_D} \\ &= \frac{0.5(t_p)_D}{\frac{\Delta t_D}{C_D}\cdot(t_p+\Delta t)_D} \end{aligned}$$

于是得

$$p'_{D恢复} \cdot \frac{\Delta t_D}{C_D} \cdot \frac{(t_p+\Delta t)_D}{(t_p)_D} = 0.5$$

因此，如果把压降曲线解释图版（图 3－28）的纵坐标看做 $[p'_D \cdot \frac{\Delta t_D}{C_D} \cdot \frac{(t_p+\Delta t)_D}{(t_p)_D}]$，而不是原来的 $(p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D})$，把横坐标看做 $\frac{\Delta t_D}{C_D}$，则这个压降解释图版就成为压力恢复解释图版（图 3－30）。

在进行恢复分析时，在尺寸与《现代试井解释图版》一书中图 6 完全相同的双对数坐标纸上，以 $(\Delta p'_{恢复} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_p+\Delta t}{t_p})$ 为纵坐标，Δt 为横坐标，画出实测压力恢复曲线，并同压降解释图版（《现代试井解释图版》一书中图 6）相拟合，此时把该图版的纵坐标 $(p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D})$ 视作 $[p'_{D恢复}\frac{\Delta t_D}{C_D} \cdot \frac{(t_p+\Delta t)_D}{(t_p)_D}]$，读出纵坐标的拟合值，由于［式（3－27）］

$$p'_D \cdot \frac{\Delta t_D}{C_D} = \frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}\cdot\Delta p'\cdot\Delta t$$

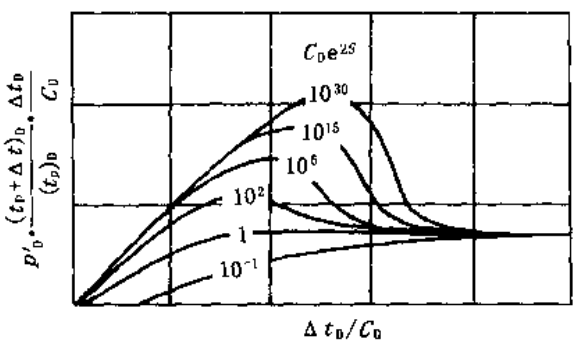


图 3－30　均质油藏压力恢复的导数解释图版

故

$$p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{\Delta t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}} \cdot \frac{(t_{\mathrm{p}}+\Delta t)_{\mathrm{D}}}{(t_{\mathrm{p}})_{\mathrm{D}}} = \frac{Kh}{1.842\times 10^{-3} q\mu B} \cdot \Delta p' \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}$$

因此可由下列式子计算流动系数、地层系数和渗透率：

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842\times 10^{-3} qB \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{\Delta t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}} \cdot \frac{(t_{\mathrm{p}}+\Delta t)_{\mathrm{D}}}{(t_{\mathrm{p}})_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-32}$$

$$Kh = 1.842\times 10^{-3} q\mu B \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{\Delta t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}} \cdot \frac{(t_{\mathrm{p}}+\Delta t)_{\mathrm{D}}}{(t_{\mathrm{p}})_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-33}$$

$$K = 1.842\times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h} \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{\Delta t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}} \cdot \frac{(t_{\mathrm{p}}+\Delta t)_{\mathrm{D}}}{(t_{\mathrm{p}})_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-34}$$

为了方便起见，图版中纵坐标保持不变，仍以所标示的 $p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}$ 表示，上面几个式子可写成

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842\times 10^{-3} qB \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-32'}$$

$$Kh = 1.842\times 10^{-3} q\mu B \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-33'}$$

$$K = 1.842\times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h} \left[\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'_{\text{恢复}} \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-34'}$$

C，C_{D} 和 S 的求法与上一节压降分析相同。实测压力导数的计算也可参照表 3－7（应稍作修改）进行。

三、复合图版的应用

由前面所述可知：压力导数解释图版，对于 C_De^{2S}取任何数值的情形，在早期纯井筒储集阶段均为斜率为 1 的直线（45°线），而在径向流动阶段则都是水平的 0.5 直线。这就是说，所有的样板曲线，在早期纯井筒储集阶段合并成为一条直线（45°线），在径向流动阶段又合并成为另一条直线（0.5 直线）。显然，这两个阶段的曲线（即直线段）都同井筒储集系数 C 和表皮系数 S 无关，然而这两个直线段之间的曲线部分，却反映出 C 和 S 值的影响。

有这样的情形：在 p_D—$(\frac{t_D}{C_D})$ 图版（如图 3－10）与实测的 Δp—t 曲线拟合时，很难判断哪一条样板曲线拟合得最好，即很难确定 C_De^{2S}的值。换句话说：似乎有许多条样板曲线都拟合得不错。这时，通过压力导数图版拟合，却可以容易地得到惟一的拟合，把 C_De^{2S}值确定下来。

我们把这两种解释图版——p_D—$(\frac{t_D}{C_D})$ 图版（图 3－10）和 $(p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D})$—$(\frac{t_D}{C_D})$ 图版（图 3－28）迭加在一起，得到一个新的复合解释图版，如图 3－31 所示。《现代试井解释图版》一书中的图 6 就是这种图版。在拟合时，要同时进行两种图版拟合，即既作 p_D—$(\frac{t_D}{C_D})$ 图版与 Δp—t 实测曲线的拟合，又作 $(p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D})$—$(\frac{t_D}{C_D})$ 图版与 $(\Delta p'\cdot t)$—t 实测曲线的拟合。为此，必须在与复合图版刻度相同的双对数坐标纸上，同时画出 Δp—t 曲线和 $\Delta p'\cdot t$—t 曲线（图 3－32）。一画出这两条曲线，从它们在中期段相隔距离的大小，就可以定性地判断 C_De^{2S}值的大小了：Δp—t 曲线与 $\Delta p'\cdot t$—t 曲线相隔距离 d 越大，C_De^{2S}值就越大（图 3－32）。

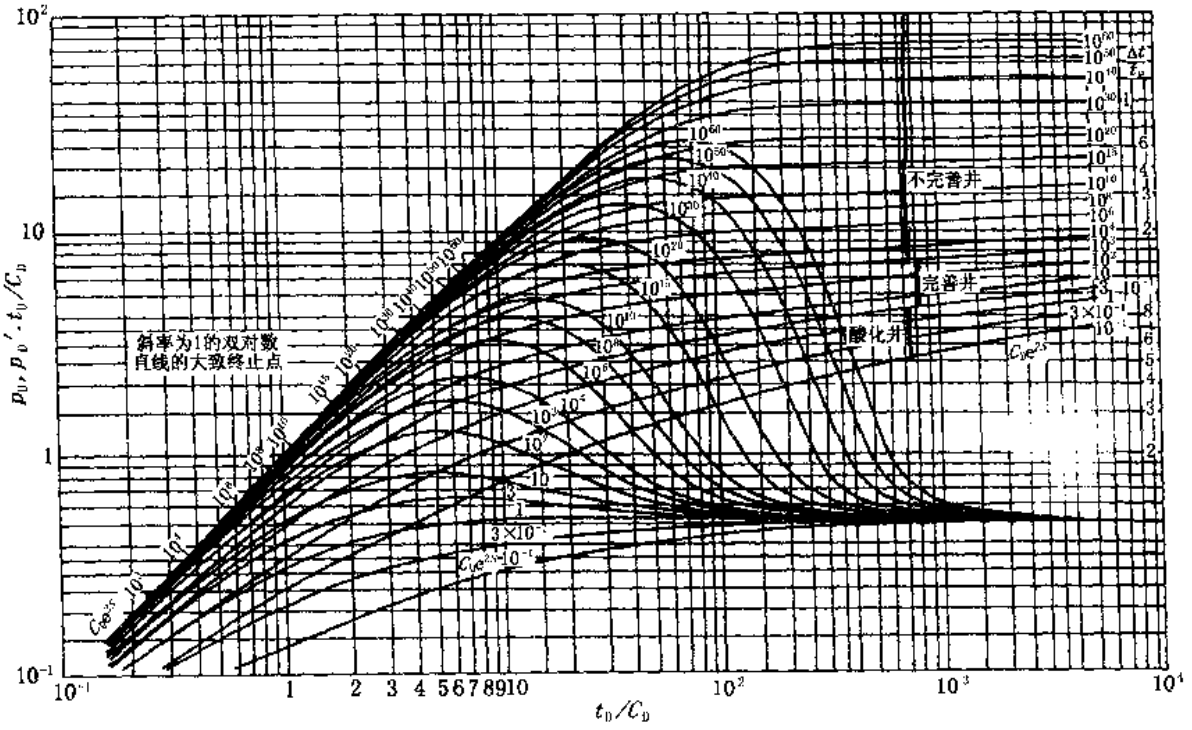


图 3－31　均质油藏复合解释图版

用复合图版同时进行两种图版的拟合，可以互为补充，互为验证。特别是对于油藏类型的识别和流动阶段的划分，复合图版的拟合具有很显著的作用。

四、几种外边界在压力导数曲线上的反映

在测试井附近有不渗透边界（如断层）的情形，有（参看第二章第三节）

$$\Delta p = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\left[\lg\frac{8.085\eta t}{r_w^2}+\lg\frac{8.085\eta t}{(2d)^2}+0.8686S\right]$$

$$= 2\times\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{Kh}\lg\left(\frac{8.085\eta t}{2r_w d}+0.4343S\right)$$

即

$$p_D = \ln t_D + \ln(1.1229r_w) - \ln d + S$$

故

$$p'_D = -\frac{\mathrm{d}p_D}{\mathrm{d}\left(\frac{t_D}{C_D}\right)} = \frac{C_D}{t_D}$$

$$p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D} = 1$$

所以，在这种情形，压力导数曲线将从 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=0.5$（0.5线）上升一个台阶而变成 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=1$（称之为“1线”，见图3-33，其左上角是井位示意图）。下一段中的例3-6就是一个测试井附近有断层的实例。

要是测试井附近有两条互相垂直相交的不渗透边界（图2-21），则压力导数曲线将由0.5线上升一个更高的台阶，变成 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=2$（称之为“2线”，见图3-34，其左上角是井位示意图）。若断层更多，其展布情形更复杂，则压力导数曲线向上抬升也将呈现更复杂的状况。

如果测试井是在封闭油藏中，则在晚期将进入拟稳定流动阶段，此时压力导数曲线成为斜率为1的直线（$p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=\frac{t_D}{C_D}$），与压差曲线相重合（图3-35，其左上角是井位示意图）。但在压力恢复情形，并无“拟稳定流动阶段”，封闭油藏在压力导数曲线上的反映是向下滑降（图3-36），这是由于压力恢复速度越来越慢所造成的。

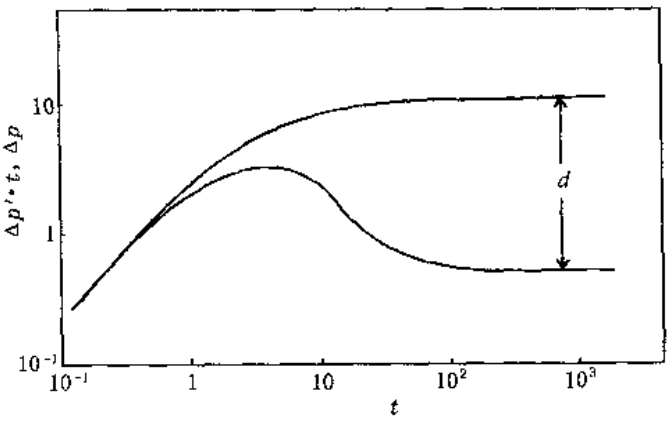


图3-32　与复合图版相拟合的复合曲线

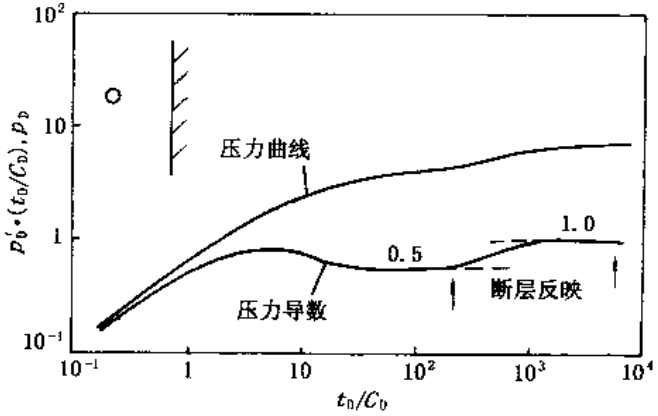


图 3－33　在双对数图上，单一断层对压力及导数曲线形态的影响

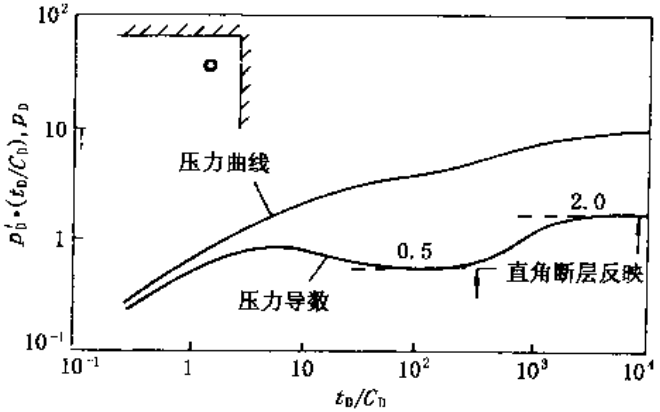


图 3－34　存在直角断层时不稳定压力曲线双对数及导数图

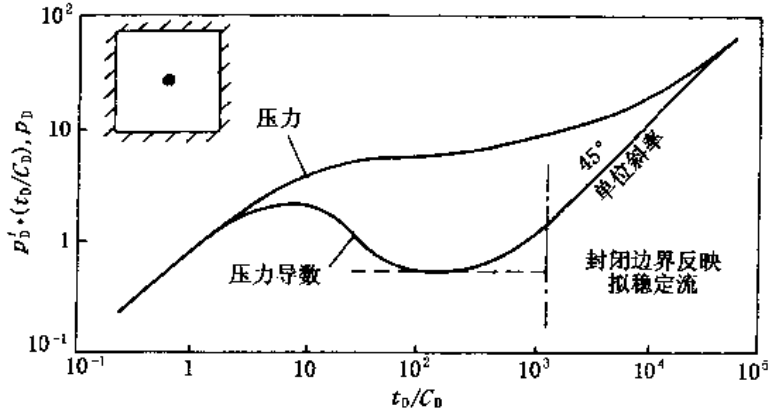


图 3－35　封闭地层中心一口井开井压力降及导数曲线晚期形态示意图

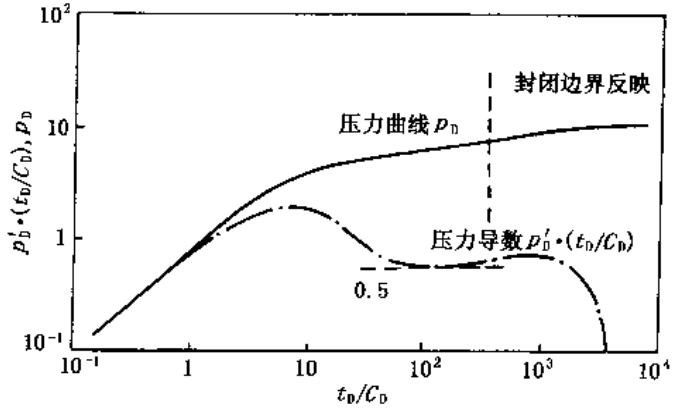


图 3－36　封闭地层中心一口井关井压力恢复曲线图

测试井附近若有定压边界（如油层的非常活跃的边水界面），则由于在晚期段压力逐步趋于稳定，不管是压力降落还是压力恢复，其导数曲线都将向下滑降，如图 3－37 所示。

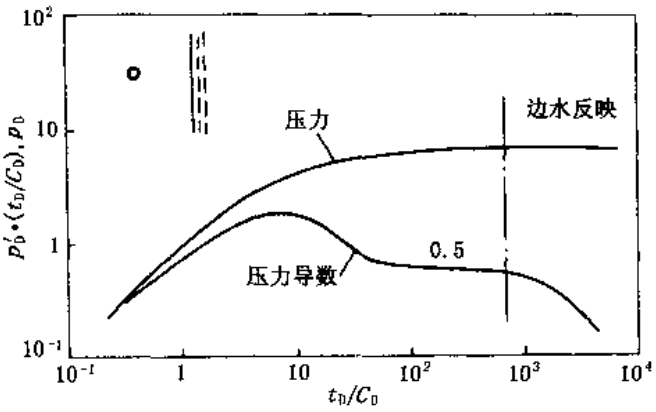


图 3－37　井附近存在定压边界时压降或压力恢复曲线形态

例 3－6　表 3－8 是我国北部湾涠 10－3 油田砂岩油藏一口生产井的实测压力恢复数据。该井关井前生产了 20.51h，其前一阶段频繁改变油嘴，但无产量记录，后来比较稳定的产量为 257.4m^3/d，我们把它作为这一阶段（共 12.8h）的产量；后一阶段生产比较稳定，历时 7.63h，产量为 403.2m^3/d。其他有关基本参数如下所列：

$$h = 9\text{m}$$

$$B_0 = 1.04\text{m}^3/\text{m}^3$$

$$\phi = 0.225$$

$$\mu_0 = 0.44\text{mPa} \cdot \text{s}$$

$$C_t = 2.118 \times 10^{-3}(\text{MPa})^{-1}$$

$$r_w = 0.08839\text{m}$$

初拟合的结果如图 3－38 所示。图中“。”线和“·”线分别为实测压差曲线和实测压力导数曲线，而实线则分别为无限大均质地层的格林加登样板曲线和布德样板曲线。压差曲线和压力导数曲线均有明显的不渗透边界反映。地质分析也确认该井两侧均有断层。于是在解释模型中加上两条与该井距离相等且互相平行的断层，拟合结果见图 3－39。图 3－38 和图 3－39 中上方的实线和“。”线分别为格林加登样板曲线和实测压差曲线，下方的实线和“·”线分别为布德样板曲线和实测压力导数曲线。显然，在解释模型中加上两条断层后，实测曲线与样板曲线拟合得相当好。根据拟合结果算得的参数是

$$K = 0.1045\mu\text{m}^2$$

$$S = 1.89$$

$$C = 5.3\text{m}^3/\text{MPa}$$

$$d_1 = d_2 = 95\text{m}$$

其中 d_1 和 d_2 表示测试井离两条断层的距离。

经多产量叠加处理，画出恢复压力与时间叠加函数的关系曲线，见图 3－40。此图明显呈现两个相交直线段，上翘直线段与第一直线段的斜率比为 2.87。这也表明：测试井附近有两条等距离的互相平行的直线型不渗透边界的模型符合本井的实际情况。由恢复压力与时间叠加函数关系曲线分析得到的结果是：

$$K = 0.1037\mu m^2$$

$$S = 1.73$$

$$p^* = 17.92MPa$$

$$d_1 = d_2 = 100m$$

表 3-8　渭 10-3 油田某井压力恢复数据（例 3-6）

Δt (h)	p_{ws} (MPa)	Δt (h)	p_{ws} (MPa)
0	13.047	4.4504	20.027
0.016912	13.674	5.4505	20.093
0.033578	14.586	6.4505	20.144
0.050246	15.191	7.4505	20.176
0.066912	15.789	8.4506	20.209
0.083580	16.212	9.4506	20.246
0.10025	16.767	10.4507	20.275
0.11691	17.723	11.4507	20.307
0.15025	17.724	12.4507	20.326
0.18358	17.992	13.4508	20.355
0.21692	18.182	14.4508	20.370
0.25025	18.298	15.4509	20.384
0.28359	18.371	16.4509	20.399
0.31692	18.444	17.4509	20.428
0.35026	18.524	18.4510	20.436
0.38359	18.583	19.4510	20.457
0.41693	18.663	21.4511	20.472
0.45026	18.736	22.4511	20.479
0.61694	19.064	24.4512	20.501
0.78361	19.298	26.4513	20.523
0.95028	19.422	27.4513	20.560
1.1170	19.465	28.4514	20.574
1.2836	19.495	33.4516	20.589
1.4503	19.538	35.4517	20.596
1.9503	19.684	37.4517	20.611
2.4503	19.794	40.4519	20.640
2.9504	19.867	42.4519	20.654
3.4504	19.932		

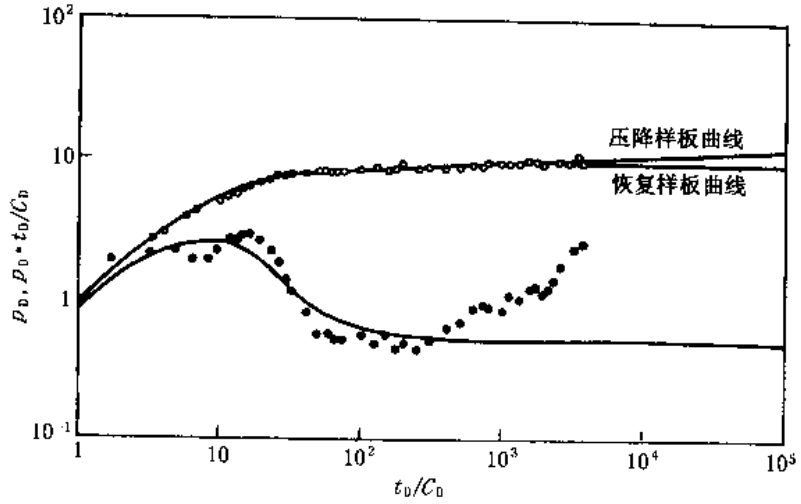


图 3－38　初拟合结果（例 3－6）

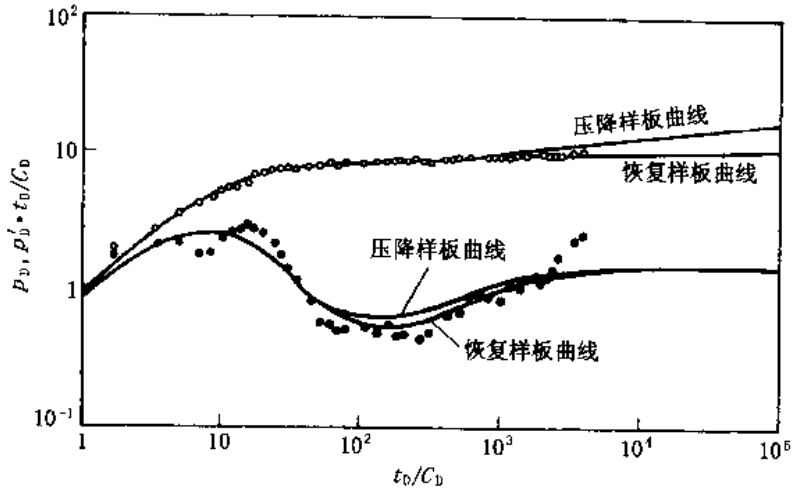


图 3－39　模型中加上两条断层后的拟合结果（例 3－6）

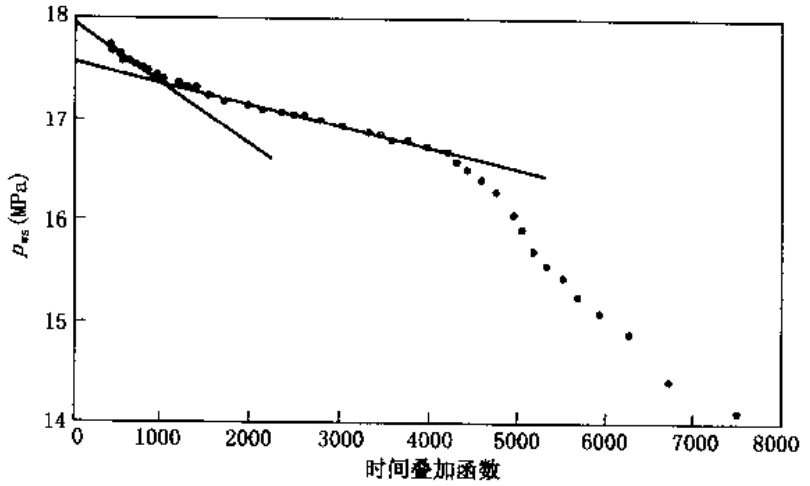


图 3－40　关井恢复压力与时间叠加函数的关系曲线（例 3－6）

无量纲赫诺曲线（图 3－41）拟合得很好。图 3－42 和图 3－43 分别是加上两条断层之前及之后的压力史拟合曲线，可以看到，图 3－43 中实测压力变化（点线）和由解释结果计算的理论压力变化（实线），包括压降和压力恢复，都拟合得很好。这进一步证实了两条断层的存在和其他解释结果的正确性。

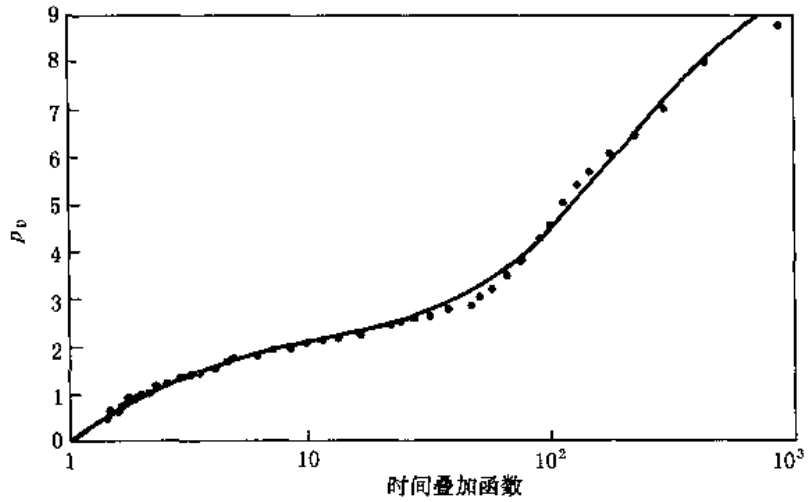


图 3－41　无量纲赫诺曲线拟合图（例 3－6）

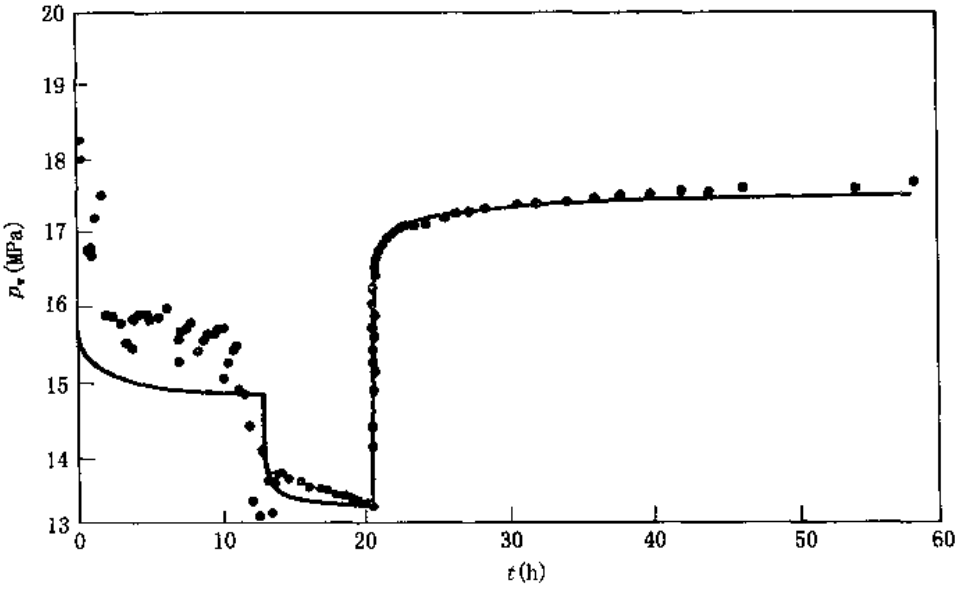


图 3－42　加上断层之前的压力史拟合曲线（例 3－6）

例 3－7　我国海域 WX 构造的第一口探井 WX－1 井 DST 采用二开三关测试，图 3－44 是其三次压力恢复的直角坐标图。可以看到，在如此短暂的 DST 测试过程中，每一次关井，地层压力都下降了一个台阶。这说明此构造含气面积不大，储量很有限。终开井历时 13.8h，其油嘴和气产量列于表 3－9；终关井 19.5h，测得了较好的压力恢复资料。采用变产量通过叠加方法进行处理，其终压力恢复与时间叠加函数的关系曲线（图 3－45）呈现两个直线段，后一直线段明显上翘，两直线段的斜率比为 4∶1，显示出明显的边界干扰。其压力导数曲线更加证实了这一点。图 3－46 是用均质模型未加上边界影响时的拟合情况。经用

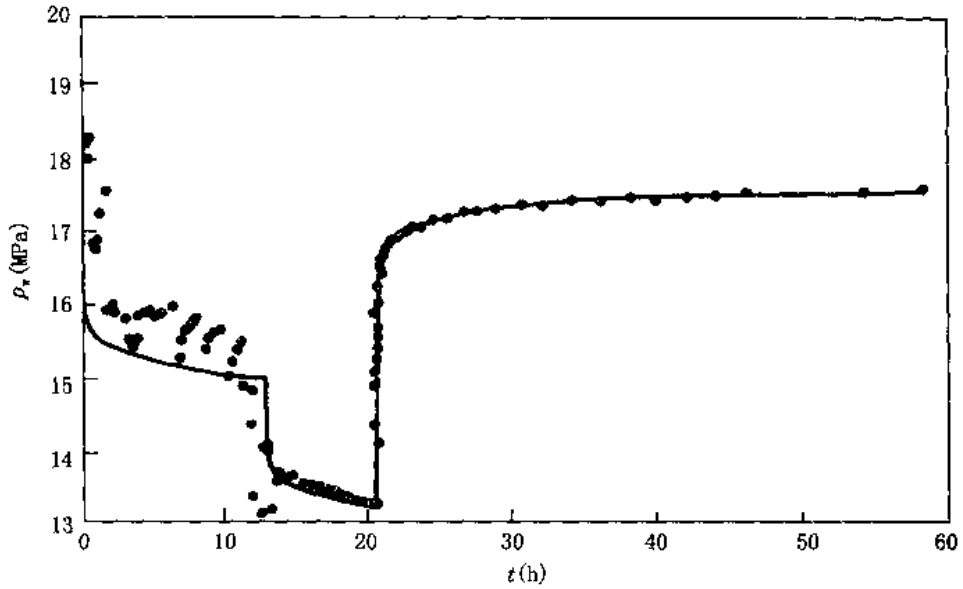


图 3－43　加上两条断层后的压力史拟合曲线（例 3－6）

多种不渗透边界模型进行试验，最后选用狭长的长方形封闭边界模型（其长宽比为 8∶1），得到比较满意的拟合（图 3－47），再经无量纲赫诺曲线（图 3－48）和压力史拟合曲线（图 3－49）验证，得到较满意的解释结果：

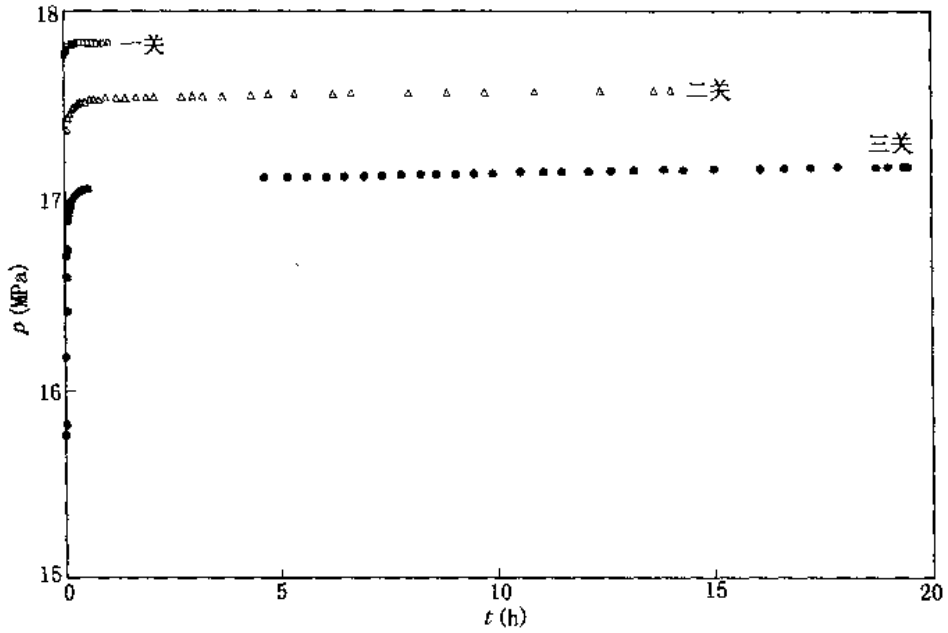


图 3－44　WX－1 井三次关井的压力恢复曲线对比图（例 3－7）

表 3－9　WX－1 井 DST 终开井产量数据

油嘴（mm）	产量（$10^4m^3/d$）	历时（h）
6.14	8.83	3.88
12.7	14.91	4.35
19.1	42.35	5.55

气藏模型：均质长方形封闭气藏（图 3－50）

气藏无量纲面积：$A_D = \dfrac{\phi h C_t}{0.15916 C} A = 30000$

长宽比：$d_1 : d_2 = 8 : 1$

偏心距：$d_3 : d_1 = 0.77$

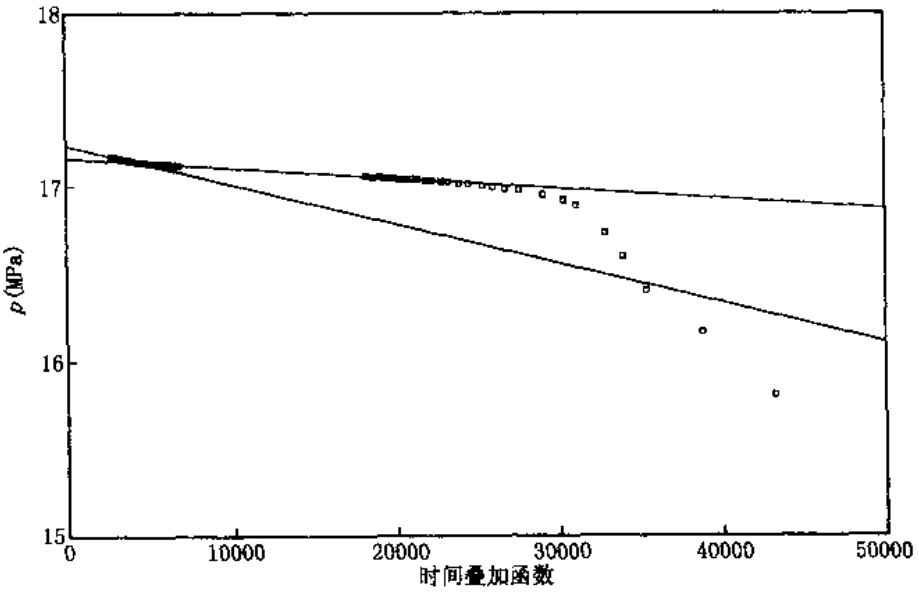


图 3－45　终恢复压力与时间叠加函数的关系曲线（例 3－7）

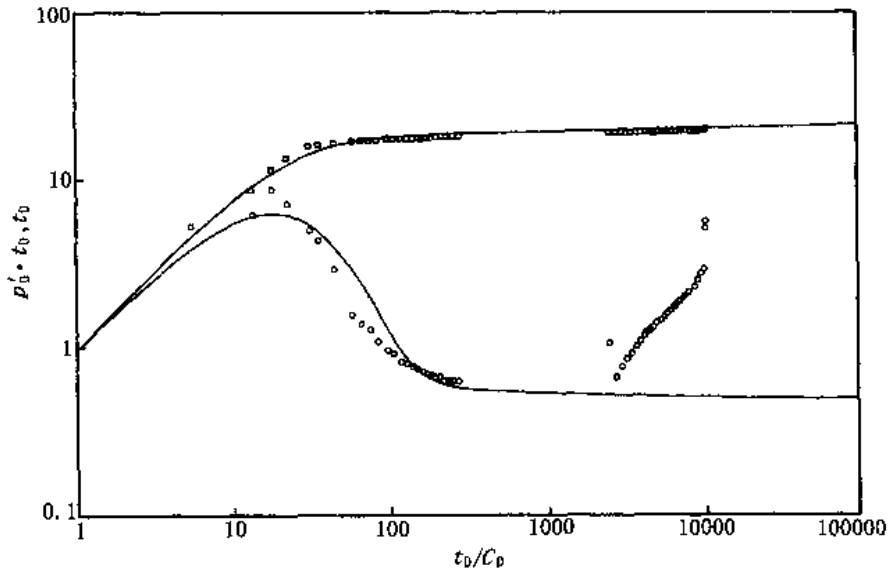


图 3－46　终恢复压力及导数曲线拟合图（例 3－7）
（未考虑边界）

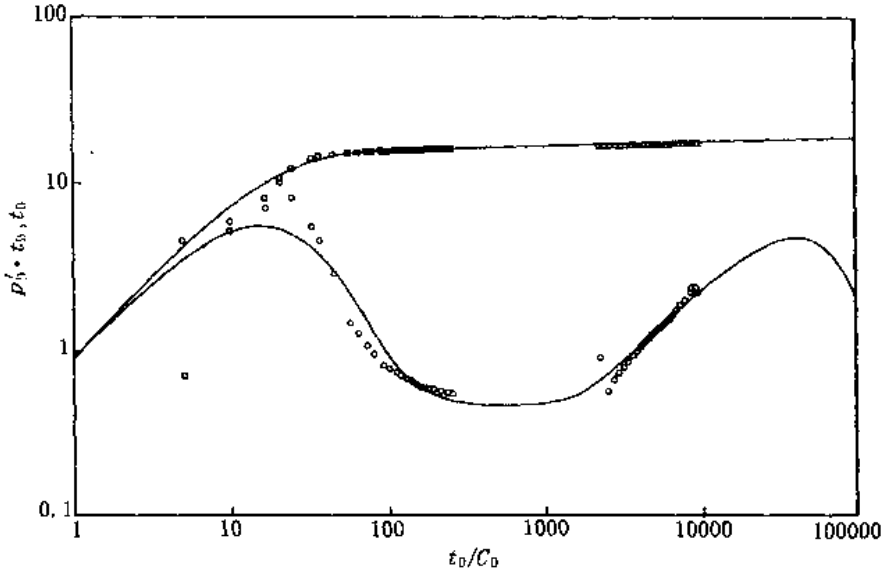


图 3－47　终恢复压力及导数曲线拟合图（例 3－7）
（已加进长方形封闭边界）

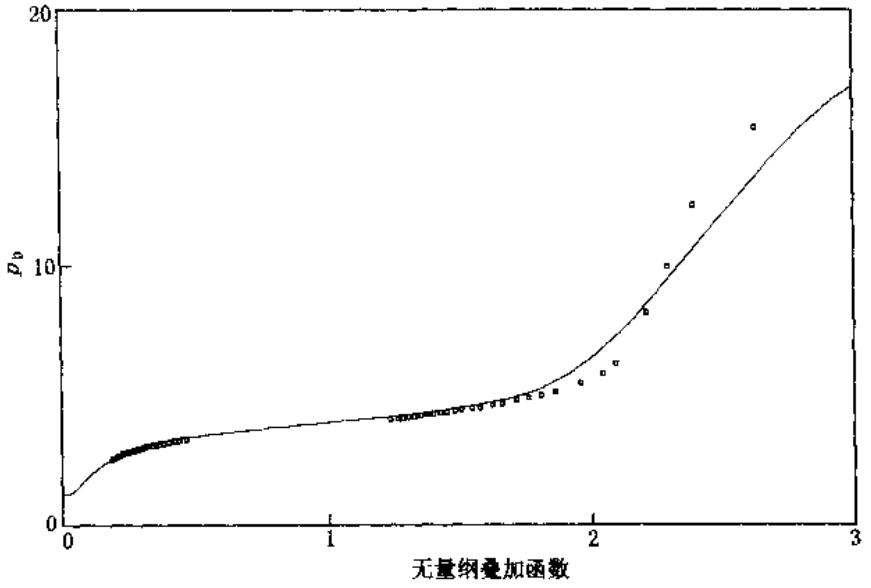


图 3－48　终恢复无量纲赫诺曲线（例 3--7）

由此计算得：

气藏长度：$2d_1 = 1254\text{m}$

气藏宽度：$2d_2 = 157\text{m}$

气藏面积：$S = 196546\text{m}^2 \approx 0.2\text{km}^2$

天然气储量：$N = 3534 \times 10^4\text{m}^3$

有效渗透率：$K = 0.1493\mu\text{m}^2$

视表皮系数：$S' = 11.07$

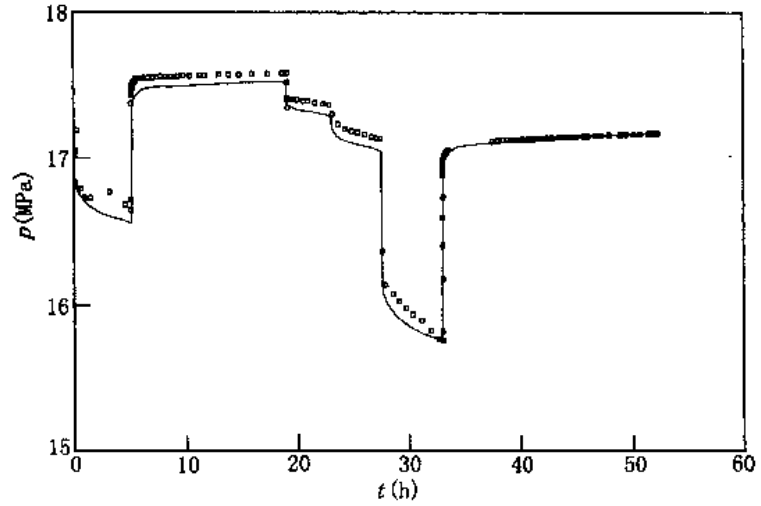


图 3－49　压力历史拟合曲线（例 3－7）

井筒储集系数：$C=2.96\text{m}^3/\text{MPa}$

按照这一解释结果，此构造的形状及测试井的位置应如图 3－50 所示。

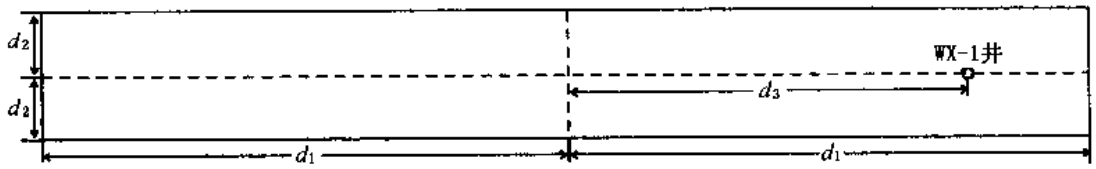


图 3－50　WX 构造和 WX－1 井解释模型示意图（例 3－7）

本井测试一结束，立即拖航至离本井 4.5km 处钻此构造第二口探井 WX－2 井，结果落空。在定 WX－2 井井位时，有些地质研究人员就认为：此构造面积不大，WX－2 井井位不妥。他们绘制的 WX 构造图形状如图 3－51。可见试井解释结果与地质研究成果基本相符。要是根据地质研究成果和试井解释结果定第二口探井井位，就不至于把它定在 WX－2 井的位置，从而避免一口落空井。

五、用压力导数曲线识别流动阶段

上面已对井筒储集和径向流动在压力导数曲线上的反映作了详细的讨论。事实上，其他各种流动（以及各种油藏类型）在导数曲线上也有其明显的、特别的反映。下面就来考察一下这些流动在导数曲线上的反映。

1．线性流

线性流动的特征是（第二章第三节）

$$\Delta p = l\sqrt{t}$$

于是

$$\Delta p' = \frac{l}{2\sqrt{t}}$$

$$\Delta p' \cdot t = \frac{l}{2}\sqrt{t}$$

$$\lg(\Delta p' \cdot t) = \frac{1}{2}\lg t + \lg\frac{l}{2}$$

由上式可知：在双对数坐标系中，压力导数曲线是一条斜率为$\frac{1}{2}$的直线。另外还有

$$\lg\Delta p = \frac{1}{2}\lg t + \lg l$$

这就是说：在双对数坐标系中，压差曲线也是一条斜率为$\frac{1}{2}$的直线（第二章第三节）。也就是说：压力导数曲线与压差曲线互相平行，导数曲线在压差曲线的下方，它们之间在纵坐标方向上的差距为

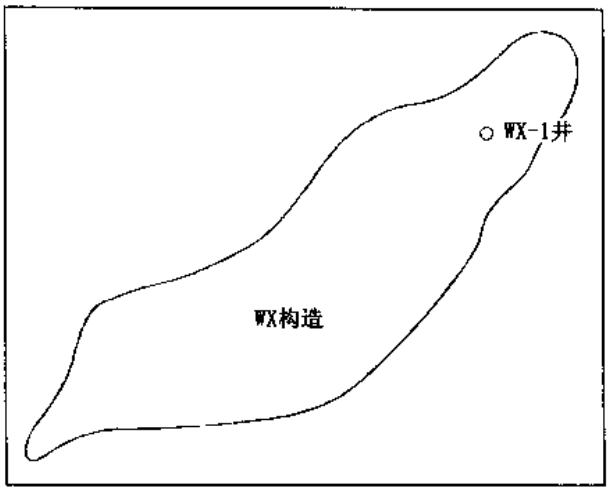


图 3-51　WX构造和WX-1井井位示意图（例3-7）

$$\lg\Delta p - \lg(\Delta p' \cdot t) = (\frac{1}{2}\lg t + \lg l) - (\frac{1}{2}\lg t + \lg\frac{l}{2}) = \lg 2 \approx 0.301(\text{对数周期})$$

如图 3-52 所示。

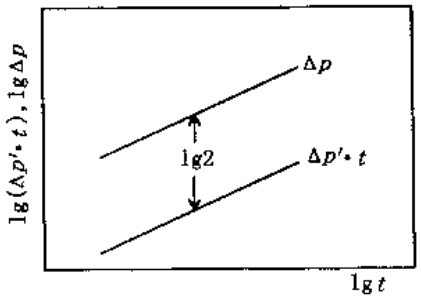


图 3-52　线性流动阶段的压差曲线和导数曲线

2. 双线性流

双线性流动的特征是（第二章第三节）

$$\Delta p = l'\sqrt[4]{t}$$

于是

$$\Delta p' = \frac{l'}{4\sqrt[4]{t^3}}$$

$$\Delta p' \cdot t = \frac{l'\sqrt[4]{t}}{4}$$

$$\lg(\Delta p' \cdot t) = \frac{1}{4}\lg t + \lg\frac{l'}{4}$$

由此可见：在双对数坐标系中，压力导数曲线呈斜率为$\frac{1}{4}$的直线。又

$$\lg\Delta p = \frac{1}{4}\lg t + \lg l'$$

压差曲线也是一条斜率为$\frac{1}{4}$的直线（第二章第三节）。故导数曲线与压差曲线互相平行，导数曲线位于压差曲线的下方，而它们之间在纵坐标方向的差距为

$$\lg\Delta p - \lg(\Delta p' \cdot t) = (\frac{1}{4}\lg t + \lg l') - (\frac{1}{4}\lg t + \lg\frac{l'}{4}) = \lg 4 \approx 0.603(\text{对数周期}) \tag{3-35}$$

见图 3-53 所示。

3. 球形流

在球形流动阶段，压差为（第二章第三节）：

$$\Delta p = A - mt^{-\frac{1}{2}}$$

故有

$$\Delta p' = \frac{m}{2}t^{-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta p' \cdot t = \frac{m}{2}t^{-\frac{1}{2}}$$

$$\lg(\Delta p' \cdot t) = -\frac{1}{2}\lg t + \lg\frac{m}{2}$$

可见压力导数曲线呈一条斜率为 $-\frac{1}{2}$ 的直线，即 $-45°$ 线，如图 3－54 所示。

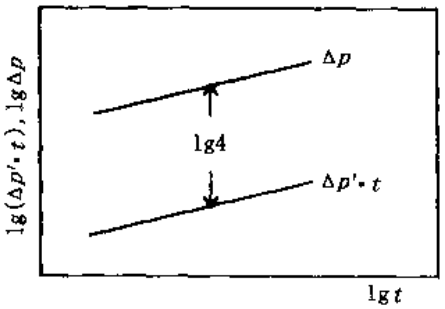


图 3－53　双线性流动阶段的压差曲线和导数曲线

4．拟稳定流

如上一章所述，在封闭系统中进行的压降测试晚期，将出现拟稳定流动，在这一流动阶段，压差为［式（2－13）］

$$\Delta p_{wf} = \frac{qB}{24V_pC_t} \cdot t + \Delta p_{int}$$

由此可得

$$\Delta p' = \frac{qB}{24V_pC_t} = 常数$$

$$\Delta p' \cdot t = \frac{qB}{24V_pC_t} \cdot t$$

$$\lg(\Delta p' \cdot t) = \lg t + \lg\frac{qB}{24V_pC_t}$$

可见导数曲线是一条斜率为 1 的直线，即 45°线。由式（2－16）注意到

$$\lg(\Delta p_{wf} - \Delta p_{int}) = \lg t + \lg\frac{qB}{24Ah\phi C_t}$$

即其压差曲线也趋近于斜率为 1 的直线。所以，在拟稳定流动阶段，压差曲线以导数曲线为渐近线，不断地逐渐向导数曲线靠拢（图 3－55）。拟稳定流的实例见例 2－2。

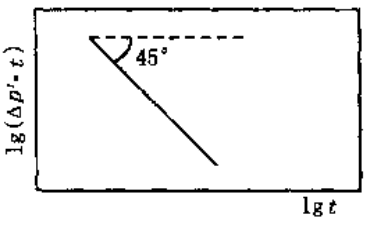


图 3－54　球形流动阶段的导数曲线

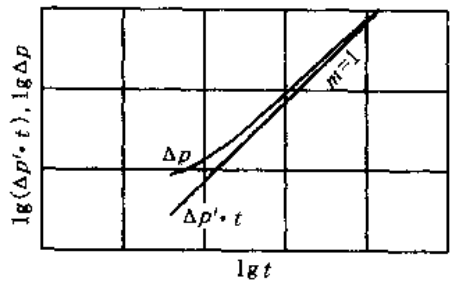


图 3－55　拟稳定流动阶段的压差曲线和压力导数曲线

5．稳定流

在稳定流动阶段，有

$$\Delta p = 常数$$

故

$$\Delta p' = 0$$

$$\Delta p' \cdot t = 0$$

因此，在向稳定流动阶段过渡时，压力导数曲线将急速下降，如图 3－56 所示。

综上所述，在压差曲线和压力导数曲线上，各个

流动阶段都分别呈现出明显的不同的特征，而且有的流动阶段在压力导数曲线上的特征更为突出和明显，因此压力导数曲线成了更有效的诊断曲线。各个流动阶段在两种诊断曲线上的特征列于表 3－10。

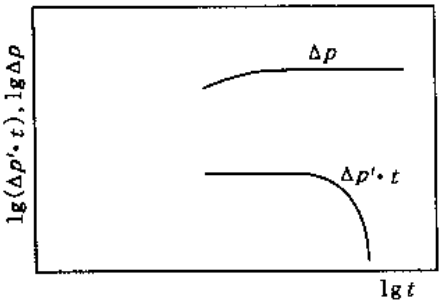


图 3－56　稳定流动阶段的压差曲线和导数曲线

斯伦贝谢公司（Schlumberger）制作了一个“流动阶段识别板”，如图 3－57 所示。在这块流动阶段识别板上，刻上了上述七个流动阶段中除稳定流动以外的六个流动阶段在压力导数曲线上的特征曲线，即压力导数诊断曲线。在纵坐标和横坐标的对数周期长相同的双对数坐标纸上画出实测压力导数曲线后，把这块识别板放在它上面平行移动（注意保持其径向流动诊断曲线，即水平直线与横坐标轴平行），便可对各流动阶段做出初步识别。图 3－58～图 3－61 分别是用流动阶段识别板识别井筒储集阶段、径向流动阶段、线性流动阶段和球形流动阶段的例子。

表 3－10　不同流动阶段在压差曲线和压力导数曲线上的特征

序号	流 动 阶 段	在压差曲线上的特征	在压力导数曲线上的特征	两种诊断曲线的关系
1	井筒储集阶段	斜率为 1 的直线（45°线）	斜率为 1 的直线（45°线）	相重合
2	径向流动阶段		水平直线段	
3	线性流动阶段	斜率为$\frac{1}{2}$的直线	斜率为$\frac{1}{2}$的直线	互相平行，压差曲线比压力导数曲线高出 lg2≈0.301（对数周期）
4	双线性流动阶段	斜率为$\frac{1}{4}$的直线	斜率为$\frac{1}{4}$的直线	互相平行，压差曲线比压力导数曲线高出 lg4≈0.603（对数周期）
5	球形流动阶段		斜率为$-\frac{1}{2}$的直线	
6	拟稳定流动阶段	逐渐接近于斜率为 1 的直线（45°线）	斜率为 1 的直线（45°线）	压差曲线以导数曲线为渐近线
7	稳定流动阶段	水平直线段	急速下降	

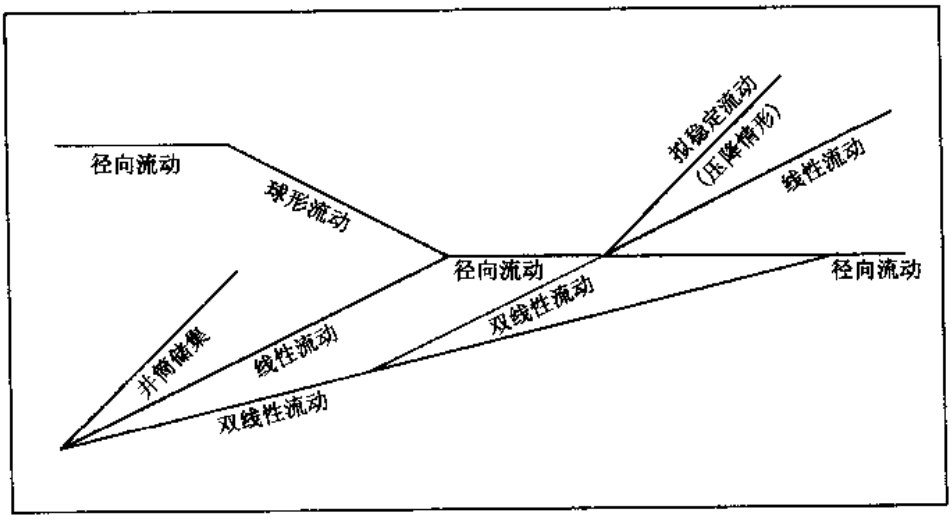


图 3－57　流动阶段识别板

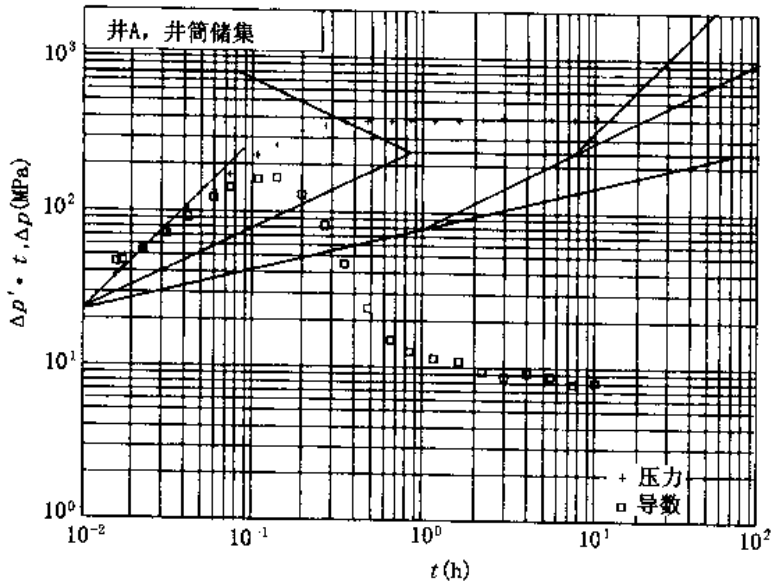


图 3－58　用流动阶段识别板识别井筒储集阶段

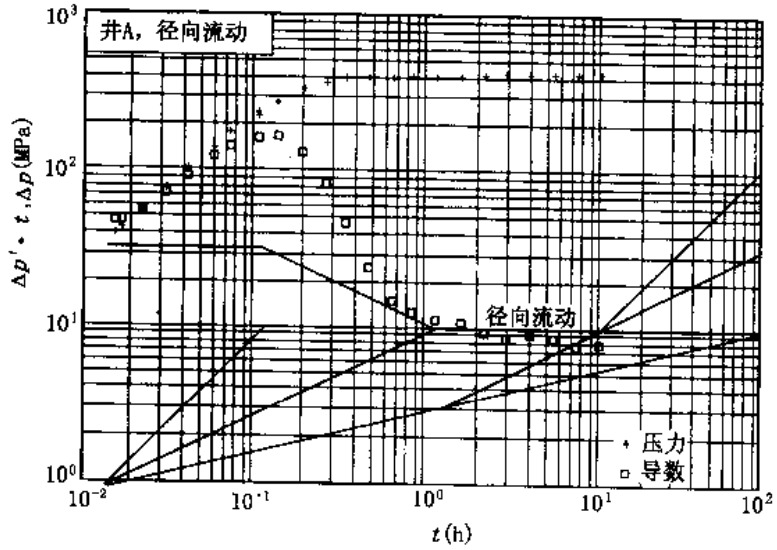


图 3－59　用流动阶段识别板识别径向流动阶段

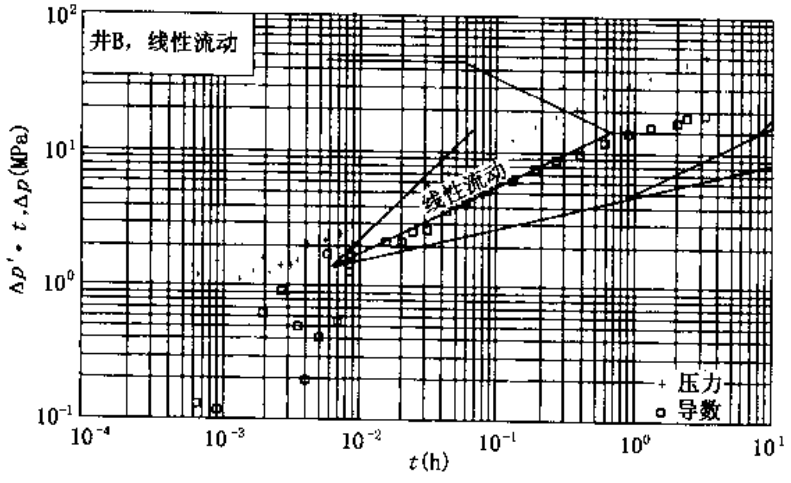


图 3－60　用流动阶段识别板识别线性流动阶段

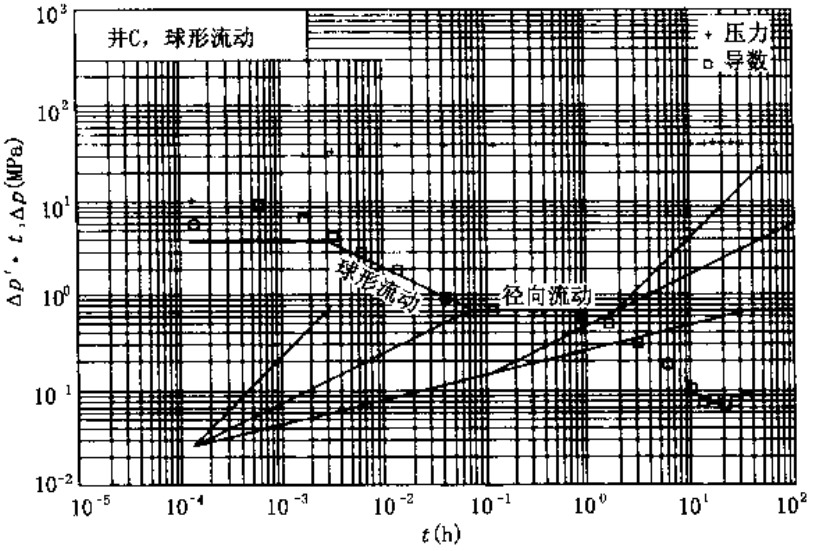


图 3－61　用流动阶段识别板识别球形流动阶段

六、变井筒储集的影响及处理

如前述，所有的压力图版和压力导数图版都假定井筒储集系数是一个常数。但事实上，井筒储集系数并不总是常数，有时甚至变化相当大。图 3－62 就是一口井井口关井压力恢复测试早期井筒储集系数 C 的变化情况。

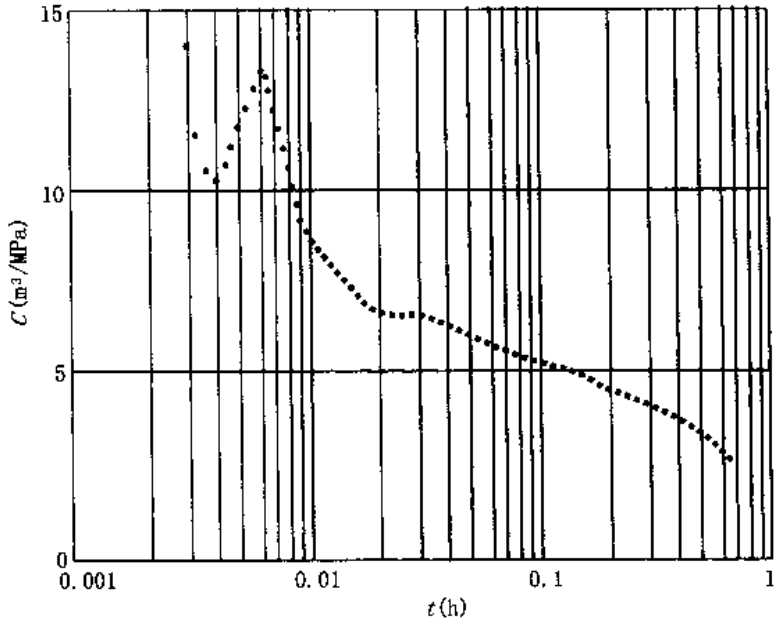


图 3－62　某井关井早期井筒储集系数的变化情况

在变井筒储集的情形，由于其影响，压差曲线和压力导数曲线严重变形，根本无法与样板曲线相拟合。图 3－63 就是一次 DST 压力恢复的实例，它与井筒储集系数为常数的样板曲线显然无法相拟合。对于这种情形，如果用手工解释，确实很难处理；但如果有比较先进的试井解释软件，其中有变井筒储集的模型，则可以用这种模型产生变井筒储集的样板曲线供拟合分析。图 3－64 就是图 3－55 的实例经如此处理后的拟合结果。

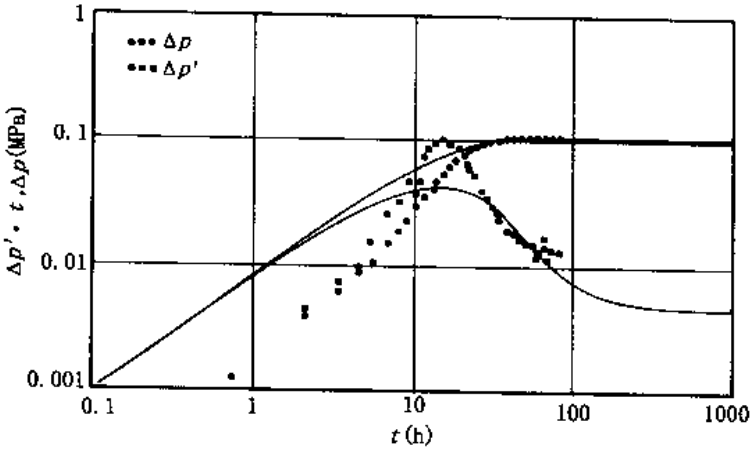


图 3－63　变井筒储集影响下变形的压差和导数曲线

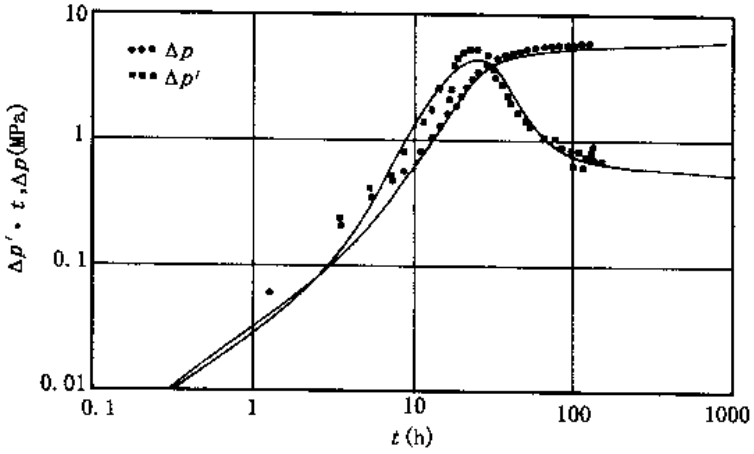


图 3－64　用变井筒储集模型样板曲线拟合的结果

第四章　双重孔隙介质油藏的试井解释

第一节　双重孔隙介质油藏的有关概念

考虑天然裂缝油藏，其模型如图 4－1 所示。把这种油藏看做两个系统：裂缝系统和基质岩块系统，并且油藏中任何一个体积单元内都存在着这两个系统。假定裂缝系统的渗透率 K_f 比基质岩块系统的渗透率 K_m 大得多，即 $K_f \gg K_m$（这里下标 f 和 m 分别表示裂缝和基质岩块系统）；并且原油由基质岩块流到裂缝系统，然后再由裂缝系统流到井筒，而不能由基质岩块系统直接流入井筒：

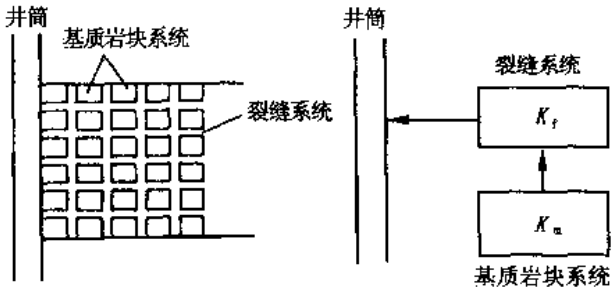


图 4－1　双重孔隙介质油藏模型

基岩系统→裂缝系统→井筒。

一开井，裂缝系统中的原油流入井筒，但基质岩块系统仍保持原来的状态，尚没有流动发生。这时井底压力所反映的是裂缝系统的特性，并且恰与均质油藏相同，因此可以拟合均质油藏模型的某一条样板曲线。这是裂缝系统流动阶段，称为第一阶段。

在第一阶段中，裂缝系统中的原油减少，其中的压力 p_f 降低，基质岩块系统却仍保持原来的状态，两种孔隙系统之间形成了压差，其压力分布剖面如图 4－2a所示。

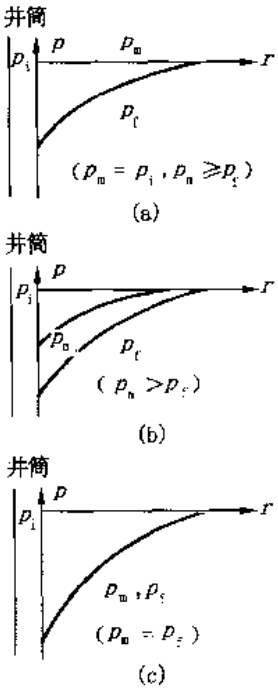


图 4－2　双重孔隙介质油藏的压力变化过程

现在，基质岩块系统和裂缝系统之间存在着压差，使基质岩块系统中的原油流入裂缝系统，其中的压力 p_m 因此逐渐降低，如图 4－2b所示。这是两种孔隙介质之间的流动（由基岩系统流向裂缝系统）阶段，称为第二阶段或过渡阶段。这一阶段的压力变化不能与均质油藏的解释图版相拟合。

在上述第一、第二两个阶段，存在着两个压力分布剖面，即裂缝系统的压力 p_f 分布剖面和基质岩块系统压力 p_m 分布剖面。当基质岩块系统的压力 p_m 降到裂缝系统的压力 p_f 后，既有原油从基质岩块系统流到裂缝系统，又有原油从裂缝系统流入井筒，两者同时进行。两种介质中的压力 p_f 和 p_m 相等且同时下降，如图 4－2c 所示。这时井底压力的变化又与均质油藏相同，可以拟合均质油藏模型的另一条样板曲线，所反映的特性则是整个系统即基质岩块系统和裂缝系统两者的总和。这是第三阶段。

双重孔隙介质油藏中，井的压力变化的双对数曲线如图 4－3 所示（详见本章第二节和第三节）。

为了研究这种双重孔隙介质油藏，引入如下概念和定义：

（1）裂缝体积比 V_f：

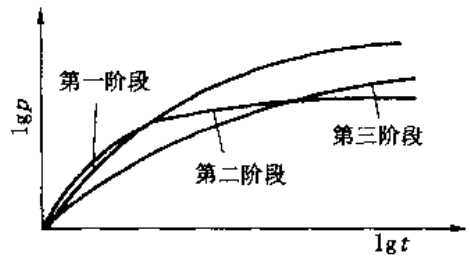


图 4－3　双重孔隙介质油藏压力变化曲线

$$V_f = \frac{\text{裂缝系统体积}}{\text{总体积}}$$

（2）基岩体积比 V_m：

$$V_m = \frac{\text{基质岩块系统体积}}{\text{总体积}}$$

其中：总体积＝裂缝系统体积＋基质岩块系统体积。显然有

$$V_{f+m} = V_f + V_m = 1$$

（3）裂缝孔隙度 ϕ_f：

$$\phi_f = \frac{\text{裂缝系统孔隙体积}}{\text{裂缝系统总体积}}$$

（4）基岩孔隙度 ϕ_m：

$$\phi_m = \frac{\text{基质岩块系统孔隙体积}}{\text{基质岩块系统总体积}}$$

显然，整个介质系统（基质岩块系统＋裂缝系统）的孔隙度为

$$\phi = V_f\phi_f + V_m\phi_m$$

（5）裂缝系统弹性储能系数（又称作“弹性容量”）$(V\phi C_t)_f$：

$$(V\phi C_t)_f = V_f\phi_f C_{tf}$$

（6）基质岩块系统弹性储能系数（弹性容量）$(V\phi C_t)_m$：

$$(V\phi C_t)_m = V_m\phi_m C_{tm}$$

（7）裂缝系统弹性储能比（又称作“弹性容量比”）ω：

$$\omega = \frac{\text{裂缝系统弹性储能系数}}{\text{总弹性储能系数}} = \frac{(V\phi C_t)_f}{(V\phi C_t)_f + (V\phi C_t)_m} = \frac{(V\phi C_t)_f}{(V\phi C_t)_{f+m}} \qquad (4-1)$$

如果我们把基质岩块系统形象地看成“储油气仓库”，把裂缝系统看成是“油气通道”，则 ω 越小（大），表明在基质岩块系统这个“仓库”中，储备着越多（少）油气，即此“仓库”中的油气储量占整个系统的油气储量的百分比越大（小）。

（8）孔隙介质内部流动因子（又称作“窜流系统”）λ：

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{K_m}{K_f}$$

式中 α 为基质岩块的形状因子，其定义是

$$\alpha = \frac{4n(n+2)}{l^2}$$

其中 l 是基质岩块的特征长度，n 是裂缝面的维数。例如，当基质岩块呈层状时，设层厚为 h_m，则（图 4－4a）

$$n = 1$$

$$l = h_m$$

$$\alpha = \frac{12}{h_m^2}$$

当基质岩块呈正方体状时，设岩块正方体单元的边长为 a_m，则（图 4－4b）

$$n = 3$$

$$l = a_m$$

$$\alpha = \frac{60}{a_m^2}$$

当基质岩块呈球形时，若球的半径为 r_m，则（图 4－4c）

$$n = 3$$

$$l = 2r_m$$

$$\alpha = \frac{15}{r_m^2}$$

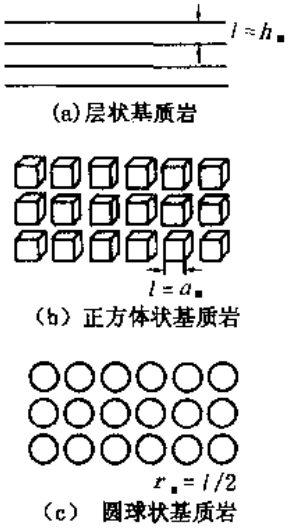


图 4－4 基质岩示意图

由定义可知，孔隙介质内部流动因子 λ 是两种介质的渗透率之比$\frac{K_m}{K_f}$和基质岩块的几何结构的函数，它的数值大小，反映了原油从基质岩块系统流到裂缝系统的难易程度，决定着过渡段出现的时间，λe^{-2S}越小，出现过渡段时对应的 p_D 值越大。

从基岩系统流向裂缝系统的流动，即上述第二阶段的流动，有两种不同的类型，据此建立起两类模型，即拟稳定流动模型和不稳定流动模型。它们的压力变化不相同，因此解释图版也不同。下面我们将分别加以讨论。

第二节 基岩向裂缝的流动为拟稳定流动的模型

一、压力图版拟合分析

这一模型的基本假定是：每个基质岩块内部的压力处处相同。基压力解释图版由两组 p_D—$\frac{t_D}{C_D}$的双对数曲线构成，其中一组是均质油藏的样板曲线，即均质油藏的压力解释图版（图 3－10），我们已经知道，这图版中每一条曲线对应一个 C_De^{2S} 值；另一组是两种介质之间拟稳定流动的样板曲线，每一条曲线对应一个 λe^{-2S} 值（图 4－5）。把这两组曲线迭合为一，就是双重孔隙介质油藏、介质间的流动为拟稳定流动模型的压力解释图版，如图 4－6 所示。实际解释时可用《现代试井解释图版》一书中图 2。这一情形下，各无量纲量的定义与均质油藏情形略有不同：

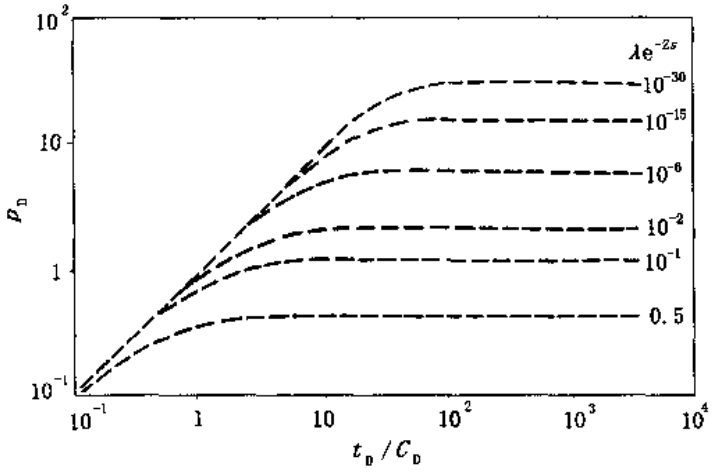


图 4－5 拟稳定流动样板曲线

$$p_D = \frac{K_f h}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}\Delta p \tag{4-2}$$

$$t_{Df+m} = \frac{3.6K_f}{(V\phi C_t)_{f+m}\mu r_w^2} t_{f+m} \tag{4-3}$$

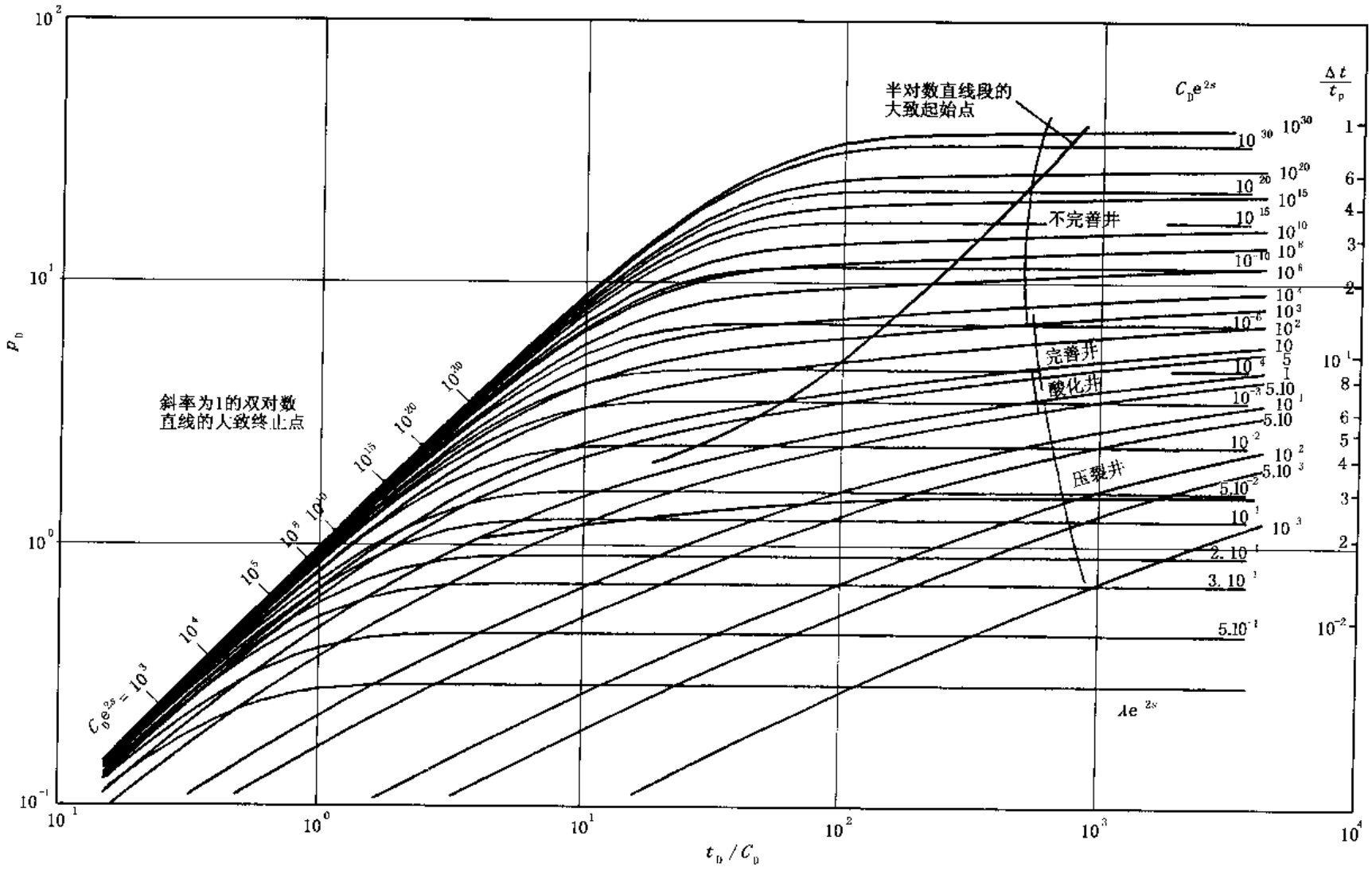


图 4－6　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）具有井筒储集和表皮效应的井的解释图版

$$t_{Df} = \frac{3.6K_f}{(V\phi C_t)_f \mu r_w^2} t_f \tag{4-4}$$

$$C_{Df+m} = \frac{C}{2\pi(V\phi C_t)_{f+m} h r_w^2} \tag{4-5}$$

$$C_{Df} = \frac{C}{2\pi(V\phi C_t)_f h r_w^2} \tag{4-6}$$

压力图版拟合分析的步骤与均质油藏情形基本一样，下面仅对其中不同之处作些说明。

在进行图版拟合时，前一段（即第一阶段）实测曲线与某一条均质油藏样板曲线 $[C_De^{2S} = (C_De^{2S})_f]$ 相拟合，中间一段（即第二阶段或过渡段）实测曲线与一条两种介质之间拟稳定流动样板曲线 λe^{-2S} 相拟合，后一段（第三阶段）与另外一条均质油藏样板曲线 $[C_De^{2S} = (C_De^{2S})_{f+m}]$ 相拟合（图 4-7）。

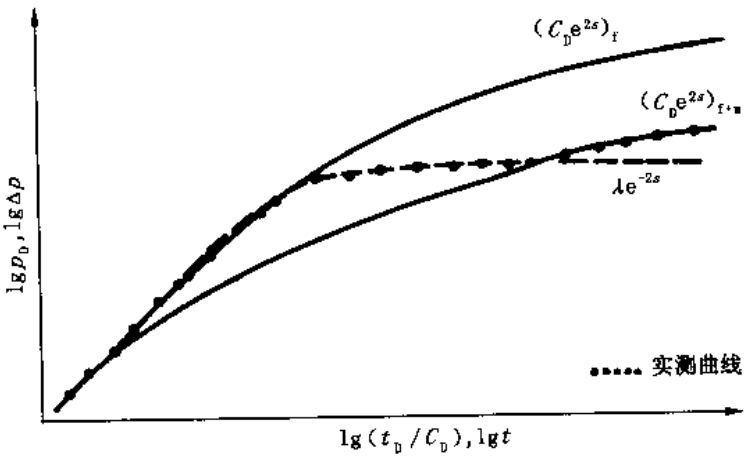


图 4-7　双重孔隙介质油藏介质间拟稳定流情形图版拟合示意图

显然，ω 的数值越大，$(C_De^{2S})_f$ 与 $(C_De^{2S})_{f+m}$ 之比值就越大，第一阶段与第三阶段所拟合的均质油藏样板曲线相距也就越远，反之亦然。

参数的计算也与均质油藏情形略有不同。由压力拟合得［式（4-2）］

$$\frac{K_f h}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{4-7}$$

$$K_f = 1.842 \times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h} \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{4-8}$$

由时间拟合得［式（3-15）］

$$C = \frac{7.2\pi K_f h}{\mu \left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}} \tag{4-9}$$

然后再由式（4-5）计算

$$C_{Df+m} = \frac{C}{2\pi(V\phi C_t)_{f+m} h r_w^2}$$

由曲线拟合得到三个曲线拟合值：$[(C_De^{2S})_f]_{拟合}$、$(\lambda e^{-2S})_{拟合}$ 和 $[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}$，由它们可计算

$$S = 0.5\ln \frac{[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{C_{Df+m}} \tag{4-10}$$

$$\omega = \frac{[(C_D e^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{[(C_D e^{2S})_f]_{拟合}} \quad (4-11)$$

$$\lambda = \frac{(\lambda e^{-2S})_{拟合}[(C_D e^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{C_{Df+m}} \quad (4-12)$$

λ 值也可由 $(\lambda e^{-2S})_{拟合}$ 和 S 值求得

$$\lambda = (\lambda e^{-2S})_{拟合} \cdot e^{2S}$$

但上式中有指数运算，S 的一点误差会带来 λ 的相当大误差，所以要谨慎使用。

双重孔隙介质油藏介质之间的流动为拟稳定流动的模型的半对数曲线，可分成如下三种情形：

(1) 第一阶段达到了径向流动阶段。此时半对数曲线呈现两条互相平行的直线段，如图 4-8 所示。

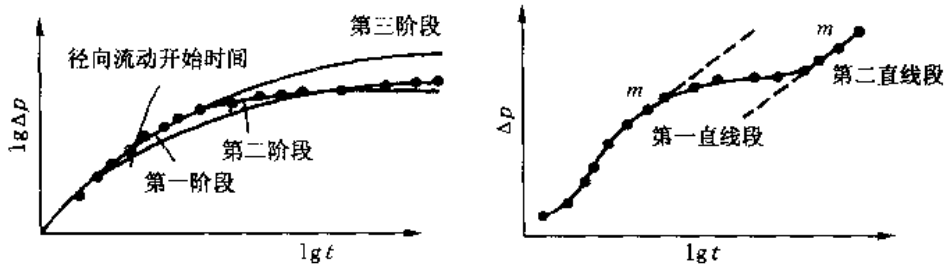


图 4-8 第一阶段进入径向流动，半对数曲线呈现两条平行直线段

(2) 第一阶段未达到径向流动阶段，而第三阶段达到了径向流动阶段。此时半对数曲线只出现一条直线段，如图 4-9 所示。

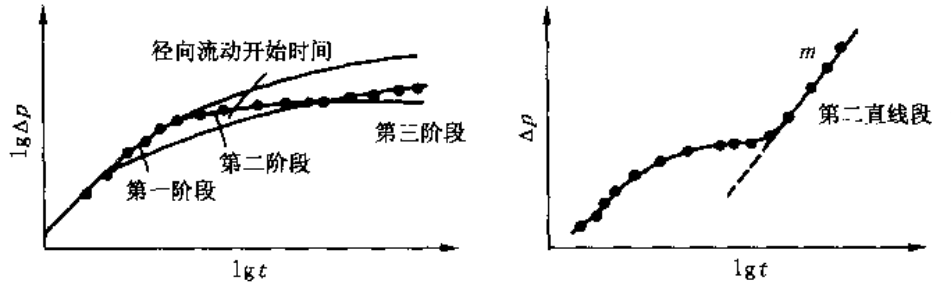


图 4-9 第一阶段没有达到径向流动，但第三阶段达到了，半对数曲线只呈现一条直线段

(3) 连第三阶段也未达到径向流动阶段。此时半对数曲线不出现直线段，如图 4-10 所示。

如果半对数曲线出现了直线段（即上述情形 1 或 2），由直线段的斜率的绝对值 m 可以

● 这是因为 [式 (4-5) 和式 (4-6)]：

$$\frac{(C_D e^{2S})_{f+m}}{(C_D e^{2S})_f} = \frac{C_{Df+m}}{C_{Df}} = \frac{C}{2\pi(V\phi C_t)_{f+m} h r_w^2} \div \frac{C}{2\pi(V\phi C_t)_f h r_w^2} = \frac{(V\phi C_t)_f}{(V\phi C_t)_{f+m}} = \omega$$

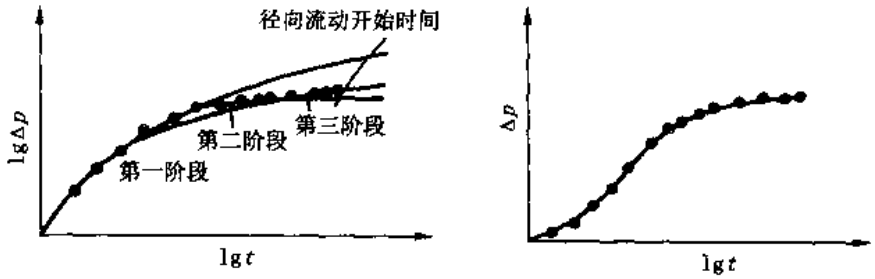


图 4－10　连第三阶段也没有达到径向流动，半对数曲线不出现直线段

算出

$$\frac{K_f h}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m} \tag{4-13}$$

进而算出 $K_f h$ 和 K_f，以及

$$S = 1.151\left[\frac{\Delta p_{1h}}{m} - \lg\frac{K_f}{(V\phi C_t)_{f+m}\mu r_w^2} - 0.9077\right] \tag{4-14}$$

必须注意，Δp_{1h}必须在第二直线段或其延长线上取值。

在上述第一种情形，通过半对数分析还可以算出 ω 值。事实上，

$$p_{Df+m} = 0.5[\ln t_{Df+m} + 0.80907 + 2S]$$

$$p_{Df} = 0.5[\ln t_{Df} + 0.80907 + 2S]$$

故

$$p_{Df+m} - p_{Df} = 0.5\ln\frac{t_{Df+m}}{t_{Df}}$$

于是

$$\frac{K_f h}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}(\Delta p_{f+m} - \Delta p_f) = 1.151\lg\frac{t_{Df+m}}{t_{Df}}$$

由于

$$m = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{K_f h}$$

$$t_{Df+m} = \frac{3.6 K_f t_{f+m}}{(V\phi C_t)_{f+m}\mu r_w^2}$$

$$t_{Df} = \frac{3.6 K_f t_f}{(V\phi C_t)_f \mu r_w^2}$$

故

$$\frac{\Delta p_{f+m} - \Delta p_f}{m} = \lg\left[\frac{(V\phi C_t)_f}{(V\phi C_t)_{f+m}} \cdot \frac{t_{f+m}}{t_f}\right] = \lg\left(\omega \cdot \frac{t_{f+m}}{t_f}\right)$$

取 $t_{f+m} = t_f = 1\text{h}$，得

$$\frac{(\Delta p_{f+m})_{1h} - (\Delta p_f)_{1h}}{m} = \lg\omega$$

令

$$\delta p = (\Delta p_f)_{1h} - (\Delta p_{f+m})_{1h}$$

则

$$\lg\omega = -\frac{\delta p}{m}$$

$$\omega = 10^{-\frac{\delta p}{m}} \tag{4-15}$$

式（4－15）就是半对数曲线分析计算 ω 值的公式。其中 δp 的几何意义是：两条互相平行的直线段之间在 Δp 方向上（纵坐标轴方向上）的距离（图 4－11）。

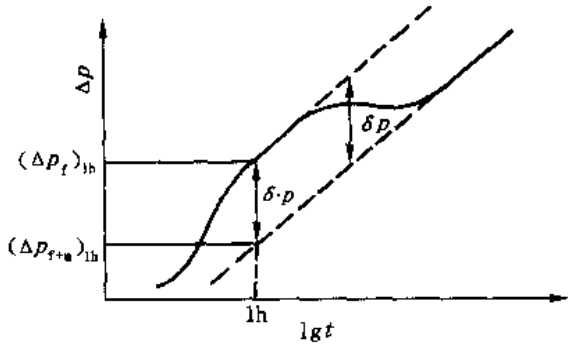


图 4－11　δp 的几何意义

但是，如果第一阶段尚未达到径向流动阶段，便得不到第一直线段。在这种情形，无法利用半对数分析计算 ω 值。

二、压力导数图版拟合分析

用压力导数方法解释双重孔隙介质油藏的试井资料具有尤其明显的优越性，因为双重孔隙介质油藏的压力导数曲线具有十分特殊的形状，非常容易识别。

如上节所述，双重孔隙介质油藏中井的流动可分为三个阶段：第一阶段为裂缝系统中的流动；第二阶段为由基岩系统到裂缝系统的流动，或称为介质间的流动，这一阶段亦称为过渡段；第三阶段为整个系统（基岩系统＋裂缝系统）的流动。介质间的流动有拟稳定流和不稳定流两种，据此建立起两种不同的模型。本节和下一节将分别简单介绍这两种模型的压力导数曲线及解释方法。我们将会看到，这两种模型的压力导数曲线有非常显著的不同，因此很容易识别。

首先考察介质间拟稳定流动模型。

这一模型的压力导数解释图版如图 4－12 所示。实际解释时用《现代试井解释图版》一书中图 7，其纵坐标和横坐标仍分别是（$p'_D\frac{t_D}{C_D}$）和$\frac{t_D}{C_D}$，因此实测曲线亦应分别以（$\Delta p'\cdot t$）和 t 为纵坐标和横坐标。实测压力导数图形如图 4－13 所示。在井筒储集阶段，压力导数沿着 45°线变化（图 4－13①）。然后过渡到裂缝系统的流动，假如达到了径向流动阶段，则在这个阶段压力沿着水平直线变化（图 4－13②），这段水平直线将拟合图版的 0.5 直线。

在介质间拟稳定流动阶段，压力变化由原来的上升变为平稳，然后又变为上升。因此，在这个阶段压力导数曲线下降，然后又上升，形成了一个“凹子”（图 4－13③），最后到达整个系统的流动，在其径向流动阶段，压力导数又沿着水平直线变化（图 4－13④），这段水平直线也将拟合图版的 0.5 直线。

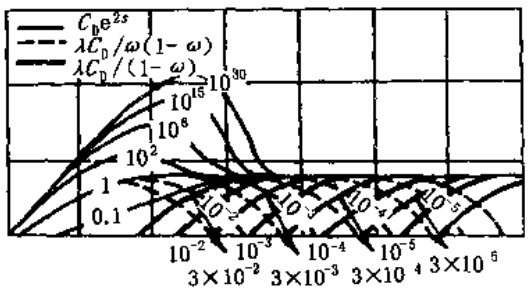


图 4－12　双重孔隙介质油藏介质间拟稳定流动模型压力导数解释图版

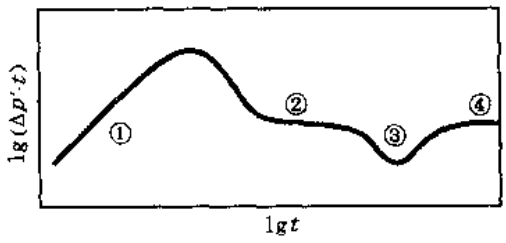


图 4－13　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）实测压力导数曲线

在图 4－12 中，在 0.5 直线的下方有两组曲线，即《现代试井解释图版》一书中的图 7 中的红虚线，分别对应于不同的$\frac{\lambda C_{Df+m}}{\omega\ (1-\omega)}$值和$\frac{\lambda C_{Df+m}}{1-\omega}$值。这是用作根据介质间拟稳定流动阶段的资料（即“凹子”）来解释地层的。拟合时，实测曲线沿某一条$\frac{\lambda C_{Df+m}}{\omega\ (1-\omega)}$曲线下降，然后沿某一条$\frac{\lambda C_{Df+m}}{1-\omega}$曲线上升，由这两个曲线拟合值便可算出 λ 和 ω 的数值。

我们知道，在双重孔隙介质油藏测试中，第一阶段——裂缝系统流动阶段的特性常常被井筒储集所掩盖，此时用压力变化曲线来识别和解释就会比较困难（图 4－14）。但压力导数曲线却仍明显呈现双重孔隙介质油藏、介质间为拟稳定流的特性，只是由井筒储集阶段直接进入介质间拟稳定流动阶段，形成“凹子”，然后过渡到整个系统的径向流动阶段，形成一条水平直线（图 4－15）。

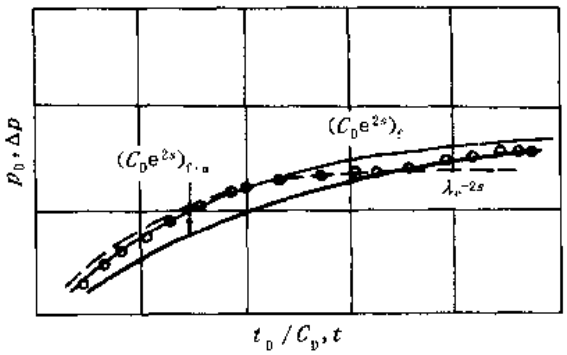


图 4－14　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）压力曲线、第一阶段的特性被井筒储集所掩盖

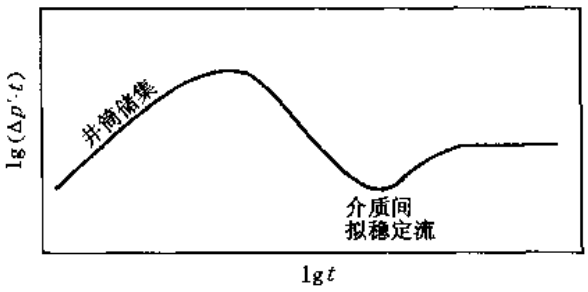
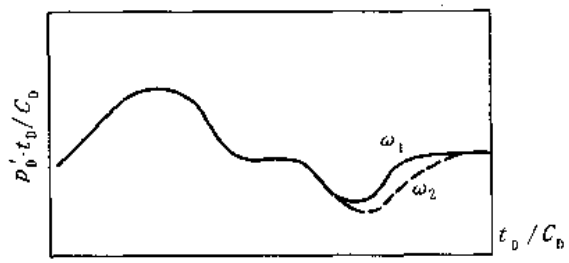
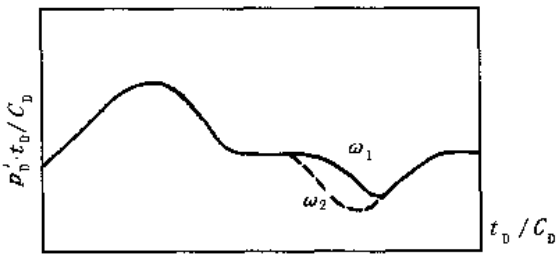


图 4－15　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）压力导数曲线，第一阶段的特性被井筒储集所掩盖，但仍明显呈现双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）的特性



（a）由于$[(C_De^{2s})_{f+m}]_1 > [(C_De^{2s})_{f+m}]_2$，使得$\omega_1 > \omega_2$



（b）由于$[(C_De^{2s})_f]_1 > [(C_De^{2s})_f]_2$，使得$\omega_1 > \omega_2$

图 4－16　ω 对压力导数曲线过渡段的影响

储能比 ω 决定着压力导数曲线过渡段下凹的宽度和深度：ω 越小，过渡段就越长，“凹子”就越宽且越深（图 4－16）。窜流系数 λ 则决定过渡段的位置，λ 值越小，则“凹子”越靠右方（图 4－17）。

进行图版拟合时，可以首先拟合图版的 0.5 直线，然后平行移动实测曲线，使早期的井筒储集阶段与图版的 45°线重合。

压力恢复的解释同前一章所述一样，只需视图版的纵坐标为 $[p'_D \cdot \frac{\Delta t_D}{C_D} \frac{(t_p+\Delta t)_D}{(t_p)_D}]$，横

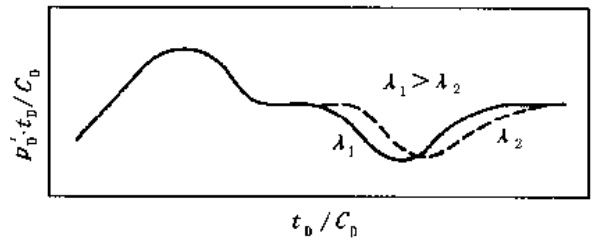


图 4－17　λ 对压力导数曲线过渡段的影响

坐标为$\frac{\Delta t_D}{C_D}$，画出$\left(\Delta p' \cdot \Delta t \frac{t_p + \Delta t}{t_p}\right)$与 Δt 的实测曲线进行拟合。如果在关井前的生产时间 t_p 内已达到了整个系统（基岩系统＋裂缝系统）的径向流动阶段，则实测压力恢复曲线可与压降图版完全拟合。但如果关井前压降在介质间拟稳定流动阶段（过渡段），甚至在裂缝系统流动阶段就停止而开始压力恢复测试，则恢复曲线将偏离压降样板曲线，因而无法和它完全拟合。但恢复曲线在过渡段仍将呈现双重孔隙介质油藏、介质间拟稳定流的特性即出现“凹子”，只是出现的时间较晚，且“凹子”加深，如图 4－18 所示。

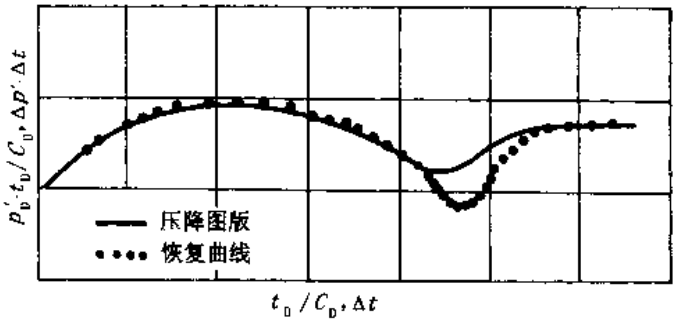


图 4－18　关井前生产时间不够长时恢复压力导数曲线偏离压降导数解释图版

和均质油藏情形一样，常常使用格林加登图版和布德图版的复合图版（图 4－19），同时进行两种图版拟合，以便互相验证，从而更准确地识别油藏类型，划分流动阶段。《现代试井解释图版》的图 7 就是这种复合图版。

第三章第四节中关于用压降解释图版进行压力恢复分析的方法，在这里也完全同样适用。

例 4－1　表 4－1 是假想双重孔隙介质油藏中一口井的压力恢复数据。其余有关基础数据列出如下：

$$q = 79.5\text{m}^3/\text{d}$$
$$t_p = 300\text{h}$$
$$h = 18.9\text{m}$$
$$\mu = 0.97\text{mPa} \cdot \text{s}$$
$$B = 1.1032$$
$$C_t = 1.813 \times 10^{-3}(\text{MPa})^{-1}$$
$$\phi = 0.287$$
$$r_w = 0.1067\text{m}$$

图 4－20 是实测压力曲线和压力导数曲线与复合图版拟合的结果。图的上方为实测压力曲线（“◦”线）与格林加登样板曲线（实线）拟合的结果，下方是实测压力的导数曲线（“·”线）与布德样板曲线即压力导数样板曲线（实线）拟合的结果。

所得的拟合值是

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{\text{拟合}} = 0.7151 \qquad \left(\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{\text{拟合}} = 5.566$$
$$\left[(C_D e^{2S})_f\right]_{\text{拟合}} = 10 \qquad \left[(C_D e^{2S})_{f+m}\right]_{\text{拟合}} = 1$$
$$(\lambda e^{-2S})_{\text{拟合}} = 0.0107$$

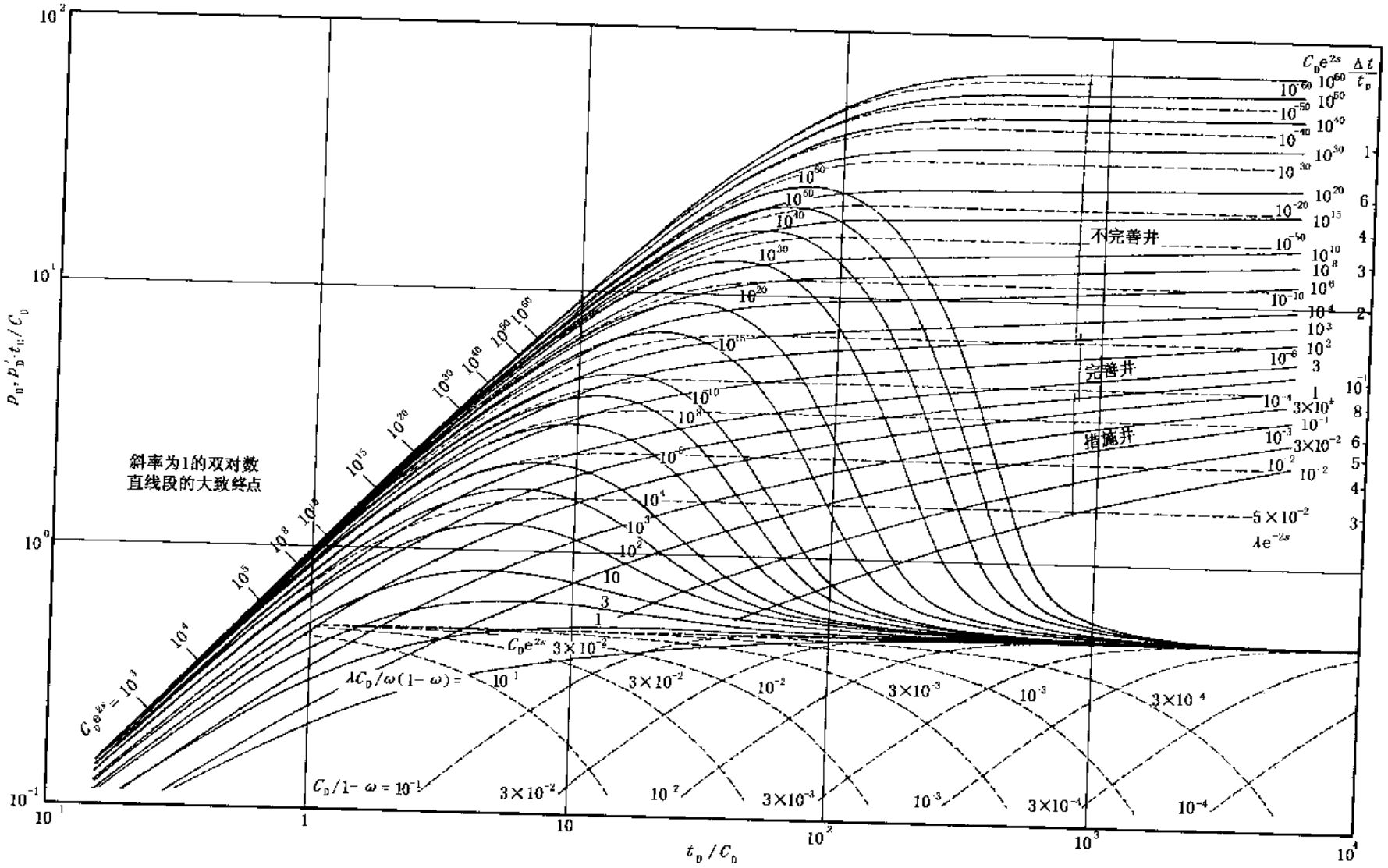


图 4－19　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）的复合图版

表 4-1　某井压力恢复数据表

Δt (h)	p_{ws} (MPa)	Δt (h)	p_{ws} (MPa)
0.00000	13.557254	1.87061	16.615295
0.01001	13.631579	2.18170	16.705471
0.01169	13.643266	2.54459	16.780540
0.01361	13.656552	2.96780	16.842489
0.01590	13.672307	3.46149	16.899944
0.01849	13.689971	4.03729	16.946877
0.02161	13.710421	4.70880	16.989885
0.02521	13.734298	5.49200	17.029627
0.02939	13.762407	6.40549	17.068665
0.03421	13.792475	7.47101	17.109669
0.03989	13.828355	8.71371	17.154533
0.04660	13.867883	10.16299	17.198935
0.05429	13.913471	11.85349	17.251114
0.06339	13.966844	13.82510	17.305962
0.07391	14.024849	16.12469	17.368586
0.08621	14.094306	18.80679	17.435402
0.10059	14.163757	21.93500	17.506571
0.11719	14.245102	25.58350	17.583694
0.13681	14.333300	29.83890	17.665632
0.15948	14.433003	34.80209	17.747969
0.18610	14.540596	40.59091	17.834402
0.21701	14.657166	47.34250	17.921360
0.25311	14.784105	55.21710	18.009041
0.29520	14.921214	64.40161	18.096506
0.34430	15.062087	75.11380	18.182262
0.40161	15.211696	87.60770	18.266481
0.46841	15.365229	102.17981	18.347820
0.54620	15.522236	119.17569	18.426394
0.63708	15.680325	138.99860	18.501732
0.74310	15.835602	162.11859	18.573511
0.86670	15.985019	189.08429	18.641508
1.01080	16.134399	220.53522	18.705555
1.17899	16.270267	257.21753	18.765524
1.37509	16.399786	300.00000	18.821363
1.60379	16.512894		

由此算得［见式（4-8）、（4-9）、（4-5）］

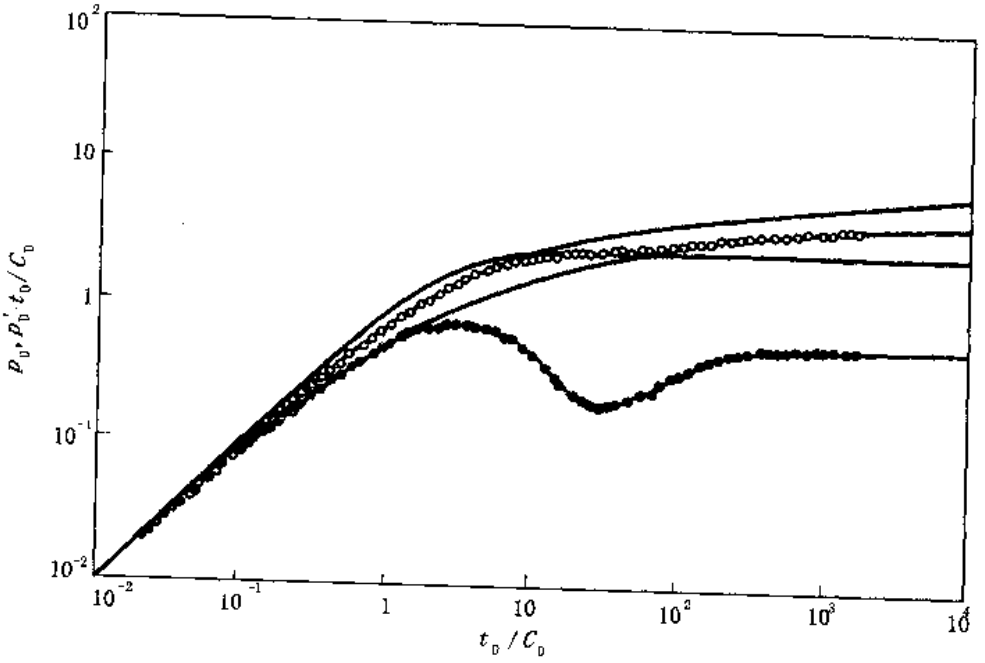


图 4－20　压力和压力导数曲线与复合图版的拟合（例 4－1）

$$K_f = \frac{1.842\times10^{-3}q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} = \frac{1.842\times10^{-3}\times79.5\times0.97\times1.1032}{18.9}\times0.7151$$

$$= 0.005929\mu m^2$$

$$C = \frac{7.2\pi K_f h}{\mu\left(\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{拟合}} = \frac{7.2\pi\times0.005929\times18.9}{0.97\times5.566} = 0.4695m^3/MPa$$

$$C_{Df+m} = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} = \frac{0.4695}{2\pi\times0.287\times1.813\times10^{-3}\times18.9\times0.1067^2} = 667.4$$

$$S = 0.5\ln\frac{[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{C_{Df+m}} = 0.5\ln\frac{1}{667.4} = -3.25$$

$$\omega = \frac{[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{[(C_De^{2S})_f]_{拟合}} = \frac{1}{10} = 0.1$$

$$\lambda = \frac{(\lambda e^{-2S})_{拟合}[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}}{C_{Df+m}} = \frac{0.0107\times1}{667.4} = 1.603\times10^{-5}$$

赫诺曲线见图 4－21。这是双重孔隙介质油藏、介质间呈拟稳定流、第一阶段未达到径向流动的典型曲线。直线段的斜率 $m = 1.61$MPa/对数周期，外推压力 $p^* = 19.306$MPa，p_{ws}（1h）$= 15.316$MPa，$p_{wf} = 13.557$MPa，由此得［见式（4－8）、（4－14）］

$$K_f = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{mh} = \frac{2.121\times10^{-3}\times79.5\times0.97\times1.1032}{1.61\times18.9} = 0.00593(\mu m^2)$$

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

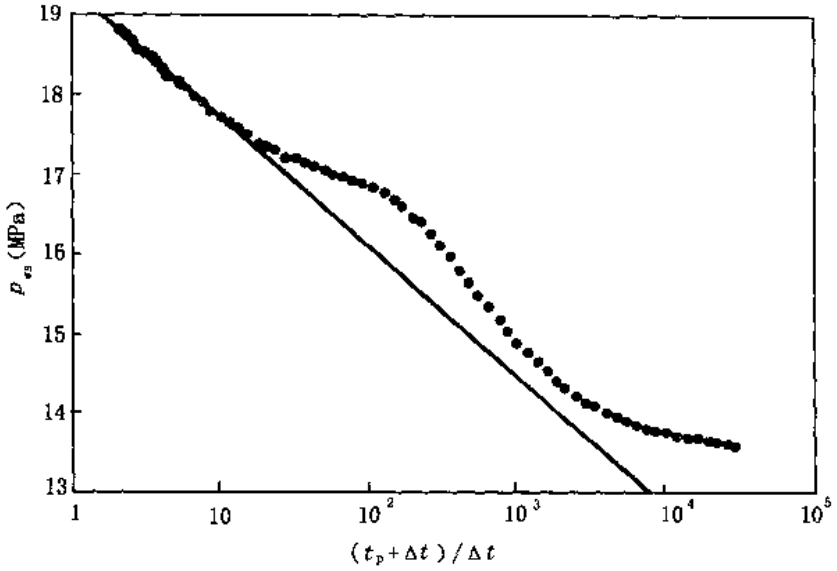


图 4－21　赫诺曲线（例 4－1）

$$= 1.151 \times \left(\frac{15.316 - 13.557}{1.61} - \lg \frac{0.00593}{0.287 \times 0.97 \times 1.813 \times 10^{-3} \times 0.1067^2} - 0.9077 \right)$$

$$= -3.256$$

因为第一直线段不出现，所以无法由赫诺曲线计算 ω。

图 4－22 和图 4－23 分别是这次恢复分析的无量纲赫诺曲线和压力史拟合曲线，实测曲线（点线）和用解释结果计算的理论曲线（实践）拟合得很好，表明解释结果准确可靠。

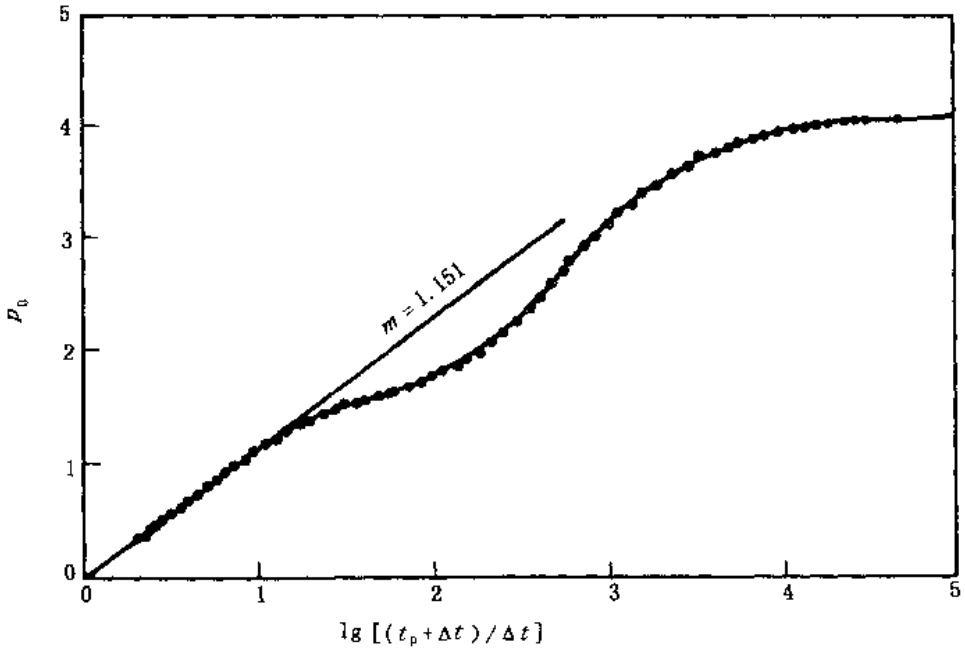


图 4－22　无量纲赫诺曲线（例 4－1）

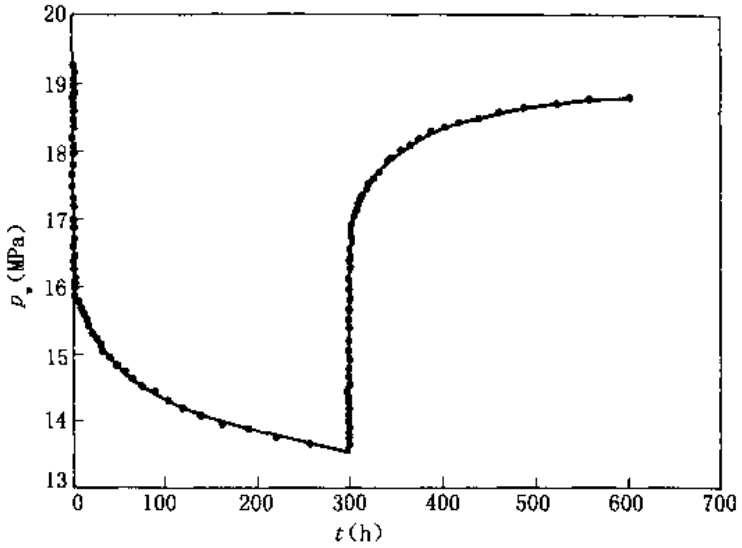


图 4 23 压力史拟合曲线（例 4－1）

例 4－2[1] 塔里木地区的塔中 1 井，在钻井过程中进行了中途测试。采用三开三关，测试过程的产量和压力变化情况见图 **4－24**。用终关井的压力恢复资料进行解释，其压力（Δp）和压力导数（$p'\cdot\Delta t$）的双对数曲线如图 4－25，导数曲线呈现出典型的双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流）的特征。图 4－26 为考虑了整个测试过程的产量史的叠加函数曲线，若不是根据压力导数曲线做出上述分析，很可能会误认为它有两个直线段（图 4－26 中的①和②）。实际上其中的②才是真正的直线段，①所对应的是拟稳定流动过渡段（导数曲线上的“凹子”）。复合图版拟合的结果见图 4－27，解释结果列于表 4－2。无量纲叠加赫诺曲线拟合和整个测试过程的压力史拟合都相当好（图 4－28 和图 4－29），说明解释是正确的。该油层是天然裂缝发育的白云岩地层，属双重孔隙介质；储能比 $\omega=0.08$，说明其储集性能较好；窜流系数 $\lambda=9.4\times10^{-4}$，说明基质岩块中的原油比较容易流入裂缝系统。但地层有效渗透率低（$K=0.2689\times10^{-3}\mu m^2$），油井的完善程度也不大好（$S=-0.7\sim0.8$。如第二章第四节所指出，对于双重孔隙介质油藏的井，改善井的表皮系数 $S<-3$），对日后的生产不利。

表 4－2 塔中 1 井解释成果数据（例 4－2）

储集类型	解释方法	渗透率 K $(10^{-3}\mu m^2)$	流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$ $(\frac{10^{-3}\mu m^2\cdot m}{mPa\cdot s})$	流度 $\frac{K}{\mu}$ $(\frac{10^{-3}\mu m^2}{mPa\cdot s})$	表皮系数 S	井筒储集系数 C $(\frac{m^3}{MPa})$	影响半径 r_i (m)	外推压力 (MPa)	储能比 ω	窜流系数 λ	备 注
双孔介质	双对数图版法	0.2689	172.1	1.106	-0.72	7.18×10^{-2}	56.5	40.55	0.08	9.4×10^{-4}	$(C_D e^{2S})_f=37.5$ $(C_D e^{2S})_{f+m}=3$
	叠加法	0.2689	172.1	1.106	-0.81						

[1] 本例引自文献［4］，解释人：庄永新、蒋沛然、宋黎明。

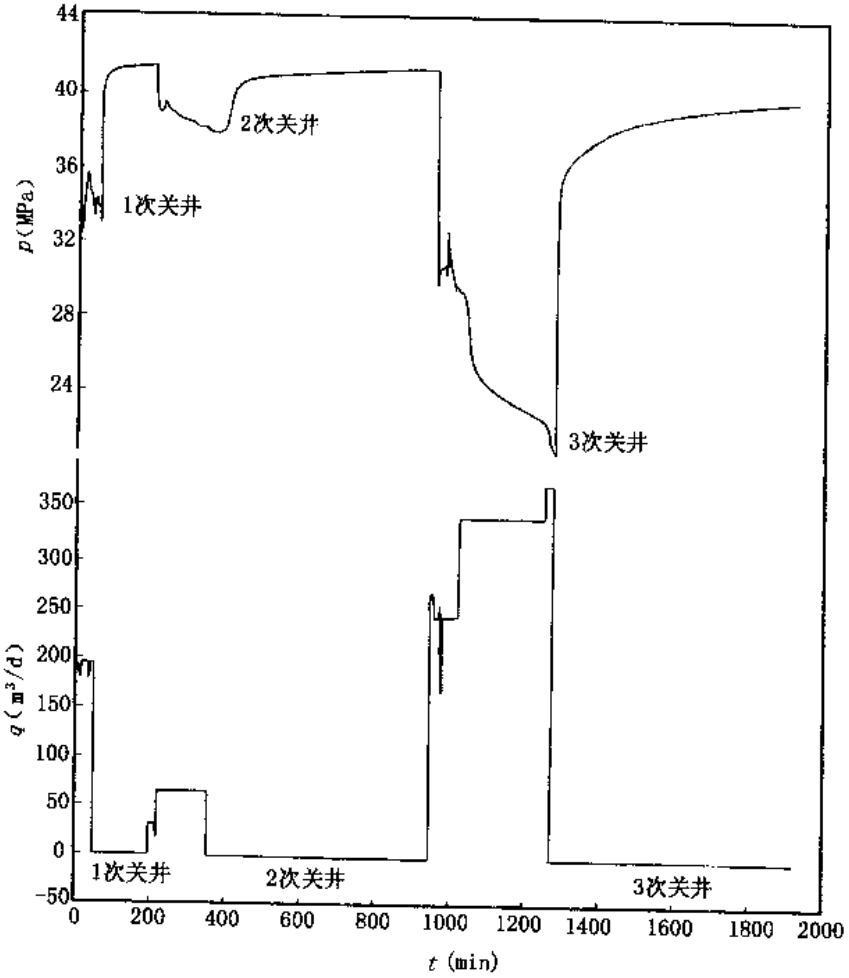


图 4－24　塔中 1 井压力产量历史图（例 4－2）

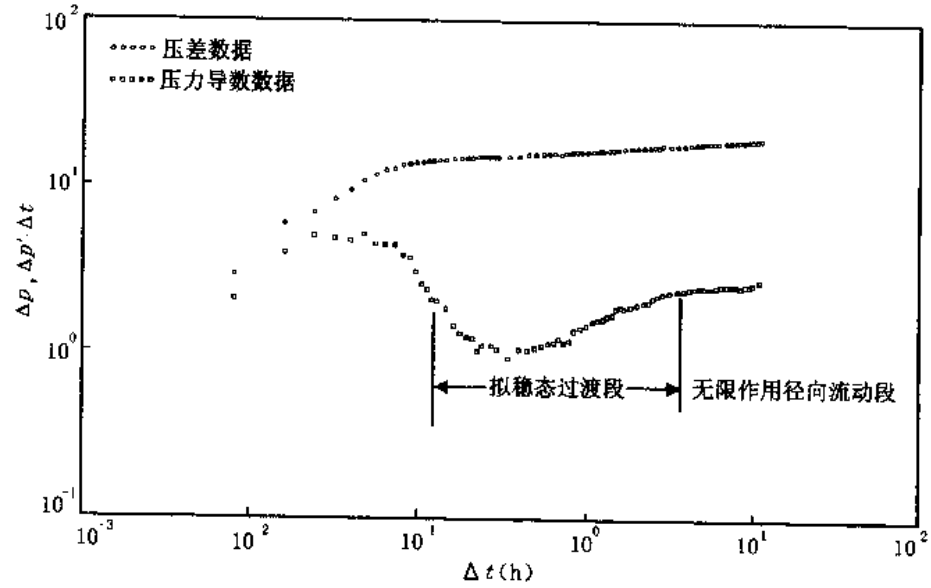


图 4－25　塔中 1 井第三次关井压力恢复双对数及导数图（例 4－2）

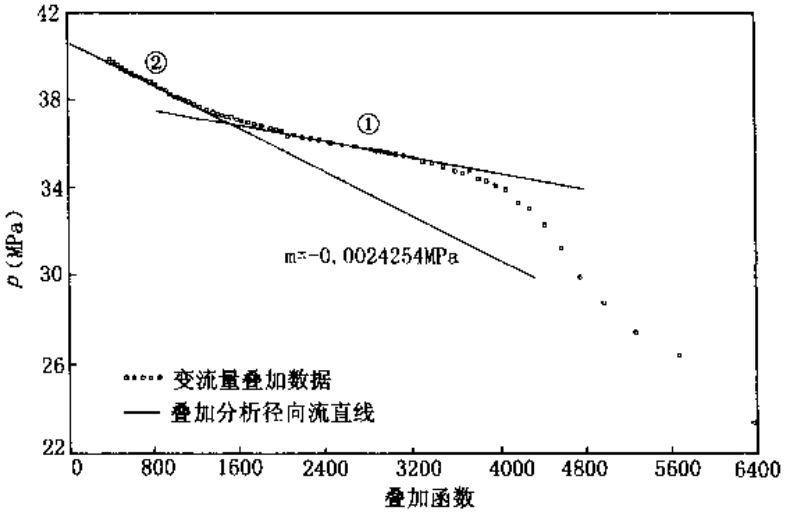


图 4－26　塔中 1 井叠加函数图（例 4－2）

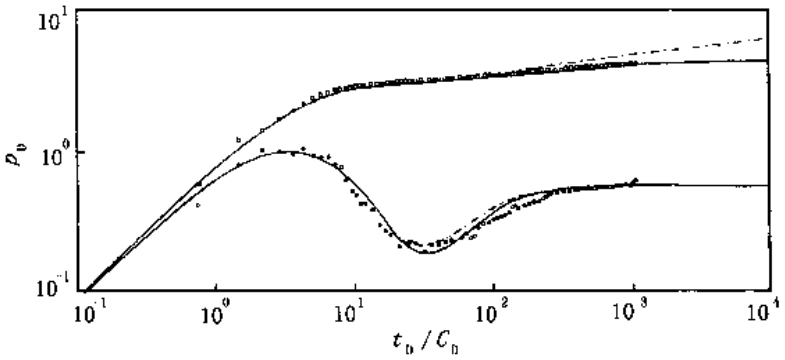


图 4－27　塔中 1 井无量纲压力及压力导数拟合图（例 4－2）

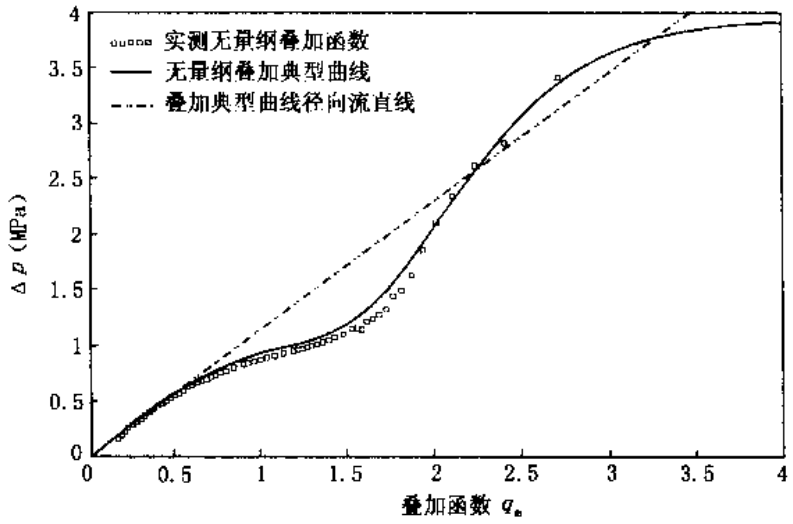


图 4－28　塔中 1 井无量纲叠加函数拟合图（例 4－2）

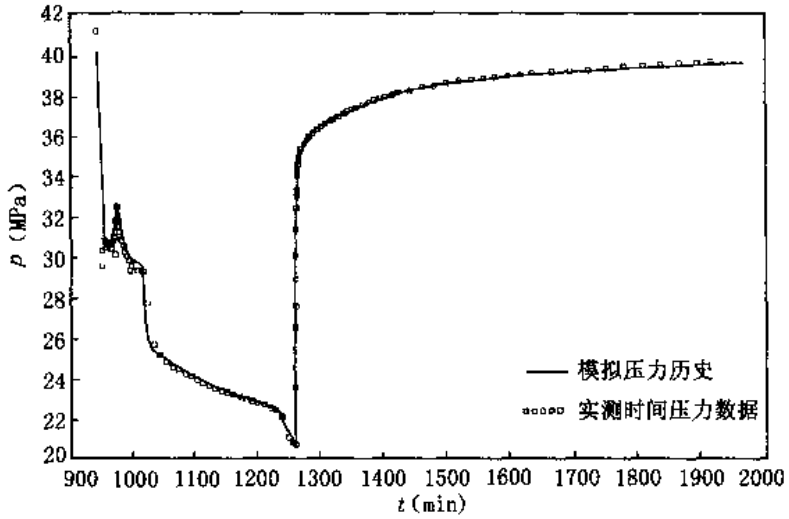


图 4－29　塔中 1 井压力历史拟合图（例 4－2）

第三节　基岩向裂缝的流动为不稳定流动的模型

一、压力图版拟合分析

这一模型的基本假定与前一模型有所不同：基质岩块内部的压力并不是处处相等。也就是说：在每一瞬间，基岩内部都存在着压差。各无量纲量的定义与上节相同。这一模型的解释图版与前一模型类似，也是由两组样板曲线构成（图 4－30），其中一组仍是均质油藏的样板曲线，每一条曲线对应一个 C_De^{2S} 值；另一组是两种介质之间不稳定流动样板曲线，每一条曲线对应一个 β' 值，而

$$\beta' = \delta \frac{(C_De^{2S})_{f+m}}{\lambda e^{-2S}} \tag{4-16}$$

式中

$$\delta = \begin{cases} 1.8914 & \text{若基质岩块是方块状的} \\ 1.0508 & \text{若基质岩块是圆球状的} \end{cases}$$

λ 则与前一模型相同，即

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{K_m}{K_f}$$

其中 α 为形状因子，取值亦与上一节所述相同。实际解释可用《现代试井解释图版》一书中图 3；解释图版（图 4－30）中有两条曲线（《现代试井解释图版》图 3 中为两条红实线）标出均质油藏模型样板曲线半对数直线段开始的大致时间，有两条点线（《现代试井解释图版》图 3 中为两条红点线）标出介质间不稳定流动达到径向流动阶段的大致时间，即介质间不稳定流动段半对数直线段出现的大致时间。

曲线拟合方法与前一模型一样。前一段（第一阶段）实测曲线与某一条均质油藏样板曲线 $[C_De^{2S} = (C_De^{2S})_f]$ 相拟合，第二阶段（过渡段）与一条两种介质之间不稳定流动样板曲线 β' 相拟合，后一段（第三阶段）与另外一条均质油藏样板曲线 $[C_De^{2S} = (C_De^{2S})_{f+m}]$ 相拟合（图 4－31）。同上一节一样，通过拟合可以得到压力拟合值、时间拟合值和三个曲

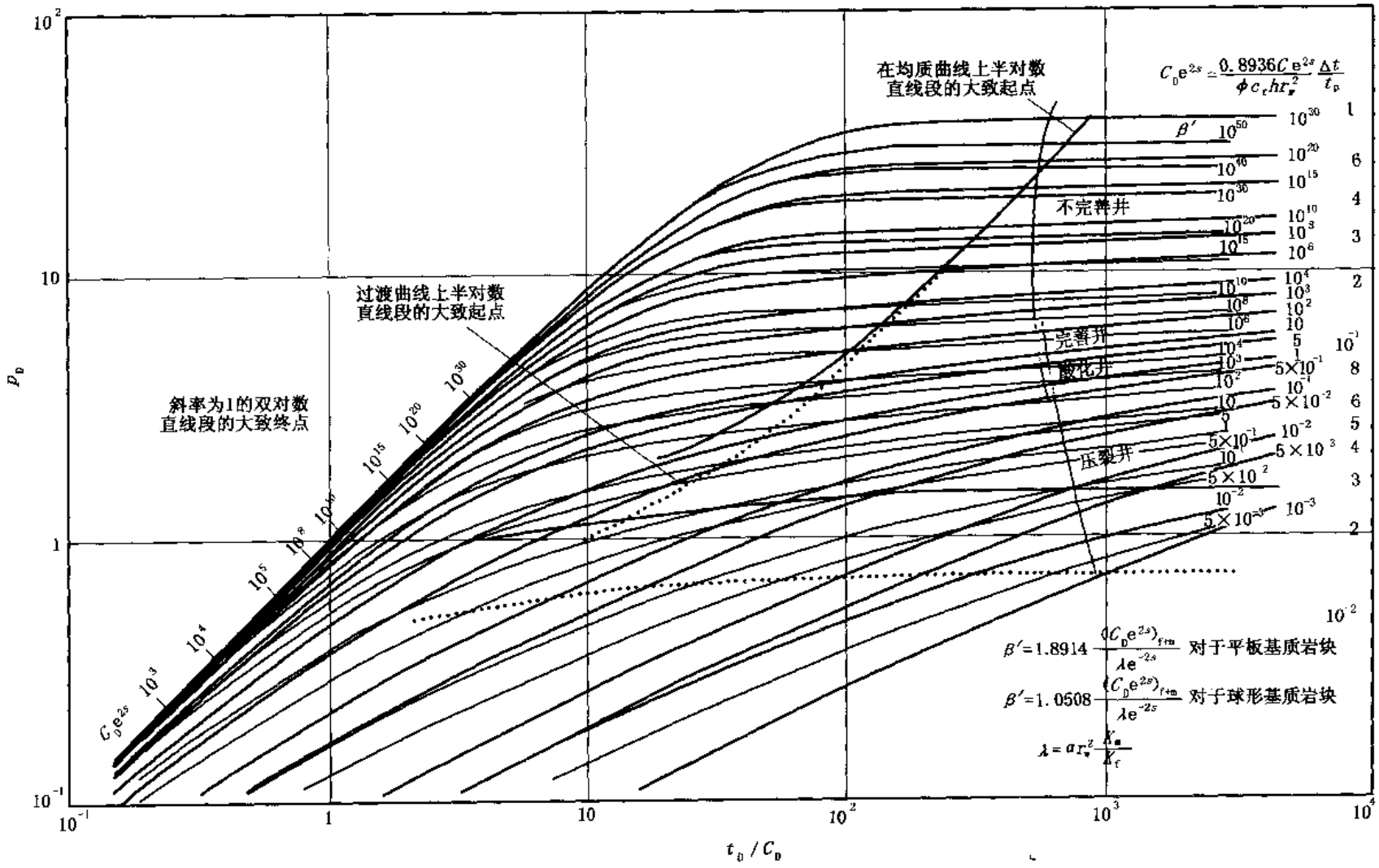


图 4－30　双重孔隙介质油藏（介质间不稳定流），具有井筒储集和表皮效应的井的解释图版

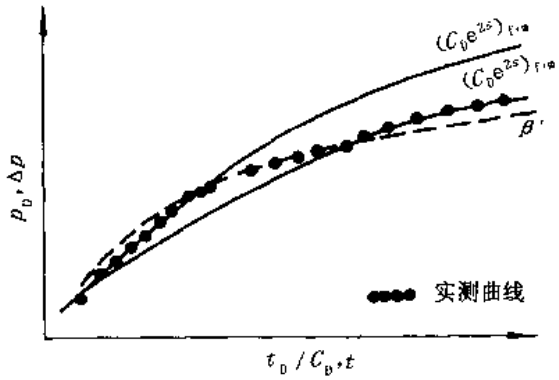


图 4－31　双重孔隙介质油藏介质间不稳定流情形图版拟合示意图

线拟合值：$(C_De^{2S})_f$，β'和$(C_De^{2S})_{f+m}$。由这些拟合值求$\frac{K_fh}{\mu}$、K_f、C、S 和 ω 的方法同前一模型完全一样[见上节式(4－7)、(4－8)、(4－9)、(4－10)和式(4－11)]。λ 值同样可由曲线拟合值$\beta'_{拟合}$、$[(C_De^{2S})_{f+m}]_{拟合}$和 C_{Df+m}值算出：

$$\lambda = \frac{\delta[(C_De^{2S})_{f+m}]^2_{拟合}}{\beta'_{拟合}C_{Df+m}}$$

这个公式的正确性不难由 β'的定义 [见式(4－16)] 看出。

介质间不稳定流动的模型，常常看不到第一阶段——裂缝系统中流动的阶段。在这种情形，其双对数曲线一开始就沿着一条 β'曲线，然后转到一条 $(C_De^{2S})_{f+m}$曲线，如图 4－32a 图所示。其半对数曲线，不再是两条彼此平行的直线段，而是两条相交的直线段，其中第一直线段为过渡段，即介质间不稳定流动的径向流动段，第二直线段则反映整个系统（裂缝系统＋基岩系数）的特性。第二直线段的斜率为第一直线段的斜率的两倍，如图 4－32b 图所示。

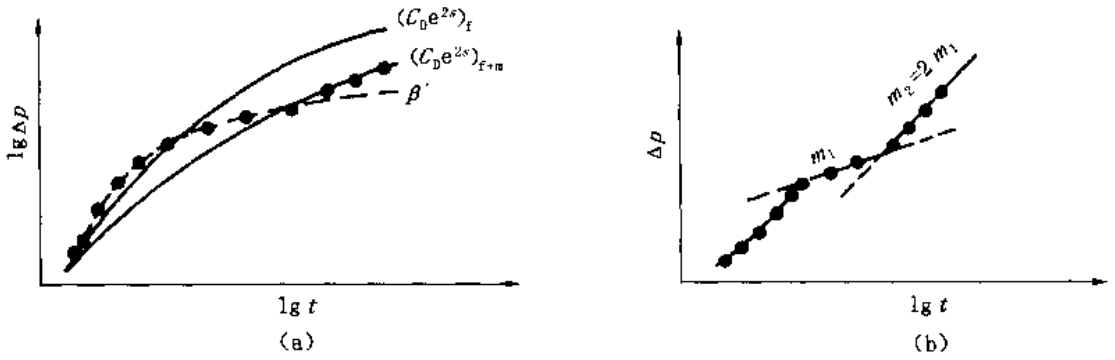


图 4－32　通常所见的双重孔隙介质油藏介质间不稳定流情形的双对数曲线和半对数曲线

显然，我们计算流动系数（或地层系数或渗透率）时，必须用第二直线段的斜率 m_2：

$$\frac{K_fh}{\mu} = \frac{2.121\times10^{-3}qB}{m_2}$$

$$K_f = \frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{m_2h}$$

由于 $m_1=\frac{1}{2}m_2$，故亦可用第一直线段的斜率 m_1 计算：

$$\frac{K_fh}{\mu} = \frac{1.061\times10^{-3}qB}{m_1}$$

$$K_f = \frac{1.061\times10^{-3}q\mu B}{m_1h}$$

最后，要是过渡段达到了径向流动阶段，则半对数曲线呈现两条相交的直线段，其斜率

之比为 $m_2:m_1=2:1$（这与均质油藏中一口井附近有密封断层的反映完全一样，应结合地质资料进行解释）；如果过渡段没有达到径向流动阶段，但第三阶段达到了，则半对数曲线只出现一条直线段（第二直线段）；如果连第三阶段也未达到径向流动阶段，则半对数曲线不出现任何直线段。

二、压力导数图版拟合分析

这个模型的压力导数解释图版如图 4－33 所示，其彩色图版在我国尚未出版，但在各种试井解释软件中都可以找到。在早期，所有样板曲线成 45°线，然后逐渐过渡成为水平直线 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=0.25$。在过渡段，每一条样板曲线对应一个 β' 值。在两条水平直线 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=0.25$（称作 0.25 线）和 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}=0.5$（0.5 线）之间有一组曲线，每一条对应一个 $\frac{\lambda C_{DM+m}}{(1-\omega)^2}$ 值。

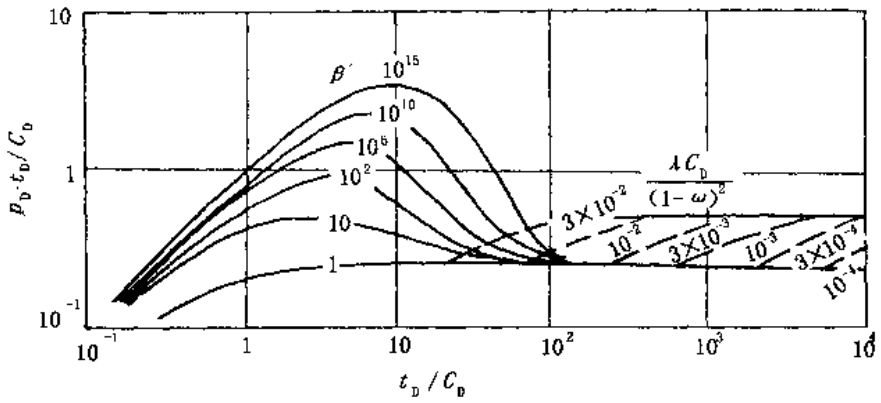


图 4－33　双重孔隙介质油藏介质间不稳定流动模型解释图版

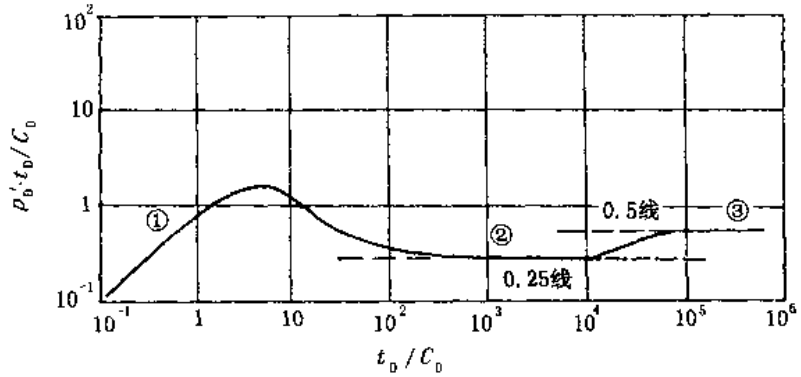


图 4－34　双重孔隙介质油藏（介质间不稳定流动）的压力导数曲线及其拟合

如前所述，介质间不稳定流动模型常常看不到裂缝系统流动阶段，其压力导数曲线如图 4－34 所示。同前述模型一样，早期的纯井筒储集阶段是一条 45°直线（图 4－34①），接着逐渐过渡到介质间不稳定流动阶段，这一阶段的径向流动曲线拟合 0.25 水平线（图 4－34②），然后达到整个系统的流动阶段，曲线逐渐上升，其径向流动阶段拟合 0.5 线（图 4－

34③)。和0.25线及0.5线拟合，就分别表征介质间不稳定流动和整个系统流动的径向流动阶段。如果介质间不稳定流动尚未达到径向流动就迅速转入整个系统的流动，则曲线尚未到达和0.25线相拟合的水平线就开始上升，最后呈现与0.5线相拟合的水平线，如图4－35。

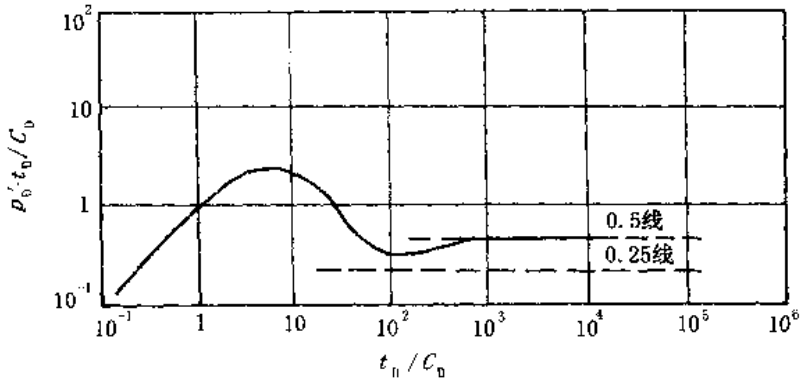


图4－35　介质间不稳定流动未达到径向流动情形的压力导数曲线

这一模型的复合图版如图4－36所示，实际进行拟合解释时，也常常同时做出两种图版的拟合，以便互相验证。

利用压力导数解释介质间不稳定流动模型，虽然比用压力进行解释大有改进，但有时仍会出现模棱两可的情形，即存在多解性的问题。比如导数曲线由拟合0.25直线上升到拟合0.5直线，与均质油藏中一口井附近有封闭断层的情形的反映（此时，导数曲线由拟合0.5直线上升到拟合1.0直线）十分相似。这种问题，只能靠同地质等资料一起进行综合解释才能解决。

第三章中关于用压降解释图版进行压力恢复分析的方法，在这里也完全同样适用。

第四节　几点重要的注释

（1）在双重孔隙介质油藏情形，不能像在均质油藏情形那样，用表皮系数 S 的符号来判断油井是否受到污染。一般说来，正常井（未受污染井）的表皮系数为负值，改善井的表皮系数 $S<-3$。

（2）在双重孔隙介质油藏中，由试井解释计算的井筒储集系数 $C_{试井}$ 要比均质油藏高得多。

$S<0$ 且 $C_{试井} \gg C_{完井}$（由完井数据计算的井筒储集系数），正是双重孔隙介质油藏的重要特征。

（3）测取双重孔隙介质油藏中油井的压力恢复，必须待压力降落达到了第三阶段（两种介质同时存在流动，p_f 与 p_m 同时下降，见本章第一节）之后才关井。这是因为，在介质之间为不稳定流动情形，如果在压降到达过渡段前就关井，则压力恢复曲线将不出现直线段（如图4－37所示）。如果压降到达了过渡段但未到达第三阶段就关井，则压力恢复曲线将只出现第一直线段（如图4－38所示）。要是用这个直线段的斜率来计算参数，用这个直线段来外推地层压力，都将得到错误的结果。只有当压降到达第三阶段后关井，恢复曲线才可能呈现两条直线段（图4－39），才可能做出正确的判断，并算得正确的压力和参数。

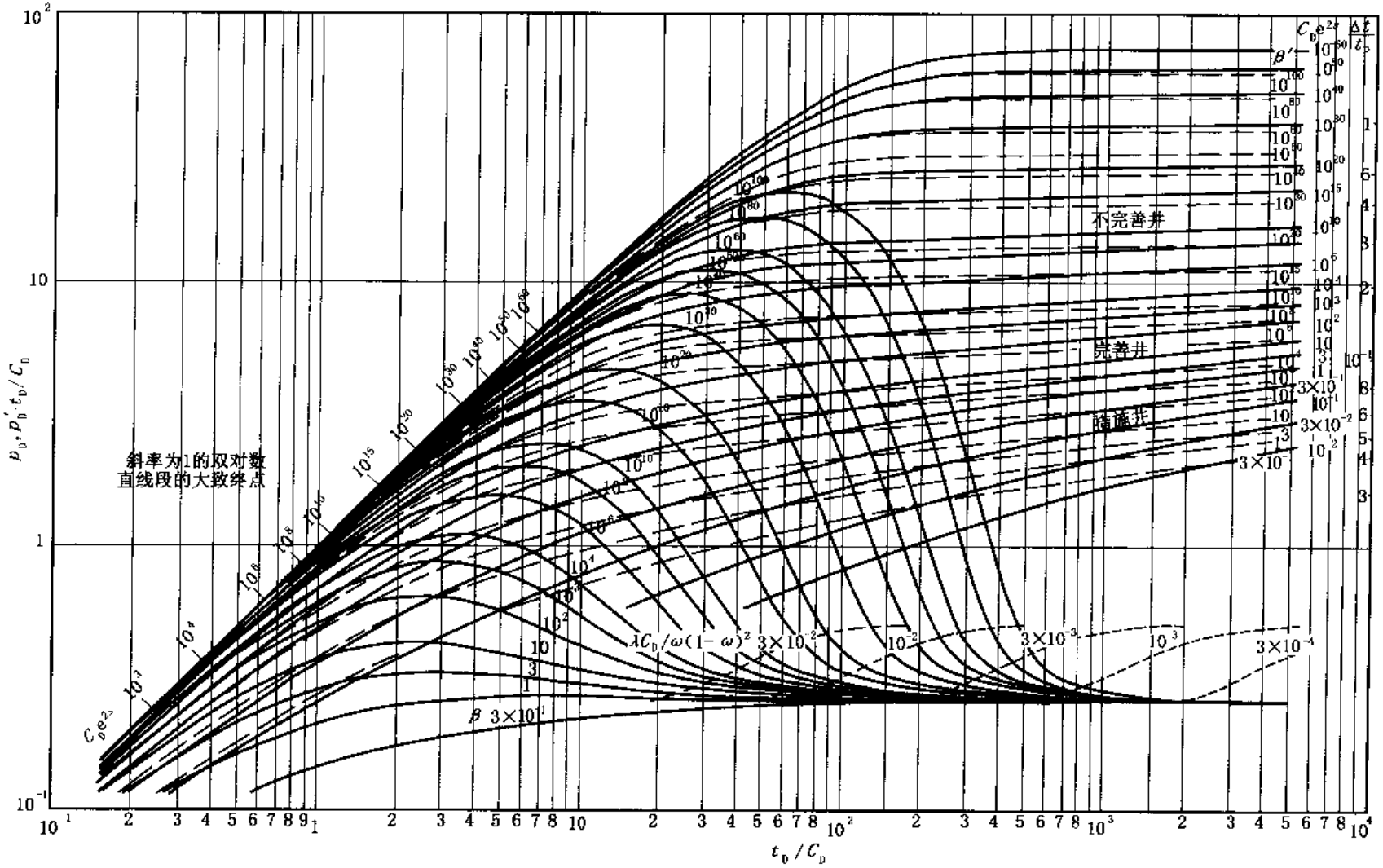


图 4－36　双重孔隙介质油藏（介质间不稳定流）的复合图版

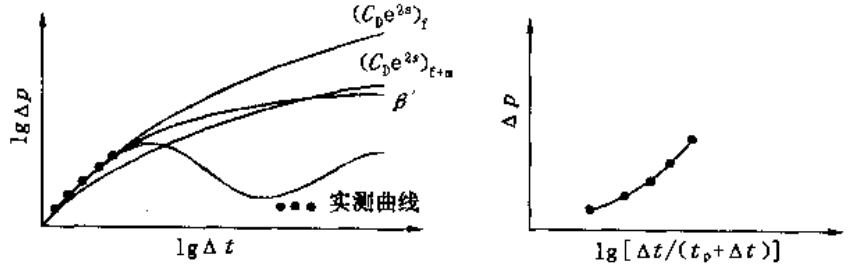


图 4－37　关井前压力未达到过渡段，压力恢复（半对数）曲线不出现直线段

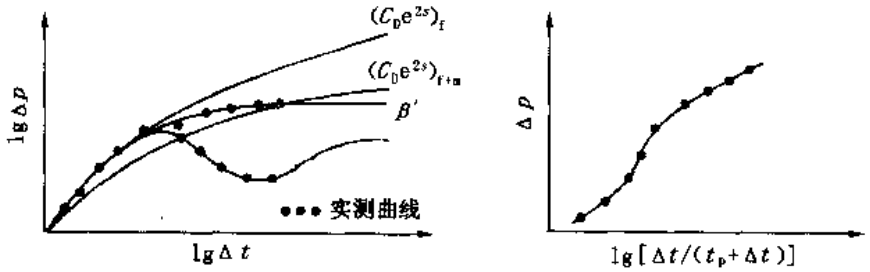


图 4－38　关井前压降只达到过渡段而未达到整个系统的流动，压力恢复（半对数）曲线只能出现一个直线段

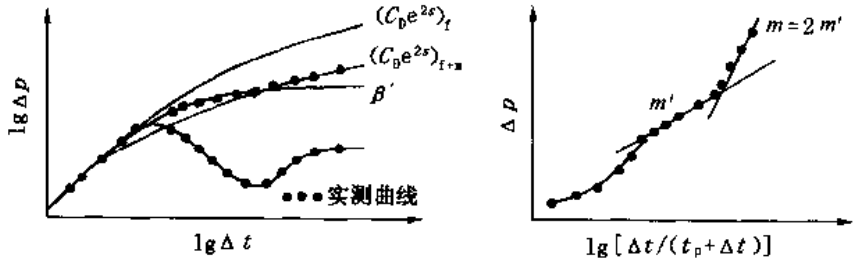


图 4－39　关井前压降达到了整个系统的流动，压力恢复（半对数）曲线才能呈现两个直线段

第五章　均质油藏中垂直裂缝井的试井解释

人工压裂是一项重要的增产措施。虽然压裂可能产生各种各样的裂缝，但是研究表明：在深度超过 700m 的地层中，压裂产生的裂缝基本上都是垂直裂缝。因此，关于压裂井试井解释的研究，着重于垂直裂缝的情形。对于各种压裂措施，如水力压裂等，均可以使用本章的方法，有效地判断是否形成了预期的裂缝，并且把压开的裂缝的长度计算出来。

我们考虑如下两种裂缝模型：

（1）无限导流性垂直裂缝；

（2）有限导流性垂直裂缝。

第一节　无限导流性垂直裂缝模型

一、模型的基本假定

（1）只压开一条裂缝，这条裂缝与井筒对称，其半长为 x_f，如图 5－1 所示；

（2）裂缝具有无限大的渗透率，因此整条裂缝中压力相同，换句话说，沿着裂缝没有压力降；

（3）裂缝的宽度为 0；

（4）如果压裂井位于长方形封闭油藏的中央，裂缝方向与该油藏的一条不渗透边界平行。

在静水压头非常高的情形下钻井时，或在人工压裂过程中没有加适当的支撑剂时，都可能产生符合这种模型的裂缝。

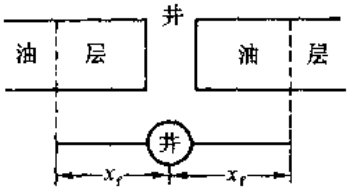


图 5－1　无限导流性垂直裂缝模型示意图

二、模型的流动阶段

这种模型的流动可以区分为线性流动阶段和径向流动阶段。

1. 线性流动阶段

早期是线性流动阶段。一般说来，看不到任何井筒储集效应，一开始就是线性流动。

定义无量纲时间为［式（1－36）］

$$t_{Df}=\frac{3.6K}{\phi\mu C_t x_f^2}\cdot t$$

则有

$$p_D=\sqrt{\pi t_{Df}} \tag{5-1}$$

即

$$\frac{Kh}{1.842\times10^{-3}q\mu B}\Delta p=\sqrt{\frac{3.6\pi Kt}{\phi\mu C_t x_f^2}}$$

整理得

$$\Delta p=\frac{6.195\times10^{-3}qB}{hx_f}\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}}\cdot\sqrt{t} \tag{5-2}$$

两边取对数得

$$\lg\Delta p = \frac{1}{2}\lg t + \lg\left(\frac{6.195\times10^{-3}qB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}}\right) \tag{5-3}$$

由式（5－3）知：在双对数坐标系中，Δp 与 t 呈斜率为$\frac{1}{2}$的直线（图 5－2a）；而由式（5－2）知：在直角坐标系中，Δp 与$\sqrt{t}$成过原点的一条直线，其斜率 m''为（图 5－2b；参

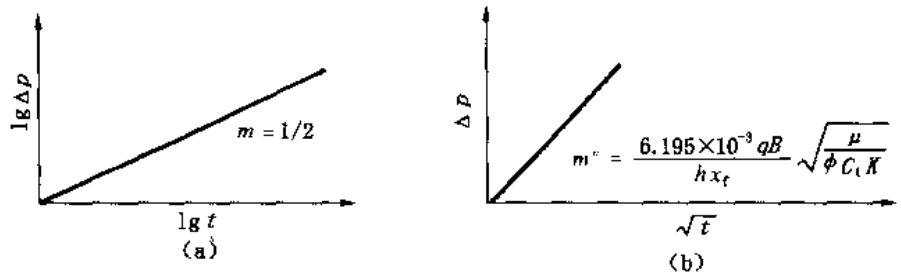


图 5－2　无限导流性垂直裂缝井早期线性流动阶段的诊断曲线和特种识别曲线

看图 2－10）：

$$m'' = \frac{6.195\times10^{-3}qB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}} \tag{5-4}$$

图 5－2 中的 a 和 b 分别是无限导流性垂直裂缝模型早期线性流动阶段的诊断曲线和特种识别曲线图。由式（5－4）可得

$$x_f = \frac{6.195\times10^{-3}qB}{m''h}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}} \tag{5-5}$$

所以，当我们计算出 K 和 m''后，就可以由上式算出裂缝的有效半长 x_f。

2．径向流动阶段

早期的线性流动将逐步过渡到径向流动。在径向流动阶段有

$$p_D = 0.5(\ln t_{Df} + 2.2) \tag{5-6}$$

这时，早期的裂缝影响已经结束，所以，压力变化应与均质油藏一致，即应有

$$p_D = 0.5(\ln t_D + 0.80907 + 2S)$$

或

$$p_D = 0.5(\ln t_{De} + 0.80907)$$

其中 t_{De}的定义见式（1－34）：

$$t_{De} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_{we}^2}t$$

r_{we}为折算半径或有效半径［详见第一章式（1－42）］：

$$r_{we} = r_w e^{-S}$$

于是得到

$$0.5(\ln t_{Df} + 2.2) = 0.5(\ln t_{De} + 0.80907)$$

化简得

$$\ln t_{Df} + 1.39093 = \ln t_{De}$$

$$4.0186t_{Df} = t_{De}$$

将式（1－36）和式（1－34）代入上式得

$$4.0186\times\left(\frac{3.6K}{\phi\mu C_t x_f^2}\cdot t\right)=\frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_{we}^2}\cdot t$$

化简可得

$$x_f^2=4.0186r_{we}^2$$

从而有

$$x_f\approx 2r_{we}=2r_w e^{-S} \tag{5-7}$$

或

$$S\approx\ln\frac{2r_w}{x_f} \tag{5-8}$$

由式（5－7）和式（5－8）可知，如果算出了裂缝半长 x_f，则可以算出表皮系数 S；反之，如果算出了 S 值，便可以算出 x_f 值。不过，如前面已经指出过的，式（5－7）要谨慎使用，因为 S 的一点误差可能带来 x_f 的很大误差。

三、压力图版拟合分析

无限大均质地层中一口无限导流性裂缝井的压降解释图版如图 5－3 所示。这是一条无量纲压力 p_D 与无量纲时间 t_{Df} 的双对数曲线。请参看《试井分析方法》一书[1] 附录 C 图 C－3。

无限大均质地层中一口具井筒储集效应的无限导流性裂缝井的压降解释图版见图 5－4。这是无量纲压力 p_D 与无量纲时间 t_{Df} 的双对数曲线族，每一条曲线对应一个 C_{Df} 值，而

$$C_{Df}=\frac{C}{2\pi\phi C_t h x_f^2} \tag{5-9}$$

p_D 和 t_{Df} 的定义分别见式（1－29）和式（1－36）。图 5－4 中，$C_{Df}=0$ 的那一条曲线就是图 5－3 的曲线，各条曲线（$C_{Df}=0$ 除外）的左下端为井筒储集阶段，接着是裂缝线性流动阶段，最后是径向流动阶段。

拟合分析时，画出 Δp—t 或 Δp—Δt 的双对数曲线，与压力解释图版相拟合，由拟合值可以算出［见式（3－1）、（3－3）、（1－36）、（5－9）和式（5－8）］

$$\frac{Kh}{\mu}=1.842\times10^{-3}qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$K=1.842\times10^{-3}\frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$x_f=\sqrt{\frac{3.6K}{\phi\mu C_t}\frac{1}{\left(\frac{t_{Df}}{t}\right)_{拟合}}}$$[2]

$$C=2\pi\phi C_t h x_f^2(C_{Df})_{拟合}$$

$$S=\ln\frac{2r_w}{x_f}$$

---

[1] 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，栾志安等译，葛家理译校，石油工业出版社，1985 年版。

[2] 在压力恢复情形，式中的 t 应改为 Δt。

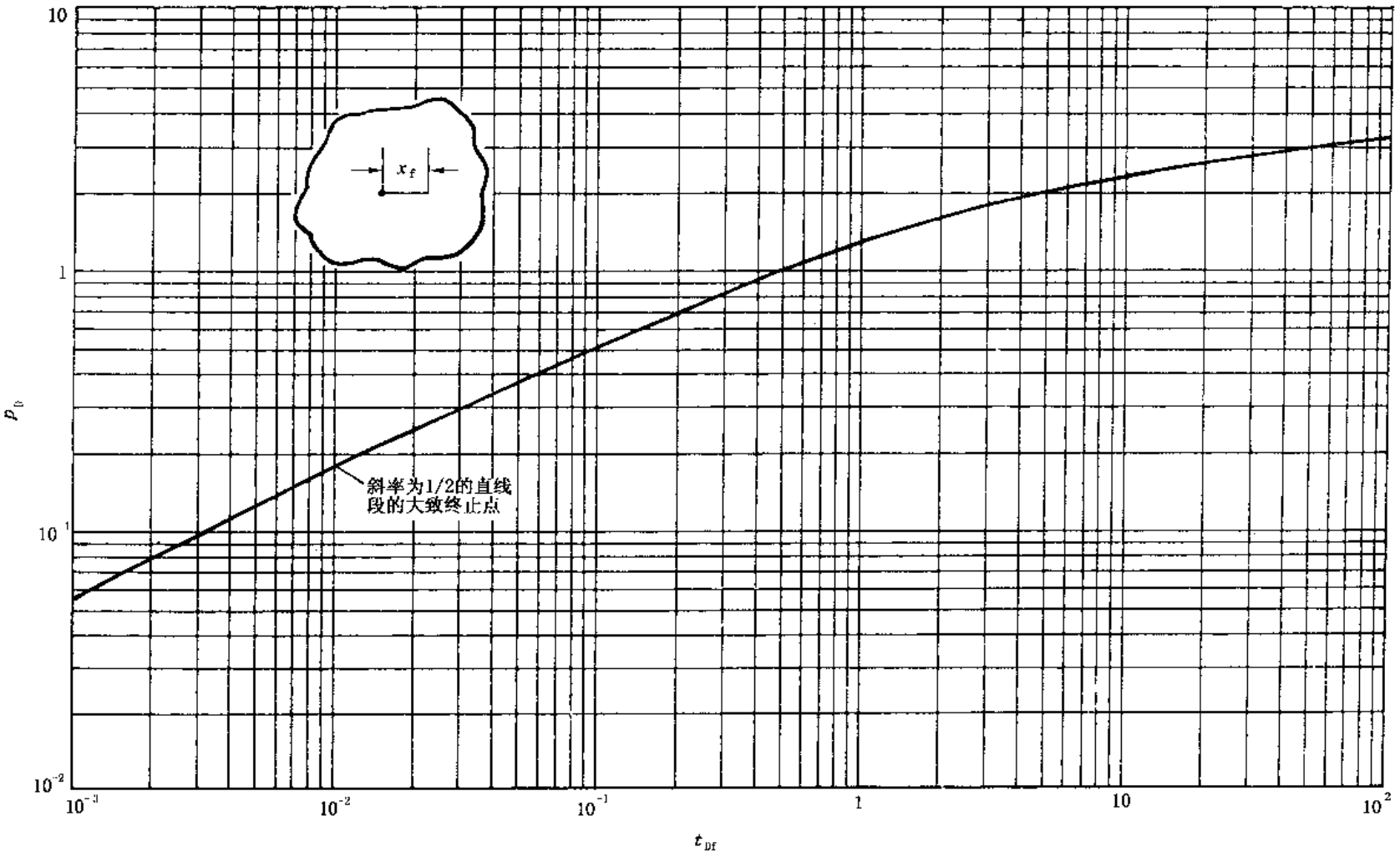


图 5－3　无限大均质地层中无限导流性垂直裂缝井的解释图版

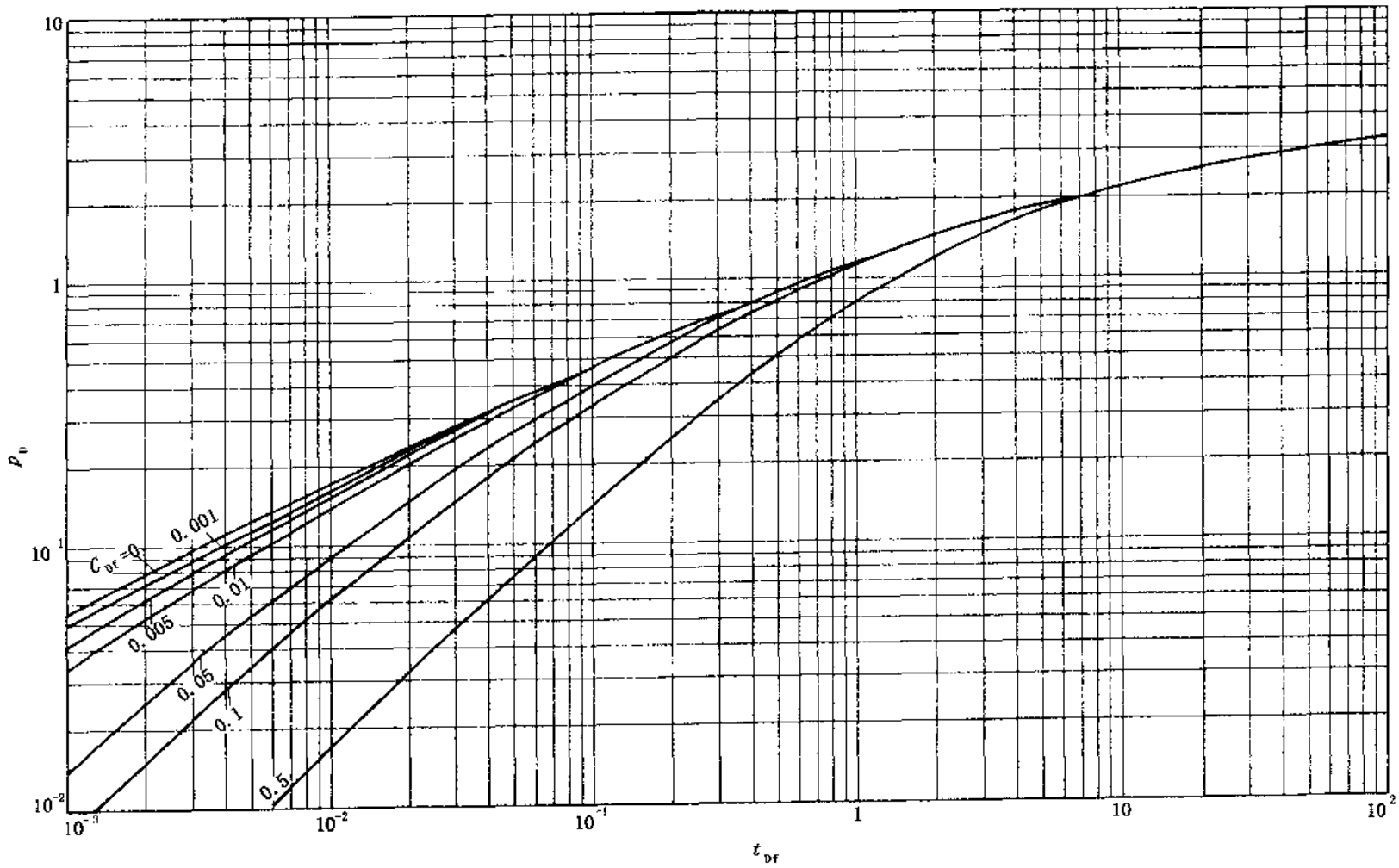


图 5－4　具井筒储集效应的无限导流裂缝井的解释图版

图 5－5 是长方形封闭均质油藏中央一口无限导流性裂缝井压降解释图版。这是假定长方形封闭系统的中央有一口井，有一条垂直裂缝切割井筒，这条裂缝在井的两边的长度均为 x_f，而且井在 x、y 方向上离边界的距离分别为 x_e 和 y_e，如图 5－5 左上角所示。显然，这个封闭油藏的面积 $A=4x_e y_e$。当 $\frac{x_f}{\sqrt{A}}$ 取不同数值时，样板曲线具有不同的形状，而当 $\frac{x_f}{\sqrt{A}}=0$ 时，便是均质油藏（无裂缝）的模型（图 5－5 中最下方一条曲线）。$\frac{x_e}{y_e}$ 的数值不同时，曲线也稍有变化，图 5－5 中用不同的线标出，详情请参看《现代试井解释图版》一书中图 9。

通过图版拟合，可以得到 $\frac{Kh}{\mu}$、K 和 x_f，并进而计算出 S 和 A。由压力拟合得

$$\frac{Kh}{\mu}=1.842\times10^{-3}qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$K=1.842\times10^{-3}\frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

由时间拟合得

$$x_f=\left[\frac{3.6K}{\phi\mu C_t\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

进而由式（5－8）算得

$$S=\ln\frac{2r_w}{x_f}$$

当 $x_f\neq0$ 时，可得

$$A=\frac{x_f^2}{\left(\frac{x_f}{\sqrt{A}}\right)^2_{拟合}}$$

径向流动阶段的特种识别曲线，和均质油藏情形一样，也是 MDH 曲线或赫诺曲线。同样，由直线段的斜率可以求得 $\frac{Kh}{\mu}$、Kh、K 和 S（见第三章）。

解释步骤可以归纳如下：

（1）绘制实测双对数曲线图，根据实际情况选择解释图版，进行初拟合，划分流动阶段；

（2）进行特种识别曲线分析；

①画早期线性流动阶段资料的 Δp—$\sqrt{t}$（恢复情形为 Δp—$\sqrt{\Delta t}$）关系曲线图，应为过原点的一条直线，量出斜率 m''。

②画径向流动阶段的 p—$\lg t$（恢复情形为 p—$\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 或 p—$\lg\Delta t$）关系曲线图，由其直线段的斜率的绝对值 m 计算 $\frac{Kh}{\mu}$、Kh、K、S 和压力拟合值 $\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}=\frac{1.151}{m}$。

③画晚期资料（封闭系统，压降试井，进入了拟稳定流动阶段的情形）的 Δp—t 关系曲线，应成一条直线，由其斜率 m^* 算出该封闭系统的储量。

（3）进行终拟合，计算 $\frac{Kh}{\mu}$、Kh、K、x_f 和 S，在封闭长方形油藏情形，计算封闭油藏的面积 A；

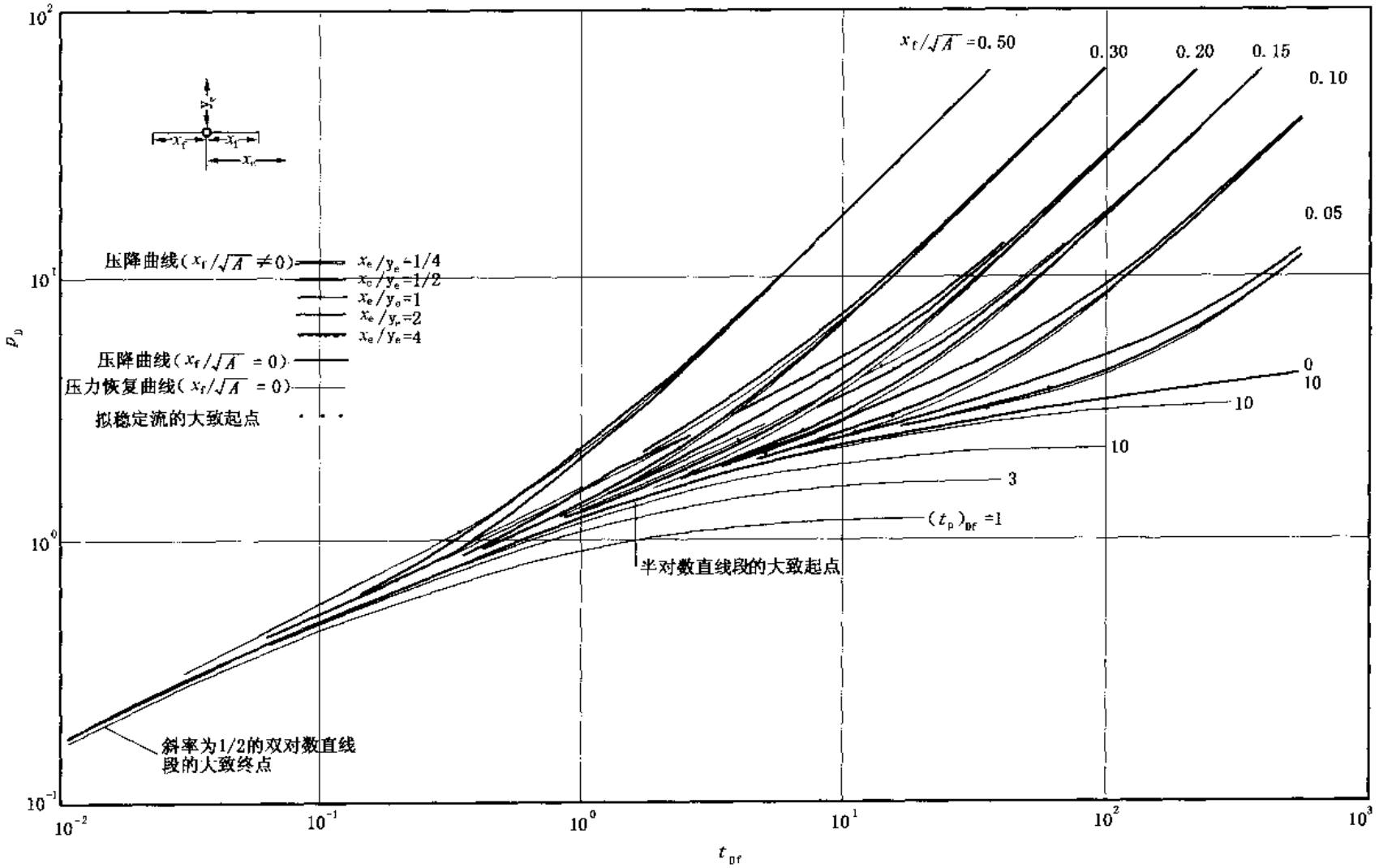


图 5－5　封闭长方形均质油藏中心一口被一条无限导流性垂直裂缝切割的井的解释图版

(4) 由 K 和 m'' 计算 x_f [式 (5-5)];

(5) 对比各项计算结果。

值得注意的是：某些非均质性也可能使压差—时间的双对数曲线呈斜率为$\frac{1}{2}$的直线。因此，只有那些确实进行过水力压裂的井，才可使用这一模型进行试井解释。

四、压力导数图版拟合分析

无限大均质油藏中一口具井筒储集效应的无限导流垂直裂缝井，在纯井筒储集阶段有

$$\Delta p = \frac{qB}{24C} \cdot t$$

由式 (1-29)、(1-36)、(5-9) 定义

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \cdot \Delta p$$

$$t_{Df} = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t x_f^2} \cdot t$$

$$C_{Df} = \frac{C}{2\pi\phi C_t h x_f^2}$$

则

$$p_D = \frac{t_{Df}}{C_{Df}}$$

由此可得

$$p'_D = \frac{dp_D}{dt_{Df}} = \frac{1}{C_{Df}}$$

$$p'_D \cdot t_{Df} = \frac{t_{Df}}{C_{Df}}$$

$$\lg(p'_D \cdot t_{Df}) = \lg \frac{t_{Df}}{C_{Df}} \tag{5-10}$$

在裂缝线性流动阶段有 [式 (5-1)]

$$p_D = \sqrt{\pi t_{Df}}$$

故

$$p'_D = \frac{dp_D}{dt_{Df}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{t_{Df}}}$$

$$p'_D \cdot t_{Df} = \frac{1}{2}\sqrt{\pi t_{Df}}$$

$$\lg(p'_D \cdot t_{Df}) = \frac{1}{2}\lg t_{Df} + \lg\frac{\sqrt{\pi}}{2} \tag{5-11}$$

而在径向流动阶段，成立 [式 (5-6)]

$$p_D = 0.5(\ln t_{Df} + 2.2)$$

故此时有

$$p'_D = \frac{dp_D}{dt_{Df}} = \frac{0.5}{t_{Df}}$$

$$p'_D \cdot t_{Df} = 0.5 \tag{5-12}$$

无限大均质油藏中具井筒储集效应的无限导流垂直裂缝井的压力导数解释图版，是以 t_{Df} 和 $p'_D \cdot t_{Df}$ 分别为横坐标和纵坐标的双对数曲线族，族中每一条曲线对应一个 C_{Df} 值（图 5－6）。由式（5－10）、（5－11）和式（5－12）可知：在纯井筒储集阶段，双对数曲线呈斜率为 1 的直线即 45°线（与均质油藏情形相同）；在线性流动阶段，双对数曲线呈斜率为 $\frac{1}{2}$ 的直线；在径向流动阶段，双对数曲线为 $p'_D \cdot t_{Df}=0.5$ 的水平直线，即 0.5 线（亦与均质油藏情形相同）。不过，这种井很少出现纯井筒储集阶段，所以在早期阶段往往只出现斜率为 $\frac{1}{2}$ 的直线段。

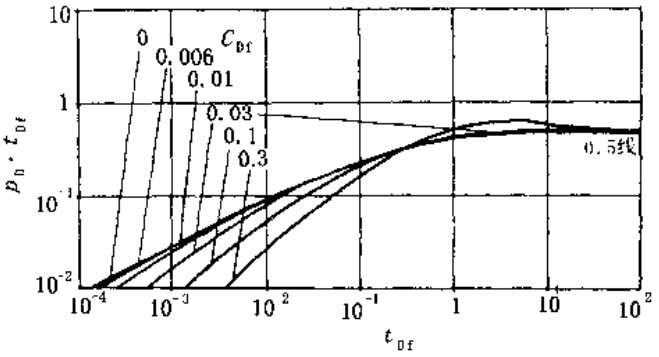


图 5－6　均质油藏中具井筒储集效应的无限导流垂直裂缝井的压力导数解释图版

拟合解释的步骤与均质油藏情形大体相同。先使实测压力导数曲线（$\Delta p' \cdot t = \frac{d\Delta p}{dt} \cdot t$ 与 t 的双对数曲线）的水平直线段与图版的 0.5 线相重合，然后将实测曲线沿着水平方向移动，直到早期段曲线与图版的早期段互相重合。由压力拟合值、时间拟合值和曲线拟合值可分别计算流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$（或地层系数 Kh，或渗透率 K）、裂缝半长 x_f 和井筒储集系数 C：

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left(\frac{p'_D \cdot t_{Df}}{\Delta p' \cdot t} \right)_{拟合}$$

$$Kh = 1.842 \times 10^{-3} q\mu B \left(\frac{p'_D \cdot t_{Df}}{\Delta p' \cdot t} \right)_{拟合}$$

$$K = 1.842 \times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h} \left(\frac{p'_D \cdot t_{Df}}{\Delta p' \cdot t} \right)_{拟合}$$

$$x_f = \sqrt{\frac{3.6K}{\phi \mu C_t} \frac{1}{\left(\frac{t_{Df}}{t} \right)_{拟合}}}$$

$$C = 2\pi \phi C_t h x_f^2 (C_{Df})_{拟合}$$

此外，还可由 x_f 算出表皮系数 S：

$$S = \ln \frac{2r_w}{x_f}$$

均质油藏中具井筒储集效应的无限导流垂直裂缝井的复合图版如图 5－7 所示。在实际解释时也常常应用这种复合图版，同时进行两种图版的拟合，以便互相验证，并更准确地识别裂缝井和划分流动阶段。如早期线性流动阶段，$\lg\Delta p$—$\lg t$ 曲线和 $\lg(\Delta p' \cdot t)$—$\lg t$ 曲线均成斜率为 $\frac{1}{2}$ 的直线，即它们互相平行，而且由于［参看式（5－2）、图 3－52 及表 3－10］

$$\Delta p' \cdot t = \frac{1}{2} \Delta p$$

$$\lg\Delta p - \lg(\Delta p' \cdot t) = \lg 2 \approx 0.3010$$

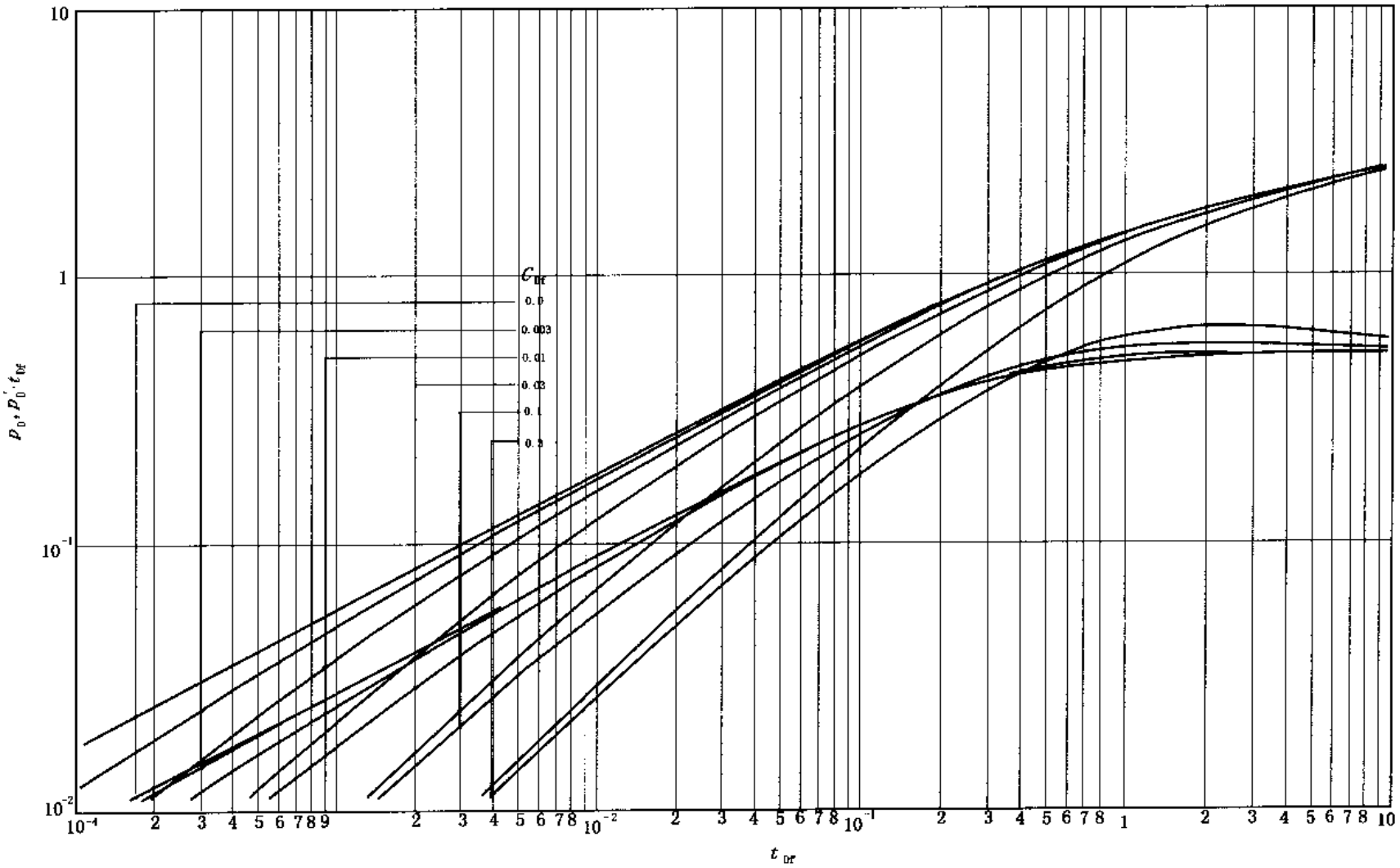


图 5－7　均质油藏中具井筒储集效应的无限导流性垂直裂缝井的复合图版

所以在纵坐标方向上，它们之间相距 lg2≈0.301 个对数周期。同理，在早期线性流动阶段，复合图版的两条相应样板曲线也是如此（见图 5－7）。

第三章中关于用压降解释图版来进行压力恢复分析的方法，在这里也完全同样适用。

例 5－1[1] 克拉玛依油田446井压裂后进行了压力恢复测试，压力恢复及其导数的双对数曲线如图5－8所示。压力曲线和导数曲线均呈现斜率为$\frac{1}{2}$的直线，彼此互相平行，它们之间的纵向距离约为 0.3 对数周期。这正是无限导流裂缝形成线性流动的特征。直线段延续很长，达 2.5 对数周期，说明压开的裂缝相当长。

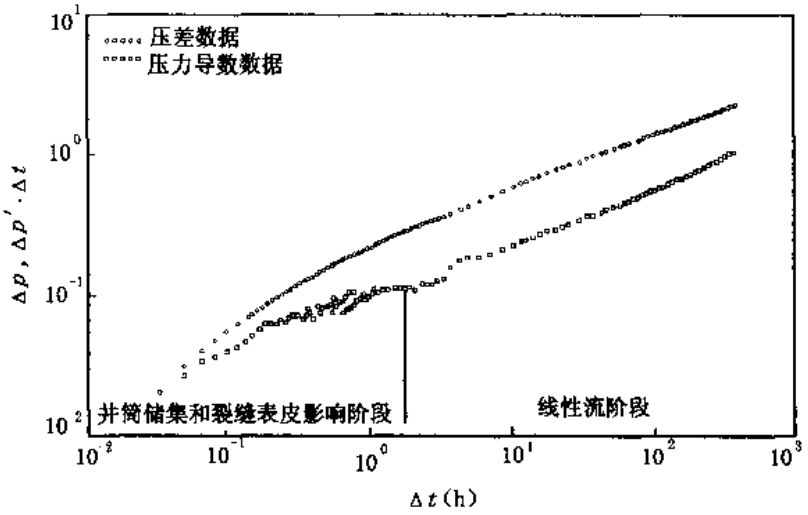


图 5－8　446 井压力及导数双对数图（例 5－1）

关井前产量变化较大，故采用处理多流量的解释方法进行解释。其叠加函数曲线如图 5－9。显然，如果用老的常规试井解释方法，光靠图 5－9 进行解释，是相当困难的。用无

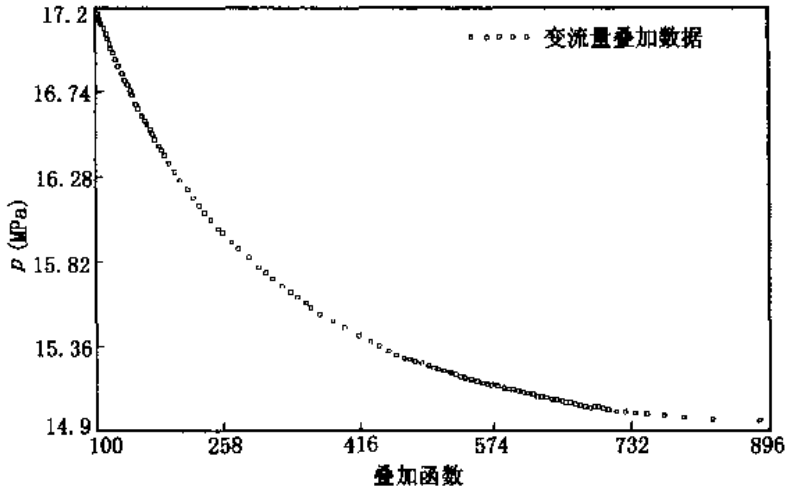


图 5－9　446 井压力恢复叠加函数图（例 5－1）

[1] 本例引自文献［4］，解释人：蒋沛然、王维君。

限导流性垂直裂缝井的复合解释图版（图 5－7）进行拟合分析，问题就可迎刃而解。拟合的结果见图 5－10，解释结果列于表 5－1。无量纲叠加函数拟合检验图和压力史拟合检验图见图 5－11 和 5－12。

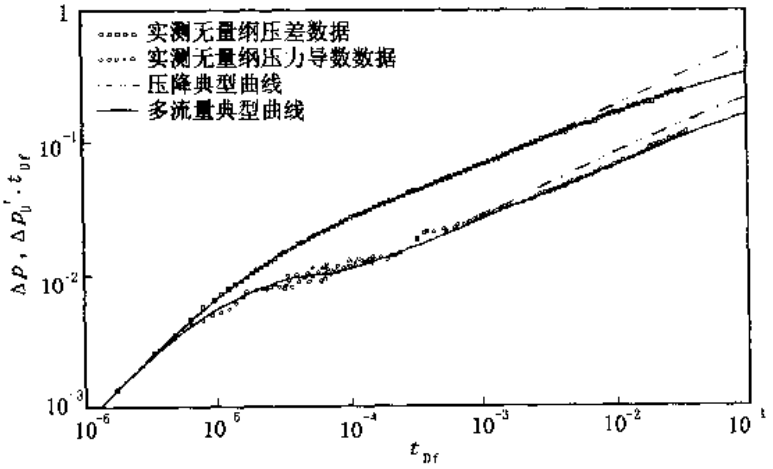


图 5－10　446 井无量纲压力及导数拟合图（例 5－1）

表 5－1　446 井解释结果（例 5－1）

储集类型	解释方法	渗透率 K $(10^{-3}\mu m^2)$	表皮系数 S	井筒储集系数 C $\left(\frac{m^3}{MPa}\right)$	裂缝半长 x_f (m)	外推压力 (MPa)	裂缝导流能力 F_{CD}
均质垂直裂缝	双对数图版法	0.753	0.016	2.12	339.2		5000
	迭加法	0.753	0.016			19.24	

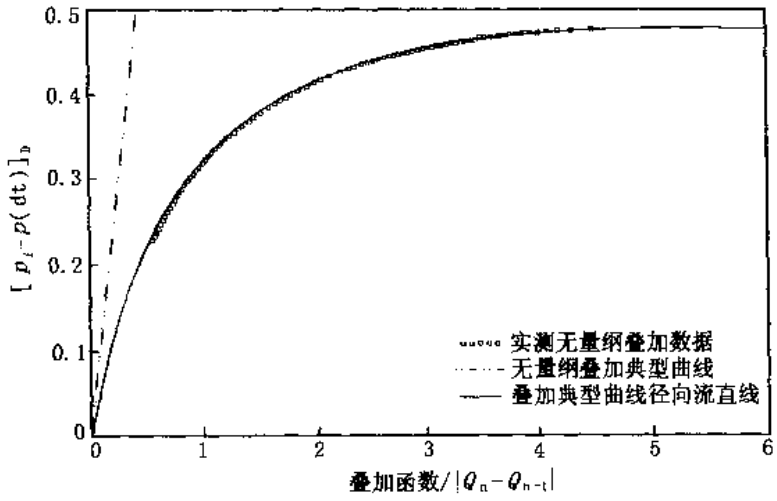


图 5－11　446 井无量纲叠加函数拟合检验图（例 5－1）

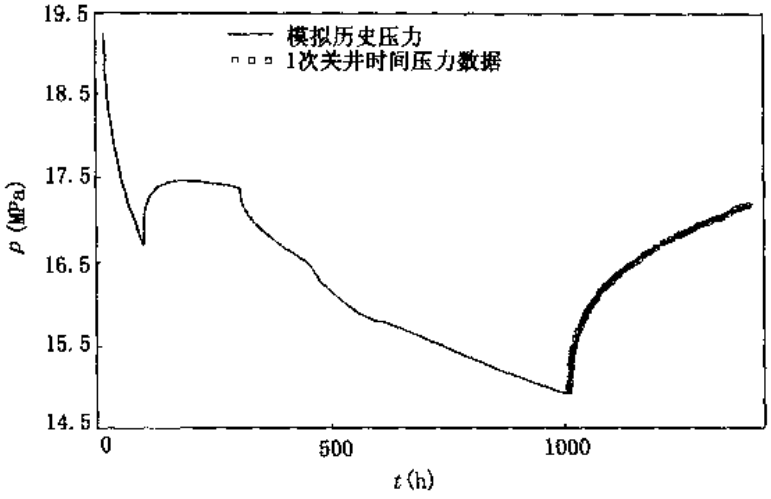


图 5－12　446 井压力历史拟合检验图（例 5－1）

第二节　有限导流性垂直裂缝模型

一、模型的基本假定

（1）只压开一条裂缝，这条裂缝对井筒对称，其半长为 x_f（图 5－13）；

（2）裂缝具有一定的渗透率 K_f，沿着裂缝存在压降；

（3）裂缝的宽度为 $w \neq 0$（图 5－13）；

（4）裂缝渗透率 K_f 比油层渗透率 K 大得多，即

$$K_f \gg K$$

大型加砂压裂往往产生符合这一模型的裂缝。

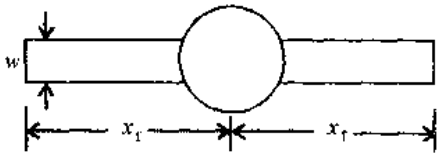


图 5－13　有限导流性垂直裂缝模型示意图

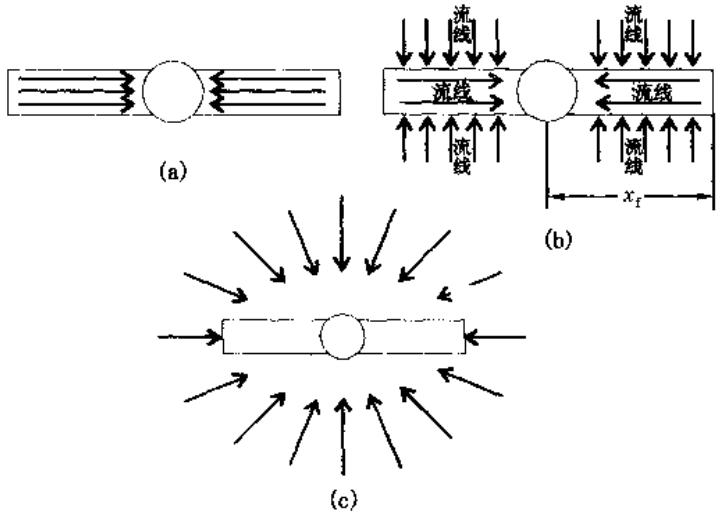


图 5－14　有限导流性垂直裂缝和地层中的流动过程

二、模型的流动阶段

这种模型的流动可以区分为早期的双线性流动阶段和后来的拟径向流动阶段。

1．线性和双线性流动阶段

在早期，首先是裂缝线性流动（图 5－14a）。一般说来，看不到井筒储集效应。在裂缝线性流动阶段，双对数曲线呈斜率为 $\frac{1}{2}$ 的直线，但历时很短，很难看到。

接着出现的是裂缝和地层的双线性流动（图 5－14b），双对数曲线呈现斜率为 $\frac{1}{4}$ 的直线。

双线性流动方程为

$$p_D = \frac{2.45}{\sqrt{K_{fD} w_{fD}}} \cdot \sqrt[4]{t_{Df}} \tag{5-13}$$

式中 K_{fD}为无量纲裂缝渗透率：

$$K_{fD} = \frac{K_f}{K}$$

w_{fD}为无量纲裂缝宽度：

$$w_{fD} = \frac{w}{x_f}$$

t_{Df}的定义见式（1-36）。

式（5-13）也可写成

$$\Delta p = \frac{6.2163 \times 10^{-3} q\mu B}{h \sqrt{K_f w} \sqrt[4]{\phi \mu C_t K}} \sqrt[4]{t} \tag{5-14}$$

两边取对数得

$$\lg \Delta p = \frac{1}{4} \lg t + \lg \frac{6.2163 \times 10^{-3} q\mu B}{h \sqrt{K_f w} \cdot \sqrt[4]{\phi \mu C_t K}} \tag{5-15}$$

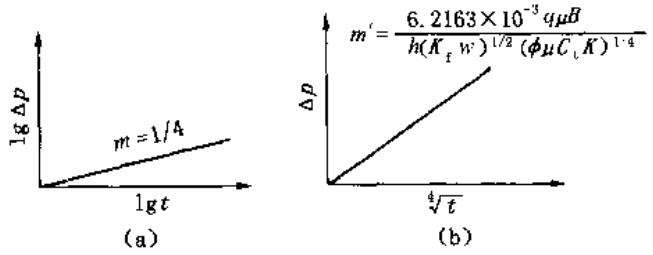


图 5-15 有限导流性垂直裂缝早期双线性流动的诊断曲线和特种识别曲线

由式（5-15）知：在对对数坐标系中，Δp 与 t（恢复情形为 Δp 与 Δt）成斜率为 $\frac{1}{4}$ 的直线，这就是有限导流性裂缝模型双线性流动的诊断曲线（图 5-15a），而其特种识别曲线图，由式（5-14）可知，应为 Δp 与 $\sqrt[4]{t}$（恢复情形为 Δp 与 $\sqrt[4]{\Delta t}$）的直角坐标图：Δp 与 $\sqrt[4]{t}$（或 $\sqrt[4]{\Delta t}$）成过原点的一条直线，其斜率为

$$m'' = \frac{6.2163 \times 10^{-3} q\mu B}{h (K_f w)^{\frac{1}{2}} (\phi \mu C_t K)^{\frac{1}{4}}}$$

（图 5-15b）。由此可得

$$K_f w = \frac{3.864 \times 10^{-5}}{\sqrt{\phi \mu C_t K}} \left(\frac{q\mu B}{h m''}\right)^2 \tag{5-16}$$

因此，如果我们在油井压裂之前进行过试井，算出了油层的渗透率 K，则可用（5-16）式算出 $K_f w$ 来。

2. 拟径向流动阶段

线性流动结束后，则进入拟径向流动阶段（图 5-14c）。

拟径向流动阶段的特种识别曲线与均质油藏情形一样，是 MDH 曲线或赫诺曲线。半对数曲线分析亦与均质油藏情形相同（见第三章）。

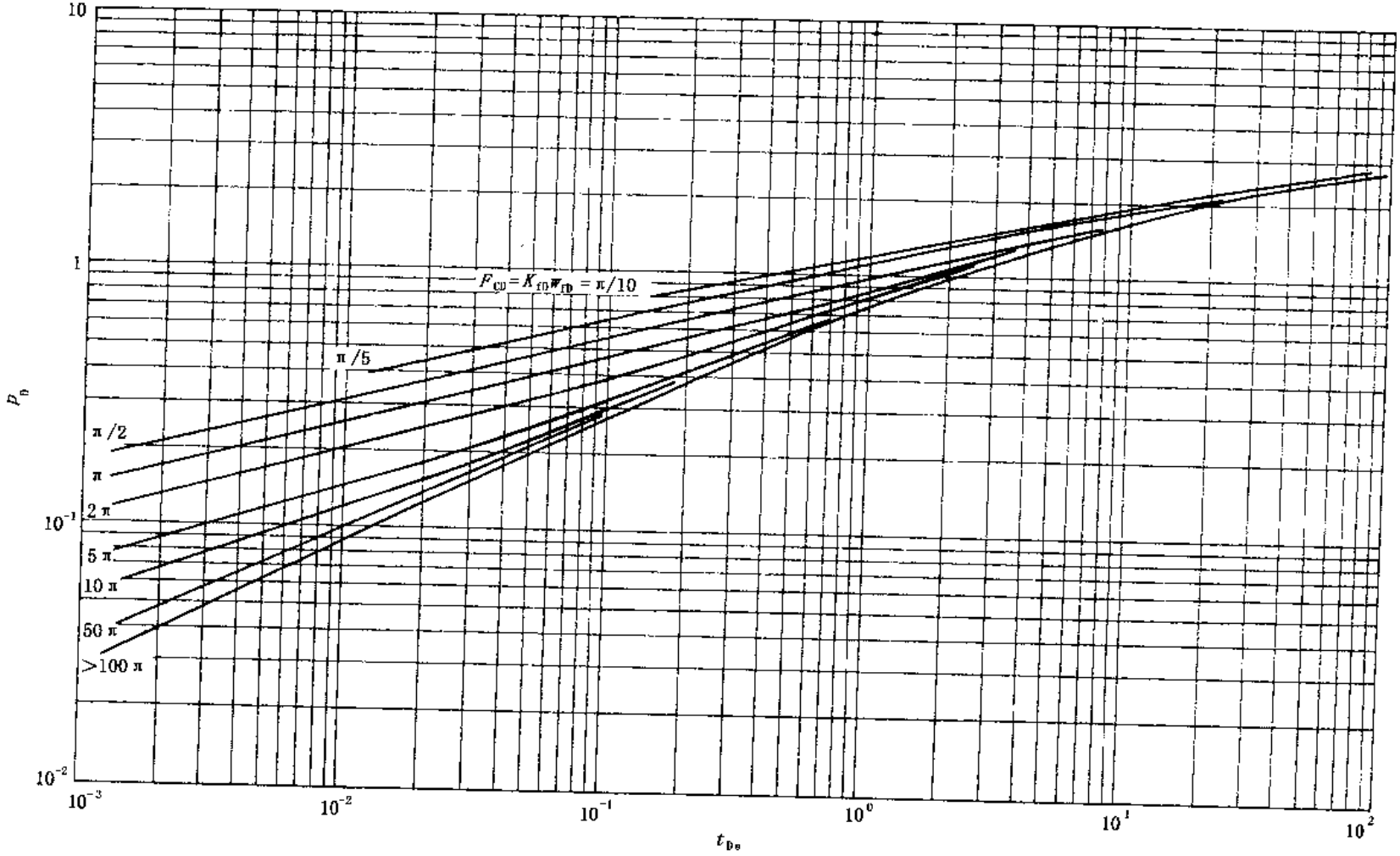


图 5－16　均质油藏中被一条有限导流性垂直裂缝切割的井的解释图版

三、压力图版拟合分析

有限导流性垂直裂缝模型的解释图版如图 5－16 所示（其彩色图版未翻印出版），其纵坐标为无量纲压力 p_D［定义同均质油藏模型，见式（1－29）］，横坐标为无量纲时间 t_D［定义见式（1－34）］：

$$t_{De}=\frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_{we}^2}\cdot t$$

每一条曲线对应于一个无量纲裂缝传导系数 F_{CD}值：

$$F_{CD}=K_{fD}w_{fD}$$

当 $F_{CD}>100\pi$ 时，就是无限导流性裂缝模型的样板曲线（见图 5－16 中最下方一条曲线）。解释图版拟合方法亦与前面所述一样。由压力拟合得［式（3－1）、（3－3）］

$$\frac{Kh}{\mu}=1.842\times10^{-3}qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$K=1.842\times10^{-3}\frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

由时间拟合得［参看式（1－34）］

$$r_{we}=1.8974\sqrt{\frac{K}{\phi C_t\mu\left(\frac{t_{De}}{t}\right)_{拟合}}}$$

从而可算出［参看式（1－42）］

$$S=\ln\frac{r_w}{r_{we}}$$

由曲线拟合可得 $F_{CD}=K_{fD}w_{fD}=\frac{K_f\omega}{Kx_f}$的数值，然后由图 5－17 查出$\frac{r_{we}}{x_f}$值，再求出 x_f：

$$x_f=\frac{r_{we}}{\left(\frac{r_{we}}{x_f}\right)_{图5-17}}$$

当然，与上述一样，由双对数曲线分析与由特种识别曲线分析所得的结果必须相符；如果不符，则解释过程中有错误，必须检查修正。

值得注意的是：油藏的某些非均质性也可能使得压差与时间的双对数曲线呈斜率为$\frac{1}{4}$的直线。因此，只有确实进行过人工压裂的井，试井解释时才考虑使用压裂井的解释模型。另外，在地面关井情形，在线性流动之前，有可能出现井筒储集阶段，此时双对数曲线首先成 45°线，然后才过渡到斜率为$\frac{1}{4}$的直线。井筒储集效应严重时甚至可以掩盖线性流动的特性。

四、压力导数图版拟合分析

无限大均质油藏中一口具井筒储集效应的有限导流垂直裂缝井，在早期出现的双线性流动阶段有

$$\Delta p=\frac{6.216\times10^{-3}q\mu B}{h\sqrt{K_f\omega}\sqrt[4]{\phi\mu C_t K}}\sqrt[4]{t}$$

$$p_D=\frac{2.45}{\sqrt{K_{fD}w_{fd}}}\sqrt[4]{t_{Dxf}}$$

故有

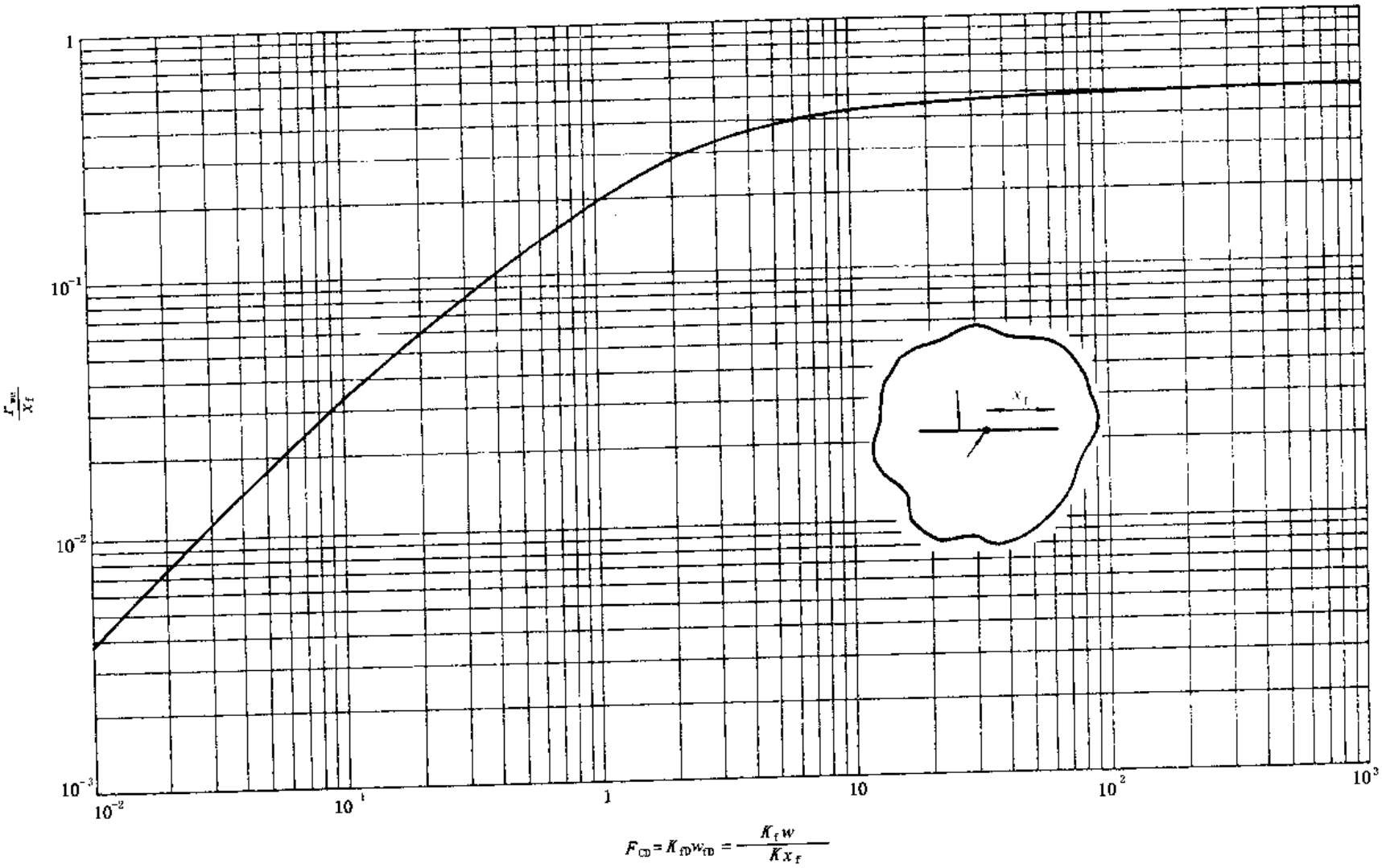


图 5－17　$\frac{r_{we}}{x_f}$与 F_{CD}关系曲线图

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{Dxf}}} \cdot t_{\mathrm{Dxf}} = \frac{0.6125}{\sqrt{K_{\mathrm{fD}} w_{\mathrm{fD}}}} \cdot \sqrt[4]{t_{\mathrm{Dxf}}}$$

$$\lg\left(\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{Dxf}}} \cdot t_{\mathrm{Dxf}}\right) = \frac{1}{4}\lg t_{\mathrm{Dxf}} + \lg \frac{0.6125}{\sqrt{K_{\mathrm{fD}} w_{\mathrm{fD}}}}$$

$$t\frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}t} = \frac{1.554 \times 10^{-3} q\mu B}{h\sqrt{K_{\mathrm{f}} w}\sqrt[4]{\phi\mu C_{\mathrm{t}} K}}\sqrt[4]{t}$$

$$\lg\left(t \cdot \frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}t}\right) = \frac{1}{4}\lg t + \lg \frac{1.554 \times 10^{-3} q\mu B}{h\sqrt{K_{\mathrm{f}} w}\sqrt[4]{\phi\mu C_{\mathrm{t}} K}}$$

而

$$\lg\Delta p = \frac{1}{4}\lg t + \lg \frac{6.216 \times 10^{-3} q\mu B}{h\sqrt{K_{\mathrm{f}} w}\sqrt[4]{\phi\mu C_{\mathrm{t}} K}}$$

由此可见，在双对数坐标系中，压差曲线（Δp 与 t 曲线）和压力导数曲线（$\frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}t} \cdot t$ 与 t 曲线）均呈斜率为 1/4 的、互相平行的直线，它们之间在纵坐标方向的距离为 $\lg 4 = 0.603$ 对数周期［参看式（3－36）、图 3－53 及表 3－10］。

在双线性流动阶段之后，若出现地层线性流动，则与无限导流垂直裂缝井的线性流动情形一样，压力导数曲线呈斜率为 0.5 的直线，且与压差曲线平行，彼此相距 $\lg 2 = 0.301$ 对数周期，此后过渡到拟径向流动阶段；若此流动阶段被掩盖，则流动直接过渡到拟径向流动阶段，压力导数曲线呈水平直线（与图版中的 $\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{Dxf}}} \cdot t_{\mathrm{Dxf}} = 0.5$ 相拟合）。

例 5－2❶ 克拉玛依油田百68井压裂后进行试油，测得了压力恢复曲线。利用变流量方法解释，压力和压力导数的双对数曲线见图5－18，叠加函数曲线见图5－19。图5－20是用有限导流性裂缝井模型解释图版进行拟合的结果。在井筒储集阶段之后，压力和压力导数曲线均呈斜率为$\frac{1}{4}$的直线，两者之间在纵坐标方向的距离为 0.6 对数周期，完全符合双线性流动的特征。解释结果列于表 5－2。由无量纲叠加函数检验曲线（图 5－21）和压力史拟合检验图（图 5－22）看，解释是正确的。

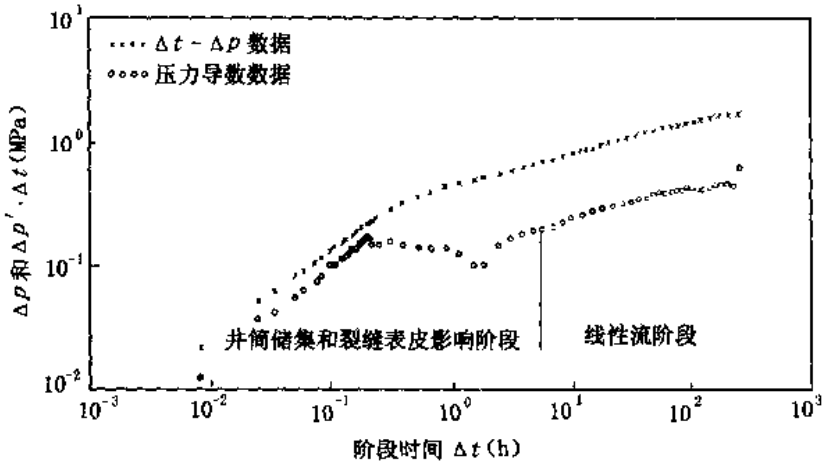


图 5－18　百 68 井压力及导数双对数图（例 5－2）

❶ 本例引自文献［4］，解释人：蒋沛然、张家富。

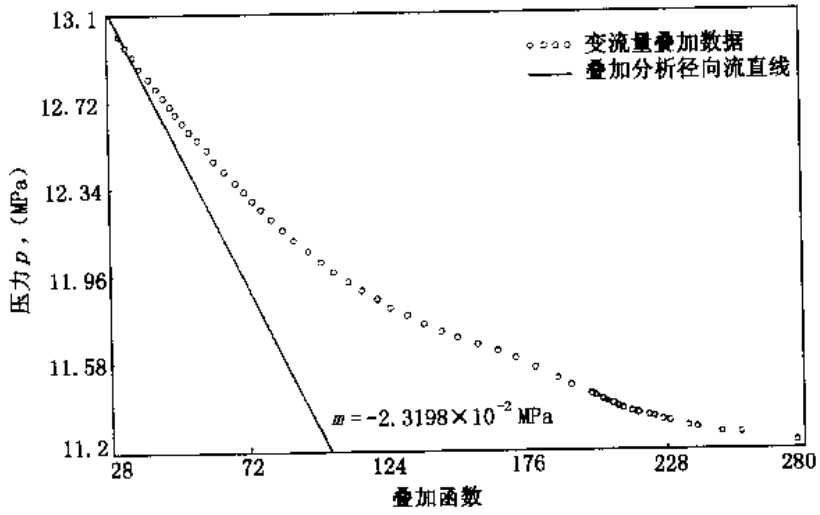


图 5－19　百 68 井压力恢复叠加函数图（例 5－2）

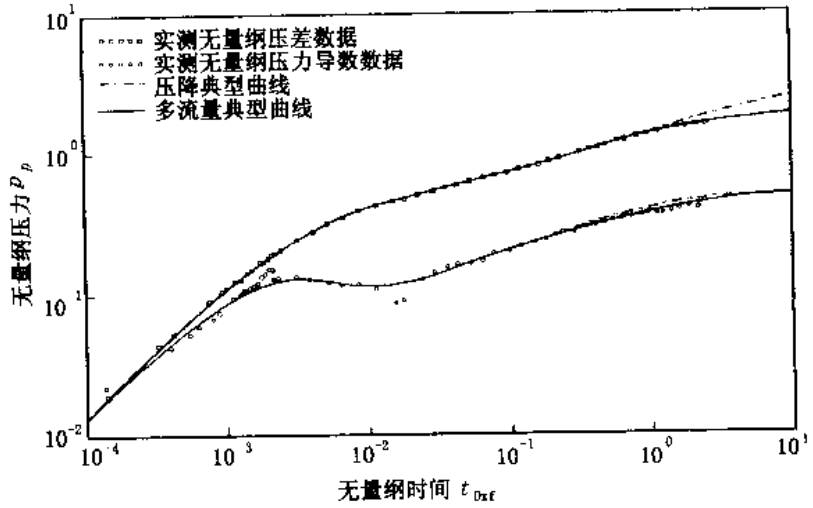


图 5－20　百 68 井无量纲压力及导数拟合图（例 5－2）

表 5－2　百 68 井解释结果（例 5－2）

储集类型	解释方法	渗透率 K $(10^{-3}\mu m^2)$	流动系数 $\frac{Kh}{\mu}$ $\left(\frac{10^{-3}\mu m^2\cdot m}{mPa\cdot s}\right)$	流度 $\frac{K}{\mu}$ $\left(\frac{10^{-3}\mu m^2}{mPa\cdot s}\right)$	表皮系数 S	井筒储集系数 C $\left(\frac{m^3}{MPa}\right)$	裂缝半长 x_f (m)	裂缝导流能力 F_{CD}
均质有限导流垂直裂缝	双对数图版法	9.8	18.68	4.15	0.28	0.30	93.34	500
	迭加法	9.8	18.68	4.15	0.28			

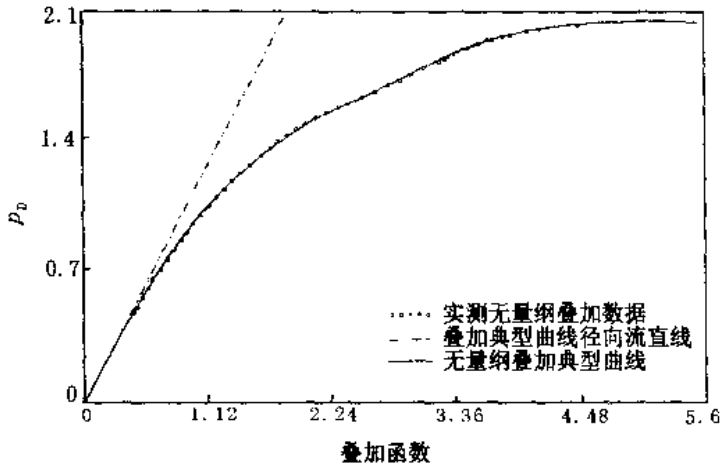


图 5－21　百 68 井无量纲叠加函数拟合检验图（例 5－2）

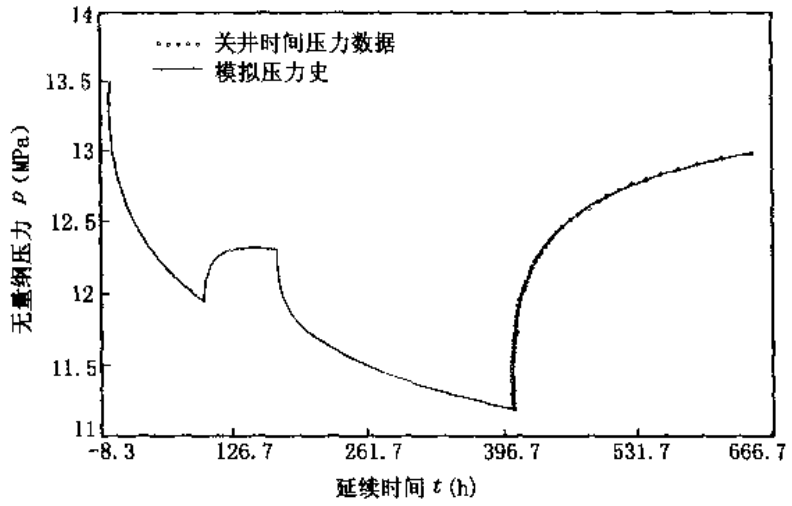


图 5－22　百 68 井压力历史拟合检验图（例 5－2）

第六章　双重渗透介质油藏的试井解释

第一节　双重渗透介质油藏的有关概念

和双重孔隙介质油藏一样，双重渗透介质油藏也是由渗透率相差相当大的两种介质构成；和双重孔隙介质油藏不同的是：这两种介质中的流体都可以直流流入井筒，如图 6－1 所示。符合这一模型的典型油藏是渗透率相差悬殊的双层油藏。这里就以这种油藏为对象，说明有关概念和试井解释方法。

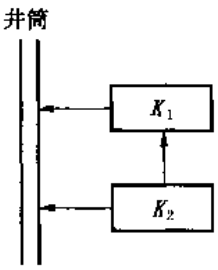


图 6－1　双重渗透介质模型

假设油藏包含两个均质、等厚、渗透率分别为 K_1 和 K_2（$K_1 > K_2$）、厚度分别为 h_1 和 h_2 的油层，这两个油层均向井筒供油，同时由低渗透层（$K = K_2$）向高渗透层（$K = K_1$）发生拟稳定窜流；并假设井具井筒储集效应和表皮效应，且两层的表皮系数 S 相同。

定义无量纲次压力

$$p_D = \frac{K_1h_1 + K_2h_2}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \cdot \Delta p \tag{6-1}$$

无量纲时间

$$t_D = \frac{3.6(K_1h_1 + K_2h_2)t}{[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2]\mu r_w^2} \tag{6-2}$$

无量纲井筒储集系数

$$C_{D1} = \frac{C}{2\pi(\phi C_t h)_1 r_w^2} \tag{6-3}$$

$$C_{D2} = \frac{C}{2\pi(\phi C_t h)_2 r_w^2} \tag{6-4}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2] r_w^2} \tag{6-5}$$

储能比

$$\omega = \frac{(\phi C_t h)_1}{(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2} \tag{6-6}$$

窜流系数

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{K_2h_2}{K_1h_1 + K_2h_2} \tag{6-7}$$

再引进一个新的参数——地层系数比 κ：

$$\kappa = \frac{K_1h_1}{K_1h_1 + K_2h_2} \tag{6-8}$$

地层系数比 κ 表征着两层之间差异的大小。上列各式中的下标 1 表示高渗透层，2 表示低渗

透层，各符号的意义同前。

第二节　双对数曲线的特性和解释图版

在双重渗透介质情形，考虑的参数比双重孔隙介质情形又增加了一个，因此不再可能只用一张图版描述所有的内容。

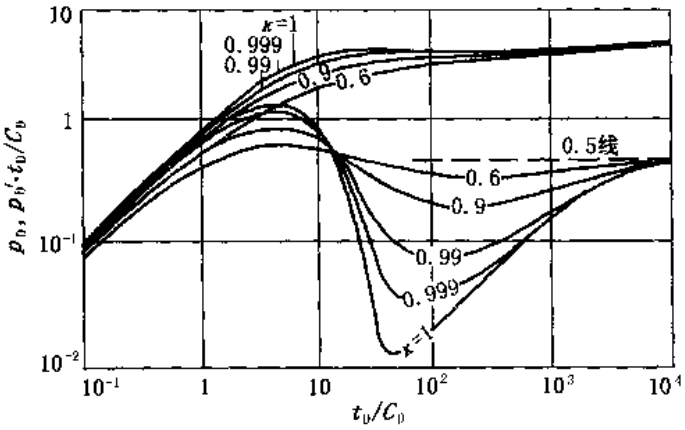


图 6－2　双重渗透介质油藏模型双对数曲线
($C_De^{2S}=1$，$\lambda e^{-2S}=4\times10^{-4}$，$\omega=10^{-3}$)

我们先来考察双对数曲线的特性。图 6－2 和图 6－3 是固定 $C_De^{2S}=1$、$\lambda e^{-2S}=4\times10^{-4}$，分别取 $\omega=10^{-3}$（图 6－2）和 $\omega=10^{-1}$（图 6－3）情形的一组复合样板曲线，在其上方的是 p_D—$\frac{t_D}{C_D}$的双对数曲线，在其下方的是 $p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}$—$\frac{t_D}{C_D}$的双对数曲线，每一条曲线对应一个 κ 值。在早期，曲线呈斜率为 1 的直线（45°线），这是纯井筒储集阶段；导数曲线的“凹子”对应于层间窜流阶段；最后的 0.5 水平线则对应于双层系统的径向流动阶段。可以看到，对于不同的 κ 值，“凹子”具有不同的深浅程度：κ 越小，“凹子”越浅而越接近 0.5 水平线，若 $\kappa=0.5$，则 $K_1h_1=K_2h_2$ 成为均质油藏模型，“凹子”不复存在而呈 0.5 水平线；κ 越大，则“凹子”越深，若 $\kappa=1$，则 $K_2\approx0$，接近于双重孔隙介质模型。这就是说：双重渗透介质油藏的样板曲线位于均质油藏样板曲线与双重孔隙介质油藏样板曲线之间。

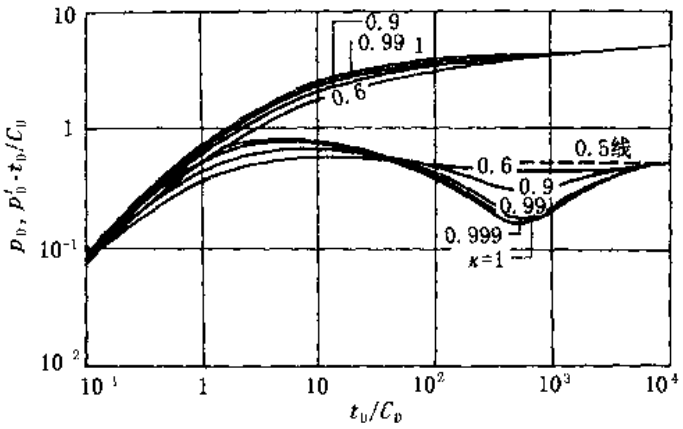


图 6－3　双重渗透介质油藏模型双对数曲线
($C_De^{2S}=1$，$\lambda e^{-2S}=4\times10^{-4}$，$\omega=10^{-1}$)

图 6－4 是固定 $C_De^{2S}=1$，$\lambda e^{-2S}=4\times10^{-4}$，$\kappa=0.99$ 情形的一组复合样板曲线，由此可以考察 ω 的变化对曲线的影响：ω 越小，导数曲线的“凹子”就越深。

图 6－5 和图 6－6 是刘尉宁、陈钦雷等在 Bourdet 提出的数学模型的基础上研制成的双重渗透介质油藏中具井筒储集效应和表皮效应的井的复合解释图版，分别取定 $\kappa=0.99$（图 6－5）和 $\kappa=0.85$（图 6－6）。可以看到，这图版和双重孔隙介质模型的图版十分相似，其

中各参数也与之相同。这就是说：上方的 p_D—$\frac{t_D}{C_D}$解释图版由两套图版构成，其中实线是均质油藏的解释图版，每一条样板曲线对应一个C_De^{2S}值；虚线是层间拟稳定窜流的解释图版，每一条样板曲线对应一个 λe^{-2S}值。下方的 $p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}$—$\frac{t_D}{C_D}$解释图版（导数解释图版）亦由两部分组成，一部分（实线）是均质油藏的导数解释图版，每一条曲线对应一个C_De^{2S}值；一部分（由最

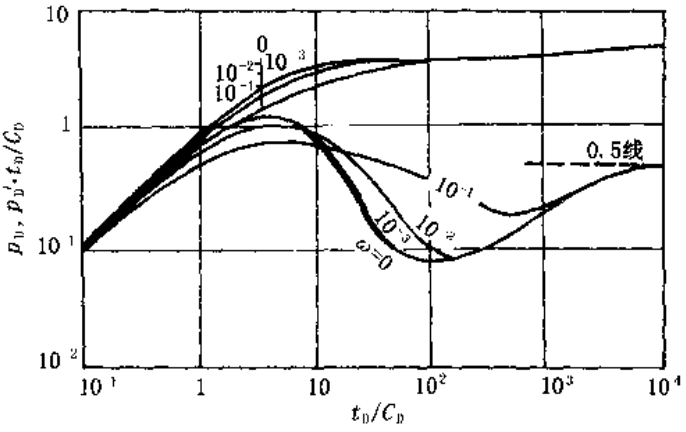


图 6－4　双重渗透介质油藏模型双对数曲线
（$C_De^{2S}=1$，$\lambda e^{-2S}=4\times10^{-4}$，$\kappa=0.99$）

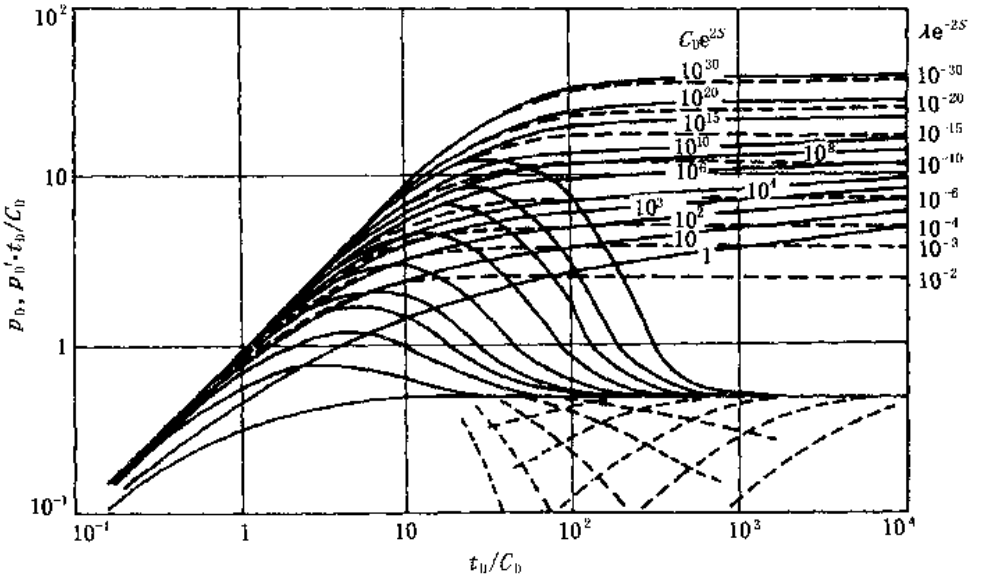


图 6－5　双重渗透介质油藏中具井筒储集和表皮效应的井的解释图版（$\kappa=0.99$）

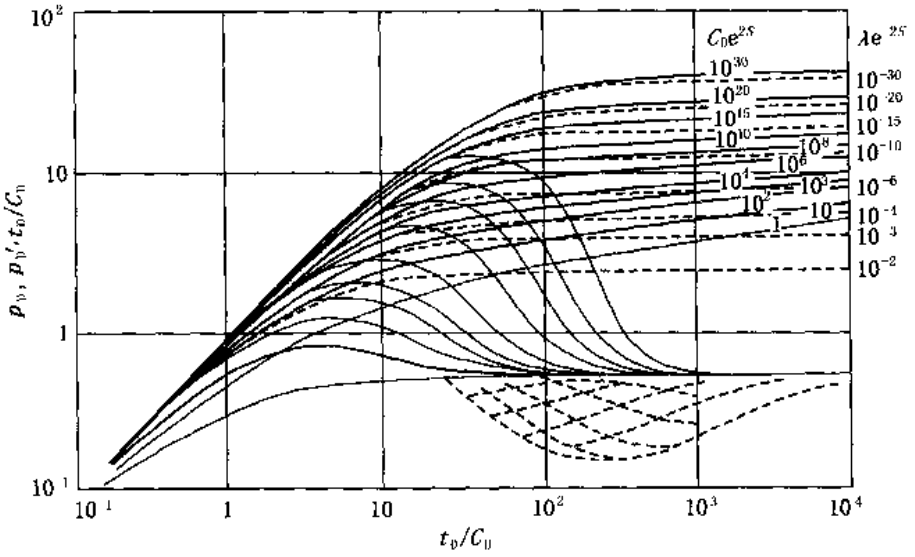


图 6－6　双重渗透介质油藏中具井筒储集和表皮效应的井的解释图版（$\kappa=0.85$）

下方两组虚线构成）是层间拟稳定窜流的导数解释图版，每一条早期窜流线对应一个$\frac{\lambda C_D}{\omega(1-\omega)}$值，每一条晚期窜流线对应一个$\frac{\lambda C_D}{1-\omega}$值。

双重渗透介质油藏另一种典型的试井曲线，在《中国油气井测试资料解释范例》（石油工业出版社，1994 年）一书第二章第四节中有详细的介绍和分析，请读者参阅。

第三节　解 释 方 法

如果测试井是在两层油藏中，而且这两层的渗透率相差悬殊，则应考虑使用双重渗透介质模型进行解释。

在多层（层数大于 2）油藏情形，如果这些油层可以分作渗透率明显不同的两组：高渗透层组和低渗透层组，而在高渗透层组中各层的渗透率差异却不很大，在低渗透层组中各层的渗透率差异也不很大，则也可使用双重渗透介质模型进行解释。

进行解释时，画出实测 Δp—t（或 Δp—Δt）和 $\Delta p' \cdot t - t$（或 $\Delta p' \cdot \frac{t_p+\Delta t}{t_p} \cdot \Delta t$—$\Delta t$）的双对数曲线，与解释图版相拟合。拟合方法与双重孔隙介质油藏情形相似：实测曲线的前一段与某一条均质油藏样板曲线［对应于某一 $[\kappa C_{D1} + (1-\kappa) C_{D2}] e^{2S}$ 值，记作 $(C_D e^{2S})_{早}$］相拟合，中间一段与某一条层间拟稳定窜流样板曲线（对应于某一 λe^{-2S} 值）相拟合，后一段又与另一条均质油藏样板曲线［对应于某一 $C_D e^{2S}$ 值，记作 $(C_D e^{2S})_{晚}$］相拟合。与层间拟稳定窜流样板曲线 λe^{-2S} 相拟合的那一段，也就是压力导数曲线形成“凹子”的那一段，分别与某一条早期窜流线$\frac{\lambda C_D}{\omega(1-\omega)}$和某一条晚期窜流线$\frac{\lambda C_D}{1-\omega}$相拟合。

获得最佳拟合后，读出各个拟合值：$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$、$\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}$ 或 $\left(\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{拟合}$、$[(C_D e^{2S})_{早}]_{拟合}$、$(\lambda e^{-2S})_{拟合}$ 和 $[(C_D e^{2S})_{晚}]_{拟合}$，由下列各式算出各项参数值（参看式(6-1)、(6-2) 和 (6-5)）：

$$\frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$\frac{K_1 h_1}{\mu} = \kappa \cdot \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{\mu}$$

$$\frac{K_2 h_2}{\mu} = (1-\kappa) \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{\mu}$$

$$K_i h_i = \left(\frac{K_i h_i}{\mu}\right) \cdot \mu \qquad i = 1,2$$

$$K_i = \frac{(K_i h_i)}{h_i} \qquad i = 1,2$$

$$C = \frac{7.2\pi(K_1 h_1 + K_2 h_2)}{\mu} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2] r_w^2}$$

$$S = \frac{1}{2}\ln\frac{[(C_D e^{2S})_{晚}]_{拟合}}{C_D}$$

$$\lambda = \frac{(\lambda e^{-2S})_{拟合}[(C_D e^{2S})_{晚}]_{拟合}}{C_D}$$

$$\omega = \frac{1}{2}[1-(1-2\kappa)n-\sqrt{1-2n+(1-2\kappa)^2 n^2}] \tag{6-9}$$

其中

$$n = \frac{[(C_D e^{2S})_{晚}]_{拟合}}{[(C_D e^{2S})_{早}]_{拟合}}$$

这是因为［参看式（6-6）］

$$(\phi C_t h)_1 = \omega[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2]$$

$$(\phi C_t h)_2 = (1-\omega)[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2]$$

$$n = \frac{(C_D e^{2S})_{晚}}{(C_D e^{2S})_{早}} = \frac{C_D e^{2S}}{\kappa C_{D1} e^{2S} + (1-\kappa)C_{D2} e^{2S}} = \frac{C_D}{\kappa C_{D1} + (1-\kappa)C_{D2}}$$

$$= \frac{\dfrac{1}{(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2}}{\dfrac{\kappa}{(\phi C_t h)_1} + \dfrac{1-\kappa}{(\phi C_t h)_2}} = \frac{\dfrac{1}{(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2}}{\dfrac{\kappa}{\omega[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2]} + \dfrac{1-\kappa}{(1-\omega)[(\phi C_t h)_1 + (\phi C_t h)_2]}}$$

$$= \frac{\omega(1-\omega)}{\kappa(1-\omega)+\omega(1-\kappa)}$$

由此得关于 ω 的一元二次方程：

$$\omega^2 - [1-(1-2\kappa)n]\omega + \kappa n = 0$$

解之即得式（6-9）。

在进行拟合分析之前，要对 κ 值有个大致的估计，以便选用适合的解释图版。这可以通过半对数曲线分析而得到。

两层油藏中油井的压力与时间的半对数曲线如图 6-7 所示。其前一段呈斜率为 m_1 的直线段，称为早期直线段；中间段变得比较平缓，这是对应于层间拟稳定窜流阶段的过渡段；然后在后一段又呈斜率为 m_2 的直线段，且 $m_1 \geqslant m_2$（$m_1 = m_2$ 即为双重孔隙介质模型）。

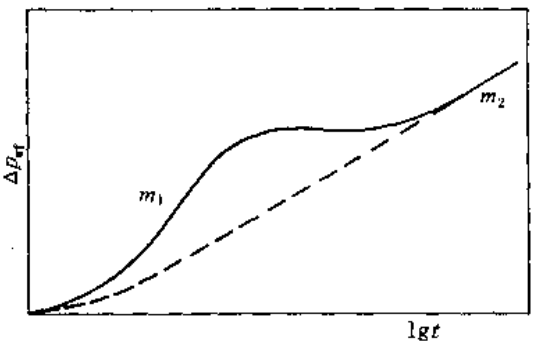


图 6-7　两层油藏中油井的半对数曲线

由 $\frac{m_1}{m_2}$ 的数值可以估计 κ 的大小：

$$当\frac{m_1}{m_2} \approx 1 时，\kappa \geqslant 0.999$$

$$当\frac{m_1}{m_2} \approx 1.25 时，0.95 \leqslant \kappa < 0.999$$

$$当\frac{m_1}{m_2} \approx 1.25 \sim 1.28 时，0.8 \leqslant \kappa < 0.95$$

双重渗透介质油藏模型的解释图版虽已研制成功，但至今尚未出版供实际解释使用的工

作用图；但有不少试井解释软件已包含了这一模型，可对双渗介质油藏的测试资料做出解释。在 κ 很大（如 $\kappa>0.9$）的情形，可以借用双重孔隙介质油藏模型的解释图版进行解释，得出 $K_1h_1+K_2h_2$ 的近似值，然后再利用别的资料（如电测解释资料）进而求出 K_1 和 K_2。借用双重孔隙介质油藏模型的图版进行解释得不到正确的 ω 和 λ 值。

最后还应指出：如果两层油藏中两层的渗透率（或导压系数）差别不大，如在同一个数量级内，就不需使用双重渗透介质模型进行解释，而用均质油藏模型就行了。事实上，在这一情形，双重渗透介质模型的压力变化可能显示不出任何非均质特征。

例 6－1 我国南海西部海域某砂层油藏一口探井采用双开双关方法试井，初流动 5min（产量未测量），初关井 55min，终流动 23h，终关井 10h 23min。终流动产量数据见表 6－1，终关井压力恢复数据见表 6－2。

表 6－1 某探井终流动产量数据表（例 6－1）

油嘴（mm）	历时（h）	阶段产量（m^3）	折算产量（m^3/d）
6.35	0.5	0.0159	7.632
12.7	9.5	3.379	8.427
（抽汲）	3.25	（未计量）	（未计量）
25.4	5.583	6.73	28.94
38.1	4.167	7.08	39.37

表 6－2 某探井终恢复数据表（例 6－1）

Δt（h）	p_{ws}（MPa）	Δt（h）	p_{ws}（MPa）	Δt（h）	p_{ws}（MPa）
0.0000	10.020	0.9167	12.444	4.75	12.566
0.01667	10.059	1.000	12.476	5.00	12.564
0.03333	10.161	1.0833	12.502	5.25	12.566
0.05000	10.277	1.167	12.517	5.50	12.564
0.06667	10.382	1.250	12.527	5.75	12.566
0.08333	10.490	1.333	12.535	6.00	12.569
0.1000	10.586	1.417	12.542	6.25	12.567
0.1167	10.683	1.500	12.543	6.50	12.568
0.1333	10.775	1.750	12.551	6.75	12.570
0.1500	10.860	2.000	12.552	7.00	12.570
0.1667	10.944	2.250	12.559	7.25	12.570
0.2500	11.309	2.50	12.556	7.50	12.571
0.3333	11.563	3.00	12.559	8.00	12.571
0.4167	11.773	3.25	12.560	8.50	12.572
0.5000	11.951	3.50	12.561	9.00	12.576
0.5833	12.104	3.75	12.568	9.50	12.578
0.6667	12.227	4.00	12.563	10.00	12.579
0.7500	12.321	4.25	12.564	10.38	12.580
0.8333	12.392	4.50	12.565		

对终恢复阶段的资料进行解释。恢复压力与变产量的时间叠加函数的关系曲线见图 6－8。最初由此图做出“反映径向流动的直线段已经出现”的判断，并由拐弯变平后的“直线段”计算参数得到地层的有效渗透率为 $K=15.68\mu m^2$。但是，后来根据压力恢复的导数曲线（图 6－9）呈现明显的双重介质特性判定：图 6－8 中出现“直线段”是假象，它对应于介质间或层间的流动。原来这口井射开 2 层，据测井解释结果，这两层的渗透率相差甚大，高渗透层的渗透率比低渗透层高 2.5 倍，数据见表 6－3。于是决定借用试井解释软件中的双重孔隙介质模型进行解释。

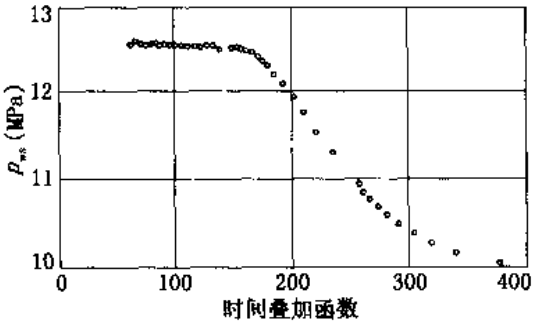


图 6－8　恢复压力与变产量的时间叠加函数关系曲线（例 6－1）

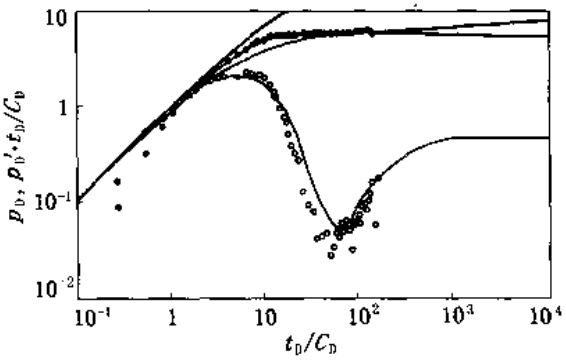


图 6－9　复合图版拟合结果（例 6－1）

表 6－3　测试井段数据表（例 6－1）

层　号	井　段 (m)	厚　度 (m)	渗透率（电测解释） (μm^2)
1	1279.4～1280.1	0.7	1.016
2	1277.0～1278.7	1.7	0.295

由压力拟合求得两层地层系数之和为

$$K_1h_1+K_2h_2=1.9912\mu m^2\cdot m$$

两层的平均渗透率为

$$\overline{K}=0.8297\mu m^2$$

表皮系数为

$$S=-1.133$$

无量纲赫诺曲线（图 6－10）和压力史拟合曲线（图 6－11）表明：解释结果基本正确。

因为这是借用双重孔隙介质模型进行解释，所得到的 ω 和 λ 值并不能代表本井所在油藏的实际情况。

按照测井解释所得渗透率的比例，可由两层地层系数之和计算两层的渗透率，即解联立方程：

$$\begin{cases}K_1h_1+K_2h_2=(K_1h_1+K_2h_2)_{\text{试井解释(双孔模型)}}\\ \dfrac{K_1}{K_2}=\left(\dfrac{K_1}{K_2}\right)_{\text{测井解释}}\end{cases}$$

将实际数据代入得

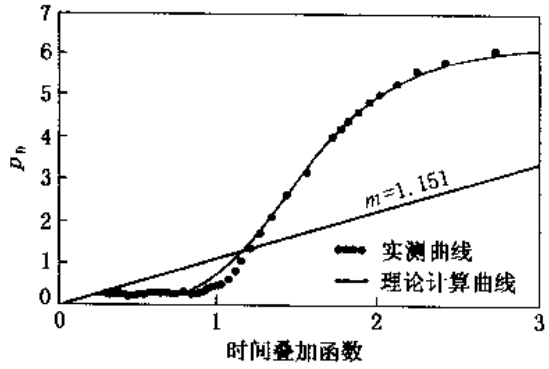


图 6－10　无量纲赫诺曲线拟合图（例 6－1）

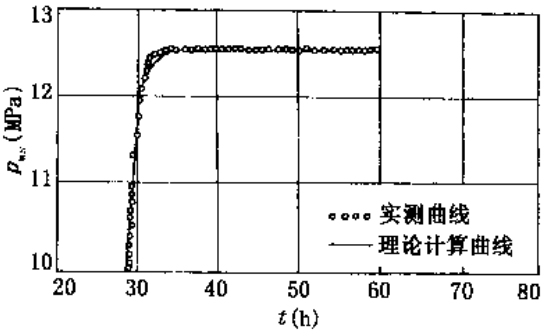


图 6－11　压力史拟合图（例 6－1）

$$\begin{cases} 0.7K_1 + 1.7K_2 = 1.9912 \\ \dfrac{K_1}{K_2} = \dfrac{1.016}{0.295} \end{cases}$$

解得

$$K_1 = 1.668\mu m^2$$

$$K_2 = 0.4844\mu m^2$$

第七章　水平井试井解释

近十几年来，水平井技术发展很快，已经成为提高单井产量（特别是在薄油层情形）、延迟底水或气顶气推进，改善开发效果和提高采收率的重要途径。水平井中的液体流动要比直井复杂，因而其压差及其导数曲线变得更复杂，试井解释变得更为困难。

第一节　水平井的流动阶段和压力变化特征

假设在水平、等厚、顶部和底部均为不渗透隔层所密封的油层中有一口与顶面和底面平行的水平井。油层的厚度为 h(m)，垂直渗透率为 K_V(μm^2)。水平渗透率为 K_H(μm^2)；水平井段的长度为 L（m），水平段井筒符合无限导流特性。不考虑重力影响。

如图 7－1 所示，以水平井轴为 x 轴，水平井轴所在平面为 x—y 平面，水平井的垂直井轴为 z 轴。

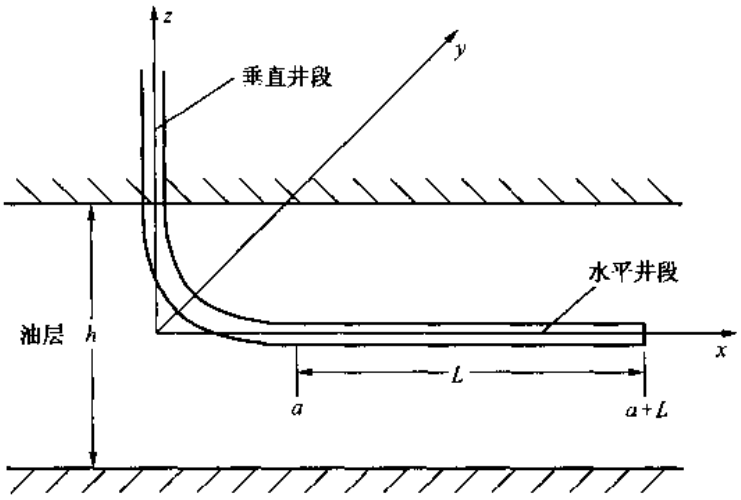


图 7－1　水平井示意图

水平井的压降和压力恢复测试和直井一样，首先经历井筒储集阶段；此阶段的压差及其导数曲线均呈斜率为 1 的直线（纯井筒储集阶段），接着形成一个小山峰般的图形（图 7－3、7－5 和图 7－7 中 A 段）。然后，一般水平井将出现如下三个流动阶段：

（1）初始拟径向流动（又称“早期拟径向流动”或“垂直径向流动”）阶段（The Early－Time Pseudoradial Flow Regime）；

（2）（中期）线性流动阶段（The Intermediate－Time Linear Flow Regime）；

（3）（后期）拟径向流动阶段（The Late－Time Pseudoradial Flow Regime）。

无量纲压力，在初始拟径向流动阶段，定义作 p_{DL}：

$$p_{DL}=\frac{\sqrt{K_H K_V}L\Delta p}{1.842\times10^{-3}q\mu B} \tag{7-1}$$

而在（后期）拟径向流动阶段，则定义作 p_{Dh}：

$$p_{Dh} = \frac{K_H h \Delta p}{1.842 \times 10^{-3} q_t \mu B} \tag{7-1'}$$

无量纲时间 t_D 定义作

$$t_D = \frac{3.6 K_v t}{\phi \mu C_t h^2} \tag{7-2}$$

现在对此三个流动阶段作个简要说明。

一、初始拟径向流动（垂直径向流动）阶段

井筒储集结束后，油层中的主要流动，是在水平井段的垂直截面上（即 $x = C$ 平面上，$a < C < a + L$ 为水平井段中的任意常数）的径向流动（见图 7-2）。这一阶段称作“初始拟径向流动阶段”，或“早期拟径向流动阶段”或“垂直径向流动阶段”。这一阶段的压差的导数曲线呈水平直线段，如图 7-3B 段。

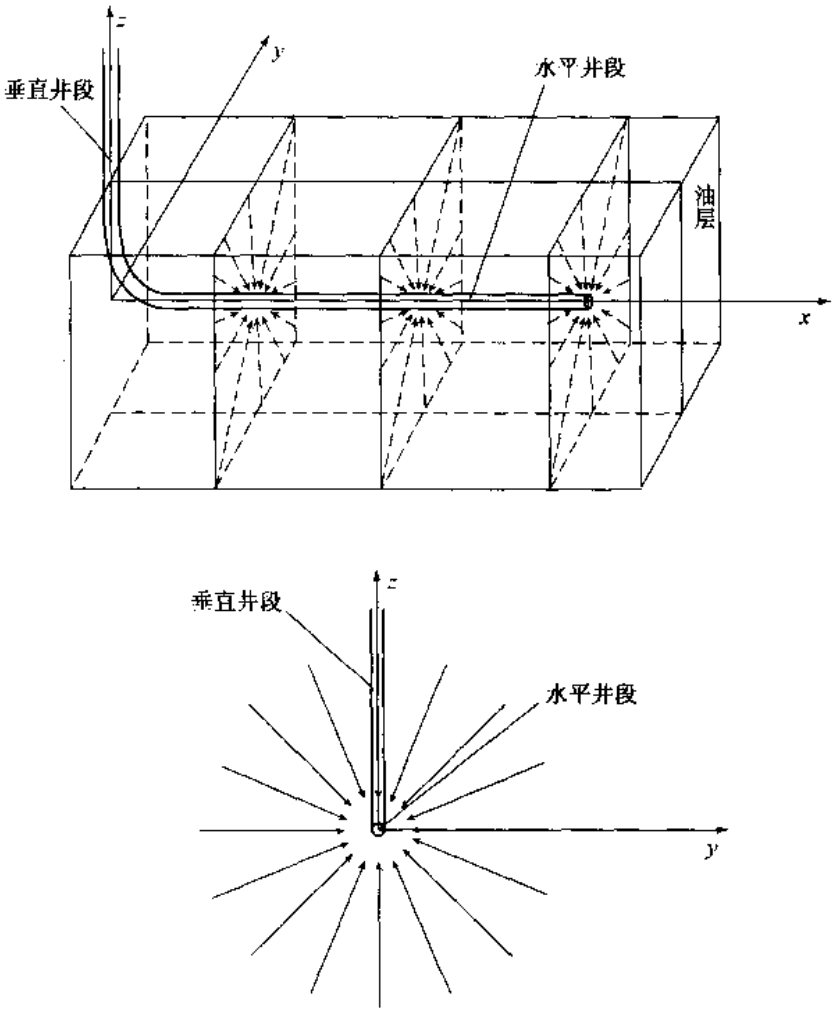


图 7-2　水平井初始拟径向流动示意图

如果水平井离顶面（或底面）很近，则初始拟径向流动只经历很短时间。在这一阶段结束以后而底面（或顶面）开始影响井的压力变化之前，还有可能产生一个类似于直井情形不渗透边界影响的流动阶段，称作“第二初始拟径向流动阶段”，压差的导数曲线将呈另一个水平直线段，形成一个小“台阶”，使得图形和分析变得更加复杂。

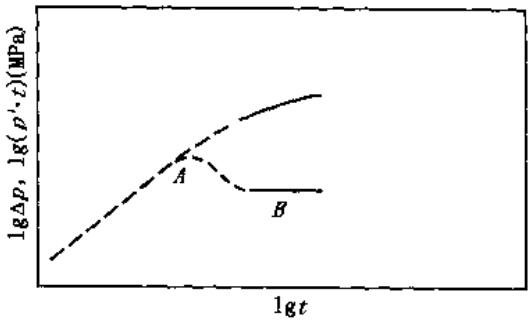


图 7-3　水平井初始拟径向流动阶段的双对数曲线

水平井情形的这一阶段有时为严重的井筒储集所掩盖。为了测得较好的资料，可以实施井底关井，并尽可能同时在井底测量压力和产量。

二、线性流动阶段

在产层的顶面和底面都影响井的压力变化之后，流动即进入线性流动阶段。此时，在水平井段的各个垂直截面（即 $x = C$ 平面上，$a < C < a + L$ 为水平井段中的任意常数），流动是水平的，如图 7-4。如前面所述，这一阶段

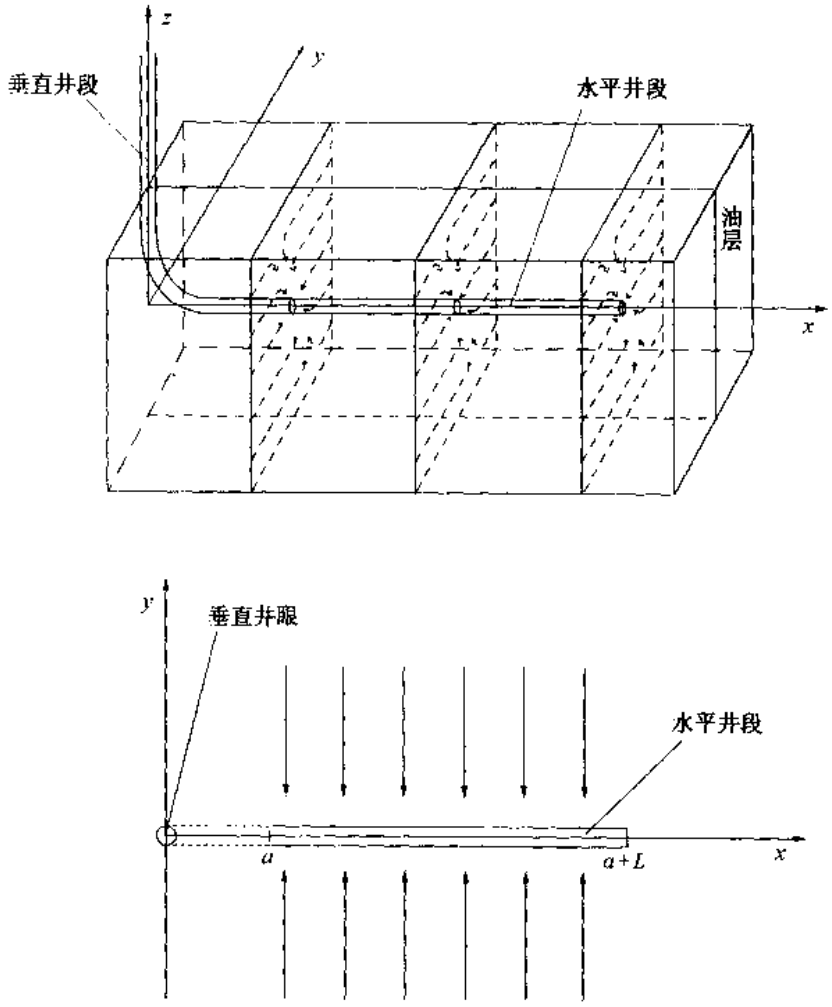


图 7-4　水平井线性流动示意图

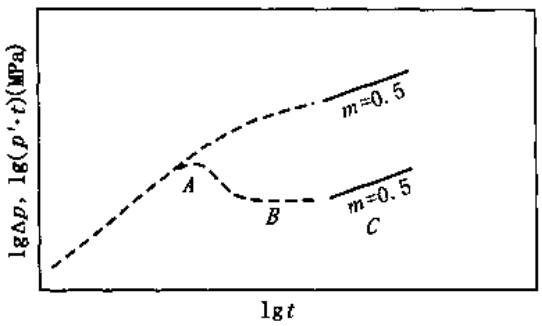


图 7－5　水平井线性流动阶段的双对数曲线

的特征是：压差及其导数曲线均呈斜率为 0.5 的直线，如图 7－5C 段。

三、（后期）拟径向流动阶段

当流动的影响扩大到水平井段的范围之外，进入到油层的广大范围之后，相对于广阔的油层，水平井段几乎只不过是一个“点”。在油层的各个水平面上（即 $z=C$ 平面上，C 为在油层范围内的任意常数），油从四面八方流向水平井“点”，“压降漏斗”沿着油层的水平面（$z=C$ 平面，C 为油层范围内的任意常数）近似于径向地不断向外扩大，类似于直井的径向流动，如图 7－6。这一阶段称为“拟径向流动阶段”或“后期拟径向流动阶段”。

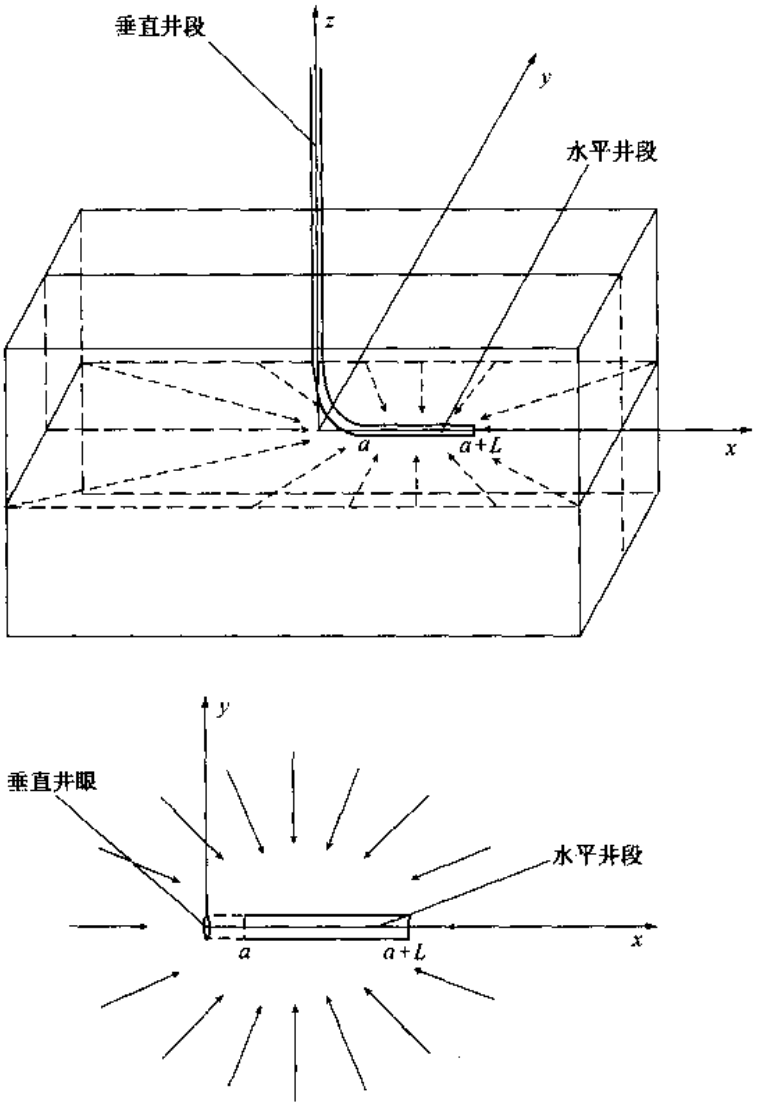


图 7－6　水平井拟径向流动示意图

这一阶段的压差的导数曲线又呈水平直线段，与初始拟径向流动阶段的水平直线段构成了一个“台阶”，如图 7－7 中的 D 段。

水平井的半对数曲线，即压降情形的 Δp_{wf}—lg$t$ 曲线或 p_{wf}—lg$t$ 曲线，和压力恢复情形的 Δp_{ws}—lgΔt 曲线或 p_{ws}—lgΔt 曲线，将在下一节第二部分“半对数曲线分析”中讨论。

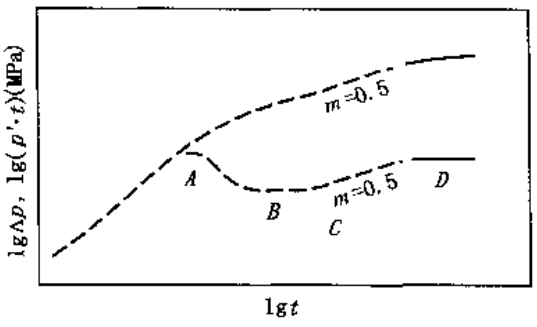


图 7－7　水平井拟径向流动阶段的双对数曲线

第二节　水平井试井资料的解释

与直井情形一样，可以进行双对数曲线分析（即压差曲线及其导数曲线的拟合分析）和半对数曲线分析；必要时还可进行重整压力分析。

一、双对数曲线分析

进行双对数曲线分析，首先是为的确定流动阶段。与此同时，也可以计算产层的水平渗透率和垂直渗透率的几何平均值 $\sqrt{K_H K_V}$，及其水平渗透率 K_H 和垂直渗透率 K_V 等参数；但计算参数主要还是要靠半对数曲线分析（特种识别曲线分析）。

在进行双对数曲线分析时，拟径向流动阶段的水平直线段，如同直井情形的径向流动阶段一样，拟合解释图版（样板曲线）中的水平直线段

$$p'_D \cdot t_D = 0.5$$

即所谓 0.5 线。因此，让初始拟径向流动水平段拟合 0.5 线，由所得压力拟合值和时间拟合值便可以分别算得

$$\sqrt{K_V K_H} = \frac{1.842\times10^{-3} q\mu B}{L}\left(\frac{p'_D \cdot t_D/C_D}{\Delta p \cdot t}\right)_{拟合} \tag{7-3}$$

$$K_V = \frac{\phi\mu C_t h^2}{3.6}\left(\frac{t_D}{t}\right)_{拟合} \tag{7-4}$$

由它们又可算出

$$K_H = \frac{(\sqrt{K_V K_H})^2}{K_V} \tag{7-5}$$

再让（后期）拟径向流动水平段拟合 0.5 线，由所得压力拟合值可以算得

$$K_H = \frac{1.842\times10^{-3} q\mu B}{h}\left(\frac{p'_D \cdot t_D/C_D}{\Delta p \cdot t}\right)_{拟合} \tag{7-6}$$

二、半对数曲线分析

按照上面所述，水平井的 Δp_{wf}—lg$t$（或 p_w—lg$t$）曲线的早期，应是反映初始拟径向流动（有时还包括第二初始拟径向流动）的直线段，后期则应是反映（后期）拟径向流动的直线段，其间还有一段线性流动的曲线，如图 7－8 所示。

由反映初始拟径向流动的直线段（设其斜率为 m_1）可以求出水平渗透率 K_H 和垂直渗透率 K_V 的几何平均值 $\sqrt{K_H K_V}$：

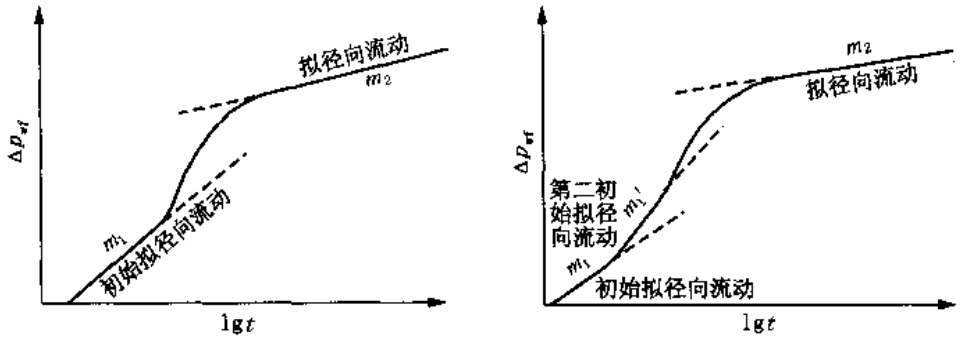


图 7－8　水平井的半对数曲线示意图

$$\sqrt{K_H K_V} = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{m_1 L} \tag{7-7}$$

而由反映（后期）拟径向流动的直线段（设其斜率为 m_2）可以求出水平渗透率 K_H 和总表皮系数 S：

$$K_H = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{m_2 h} \tag{7-8}$$

$$S = 1.151\left(\frac{\Delta p_{1h}}{m_2} - \lg\frac{K_H}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right) \tag{7-9}$$

再由式（7－7）和式（7－8）算出的 $\sqrt{K_H K_V}$ 和 K_H 可以算出 K_V：

$$K_V = \frac{(\sqrt{K_H K_V})^2}{K_H} \tag{7-10}$$

如果产层的各向异性不严重，则可取其水平渗透率 K_H 和垂直渗透率 K_V 的几何平均值 $\sqrt{K_H K_V}$ 作为产层的渗透率：

$$K = \sqrt{K_H K_V}$$

三、重整压力（Normalized Pressure）分析

为了更有效地判断和确定流动阶段，还可以使用重整压力分析方法。所谓重整压力，是指压差除以其导数的 2 倍：

$$\frac{\Delta p}{2(\mathrm{d}\Delta p/\mathrm{d}\ln t)} = \frac{\Delta p}{2t(\mathrm{d}\Delta p/\mathrm{d}t)}$$

在初始拟径向流动阶段，重整压力为（参看式（1－9））：

$$\frac{\Delta p}{2(\mathrm{d}\Delta p/\mathrm{d}\ln t)} = 1.151\left(\lg\frac{K_V t}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S\right) \tag{7-11}$$

由此可知：在此阶段，水平井重整压力的半对数曲线是斜率为 1.151 的直线段（图 7－9）。如果出现第二初始拟径向流动阶段，重整压力应为

$$\frac{\Delta p}{2(\mathrm{d}\Delta p/\mathrm{d}\ln t)} = 1.151\left(\lg\frac{K_V t}{\phi\mu C_t r_w d} + 0.9077 + 0.8686S\right) \tag{7-12}$$

半对数曲线也是斜率为 1.151 的直线段，即此时将出现两条彼此平行的直线段（图 7－10）。式（7－12）中的 d 是水平井段至不渗透顶面（或不渗透底面）的距离。

在（后期）拟径向流动阶段有

$$\frac{\mathrm{d}p_D}{\mathrm{d}\ln t_D} = \frac{1}{2}$$

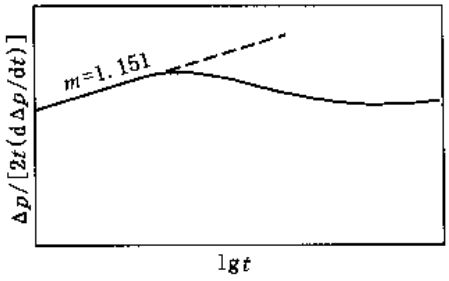


图 7－9　初始拟径向流动阶段重整压力的半对数曲线

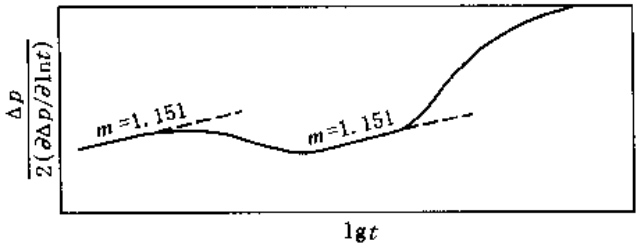


图 7－10　出现第二初始拟径向流动情形的重整压力半对数曲线早期段示意图

故无量纲重整压力

$$\frac{p_{\mathrm{D}}}{2(\mathrm{d}p_{\mathrm{D}}/\mathrm{d}\ln t_{\mathrm{D}})}=\frac{p_{\mathrm{D}}}{2\times\frac{1}{2}}=p_{\mathrm{D}}$$

即无量纲重整压力与无量纲压力相等；也就是说，在双对数坐标系中，重整压力曲线与压差曲线互相平行。

例 7－1　我国南海某水平井的水平井段长 $L=605\mathrm{m}$，油层厚度 $h=63.3\mathrm{m}$，水平井离底界 56.9m，离顶界 6.4m，以 $q=1300\mathrm{m}^3/\mathrm{d}$ 的产量生产了 136h 后关井测量压力恢复。图 7－11 和 7－12 分别是此次压力恢复的赫诺曲线和压力导数曲线。从图 7－12 可以看到：在 $\Delta t=0.6\mathrm{h}$ 到 $\Delta t=2\mathrm{h}$ 左右，以及在 $\Delta t>30\mathrm{h}$ 之后，导数曲线接近于水平直线段。由于测量压力恢复的时间太短，并没有测到后期拟径向流动段。在赫诺曲线（图 7－11）上出现了斜率分别为 $m_1=0.75$ 和 $m_1'=1.70$ 的两条相交的直线段，注意到 $m_1'\approx 2m_1$，第二直线段似是油层顶界的反映，即为第二拟径向流动阶段。这从其重整压力曲线（图 7－13）出现两条平行（斜率均约为 1.151）的直线段可以得到进一步证实。于是由式（7－7）算得（$\mu=45\mathrm{mPa\cdot s}$，$B=1.062$）：

$$\sqrt{K_{\mathrm{H}}K_{\mathrm{V}}}=\frac{2.121\times10^{-3}q\mu B}{m_1L}=\frac{2.121\times10^{-3}\times1300\times45\times1.062}{0.75\times605}=0.2904\mu\mathrm{m}^2$$

由于未测得后期拟径向流动阶段，无法进一步计算 K_{H} 和 K_{V}。

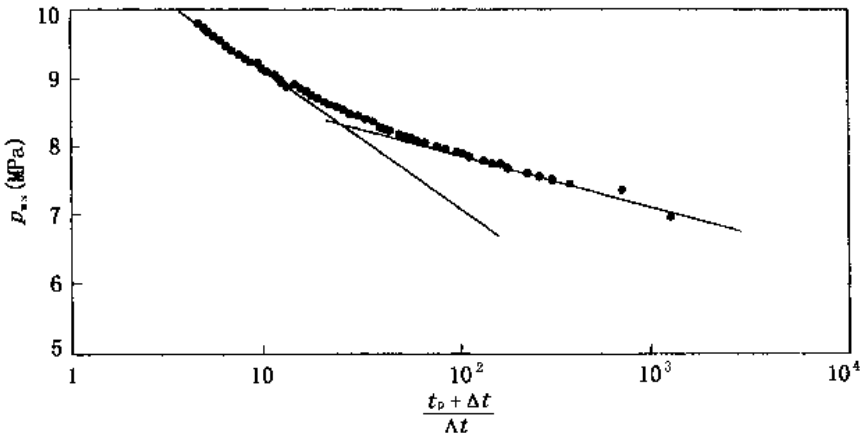


图 7－11　某井的赫诺曲线（例 7－1）

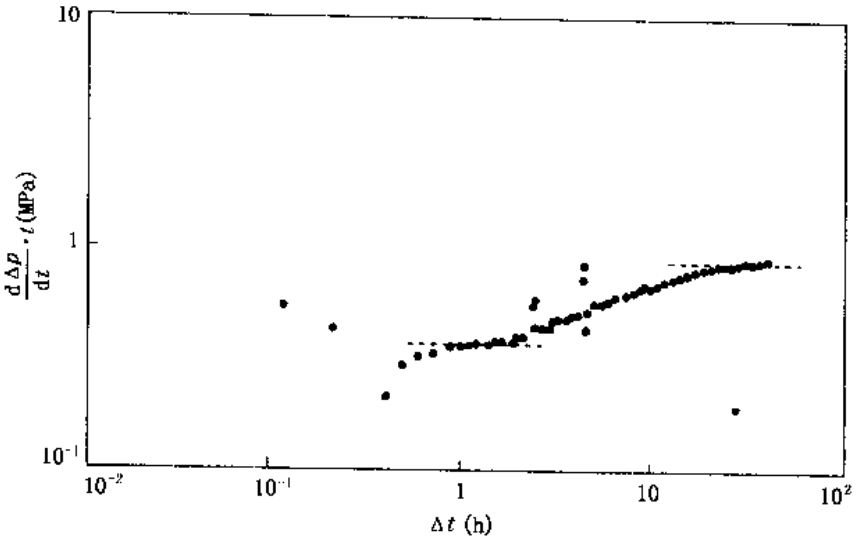


图 7－12　某井的压力导数曲线（例 7－1）

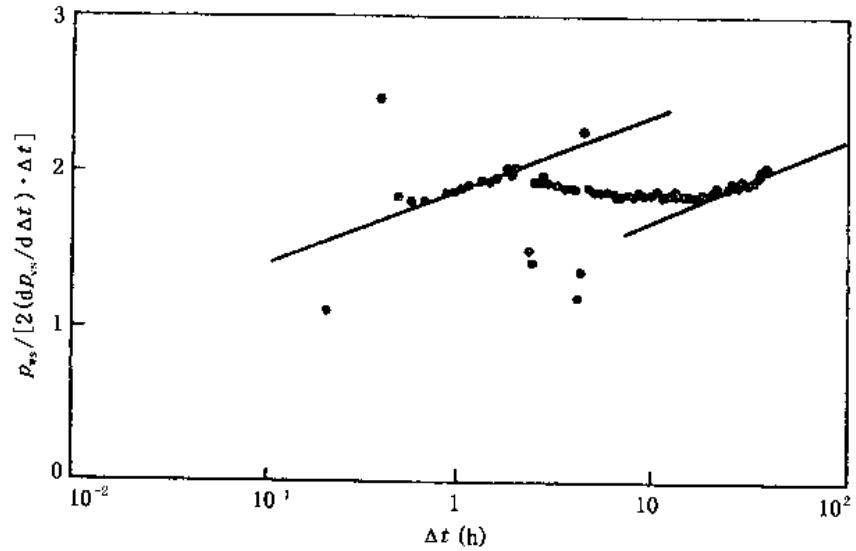


图 7－13　某井的重整压力曲线（例 7－1）

第八章　气井的现代试井解释方法

气井试井解释和油、水井不同，是因为气的状态方程和油、水有显著的差异。如第一章第一节所述，液体在多孔介质中渗流时，压力变化服从式（1－1）：

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

而在推导这一方程时，曾经作了“流体是弱可压缩的，且其压缩系数为常数”的假定。但是气体不满足这一假定，它的粘度和压缩系数等都是压力的函数；真实气体还牵涉到气体定律的偏差系数 Z，它也是压力的函数。因此，式（1－1）不能应用于气体流动。

1965 年，Al－Hussainy 和 Ramey 引进了“真实气体的势函数”（Real Gas Potential），或称为“拟压力”（Pseudo－Pressure）的概念：

$$\psi(p)=\int_{p_0}^{p}\frac{2p}{\mu Z}\mathrm{d}p \tag{8-1}$$

式中的积分下限 p_0 为任意选取的参考压力点，通常取 $p_0=0\mathrm{MPa}$。

引进拟压力 $\psi(p)$ 后，可写出形式上和液体渗流方程式（1－1）完全相同的气体渗流方程：

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial r}=\frac{1}{3.6\eta}\frac{\partial \psi}{\partial t}$$

因此，如果将气井压力 p 换算成拟压力 $\psi(p)$，便可以像油井试井解释那样解释气井试井资料，包括进行常规试井解释和现代试井解释。

第一节　拟压力的计算方法

要进行气井试井解释，首先必须计算气井的拟压力。通常可用最简单的数值积分方法——梯形法计算拟压力。

$$\psi(p)=\int_{p_0}^{p}\frac{2p}{\mu Z}\mathrm{d}p$$

$$=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}\left[\left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_i+\left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_{i-1}\right](p_i-p_{i-1})$$

式中 $p_n=p$，通常取 $p_0=0$。

这一数值积分，可以编出简单的程序用计算机计算，也可以参考表 8－1 用手工计算。表中第（2）列列出压力恢复时间 Δt（在压降情形则应为开井生产时间 t），在拟压力计算中并没有什么用处，但在绘制拟压力曲线时是必不可少的。

对于一个气田，可做出其拟压力图，即拟压力 $\psi(p)$ 与压力 p 的关系曲线，或算出 $\psi(p)$—p 函数表，以便进行 p 和 $\psi(p)$ 的相互转换。图 8－1 就是

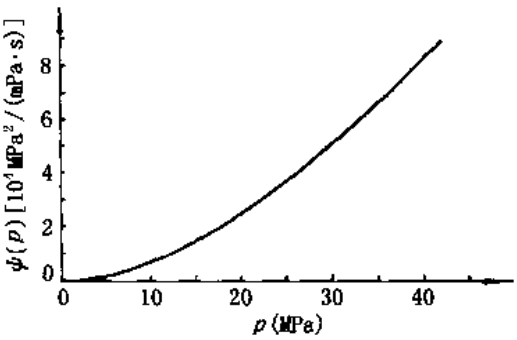


图 8－1　某气田 $\psi(p)$—p 关系曲线

表 8－1　拟压力差计算表

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
j	Δt_j (h)	p_j (MPa)	Z_j	μ_j (mPa·s)	$(p/\mu Z)_j$
					$\frac{(3)_j}{(4)_j \times (5)_j}$
0		0			0
1	0	14.76	0.9655	0.0170	899.26
2	0.01667	15.09	0.9566	0.0170	927.92
3	0.050	16.81	0.9577	0.0174	1008.76
4	0.0833	18.56	0.9604	0.0177	1091.82
5	0.1167	20.24	0.9652	0.0181	1158.55
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
$\frac{1}{2}\left[\left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_j + \left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_{j-1}\right]$	$\Delta p_j = p_j - p_{j-1}$	$\frac{1}{2}\left[\left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_j + \left(\frac{2p}{\mu Z}\right)_{j-1}\right]\Delta p_j$	$\psi_j(p)\left(\frac{\text{MPa}^2}{\text{mPa}\cdot\text{s}}\right)$	$\Delta\psi_j\left(\frac{\text{MPa}^2}{\text{mPa}\cdot\text{s}}\right)$
$(6)_j + (6)_{j-1}$	$(3)_j - (3)_{j-1}$	$(7)_j \times (8)_j$	$\sum(9) = (9)_j + (10)_{j-1}$	$(10)_j - \psi[p(0)]$
899.26	14.76	13273.08	13273.08	0
1827.18	0.33	602.97	13876.05	602.97
1936.68	1.72	3331.09	17207.14	3934.06
2100.58	1.75	3676.02	20883.16	7610.08
2250.37	1.68	3780.62	24663.78	11390.70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

某气田的 $\psi(p)$—p 关系曲线图。

第二节　试井解释方法

气井的现代试井解释方法和油井十分相似。这里只对均质气藏的压力图版和压力导数图版的拟合分析作个简要的说明，其他各种气藏的压力图版和压力导数图版拟合，以及均质气藏的雷米图版、麦金利图版拟合等，可参照本书关于油井试井解释的有关章节和这里所说明的对气井资料的处理方法进行。

一、压力图版拟合分析

在气井情形，无量纲压力 p_D ❶的定义是

$$P_D = \frac{0.027143Kh}{q}\frac{T_{sc}}{T_f p_{sc}}\Delta\psi(p) = 78.489\frac{Kh}{qT_f}\Delta\psi(p) \qquad (8-2)$$

式中　$\Delta\psi(p)$ ——拟压力差，$\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$，

$$\Delta\psi(p) = \begin{cases}\psi(p_i) - \psi[p_{wf}(t)] & \text{压降情形}\\ \psi[p_{ws}(\Delta t)] - \psi(p_{wf}) & \text{压力恢复情形}\end{cases}$$

❶ 无量纲压力 p_D 本应改称为无量纲拟压力，并以 ψ_D 表示之。但是，为了和油井试井解释图版保持一致，仍称为无量纲压力，而且仍用 p_D 表示。

q_g——气井产量，$10^4m^3/d$；

T_f——气层温度，K；

p_{sc}——标准状态的压力，规定为 $p_{sc}=0.101325MPa$（=1atm）；

T_{sc}——标准状态的温度，规定为 $T_{sc}=293.15K$（=20℃）；

K——气层渗透率，μm^2；

h——气层厚度，m。

t_D 和 C_D 的定义和油井情形相同。

这里要特别提出的是：气产量必须说明是在何种状态或何种条件下（即多大压力、多高温度下）的产量。通常都是指在标准状态下的产量。法定单位制规定的标准状态是 $p_{sc}=0.101325MPa$（=1atm，通常近似作 0.101MPa），$T_{sc}=293.15K$（=20℃，通常近似作293K）。但在英制单位中，标准状态规定为 $p_{sc}=14.6959psi$（=1atm），与法定单位制所规定的相同，而 $T_{sc}=520°R$（=60℉=15.55℃=288.7K），与法定单位制所规定的不同，在换算产量及其他有关计算中应予注意。

用压力图版进行拟合解释时，首先把气井的实测压力 p 换算成拟压力 $\psi(p)$，并计算出拟压力差 $\Delta\psi(p)$。然后在与解释图版坐标尺寸完全相同的透明双对数坐标纸上，画出拟压力差 $\Delta\psi(p)$ 与开井生产时间 t（压降情形）或关井时间 Δt（恢复情形）的关系曲线，称之为“实测拟压力曲线”。把它与压力图版相拟合，读出拟合值，计算各项参数：

$$K=\frac{q_gT_f}{78.489h}\left[\frac{p_D}{\Delta\psi(p)}\right]_{拟合} \tag{8-3}$$

$$C=\begin{cases}7.2\pi\dfrac{Kh}{\mu}\dfrac{1}{\left(\dfrac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}} & (8-4)\\[2ex] 7.2\pi\dfrac{Kh}{\mu}\dfrac{1}{\left(\dfrac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{拟合}} & (8-5)\end{cases}$$

$$C_D=\frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$$

$$S_a=\frac{1}{2}\ln\frac{(C_De^{2S})_{拟合}}{C_D} \tag{8-6}$$

这里求得的 S_a 称为拟表皮系数，它是反映井壁附近污染情况的真表皮系数 S 和井壁附近非达西流动所造成的无量纲附加压力降 Dq 的总和：

$$S_a=S+Dq_g \tag{8-7}$$

式中的 D 称为惯性—湍流系数，单位是 $(10^4m^3/d)^{-1}$。由上式看出：S_a 与 q_g 成线性关系；$q_g=0$ 所对应的 S_a 值就是真表皮系数 S 值。因此，要求出真表皮系数 S，可连续以不同产量进行若干次（至少三次）压降测试或恢复测试。把所算出的 S_a 值和对应的产量 q_g，在直角坐标系中画出直线图，直线的纵截距就是真表皮系数 S（图 8-2）。

如前所述，压力图版是压降图版。在压力恢复情形，只有当关井前生产时间很长时（有人认为当生产时间是最大关井恢复时间的 10 倍以上时），压力恢复的双对数曲线才能真正与压力图版中的某一条样板曲线相拟合。在关井前生产时间不够长的情形，将只有前一段实测曲线可以与图版中某一条样板曲线相拟合，而后一段则不能。实测拟压力曲线开始偏离压降

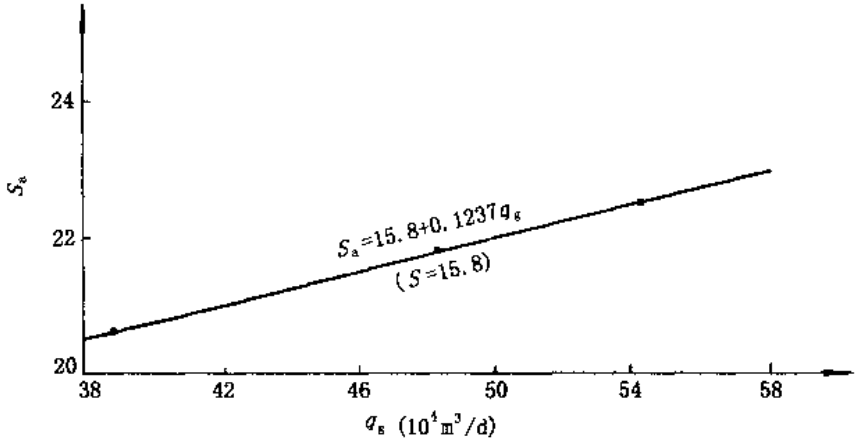


图 8－2　某井的 S_a—q_g 关系曲线

样板曲线的大致时间，由图版右边标出的 $\frac{\Delta t}{t_p}$ 值给出，详见本书第三章第三节。

和油井情形一样，可以用 $\Delta p = p_i - p_{wf}(t)$ 与 t（压降情形）或 $\Delta p = p_{ws}(\Delta t) - p_{wf}$ 与 Δt（恢复情形）的直角坐标图来检验和校正时间误差。具体做法亦与油井情形相同，详见第二章第三节。

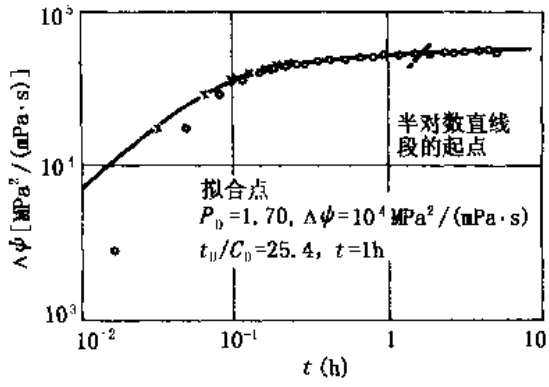


图 8－3　某井压差曲线及
所拟合的样板曲线（例 8－1）

例 8－1　图 8－3 是我国南海西部海域某砂岩气藏的一口探井压力降落测试的拟压力差 $\Delta\psi(p)$ 与开井生产时间 t 的双对数曲线，“。”和“×”分别是时间误差纠正前后的数据点（第六点以后“×”与“。”基本重合，只画出“。”），Δp—t 曲线见图 8－4。实测曲线与压力图版中 $C_De^{2S} = 10^6$ 的样板曲线（图 8－3 中实线）拟合得很好。选拟合点，读得拟合值为

$$p_D = 1.70 \quad \Delta\psi(p) = 10^4 MPa^2/(mPa \cdot s)$$

$$\frac{t_D}{C_D} = 25.4 \qquad t = 1h$$

$$C_De^{2S} = 10^6$$

该井有关参数如下：

$$q_g = 43.04 \times 10^4 m^3/d$$

$$h = 17.1m$$

$$T_f = 170.6℃ = 443.75K$$

$$C_t = 0.01484\ (MPa)^{-1}$$

$$\phi = 0.131$$

$$\mu = 0.02mPa \cdot s$$

$$r_w = 0.15m$$

代入式（8－3）、（8－5）、（1－32）和式（8－6）得

$$K = \frac{q_g T_f}{78.489h}\left[\frac{p_D}{\Delta\psi(p)}\right]_{拟合} = \frac{43.04 \times 443.75}{78.489 \times 17.1} \times \frac{1.70}{10^4} = 0.002419\mu m^2$$

$$C = 7.2\pi \frac{Kh}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}}$$

$$= 7.2\pi \times \frac{0.002419 \times 17.1}{0.02} \times \frac{1}{\frac{25.4}{1}}$$

$$= 1.842 m^3/MPa$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$$

$$= \frac{1.842}{2\pi \times 0.131 \times 0.01484 \times 17.1 \times 0.15^2}$$

$$= 391.95$$

$$S_a = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_D e^{2S})_{拟合}}{C_D} = \frac{1}{2}\ln\frac{10^6}{391.95} = 3.9$$

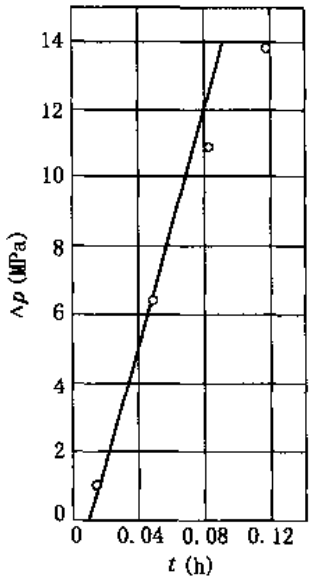


图 8-4 某井压力降落早期段的 Δp—t 曲线（例 8-1）

二、压力导数图版拟合分析

用压力导数解释图版进行气井试井解释时，首先在尺寸与该图版完全相同的透明双对数坐标纸上画出实测压力导数曲线，即 $\left(\frac{d\psi(p)}{dt} \cdot t\right)$ 与 t 的关系曲线（压降情形）或 $\left(\frac{d\psi(p)}{d\Delta t} \cdot \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \cdot \Delta t\right)$ 与 Δt 的关系曲线（恢复情形），然后将它与压力导数解释图版相拟合。由所得的压力拟合值可以计算出

$$K = \begin{cases} \dfrac{q_g T_f}{78.489h}\left[\dfrac{p_D' \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\psi(p)}{dt} \cdot t}\right]_{拟合} & \text{压降情形} \quad (8-8) \\ \dfrac{q_g T_f}{78.489h}\left[\dfrac{p_D' \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\psi(p)}{d(\Delta t)} \frac{t_p + \Delta t}{t_p}\Delta t}\right]_{拟合} & \text{恢复情形} \quad (8-9) \end{cases}$$

计算 C、C_D 和 S_a 的公式与压力图版拟合分析相同。

例 8-2 图 8-5 是例 8-1 中那口探井压力恢复的拟压力导数曲线，与压力导数图版中 $C_D e^{2S} = 10^6$ 的样板曲线（图 8-5 中的实线）拟合得很好。只可惜测试时间太短，刚要进入而尚未进入径向流动阶段测试就结束了。读得拟合值为：

$$\frac{t_D}{C_D} \cdot p_D' = 1.49, \frac{d\psi(p)}{d(\Delta t)} \cdot \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \cdot \Delta t = 10^4 MPa^2/(MPa \cdot s)$$

$$\frac{t_D}{C_D} = 30.9, \quad \Delta t = 1h$$

$$C_D e^{2S} = 10^6$$

有关数据同例 8-1。由拟合分析算得［见式（8-9）、（8-5）和式（8-6）］

$$K = \frac{q_g T_f}{78.489h}\left[\frac{p_D' \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\psi(p)}{d(\Delta t)} \cdot \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \cdot \Delta t}\right]_{拟合} = \frac{43.04 \times 443.75}{78.489 \times 17.1} \times \frac{1.49}{10^4}$$

$$= 0.00212 \mu m^2$$

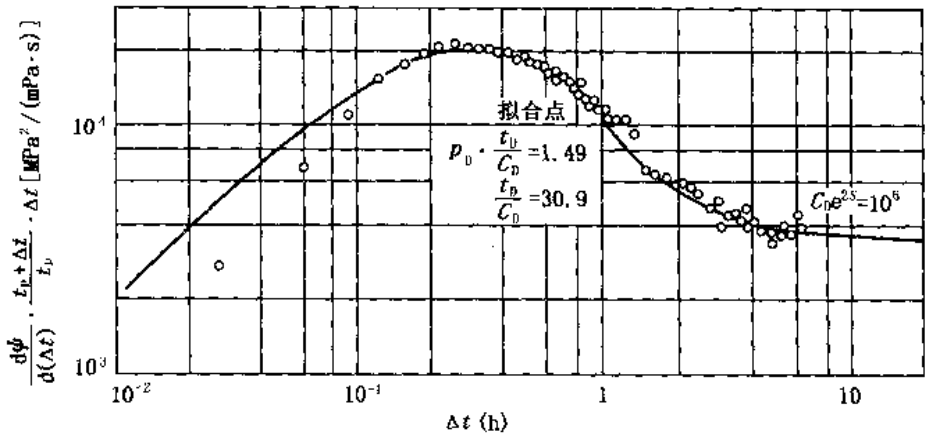


图 8－5　某井拟压力导数曲线及所拟合的样板曲线（例 8－2）

$$C = 7.2\pi \frac{Kh}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right)_{拟合}} = 7.2\pi \times \frac{0.00212 \times 17.1}{0.02} \times \frac{1}{\frac{30.9}{1}} = 1.327\text{m}^3/\text{MPa}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} = \frac{1.327}{2\pi \times 0.131 \times 0.01484 \times 17.1 \times 0.15^2} = 282.36$$

$$S_a = \frac{1}{2}\ln\frac{(C_De^{2S})_{拟合}}{C_D} = \frac{1}{2}\ln\frac{10^6}{282.36} = 4.1$$

三、试井解释步骤

和油井情形一样，气井试井解释也使用复合图版，其过程一般也包括以下几个步骤：

第一步：初拟合。

主要任务是划分流动阶段。

第二步：特种识别曲线分析。

早期段和晚期段的特种识别曲线及分析方法均与油井情形相同。中期段的特种识别曲线，压降情形是 $\psi(p_{wf})$ 与 $\lg t$ 的关系曲线，恢复情形是 $\psi(p_{ws})$ 与 $\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 的关系曲线（赫诺曲线）或 $\psi(p_{ws})$ 与 $\lg\Delta t$ 的关系曲线（MDH 曲线）。分析方法也与油井情形相类似。

气井的压降方程为

$$\psi(p_{wf}) = \psi(p_i) - 42.42\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S_a\right) \quad (8-10)$$

压力恢复的赫诺方程为

$$\psi(p_{ws}) = \psi(p_i) - 42.42\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \quad (8-11)$$

MDH 方程为

$$\psi(p_{ws}) = \psi(p_{wf}) + 42.42\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S_a\right) \quad (8-12)$$

记它们的直线段斜率的绝对值为 m，$m = 42.42\frac{p_{sc}q_g T_f}{T_{sc}Kh}$，可算得

$$K = 42.42\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{mh} = \frac{0.01467qT_f}{mh} \tag{8-13}$$

$$S_a = \begin{cases} 1.151\left[\dfrac{\psi(p_i) - \psi[p_{wf}(1h)]}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] (压降情形) \\ 1.151\left[\dfrac{\psi[p_{ws}(1h)] - \psi(p_{wf})}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] (恢复情形) \end{cases} \tag{8-14}$$

第三步：终拟合。

由中期段特种识别曲线直线段的斜率计算压力拟合值：

$$\left(\frac{p_D}{\Delta\psi}\right)_{拟合} = \frac{1.151}{m}$$

再用它对初拟合进行修正，并计算各项参数。

同样，由图版拟合和各种特种识别曲线分析所得到的各项参数应彼此大致相符；如果不相符，则解释过程中出了错误，必须重新检查。

如果用计算机进行解释，则还包括下列步骤（详见第三章）：

（1）调整参数，产生样板曲线，与实测拟压力曲线相拟合；

（2）绘制无量纲赫诺曲线，进行解释结果的检验；

（3）进行拟压力史拟合（或压力史拟合），进一步检验解释结果的可靠性。

例 8－3❶ 四川威 34 井的白云岩气层试气产量为 $q_g = 9.9\times10^4 m^3/d$。其压力和压力导数曲线及它们所拟合的样板曲线见图 8－6。这是很典型的双孔介质气藏的曲线。解释结果如下：

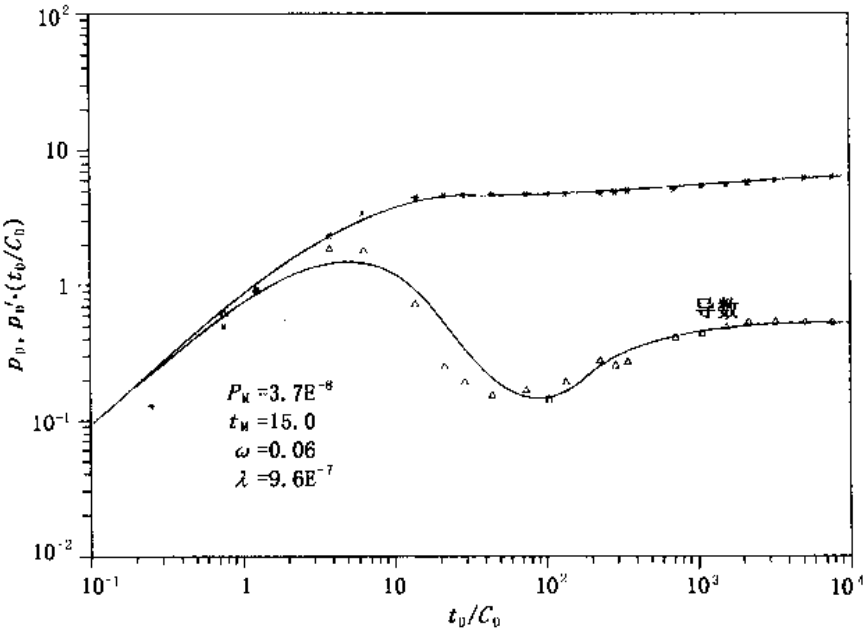


图 8－6 威 34 井压力及导数拟合图（酸化压裂前）（例 8－3）

❶ 本例引自文献［4］，解释人：高曼萍。

$$K = 1.97 \times 10^{-3} \mu m^2$$

$$S = -2.3$$

$$\omega = 6.0 \times 10^{-2}$$

$$\lambda = 9.6 \times 10^{-7}$$

图 8－7 和图 8－8 分别为这次测试的无量纲压力—时间叠加函数拟合检验和压力史拟合

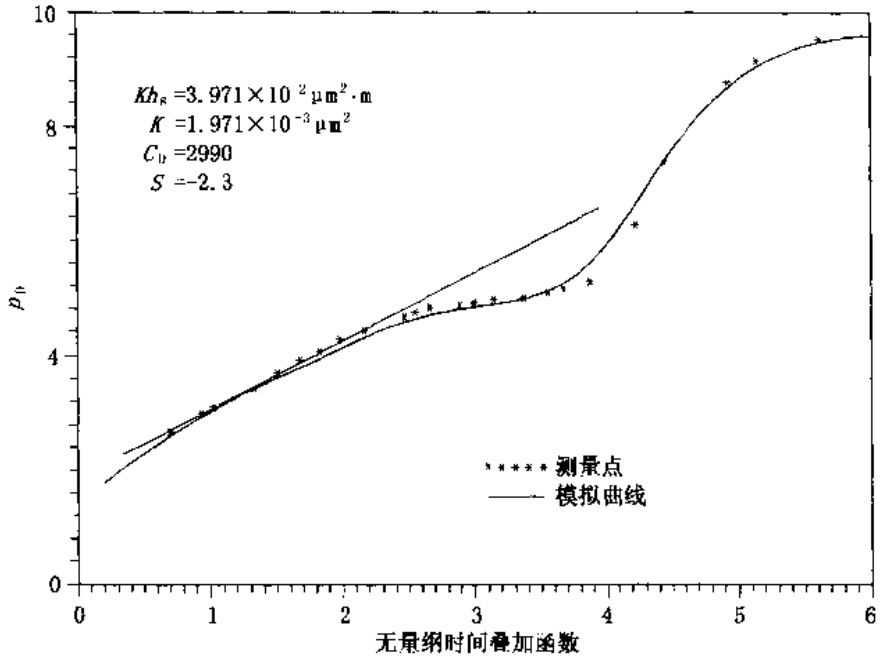


图 8－7　威 34 井无量纲赫诺曲线拟合图（酸化压裂前）（例 8－3）

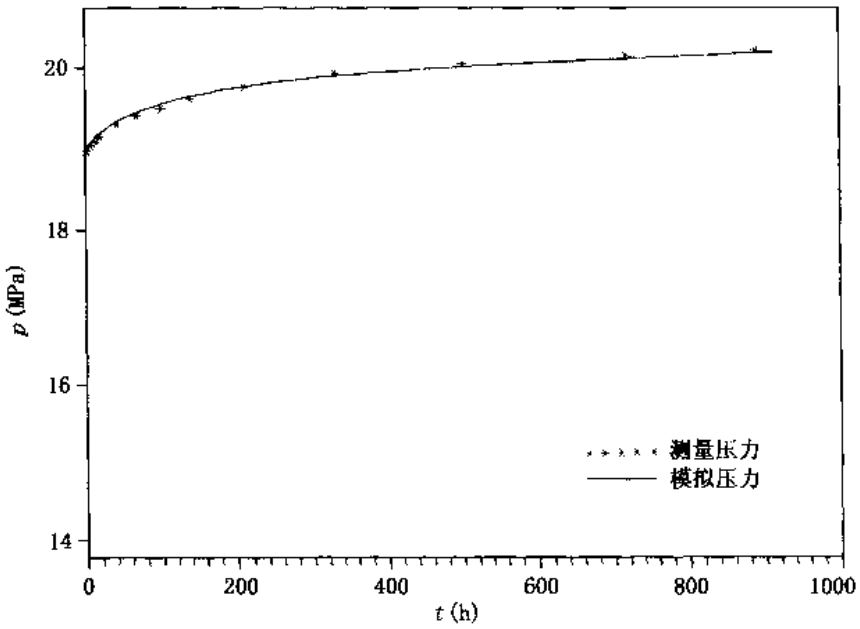


图 8－8　威 34 井压力史拟合图（酸化压裂前）（例 8－3）

检验曲线，拟合情况说明解释结果是可靠的。

后来该井进行了酸化压裂，压裂后测得的压力和压力导数曲线及它们所拟合的样板曲线如图 8－9，呈现出明显的线性流动特征，表明井底出现了大的裂缝。其无量纲赫诺曲线和压力史拟合检验曲线分别见图 8－10 和图 8－11。压裂后产气量由原来的 $9.9\times10^4 m^3/d$ 增加到 $13\times10^4 m^3/d$，见到了明显的效果。

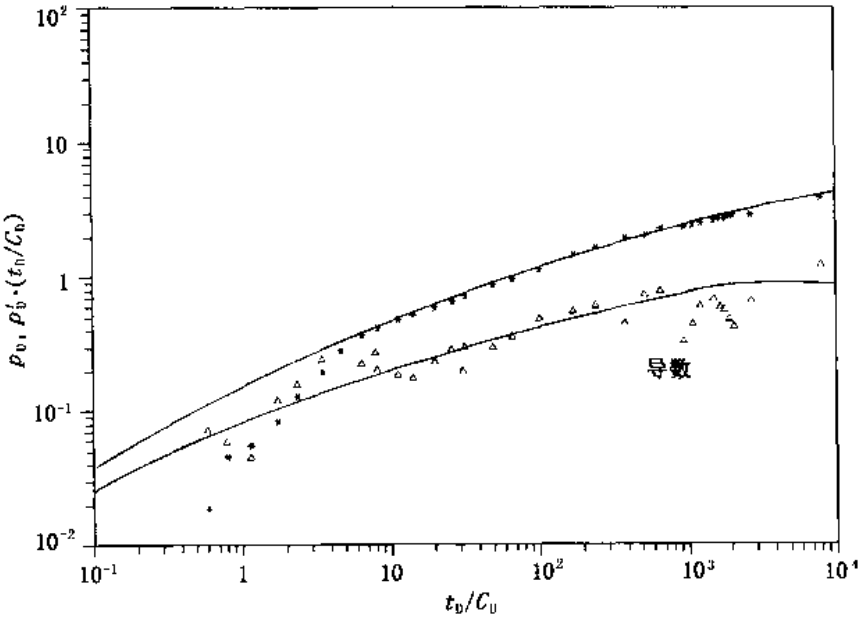


图 8－9　威 34 井压力及压力导数拟合图（酸化压裂后）（例 8－3）

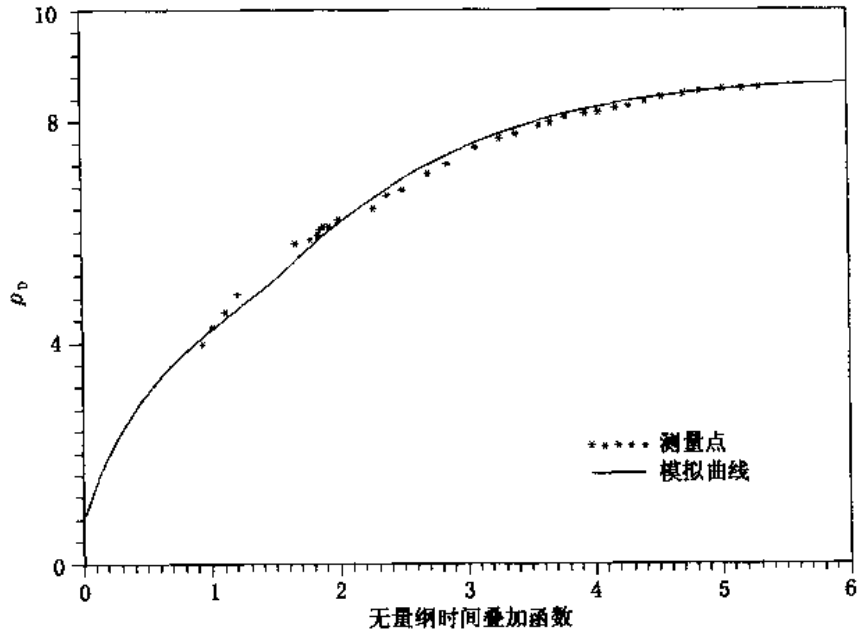


图 8－10　威 34 井无量纲赫诺曲线拟合图（酸化压裂后）（例 8－3）

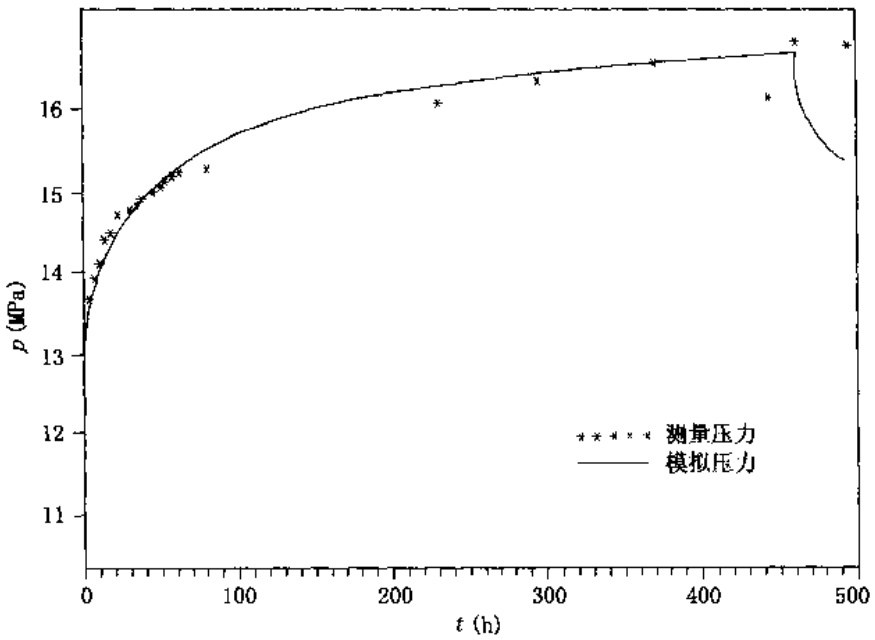


图 8－11　威 34 井压力史拟合图（酸化压裂后）（例 8－3）

第三节　拟压力的简化

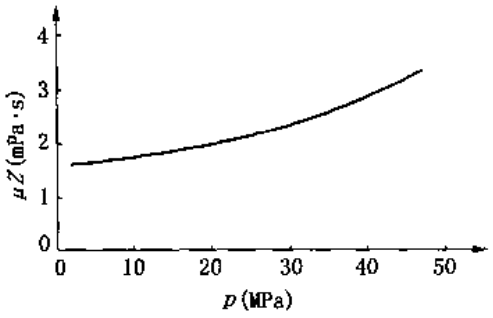


图 8－12　某气田 μZ 与 p 的关系曲线

在下列两种情形，拟压力可以分别简化为压力平方或压力，此时试井解释便因此而可以大大化简：

（1）在整个测试过程中，气井井底压力 $p_w < 13.8\text{MPa}$。此时气体的粘度 μ 与偏差系数 Z 的乘积几乎是一个常数（图 8－12）：

$$\mu Z = C_0$$

于是拟压力可以写成

$$\psi(p) = \int_0^p \frac{2p}{\mu Z}\mathrm{d}p = \frac{1}{C_0}\int_0^p 2p\mathrm{d}p = \frac{1}{C_0}p^2$$

式（8－10）、（8－11）和式（8－12）因而可改写成

$$p_{wf}^2 = p_i^2 - 42.42\frac{C_0 p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S_a\right) \qquad (8-10')$$

$$p_{ws}^2 = p_i^2 - 42.42\frac{C_0 p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\lg\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \qquad (8-11')$$

$$p_{ws}^2 = p_{wf}^2 + 42.42\frac{C_0 p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S_a\right) \qquad (8-12')$$

因此，此时可以用所谓“压力平方法”，即用压力的平方 p^2 代替拟压力 $\psi(p)$ 来进行试井解释。此时，压降曲线是 p_{wf}^2—$\lg t$ 关系曲线，压力恢复的赫诺曲线是 p_{ws}^2—$\lg\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ 关系曲

线，MDH 曲线是 p_{ws}^2—lgΔt 关系曲线，由它们的直线段斜率的绝对值 m 计算渗透率和拟表皮系数的公式是

$$K = \frac{42.42\bar{\mu}\bar{Z}p_{sc}q_gT_f}{mT_{sc}h} = \frac{0.01467\bar{\mu}\bar{Z}q_gT_f}{mh} \tag{8-13'}$$

$$S_a = \begin{cases} 1.151\left[\dfrac{p_i^2 - p_{wf}^2(1h)}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right](\text{压降情形}) \\ 1.151\left[\dfrac{p_{ws}^2(1h) - p_{wf}^2}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right](\text{恢复情形}) \end{cases} \tag{8-14'}$$

在图版拟合分析中，应定义无量纲压力为

$$p_D = \frac{0.027143Kh}{q_g\bar{\mu}\bar{Z}} \cdot \frac{T_{sc}}{T_f p_{sc}} \cdot \Delta(p^2) = \frac{78.489Kh}{q_g\bar{\mu}\bar{Z}T_f}\Delta(p^2) \tag{8-2'}$$

画出 $\Delta(p^2)$—t 或 $\Delta(p^2)$—Δt 的双对数曲线，与压力图版相拟合，由压力拟合值计算渗透率的公式应为

$$K = \frac{q_g\bar{\mu}\bar{Z}T_f}{78.489h} = \left[\frac{p_D}{\Delta(p^2)}\right]_{\text{拟合}} \tag{8-3'}$$

若绘制 $\dfrac{d\Delta(p^2)}{dt} \cdot t$—$t$ 或 $\dfrac{d\Delta(p^2)}{d(\Delta t)} \cdot \dfrac{t_p + \Delta t}{t_p} \cdot \Delta t$—$\Delta t$ 的双对数曲线，与压力导数图版相拟合，由压力拟合值计算渗透率的公式则为

$$K = \begin{cases} \dfrac{q_g\bar{\mu}\bar{Z}T_f}{78.489h}\left[\dfrac{p_D' \cdot \dfrac{t_D}{C_D}}{\dfrac{d\Delta(p^2)}{dt} \cdot t}\right]_{\text{拟合}} & (\text{压降情形}) \quad (8-8') \\ \dfrac{q_g\bar{\mu}\bar{Z}T_f}{78.489h}\left[\dfrac{p_D' \cdot \dfrac{t_D}{C_D}}{\dfrac{d\Delta(p^2)}{d\Delta t}\dfrac{t_p + \Delta t}{t_p}\Delta t}\right]_{\text{拟合}} & (\text{恢复情形}) \quad (8-9') \end{cases}$$

上列式中 $\bar{\mu}$、$\bar{Z}$ 为粘度、偏差系数的平均值［也可取某一压力下的数值，如取 $\mu_i = \mu(p_i)$，$Z_i = Z(p_i)$］。

计算 C、C_D 和 S_a 的公式不变。

在实际解释中，也常使用复合图版，即同时进行压力图版和压力导数图版拟合。

(2) 在整个测试过程中，气井井底压力 $p_w > 20.7$MPa。此时 $\dfrac{\mu Z}{p}$ 几乎是一个常数（图 8-13）：

$$\frac{\mu Z}{p} = C_0'$$

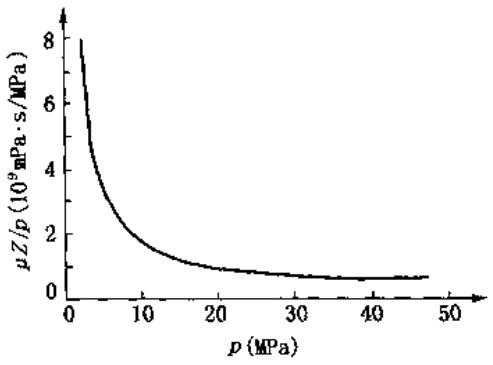


图 8-13 某气田 $\dfrac{\mu Z}{p}$ 与 p 的关系曲线

于是拟压力可以写成

$$\psi(p) = \int_0^p \frac{2p}{\mu Z}dp = \frac{2}{C_0'}p$$

式 (8-10)、(8-11) 和式 (8-12) 可以改写成

$$p_{wf} = p_i - 21.21\frac{C_0' p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686 S_a\right) \qquad (8-10'')$$

$$p_{ws} = p_i - 21.21\frac{C_0' p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\lg\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \qquad (8-11'')$$

$$p_{ws} = p_{wf} + 21.21\frac{C_0' p_{sc} q_g T_f}{T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686 S_a\right) \qquad (8-12'')$$

因此，此时可以用压力本身进行试井解释（称作“压力法”），就像油井情形一样，压降曲线是 p_{wf}—lg$t$ 曲线，压力恢复赫诺曲线是 p_{ws}—$\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 曲线，MDH 曲线是 p_{ws}—lgΔt 曲线，由它们的直线段斜率的绝对值 m 计算渗透率和拟表皮系数的公式是

$$K = \frac{21.21\mu_i Z_i p_{sc} q_g T_f}{p_i T_{sc} mh} = \frac{7.335\times10^{-3}\mu_i Z_i q_g T_f}{p_i mh} \qquad (8-13'')$$

$$S_a = \begin{cases} 1.151\left[\dfrac{p_i - p_{wf}(1h)}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] & \text{(压降情形)} \\ 1.151\left[\dfrac{p_{ws}(1h) - p_{wf}}{m} - \lg\dfrac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} - 0.9077\right] & \text{(恢复情形)} \end{cases} \qquad (8-14'')$$

在图版拟合分析中，无量纲压力的定义为

$$p_D = \frac{0.054286Kh}{q_g}\cdot\frac{T_{sc}}{T_f}\cdot\frac{p_i}{\mu_i Z_i}\cdot\frac{\Delta p}{p_{sc}} = 157\frac{Kh}{q_g T_f}\frac{p_i}{\mu_i Z_i}\Delta p \qquad (8-2'')$$

画出 Δp—t 或 Δp—Δt 的双对数曲线与压力图版相拟合，画出 $\frac{d(\Delta p)}{dt}\cdot t$—$t$ 或 $\frac{d(\Delta p)}{d(\Delta t)}\cdot\frac{t_p+\Delta t}{t_p}\cdot\Delta t$—$\Delta t$ 的双对数曲线与压力导数图版相拟合，由压力拟合值计算渗透率的公式为

$$K = \frac{q_g\mu_i Z_i T_f}{157 p_i h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \qquad (8-3'')$$

$$K = \begin{cases} \dfrac{q_g\mu_i Z_i T_f}{157 p_i h}\left[\dfrac{p_D'\cdot\dfrac{t_D}{C_D}}{\dfrac{d(\Delta p)}{dt}\cdot t}\right]_{拟合} & (8-8'') \\ \dfrac{q_g\mu_i Z_i T_f}{157 p_i h}\left[\dfrac{p_D'\cdot\dfrac{t_D}{C_D}}{\dfrac{d(\Delta p)}{d(\Delta t)}\cdot\dfrac{t_p+\Delta t}{t_p}\cdot\Delta t}\right]_{拟合} & (8-9'') \end{cases}$$

和

计算 C、C_D 和 S_a 的公式也不变。

但是，压力平方法、压力法都只不过是拟压力法在一定条件下的近似。从图 8-12 和图 8-13 可以看到，就是在 $p<13.8$MPa 时，μZ 也并不是绝对不随压力而变化，只是变化比较小而已；在 $p>20.7$MPa 时，$\frac{\mu Z}{p}$ 也并不是绝对不变。因此，用这种近似方法进行解释，势必增大结果的误差。不过，这两种方法避免了计算积分，比较简单，当用手工计算时，在满足近似条件的前提下，还是可取的。

第九章　井间干扰试井解释

井间干扰试验，又称为水文勘探试验，是一种多井试井。它是在一口（或数口）井上改变工作制度（称为“激动”），以使油层中压力发生变化，在另外一口（或数口）井下入高精度的压力计测量压力的变化。前者称为激动井［Active Well(s)］，后者称为观测井［Observation Well(s)］。从观测井能否接收到由于激动井改变工作制度所造成的压力变化（称之为压力干扰讯号）来判断它们之间是否连通；如果连通，由观测井接收到压力干扰讯号的时间以及其他资料计算油层的参数，如导压系数 η 等。

一般说来，由于激动井的激动，在观测井中造成的压力干扰数值是很小的，特别是在地层导压系数小、井距大的情况下更是如此。因此，进行井间干扰试井必须使用高精度的压力计。为了使试井解释得以顺利进行，必须使得在观测井上能接收或测量到足够大的压力干扰讯号，这讯号必须大于潮汐的影响（约为 0.0034MPa），还必须大于地层的“噪声”讯号（约为 0.0014～0.0021MPa）。因此，一般说来，为了能较容易地进行解释，要求观测井的压力反应需大于 0.007MPa。

第一节　均质油层干扰试井的极值点分析法

假设在无限大均质地层中只有一口激动井和一口观测井，它们之间互相连通，相距 r（m）；又设激动井自 $t=0$ 开井以产量 q（m^3/d）稳定生产；开井前整个地层具均一的原始压力 p_i（MPa），则观测井中的压力变化可用下式描述［第一章第一节式（1－3）］

$$p(t)=p(r,t)=p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{14.4\eta t}\right)$$

如果激动井在生产 t_p（h）后关井，在（0，t_p）内有

$$\frac{\mathrm{d}p(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{-q\mu B}{345.6\pi Kht}\mathrm{e}^{-\frac{r^2}{14.4\eta t}}<0$$

即 p（t）是单调下降函数。而在关井后，观测井中的压力为［参看式（1－16）］

$$p(t)=p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left|\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{14.4\eta t}\right)-\mathrm{Ei}\left[-\frac{r^2}{14.4\eta(t-t_p)}\right]\right| \qquad (9-1)$$

考虑它的导数：

$$\frac{\mathrm{d}p(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left[-\frac{\mathrm{e}^{-\frac{r^2}{14.4\eta t}}}{t}+\frac{\mathrm{e}^{-\frac{r^2}{14.4\eta(t-t_p)}}}{t-t_p}\right]$$

令

$$f(x)=\frac{e^{-\frac{r^2}{14.4\eta x}}}{x}$$

其中 η、r 为正的常数，则

$$\frac{dp}{dt}=\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}[f(t-t_p)-f(t)]$$

而

$$\frac{df(x)}{d(x)}=\frac{e^{-\frac{r^2}{14.4\eta x}}}{x^2}\left(\frac{r^2}{14.4\eta x}-1\right)$$

显然，当 $0<x<\frac{r^2}{14.4\eta}$ 时，$\frac{df(x)}{dx}>0$，$f(x)$ 单调上升；当 $x>\frac{r^2}{14.4\eta}$ 时，$\frac{df(x)}{dx}<0$，$f(x)$ 单调下降。

因此，当 $t_p<t<\frac{r^2}{14.4\eta}$ 时，$\frac{r^2}{14.4\eta}>t_p$，且 $0<t-t_p<\frac{r^2}{14.4\eta}$，此时有 $\frac{dp(t)}{dt}<0$，$p(t)$ 单调下降；而当 $t>t_p+\frac{r^2}{14.4\eta}$ 时，$t>t-t_p>\frac{r^2}{14.4\eta}$，此时有 $\frac{dp}{dt}>0$，$p(t)$ 单调上升。

$p(t)$ 是个连续可微的函数，它在 $[0,\ \max(t_p,\ \frac{r^2}{14.4\eta})]$ 单调下降，而在 $t>t_p+\frac{r^2}{14.4\eta}$ 时单调上升，所以必在某一点 $t_m\in[\max(t_p,\ \frac{r^2}{14.4\eta}),\ t_p+\frac{r^2}{14.4\eta}]$ 取极小值。

由函数极值的必要条件可得

$$\left.\frac{dp}{dt}\right|_{t=t_m}=\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\left[-\frac{e^{-\frac{r^2}{14.4\eta t_m}}}{t_m}+\frac{e^{-\frac{r^2}{14.4\eta(t_m-t_p)}}}{t_m-t_p}\right]=0$$

由此可得

$$\eta=\frac{r^2t_p}{14.4t_m(t_m-t_p)\ln[t_m/(t_m-t_p)]}\qquad(9-2)$$

这就是说，如果激动井和观测井之间是连通的，测得了观测井中压力变化，并画出如图 9-1a 所示的井间干扰试验曲线，量出其极值点 t_m，便可用（9-2）式计算出地层的导压系数 η。当然，如果激动井和观测井之间并不连通，则测不到任何干扰压力。

如果激动井原来在开井生产，设产量为 q_1，生产了 t_p（h），然后关井激动，关井 T_1（h）后再次开井，产量为 q_2，如图 9-1b 所示。则再次开井后的压力变化为

$$p(t)=p_i+\frac{q\mu B}{345.6\pi Kh}\{\mathrm{Ei}[-\frac{r^2}{14.4\eta(\Delta t+t_p)}]-\mathrm{Ei}(-\frac{r^2}{14.4\eta\Delta t})$$

$$+\alpha\mathrm{Ei}[-\frac{r^2}{14.4\eta(\Delta t-T_1)}]\}\qquad(\Delta t>T_1)$$

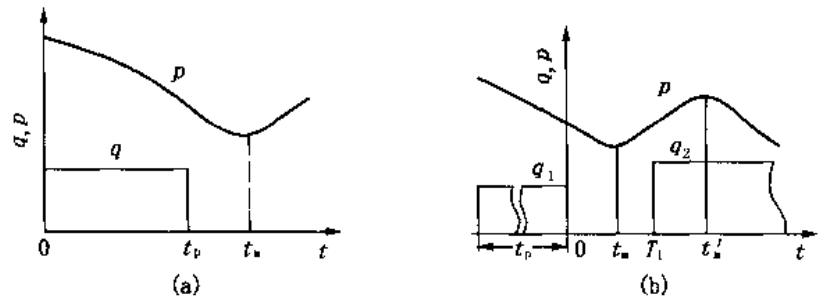


图 9－1　井间干扰试验曲线

则 p（t）将在某点 t'_m 取极大值。假设关井前生产时间 t_p 很长，$t_p \gg t'_m$，则可推得这一情形下的极值点法公式

$$\eta = \frac{r^2 T_1}{14.4 t'_m (t'_m - T_1) \ln[\alpha t'_m / (t'_m - T_1)]} \tag{9-3}$$

式中 α 是第二次开井的产量 q_2 与第一次开井的产量 q_1 之比，即

$$\alpha = \frac{q_2}{q_1}$$

把式中的自然对数化为常用对数，式（9－2）变成

$$\eta = \frac{r^2 t_p}{33.16 t_m (t_m - t_p) \lg \dfrac{t_m}{t_m - t_p}} \tag{9-4}$$

式（9－3）变成

$$\eta = \frac{r^2 t_1}{33.16 t'_m (t'_m - T_1) \lg \dfrac{\alpha t'_m}{t'_m - T_1}} \tag{9-5}$$

最后，还必须指出：干扰试验中有时只测得井底压差的变化，而不是井底压力的变化。如用国产微差压力计测量时就是这样。但压差和压力的变化完全一致，所以本节的推导和公式照样适用。

第二节　均质油层干扰试井的图版拟合分析法

对于井间干扰试井，可作如下两个假定：

（1）激动井没有井筒储集效应。事实上，如果具有井筒储集效应，这只影响到激动的开始时间，只需适当处理起始时间就行了。

（2）表皮效应可以忽略，这是因为只有极少原油流过观测井的井壁，完全可以忽略。

在上述假定下，得到井间干扰试验的基本模型：

——无限大地层；

——上、下具不渗透隔层；

——激动井开井前整个油层保持均一的原始压力；

——激动井没有井筒储集效应；

——观察井没有表皮效应；

——没有外边界。

均质油藏在这些条件下的解，就是 Theis 早在 1936 年就给出了的幂积分函数解：

$$p_D = \mathrm{Ei}\left(-\frac{1}{4t_D/r_D^2}\right)$$

式中的 p_D、t_D 和 r_D 由式（1－29）、（1－30）、（1－31）和式（1－33）定义，即

$$p_D = \frac{Kh}{1.842\times 10^{-3} q\mu B}\Delta p$$

$$t_D = \begin{cases} \dfrac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot t & \text{开井激动情形} \\ \dfrac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot \Delta t & \text{关井激动情形} \end{cases}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$

其中　r——激动井与观察井之间的距离，m；

r_w——激动井半径，m。

其余各符号的意义和单位同前。

图 9－2 就是幂积分函数曲线，也就是均质地层井间干扰试验的样板曲线，即解释图版。

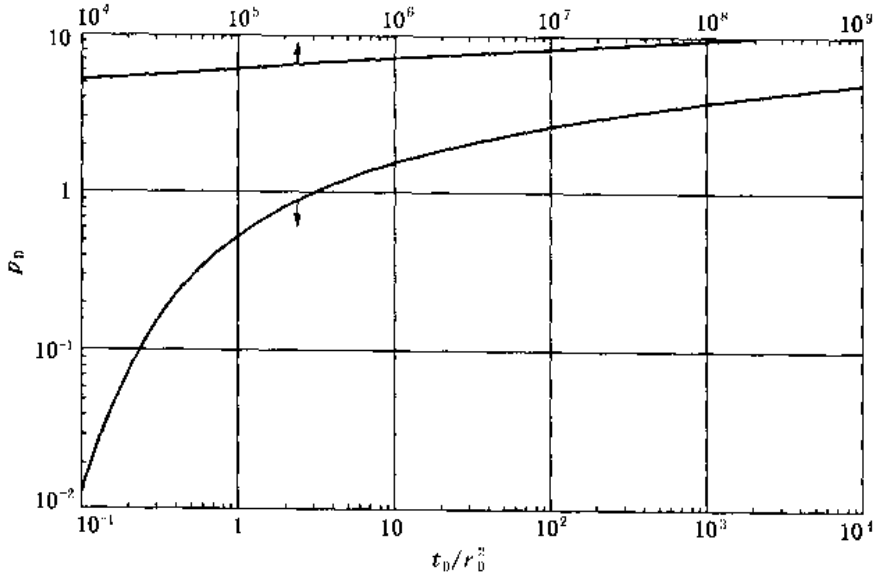


图 9－2　幂积分函数曲线（无限均质地层井间干扰样板曲线）

画出 Δp—t 实测曲线，用这个样板曲线进行拟合，从压力拟合得［参看式（3－1）、（3－2）和式（3－3）］

$$\frac{Kh}{\mu} = 1.842 \times 10^{-3} qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$Kh = 1.842 \times 10^{-3} q\mu B\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

$$K = 1.842 \times 10^{-3} \frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合}$$

从时间拟合得

$$\phi h C_t = \frac{3.6Kh}{\mu r^2\left(\frac{t_D/r_D^2}{t}\right)_{拟合}} \qquad (9-6)$$

如果满足用对数来近似表示幂积分函数的条件，即当

$$t > \frac{r^2}{0.144\eta}$$

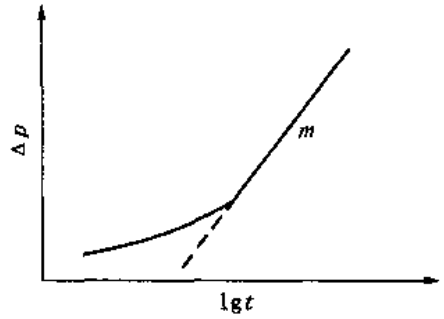


图 9－3　观测井的半对数直线图

时（参看第一章第一节），则可以画出半对数曲线进行半对数分析。设半对数直线段的斜率为 m（图 9－3），则由［参看式（1－9）］

$$\Delta p = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh}\left[\lg t + \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r^2} + 0.9077\right]$$

$$= m\left[\lg t + \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r^2} + 0.9077\right]$$

可得［参看式（1－23）、（1－24）、（1－25）和上式］

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.121 \times 10^{-3} qB}{m}$$

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

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh}$$

$$\phi h C_t = \frac{Kh}{\mu r^2} \times 10^{0.9077 - \frac{\Delta p_{1h}}{m}} \qquad (9-7)$$

由双对数曲线和半对数曲线分析所得的结果应当相符，如果相差很大，则需重新检查。

第三节　双重孔隙介质油藏干扰试井的图版拟合分析法

一、介质间拟稳定流动模型

双重孔隙介质油藏介质间拟稳定流动模型的描述见第四章第一节和第二节。

这个模型的解释图版如图 9－4，解释用图是《现代试井解释图版》一书中的图 4，其纵

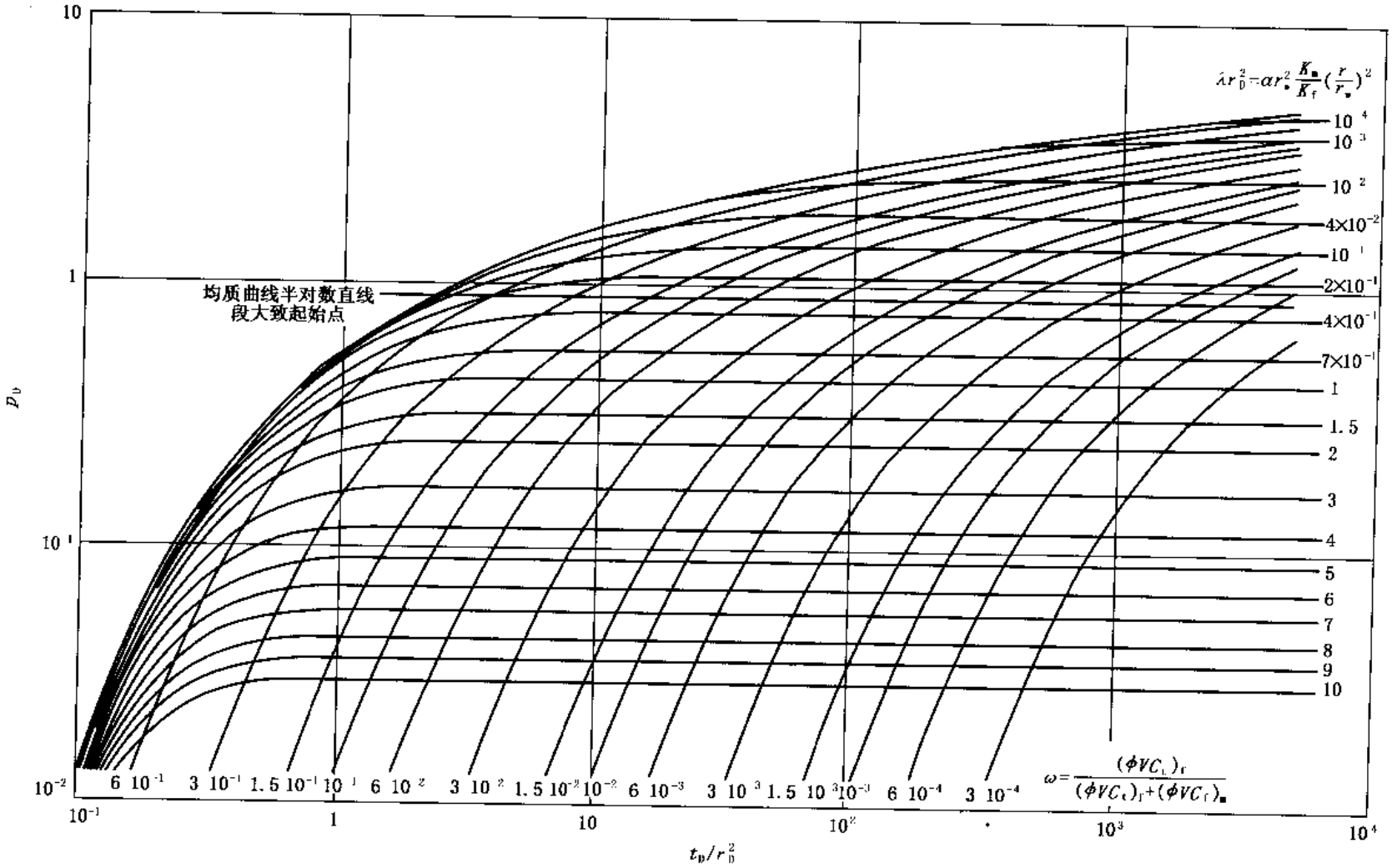


图 9－4　双重孔隙介质油藏介质间拟稳定流动模型干扰试验解释图版

坐标是无量纲压力 p_D，横坐标是$\frac{t_D}{r_D^2}$。图版由两组样板曲线组成，其中一组是均质油藏不稳定流动的样板曲线，即 Theis 曲线（《现代试井解释图版》图 4 中的黑线），每一条曲线对应一个 ω 值；另一组是介质间拟稳定流动的样板曲线（见《现代试井解释图版》图 4 中枯黄色线），每一条曲线对应一个 λr_D^2 值：

$$\lambda r_D^2 = \alpha r_w^2 \frac{K_m}{K_f}(\frac{r}{r_w})^2$$

图版中有一条水平线（见《现代试井解释图版》图 4 中红线），标出均质油藏不稳定流动样板曲线上半对数直线段开始的大致时间。

观测井的压力变化如图 9－5 所示，开始段对应于裂缝系统的流动，即 $\omega=1$ 的 Theis 曲线（图 9－5①）；然后是过渡段，对应于介质间的拟稳定流动，沿着某一条 λr_D^2 曲线变化，本例中 $\lambda r_D^2=10^{-1}$（图 9－5②）；最后进入整个系统（裂缝＋基岩）的流动，转入另外一条 $\omega<1$ 的 Theis 曲线变化，本例中 $\omega=10^{-2}$（图 9－5③）。

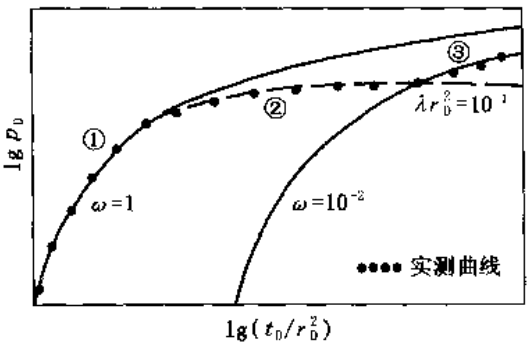


图 9－5　双重孔隙介质油藏（介质间拟稳定流动）的干扰曲线

在坐标尺寸与解释图版相同的双对数坐标纸上，以压差 Δp 和时间 t 分别为纵坐标和横坐标，画出实测曲线，再同解释图版相拟合。由压力拟合可得

$$\frac{K_f h}{\mu} = 1.842\times10^{-3}qB(\frac{p_D}{\Delta p})_{拟合}$$

$$K_f = 1.842\times10^{-3}\frac{q\mu B}{h}(\frac{p_D}{\Delta p})_{拟合}$$

由时间拟合可得

$$(\phi C_t h)_f = \frac{3.6Kh}{\mu r^2(\frac{t_D}{r_D^2}/t)_{拟合}}$$

由 Theis 曲线拟合可得 ω（第二条 Theis 曲线所对应的 ω 值）；由 λr_D^2 曲线拟合可得

$$\lambda = (\lambda r_D^2)_{拟合}/(\frac{r}{r_w})^2$$

上面说过，《现代试井解释图版》图 4 中的红线，标出半对数直线段出现的大致时间。由此可以判断是否可进行半对数曲线分析。如果可以进行，则可由直线段斜率 m 求得

$$\frac{K_f h}{\mu} = \frac{2.121\times10^{-3}qB}{m}$$

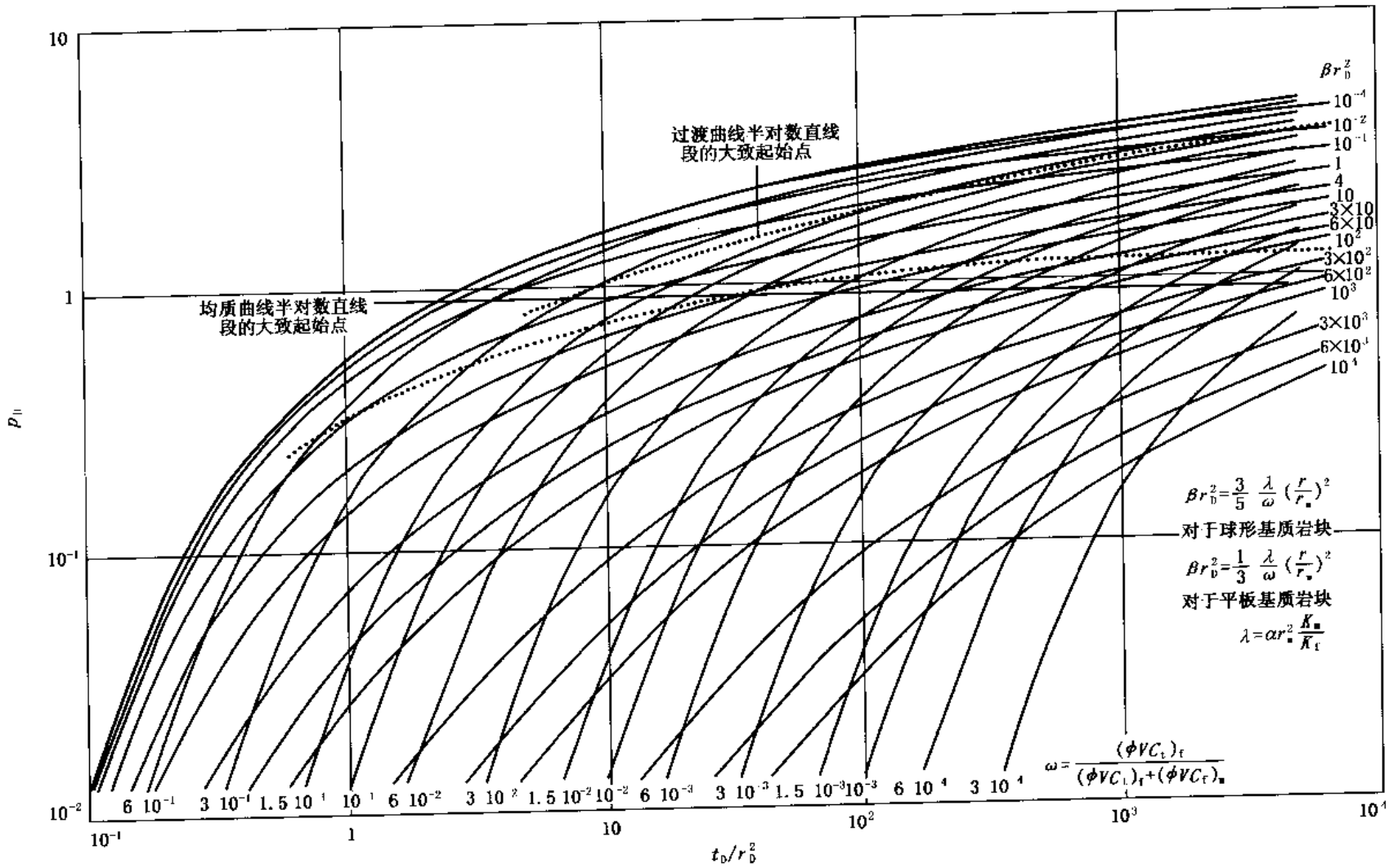


图 9－6　双重孔隙介质油藏介质间
不稳定流动模型干扰试验解释图版

$$K_f = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh}$$

$$(\phi C_t h)_f = \frac{K_f h}{\mu r^2} \cdot 10^{0.9077 \frac{\Delta p_{1h}}{m}}$$

当 $\lambda r_D^2 < 10^{-2}$时，半对数曲线可能呈现两条平行直线，此时还可得

$$\omega = 10^{-\frac{\delta p}{m}}$$

其中 m 为半对数直线斜率的绝对值，δp 为两条平行直线在纵坐标（压力坐标）方向上的距离，详见第四章第二节。

但当 $\lambda r_D^2 > 10^{-2}$时，裂缝系统流动尚未达到径向流动阶段就开始过渡到介质间流动的过渡段，半对数曲线不可能有两条平行直线段，只能呈现一条反映整个系统（裂缝+基岩）特性的直线（如果这个阶段达到了径向流动）。这种情形无法由半对数曲线分析得出 ω 值。

二、介质间不稳定流动模型

介质间不稳定流动模型和介质间拟稳定流动模型有着明显的差别。不稳定流动模型的描述详见第四章第一节和第三节。

介质间不稳定流动模型的解释图版如图 9－6 所示，解释用图为《现代试井解释图版》中的图 5。同拟稳定流动模型的解释图版相似，它也是由两组样板曲线组成，其中一组是均质油藏的 Theis 曲线，每一条曲线对应一个 ω 值；另一组是介质间不稳定流动的过渡段样板曲线，每一条曲线对应一个 βr_D^2 值，其中 β 值为

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{3}\frac{\lambda}{\omega} & \text{基岩岩块为平板状时} \\ \frac{3}{5}\frac{\lambda}{\omega} & \text{基岩岩块为圆球状时} \end{cases}$$

如果在早期裂缝系统的流动占主要地位，则压力首先沿着 $\omega=1$ 的 Theis 曲线（《现代试井解释图版》图 5 中最左边一条黑线）变化，这是裂缝系统流动阶段，接着沿着某一 βr_D^2 值的介质间不稳定流动样板曲线（《现代试井解释图版》图 5 中的桔黄色线）变化，最后到达整个系统（裂缝+基岩）的流动，压力沿着另一 ω 值的 Theis 曲线变化。但实际上裂缝系统的流动历时极短，所以往往一开始就是介质间的不稳定流动。所以压力变化曲线往往不落在 $\omega=1$ 曲线上（图 9－7），一开始就重合某条 βr_D^2 曲线（图 9－7 中为 $\beta r_D^2=0.1$），然后转到某一条 ω 曲线上（图 9－7 中为 $\omega=10^{-2}$曲线）。

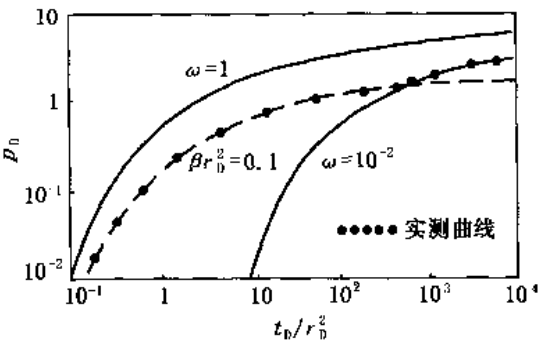


图 9－7　双重孔隙介质油藏（介质间不稳定流动）实测干扰曲线及拟合的样板曲线

《现代试井解释图版》图 5 中有一条水平红实线（图 9－6 中为粗体直线），标示出 Theis 曲线半对数直线开始的大致时间，还有两条红虚线（图 9－6 中为两条点线），标示出在介质间不稳定流动阶段的过渡曲线半对数直线段的大致起点。如果实测曲线的对应阶段超过了半对数直线段的大致起点，则可以进行半对数曲线分析，方法与第四章第三节所述相同。

第十章　试井解释软件有关问题

近二十年来，国外研制成功了很多试井解释软件，应用这些软件，用计算机辅助进行试井解释，已经在国外普遍应用。从1985年开始，我国从国外引进了若干试井解释软件，与此同时，也研制成功了多种试井解释软件，计算机辅助试井解释在我国亦已广泛应用。

各种试井解释软件大体均具有如下的功能：

（1）数据处理功能。这包括数据的输入（例如键盘输入，磁带或磁盘传输等）、数据的换算和运算（如代数运算、求导、积分等）、数据的处理（如修改、截断、删除等）和数据文件的建立、贮存、调出、合并、删除等等。

（2）图形处理功能。形成、显示、贮存、调出和绘制各种图幅，如直角坐标图、半对数坐标图和双对数坐标图等。

（3）产生样板曲线或解释图版的功能。配备多种油、气藏模型或试井解释模型，如均质油气藏、双重介质油气藏、压裂井的模型，加上了各种内边界条件（如井筒储集效应、表皮效应）和外边界条件（如直线不渗透边界、恒压边界、封闭边界等）的模型，根据指定的油、气藏模型和输入的有关参数，产生相应的样板曲线，供图版拟合分析使用。

（4）试井解释功能。包括辅助油、气藏类型诊断、常规试井解释（如绘出单对数曲线的直线段，计算其斜率等）、双对数曲线拟合分析（如做出最佳拟合、算出各项拟合值等）、计算参数（包括地层系数 Kh、渗透率 K、表皮系数 S、井筒储集系数 C、窜流系数 λ、储能比 ω、裂缝长度之半 x_f 等）。

（5）解释结果检验功能。包括辅助无量纲赫诺曲线拟合检验和压力史拟合检验等。

（6）解释结果输出功能。输出与解释结果有关的全部图幅、表格，甚至输出试井解释报告的文本。

功能齐全的试井解释软件，不但可以用来进行油、气和水井各种测试的资料解释，如压降和压力恢复测试、变产量情形的压降和恢复测试、气井产能测试、井间干扰测试的资料解释，而且还可以用来进行各种试井的设计，还可以产生新的解释图版。

应用试井解释软件，可以借助计算机完成包括油、气藏类型诊断、双对数曲线及导数曲线拟合分析、常规试井解释、无量纲赫诺曲线拟合检验和压力史拟合检验的全部工作，并且绘制规格化的全部图件，打印出所有有关数据和解释结果，甚至打印出试井解释报告，使试井解释的工作效率提高几十倍以至上百倍。

应用高水平的试井解释软件的最大优越性，还在于它可以大大提高解释结果的精确度和可靠性。这是因为，第一，出版的试井解释图版只有对应于若干个参变量的有限条样板曲线，手工解释时虽然可以靠目测在样板曲线之间内插，但毕竟有很大的局限性，而计算机却可以用软件中的相应程序，产生任意参变量的样板曲线供拟合分析，解释的精度因而大大提高；第二，出版的试井解释图版都是压降图版，而现场最经常进行的却是压力恢复测试，而且测试过程中产量往往不能一直保持稳定。在这些情形，使用压降图版进行解释，不免产生一些误差。而用试井解释软件，可由计算机根据实测产量资料和实际生产时间，产生压力恢复或变产量情形的样板曲线供拟合分析，这也提高了解释的精度。第三，只有使用试井解释

软件，由计算机辅助，才能进行试井解释结果的无量纲赫诺曲线拟合检验和压力史拟合检验，而通过这些检验，可以大大提高解释结果的可靠性，特别是在没有测得完整的测试资料（如只测得早期段的数据）的情形，几乎无法用手工进行解释，而用计算机，却可以通过反复调整参数进行解释，再经上述检验，从而得出比较可靠的解释结果。

因此，试井解释软件的推广应用，使我们的试井解释水平提高了一大步。

但是，世界上目前所有的试井解释软件，基本上都只是在计算机上重演手工操作的基础上，加上了某些补充和改进，如此而已；它们还不是可以使只具有一般试井解释常识的人能做出专家水平的解释的人工智能型专家系统。如果认为有了试井解释软件，试井解释人员就可不必开动脑筋，只要依照软件操作手册一步一步地按键，计算机就会做出准确可靠的解释，那就大错特错了。事实上，现在的试井解释软件，只能让计算机辅助操作者做好试井解释。要做出符合测试井和测试层的实际的、准确可靠的解释，还得靠运用试井解释软件进行解释的操作者。譬如，油、气藏的类型，得靠操作者根据压力及其导数曲线的形状进行判断，靠操作者据此而选择解释实测资料的试井解释模型。这项工作中，计算机起的作用只是为操作者迅速绘制并显示出压力及其导数曲线，使操作者从数据处理和绘图的繁琐工作中解放出来，把精力集中在准确地确定解释模型上。在其他工作中也是如此。又譬如，当双对数曲线和导数曲线与样板曲线的拟合不大理想时，在无量纲赫诺曲线拟合或压力史拟合不大理想时，也得靠操作者根据情况做出判断，对样板曲线的参数或别的参数做出适当调整，以改进并最终获得令人满意的拟合。在实际工作中，由于试井解释的多解性和地层千差万别，影响压力变化和压力测量的因素又十分复杂，实测资料往往并不像教科书上所说的那么标准，那么有规律，碰到这种情形时，操作者做出每一个判断（如油、气藏模型的选择、单对数直线段起止点的确定等），可能都要绞尽脑汁。因此，操作者必须掌握试井解释的基本理论和方法，必须懂得所用解释软件的功能和结构，并以此指导实际操作。此外，还有一点必须注意，就是操作者必须了解测试井、测试层的地质研究成果，在解释时加以认真考虑，做出综合分析，特别是在油、气藏类型诊断和外边界处理时，更是应当紧紧结合地质情况进行处置。譬如，在无限大均质地层模型中加断层时，应与地质情况相结合，而且必须知道加断层的处理方法，是在原模型中叠加上一口镜象井造成的压力变化，压力及其导数曲线在加上断层之后将会如何变化，若再加上若干口镜象井，则表示什么地质意义，如此等等。这样，在解释过程中，才能清楚地知道计算机在干什么，是怎么样干的，为了改进解释结果，还应当叫计算机干些什么，而这又要通过哪些指令实现，……从而在整个解释过程中成为驾驭计算机的主人。

某些试井解释软件还给用户提供了充分发挥创造性的天地。如前面已提到的产生新解释图版的功能，使用户可以按照自己的需要或所碰到的实际问题，产生新的解释模型，运用软件中的功能指令，产生新的样板曲线或解释图版。要这样做，则要求操作者对试井解释理论和软件的指令及功能有更透彻的理解。有的软件允许用户自己编制宏文件（Macro），建立宏文件库。软件的数据处理和图形处理子程序也可以用来处理其他非试井资料，即可以作为通用数据处理软件和绘图软件使用。

至于试井解释软件的操作方法，每个软件都配有操作说明书或使用手册加以详细说明，这里就不介绍了。

附录 1　符号及单位表

符　号	代表的参数	法定单位	常用工程单位	英制单位	达西单位
A	油(气)藏面积	m^2	m^2	ft^2	cm^2
B	体积系数	m^3/m^3	m^3/m^3	RB/STB	cm^3/cm^3
C	井筒储集系数	m^3/MPa	$m^3(kg/cm^2)^{-1}$	bbl/psi	cm^3/atm
$C_D, C_{Df}, C_{D(f+m)}$	无量纲井筒储集系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
C_{D1}	高渗透层的无量纲井筒储集系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
C_{D2}	低渗透层的无量纲井筒储集系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
C_o	原油压缩系数	MPa^{-1}	$(kg/cm^2)^{-1}$	psi^{-1}	atm^{-1}
C_w	水的压缩系数	MPa^{-1}	$(kg/cm^2)^{-1}$	psi^{-1}	atm^{-1}
C_g	气的压缩系数	MPa^{-1}	$(kg/cm^2)^{-1}$	psi^{-1}	atm^{-1}
C_f	岩石的压缩系数	MPa^{-1}	$(kg/cm^2)^{-1}$	psi^{-1}	atm^{-1}
C_t	综合压缩系数	MPa^{-1}	$(kg/cm^2)^{-1}$	psi^{-1}	atm^{-1}
d	测试井到不渗透边界的距离	m	m	ft	cm
F_{CD}	无量纲裂缝传导系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
h	油(气)层厚度	m	m	ft	cm
h_1	高渗透层厚度	m	m	ft	cm
h_2	低渗透层厚度	m	m	ft	cm
K	渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_f	裂缝系统渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_m	基岩系统渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_1	高渗透层渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_2	低渗透层渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_H	水平渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_V	垂直渗透率	μm^2	mD	mD	D
K_{fD}	无量纲裂缝系统渗透率	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
K_{wB}	井筒附近表皮效应影响区渗透率	μm^2	mD	mD	D
Kh	地层系数	$\mu m^2 \cdot m$	mD·m	mD·ft	D·cm
$\frac{Kh}{\mu}$	流动系数	$\mu m^2 \cdot m/(mPa \cdot s)$	mD·m/cP	mD·ft/cP	D·cm/cP
L	水平井长度	m	m	ft	cm
L_D	无量纲井长	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
m	压降曲线或恢复曲线直线段(包括水平井情形的初始径向流动直线段)斜率的绝对值	MPa/对数周期	kg/(cm²·对数周期)	psi/对数周期	atm/对数周期

续表

符　号	代表的参数	法定单位	常用工程单位	英制单位	达西单位
m	纯井筒储集阶段 Δp—t 关系曲线的斜率	MPa/h	kg/(cm^2·h)	psi/h	atm/s
m'	水平井第二初始径向流动半对数直线段斜率的绝对值	MPa/对数周期	kg/(cm^2·对数周期)	psi/对数周期	atm/对数周期
m^*	拟稳定流动阶段 p_{wf}—t 关系曲线斜率的绝对值	MPa/h	kg/(cm^2·h)	psi/h	atm/s
m''	无限导流垂直裂缝早期段 Δp—$\sqrt{t}$ 关系曲线斜率	MPa/h$^{\frac{1}{2}}$	kg/(cm^2·h$^{\frac{1}{2}}$)	psi/h$^{\frac{1}{2}}$	atm/s$^{\frac{1}{2}}$
m''	有限导流垂直裂缝早期段 Δp—$\sqrt[4]{t}$ 关系曲线斜率	MPa/h$^{\frac{1}{4}}$	kg/(cm^2·h$^{\frac{1}{4}}$)	psi/h$^{\frac{1}{4}}$	atm/s$^{\frac{1}{4}}$
N_R	可采储量	m^3	m^3	bbl	cm^3
p	压力	MPa	kg/cm^2	psi	atm
p_i	原始压力	MPa	kg/cm^2	psi	atm
p_0	参考点压力	MPa	kg/cm^2	psi	atm
p_{sc}	标准状态的压力	≈0.101325 MPa	≈1.03323 kg/cm^2	≈14.6959 psi	≈1 atm
$p_{wf}(t)$	t 时刻的井底流动压力	MPa	kg/cm^2	psi	atm
$p_{ws}(\Delta t)$	Δt 时刻的关井井底压力	MPa	kg/cm^2	psi	atm
p_D	无量纲压力	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
p'_D	无量纲压力 p_D 对 t_D/c_D 的导数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
Δp	压差	MPa	kg/cm^2	psi	atm
Δp_s	由表皮效应造成的附加压降	MPa	kg/cm^2	psi	atm
$\Delta p'$	压差对时间的导数	MPa/h	kg/(cm^2·h)	psi/h	atm/s
q	油井产量	m^3/d	m^3/d	bbl/d	cm^3/s
q_g	气井产量	10^{4}m^3/d	10^{4}m^3/d	10^{3}ft^3/d	cm^3/s
r	距离	m	m	ft	cm
r_w	井的半径	m	m	ft	cm
r_D	无量纲距离	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
r_{we}	井的有效半径(折算半径)	m	m	ft	cm
r_{wD}	无量纲井筒半径	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
S	表皮系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
S_a	拟表皮系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
S_o	含油饱和度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
S_w	含水饱和度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
S_g	含气饱和度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
t	开井生产时间	h	h	h	s
t_p	关井前生产时间	h	h	h	s
t_m, t'_m	极值点对应的时间	h	h	h	s
T_1	(干扰试验)关井时间	h	h	h	s

续表

符　号	代表的参数	法定单位	常用工程单位	英制单位	达西单位
t_D, t_{Dx}, t_{Df}, t_{DA}	无量纲时间	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
Δt	关井时间	h	h	h	s
T_f	气层温度	℃,K	℃,K	°F,°R	℃,K
T_w	标准状态的温度	=20℃ =293.15K	=20℃ =293.15K	=60°F =520°R	=0℃ =273.15K
V	井筒容积	m^3	m^3	ft^3	cm^3
V_p	油藏孔隙体积	m^3	m^3	bbl	cm^3
V_u	单位长度油管的容积	m^3/m	m^3/m	bbl/ft	cm^3/cm
V_f	裂缝体积比	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
V_m	基岩体积比	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
w	裂缝宽度	m	m	ft	cm
w_D	无量纲裂缝宽度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
x	距离	m	m	ft	cm
x_f	裂缝半长	m	m	ft	cm
x_D	无量纲距离	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
y	距离	m	m	ft	cm
y_D	无量纲距离	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
z	距离	m	m	ft	cm
z_D	无量纲距离	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
z_w	水平井与油层底面的距离	m	m	ft	cm
z_{wD}	无量纲水平井与油层底面距离	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
Z	气体的偏差系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
$\bar{Z}$	气体偏差系数的平均值	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
Z_i	气藏原始状态下(原始压力和气藏温度条件下)的气体偏差系数	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
η	导压系数	$\mu m^2 \cdot MPa/(mPa \cdot s)$	$mD \cdot kg/(cm^2 \cdot cP)$	$mD \cdot psi/cP$	$D \cdot atm/cP = cm^2/s$
η_v	垂向导压系数	$\mu m^2 \cdot MPa/(mPa \cdot s)$	$mD \cdot kg/(cm^2 \cdot cP)$	$mD \cdot psi/cP$	$D \cdot atm/cP = cm^2/s$
η_H	水平导压系数	$\mu m^2 \cdot MPa/(mPa \cdot s)$	$mD \cdot kg/(cm^2 \cdot cP)$	$mD \cdot psi/cP$	$D \cdot atm/cP = cm^2/s$
κ	(双重渗透介质油藏的)地层系数比	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
λ	孔隙内部流动因子(窜流系数)	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
μ	粘度	mPa·s	cP	cP	cP
μ_i	气藏原始状态下(原始压力和气藏温度下)的气体粘度	mPa·s	cP	cP	cP
$\bar{\mu}$	气体粘度的平均值	mPa·s	cP	cP	cP
ρ	密度	g/cm^3	g/cm^3	lb/ft^3	g/cm^3
ϕ	孔隙度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
ϕ_f	裂缝系统孔隙度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
ϕ_m	基岩系统孔隙度	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲
ψ	拟压力	$MPa^2/(mPa \cdot s)$	$(kg/cm^2)(cP)^{-1}$	psi^2/cP	atm^2/cP
$\Delta\psi$	拟压力差	$MPa^2/(mPa \cdot s)$	$(kg/cm^2)(cP)^{-1}$	psi^2/cP	atm^2/cP
ω	裂缝系统弹性储能比(弹性容量比)	无量纲	无量纲	无量纲	无量纲

下标符号及代表的意义

A——面积

D——无量纲

e——有效

f——裂缝系统

f+m——裂缝系统+基岩系统

g——气

H——水平

V——垂直

i——原始状态

m——基岩系统

o——油

p——生产

S——表皮效应

t——总的,综合的

w——井(底)

w——水

wb——井筒

wf——井底,流动状态下

ws——井底,关井状态下

1h——(开井或关井后)1 小时处

附录 2　不同单位制下的试井解释常用公式

1. 基本微分方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{1}{C_1\eta}\frac{\partial p}{\partial t} \tag{1-1}$$●

法定计量单位制：　$C_1=3.6$

常用工程单位制：●　$C_1=3.484\times10^{-4}$

英制：　$C_1=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　$C_1=1$

2. 压降公式

$$p=p(r,t)=p_i-\frac{q\mu B}{C_2Kh}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{C_3\eta t}\right)\right] \tag{1-3}$$

$$p_{wf}(t)=p_i-\frac{q\mu B}{C_2Kh}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_w^2}{C_3\eta t}\right)+2S\right] \tag{1-5}$$

$$\Delta p=p_i-p_{wf}(t)=\frac{q\mu B}{C_2Kh}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{C_3\eta t}\right)+2S\right] \tag{1-6}$$

法定计量单位制：　$C_2=345.6\pi=1085.7=\dfrac{10^4}{9.2106}$

$C_3=14.4=\dfrac{1}{0.06944}$

常用工程单位制：　$C_2=0.10508$

$C_3=1.394\times10^{-3}$

英制：　$C_2=\dfrac{1}{70.6}=0.01416$

$C_3=0.001055$

达西单位制：　$C_2=4\pi$

$C_3=4$

$$p_{wf}(t)=p_i-\frac{q\mu B}{C_4Kh}\left[\ln\frac{C_5\eta t}{r_w^2}+2S\right] \tag{1-7}$$

● 本附录中出现的公式编号是与本书正文中相对应公式的编号一致的。

● 也称为“矿场实用单位制”。

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{q\mu B}{C_4 Kh}\ln\frac{C_5\eta t}{r_{we}^2} \tag{1-43}$$

法定计量单位制：$C_4 = 345.6\pi = 1085.7$

$C_5 = 8.085$

常用工程单位制：$C_4 = 0.10508$

$C_5 = 7.827\times10^{-4}$

英制：$C_4 = \frac{1}{70.6} = 0.01416$

$C_5 = 5.922\times10^{-4}$

达西单位制：$C_4 = 4\pi$

$C_5 = 2.246$

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{C_6 q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_7 + 0.8686S\right) \tag{1-8}$$

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) = \frac{C_6 q\mu B}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_7 + 0.8686S\right) \tag{1-9}$$

法定计量单位制：$C_6 = 2.121\times10^{-3}$

$C_7 = 0.9077$

常用工程单位制：$C_6 = 21.91$

$C_7 = -3.106$

英制：$C_6 = 162.6$

$C_7 = -3.2275$

达西单位制：$C_6 = \frac{2.3026}{4\pi} = 0.1832$

$C_7 = 0.3514$

3. 压力恢复公式

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{q\mu B}{C_8 Kh}\left|-\mathrm{Ei}\left[-\frac{r_w^2}{C_9\eta(t_p+\Delta t)}\right] + \mathrm{Ei}\left(-\frac{r_w^2}{C_9\eta\Delta t}\right)\right| \tag{1-16}$$

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{q\mu B}{C_8 Kh}\left|-\mathrm{Ei}\left[-\frac{r_w^2}{C_9\eta(t_p+\Delta t)}\right] + \mathrm{Ei}\left(-\frac{r_w^2}{C_9\eta\Delta t}\right)\right| \tag{1-17}$$

法定计量单位制：$C_8 = 345.6\pi = 1085.7$

$C_9 = 14.4$

常用工程单位制：$C_8 = 0.10508$

$C_9 = 1.394\times10^{-3}$

英制：$C_8 = \frac{1}{70.6} = 0.01416$

$C_9 = 0.001055$

达西单位制：$C_8 = 4\pi$

$C_9 = 4$

赫诺公式

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i - \frac{C_{10} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \tag{1-18}$$

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = \frac{C_{10} q\mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \tag{1-19}$$

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{C_{10} q\mu B}{Kh} \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \tag{1-18'}$$

$$\Delta p = p_i - p_{ws}(\Delta t) = -\frac{C_{10} q\mu B}{Kh} \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \tag{1-19'}$$

法定计量单位制：$C_{10} = 2.121 \times 10^{-3}$

常用工程单位制：$C_{10} = 21.91$

英制：$C_{10} = 162.6$

达西单位制：$C_{10} = \frac{2.3026}{4\pi} = 0.1832$

MDH公式

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{C_{11} q\mu B}{Kh} \left[\lg \left(\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} \cdot \frac{t_p}{t_p + \Delta t} \right) + C_{12} + 0.8686S \right] \tag{1-20}$$

$$p_{ws}(\Delta t) = p_{wf}(t_p) + \frac{C_{11} q\mu B}{Kh} \left(\lg \frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{12} + 0.8686S \right) \tag{1-21}$$

法定计量单位制：$C_{11} = 2.121 \times 10^{-3}$

$C_{12} = 0.9077$

常用工程单位制：$C_{11} = 21.91$

$C_{12} = -3.106$

英制：$C_{11} = 162.6$

$C_{12} = -3.2275$

达西单位制：$C_{11} = 0.1832$

$C_{12} = 0.3514$

4. 压降或压力恢复曲线斜率的绝对值

$$m = \frac{C_{13} q\mu B}{Kh} \tag{1-22}$$

法定计量单位制：$C_{13} = 2.121 \times 10^{-3}$

常用工程单位制：$C_{13} = 21.91$

英制：　　$C_{13}=162.6$

达西单位制：　　$C_{13}=0.1832$

5. 由半对数直线段斜率求流动系数、地层系数和渗透率

$$\frac{Kh}{\mu}=\frac{C_{14}qB}{m} \tag{1-23}$$

$$\frac{K_fh}{\mu}=\frac{C_{14}qB}{m} \tag{4-13}$$

$$Kh=\frac{C_{14}q\mu B}{m} \tag{1-24}$$

$$K=\frac{C_{14}q\mu B}{mh} \tag{1-25}$$

法定计量单位制：　　$C_{14}=2.121\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{14}=21.91$

英制：　　$C_{14}=162.6$

达西单位制：　　$C_{14}=0.1832$

6. 表皮系数

$$S=1.151\left[\frac{p_i-p_{wf}(t_0)}{m}-\lg\frac{Kt_0}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{15}\right] \tag{1-26}$$

$$S=1.151\left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0)-p_{ws}(0)}{m}-\lg\left(\frac{K\Delta t_0}{\phi\mu C_tr_w^2}\cdot\frac{t_p}{t_p+\Delta t_0}\right)+C_{15}\right] \tag{1-27}$$

$$S=1.151\left[\frac{p_{ws}(\Delta t_0)-p_{ws}(0)}{m}-\lg\frac{K\Delta t_0}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{15}\right] \tag{1-28}$$

$$S=1.151\left[\frac{p_i-p_{wf}(1h)}{m}-\lg\frac{K}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{15}\right] \tag{1-26′}$$

$$S=1.151\left[\frac{p_{ws}(1h)-p_{ws}(0)}{m}-\lg\left(\frac{K}{\phi\mu C_tr_w^2}\cdot\frac{t_p}{t_p+1}\right)+C_{15}\right] \tag{1-27′}$$

$$S=1.151\left[\frac{p_{ws}(1h)-p_{ws}(0)}{m}-\lg\frac{K}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{15}\right] \tag{1-28′}$$

法定计量单位制：　　$C_{15}=-0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{15}=3.106$

英制：　　$C_{15}=3.2275$

达西单位制：　　$C_{15}=-0.3514$

7. 无量纲压力

$$p_D=\frac{Kh}{C_{16}q\mu B}\cdot\Delta p \tag{1-29}$$

法定计量单位制：　$C_{16}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　$C_{16}=19.033$

英制：　$C_{16}=141.2$

达西单位制：　$C_{16}=\dfrac{1}{2\pi}=0.1592$

8. 无量纲时间

$$t_D=\frac{C_{17}K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot t \tag{1-30}$$

$$t_D=\frac{C_{17}K}{\phi\mu C_t r_w^2}\cdot \Delta t \tag{1-31}$$

$$t_{De}=\frac{C_{17}K}{\phi\mu C_t r_{we}^2}\cdot t \tag{1-34}$$

$$t_{DA}=\frac{C_{17}K}{\phi\mu C_t A}\cdot t \tag{1-35}$$

$$t_{Df}=\frac{C_{17}K}{\phi\mu C_t x_f^2}\cdot t \tag{1-36}$$

法定计量单位制：　$C_{17}=3.6$

常用工程单位制：　$C_{17}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　$C_{17}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　$C_{17}=1$

9. 无量纲井筒储集系数

$$C_D=\frac{C}{C_{18}\phi C_t h r_w^2} \tag{1-32}$$

法定计量单位制：　$C_{18}=2\pi=6.2832$

常用工程单位制：　$C_{18}=2\pi=\dfrac{1}{0.1592}$

英制：　$C_{18}=1.1191=\dfrac{1}{0.8936}$

达西单位制：　$C_{18}=2\pi=\dfrac{1}{0.1592}$

10. 井筒储集系数

$$C=\frac{\Delta V}{\Delta p}=\frac{qt}{C_{19}\Delta p} \tag{1-37}$$

$$C=\frac{qB}{C_{19}m} \tag{2-2}$$

$$\Delta p=\frac{q}{C_{19}C}\cdot t \tag{1-38}$$

$$\Delta p=\frac{qB}{C_{19}C}\cdot t \tag{2-1}$$

法定计量单位制：　$C_{19}=24$

常用工程单位制：　$C_{19}=24$

英制：　$C_{19}=24$

达西单位制：　$C_{19}=1$

$$C=\frac{\Delta V}{\Delta p}=\frac{V_u}{C_{20}\rho} \tag{1-40}$$

法定计量单位制：　$C_{20}=9.80665\times10^{-3}$

常用工程单位制：　$C_{20}=0.1$

英制：　$C_{20}=\frac{1}{144}=6.944\times10^{-3}$❶

达西单位制：　$C_{20}=9.67841\times10^{-4}$

11. 表皮系数(定义)

$$S=\frac{Kh}{C_{21}q\mu B}\Delta p_s \tag{1-41}$$

法定计量单位制：　$C_{21}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　$C_{21}=19.033$

英制：　$C_{21}=141.2$

达西单位制：　$C_{21}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

12. 断层距离

$$d=C_{22}\sqrt{\frac{Kt_x}{\phi\mu C_t}} \tag{2-8}$$

$$d=C_{22}\sqrt{\frac{K\Delta t_x}{\phi\mu C_t}} \tag{2-9}$$

法定计量单位制：　$C_{22}=1.423$

常用工程单位制：　$C_{22}=1.40\times10^{-2}$

英制：　$C_{22}=1.218\times10^{-2}$

达西单位制：　$C_{22}=0.75$

$$2.303\lg\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)=-\mathrm{Ei}\left(-\frac{d^2}{C_{23}\eta t_p}\right)$$

$$d=\sqrt{\left(\frac{d^2}{C_{23}\eta t_p}\right)\times C_{23}\eta t_p}=\sqrt{\left(\frac{d^2}{C_{23}\eta t_p}\right)\times\frac{C_{23}Kt_p}{\phi\mu C_t}} \tag{2-10}$$

法定计量单位制：　$C_{23}=3.6$

常用工程单位制：　$C_{23}=3.484\times10^{-4}$

---

❶ 在英制下，V_u 的单位是 bbl/ft，ρ 的单位是 lb/ft^3。

英制：　　$C_{23}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{23}=1$

13. 拟稳定流动方程及封闭系统储量

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{wf}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{qB}{C_{24}V_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{t}}} \tag{2-11}$$

$$p_{\mathrm{wf}}=-\frac{qB}{C_{24}V_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{t}}}\cdot t+p_{\mathrm{wfint}} \tag{2-12}$$

$$\Delta p=\frac{qB}{C_{24}V_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{t}}}\cdot t+\Delta p_{\mathrm{int}}=\frac{qB}{C_{24}Ah\phi C_{\mathrm{t}}}\cdot t+\Delta p_{\mathrm{int}} \tag{2-13}$$

$$N_{\mathrm{R}}=V_{\mathrm{p}}S_{\mathrm{o}}=\frac{qBS_{\mathrm{o}}}{C_{24}m^{*}C_{\mathrm{t}}} \tag{2-14}$$

法定计量单位制：　　$C_{24}=24$

常用工程单位制：　　$C_{24}=24$

英制：　　$C_{24}=24$

达西单位制：　　$C_{24}=1$

14. 由图版拟合值求流动系数、地层系数和渗透率

$$\frac{Kh}{\mu}=C_{25}qB\left(\frac{p_{\mathrm{D}}}{\Delta p}\right)_{\text{拟合}} \tag{3-1}$$

$$Kh=C_{25}q\mu B\left(\frac{p_{\mathrm{D}}}{\Delta p}\right)_{\text{拟合}} \tag{3-2}$$

$$K=C_{25}\frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p_{\mathrm{D}}}{\Delta p}\right)_{\text{拟合}} \tag{3-3}$$

$$\frac{Kh}{\mu}=C_{25}qB\left[\frac{p'_{\mathrm{D}}\cdot\dfrac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'\cdot t}\right]_{\text{拟合}} \tag{3-28}$$

$$Kh=C_{25}q\mu B\left[\frac{p'_{\mathrm{D}}\cdot\dfrac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'\cdot t}\right]_{\text{拟合}} \tag{3-29}$$

$$K=C_{25}\frac{q\mu B}{h}\left[\frac{p'_{\mathrm{D}}\cdot\dfrac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'\cdot t}\right]_{\text{拟合}} \tag{3-30}$$

$$\frac{Kh}{\mu}=C_{25}qB\left[\frac{p'_{\mathrm{D}}\cdot\dfrac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p'\cdot\Delta t\cdot\dfrac{t_{\mathrm{p}}+\Delta t}{t_{\mathrm{p}}}}\right]_{\text{拟合}} \tag{3-32'}$$

$$Kh = C_{25} q\mu B \left(\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p' \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}} + \Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right)_{\text{拟合}} \tag{3-33'}$$

$$K = C_{25} \frac{q\mu B}{h} \left(\frac{p'_{\mathrm{D}} \cdot \frac{t_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{D}}}}{\Delta p' \cdot \Delta t \cdot \frac{t_{\mathrm{p}} + \Delta t}{t_{\mathrm{p}}}} \right)_{\text{拟合}} \tag{3-34'}$$

法定计量单位制：$C_{25} = 1.842 \times 10^{-3}$

常用工程单位制：$C_{25} = 19.033$

英制：$C_{25} = 141.2$

达西单位制：$C_{25} = \frac{1}{2\pi} = 0.1592$

15. $\phi h C_{\mathrm{t}}$（Ramey 图版拟合计算）

$$\phi h C_{\mathrm{t}} = C_{26} \frac{Kh}{\mu r_{\mathrm{w}}^2} \frac{1}{\left(\frac{t_{\mathrm{D}}}{t}\right)_{\text{拟合}}} \tag{3-4}$$

法定计量单位制：$C_{26} = 3.6$

常用工程单位制：$C_{26} = 3.4842 \times 10^{-4}$

英制：$C_{26} = 2.637 \times 10^{-4}$

达西单位制：$C_{26} = 1$

16. 井筒储集系数（由 Earlougher 图版拟合计算）

$$C = \frac{qB}{C_{27}} \left[\left(\frac{C_{27} C}{qB} \cdot \frac{\Delta p}{t} \right) \Big/ \left(\frac{\Delta p}{t} \right) \right]_{\text{拟合}} \tag{3-5}$$

法定计量单位制：$C_{27} = 24$

常用工程单位制：$C_{27} = 24$

英制：$C_{27} = 24$

达西单位制：$C_{27} = 1$

17. 流动系数、地层系数和渗透率（厄洛赫图版拟合计算）

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{C}{C_{28}} \left[\frac{\left(C_{28} \frac{Kh}{\mu} \cdot \frac{t}{C} \right)}{t} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-6}$$

$$Kh = \frac{C\mu}{C_{28}} \left[\frac{\left(C_{28} \frac{Kh}{\mu} \frac{t}{C} \right)}{t} \right]_{\text{拟合}} \tag{3-7}$$

$$K = \frac{C\mu}{C_{28}h}\left[\frac{\left(C_{28}\dfrac{Kh}{\mu}\dfrac{t}{C}\right)}{t}\right]_{拟合} \tag{3-8}$$

法定计量单位制：　$C_{28}=76656$

常用工程单位制：　$C_{28}=7.4191$

英制：　$C_{28}=1$

达西单位制：　$C_{28}=21293$

18. 井筒储集系数（麦金利图版拟合计算）

$$C = \left[\frac{\left(\dfrac{C_{29}C\Delta p}{qB}\right)}{\Delta p}\right]_{拟合} \times \frac{qB}{C_{29}} \tag{3-10}$$

法定计量单位制：　$C_{29}=5.6146$

常用工程单位制：　$C_{29}=5.6146$

英制：　$C_{29}=5.6146$

达西单位制：　$C_{29}=6.4984\times10^{-5}$

19. 流动系数和渗透率（麦金利图版拟合计算）

$$\left(\frac{Kh}{\mu}\right)_{wB} = \left(\frac{C_{30}}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(前段)} \times \frac{C}{C_{30}} \tag{3-11}$$

$$K_{wB} = \left(\frac{C_{30}}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(前段)} \times \frac{C\mu}{C_{30}h} \tag{3-12}$$

$$\frac{Kh}{\mu} = \left(\frac{C_{30}}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(后段)} \times \frac{C}{C_{30}} \tag{3-13}$$

$$K = \left(\frac{C_{30}}{C}\frac{Kh}{\mu}\right)_{拟合(后段)} \times \frac{C\mu}{C_{30}h} \tag{3-14}$$

法定计量单位制：　$C_{30}=13653$

常用工程单位制：　$C_{30}=1.3213$

英制：　$C_{30}=\dfrac{1}{5.6146}=0.1781$

达西单位制：　$C_{30}=1.3653\times10^{7}$

20. 压力和压力导数图版的横坐标，井筒储集系数（压力或压力导数图版拟合计算）

$$\frac{t_D}{C_D} = C_{31}\frac{Kh}{\mu}\frac{t}{C} \tag{3-15}$$

$$C = C_{31}\frac{Kh}{\mu}\frac{1}{\left(\dfrac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}}$$

法定计量单位制：　　$C_{31}=7.2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{31}=2.1892\times10^{-3}$

英制：　　$C_{31}=2.954\times10^{-4}$

达西计量单位制：　　$C_{31}=2\pi$

21. C_De^{2S}

$$C_De^{2S}=\frac{Ce^{2S}}{C_{32}\phi C_t h r_w^2} \tag{3-16}$$

法定计量单位制：　　$C_{32}=2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{32}=2\pi$

英制：　　$C_{32}=1.1191=\frac{1}{0.8936}$

达西单位制：　　$C_{32}=2\pi$

22. 断层距离（由 Theis 样板曲线计算）

$$d=C_{32}\sqrt{\frac{Kt_p}{\phi\mu C_t\left(\frac{t_D}{r_D^2}\right)_x}} \tag{3-21}$$

法定计量单位制：　　$C_{32}=0.9487$

常用工程单位制：　　$C_{32}=9.333\times10^{-3}$

英制：　　$C_{32}=8.119\times10^{-3}$

达西单位制：　　$C_{32}=0.5$

23. 无量纲压力（双重孔隙介质模型）

$$p_D=\frac{K_f h}{C_{33}q\mu B}\Delta p \tag{4-2}$$

法定计量单位制：　　$C_{33}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{33}=19.033$

英制：　　$C_{33}=141.2$

达西单位制：　　$C_{33}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

24. 无量纲时间（双重孔隙介质模型）

$$t_{Df+m}=\frac{C_{34}K_f}{(V\phi C_t)_{f+m}\mu r_w^2}t_{f+m} \tag{4-3}$$

$$t_{Df}=\frac{C_{34}K_f}{(V\phi C_t)_f\mu r_w^2}\cdot t_f \tag{4-4}$$

法定计量单位制：　　$C_{34}=3.6$

常用工程单位制：　　$C_{34}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　　$C_{34}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{34}=1$

25. 井筒储集系数（双重孔隙介质模型）

$$C_{Df+m}=\frac{C}{C_{35}(V\phi C_t)_{f+m}hr_w^2} \tag{4-5}$$

$$C_{Df}=\frac{C}{C_{35}(V\phi C_t)_f hr_w^2} \tag{4-6}$$

法定计量单位制：　　$C_{35}=2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{35}=2\pi$

英制：　　$C_{35}=1.1191=\frac{1}{0.8936}$

达西单位制：　　$C_{35}=2\pi$

26. 流动系数、渗透率（双重孔隙介质）

$$\frac{K_f h}{\mu}=C_{36}qB\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{4-7}$$

$$K_f=C_{36}\frac{qB\mu}{h}\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{拟合} \tag{4-8}$$

法定计量单位制：　　$C_{36}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{36}=19.033$

英制：　　$C_{36}=141.2$

达西单位制：　　$C_{36}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

27. 井筒储集系数（双重孔隙介质）

$$C=\frac{C_{37}K_f h}{\mu\left(\frac{t_D/C_D}{t}\right)_{拟合}} \tag{4-9}$$

法定计量单位制：　　$C_{37}=7.2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{37}=2.1892\times10^{-3}$

英制：　　$C_{37}=2.954\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{37}=2\pi$

28. 无限导流性垂直裂缝线性流动阶段压力

$$\Delta p=\frac{C_{38}qB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}}\cdot\sqrt{t} \tag{5-2}$$

法定计量单位制：　　$C_{38}=6.195\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{38}=0.6297$

英制：　　$C_{38}=4.0641$

达西单位制：　　$C_{38}=\dfrac{1}{2\sqrt{\pi}}=0.2821$

29. 斜率 m'' 和无限导流性垂直裂缝半长

$$m''=\frac{C_{39}qB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}} \tag{5-4}$$

$$x_f=\frac{C_{39}qB}{m''h}\sqrt{\frac{\mu}{\phi C_t K}} \tag{5-5}$$

法定计量单位制：　　$C_{39}=6.195\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{39}=0.6297$

英制：　　$C_{39}=4.0641$

达西单位制：　　$C_{39}=\dfrac{1}{2\sqrt{\pi}}=0.2821$

30. 无量纲井筒储集系数（无限导流性裂缝井）

$$C_{Df}=\frac{C}{C_{40}\phi C_t h x_f^2} \tag{5-9}$$

法定计量单位制：　　$C_{40}=2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{40}=2\pi$

英制：　　$C_{40}=1.1191=\dfrac{1}{0.8936}$

达西单位制：　　$C_{40}=2\pi$

31. 有限导流性垂直裂缝双线性流动阶段压力

$$\Delta p=\frac{C_{41}q\mu B}{h\sqrt{K_f w}\sqrt[4]{\phi\mu C_t K}}\sqrt[4]{t} \tag{5-14}$$

法定计量单位制：　　$C_{41}=6.2163\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{41}=6.3709$

英制：　　$C_{41}=44.084$

达西单位制：　　$C_{41}=0.3900$

32. $K_f w$（有限导流性垂直裂缝）

$$K_f w=\frac{C_{42}}{\sqrt{\phi\mu C_t K}}\left(\frac{q\mu B}{hm''}\right)^2 \tag{5-16}$$

法定计量单位制：　　$C_{42}=3.8642\times10^{-5}$

常用工程单位制：　　$C_{42}=40.588$

英制：　　$C_{42}=1943.38$

达西单位制：　　$C_{42}=0.15205$

33. 无限导流性垂直裂缝井情形的流动系数、地层系数和渗透率（导致图版拟合计算）

$$\frac{Kh}{\mu}=C_{43}qB\left(\frac{p'_{D}\cdot t_{Df}}{\Delta p'\cdot t}\right)_{拟合}$$

$$Kh=C_{43}q\mu B\left(\frac{p'_{D}\cdot t_{Df}}{\Delta p'\cdot t}\right)_{拟合}$$

$$K=C_{43}\frac{q\mu B}{h}\left(\frac{p'_{D}\cdot t_{Df}}{\Delta p'\cdot t}\right)_{拟合}$$

法定计量单位制：　　$C_{43}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{43}=19.033$

英制：　　$C_{43}=141.2$

达西单位制：　　$C_{43}=\dfrac{1}{2\pi}=0.1592$

34. 无限导流性垂直裂缝半长（图版拟合计算）

$$x_f=\sqrt{\frac{C_{44}K}{\phi\mu C_t}\frac{1}{\left(\frac{t_{Df}}{t}\right)_{拟合}}}$$

法定计量单位制：　　$C_{44}=3.6$

常用工程单位制：　　$C_{44}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　　$C_{44}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{44}=1$

35. 无限导流性垂直裂缝井井筒储集系数（图版拟合计算）

$$C=C_{45}\phi C_t h x_f^2(C_{Df})_{拟合}$$

法定计量单位制：　　$C_{45}=2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{45}=2\pi$

英制：　　$C_{45}=1.1191=\dfrac{1}{0.8936}$

达西单位制：　　$C_{45}=2\pi$

36. 无量纲压力（双重渗透介质模型）

$$p_D=\frac{K_1h_1+K_2h_2}{C_{46}q\mu B}\Delta p \tag{6-1}$$

法定计量单位制：　　$C_{46}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{46}=19.033$

英制：　　$C_{46}=141.2$

达西单位制：　　$C_{46}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

37. 无量纲时间（双重渗透介质模型）

$$t_D = C_{47}\frac{(K_1h_1+K_2h_2)t}{[(\phi C_t h)_1+(\phi C_t h)_2]\mu r_w^2} \tag{6-2}$$

法定计量单位制：　　$C_{47}=3.6$

常用工程单位制：　　$C_{47}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　　$C_{47}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{47}=1$

38. 无量纲井筒储集系数（双重渗透介质模型）

$$C_{D1} = \frac{C}{C_{45}(\phi C_t h)_1 r_w^2} \tag{6-3}$$

$$C_{D2} = \frac{C}{C_{45}(\phi C_t h)_2 r_w^2} \tag{6-4}$$

$$C_D = \frac{C}{C_{45}[(\phi C_t h)_1+(\phi C_t h)_2] r_w^2} \tag{6-5}$$

法定计量单位制：　　$C_{45}=2\pi$

常用工程单位制：　　$C_{45}=2\pi$

英制：　　$C_{45}=1.1191=\frac{1}{0.8936}$

达西单位制：　　$C_{45}=2\pi$

39. 无量纲压力（水平井模型）

$$p_{DL} = \frac{\sqrt{K_H K_V}L}{C_{46}q\mu B}\Delta p \tag{7-1}$$

$$p_{Dh} = \frac{K_H h}{C_{46}q\mu B}\Delta p \tag{7-1'}$$

法定计量单位制：　　$C_{46}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　　$C_{46}=19.033$

英制：　　$C_{46}=141.2$

达西单位制：　　$C_{46}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

40. 无量纲时间（水平井模型）

$$t_D = \frac{C_{48}K_V t}{\phi\mu C_t h^2} \tag{7-2}$$

$$K_V = \frac{\phi\mu C_t h^2}{C_{48}}\left[\frac{t_D}{t}\right]_{拟合} \tag{7-4}$$

法定计量单位制：　$C_{48}=3.6$

常用工程单位制：　$C_{48}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　$C_{48}=2.637\times10^{-4}$

达西单位制：　$C_{48}=1$

41. $\sqrt{K_H K_V}$（水平井初始径向流动段）

$$\sqrt{K_H K_V} = \frac{C_{49} q\mu B}{m_1 L} \tag{7-7}$$

$$K_H = \frac{C_{49} q\mu B}{m_2 h} \tag{7-8}$$

法定计量单位制：　$C_{49}=2.121\times10^{-3}$

常用工程单位制：　$C_{49}=21.91$

英制：　$C_{49}=162.6$

达西单位制：　$C_{49}=0.1832$

42. 表皮系数（水平井情形）

$$S = 1.151\left(\frac{\Delta p_{1h}}{m_2} - \lg\frac{K_H}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{50}\right) \tag{7-9}$$

法定计量单位制：　$C_{50}=-0.9077$

常用工程单位制：　$C_{50}=3.106$

英制：　$C_{50}=3.2275$

达西单位制：　$C_{50}=-0.3514$

43. 渗透率（水平井，图版拟合计算）

$$\sqrt{K_V K_H} = \frac{C_{51} q\mu B}{L}\left[\frac{p'_D \cdot t_D/C_D}{\Delta p \cdot t}\right]_{拟合} \tag{7-3}$$

$$K_H = \frac{C_{51} q\mu B}{h}\left[\frac{p'_D \cdot t_D/C_D}{\Delta p \cdot t}\right]_{拟合} \tag{7-6}$$

法定计量单位制：　$C_{51}=1.842\times10^{-3}$

常用工程单位制：　$C_{51}=19.033$

英制：　$C_{51}=141.2$

达西单位制：　$C_{51}=\frac{1}{2\pi}=0.1592$

44. 气井无量纲压力（拟压力形式）

$$p_D = C_{52}\frac{Kh}{q_g}\frac{T_{sc}}{T_f p_{sc}}\Delta\psi = C_{53}\frac{Kh}{q_g T_f}\Delta\psi \tag{8-2}$$

法定计量单位制：$C_{52}=2.7143\times10^{-2}$

$C_{53}=78.489$

常用工程单位制：$C_{52}=2.627\times10^{-6}$

$C_{53}=7.4534\times10^{-4}$

英制：$C_{52}=\frac{1}{50300}=1.9881\times10^{-5}$

$C_{53}=7.0346\times10^{-4}$

达西单位制：$C_{52}=\pi$

$C_{53}=858.13$

45. 气层渗透率（用拟压力拟合时）

$$K = \frac{q_g T_f}{C_{54}h}\left(\frac{p_D}{\Delta\psi}\right)_{拟合} \tag{8-3}$$

$$K = \frac{q_g T_f}{C_{54}h}\left(\frac{p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\psi}{dt}\cdot t}\right)_{拟合} \tag{8-8}$$

$$K = \frac{q_g T_f}{C_{54}h}\left(\frac{p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\psi}{d(\Delta t)}\frac{t_p+\Delta t}{t_p}\cdot\Delta t}\right)_{拟合} \tag{8-9}$$

法定计量单位制：$C_{54}=78.489$

常用工程单位制：$C_{54}=7.4534\times10^{-4}$

英制：$C_{54}=7.0346\times10^{-4}$

达西单位制：$C_{54}=858.13$

46. 气井压降方程和压力恢复方程（拟压力形式）

$$\psi(p_{wf}) = \psi(p_i) - C_{55}\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{56} + 0.8686S_a\right) \tag{8-10}$$

$$\psi(p_{ws}) = \psi(p_i) - C_{55}\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{8-11}$$

$$\psi(p_{ws}) = \psi(p_{wf}) + C_{55}\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_g T_f}{Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{56} + 0.8686S_a\right) \tag{8-12}$$

法定计量单位制：$C_{55}=42.42$

$C_{56}=0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{55}=4.383\times10^{5}$

$C_{56}=-3.106$

英制：　　$C_{55}=5.792\times10^{4}$

$C_{56}=-3.2275$

达西单位制：　　$C_{55}=0.3665$

$C_{56}=0.3514$

47. 气层渗透率（由拟压力半对数直线段斜率计算）

$$K=C_{57}\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\frac{q_gT_f}{mh}=C_{58}\frac{qT_f}{mh} \tag{8-13}$$

法定计量单位制：　　$C_{57}=42.42$

$C_{58}=0.01467$

常用工程单位制：　　$C_{57}=4.383\times10^{5}$

$C_{58}=1545$

英制：　　$C_{57}=5.792\times10^{4}$

$C_{58}=1637$

达西单位制：　　$C_{57}=0.3665$

$C_{58}=1.342\times10^{-3}$

48. 拟表皮系数（由拟压力半对数直线段斜率计算）

$$S_a=\begin{cases}1.151\left\{\dfrac{\psi(p_i)-\psi[p_{wf}(1h)]}{m}-\lg\dfrac{K}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{59}\right\}\\[2ex]1.151\left\{\dfrac{\psi[p_{ws}(1h)]-\psi(p_{wf})}{m}-\lg\dfrac{K}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{59}\right\}\end{cases} \tag{8-14}$$

法定计量单位制：　　$C_{59}=-0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{59}=3.106$

英制：　　$C_{59}=3.2275$

达西单位制：　　$C_{59}=-0.3514$

49. 气井压降方程和压力恢复方程（压力平方形式）

$$p_{wf}^2=p_i^2-C_{60}\frac{\bar{\mu}\,\bar{z}\,p_{sc}q_gT_f}{T_{sc}Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{61}+0.8686S_a\right) \tag{8-10'}$$

$$p_{ws}^2=p_i^2-C_{60}\frac{\bar{\mu}\,\bar{z}\,p_{sc}q_gT_f}{T_{sc}Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{8-11'}$$

$$p_{ws}^2=p_{wf}^2+C_{60}\frac{\bar{\mu}\,\bar{z}\,p_{sc}q_gT_f}{T_{sc}Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_tr_w^2}+C_{61}+0.8686S_a\right) \tag{8-12'}$$

法定计量单位制：　　$C_{60}=42.42$

　　$C_{61}=0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{60}=4.383\times10^{5}$

　　$C_{61}=-3.106$

英制：　　$C_{60}=5.792\times10^{4}$

　　$C_{61}=-3.2275$

达西单位制：　　$C_{60}=0.3665$

　　$C_{61}=0.3514$

50. 气层渗透率（由压力平方半对数直线段斜率计算）

$$K = C_{62}\frac{\bar{\mu}\,\bar{z}\,p_{sc}q_gT_f}{mT_{sc}h} = C_{63}\frac{\bar{\mu}\,\bar{z}\,qT_f}{mh} \qquad (8-13')$$

法定计量单位制：　　$C_{62}=42.42$

　　$C_{63}=1.467\times10^{-2}$

常用工程单位制：　　$C_{62}=4.383\times10^{5}$

　　$C_{63}=1545$

英制：　　$C_{62}=5.792\times10^{4}$

　　$C_{63}=1637$

达西单位制：　　$C_{62}=0.3665$

　　$C_{63}=1.342\times10^{-3}$

51. 拟表皮系数（由压力平方半对数直线段斜率计算）

$$S_a = 1.151\left[\frac{p_i^2-p_{wf}^2(1h)}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{64}\right] \qquad (8-14')$$

$$S_a = 1.151\left[\frac{p_{ws}^2(1h)-p_{wf}^2}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{64}\right] \qquad (8-14')$$

法定计量单位制：　　$C_{64}=-0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{64}=3.106$

英制：　　$C_{64}=3.2275$

达西单位制：　　$C_{64}=-0.3514$

52. 气井无量纲压力（压力平方形式）

$$p_D = C_{65}\frac{Kh}{q_g\bar{\mu}\,\bar{z}}\frac{T_{sc}}{T_f p_{sc}}\Delta(p^2) = C_{66}\frac{Kh}{q_g\bar{\mu}\,\bar{z}\,T_f}\Delta(p^2) \qquad (8-2')$$

法定计量单位制：　　$C_{65}=2.7143\times10^{-2}$

　　$C_{66}=78.489$

常用工程单位制：　　$C_{65}=2.627\times10^{-6}$

$$C_{66}=7.4534\times10^{-4}$$

英制：

$$C_{65}=\frac{1}{50300}=1.9881\times10^{-5}$$

$$C_{66}=7.0346\times10^{-4}$$

达西单位制：

$$C_{65}=\pi$$

$$C_{66}=858.13$$

53. 气层渗透率（用压力平方拟合时）

$$K=\frac{q_g\bar{\mu}\,\bar{z}\,T_f}{C_{67}h}\left[\frac{p_D}{\Delta(p^2)}\right]_{拟合} \tag{8-3'}$$

$$K=\frac{q_g\bar{\mu}\,\bar{z}\,T_f}{C_{67}h}\left[\frac{p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\Delta(p^2)}{dt}\cdot t}\right]_{拟合} \tag{8-8'}$$

$$K=\frac{q_g\bar{\mu}\,\bar{z}\,T_f}{C_{67}h}\left[\frac{p'_D\cdot\frac{t_D}{C_D}}{\frac{d\Delta(p^2)}{d\Delta t}\cdot\frac{t_p+\Delta t}{t_p}\cdot\Delta t}\right]_{拟合} \tag{8-9'}$$

法定计量单位制：

$$C_{67}=78.489$$

常用工程单位制：

$$C_{67}=7.4534\times10^{-4}$$

英制：

$$C_{67}=7.0346\times10^{-4}$$

达西单位制：

$$C_{67}=858.13$$

54. 气井压降方程和压力恢复方程（压力形式）

$$p_{wf}=p_i-C_{68}\frac{\mu_i z_i p_{sc} q_g T_f}{p_i T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{Kt}{\phi\mu C_t r_w^2}+C_{69}+0.8686S_a\right) \tag{8-10''}$$

$$p_{wf}=p_i-C_{68}\frac{\mu_i z_i p_{sc} q_g T_f}{p_i T_{sc} Kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{8-11''}$$

$$p_{ws}=p_{wf}+C_{68}\frac{\mu_i z_i p_{sc} q_g T_f}{p_i T_{sc} Kh}\left(\lg\frac{K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2}+C_{69}+0.8686S_a\right) \tag{8-12''}$$

法定计量单位制：

$$C_{68}=21.21$$

$$C_{69}=0.9077$$

常用工程单位制：

$$C_{68}=2.192\times10^5$$

$$C_{69}=-3.106$$

英制：

$$C_{68}=2.896\times10^4$$

$$C_{69}=-3.2275$$

达西单位制：

$$C_{68}=0.1833$$

$$C_{69}=0.3514$$

55. 气层渗透率（由压力半对数直线段斜率计算）

$$K = C_{70}\frac{\mu_i z_i}{p_i}\frac{p_{sc}q_g T_f}{T_{sc}mh} = C_{71}\frac{\mu_i z_i q_g T_f}{p_i mh} \qquad (8-13'')$$

法定计量单位制：$C_{70}=21.21$

$C_{71}=7.335\times10^{-3}$

常用工程单位制：$C_{70}=2.192\times10^{5}$

$C_{71}=773.0$

英制：$C_{70}=2.896\times10^{4}$

$C_{71}=818.4$

达西单位制：$C_{70}=0.1833$

$C_{71}=6.709\times10^{-4}$

56. 拟表皮系数（由压力半对数直线段斜率计算）

$$S_a = 1.151\left[\frac{p_i - p_{wf}(1h)}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{72}\right] \qquad (8-14'')$$

$$S_a = 1.151\left[\frac{p_{ws}(1h) - p_{wf}}{m} - \lg\frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + C_{72}\right] \qquad (8-14'')$$

法定计量单位制：$C_{72}=-0.9077$

常用工程单位制：$C_{72}=3.106$

英制：$C_{72}=3.2275$

达西单位制：$C_{72}=-0.3514$

57. 无量纲压力（压力形式）

$$p_D = C_{73}\frac{Kh}{q_g}\frac{T_{sc}}{T_f}\frac{p_i}{\mu_i z_i}\frac{\Delta p}{p_{sc}} = C_{74}\frac{Kh}{q_g T_f}\frac{p_i}{\mu_i z_i}\Delta p \qquad (8-2'')$$

法定计量单位制：$C_{73}=5.4286\times10^{-2}$

$C_{74}=157$

常用工程单位制：$C_{73}=5.2541\times10^{-6}$

$C_{74}=1.491\times10^{-3}$

英制：$C_{73}=3.9762\times10^{-3}$

$C_{74}=1.4069\times10^{-3}$

达西单位制：$C_{73}=2\pi$

$C_{74}=1716$

58. 气层渗透率（用压力拟合时）

$$K = \frac{q_g \mu_i z_i T_f}{C_{75} p_i h} \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_{拟合} \tag{8-3''}$$

$$K = \frac{q_g \mu_i z_i T_f}{C_{75} p_i h} \left[\frac{p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\frac{d(\Delta p)}{dt} \cdot t} \right]_{拟合} \tag{8-8''}$$

$$K = \frac{q_g \mu_i z_i T_f}{C_{75} p_i h} \left[\frac{p'_D \cdot \frac{t_D}{C_D}}{\frac{d(\Delta p)}{d(\Delta t)} \cdot \frac{t_p + \Delta t}{t_p} \cdot \Delta t} \right]_{拟合} \tag{8-9''}$$

法定计量单位制：　$C_{75} = 157$

常用工程单位制：　$C_{75} = 1.491 \times 10^{-3}$

英制：　$C_{75} = 1.4069 \times 10^{-3}$

达西单位制：　$C_{75} = 1716$

59. 导压系数（由干扰试验曲线极值点计算）

$$\eta = \frac{r^2 t_p}{C_{76} t_m (t_m - t_p) \ln[t_m/(t_m - t_p)]} \tag{9-2}$$

$$\eta = \frac{r^2 T_1}{C_{76} t'_m (t'_m - T_1) \ln[\alpha t_m/(t_m - T_1)]} \tag{9-3}$$

法定计量单位制：　$C_{76} = 14.4$

常用工程单位制：　$C_{76} = 1.394 \times 10^{-3}$

英制：　$C_{76} = 1.0547 \times 10^{-3}$

达西单位制：　$C_{76} = 4$

$$\eta = \frac{r^2 t_p}{C_{77} t_m (t_m - t_p) \lg[t_m/(t_m - t_p)]} \tag{9-4}$$

$$\eta = \frac{r^2 T_1}{C_{77} t'_m (t'_m - T_1) \lg[\alpha t'_m/(t'_m - T_1)]} \tag{9-5}$$

法定计量单位制：　$C_{77} = 33.16$

常用工程单位制：　$C_{77} = 3.2098 \times 10^{-3}$

英制：　$C_{77} = 2.4285 \times 10^{-3}$

达西单位制：　$C_{77} = 9.2103$

60. $\phi h C_t$（干扰试验图版拟合计算）

$$\phi h C_t = C_{78} \frac{Kh}{\mu r^2 \left(\frac{t_D/r_D^2}{t} \right)_{拟合}} \tag{9-6}$$

法定计量单位制：　　$C_{78}=3.6$

常用工程单位制：　　$C_{78}=3.4842\times10^{-4}$

英制：　　$C_{78}=2.6368\times10^{-4}$

达西单位制：　　$C_{78}=1$

61. ϕhC_t（由干扰试验半对数直线段斜率计算）

$$\phi hC_t=\frac{Kh}{\mu r^2}10^{C_{79}-\frac{\Delta p_{1h}}{m}} \tag{9-7}$$

法定计量单位制：　　$C_{79}=0.9077$

常用工程单位制：　　$C_{79}=-3.106$

英制：　　$C_{79}=-3.2275$

达西单位制：　　$C_{79}=0.3514$

附录 3　单位换算系数表

1. 长度单位换算系数表

项　目	m	cm	ft
1 米（m）	1	100	3.28084
1 厘米（cm）	0.01	1	3.28084×10^{-2}
1 英尺（ft）	0.3048	30.48	1

2. 面积单位换算系数表

项　目	m^2	cm^2	ft^2
1 平方米（m^2）	1	10^4	10.7639
1 平方厘米（cm^2）	10^{-4}	1	1.07639×10^{-3}
1 平方英尺（ft^2）	0.092903	929.03	1

3. 体积、容积单位换算系数表

项　目	m^3	cm^3	ft^3	bbl
1 立方米（m^3）	1	10^6	35.3147	6.28978
1 立方厘米（cm^3）	10^{-6}	1	3.53147×10^{-5}	6.28978×10^{-6}
1 立方英尺（ft^3 或 CF）	0.0283168	2.83168×10^4	1	0.17811
1 桶（bbl）	0.158988	1.58988×10^5	5.6146	1

4. 压力单位换算系数表

项　目	MPa	atm	kg/cm^2	psi
1 兆帕（斯卡）（MPa）	1	9.86923	10.1972	145.038
1 标准大气压（atm）	0.101325	1	1.03323	14.6959
1 公斤每平方厘米（kg/cm^2）	0.0980665	0.967841	1	14.2233
1 磅每平方英寸（psi）	0.00689476	0.068046	0.070307	1

5. 温度单位换算系数表

项　目	℃	K	℉	℟
t 摄氏度（℃）	t	$t+273.15$	$\frac{9}{5}\cdot t+32$	$\frac{9}{5}\cdot t+491.67$

续表

项　目	℃	K	℉	℟
T 开（尔文）（K）	$T-273.15$	T	$\frac{9}{5}\cdot T-459.67$	$\frac{9}{5}\cdot T$
f 华氏度（℉）	$\frac{5}{9}\cdot(f-32)$	$\frac{5}{9}(f+459.67)$	f	$f+459.67$
r 兰氏度（℟）	$\frac{5}{9}\cdot r-273.15$	$\frac{5}{9}\cdot r$	$r-459.67$	r

6. 油井产量单位换算系数表

项　目	m^3/d	cm^3/s	bbl/d
1 立方米每天（m^3/d）	1	$\frac{10^4}{864}$	6.28978
1 立方厘米每秒（cm^3/s）	0.0864	1	0.543437
1 桶每天（bbl/d）	0.158988	1.84014	1

7. 气井产量单位换算系数表

项　目	$10^4m^3/d$	cm^3/s	$10^3ft^3/d$
1 万立方米每天（$10^4m^3/d$）	1	$\frac{10^8}{864}$	353.147
1 立方厘米每秒（cm^3/s）	864×10^{-8}	1	3.05119×10^{-3}
1 千立方英尺每天（MCF/d）	2.83168×10^{-4}	327.741	1

8. 密度单位换算系数表

项　目	g/cm^3	lb/ft^3
1 克每立方厘米（g/cm^3）	1	62.428
1 磅每立方英尺（lb/ft^3）	0.0160185	1

9. 渗透率单位换算系数表

项　目	μm^2	D	mD
1 二次方微米（μm^2）	1	1.01325	1013.25
1 达西（D）	0.986923	1	1000
1 毫达西（mD）	9.86923×10^{-4}	0.001	1

10. 粘度单位换算表

项　目	mPa·s	cP
1 毫帕秒（mPa·s）	1	1
1 厘泊（cP）	1	1

附录 4　公式的单位变换

我们常常要把某一单位制下的公式变换成另一单位制下的公式。在进行变换时，要把公式中每一个物理量从原单位化成新单位。这里通过一个实例说明变换的方法。

在达西单位制下，由压力恢复曲线斜率及其他参数计算渗透率的公式是

$$K = \frac{2.302585q\mu B}{4\pi mh} \qquad \text{(附录 4 - 1)}$$

现在要把它变换成法定计量单位制下的公式。

式（附录 4－1）是在原单位制（达西单位制）下成立的，即其中所有物理量都必须使用原单位：渗透率用 D；产量用 cm^3/s；粘度用 cP；斜率用 atm/对数周期；厚度用 cm；体积系数则是 cm^3/cm^3，相当于无量纲量。

在新单位（法定计量单位制）下，设渗透率为 K（μm^2），产量为 q（m^3/d），粘度为 μ（mPa·s），斜率为 m（MPa/对数周期），厚度为 h（m），体积系数为 $B m^3/m^3$（相当于无量纲）。显然，要使式（附录 4－1）成立，这些量必须统统化成原单位：

$$K(\mu m^2) = 1.01325K(\mathrm{D})$$

$$q(m^3/d) = \frac{10^6 q}{86400}(cm^3/s)$$

$$\mu(\mathrm{mPa \cdot s}) = \mu(\mathrm{cP})$$

$$B(m^3/m^3) = B(cm^3/cm^3)$$

$$m(\text{MPa/对数周期}) = 9.86923m(\text{atm/对数周期})$$

$$h(\mathrm{m}) = 100h(\mathrm{cm})$$

然后把它们代入式（附录 4－1），得

$$(1.01325K) = \frac{2.302585 \times \left(\frac{10^6}{86400}q\right) \cdot \mu \cdot B}{4\pi(9.86923m) \times (100h)} \qquad \text{(附录 4 - 2)}$$

化简得

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh} \qquad \text{(附录 4 - 3)}$$

式（附录 4－2）和式（附录 4－3）中的各个物理量都是用的新单位。这就是说，式

(附录 4－3) 在各物理量取新单位时成立。也就是说，它就是在新单位制下的公式。

公式单位变换的具体做法可以归纳如下：

1. 列出公式中所有物理量的原单位和新单位，以及它们之间的关系。原单位和新单位之间的关系指的是把新单位表成原单位，即以“1 新单位＝？原单位”的形式表示的关系式。如在本例中，可列出下表：

物 理 量	原 单 位	新 单 位	单位之间的关系
K	D	μm^2	$1\mu m^2 = 1.01325D$
q	cm^3/s	m^3/d	$1m^3/d = \frac{10^6}{86400} cm^3/s$
μ	cP	mPa·s	1mPa·s＝1cP
B	cm^3/cm^3	m^3/m^3	$1m^3/m^3 = 1cm^3/cm^3$
m	atm/对数周期	MPa/对数周期	1MPa/cycle＝9.86923atm/对数周期
h	cm	m	1m＝100cm

2. 在原公式中保持所有的常系数不变，并将每一个物理量乘以其新单位化成原单位的换算系数。如在本例中，保持公式中的 2.302585 和 4π 不变，K 乘以 1.01325，q 乘以 $\frac{10^6}{86400}$，m 乘以 9.86923，h 乘以 100，μ 乘以 1（即保持不变）。无量纲量应保留不变。见式（附录 4－2）。

3. 整理化简，就得到新单位制下的公式。

[1] [美] C.S. 马修斯编著．李祐佑等译．油层压力恢复和油气井测试．北京：石油工业出版社，1983
[2] [美] 小罗伯特 C. 厄洛赫，栾志安等译．试井分析方法．北京：石油工业出版社，1985
[3] 童宪章编著．压力恢复曲线在油、气田开发中的应用．北京：石油工业出版社，1983
[4]《中国油气井测试资料解释范例》编写组编．中国油气井测试资料解释范例．北京：石油工业出版社，1994
[5] Schlumberger Wireline & Testing. Modern Reservoir Testing. 1994
[6] 朱亚东．球形流试井分析方法．油气井测试，26～33，1990 (3)
[7] A. C. Gringarten, D. Bourdet, P. A. Landel, V. Kniazeff. A Comparison Between Different Skin and Wellbore Storage Type－Curves for Early Time Transient Analysis. SPE 8205
[8] D. Bourdet, A. C. Gringarten. Determination of Fissure Volume and Block Size in Fractured Reservoirs. SPE 9293
[9] J. E. Warren, P. J. Root. The Behaviour of Naturally Fractured Reservoirs. SPEJ, 1963 (9)
[10] A. C. Gringarten. Interpretation of Tests in Fissured Reservoirs and Multilayered Reservoirs with Double Porosity Behaviour: Theory and Practice. SPE 10044
[11] R. Agarwal et al.. An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: Analytical Treatment. SPEJ, 1970 (9)
[12] R. M. Mckinley. Wellbore Transmissibility from Afterflow－Dominated Pressure Build－up Data. JPT, 1971 (7)
[13] R. C. Earlougher, K. M. Kerch. Analysis of Short－Time Transient Test Data by Type－Curve Matching. JPT, 1974 (7)
[14] H. Cinco et al.. Transient Pressure Behaviour for a Well with a Finite Conductivity Vertical Fracture. SPEJ, 1978 (8)
[15] A. C. Gringarten et al.. Applied Pressure Analysis for Fractured Wells. JPT, 1975 (7)
[16] A. C. Gringarten. Reservoir Limit Testing for Fractured Wells. SPE 7452
[17] D. Bourdet, J. A. Ayoub, Y. M. Pirard, Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation. SPE 12777
[18] D. Bourdet, T. M. Whittle, A. A. Douglas, Y. M. Pirard. A New Set of Type－Curves Simplified Well Test Analysis. World Oil, 1983 (5)
[19] D. Bourdet, J. A. Ayoub, T. M. Whittle, Y. M. Pirard, V. Kniazeff. Interpreting Well Tests in Fractured Reservoirs. World Oil, 1983 (10)
[20] D. Bourdet, A. Alagoa, J. A. Ayoub, Y. M. Pirard. New Type－Curves Aid Analysis of Fissured Zone Well Tests. World Oil, 1984 (4)
[21] B. G. Derugck et al.. Interpretation of Interference Tests in Reservoirs with Double Porosity Behavior: Theory and Field Examples. SPE 11025
[22] E. Ozkan, R. Raghavan, S. D. Joshi. Horizontal Well Pressure Analysis. SPE 16378
[23] D. Bourdet. Pressure Behavior of Layer Reservoirs with Crossflow. SPE 13628