

QICANG DONGTAI MIAOSHU HE SHIJING

气藏动态描述和试井

庄惠农 编著

石油工业出版社

气藏动态描述和试井

庄惠农 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从储层动态描述的新视角,讲述如何应用试井资料研究油气藏研究储层,把动态分析工作提升到一个新的层次。在书中不但讲解了试井的基本理论,还以“图形分析”为基本手段,讲解不同类型储层的流动特征,使试井分析更加形象化、实用化。书中还以中国近10年来气田动态研究中的大量的计算机软件分析实例,验证了气藏动态描述的应用。

本书实用性强,可供从事油气田开发、油气藏工程等专业的工程技术人员及油田管理人员学习参考,也可用于石油大专院校相关专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气藏动态描述和试井/庄惠农编著.

北京:石油工业出版社,2004.4

ISBN 7-5021-4546-X

I. 气…

II. 庄…

III. 气田动态-分析

IV. TE3

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第002917号

气藏动态描述和试井

庄惠农编著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004年4月第1版 2004年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:23.5

字数:595千字 印数:1—1500册

书号:ISBN 7-5021-4546-X/TE·3182

定价:66.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

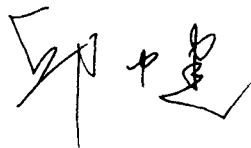
版权所有,翻印必究

序 言

本书作者庄惠农 1962 年毕业于北京大学，学习的专业是航空空气动力学。当时正值大庆油田发现、我国石油工业蓬勃发展的形势下，作者毕业后被分配到大庆油田，随即投身于油气田勘探开发的行列之中，并在童宪章院士等老一辈专家的感召下，开始研究石油试井。多年来持之以恒，锲而不舍，在专业领域取得了可喜的成绩。从天上到地下，变化不可谓不大。以学校中扎实的理论训练为基础，加上在现场取得的实践知识，终于结出了丰硕的果实。

本书从新的视角——“储层动态描述”来看待试井研究，把动态分析工作提升到一个新的层次。作者长期以来工作在油田现场，坚持理论联系实际。到中国石油勘探开发研究院工作以后，积极投入到我国大中型气田开发过程的研究中。特别是近 10 年来，在对靖边气田、克拉 2 气田、千米桥气田、苏里格气田等多个气田试井资料分析研究中，提出了许多仅从静态地质资料未能认识到的气田重要特征，为推动这些气田合理开发做出了贡献。这些珍贵的资料和经验融入本书，将对今后的油气田开发提供很好的借鉴。

该书涉及油气藏动态研究及现代试井分析的各个方面，是一本指导和规范油气田动态研究，特别是气藏动态研究的有实用价值的好书。



2003 年 9 月

前 言

用试井方法，或者说用动态分析方法评价一个油气层，早在 20 世纪 40 年代就已在外国得到了应用。在我国，老一代的试井专家童宪章院士于 1960 年曾带领工作组亲临大庆油田现场，用外国发明不久的“赫诺方法”分析早期勘探井的测压资料，准确计算了储层的原始压力、渗透率、表皮系数等参数，开辟了我国油气田试井研究的先河。

作者本人 1962 年毕业后来到大庆，被老一辈专家的科学精神所感动，把自少年时代即萌生的献身航空事业的梦想，落实到了地下渗流研究，并转而做起了地下渗流研究中最接近油田实际的试井，不想一做就是 40 年。这 40 年不知爬了多少次井口，读了多少张测压卡片，作了多少口井的试井分析，也不知走了多少路。但终于有一天，悟出了一个简单的道理，所有这一切忙碌，就是要在地质研究以外，能够对油气储层另作一番描述，发现那些地质家们用静态方法看不到的东西，这就是本书名称的前半部分——“气藏动态描述”的由来。

40 年来试井本身也发生了很大的变化，从简单的压力恢复曲线分析，发展成了目前的“现代试井”。生产了高精度的电子压力计，发表了大量的理论研究成果，开发了完善的试井解释软件，从而形成了从动态角度描述储层的新的理念，而且在认识油气储层方面屡试不爽。

天然气藏的勘探开发与油藏有所不同，天然气的开发强调上下游一体化，早期的评价研究更突显其重要性，对动态描述的需求也更迫切。作者近 10 年来一直参与其中，体会也就更为深切。通过动态描述把气藏内部地质结构了解清楚了，开发的效益就会更好一些，否则将会给下一步的开发工作埋下隐患。

本书介绍的内容，大多是作者本人 40 年来对试井方法的解读和参与现场试井工作的体会。特别那些用来验证理论模型的现场实例，大多是作者本人实地参与录取和分析的。像早年在胜利油田录取的干扰试井和脉冲试井实例，20 世纪 90 年代靖边气田试采井的动态资料分析研究，近年来克拉 2 气田勘探和开发准备工作中的动态描述研究，鄂尔多斯盆地上古生界气藏的试采井动态模型评价研究，都是作者本人学习试井、理解试井的最好的课堂。

在编写这本书的过程中，得到了各方面的热情支持和帮助。油气田勘探开

发方面老一辈的专家王乃举、沈平平、孟慕尧、潘兴国、朱亚东、刘能强、陈元千、袁庆丰等，都耐心地给予指点，帮助改正了初稿中的许多不妥之处。中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司的李海平副总工程师及中国石油长庆油田分公司的老领导金忠臣同志（原副总经理）、闵祺总地质师和塔里木油田的张福祥、长庆油田的谭中国等许许多多同志，帮助提供并完善了相关实例，在此一并表示感谢。这里还要感谢我所在的中国石油勘探开发研究院廊坊分院，感谢李文阳院长，正是他努力构建的科学研究氛围，使我在晚年得以发挥余热，在为油气田开发研究尽力做出贡献的同时，产生了写作这本书的决心和构想。另外还要特别提到的是，近十年来，作者本人所参与的有关气藏试井方面的研究工作，大都是由韩永新博士协助共同完成的，在针对靖边气田、克拉 2 气田、千米桥气田、苏里格气田、和田河气田、涩北气田等大中型气田的研究工作中，在解读气藏特征的同时，共同形成了新的理念。在此深表谢意。

这里还要说到的是，作者 40 年来仅仅就作了这么一件小事。在回顾以往、总结过去，把切身体会融入本书的过程中，不由得时时想起培育过我的各位老师，是他们教给我做学问时要实事求是、谨慎求证，处世时要诚信待人。虽然这些老师大多已过世，但我仍然以此微薄的成果奉献给他们。

最后还要感谢我的家人，我的夫人石彩云审阅了初稿的全部文字，并把它们转化成电子版文档，帮助我跨越了晚年这个小小的台阶。

作者

2003 年 8 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 编写这本书的宗旨.....	(1)
第二节 气田研究中试井所发挥的作用.....	(2)
一、气田勘探阶段.....	(2)
二、气田开发准备阶段.....	(6)
三、气田开发阶段.....	(8)
第三节 试井研究中的关键环节及运作方式.....	(9)
一、试井研究中的正问题和反问题.....	(9)
二、如何理解试井研究中的正问题.....	(10)
三、试井分析方法描述气田——解反问题.....	(12)
四、试井解释软件支持下的气田试井研究.....	(14)
第四节 现代试井技术的特色.....	(15)
第二章 基本概念和气体渗流方程式	(17)
第一节 基本概念.....	(17)
一、稳定试井和不稳定试井.....	(17)
二、试井分析模型和试井解释图版.....	(18)
三、无量纲量和试井解释图版中的压力导数.....	(18)
四、井储效应和井储效应在图版曲线上的特征.....	(20)
五、天然气在地层中的几种典型的渗流状态及在解释图版上的特征.....	(22)
六、表皮效应,表皮系数和折算半径.....	(29)
七、开井时的压力影响半径.....	(30)
八、层流和湍流.....	(34)
第二节 气体渗流方程式.....	(37)
一、储层作为连续介质的定义.....	(37)
二、流动方程式.....	(38)
第三章 气井产能试井方法及实例	(52)
第一节 气井产能及无阻流量.....	(52)
一、气井产能的含义.....	(52)
二、理解气井产能时的误区.....	(53)
三、气井的初期产能、延时产能和配产产量.....	(53)
第二节 三种产能试井方法.....	(54)
一、回压试井法.....	(54)
二、等时试井法.....	(55)
三、修正等时试井法.....	(56)
四、简化的单点试井.....	(57)

五、各种测试方法压差计算示意图·····	(58)
第三节 产能试井资料整理方法·····	(58)
一、两种产能方程·····	(58)
二、两种产能方程的差别·····	(60)
三、产能方程的三种不同压力表达形式·····	(62)
第四节 影响气井产能的参数因素·····	(66)
一、均质无限大地层的产能方程中系数 A 、 B 的表达式·····	(67)
二、流动进入拟稳态时的产能方程·····	(68)
第五节 结合修正等时试井进行的气井短期试采·····	(69)
一、试采井的压力模拟·····	(69)
二、修正等时试井无阻流量计算方法的改进·····	(71)
第六节 气田开发方案设计中的产量预测·····	(73)
一、具备试气资料井的产能预测·····	(73)
二、开发方案设计井的产能预测·····	(75)
第七节 产能试井中几个问题的讨论·····	(81)
一、产能测试点的设计·····	(82)
二、为什么计算的无阻流量有时会低于井口实测产量·····	(85)
三、回压试井法测算无阻流量时存在的问题·····	(86)
四、为什么产能方程会出现 n 大于 1 或 B 小于 0 的情况·····	(88)
五、单点法产能计算方法及误差分析·····	(90)
六、免去稳定流动点的产能试井·····	(96)
七、关于井口产能·····	(97)
八、用手工方法计算产能方程系数 A 、 B 和无阻流量·····	(97)
九、实测点校正的产能分析理论公式法·····	(99)
第四章 压力梯度法分析气藏特征·····	(106)
第一节 勘探井早期压力梯度分析及实测例·····	(106)
一、压力数据的采集及资料整理·····	(106)
二、压力梯度分析·····	(107)
第二节 地层条件下天然气密度及压力梯度计算·····	(108)
第三节 气田开发后的压力梯度分析·····	(110)
第四节 压力梯度分析的一些要点·····	(110)
一、测压资料录取的准确性·····	(110)
二、压力梯度分析应与地质研究紧密结合·····	(111)
第五章 气藏动态模型和试井·····	(112)
第一节 概述·····	(112)
一、气藏的静态模型和动态模型·····	(112)
二、气井的压力历史标志着气井的生命史·····	(116)
三、用不稳定试井曲线的图形特征研究储层的动态模型特征·····	(121)
第二节 压力的直角坐标图——压力历史图·····	(131)
一、气井压力历史图的内容和画法·····	(131)

二、压力历史展开图中显示的地层和井的信息	(135)
第三节 压力单对数图	(136)
一、用图形特征计算参数的几种单对数图	(136)
二、单对数图用于试井软件分析	(141)
第四节 压力和压力导数的双对数图版及模式图	(142)
一、双对数图和现代试井分析图版	(142)
二、典型的特征图形——试井分析模式图	(158)
第五节 不同储层类型不稳定试井特征图及实例	(161)
一、均质地层的特征图(模式图形 M—1)及实例	(161)
二、双重介质地层的特征图(模式图形 M—2, M—3)及实例	(167)
三、具有压裂裂缝的均质地层特征图(模式图形 M—4, M—5)及实例	(175)
四、部分射开地层的特征图(模式图形 M—6)及实例	(183)
五、复合地层的特征图(模式图形 M—7, M—8)及实例	(187)
六、带有不渗透边界地层的特征图(模式图 M—9~M—13)及实测例	(194)
七、带有边界的裂缝发育带特征图(模式图形 M—14, M—15)及实例	(205)
八、凝析气井的特征图及实例	(213)
九、水平井试井的特征图(模式图形 M—16)及实例	(223)
第六章 干扰试井和脉冲试井	(227)
第一节 多井试井的用途及发展历史	(227)
一、概况	(227)
二、多井试井的用途	(227)
三、多井试井方法的历史发展	(229)
四、如何做好干扰试井的测试和分析	(231)
第二节 干扰和脉冲试井原理	(234)
一、干扰试井	(234)
二、脉冲试井	(243)
三、多井试井设计	(247)
第三节 用多井试井法研究油气田的现场实测例	(251)
一、靖边气田(陕甘宁中部气田)的干扰试井研究	(251)
二、注采井之间断层密封性的测试研究	(257)
三、灰岩地层生产井之间断层封隔性的研究	(259)
四、注水见效情况研究	(260)
五、井间连通参数分析	(262)
六、垦利古潜山油田的多井试井综合评价研究	(270)
第七章 煤层气井试井分析	(280)
第一节 概述	(280)
一、煤层气和煤层气井	(280)
二、煤层气井试井在煤层气层研究中的作用	(280)
三、煤层气试井与一般油气井试井的差别	(281)
第二节 煤层气层的渗流机理及试井模型	(282)

一、煤岩层的结构特征及煤层甲烷气的渗流·····	(282)
二、7种典型的煤层气试井动态模型·····	(283)
三、单相水裂缝均质流的特征及试井资料解释方法·····	(284)
四、甲烷气解吸条件下的单相流动及试井分析方法·····	(284)
第三节 煤层气井注入/压降试井方法·····	(288)
一、注入/压降试井装备及工艺·····	(288)
二、注入压降试井设计·····	(289)
三、注入/压降试井资料的测评分析方法·····	(290)
第四节 煤层气井注入/压降试井实测资料分析解释·····	(294)
一、解释方法·····	(294)
二、实测例分析·····	(295)
第八章 气藏综合描述实例·····	(298)
第一节 概述·····	(298)
第二节 靖边气田开发准备中的气藏动态描述·····	(298)
一、靖边气田的地质概况·····	(298)
二、焦点问题·····	(298)
三、开发准备阶段的动态研究·····	(299)
第三节 克拉2气田动态特征的综合描述·····	(302)
一、地质概况·····	(303)
二、克拉2气田试井分析研究步骤及取得的认识·····	(304)
第九章 试井设计·····	(332)
第一节 试井设计的重要性及步骤·····	(332)
一、试井设计的重要性·····	(332)
二、试井设计的步骤·····	(332)
三、资料录取的基本要求·····	(336)
第二节 针对不同地质目标的不稳定试井模拟设计要点·····	(336)
一、均质地层试井设计·····	(336)
二、双重介质地层试井设计·····	(337)
三、均质地层压裂井试井设计·····	(338)
四、具有阻流边界地层的试井设计·····	(338)
五、气井产能试井设计·····	(339)
六、多井试井设计·····	(339)
七、试井设计师的责任和理念·····	(339)
参考文献·····	(340)
附录1 符号意义及单位(法定)·····	(344)
附录2 不同单位制下常用量的单位(不包括无量纲量)·····	(351)
附录3 法定单位与其他单位的换算关系·····	(353)
附录4 法定单位下试井常用公式·····	(355)
附录5 不同单位制下公式系数的转化方法·····	(362)

第一章 概 论

第一节 编写这本书的宗旨

一般认为,现代试井发展于20世纪80年代初。在我国,随着改革开放的进展,随之带来了现代试井的方法、软件和先进的测试仪表及工具的引进。回顾20多年来的进展,可以看到,在许多重大的气田发现、开发准备及开发过程中,已成功运用了这门新兴学科的知识,这是十分可喜的。但另一方面,也必须看到,在某些地区、某些时候,现代试井应用得还不是那么理想,还有需要改进的地方。

发展到现阶段的现代试井,已不同于二三十年前的试井。正如其他学科那样,由于计算机软件的应用,如今的科技人员,已很少依赖于手工的计算。因此,试井分析人员和油藏工程师,已不再需要频繁查阅试井书籍中的那些复杂的公式,用计算器去进行繁琐的计算,往往只须点击一些菜单项,即可得到所需的结果。

那么是不是说试井工作就变得很容易了呢?正相反,随着研究工作的深入,试井工作不是更容易了,而是遇到了更大的挑战。

首先,试井分析已不仅仅要求解释诸如储层渗透率等简单的参数,而且还要求提供介质类型、边界情况等有关深入储层内部的信息,最终要得到一个关于气井和气藏的“动态模型”——一个真实反映气井和气藏情况的动态模型,将用于气田评价和动态预测。

在我国,由于储层的类型十分丰富,工作的难度显得更为突出。在介质类型上,有砂岩孔隙性储层、碳酸岩盐的裂缝性储层和生物礁块状灰岩储层;在储层平面结构上,有延伸较好的大面积均匀分布的地层、有断层切割的具有复杂边界的储层,还有河流相沉积形成的条带形岩性储层;从流体类型上看,有普通的干气气藏、凝析气藏,还有带有油环和边底水的气顶气藏;从储层压力上看,有正常压力系数的气藏,也有超高压的巨厚气藏,欠压的气藏。可以说是五花八门、丰富多彩。这无疑给试井分析人员和油藏工程师提出了新的挑战。

另外,压力资料的质量已不是20年前的情况。那时的压力资料是用机械式压力计录取,从压力卡片上读出的压力数据,多则上百个点,少的不过十几个点。以这样的压力资料解释出的结果,不但内容简单,而且在解释上难得有什么争议。而目前,电子压力计录取的资料,动辄数万,多的上百万个压力点。不但测出了压力恢复段,而且还要测出多次开井、关井情况下的压力变化“历史”。如果通过分析得到的“试井模型”与实际地层稍有差别,马上会从检验过程中显示出来,所以来不得半点马虎。

因此可以说,现在的试井工作,已不单是油藏工程师手中的几个公式和简单的运算,而是一个系统工程,这个系统工程包含着以下几个内容:

- (1) 勘探开发的主管人员,必须适时提出恰当的测试项目;
- (2) 优化的试井设计;
- (3) 优质的现场压力、产量资料录取;
- (4) 运用试井分析软件解释压力资料,并综合地质和施工工艺资料进行储层参数评价;
- (5) 气藏工程应用;

(6) 必要时研究新的试井模型, 充实到试井软件中加以应用。

以上这几方面的内容, 分属不同的环节和部门。但又彼此相关, 影响着最终成果:

(1) 只有当主管部门的领导, 深刻认识试井资料在描述气藏特征、指导气田开发中的作
用时, 才能及时安排测试项目, 给予资金支持, 使项目得以实施。

(2) 只有执行一个优化的设计, 才能事半功倍, 录取到能够说明问题的压力资料。

(3) 压力资料的录取, 往往是雇请测试队完成。测试队虽然是照合同办事, 但他们应熟
知什么是好资料, 如何才能达到设计要求。试井监督必须按设计要求验收资料, 保证资料的
录取成功率。

(4) 资料分析最终体现测试结果的应用价值, 用于指导气田开发和方案设计。这往往是由
分析人员和油藏工程师协作完成的。这种分析结果只有取得主管部门的认可, 才能发挥应
有的作用。

编著本书的宗旨就是, 从研究气田出发, 讲解如何站在各个不同环节的不同角度, 共同
去认识试井资料, 认识气藏, 从而开发好气藏。

编写本书采取的做法是:

(1) 应用试井方法不仅着眼于气井, 更要着眼于气田。从气田和气藏的研究出发来分析
试井资料, 这是作者力图达到的目标。

(2) 建立一种图形分析方法。图形分析方法的基础是, 从渗流力学基本理论出发, 给出
一套压力曲线的模式图, 把储层中的渗流特征与试井曲线特征建立有机的联系, 从而可更便
捷地从测得的试井曲线来了解储层的情况。

(3) 实例分析是本书的又一重点。本书不但介绍了气井的试井分析应用实例, 还介绍了
应用试井进行气田研究的实例; 不但介绍了一些成功的实例, 而且也介绍通过不断摸索实
践, 从失败的教训中总结的经验及最终取得成功的实例。

(4) 同时书中用了一章的篇幅介绍了一些基本公式, 但对每一个公式不会去加以推导
(有关这些公式的推导和应用, 有一些很好的专著可以参考^[1,2]) 只讲解如何计算和应用。
本书的出发点是, 读者在了解这些公式的前提下, 通过试井解释软件进行解释。

本书也将帮助读者, 把握正确的解释分析技术, 特别是针对气田的研究方法, 取好、用
好试井资料, 以试井为手段建立并确认正确的气田动态模型。

第二节 气田研究中试井所发挥的作用

在气田整个勘探开发过程中, 试井发挥着不可缺少的作用。从一个新气区的发现井开
始, 到落实气田的储量、进行开发建设、直至气田开发生产的整个过程中, 在确认气层的存
在、测取气井的产能、了解储层的地层参数、进行气田的开发方案设计和投入开发后的动态
分析等方面, 无一不依靠试井。在表 1.1 中, 详细地标明了勘探开发不同阶段, 试井所能发
挥的作用。

一、气田勘探阶段

1. 勘探井的 DST 测试

当一个新探区发现了有利的构造以后, 部署了首批勘探井。在钻井过程中, 通过气测或
随钻测井, 有可能发现油气显示。这时, 这些油气显示是否意味着找到了能够产出工业气流
的油气层, 是没有把握的。若要确认油气层的存在, 必须采取 DST 测试的方法。通过 DST

测试,如果测试层表现出旺盛的产气能力,则要进一步测试储层的压力和产量,并用不稳定试井方法,初步评估储层的渗透性,以及钻井时有没有对地层造成伤害。

旺盛的产气能力,预示着一个新的气田的诞生,而 DST 测试取得的产量、压力数据,则是新气田诞生的直接证据(表 1.1)。

2. 勘探井的完井试气

进一步核实气田的规模及产气能力,一般要等到完井测试时进行。完井测试是在勘探井钻穿目的层并完钻以后,采取下套管或用其他方式完井,并进行逐层的完井试气。此时井壁稳定,测试条件较为完备,测试时间也更充裕,因此能够更确切地核实储层的各项参数。特别可以选择不同的流量试气,以推算气井的无阻流量 q_{AOF} 。而 q_{AOF} 是标志气井产能的最有说服力的参数。

有一些低渗透的储层,例如鄂尔多斯盆地石炭、二叠系储气层和奥陶系的气层,有时单靠普通的射孔完井的方法,达不到工业产气量,常常需要经过压裂或酸化的方法,经过强化措施来重新完井。此时重新评价表皮系数 S 及对压裂裂缝指标的分析,就显得十分重要,(以上测试项目参见表 1.1)。

一口井、一个测试层,射孔后达不到预期的产气量,有可能是储层的含气饱和度低,或者说白了就是没有气。但是,也有可能是有气,但是由于储层物性差,或钻井完井时对井底有伤害,形成了堵塞,而使气产不出来。区分产量偏低的原因,对于评价储层来说是至关重要的。

表皮系数是标志产气井受到伤害的重要参数。只要有条件录取到不稳定压力资料的测试层,必须重视这一环节。特别是对于高渗透储层,加上钻井液相对密度大,浸泡时间长,储层压力低时,形成的表皮污染会比较严重,影响产能的发挥。如果产层条件允许,可通过酸化来解堵;但是,如果通过试井,了解到储层的渗透率很低,譬如低到 0.1 mD 或者更小,酸化解堵就不一定奏效了,必须通过压裂措施来提高产能。

是否需采取措施,措施的效果如何,都要通过试井来作出判断。

3. 储量评估

一旦勘探井提供的产量资料及储层压力、储层渗透率等资料证实了气田的存在,立即会进入储量评估。

1) 储量评估时值得注意的几个问题

目前储量评估中更多的是应用静态资料,也就是物探、测井、岩心分析提供的数据,采用容积法计算地质储量。然后采取类比的方法,给定一个采收率系数,推算可采储量。

但是通过近年来的实践,已看到仅靠静态参数评估的储量,是有很大的风险性的。至少有以下几点值得引起注意。

(1) 对于成组系的裂缝性储层,容积法计算的储量误差非常大。

这里所说的组系性裂缝,是指古潜山类型的、非均匀分布的裂缝性储层。这种裂缝性储层的特点是,油气存在于区域分布的、成组成系的、局部渗透性很高的裂缝系统中。基质岩块致密,用试井的专业语言说,就是双重介质中的储能参数 ω 值很大,达到 $0.3 \sim 0.5$ 。

从试井曲线形态上,最能识别这类储层的存在:

①这种储层的压力恢复曲线形态,特别是导数曲线的形态,往往都很怪异,经常没有明显的径向流段,表现为大起大落,并在后期趋向于急剧的上倾;

②从开井降压曲线看,往往下降速率很快,并且关井后井底压力恢复不到初始的水平;

表 1.1 试井在气田勘探开发中发挥的作用

实施项目	测试分析内容	了解储层 含气情况	测试储层 地层压力	产能测试 确认井的 无阻流量	不稳定试 井解释储 层渗透率	表皮系数 评价钻井 完井质量	压裂裂缝 长度及导 流能力	确定裂缝 性储层的 双重介 质参数	提供气井 生产时的 湍流系数	确定储层 的不渗透 边界分布	干扰试井 测定储层 的横向 连通性	推测气藏 气井控制 的动储量	核实气藏 的动储量
		★	★	☆	★	★							
气田 勘探 阶段	勘探井钻探过程的 DST 测试	★	★	☆	★	★							
	勘探井完井试气	★	★	★	★	★	☆						
	详探井的 DST 测试 及完井试气	★	★	★	★	★	☆	☆					
	含气区块的储量评价	■	■	■	■	■	□	□					
开发 准备 阶段	开发评价井的产能 试井和其他不稳定试井	★	★	★	★	★	★	★	★	☆	☆	☆	
	酸化压裂措施改造		★	★	★	★	★	☆	★	☆			
	开发评价井的试采 和延长试井		★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	气田储量核实		■	■	■	■	□	■		■	■		★
	气田数值模拟 制订开发方案		■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■
气田 开发	气田动态监测		★	☆	★	★	☆	☆	☆	☆	☆		★
	调整井的完井试气	★	★	★	★	★	★	★	★	☆			★

注：★——必须实施的项目；☆——可能实施的项目；■——必须使用的参数；□——可能使用的参数

③多数这类气井，出水后含水率上升很快，如果兼有凝析油存在的话，压力恢复曲线早期的形态会更趋复杂。

(2) 河流相沉积形成的岩性气藏可采储量的评估应与井网密度挂钩。

20 世纪 90 年代，国外很多研究证实，一些河流相沉积的低渗透储层，常常出现采收率偏低的现象，通过进一步研究发现，正是岩性边界的存在，阻碍了在正常井网下天然气采出程度的提高^[3]。通过钻加密井，有可能改善这类储层的采出程度。

(3) 压力分布所显示的储层整体性的特征在储量计算时应予考虑。

如果一个气田，所有的气井处在一个整体的连通储层内，那么，测试这些气井的初始地层压力，并折算到相应的海拔深度，则压力点的分布与在同一口静止的气井内所测到的压力梯度是一致的。用这样一个简单的原则，可以判断气田的整体特性。

如果气田是整体的气藏，无疑储量的计算就较为简单；如果不是，则要找出其中的原因，综合地质特征加以分析，并要体现在储量计算中。有时测压资料的准确性差，给分析辨别带来困难，甚至失去了研究的意义。因此，重视这一方面的工作，录取好原始资料，无疑是一切研究工作的基础。但是如果确实探井所打开的同一层位的地层，不在同一压力系统内，则储量计算必须作深一层次的评估。

2) 试井方法在储量评估中所起的作用

在勘探阶段，不能用试井资料直接计算储量，只能在一定程度上，对储量评估作出补充或校正。具体说来，有以下几个方面：

(1) 为储量计算提供产能依据：

目前评估的气藏地质储量，是指气井达到工业气流标准的储量。而是否达到此标准，则须通过测试加以评估。有的井完井后井底受到伤害，表皮系数 S 值很高，使得产量较低或很低。经过措施后，解除了伤害，达到工业气流标准。气井是否受到伤害，措施后的无阻流量是多少，均须通过试井来确定。

(2) 对于双重介质储层提供储层的稳产特征系数：

目前在地质研究上，常常把具有裂缝的碳酸盐岩储层，统称为“双重介质”。但在储量分析上，并未把这种双重介质与均质砂岩区别开来。

双重介质这种专用名称，是 1960 年由前苏联学者巴兰布拉特，在研究天然裂缝性储层的试井数学模型时提出来的，并给出了流动模式图^[4]。巴兰布拉特提出了标志流动特征的两个参数，即储能比 ω 和窜流系数 λ 。所谓储能比 ω 是指裂缝中储存的油气，在整体的（裂缝加基质）储存中所占的比例。 ω 越大，则裂缝中的油气越多。由于裂缝中的油气极易流入井中并采出，因而造成开井初期表现出旺盛的生产能力的就是裂缝。但时间稍长，如果基质中没有更多的油气补充，就会表现出产能的急剧下降；相反，如果 ω 值很小，例如 $\omega = 0.01$ 或更小，表明更多的油气储存在基质中，因此，这种储层的产能会是很稳定的。

另一个参数 λ 也很重要，称之为窜流系数。是指从基质向裂缝供应油气时的导流能力。如果 λ 较大，则当裂缝中的油气流采出后压力下降时，基质中的流体会及时加以补充，使气井得以稳定生产。否则，如果 λ 值很小，即使基质中存在一定数量的油气，在裂缝压力极度下降后的很长时间，甚至数年内，基质也不能充分供应裂缝，那么这样的储量是没有什么工业价值的。

由此可以看出，对于确实存在双重介质特征的储层，用试井求出的 ω 和 λ 参数，对于辨别储量本身的稳产特征，是十分重要的指标。 ω 和 λ 只能用试井方法求得，而且在求出这些

参数时,对测试条件的要求十分苛刻。在后面的章节,还会专门加以讨论。

中国有相当多的裂缝性碳酸盐岩储层。有的油气井,在开井初期产能十分旺盛,现场管理人员被这一现象所鼓舞,以为找到了金娃娃。但他们并未冷静地分析上述 ω 、 λ 参数所起的作用。有的井,以日产 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气开井,仅延续几天就告枯竭。这的确应引以为戒。

(3) 试井研究为储量评估提供储层平面分布信息:

如果一个气田在平面上是连片延伸的,储量计算时只须划定外边界。而且在开发布井上有更大的回旋余地。当勘探初期井距较大时,地质上用井点插值所划定的有效厚度分布图,往往不能真正反映储层的真实分布特征。试井资料、特别是延长试井资料,却常常真实反映储层的延伸变化情况。例如对于断块油气田,可以通过试井资料分析,确认所在区块的面积和形状;对于具有边水分布的气田,了解边水的距离。本书后面的章节,将详细介绍靖边气田利用探井短期试采所得到的压力恢复曲线,以及干扰试井曲线,评价出奥陶系储层在平面结构上,属于连片分布但非均质性严重的结论,为储层平面分布特征提供了有力的证据。从而为储量的最后通过国家储委审批,解除了最后的疑虑。

(4) 为储量评估提供原始压力资料:

气藏储量除去与储层的面积、厚度、孔隙度、含气饱和度等静态参数有关以外,还与气藏原始地层压力成正比。特别对于超高压气藏,原始压力值的影响更突出。因此在气藏储量评估前,要求准确测定原始地层压力。

曾经有一段时间,某些地区曾要求用每一次测试曲线计算单井控制的储量。这种作法是把试井方法用于储量分析简单化了,是不妥的。也不会取得真正有用的结果。

对于气田来说,到了开发中后期,压降过程进入拟稳态生产时,可以应用更多的方法复核储量,关于这一点,后面的章节还会详细谈到。

二、气田开发准备阶段

这一阶段对于试井资料的依赖性,无疑更为突出。

曾经有一个国外公司,在决定与中国合作开发一个气田后,对于一个已通过储量评审,实实在在摆在那里的的气田,却要花上一年的时间,耗费大量的人力、财力,对全部十几口井,开展动态测试和分析研究。起初被怀疑是否必要,后来却证明是有效的。正是这些动态研究结果,成为制订开发方案的决定性的依据。

中国近年发现的整装气田,比以往任何时候都要多,开发准备阶段的动态研究,也逐渐提到日程上来。结合以往的经验教训,重视动态研究,显得尤为重要。

1. 开发评价井的产能试井

单井产能值,被认为是制订开发方案的主要依据。常常用无阻流量来标志产能大小。对于均匀分布的砂岩储层,习惯用 $1/4$ 或 $1/5$ 的 q_{AOF} 作为方案中选用的单井稳定产量值。

正如本书第三章将要介绍的,现场采用多种方法测定无阻流量。与勘探阶段不同的是,用于勘探井的一些测定无阻流量的简单方法,例如单点法,只是初步了解气井产能是否达到工业气流标准,用于储量评价时划定下限;而开发准备阶段的产能试井,不但要准确标定产能指标,以及在气田中的平面分布情况,而且还要了解产能的长时间稳定特征。

在本书产能评价一章将要介绍,对于一些河流相沉积形成的、低渗透的岩性气藏,由于单井控制的有效流动面积有限,加上储层本身流动性差,使得勘探初期评价的、瞬时的无阻流量与通常所说的稳定生产条件下的产量,差距非常大,有时会达到 $10:1$,甚至更多。如

果证实储层确实属于这种情况，国外一些研究结果建议，应采取定压放产，尽快回收成本的开发策略。另外对于存在组系性裂缝的古潜山气田，显然也不可能按常规设计的稳产条件投产。

因此，在开发准备阶段，针对开发评价井的、系统的、严格的产能测试，对于一个气田，特别是大规模的整装气田来说，是必不可少的。通过测试和分析计算，不但要给出常规的无阻流量值，还要评价出稳定的产能值；必要时还可以通过试井软件的分析 and 产能预测，给出合理的“全程产量安排”^[5]。

2. 开发评价井的不稳定试井

目前国内大面积整装气田的开发评价井，常常采用短期试采的方法进行研究。在短期试采时，用高精度电子压力计，跟踪测试全程的井底压力（流动压力和关井压力）。这种测试方法，除能测定气井产能以外，还可以得到关井压力恢复曲线及全程的压力历史。正如表 1.1 所显示的，通过测试，可得到大量的关于气藏的重要信息：

- (1) 气田含气区和含气层分布情况。
- (2) 储层的地层压力 p_R 。
- (3) 主力产气层的无阻流量，产能在平面上和纵向上的分布情况。
- (4) 产气层的有效渗透率，以及有效渗透率与测井渗透率的关系。
- (5) 气井完井的表皮伤害。是否需要酸化压裂改造，改造后的表皮系数情况。
- (6) 对于压裂过的井，评价压裂效果，生成的裂缝长度，裂缝的导流能力，以及裂缝面的损害情况。
- (7) 对于双重介质储层，当测到具有明显的双重介质特征曲线时，分析储能比 ω 和窜流系数 λ 值的大小。评估储量特质及稳产特征。
- (8) 提供气井生产的非达西流系数值。在气田开发方案设计中，涉及产量与生产压差之间关系的选值，必须用到非达西流系数 D 值。 D 值是由于井底附近的湍流形成的，是组成拟表皮的主要部分。产生湍流的原因很复杂，用理论方法很难估算，只有通过测试得到。
- (9) 如果测试时间足够长，可以得到有关储层边界的信息。不过，如果在不算很长的测试期间，就得到了有关边界的信息，则预示着边界距井不远。

目前一些较为完善的试井软件，都包含有类型各异的边界组合的试井模型。数值试井软件，更可以参考具体气层的地质特征，组合出适合本地区特点的储层边界形态和地层参数分布，并提供相应的试井曲线理论形态。通过与实测曲线的拟合对比，可以得到关于具体测试对象的形象的描述。特别值得注意的是，这种描述来自于气层在生产过程中的生动表现，因而所反映出的特征是更接近于真实的。

如果条件许可，可以通过干扰试井研究储层平面上及纵向上的连通性。

气田内的干扰试井，在现场实施时存在很大的难度。原因就是天然气的压缩性较之石油或水都大。而且气层的渗透性往往又很低，井距又大，因此测试常常延续较长时间才会有结果。比如在靖边气田，林 5 井组的干扰试井前后延续了 10 个月。这一测试，取得了极为珍贵的成果：证实了气区内井间的连通性，同时也看到了明显的非均质特征。

在上述测试取得成功的基础上，原则上可以对气井的和气区的动储量进行预测。

这里说的“原则上”，是因为从动态测试结果所预测的动储量，只能是针对动态影响所波及的范围内的情况加以预测，未反映动态影响范围以外的情况。

如果气井所处的位置是在一个封闭的或接近封闭的岩性区块中，则通过动态特征的分