

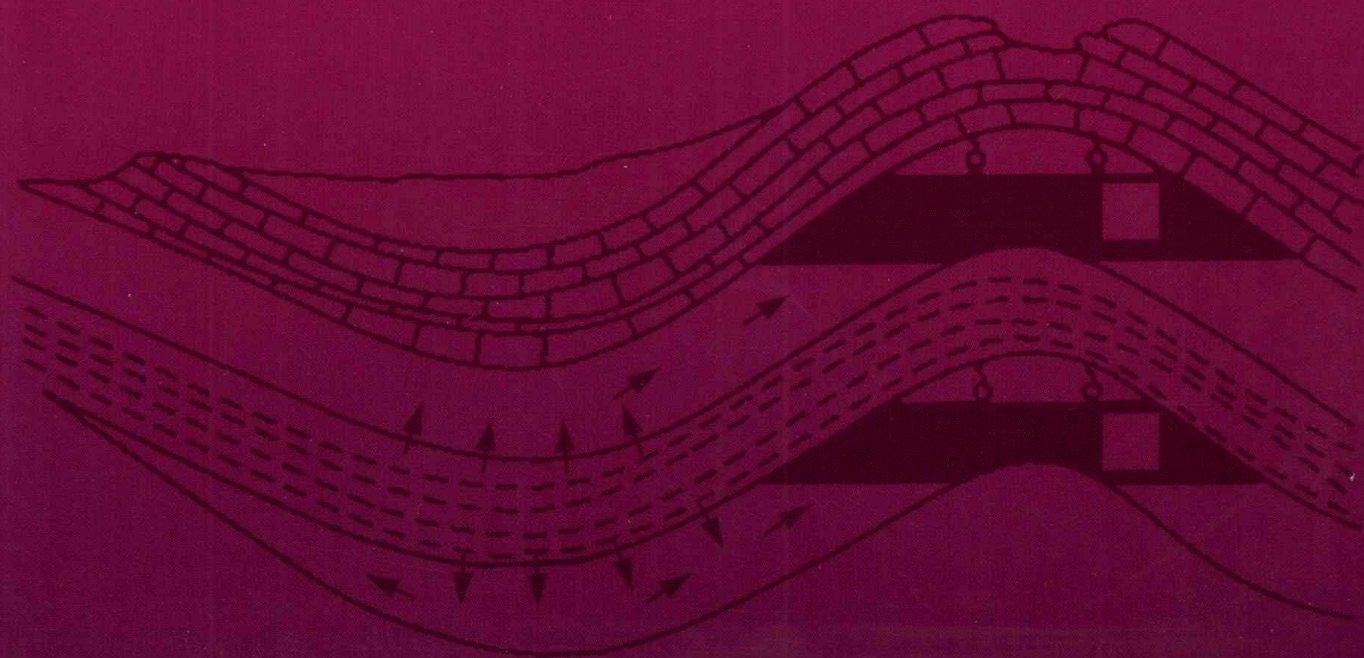
国外油气勘探开发新进展丛书 (五)
GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU

Gas Well Testing

Handbook

气井试井手册

[美] 阿曼纳特 U. 乔德瑞 著
冉新权 刘海浪 等编译



石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(五)

气井试井手册

[美] 阿曼纳特 U. 乔德瑞 著

冉新权 刘海浪 等编译

石油工业出版社

内 容 提 要

本手册从实用角度出发,提出关于气井试井资料录取和解释等相关原则,并且对目前该领域的前沿技术进行了简要总结,着重介绍了目前最常用的解释方法以及这些方法在解决实际问题中的应用,相关油田实例 100 多个,大多为作者的亲身实践,有较强实用价值。适合油藏工程师、数值模拟工程师、现场石油工程师、石油地质工作者、地球物理工作者、技术管理者及相关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

气井试井手册/[美]阿曼纳特 U. 乔德瑞著;冉新权,刘海浪等编译.
北京:石油工业出版社,2008.11

(国外油气勘探开发新进展丛书:5)

书名原文:Gas Well Testing Handbook

ISBN 978-7-5021-6718-9

I. 气…

II. ①乔…②冉…

III. 采气井-试井-技术手册

IV. TE 353-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 115914 号

Copyright ©2003 by Elsevier, Science.

本书经 Elsevier Science 授权翻译出版,

中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

著作权合同登记号图字:01-2005-5516

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.com.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京时代澄宇科技有限公司

印 刷:北京晨旭印刷厂

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:37.75

字数:963 千字

定价:150.00 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

《国外油气勘探开发新进展丛书（五）》

编 委 会

主 任：胡文瑞

副 主 任：赵政璋 杜金虎 张卫国

委 员：（按姓氏笔画排序）

刘德来 李忠兴 李相方

张义堂 张仲宏 张明禄

周家尧 章卫兵 魏国齐

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从 2001 年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了四期 22 本专著。在这套系列丛书中，某些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可。2002 年丛书第 2 辑整体获得了中国出版工作者协会颁发的“引进版科技类优秀图书奖”，2006 年丛书第 4 辑的《井喷与井控手册》再次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，产生了很好的社会效益。

今年我们在前四期出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的 6 本专著，即《油层物理》、《钻井液处理手册》、《油井试井手册》、《气井试井手册》、《项目计划与控制》、《现代试井解释模型及应用》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁

译者前言

随着世界经济迅速发展，人口急剧增加，能源消费不断增长，温室气体和各种有害物质排放激增，人类生存环境受到极大挑战。在这种形势下，清洁的、热值高的天然气能源正日益受到重视，发展天然气工业成为世界各国改善环境和促进经济可持续发展的最佳选择。天然气工业的发展得益于多方面的有利条件。首先，储量比较丰富。其次，天然气的热能利用率高，是一种相当经济的能源。再次，天然气的污染程度也较低。目前，经济全球化带动着天然气的全球化，天然气越来越受到全世界的青睐，从环境保护和优化能源结构的角度来看，二十一世纪是天然气的世纪。我国实行油气并举的石油天然气开发战略，必将有利于并加速天然气工业的发展。加快天然气的勘探和开发有助于适应我国国民经济对天然气日益增长的需要。中国天然气的综合利用出现了前所未有的繁荣景象，呈现了一些新特点。经过几十年的生产实践，我国在天然气的勘探、开发、储运和综合利用等方面，已经积累了丰富的经验，技术在日臻完善并已达到较高的水平。

本手册提出了关于气井试井资料录取和解释等相关原理和方法，对前沿技术作了简要介绍。本手册从试井工艺、解释方法、应用方面重点介绍了常用解释方法。作者在世界各地针对各种试井技术和资料解释积累了丰富的经验，提供了大量的应用实例。为读者能提供丰富的可用信息。

本手册在翻译和整理过程中，对一些图表和算例做了验证并适当调整以适合广大石油工作者阅读。在此手册即将面世之际，感谢刘启国教授及所有关心支持本手册出版的人。手册中若有不当之处欢迎批评指正。

2008 年 6 月

原 书 序

几乎从第一个气藏的发现开始，气井试井的基本方法就已应用于实际生产中，但仅仅在过去的三十年里才提出了气井试井技术的相关概念。在许多公开出版的个人专著及相关手册中，或者在一些油气公司的内部出版物中，也有一些关于气井试井的论述。在本手册中，作者将对该项技术独立成集进行专述。

监测和分析非裂缝性和裂缝性气藏气井产能、流量变化以及不稳定压力响应等资料，以了解气井或气藏动态，是气藏工程中应用最广的技术，气井试井技术正是根源于此发展起来的。本书从实用的角度，给出了与气井试井资料录取和解释相关的概念，这些概念贯穿于本书并通过很多实例加以强调。

在《气井试井手册》中，作者对气井产能试井、流量、不稳定压力的测量和分析方法进行了深入广泛的研究。归纳总结了不同试井方法的基本原理，结合油田实例，详尽论述和阐明了各种试井方法的适应性和局限性。本书可以帮助涉及气井产能、压力恢复、流量测试工作的工程师，快速了解气井试井技术，同时，由于借鉴了大量最新的参考文献和参考书，本手册对专业从事试井解释工作的工程师也是有用的参考和指南。作者以严谨和认真的态度编撰此书，实现了上述的目标。

作者通过油田应用实例研究，描述了在油田生产过程中将遇到的气井和气藏动态类型，并对分析计算中基础数据的来源、特性和准确度做了论述。书中大量的实例可以帮助读者更好地理解掌握气井试井方法的基本原理和应用条件。

本书对于关注气井气藏系统评价，气井压力动态的工程师是非常重要的。作者在该领域经验丰富，是编撰此书的最适合人选。这本书的发行，也是对该领域石油技术文献的及时补充。

Dilip Borthaker

印度尼西亚海湾能源部部长

原书前言

编写这本手册的主要目的是为掌握现代气井试井技术方法提供实用的参考书。书中给出了评价井况和储层特性参数的气井试井技术和分析方法。书中所引用的方法和数据都是经过现场验证的，并且是首次公开出版，比如一些新型图表和不同试井分析方法的对比。这些技术和方法大多数都采用油田实际的数据加以说明。

该手册是油藏工程师、数值模拟工程师、现场石油工程师、石油地质工作者、地球物理工作者和技术管理者的必备读物。也可以作为相关院校教授帮助学生熟悉现场、解决实际问题的辅助参考书。

本书从实用的角度，提出了关于气井试井资料录取和解释等相关原则，而且对目前该领域的前沿技术进行了简要总结，着重介绍了目前最常用的解释方法以及这些方法在解决实际问题中的应用。本书在阐述气井试井工艺、解释方法和应用方面的油田实例超过 129 个。

书中所引用的许多实例来源于作者的亲身实践。多年来，作者在世界各地针对各种各样的试井技术和资料解释积累了丰富的经验。在此，我非常感谢这些年来给了我参与试井分析工作机会的公司。

一次合理设计、实施和解释分析的试井，可以提供诸如储层渗透率、油藏原始地层压力、油藏平均地层压力、井底条件（储层损害和改善）、泄油面积、油气藏边界和不连续性、储层非均质性、人工裂缝延伸尺寸、地质模型的合理性和系统识别（油藏和数学模型）等方面的信息。

此外，确定储层产能和产能潜在的影响因素是非常重要的。试井资料结合油气生产资料、流体和岩石特性的实验资料，可以估算油气地下储量，预测油气藏在不同开发方式下的采收率。采用气井试井资料和 IPR 流入动态方程，结合产量数据，也可以在气井生产系统设计、分析、优化及单井合理产能确定方面起到辅助作用。

精确的论述、丰富的矿场实例、通俗易懂的形式，使本书成为每一个石油专业图书馆值得选藏的专业读物。在如何使该书更适用于现场工程师方面，我的同事们给出了许多非常有价值的建议。大多数读者会发现，本书内容安排逻辑性强，很容易在解决实际试井问题过程中得到应用。

致 谢

非常感谢 Pittsburgh 大学石油工程系主任 Furlow Fulton 博士在油藏工程方面给予我的教育。我也非常荣幸地与石油工业的很多专家一起工作，他们教授了我很多知识，帮助我成长为一名工程师。感谢休斯敦石油综合技术咨询服务公司部门经理 A. C. Carne 先生，为我的职业生涯确立了油藏模拟和试井解释方向。感谢为该书提供油田生产历史资料和生产数据的石油公司。我也感谢印度尼西亚国有石油公司总经理 Ambar Sudiono 先生，他认真地阅读了第 3、4、5、7 和 10 章，并提出了很多有价值的建议。

Dilip Borthakur 先生对本书提供的资料进行了审核，他花了大量时间来阅读、审核和注释这些材料。毫无疑问，没有他的帮助，这本书达不到现在这样的效果。

Faiza Azam 女士为该书的最后成型设计了很多方案，她精湛的专业技能和熟练的英语使得该书按计划顺利进行；她查阅了大量文献，准备了所有的原始图表，并重新绘制了许多解释图版，使得这些术语和符号与其他文献保持一致。她那艺术家的审美观、精湛的技能、精益求精的工作态度在本书中得以充分展示。我也非常感谢 Elsevier 的编辑们在该书出版过程中给予的大力支持和艰苦工作。最后，对 Kyle Sarofeen、Phil Carmical 和 Christine Kloiber 先生为本书作出的巨大贡献表示诚挚的谢意。

阿曼纳特 U. 乔德瑞

目 录

1 绪论	(1)
1.1 气井试井资料在石油工程中的作用	(1)
1.2 气井试井的历史	(1)
1.3 气井试井资料的录取、分析及处理	(2)
1.4 气井增产措施的选择	(2)
1.5 气藏特征描述流程	(3)
1.6 适用范围和目的	(4)
1.7 内容编排	(4)
1.8 单位制及换算	(6)
参考文献	(7)
2 气体流动方程	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 稳态层流	(8)
2.3 稳态紊流	(13)
2.4 拟稳态流动	(15)
2.5 非稳态流动	(16)
2.6 气体径向流动扩散方程	(17)
2.7 气体基本流动方程	(17)
2.8 一维流动系统	(19)
2.9 气体径向流动的无量纲变量	(19)
2.10 气体流动方程的解析解	(24)
2.11 叠加原理的应用	(36)
2.12 气体产能试井方法和分析方程的选择	(44)
2.13 表皮效应、惯性流—紊流效应和井筒存储效应	(46)
2.14 偏微分方程的数值解	(51)
2.15 小结	(58)
参考文献	(58)
3 水平气井试井技术	(61)
3.1 引言	(61)
3.2 气体稳态流动	(61)
3.3 水平气井不稳定压力特征	(64)

3.4	气体的拟稳态流动	(68)
3.5	水平井不稳定试井流动阶段及其解析解	(77)
3.6	水平井试井中的问题	(91)
3.7	水平井在低渗透气藏中的应用	(92)
3.8	高渗透气井中湍流的影响	(92)
3.9	湍流的识别	(93)
3.10	垂直气井和水平气井的流入动态特征曲线	(93)
3.11	根据气井生产历史评价油气藏性质	(98)
3.12	小结	(103)
	参考文献	(103)
4	产能试井和气井生产潜能分析方法	(105)
4.1	引言	(105)
4.2	无限大气藏中气体的流动方程	(105)
4.3	稳定流动方程	(105)
4.4	不稳定流动方程的应用	(106)
4.5	产能试井的分类、局限性和应用	(110)
4.6	流量、压力动态和产能曲线	(111)
4.7	气井产能试井和生产潜力分析	(114)
4.8	稳定产能方程	(147)
4.9	用图形方法求解稳定产能关系	(152)
4.10	通过短时流动测试预测气井产能	(154)
4.11	用解释图版预测气井产能	(164)
4.12	根据完井数据估算表皮系数	(172)
4.13	层流—惯性流与紊流分析	(173)
4.14	小结	(177)
	参考文献	(177)
5	压降试井分析基础	(179)
5.1	引言	(179)
5.2	流动特性和气井不稳定试井	(179)
5.3	定产量压降试井的压力—时间历史	(179)
5.4	各个流动阶段的特征	(180)
5.5	水平裂缝/垂直裂缝气井的压力动态	(183)
5.6	压降试井的应用	(184)
5.7	早期流动阶段数据分析	(184)
5.8	根据不稳定流动试井资料估算地层参数	(188)
5.9	拟稳态流动资料分析	(230)
5.10	稳定产能方程的应用	(235)

5.11	稳定产能方程的其他形式	(235)
5.12	小结	(236)
	参考文献	(236)
6	压力恢复试井分析方法基础	(238)
6.1	引言	(238)
6.2	压力恢复动态曲线	(238)
6.3	压力恢复试井的应用与实施	(239)
6.4	样版曲线拟合和多次叠加分析	(240)
6.5	应用早期资料的试井方法	(240)
6.6	应用中期和晚期资料的试井方法	(240)
6.7	无限作用气藏的压力—时间动态	(240)
6.8	有界气藏动态分析	(253)
6.9	平均气藏压力的估算方法	(255)
6.10	分析压力恢复试井资料的其他方法	(257)
6.11	压力动态分析与气藏特性估算	(264)
6.12	供气半径概念	(301)
6.13	复合气藏的动态分析	(301)
6.14	小结	(301)
	参考文献	(301)
7	用经验公式预测气井产能	(304)
7.1	引言	(304)
7.2	经验处理方法	(304)
7.3	压裂气井产能预测方法	(310)
7.4	小结	(318)
	参考文献	(318)
8	解释图版拟合方法的应用	(320)
8.1	引言	(320)
8.2	解释图版拟合的基本原理	(320)
8.3	解释图版拟合技术	(321)
8.4	解释图版在定产、无限大气藏中的应用	(321)
8.5	考虑井储效应和表皮效应的图版拟合技术	(330)
8.6	无限导流垂直裂缝井图版拟合技术	(331)
	参考文献	(343)
9	压力导数分析方法	(344)
9.1	引言	(344)
9.2	压力导数的计算	(344)
9.3	压力变化及其导数的双对数诊断曲线	(344)

9.4	其他常见流动形态的压力导数变化趋势	(346)
9.5	均质气藏	(346)
9.6	双重孔隙介质气藏	(357)
	参考文献	(360)
10	大型水力压裂气井动态分析	(362)
10.1	引言	(362)
10.2	大型水力压裂气井评价方法	(362)
10.3	压裂措施效果评价	(362)
10.4	大型水力压裂气井的不稳定压力分析	(372)
10.5	利用压力不稳定试井方法评估裂缝特性	(378)
10.6	水力压裂气井的压前测试	(382)
10.7	定产条件下的压力不稳态响应	(382)
10.8	小结	(385)
	参考文献	(386)
11	双线性流理论分析压裂气井动态	(388)
11.1	引言	(388)
11.2	用于压裂气井压力分析的专用典型图版	(388)
11.3	流动类型识别	(388)
11.4	不稳定压力动态分析	(392)
11.5	特定解释方法	(393)
11.6	小结	(404)
	参考文献	(405)
12	井间干扰试井和脉冲试井的实际应用	(406)
12.1	引言	(406)
12.2	干扰试井分析技术	(406)
12.3	脉冲试井压力响应分析	(409)
	参考文献	(414)
13	多层气藏试井分析	(415)
13.1	引言	(415)
13.2	多层气藏系统的分类	(415)
13.3	层状气藏的压力分析法	(417)
13.4	多层压裂气藏的压力响应	(420)
13.5	压力—产量动态响应方程	(421)
13.6	流动类型的识别和动态分析	(423)
13.7	多层气藏压力恢复动态	(423)
13.8	混合系统气藏参数的确定	(425)
13.9	影响动态的因素	(425)

13.10	层间窜流的经济影响	(425)
	参考文献	(426)
14	非均质气藏压力动态分析	(427)
14.1	引言	(427)
14.2	引起非均质性的原因	(427)
14.3	压敏性	(427)
14.4	不渗透边界附近的压力响应	(428)
14.5	横向非均质性对压力动态的影响	(435)
14.6	储集岩孔隙系统的非均质性评价	(436)
14.7	利用压力不稳定试井描述储层的非均质性	(444)
14.8	监测裂缝趋势和储层的非均质性	(445)
14.9	储层参数和裂缝方位的确定	(448)
14.10	多井试井研究气藏非均质性	(449)
	参考文献	(459)
15	气井试井油田实例研究	(461)
15.1	引言	(461)
15.2	气井试井评价表	(461)
15.3	浅层低压高产气藏	(462)
15.4	国家规定的回压试井程序规则	(463)
15.5	政府报表格式	(463)
15.6	增产措施评价总结及建议	(464)
15.7	裂缝性碳酸盐岩气藏的地层特性	(468)
15.8	修井前后的压力恢复解释	(471)
	参考文献	(477)
16	递减规律及其应用	(478)
16.1	引言	(478)
16.2	瞬时递减动态分析	(478)
16.3	拟稳态递减	(480)
16.4	产量递减特征及分类	(481)
16.5	用采气曲线图版预测水平气井的生产动态	(491)
16.6	水平气井及垂直裂缝气井的产气量预测	(493)
16.7	天然气地质储量估算	(497)
16.8	经济极限产量的确定	(498)
	参考文献	(498)
17	总表皮效应对气井生产动态的影响	(499)
17.1	引言	(499)
17.2	与流量有关的表皮系数	(499)

17.3	由于部分打开引起的表皮系数	(501)
17.4	由于射孔引起的表皮系数	(504)
17.5	由于部分打开和井斜引起的表皮系数	(506)
17.6	由于压实带渗透率降低引起的表皮系数	(513)
17.7	斜井污染表皮对气井产能的影响	(514)
17.8	水平井污染表皮效应	(517)
	参考文献	(522)
18	气井增产措施的选择	(524)
18.1	引言	(524)
18.2	气井低产的主要成因	(524)
18.3	储层条件评价技术	(524)
18.4	井筒条件的相对指标	(525)
18.5	表皮系数的概念、关系和方程	(526)
18.6	完井类型和相关的表皮系数	(528)
18.7	压裂措施的选井问题	(528)
18.8	产能增加和相关变量的处理	(528)
18.9	不同水力压裂设计的 IPR 修正	(530)
	参考文献	(531)
19	产量和压力不稳定试井的设计标准	(532)
19.1	引言	(532)
19.2	产能试井	(532)
19.3	产能试井的实施步骤	(534)
19.4	不稳定试井设计的一般概念	(537)
19.5	试井计划和资料录取	(541)
19.6	气井试井指南	(542)
19.7	气井试井中存在的问题	(544)
19.8	气井试井数据报告	(544)
	参考文献	(545)
附录 A	气井试井方程中 SI 单位制的应用	(546)
附录 B	无量纲函数的相关图表	(548)
	参考文献	(554)
附录 C	钻杆测试的地层特征评价	(555)
C.1	常规钻杆测试	(556)
C.2	有效渗透率、表皮系数和堵塞比的确定	(556)
C.3	原始地层压力计算方法	(556)
C.4	探测半径	(557)
	参考文献	(557)

附录 D 流体、岩石性质及关系式 (558)

 D.1 气体性质和关系式 (558)

 D.2 储层岩石性质 (568)

 D.3 地层水的高压物性参数 (568)

 参考文献 (577)

1 绪 论

1.1 气井试井资料在石油工程中的作用

气井试井分析是气藏工程的一个重要分支。从气井产能试井和压力不稳定试井中得到气藏信息,在气田开发的各个阶段都是非常重要的。气藏工程师必须掌握足够的气藏或气井的特性资料,才能准确分析气藏动态和预测不同工作制度下的产量;同时,采气工程师还必须了解生产井和注入井状况才能确定最佳的气藏开采方式。

压力是气藏工程中最有价值的数据,其直接或间接地贯穿于气藏工程计算的各个方面,因此准确分析和测定气藏参数是非常重要的。一般的,气井试井分析可以实现下列目标:

- (1) 确定产气层段;
- (2) 确定气井的产能;
- (3) 获取气藏参数;
- (4) 估算气井的表皮系数或钻井、完井损害程度,根据地层伤害的程度确定增产措施;
- (5) 了解井间气藏的连通性及边界特性。

1.2 气井试井的历史

Schellherdt 和 Rawlins 最早在《天然气井的回压数据及其在生产实践中的应用》一文中,在经验方法的基础上提出了适用于高孔高渗气藏的产能试井分析方法。这种方法就是我们今天所说的四点法(又称常规回压法),即在气藏平均压力与井底流压的平方差和流量 $[(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2) - q_{sc}]$ 的双对数曲线图中,四个稳定流量测试点呈一条直线,根据这一直线可以确定任意井底流压下气井的产量,平均地层压力(流压为零)所对应的流量即为最大流量,称为绝对无阻流量。之后,基于减少资源浪费及针对低渗透气藏的生产条件,出现了越来越多的实用产能试井方法,例如,等时试井方法和修正等时试井方法,这些试井方法已广泛应用于天然气工业中。

近年来发展起来的产能试井和压力不稳定试井可用来确定气井流动特性。20 世纪 50 年代末期,大规模加砂压裂已成为开发致密气藏的常规方法。1966 年 Russell 与壳牌石油公司的同事们发表了一些文章,提出了适用于所有气井的基本流动方程,该技术可以忽略渗透率和裂缝的影响。1967 年,Matthews 和 Russell 对这项技术进行归纳总结并出版了《压力恢复和产能试井》一书。1977 年 Earlougher 在《试井分析的进展》专题中又重新对该项技术进行了说明;1975 年,出版了一部关于产能试井和不稳定试井分析方法的论著。

由于采用水力压裂增产措施的气井较多,人们也越来越重视压裂气井压力资料的分析。参考文献[4]~[7]给出了 1962—1978 年间在压裂井试井分析方面的主要研究成果。