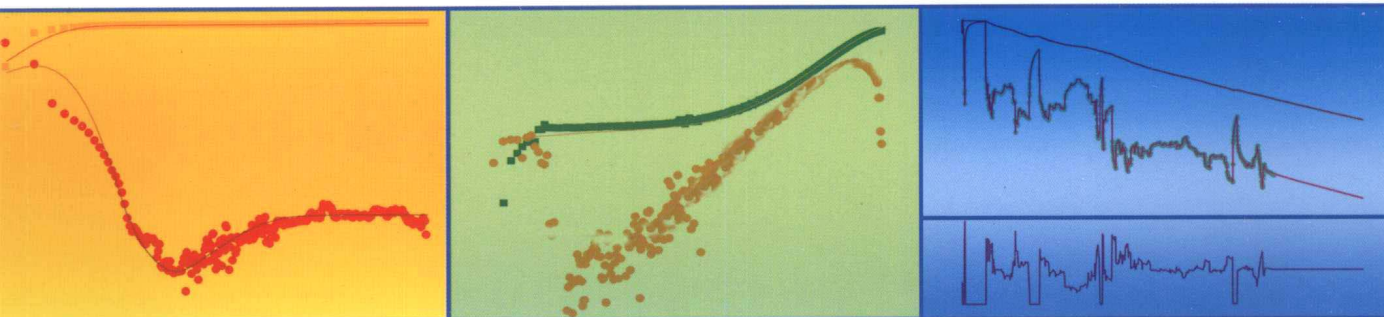


复杂气藏现代试井 分析与产能评价

孙贺东 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对低渗、异常高压、多层、火山岩和碳酸盐岩等复杂气藏开发中在试井分析、产能评价方面遇到的难题,系统、深入地介绍了相应的理论研究进展、矿场实践及主要认识。本书内容丰富、实用性强,具有理论联系实际的特点,可为今后类似气藏的动态描述提供宝贵的经验和技术指导。

本书可供从事油气藏工程方面的现场技术人员使用,也可作为高等院校师生与科研单位有关技术人员的参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂气藏现代试井分析与产能评价/孙贺东著.

北京:石油工业出版社,2012.9

ISBN 978-7-5021-9092-7

I. 复…

II. 孙…

III. 复杂地层-气井试井

IV. TE373

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 109164 号

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

编辑部:(010) 64523596 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10

字数:249 千字 印数:1—1000 册

定价:58.00 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

新世纪以来,我国天然气工业进入跨越式发展的新阶段,天然气产量以每年 100 亿立方米的速度迅猛增长。相继投产的各类复杂气藏非均质性极强,使得试井分析与产能评价的难度增大,《复杂气藏现代试井分析与产能评价》一书应时而作,顺势而生。

该书针对低渗、异常高压、多层、火山岩和碳酸盐岩等 5 类复杂气藏开发在试井分析、产能评价方面遇到的难题,系统地阐述了作者在全生命周期试井分析、产能评价等方面的主要理论方法及其矿场实践。

该书以气井试井与试采动态资料的分析为切入点,运用现代试井分析、物质平衡和生产动态分析等气藏工程分析方法,综合地质、工艺、工程等信息,研究刻画储层物性及非均质性变化特征,揭示影响气井产能与稳产能力的关键因素,预测不同生产条件下的气井合理配产,为气田开发技术政策的制定提供依据,将产能评价技术从传统的无阻流量经验配产法提升到基于物质平衡方法配产的新水平,大大降低了方案编制的风险性。

该书内容主要来自于对实践经验的总结,因此对国内复杂气藏的开发具有现实的指导意义,其中许多成果已经应用于苏里格、迪那 2、涩北、克拉美丽、塔中 I 等十余个不同类型复杂气藏的前期评价及开发方案编制,提高了气田开发的科学性、预见性和经济效益,为中国复杂气藏开发和快速上产提供了理论方法与技术支撑。

相信该书的出版将会为类似气田气藏工程方面的研究提供有益的借鉴,也将为试井技术的进步、人才培养起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2012 年 9 月

前 言

进入 21 世纪, 中国天然气工业进入快速发展阶段。全国天然气产量由 2001 年的 302 亿立方米上升到 2011 年的 1025.3 亿立方米。苏里格、克拉 2、涩北、克拉美丽、塔中 I 等不同类型复杂气藏相继投入开发。这些气藏储层介质多样、储层平面展布各异、流体性质多样, 现代试井分析与产能评价的工作难度更为突出。全生命周期的现代试井分析不仅可求取地层参数、认识改造效果, 还可估算动态储量、评价单井稳产能力, 与产能评价技术、物质平衡技术等一起成为进行储层动态描述的主要工具。本书针对低渗、异常高压、多层、火山岩和碳酸盐岩 5 类复杂气藏的特点, 较为系统地论述了各类复杂气藏全生命周期试井分析、产能评价方面的最新研究成果。本书内容是笔者多年来从事科学研究工作的一部分, 具有理论与实践相结合的特点, 并在生产实践中得到较好的应用。

在此, 感谢笔者的硕士研究生导师西安石油大学高承泰教授、博士导师西安交通大学周芳德教授、博士后导师中国科学院力学研究所刘曰武研究员, 正是他们的耐心指导才使笔者走向科研之路并不断前进。感谢中国石油勘探开发研究院廊坊分院李熙喆副院长、陈建军副总师和开发所陆家亮所长、龙道江书记、万玉金副所长, 正是他们使笔者有机会承担中国石油天然气集团公司多个重点气田动态描述的科研任务, 特别感谢试井专家庄惠农教授、韩永新副所长, 遇到困难时, 正是他们耐心的指点才使笔者顺利完成科研任务。感谢中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院的肖香姣、邓兴梁、罗春树、施英、阳建平等项目长, 中国石油川庆钻探长庆井下技术作业公司孙虎书记, 中国石油长庆油田公司苏里格研究中心范继武所长、中国石油新疆油田公司勘探开发研究院王彬所长、杨作明项目长, 在项目合作过程中给予的支持与帮助。

感谢中国石油勘探开发研究院中青年创新基金 (No. 2009A1715)、中国博士后科学基金 (No. 2011M500403)、中国博士后科学基金第五批特别资助 (No. 2012T50140) 的资助。

由于笔者水平有限, 书中难免有表达不当之处, 敬请读者给予批评指正。

2012 年 9 月 10 日

目 录

第一章 低渗气藏试井分析与产能评价技术	(1)
第一节 无阻流量小于测试产量的异常情况分析	(1)
第二节 低渗气井试气工艺方法的改进	(5)
第三节 低渗压裂气井产能影响因素分析	(13)
第四节 封闭气藏产量递减规律及动态预测	(17)
第五节 具有补给的气藏物质平衡方程及动态预测	(21)
第二章 异常高压气藏试井分析与产能评价技术	(27)
第一节 异常高压裂缝性应力敏感气藏的数值试井分析	(27)
第二节 应力敏感性气藏产能评价及动态预测	(32)
第三节 水驱气藏气井试井曲线特征	(36)
第三章 多层气藏试井分析与产能评价技术	(43)
第一节 多层油气藏最大有效井径试井模型	(43)
第二节 二层气藏物质平衡方程及其应用	(68)
第三节 多层合采气藏优化配产及动态预测	(77)
第四章 火山岩气藏试井分析与产能评价技术	(81)
第一节 试井特征分析	(81)
第二节 井间连通性分析	(86)
第三节 产能分析与合理配产	(91)
第五章 碳酸盐岩气藏试井分析与产能评价技术	(102)
第一节 缝洞型油气藏试井分析研究进展	(102)
第二节 直井试井特征	(106)
第三节 水平井试井特征	(111)
第四节 交接面有附加阻力的试井分析	(114)
第五节 交接面有附加阻力的产量不稳定分析	(121)
第六节 碳酸盐岩凝析气藏动态描述分析技术	(129)
参考文献	(145)

第一章 低渗气藏试井分析与产能评价技术

低渗气藏是指试井渗透率在 $0.1 \sim 5\text{mD}$ 范围内的气藏，这类气藏的特点是储量大、单井产能低、需通过储层改造措施才能获得工业产能。试井分析与产能评价技术是正确认识油气藏，进行油气藏开发动态分析与预测，进而实现油气藏合理开发的重要手段。该技术以气井试井与试采动态资料分析为切入点，运用现代试井分析、物质平衡和生产动态分析等气藏工程分析方法，综合地质、工艺、工程等信息，研究刻画储层物性及非均质性变化特征，揭示影响气井产能与稳产能力的关键因素，进而有针对性地提出增产挖潜措施对策，预测不同生产条件下的气井合理配产，为气田开发技术政策的制定提供依据。

第一节 无阻流量小于测试产量的异常情况分析

一、河道边界对气井测试产能的影响

长期以来，气井产能评价中习惯上采用无阻流量这一指标，并以此作为气井生产合理配产的依据。然而，在低渗致密气藏气井产能测试中，常常出现利用测试数据计算的气井无阻流量小于实际测试产量的现象。如何理解这一现象，对于正确认识气井的产能、确定气藏合理的开发技术政策具有极其重要的意义。在分析不同气井产能指标的基础上，通过理论模拟，对比研究了不渗透岩性边界对低渗压裂气井测试产能的影响。

众所周知，气井的产能主要取决于3个要素：地层压力、地层的渗透率及气井的完井情况。但气井的长期稳产能力，不但受上述要素的影响，还取决于单井控制储量的大小。也就是说，长期稳产能力由不渗透岩性边界的分布状态、渗透层连通区域的大小及地层的非均质分布等因素决定。

目前，低渗气藏主要采用修正等时试井的方式来获取气井的无阻流量值。通过实测数据的计算，可得到瞬时和延时无阻流量两项指标。其中，瞬时无阻流量是早期短时开井、井筒附近地层压力仍处于较高水平条件下的气井生产能力；延时无阻流量则是利用延时测点流压计算得到的产能指标。

传统意义上的气井绝对无阻流量值，是指气井生产进入拟稳态条件下的敞喷能力。但由于低渗气藏气井生产达到拟稳态常常需要数月、几年甚至更长的时间，因此很难通过现场测试来获取。该值通常利用该井压力恢复试井解释的地层参数，结合地质上对供气边界大小的认识成果，采用理论公式计算得出。

从以上3种产能指标的分析不难看出，它们代表了不同供给范围内气井的产气能力大小。在测试未达到拟稳态前，延时测试时间越长，实测数据计算得到的延时无阻流量越接近理论上稳定的绝对无阻流量值。

为研究河道边界对气井产能的影响，首先模拟了正方形（ $1500\text{m} \times 1500\text{m}$ ， $X_w = Y_w =$

750m) 供给边界下一口低渗压裂气井的修正等时试井压力变化。然后, 在供气面积等同的情况下, 模拟了 3 种不同河道宽度下的井底流动压力变化。图 1-1 为模拟地层和井的模型示意图, 图 1-2 为 4 种方案等效的河道宽度下模拟的井底流动压力变化。

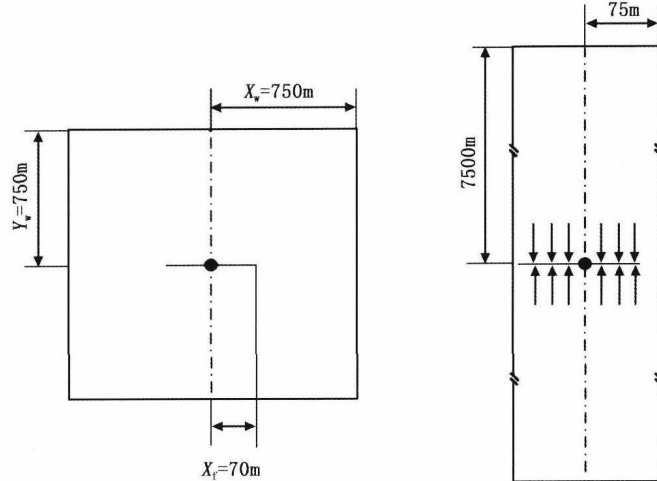


图 1-1 模拟地层和井的模型示意图

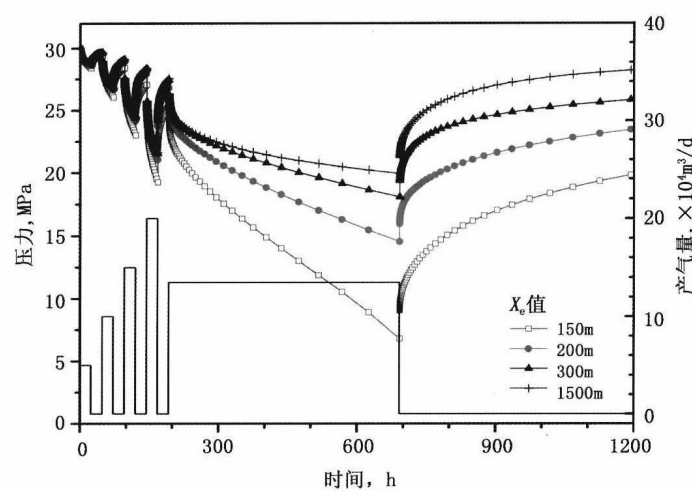


图 1-2 4 种等效的河道宽度下模拟井底流动压力变化

模型中采用的参数如下: 原始地层压力为 30MPa, 产层厚度为 10m, 地层渗透率为 0.5mD, 地层温度为 100℃, 孔隙度为 8%, 裂缝面表皮系数为 0.1, 非达西流动系数为 $2 \times 10^{-6} (m^3/d)^{-1}$, 裂缝半长 X_f 为 70m, 井筒半径为 0.08m。修正等时试井 4 个产量序列及延时段产量分别是 $5 \times 10^4 m^3/d$ 、 $10 \times 10^4 m^3/d$ 、 $15 \times 10^4 m^3/d$ 、 $20 \times 10^4 m^3/d$ 、 $13.5 \times 10^4 m^3/d$ 。4 种方案等效的河道宽度 X_e 分别是 150m、200m、300m、1500m。

4 种方案模拟结果表明: 相同的测试产量条件下, 河道边界越窄, 延时生产段井底流压的下降速度越快, 相同关井时间内压力恢复的程度越低。

利用上面的模拟数据, 可以得到延时产能分析结果, 如图 1-3 所示。等效河道宽度分别为 150m、200m、300m、1500m 时, 计算的延时无阻流量依次为 $14.2 \times 10^4 m^3/d$ 、 $16.9 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $19.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $22.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

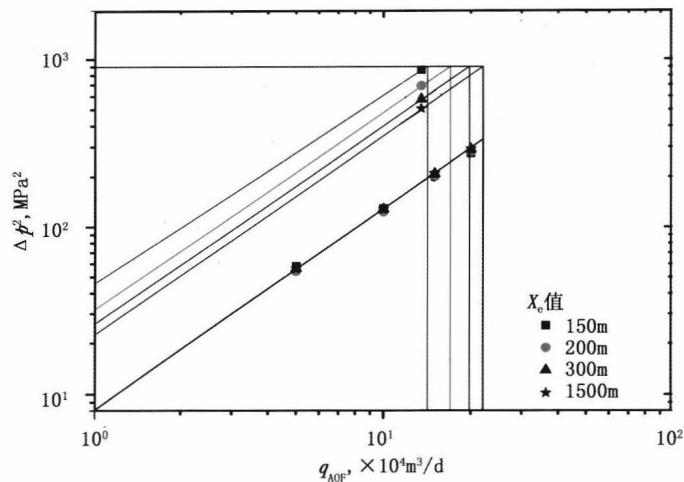


图 1-3 4 种不同供给边界条件下测试产能分析图

计算结果表明：当河道宽度小于 300m 时，将出现延时无阻流量小于测试瞬时产量的现象。这是由于随着河道变窄，延时测点的流动压力也越低，使延时产能分析线上移，带动计算无阻流量的竖线向左移动，从而导致计算的延时无阻流量低于测点的实际产量。河道越窄，相差越大。

大量的模拟表明，上述差值不但与河道的宽度有关，还与模拟中测试产量的大小有较大的关系。若测试产量小，即使较窄的河道边界，也出现不了计算的延时无阻流量小于测试产量的情况。这与现场实际情况吻合，即同一低渗河流相沉积的气藏内，较小测试产量的气井，计算的延时无阻流量不低于实际气井产量。

另外，对低渗裂缝性储层中的气井，当储层渗透率各向异性特别明显时，也可出现类似狭窄条带边界的特征。其特征可采用渗透率与供给区边界形状的等效处理来描述，即将正方形供给区等效为有效渗透率 $K_{\text{等效}} = \sqrt{K_x \cdot K_y}$ 、长宽比为 $\sqrt{K_x/K_y}$ 的矩形供给区。

二、实例分析

T5 井打开的二叠系地层为河流相沉积形成的低渗透砂岩气层，压裂改造后进行了修正等时产能试井。图 1-4 为该井指数式产能测试分析曲线图。

可以看出，该井计算的延时无阻流量明显小于实际测试产量。其原因就是由于该井位于一个狭窄的河道砂体内，使得延时开井期井底流压一直处于不断的下降中。所以，采用延时末点流压计算得到的延时无阻流量仍然是一个不稳定的值，若测试时间再长，该计算结果还会更小。

图 1-5 是该井产能试井终关井压力恢复双对数曲线图，表现出了典型的条带形地层压裂井特征，即早期的续流段后，接着是斜率为 0.5 的裂缝线性流段，并一直延续下去，与边界线性流交织在一起，没有出现拟径向流阶段。试井分析结果显示，地层渗透性很低，河道边界宽度不足 100m。

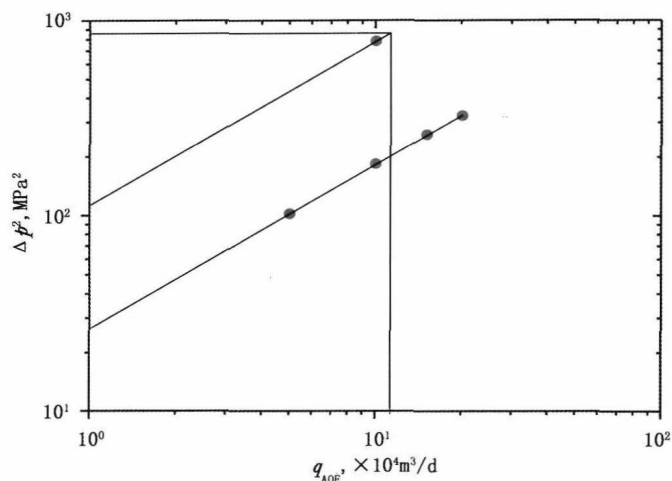


图 1-4 T5 井指数式产能测试分析曲线图

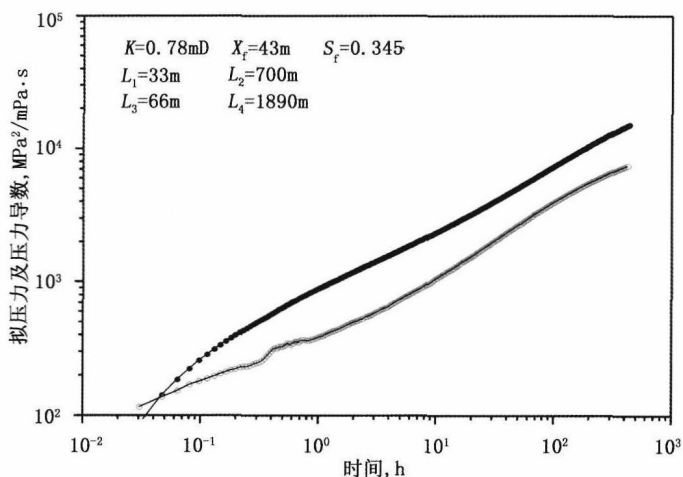


图 1-5 T5 井压力恢复双对数曲线图

三、小结

低渗压裂气井 3 种产能指标代表了不同供给范围内气井的产气能力大小。利用修正等时试井方法获取延时无阻流量小于实际测试产量属正常现象，其真正的稳定无阻流量值更小。对于河流相条带形边界低渗气藏压裂井，当修正等时产能测试产量过高时，特别容易出现瞬时流量大于延时无阻流量的现象。此特征在低渗裂缝性储层气井的测试中也会出现。低渗压裂气井修正等时试井获取的气井延时无阻流量，不但与储层本身固有的特征有关，还受测试实际产量大小的影响。低渗压裂气井的开发配产，不能简单采用测试无阻流量的几分之一来确定，利用不稳定试井分析建立全生命周期的气井动态储层模型，是准确进行长期动态预测的唯一选择。

第二节 低渗气井试气工艺方法的改进

一、目前试气工艺压力分析

低渗气井目前试气过程如图 1-6 所示, 由两个压降过程及两个压力恢复过程组成, 其中 q_1 表示敞喷期的平均产量, 这个阶段不进行流量压力测试, 因而无法进行分析, 生产时间 t_{p1} 约 7d 左右, 接着关井恢复至时间 t_{s1} , 关井期 $t_{s1} - t_{p1}$ 约 10d 左右, 接着开井以定产量 q_2 生产至时间 t_{p2} , 生产时间 $t_{p2} - t_{s1}$ 约 3d 左右, 然后关井。 p_{wf1} , p_{wf2} , p_{s1} 分别是 t_{p1} , t_{p2} , t_{s1} 时刻下的井底流压。关井后可能测压力恢复, 也可能结束试气。

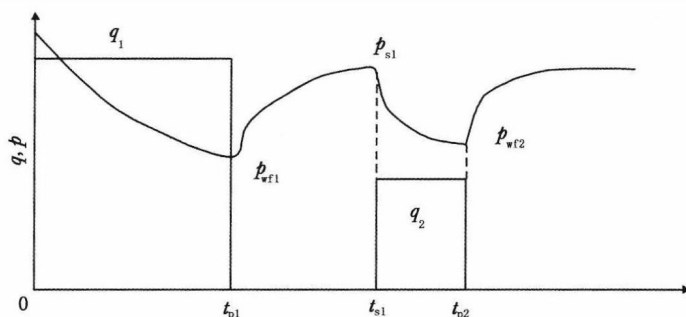


图 1-6 低渗井目前试气过程示意图

利用叠加原理对现行试气流动过程作一分析。当时间位于 t_{s1} 至 t_{p2} 的第二生产期时, 井底压力可表示为:

$$p_i - p_{wf} = \frac{1.842 \times 10^{-3} B\mu}{Kh} \left\{ q_1 \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t_D}{\gamma} \right) - q_1 \frac{1}{2} \ln \left[\frac{4(t - t_{p1})_D}{\gamma} \right] + q_2 \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[\frac{4(t - t_{s1})_D}{\gamma} \right] + S \right\} \right\}$$

$$= m \left\{ \frac{q_1}{q_2} \lg \left(\frac{t}{t - t_{p1}} \right) + \lg \left[\frac{K(t - t_{s1})}{\phi \mu C_i r_w^2} \right] + 0.9077 + 0.87S \right\} \quad t_{s1} < t < t_{p2} \quad (1-1)$$

式中 p_i ——原始地层压力, MPa;
 B ——体积系数, 无量纲;
 μ ——天然气黏度, mPa·s;
 K ——渗透率, mD;
 h ——地层厚度, m;
 t_D ——无因次生产时间, 无量纲;
 γ ——欧拉常数, 1.78107;
 S ——表皮系数, 无量纲;
 m ——斜率, MPa/cycle;
 ϕ ——孔隙度, 无量纲;
 C_i ——综合压缩系数, MPa⁻¹;
 r_w ——井筒半径, m。

斜率 m 由式 (1-2) 给出:

$$m = \frac{2.21 \times 10^{-3} q_2 B \mu}{Kh} \quad (1-2)$$

于是有

$$p_{wf} = p_i - m \frac{q_1}{q_2} \lg\left(\frac{t}{t - t_{p1}}\right) - m \left\{ \lg\left[\frac{K(t - t_{s1})}{\phi \mu C_i r_w^2}\right] + 0.9077 + 0.87S \right\} \quad (1-3)$$

在现行的试气分析中,认为第一恢复期已近似恢复至原始地层压力 p_i ,因而将式(1-3)当做单一压降过程使用:

$$p_{wf} = p_i - m \left\{ \lg\left[\frac{K(t - t_{s1})}{\phi \mu C_i r_w^2}\right] + 0.9077 + 0.87S \right\} \quad (1-4)$$

由于 t_{p1} 约为 168h (7d), t_{s1} 约为 408h (17d), t_{p2} 约为 480h (20d), 再设 $q_1 \approx 2q_2$, $t_{s1} < t < t_{p2}$, 则有:

$$m \frac{q_1}{q_2} \lg\left(\frac{t}{t - t_{p1}}\right) > 2m \lg\left(\frac{480}{480 - 168}\right) = 0.374m$$

m 是一个对数周期的压降, m 与 Kh 成反比。因此, $0.374m$ 不是一个可以忽略的数值,对于低渗气井更是如此。这说明在敞喷期与生产期中间夹入 10d 左右的恢复期,起不到预期的作用,即让地层近似恢复至原始状态,反而会造成不必要的误差。第一恢复期的存在,不仅影响生产期的压降分析,如上所述,也影响第二恢复期的压力恢复试井分析。对于第二压力恢复期,按照叠加原理有:

$$\begin{aligned} p_i - p_{ws} &= \frac{1.842 \times 10^{-3} B \mu}{Kh} \left\{ q_1 \left[\frac{1}{2} \ln\left(\frac{4t_D}{\gamma}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4(t - t_{p1})_D}{\gamma}\right) \right] \right. \\ &\quad \left. + q_2 \left\{ \frac{1}{2} \ln\left[\frac{4(t - t_{s1})_D}{\gamma}\right] - \frac{1}{2} \ln\left[\frac{4(t - t_{p2})_D}{\gamma}\right] \right\} \right\} \\ &= m \left[\frac{q_1}{q_2} \lg\left(\frac{t}{t - t_{p1}}\right) + \lg\left(\frac{t - t_{s1}}{t - t_{p2}}\right) \right] \quad t_{p2} < t < t_{s2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 p_{ws} ——关井压力。

即有

$$p_{ws} = p_i - m \frac{q_1}{q_2} \lg\left(\frac{t}{t - t_{p1}}\right) - m \lg\left(\frac{t - t_{s1}}{t - t_{p2}}\right) \quad (1-6)$$

对于单一压降过程后的压力恢复赫诺公式有:

$$p_{ws} = p_i - m \lg\left(\frac{t - t_{s1}}{t - t_{p2}}\right) \quad (1-7)$$

与式(1-6)比较可见,将式(1-6)当式(1-7)使用会造成类似的误差。

二、改进试气工艺压力分析

针对现行试气工艺所存在的问题及缩短试气过程的生产要求,建议将敞喷阶段与生产阶段直接连接起来,取消敞喷后约 10d 的压力恢复。改进后的试气过程如图 1-7 所示。

这是类似双流量测试的过程,不同点在于第一流动阶段敞喷流量大且不稳定,其流量

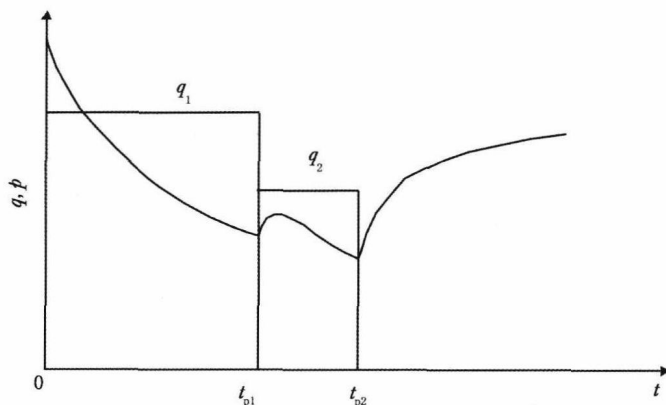


图 1-7 低渗气井改进试气过程示意图

q_1 是粗估值。要求在敞喷阶段 t_{p1} 结束前 3d 下井底压力计，并安装孔板测量气井流量，控制流量使气井在敞喷阶段后期流量 q_1 稳定，第二流动段以稳定产量 q_2 生产至 t_{p2} 关井，然后测恢复压力或者结束试气过程。为了求得更好的试井资料，拟将稳定生产阶段的时间延长至 5d 左右。

为了获得较好的双流量测试资料，不但要求第二流动段产量 q_2 很稳定（误差小于 5%），而且要求第一流动段末 3 天的产量 q_1 也是稳定的，只要小心微调阀门，这一要求不难达到。如果此后关井测压力恢复，则可得到高质量的压力恢复曲线，求得可靠的地层和气井参数。这样的试气作业，可以得到一套二流量试井资料和一套压力恢复曲线，二者皆可用于来进行试井解释。

依据叠加原理，当 $t_{p1} < t < t_{p2}$ 时，井底压力可以表示为：

$$\begin{aligned} p_i - p_{wf} &= \frac{1.842 \times 10^{-3} B\mu}{Kh} \left\{ q_1 \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t_D}{\gamma} \right) + (q_2 - q_1) \frac{1}{2} \ln \left[\frac{4(t - t_{p1})_D}{\gamma} \right] + q_2 S \right\} \\ &= m \left\{ \frac{q_1}{q_2} \lg \left(\frac{t}{t - t_{p1}} \right) + \lg \left[\frac{K(t - t_{p1})}{\phi\mu C_i r_w^2} \right] + 0.9077 + 0.87S \right\} \end{aligned} \quad (1-8)$$

令

$$X = \frac{q_1}{q_2} \lg \left(\frac{t}{t - t_{p1}} \right) + \lg(t - t_{p1})$$

则式 (1-8) 变成：

$$p_{wf} = p_i - m \left[X + \lg \left(\frac{K}{\phi\mu C_i r_w^2} \right) + 0.9077 + 0.87S \right] = b - mX \quad (1-9)$$

绘制 $p_{wf}-X$ 图会得到一条直线，斜率为 $-m$ ，截距为 b ：

$$b = p_i - m \left[\lg \left(\frac{K}{\phi\mu C_i r_w^2} \right) + 0.9077 + 0.87S \right] \quad (1-10)$$

$$m = \frac{2.21 \times 10^{-3} q_2 \mu B}{Kh} \quad (1-11)$$

由斜率 m 求得 Kh 值，由截距求得表皮系数 S ：

$$Kh = \frac{2.12 \times 10^{-3} q_2 \mu B}{m} \quad (1-12)$$

$$S = 1.151 \left[\frac{p_i - b}{m} - \lg \left(\frac{K}{\phi \mu C_i r_w^2} \right) - 0.9077 \right] \quad (1-13)$$

将敞喷期与生产期合在一起看做关井前的生产期，根据估计的敞喷期产量 q_1 ，可以计算折算生产时间 t_p ：

$$t_p = \frac{q_1 \times t_{p1} + q_2 (t_{p2} - t_{p1})}{q_2} = t_{p2} + \left(\frac{q_1}{q_2} - 1 \right) t_{p1} \quad (1-14)$$

分析方法与普通压力恢复试井分析完全一致，可用图版分析或赫诺法分析。于是压力恢复可表示为：

$$p_{ws} = p_i + m \lg \left(\frac{t - t_p}{t} \right) = p_i + m \lg \left(\frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \right) \quad (1-15)$$

其中 $\Delta t = t - t_p$ 。绘赫诺曲线 $p_{ws} - \lg \left(\frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \right)$ ，得半对数直线，其截距为原始地层压力 p_i ，斜率为 m ，于是：

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{2.12 \times 10^{-3} q_2 B}{m} \quad (1-16)$$

表皮系数 S 为：

$$S = 1.151 \left[\frac{p_{1h} - p_{wf}}{m} - \lg \left(\frac{K}{\phi \mu C_i r_w^2} \right) - 0.9077 \right] \quad (1-17)$$

这里 p_{1h} 是 $\Delta t = 1h$ 时的压力值， p_{wf} 是关井前的井底压力值。对于二流量压降试井及二流量压降后的恢复试井，都可用试井软件 EPS 或者 ECRIN 进行有效分析。

三、两种试气方法单井数值模拟研究

假设圆形封闭边界为 1000m，孔隙度为 6%，原始地层压力为 24MPa，渗透率依次取 10mD、5mD、1mD，表皮系数为 -6，井径为 0.1m，气层厚度为 10m，地层温度为 70℃，天然气相对密度为 0.6，非达西流动系数为 $2 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\text{d})^{-1}$ 。下面以渗透率为 10mD 情形为例，说明整个模拟过程。首先根据以上数据进行试井设计。目前情形的试井设计如图 1-8 所示，假设酸化压裂后以 $15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的平均产量放喷 7d 时间 [以 $(0 \sim 30) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的随机产量进行生产，假设每个时间段为 4h]，然后关井 10d，等待井底压力恢复（至接近原始地层压力），下压力计测得压力作为原始地层压力 p_i 。然后以大致稳定的产量 $10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 生产 3d。

改进情形试井设计如图 1-9 所示，假设酸化压裂后以 $15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的平均产量放喷 7d 时间 [以 $(0 \sim 30) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的随机产量进行生产，假设每个时间段为 4h]，然后以大致稳定的产量 $10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 生产 5d，最后关井测压力恢复。

将设计数据加上一定的随机数后作为输入变量，用 ECRIN 软件进行试井解释，从而比较两种方法的优劣。两种方法对比结果见表 1-1、表 1-2，采用改进的试气工艺后，不但缩短了试气时间，而且试井解释参数还有所提高。

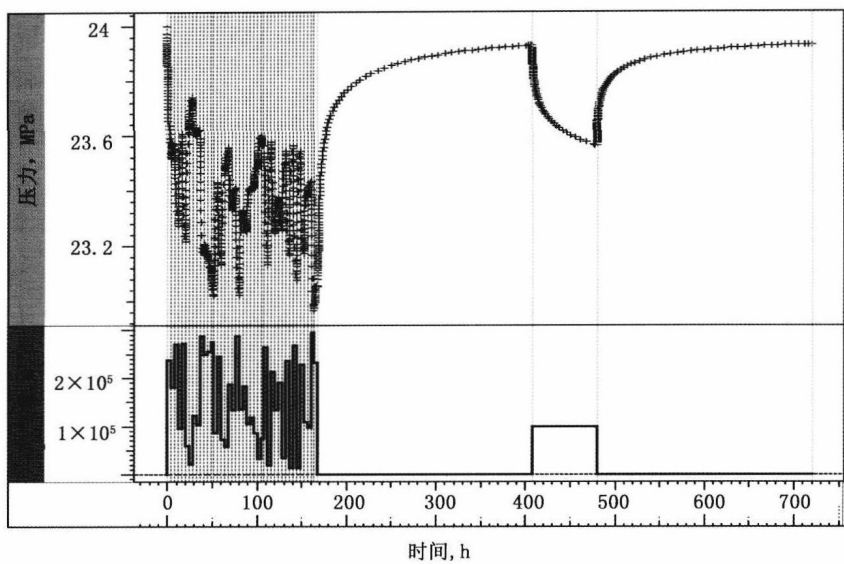


图 1-8 目前试气过程试井设计—产量随机

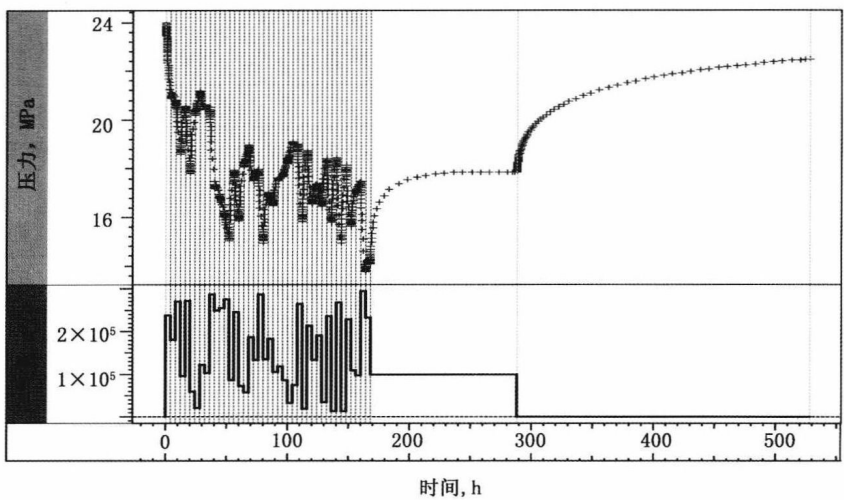


图 1-9 改进试气过程试井设计—产量随机

表 1-1 不同渗透率情况下半对数试井解释主要参数对比表

渗透率 (mD)	参数	模拟参数	半 对 数			
			目前流程		改进流程	
			结果	误差, %	结果	误差, %
10	K , mD	10	11.60	16.00	10.90	9.00
	S	-6	-5.53	7.83	-5.62	6.33
	p_i , MPa	24	23.98	0.07	23.99	0.04
	m , $\text{kPa}^2/\text{cP}^\bullet$		4.46538×10^8		4.76775×10^8	

① $1\text{cP} = 1 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

续表

渗透率 (mD)	参数	模拟参数	半 对 数			
			目前流程		改进流程	
			结果	误差, %	结果	误差, %
5	K , mD	5	5.48	9.60	5.35	7.00
	S	-6	-5.60	6.67	-5.65	5.83
	p_i , MPa	24	23.99	0.04	23.99	0.03
	m , kPa^2/cP		9.44672×10^8		9.68270×10^8	
1	K , mD	1	1.24	24.00	1.23	23.00
	S	-6	-5.42	9.67	-5.45	9.17
	p_i , MPa	24	23.93	0.29	23.91	0.37
	m , kPa^2/cP		4.18458×10^9		4.22361×10^9	
0.5	K , mD	0.5	0.666	33.20	0.668	33.60
	S	-6	-5.32	11.33	-5.36	10.67
	p_i , MPa	24	23.85	0.64	23.79	0.88
	m , kPa^2/cP		7.76903×10^9		7.74985×10^9	

表 1-2 目前试气流程放喷后压力恢复程度表（随机产量）

渗透率 mD	原始压力 MPa	放喷后恢复压力, MPa	
		目前流程	恢复程度, %
10	24	23.93	99.69
5		23.90	99.60
1		23.33	97.20
0.5		22.72	94.65

四、改进试气方法实例分析

×井为××气田的一口天然气预探井，完钻井深为 2850.0m。该井钻遇石盒子组、马家沟组含气显示层段，完钻层位马五 5。本次试气层位为盒 1，气层综合数据见表 1-3。

表 1-3 ×井气层综合数据表

层位	气 层		电 性					
	井段 m	厚度 m	声波时差 $\mu\text{s}/\text{m}$	电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$	孔隙度 %	基质渗透率 mD	含气饱和度 %	解释 结果
盒 1	2294.7 ~ 2295.6	0.7	222.0	32.7	6.88	0.57	34.59	干层
	2295.4 ~ 2300.5	5.1	234.7	41.8	9.02	2.52	55.88	气层
	2300.5 ~ 2301.1	0.9	231.9	39.3	7.91	1.23	43.77	干层
	合计	6.7	233.0	40.5	8.65	2.14	52.03	

2005 年 10 月 8 日至 10 月 25 日关放排液，累积入井液量 186.5m^3 ，累积排出液量 222.8m^3 。10 月 25 日至 10 月 29 日采用“一点法”测试求产，流动时间为 102.5h ，累积产气量为 $21.6694 \times 10^4\text{m}^3$ ，稳定时间为 43h ，井口产量为 $5.3383 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，计算无阻流量为 $12.9617 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

(1) 不考虑排液敞喷。

10 月 25 日至 10 月 29 日“一点法”测试求产期间，流动时间 102.5h ，稳定时间 43h ，井口产量为 $5.3383 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，累积产气量为 $9.56 \times 10^4\text{m}^3$ 。不稳定生产阶段时间为 $102.5\text{h} - 43\text{h} = 59.5\text{h}$ ，平均产量为 $(21.6694 - 9.56) / (59.5/24) = 4.8844 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

双对数分析结果： $p_i = 7.4\text{MPa}$ ， $Kh = 143.0\text{mD} \cdot \text{m}$ ， $K = 21.34\text{mD}$ ， $S = -1.91$ 。河道平行边界宽度为 540m 。半对数分析结果为： $p_i = 7.398\text{MPa}$ ， $Kh = 111.0\text{mD} \cdot \text{m}$ ， $S = -2.83$ 。两者结果较为接近（图 1-10）。

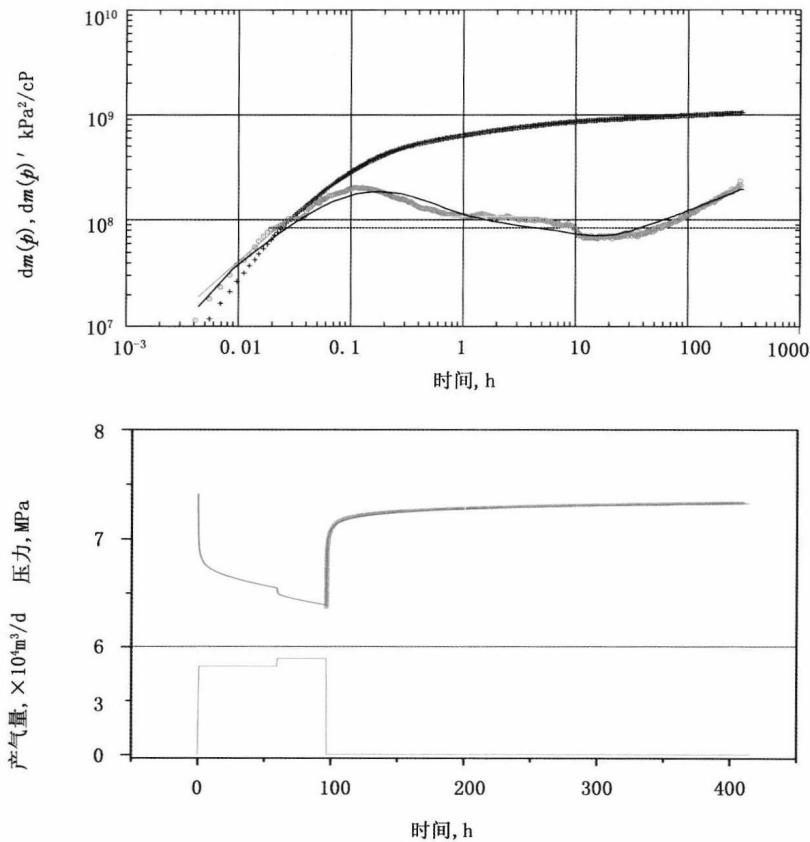


图 1-10 ×井试井解释结果（不考虑敞喷）

(2) 考虑排液敞喷。

2005 年 10 月 8 日至 10 月 25 日关放排液，累积生产 168h ，假设平均产量为 $(21.6694 - 9.56) / (59.5/24) = 4.8844 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

双对数分析结果： $p_i = 7.4582\text{MPa}$ ， $Kh = 152.0\text{mD} \cdot \text{m}$ ， $K = 22.68\text{mD}$ ， $S = -1.67$ 。河道平行边界宽度为 960m 。半对数分析结果为： $p_i = 7.46694\text{MPa}$ ， $Kh = 115.0\text{mD} \cdot \text{m}$ ， $S = -2.75$ 。两者结果较接近（图 1-11）。

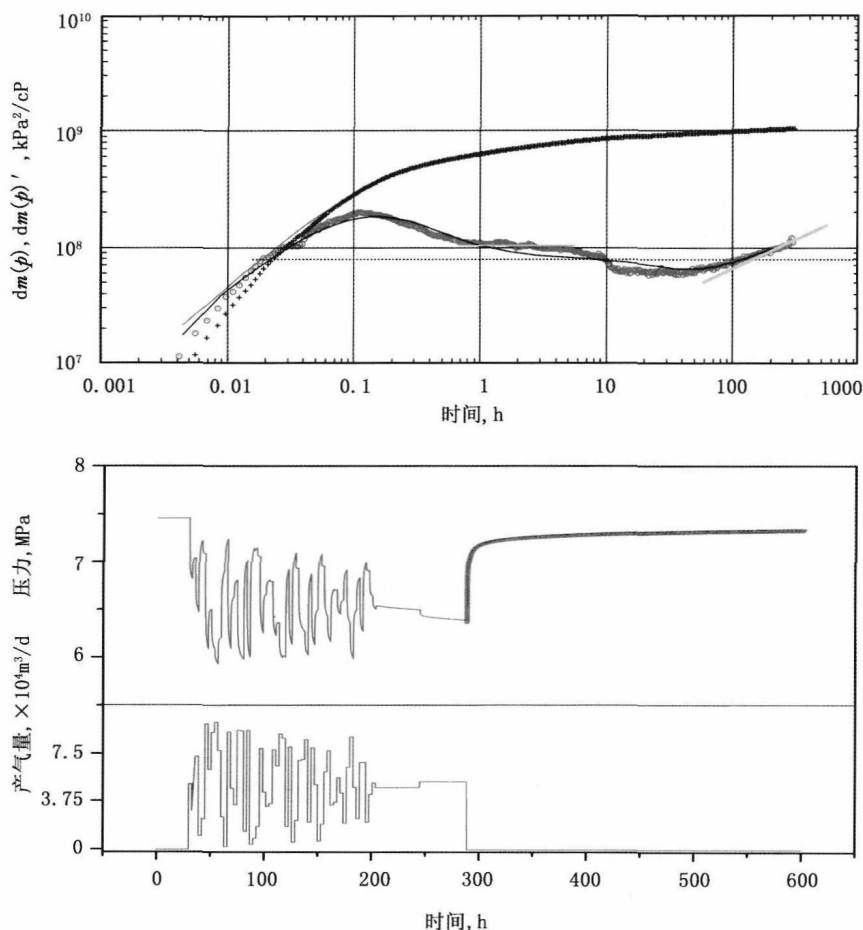


图 1-11 ×井试井解释结果 (考虑敞喷)

考虑敞喷前后, 试井解释结果有较大的变化。特别是河道平行边界的宽度, 不考虑敞喷时, 河道平行边界的宽度 $= 270\text{m} \times 2 = 540\text{m}$, 考虑敞喷后, 河道平行边界的宽度 $= 480\text{m} \times 2 = 960\text{m}$ 。

五、小结

(1) 目前试气方法在敞喷期与生产期中间夹入 10d 左右的恢复期, 达不到让地层近似恢复至原始状态的预期, 反而会造成不必要的误差。第一恢复期的存在, 不仅影响生产期的压降分析, 也影响第二恢复期的压力恢复试井分析。

(2) 目前试气 3d 生产段所处的流动阶段属于无限大作用期, 远达不到拟稳态。而将敞喷期 7d 加上生产期 5d, 则可接近拟稳态流动的要求。

(3) 单井模拟结果表明: 改进后的试气方法解释参数结果优于目前试气方法, 不但缩短了试气测试时间, 而且解释的地层系数、表皮系数、原始地层压力、无阻流量等更可靠。