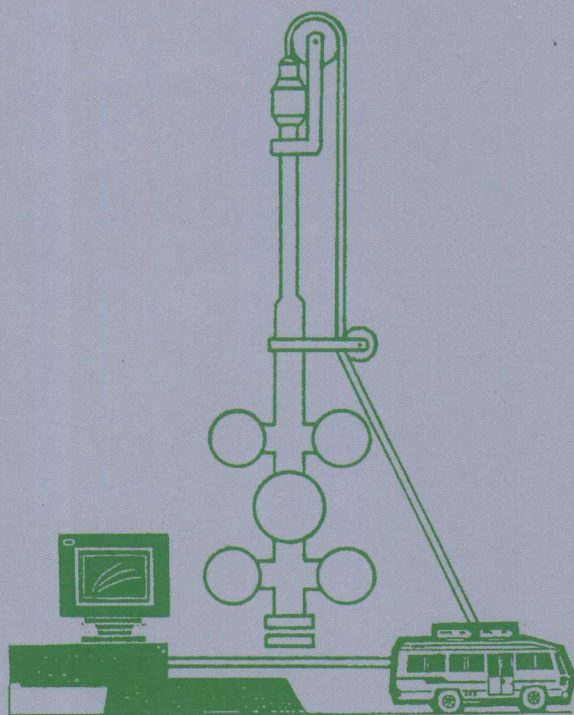


凝析气藏试井与生产动态 预测研究文集

(上册)

王俊明 尹庆文 杜玉洪 刘 聪 王承毅 主编



 科学技术文献出版社

凝析气藏试井与生产动态 预测研究文集

(上册)

王俊明 尹庆文 杜玉洪 刘 聪 王承毅 主编

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北 京

图书在版编目(CIP)数据

凝析气藏试井与生产动态预测研究文集/王俊明等主编.-北京:科学技术文献出版社,2005.1

ISBN 7-5023-4959-6

I. 凝… II. 王… III. 凝析气田-试井-文集 IV. TE372-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006053 号

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路 15 号(中央电视台西侧)/100038
图书编务部电话 (010)68514027,(010)68537104(传真)
图书发行部电话 (010)68514035(传真),(010)68514009
邮 购 部 电 话 (010)68515381,(010)58882952
网 址 <http://www.stdph.com>
E-mail: stdph@istic.ac.cn
策 划 编 辑 科 文
责 任 编 辑 李正德
责 任 校 对 赵文珍
责 任 出 版 王芳妮
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 富华印刷包装有限公司
版 (印) 次 2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
开 本 787×1092 16 开
字 数 343 千
印 张 15.25
印 数 1~1500 册
定 价 48.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

《凝析气藏试井与生产动态 预测研究文集(上册)》

编 委 会

主 编:王俊明 尹庆文 杜玉洪 刘 聪 王承毅

编 委:韩 成 黄在友 王洪光 徐建平 贺子伦

陈继武 马小明 王 莉 张宗亮 崔迪生

温爱国 高建忠 袁文红 王停武 王志愿

程远忠 蒋 华 董英桥 冀秀文 杨士荣

《凝析气藏试井与生产动态 预测研究文集(上册)》

序 言

我们历经五年来的思考与不懈的努力,今天,《凝析气藏试井与生产动态预测研究文集(上册)》终于与大家如期会面了。这是继 1993 年 12 月在中国科学技术出版社完成出版《现代试井解释方法》、2000 年 10 月在中国地质出版社完成出版《油气水井测试分析方法》、2003 年 2 月在中国石油工业出版社完成出版《非牛顿流体注入动态分析方法研究文集》之后,又一部新的力作。

本套书上册收录了作者编写和翻译的凝析气藏试井与生产动态预测研究方面的专业论文 18 篇,有 30 多万字。这些论文从不同角度,论述了凝析气藏试井与生产动态预测研究方法的理论与实践。重点介绍了国外在这一领域研究的最新进展情况,具有非常典型的代表性。本套书的出版和印刷,无疑将对我国油田凝析气藏试井与生产动态预测研究与应用起到积极的促进作用。

在世界石油范围内,凝析气田的储量在石油总储量中占有很大的比例。因此,对这种凝析气藏试井与生产动态预测的研究就显得尤为

重要,特别是1998年大港古潜山亿吨级凝析气田的重大发现,需要制订合理的开发方案,以提高其经济效益。这就为本项工作开展深入研究展现了诱人的前景。

“合抱之木,生于毫末;九层之台,起于垒土;千里之行,始于足下”,成功地完成了本文集的出版和印刷,这只是万里长征走完了第一步,如果这一步也值得骄傲,那是非常渺小的,值得骄傲的还在后头……

我们能在我国石油专业领域有一个长足的发展,主要是有关领导和同志们大力支持和帮助的结果。在以后的蹉跎岁月中,我们有信心再做几项重大创新,其中包括对思想建设与企业管理方面的探索。

借此机会,感谢对本项工作提供支持和帮助的各位同仁,特别感谢我国著名油藏工程专家(教授级高级工程师)朱亚东同志、廊坊分院韩永新博士,对你们充满智慧的思考和辛勤的劳动表示最崇高的敬意;感谢科学技术文献出版社的友好通力合作!最后,希望读者们多提宝贵意见。

编 者
2004年5月

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

本套书(上、下册)比较系统地介绍了国内外凝析气藏试井与生产动态预测方法研究的最新进展情况,详细地论述了该理论在大港油田古潜山凝析气藏勘探与开发工作中的应用情况。

本套书可供我国油田从事地层测试、试井、生产测井及油藏工程方面的地质和工程技术人员以及大专院校师生使用与参考。

科学技术文献出版社是国家科学技术部系统唯一一家中央级综合性科技出版机构,我们所有的努力都是为了使您增长知识和才干。

目 录

(上 册)

凝析气藏中压力降落及恢复的试井分析新进展	(1)
凝析气藏试井分析的实际考虑因素	(13)
凝析气藏试井:取样、测试设计及分析	(26)
凝析气藏水力压裂井的不稳定压力数据的解释	(43)
反凝析气井试井及生产中的组分组成和相变问题	(58)
消除流体相分离对试井解释影响的试井设计及其数据预分析处理	(67)
边界油藏油井动态的预测方法	(76)
凝析气藏中评价井产能预测的理论研究	(90)
凝析气藏评价井产能预测模拟的理论研究	(107)
压裂的凝析气井产能建设:北海 Smorbukk 油田的实例研究	(124)
加拿大凝析气藏生产动态预测	(140)
凝析气藏衰竭式开采动态预测	(146)
溶解气驱储层的生产动态预测	(157)
凝析气藏组分随深度变化的处理方法	(174)
凝析气藏蜡沉淀对井筒的伤害问题	(185)
凝析油气藏注水动态分析	(191)
凝析气藏中的多相非达西流动	(202)
天然气井的试井分析——DHC 试井解释软件的分析步骤介绍:实例	(215)
附录——参数符号、名称、单位及单位换算关系	(228)

凝析气藏中压力降落及恢复的 试井分析新进展

【摘 要】 本文介绍了凝析气藏生产中两相流动条件下,分析压力降落测试及恢复测试的一种新方法,即应用拟压力积分的方法处理物性参数和压力变化而引起的相变。相变是当压力和温度条件适当时在储层内出现的凝析流体的反凝析特性。相变的结果引起了液体饱和度的变化,因此改变了该相的相对渗透率。为了把相对渗透率表示成为饱和度的函数,饱和度在任何时刻均是已知的。然而,这种方法表明了如何用压力、表皮系数和给定衰竭阶段不同区带分布范围的函数计算液相和气相的有效渗透率,而后有效渗透率可以用来描述拟稳态的气井动态、储量和绝对无阻流量(AOF)。

在压力测试期间,与拟稳态下的压力下降时间相比是很短的,此期间的生产油气比假设为一常数,即生产油气比保持一个常数,而实际上在相态变化的环境下很难做到这一点。因此,进行敏感性分析以观察生产油气比的变化对拟压力计算值的影响。在分析过程中,我们发现随着生产压力升高,生产油气比(R_p)以一定的百分比增加,拟压力的百分比误差也稳定增加。我们还观察到,气相有效渗透率的误差总量只是油相有效渗透率误差的3%~9%。

本文有四个部分:第一,拟压力被化简为分割的有效渗透率项。第二,为了得出每一相有效渗透率的相关性,我们修正了试井分析的方程式。第三,在上面实例的情况下或在使用计算的GOR值的情况下,确定拟压力误差。最后,利用步进递进方法解析现场实例,以表明这种方法的有效性。

引 言

试井是一门非常具体的学科,每次测试都必须根据特定井的目的作设计,最常见的试井目的有确定储层传导性、地层伤害、相邻井之间的干扰、不渗透边界的存在及其位置、油藏范围和生产预测等。另外,试井的一个很重要的目的也可以确定作为压力函数的有效渗透率,并用它来建立多相流动系统的流动模型,这一目的作为井测试的新用途,就像本文表明的那样,它可以帮助得到作为压力连续函数的渗透率。

这种关联的应用领域之一就是油藏模拟,在这里,岩心得出的相对渗透率可以得到很好的应用。在大多数情况下,修正的相对渗透率曲线可以得到很好的历史拟合。通常拟合不好是由于地质原因而不是实验室试验得到的相对渗透率曲线的原因,因为反映油藏地质的相对渗透率曲线来自于油藏本身。因而,试井仅仅是一种描述整个油藏系统的非均质性和有代表性

的流体的工具。

图 1 和图 2 表明了凝析气藏中的概念化压力和流体分布情况,三个不同区带的概念是本研究的主要基础。

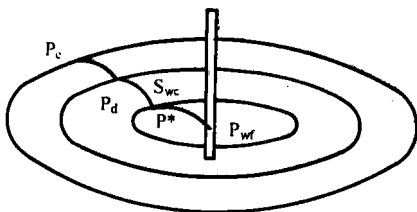


图 1 凝析气藏中直井的三区带示意图

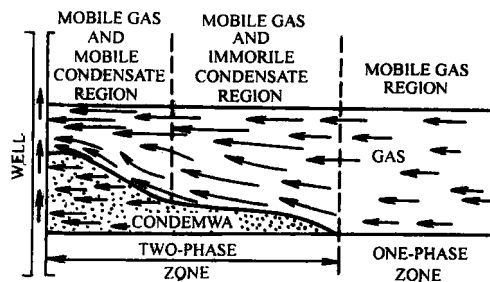


图 2 凝析气藏中三个区带的流动状况

凝析气藏系统的另一特殊面是由于这种流体的反常规行为产生的相变。当流体流过两相区带的低边界时,液相要经历一个二次汽化相。怎样处理这一相变和随相变发生变化的流体性质呢?本文应用积分的方法处理这种由 Fevang 和 Whiston 所揭示的现象。

因而,本研究的主要目的是建立有效渗透率和压力之间的相关性,并把不稳定压力数据应用于建立多相流动系统模拟以及用于凝析气藏的动态描述。

文献回顾

凝析气藏试井分析领域中的最新进展来自 Raghavan、Penuela 和 Gringarten 等人。Ramey 和 Husseingy 首先引进了拟压力的概念处理作为压力函数的真实气体的物性参数。传统上是应用组分的方法分析凝析气藏系统。近期 Fevang 和 Whiston 在 1995 年提出了如何使用拟压力技术描述凝析气藏中井的动态。Penuela 和 Civan 对凝析气藏系统分别用相对渗透率曲线和不用相对渗透率曲线对井的测试资料进行了分析。

数学基础

从凝析气藏流入井筒的流体来自三个不同区带,区带的流动边界按依赖于时间。在拟稳态阶段,这些边界是由于压力下降产生的。在不稳定压力测试期间,这些边界可能是非常微弱的,并且要经过很长时间的过渡流动区域,并不像密封断层或其它明显的固体边界那样,对压力曲线的影响会通过斜率的快速变化而反映出来。数学建模的目的就是把这些边界作为明显边界来处理。如图 4 所示,边界的存在会在压力(导数)曲线异常点反映出来。由于气藏压力等于露点压力时,异常点接近 P^* 。要建立凝析气藏模型必须考虑以下几点:

1. 凝析气藏中流体的总流量来自以下三个区带;
2. 区带 3,即最远的区带由气相组成,压力的内外边界条件分别是 P_d 和 P_e , P_d 为露点压力;

3. 区带 2, 是中间区带, 由液相和气相组成但仅气相流动, 压力的内外边界条件分别是 P^* 和 P_d ;

4. 区带 1, 最靠近井筒, 由可流动的气相和液相组成, 压力的内外边界条件分别是 P_{wf} 和 P^* ;

5. 有效渗透率随储层中压力的变化而变化, 即 $k_e = f(P)$;

6. 这项研究没有考虑外界压力的补充情况, 即所有边界都是不渗透边界;

7. 油气流量是一个常数, 也就是说在不稳定试井期间, 生产油气比也是一个常数。虽然从实际操作的角度来看这是一个假设, 但从实际目的出发我们不得不依赖于在试井过程中测定的作为时间函数的流量。

三个区带的基本数学推导

在推导压力响应以前, 让我们先定义生产油气比。区带 1 中的生产油气比定义为:

$$R_p = \frac{q_{gT}}{q_{oT}} = \frac{q_{g, free} + q_{o, free} R_s}{q_{o, free} + q_{g, free} R_o} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{q_{gT}}{q_{oT}} = C \left[\left(\frac{k_{rg}}{B_g \mu_g} \right) + \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} \right) R_s \right] / C \left[\left(\frac{k_{rg}}{B_g \mu_g} \right) + \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} \right) R_o \right] \quad (2)$$

化简后得到:

$$R_p = R_s + \left(\frac{k_{rg}}{k_{ro}} \right) \left(\frac{B_o \mu_o}{B_g \mu_g} \right) (1 - R_o R_p) \quad (3)$$

$$R_p(P) \left[R_s + \left(\frac{k_{rg}}{k_{ro}} \right) \left(\frac{B_o \mu_o}{B_g \mu_g} \right) / 1 + R_o \left(\frac{k_{rg}}{k_{ro}} \right) \left(\frac{B_o \mu_o}{B_g \mu_g} \right) \right] (P) \quad (4)$$

求解 k_{rg}/k_{ro} 的结果:

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = \frac{R_p - R_s}{1 - R_o R_p} \frac{B_o \mu_o}{B_g \mu_g} \quad (5)$$

用试井模型对方程 5 积分:

$$q_m = C_1 \Delta m P_1 + C_2 \Delta m P_2 + C_3 \Delta m P_3 \quad (6)$$

$$mP_{1,g} = \int_{P_{wf}}^{P^*} \left(\frac{k k_{ro}(P)}{B_o \mu_o} R_s + \frac{k k_{rg}}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \quad (7)$$

设

$$M_{ol} = \int_{P_{wf}}^{P^*} k k_{ro}(P) dp \quad (8)$$

$$M_{gl} = \int_{P_{wf}}^{P^*} k k_{rg}(P) dp \quad (9)$$

则

$$mP_{1,g} = M_{ol} \int_{P_{wf}}^{P^*} \left(\frac{R_s}{B_o \mu_o} \right) dp + M_{gl} \int_{P_{wf}}^{P^*} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \quad (10)$$

区带1

区带 1 的压力响应表示为:

$$mP_{P < P^*} - mP_{wf} = 162.6 \left(\frac{q_{g, meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_{ct} r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (11)$$

直到压力上限达到 P^* , 上述方程都是有效的, 而后进入区带 2。其压力响应方程可以写作:

$$\begin{aligned} & \int_{P_m}^P \left(\frac{kk_{ro}(P)}{B_o \mu_o} R_s + \frac{kk_{rg}(P)}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp + \int_{P_m}^P \left(\frac{kk_{ro}(P)}{B_o \mu_o} R_s + \frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \\ &= 162.6 \left(\frac{q_{g, meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_{ct} r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \end{aligned} \quad (12)$$

简化后把方程 5 代入, 上述方程解为:

$$\begin{aligned} & \int_{P_{wf}}^P \left[\frac{1}{B_o \mu_o} \left(\frac{R_p - R_s}{1 - R_o R_p} \right) \right] dp \\ &= \frac{162.6}{\int_{P_{wf}}^P [kk_{ro}(P)] dp} \left(\frac{q_{g, meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_{ct} r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \end{aligned} \quad (13)$$

上述方程是凝析气藏中一口井的拟压力响应, 它给出了作为压力函数的油相有效渗透率。现在代入表示 $(k \quad k_{ro})$ 的方程 5, 化简后得到:

$$\begin{aligned} & \int_{P_{wf}}^P \left[\frac{1}{B_g \mu_g} \left(\frac{(1 - R_s R_o) R_p}{1 - R_o R_p} \right) \right] dp \\ &= \frac{162.6}{\int_{P_{wf}}^P [kk_{rg}(P)] dp} \left(\frac{q_{g, meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_{ct} r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \end{aligned} \quad (14)$$

上述方程给出了气相有效渗透率。

区带2

对于区带 2, 有:

$$mP_{g2} = \int_{P^*}^{P_d} \left(\frac{kk_{rg}(P)}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \quad (15)$$

类似的有:

$$M_{g2} = \int_{P^*}^{P_d} kk_{rg}(P) dp \quad (16)$$

$$mP_{g2} = M_{g2} \int_{P_{wf}}^{P^*} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \quad (17)$$

其压力响应表示为:

$$mP_d - mP^* = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu c_t r_c^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (18)$$

$$\int_{P^*}^{P_d} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp = \frac{162.6}{M_{g2}} \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu c_t r_c^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (19)$$

式中 r_c 是 $P = P^*$ 位置处距井眼的距离, 公式表示为:

$$r_c = 0.029 \sqrt{\frac{k_e(P^*) t^*}{\phi \mu^* c_t}} \quad (20)$$

式中“*”值在第一条和第二条直线的相交点取得, 这点的压力就为 P^* , 粘度、有效渗透率也是 P^* 的函数, 解方程 13 和 14 得出表皮系数分别为:

$$S_1 = 1.1513 \left[\frac{h \Delta m P_{1hr} M_{g1hr}}{q_{g, \text{mean}}} - \log \left(\frac{k_g(P_{1hr})}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right] \quad (21)$$

$$S_1 = 1.1513 \left[\frac{h \Delta m P_{1hr} M_{g1hr}}{q_{g, \text{mean}}} - \log \left(\frac{k_o(P_{1hr})}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right] \quad (22)$$

类似的由方程 19 可解得 S_2 :

$$S_2 = 1.1513 \left[\frac{h \Delta m P_{1hr} M_{g21hr}}{q_{g, \text{mean}}} - \log \left(\frac{k_{g2}(P_{1hr})}{\phi \mu c_t r_c^2} \right) + 3.23 \right] \quad (23)$$

区带3

对区带 3, 没有相变发生, 因此有:

$$mP_{g3} = M_{g2} \int_{P_d}^{P_R} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp \quad (24)$$

$$mP_e - mP_d = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{hk} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e}{\phi \mu c_t r_d^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (25)$$

$$\int_{P_d}^{P_R} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{hk} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e}{\phi \mu c_t r_d^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (26)$$

式中, r_d 是 $P = P_d$ 处距井眼的距离, k 是绝对渗透率。

压力恢复: 区带1

用拟压力表示的压力恢复响应写成:

$$mP_{ws} - mP_{wf(\Delta t=0)} = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (27)$$

对压力恢复方程 13 变成:

$$\begin{aligned} & \int_{P_{wf(\Delta t=0)}}^{P_{ws}} \left[\frac{1}{B_o \mu_o} \left(R_s + \frac{(R_p - R_s)}{1 - R_s R_p} \right) \right] dp \\ &= \frac{162.6}{\int_{P_{wf(\Delta t=0)}}^{P_{ws}} [k k_{ro}(P)] dp} \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \end{aligned} \quad (28)$$

类似的方程 14 可以写作:

$$\int_{P_{wf}(\Delta t=0)}^{P_{ws}} \left[\frac{1}{B_g \mu_g} \left(R_s + \frac{(1-R_s)R_p}{(R_p-R_s)} \right) \right] dp$$

$$= \frac{162.6}{\int_{P_{wf}(\Delta t=0)}^P [k k_{rg}(P)] dp} \left(\frac{q_{g,meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_c r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (29)$$

上述方程一直到 $P_{ws} = P^*$ 都是有效的。

压力恢复: 区带2

$$mP_{ws} - mP^* = 162.6 \left(\frac{q_{g,meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_c r_c^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (30)$$

$$\int_{P^*}^{P_{ws}} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp = \frac{162.6}{M_{g2}} \left(\frac{q_{g,meas}}{h} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k_e(P)}{\phi \mu_c r_c^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (31)$$

压力恢复: 区带3

$$mP_{ws} - mP_d = 162.6 \left(\frac{q_{g,meas}}{hk} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k}{\phi \mu_c r_d^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (32)$$

$$\int_{P_d}^{P_{ws,R}} \left(\frac{1}{B_{gd} \mu_{gd}} \right) dp = 162.6 \left(\frac{q_{g,meas}}{hk} \right) \left[\log(t) + \log \left(\frac{k}{\phi \mu_c r_d^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \quad (33)$$

既然三个区带同时存在是不可能的,因此根据地层的出口压力情况获得最大限度的信息量是最重要的。以上的数学处理表明绝对渗透率只能从区带 3 中取得,因而只要区带 3 存在,绝对渗透率就一定能够推算出来,然后将其应用到区带 1 和 2 的推导计算中,从区带 1 和 2 中仅能获得作为压力函数的有效渗透率。而一旦绝对渗透率被确定,作为为压力函数的相对渗透率即可从区带 1 和 2 中获得。如果区带 3 不存在的话,要获得绝对渗透率,可以进行短时间的注入测试。最近很少有评价储层物性参数包括由漏失或微压裂测试估算绝对渗透率方面的文章发表。为了获得尽可能多的有价值的信息,我们不应该错过这个机会。岩心得出的相对渗透率也可以用来获得绝对渗透率。

根据试井理论计算有效渗透率

根据达西定律任意相(m)流向井筒的流量均为压力的函数,而压力又是距井筒距离的函数:

$$q_m = 1.127 \times 10^{-3} \left[\frac{2\pi r h k k_{rm}}{\mu_m B_m} \right] \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)_w \quad (34)$$

式中 k 是绝对渗透率。对于 $t_D/r_D^2 \geq 50$, 压力是 Boltzman 变量 $z = r^2/t$ 的函数,因此可以写成:

$$r \frac{\partial P}{\partial r} = 2z \left(\frac{dP}{dz} \right) = -2t \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = -2 \frac{\partial P}{\partial \ln(t)} \quad (35)$$

把上述方程代入达西定律公式得到:

$$q_m = -1.127 \times 10^{-3} \left[\frac{2\pi h k k_{rm}}{\mu_m B_m} \right] \left(2 \frac{\partial P_{wf}}{\partial \ln(t)} \right) \quad (36)$$

解得有效渗透率结果为:

$$kk_m = -\frac{70.6 q_m \mu_m B_m}{h [\partial P_{wf} / \partial \ln(t)]} \quad (37)$$

在单相流体情况下, $\partial P_{wf} / \partial \ln(t)$ 项是压力或拟压力对时间的半对数坐标系下压力曲线的斜率。

矿场实例

这一实例来自参考文献。该井井名 K-5, 井深 11500 ft, 物性参数见表 1, 原始条件为反凝析情况。使用方程 14 的左端(LHS)计算得出表 3 中的 mP 值。一旦计算了拟压力导数, 即可根据方程 14 的斜率计算出有效渗透率的积分值。

表 1 井、油藏和流体数据

P_i	6750 psia	q_c	2.8 STB/D
P_d	6750 psia	h	216.5 ft
GOR	9470 scf/STB	Φ	0.062
T	354 °F	r_w	0.54 ft
Gas SG	0.94[MW=27.17]	API	50(假设)
q_g	75.4 Mscf/D	ΔT	2.85 °F/100 ft

表 2 油气比(GOR)增加 10%对有效渗透率的影响

P, psi	K_{∞}		误差 %
	$R_p = 9470$	$R_p = 10417$	
6406.1	5.73045E-05	5.16527E-05	9.862689
6452.5	5.99946E-05	5.45406E-05	9.090909
6487.3	0.000121813	0.000110739	9.090909
6507.6	4.81366E-05	4.37605E-05	9.090909
6526.5	4.09671E-05	3.72428E-05	9.090909
6556.9	0.000140586	0.000127806	9.090909
6574.3	8.28509E-05	7.53190E-05	9.090909
6587.3	0.000495371	0.000450337	9.090909

表 3 生产油气比(GOR)增加 10%对有效渗透率的影响

时间, hrs	P, psi	K_{∞}	K_{∞}	误差 %
		R _p = 9470	R _p = 10417	
34	6406.1	2.69E-05	2.87E-05	3.02190686
42	6452.5	3.99E-05	4.11E-05	3.06048534
50	6587.3	8.08E-05	8.33E-05	3.04016961
58	6507.6	3.23E-05	3.34E-05	3.21625527
68	6526.5	2.87E-05	2.87E-05	3.35208414
82	6556.9	9.35E-05	9.64E-05	3.07862887
97	6574.3	5.44E-05	5.59E-05	2.88401789
112	6587.3	0.00033	0.00034	3.08949186
141	6601.8	—	—	—

表 4 生产油气比(GOR)中气体增加 10%表皮系数的绝对误差

P, psi	Skin	Skin	误差 %
	R _p = 9470	R _p = 10417	
6452.5	-3.35405	-3.48856	1.287002
6487.3	-3.92994	-3.86666	1.610467
6507.6	-3.53555	-3.46757	1.922726
6526.5	-3.53051	-3.45896	2.026399
6556.9	-4.18602	-4.09822	2.097282
6574.3	-4.01019	-3.92981	2.004447
6587.3	-4.92164	-4.81367	2.193882

a. 计算临界温度和压力: $T_{pc} = 462.574^{\circ}R$ 、 $P_{pc} = 660.57$ psi, 在 2200 psi 时, $T_r = T/T_{pc} = (354 + 460)/462.574 = 1.759$, $P_{pr} = P/P_{pc} = 2200/660.57 = 3.33$;

b. 计算压缩系数(Gpoal 方程): $Z = 0.8699$;

c. 计算 $B_g = 0.0016$ bbl/scf;

d. 使用下面的方程计算气体密度:

$$\rho_g = 1.601846 \times 10^{-2} \frac{MW \cdot P}{PT}$$

$$= 1.601846 \times 10^{-2} \frac{(27.17)2200}{(10.73)(354 + 460)} = 0.10962 \text{ gm/cc};$$

e. 使用 Lee 和 Gonzalez 的方程计算气体粘度: $\mu_g = 0.011$ cp;

f. 计算 R_{so} : $R_{so} = 674.73$ scf/STB(轻质油);

g. 计算气相中的蒸汽相, R_o [STB/MMscf]:

$$\begin{aligned}
 R_o &= -11.66 + 4.706 \times 10^{-9} R_s^3 + 1.623 \sqrt{R_s} - (42.3815/\sqrt{R_s}) \\
 &= -11.66 + 4.706 \times 10^{-9} (674.73)^3 + 1.623 \sqrt{674.73} - (42.3815/\sqrt{674.73}) \\
 &= 30.31233 \text{ STB/MMscf} = 3.0312 \times 10^{-5} \text{ STB/scf};
 \end{aligned}$$

h. 生产气油比 R_p , 为地面测量值: $R_p = 9470 \text{ SCF/STB}$ 。

有效渗透率

根据直线段以及前面使用的下述方程计算 k_{eg} 积分值:

$$\begin{aligned}
 \int_{P_{wf}}^{P_p} k k_{rg}(P) dp &= 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left(\frac{dmP}{d \ln(t)} \right)^{-1} \\
 \int_{P_{wf}}^P k k_{rg}(6574.3) dp &= \frac{162.6}{3.5908715 \times 10^6} \left(\frac{75.4 \times 1000}{216.5} \right) = 0.01577
 \end{aligned}$$

油相有效渗透率

应用方程 13 代替方程 14 计算拟压力, 使用下述方程计算油相有效渗透率。两点数值导数也可以用于计算作为压力函数的有效渗透率:

$$k k_{rg} = \frac{\text{Integral}[k_g]_2 - \text{Integral}[K_g]_1}{P_2 - P_1}$$

$$\int_{P_{wf}}^P k k_{ro}(P) dp = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left(\frac{1}{\Delta mP'} \right)$$

可以使用方程 13 的斜率求得油相有效渗透率:

$$\int_{P_{wf}}^P k k_{ro}(P) dp = 162.6 \left(\frac{q_{g, \text{means}}}{h} \right) \left(\frac{dmP}{d \ln(t)} \right)^{-1}$$

使用下面的方程求多个压力和有效渗透率值, 计算与压力有关的表皮系数:

$$S_1 = 1.1513 \left[\frac{\Delta mP_g M_g h}{q_{g, \text{means}}} - \log \left(\frac{k_{eg}(P)}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$

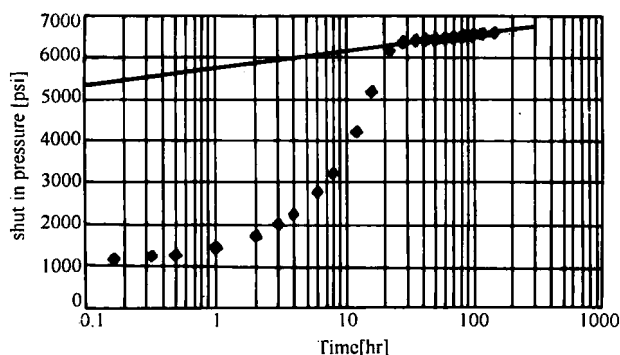


图 3 不稳定压力的半对数曲线图