

试 用 教 材

油 藏 测 试 理 论 及 方 法

石油与天然气地质勘探专业用

徐献中 王岫云 编著

中国地质大学(武汉)油区教研室

1989年4月

油藏测试理论及方法

编号89—01 (内部交流)

出版：中国地质大学（武汉）教材科

印刷：中国地质大学（武汉）印刷厂

责任编辑：贺秋云

校对：张新花

印数：1000 出厂日期 1989.9.

绪 论

石油、天然气是流动性矿床。处于原始状态下的油(气)藏是静止的,油(气)藏中没有流体流动。当油(气)藏上钻成一定数量的产油(气)井,并且使这些生产井同时工作时,油(气)藏中流体开始流动。石油、天然气被开采出来。在多孔介质——油藏内部连通性的条件下,这些生产井的产量和压力都会互相影响。因此,在油(气)藏开发过程中,按流动系统,应把整个油(气)藏作为一个开发对象。所以,油(气)藏开发开采,从动态角度来讲,主要就是引导好油(气)的流动。

油藏测试理论及方法是油藏开发开采中的一个极重要部分。通过认识油藏的测试实践,不断提高认识油藏的正确程度,从而达到开发油藏的最大采油速度和最高采收率。

油矿实习是石油与天然气地质勘探专业教学要求的认识实习。实习涉及面大,教学内容丰富。油藏测试理论及方法作为油矿实习试用教材的一部分,尽管不是实习内容的全部,却是几个主要实习部分内容的某些方面。

本试用教材第三、五章由王岫云负责,第四章由王岫云主写,徐献中部分编写,第一、二章和全书统稿由徐献中负责。

本试用教材是在系领导和教研室同志们关怀和鼓励下编写的。完稿后,石油工业部石油勘探开发科学研究院开发研究所陈元干高级工程师和我校石油系油区教研室马正副教授对本试用教材从内容到文字,认真进行了审查,提出了极宝贵的意见,油层物理实验室崔武林工程师和研究生于水同志在图件腾清方面给予很大帮助,教材科贺秋云科长的热忱支持并亲自责任编辑,以及湖南省地矿局马莉同志利用业余时间清绘图件,最后得到印刷厂同志们的帮助,使本试用教材顺利印刷成册,谨在此向以上同志表示衷心的感谢。

编写中参阅和引用了一些国内同行的著作,在此对这些同志的辛勤劳动表示谢意。

第一章 目 录 理论基础

绪 论

第一章 油藏测试理论基础..... (1)

第一节 油藏流体稳定状态流动..... (1)

第二节 稳定试井..... (6)

第三节 油藏流体不稳定状态流动..... (14)

第四节 不稳定试井..... (33)

第二章 油藏压力与温度的测试..... (72)

第一节 油藏压力含义..... (72)

第二节 使用井下压力计测试井底压力..... (80)

第三节 使用回声仪测试井筒液面..... (88)

第四节 使用地层测试器井下压力计测试井底压力..... (92)

第五节 按静止井口压力计算井底静气柱压力..... (100)

第六节 油藏温度..... (103)

第三章 石油与天然气计量..... (119)

第一节 石油计量..... (119)

第二节 水量计量..... (124)

第三节 测气..... (125)

第四节 测试层段鉴别..... (128)

第四章 油井开采..... (130)

第一节 油井完成方法..... (130)

第二节 自喷开采..... (132)

第三节 抽油开采..... (138)

第五章 矿场油气集输..... (153)

第一节 油气集输基本任务和原则..... (153)

第二节 油气集输流程..... (154)

主要参考文献..... (157)

第一章 油藏测试理论基础

流体在油藏孔隙介质中的流动称为渗流。流体的渗流，按照油藏中压力和流速（流量）随时间的变化，表现出两种状态，稳定状态渗流和不稳定状态渗流。如果把不稳定渗流状态中一种特殊情况独立出来，称它为拟稳定状态渗流，便成三种渗流状态。

稳定渗流状态——在这种渗流方式下，油藏中压力和流速分布不随时间而变化。

不稳定渗流状态——油藏中压力或流速分布，在渗流过程中，随时间发生变化。

拟稳定渗流状态——在整个油藏压力受到影响后的某个时间内，油藏所有半径上压力随时间成恒定变化并平行分布，其产量相应保持恒定，在油藏中存在的这种渗流状况称为拟稳定状态渗流，亦称准/假稳定状态渗流。

在某种流动状态下，用某种方法测试油井就成为该渗流状态下的试井方法。试井就是通过改变油井工作制度（含开井生产和关井停产）来研究油井生产情况及其周围地层特性的术语。通过对试井所测得的主要资料——油井压力或/和流量及其变化的研究进而认识整个油藏。

第一节 油藏流体稳定状态流动

一、稳定状态流动含义

稳定状态流动是指出现当遍及油藏的压力和流速分布不随时间发生变化时的流动状态。产生这种流动状态的前提是

$$\frac{\text{流出油藏的质量流量}}{\text{流出油藏的质量流量}} = \frac{\text{流进油藏的质量流量}}{\text{流进油藏的质量流量}}$$

在生产实践中，一个具有强烈水驱或大的气顶驱（意指水侵或气体排驱速度等于开采速度）的油藏，在某一工作制度下，可以非常近似地逼近这个条件。在大多数情况下，任何不稳定状态流动系统的井，其井底附近的流量几乎近于常数，即井底周围条件几乎是恒定的，所以可以把稳定状态短时期限制地用于井底附近，而不会产生多大差错。

在油井投入生产的初期，不论是油井产量，或是油井的井底压力，都是不稳定的。如何确信油井的工作制度是稳定的呢？据现场粗略经验法则，假若前后两次相隔24小时所测量得到的产量和压力相差不超过10%的话，就算是稳定状态的。此外，可用经验公式求得稳定所需的时间

$$t_s = 15 \frac{\mu}{Kh} \quad (I=1)$$

式中

t_s ——改变工作制度后达到稳定状态所需的时间，h；

μ ——原油粘度，cp；

h ——油层厚度，m；

K ——油层渗透率, D。

二、稳定状态流动产量公式

图(1-1)表示液体以平面径向渗流方式流入一口井时,出现稳定状态流动状况的压力和

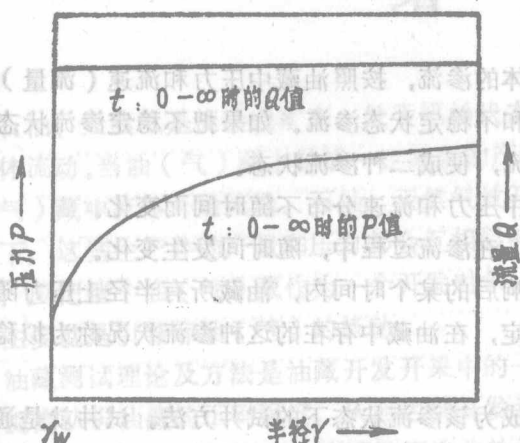


图1-1 径向稳定状态流动

流量分布,可以说,只要供油面积保持稳定状态,这种压力和流量的分布形式将始终保持不变。注意,实现这种状态的绝对条件必须是通过供给边界的流量等于通过井径处的流量,并且是通过这两个半径的是同样的流体。

据上述渗流情况,达西公式在平面径向渗流条件下,就是不可压缩流体的线性流动方程

$$Q = \frac{K}{\mu} (2\pi r h) \frac{dP}{dr} \quad (1-2)$$

在积分限域 $r: r_e \rightarrow r_w$, $P: P_e \rightarrow P_{wf}$ 内积分,得

$$Q = \frac{2\pi K h (P_e - P_{wf})}{\mu \ln r_e / r_w} \quad (1-3)$$

式中

Q ——在油藏条件下的井流量, cm^3/s ;

K ——油层渗透率, D;

h ——油层厚度, cm;

P_e ——油藏供给边缘压力, atm;

P_{wf} ——井底压力, atm;

μ ——油藏条件下石油粘度, cp;

r_e ——油藏供给半径,即油井至当时油藏压力仍保持不变的边缘的距离。有时采用油藏中平均井距的一半作为供给半径, cm。

在目前油藏工程的实际应用中,有两个实用混合单位制流动公式。

$$1. \quad Q = \frac{23.6 K h (P_e - P_{wf})}{B_o \mu \ln r_e / r_w} \quad (1-4)$$

式中

Q ——在地面条件下的井产量, m^3/d ;

h ——油层厚度, m;

B_o ——石油体积系数。其值表示标准状况(压力为1atm,温度为0℃)下, 1m^3 石油在油藏中由于油藏压力和温度,特别是由于溶解了天然气,它的体积增加了百分之多少,或者这样来定义它,在油藏压力和温度下,油藏中石油的数量与当压力和温度降为地面标准条件时,从这部分油藏石油中得到的地面石油数量之比。这种压力和温度的降低,引起了气体的脱出和液体体积的收缩。这儿用它的概念,把地面测量所得的石油产量乘以石油体积系数折合成油藏条件下的石油流量。

P_e 、 P_{wf} 、 μ 、 r_e 、 r_w 含义和单位同前。

$$Q = \frac{7.08Kh(P_e - P_{wf})}{B_o \mu \ln r_e / r_w} \quad (1-5)$$

或

$$Q = \frac{3.08Kh(P_e - P_{wf})}{B_o \mu \lg r_e / r_w}$$

式中

Q ——在地面条件下的井产量, bbl/d;

h ——油层厚度, ft;

P_e 、 P_{wf} ——油藏供给边缘压力和井底压力, psi;

r_e 、 r_w ——油藏供给半径和井半径, in;

μ 、 B_o ——含义和单位同前。

三、几个重要系数

1. 表皮系数

上述公式中, 渗透率 (K) 是指在开采面积内未受污损的地层原始渗透率的平均值。在很多情况下, 都曾发现钻井和完井作业会降低井底附近地层的渗透性能。泥浆侵入、粘土分散、泥饼及水泥的存在、井底周围气体饱和度以及地层部分打开、射孔不足、射孔孔眼堵塞等等, 都是造成渗透率下降的有关因素, 或者经过增产措施改善了井底附近地层的渗透率。从压力损耗出发, 引入由于井底附近渗透率污损或改善所引起的附加压力降 (ΔP_{skin}), 把 (1-3) 式改写成

$$Q = \frac{2\pi K_e h (P_e - P_{wf} - \Delta P_{skin})}{\mu \ln r_e / r_w} \quad (1-6)$$

式中

ΔP_{skin} ——由于井底周围地层渗透率受到污损 (ΔP_{skin} 为正值压力降) 或改善 (ΔP_{skin} 为负压力降) 而引起的附加压力降;

K_e ——油藏原始渗透率, 即渗透率未受到过污损或被改善。

当用表皮系数来表征井底附近地层渗透率的变化时, 其流量公式为

$$Q = \frac{2\pi K_e h (P_e - P_{wf})}{\mu (\ln(r_e / r_w) + S)} \quad (1-7)$$

式中

S ——表皮系数, 在数值上, 可按下式计算

$$S = \left(\frac{K_e}{K_{skin}} - 1 \right) \ln \frac{r_{skin}}{r_w} \quad (1-8)$$

式中的 K_{skin} 和 r_{skin} 或简写成 K_s 和 r_s , 分别表示受污损区的渗透率和受污损区的半径。

在正以类似于原始公式来表征井底周围渗透率受到污损或被改善的情况, 即将表皮系数 (S) 并入井底半径 (r_w) 项中, 上式成为

$$Q = \frac{2\pi K_e h (P_e - P_{wf})}{\mu \ln(r_e / r_{we})} \quad (1-9)$$

式中

r_{we} ——折算半径 (有效井眼半径)。它的含义是, 用一个假设的折算半径为 r_{we} 的完善

井，在效能上和不完善井的效能相当，来代替不完善井。折算半径在数值上可按式计算

$$\ln \frac{r_e}{r_{we}} = \ln \frac{r_e}{r_w} + S = \ln \frac{r_e}{r_w} + \ln e^S$$

$$\therefore r_{we} = r_w / e^S = r_w e^{-S} \tag{I-10}$$

如果井底附近地层渗透率受到污损，流体通过受污损区向井流动过程中，在井底附近增加了流动阻力，表皮系数是正值。这时折算半径所假设的完善井比实际井的井眼要小。反之，表皮系数是负的。这说明井底附近地层的渗透率得到改善，比原始渗透率要好，附加阻力是负压力降。这时折算半径所假设的完善井比实际井的井眼为大。

实例1.1

图（1-2）表示一个受污损井的平面径向稳定状态渗流时的压力分布，并已知油藏特征参数：

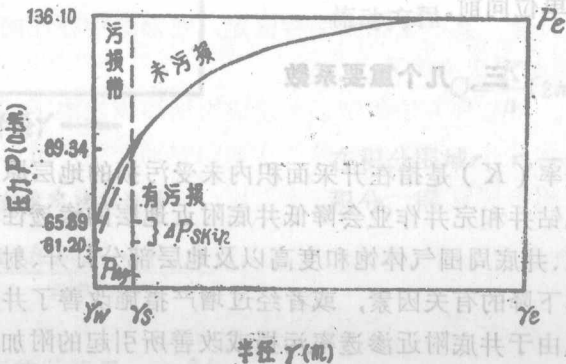


图1-2 径向稳定渗流压力分布

r_e : 213m; r_w : 0.213m; h : 2.04m;
 μ_o : 0.708cp; β_o : 1.25.

(1) 某井的供油边缘上压力 $P_e=136.1\text{atm}$ 。在 $P_{wf}=61.2\text{atm}$ 下生产时，其井的地面测得排量 $Q=12.72\text{m}^3/\text{d}$ 。从该井压力恢复曲线得知，未受污损渗透率 $K_e=10\text{mD}$ ，试求附加压力降 ΔP_{skin} 。

(2) 经改善井底附近地层渗透率措施后，附加压力降 $\Delta P_{skin}=0$ 。在保持同样的井底压力下生产，试求其产量。

(3) 如果有一半径为2.13m污损带，试求流经这个污损带的总压力降。

解

(1) 按公式（I-4）

$$Q = \frac{23.6 K_e h (P_e - P_{wf} - \Delta P_{skin})}{B_o \mu_o \lg r_e / r_w}$$

解得

$$\Delta P_{skin} = (P_e - P_{wf}) - \frac{QB_o \mu_o \lg r_e / r_w}{23.6 K_e h}$$

将题示数据代入，并计算得

$$\Delta P_{skin} = (136.1 - 61.2) - \frac{(12.72)(1.25)(0.708) \lg 213 / 0.213}{(23.6)(0.01)(2.04)}$$

由题意可知 $\Delta P_{wf} = 0$ ，则产量计算公式为

$$Q = \frac{(23.6)(0.01)(2.04)(136.1 - 61.2)}{(1.25)(0.708)\lg 213/0.213} = 13.57 \text{ m}^3/\text{d}$$

在油藏条件下，井流量为

$$B_o Q = (1.25)(13.57) = 16.96 \text{ m}^3/\text{d}$$

(3) 将受污损情况下的渗流过程看成两个连续的平面径向流：从213m—2.13m的渗流过程和从2.13m—0.213m的渗流过程。由渗流过程中的压力降求得总压力降：

从213m—2.13m的渗流过程

$$Q = \frac{23.6 K_e h (P_{213\text{m}} - P_{2.13\text{m}})}{B_o \mu_o \lg 213/2.13}$$

移项，得 $P_{2.13\text{m}}$

$$P_{2.13\text{m}} = 136.1 - \frac{(12.72)(1.25)(0.708)(2)}{23.6(0.01)(2.04)} = 89.34 \text{ atm}$$

从2.13m—0.213m的渗流过程

按题意 $P_{wf} = 61.2 \text{ atm}$

污损带总压力降

$$\Delta P = P_{213\text{m}} - P_{2.13\text{m}} = 89.34 - 61.20 = 28.14 \text{ atm}$$

2. 采油指数

采油指数定义为单位生产压差的油井日产油量，意指生产压差为一个大气压时，每天能从井中采出石油的地面体积量。

$$J = \frac{Q}{P_e - P_{wf}} \text{ m}^3/\text{d}/\text{atm} \quad (I-11)$$

它是油井产能的一个直接度量标准。如果一个测得的采油指数有一非所预期的降落，那末就应当研究所指示的这一问题。在同一油藏中，在大体相同的开发阶段，在不同的井上进行采油指数的比较，还可以指示在完井过程中可能经过不寻常的井。

鉴于采油指数可以因油藏厚度变化而逐井有所变化，所以去除厚度的影响，以使采油指数更特征化，而引入比采油指数

$$J_s = \frac{J}{h} = \frac{Q}{(P_e - P_{wf})h} \text{ m}^3/\text{d}/\text{atm} \cdot \text{m} \quad (I-12)$$

为取准采油指数资料，在测试上应注意的问题是：

- (1) 每个产量开采时间都应超过稳定所需要的时间；
- (2) 确保井底周围无气体饱和度变化对地层渗透率产生影响；
- (3) 满足达西渗流方程式的适用条件，经验法则，在每米砂层的产量小于 $26 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，在正常情况下，达西渗流方程式的适用条件得到保证。

严格或近乎遵守这些条件下进行采油指数的测试，能够获得表征地层特性的常数采油指数。

3. 流动效率

它是实际采油指数与理想采油指数（即表皮系数 $S=0$ ）的比值

$$EF = J_s / J_i \quad (I-13)$$

由图(1-2)可知,实际的生产压差为 $(P_e - P_{wf})$ 。在未受污损的理想条件下,生产压差为 $P_e - (P_{wf} + \Delta P_{skin})$,因为此时的稳定井底压力应是 $P_{wf} + \Delta P_{skin}$ 。这样,实际采油指数和理想采油指数分别为

$$J_a = \frac{Q}{P_e - P_{wf}} \quad J_i = \frac{Q}{P_e - (P_{wf} + \Delta P_{skin})}$$

因此,流动效率

$$EF = \frac{P_e - (P_{wf} + \Delta P_{skin})}{P_e - P_{wf}} \quad (1-14)$$

用1减去它,即得污染系数

$$\begin{aligned} \text{污染系数} &= 1 - \frac{P_e - (P_{wf} + \Delta P_{skin})}{P_e - P_{wf}} \\ &= \frac{\Delta P_{skin}}{P_e - P_{wf}} \end{aligned} \quad (1-15)$$

4. 堵塞比(损害程度比)

堵塞比或称损害程度比,借助它把油井的实际产量与井底周围地层没有受过任何污损或者被改善情况下所能得到的产量联系起来。

$$\begin{aligned} DR &= \frac{Q_i}{Q_o} \\ &= \frac{(K_o h / \mu_o)_i}{(K_o h / \mu_o)_o} = \frac{(K_o)_i}{(K_o)_o} \end{aligned} \quad (1-16)$$

通过堵塞比引入产量这一个实际测值,使对井底周围地层渗透性能的受损害或被改变更容易理解和解释。当 $DR > 1.0$ 时,堵塞比指示出井底周围地层受到损害,形成了一个损害带,而 $DR < 1.0$,则指示井底周围的流动条件得到改善。

井产量正比于地层供油能力 (Kh/μ) ,堵塞比就等于供油能力的比值,在地层 h/μ 相同下,堵塞比即为渗透率的比值。

第二节 稳定试井

一、稳定试井含义

在井工作稳定方式下稳定流向井的测试方法,就是不只一次地测量所试井的井底压力和稳定井底压力下的液体流量。

在试井时,改变油井工作制度的顺序没有多大意义,可以把试井前油井生产的工作制度看作试井时的一种工作制度,然后可以增加或降低生产压差来改变工作制度。最好使压力差的变化范围尽可能地大,从由液体还可以向油井流动的最小压差直到最大压差。最小的压力差数值一般根据套管头和隔水套管的技术强度和严密性来确定;最大的压力差数值主要是根据地质技术条件决定。

二、稳定试井资料整理

油井测试结果通常得到下列资料:生产压差 $(\Delta P = P_e - P_{wf})$ 和它相当的产量 (Q_o, Q_g, Q_e) 、油气比 (R) 、含砂百分比 $(e\%)$ 的数值等等。

资料整理主要是作系统试井曲线和指示曲线图。

1. 绘制系统试井曲线

绘制系统试井曲线的目的是确定合理的工作制度。在这种生产制度下，使油藏压力耗损比较少并维持在较高的准值下，而生产井的流量都相当的高，使最大的开采速度生产但又不损害地层，使油气比、含砂和含水量控制在合理的低值范围内。它是液体产量和产量的一次方。

实例1.2

某井通过稳定试井测得数据列于表1-1。

表1-1

油嘴 mm	井口压力 atm	流动压力 atm	产油量 m ³ /d	油气比 m ³ /m ³	含砂 %	含水 %
5	20.5	186.6	17.7	34	0.5	1.1
6	18	181.2	24.2	25	0.6	1.3
7	15	174.4	33.5	23	0.8	1.8
8	9.5	160.5	37.3	32	1.7	2.5

试作系统试井曲线并选择合理生产制度（油嘴大小）。

解

绘制系统试井曲线如图（1-3）所示。

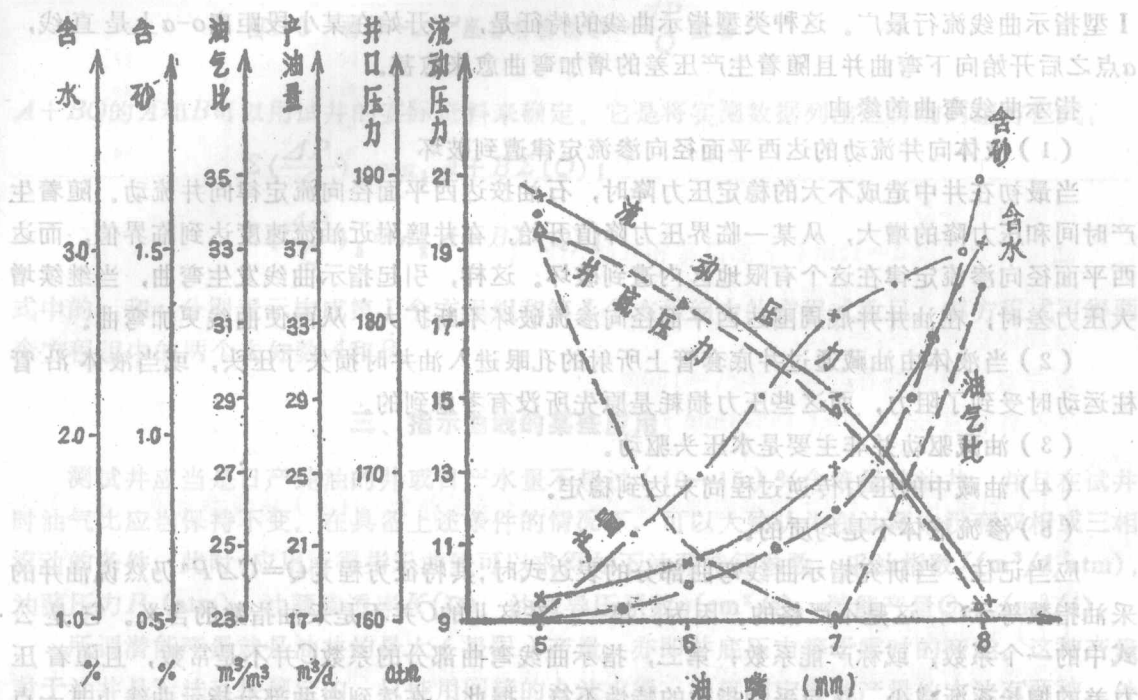


图1-3 系统试井曲线

从系统试井曲线上综合分析可以看出，选择油嘴直径7mm生产较为合适，因为藉此油嘴直径生产条件下，油气比最低，产量较高，含砂、含水量比增加不十分明显，流动压力尚有一定的数值。

2. 绘制油流指示曲线

油流指示曲线指产量和生产压差的关系曲线，一般就称为指示曲线。广义的指示曲线包

括油气比和生产压差的关系曲线 $GOR=f(\Delta P)$ ，含砂百分比和生产压差的关系曲线 $e\%=f(\Delta P)$ ，产水量和生产压差的关系曲线 $Q_w=f(\Delta P)$ 等等。

在生产实践中遇有下面三种形式的指示曲线，图(1-4)中的 I、II 和 III 型曲线，其中

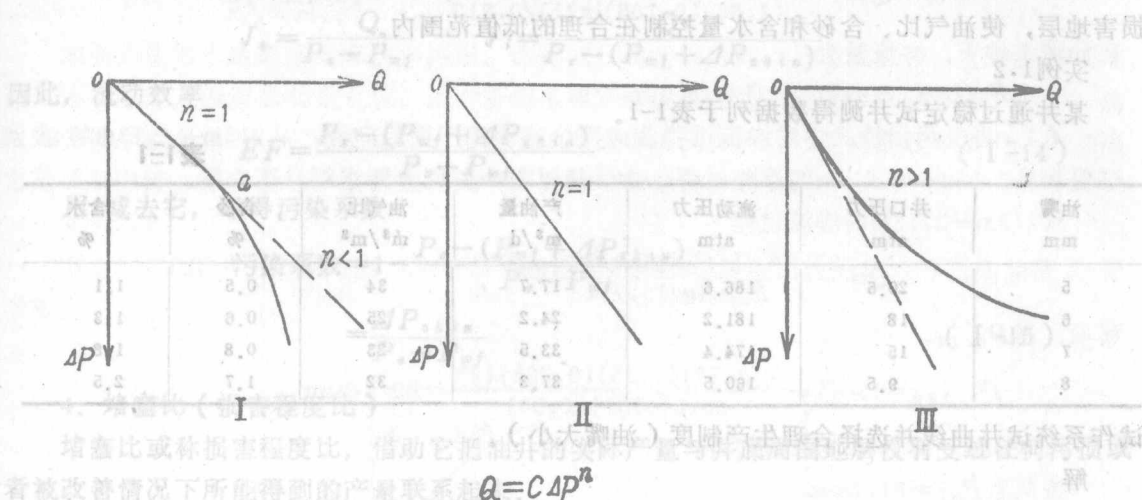


图1-4 指示曲线的形状

I 型指示曲线流行最广。这种类型指示曲线的特征是，一开始在某小段距离 $o-a$ 上是直线， a 点之后开始向下弯曲并且随着生产压差的增加弯曲愈来愈甚。

指示曲线弯曲的缘由

(1) 液体向井流动的达西平面径向渗流定律遭到破坏

当最初在井中造成不大的稳定压力降时，石油按达西平面径向流定律向井流动。随着生产时间和压力降的增大，从某一临界压力降值开始，在井壁附近油流速度达到临界值，而达西平面径向渗流定律在这个有限地区内遭到破坏。这样，引起指示曲线发生弯曲，当继续增大压力差时，在油井井底周围达西平面径向渗流破坏不断扩大，从而使曲线更加弯曲。

(2) 当液体由油藏通过井底套管上所射的孔眼进入油井时损失了压头，或当液体沿管柱运动时受到了阻力，而这些压力损耗是原先所没有考虑到的。

(3) 油藏驱动并非主要是水压头驱动。

(4) 油藏中的压力传递过程尚未达到稳定。

(5) 渗流液体不是均质的。

应当记住，当研究指示曲线弯曲部分的表达式时，其特征方程为 $Q=C\Delta P^n$ 仍然说油井的采油指数等于 C ，这是不严格的。因为，第一，在这儿的 C 并不是采油指数的含义。它是公式中的一个系数，或称产能系数；第二，指示曲线弯曲部分的系数 C 并不是常数，且随着压力差的增大逐渐减小，这与采油指数的特性不符。据此，在读到弯曲部分指示曲线上某一点的特征系数时，应该标明它所对应的压力差值，否则就无多大实用意义。

这种凸向产量轴的指示曲线 ($n<1$) 成为整条曲线的特征时，既然是由于井底附近地区液体渗流并非遵守达西平面径向流定律，故用二项式来代替单项式处理是必要的。二项式的形式是

$$P_e - P_{wf} = AQ + BQ^2$$

或

$$\frac{P_e - P_{wf}}{Q} = A + BQ$$

(I-17)

从公式(1-17)中可以看出, $Q=CAP$ 只是二项式的一部分。这种情况, 可以理解成公式中的第二项相对于第一项来说是非常的小, 在计算中忽略不计算它并不会带入多大误差。当产量不太大时, 经常出现这种情况。随着产量的变大, 第二项的作用增大。从物理意义上讲, 公式中的第一项表征着由于渗流阻力所引起的压力损失, 它是液体粘度和产量的一次方; 公式中的第二项表征着由于液体惯性所引起的压力损失, 它是液体密度和产量的二次方。

现在保持 x 轴标出 Q 值不变, 将 y 轴的 ΔP 转换成 $\Delta P/Q$ 值标出, 可以得到一条直线, 如图(1-5)所示, A 是 $\Delta P/Q$ 轴上截距, B 是直线对于 Q 轴的正切。所以, 方程式中 $\Delta P/Q =$

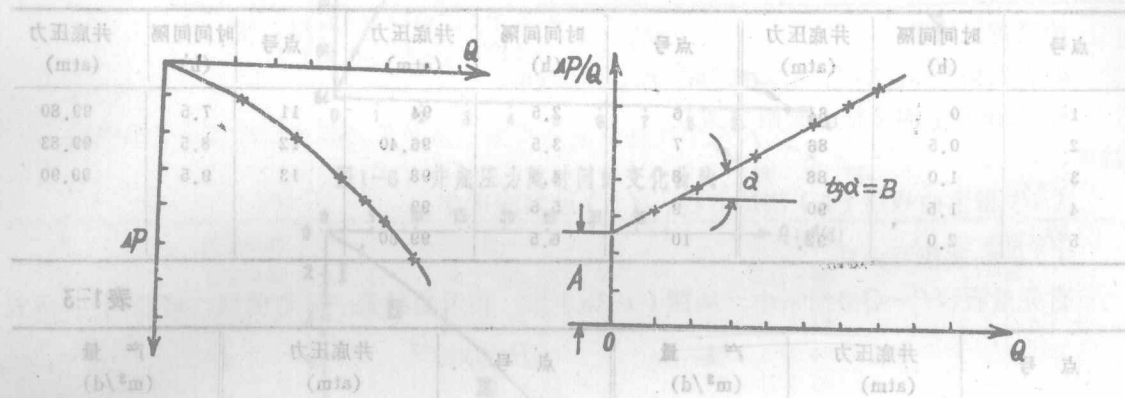


图1-5 将 $Q-\Delta P$ 座标转换成 $Q-\frac{\Delta P}{Q}$ 座标

$A+BQ$ 的 A 和 B 可以用试井的实际资料来确定。它是将实测数据列出这样的两组方程式:

$$\sum \left(\frac{\Delta P}{Q} \right)_I = n_I A + B \sum (Q)_I$$

$$\sum \left(\frac{\Delta P}{Q} \right)_{II} = n_{II} A + B \sum (Q)_{II}$$

式中的 n_I 和 n_{II} 分别表示构成第I个方程组和第II个方程组中的方程式数目, 解方程式可得两个方程组中的两个未知数 A 和 B 。

三、指示曲线的某些应用

测试井应当是日产纯油的井或日产量不超过(10—15)%含液量的油井, 并且在试井时油气比应当保持不变。在具备上述条件的情况下, 可以大致认为在油藏中没有双相或三相流动的条件。此时, 应用所得指示曲线可以求得如下油藏特征参数: 采油指数 $J(\text{m}^3/\text{d}/\text{atm})$, 油藏压力 $P_e(\text{atm})$, 油藏渗透率 $K(D)$, 油藏异压系数 $\eta(\text{cm}^2/\text{s})$, 潜能产量 $Q_{\max}(\text{m}^3/\text{d})$ 。

所谓潜能产量就是油井的最大(极限)产量, 亦即井底压力等于零时的产能。这种产量对于油井是无法直接测定的, 只能用间接的办法求得。间接测定潜能产量的方法有两种: 外推法和运算法。

外推法是将所绘出的指示曲线向外延伸, 直到 $\Delta P = P_e$ 的点上, 此点相应的产量即为潜能产量 $Q_{\max}$ 。应记住, 指示曲线外推范围不能过大, 过大会引起很大误差。据经验法则, 指示曲线外推的准则是, 对直线型来讲, 许可外推 $\Delta P = 1.75 \Delta P_{\max}$, 对曲线型来讲, 许可外推 $\Delta P = 2.25 \Delta P_{\max}$, 式中的 $\Delta P_{\max}$ 是指在测试过程中所记录的最大生产压差值, 或者说, 它是指示曲线终端点所对应的压差值。

运算法是将按所绘出的指示曲线形态求得的数学表达式 $\Delta P = P_e - P_w$ 中的井底压力

P_w 令其为零, 于是 $Q=CA\Delta P$ 方程式就成为 $Q_{max}=CP_e$ 。对于 $Q=CA\Delta P^n$ 式, 则为 $Q_{max}=c(P_e)^n$ 。式中 $1/2 \leq n \leq 1$ 。必须指出, 这几计算所得的压力差外推值同样应该满足外推压力差的准则。

实例1.3 某油田新某井, 关井后测得井底压力随时间的变化列于表1-2。然后开井生产, 并测得压力与产量的关系数据如表1-3所示。

表1-2

点号	时间间隔(h)	井底压力(atm)	点号	时间间隔(h)	井底压力(atm)	点号	时间间隔(h)	井底压力(atm)
1	0	84	6	2.5	94	11	7.5	99.80
2	0.5	86	7	3.5	96.40	12	8.5	99.83
3	1.0	88	8	4.5	98	13	9.5	99.90
4	1.5	90	9	5.5	99			
5	2.0	92	10	6.5	99.60			

表1-3

点号	井底压力(atm)	产量(m³/d)	点号	井底压力(atm)	产量(m³/d)
1	99.6	1.75	6	92	29.2
2	99	4	7	90	28.6
3	98	7.45	8	88	32.4
4	96	13.90	9	86	35.4
5	94	19.20	10	84	38.4

油藏特征参数
油层有效厚度 $h=12\text{m}$ (全部铅穿和裸眼完成);
石油在油层条件下粘度 $\mu_o=3.9\text{cp}$;
石油体积系数 $B_o=1.2$;
该井至其周围各井距离之半 $r_e=150\text{m}$;
生产套管直径 $d=6\text{in}$ (152.4mm)。

试求
(1) 油藏压力; (2) 指示曲线数学式; (3) 采油指数; (4) 油藏渗透率; (5) 潜能产量。
解
(1) 求油藏压力
按题所给数据绘制油井关井停产时井底压力随时间的变化曲线如图(1-6), 从图上得出油藏压力 $P_e=100\text{atm}$ 。

(2) 求指示曲线数学式
绘制指示曲线如图(1-7)所示。
指示曲线直线段的起点即为坐标系的原点 ($Q=0, \Delta P=0$), 终点位置虽可由计算雷诺数 (R_e) 办法判断达西平面径向渗流定律开始破坏的点来定, 但由于计算雷诺数公式使用起来比较麻烦, 所以实践中多用目观法确定直线段终点。经分析, 选 $Q=4.0\text{m}^3/\text{d}$, $\Delta P=1.0\text{atm}$ 的点为指示曲线直线段的终点。所以, 该直线段数学表达式为 $Q=4.37\Delta P$ 。

处理,按资料作成 $\Delta P-Q$ 关系曲线图(1-35),此关系曲线为一条直线。

1-2 求二项式方程

从图(1-35)中求得 P/Q 轴截距 $A=0.048$, P/Q 轴截距 $B=(11.43 \times 10^{-3}-8 \times 10^{-3})/(40-32)=0.00056$, 所以二项式方程为

P_w
(atm)

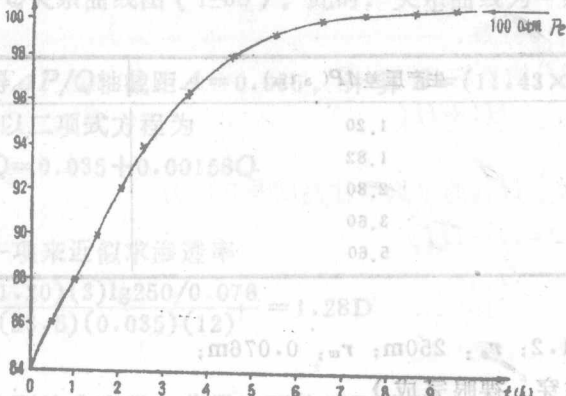


图1-6 井底压力随时间的变化曲线

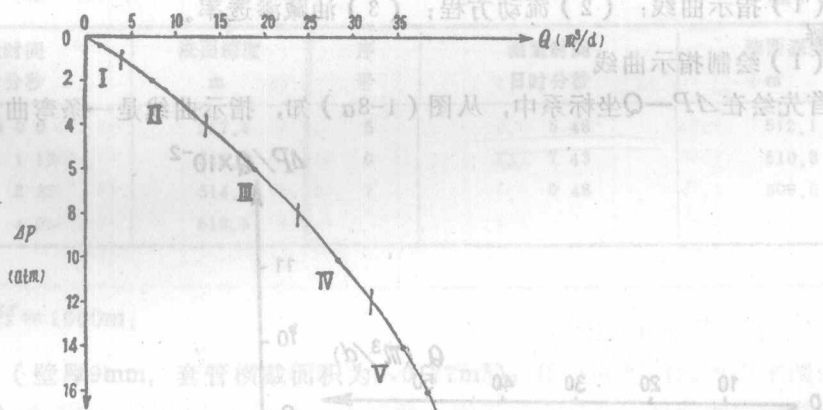


图1-7 油流指示曲线

直线段之后的曲线部分,按曲线回归求得方程式为 $Q=5.355\Delta P^{0.75}$ 。

(3) 求采油指数

按照直线段

$$J=4.37\text{m}^3/\text{d}/\text{atm}$$

对曲线段来说,在(13.9, 4)点上 $J=3.5\text{m}^3/\text{d}/\text{atm}$;在(24.2, 8)点上, $J=3.02$;在(32.4, 12)点上 $J=2.7\text{m}^3/\text{d}/\text{atm}$ 。

(4) 求油藏渗透率

$$K = \frac{QB_o\mu_o lgr_e/r_w}{23.6h\Delta P} = \frac{(4)(1.2)(3.9)\lg 150 \times 10^3/152.4/2}{23.6(12)(1)} = 0.218D$$

(5) 求潜能产量

因为在使井底压力等于零时,其压力差值已经超过曲线外推的限值,所以不能求潜能产量。如果非要知道它,只能以 $\Delta P_{m,x} \times 2.25$ 时的压力差来求,得 $Q=5.355(16 \times 2.25)^{0.75} = 78.70\text{m}^3/\text{d}$ 。

实例1.4

已知某井生产压差和产量的关系见表1-4。

表1-4

点号	生产压差 ΔP (atm)	产油量 Q (m^3/d)
1	1.20	17
2	1.82	25
3	2.80	32
4	3.60	40
5	5.60	39

油藏特征参数

μ_o : 3cp; B_o : 1.2; r_e : 250m; r_w : 0.076m;

h : 12m (全部钻穿, 裸眼完成)。

试求

(1) 指示曲线; (2) 流动方程; (3) 油藏渗透率。

解

(1) 绘制指示曲线

首先绘在 $\Delta P-Q$ 坐标系中, 从图(1-8a)知, 指示曲线是一条弯曲线, 故改用二项式

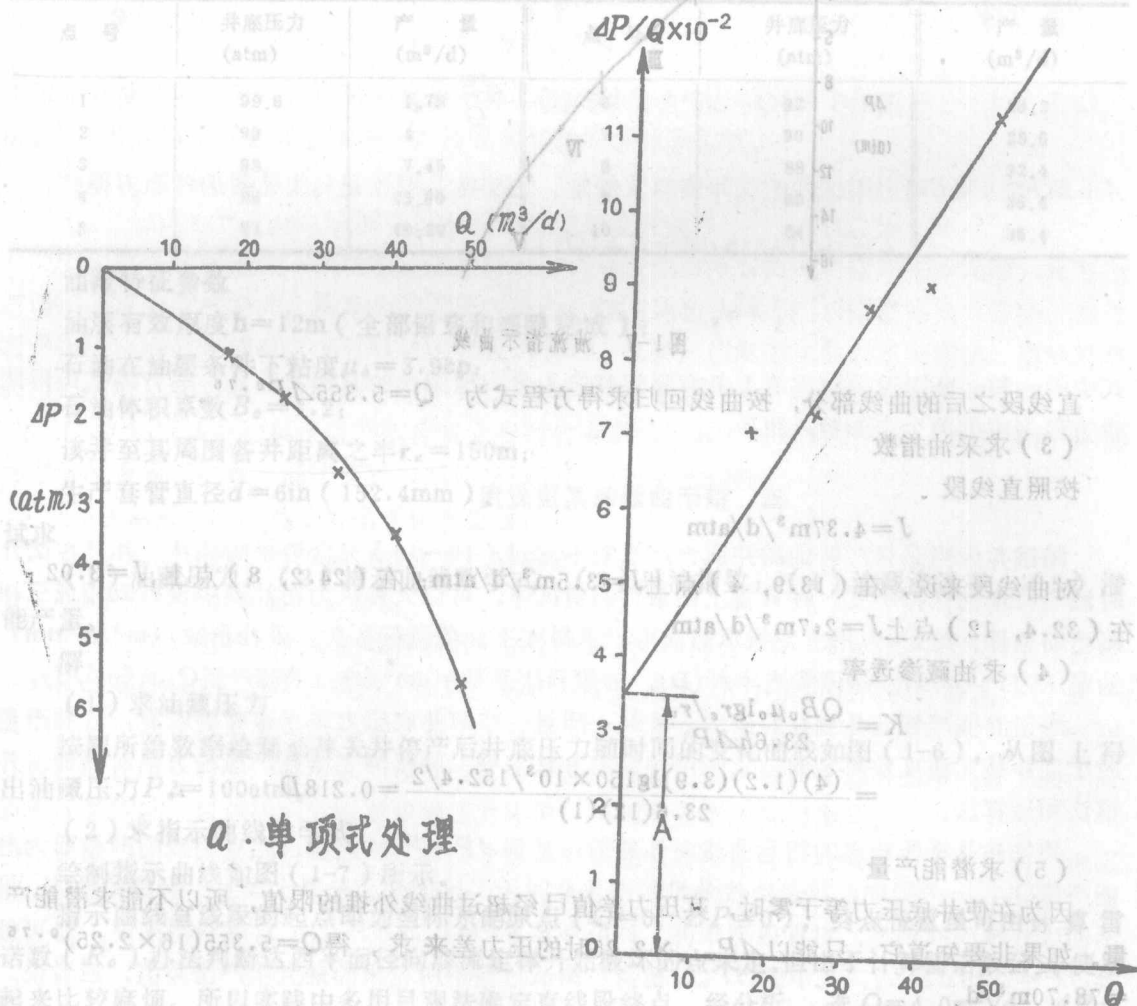


图1-8 指示曲线

处理。按资料绘成 $\Delta P-Q$ 关系曲线图(1-8b)。此时,关系曲线为一条直线。

(2) 求二项式方程

从图(1-8b)中,得 $\Delta P/Q$ 轴截距 $A=0.035$, 计算 $B=(11.43 \times 10^{-2}-8.75 \times 10^{-2})/(49-32)=0.00158$, 所以二项式方程为

$$\Delta P/Q=0.035+0.00158Q$$

(3) 求渗透率

以二项式方程的第一项来近似求渗透率

$$K=\frac{(1.20)(3)\lg 250/0.076}{(23.6)(0.035)(12)}=1.28D$$

实例1.5

油田上某井用探测液面法求产量, 获得液面数据列于表1-5。

表1-5

序号	测量时间 日时分秒	液面深度 m	序号	测量时间 日时分秒	液面深度 m
1	15 8 0 0	517.4	5	5 48	512.1
2	1 13	516.1	6	7 43	510.8
3	2 33	514.8	7	9 48	509.5
4	4 03	513.5			

油井资料

油层中部深度 $H=1000m$;

油层套管 $6\frac{5}{8}$ " (壁厚9mm, 套管横截面积为 $0.0177m^2$);

液体相对密度 $\nu_o=0.85$ 。

试求

(1) 油井静液柱压力; (2) 采

油指数。

解

解题前需先求得井筒中液柱高及其相对应的产量值, 并按题意绘制液柱高变化示意图(1-9)。

油井产量

$$Q_{12}=\frac{A(H'_1-H'_2)}{t_2-t_1}(24 \times 60)$$

(1-18)

式中

Q_{12} ——在时间 (t_2-t_1) 内油井平均产量; m^3/d ;

A ——井筒横截面积 $=0.0177m^2$;

H'_1 、 H'_2 ——在时间 t_2 和 t_1 时探测所得的液面深度, m ;

t_1 、 t_2 ——探测液面的次序时

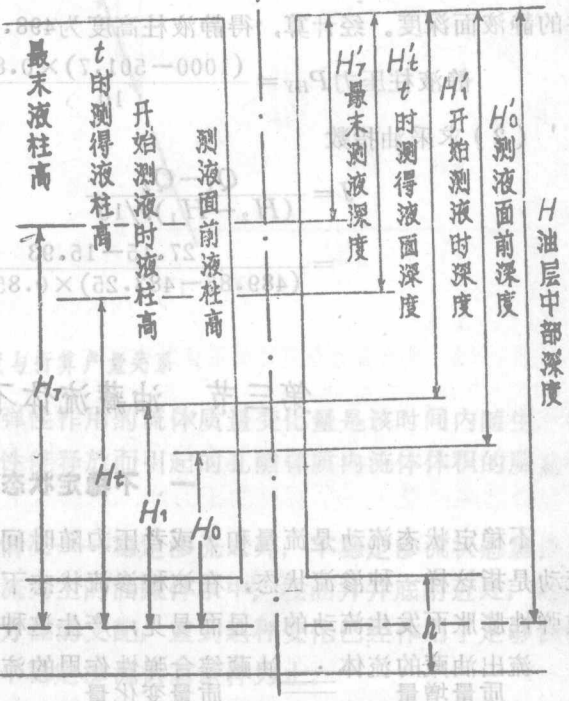


图1-9 探液面求产时液柱高变化示意