

王鸿勋 张琪 等编

采油工艺原理

修 订 本

高等学校教学用书

石油工业出版社

TE35
6=2

采油工艺原理

(修订本)

王鸿勋 张 琪 等编

石油工业出版社

B 503140

内 容 提 要

本修订本中对自喷、气举采油方法,根据国内生产上的需要及技术上的发展进行了重写,对其他章节如抽油、注水、压裂、酸化、砂蜡水等也进行了不同程度的修改。另外删除了原第一版的第七章“封隔器及管柱”(此章稍加整理后拟改为选修课)。希望修改后的第二版,在培养高层次的采油专业人材中,对提高学生分析和解决实际问题能力及提高学生从事科研的能力中,能够发挥更大的作用。

采 油 工 艺 原 理

(修订本)

王鸿勋 张 琪 等编

石油工业部教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀区昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16开本 22印张 539千字 印1—3,000

1989年7月北京第1版 1989年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0171-3/TE·169

定价:4.20 元

初 版 前 言

《采油工艺原理》是根据1977年底石油部在华东石油学院召开的石油院校教材会议的决定，由大庆、西南、华东石油学院三个院校联合编写的。在编写过程中，努力贯彻少而精、理论联系实际及反映新技术的原则。在教材内容上加强了基础理论。

《采油工艺原理》共分七章，即自喷、抽油、注水、压裂、酸化、砂蜡水和封隔器及管柱。它是在1960年及1965年石油院校编写的《采油工程》、《采油原理》教学实践的基础上重新编写的。为了适应具有我国特点的分层开采的需要，增加了封隔器及管柱一章，主要介绍了封隔器设计计算及管柱受力分析的基本概念。

随着采油工艺技术与理论的发展，在这次编写中对自喷、抽油、注水、压裂、酸化、砂蜡水各章，都作了程度不同的增删。共同的特点是尽量加强了工艺理论的分析，力图使采油工程中一些主要参数的选择、工程效果及生产预测等能够建立在一定的理论基础之上，以便提高学生从事采油工作的设计能力。

为了便于在教学中逐步培养学生分析、解决实际问题与从事科研的能力，在编写过程中尽可能阐明解决具体采油工程中某些问题的思路和方法，并提出了方法上存在的问题及改善的途径。

本书第一章自喷中的1~4节及第三章的注水，由大庆石院蒋汉青编写。第五章的酸化及第一章的第5节，由西南石院潘迎德编写。第七章的封隔器及管柱，由西南石院曾宪平编写。第六章的砂蜡水，由华东石院陈月明编写。第二章的抽油，由华东石院张琪编写。第四章压裂，由华东石院王鸿勋编写。西南石院袁兴柏参加了本书的定稿工作。华东石院采油教研室的一些同志也参加了这项工作。全书由华东石院王鸿勋副教授与张琪主编，由大庆石院副教授胡靖邦主审。西南石院副教授任书泉审查了第五章。

由于时间仓促，加上编写人员水平有限，书内错误之处在所难免。希望使用此教材的师生、读者提出批评指正。

再 版 前 言

由大庆、西南、华东石油学院联合编写的《采油工艺原理》一书，在各石油院校采油专业中从 1981 至 1985 年已试用五个年级。从总的方面看，此教科书虽基本上符合 1977 年石油部在华东石油学院召开的石油院校教材会议决定的精神，但在教学过程中也反映出本书的一些不足之处，应在总结经验的基础上进行修订。华东石油学院采油教研室受石油院校采油学科小组的委托进行了此项工作。

在修订过程中努力遵照少而精、理论联系实际、反映新技术及加强专业基础理论等原则，努力作到三个面向。

全书各章节都有不同程度的修订。考虑到近年来单井生产优化理论的发展及气举在采油中逐渐受到重视，所以对第一章（自喷）进行了较大的变动，基本上是重写。考虑到本课程学时数的减少，删掉了第七章（封隔器及管柱）。

在修订本书时，注意到以下几个方面：

1. 各章节内容对本科大学课程、选修课及研究生课之间的教学层次及相互衔接的关系。
2. 将成熟的新技术，特别是国内各油气田研究单位及院校的研究成果编入本教材。
3. 遵照国家的规定，本书中的图表、公式等已全部使用法定单位制。
4. 本书中的设计计算部分，已注意到计算机的应用。

由于各院校采油专业对本课所规定的教学时数不同，或对课程内容的侧重点不同，请使用本教材的师生对各章节的内容根据具体情况有所增删或选择。建议在本教材的基础上开设各种专题性的选修课（例如象封隔器及管柱设计等），以扩大学生掌握采油知识的深度与广度。

本书第一、二、三章由张琪修订或编写，四、五、六章由王鸿勋修订或编写，全书由北京石油勘探开发科学研究院秦同洛教授主审。

希望使用此教材的师生对教材编写的指导思想、内容取舍及修订增编中的缺点、错误提出批评指正以便修正。

1986.3

目 录

第一章 自喷和气举	(1)
第一节 油井流入动态	(1)
第二节 气-液混合物在垂直管中的流动规律	(22)
第三节 自喷井的协调及系统分析	(48)
第四节 自喷井管理及分层开采	(60)
第五节 气举	(63)
参考文献	(83)
第二章 抽油	(84)
第一节 抽油装置和泵的工作原理	(84)
第二节 抽油机悬点运动规律	(90)
第三节 抽油机悬点载荷计算	(95)
第四节 影响泵效的因素及提高泵效的措施	(110)
第五节 抽油井生产分析	(119)
第六节 抽油设备选择	(131)
第七节 美国石油学会推荐的有杆抽油系统设计计算方法—API RP 11L	(156)
第八节 抽油井计算机诊断技术	(168)
参考文献	(173)
第三章 注水	(175)
第一节 水源及水处理	(175)
第二节 分层吸水能力的研究	(183)
第三节 注水指示曲线的分析和应用	(190)
第四节 防止吸水能力降低及改善吸水剖面的方法	(198)
参考文献	(204)
第四章 水力压裂	(205)
第一节 造缝机理	(205)
第二节 压裂液	(215)
第三节 支撑剂及裂缝导流能力	(231)
第四节 压裂设计	(240)
第五节 压裂工艺	(258)
附录一 非牛顿液体在裂缝中的流动	(262)
附录二 X 值的误差补偿函数表	(263)
参考文献	(265)
第五章 酸化	(266)
第一节 碳酸盐岩地层的盐酸处理	(267)

第二节 酸液及添加剂	(289)
第三节 酸处理工艺	(298)
第四节 砂岩油气层的土酸处理	(301)
参考文献	(305)
第六章 砂、蜡、水	(306)
第一节 防砂和清砂	(306)
第二节 防蜡和清蜡	(318)
第三节 找水和堵水	(327)
参考文献	(344)

第一章 自喷和气举

采油方法通常是指将流到井底的原油采到地面上所采用的方法，其中包括自喷采油法、气举采油法和深井泵采油法。利用油层本身的能量使油喷到地面的方法称自喷采油法。当油层能量小而不能自喷生产时，则需要给井底的油流补充能量，以便将油采到地面。依靠向油井注入高压气体，利用压缩气的膨胀能将井内原油举升到地面的方法称为气举采油法；利用安装在井下的泵将井内原油举升到地面的方法称深井泵采油法。后两种方法统称人工举升或机械采油法。其中自喷采油法设备简单、管理方便，也最经济。

任何油井的生产都可分为三个基本流动过程：从油层到井底的流动——油层中的渗流；从井底到井口的流动——井筒中的流动；从井口到分离器——在地面管线中的水平或倾斜管流。对自喷井，原油到井口后还有通过油嘴的流动——嘴流。所以，自喷井可以分为四个基本流动过程。

自喷井和气举井井筒中的流动——多相垂直（或倾斜）管流——具有基本相同的规律，因此，把自喷和气举放在同一章讲授。深井泵采油法中的有杆抽油将在第二章中讲授。不管采用哪种采油方法，第一个流动过程——油层中的渗流都是共同的。它是进行油井设计和分析的基础。下面首先介绍反映油井生产时第一个流动过程的油井流入动态。

第一节 油井流入动态

油井流入动态是指油井产量与井底流动压力的关系，它反映了油藏向该井供油的能力。表示产量与流压关系的曲线称为流入动态曲线（Inflow Performance Relationship curve），简称 IPR 曲线，也称指示曲线（Index Curve）。从单井来讲，IPR 曲线表示了。

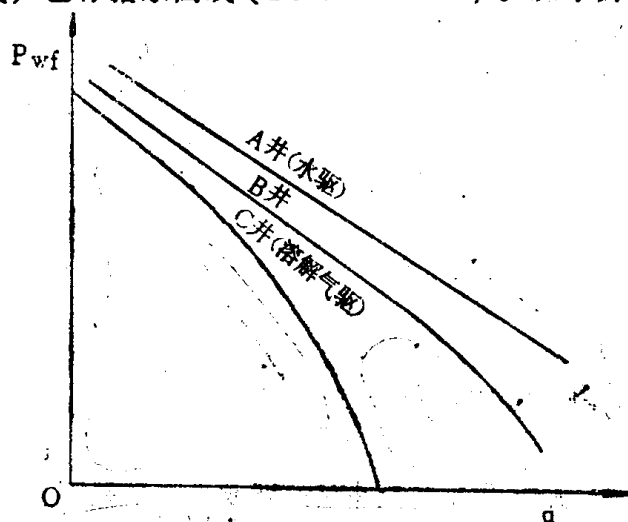


图 1-1 典型的油井流入动态曲线

层工作特性。因而，它既是确定油井合理工作方式的依据，也是分析油井动态的基础。典型的流入动态曲线如图 1-1 所示。由图可看出，IPR 曲线的基本形状与油藏驱动类型有关。就是同一驱动方式下 $P_{wf} \sim q$ 关系的具体数值，将取决于油藏压力、渗透率及流体物理性质。有关不同驱动方式下 $P_{wf} \sim q$ 关系与油藏物理参数及完井状况之间的定量关系已在渗流力学中做了详细的讨论。这里，我们仅从研究油井生产动态的角度来讨论不同条件下的流入动态曲线及其绘制方法。

一、单相液体的流入动态

根据达西定律，在供给边缘压力不变的圆形地层中心一口井的产量公式为：

$$q_o = \frac{2\pi k_o h (P_e - P_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \cdot a \quad (1-1)$$

或

$$q_o = \frac{2\pi k_o h (\bar{P}_r - P_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S \right)} \cdot a \quad (1-1a)$$

对于圆形封闭地层，即泄油边缘上没有液体流过，其相应的产量公式为：

$$q_o = \frac{2\pi k_o h (P_e - P_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S \right)} \cdot a \quad (1-2)$$

或

$$q_o = \frac{2\pi k_o h (\bar{P}_r - P_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)} \cdot a \quad (1-2a)$$

式中 q_o ——油井产量（地面）；

k_o ——油层的有效渗透率；

B_o ——原油体积系数；

h ——油层有效厚度；

μ_o ——地层油的粘度；

P_e ——边缘压力；

$\bar{P}_r$ ——油井平均地层压力；

P_{wf} ——井底流动压力；

r_e ——油井供油（泄油）边缘半径；

r_w ——井眼半径；

S ——表皮系数，与油井完成方式、井底污染或增产措施等有关，可由压力恢复曲线求得；

a ——单位换算系数，各参数采用不同单位时的 a 值见表 1-1。

表 1-1 采用不同单位制时的 a 值

单位制	参 数					单位换算系数 a
	产量	渗透率	厚度	粘 度	压 力	
渗流力学达西单位	厘米 ³ /秒	达西	厘米	厘泊	大气压	1
法定单位 (SI 单位)	米 ³ /秒	米 ²	米	帕·秒	帕	1
英制实用单位	桶/日	毫达西	英尺	厘泊	磅/英寸 ²	0.001127
法定实用单位	米 ³ /日	微米 ²	米	毫帕·秒	千帕	0.0864

对于非圆形封闭泄油面积的油井产量公式, 可根据泄油面积形状和油井位置进行校正。其方法是令公式中的 $r_e/r_w = x$, 根据泄油面积形状和井的位置由图 1-2 可查得相应的 x 值。

形状与位置	X	形状与位置	X
	$\frac{r_e}{r_w}$		$\frac{0.966A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.571A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.44A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.565A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{2.206A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.604A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.925A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.61A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{6.59A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.678A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{9.36A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.668A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.724A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{1.368A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.794A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{2.066A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{4.072A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.884A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{9.523A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{1.485A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{10.135A^{1/2}}{r_w}$

图 1-2 泄油面积形状与油井位置系数

在单相流动条件下, 油层物性及流体性质基本不随压力变化, 这样, 上述产量公式可写成:

$$q_o = J(\overline{P}_r - P_{wf}) \quad (1-3)$$

$$J = \frac{2\pi k_o h a}{\mu_o B_o \left(\ln x - \frac{3}{4} + S \right)} \quad (1-4)$$

或

$$J = \frac{2\pi k_o h a}{\mu_o B_o \left(\ln x - \frac{1}{2} + S \right)} \quad (1-4a)$$

在一些文献中, 把 (1-3) 式称为油井的流动方程。由 (1-3) 式可得:

$$J = \frac{q_o}{(P_r - P_{wf})} \quad (1-5)$$

J 称为采油指数, 它是一个反映油层性质、流体参数、完井条件及泄油面积等与产量之间的关系综合指标。其数值等于单位压差下的油井产量。因而可用 J 的数值来评价和分析油井的生产能力。一般都是用系统试井资料来求得采油指数 J 。只要测得 3~5 个稳定工作制度下的产量及其流压, 便可绘制该井的 IPR 曲线。单相流动时的 IPR 曲线为直线, 其斜率的负倒数便是采油指数; 在纵座标 (压力座标) 上的截距即为油层压力。有了采油指数就可以在对油井进行系统分析时利用 (1-3) 式来预测不同流压下的产量。另外, 还可根据 (1-4) 或 (1-4a) 来研究油层参数。

例 1 X 井位于面积 $A=3897$ 米² 的等边三角形泄油面积的中心; 井眼半径 $r_w=0.1$ 米; 根据高压物性资料 $B_o=1.2$, $\mu_o=3$ 毫帕·秒; 由压力恢复试井资料获得 $S=+3$ 。试根据表 1-2 所给测试资料绘制 IPR 曲线, 并求采油指数 J 及油层参数 $k_o h$ 。

表 1-2 X 井测试数据

流压, 10 ³ 千帕	111.5	102.6	97.4	91.5
产量, 米 ³ /日	17.4	34.1	45.6	56.8

解

1. 绘制 IPR 曲线 (见图 1-3)
2. 求采油指数 J 及油层参数 $k_o h$

$$J = \frac{q_2 - q_1}{P_{wf1} - P_{wf2}} = \frac{60 - 20}{(110 - 90) \times 10^3} = 2 \times 10^{-3} (\text{米}^3/\text{日})/\text{千帕}$$

由图 1-2 查得该井 $x = \frac{\times 0.604 \sqrt{A}}{r_w}$

则

$$x = \frac{0.604 \times \sqrt{38971}}{0.1} = 1192.36$$

$$k_o h = \frac{J \mu_o B_o \left(\ln x + \frac{3}{4} + S \right)}{2\pi a}$$

$$= \frac{2 \times 10^{-2} \times 3 \times 1.2 \times (\ln 1192.36 - 0.75 + 3)}{2\pi \times 0.0864}$$

$$= 1.238 \text{ 微米}^2 \cdot \text{米}$$

3. 外推直线至 $q=0$ 处得地层压力为 12000 千帕(12 兆帕)

根据公式 (1-5), 采油指数可定义为: 产量与生产压差之比, 或者单位生产压差下的油井产量。根据例 1 中用 IPR 曲线确定采油指数的方法, 则采油指数定义为: 每增加单位生产压差时, 油井产量的增加值, 或 IPR 曲线的负倒数。对于单相液体流动的直线型 IPR 曲线, 按上述几种定义方式所求得的采油指数是相同的; 而对于多相流动等非直线型的 IPR 曲线, 由于其斜率不是定值, 按上述几种定义所求得的采油指数则不同。而且, 对于具有非直线型 IPR 曲线的油井, 在

使用采油指数时, 应该说明相应的流动压力, 也不能简单地用某一流压下的采油指数来直接推算不同流压下的产量。

当油井产量很高时, 在井底附近将出现非达西渗流, 根据渗流力学中的非达西渗流二项式, 油井产量和生产压差之间的关系可用下面的二项式表示:

$$\bar{P}_r - P_{wf} = Cq + Dq^2 \quad (1-6)$$

$$C = \frac{\mu_o B_o (\ln x - \frac{3}{4} + S)}{2\pi k h a}$$

$$D = 1.3396 \times 10^{-18} \frac{\beta B_o^2 \rho}{4\pi^2 h^3 r_w}$$

式中 $\bar{P}_r$ ——油井平均地层压力, 千帕; P_{wf} ——井底流动压力, 千帕;
 q ——油井产量(地面), 米³/日; k ——有效渗透率, 微米²;
 h ——地层有效厚度, 米; μ_o ——地层油粘度, 毫帕·秒;
 B_o ——原油体积系数; r_w ——井眼半径, 米;
 X ——由图 1-2 查得; ρ ——原油密度, 公斤/米³;
 D ——紊流系数, 千帕/(米³/日)²; β ——紊流速度系数, 1/米。

根据实验, 胶结地层和非胶结砾石充填层的紊流速度系数与渗透率的关系如图 1-4 所示。

根据图 1-4, 胶结地层的紊流速度系数为:

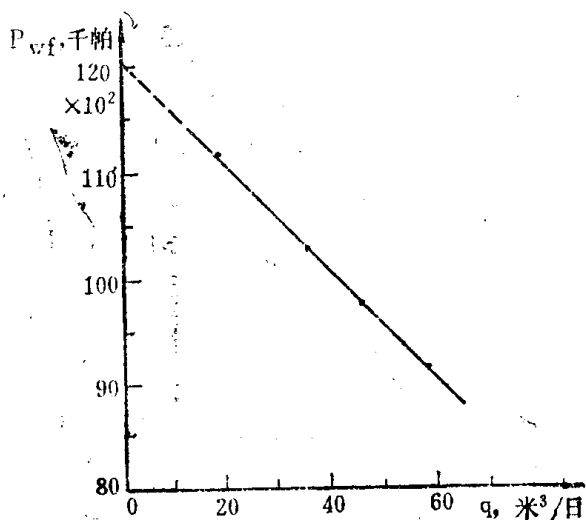


图 1-3 X 井的 IPR 曲线

$$\beta = \frac{1.906 \times 10^7}{k^{1.201}} \quad 1/\text{米} \quad (1-7)$$

非胶结砾石充填层的紊流系数 β_s 为:

$$\beta_s = \frac{1.08 \times 10^6}{k^{0.55}} \quad 1/\text{米} \quad (1-7a)$$

式中 k ——渗透率, 微米²。

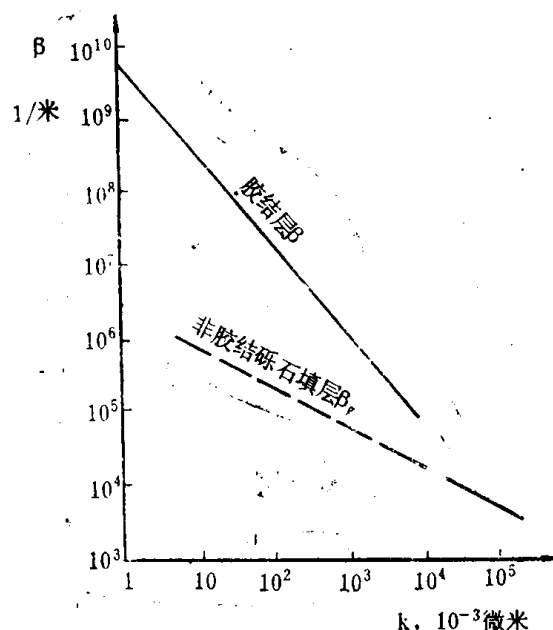


图 1-4 紊流速度系数与渗透率关系

在系统试井时, 如果在单相流动条件出现非达西渗滤, 则可直接利用试井所得的产量和压力资料用图解法求得 (1-6) 式中的 C 和 D 值。改变 (1-6) 式可得:

$$\frac{\bar{P}_r - P_{wf}}{q} = C + Dq \quad (1-6a)$$

由 (1-6a) 式可看出, $(\bar{P}_r - P_{wf})/q$ 与 q 呈线性关系。由试井资料绘制的 $(\bar{P}_r - P_{wf})/q \sim q$ 直线的斜率为 D , 其截距则为 C 。

二、油气两相渗流时的流入动态

油气两相渗流发生在溶解气驱油藏中, 油藏流体的物理性质和相渗透率将明显地随压力而改变。因而, 溶解气驱油藏油井产量与流压的关系是非线性的。要研究这种井的流入动态, 就必须从油气两相渗流的基本规律入手。

(一) 油气两相渗流流入动态的一般公式

根据达西定律, 对于平面径向流, 油井产量公式为:

$$q_o = \frac{2\pi r k_o h}{\mu_o B_o} \frac{dp}{dr}$$

令 $k_{r.o} = k_o/k$ ——相对渗透率, 并积分, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{q_o}{2\pi k h} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} &= \int_{P_{wf}}^{P_e} \frac{k_{r.o}}{\mu_o B_o} dp \\ q_o &= \frac{2\pi k h}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \int_{P_{wf}}^{P_e} \frac{k_{r.o}}{\mu_o B_o} dp \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 μ_o 、 B_o 及 $k_{r.o}$ 都是压力的函数, 只要找到它们与压力的关系, 就可求得积分, 从而找到产量和流压的关系。 μ_o 及 B_o 不难由高压物性资料或经验相关式得到, 而 $k_{r.o}$ 与压力的关系则必须利用生产油气比、相渗透率曲线来寻找。

对油和气分别利用达西定律就可得到油气两相渗流时，任一时间的当前生产油气比：

$$R = \frac{k_g}{k_o} \frac{\mu_o}{\mu_g} \frac{B_o}{B_g} + R_s \quad (1-9)$$

式中 R_s 为溶解油气比；渗透率、粘度及体积系数的下角“O”——油，“g”——气。

由已知的压力、温度和流体性质，就可确定(1-9)式中的 μ_o 、 μ_g 、 B_o 、 B_g 和 R_s 。给定油气比 R 后，就可求得不同压力下的 k_g/k_o 值。然后，利用相对渗透率曲线(图 1-5)作出 k_g/k_o 与饱和度关系曲线(图 1-6)，就可求得相应压力下的含油饱和度，并可绘出给定生产油气比时的压力与饱和度的关系曲线(图 1-7)。利用图 1-7 和图 1-5 就可求得不同

压力下的相对渗透率 k_{ro} 。这样就不难绘出 $\frac{k_{ro}}{\mu_o B_o}$ 与压力的关系曲线(图 1-8)。

利用图 1-8 可求得公式(1-8)中的积分。取不同的积分下限就可得到不同流压下的产量，并绘出 IPR 曲线。

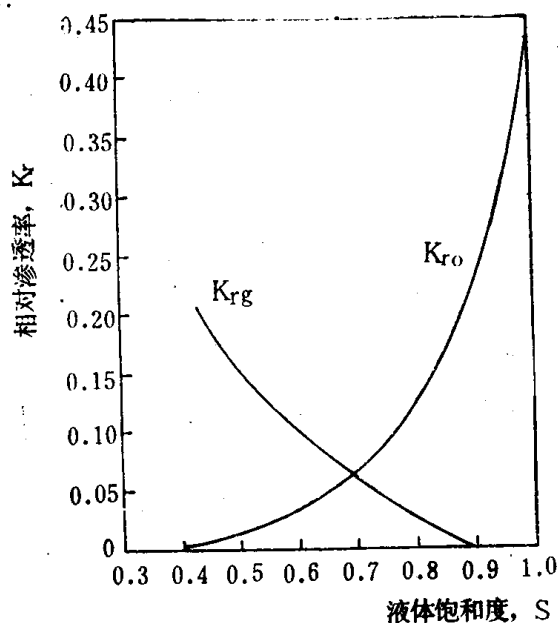


图 1-5 相对渗透率与饱和度关系曲线

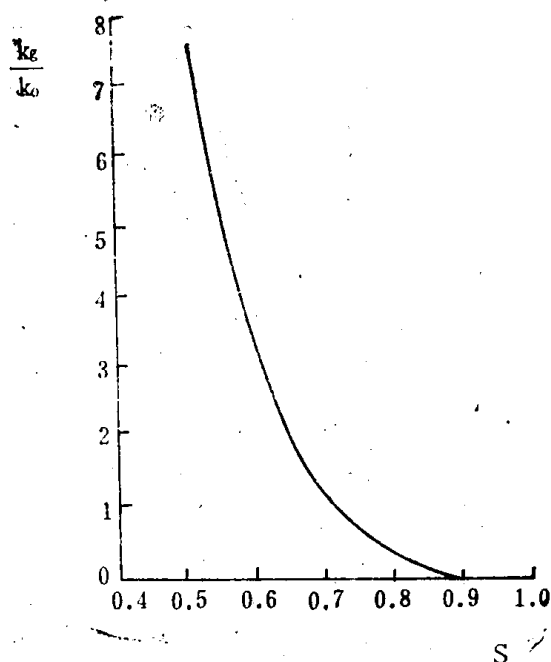


图 1-6 k_g/k_o —S 曲线

溶解气驱油藏在油井关井后所能测得的是泄油面积内的平均压力 $\bar{P}_r$ ，而不是泄油面积边缘压力 P_e 。用 $\bar{P}_r$ 代替 P_e 后，(1-8)式将变为：

$$q_o = \frac{2\pi kh}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4}} a \int_{\bar{P}_{wf}}^{\bar{P}_r} \frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} dp \quad (1-8a)$$

则采油指数

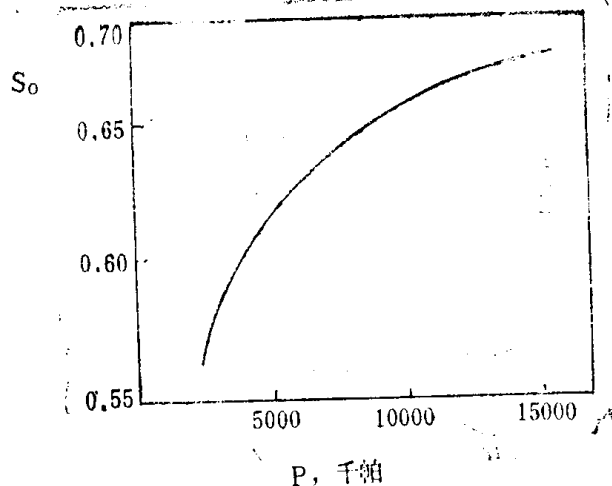


图 1-7 含油饱和度与压力关系曲线

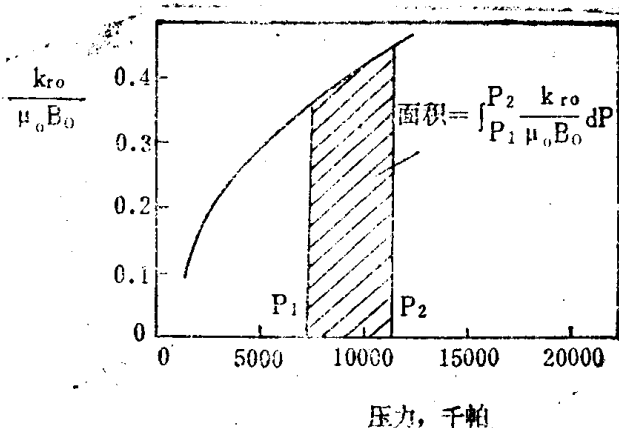


图 1-8 $\frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} - P$ 曲线

$$PI = \frac{q_o}{P_r - P_{wf}} = \frac{2\pi k h a \int_{P_{wf}}^{\bar{P}_r} \frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} dp}{(\bar{P}_r - P_{wf}) \left(\ln \frac{r_o}{r_w} - \frac{3}{4} \right)} \quad (1-10)$$

为了分析采油指数与压力的关系，在图 1-9 中表示了同一生产压差不同地层压力时的积分面积。由图 1-9 和公式 (1-10) 可看出：

(1) 当生产压差成倍增大时，由于积分限内曲线所包面积不能成倍增加，因而，PI 与生产压差是非线性关系。同一油藏压力下，采油指数将随生产压差的增大而减小。

(2) 在相同生产压差下，油藏压力高时的曲线面积大于油藏压力低的曲线面积。因而，溶解气驱油藏，其采油指数将随油藏压力的降低而减小。

(3) 采油指数与生产油气比 R 有关。因为不同的 R 值有不同的 $S_o \sim P$ 和 $\frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} \sim P$ 曲线。

P 曲线。

为了预测未来采油指数的变化，必须知道未来的油藏压力及饱和度。

显然，利用上述方法来绘制当前的和预测未来的 IPR 曲线是十分繁琐的。因而，在油井动态分析和预测中都采用简便的近似方法来绘制 IPR 曲线。

(二) 无因次 IPR 曲线及 Vogel 方程

1968 年 Vogel 发表了适用于溶解气驱油藏的无因次 IPR 曲线及描述该曲线的方程。它们是根据用计算机对若干典型的溶解气驱油藏的流入动态曲线的计算结果提出的。

计算时假设：(1) 圆形封闭油藏，油井位于中心；(2) 均质地层，含水饱和度恒定；(3) 忽略重力影响；(4) 忽略岩石和水的压缩性；(5) 油、气组成及平衡不变；(6) 油、气两相的压力相同；(7) 拟稳态下流动，在给定的某一瞬间，各点的脱气原油流量相同。

计算结果如图 1-10 所示，产量与流压的关系随采出程度 N_p/N 而变。为了讨论不同

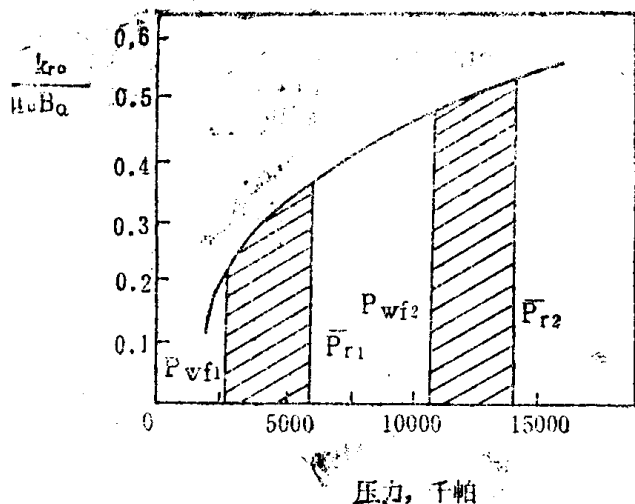


图 1-9 油藏平均压力 $\bar{P}_r$ 对 $\int_{P_{wf}}^{\bar{P}_r} \frac{k_{r_o}}{\mu_o B_o} dp$ 的影响

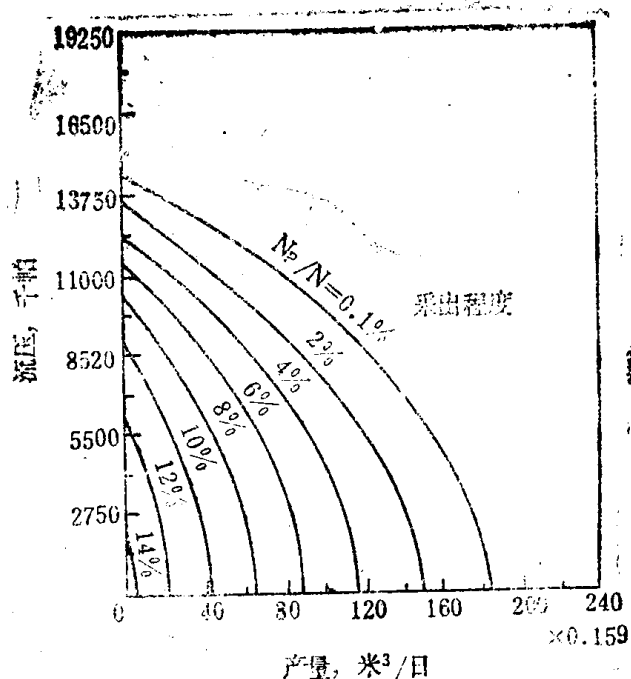


图 1-10 计算机计算的溶解气驱油藏油井流入动态曲线

原始压力 = 14686.4 千帕 泡点压力 = 14636.4 千帕

采出程度下的 IPR 曲线的变化规律，把图 1-10 的曲线改变坐标后绘制在图 1-11 中。纵坐标为流压与油藏压力的比值 $P_{wf}/\bar{P}_r$ ，横坐标为相应流压下的产量 q 。与流压为零时的最大产量 $q_{o,max}$ 之比。由图可看出，在无因次坐标中，不同采出程度下的 IPR 曲线很接近。

Vogel 对不同流体性质、油气比、相对渗透率、井距及压裂过的井和井底有污染的井等各种情况下的 21 个溶解气驱油藏进行了计算。其结果表明：IPR 曲线都有类似的形

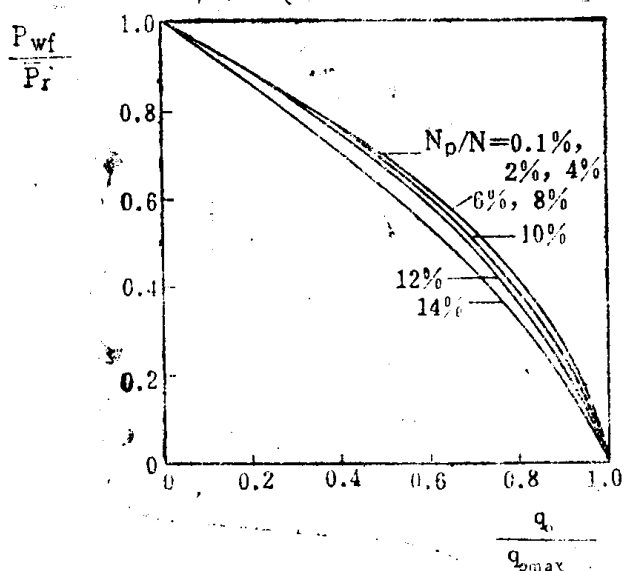


图 1-11 溶解气驱油藏计算的无因次流入动态曲线

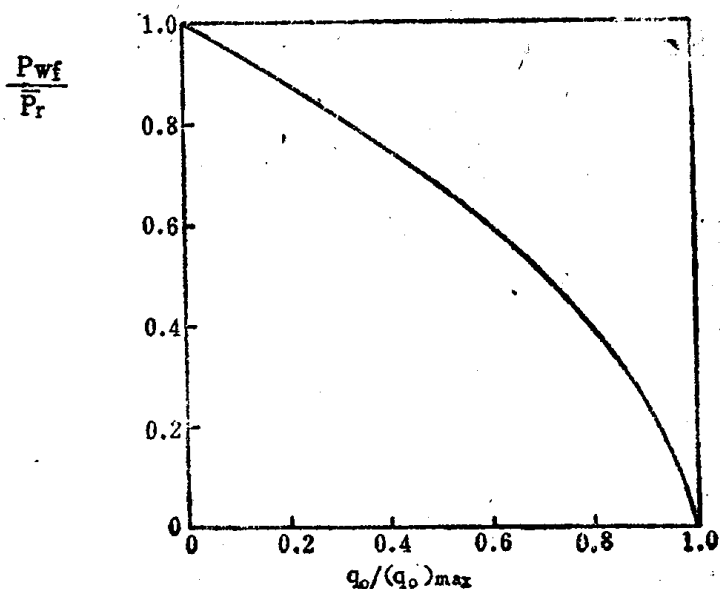


图 1-12 溶解气驱油藏无因次 IPR 曲线 (Vogel 曲线)

状，只是高粘度油藏及油井污染严重时差别较大。Vogel 在排除了这些特殊情况之后，绘制了一条如图 1-12 所示的参考曲线（常称为 Vogel 曲线）。这条曲线可看作是溶解气驱油藏渗流方程通解的近似解。

图 1-12 的曲线可用下面的方程（Vogel 方程）来表示：

$$\frac{q_o}{q_{o\max}} = 1 - 0.2 \frac{P_{wf}}{P_r} - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \quad (1-11)$$

参考曲线与各种情况下的计算机计算曲线的比较表明：除高粘度及井底污染较严重的油井外，参考曲线更适用于溶解气驱早期（即采出程度较低时）情况，如图 1-13 所示。

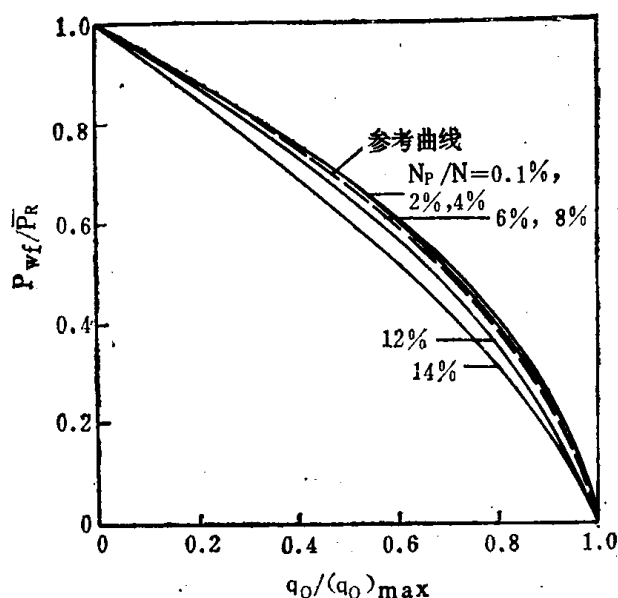


图 1-13 参考曲线与计算机计算的 IPR 曲线的比较

应用 Vogel 方程可以在不涉及油藏参数及流体性质资料的情况下绘制油井的 IPR 曲线和预测不同流压下的油井产量，使用很方便。但是，必须给出该井的某些测试数据。

例 2 已知 B 井油藏平均压力 $\bar{P}_r = 130 \times 10^3$ 千帕，流压 $P_{wf} = 110 \times 10^3$ 千帕时的产量 $q_o = 30$ 米³/日。试利用 Vogel 方程绘制该井的 IPR 曲线。

解

1. 计算 $q_{o\max}$

$$\begin{aligned} q_{o\max} &= \frac{q_o}{\left[1 - 0.2 \frac{P_{wf}}{P_r} - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \right]} \quad \text{①} \\ &= \frac{30}{1 - 0.2 \times \frac{11000}{13000} - 0.8 \left(\frac{11000}{13000} \right)^2} \\ &= 116.3 \text{ 米}^3/\text{日} \end{aligned}$$

① [] 内的数值也可以根据已知的 P_{wf}/P_r 值直接从图 1-12 的纵坐标查得。