



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

采 油 工 程

李颖川 主编



石油工业出版社

面向 21 世纪 课程教材
Textbook Series for 21st Century

采 油 工 程

李颖川 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地讲述了油井生产系统基本流动过程的动态规律,全面阐述了自喷、气举、有杆泵、潜油电泵、水力泵及螺杆泵等采油技术和注水、压裂、酸化开发措施,以及解决砂、蜡、水、稠、凝等生产问题的采油工艺原理和设计方法,并反映了相关的新技术和新工艺。

本书可作为高等石油院校石油工程专业教材,亦可供从事采油、井下作业和油田开发的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

采油工程/李颖川主编.
北京:石油工业出版社,2002.2
ISBN 7-5021-3590-1

I.采…
II.李…
III.石油开采
IV.TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 078306 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×960 毫米 16 开本 26.25 印张 485 千字印 1—2000
2002 年 2 月北京第 1 版 2002 年 2 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3590-1/TE·2643
定价: 42.00 元



面向 21 世纪课程教材

序

为了适应我国石油工业发展和石油高等教育改革的要求,西南石油学院组织编写了《采油工程》教材,此教材的出版将为培养面向 21 世纪石油工程专业本科人才和促进采油工程技术的发展发挥重要作用。

油田开发工程由油藏工程、采油工程和地面建设工程所组成。采油工程立足油藏工程,衔接地面建设工程,起着承上启下的作用,是油田开发的重要支柱。新的石油工程专业人才培养方案对石油工程专业课程进行重组和整合,形成了较为完善合理的教学内容体系。

该教材以大量的科学研究和长期的教学实践为基础,并参考大量国内外相关教材编写完成。具有以下主要特点:

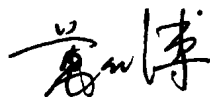
系统性:全面系统地阐述了采油工程的基本原理、采油工艺技术以及采油工程在油田开发中的重要地位及其功能,形成采油工程体系。

完整性:除了常规采油方法和工艺技术外,新增了各种无杆泵(潜油电泵、水力活塞泵、射流泵和螺杆泵)举升方式的采油原理和设计方法、稠油和高凝油的开采技术,特别是稠油热采和冷采方法,以及水平井产能分析和水平井的应用,对不同类型油藏(如砂岩、碳酸盐岩等)开采技术及增产措施有了全面的认识。并在新技术、新工艺、新材料方面有了更深入地论述。

实用性:对采油工程中的一些重点和难点内容的传统讲述方法进行了有效的改进,力求循序渐进,深入浅出,既科学严谨又便于理解。注重理论联系实际和基本知识的应用,精心设置了例题和习题,有利于提高学生分析问题和解决问题的能力,以鼓励和促进学生在举一反三,融会贯通上下功夫。

采油工程与钻井工程对完井工程的角度不一样,采油工程是提出油田开发和采油工程对完井工程依据的要求,而不是去实施和代替完井工程中的各项工程,完井工程是衔接钻井工程和采油工程的桥梁,希望本书再版时应增加“完井工程”的内容。

该教材适用于石油工程专业本科教学,对现场采油工程技术人员是一本有价值的参考书。



2001 年 10 月 7 日

前 言

采油工程的任务是根据油田开发要求,科学地设计、控制和管理生产井和注入井,通过采取一系列工艺技术措施,以达到经济有效地提高油井产量和原油采收率,合理开发油藏的目的。随着油田开采的技术难度、投资额度和风险程度日益增高,特别是石油工业的高速发展和高新技术的应用,对 21 世纪的采油工程技术提出了更高的要求和挑战。

为了适应我国石油工业发展和石油高等教育改革的要求,教育部颁布了新的专业目录,将原钻井工程、油藏工程和采油工程三个专业合并为石油工程专业。采油工程作为石油工程专业主干课程和“石油工程专业改革与建设”教改项目的配套系列教材之一,1999 年被中国石油天然气集团公司确定为面向 21 世纪课程教材。

本教材在编写过程中努力贯彻加强基础,拓宽知识领域,理论联系实际及反映新技术的教改精神。从采油工程系统出发,系统地讲述了油井生产系统流动过程的动态规律,全面地阐述了各种采油方式和增产工艺措施的基本原理和设计方法。力图建立采油系统工程观念,加强工艺技术的理论分析,强调计算机技术在采油工程设计中的应用;为了便于学习理解和掌握基本理论和方法,精心设计选配了相当数量的例题和习题。根据石油工程专业改革要求,涉及地面工艺流程和采油工程方案设计的内容,分别设置在矿场生产实习和石油工程课程设计两个实践教学环节中系统学习。

本教材共分九章,参加编写的教师有:李颖川(第一章、第二章第一节、第三章、第八章、第九章);王永清(第二章第二节、第五章);刘建仪(第四章);胡永全(第六章);赵立强(第七章)。全书由李颖川统稿,万仁溥教授和潘迎德教授主审。

在本教材的编写过程中,自始至终得到了万仁溥教授和潘迎德教授的指导和帮助,也得到了西南石油学院石油工程专业教改组和教务处的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写人员水平有限,对于教学如何适应 21 世纪发展要求尚处于探索阶段,本书难免存在缺点和不足之处,诚望使用本教材的师生和读者批评指正。

编 者

2001 年 7 月

目 录

第一章 油井基本流动规律	(1)
第一节 油井流入动态.....	(1)
第二节 气液两相管流基本概念及基本方程	(22)
第三节 气液两相管流计算方法	(31)
第四节 嘴流动态	(43)
习 题	(47)
参考文献	(48)
第二章 自喷与气举采油	(50)
第一节 自喷井节点系统分析	(50)
第二节 气举采油	(58)
习 题	(77)
参考文献	(77)
第三章 有杆泵采油	(78)
第一节 有杆抽油装置	(79)
第二节 抽油机悬点运动	(87)
第三节 抽油机悬点载荷	(94)
第四节 抽油机平衡计算.....	(108)
第五节 减速器扭矩及电动机功率计算.....	(110)
第六节 泵效分析.....	(114)
第七节 抽油系统选择设计.....	(123)
第八节 抽油井生产分析及系统效率.....	(131)
习 题.....	(147)
参考文献.....	(148)
第四章 无杆泵采油	(150)
第一节 潜油电泵采油.....	(150)
第二节 水力活塞泵采油.....	(165)
第三节 水力射流泵采油.....	(177)
第四节 螺杆泵采油.....	(187)
习 题.....	(192)
参考文献.....	(192)

第五章 注水	(194)
第一节 水质.....	(194)
第二节 水源及水处理.....	(203)
第三节 注水井动态.....	(212)
第四节 注水工艺.....	(221)
习 题.....	(236)
参考文献.....	(236)
第六章 水力压裂	(237)
第一节 水力压裂造缝机理.....	(237)
第二节 压裂液.....	(245)
第三节 支撑剂.....	(257)
第四节 水力压裂裂缝延伸模拟.....	(266)
第五节 支撑剂输送.....	(271)
第六节 水力压裂评价.....	(278)
第七节 水力压裂设计.....	(283)
第八节 水力压裂工艺技术.....	(287)
习 题.....	(290)
参考文献.....	(291)
第七章 酸化	(292)
第一节 酸化增产原理.....	(292)
第二节 酸—岩化学反应当量及反应产物.....	(295)
第三节 酸—岩化学反应动力学.....	(301)
第四节 碳酸盐岩储层酸化设计计算.....	(314)
第五节 砂岩储层酸化设计计算.....	(321)
第六节 酸化工艺设计.....	(325)
第七节 酸液及添加剂.....	(335)
习 题.....	(345)
参考文献.....	(347)
第八章 油井防砂、防蜡与堵水工艺技术	(348)
第一节 防砂.....	(348)
第二节 防蜡与清蜡.....	(359)
第三节 调剖与堵水.....	(363)
习 题.....	(374)
参考文献.....	(374)
第九章 稠油及高凝油的开采技术	(375)

第一节	稠油及高凝油的基本特性·····	(375)
第二节	常用热采方法·····	(378)
第三节	注蒸汽井筒两相流及传热数值模拟方法·····	(381)
第四节	人工举升方式及配套井筒降粘技术·····	(385)
第五节	稠油排砂冷采技术·····	(392)
第六节	水平井在稠油及高凝油开采中的应用·····	(396)
习 题	·····	(409)
参考文献	·····	(410)

第一章 油井基本流动规律

任何油井生产系统均可分为三个子系统：从油藏到井底的流动——油层中渗流；从井底到井口的流动——井筒中流动；从井口到地面计量站分离器的流动——在地面管线中的水平或倾斜管流。对于自喷井，原油流到井口后还有通过油嘴的流动——嘴流。为此，本章将分别介绍油井生产的三个基本流动过程（油层渗流、气液两相管流及嘴流）的动态规律及计算方法。

第一节 油井流入动态

原油从油层到井底通过多孔介质（含裂缝）的渗流是油井生产系统的第一个流动过程。认识掌握这一渗流过程的特性是进行油井举升系统工艺设计和动态分析的基础。油井的产量主要取决于油层性质、完井条件和井底流动压力。油井流入动态是指在一定地层压力下，油井产量与井底流压的关系，流入动态曲线，简称 IPR（Inflow Performance Relationship）曲线。典型的油井流入动态曲线如图 1-1 所示，其横坐标为油井产液量（标准状态下），纵坐标为井底流压 p_{wf} （表压）。当井底压力为平均地层压力时（即生产压差 $\bar{p}_r - p_{wf} = 0$ ），无流体流入井筒，故产量为零。随着井底流压降低，油井产量随生产压差的增大而增大。当井底流压降至大气压（ $p_{wf} = 0$ ）达到完全敞喷条件，油井产量达到最大 q_{max} 。然而，实际上油井无法在此条件下生产， q_{max} 仅表示油层的潜在产能。

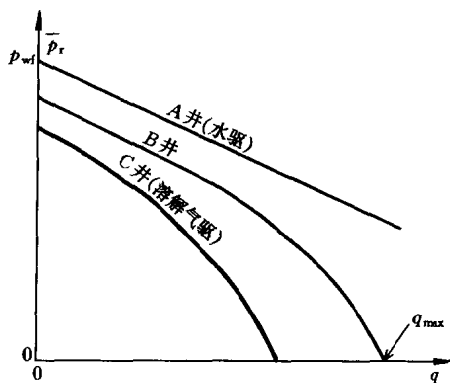


图 1-1 典型的油井 IPR 曲线

就单井而言，IPR 曲线反映了油层向井的供给能力（即产能）。如图 1-1 所示，IPR 曲线的基本形状与油藏驱动类型有关，其定量关系涉及到油藏压力、渗透率、流体物性、含水率及完井状况等。在渗流力学中已详细讨论了这方面的相应理论。下面仅从研究油井生产系统动态的角度讨论不同油层条件下的流入动态曲线及其绘制方法。

一、单相原油流入动态

1. 垂直井单相油流

根据达西定律，定压边界圆形油层中心一口垂直井的稳态流动产量公式为

$$q_o = \frac{CK_o h (\bar{p}_r - p_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S \right)} \quad (1-1)$$

对于圆形封闭地层中心一口井的拟稳态流动其产量为

$$q_o = \frac{CK_o h (\bar{p}_r - p_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)} \quad (1-1a)$$

式中 q_o ——油井原油产量（地面）；

K_o ——油层有效渗透率。尽量应用试井解释的结果，若缺少试井资料也可用岩心实验数据近似值；

h ——油层有效厚度；

μ_o 、 B_o ——地层原油粘度及体积系数。由 PVT 物性资料确定，若缺少 PVT 资料可选用合适的相关式计算；

$\bar{p}_r$ ——井区平均油层压力；

p_{wf} ——井底流动压力；

r_e ——油井泄流半径。可用试井解释结果，对于一般开发井网，常取井距之半；

r_w ——井眼半径。可用井径仪实测，也可根据所用钻头尺寸确定；

S ——表皮系数。与完井方式、井壁污染或增产措施有关，由压力恢复曲线解释获得；

C ——与单位有关的系数，见表 1-1。

表 1-1 系数 C 值

单位制	参 数					系数 C
	产 量 q	渗透率 K_o	厚度 h	粘度 μ_o	压力 p	
达西	cm ³ /s	D(达西)	cm	cP(厘泊)	atm(大气压)	2π
国际 SI	m ³ /s	m ²	m	Pa·s	Pa	2π
法定实用	m ³ /d	10 ⁻³ μm ²	m	mPa·s	MPa	0.543
英制实用	bbl/d(桶/日)	mD(毫达西)	ft(英尺)	cP	psi(磅/英寸 ²)	0.00708

对于非圆形封闭泄流区域的油井，可以对式（1-1）进行修正，即令式中的 $r_e/r_w = C_X \sqrt{A}/r_w$ ，根据泄流面积 A 的形状及井点位置由图 1-2 查

得相应的 C_X 值。

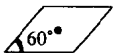
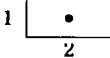
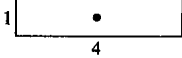
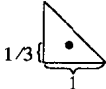
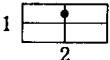
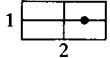
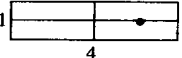
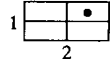
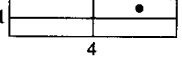
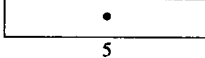
	0.565		1.485		4.072
	0.604		1.724		9.523
	0.610		0.668		1.368
	0.678		0.966		1.925
	10.135		1.440		6.590
	0.571		2.206		9.360
	0.884		1.794		2.066

图 1-2 不同泄流区域形状及井点位置下的 C_X 值

在单相原油流动条件 ($p_{wf} \geq p_b$) 下, 油层流体物性基本不随压力变化, 故式 (1-1)、(1-1a) 可表示为

$$q_o = J_o(\bar{p}_r - p_{wf}) \quad (1-2)$$

此式也称为油井的流动方程, 其中

$$J_o = \frac{CK_o h}{\mu_o B_o (\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S)} \quad (1-3)$$

或

$$J_o = \frac{CK_o h}{\mu_o B_o (\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S)} \quad (1-3a)$$

由式 (1-2) 得

$$J_o = \frac{q_o}{\bar{p}_r - p_{wf}} \quad (1-4)$$

J_o 称为采油指数, 一些文献和专著中也用符号 PI (Production Index) 表示。它是反映油层性质、流体物性、完井条件及泄油面积等与产量之间关

系的综合指标。其数值等于单位生产压差下的油井产量。因此可用它来评价和分析油井的生产能力。

单相原油渗流条件下的 IPR 曲线为直线，其斜率的负倒数即为采油指数。在纵坐标（压力）上的截距即为平均地层压力。一般根据系统试井资料（3 或 4 个稳定工作制度下的产量及其流压），直接用图解法可获得可靠的采油指数。可利用式（1-2）预测不同流压下的产量，还可根据式（1-3）来研究油层参数。

采油工程中一项重要的任务就是在合理的费用条件下，努力提高采油指数。采取解堵酸化消除近井地带的伤害或通过水力压裂取得负表皮系数。对于粘度较高的稠油油藏，可采用注蒸汽或火烧油层的热处理油层的方法降低原油粘度。

当油井产量很高时，在流速很高的井底附近将出现高速非线性渗流，根据渗流力学中的非线性流二项式，油井产量与生产压差之间的关系可表示为（SI 单位制）：

$$\begin{aligned}\bar{p}_r - p_{wf} &= Aq_o + Bq_o^2 \quad (1-5) \\ A &= \frac{\mu_o B_o}{2\pi K_o h} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right) \\ B &= \frac{\beta \rho B_o^2}{4\pi^2 h^2 r_w}\end{aligned}$$

式中 A ——二项式层流系数， $\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

B ——二项式紊流系数， $\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^2$ ；

ρ ——原油密度， kg/m^3 ；

β ——紊流速度系数， m^{-1} 。

β 表征岩石孔隙度结构对流体紊流的影响。由于岩石结构的复杂性，一般采用经验公式估计：

$$\beta = a/K^b \quad (1-6)$$

式中 K ——地层渗透率， μm^2 。

对于胶结地层，式中 a 、 b 分别取值 1.906×10^7 ，1.201；对于非胶结砾石充填地层， a 、 b 分别取值 1.08×10^6 ，0.55。

在系统试井时，如果在单相流动条件下出现非达西渗流，则可用图解法求得二项式（1-5）中的系数 A 和 B 值。改变式（1-5）可得

$$\frac{\bar{p}_r - p_{wf}}{q_o} = A + Bq_o \quad (1-5a)$$

由上式可知， $(\bar{p}_r - p_{wf})/q_o$ 与 q_o 呈线性关系，其直线的斜率为 B ，截距为 A 。

2. 水平井单相油流

20 世纪 80 年代以来, 国际上水平井的井数和产量一直迅速增加。对于较薄的油层或垂向渗透率较大的油藏, 尤其是裂缝性油藏, 钻水平井是极好的选择。如图 1-3 所示, 长度为 L 的水平井穿过水平渗透率和垂向渗透率分别为 K_h 和 K_v 的油藏。水平井形成椭球形的泄流区域, 其泄流区域的长半轴为 a 与水平井长度有关, 大大增加了井眼与油藏的接触面积。

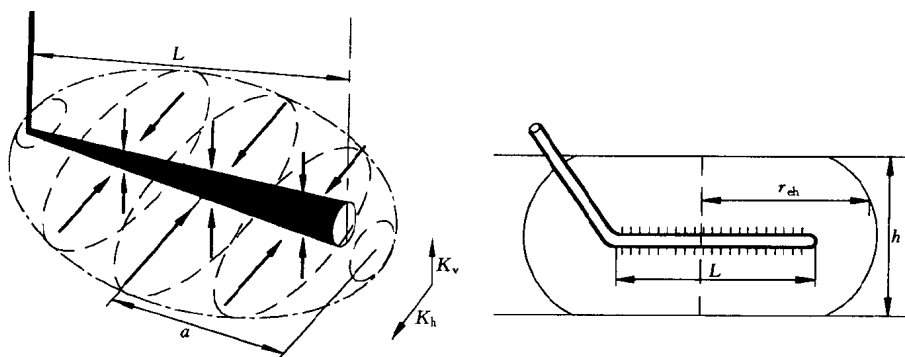


图 1-3 水平井示意图

基于 Joshi (1988) 的研究成果, 位于油层中部水平井在稳态流动条件下的采油指数为

$$J_h = \frac{CK_h h / (\mu_o B_o)}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{\beta h}{L} \left(\ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} + S \right)} \quad (1-7)$$

$$\beta = \sqrt{K_h / K_v} \quad (1-8)$$

$$a = \frac{L}{2} \sqrt{0.5 + \sqrt{0.25 + \left(\frac{r_{eh}}{L/2} \right)^4}} \quad (1-9)$$

$$r_{eh} = \sqrt{A/\pi}$$

式中 β ——油层渗透率各向异性系数;

K_h 、 K_v ——油层水平、垂向方向的渗透率;

a ——长度为 L 的水平井所形成的椭球形泄流区域的长半轴;

L ——水平井水平段长度 (简称井长);

S ——水平井表皮系数;

r_{eh} ——水平井的泄流半径;

A ——水平井控制泄流面积。

式 (1-7) 中的泄流区域几何参数 (如图 1-3 右图所示) 要求满足以下条件

$$L > \beta h \text{ 且 } L < 1.8 r_{eh}$$

二、油气两相渗流的流入动态

当地层压力低于饱和压力 ($\bar{p}_r < p_b$) 时, 油藏的驱动类型为溶解气驱, 此时油藏处于油气两相渗流。因而必须根据油气两相渗流的基本规律来研究其油井流入动态。

考虑原油物性 μ_o 和 B_o 随压力的变化以及相对渗透率 K_{ro} 效应, 对于拟稳态流动, 油井产量的一般表达式为

$$q_o = \frac{CKh}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S} \int_{\bar{p}_{wf}}^{\bar{p}_r} \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} d\bar{p} \quad (1-10)$$

然而, 式 (1-10) 中的被积函数 $K_{ro}/(\mu_o B_o)$ 与压力和生产气油比等很多因素有关, 其定量关系十分复杂。因此, 在油井动态分析和预测中一般采用简便实用的近似方法绘制溶解气驱条件的 IPR 曲线。

1. Vogel 无因次 IPR 曲线

Vogel (1968) 采用油藏数值模拟方法, 针对若干典型的溶解气驱油藏条件, 模拟计算出大量流入动态曲线数据。经过无因次化处理, 得出图 1-4 所示的不同采出程度 N_p/N 下的无因次 IPR 曲线, 其纵坐标为流压与平均地层压力之比 $\bar{p}_{wf}/\bar{p}_r$; 横坐标为相应流压下的产量与流压为零时最大产量之比 $q_o/q_{o\max}$ 。

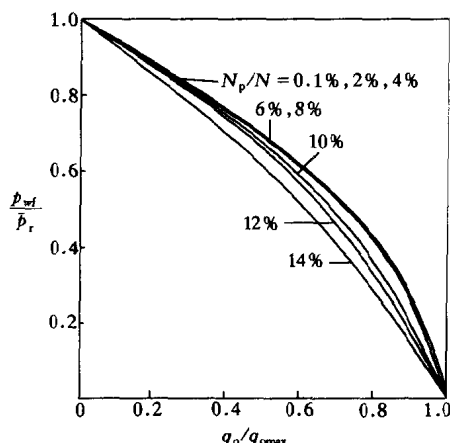


图 1-4 不同采出程度下的
无因次 IPR 曲线

Vogel 对不同流体性质、气油比、相对渗透率、井距及压裂井和井底存在污染等各种情况下的 21 个溶解气驱油藏条件进行了模拟计算。数值模拟计算结果表明, 上述情况的 IPR 曲线都具有类似的形状, 只是高粘度原油

及油井存在严重污染时差别较大。Vogel 在排除这些特殊情况之后, 从多条无因次 IPR 曲线中抽取了一条如图 1-5 所示的参考曲线 (习惯称为 Vogel 曲线)。该曲线可用下式无因次 IPR 方程 (Vogel 方程) 表示。它可视为溶解气驱油藏渗流微分方程通解的近似解。

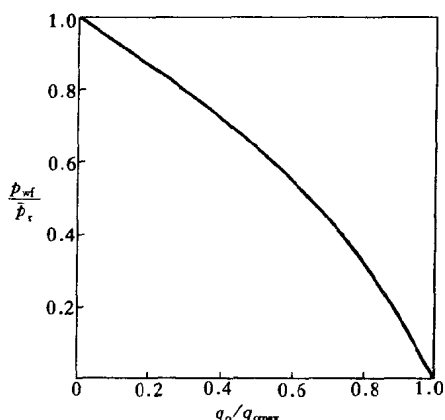


图 1-5 溶解气驱油藏无因次 IPR 曲线 (Vogel 曲线)

$$\frac{q_o}{q_{\text{omax}}} = 1 - 0.2 \frac{p_{\text{wf}}}{p_r} - 0.8 \left(\frac{p_{\text{wf}}}{p_r} \right)^2 \quad (1-11)$$

Vogel 方程 (1-11) 中不涉及油藏及流体物性参数。只需要已知目前平均地层压力和一个稳定的测试点 (产量及其流压), 便可绘制油井的 IPR 曲线, 用于预测不同流压下油井的产量, 应用十分简便。

【例 1-1】 已知 B 井平均地层压力为 14MPa, 流压为 11MPa 时的产量为 30m³/d。试用 Vogel 方程绘制该井的 IPR 曲线。

解 (1) 计算 q_{omax} :

$$q_{\text{omax}} = \frac{q_o}{1 - 0.2 \frac{p_{\text{wf}}}{p_r} - 0.8 \left(\frac{p_{\text{wf}}}{p_r} \right)^2} = \frac{30}{1 - 0.2 \left(\frac{11}{14} \right) - 0.8 \left(\frac{11}{14} \right)^2} = 85.97 \text{ m}^3/\text{d}$$

(2) 预测不同流压下的产量:

$$q_o = q_{\text{omax}} \left[1 - 0.2 \frac{p_{\text{wf}}}{p_r} - 0.8 \left(\frac{p_{\text{wf}}}{p_r} \right)^2 \right]$$

计算结果列入下表

$p_{\text{wf}}, \text{MPa}$	14	13	12	11	10	8	6	4	2	0
$q_o, \text{m}^3/\text{d}$	0	10.7	20.7	30	38.6	53.7	66.0	75.4	82.1	86.0

(3) 根据计算结果绘制 IPR 曲线见图 1-6。

2. 非完善井 Vogel 方程的修正

Vogel 在进行不同溶解气驱油藏条件的模拟计算中, 虽然也包含了不完善井(井底存在污染 $S>0$) 和超完善井(压裂 $S<0$) 的情况。由各种情况的数据结果产生了一族曲率不同的无因次 IPR 曲线(图 1-4)。然而上述 Vogel 曲线(图 1-5) 只是图 1-4 所示曲线族的“平均”曲线, 实际上仅表示接近完善井的情况。

就其完井方式而言, 射孔完井为打开性质上的不完善井; 为了防止底水锥进而未全部钻穿油层的井为打开程度上的不完善井。另外, 在钻井或修井作业过程中油层受到污染或进行过酸化、压裂等措施的油井, 其井壁附近的渗透率都会改变, 从而改变油井的完善性。所有这些都会增加或降低井底附近的压力降(如图 1-7 所示), 从而影响油井的流入动态。

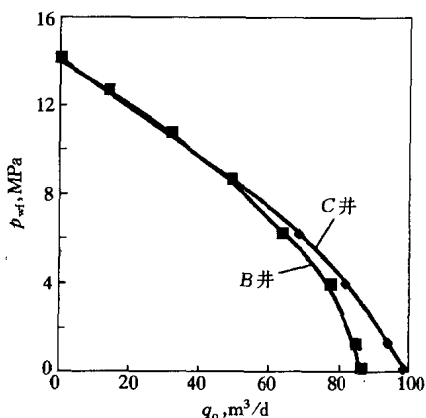


图 1-6 B 和 C 井的 IPR 曲线

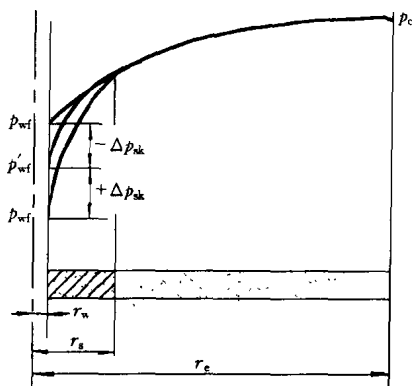


图 1-7 完善井和非完善井周围的压力分布

实际油井的完善程度可用流动效率 (Flowing Efficiency) 表示, 其定义为油井在同一产量下理想完善情况的生产压差与实际生产压差之比, 即

$$E_f = \frac{\bar{p}_r - p'_{wf}}{\bar{p}_r - p_{wf}} = \frac{\bar{p}_r - p_{wf} - \Delta p_{sk}}{\bar{p}_r - p_{wf}} \quad (1-12)$$

式中 p'_{wf} ——理想完善情况的流压;

p_{wf} ——同一产量下实际非完善井的流压;

Δp_{sk} ——非完善井表皮附加压力降。 $\Delta p_{sk} > 0$, 油井不完善; $\Delta p_{sk} < 0$, 油井超完善。

$$\Delta p_{sk} = p'_{wf} - p_{wf} = \frac{q_o \mu_o B_o S}{CK_o h} \quad (1-13)$$