



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



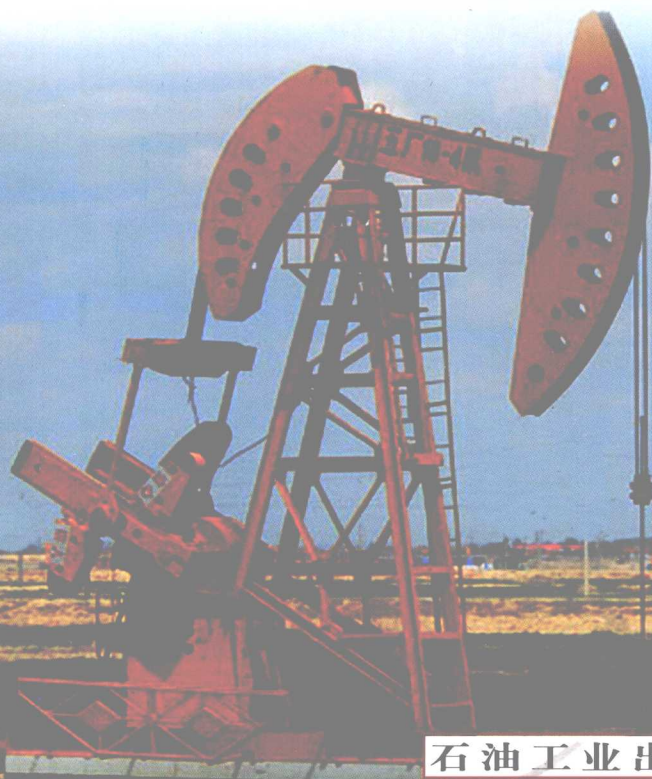
面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

# 采油工程

(第二版)

李颖川 主编



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
面向 21 世纪课程教材  
高等院校石油天然气类规划教材

# 采油工程

(第二版)

李颖川 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书系统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、螺杆泵及水力泵等采油技术和注水、压裂、酸化开发措施的基本原理与设计方法,介绍了解决“砂、蜡、水、稠、凝”生产问题的技术方法,以及完井方式选择和射孔完井工艺设计,反映了采油工程新技术和新工艺。

本书可作为石油工程本科专业教材,也可作为研究生、成人教育及相近专业的参考教材,或供从事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. —2版.

北京:石油工业出版社,2009.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-6588-8

I. 采…

II. 李…

III. 石油开采 - 高等学校 - 教材

IV. TE35

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第064489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)64523580 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

---

2009年2月第2版 2009年2月第8次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:25.5

字数:651千字

---

定价:38.00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

# 前 言

面向 21 世纪课程教材《采油工程》自 2002 年 2 月由石油工业出版社出版发行以来，迄今已在西南石油大学石油工程本科专业使用七届，在成都理工大学使用六届；同时也被两校选为油气田开发工程和油气井工程学科硕士、博士研究生的主要参考书之一。许多现场石油工程技术人员也将该教材选作专业技术参考书。

《采油工程》作为国家级重点学科“油气田开发工程”的主干课程之一，被西南石油大学列为首批重点建设的精品课程。该教材获 2005 年四川省优秀教学成果三等奖。2006 年被教育部确定为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本教材在修订过程中力求适应我国石油工业发展和对石油高等教育的需求，力图体现科学性、系统性和实用性，反映教学改革和课程建设的新成果。以达到提高素质，培养能力，提高教学效益的目的。其主要特点是：

(1) 为了适应水平井技术的发展，适当新增了水平井开采的相关内容，重点阐述与直井的区别及其技术思路。

(2) 新增第十章“完井及试油投产”内容，着重强调采油工程对完井工程提出技术要求，完善了本书内容的系统性。

(3) 为了加强基础培养能力，选配了较充分的典型算例和习题，强调计算机技术在采油工程计算中的应用，为学生独立学习及教师教学提供条件。

(4) 在保证基本要求的前提下，有一定的弹性内容，以适应不同学校教学与不同学生学习的需要。

(5) 在阐述采油工程原理和方法中，对一些基本概念和常用工程术语标注了英语，有助于降低学生阅读英语专业文献的难度。

本书内容反映了采油工程研究所全体教师的集体智慧和多年来共同教学实践的成果。具体参加本书修订工作的有李颖川（第一、二、三、八、九章）、刘建仪（第四章）、王永清（第五章）、胡永全（第六章）、刘平礼（第七章）和李海涛（新编写第十章）等教师。由李颖川统稿，万仁溥教授和潘迎德教授主审。

在本书修订过程中，得到了万仁溥教授和潘迎德教授，以及华北油田采油工程专家陈宪侃教授，成都理工大学伊向艺教授，大庆石油学院夏惠芬教授的帮助和指教，也得到了西南石油大学教务处、石油工程学院和石油工业出版社的大力支持，在此一并表示真诚的谢意！

由于编者水平所限，书中错误和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正，以便不断改进和完善。

编 者  
2008 年 10 月

# 第一版序

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：

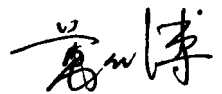
**系统性：**全面系统地阐述了采油工程的基本原理、采油工艺技术以及采油工程在油田开发中的重要地位及其功能，形成采油工程体系。

**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，融会贯通上下工夫。

采油工程与钻井工程对完井工程技术要求的角度不一样，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

# 第一版前言

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

<b>第一章 油井基本流动规律</b> .....	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 .....	17
第三节 气液两相管流计算方法 .....	25
第四节 油井井筒传热模型及温度计算 .....	35
第五节 嘴流动态 .....	38
习题 .....	40
<b>第二章 自喷与气举采油</b> .....	43
第一节 自喷井节点系统分析 .....	43
第二节 气举采油 .....	49
习题 .....	66
<b>第三章 有杆泵采油</b> .....	68
第一节 有杆抽油装置 .....	68
第二节 抽油机悬点运动规律 .....	74
第三节 抽油机悬点载荷 .....	79
第四节 抽油机平衡、扭矩及功率 .....	91
第五节 泵效分析 .....	96
第六节 抽油系统工艺设计.....	102
第七节 抽油系统工况分析及系统效率.....	109
习题.....	122
<b>第四章 无杆泵采油</b> .....	125
第一节 潜油电泵采油.....	125
第二节 螺杆泵采油.....	137
第三节 水力活塞泵采油.....	147
第四节 水力射流泵采油.....	155
习题.....	163
<b>第五章 注水</b> .....	165
第一节 注水水质指标设计.....	165
第二节 水处理与注入系统.....	171
第三节 注水井吸水能力.....	181
第四节 注水工艺.....	189
习题.....	199
<b>第六章 水力压裂</b> .....	201
第一节 水力压裂造缝机理.....	201

第二节	压裂液	208
第三节	支撑剂	218
第四节	水力压裂裂缝延伸模拟	225
第五节	支撑剂输送	229
第六节	水力压裂评价	235
第七节	水力压裂设计	238
第八节	压裂工艺技术	241
第九节	水力压裂技术进展	244
	习题	256
<b>第七章</b>	<b>酸化</b>	<b>258</b>
第一节	酸化增产原理	258
第二节	酸-岩化学反应当量及反应产物	261
第三节	酸-岩化学反应动力学	266
第四节	碳酸盐岩储层酸化设计计算	276
第五节	砂岩储层酸化设计计算	282
第六节	酸化工艺设计	285
第七节	酸液及添加剂	294
	习题	303
<b>第八章</b>	<b>油井防砂、防蜡与堵水工艺技术</b>	<b>305</b>
第一节	防砂	305
第二节	防蜡与清蜡	319
第三节	调剖与堵水	323
	习题	332
<b>第九章</b>	<b>稠油及高凝油开采技术</b>	<b>333</b>
第一节	稠油及高凝油的基本特性	333
第二节	常用热采方法	336
第三节	注蒸汽井筒及管线两相流与传热数值计算	339
第四节	人工举升及配套井筒降粘技术	342
第五节	稠油出砂冷采技术	349
第六节	水平井注蒸汽辅助重力泄油	353
	习题	357
<b>第十章</b>	<b>完井与试油投产</b>	<b>359</b>
第一节	完井方式选择	359
第二节	合理油、套管尺寸的确定	372
第三节	射孔完井工艺设计	374
第四节	试油工艺	387
第五节	完井投产措施	396
	习题	399



# 第一章 油井基本流动规律

油井生产系统可分为三个子系统：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。有些油井为了使其稳定生产并从安全性考虑，还会有通过油嘴以及井下安全阀的流动——嘴流（节流）。为此，本章将分别介绍油井生产系统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，图 1-1 为流入动态曲线，简称 IPR（Inflow Performance Relationship）曲线。典型的 IPR 曲线如图 1-1 所示，其横坐标为油井产液量  $q$ （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  $\bar{p}_r$  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（ $p_{wf} = 0$ ）时，油井产量达到最大  $q_{max}$ ，它表示油层的潜在产能。

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。

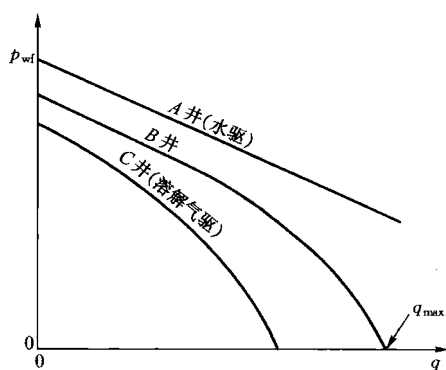


图 1-1 典型的油井 IPR 曲线

### 一、单相原油流入动态

#### 1. 符合线性渗流规律的流入动态

根据达西定律，定压边界圆形油层中心一口垂直井，稳态流动条件下的产量为

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

对于圆形封闭油层，即泄流边缘上没有液体流过，拟稳态条件下的产量为

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

式中  $q_o$ ——油井原油产量（地面）；

$K$ ——油层渗透率（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）；

$h$ ——油层有效厚度；

$\mu_o$ 、 $B_o$ ——油层原油粘度及原油的体积系数（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（表压）；

$r_e$ ——油井供给（泄流）边缘半径（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（skin factor，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，列入表 1-1。

表 1-1 系数  $C$  值

单位制	参 数					系数 $C$
	产量 $q$	渗透率 $K$	厚度 $h$	粘度 $\mu_o$	压力 $p$	
达西	cm <sup>3</sup> /s	D (达西)	cm	cP (厘泊)	atm (大气压)	$2\pi$
国际 SI	m <sup>3</sup> /s	m <sup>2</sup>	m	Pa·s	Pa	$2\pi$
法定标准	m <sup>3</sup> /d	$10^{-3}\mu\text{m}^2$	m	mPa·s	MPa	0.543
英制标准	bbl/d (桶/日)	mD (毫达西)	ft (英尺)	cP	psig (磅/英寸 <sup>2</sup> )	0.00708

对于非圆形封闭泄流区域的油井，可以对式 (1-1) 和 (1-1a) 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。

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

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

上式也称为油井流动方程，其中

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

或

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

由式 (1-2) 可得

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







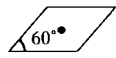



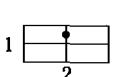


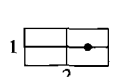


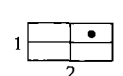



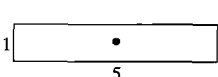
	0.565		1	1.485		2	4.072
	0.604		1	1.724		2	9.523
	0.610		1	0.668		4	1.368
	0.678		1	0.966		4	1.925
	10.135		1	1.440		4	6.590
	0.571		1	2.206		4	9.360
	0.884		1	1.794		5	2.066

图 1-2 不同泄流区域形状及井点位置下的  $C_x$  值

$J$ 。称为采油指数，一些文献中也用符号 PI (Productivity Index) 表示。它是反映油层性质、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 (4~5 个稳定工作制度下的产量及其流压)，直接用图解法即能获得可靠的采油指数。可用式 (1-2) 预测不同流压下的产量，还可根据式 (1-3) 或式 (1-3a) 研究油层参数。

采油工程中一项重要任务就是在合理的费用条件下，努力提高采油指数。采取解堵酸化等工艺措施消除近井地带的伤害或通过水力压裂取得负表皮系数。对于高粘度的稠油油藏，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。

## 2. 符合非线性渗流规律的流入动态

当油井产量很高时，在井底附近将出现高速非线性渗流。根据 Forchheimer (1901) 提出的非线性渗流方程 (1-5)，积分得到油井产量二项式 (1-6) 方程 (SI 单位制)

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K}v + \beta\rho v^2 \quad (1-5)$$

$$\bar{p}_r - p_{wf} = Aq_o + Bq_o^2 \quad (1-6)$$

式中  $v$ ——渗流速度，m/s；

$\rho$ ——原油密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\beta$ ——紊流速度系数，m<sup>-1</sup>；

$A$ ——二项式层流系数，Pa·s/m<sup>3</sup>；

$B$ ——二项式紊流系数，Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>。

$$A = \frac{\mu_o B_o}{2\pi Kh} \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)$$

$$B = \frac{\beta \rho B_o^2}{4\pi^2 h^2 r_w}$$

$\beta$  表征岩石孔隙结构对流体紊流的影响。由于岩石结构的复杂性，一般可采用经验公式估计

$$\beta = a/K^b$$

式中  $K$ ——油层渗透率， $\mu\text{m}^2$ ；

$a$ 、 $b$ ——经验系数（对于胶结地层，可分别取值  $1.906 \times 10^7$ 、 $1.201$ ；对于非胶结砾石充填层，可分别取值  $1.08 \times 10^6$ 、 $0.55$ ）。

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 (1-6) 中的系数  $A$  和  $B$  值。改变式 (1-6) 为

$$\frac{\bar{p}_r - p_{wf}}{q_o} = A + Bq_o \quad (1-6a)$$

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  $A$ 。

非线性二项式压降方程 (1-6) 也可表示为下式产量方程

$$q_o = \frac{2\pi Kh(\bar{p}_r - p_{wf})}{\mu_o B_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_o \right)} \quad (1-6b)$$

$$D = \frac{\beta \rho B_o}{2\pi h \mu_o r_w}$$

式中  $D$ ——惯性系数， $(\text{m}^3/\text{s})^{-1}$ 。

式 (1-6b) 中  $S$  和  $Dq_o$  都表示表皮系数。前者反映近井地带因渗透率变化所产生的粘滞渗流阻力；后者反映近井地带因流体流速变化产生的惯性渗流阻力。可将两者合并为视表皮系数  $S'$ 。

$$S' = S + Dq_o \quad (1-7)$$

式中  $S$  和  $D$  由不稳定试井确定。

### 3. 水平井产能及其特点

20 世纪 80 年代以来，国际上水平井 (horizontal well) 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。

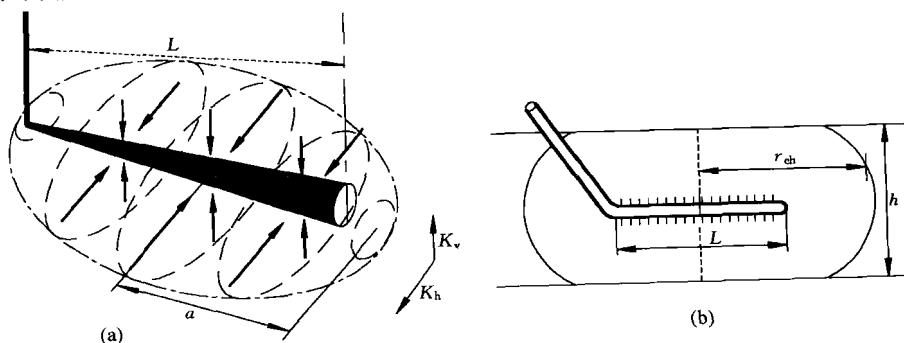


图 1-3 水平井示意图

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

$$J_h = \frac{0.543K_h h / (\mu_o B_o)}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{\beta h}{L} \left( \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} + S_h \right)} \quad (1-8)$$

$$\beta = \sqrt{K_h / K_v}$$

$$a = \frac{L}{2} \sqrt{0.5 + \sqrt{0.25 + \left( \frac{r_{ch}}{L/2} \right)^4}}$$

式中  $J_h$ ——水平井采油指数,  $m^3 / (d \cdot MPa)$ ;  
 $\beta$ ——油层渗透率各向异性系数 (各向同性地层  $\beta=1$ );  
 $K_h$ 、 $K_v$ ——油层水平、垂直方向的渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  
 $\mu_o$ ——原油粘度,  $mPa \cdot s$ ;  
 $B_o$ ——原油的体积系数;  
 $h$ ——油层厚度,  $m$ ;  
 $a$ ——长度为  $L$  的水平井所形成的椭球形泄流区域的长半轴,  $m$ ;  
 $L$ ——水平井段长度 (简称井长),  $m$ ;  
 $S_h$ ——水平井表皮系数;  
 $r_w$ ——水平井半径,  $m$ ;  
 $r_{ch}$ ——水平井的泄流半径,  $m$ 。

式 (1-8) 中的泄流区域几何参数如图 1-3 (b) 所示, 要求满足以下条件

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

垂直井的产能与  $K$  和  $h$  的乘积成正比, 即渗透率较低或薄油层 (或二者兼而有之) 将导致较低的产能。随水平井长度  $L$  的增长, 将增大油井的泄油区域, 从而提高油井产能。在相同油藏条件下, 水平井与直井的采油指数比值  $J_h/J_v$  可用式 (1-9) 表示 (假设  $\beta=1$  且直井与水平井的泄油半径  $r_{ch}$  相同)。

$$\frac{J_h}{J_v} = \frac{\ln(r_{ch}/r_w)}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \left( \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right)} \quad (1-9)$$

图 1-4 对比了在均质油层稳态流动条件下, 不同水平井长度  $L$  和油层厚度  $h$  对  $J_h/J_v$  的影响。

与垂直井相比, 水平井具有以下主要优点:

(1) 与直井相比, 水平井大大增加了井眼与油藏接触面积, 提高泄油效率, 也增大了钻遇储层天然裂缝的机会。

(2) 在同一井场上可以钻数口水平井, 能控制更大的泄油面积, 有利于环境敏感地区以及海上油田的开发。

(3) 由于水平井在一长距离内形成一低压区, 而直井是形成一个低压点, 所以水平井在其长度上能保持流体较为均匀地流入井筒。故它有利于开发薄油层和带底水、气顶的油层, 可以减缓底水和气顶的推进。

(4) 从水平井中注入或采出流体能与直井的相应流体形成正交流动状态, 有利于提高扫

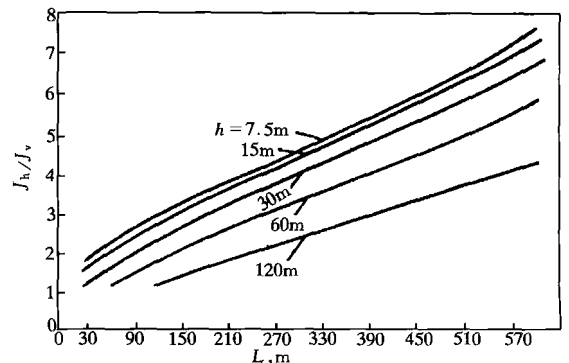


图 1-4 水平井长度和油层厚度对  $J_h/J_v$  的影响

油效率和采收率。

水平井的主要缺点是钻井、完井技术复杂，工期较长，水平井的成本和污染程度一般较直井高。但随着钻井、完井技术的完善配套，上述不足已明显得到改善。因此，对于一定地区，一般应考虑钻多口水平井方案，而不是选择单口水平井方案。

由于水平井的产能主要取决于水平井长度和完井质量，这均取决于钻井、完井工艺技术。因此，为了提高水平井工程的经济效益，要求钻井、完井、油藏工程和采油工程多学科协同配合。

## 二、油气两相渗流的流入动态

当油藏压力低于饱和压力 ( $\bar{p}_r < p_b$ ) 时，油藏的驱动类型为溶解气驱 (solution gas drive)，此时油藏处于气液两相渗流。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  $\mu_o$  和  $B_o$  随压力的变化以及油的相对渗透率  $K_{ro}$  效应，对于拟稳态流动，油井产量的一般表达式为

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

式中各字母含义同前。

然而，式 (1-10) 中的被积函数  $K_{ro}/(\mu_o B_o)$  与压力和生产油气比等很多因素有关，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油藏的 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 1-5 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  $q_o/q_{o\max}$ 。

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 1-6 所示的参考曲线，习惯称

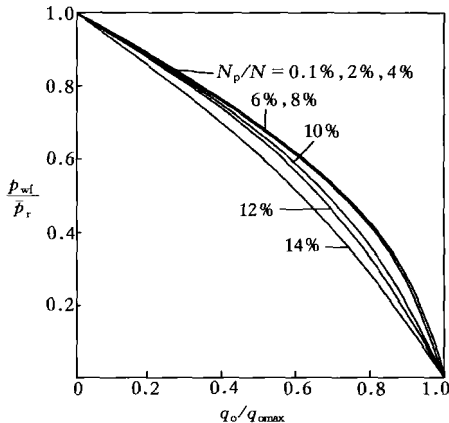


图 1-5 不同采出程度下的无因次 IPR 曲线

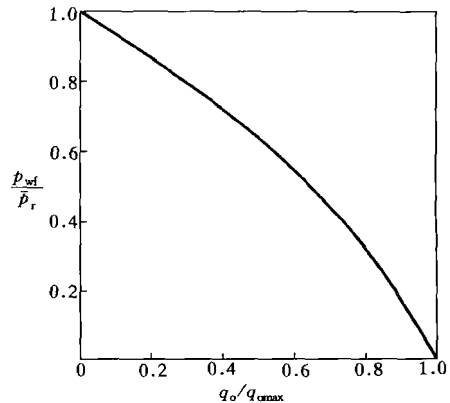


图 1-6 溶解气驱油藏无因次 IPR 曲线 (Vogel 曲线)

为 Vogel 曲线，并用下式无因次 IPR 方程（Vogel 方程）表示。可将它视为溶解气驱油藏渗流微分方程的近似解。

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

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十分简便。

**【例 1-1】** 已知 B 井平均地层压力  $p_b$  为 14MPa，测试流压为 11MPa 时的测试产量为  $30\text{m}^3/\text{d}$ 。试用 Vogel 方程绘制该井的 IPR 曲线。

解：(1) 计算  $q_{o\max}$ ：

$$q_{o\max} = \frac{q_{otest}}{1 - 0.2 \frac{p_{wtest}}{p_r} - 0.8 \left( \frac{p_{wtest}}{p_r} \right)^2} = \frac{30}{1 - 0.2 \left( \frac{11}{14} \right) - 0.8 \left( \frac{11}{14} \right)^2} = 86.0\text{m}^3/\text{d}$$

(2) 预测不同流压下的产量：

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

计算结果列入下表：

$p_{wf}$ , MPa	14	13	11	9	7	5	3	1	0
$q_o$ , $\text{m}^3/\text{d}$	0	10.7	30	46.5	60.2	71.1	79.2	84.4	86.0

(3) 根据计算结果绘制 IPR 曲线，如图 1-7 所示。

## 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，虽然也考虑了不完善井（井底存在污染  $S>0$ ）和超完善井（压裂  $S<0$ ）的多种情况，产生了一簇曲率不同的无因次 IPR 曲线（图 1-5）。然而 Vogel 曲线（图 1-6）只是图 1-5 所示曲线簇的“平均”曲线，实际上仅代表接近完善井的情况。

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会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（图 1-8），从而影响油井的流入动态。

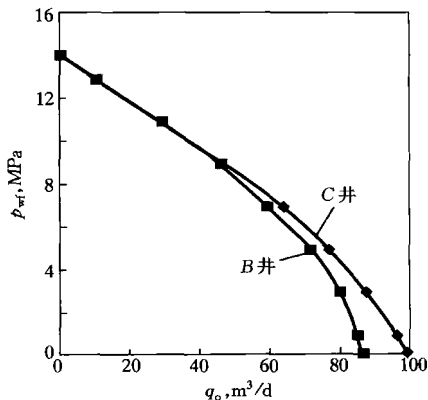


图 1-7 B 井和 C 井的 IPR 曲线

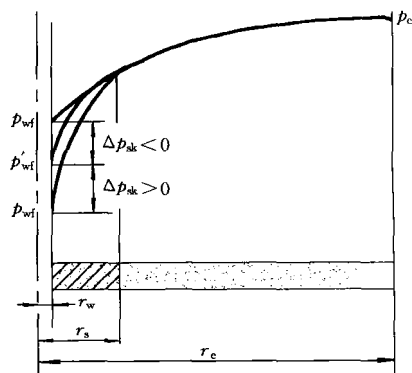


图 1-8 完善井和非完善井周围的压力分布

实际油井的完善程度可用流动效率  $E_f$  (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  $p'_{wf}$ ——理想完善情况的井底流压;

$p_{wf}$ ——同一产量下实际非完善井的井底流压;

$\Delta p_{sk}$ ——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。

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

由于油井的污染半径及污染区的渗透率难以确定, 通常用压力恢复曲线求出  $S$  或  $\Delta p_{sk}$ 。

对于圆形封闭油层中心一口直井, 流动效率与表皮系数可近似表示为

$$E_f = \frac{\ln(r_e/r_w) - 0.75}{\ln(r_e/r_w) - 0.75 + S} \quad (1-14)$$

完善井  $S=0$  或  $E_f=1$ ; 增产措施成功后的超完善井  $S < 0$  或  $E_f > 1$ ; 油层受伤害的不完善井  $S > 0$  或  $E_f < 1$ 。

Standing (1970) 提出将 Vogel 方程中的流压用  $p'_{wf}$  代替, 以适应  $0.5 \leq E_f \leq 1.5$  范围内的非完善井条件, 即

$$\frac{q_o}{q_{o_{max}}^{E_f=1}} = 1 - 0.2 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right) - 0.8 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right)^2 \quad (1-15)$$

$$p'_{wf} = \bar{p}_r - (\bar{p}_r - p_{wf}) E_f \quad (1-16)$$

图 1-9 为 Standing 按上述方程绘制的无因次 IPR 曲线, 其横坐标中的  $q_{o_{max}}$  是  $E_f=1$  时的最大产量。

**【例 1-2】** C 井  $E_f=0.8$ , 其他数据同例 1-1 中的 B 井。试绘制该井的 IPR 曲线。

解: (1) 计算该井在  $E_f=1$  时的最大产量:

$$p'_{wf} = \bar{p}_r - (\bar{p}_r - p_{wf}) E_f = 14 - (14 - 11) \times 0.8 = 11.6 \text{MPa}$$

$$\frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} = \frac{11.6}{14} = 0.829$$

$$q_{o_{max}} = \frac{q_o}{1 - 0.2 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right) - 0.8 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right)^2} = \frac{30}{1 - 0.2 \times 0.829 - 0.8 \times 0.829^2} = 105.5 \text{m}^3/\text{d}$$

(2) 预测不同流压下该井的产量:

先求  $E_f=0.8$  时不同  $p_{wf}$  对应的  $p'_{wf}$ , 然后由下式求相应的产量

$$q_o = q_{o_{max}}^{E_f=1} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right) - 0.8 \left( \frac{p'_{wf}}{\bar{p}_r} \right)^2 \right]$$

以  $p_{wf}=5 \text{MPa}$  为例, 对应  $p'_{wf}=6.8 \text{MPa}$

$$q_o = 105.5 \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{6.8}{14} \right) - 0.8 \left( \frac{6.8}{14} \right)^2 \right] = 75.3 \text{m}^3/\text{d}$$



改变流压计算相应产量列下表:

$p_{wf}$ , MPa	13	11	9	7	5	3	1	0
$p'_{wf}$ , MPa	13.2	11.6	10	8.4	6.8	5.2	3.6	2.8
$q_o$ , m <sup>3</sup> /d	10.6	30.1	47.4	62.4	75.3	86.0	94.5	97.9

(3) 根据计算结果绘制 C 井的 IPR 曲线, 如图 1-7 所示。

值得注意: 采用 Standing 方法计算  $E_i \neq 1$  的 IPR 曲线时, 不应超过图 1-9 所示无因次 IPR 曲线的范围  $E_i = 0.5 \sim 1.5$ 。Harrison 提供了可用于计算高流动效率井 IPR 曲线的公式

$$q_o/q_{\text{omax}} = 1.2 - 0.2e^{1.792p'_{wf}/\bar{p}_r} \quad (1-17)$$

### 3. 单相流与两相流的组合

当油藏压力高于原油饱和压力  $p_b$  而井底流压  $p_{wf} < p_b$  时, 油藏中同时存在单相流和气液两相渗流。典型的 IPR 曲线如图 1-10 所示。当  $p_{wf} \geq p_b$  时, 油藏中为单相油流, 采油指数为常数, IPR 曲线为直线且表示为

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

由此,  $p_{wf} = p_b$  时的产量  $q_b$  为

$$q_b = J_o(\bar{p}_r - p_b) \quad (1-18)$$

当  $p_{wf} < p_b$  时, 油藏中为油气两相渗流, 分别用  $p_b$  和  $q_v$  代替 Vogel 方程 (1-11) 中的  $\bar{p}_r$  及  $q_{\text{omax}}$ , 即

$$q_o = q_b + q_v \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{p_b} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right] \quad (1-19)$$

由式 (1-2) 和 (1-19) 分别对  $p_{wf}$  求导, 在  $p_{wf} = p_b$  点上二导数相等, 得

$$q_v = \frac{J_o p_b}{1.8} \quad (1-20)$$

如果测试流压  $p_{wftest} \geq p_b$ , 采油指数为

$$J_o = \frac{q_{\text{otest}}}{\bar{p}_r - p_{wftest}} \quad (1-21)$$

如果测试流压  $p_{wftest} < p_b$ , 可将式 (1-18) 和式 (1-20) 代入式 (1-19) 导出单相油流采油指数

$$J_o = \frac{q_{\text{otest}}}{\bar{p}_r - p_b + \frac{p_b}{1.8} \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wftest}}{p_b} - 0.8 \left( \frac{p_{wftest}}{p_b} \right)^2 \right]} \quad (1-22)$$

**【例 1-3】** 已知 D 井  $\bar{p}_r$  为 18MPa,  $p_b$  为 13MPa, 测试流压为 9MPa 时的产量为 80m<sup>3</sup>/d。试计算流压分别为 15MPa 和 7MPa 时的产量, 并绘制该井的 IPR 曲线。

解: (1) 计算  $J_o$  及  $q_b$ :

$$\begin{aligned} J_o &= \frac{q_{\text{otest}}}{\bar{p}_r - p_b + \frac{p_b}{1.8} \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wftest}}{p_b} - 0.8 \left( \frac{p_{wftest}}{p_b} \right)^2 \right]} \\ &= \frac{80}{18 - 13 + \frac{13}{1.8} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{9}{13} \right) - 0.8 \left( \frac{9}{13} \right)^2 \right]} = 9.46 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa}) \end{aligned}$$

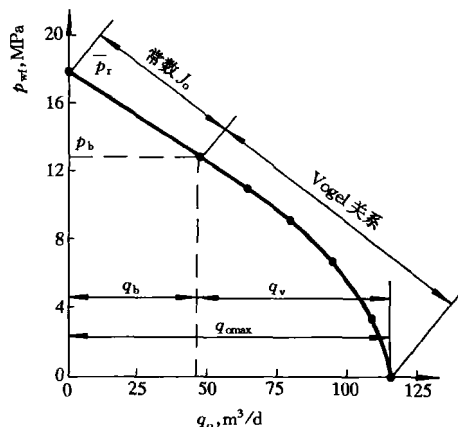


图 1-10 组合型 IPR 曲线