




中国石油大学(华东)远程与继续教育系列教材

采油工程

OIL PRODUCTION ENGINEERING

主编 曲占庆 王卫阳

中国石油大学出版社

 中国石油大学（华东）远程与继续教育系列教材

采油工程

曲占庆 王卫阳 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

采油工程/曲占庆,王卫阳主编.—东营:中国石油大学出版社,2009.6

ISBN 978-7-5636-2357-0

I. 采… II. ①曲…②王… III. 石油开采—成人教育—教材 IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 068420 号

书 名: 采油工程
作 者: 曲占庆 王卫阳

责任编辑: 李 锋(0532—86981532)

封面设计: 王长皓

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印刷者: 青岛星球印刷有限公司

发行者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 19 字数: 379 千字

版 次: 2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

中国石油大学(华东)
远程与继续教育系列教材编审委员会

主任：王瑞和

副主任：齐高岱 刘衍聪

委员：戴俊生 邱正松 刘雪暖 崔学政 李雷鸣
 署恒木 刘润华 梁 鸿 吕巍然 李书光
 孙秀丽 王建军 王天虎 马国刚

总序

从1955年创办函授夜大学至今,中国石油大学成人教育已经走过了从初创、逐步成熟到跨越式发展的50载历程。50多年来,我校成人教育紧密结合社会经济发展需求,积极开拓新的服务领域,为石油、石化企业培养、培训了10多万名本专科毕业生和管理与技术人才,他们中的大多数已经成为各自工作岗位的骨干和中坚力量。我校成人教育始终坚持“规范管理、质量第一”的办学宗旨,坚持“为石油石化企业和经济建设服务”的办学方向,赢得了良好的社会信誉。

自2001年1月教育部批准我校开展现代远程教育试点工作以来,我校以“创新教育观念”为先导,以“构建终身教育体系”为目标,整合函授夜大学教育、网络教育、继续教育资源,建立了新型的教学模式和管理模式,构建了基于卫星数字宽带和计算机宽带网络的现代远程教育教学体系和个性化的学习支持服务体系,有效地将学校优质教育资源辐射到全国各地,全力打造出中国石油大学现代远程教育的品牌。目前,办学领域已由创办初期的函授夜大学教育发展为今天的集函授夜大学教育、网络教育、继续教育、远程培训、国际合作教育于一体的,在国内具有领先水平、在国外具有一定影响的现代远程开放教育系统,成为学校高等教育体系的重要组成部分和石油、石化行业最大的成人教育基地。

为适应现代远程教育发展的需要,学校于2001年9月正式启动了网络课程研制开发和推广应用项目,斥巨资实施“名师名课”教学资源精品战略工程,选拔优秀教师开发网络教学课件。随着流媒体课件、WEB课件到网络课程的不断充实与完善,建构了内容丰富、形式多样的网络教学资源超市,基于网络的教学环境初步形成,远程教育的能力有了显著提高,这些网上教学资源的建设与研发为我校远程教育的顺利发展起到了支撑和保障作用。相应地,作为教学资源建设的一个重要组成部分,与网络教学课件相配套的纸质教材建设就成为一项愈来愈重要的任务。根据学校现代远程教育

发展规划,在“十一五”期间,学校将推进精品课程、精品网络课件和教材的建设工作,通过立项研究方式启动远程与继续教育系列教材建设工作,选聘石油石化行业和有关石油高校专家、学者参与系列教材的开发和编著工作,计划用5年的时间,以石油、化工等主干专业为重点,陆续推出成人学历教育、岗位培训、继续教育三大系列教材。系列教材将充分吸收科学技术发展和成人教育教学改革最新成果,体现现代教育思想和远程教育教学特点,具有先进性、科学性和远程教育教学的适用性,形成纸质教材、多媒体课件、网上教学资料互为补充的立体化课程学习包。

为了保证远程与继续教育系列教材编写出版进度和质量,学校成立了专门的远程与继续教育系列教材编审委员会,对系列教材进行严格的审核把关,中国石油大学出版社也对系列教材的编辑出版给予了大力支持和积极配合。目前,远程与继续教育系列教材的编写还处于探索阶段,随着我校现代远程教育的进一步发展,新课程的开发、新教材的编写将持续进行,本系列教材的体系也将不断完善。我们相信,有广大专家、学者们的共同努力,一定能够创造出体现现代远程教育教学和学习特点的,体系新、水平高的远程与继续教育系列教材。

编委会

2006年10月

前 言

P R E F A C E

采油工程作为一门石油工程专业的主干专业课,主要介绍提高油井产量和原油采收率的各项工程技术措施的理论、工程设计方法。

采油工程面对的是不同地质条件和动态不断变化的各种类型的油气藏,只有根据其地质条件和动态变化,正确地选择和实施技术上可行、经济上合理的工程技术措施,才能获得良好的经济效果。采油工程的特点是:遇到的问题多、难度大、涉及面广,各项工程技术措施间的相对独立性强。

本着加强基础和理论联系实际的原则,本书系统地介绍了采油工程技术领域内的有关基本知识和基本理论。全书由曲占庆和王卫阳主持编写,具体分工如下:

王卫阳编写第1章油井基本流动规律和第2章自喷与气举采油;

鲍丙生编写第3章有杆泵采油和第4章无杆泵采油;

温庆志编写第6章压裂、酸化技术和第7章复杂条件下的开采技术;

曲占庆编写第5章注水和第8章油水井作业。

本书作为一本适合于成人教育的专业教材,主要是帮助石油工程专业的学员了解、掌握采油工程学科领域的基本概念、基本理论和基本方法,亦可供从事采油工程的技术人员参考。

在本书编写过程中得到了张琪教授的指导,也得到了中国石油大学(华东)采油工程系的老师们的大力支持,在此表示感谢。

编者

2009.5

目 录

CONTENTS

第1章 油井基本流动规律	1
1.1 油井流入动态	1
1.1.1 单相液体的流入动态	2
1.1.2 油气两相渗流时的流入动态	4
1.1.3 $\bar{p}_r > p_b > p_{wf}$ 时的流入动态	9
1.1.4 油气水三相 IPR 曲线	10
1.1.5 多层油藏油井流入动态	11
1.2 井筒气液两相流基本概念	13
1.2.1 井筒气液两相流动的特性	13
1.2.2 井筒气液两相流能量平衡方程及压力分布计算步骤	17
1.3 垂直气液两相管流计算方法	21
1.3.1 压力降公式及流动型态划分界限	22
1.3.2 混合物平均密度及摩擦损失梯度的计算	23
1.4 嘴流动态	27
第2章 自喷与气举采油	31
2.1 自喷井生产设备及工艺流程	31
2.1.1 自喷井井口装置	31
2.1.2 自喷井流程	34
2.1.3 自喷井分层开采生产管柱	34
2.2 自喷井生产系统分析	35
2.2.1 自喷井生产基本流动过程	35
2.2.2 自喷井节点分析	37
2.2.3 自喷井的管理	42
2.3 气举采油原理及生产系统设计方法	44
2.3.1 气举采油原理	45
2.3.2 气举方式及井下管柱	45

2.3.3	气举启动压力与工作压力	46
2.3.4	气举阀	48
2.3.5	气举生产系统设计	52
2.3.6	气举井试井	56
第3章	有杆泵采油	58
3.1	有杆泵抽油装置	58
3.1.1	抽油机及其工作原理	60
3.1.2	抽油泵	65
3.1.3	抽油杆柱及井口装置	67
3.2	抽油机悬点运动规律	70
3.2.1	简化为简谐运动时的悬点运动规律	70
3.2.2	简化为曲柄滑块机构时的悬点运动规律	72
3.3	抽油机悬点载荷计算与分析	73
3.3.1	悬点所承受的载荷	74
3.3.2	悬点最大和最小载荷	78
3.4	抽油机的平衡、扭矩与功率计算	78
3.4.1	抽油机平衡计算	78
3.4.2	曲柄轴扭矩计算	81
3.4.3	电动机的选择和功率计算	83
3.4.4	抽油机井的系统效率	84
3.5	泵效计算与分析	86
3.5.1	影响泵效的因素	86
3.5.2	提高泵效的措施	90
3.6	有杆抽油系统设计	94
3.6.1	抽油杆强度计算及杆柱设计	94
3.6.2	有杆抽油井生产系统设计	97
3.7	有杆抽油系统工况分析	99
3.7.1	抽油机井液面测试与分析	99
3.7.2	地面示功图分析	100
3.7.3	抽油机井的计算机诊断技术	107
3.7.4	抽油机井生产动态分析——动态控制图的应用	108
3.8	地面驱动螺杆泵结构及工作原理	111
3.8.1	地面驱动螺杆泵的组成	111
3.8.2	螺杆泵工作原理	112

3.8.3	地面驱动螺杆泵生产系统优化设计	114
3.8.4	螺杆泵采油配套工艺技术	118
第4章	无杆泵采油	123
4.1	电潜泵采油	123
4.1.1	电潜泵采油装置及其工作原理	123
4.1.2	电潜泵井生产系统设计及设备选择	127
4.1.3	电潜泵井生产管理与分析	128
4.2	水力活塞泵采油	134
4.2.1	水力活塞泵装置的组成和分类	134
4.2.2	水力活塞泵井下机组工作原理	138
4.2.3	水力活塞泵使用范围	139
4.2.4	水力活塞泵油井生产系统设计	140
4.2.5	水力活塞泵的工况诊断及故障分析	141
4.3	水力射流泵采油	143
4.3.1	采油装置构成及工作原理	143
4.3.2	射流泵油井生产系统设计步骤	146
4.3.3	射流泵的常见故障及排除	146
第5章	注 水	149
5.1	水源、水质及注水系统	149
5.1.1	水源及水质要求	149
5.1.2	注入水处理工艺	151
5.1.3	注水地面系统	152
5.1.4	注水井的投注程序	155
5.2	注水井吸水能力分析	156
5.2.1	注水井吸水能力的表达	156
5.2.2	影响吸水能力的因素	158
5.2.3	改善吸水能力的措施	158
5.3	分层注水技术	159
5.3.1	分层吸水能力的测试及分层配水	159
5.3.2	分层配水	164
5.3.3	分层注水管柱	166
5.4	注水井分析	168
5.4.1	注水井的油、套压及注水量变化分析	168
5.4.2	注水指示曲线分析及应用	169

5.5 注水井调剖与检测	173
5.5.1 调剖方法	173
5.5.2 示踪剂检测	174
第6章 压裂、酸化技术	177
6.1 水力压裂技术	177
6.1.1 增产原理	177
6.1.2 造缝机理	178
6.1.3 压裂液	180
6.1.4 支撑剂	185
6.1.5 压裂设计	190
6.2 酸处理技术	197
6.2.1 酸液及添加剂	197
6.2.2 碳酸盐岩地层的盐酸处理	202
6.2.3 砂岩油气层的土酸处理	204
6.2.4 酸化压裂技术	208
6.2.5 酸处理工艺	209
第7章 复杂条件下的开采技术	214
7.1 油井出砂处理技术	214
7.1.1 油层出砂原因	214
7.1.2 防砂方法	217
7.1.3 清砂方法	220
7.2 防蜡与清蜡技术	222
7.2.1 油井防蜡机理	222
7.2.2 油井防蜡方法	223
7.2.3 油井清蜡方法	224
7.3 油井堵水	225
7.3.1 油井出水原因及找水技术	225
7.3.2 油井封堵水技术	227
7.4 稠油及高凝油开采技术	233
7.4.1 稠油及高凝油开采特征	234
7.4.2 热处理油层采油技术	236
7.4.3 井筒降粘技术	242
第8章 油水井作业	248
8.1 修井设备与工具	248

8.1.1	动力设备	248
8.1.2	起下设备	249
8.1.3	旋转设备	253
8.1.4	循环设备	253
8.1.5	井口装置及工具	255
8.1.6	封隔器	257
8.2	油井小修	262
8.2.1	压井	262
8.2.2	抽油井检泵	265
8.2.3	不压井、不放喷作业设备	269
8.3	油井大修	276
8.3.1	井下打捞及打捞工具	276
8.3.2	井下解卡技术及解卡管柱与工具	280
8.3.3	套管修复工艺与工具	282

第1章 油井基本流动规律

本章导学:

本章介绍油井生产基本流动过程的动态规律及计算方法。要求掌握不同驱动类型油藏的油井流入动态计算及 IPR 曲线的绘制方法;了解油气水混合物在井筒中的流动特性,掌握气液两相流的基本概念以及气液混合物在井筒中压力分布的计算步骤和方法。

重点难点:

- (1) 单相及气液两相流体渗流时的油井流入动态;
- (2) 井筒气液两相流的流型及能量损失规律;
- (3) 多相垂直管流压力分布计算的步骤和方法;
- (4) 嘴流临界流动的特点。

任何油井的生产都包含三个基本流动过程:从油藏到井底的流动——油层中的渗流;从井底到井口的流动——井筒中的管流;从井口到地面计量站分离器的流动——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。尽管这些流动过程相互衔接,但它们在本质上有着不同的流动规律。准确预测其流动规律是油井各种举升方式设计和生产动态分析所需要的共同基础。本章将分别介绍油井生产的三个基本流动过程(油层渗流、气液两相管流和嘴流)的动态规律及计算方法。

1.1 油井流入动态

石油从油层经过渗流到达井底后的剩余压力称为井底流动压力(简称流压)。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,人们常用油井流入动态来表述这一过程的宏观规律。

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。表示油井产量与流压关系的曲线称为油井流入动态曲线,简称 IPR 曲线,也称采油指示曲线。典型的流入动态曲线如图 1-1 所示,其横坐标为油井产量 q ,纵坐标为井底流压 p_{wf} 。

从单井来讲,IPR 曲线反映了油层向井的供给能力(产能)。图 1-1 表明,IPR 曲线的基本形状与油藏驱动类型有关。即使在同一驱动方式下,其定量关系也取决于油藏压力、油层厚度、渗透率及流体物理性质等。下面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。

1.1.1 单相液体的流入动态

1.1.1.1 垂直井单相液体的流入动态

当井底流压高于原油饱和压力时,油藏中流体的流动为单相渗流。根据达西定律,定压边界圆形地层中心一口垂直井的稳态产量公式为:

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

对于圆形封闭油藏,即泄油边缘上没有液体流过,则拟稳态条件下的产量公式为:

$$q_o = \frac{2\pi K_o h (\bar{p}_r - p_{wf})}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + s \right)} \quad (1-2)$$

式中 q_o ——油井产量(地面), m^3/s ;

K_o ——油层有效渗透率, m^2 ;

B_o ——原油体积系数,无因次;

h ——油层有效厚度, m ;

μ_o ——地层油的粘度, $Pa \cdot s$;

\bar{p}_r ——井区平均油藏压力, Pa ;

p_{wf} ——井底流动压力, Pa ;

r_e ——油井供油(泄油)边缘半径, m ;

r_w ——井眼半径, m ;

s ——表皮系数,与油井完成方式、井底污染或增产措施等有关,可由压力恢复试井资料求得。

对于非圆形封闭泄油面积油井拟稳态条件下的产量公式,可根据泄油面积和油井位置对式(1-2)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可确定相应的 X 值(具体方法参见文献 13)。

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,这样产量公式可写成:

$$q_o = J (\bar{p}_r - p_{wf}) \quad (1-3)$$

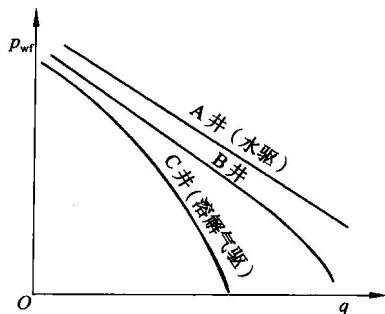


图 1-1 典型的油井流入动态曲线

$$J = \frac{2\pi K_o h}{\mu_o B_o \left(\ln X - \frac{3}{4} + s \right)} \quad (1-4)$$

在一些文献中,称式(1-3)为油井流动方程。由式(1-3)可得:

$$J = \frac{q_o}{\bar{p}_r - p_{wf}} \quad (1-5)$$

J 称为采油指数,它是一个反映油层性质、厚度、流体参数、完井条件及泄油面积等与产量之间的关系的综合指标。其数值等于单位生产压差下的油井产油量,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,便可绘制该井的实测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;在纵坐标上的截距即为油藏压力。

对于单相液体流动的直线型IPR曲线,其采油指数是定值;而对于多相流动等非直线型的IPR曲线,其斜率是变化的。所以,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。

另外应当指出,即便在单相渗流条件下,当油井产量很高时,在井底附近也将出现非达西渗流,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:

$$\bar{p}_r - p_{wf} = Cq + Dq^2 \quad (1-6a)$$

式中 \bar{p}_r ——井区平均油藏压力, kPa;

p_{wf} ——井底流动压力, kPa;

q ——油井产量(地面), m^3/d ;

C ——系数, $\text{kPa}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;

D ——紊流系数, $\text{kPa}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})^2$ 。

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

$$\frac{\bar{p}_r - p_{wf}}{q} = C + Dq \quad (1-6b)$$

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

1.1.1.2 水平井单相液体的流入动态

20世纪80年代以来,水平井在油气田开发中得到了广泛应用。水平井同直井比较而言,由于它能钻遇较长的油气层,增加了与油藏的接触面积,从而提高了单井产能。国内外学者对水平井产能的预测方法进行了大量的研究,稳态解析解是其中最简

单的形式,而 Joshi 提出的水平井稳态产量计算公式经常被采用。

如图 1-2 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,泄流区域的长半轴 a 与水平井长度 L 有关。

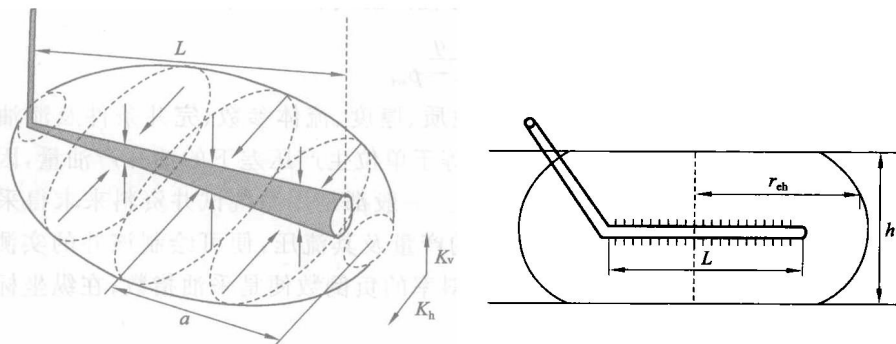


图 1-2 水平井示意图

水平井稳态流动条件下的产量为:

$$q = \frac{2\pi K_h h (\bar{p}_r - p_{wi}) / (\mu_o B_o)}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] + (\beta h / L) \ln \left(\frac{\beta h}{2\pi r_w} + s \right)} \quad (1-7)$$

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

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

$$r_{eh} = \sqrt{A / \pi} \quad (1-10)$$

式中 β ——油层渗透率各向异性系数,无因次;

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;

s ——水平井表皮系数,无因次;

r_{eh} ——水平井的泄流半径, m;

A ——水平井的控制泄流面积, m^2 。

式(1-7)中的泄流区域几何参数要求满足以下条件:

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

1.1.2 油气两相渗流时的流入动态

当地层压力低于饱和压力时,油藏的驱动类型为溶解气驱。此时,油藏处于油气两相渗流,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。

1.1.2.1 垂直井油气两相渗流时的流入动态

根据达西定律,对于平面径向流,直井油气两相渗流时油井产量公式为:

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

令 $K_{ro} = K_o/K$, 表示油相相对渗透率,并对上式积分,可得:

$$q_o = \frac{2\pi K h}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \int_{p_{wf}}^{p_c} \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} dp \quad (1-11)$$

式中, μ_o , B_o 及 K_{ro} 都是压力的函数,只有找到它们与压力的关系才可求得积分,从而找到产量和流压的关系。显然,利用上述方法来绘制 IPR 曲线是十分繁琐的。因而,在油井动态分析和预测中通常结合生产测试资料或者简便实用的近似方法绘制溶解气驱条件下的 IPR 曲线。

(1) Vogel 方法

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。

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模拟计算,得到了大量流入动态曲线数据。计算结果表明,产量与流压的关系随采出程度 N_p/N 而变。但将曲线无因次化处理(以流压与油藏压力的比值 p_{wf}/\bar{p}_r 为纵坐标,以相应流压下的产量 q_o 与流压为零时的最大产量 $q_{o\max}$ 之比为横坐标)后,则不同采出程度下的 IPR 曲线很接近(图 1-3)。绘制出一条如图 1-4 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。

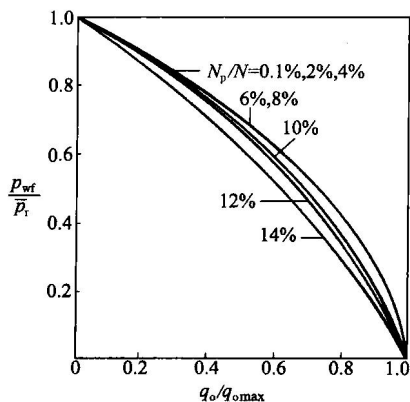


图 1-3 溶解气驱油藏不同采出程度下无因次 IPR 曲线

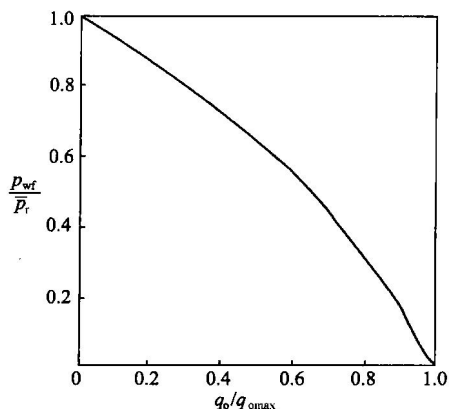


图 1-4 溶解气驱油藏 Vogel 曲线

图 1-4 的曲线可用下面的方程(Vogel 方程)来表示: