



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

采油工程 原理与设计

张 琪 主 编

石油大学出版社

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

采油工程原理与设计

张琪 主编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

采油工程原理与设计/张琪主编. —东营:石油大学出版社, 2000. 9

ISBN 7-5636-1197-5

I. 采… I. 张… II. 石油开采 IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 28291 号

采油工程原理与设计

张琪 主编

责任编辑: 郇云飞 (电话 0546—8392565)

封面设计: 傅荣治

出版者: 石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://suncntr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱: upcpress@mail.hdpu.edu.cn

印刷者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本: 787×960 1/16 印张: 30 字数: 555 千字

版 次: 2003 年 3 月第 1 版第 4 次印刷

印 数: 6001~9000 册

定 价: 36.00 元

前 言

为了适应我国石油工业发展和石油高等教育改革的要求,根据石油高等教育教材建设规划和石油工程专业教学计划,石油大学组织有关教师编写了本书,作为原油藏工程、采油工程和钻井工程三个专业合并后的石油工程专业的采油工程课教材。本书是在王鸿勋、张琪主编的《采油工艺原理》教材及编者多年教学实践的基础上重新编写的。

本书的特点是:从采油工程系统出发,在面上扩充了教材内容;为适应采油工艺技术的发展增加了新的内容;以工程设计为主线,阐述基本原理、工艺技术和设计计算方法。编写过程中,遵循了如下原则:

1. 努力运用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点阐述采油工程的基本规律。
2. 从采油工程系统出发,以采油工程设计与方案编制为主线组织内容,重点阐述各项工程措施的基本原理、计算及工程设计方法。涉及工艺过程、设备和工具的内容在有关教学环节中学习。
3. 从石油工业发展战略出发,贯彻理论联系实际的原则。
4. 总体安排上涉及的技术面要广,具体内容要新,深度要适度,即“广、新、适度”原则。
5. 符合课程教学大纲要求,体现专业课教学规律。

本书是在试用版试用和广泛征求意见的基础上,由张琪、王杰祥、樊灵、陈德春分别进行修改,由张琪组织定稿;编写分工如下:

张 琪:绪论;第一章第二、三、四节;第三章第一、二、三节;第十章。

孙大同:第一章第一节;第二章第一节;第三章第四、五、六节。

樊 灵:第二章第二、三节;第四章。

王杰祥:第五章;第九章。

张士诚:第六章;第七章。

陈德春:第八章。

为了保证教材的实用性和内容的完整性与系统性,本教材的总体内容超过了目前教学计划规定的学时数,因此,授课教师在使用时应根据教学大纲进行选讲,必要时对部分内容可指导学生自学。

KAH/100/07

本书在编写过程中得到了石油大学(华东)教材科、采油教研室的支持和帮助,也得到了王鸿勋教授、万仁溥教授级高级工程师、陈宪侃教授级高级工程师等采油工程界专家的关注和指导,特别是王鸿勋教授在最终审稿时提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。由于时间及编者的经验和水平有限,书中遗误之处在所难免,敬请使用本教材的师生及有关读者指正。

编 者

2000年3月

目 录

绪 论	(1)
第一章 油井流入动态与井筒多相流动计算	(3)
第一节 油井流入动态(IPR 曲线)	(3)
一、单相液体的流入动态	(4)
二、油气两相渗流时的流入动态	(7)
三、 $\bar{p}_r > p_b > p_{wi}$ 时的流入动态	(15)
四、油气水三相流入动态	(19)
五、多层油藏油井流入动态	(21)
第二节 井筒气液两相流基本概念	(23)
一、井筒气液两相流动的特性	(24)
二、井筒气液两相流能量平衡方程及压力分布计算步骤	(28)
第三节 计算气液两相垂直管流的 Orkiszewski 方法	(33)
一、压力降公式及流动型态划分界限	(34)
二、平均密度及摩擦损失梯度的计算	(35)
第四节 计算井筒多相管流的 Beggs-Brill 方法	(41)
一、基本方程	(42)
二、Beggs-Brill 方法的流型分布图及流型判别式	(44)
三、持液率及混合物密度的确定	(45)
四、阻力系数 λ	(47)
附录 A 利用 Beggs-Brill 方法计算井筒流体的压力梯度	(50)
参考文献	(53)
第二章 自喷与气举采油	(54)
第一节 自喷井生产系统分析	(54)
一、自喷井生产系统的组成	(54)
二、自喷井节点分析	(56)
第二节 气举采油原理及油井举升系统设计方法	(68)

一、气举采油原理	(69)
二、气举启动	(70)
三、气举阀	(72)
四、气举设计	(81)
五、气举井试井	(92)
参考文献	(93)
第三章 有杆泵采油	(94)
第一节 抽油装置及泵的工作原理	(94)
一、抽油装置	(94)
二、泵的工作原理	(99)
第二节 抽油机悬点运动规律及悬点载荷	(100)
一、抽油机悬点运动规律	(100)
二、抽油机悬点载荷计算	(103)
第三节 抽油机平衡、扭矩与功率计算	(117)
一、抽油机平衡计算	(117)
二、曲柄轴扭矩计算及分析	(121)
三、电动机的选择和功率计算	(130)
第四节 泵效计算	(134)
一、柱塞冲程	(135)
二、泵的充满程度	(138)
三、泵的漏失	(140)
四、提高泵效的措施	(141)
第五节 有杆抽油系统设计	(143)
一、抽油杆强度计算及杆柱设计	(143)
二、有杆抽油井生产系统设计	(147)
三、钢杆-玻璃钢杆组合杆柱抽油技术	(148)
第六节 有杆抽油系统工况分析	(153)
一、抽油井液面测试与分析	(153)
二、地面示功图分析	(157)
三、抽油井工况诊断技术——井下示功图分析	(163)
附录 A 美国石油学会推荐的有杆抽油系统设计计算	
方法——API RP 11L	(170)
参考文献	(180)

第四章 无杆泵采油	(182)
第一节 电潜泵举升技术	(182)
一、电潜泵采油装置及其工作原理	(182)
二、电潜泵油井生产系统设计	(187)
第二节 水力活塞泵采油	(193)
一、水力活塞泵采油系统及装置	(193)
二、水力活塞泵井下机组	(198)
三、水力活塞泵油井生产系统设计	(202)
第三节 水力射流泵采油	(207)
一、水力射流泵采油系统	(207)
二、水力射流泵的工作特性	(208)
三、水力射流泵油井生产系统设计步骤	(211)
参考文献	(212)
第五章 注水	(213)
第一节 水源、水质及注水系统	(213)
一、水源及水质要求	(213)
二、注入水处理技术	(215)
三、注水地面系统	(220)
四、注水井投注程序	(221)
第二节 注水井吸水能力分析	(222)
一、注水井吸水能力	(222)
二、影响吸水能力的因素	(223)
三、改善吸水能力的措施	(225)
第三节 分层注水技术	(229)
一、分层吸水能力及测试方法	(229)
二、分层注水管柱	(235)
第四节 注水指示曲线的分析和应用	(236)
一、指示曲线的几种形状	(237)
二、用指示曲线分析油层吸水能力的变化	(238)
三、井下配水工具工作状况的判断	(239)
四、配注准确程度和分配层段注水量检查	(240)
五、嘴损曲线与配水嘴的选择	(242)

第五节 注水井调剖	(245)
一、调剖方法	(245)
二、示踪剂检测	(248)
参考文献	(250)
第六章 水力压裂技术	(251)
第一节 造缝机理	(251)
一、油井应力状况	(252)
二、造缝条件	(255)
第二节 压裂液	(257)
一、压裂液类型	(258)
二、压裂液的滤失性	(259)
三、压裂液的流变性	(263)
第三节 支撑剂	(268)
一、支撑剂的性能要求	(268)
二、支撑剂的类型	(269)
三、支撑剂在裂缝内的分布	(271)
四、支撑剂的选择	(278)
第四节 压裂设计	(280)
一、影响压裂井增产幅度的因素	(280)
二、裂缝几何参数计算模型	(282)
三、压裂效果预测	(287)
四、裂缝参数设计方法	(290)
参考文献	(293)
第七章 酸处理技术	(294)
第一节 碳酸盐岩地层的盐酸处理	(294)
一、盐酸与碳酸盐岩的化学反应	(294)
二、影响酸岩反应速度的因素	(296)
第二节 酸化压裂技术	(300)
一、酸液的滤失	(300)
二、酸液的损耗	(302)
三、酸岩复相反应有效作用距离	(303)
四、前置液酸压设计方法	(311)

第三节 砂岩油气层的土酸处理	(316)
一、砂岩地层土酸处理原理	(316)
二、土酸处理设计	(318)
第四节 酸液及添加剂	(322)
一、常用酸液种类及性能	(322)
二、酸液添加剂	(327)
第五节 酸处理工艺	(329)
一、酸处理井层的选择	(329)
二、酸处理方式	(330)
三、酸处理井的排液	(330)
参考文献	(332)
第八章 复杂条件下的开采技术	(333)
第一节 防砂与清砂	(333)
一、油层出砂原因	(333)
二、防砂方法	(336)
三、清砂方法	(346)
第二节 防蜡与清蜡	(348)
一、油井防蜡机理	(349)
二、油井防蜡方法	(351)
三、油井清蜡方法	(353)
第三节 油井堵水	(354)
一、油井出水原因及找水技术	(354)
二、油井封堵水技术	(360)
第四节 稠油及高凝油开采技术	(366)
一、稠油及高凝油开采特征	(366)
二、热处理油层采油技术	(368)
三、井筒降粘技术	(374)
第五节 井底处理新技术简介	(381)
一、高能气体压裂技术	(382)
二、水力解堵技术	(385)
三、电脉冲井底处理技术	(387)
四、超声波井底处理技术	(388)
五、微生物采油技术	(389)

六、人工地震处理油层技术	(390)
参考文献	(391)
第九章 完井方案设计与试油	(392)
第一节 完井方式	(393)
一、井身结构	(394)
二、完井方式	(396)
三、完井方式选择	(402)
四、水平井完井技术	(407)
第二节 射孔方案设计	(412)
一、射孔参数设计	(412)
二、射孔工艺设计	(415)
第三节 油气层保护	(420)
一、油气层损害	(420)
二、储层敏感性	(422)
第四节 试油	(429)
一、试油的任务及工作内容	(429)
二、诱导油流方法	(430)
三、试油工艺	(434)
四、试油资料	(436)
参考文献	(436)
第十章 采油工程方案设计概要	(437)
第一节 概述	(437)
一、编制采油工程方案的目的和意义	(437)
二、采油工程方案在油田开发总体建设方案中的地位	(437)
三、采油工程方案编制原则及要求	(439)
四、采油工程方案编制的前期准备	(439)
五、采油工程方案的基本构成	(439)
第二节 采油工程方案的基本内容	(441)
一、方案设计的油藏地质基础与油藏工程基础	(441)
二、开发全过程的系统保护油层要求与措施	(441)
三、完井工程要求及投产措施	(442)
四、注水工艺设计	(443)

五、举升方式优选及其工艺方案	(444)
六、采油工程配套工艺	(445)
七、油田动态监测	(446)
八、作业工作量预测及配套厂站和队伍建设	(446)
九、采油工程方案经济分析	(447)
第三节 采油方式综合评价与决策分析	(447)
一、采油方式决策的意义和论证的内容	(447)
二、采油方式综合评价与决策模式	(448)
三、油井生产系统及其动态模拟	(450)
四、采油方式综合评价因素及模型	(452)
五、决策分析步骤	(455)
第四节 低渗透油藏总体压裂设计方案编制简介	(459)
一、总体压裂优化设计概念	(459)
二、总体压裂优化设计的任务与原则	(459)
三、总体压裂设计	(460)
参考文献	(463)

绪 论

采油工程是油田开采过程中根据开发目标通过生产井和注入井对油藏采取的各项工程技术措施的总称。作为一门综合性应用学科,它所研究的是可经济有效地作用于油藏,以提高油井产量和原油采收率的各项工程技术措施的理论、工程设计方法及实施技术。

采油工程的任务是通过一系列可作用于油藏的工程技术措施,使油、气畅流入井,并高效率地将其举升到地面进行分离和计量;其目标是经济有效地提高油井产量和原油采收率。

从系统工程观点出发,采油工程是油田开采大系统中的一个处于中心地位的重要子系统,与油藏工程和矿场油气集输工程有着紧密的联系。

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藏,只有根据油藏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方案,才能获得良好的经济效益。要做到这一点,就必须在掌握各种工程技术措施的基本原理、计算与工程设计方法的基础上,进行综合对比分析。

我国当前和未来都将面对低渗、稠油等难开发油藏及特高含水期油藏,以及海上和沙漠油田的一系列开采问题。随着油田开采难度的增大,技术要求越来越高,必须运用现代科学技术改造传统开采工艺,以迎接 21 世纪的挑战。

解决采油过程中某一生产技术问题,有机械、化学和物理等各种不同的方法,这将涉及技术方法的选择,甚至是综合应用问题。

综上所述,采油工程的特点是:在整个开采过程中的地位十分重要;遇到的问题多、难度大、涉及面广;综合性和针对性强;各项工程技术措施间的相对独立性强。

针对上述特点,本书将着重讲述各项采油工程技术措施的基本原理和工程设计方法,并力图形成较为完整的采油工程体系。

本书共分 10 章:

第一章讲述油井流入动态与井筒多相流动计算,这是采油工程的基础内容,是油井生产设计与分析的基础。

第二、三、四章重点讲述自喷、气举、有杆泵及无杆泵采油理论计算及油井生

产系统的设计方法与工况分析。

第五章从注水工艺出发,着重介绍了注入水的水源、水质、注水系统、注水井分析以及分层注水与调剖技术。

第六、七两章讲述油井增产措施,重点介绍压裂和酸化的原理、理论计算、工程设计方法与工艺。

第八章讲述复杂条件下的油藏开采技术,除了介绍解决生产中常遇到的砂、蜡、水问题的技术外,还对稠油、高凝油的开采技术以及各种物理法处理近井地带技术和微生物在采油中的应用技术做了简要介绍。

第九章着重从采油工程角度介绍完井方式选择、方案设计、油层保护与试油技术。

第十章为采油工程方案设计概要,除了概括阐述采油工程方案设计原则、依据、内容和方法外,还就“采油方式综合评价”及“低渗透油藏总体压裂设计方案”分别做了简要介绍。本章的目的除了阐述采油工程方案编制自身所需要研究解决的问题外,还试图将以前各章讲述的某些单项工程技术措施和单井的工程设计方法,扩大到面对整个油藏或开发区块以及开发全过程的采油工程设计,使采油工程设计理论和方法更为完整和系统化;同时,进一步使读者从总体上加深对采油工程的认识。

第一章 油井流入动态与井筒多相流动计算

油气从油藏流入井底和在井筒中的流动是油气开采的两个基本流动过程。油井流入动态和井筒多相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的理论基础；同时，采油工程中的各项工程技术措施也都将涉及到这两个基本流动过程。尽管它们在生产过程中是两个相互衔接的流动过程，但它们在本质上有着不同的流动规律。为此，本章将分别介绍其基本规律及计算方法。至于两者在生产过程中的协调问题，将在油井举升的有关章节中具体讨论。

第一节 油井流入动态(IPR 曲线)

石油开采的第一个流动过程是油气从油层流向井底。它遵循渗流规律。采油过程中，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 曲线表示了油层的工作特性。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。典型的油井流入动态曲线如图 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。即使在同一驱动方式下， $p_{wf}-q$ 关系的具体数值还将取决于油藏压力、油层厚度、渗透率、流体物理性质及完井状况等。有关不同驱动方式下 $p_{wf}-q$ 关系与油藏物性参数及完井状况之间的定量关系已在渗流力学中做过详细的讨论。这里，我们仅从研究油井生产动态的角度来讨论不同条件

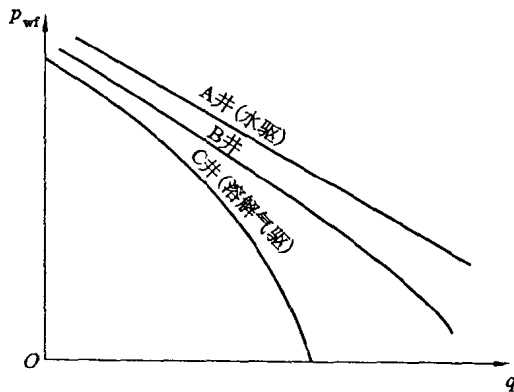


图 1-1 典型的油井流入动态曲线

下的油井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单层油藏中心一口井的产量公式为:

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

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, m^3/m^3 ;

h ——油层有效厚度, m ;

μ_o ——地层油的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\bar{p}_r$ ——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,可由压力恢复曲线求得;

a ——采用不同单位制的换算系数。采用流体力学达西单位及法定(SI)单位时 $a=1$;采用法定实用单位,即 $q(\text{m}^3/\text{d})$, $k(\mu\text{m}^2)$, $\mu(\text{mPa} \cdot \text{s})$, $h(\text{m})$, $p(\text{MPa})$ 时 $a=86.4$;若压力的实用单位中用 kPa ,则 $a=0.0864$ 。

对于圆形封闭油藏,即泄油边缘上没有液体流过,拟稳态条件下的产量公式为:

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

对于非圆形封闭泄油面积油井在拟稳态条件下的产量公式,可根据泄油面积和油井位置进行校正。其方法是令公式中的 $\frac{r_e}{r_w} = X$,根据泄油面积形状和井的位置可确定相应的 X 值(见图 1-2)。

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,油井产量公式可写成:

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

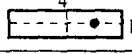
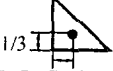
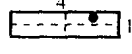
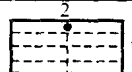
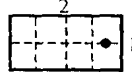
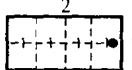
形状与位置	X	形状与位置	X
	$\frac{r_c}{r_w}$		$\frac{0.966 A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.571 A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.44 A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.565 A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{2.206 A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.604 A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{1.925 A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.61 A^{1/2}}{r_w}$		$\frac{6.59 A^{1/2}}{r_w}$
	$\frac{0.678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

图 1-2 泄油面积形状与油井的位置系数

式中 J ——采油指数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$, 表达式为:

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

在一些文献中,把式(1-3)称为油井流动方程。由式(1-3)可得:

$$J = \frac{q_o}{p_i - p_{wi}} \quad (1-5)$$

采油指数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