



石油工程基础知识手册丛书—2

# 采油工程 基础知识手册

主编/曲占庆

CAIYOU GONGCHENG  
JICHU ZHISHI SHOUCHE

CAIYOU GONGCHENG  
JICHU ZHISHI SHOUCHE

石油工业出版社

石油工程基础知识手册丛书

# 采油工程基础知识手册

曲占庆 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从采油工程技术基础入手,系统而广泛地介绍了该领域内的有关基本知识和基本理论。适用于从事采油工程的现场人员及非采油工程专业人员了解、掌握采油工程学科领域的基本概念、基本理论和基本方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

采油工程基础知识手册/曲占庆主编.  
北京:石油工业出版社,2002.8  
(石油工程基础知识手册丛书)  
ISBN 7-5021-3761-0

I.采…  
II.曲…  
III.石油开采-基本知识  
IV.TE35

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第027770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排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 12印张 300千字印1—2500  
2002年8月北京第1版 2002年8月北京第1次印刷  
ISBN 7-5021-3761-0/TE·2746  
定价:35.00元

# 《石油工程基础知识手册丛书》

## 编辑委员会

主任：刘宝和

副主任：刘振武 阎存章 魏宜清 吴奇

成员：

冉新权 张卫国 李海平 张琪

李章亚 宋治 杨能宇 孙明光

翟应虎 刘振宇 曲占庆 王文起

## 序

石油工程是一个系统工程，它由很多相关专业组成，各学科互相渗透、互相交叉。广大石油工作者需要掌握的知识范围越来越广，在掌握好本专业知识的同时还得熟悉相关专业的基础知识，而本专业的基础知识又散布在大量的专业书籍中，这样就非常希望有一套分专业集中的基础知识丛书，作为工具书以备查用。

石油工业出版社组织编写出版的《石油工程基础知识手册》丛书，共分5个分册，分类总结了石油工程几个方面的基础知识，这项工作很重要。本套丛书包括石油工程的几个骨干专业的常用基础知识，5个分册分别为：《油藏工程基础知识手册》、《采油工程基础知识手册》、《钻井、完井工程基础知识手册》、《油管、套管数据手册》、《钻杆、钻具、法兰数据手册》。本套丛书的出版将使广大石油工作者在日常工作中省去了繁琐的资料查找工作，从而使他们有更多的时间和精力去搞好本职工作。

我相信本书将成为从事石油工程相关专业的技术人员、管理人员案头的工具书，成为大家工作中的好帮手。

中国石油天然气股份公司副总裁

## 前 言

采油工程在油气勘探开发过程中起着十分重要的作用。在整个油气勘探开发的过程中采油工程既要石油地质的研究成果为依据，也要为解决石油地质的某些问题发挥积极的作用，以期通过采油工程来了解和认识油藏地质的某些现象，进而达到科学、合理、有效地开发油气资源。在油气田勘探过程中要判断某油田、某些区块的开发可行性和工业标准等，则需要采取采油工程的某些技术如酸化技术、压裂技术等来逐步认识油气藏，从而达到上述目的。在油气田开发过程中，我们要通过采油工程技术了解油气藏的某些自然规律，如油气井的产能、注水井的吸水能力、油层中裂缝的分布和地应力场等来制定油气田的开发方案和油气井的工作制度；同时对油藏工程中的许多目标和工作都要以采油工程为手段来加以实施才能获得预期的结果，另外还要与地面建设工程结合，保证油田的正常开采。通过采油工程衔接钻井工程、油藏工程和地面建设工程来制定和优化整体油田开发方案。从这个意义上说，采油工程技术既是认识油气藏的重要手段，更是全面开发油气田不可缺少的措施和手法。

从目前学科建设和技术发展的现状看，采油工程是研究解决在油田开发过程中遇到的各种生产技术问题、及应采取的各项工程技术措施的原理、工程设计理论和方法的一门技术学科。从生产角度讲，采油工程是在油井完钻后，为将地下原油采出地面，对油井和注入井所采取的各项工程技术措施的总称。采油工程的内容包括：(1) 原油流入井中，将流入井底的原油举升至地面；(2) 研究油井、注入井的生产规律，确定采油方法，控制井的工作方式，维护油井、注入井正常生产及解除生产故障等；(3) 恢复和增加油井产量和注入井注入量的增产、增注工艺措施；(4) 为保持地层压力及提高油层采收率而进行的专门工艺技术措施；(5) 制订开发方案和掌握地下油、气、水运动规律，在井场进行专门测试和试验研究；(6) 对各井产物的收集和分离计量等。整体上讲，采油工程的目的是从石油勘探整体出发，以增加地质储量或可采储量为目的，把井筒技术、油层保护和油层改造紧密结合，提高油井产量和注水井的注入量，达到科学合理地开发油田，提高原油采收率。

采油工程技术是一门综合性的很强的学科，它涉及到的学科和技术非常广泛，如地质学、固体力学、岩石力学、流体力学、材料力学、热力学、生物（微生物）学、数学、油田化学、运筹学和最优化理论、技术经济学、核能技术、计算机技术、节能技术和环境保护等多学科。同其它应用技术一样，均受到各学科和技术发展的影响，所以基础学科的发展必将推动采油工程技术的进步。

下面简单列举几项学科技术在采油工程技术中的应用：

(1) 从固体力学和岩石力学的应用看，它大致涉及如下内容：① 储层岩石力学特征及测定方法，如应力、应变、抗张强度、抗压强度、断裂因子、泊松比等；② 天然裂缝的分布规律和预测方法；③ 油层地应力的分布及随油田开发过程的变化规律；④ 储层人工破裂机理、裂缝的几何形态、裂缝的延伸规律及影响因素等；⑤ 储层的伤害和保护，如机械、物理、化学伤害及解除方法、预防措施和机理的研究；⑥ 砂岩储层出砂机理的研究及预防方法。

(2) 从油田化学的应用看，它大致涉及如下内容：① 各种化学剂对储层的作用机理及油层流体的配伍，如解堵、堵水、防砂、调剖；② 化学剂对裂缝性油藏储层及大孔道的堵塞规

律和流动机理；③化学剂的作用机理、对地层的伤害和预防方法。

(3) 从热力学的应用来看，它大致涉及如下内容：①不同类型油藏储层的热力学特性参数的测定；②热采井的热力学特征及化学特性；③火烧油层的燃烧动力学研究；④井筒中温度场分布及变化特征。

(4) 从材料力学的应用看，它大致涉及如下内容：①不同井深条件下的油管柱受力状况分析；②不同温度和压力效应对油管柱伸长、缩短、弯曲等变形的影响；③不同举升方式下油管柱的受力状况及对举升动力和生产能力的影响；④不同类型的油井在不同参数下、不同类型管柱的合理设计；⑤动、静态应力状况与完井参数对套管变形的影响。

(5) 从流体力学的应用来看，它大致涉及如下内容：①不同油藏、不同油井类型如直井、斜井、丛式井、水平井、定向井的渗流特征及机理；②不同类型的举升方式，如垂直管、斜管、水平管的流体动力学、流速、流态、摩阻、压降等；③各种性质的流体在不同管流中的流变规律；④不同性质的流体在近井地带多孔介质中的流动规律和变化特征；⑤不同的举升方式，如有杆抽油、气举、电泵、螺杆泵、射流泵等的举升作用特征和机理，流体的运动规律和各种举升方式下的诊断。

在人类进入 21 世纪信息化时代的今天，采油工程技术也得到了空前的发展，由于各学科和各项技术的进步，为采油工程技术进入多学科综合发展奠定了基础，采油工程技术将更加适用多种类型的油藏和储层，更加讲求科学、合理、经济、高效地开发和利用油气资源。从世界石油科技的发展趋势结合我国石油工业的具体情况，下面列举了几项有代表性和发展方向的技术：

(1) 水平井、多分支井和复杂结构井将获得更大的发展和应用。

①水平井对老油田进行挖潜和增储；

②对老油田的老井进行侧钻，恢复停产井，使之重新投入生产，提高低产、低效井的产量，使采收率进一步得到提高；

③对已加密补钻直井以后的老油田用水平井、多分支井可以再次提高油田的产量；

④用复合结构井提高采收率和开采稠油。目前已发展形成叠式多分支井、对称双分支井、侧钻多分支井、丛式多分支井、多泄油面积多分支井和三维井等多种形式的复杂结构井；

⑤利用水平井开发裂缝油藏，提高油井产量和采收率；

⑥利用水平井开发底水油藏，从而提高油井的单井产量，减缓底水的上升速度；

⑦利用水平井开发稠油油藏；

⑧水平井蒸汽辅助重力泄油 (SAGE) 在加拿大 UTF 矿区试验取得成功后，已先后有多家公司进入油田试验，我国辽河曙光杜家台油田也进行了试验并获得成功；

⑨稠油单井 (SAGD) 技术已获工业应用。

(2) 改进性采油 (IOR) 的新技术有待大力研究、发展和应用。

①聚合物弱凝胶调驱技术。

②非烃类混相驱、蒸汽驱、聚合物驱、复合驱和微生物采油、地震采油等技术。

③深度调剖技术。

④正韵律厚油层水平井开采提高采收率技术。

(3) 研究发展无伤害压裂新技术、采用整体压裂技术和压裂防砂一体化技术、优化重复防砂技术、开展压裂酸化数值模拟、压裂诊断技术。

(4) 低渗透油藏开采的配套技术。

从高效益、低成本出发，创出一套经济可行的低渗透、低产油田的开采的配套技术；探索提高注气提高采收率的问题；对低渗透油藏，从布井开始整体考虑压裂、酸化、完井、注水或注气开发，提出整体方案和监测系统，提高开发效果和采收率。

(5) 深井和超深井的采油工程技术。

- ①深井、超深井完井管柱和配套工具。
- ②连续油管作业技术。
- ③超深井人工举升设备工具和配套技术。
- ④超深井压裂酸化技术和设备。

(6) 发展并应用稠油开发新技术。

- ①水平井蒸汽辅助重力泄油技术 (SAGD)。
- ②注气体溶剂萃取 (VAPEX) 稠油冷采技术。
- ③稠油出砂冷采技术。
- ④重力辅助火烧油层技术。
- ⑤水驱油藏后期蒸汽驱开采。

在本书的编写过程中，本着加强基础、理论联系实际的原则，从基础入手，系统而广泛地介绍采油工程技术领域内的有关基本知识和基本理论。全书共分十一章：第一章介绍采油工程中的一些基本概念；第二章介绍了与注水井相关的一些内容；第三章到第五章重点对采油工程技术中主要的开采方式并对有关设备工具进行了介绍；第六章对油井几项重要的增产措施技术进行了集中讨论；第七章讨论了油井出砂问题；第八章简单介绍了油井堵水和注水井调剖的一些基本概念和目前常用的几种方法；第九章重点介绍了油井的清、防蜡问题，同时对防腐和防垢也做了介绍；第十章重点对采油工程技术经济中的基本概念和分析方法进行了讨论；第十一章对提高原油采收率的有关基本知识进行了介绍。本书作为一本采油工程的基础参考书，主要是帮助从事采油工程的现场人员及非采油工程专业的人员了解、掌握采油工程学科领域的基本概念、基本理论和基本方法，也可供从事采油工程技术人员参考。

本书由石油大学石油工程学院曲占庆主持编写，具体分工如下：

曲占庆编写第一章第三节、第四节、第五节，第二章，第四章，第六章第一节、第二节、第三节；吴宁编写第一章第一节、第二节；赵东伟编写第三章；孙仁远编写第六章第四节、第五节、第六节，第九章；薄启炜编写第五章；董长银编写第七章；周洪涛、林博编写第八章；张红玲编写第十章；黎洪、郭宗诚编写第十一章。

在编写过程中得到了张琪教授的指导和大力支持，张琪教授审阅了初稿并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。由于编者水平有限、经验不足，错误和不妥之处在所难免，热忱希望广大读者提出宝贵意见。

编者  
2001年8月



# 目 录

<b>1 采油工程基本概念</b> .....	1
1.1 油井流入动态 .....	1
1.2 井筒气液两相流基本概念 .....	5
1.3 油藏流体物性 .....	13
1.4 油井生产系统的节点分析 .....	22
1.5 油层保护 .....	25
<b>2 注水</b> .....	33
2.1 水源、水质及水处理 .....	33
2.2 注水井吸水能力分析 .....	36
2.3 分层注水 .....	37
2.4 注水指示曲线的分析和应用 .....	38
<b>3 自喷与气举</b> .....	42
3.1 自喷 .....	42
3.2 气举采油 .....	44
<b>4 有杆泵采油</b> .....	47
4.1 游梁式抽油机采油 .....	47
4.2 链条式抽油机采油 .....	62
4.3 螺杆泵采油 .....	66
4.4 新型抽油机采油 .....	72
<b>5 无杆泵采油</b> .....	77
5.1 电潜泵采油 .....	77
5.2 水力活塞泵采油 .....	81
5.3 射流泵采油 .....	85
<b>6 油井增产措施</b> .....	89
6.1 岩石力学基本知识 .....	89
6.2 水力压裂 .....	92
6.3 酸化 .....	105
6.4 水力振荡解堵技术 .....	114
6.5 超声波解堵技术 .....	116
6.6 电脉冲波解堵技术 .....	120
<b>7 油井防砂</b> .....	123
7.1 油层出砂原因 .....	123
7.2 出砂预测方法 .....	125
7.3 防砂工艺技术 .....	126
<b>8 堵水</b> .....	143

8.1 堵水的概念 .....	143
8.2 堵水方法 .....	143
8.3 调剖堵水决策技术 .....	146
8.4 边水和底水的堵水方法 .....	147
8.5 调剖堵水的潜水、限度与发展趋势 .....	148
<b>9 防蜡、防腐和防垢 .....</b>	<b>149</b>
9.1 防蜡 .....	149
9.2 防腐 .....	154
9.3 防垢 .....	158
<b>10 经济评价.....</b>	<b>163</b>
10.1 采油工程技术经济分析的经济要素.....	163
10.2 采油工程技术经济评价方法.....	166
10.3 不确定性分析.....	169
<b>11 提高原油采收率.....</b>	<b>171</b>
11.1 提高原油采收率的基本概念.....	171
11.2 提高原油采收率机理.....	171
11.3 影响原油采收率的因素.....	173
11.4 提高原油采收率的方法.....	174
<b>参考文献.....</b>	<b>178</b>

# 1 采油工程基本概念

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。其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油藏的采收率；其特点是涉及面广，各项技术措施间具有相对独立性。

## 1.1 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，它反映了油藏向该油井供液的能力。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）。IPR 曲线表示了油层工作特性，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。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、渗透率及流体物性等。

### 1.1.1 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：

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

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：

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

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；

$h$ ——油层有效厚度， $m$ ；

$\mu_o$ ——地层油的粘度， $Pa \cdot s$ ；

$p_e$ ——边缘压力， $Pa$ ；

$\bar{p}_r$ ——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，与完井方式、井底污染或增产措施等有关；

$a$ ——采用不同单位制的换算系数。

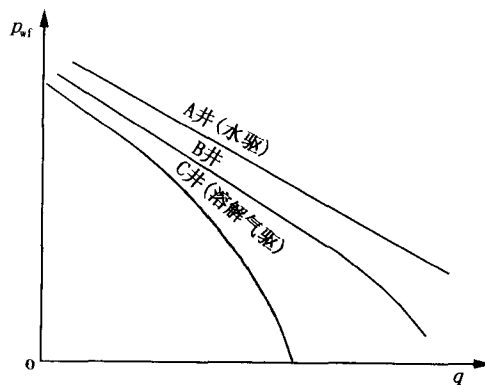


图 1-1 典型的油井流入动态曲线

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  $q$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ ),  $K$  ( $\mu\text{m}^2$ ),  $h$  (m),  $\mu$  ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ),  $p$  (MPa) 时  $a = 86.4$ ; 若实用单位中  $p$  用 kPa 时, 则  $a = 0.0864$ 。非圆形封闭泄油面积的油井, 可根据泄油面积和油井位置校正。

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, 产量公式可写成:

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

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

$J$  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。其数值等于油井在单位生产压差下的日产油量, 它反映了油井的生产能力。一般是用系统试井资料来求得采油指数。单相流动时的 IPR 曲线为直线, 其斜率的负倒数是采油指数; 在纵坐标上的截距为油层静压。产液指数是指单位生产压差下的日产液量。

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:

$$\bar{p}_r - p_{wf} = Cq + Dq^2 \quad (1-5)$$

$$C = \frac{\mu_o B_o \left( \ln X - \frac{3}{4} + S \right)}{2\pi K h a}$$

$$D = 1.3396 \times 10^{-13} \frac{\beta B_o^2 \rho}{4\pi^2 h^2 r_w}$$

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),  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$K$ ——有效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;

$h$ ——油层有效厚度, m;

$\mu_o$ ——地层油粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;

$B_o$ ——原油体积系数;

$r_w$ ——井眼半径, m;

$X$ ——校正系数;

$\rho$ ——原油密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$D$ ——紊流系数,  $(\text{kPa}\cdot\text{d}^2) / \text{m}^6$ ;

$\beta$ ——紊流速度系数,  $1/\text{m}_o$ 。

胶结地层的紊流速度系数为:

$$\beta = \frac{1.960 \times 10^7}{K^{1.201}} \quad (1-6)$$

非胶结砾石充填层的紊流系数  $\beta_g$  为:

$$\beta_g = \frac{1.08 \times 10^6}{K^{0.55}} \quad (1-7)$$

式中  $K$ ——渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

### 1.1.2 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，见图 1-2。

#### 1.1.2.1 垂直井油气两相渗流时的流入动态

在油井动态分析和预测中通常结合生产测试资料来绘制 IPR 曲线。

(1) Vogel 方法：

Vogel 方法假设：圆形封闭油藏，油井位于中心；均质油层，含水饱和度恒定；忽略重力影响；忽略岩石和水的压缩性；油、气组成及平衡不变；油、气两相的压力相同；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。

Vogel 方程：

$$\frac{q_o}{q_{o\max}} = 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{p_r} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \quad (1-8)$$

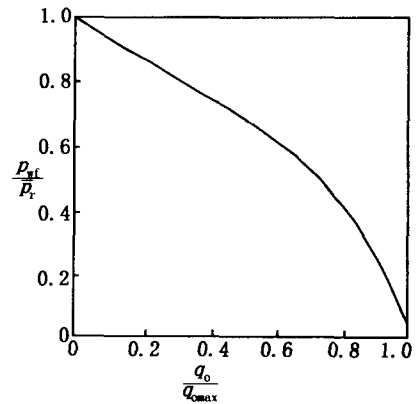


图 1-2 溶解气驱油藏无因次 IPR 曲线

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。

(2) 不完善井 Vogel 方程的修正：

Vogel 在建立无量纲流入动态曲线和方程时，认为油井是理想的完善井。

实际油井的完善性可用流动效率  $E_f$  来表示。所谓油井的流动效率是指该井的理想生产压差与实际生产压差之比。

$$E_f = \frac{\bar{p}_r - p'_{wf}}{\bar{p}_r - p_{wf}} = \frac{\bar{p}_r - p_{wf} - \Delta p_{sk}}{\bar{p}_r - p_{wf}}$$

式中  $\bar{p}_r$ ——平均油藏压力；

$p'_{wf}$ ——理想完善井的流压；

$p_{wf}$ ——同一产量下实际非完善井的流压；

$\Delta p_{sk}$ ——非完善井表皮附加压力降 ( $\Delta p_{sk} = p'_{wf} - p_{wf}$ )。

$\Delta p_{sk}$  为“正”称正表皮，油井不完善； $\Delta p_{sk}$  为“负”称负表皮，油井超完善。

#### 1.1.2.2 斜井和水平井的 IPR 曲线

由于斜井和水平井的流入动态与垂直井不同，所以不能把 Vogel 方程不加验证地直接用于斜井和水平井。有关斜井和水平井的流入动态可查阅有关文献。

#### 1.1.3 $\bar{p}_r > p_b > p_{wf}$ 时的流入动态

当油藏压力  $\bar{p}_r$  高于饱和压力  $p_b$ ，而流动压力  $p_{wf}$  低于饱和压力时，油藏中将同时存在单相和两相流动。

在  $p_{wf} > p_b$  时，由于油藏中全部为单相液体流动，采油指数  $J$  为常数，IPR 曲线为直线。此时的流入动态可用下式表示：

$$q_o = J(\bar{p}_r - p_{wf}) \quad (1-9)$$

流压等于饱和压力时的产量  $q_b$  为：

$$q_b = J(\bar{p}_r - p_b) \quad (1-10)$$

当  $p_{wf} < p_b$  后, 油藏中出现两相流动, IPR 曲线将由直线变成曲线。如果用  $p_b$  及  $q_c$  代替 Vogel 方程中的  $\bar{p}_r$  及  $q_{max}$ , 则可用 Vogel 方程来描述  $p_{wf} < p_b$  时的流入动态。由此可得:

$$q_o = q_b + q_c \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{p_b} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right] \quad p_{wf} < p_b \quad (1-11)$$

$$q_c = \frac{q_b}{1.8 \left( \frac{\bar{p}_r}{p_b} - 1 \right)}$$

#### 1.1.4 油气水三相 IPR 曲线

Petrobras 提出了一种计算三相流动 IPR 曲线的方法。如图 1-3 所示, 曲线 A 为  $f_w = 0$  时油层的 IPR 曲线, 称油 IPR 曲线; 曲线 B 为  $f_w = 100\%$  时的 IPR 曲线, 称水 IPR 曲线; 曲线 C 为某一含水率时的 IPR 曲线, 称为油气水三相综合 IPR 曲线。

Petrobras 方法计算综合 IPR 曲线的实质是按含水率取纯油 IPR 曲线和水 IPR 曲线的加权平均值。当已知测试点计算采液指数时, 是按产量加权平均; 当预测产量或流压时是按流压加权平均。

##### 1.1.4.1 采液指数计算

已知一个测试点:  $p_{wf(test)}$ 、 $q_{t(test)}$  和饱和压力  $p_b$  及油藏压力  $\bar{p}_r$ 。

$$(1) \quad p_{wf(test)} \geq p_b, \quad \text{则} \quad J_1 = \frac{q_{t(test)}}{\bar{p}_r - p_{wf(test)}}$$

$$(2) \quad p_{wf(test)} < p_b$$

$$J_1 = \frac{q_{t(test)}}{(1 - f_w) \left( \bar{p}_r - p_b + \frac{p_b}{1.8} A \right) + f_w (\bar{p}_r - p_{wf(test)})} \quad (1-12)$$

$$A = 1 - 0.2 \left( \frac{p_{wf(test)}}{p_b} \right) - 0.8 \left( \frac{p_{wf(test)}}{p_b} \right)^2$$

式中  $q_{t(test)}$ ——对应流压  $p_{wf(test)}$  时总产液量;

$f_w$ ——含水率, 小数;

$q_{omax}$ ——纯油 IPR 曲线的最大产油量。

##### 1.1.4.2 某一产量下的流压计算

(1)  $0 < q_t < q_b$  时,

$$p_{wf} = \bar{p}_r - \frac{q_t}{J_1} \quad (1-13)$$

(2)  $q_b < q_t < q_{omax}$ , 则按流压加权平均进行推导:

$$p_{wf} = (1 - f_w) p_{wf(oil)} + f_w p_{wf(water)} \quad (1-14)$$

式中  $p_{wf(oil)}$ ——对应产量  $q_t$  时纯油 IPR 曲线上的流压;

$p_{wf(water)}$ ——对应产量  $q_t$  时水 IPR 曲线上的流压。

用组合 IPR 曲线计算:

$$p_{wf(oil)} = 0.125 p_b \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{q_t - q_b}{q_{o\max} - q_b} \right)} \right] \quad (1-15)$$

用恒定的生产指数公式计算  $p_{wf(water)}$  :

$$p_{wf(water)} = \bar{p}_r - \frac{q_t}{J_1}$$

于是:

$$p_{wf} = f_w \left( \bar{p}_r - \frac{q_t}{J_1} \right) + 0.125 (1 - f_w) p_b \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{q_t - q_b}{q_{o\max} - q_b} \right)} \right] \quad (1-16)$$

(3) 若  $q_{o\max} < q_t < q_{t\max}$  时,

$$p_{wf} = f_w \left( \bar{p}_r - \frac{q_{o\max}}{J_1} \right) + \frac{(q_t - q_{o\max})(8f_w - 9)}{J_1} \quad (1-17)$$

### 1.1.5 多层油藏油井流入动态

对于多层油藏, 随着流压的降低, 由于参加工作的小层数增多, 产量将大幅度增加, 采油指数也随之而增大。油井的 IPR 曲线是分层 IPR 曲线的叠加。

对于多层见水、而水淹程度又差异较大的复杂情况, 虽然也可以用上述方法绘制油、水和综合 IPR 曲线及其含水变化曲线, 但它所说明的主要是全井综合情况, 或者只能定性说明出油层及出水层的情况。要确切掌握分层的流入动态, 必须进行分层测试。

## 1.2 井筒气液两相流基本概念

井筒多相流理论是研究各种举升方式油井生产规律的基础理论。为了掌握油井生产规律及合理地控制和调节油井工作制度, 必须熟悉气—液混合物在井筒中的流动规律。这里主要介绍多相垂直管流的基本概念, 以及在实际中应用较多的 Orkiszewski 方法。

### 1.2.1 井筒气液两相流动的特性

#### 1.2.1.1 与单相液流的比较

当油井的井口压力高于原油饱和压力时, 井筒内的流体是单相液体, 其流动规律与水力学中单相液体的流动规律完全相同。

原油从油层流到井底后具有的压力称为井底流压简称流压, 它既是油藏流体流到井底后的剩余压力, 同时又是沿井筒向上流动的动力。如果流压足够高, 在平衡了相当于井深的静液柱压力和克服流动阻力之后, 在井口尚有一定的剩余压力, 则原油将通过油管 and 地面管线流到计量站。此时油管中的压力平衡等式应为:

$$p_{wf} = p_H + p_{fr} + p_{wf}$$

式中  $p_{wf}$ ——井底流动压力;  
 $p_H$ ——井内静液柱压力;  
 $p_{fr}$ ——摩擦阻力;  
 $p_{wf}$ ——井口油管压力。

单相管流能量消耗于克服重力及摩擦阻力。在单相水平管中没有克服液柱重力的能量消耗; 而在井筒中, 能量主要消耗在克服液柱重力上。

当自喷井的井底压力低于饱和压力时, 则整个油管内部都是气—液两相流动。当井底压力高于饱和压力而井口压力低于饱和压力时, 油流上升过程中其压力低于饱和压力后, 油中溶解的天然气开始从油中分离出来, 油管中便由单相液流变为气—液两相流动。液流中增加

了气相之后，其流动型态与单相垂直管流有很大差别，流动过程中的能量供给和消耗关系要复杂得多。油气液上升过程中，气体膨胀能是一个很重要的方面。一些溶解气驱油藏的自喷井，流压很低，主要是靠气体膨胀能来维持油井自喷。

在单相管流中，由于液体压缩性很小，各个断面的体积流量和流速相同。在多相管流中，沿井筒自下而上随着压力不断降低，气体不断从油中分出和膨胀，使混合物的体积流量和流速不断增大，而混合物密度则不断减小。多相垂直管流的压力损失除重力和摩擦阻力外，还有由于气流速度增加所引起的动能变化造成的损失。另外，在流动过程中，混合物密度和摩擦力沿程随气—液体积比、流速及混合物流动结构而变化。

### 1.2.1.2 气液混合物在垂直管中的流动结构——流动型态的变化

油气混合物的流动结构是指流动过程中油、气的分布状态，称为流动型态，简称流型。不同流动结构的混合物有各自的流动规律，因此，可按其流动结构把混合物的流动分为不同的流动类型（图 1-4）。如图 1-4 (a) 所示，在井筒中从低于饱和压力的深度起，溶解气开始从油中分离出来，这时，由于气量少，压力高，气体都以小气泡分散在液相中，气泡直径相对于油管直径要小很多，这种结构的混合物的流动称为泡流。由于油、气密度的差异和泡流的混合物平均流速小，因此，在混合物向上流动的同时，气泡上升速度大于液体流速，气泡将从油中超越而过，这种气体超越液体上升的现象称为滑脱。泡流的特点是：气体是分散相，液体是连续相；气体主要影响混合物密度，对摩擦阻力的影响不大；滑脱现象比较严重。

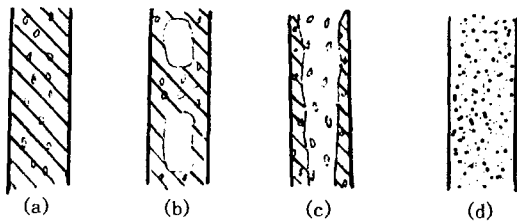


图 1-4 气体混合物的流动结构（流型）示意图  
(a) 泡流；(b) 段塞流；(c) 环流；(d) 雾流

当混合物继续向上流动，压力逐渐降低，气体不断膨胀，小气泡将合并成大气泡，直到能够占据整个油管断面时，在井筒内将形成一段油一段气的结构，如图 1-4 (b)，这种结构的混合物的流动称为段塞流。出现段塞后，气体的膨胀能得到较好的发挥和利用。这种气泡举升液体的作用象一个破漏的活塞。段塞向上运动的同时，沿管壁还有油相对于气泡向下流动。虽然如此，在油气段塞结构情况下，油、

气间的相对运动要比泡流小，滑脱也小。一般自喷井内，段塞流是主要的。随着混合物继续向上流动，压力不断下降，气相体积继续增大，气泡体积不断加大，逐渐由油管中间突破，形成油管中心是连续的气流而管壁为油环的流动结构，这种流动称为环流，如图 1-4 (c)。此时，气液两相都是连续相，气体举升主要依靠气液之间的摩擦作用。

在油气混合物继续上升过程中，如果压力下降使气体的体积流量增加到足够大时，油管中内流动的气流芯子将变得很粗，沿管壁流动的液环变得很薄，此时，绝大部分油都以小油滴分散在气流中，这种流动结构称为雾流，如图 1-4 (d)。雾流的特点是：气体是连续相，液体是分散相；气体以很高的速度携带液滴喷出井口；气、液之间的相对运动速度很小；气相是整个流动的控制因素。

油井中可能出现的流型自下而上依次为：纯油流、泡流、段塞流、环流和雾流（图 1-5）。图 1-5 只是为了说明油井生产时各种流型在井筒中的分布和变化情况的示意图。实际上，在同一口井内，不会出现如图 1-5 所示的完整的流型变化。

### 1.2.1.3 滑脱损失



在气—液两相管流中，由于气体和液体间的密度差而产生气体超越液体流动的现象称为滑脱。由于滑脱而产生的附加压力损失称为滑脱损失。通常，用有滑脱时混合物的密度  $\rho_m$  与只按气、液体积流量计算的混合物密度  $\rho'_m$  之差  $\Delta\rho_m$  来表示单位管长上的滑脱损失，即

$$\Delta\rho_m = \rho_m - \rho'_m$$

不考虑滑脱时，某一深度的混合物密度可由下式计算：

$$\rho'_m = \frac{Q_l\rho_l + Q_g\rho_g}{Q_l + Q_g} \quad (1-18a)$$

式中  $\rho'_m$ ——无滑脱时就地的混合物密度；

$Q_l$ ——液体的体积流量；

$Q_g$ ——就地气的体积流量；

$\rho_l$ 、 $\rho_g$ ——液、气的密度。

式 (1-18) 中的  $Q_l$ 、 $Q_g$  和  $\rho_l$ 、 $\rho_g$  及  $\rho_m$  均为该深度处的压力及温度下的相应值。

通过每个断面的液体和气体流量应分别等于各自的真实流速与过流断面 (图 1-6) 的乘积。

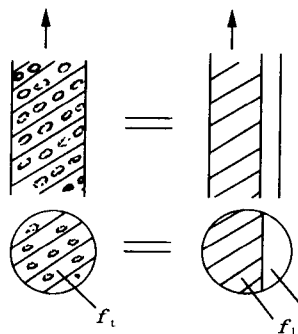


图 1-6 气液两相流流动断面简图

在无滑脱时， $v_l = v_g = v_m$

$$Q_g + Q_l = v_m f_t$$

式中  $v_l$ 、 $v_g$ 、 $v_m$ ——液相、气相和混合物的流速。

这样，式 (1-18a) 可写成

$$\rho'_m = \frac{f_l\rho_l + f_g\rho_g}{f_l + f_g} \quad (1-18b)$$

式中  $f_l$ ——液相所占的流动断面面积；

$f_g$ ——气相所占的流动断面面积；

$f_t$ ——流动断面的总面积。

为了便于比较和分析存在和不存在滑脱时的混合物密度，假定两种情况下液、气体积流量不变。由于有滑脱时，气体流速大，液体流速小，为了保持体积流量不变，气体过流断面将减小为  $f'_g$ ，而液体的过流断面将增加为  $f'_l$ 。考虑滑脱后相过流断面的变化：

$$\Delta f' = f'_l - f_l = -(f'_g - f_g)$$

存在滑脱时的混合物密度  $\rho_m$  可表示为：

$$\rho_m = \frac{f'_l\rho_l + f'_g\rho_g}{f_t} = \frac{(f_l + \Delta f)\rho_l + (f_g - \Delta f)\rho_g}{f_t} \approx \frac{(f_l + \Delta f)\rho_l}{f_t} \quad (1-19)$$

由式 (1-18b) 和 (1-19) 可得单位管长上滑脱损失为：

$$\Delta\rho_m = \frac{\Delta f}{f_t} \rho_l \quad (1-20)$$

在计算中不能直接应用简单的式 (1-19) 来计算滑脱，因为  $\Delta f$  是未知的，也是实验中难以测量的参数。通常是研究存在滑脱时不同流型下混合物密度  $\rho_m$  的确定方法；或者用

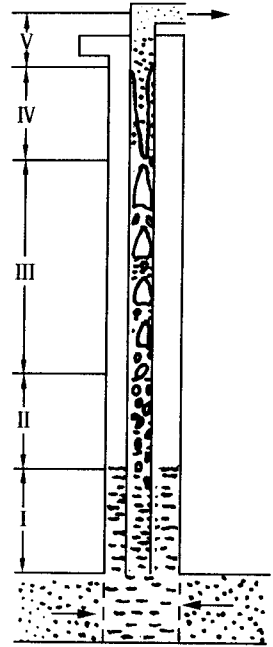


图 1-5 油气沿井筒喷出时的流型变化示意图