

油气田开发与开采的 研究方法

(美) B. C. 克纳夫特 M. F. 豪金斯

童宪章 张朝琛 张柏年 合译

石油工业出版社

油、气田开发与开采的 研究方法

〔美〕B. C. 克纳夫特 M. F. 豪金斯

童宪章 张朝琛 张柏年 合译

石油工业出版社

734

本书系统地介绍了美国近十年来在油、气田开发方面的理论研究成果以及这些成果在各种类型油、气田开发计算和动态分析中的具体应用。通过本书可简单扼要地了解美国最近的油、气田开发理论和研究方法。

本书可供油、气田开发开采工程技术人员、研究人员参考，也可供石油院校有关师生教学参考。

本书系由童宪章（第三章）、张朝琛（第四至七章）、张柏年（第一至二章）三位同志译出。原文书名直译应为“实用油藏工程”，根据书中内容，中译本的书名采用了“油、气田开发与开采的研究方法”。

B. C. Craft M. F. Hawkins
APPLIED
PETROLEUM RESERVOIR
ENGINEERING
Prentice-Hall, Inc.
Englewood Cliffs New Jersey—1959

油、气田开发与开采的研究方法

童宪章 张朝琛 张柏年 合译

（根据原中国工业出版社纸型重印）

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲36号）

通县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 16³/₁₆印张 425千字 印1—2000

1982年10月北京新1版 1982年10月北京第1次印刷

书号：15037·2183 定价：2.00元

序 言

二十年来,油(气)藏工程学已发展成为一个明确的、具有高度性的石油工程学的分科。目前所有油、气田开发的设备投资和人员配备均根据油藏工程研究所估计的油层情况决定。油(气)藏工程学还有一个比较重要的用途是,研究二次采油,从已废弃的或被认为基本枯竭的油田中再采出数量可观的石油。油(气)藏工程师和科学研究人员正在继续探索和改进油、气开采工艺的新技术以及使油(气)藏动态计算更加精确的新技术。

本书内容,主要是阐述油(气)藏工程数据如何应用于各种生产方式下油(气)藏储量的计算;可能采收率的计算;油(气)藏动态的分析和预测。鉴于天然气的开采日益重要,本书特列气藏专章,加以论述。同时,对于油(气)井的动态,也单独列出专章,阐述油(气)井和油(气)藏动态计算之间许多重要的相互关系。

本书中的计算公式均通过大量的示例和油(气)藏研究实例加以推导和解说,因而也就阐明了现代油(气)藏生产实践中接触到的各种类型的油(气)井和油(气)藏动态。至于各种计算、分析所根据的文献资料的来源、特色和精确程度,只是顺便稍作讨论。这些文献资料,包括地下地质调查、岩石学研究、地层流体物理特性研究、实验室岩心分析、专门仪器装置(如油、气藏分析仪和模型等)的创制等。为使读者理解实用油(气)藏工程学的原理及范围,本书每章后面还附有许多习题。

本书在引述油(气)藏工程学的各项原理时,都照顾到读者对于地质学、其他物理学科以及工程学某些分科可能具备的基础知识,因而能为读者所接受;但最终的阐述并没有离开现代油(气)工程学的实际水平。凡是应用油(气)藏工程学中重要的基础计

算，在阐述时，都力求能为读者奠定必要基础，以解决实际工程中可能遇到的某些特殊的和复杂的油(气)藏工程问题。

B. C. 克纳夫特

M. E. 豪金弗

目 录

序 言

第一章 气藏 1

1. 油藏工程簡史 1
2. 油藏 4
3. 符号和换算系数 5
4. 原子量和分子量 14
5. 磅分子 15
6. 理想气体定律 16
7. 气体的比重 18
8. 非理想气体或真实气体 19
9. 地层气体体积系数、密度和梯度 25
10. 用体积法计算地下原始儲气量 30
11. 定容气藏单元产量的计算 38
12. 水驱气藏单元产量的计算 39
13. 气藏中的物质平衡 43
14. 采出凝析液和水的的气体当量 50
15. 公式的极限和誤差 52
- 习 題 54
- 参考文献 65

第二章 凝析气藏 68

1. 引 言 68
2. 用两相图判断矿藏形态 71
3. 凝析气藏中原始儲气量和儲油量的计算 76
4. 定容反凝析气藏的动态 83
5. 反凝析气藏物质平衡方法的应用 92
6. 定容凝析气藏的预测生产史和实际生产史的比较 95
7. 凝析气藏中循环注气和水驱 100
- 习 題 106

参考文献	110
第三章 低飽和油藏	111
1. 引 言	111
2. 天然氣溶解度	113
3. 油層體積系數	115
4. 用體積法計算地下原油儲量并估算可采儲量	120
5. 定容低飽和油藏的物質平衡計算	126
6. 基里-斯尼德油田, 崖礁油藏	131
7. 美國羅得莎油田的格洛埃德-密特謝爾油層組的開發情況	137
8. 油藏流体在飽和壓力以上時的壓縮性	145
9. 地層水中的溶解氣, 體積系數和壓縮系數	148
10. 岩石的壓縮系數	151
11. 在飽和壓力以上的計算, 包括岩層和水的壓縮系數	155
習 題	159
参考文献	170
第四章 綜合驅動 (溶解氣驅、氣頂驅及水驅) 油藏	173
1. 氣頂驅和水驅油藏的特徵	173
2. 物質平衡方程式的普遍式	174
3. 物質平衡方程式的應用及其局限性	181
4. 水侵	184
5. 用最小二乘方法表述氣體體積系數	195
6. 接觸和微分脫氣	202
7. 選擇物質平衡計算所需的 PVT 數據	209
8. 輕質油油藏	217
9. Y 關係式	218
10. “岩井”油田的注水	220
11. 最大有效采油速度 (MER)	229
習 題	232
参考文献	237
第五章 油藏水侵	240
1. 引 言	240
2. 油藏水侵的水力相似模擬	241

3. 解传导方程得出的侵入水量	243
4. 不依賴物质平衡計算确定水侵量	261
5. 由物质平衡研究法求得水侵量后之水侵解析表达式	265
6. 同时計算地下原始儲油量及水侵量	272
7. 油藏动态电分析仪	278
8. 油藏水侵的矿场研究工作	284
9. 同一供水区内各油藏相互之間的压力干扰	293
习 題	300
参考文献	305
第六章 油层流体渗濾規律	306
1. 达西定律	306
2. 油层条件下水、天然气和油的粘度	312
3. 流体的类型——流体的压縮性	317
4. 地下渗流方式的分类	323
5. 不可压縮流体的綫性稳定渗濾	325
6. 气体的綫性稳定渗濾	326
7. 串組岩层的綫性渗濾	328
8. 平行（并联）岩組的綫性渗濾	329
9. 泊稷叶毛管渗濾定律	331
10. 裂縫渗濾	333
11. 不可压縮液体的径向稳定渗濾	334
12. 有限供油区内可压縮液体的稳定径向渗濾	337
13. 径向渗流方式中的平均压力及再調整時間	339
14. 产油指数	342
15. 在渗透性变化时之径向渗濾	346
16. 产率比及电模型	348
17. 用电模型和数学处理法求解的其他有关油井問題	352
18. 带状污阻和井的增产处理	357
19. 在稳定渗流状态下的压力恢复	361
20. 可压縮液体的不稳定径向渗濾	364
21. 井内不定态的压力恢复問題	374
22. 在稳定和不稳定状态下气体的径向渗濾	383
23. 气井中的压力恢复	390

24. 气藏布井、采收率和供气能力	391
习 题	399
参考文献	422
第七章 油、气的驱替机理	424
1. 相对渗透率	424
2. 貝克萊-列維尔特驱油机理	430
3. 有重力区分或无重力区分的气驱油	437
4. 溶解气驱油的采收率	447
5. 根据矿场资料求相对渗透率比值	463
6. 在油藏衰竭过程中产油指数的递减	465
7. 在多层油藏中用水驱油	467
8. 扫油效率(波及系数)	483
习 题	497
参考文献	508

第一章 气 藏

1. 油藏工程简史

原油、天然气和水，都是石油工程师所最关切的物质。这些物质，虽然有时呈固态或半固态（通常在低温、低压之下），如石蜡、气体水化物、冰或高凝固点原油等，但在地下或井内主要是流体状态（不是蒸汽或气相，就是液相），实际上常以液、气两相共存。在钻井、固井和压裂作业中即使要用固体物质，也都是配制成流体或悬浮液。油井和油层中的流体是液相还是气相，主要取决于温度和压力。流体在油层中的状态或相，通常随压力的大小而变，而温度实际上是个常数。在很多情况下，流体在地层中的状态（或相）与其被采到地面时的状态是完全不同的。所以，石油工程师最关切的问题是要确切地了解原油、天然气和水单独的或是共同的在静止状况下和在岩层和管道中流动时，以及温度与压力变化时的动态。

早在1928年，石油工程师们就已经认真地考虑过有关气体和能量的相互关系，同时认为需要更精确地了解有关油、气、水在井中和油藏中的物理状态。从早期采油方法的水平可以明显地看出，仅根据井口或地面数据进行计算常会导致错误的结果。斯科拉特和斯蒂文森〔1〕曾描述了第一次使用自动记录井底压力计和井下高压取样器的情况。值得注意的是，这篇文章所谈的井底资料，指的就是直接测定压力、温度、油气比和流体的物理化学性质。米里肯和赛德威尔〔2〕在谈到第一个精密压力计时更进一步强调准确测定井底压力的必要，他们指出，石油工程师在确定最有效的采油方法时，井底压力数据的作用极为重要。由于这种精密压力计的出现，工程师才能测出进行油层动态计算所必需的一个最重要基本数据，即油层压力。

油层物理学研究的是岩石性质以及岩石与静止和流动状态的

流体之间的关系。孔隙度、渗透率、流体饱和度及其分布，岩石和流体的导电率，孔隙结构和放射性等，是岩石的几个较重要的油层物理特性。法奇、路易斯和巴涅斯〔3〕在1933年，最早研究了油层物理学；1934年，烏索夫、包赛特、麦斯盖特和瑞得〔4〕在达西1856年发明的流体渗滤方程式的基础上，发展了测量油层岩样渗透率的方法。烏索夫和包赛特〔5〕对油、水和气、水在非胶结性砂层中共同流动的研究上有了重要的发展。这种研究，以后又及于胶结性砂层和其它岩石；到1940年，萊維瑞特和路易斯〔6〕又提出了油、气、水三相流动的研究报告。

首先，油藏工程学的先辈就认识到，在计算地下原始油、气体积以前，应该了解油层流体井底样品的物理性质随压力而变化的情况。到1935年，薛尔紹斯〔7〕介绍了一种井底取样器和量测所获样品物理性质的方法，量测项目包括：压力-体积-温度的关系，饱和度和饱和压力，油中溶解的总气量，在不同温度、压力条件下游离出的气量，以及原油在溶解气分离后的收缩度。有了这些数据，才建立了某些确实有用的方程式，并且，这些数据还为计算原始储油量的体积公式提供了重要的修正参数。

其次一个重要的进展是认识到束缚水饱和度并提出了测定方法〔8〕〔9〕。人们认为，这种束缚水原为地层所固有，而在油、气聚集以后仍占据一部分孔隙空间。因而人们才能进一步解释这种现象：为什么在束缚水饱和度很高而渗透性很低的砂层中，油、气采收率低；同时，人们才开始采用以总孔隙空间百分比表示的水、油和气饱和度的概念。而测量了水饱和度，可以将孔隙体积修改为碳氢化合物所占的孔隙空间，这就为体积公式提供了另一重要的修正。

虽然，地层温度和地温梯度多年以来就为地质师们感到兴趣，但是，在还没有发明精密的井下记录温度计以前，油田工程师却一直无法利用这些重要数据。米里肯〔10〕曾指出，在油层和油井研究中应用温度数据是十分重要的。

根据上述基础数据，薛尔紹斯〔11〕推导出一种有用的公式，

即通常所謂斯奇利思物质平衡方程式。它是柯勒曼、威尔德和莫尔〔12〕等人早先发表的公式的演变，并且是油田工程中最重要工具之一。这个公式基本上是阐述物质不灭原理，是一种計算油层流体的原始体积和原始数量、采出体积和采出量、注入体积和注入量以及油层开采各阶段中流体残留体积和残存量的方法。在水驅油层中，进入油层范围的水，其体积也应列入流体物质平衡中。虽然薛尔紹斯〔11〕最先提出应用物质平衡方程式來計算油层中侵入水的方法，但是，經過赫斯特〔12〕，后来又經過依維尔丁金与赫斯特〔14〕的努力，这个方法才发展成为一个独立計算侵入水的方法，而能适用于有限或无限的，稳定或不稳定流动的含水层。

在上述原始油、气儲量和任一开采阶段中油、气儲量的計算方法进一步发展之后，特尔涅尔〔15〕、布克萊和萊維瑞特〔16〕又为計算各种岩层和流体特性的原油采收率奠定了基础。特尔涅尔以及后来的麦斯盖特又提出了計算内部气驅或溶解气驅采收率的各种方法，同时，貝克勒和萊維瑞克也提出了計算外部气頂驅和水驅采收率的各种方法。这些方法不仅为經濟对比提供了計算采收率的手段，而且也解释了很多油田上采收率很低的原因。这些发现，同时又指出了改善采收率的途径，那就是：利用天然能量，注气、注水以补充輔助能量，以及統一开发油藏以弥补因互相竞争而造成的能量損耗。

随着技术、認識和公式方面的上述发展，油藏工程学就成为石油工程的一个分支，而且范围明确，有实用价值。所謂油藏工程学，就是要把科学原理应用在开发与开采油气藏时发生的流体驅動問題上；也可以說油藏工程学的定义是：“达到极經濟地开发和开采油气藏的一种艺术”〔18〕。油藏工程学的工作手段則是：地下地质学，应用数学，以及决定地层中原油、天然气和水的液相与气相状况的物理和化学的基本定律。由于油藏工程是采油、采气的一門科学，所以也包括与油、气开采有关的各种因素的研究。格勒尔克和威色列〔19〕极力主张綜合地应用油田地质和油藏工程数据来制定合理的油藏开发方案。最后，油藏工程学对

所有石油工程师來說，都是有关系的，不管他是制定泥浆計劃的钻井工程师，还是从事于关系油井寿命的油管設計工作的防腐工程师。

2. 油 藏

油和气通常都是聚集在因构造作用或地层作用而形成的圈閉〔20〕內，通常又都是处在孔隙性与渗透性較高的地层部分（主要是砂层、砂岩、石炭岩和白云岩），饱和在顆粒之間的孔道中，或由于微裂縫、裂縫和溶解作用而形成的孔隙空間中。所謂油藏，是指圈閉（油捕）中含有油和气，为一单独水力系統的部分。很多油、气层都与体积不等的含水层，即所謂供水区有水力联系。許多油藏常常是同处在一个大的沉积盆地內，具有共同的供水区。此时，若其中的一个油藏上进行开采，由于流体經過供水区的联通作用，就会引起其它油藏的压力降。在某些情况下，整个圈閉都充滿着油或气；此时，油圈閉和油藏就完全是一回事。

油和气因受下列各种作用而被驅入生产井：a) 流体的膨胀；b) 流体的置換（天然的或人工的），c) 重力驅动以及（或）d) 毛細管力。如果沒有供水区，而且又未向地层注入流体时，則油、气的开采就主要是依靠流体的膨胀作用；如地层中的流体为原油时，其驅动还可能受到重力驅动的帮助。如从供水区有水侵入，或在选择好的井中注水时，則开采就受流体置換作用的控制，但此时也会受重力和毛細管力作用的帮助。气体也可作为置換流体注入井中以帮助采油，并且也可用循环注气法来开采凝析气藏。在很多油藏中，上述四种采油机理可能同时发生，但是，一般都有一种或两种是主要的。在油藏整个开采过程中，主要采油机理也可能因天然或人为的影响而发生变化。例如，某一定容油层（无供水区），最初靠流体膨胀开采；在压力損耗很大时，原油就会主要依靠重力驅动作用流入井中，然后由泵抽到地面。再往后，还可向一些井中注水，把剩余的油驅向另外一些井中。这种过程，通常称之为水驅或二次采油。在上例中，采油

机理的演变过程为：膨胀—重力—置换。当然，在这种演变过程中，很多机理常常是交替发生的，油藏工程学的目的就是要计划采油机理的演变过程，在最短的时间内采出最多的原油。

碳氢化合物在原始地层条件下可能为单相状态，或双相状态。单相可能是液相，此时，液相中的所有气体都溶解在油中。因此，原油中所溶解的气体储量，应象原油储量一样加以计算。但单相也可能是气相。如在气相中有蒸发的碳氢化合物，而且可作为液体采到地面，则该矿藏称之为凝析气藏或蒸馏液气藏（较老的名称）。在这种情况下，伴生液体（凝析液或蒸馏液）的储量，也应象气体储量一样加以计算。如果，碳氢化合物为双相状态，则此时的蒸气相称之为气顶，并伏于液相（含油带）之上。在这种情况下，需加计算的有四种形式的储量，即：自由气，溶解气，含油带中的原油和可从气顶中采出的液体。虽然原始碳氢化合物的数量（即储量）是固定的，但是，气体、凝析液和原油原始数量可采部分的大小却取决于开采的方法。

3. 符号和换算系数

物理量所用的文字符号应是一种便于在数学表达式中运用的字母。相、压力、时间等特殊条件是以小体字表示。在1953年以前，油田工程方面发表的很多文献采用了互相不同的新符号。这不仅给大学生，而且也给所有工程技术人造成混乱和浪费许多时间。但不久就发现了这个障碍，经过三年来的研究，到1956年，美国矿业、冶金、石油工程师学会（AIME）〔21〕石油工程师协会就采用了一种标准的油田工程符号。这套标准符号如表1·1所示，本书将全部采用这套符号。粗略看来，这个表虽然有些包罗万象，但是比较仔细地加以考察就可发现，表中采用的文字和小体字母数量较少，而配合的形式甚多。例如， R 代表油气比，当其下角无任何小体字母时，即代表流动油气比或生产油气比；而有小体字母后，如 R_s 代表溶解油气比， R_{si} 代表原始溶解油气比， R_{sw} 则代表溶解水气比，等等。

表 1-1 美国矿业、冶金、石油工程师学会石油工程师协会
采用的油藏工程标准文字符号

英 文		因 次
A	面 积	L^2
B	地层体积系数	
B_g	气体地下体积系数	
B_o	原油地下体积系数	
B_t	总(两相)地层体积系数	
B_w	水的地下体积系数	
c	压缩性	Lt^2/m
c_f	地层(岩石)压缩性	Lt^2/m
c_g	气体压缩性	Lt^2/m
c_o	原油压缩性	Lt^2/m
c_w	水的压缩性	Lt^2/m
C	浓 度	不 等
D	深 度	L
D	扩散系数	L^2/t
e	流入速度	L^3/t
e_g	气体流入速度	L^3/t
e_o	原油流入速度	L^3/t
e_w	水流入速度	L^3/t
f	分数(如由某一相所组成的流体占全部流体的部分)	
g	重力加速度	L/t^2
G	地层原始总储气量	L^3
G_o	累计气体流入量	L^3
G_1	累计气体注入量	L^3
G_p	累计气体产量	L^3
ΔG_o	某一时间的气体流入量	L^3
ΔG_1	某一时间的气体注入量	L^3
ΔG_p	某一时间的气体产量	L^3
h	有效地层厚度	L
H	总地层厚度	L
i	注入速度	L^3/t
i_g	注气速度	L^3/t
i_w	注水速度	L^3/t

續表 1.1

英 文		因 次
I	注入指数	$L^4 t / m$
I_s	比注入指数	$L^3 t / m$
J	生产指数	$L^4 t / m$
J_s	比生产指数	$L^3 t / m$
k	绝对渗透率	L^2
k_g	气体有效渗透率	L^2
k_o	原油有效渗透率	L^2
k_{rg}	气体相对渗透率	
k_{ro}	原油相对渗透率	
k_{rw}	水相对渗透率	
k_w	水有效渗透率	L^2
K	平衡比 (y/x)	
$\ln$	自然对数, 以 e 为底	
$\log$	常用对数, 以 10 为底	
L	长 度	L
L	液相磅分子数	
m	质 量	m
m	原始地层自由气体积与原始地层原油体积之比	
M	流动比 ^① (λ_1/λ_2)	
M	分子量	m
n	总磅分子数	
N	地层原始储量	L^3
N_e	累计原油流入量	L^3
N_p	累计原油产量	L^3
ΔN_e	某一时间的原油流入量	L^3
ΔN_p	某一时间的原油产量	L^3
p	压 力	m/Lt^2
p_a	大气压力	m/Lt^2
p_b	饱和压力	m/Lt^2
p_c	临界压力	m/Lt^2
p_{cf}	套管压力 (流动的)	m/Lt^2

① 当两种流体在同一接触表面的相对方向上流动时, 则其流动比为置换相的流动性与被置换相的流动性之比, 或为顺流流体的流动性与逆流流体的流动性之比。

英 文

p_{cs}	套管压力 (靜止的)
p_d	露点压力
p_D	无因次压力
p_e	外边界压力
p_f	前緣或接触面压力
p_i	原始压力
p_r	折算压力
p_{sc}	标准条件下压力
p_{sp}	分离器压力
p_{tf}	油管压力 (流动的)
p_{ts}	油管压力 (靜止的)
p_w	井底压力 (普通的)
p_{wf}	井底压力 (流动的)
p_{ws}	井底压力 (靜止的)
$\bar{p}$	平均压力
P_c	毛細管压力
q	生产速度
q_D	无因次生产速度
q_g	采气速度
q_o	采油速度
q_w	产水速度
r	径向距离
r_D	无因次径向距离
r_e	外边界半径
r_w	油井半径
R	生产油气比
R	通用气体常数 (每磅分子)
R_p	累計油气比
R_s	溶解油气比 (气在油中的溶解度)
R_{sw}	气在水中的溶解度
S	饱和度
S_g	气体饱和度
S_{ge}	临界气体饱和度
S_{gr}	残余气体饱和度

續表 1.1

因 次

m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
m/Lt^2
L^3/t
L^3/t
L^3/t
L^3/t
L
L
L
mL^3/t^2T