

# 油藏工程方法

〔美〕F. W. 科尔

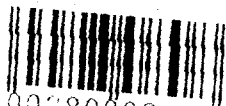
石油工业出版社

7797

# 油藏工程方法

[美] F.W. 科尔

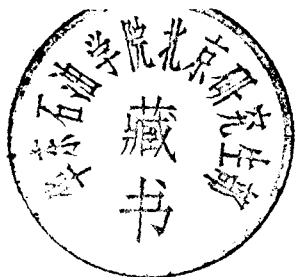
栾庆江 张兴金 译  
胡靖邦 陈元千 校



00280808



200396856



石油工业出版社

**RESERVOIR  
ENGINEERING  
MANUAL**

Frank W Cole  
Gulf Publishing Company  
Texas 1969

\*

**油藏工程方法**

{美}F. W. 科尔  
栾庆江 张兴金译  
胡靖邦 陈元千校

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外外馆东后街甲36号)  
大厂回族自治县印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

850×1168毫米 32开本 11<sup>5</sup>/<sub>8</sub>印张 306千字 印1,701—3,700  
1981年5月北京第1版 1982年7月北京第2次印刷  
书号:15037·2264 定价:1.45元

## 内 容 提 要

本书是根据美国俄克拉何马州立大学石油工程教授F. W 科尔所著《Reservoir Engineering Manual》一书第二版翻译的。原书第一版于1961年出版，1969年修订再版。

本书内容包括：油藏工程的基本概念；油藏；溶气驱油藏；气顶驱油藏；水驱油藏；重力驱油藏；混合驱油藏；地层压力保持；二次采油；气藏；凝析气藏；经济分析。

本书总结了美国多年来不同驱动类型油、气藏开发的常规分析方法，具有内容实际、文字简要、原理清晰、应用有例等特点，可供从事油、气田开发分析工作人员及院校开发专业师生参考。

# 目 录

<b>第一章 绪 论</b> .....	1
<b>第二章 油藏工程的基本概念</b> .....	3
孔隙度 .....	3
流体的饱和度 .....	5
渗透率 .....	11
通过多层的直线流动 .....	17
通过连续地层的径向流动 .....	19
克林肯勃格效应(Klinkenberg Effect) .....	20
有效渗透率 .....	22
相对渗透率 .....	23
计算相对渗透率的数据 .....	31
相态特性 .....	35
参考文献 .....	42
<b>第三章 油 藏</b> .....	43
油藏的驱油机理 .....	43
基本的方程式和方法 .....	47
轻质油油藏 .....	67
轻质油油藏的判别 .....	68
最终采收率 .....	69
预测油藏动态 .....	71
参考文献 .....	71
<b>第四章 消耗驱动油藏</b> .....	73
预测油藏动态 .....	74
油藏动态预测过程的内容 .....	78
油藏动态预测的过程 .....	78
预测的局限性 .....	91
油藏动态与时间的关系 .....	

影响最终采收率的因素 .....	99
分析油气比的变化历史 .....	99
参考文献 .....	100
<b>第五章 气顶驱油藏</b> .....	102
开采速度对最终采收率的影响 .....	105
预测油藏动态 .....	106
方程式的应用 .....	106
<b>第六章 水驱油藏</b> .....	116
自由气饱和度对采收率的影响 .....	119
预测油藏动态 .....	122
计算水侵量 .....	135
应用不稳定状态方程预测油藏动态 .....	141
动态预测的可靠性 .....	142
油藏动态预测的局限性 .....	143
预测油藏动态的算例 .....	145
物质平衡方程式是一个直线方程式 .....	153
参考文献 .....	155
<b>第七章 重力驱油藏</b> .....	157
倾斜方向上的渗透率 .....	161
油藏的倾角 .....	161
油藏的采油速度 .....	162
原油粘度 .....	162
相对渗透率特性 .....	162
基本的开采过程 .....	162
预测油藏动态 .....	163
视相对渗透率法 .....	164
原油饱和度法 .....	167
参考文献 .....	168
<b>第八章 综合驱油藏</b> .....	169
驱动指数 .....	171
应用的方程式 .....	175
物质平衡方程式 .....	176

瞬时油气比方程式 .....	181
<b>第九章 保持压力 .....</b>	<b>188</b>
注气保持压力 .....	192
凝析气驱 .....	196
注气的动态预测 .....	197
注入气体的驱动指数 .....	198
注水保持压力 .....	200
注水的动态预测 .....	200
注水驱动指数 .....	203
气顶的控制 .....	204
典型的注水保持压力工作 .....	204
参考文献 .....	211
<b>第十章 提高原油采收率 .....</b>	<b>212</b>
利用注入流体提高原油采收率 .....	213
非混相气体 .....	214
水 .....	214
注入混相流体 .....	218
热法采油 .....	218
根据流体注入方案预测采收率 .....	219
预测注水动态的斯蒂尔斯法 .....	219
含水率方程式和采出程度方程式的推导 .....	226
预测注水或注气结果的前缘推进方法 .....	233
井网的布置 .....	242
边缘注水 .....	248
预测边缘注水的动态 .....	250
注水中需考虑的特定问题 .....	250
注水的典型例证 .....	251
预测注水的结果 .....	257
参考文献 .....	260
<b>第十一章 气藏 .....</b>	<b>263</b>
气藏的物质平衡方程式 .....	264
气藏的大小 .....	269
水驱气藏的计算 .....	

开采速度对最终采收率的影响 .....	276
气体储量的价值 .....	278
气井流量的测定 .....	279
未来产量与时间的关系 .....	283
物质平衡方程式为一直线方程式 .....	290
参考文献 .....	292
<b>第十二章 凝析气藏</b> .....	<b>293</b>
重量百分数、体积百分数和克分子百分数 .....	296
汽-液平衡比 .....	297
K值的应用 .....	298
预测气藏动态 .....	299
取样方法 .....	301
凝析液的回收率 .....	301
干气回注 .....	303
瞬时蒸发, 算例 .....	304
计算步骤 .....	304
液-气比变化历史 .....	312
参考文献 .....	313
<b>第十三章 经济学</b> .....	<b>315</b>
现在金额 .....	316
利润-投资比 .....	323
偿付时间 .....	323
利润率 .....	324
检验经费合理使用的方法 .....	330
气顶的收缩 .....	330
气顶的膨胀 .....	332
控制气顶膨胀的方法 .....	334
<b>附录一 标准文字符号</b> .....	<b>336</b>
<b>附录二 换算系数</b> .....	<b>343</b>
<b>附录三 贴现计算表</b> .....	<b>345</b>
<b>附录四 计算用图</b> .....	<b>346</b>



## 第一章 绪 论

油藏工程是石油工程的一个组成部分，以研究各种类型的油藏为主。多年的研究与实践表明，只有从整体上控制油藏动态才能获得最高采收率，从而使油藏工程逐渐发展成为石油工程的一个分科。随着这一工程技术状况的发展，各个单井的作用就或多或少降低到次要的地位，而不再予以主要的考虑。在油藏工程师的眼里，它们被看作是控制油藏动态的机械元件。

在四十年代期间，由于对石油日益增长的需求，并由于应用油藏工程原理而大大提高了最终采收率，因而油藏工程得到了惊人的发展。

油藏工程的原理对从事钻井和采油的生产实践关系极大。为了最大限度地利用这些原理，这就需把油藏工程、钻井工程以及采油工程的实践密切地结合起来。随着这一认识的深化，油藏工程就失去了某些本身的专业化性质。石油工程方面的工艺技术现状，要求所有的石油工程师都应对控制油藏动态的原理有深刻的了解。既然这三大工程如此密切相关，所以采油和钻井工程师就必须很好地掌握油藏工程的基础知识。

油藏工程师的主要职能是，依据各种有效的或可能变成有效的采油机理来预测油藏的未来动态。对各种油藏开发方案进行经济上的评价也是整个油藏工程研究中不可分割的组成部分。在对这些方案进行经济分析的同时，从对各种方案预定要达到的采收率的研究，就可作出是否需要采取保持油藏压力、二次采油、回注或其他一些措施的决定。油藏工程师根据他的研究，必然要提出可获得最高纯收益的油藏开发方案，这一收益通常是用货币价值来表示。经营石油企业的目的是要从其投资中赚钱，因此，油藏开发与开采的一贯目标是为赚取最大利润，而不一定是从地层

**中获得最高的原油采收率。但是恰巧，从地层中获得最高的原油采收率往往会导致赚取最大利润的结果。**

本书阐述了把原油从地层中驱出的各种驱动力，并通过例题说明了在各种驱动力下用于预测原油采收率的一些方法。对全部例题均采用逐步求解的作法，这样会使那些不熟悉本书所述原理的人们有可能理解这些问题。本书所示的大多数例题都是本着解决预测油藏的未来动态这一问题而提出来的，因为这常常是油藏工程师所遇到的主要问题之一。

译者：栾庆江

校者：胡靖邦

## 第二章 油藏工程的基本概念

在进行可靠的油藏工程研究之前，彻底理解油藏工程的某些基本概念是必不可少的。

油藏工程中的三个最重要的概念，涉及到储油岩石的某些物理性质以及储油岩石孔隙内各种流体的分布。这些性质是：（1）孔隙度，（2）渗透率，以及（3）流体的饱和度。本章将讨论其中的每一种性质。

### 孔 隙 度

孔隙度是储油岩石中未被固相骨架占有的那部分空间的量度。它可定义为岩石总体积中未被固体所占据的那一部分体积。这可用数学形式表示为：

$$\phi_a = \frac{\text{总体积} - \text{固体所占据的体积}}{\text{总体积}} \times 100 \quad (2-1)$$

式中  $\phi_a$ ——孔隙度，百分数。

孔隙度习惯上用百分数的形式表示，而不用小数表示，这就是方程式（2-1）要乘以100的理由。孔隙度也可用下列方程表示，

$$\phi_a = \frac{\text{空隙空间的总体积}}{\text{总体积}} \times 100 \quad (2-2)$$

方程式（2-1）和（2-2）必定是恒等的，因为空隙空间的体积必定恰好等于总体积减去固体所占有的体积。

由于沉积物的堆积，在过去的地质时代中逐渐形成了岩石，所形成的一些空隙空间由于过度的胶结作用而成为彼此隔离的孔隙。这样，大量的空隙空间是连通的，而某些空隙空间，或常被称之为所谓的孔隙空间将是完全孤立的。这就引出了两种不同类型

的孔隙度概念，它们取决于孔隙空间的取值。绝对孔隙度指的是储油岩石中空隙空间的总体积，而有效孔隙度仅指岩石中彼此连通的那部分孔隙空间体积。方程式（2-1）和（2-2）得出的是岩石的绝对孔隙度，而测定有效孔隙度的公式是：

$$\phi = \frac{\text{彼此连通的孔隙体积}}{\text{总体积}} \times 100 \quad (2-3)$$

式中  $\phi$ ——有效孔隙度，百分数。

为了从地下岩层中开采出石油，在很多情况下，石油在到达生产井底之前，需在储油岩石的孔隙通道中流动几百英尺的距离。如果石油处在互不连通的孤立的孔隙空间，那它就不可能被开采出来，石油工程师对这一部分石油是不太感兴趣的。因此，有效孔隙度是在所有的工程计算中均应采用的数值。所有的储油岩石都可能包含某些彼此孤立的孔隙空间，但石灰岩的孔隙空间通常绝大部分是由这种孤立的孔隙空间所组成。

由于有效孔隙度是石油工程师所感兴趣的孔隙度数值，因此应特别注意确定孔隙度所用的方法。例如，如果一块岩样的孔隙度是用已知密度的流体百分之百地饱和来确定的，则用称重的方法确定由饱和流体所增加的重量，这就会求出有效孔隙度的数值，因为饱和流体只能进入彼此连通的孔隙空间。另一方面，如果岩样用研钵和研锤研碎，确定出岩样的固体颗粒的实际体积，那么就求得绝对孔隙度的值，因为在研碎过程中会使得任何孤立孔隙本身不复存在了。

岩样的孔隙度对于石油生产者来说是一个十分重要的参数，因为它是岩石通过流体能力的一种量度。下面举出一个例题来说明孔隙度对储油岩石含油量的影响。

### 例 题 2-1

A. 计算每英亩-英尺体积的储油岩石中的含油量，其中束缚水饱和度为25%，有效孔隙度为10%。

B. 如果孔隙度增加到30%，计算含油量的大小。

A. 含油量, 桶/英亩-英尺 =  $7758Ah\phi(1 - S_{wi})$

式中 7758——换算系数, 把英尺<sup>3</sup>换算成桶英亩-英尺,

$$\left( \frac{43560 \text{ 英尺}^2/\text{英亩}}{5.62 \text{ 英尺}^3/\text{桶}} \times 1 \text{ 英尺} = 7758 \text{ 桶/英亩-英尺} \right)$$

A——油藏的面积英尺<sup>2</sup>;

h——油藏的平均厚度, 英尺;

$\phi$ ——有效孔隙度, 小数;

$S_{wi}$ ——束缚水饱和度, 小数;

$$\text{含油量} = 7758 \times 1 \times 1 \times 0.10 \times (1 - 0.25)$$

$$= 582 \text{ 桶/英亩-英尺}$$

B. 含油量 =  $7758 \times 1 \times 1 \times 0.30(1 - 0.25)$

$$= 1746 \text{ 桶/英亩-英尺}$$

因此, 孔隙度增加三倍使得储油岩石含油量也增加三倍。

## 流体的饱和度

上述讨论了有关油藏流体所占有的孔隙空间。通常在油藏内存在有不只一种流体。因为大多数含油层认为是生成于海相的, 从油藏的形成历史来看, 这标志着岩石的孔隙最初完全为水所充满。然后石油和天然气运移到油藏中, 将水驱替到某一最小值的残留饱和度。于是, 当发现一个油藏时, 油、水以及气可能以某种形式遍布于油藏。流体饱和度这一概念是用来确定孔隙空间被任一个别流体所占据的程度。流体饱和度可定义为各个流体所占有的孔隙空间的百分数或小数值。以方程式的形式表示计算含油饱和度为:

$$S_o = \frac{\text{原油体积}}{\text{总孔隙体积}} \times 100 \quad (2-4)$$

式中  $S_o$ ——含油饱和度, 百分数。

于是, 所有的饱和度数值是建立在孔隙体积上, 而不是总的油藏体积。

在大多数油藏内的流体认为已达到了一种平衡的状态, 因

此，按照它们的密度已完成了重力分离，即天然气在油的上面，而水在油的下面。除了底水和边水之外，还有束缚水，它遍布于含油区和含气区。在这些区域内的这种水的饱和度会减少到不可能再少的最小值，使得这种水能被保存在含油和含气区内的力称为毛细管力。因为这种力只是在毛细管大小的空间里才显得重要。为了确定油藏中毛细管力的大小，借以确定油藏中束缚水的饱和度，实验室试验已发展到去模拟油藏中的各种驱替力。束缚水饱和度是一个很重要的因素，因为它可以确定原油所占有的孔隙空间的部分。

计算地质储量的体积方程式为：

$$N = 7758 \times A \times h \times \phi \times S_{oi} / B_{oi} \quad (2-5)$$

式中  $N$ ——原始地质储量的体积，地面桶；

$B_{oi}$ ——原始油藏压力下地层原油体积系数，引入这一系数是为了把油藏桶数转换成地面桶数。

在最初，油藏中仅存在两种流体，油和束缚水，因为  $S_o + S_{wi} = 1$ ，方程式 (2-5) 可修正如下：

$$N = 7758 \times A \times h \times \phi \times (1 - S_{wi}) / B_{oi} \quad (2-6)$$

这样，如前面所述的，随束缚水饱和度的增加，则油藏的原油储量（地面）就要减少。

为了测定束缚水的饱和度，建立了使毛细管压力恢复到原始状态的工艺，这种设备的示意图如图2-1所示。简单地说，这一过程包括以下几个步骤：首先用地层水100%地将岩心饱和，然后将岩心放在一块多孔的隔板上，这种隔板100%地被水饱和，并且在试验期间在所加的压力差的条件下只能为水所渗透。然后空气进入岩心盒，增加压力直至有少量的水通过多孔半渗透隔板驱替到有刻度的量筒里时为止。然后压力一直保持不变直到再没有更多的水被驱出为止。这一驱替过程常常需要几天或者甚至几周时间。在驱替完毕后，从仪器中取出岩心，用称重法测定水的饱和度。然后岩心再放入到仪器中去，增加压力，再重复这一过程直到水的饱和度降到最小值。从这样的实验中所得到的资料可

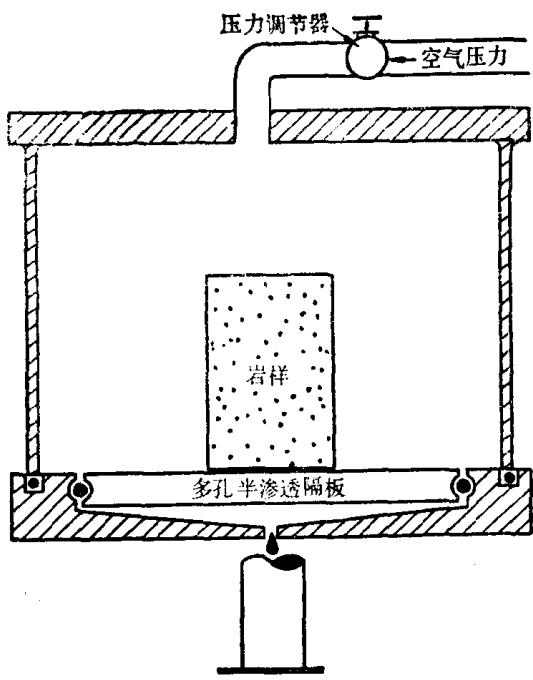


图 2-1 毛细管压力复原情况的实验设备

绘成如图2-2所示的曲线。因为在达到平衡之后,驱替润湿相所需要的压力和岩心内保持残留水的毛细管压力恰好是相等的,这

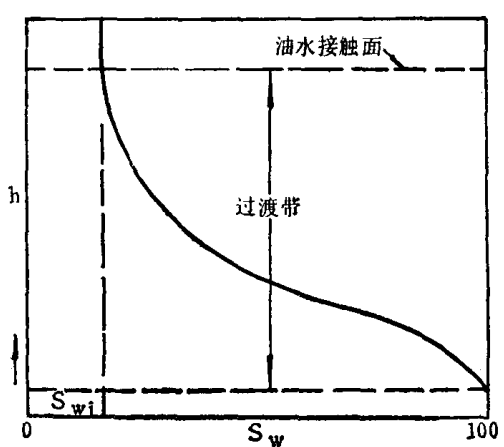


图 2-2 毛细管压力曲线

一压力数据可以作为毛细管压力来作图。从研究图 2-2 可以看出,含水饱和度达到的某一极小值,这相当于束缚水的饱和度值。

对于单根毛细管使用的毛管压力方程式为:

$$P_c = h \times \Delta\rho \times g = \frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (2-7)$$

式中  $P_c$ ——毛细管压力;  
 $h$ ——自由液面以上的高度;  
 $\Delta\rho$ ——两种流体的密度差;  
 $g$ ——重力加速度;  
 $\gamma$ ——流体间的界面张力;  
 $\theta$ ——接触角;  
 $r$ ——毛细管半径。

可以看出,毛细管压力与自由水面以上的高度有关。毛细管压力数据可以转绘成 $h$ 对应于 $S_w$ 的曲线,如图2-2所示。在图上标出了含水饱和度从100%到极小值之间的过渡带。从图2-2中可以得出一重要概念,即从含水为100%到最大的含油饱和度之间没有突然的变化。实际上不存在油水接触面那种情况,而是有一个从含水100%到最大含油饱和度之间逐渐过渡。如果油水接触面规定为百分之百产油的油藏内最低点,那么油水接触面将如图2-2所示的位置,在那种情况下在油水接触面之下还有大量的原油,而这部分原油必须同水一起采出。在某些油藏中过渡带的厚度可能只有2~3英尺,而在另一些油藏中可能达到几百英尺。

改变孔隙的大小和油藏流体的密度,就会使毛细管压力曲线的形状及过渡带的厚度发生变化。由方程式(2-7)的重新整理,可求出在自由液面以上的高度 $h$ 值,而表示出随着密度差 $\Delta\rho$ 的减少, $h$ 值增加。实际上这就意味着,在具有气-水接触面的气藏中,由于 $\Delta\rho$ 大,所以过渡带的厚度是最小的。同样,如果其他所有因素都保持不变,那么,低比重(API)油藏要比高比重(API)油藏的油水接触面具有较长的过渡带。这一概念在图 2-3 上加以说明。



观察方程式(2-7)可以看出,当孔隙半径 $r$ 增加时 $b$ 值下降。因此,具有较小孔隙的储油岩石系统比具有较大孔隙的储油岩石系统具有较长的过渡带。

油藏孔隙的大小可近似地认为与渗透率直接相关,这可用于阐明高渗透率油藏比低渗透率油藏的过渡带较短。这后一概念在图2-4中表示出来。

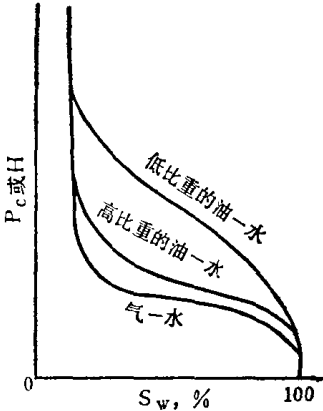


图 2-3 对于含有不同流体的同一岩石系统 $P_c$ 随 $S_w$ 的变化关系

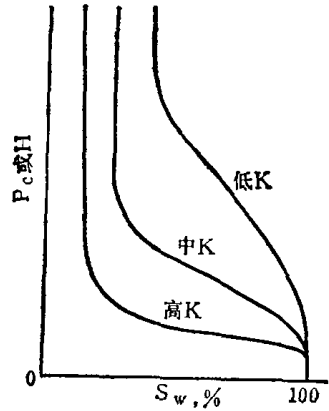


图 2-4 对于含有同一流体的不同岩石系统 $P_c$ 随 $S_w$ 的变化关系

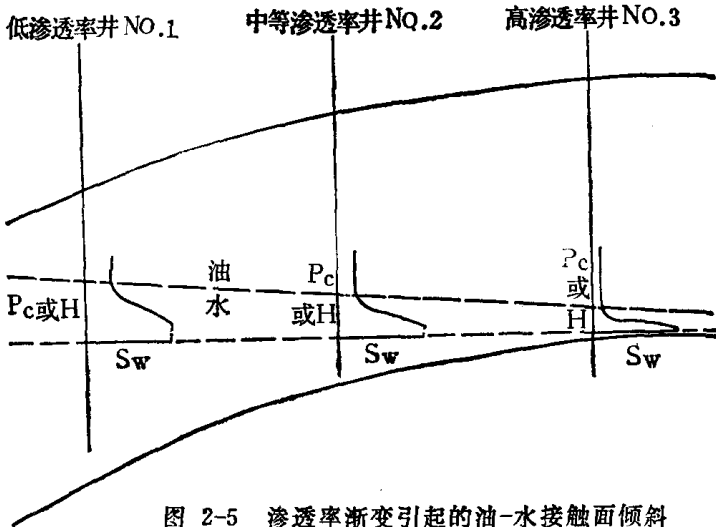


图 2-5 渗透率渐变引起的油-水接触面倾斜