

石油科学进展 8

# 油藏工程原理

L. P. 达克 著

(北京)

3

17482

石油科学进展 8

# 油藏工程原理

L.P.达克著

刘翔鄂 胡靖邦 等译 谭国雄 校

石油工业出版社

### 内 容 提 要

本书是作者根据他为壳牌石油公司编写的培训讲义写成的。全书共十章。第一到四章作为本书绪论，重点在第五到八章，介绍了油藏工程中最重要试井和压力分析方法的理论和实践。第九、十章分别介绍了自然水侵和非混溶驱替。本书的特点是用简单易懂的数学方法介绍了油藏工程的基本物理原理，以有助于油藏工程师从实际出发了解和解决复杂的油藏工程问题。

本书由刘翔鄂（第一章）、许远英（第二章）、张洪亮（第三章）、胡靖邦（第四章）、张子香（第五、六章）、马永海（第七章）、赵润泉（第八章）、吕平（第九章）、杨普华（第九章）等九位同志翻译，全书经谭国雄同志校订。

L. P. DAKE  
Developments in Petroleum Science, 8  
**Fundamentals of Reservoir Engineering**  
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY New York 1978

石油科学进展8

**油藏工程原理**

L. P. 达克著

刘翔鄂 胡靖邦等译 谭国雄 校

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲36号）

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 18<sup>1</sup>/<sub>2</sub>印张 491千字 印1—3,230

1984年8月北京第1版 1984年8月北京第1次印刷

书号：15037.2463 定价：1.90元

## 作者序

这本有关油藏工程的教科书是根据作者于1974至1977年间在海牙受聘于壳牌国际石油公司的培训部时所编的各种讲义写成的。

本书的主要目的是利用最简单和最易懂的数学方法介绍油藏工程的基本物理原理。只有完全领会了物理原理之后，工程师才有可能从实用的角度了解和解决复杂的油藏工程问题。

第一到四章是课题的引言部分，包含了在壳牌石油公司的基础培训教程中介绍的材料。因此，它们对于甚至是与烃类资源开发和生产工作联系不很密切的任何人都是有裨益的。

第五到八章专门介绍在整个油藏工程中很可能是最重要的试井和压力分析方法的理论和实践。所谈的方法完全是通用的，因为不论储层中的流体属于何种类型，借助无因次压力或假压力函数的叠加，对试井取得的任何流量-压力-时间记录都可能进行分析。为了了解这种通用性，建议读者在开始精读这几章之前粗略阅读一下8.13节。作者希望这部分内容能作为最近出版的而且和往常一样是极好的石油工程学会专论《试井分析进展》(R.C.小伊尔洛克著)的一个有用的导引，因为该专论需要用到这四章中介绍的大部分理论知识。

第九章叙述含水驱替艺术，而最后一章第十章涉及非混溶、不可压缩驱替问题。这里的要旨是只有一种驱替理论，就是贝克莱-列维勒理论。其它的一切无非是“改进”相对渗透率曲线(行业中称为“科学调整”)，以便考虑流体饱和度在储层倾斜层面法向的分布方式而已。这样，就可把这些曲线同贝克莱-列维勒方程结合起来用以计算采油量。通过对生成平均(假)相对渗透率隐含的物理原理及它们在数值模拟中的作用的阐述，希望本章会有助于科学调整者。

本书还包含大量说明理论应用的已作出的练习题。在谈到的问题中，最明显的不足就是缺少有关烃类相特性复杂性的认真讨论。在这方面已有数本专门的教科书涉及，其中最值得注意的是本书经常提到的阿密克斯等人写的书(第一章参考文献8)。在写本书时要作的一个困难决定是使用哪一种单位制。虽然已作过工业界应当采用国际单位制(SI)的合乎逻辑的决定，但是有关可以用基本单位表示的“可容许”单位范围迄今尚未达成协议。因此，为了避免可能的错误，作者在推导重要的理论公式时选用达西单位，而对在现场需要应用的公式则用矿场实用单位表示。在专门介绍达西定律的第四章表4.1中定义了这两种单位系统。在该章中还有一节(4.4节)介绍如何把一种单位系统表示的公式转变为用任何别的单位系统表示的相当形式。选择达西单位在很大程度上是基于传统。用这种单位系统表示的公式除重力项外与用绝对单位系统表示的形式相同。实用的公式都使用了矿场单位，以便读者能够把它们同现有的美国矿冶工程学会文献所用的公式联系起来。

海牙 壳牌石油公司培训部

L.P.达克

1977年10月

# 代 表 符 号

## 英文字母

- A 面积
- B 气井稳定流动公式中的达西系数
- B<sub>g</sub> 气体地下体积系数
- B<sub>o</sub> 原油地下体积系数
- B<sub>w</sub> 水的地下体积系数
- c 等温压缩率
- c<sub>e</sub> 有效压缩率 (用于含烃孔隙体积)
- c<sub>v</sub> 孔隙压缩率
- c<sub>t</sub> 总压缩率 (用于孔隙体积)
- C 含水区总压缩率 (C<sub>o</sub> + C<sub>w</sub>)
- C 任意积分常数
- C 气井回压公式中的系数
- C 压力恢复校正系数 (拉塞尔续流分析法)
- C<sub>A</sub> 迪叶兹形状系数
- D 与流量有关的污染中出现的非达西流动常数
- D 垂向深度
- e 幂的或指数的
- e<sup>i</sup> 幂积分函数
- E 气体膨胀系数
- E<sub>o</sub> 物质平衡式中计及原生水膨胀和孔隙体积缩小的项
- E<sub>g</sub> 物质平衡式中计及油及其原有溶解气膨胀的项
- f 分数
- f 任一种流体在储层中的分相流量
- f 函数, 例如 f(p) 表示压力的函数
- F PVT 分级脱气试验中的累计相对气体体积
- F 气体流动公式中的非达西系数
- F 物质平衡式中的产量项
- F 麦肯利续流分析中的井筒参数
- g 重力加速度
- g 函数, 例如 g(P) 表示压力的函数
- G 原始气体地质储量 (GIIP)
- G 重力数
- G<sub>v</sub> 水驱气藏中的视气体储量
- h 地层厚度
- h<sub>i</sub> 射开层段厚度
- H 毛管过渡带总高度
- J 贝塞尔函数
- J 产率指数 (采油指数)
- k 绝对渗透率 (四、九、十章)
- k 有效渗透率 (五、六、七、八章)
- k<sub>r</sub> 通过除以绝对渗透率将有效渗透率曲线标准化得出的相对渗透率
- $\bar{k}$  厚度平均相对渗透率
- k<sub>r</sub> 端点相对渗透率
- k 迭代次数
- K<sub>r</sub> 除以对油的端点渗透率将有效渗透率曲线标准化得出的相对渗透率
- l 长度
- L 长度
- m 气顶部分原始含烃孔隙体积与含油部分原始含烃孔隙体积之比 (物质平衡式)
- m 分析压力恢复、压力降落或多流量流动测试的压力 (假压力) 与时间关系线的早期直线段斜率
- m(p) 真实气体假压力
- m'(p) 两相 (气-油) 流动的假压力
- M 端点流度比
- M 分子量
- M<sub>o</sub> 注水前缘流度比
- n 气井回压公式的指数
- n 总分子数
- N 原始贮罐油地质储量 (STOIIP)
- N<sub>c</sub> 累计采油量
- N<sub>c</sub> 无因次累计采油量 (以孔隙体积为单位)
- N<sub>c</sub> 无因次累计采油量 (以可动油体积为单位)
- p 压力
- p<sub>a</sub> 含水区中的平均压力
- p<sub>b</sub> 泡点压力 (饱和压力)
- p<sub>c</sub> 临界压力
- p<sub>d</sub> 动态网格压力
- p<sub>e</sub> 无因次压力
- p<sub>f</sub> 在外边界处的压力
- p<sub>g</sub> 原始压力
- p<sub>h</sub> 假临界压力

$p_{\cdot\cdot}$  假对比压力  
 $p_{\cdot}$  标准条件压力  
 $p_{\cdot\cdot}$  井底流动压力  
 $p_{\cdot\cdot}(1_{\cdot\cdot})$  开井出油后1小时记录到的井底流动压力  
 $p_{\cdot\cdot}$  井底静止压力  
 $p_{\cdot\cdot}(t_{\cdot\cdot})$  霍纳压力恢复曲线早期直线段外推得出的(假设)压力  
 $\bar{p}$  平均压力  
 $p^*$   $p_{\cdot\cdot}(t_{\cdot\cdot})$  在无限长关井时间的特定值  
 $\Delta p$  压力降  
 $p_{\cdot}$  毛管压力  
 $p_{\cdot\cdot}$  假毛管压力  
 $q$  流量(产量)  
 $q_i$  注入流量  
 $Q$  气流量(产量)  
 $r$  径向距离  
 $r_{\cdot}$  外边界半径  
 $r_{\cdot\cdot}$  无因次半径  $=r/r_{\cdot}$  (七、八章)  
 $=r/r_{\cdot}$  (九章)  
 $r_{\cdot\cdot}$  无因次半径  $=r_{\cdot}/r_{\cdot}$  (七、八章)  
 $=r_{\cdot}/r_{\cdot}$  (九章)  
 $r_{\cdot}$  蒸汽浸渍井的受热带半径  
 $r_{\cdot}$  油藏半径  
 $r_{\cdot}$  井筒半径  
 $r_{\cdot\cdot}$  考虑到机械污染的有效井筒半径 ( $r_{\cdot\cdot}' = r_{\cdot} e^{-\cdot}$ )  
 $R$  生产(或瞬时)气油比  
 $R$  通用气体常数  
 $R_{\cdot}$  累计气油比  
 $R_{\cdot}$  溶解气油比  
 $S$  机械污染系数  
 $S$  饱和度(总是以孔隙体积的分数表示)  
 $S_{\cdot}$  气体饱和度  
 $S_{\cdot\cdot}$  残余气饱和度  
 $S_{\cdot}$  油饱和度  
 $S_{\cdot\cdot}$  残余油饱和度  
 $S_{\cdot}$  水饱和度  
 $S_{\cdot\cdot}$  原生水(束缚水)饱和度  
 $S_{\cdot\cdot}$  注水前缘处的水饱和度  
 $S_{\cdot}$  厚度平均水饱和度  
 $S_{\cdot}$  前进着的注水前缘后面的体积平均水饱和度  
 $t$  假对比温度的倒数 ( $T_{\cdot\cdot}/T$ )  
 $t$  时间  
 $t_{\cdot}$  无因次时间

$t_{\cdot\cdot}$  无因次时间 ( $=t_{\cdot} r_{\cdot}^2/A$ )  
 $\Delta t$  压力恢复时的关井时间  
 $\Delta t_{\cdot}$  压力恢复到  $p_{\cdot\cdot}(t_{\cdot\cdot}) = \bar{p}$  时的关井时间  
 $\Delta t_{\cdot}$  压力恢复到  $p_{\cdot\cdot}(t_{\cdot\cdot}) = p_{\cdot}$  时的关井时间  
 $T$  绝对温度  
 $T$  传导率(麦肯利续流分析法)  
 $T_{\cdot}$  临界温度  
 $T_{\cdot\cdot}$  假临界温度  
 $T_{\cdot\cdot}$  假对比温度  
 $u$  渗流速度  
 $U$  含水区常数  
 $v$  速度  
 $v_{\cdot}$  分级脱气试验的相对气体体积  
 $V$  体积  
 $V$  油(气)藏净总体积  
 $V_{\cdot}$  孔隙体积(PV)  
 $V_{\cdot}$  累计相对气体体积(标准条件)  
 $W$  宽度  
 $W_{\cdot}$  无因次累计水侵量  
 $W_{\cdot}$  累计水侵量  
 $W_{\cdot\cdot}$  含水区中原始的可侵水量;  $W_{\cdot\cdot} = \bar{C} W_{\cdot p}$   
 $W_{\cdot}$  含水区原始含水量(九章)  
 $W_{\cdot}$  累计注水量(十章)  
 $W_{\cdot\cdot}$  无因次累计注水量(以孔隙体积为单位)  
 $W_{\cdot\cdot}$  无因次累计注水量(以可动油体积为单位)  
 $W_{\cdot}$  累计产水量  
 $y$  对比密度(霍尔-雅波洛克公式)  
 $Z$  Z系数(偏差系数)

#### 希腊字母

$\beta$  非达西流动的紊流系数  
 $\beta$  稳定分离驱替中,油-水界面与流动方向之间的角度  
 $\gamma$  比重(在标准条件下液体与水的重率之比,设水的重率=1;在标准条件下气体与空气的重率之比,设空气的重率=1)  
 $\gamma$  其自然对数等于欧拉常数的一个数(=1.782)  
 $\Delta$  差值(取正差值,即  $\Delta P = P_{\cdot} - P$ )  
 $\lambda$  流度  
 $\theta$  油(气)藏或储层倾角  
 $\Theta$  接触角  
 $\mu$  粘度  
 $\rho$  密度  
 $\sigma$  表面张力

$\phi$  孔隙度  
 $\Phi$  单位质量流体势  
 $\psi$  单位体积流体势 (基准压力)  
**下标**  
b 泡点  
bt 见水  
c 毛管  
d 分级 (PVT分析)  
d 无因次 (以孔隙体积为单位表示)  
d 驱替相  
D 无因次 (压力、时间、半径)  
D 无因次 (以可动油体积为单位表示)  
DA 无因次 (时间)  
e 有效的  
e 在油藏单元生产端 (例如S..) )  
f 降压分离或接触分离 (PVT)  
f 注水前缘  
f 孔隙 (例如 $C_r$  = 孔隙压缩率)  
g 气体  
h 受热带  
i 累计注入  
i 初始或原始条件  
n 流动期数  
N 流动期数  
n (上标) 时间步长数  
o 油  
p 累计产量  
r 对比; 折算  
r 相对  
r 残余  
s 蒸汽  
s 溶解气  
sc 标准条件  
t 总  
w 水  
wf 井底流动

ws 井底静止

**本书常用单位代表符号**

atm 大气压  
b 桶  
b/d/psi 桶/日/磅/英寸<sup>2</sup>  
cc 立方厘米  
cm 厘米  
cp 厘泊  
cuft 立方英尺  
D 达西  
dyne 达因  
ft 英尺  
gm 克  
HCPV 含烃孔隙体积  
hr 小时  
lb 磅  
m 米  
mD 毫达西  
min 分钟  
MMrb 百万地下桶  
MMscf/d 百万标准立方英尺/日  
MOV 可动油体积  
Mscf/d 千标准立方英尺/日  
Mstb/d 千储罐桶/日  
Newton 牛顿  
psi 磅/英寸<sup>2</sup>  
psia 磅/英寸<sup>2</sup>绝对压力  
psig 磅/英寸<sup>2</sup>表压力  
PV 储层或油 (气) 藏单元的孔隙体积  
rb 地下条件桶  
r·cc 地下条件立方厘米  
s·cc 标准条件立方厘米  
scf 标准条件立方英尺  
sec 秒  
stb 储罐桶

# 目 录

作者序	
代表符号	
第一章 油藏工程的一些基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 烃类体积的计算	1
1.3 流体压深关系	2
1.4 采油量, 采收率	6
1.5 定容气藏工程	8
1.6 真实气体状态公式的应用	13
1.7 气体物质平衡; 采收率	16
1.8 烃的相特性	24
第二章 原油的PVT (高压物性) 分析	28
2.1 引言	28
2.2 基本PVT参数的定义	28
2.3 取样	34
2.4 实验室测定的基本PVT参数及其转变为现场工作情况的参数	36
2.5 表示实验室PVT分析结果的另一方法	42
2.6 PVT全分析	44
第三章 应用于油藏的物质平衡	46
3.1 引言	46
3.2 油藏物质平衡的通式	46
3.3 用直线方程表示的物质平衡	49
3.4 油藏驱动机理	50
3.5 溶解气驱	50
3.6 气顶驱	55
3.7 自然水驱	59
3.8 压实驱动以及有关的孔隙压缩现象	61
第四章 达西定律及其应用	65
4.1 引言	65
4.2 达西定律; 流体势	65
4.3 符号惯例	67
4.4 单位; 单位转换	68
4.5 真实气体势	71
4.6 基准压力	72
4.7 径向稳态流动; 油井的增产处理	73
4.8 两相流动; 有效和相对渗透率	76
4.9 提高原油采收率的机理	79
第五章 孔隙介质中径向流的基本微分方程	83
5.1 引言	83
5.2 径向流动基本微分方程的推导	83
5.3 解的几种情况	84
5.4 方程(5.1)用于压缩率小且为常数的流体时的线性化	87
第六章 稳定流动情况的向井流动方程	89
6.1 引言	89
6.2 半稳态解	89
6.3 稳态解	91
6.4 稳定流动公式的应用例子	92
6.5 半稳态情况流动公式的推广形式	94
第七章 径向扩散方程的定端流量解及其在油井测试中的应用	97
7.1 引言	97
7.2 定端流量解	97
7.3 不稳态和半稳态流动情况的定端流量解	98
7.4 无因次变量	106
7.5 叠加定理; 试井的通用理论	111
7.6 马休斯、布隆斯和哈塞布鲁克(MBH)的压力恢复理论	115
7.7 压力恢复分析法	125
7.8 多流量压力降落测试	140
7.9 油层部分打开的效应	148
7.10 测压的一些实用知识	149
7.11 续流分析法	151
第八章 真空气体的流动和气井测试	161
8.1 引言	161
8.2 真实气体径向流动基本微分方程的线性化及解	161
8.3 拉塞尔、古德利兹等人的解法	162
8.4 阿尔胡辛尼、雷米和克劳福特的解法	164
8.5 压力平方与假压力解法的比较	167
8.6 非达西流动	168



8.7	非达西系数F的求法	170	2.2	把分级脱气数据转换为现场使用的PVT参数B、R和B <sub>0</sub>	42
8.8	真实气体流动的定端流量解	171	3.1	溶解气驱, 低饱和油藏	51
8.9	气井测试的通用理论	174	3.2	溶解气驱; 低于泡点压力的油藏	52
8.10	气井多流量测试	175	3.3	在泡点压力以下注水	55
8.11	气井压力恢复测试	187	3.4	气顶驱	57
8.12	溶气驱油藏中的压力恢复分析	194	4.1	单位转换	70
8.13	压力分析法小结	195	6.1	井底污染	93
第九章	自然水侵	201	7.1	ei函数; 对数近似式	101
9.1	引言	201	7.2	压力降落测试	103
9.2	赫斯特-范艾弗丁根的不稳态水侵理论	201	7.3	无因次变量	106
9.3	赫斯特-范艾弗丁根水侵理论在历史谱配中的应用	210	7.4	从不稳态向半稳态流动的转变	109
9.4	菲柯维奇的有限含水区近似水侵理论	217	7.5	无因次压力函数的生成	123
9.5	预测水侵量	223	7.6	霍纳压力恢复分析法; 无限大油藏情况	133
9.6	水侵算法在蒸汽浸渍中的应用	226	7.7	压力恢复测试分析; 有界排流体积	135
第十章	非混溶驱替	229	7.8	多流量流动测试分析	142
10.1	引言	229	7.9	续流分析方法	156
10.2	物理假设及其含意	229	8.1	假设其为稳定流动的气井多流量测试分析	177
10.3	分相流量公式	234	8.2	设其为不稳定流动情况的气井多流量测试分析	181
10.4	贝克莱-列维勒-维驱替	237	8.3	气井压力恢复分析法	189
10.5	累计采油量计算	241	9.1	定端压力解的应用	208
10.6	分离流动情况下的驱替	249	9.2	用赫斯特和范艾弗丁根的不稳态理论进行含水区拟合	211
10.7	在驱替计算中对有限毛管过渡带的影响的考虑	260	9.3	使用菲柯维奇法计算水侵量	220
10.8	多层油藏中的驱替	266	10.1	分相流量	243
10.9	完全没有垂向平衡时的驱替	275	10.2	预测注水条件下的累计采油量	246
10.10	非混溶、不可压缩驱替的数值模拟	277	10.3	分离流动情况下的驱替	255
			10.4	多层油藏平均相对渗透率曲线的生成 (分离流动情况)	272
练习					
1.1	气体在气藏中的压力梯度	15			
1.2	气体物质平衡	21			
2.1	地下产量	33			

# 第一章 油藏工程的一些基本概念

## 1.1 引言

本章在说明油藏工程师的主要任务即在计算烃类地质储量、计算采收率和采出量随开发时间的变化的过程中介绍了许多油藏工程中的基本概念。

有关石油地质储量计算的论述，大部分集中在如何确定流体的压深关系和油藏中流体界面的问题。通常，一次采出量是通过地下流体等温压缩率的意义说明，而确定采收率和不同开发阶段的采出程度则用定容气藏的工程计算表述。本章以简要地定性说明多组份烃类系统的相特性作为结尾。

## 1.2 烃类体积的计算

考察充有液态石油的一油藏，其中的石油体积（石油地质储量）为

$$\text{OIP} = V\phi(1 - S_{wc}) \quad (\text{地下体积}) \quad (1.1)$$

式中  $V$ ——储层岩石的净总体积；

$\phi$ ——孔隙度或岩石中孔隙所占体积的百分数；

$S_{wc}$ ——共生水或束缚水饱和度，以所占孔隙体积的百分数表示。

乘积  $V\phi$  称为孔隙体积 (PV)，为油藏中能被流体占据的总体积。与此类似  $V\phi(1 - S_{wc})$  的乘积称为含烃孔隙体积，为油藏中能被烃类如油、气或两者所充满的总体积。

束缚水饱和度的存在（通常是 10—25% (PV)）是自然现象的一个例子，这对于流体在孔隙介质中的流动是很重要的。就是说在孔隙介质中，当一种流体驱替另一种流体时，被驱替流体的饱和度绝不会降到零。这适用于流体是不混溶（不相混合）的情况，意味着两种流体的界面之间具有有定限的界面张力。

这样，在深埋的生油岩中生成的石油运移到被水充满的储层圈闭中时，驱替掉其中的一些但不是全部的水，因而就形成了束缚水饱和度。由于那些水是不流动的，它在油藏工程计算中仅有的影响是减少了能被烃类占据的储层容积。

用方程 (1.1) 计算的石油体积是油藏（地下）体积。由于在油藏中处于高压和高温下的所有石油单位体积中都含有不同数量的溶解气，因此把油的体积表示为油和气已互相分离的储罐（地面）条件下的体积更有意义。这样原始储罐油地质储量为

$$\text{STOIP} = N = V\phi(1 - S_{wc})/B_{oi} \quad (\text{地面体积}) \quad (1.2)$$

式中  $B_{oi}$  是原始条件下的油层体积系数，其单位为油藏体积/地面体积，一般为油藏条件桶/地面条件桶 (rb/stb)。因此， $B_{oi}$  油藏桶的油采出地面后将得出一储罐桶油和原来在油藏中溶解于该油的气体量。油层体积系数的确定及其在油藏工程中的一般应用将在第二章中详细叙述。

方程 (1.2) 中的参数  $\phi$  和  $S_{wc}$  通常是用岩石物理分析法<sup>[1]</sup>来确定的，本文将不叙述其评定方法。储层净总体积  $V$  是根据地质和流体压力分析求得的。

地质家提供如图1.1所示的油藏顶部和底部等高线构造图。这种图具有高差为50英尺左右的等高线，问题是确定油水界面（OWC）的位置。测定这个界面以上被包围的储层岩石体积即可求得净总体积V。对于像图1.1（b）所示的情况，用电测方法是不可能确定界面位置的，因为井仅仅钻穿了含油带。然而，当油藏中的油水界面稍高时就可以使用这种技术。

确定油水界面或一般说流体间界面的位置需要知道油藏中的流体压深关系，这将在下一节中论述。

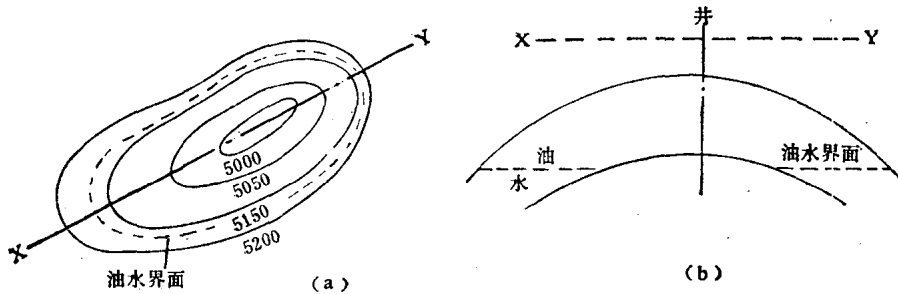


图 1.1 (a) 油藏顶部等高线构造图； (b) 沿X-Y线的油藏剖面

### 1.3 流体压深关系

因地层岩石及流体（不论其为水、油或气）的重量在任一深度造成的总压力称为覆盖层压力。在多数沉积盆地中，覆盖层压力与深度成正比，典型的压力梯度为1磅/英寸<sup>2</sup>/英尺。见图1.2。

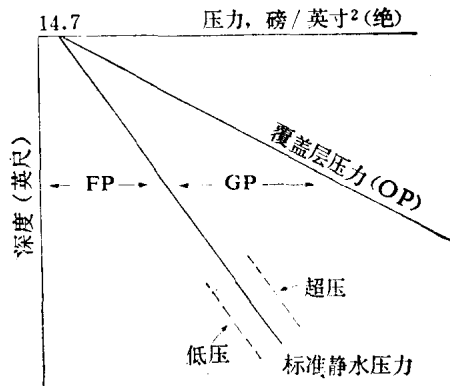


图 1.2 覆盖层压力和静水压力与深度的关系  
(FP=流体压力；GP=颗粒压力)

在一定深度处，覆盖层压力等于流体压力（FP）与在个别岩石质点之间作用的颗粒压力或叫基质压力（GP）之和，即

$$OP = FP + GP \quad (1.3)$$

特别是，由于在任一特定深度覆盖层压力是常数，因而

$$d(FP) = -d(GP) \quad (1.4)$$

就是说，流体压力下降将导致颗粒压力相应地增加，反之也是如此。

在烃柱中的流体压深关系是受油藏邻近的水压所控制的。在完全正常的情况下，任一深度的水压可用下式计算：

$$p_w = \left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{水}} \times D + 14.7 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.5)$$

式中  $dp/dD$  为水的压力梯度，决定于其化学成份（矿化度），对于纯水其值为0.4335磅/英寸<sup>2</sup>/英尺。

加上地面的一个大气压力（14.7磅/英寸<sup>2</sup>（绝））就把压力表示为绝对压力而不是相对于大气压力测量的表压力（磅/英寸<sup>2</sup>（表））了。在油藏工程中很多情况下涉及的是压差，因而不论用表压或绝对压力都一样，简单地用磅/英寸<sup>2</sup>表示。

方程（1.5）假设水压与地面连通并且水的矿化度不随深度而变。在多数情况下，前一假设是成立的，即使含水砂层通常与不渗透的页岩成交互层也是如此，因为这种明显的封闭在区域上的连续性的任何破坏会导致静水压力与地表的沟通。然而，后一假设是不现实的，因为矿化度可以随深度而明显变化。但是，为了说明问题，暂且假定静水压力梯度为一常数。下面将要谈到，对工程师真正有关紧要的是确定在含烃储层邻近的静水压深关系。

与这种正常情况不同的是异常的静水压深关系，它可用下列公式表示：

$$p_w = \left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{水}} \times D + 14.7 + C \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.6)$$

式中  $C$  为常数，当水压超过正常静水压力时  $C$  为正，而低于正常静水压力时为负。

在任一地层中的水如果其压力异常，那么该地层必然与其周围地层隔绝，因而静水压力到地表的连续性无法建立。布莱德雷<sup>[2]</sup>列举过可能造成封闭含水层中异常流体压力的各种条件，包括：

——温度变化：温度上升华氏1度，可使一密封的淡水系统压力上升125磅/英寸<sup>2</sup>。

——地质变化：如储层的隆起，或情况相当的地表被侵蚀，两者都会引起储层中的水压对其埋藏深度来说偏高。储层下降可产生相反的效果，这类储层可具有异常低的流体压力。

——不同矿化度的水之间的渗透：起密封作用的页岩在离子交换中扮演了半渗透薄膜的角色。如果受封闭的水其矿化度较周围的水高，渗透将造成异常高的压力，反之亦然。

造成异常压力的这些原因中有些是相互影响的，例如如果一个油藏单元隆起引起的超压会由于油藏温度的下降而部分缓和。

查普曼著的地质教科书<sup>[3]</sup>中对超压的机理作了综合说明。然而，油藏工程师比地质师更关心异常压力。主要的问题是：含水砂层是否是压力异常，如果是则它对烃类聚积的范围有何影响？

前面仅讨论了静水压力。烃类压深关系不同之处在于油和气的密度小于水，因而其压力梯度小些，典型数字为

$$\left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{水}} = 0.45 \text{磅/英寸}^2/\text{英尺}$$

$$\left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{油}} = 0.35 \text{磅/英寸}^2/\text{英尺}$$

$$\left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{气}} = 0.08 \text{磅/英寸}^2/\text{英尺}$$

这样，对于图1.3所示既有油又有游离气顶的油藏，使用上述压力梯度将得出图中左侧的压力分布。

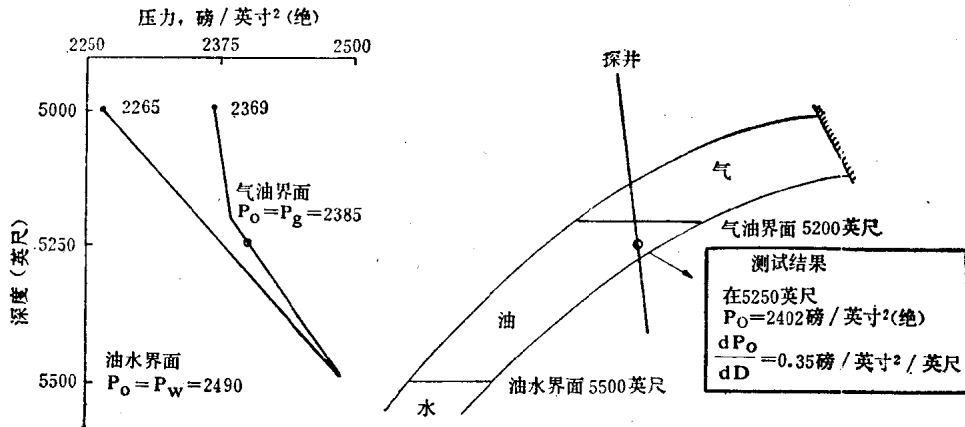


图 1.3 典型油藏的油和气的压深关系

在5500英尺的油水界面处，在油中的压力必然与在水中的压力相等，否则就不可能存在一个静界面。假设是正常静水压深关系，水中的压力可用方程（1.5）确定，化整到最接近的磅/英寸<sup>2</sup>数为

$$p_w = 0.45D + 15 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.7)$$

因此，在油-水界面处

$$p_o = p_w = 0.45 \times 5500 + 15 = 2490 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝})$$

油水界面以上，油压的线性方程式为

$$p_o = 0.35D + \text{常数}$$

并且由于在 $D=5500$ 英尺处 $p_o=2490$ 磅/英寸<sup>2</sup>(绝)，故可算出常数求得方程

$$p_o = 0.35D + 565 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.8)$$

在5200英尺的气油界面处，在两种流体中的压力必然相等，而且可利用（1.8）式算出它等于2385磅/英寸<sup>2</sup>(绝)。因此求得的气压线方程为

$$p_g = 0.08D + 1969 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.9)$$

最后，用上式可算出在构造顶部5000英尺处的气体压力为2369磅/英寸<sup>2</sup>(绝)。图1.3中的压深关系图画有烃柱的压力线，可以看出构造顶部的气体压力超出正常静水压力104磅/英寸<sup>2</sup>。因此在构造顶部钻的一口井，穿过页岩盖层在5000英尺深处开始进入油藏时，压力将从2265磅/英寸<sup>2</sup>(绝)突升到2369磅/英寸<sup>2</sup>(绝)。钻入油气藏时，压力突变的幅度决定于井钻入油藏的位置与烃水界面之间的垂直距离。对于同样的距离来说，若储层中仅为气时压力突变幅度将大些。

在钻探井和发现新的油气藏时，主要的目标之一就是确定上一节讨论过的确定流体界面的位置，以便计算石油地质储量。

考察图1.3所示的探井，它在油柱的顶部附近穿过油藏。根据该井的测井资料可以清楚地看出气油界面在5200英尺处。但是，油水界面却不得而知，因为它位于该探井钻达的油藏底部以下225英尺。该界面的位置仅能根据诸如测量压力和温度及取得油样的钻杆地层测试器<sup>[4]</sup>或电缆地层测试器的测试结果加以推断<sup>[5,6]</sup>。对油样进行分析后即可计算出油藏

条件下的原油密度和原油压力梯度（参阅第二章练习1）。根据测得的压力和压力梯度结合起来就足以确定油柱中的压深关系直线。如果图1.3中所示的井是在5250英尺处进行测试的，那么测得的压力将是2402磅/英寸<sup>2</sup>（绝），计算出的油的压力梯度为0.35磅/英寸<sup>2</sup>/英尺，这就足以确定油的压力线方程为

$$p_o = 0.35D + 565 \quad \text{磅/英寸}^2 \text{ (绝)} \quad (1.8)$$

而且把这一直线外推到与正常静水压力线相交处即得油水界面位于5500英尺。

这类分析决定性地依赖于已知的静水压深关系。例如，如果静水压力超压20磅/英寸<sup>2</sup>，那么油水界面位置将不是5500英尺而是5300英尺。这一事实可通过对图1.3进行直观检查或将超压水线方程（1.6）写成如下形式：

$$p_w = 0.45D + 35 \quad \text{磅/英寸}^2 \text{ (绝)}$$

然后按在油水界面处  $p_w = p_o$  的条件，将上式与方程（1.8）联立求解来核实。油水界面位置误差200英尺对于石油地质储量计算可能造成巨大的误差，当油藏面积很大时尤其如此。

正是由于这个原因，油藏工程师们对于一个新油气田要准备花很多时间（从而金钱）来确定静水压深关系。简便的方法是在探井中进行一系列的电缆地层测试器测试<sup>[5-6]</sup>。这种测试通常是电测后和下套管前对一个或多个油气储层上下的含水层的压力进行精确地测量。在不同深度进行了许多压力测量后，不论压深关系正常与否都可能准确确定油气储层邻近的静水压力线方程（1.6）。

在一个新油田或新油区，这类测试须在最初的几口井中反复进行，直到工程师们十分满意地认为静水压力在面积上是一致时为止。不这样做就可能导导致烃类地质储量计算发生很大误差，进而制定出非常不准确的油田开发方案。

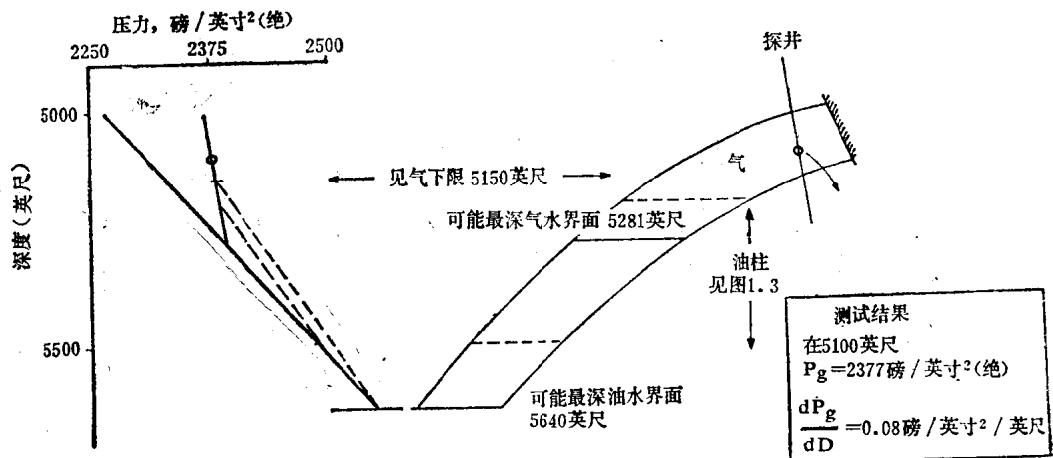


图1.4 说明根据在气顶区的井的测试结果来估算油柱可能高度的不定性

图1.4说明根据压力测量确定流体界面的另一种不定性。油藏与图1.3所示相同，但此处探井只钻穿了气顶。在5100英尺的深度处进行了测试，测得气压为2377磅/英寸<sup>2</sup>（绝），取得的气样分析结果（参见练习1.1）表明在油藏中的气压梯度为0.08磅/英寸<sup>2</sup>/英尺。根据这些数据可确定气压线方程为

$$p_g = 0.08D + 1969 \quad \text{磅/英寸}^2 \text{ (绝)} \quad (1.9)$$

因井内没有见到油，工程师可能以为他钻穿的只是一个纯气藏，因而外推（1.9）式使之与正常静水压力线

$$p_w = 0.45D + 15 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝}) \quad (1.7)$$

相交, 在交点  $p_w = p_g$  处的深度为5281英尺。假设没有油的这个位置在图 1.4 中标为可能最深气水界面 (DPGWC)。

另一方面, 井中见气的最深点为5150英尺 (GDT—见气下限), 没有什么实在的理由说明油柱不能在紧挨这个深度的下面出现。在这个油柱顶部的压力将与气体压力相等, 用(1.9)式计算得2381psia。因此, 假设油的梯度同前为0.35磅/英寸<sup>2</sup>/英尺则油压线方程为

$$p_o = 0.35D + 579 \quad \text{磅/英寸}^2(\text{绝})$$

按  $p_o = p_w$  的条件把上式同 (1.7) 式联立求解得出油水界面深度为 5640 英尺。这个在图1.4上标为可能最深油水界面 (DPOWC), 相应于可能的最大油柱下限。因此, 即使探井已经过细致地测试, 油柱的范围仍然存在高度的不定性。油柱可能确实是零 (DPGWC为 5281英尺), 或者在最乐观情况下其高度可达490英尺 (DPOWC为5640英尺), 或者它可能是在这两个极限之间的任一值。在图1.4中还表示了图1.3中的实际油柱位置。

因此, 当钻穿一个只见到气的储层时总应提出这样的问题: 在构造下倾部位是否存在可供开发的重要油柱或油环? 弄清这个问题的唯一可靠的方法是在构造下倾部位另钻一口井, 或者如果机械上可行则从原井拐弯打到下倾部位。这样看来, 作探井计划时把井布在构造最高点处不总是有利的。这样做虽然找到烃的可能性最大, 但是与钻探井的主要目的之一即求得尽可能多的有关储层及其所含流体的资料是不一致的。

利用本节介绍的方法确定储层中的流体界面后, 工程师就有可能计算为了计算烃的地质储量所必需的净总体积  $V$ 。例如, 在图1.1 (a) 中这个工作可通过利用面积仪对油水界面以上的等高线求积来完成<sup>[7, 8]</sup>。

最后, 关于 (1.2) 式的应用, 只有在式中的所有参数真正代表整个油藏的平均值时, 求得的原始储罐油地质储量 (STOIIP) 数字才是正确的。由于要得到这样的数字是不可能的, 所以通常是把式中的每个参数值都用概率分布值而不是确定值来代表。例如, 如果对于构造可能有几个不同的地质解释因而得出净总体积  $V$  的一个数值范围时, 就可把它表示为这个参数值的一个概率分布。

然后原始储罐油地质储量方程就可用某个与输入数据的质量相适应的统计算法进行计算, 结果以原始储罐油地质储量的概率分布表示。这个分布的优点是可以从最后的分布提取原始储罐油地质储量的平均值, 还可把结果用对此数字附有不定性的式子表示, 例如表示为关于平均值的标准偏差<sup>[9, 10]</sup>。如果不定性非常大, 那就有必要增钻一口井或一些井, 以便对油气田进行开发之前缩小不定性的范围。

## 1.4 采油量; 采收率

式 (1.2) 只需乘上采收率 (RF) 就可转变为计算最终采油量的公式。采收率代表可采出的原油分数, 它是在零与一之间的一个数, 因此

$$\text{最终采油量 (UR)} = (V\phi(1-S_{wc})/B_{oi}) \times \text{RF} \quad (1.10)$$

“只需乘上采收率”是容易说的, 但对任一油藏确定其采收率该多少并不很容易, 而且确定这个数字确实是油藏工程师最重要的一个任务。

首先, 要把两种采收率区分清楚。一种是受当时的经济情况而且愈来愈受到环境和生态问题控制的采收率, 另一种是取决于储层-流体系统物理性质的纯粹技术上的采收率。遗憾

的是，前者虽然可能是更有意义，但不是本书的主题。

主要的两类采油量称为一次采油量和补充采油量。一次采油量是依靠油藏及其毗邻的含水区中的自然能量可能采出的油量。补充采油量则是通过向油藏-流体系统加入能量可能采出的油量。补充采油的最常用形式是注水，注入油藏的水把油驱向生产井从而增加了系统的能量。后面在第四章 9 节及第十章中将介绍补充采油的机理，这里只讨论一次采油问题。

一次采油的全部机理依赖于油藏中流体的膨胀，考察如下的等温压缩率的定义即容易了解。

$$c = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_T \quad (1.11)$$

等温压缩率常用于大多数的油藏工程计算，因为人们认为它是一个合理的近似值。这是由于随着流体的产出并以对流方式从油藏移走热量时，作为无限延伸的热源盖层和底层岩石立即以传导方式补偿这部分热量，使得油藏温度保持不变。因此，本书中提到压缩率时指的就是等温压缩率。

在 (1.11) 式中的负号惯例是必需的，因为压缩率是作为正数定义，而流体在压力下降时发生膨胀  $\partial V/\partial p$  是负的。使用压缩率的定义来描述油藏的消耗时，把它表示成下面的形式更为直观

$$dV = cV\Delta p \quad (1.12)$$

式中  $dV$  是膨胀量， $\Delta p$  是压力降，两者皆为正值。这是所有形式的一次采油机理非常基本的方程式。如果把  $\Delta p$  当成是油藏压力从原始值到某个较低值的压力降  $p_i - p$ ，那么  $dV$  就相应于流体膨胀量，其表现就是产量。

利用油藏的自然能量来达到很高的一次采收率的工艺技巧在于保证  $dV$  也就是采出量是油藏中最有价值的油的采出量。做到这一点的方法可用图 1.5 来说明。

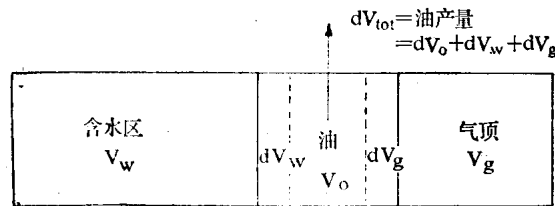


图 1.5 因油、水和气膨胀获得的一次采油量

该图表明了相当明显的事实，就是说为了开采油藏，井应钻入含油带。如果油藏具有气顶和边水，那么在整个系统中因均匀的压力降  $\Delta p$  而采出的油量将等于油、气和水的膨胀量之和，即

$$dV_{TOT} = \text{油产量} = dV_o + dV_w + dV_g$$

式中各项都是以地层条件下的流体体积表示。应用 (1.12) 式可把上式表示为

$$dV_{TOT} = c_o V_o \Delta p + c_w V_w \Delta p + c_g V_g \Delta p$$

考察上面三个分量中的压缩率在 2000 磅/英寸<sup>2</sup> (绝) 压力下的典型数字：

$$c_o = 15 \times 10^{-6} / \text{磅/英寸}^2$$

$$c_w = 3 \times 10^{-6} / \text{磅/英寸}^2$$

$$c_g = 500 \times 10^{-6} / \text{磅/英寸}^2 \quad (\approx \frac{1}{p}; \text{参阅 1.5 节})$$



显然，油和水的膨胀量对 $dV_{TOT}$ 的贡献只有在油和水的原始体积 $V_o$ 和 $V_w$ 都很大时才显著。另一方面，由于气体压缩率大，即使是比较小的气顶也会对油产量作出很大的贡献。

因此，显然是不应当采出含水区的水而是让水膨胀以驱替原油；同样，气顶中的气虽有商业价值也应让它暂时保存在油藏中借其膨胀对一次采油量起非常重要的作用。一次采油的机理将在第三章中更详细地叙述。

## 1.5 定容气藏工程

在本书的较早阶段就介绍定容气藏工程是因为这个课题比较简单。因此将用它来说明如何确定采收率和采出程度随时间的变化。

天然气之所以简单是因为其状态可以利用包含所有三个参数即压力、体积和温度的一个简单关系式来确定的少数物质之一。饱和蒸汽也属于这类物质。但是，含溶解气的原油却不存在这种关系，因而为了确定这种混合物的状态所需的PVT参数必须用实验方法求得。

对于理想气体即其分子间的吸引力和分子所占体积都是微不足道的气体的状态公式是

$$pV = nRT \quad (1.13)$$

式中，对于工业界使用的常规矿场单位来说

$p$ ——压力，磅/英寸<sup>2</sup>(绝)； $V$ ——体积，立方英尺；

$T$ ——绝对温度——兰金度数 ( $^{\circ}R = 460 + ^{\circ}F$ )；

$n$ ——磅分子数，一磅分子就是以磅表示的气体分子重量；

$R$ ——通用气体常数，对于上述单位其值为10.732磅/英尺(绝)·立方英尺/磅分子· $^{\circ}R$ 。

这个公式是波义耳、查尔斯、阿弗加特罗和盖吕萨克协力的结果，只适用于压力接近大气压力的情况。因为它是在该种压力条件下用实验导出的，而在该条件下气体的性态与理想气体相同。

过去曾对真实气体在极端情况下偏离理想气体状态公式的问题作过许多研究。比较驰名的一个是范特瓦尔公式，对于一磅分子气体可表示为

$$\left( p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (1.14)$$

此公式表示，在装有真实气体的容器壁上测得的压力将低于装有理想气体的情况。这是因为气体分子正要碰撞器壁时其动量被分子间的吸引力所降低；因此与动量的变化率成正比的压力降低。为了对此情况进行校正就必须向实测压力加上一项 $a/V^2$ ，其中 $a$ 是决定于气体性质的常数。同样，以分子占据的空间体积是微不足道的假设计量的体积 $V$ ，对于真实气体必须减去一个因数 $b$ ，此因数也决定于气体的性质。

采用(1.14)式来描述油气藏中遇到的真实气体时，主要缺点是该式适用的最高压力仍远低于油气藏的正常压力范围。

最近已导出了更成功的状态公式，例如贝蒂-布里奇曼和本尼迪-威普-鲁宾公式（这些公式在参考文献18的第三章中已作了概述）；然而，工业界在实践中最常用的公式是

$$pV = ZnRT \quad (1.15)$$

式中的单位与(1.13)式所用的相同， $Z$ 是无因次量并称之为 $Z$ 系数。把公式表示为

$$\left( \frac{p}{Z} \right) V = nRT$$