

油井开采原理

(修订本)

(加) T · E · W · 尼德

石油工业出版社

再 版 前 言

本书第一版于 1964 年问世以来，石油工业有了很大发展，并且市场稳定，尤其意识到，虽然初版本的销售情况良好，但有些主要内容已不适应当前石油工业发展形势，而且有的原始资料需要结合新的概念和已取得的成果进行修订或补充。我希望这个修订本能弥补初版本中的某些缺陷。

我不想写成一包罗万象的手册，而是着重于研究一种结构，使之不仅有助于采油工程师解决特殊问题，而且也能帮助解决日常生产中碰到的问题。为此目的，已对初版本做了非常广泛的修订，并引进了不少新资料；在选用课上，我的最高准则是普及与稳定。从适当、必要和可能出发，提供了一种数学分析，但是，在这种描述中，是想以假设和近似为基础，并不算是一种精确的体系。

希望本书能对有实践经验的工程师和大学生有较大的参考价值。确实，我认为本书最适合具备一定基础知识和实际经验的采油工程师，理由很简单，采油工程含有一种对油田的静态和动态进行“试探”的意思。大约在三十年前，W.E.Gilbert 就曾向我介绍了这个课题的吸引力，他常说，“在石油领域中没有一鸣惊人的事”。所谓意外的成果，是尽可能为今后的发展和新的探讨铺平道路。如果本书对阐明油井的动态有所裨益，就算达到本书的目的了。

我要感谢近年来许多石油工程师的工作，他们对我澄清思想、理顺思路都有助益。特别要感谢 Elom Blount 和所有同他

一起在 Mobil 石油公司矿场研究实验室工作的同事们。

最后，正如我在第一版的前言中所说的，我在本书中所提出的任何有价值的概念，都应归功于书中所列的众多作者和有关人士及朋友。

T.E.W. 尼德

于加拿大安大略省彼得伯勒

目 录

第一章 油藏工程	1
1-1 引言	1
1-2 渗透率	3
1-3 径向流动方程	11
1-4 压力恢复分析, 赫诺(Horner)法	18
1-5 完井效率	22
1-6 水油比特性	24
1-7 气油比动态	28
1-8 油藏动态曲线	32
参考文献	34
第二章 产量递减曲线	35
2-1 引言	35
2-2 指数式递减	36
2-3 双曲线递减和调和递减	44
2-4 小结——一个警告	51
参考文献	52
第三章 生产层的动态	53
3-1 引言	53
3-2 采油指数 (PI) 和向井流动特性曲线 (IPR)	53
3-3 影响向井流动特性曲线形状的因素	59
3-4 向井流动特性曲线的预测: 溶解气驱油田	64
3-5 紊流的影响	76
3-6 压力降对水油比的影响	76
参考文献	80

第四章 垂向举升动态	81
4-1 引言	81
4-2 两相垂向举升流的各种流动状态	82
4-3 垂直举升动态: Poettmann 和 Carpenter 法	84
4-4 垂向举升动态: ROS 法	94
4-5 垂向举升动态: Gilbert 法	96
4-6 压力-产量-深度格网	121
4-7 滑脱和流动阻力: 最佳气液比	123
4-8 油管尺寸的影响: 环状流	127
4-9 压力分布曲线: 比较性的概括	131
4-10 压力分布曲线的方程式	135
4-11 关于油管深度的说明: 井斜	145
4-12 向井流动特性关系: 自喷井	145
4-13 两个例题	150
参考文献	158
第五章 节流动态: 油井动态史	159
5-1 引言	159
5-2 节流动态	159
5-3 稳定流和不稳定流状态	165
5-4 油嘴尺寸变化的影响	169
5-5 静压对自喷井效率的影响	171
5-6 一个开采区的产量预报	174
5-7 生产时气液比微小变化的影响	187
5-8 间歇出油周期	190
5-9 井下油嘴和出油管油嘴: 一般说明	198
参考文献	200
第六章 气举原理	201
6-1 引言	201
6-2 实例	202
6-3 压缩机的需用功率	207
6-4 压缩机功率的最低要求	208

6-5 气举在一口井开采历程中的地位.....	224
6-6 必要的气举凡尔.....	224
参考文献	226
第七章 气举凡尔和管柱设计	227
7-1 引言.....	227
7-2 差压式凡尔.....	228
7-3 通过节流孔的气流.....	231
7-4 气举管柱设计示例：差压式凡尔.....	233
7-5 承压腔盒式凡尔.....	245
7-6 管柱设计举例：承压腔盒式凡尔.....	249
7-7 结束语.....	256
参考文献	257
第八章 用段塞式产液	258
8-1 引言.....	258
8-2 关于液体段塞的三种开采方法.....	259
8-3 液体在敞口直立钢管中的回升.....	262
8-4 最佳循环次数和效率.....	266
8-5 气液比是液塞大小的函数.....	276
8-6 天然柱塞式气举.....	281
参考文献	287
第九章 有杆泵抽油	288
9-1 引言.....	288
9-2 泵抽周期.....	288
9-3 地面和井下设备.....	290
9-4 光杆的运动.....	292
9-5 杆式泵的近似分析：单一的抽杆尺寸.....	296
9-6 在杆式泵抽油中用级次抽油杆柱.....	308
9-7 原油通过泵柱塞的漏失量.....	309
参考文献	313
第十章 抽油井的仪器	314
10-1 引言.....	314

10-2	抽油泵的示功图：一般介绍	314
10-3	泵的示功图：测试结果的解释	315
10-4	地面动力仪：概述	317
10-5	地面动力仪记录卡的定性解释	319
10-6	示功图的计算机分析	322
10-7	在环形空间封闭及敞开时抽油	324
10-8	环形空间中流体的性状：在环形空间敞开时抽油	325
10-9	环形空间液面的性质	328
10-10	确定抽油井的井底流动压力	329
	参考文献	342
第十一章	抽油井的特殊问题	343
11-1	引言	343
11-2	自由气对泵效的影响：气锚	343
11-3	抽汲喷油	349
11-4	内抽外喷	349
11-5	最佳泵挂深度：环形空间间歇生产	356

第一章 油 藏 工 程

1-1 引 言

本书的主旨是说，油藏和各井本身及地面设施是一个综合系统，而一口生产井仅只是该系统的一部分。这个系统的每一个单元都相互影响，因而，要达到有效的开采，必须保证各单元之间相互配伍。

因此，一位合格的采油工程师应具备扎实的油藏工程知识，而且还需充分熟悉油井和地面设备的工艺技术进展。然而，作者的目的是不是编写一本参考性的手册，而是要强调在设计和管理生产井时所必需牢记的原理。希望掌握了此类原理能有助于工程师适应由于油藏条件变化、设备的进展和可购置情况，以及指导其公司经营的全面的经济因素等所造成的各种制约和时机。全面评述所设计的把油、水 and 气从地层举升到地面的各种主要完井类型，可构成一篇恰当的前言。

油井基本上有四种开采方式，可以是自喷、气举、泵抽，或间歇开采。这些开采方式的每一种又都各自有若干变型，且这些类型之间存在一些相互交叉。自喷井可算是一种简便的自喷完井法。它通过油管产油，井中可以装也可不装油套管封隔器，油嘴既可装在油管内，也可装在井口装置中，或者装在地面出油管中。完井方式可以是小井眼，还可以用间歇自喷定时控制来控制间歇产油，或者设法迎合该井的限额产量。气举开采可以是连续气举，也可以是间歇气举。有各种型式的气举阀芯可供采用，此

项工艺还可以同另一类举油方法结合起来，例如与一个自由降落柱塞结合而成活塞气举。泵抽法更有各种不同的类型，常用的是有杆泵、水力活塞泵和离心泵，而每一类又可用不同的工艺技术，例如常规抽油机或空气平衡抽油机，长冲程抽油等。间歇开采（或用多段式开采）则可以用自由降落柱塞，用舱室(chamber-cift)气举装置，用间歇气举作业等措施。

这些基本开采工艺的每一种都有很宽的使用范围，图 1-1 所示可说明这种情况。该图是 Babson 所作并经改编的简化图^[1]。但是，之所以必须用这样粗线条的区划法，是由于认识到不仅区划线不清楚，而且还有宽广的交错区。但是，在为一口具体油井或井组确定一个最佳生产工艺时，必须考虑许多因素。需要考虑的一些重要参数是：

1. 井深；
2. 目前的和预期的气液比 (GLR_s)；
3. 砂和蜡；
4. 井斜；
5. 套管直径；
6. 目前的和将来的向井流动特性关系 (或 IPR；产油指数——油井的潜力)；
7. 地层压力和压力递减；
8. 二次和三次采油计划；
9. 今后的开采期限和预期的累积产量；
10. 高压天然气的可用性；
11. 油井大修的各种困难 (如近海完成的井)；
12. 原油的粘度；
13. 目前和将来的水油比 (WOR_s)；
14. 根据公司的方针和要求确定的经济和利润指标。

本书第一章的以后各部分将紧紧围绕着采油工程师必须永远

牢记的一些油藏动态的概念加以论述。不打算全面或严格地逐条论述。目的是要把它们放到一个恰当的、科学分类上；更重要的是，在这种开采方式下当采油工程师通盘考虑问题时能够掌握下面论及的原理。

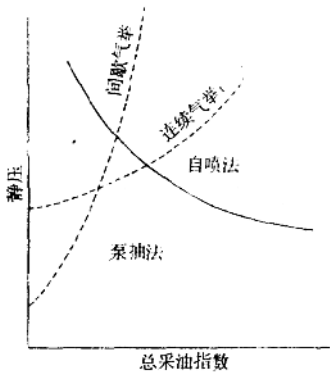


图 1-1 四种基本开采方法的相对使用范围⁽¹⁾

1-2 渗透率

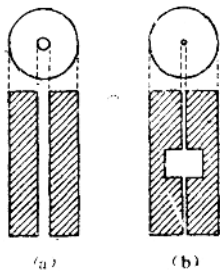


图 1-2 具有相同孔隙度的岩石可以有极不相同的渗透率

渗透率是流体流过（在非紊流状态下）孔隙性岩石难易程度的单位，并且是孔隙之间相互连通程度的函数。例如，图 1-2 中示出的两个样品假设具有相同的孔隙度。显然，流体从北向南流动时通过样品 a 要比通过样品 b 容易得多，这是因为 b 中的流动受到细的毛细管的限制作用的缘故。

亨利·达西在探讨流经滤砂的水流时^{〔2〕}对渗透率做了具有先驱意义的工作，因而在石油工业中渗透率的单位通称之为达西。毫达西 (md) 是一个达西的千分之一，是工业界通用的单位。含油砂层的渗透率变化范围约从 1 毫达西到 1000 毫达西 (0.001~1 达西)，或者更高些。

对一块渗透率为恒定值 k 的岩石，当粘滞流流经它时，达西公式可以写成

$$\frac{Q}{A} = - \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (1-1)$$

式中 Q/A ——流经一块面积为 A 的岩石面时每单位横截面积上的流量；

dp/dl ——在整个流动方向上的压降速度；

μ ——流体的粘度。

可以证明，考虑到公式中各因素的量纲，那么 k 的量纲应为面积。可惜，在油田术语中这种用来求 k 的度量体制却反而是非标准的^{〔2〕}。设 Q 以立方厘米/秒计， μ 以厘泊计， l 以厘米计， A 以平方厘米计，而 p 以大气压计，则结果 k 值为达西；用 1000 乘这个结果得出的答案是毫达西 (md)。

达西与面积间的相互关系是

$$1 \text{ 达西} = 10^{-8} \text{ 平方厘米 (近似值)}$$

即 1 达西等于一亿分之一平方厘米，而 1 毫达西则等于上值的千分之一。

在同一储集层岩石的不同部位，其渗透率会有很大的变化范围，因而想把个别岩心的渗透率测量得过于精确意义不大。一般说来，通常认为当渗透率值低于 50 毫达西时，那么开采该油藏的那些油井，以每英尺净油层的日产量为衡量依据，都是一些产量较低的低产井（除非实施某些地层处理措施，如压裂或酸化）；而当其数值介于 50~250 毫达西之间时，油井将会是一

些产量较好的井；若渗透率大于 250 毫达西（在其他条件相同的情况下），这将会是一些高产井。然而，这样笼统地概括并没有考虑到具体油井的各种麻烦，如高含水、高气油比以及出砂等问题。渗透率除了处处都有改变外，它还有方向上的变化。在许多油井内，因为产油层最初大致是成水平层状一层层沉积下来的，所以垂向渗透率（垂直于层面的渗透率）比水平渗透率（平行于层面的）差得多。此外，在沉积过程中还可能发生砂粒按其长轴定向沿大致相同的方向排列（例如靠液流作用）；在这种情况下，不同的水平方向的渗透率就会有所差异。还要牢记的是，公式（1-1）仅适用于粘滞流或层流。实验室的试验连同根据矿场数据进行的计算表明，一般情况下，一个采油的油田其地层中的油流速度满足这种层流条件，也许在井筒本身一两英尺范围内则并非如此（见 3-4 和 3-5 节）。然而，对某些高产气井，湍流可能起主导作用（见 Katz 等人的举例，参考文献[3]的 46—51 页和 436—427 页）。

虽然渗透率和孔隙度之间没有直接的联系，但有理由设想，对于处在类似条件下的砂岩层，一般说来，其渗透率随着孔隙度而增高。事实上也常常发现，在一个油田内，或者是在一个覆盖较广、单一的地层单元内，当绘出渗透率的对数与孔隙度的关系图（图 1-3）时，仍可能得到一条合理的相关直线。

实际上，大多数油藏至少含有两种流体，即共存水和油；如果也存在自由气的话，则油藏中将含有三种流体。显然，原油流过一块假设含有 20% 共存水的岩石，要比流过一块不含共存水的同样岩石，其流动阻力要大，这是因为共存水会堵塞一些流道。这个课题已有不少著作进行过探讨^[4-8]，有关这个课题的首创工作是由 Wyckoff 和 Botset 所进行的^[4]。

例如假设有一个油水系统，那么通过与公式（1-1）相比拟的办法，对油和对水的有效渗透率 k_o 和 k_w 可以分别用下式

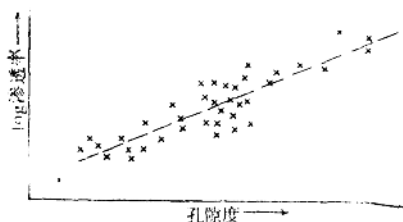


图 1-3 许多油田都可见到的孔隙度与渗透率的典型关系

确定

$$k_o = - \frac{Q_o \mu_o}{A} \bigg/ \frac{dp}{dl} \quad (1-2)$$

和

$$k_w = - \frac{Q_w \mu_w}{A} \bigg/ \frac{dp}{dl} \quad (1-3)$$

在上述两个公式中原油的压降速度可能稍微不同于水的，这是由于当流体流经直径微小的流道和孔隙时受到毛管力影响的缘故。只不过是这种差异在此处忽略不计而已。

实验发现，原油的粘度、水的粘度、总的通过速度（设粘滞流动条件保持不变）、回压以及岩心的长度和横截面积等，对 k_o 和 k_w 与岩心中的流体饱和度的关系曲线多少有些微小影响^①。但是一般说来，任何特定的岩心，其 k_o 和 k_w 曲线仅取决于该岩心的油和水的饱和度 S_o 和 S_w （或者仅取决于其中一

① 然而，应该注意的是，有些正常的倾向即使不算很显著，但还是清晰可辨的。这就是，看来这些曲线还取决于流体饱和度的变化方向，例如含油饱和度和增高或降低（见 Pirson⁽⁹⁾ 81—83 页有关这现象的论述）。——原书注

项, 因为 S_o 和 S_w 之和为 1)。

k_o 和 k_w 等系数分别称之为油和水的有效渗透率。关于一个油水系统的有效渗透率曲线, 有三个重点必须注意:

1. 系数 k_o 随着 S_w 由零往上升而迅速下降, 同样, k_w 随着 S_w 由 1 往下减少而急剧下降。就是说, 很小的含水饱和度可以显著地减低原油流过岩石的畅通性, 反之亦然。

2. 系数 k_o 降到零时, 岩心内仍具可观的含油饱和度 (图 1-4 中点 C)。另一方面, 低于某一最低含油饱和度时岩心中的原油就不能再流动了; 这种最低含油饱和度称之为残余油饱和度 (S_{or}), 或者称作临界含油饱和度 (S_{oc})^①, 对水也是一样, 叫做残余水饱和度 (S_{wr}) 或临界含水饱和度 (S_{wc}), 见图 1-4 中的 D 点。

3. k_o 和 k_w 两个值总是低于 k (除了在点 A 和点 B 以外)。事实上, 除了在点 A 和 B 以外, 在任何含油饱和度处其 k_o 和 k_w 的总和都低于 k , 即

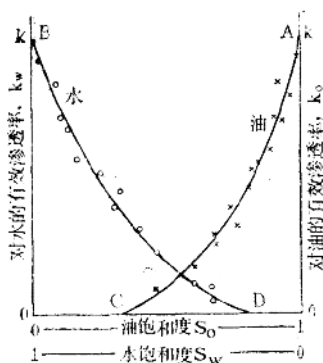


图 1-4 典型有效渗透率曲线 (油水系统)

① “残余油饱和度”这个术语也被用来定义油田开发末期含油带内剩余的原油饱和度和。这种残余油饱和度可能大大超过临界含油饱和度。

$$k_o + k_w \leq k \quad (1-4)$$

现在假设用两块渗透率 k_1 和 k_2 不同的岩心做双液流试验。可能产生如图 1-5 所示那样的曲线。此类曲线所给出的两个岩心的 k_w-k_o 曲线不能直接对比，这是因为它们是从不同点 k_1 和 k_2 开始的。然而，如果不是绘制 k_w-k_o 对流体饱和度的关系曲线，而是绘制比率

$$k_{r,w} = \frac{k_w}{k}$$

$$k_{r,o} = \frac{k_o}{k} \quad (1-5)$$

的关系曲线，于是在每一种情况下其 $k_{r,w}-k_{r,o}$ 曲线都是从点 1 开始，故可以对不同的 $k_{r,w}$ 曲线之间（同样 $k_{r,o}$ 之间的）进行对比（图 1-6）。量值 $k_{r,w}$ 和 $k_{r,o}$ 分别称之为对水和对油的相对渗透率。应该注意， $k_{r,w}$ 和 $k_{r,o}$ 永远处于 0 到 1 范围内，而且由前述公式（1-4）

$$k_{r,o} + k_{r,w} \leq 1 \quad (1-6)$$

可惜的是，相对渗透率曲线均明显地取决于地层；如果有机会要

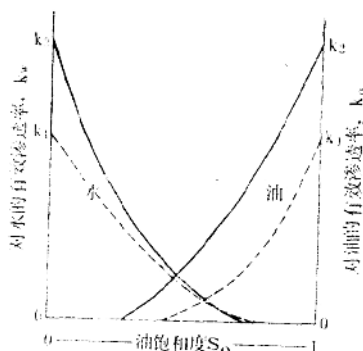


图 1-5 两块不同的岩心的有效渗透率

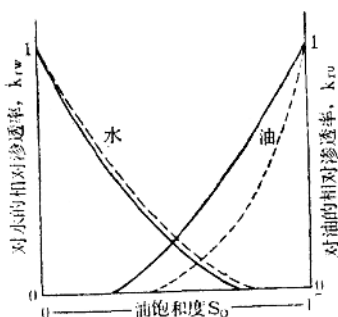


图 1-6 两块不同的岩心的相对渗透率

使用这种曲线（例如进行油藏研究），那么要用试验方法确定所研究的具体地层的曲线。如果无法做到这一点，应求助于文献中发表过的试验曲线。

到此为止，我们所考虑的只是水-油系统。对于气-油和 气-水系统，同样也可作出类似曲线。这些系统的相对渗透率曲线有如图 1-7 中所示的一般形状。在这种情形下，其重点有如下述：

1. 虽然 $k_{r,g}$ 随着 S_g 从 0 往上升而迅速下降，但原油的饱和度很小时却对 $k_{r,g}$ 往往只有相对很小的影响。

2. 存在临界含油饱和度 $S_{o,c}$ 和临界含气饱和度 $S_{g,c}$ 。气-油系统中的临界含油饱和度当然不同于水-油系统的临界含油饱和度，尽管用于测定的是同样的岩心。临界含气饱和度通常约为 5~10%。

3. $k_{r,g}$ 和 $k_{r,o}$ 两者之和小于或等于 1，即

$$k_{r,g} + k_{r,o} \leq 1 \quad (1-7)$$

4. 看来 $k_{r,g}/k_{r,o}$ 比值趋向于随着岩石的固结程度而增加。这样，一般说来，越是低孔隙和低渗透岩石，在给定的含气饱和度下，气体的相对渗透率与油的相对渗透率之比就越高（见

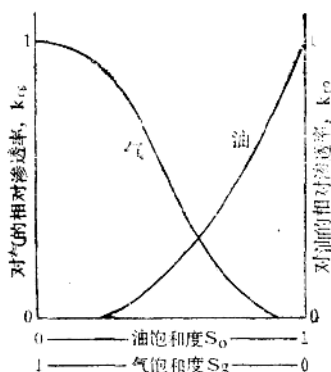


图 1-7 典型相对渗透率曲线（气-油系统）

参考文献〔9〕中 68-74 页）。

5. 还有一点是涉及气-油曲线的，但对水-油系统则不明显，那就是共存水的问题。曾经发现，为了取得能与矿场一致的气-油相对渗透率曲线，必须用含共存水的岩心进行实验。在这种情况下，共存水可视为是岩石的一部分，也应该在有共存水的情况下测定单相流体原油和气的渗透率。这就是为什么气或油的饱和度有时用含烃类的孔隙空间来表示的理由；以此假设为根据，共存水就是不能动的一相，其唯一的特性是降低了有效孔隙度●。

关于相对或有效渗透率的常规实验，应当注意的是，所用的实验方法对实验结果会有显著的影响，以致根据曲线的一般形状进行定性论证可能是恰当的，若用这些曲线来进行定量论证却总

● 这个论点是假设，共存（或隙间）水饱和度低于或等于临界含水饱和度，所以不会发生水的移动。然而在许多油田上，共存水饱和度大于临界含水饱和度，以致有些油井从开始生产第一桶油时起，就有水随之产出了。这种共存水的产出特点是该井产液的水含量多是一个常数（见 1-6 节）。——原书注