

石油技工学校试用教材



油藏渗流物理基础

河南石油勘探局技工学校 陈亘贤 主编



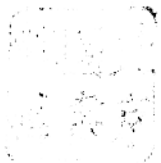
312

87
TE312
5
3

油藏渗流物理基础

河南石油勘探局技工学校 陈亘贤 主编

2010/12



石油工业出版社

423610

绪 论

就采油工作者的愿望来说,从地下采出的原油越多越好。但是,这决定于地下储集有多少原油以及这些原油能流出来多少。

采油工作者的任务,就是要把已经掌握的地下原油储量尽可能地转变成地面的原油产量,用采油的术语来讲,就是要有合乎要求的采油速度和尽可能高的最终采收率。而采油速度和采收率的高低,主要决定于人们在开发油田中如何进行工作,其成功与否的关键在于认识和掌握油气流从地层到地面的流动规律,并根据这些规律采取得当的措施。

油气流从地层流进油井,又从油井流至地面,是一个连续不断的完整过程。故作为采油工人,在油井管理和动态分析中,时刻都应以油层和油井的协同工作为出发点,不但要了解油气流从生产井底至地面的流动,也应当了解油气流从地层的岩石孔隙进入生产井底的流动。而且,只有地层中的原油大量流进了生产井,自喷井才有可能多喷油,抽油井才有可能多抽油。因此,要管好油井,得先管好油层,所以说“采油工人的岗位在地下”是有深刻道理的。人们在进行开发的实际工作时,总是把油层和油井联系起来的,但在研究中,把油气流从地层至地面的流动分为两个大的阶段:油气流经过油层岩石孔隙流入井底为第一阶段;从井底流至地面为第二阶段,这是为了方便才分两部分来研究。于是,在石油技工学校的课程设置上,就相应地出现了分工,上面所说的“第一阶段”的有关内容就构成了本课程,“第二阶段”的有关内容就属于《采油工程》的范围了。

当分析研究原油在油层中的流动时,自然离不开要考虑原油的性质和它的流动环境,油层中的原油,储集在岩石裂隙中,处于高温高压条件下,与地面原油的性质大不相同,加上油层中还有天然气和油层水,因而在分析研究问题时,就不能按我们在地面常见的状况去对待,而是要按照地下的实际情况去对待。但采油工作和其它矿藏开采(如采煤等)相比,最不同的是采油工人不能直接进入矿层(油层)去观察情况,而工作本身又要求从油层的实际情况出发,要解决这个问题,只好依靠我们在工作中所测取到的资料,在有关的理论指导下进行分析推断,间接地观察油层中的情况。《油藏渗流物理基础》这门课的任务,就是让学生了解油层流体向井底流动的有关基础知识,作为分析生产、管好油水井的工具。

本课程将在《采油地质》课的基础上,介绍油层流体(原油、天然气、油层水)和它们的储集与流动环境——油层在渗流方面的有关性质,从采油的角度出发,讲清这些性质在采油中的意义。在介绍了渗流的物质基础(油层和其中的流体)之后,进而介绍渗流的简单规律,并初步介绍这些规律的应用。通过这门课程的理论学习和实验,再加上同学们已学过的地质概念,希望在脑海里建立起一个油层模型。换句话说,能在这方面进行一定程度的形象思维。不但是为学好《采油工程》课打下基础,而且在将来的生产中能综合利用本课程以及《采油工程》、《修井工艺》等专业课的知识去分析和解决问题,管好油层和油井,使油层和油井能够良好地协同工作。

前 言

本书是根据石油部劳资司1984年审定的石油技工学校采油专业《油藏渗流物理基础》教学大纲编写而成。全书用62学时授完，带“*”号的内容可根据学生的具体情况选学。

本教材的计量单位，遵照国务院《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》规定，我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。考虑到目前现场使用单位的实际情况，故在教材中既采用法定计量单位，也采用现场习惯使用的单位，对不同的计量单位作适当的交叉使用，并附换算表，使学生能适应目前的过渡局面。

本书由几位讲授《油藏渗流物理基础》课程的同志参加编写，以他们自己授课的讲稿修改充实编成教材。第一章由大庆石油管理局技工学校黄献瑞编写，第二章由江汉石油管理局技工学校曾永陵编写，第三章和第五章由河南石油勘探局技工学校陈巨贤编写，第四章由新疆石油管理局克拉玛依技工学校陈建元编写，由陈巨贤任主编修改定稿，拟定复习思考题。由于编者水平有限，缺点、错误在所难免，敬请读者提出批评指正。

编者

目 录

绪论

第一章 油层的物理性质.....	(1)
第一节 油层岩石的孔隙度	(1)
第二节 油层岩石的渗透率	(5)
第三节 油层中流体饱和度的概念及测定原理	(8)
第四节 孔、渗、饱在采油中的意义及相互关系	(10)
*第五节 油层的碳酸盐含量	(13)
第六节 油层压力与温度	(15)
第二章 油层流体的特性.....	(19)
第一节 天然气	(19)
第二节 地层油	(26)
第三节 油层水	(34)
第三章 油层驱油机理简介	(41)
第一节 油层的驱油能量	(41)
第二节 油层中的渗流阻力	(45)
第三节 水驱油机理	(49)
第四节 油藏驱动方式	(51)
*第五节 油藏物质平衡方程简介	(57)
第四章 单相稳定平面径向流	(63)
第一节 有关的概念	(63)
第二节 平面径向流的渗流公式	(65)
第三节 影响产量的因素分析	(71)
第四节 公式应用简例——稳定试井	(72)
第五章 保持油层产油能力及提高采收率	(81)
第一节 概念	(81)
第二节 提高采收率的途径	(84)
第三节 提高采收率的主要方法简介	(86)
附录	(94)
附录 I 单位换算表	(94)
附录 II 本书使用的符号	(95)
主要参考文献	(96)

第一章 油层的物理性质

深埋地下的石油，象喷泉一样，源源不断地从地下通过油井喷出地面。或象水井的水一样，从井底被人们抽提上来。人们不禁会问，地下是不是有“石油河”或“石油海”呢？不是的。石油是埋藏在地下具有孔隙、裂缝或孔洞的岩石中，这种储藏石油的地层就是油层。目前世界上开发的油层，绝大部分是沉积岩组成的，如砂岩、石灰岩等等。砂岩油层主要是孔隙储油，石灰岩油层主要是裂缝或孔洞储油。

本章介绍砂岩储油层的物理性质。

砂岩是由各种大小不同的矿物颗粒，经不同的胶结物以不同的胶结方式胶结而成。不同的油田，其岩石的矿物组成也不同。砂岩主要由石英（ SiO_2 ）、长石、云母、粘土矿物（高岭石、蒙脱石等）、碳酸盐、亚铁化合物等组成。石灰岩又称碳酸盐岩，主要以方解石（ CaCO_3 ）、白云石（ CaCO_3 、 MgCO_3 ）为主。油层的化学组成会影响储油层的物理化学性质。

由于形成砂岩的颗粒大小、形状千差万别而且相互交错，在胶结过程中，胶结物和岩石颗粒又相互分散，因此形成十分复杂的孔隙结构。有的地层受到外力（自然的或人为的）作用形成裂缝。我们将具有这类裂隙结构的岩层称为多孔介质，因为，我们所研究的地下流体（石油、天然气、油层水）要在其中储存和流动。

地下流体在多孔介质中的流动称为渗流。渗流是很复杂的，但在油田开发中却不能避开它，为了多采油，作为采油工人还必须了解它。因此，本章所介绍的油层的物理性质也重点介绍其对地下流体渗流有意义的性质。

第一节 油层岩石的孔隙度

一、孔隙度的概念

储油岩石的体积包括岩石固体骨架（颗粒及胶结物）和孔隙空间两部分（图1-1）。这两部分是互相依存的，没有孔隙空间就无所谓骨架。石油、天然气和油层水储集在岩石孔隙中。显然，油层中孔隙空间大，可供储存石油的场所就大，意味着可能储油量的多少。因此，我们必须对孔隙容积的大小有所了解。

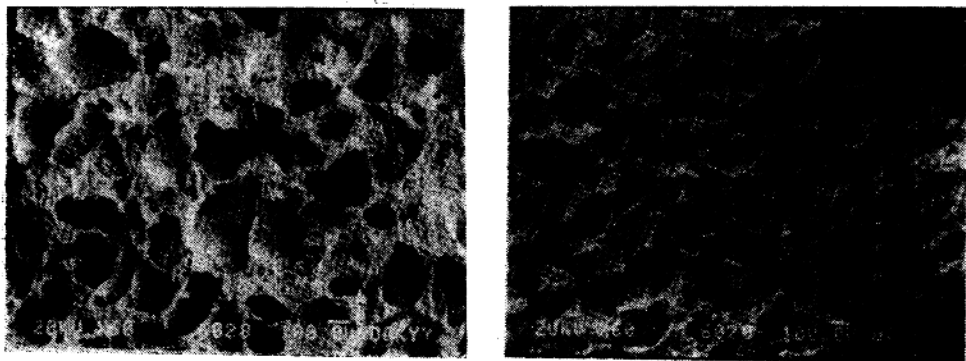


图1-1 岩石孔隙结构

单个孔隙的孔径大小不同，在渗流中所起的作用不同。根据单个孔隙的孔径大小将孔隙大致分为三类。

直径大于500微米（1微米=10⁻³毫米）以上的称为超毛管孔隙，主要是由大的均匀砂粒组成。在渗流中毛管力（将在第三章里详细介绍）的作用较小，其流动规律近似于管道流动。

直径在500~2微米之间的称为毛管孔隙，主要由中等砂粒组成。绝大多数含油砂岩的孔隙是由这类孔隙构成的，在这类孔隙中毛管力的作用较大。

直径小于2微米的称为微毛管孔隙，由于这类孔隙极其微小，孔壁表面的固体分子的作用力很显著，部分孔隙的半径和分子作用半径差不多，使储存其中的流体在油藏自然条件所形成的压差下无法流动，如果超毛管孔隙或毛管孔隙的四周被微毛管孔隙所包围，其中的流体亦不能流动。

根据孔隙的连通状况又分为连通孔隙和不连通的死孔隙。

在油田开发中，按其对流体的流动意义分为两类：一类是可供流体流动的称为有效孔隙；另一类是流体不能在其中流动的，称为无效孔隙或死孔隙。

前面所述都是就单个孔隙而言的，在油田开发中，常常要了解孔隙集合体的容积大小，简称为孔隙体积，孔隙体积的大小用孔隙度来描述。

孔隙体积在岩石体积（外表体积）中所占的百分数（或小数）称为孔隙度，用公式表示为

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1-1)$$

式中 ϕ ——孔隙度；

V_p ——孔隙体积；

V_t ——岩石（外表）体积。

根据有效孔隙和死孔隙的区别，孔隙度又分为绝对孔隙度和有效孔隙度。

绝对孔隙度（又称总孔隙度、完全孔隙度）是指岩石中的总孔隙体积占岩石（外表）体积的百分数（或小数）；有效孔隙占岩石（外表）体积的百分数（或小数）称为有效孔隙度。根据“总孔隙体积=有效孔隙体积+死孔隙体积”便可以区分出二者的不同。

总孔隙体积 V_{tp} 可用岩石外表体积 V_t 减去岩石固相（骨架）体积 V_s 来表示，即

$$V_{tp} = V_t - V_s \quad (1-2)$$

在公式（1-1）中，若 V_p 的数值用的是 V_{tp} ，则计算出的 ϕ 值为绝对孔隙度；若 V_p 值用的是有效孔隙体积 V_{ep} ，则计算出的是有效孔隙度。显然，绝对孔隙度大于有效孔隙度。一般应用的“孔隙度”指有效孔隙度，若用到绝对孔隙度时必须特别指明。

二、煤油法测孔隙度

孔隙度的测定方法很多，有用地球物理测井的方法求得，也有用岩心在实验室内测定。在实验室测岩心的孔隙度，不外乎是测定岩心的外表体积 V_t 和孔隙体积 V_p 或岩心固相（骨架）体积 V_s 。由于测定这些体积的方法很多，所以目前在矿场上使用各种各样测孔隙度的方法，煤油法是其中用得比较广泛而又简单易懂的方法，介绍它可以加深对孔隙度的理解，其测定过程如下。

（1）除油（抽提净岩样内原来所含的流体）、烘干、除去岩样表面粉屑及棱角后，在空气中称得岩样的重量 G_1 （干岩样在空气中的重量）。

(2) 在真空(3至10毫米汞柱)条件下让岩样饱和煤油,在煤油中称得岩样的重量 G_3 (饱和煤油岩样在煤油中的重量)。

(3) 取出岩样,揩去表面煤油后称得重量 G_2 (饱和煤油岩样在空气中的重量)。

(4) 计算。根据阿基米德原理,物体在液体中失去的重量等于该物体在液体中所排开同体积液体的重量。

$$V_f = \frac{G_2 - G_3}{\gamma_o} \quad (1-3)$$

$$V_o = \frac{G_2 - G_1}{\gamma_o} \quad (1-4)$$

式中 γ_o ——煤油的重度。

由公式(1-1)

$$\phi = \frac{G_2 - G_1}{G_2 - G_3} \times 100\% \quad (1-5)$$

这种方法测出的孔隙度是有效孔隙度。

至于绝对孔隙度的测定,在 V_f 求出之后,将岩样粉碎测定其固相体积 V_s ,由下面公式计算

$$\phi = \frac{V_f - V_s}{V_f} = 1 - \frac{V_s}{V_f} \quad (1-6)$$

通常用的是有效孔隙度。

三、影响孔隙度的因素

影响孔隙度大小的因素,一般有以下四方面。

(一) 颗粒的排列方式(图1-2)

假若颗粒是均匀的球体,挨紧排列,则正方形排列最松,理论计算其孔隙度为47.6%;菱形排列最紧,理论计算其孔隙度为29.95%。

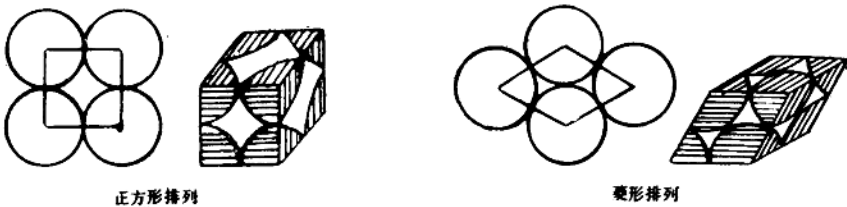


图1-2 颗粒排列方式

在均匀球体的排列中,孔隙度的大小与颗粒的直径无关。单个孔道的大小与孔隙度的大小不是一回事,岩石的孔隙大并不等于其孔隙度大。例如砂岩颗粒直径大,颗粒之间的间隙(单个孔隙)就大;颗粒直径小,颗粒之间的间隙就小。而泥岩颗粒直径最小(<0.01 毫米),其颗粒之间的间隙(单个孔隙)也最小,一般不具备储油的条件,但其孔隙度却不是最小。

(二) 颗粒的均匀程度(或分选程度)

若岩石颗粒大小不同,当大小颗粒杂乱排列时,大颗粒之间的孔隙就会被小颗粒充填,

如图1-3所示，从而减小孔隙度。故组成岩石的颗粒大小越不均匀，孔隙度就越小。

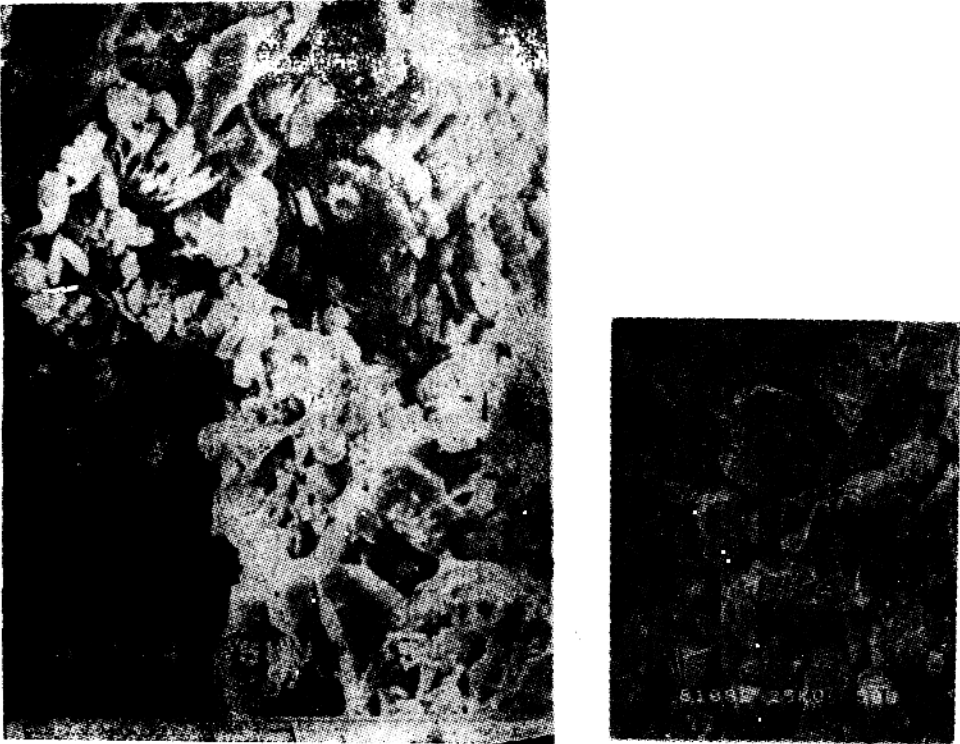


图1-3 岩石颗粒相互支撑与充填

(三) 颗粒的形状

形状不规则的颗粒，在排列时不能象前面等径球体的排列那样挨紧排列，会出现颗粒的棱角相互支撑，形成架空的较大空间。故颗粒形状越不规则，孔隙度越大。实际岩石的颗粒很不规则，故有的岩石孔隙度有大于理论值（等径球体正方形排列，47.6%）的现象。

(四) 岩石的胶结物

岩石的胶结物充填孔隙，显然，岩石胶结物质越多，孔隙度越小。

实际岩石孔隙一般的数值如下：

页岩0.54~1.44%；

粘土8~50%；

砂岩3.5~30%；

砂层6~52%；

石灰岩2.5~33%。

常见的含油层孔隙度为10~25%。

四、多孔介质的特点

实际的储油砂岩，其形成环境条件和岩石的成分等变化很大，它具有以下特点：

(一) 颗粒结构复杂

组成砂岩孔隙的颗粒，在形状、大小、排列方式、胶结物及胶结程度上很不均一。砂粒奇形怪状，表面凹凸不平，排列时相互支撑、充填。

(二) 孔隙结构复杂

颗粒间的空隙——即孔隙，其大小、形状、连通性、分布状况等无一定规律。由于颗粒和胶结物的多样性，就使孔隙具有极不规则而复杂的结构。孔隙的大小悬殊，互相交错，有的孔隙四通八达，有的则被封闭为死孔隙，肉眼乍看起来无法辨认其空间结构，通过放大之后可以看到它的空间结构是错综复杂的孔隙网，如图1-1及图1-3所示。

(三) 具有巨大的比面

从上面描述的砂岩孔隙的状况，可知一块砂岩内其颗粒的表面积总和是相当大的。换句话说，由于砂岩内孔隙数量巨大，每个孔隙空间具有其内表面积，这些内表面积的和是相当大的，从这个意义上说砂岩是高度的分散体系。为了说明其分散程度，引入比面这一概念。

单位体积内岩石颗粒的总表面积，或单位体积岩石内所有孔隙的内表面积称为岩石的比面。比面的单位用厘米²/厘米³或米²/米³。1米³岩石的比面是很巨大的。例如直径为0.208毫米的砂粒堆成1米³时，其孔隙的内表面积为20276米²，即比面为20276米²/米³。组成砂岩的颗粒越小，比面越大，一般砂岩的比面约为15000米²/米³。

通过以上学习，使我们认识到采油工作的对象——油层是不规则（在颗粒大小、排列、孔隙形状及分布等意义上的不规则）的多孔介质。由于孔隙结构复杂，孔隙内表面积巨大，油、气、水与岩石接触时，接触面积很大，呈高度分散状态，流动时有很大的阻力使其渗流速度缓慢。从这些认识中，说明油层流体在地下的储集不同于地面我们所见的容器、湖泊和海洋中的积聚，其流动也不同于地面河道、管道中的流动。

复习思考题

1. 绝对孔隙度、有效孔隙度的含义是什么？如何用公式表示？二者有何区别？
2. 影响孔隙度的因素有哪些？
3. 储油砂岩的特点有哪些？
4. 一块岩样经抽提烘干之后，在空气中重16.16克，饱和煤油之后，在煤油中重10克，饱和煤油岩样在空气中重18克，这块岩样的孔隙度是多少？
5. 煤油法测出的是什么孔隙度，为什么？

第二节 油层岩石的渗透率

一、渗透性

上一节讲了油层岩石孔隙的状况，在储油岩层中的孔隙大都是相互连通的，在一定的压差下可让流体在其中流动，这种能让流体通过的性质，称为油层岩石的渗透性。正是由于油层岩石有此性质，地下原油才得以从油层中流入生产井。渗透性在我们日常生活中也可以经常看到，例如砂地和黄土地，在下雨之后，雨水会渗入地下。同时又出现一种现象，砂地上的水很快渗入地下，而黄土地上的水一部分慢慢渗入地下，一部分仍然留在地面，容易形成积水，这个现象说明了砂地和黄土地都具有渗透性，但是雨水渗透的难易程度却不一样，雨水在砂地容易渗透，在黄土地就比在砂地难渗透一些。对油层岩石来说，也会有这类现象。同样的流体在相同的压差作用下，若通过不同的岩石，也会在有的岩石中相对容易些，在有的岩石中又相对要难些。

岩石让流体通过的难易程度（即渗透能力）用渗透率来衡量。

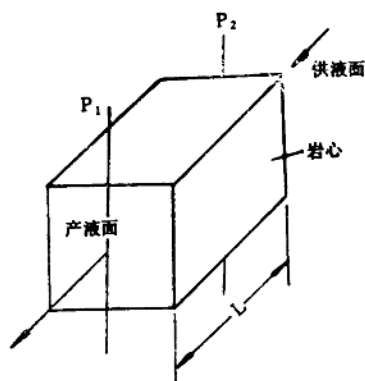


图1-4 达西实验示意图

1856年，法国物理学家达西设计研究多孔介质渗透的实验装置，作了单向渗流的许多实验之后，发现流体的流量与压力差成正比，与所通过的岩石截面积成正比，与流体的粘度和流动方向上的岩石长度成反比。

设流动方向如图1-4所示，岩石长度为 L ，截面积为 F ，供液面上（液体入口）的压力为 P_2 ，产液面上（液体出口）的压力为 P_1 ，液体的粘度为 μ ，则液体产量

$$q \propto \frac{P_2 - P_1}{L} \cdot F \cdot \frac{1}{\mu} \quad (1-7)$$

若以 K 表示比例常数，则上式可化为等式

$$q = K \frac{F \cdot \Delta P}{\mu \cdot L} \quad (1-8)$$

式中 ΔP ——压力差 ($\Delta P = P_2 - P_1$)

对同一块岩石，上式其它参数变化时， K 值不变，是个定值；而对不同的岩石， K 又是另一个定值。所以说 K 反映岩石的性质，它和通过岩石的流体性质无关。在这个意义上，比例常数 K 反映岩石让流体通过的难易程度。对不同的岩石而言，如果它们的几何尺寸相同，通过的流体相同，压差相同时， K 值大的岩石得到的流量大， K 值小的岩石得到的流量小。通过比较 K 值的大小便知道岩石渗透能力的相对大小，也就是说用它可衡量岩石让流体通过的难易程度，这个 K 值被称为岩石的渗透率。

二、渗透率的单位

渗透率不是无因次的纯系数，它的单位由公式(1-9)导出

$$K = \frac{q \mu L}{F \Delta P} \quad (1-9)$$

公式右边的参数选用的单位不同，便推导出不同的渗透率单位。

(一) 法定计量单位

当公式(1-9)右边的物理量采用法定计量单位 (q —米³/秒； μ —帕秒； F —米²； L —米； P —帕)时

$$K = \frac{(\text{米}^3/\text{秒}) \cdot \text{帕秒} \cdot \text{米}}{\text{米}^2 \cdot \text{帕}} \\ = \text{米}^2$$

此单位太大，应用不便，常用微米² (μm^2)。

(二) 原用单位

粘度为1厘泊的流体，通过长1厘米，截面积为1厘米²的岩芯，在1大气压的压差下，得到1厘米³/秒的流量时，此岩石的渗透率为1达西，习惯用符号 D 表示，($1D = 0.987 \mu\text{m}^2$)。

由于实际的岩石渗透率很多都小于1达西，用达西作单位嫌太大，又把达西再细分为毫达西(千分达西)，以符号 mD 表示， $1D = 10^3 mD$ 。

三、有效渗透率和相对渗透率

岩石被一种流体所充满，并且不和流体发生物理化学作用下的渗透率称为绝对渗透率。它只反映岩石本身的渗透率能力，不包括流体与固体（岩石）的作用因素。

事实上，如果用不同的流体（如淡水、盐水、原油、煤油、空气、天然气等），即便是单相，测得的渗透率也不相同。所以，规定用和岩石不发生显著物理、化学作用的流体（如空气、氮气等）测绝对渗透率。

实际油层都是两种以上的流体共存，如油-气、油-水或油-气-水等，此时岩石对任一相的渗透能力不仅与岩石本身特性有关，而且与流体的性质、流体间的相互作用、流体与固体间的作用等因素有关。假如各相完全独立，为彼此不互溶的多相流体共同流动，对于每一相来说，其渗透的难易程度不同。

当岩石孔隙中有多种不互溶的流体流动时，岩石对每一相流体的渗透率称为有效渗透率或相渗透率。

若孔隙中有油、气、水三相流动时，以 K_o 、 K_g 、 K_w 分别表示岩石对油、气、水各相的有效渗透率，则

$$K_o = \frac{q_o \mu_o L}{F \Delta P} \quad (1-10)$$

$$K_w = \frac{q_w \mu_w L}{F \Delta P} \quad (1-11)$$

$$K_g = \frac{2q_g \mu_g L}{F(P_2^2 - P_1^2)} \quad (1-12)$$

式中 q_g ——指标准状况下的体积流量；

K_g ——公式形式稍有不同是由于气体在不同状态下的体积不同所引起。

由于流体间和流体同岩石间的相互作用，使油、气、水三相渗透率之和小于绝对渗透率，即

$$K_o + K_g + K_w < K$$

为了便于对比和在研究工作中使用方便，又引入了相对渗透率的概念。相对渗透率的定义是：各相流体的有效渗透率对岩石绝对渗透率的百分比就是它们各自的相对渗透率，以符号 \bar{K} 表示。 \bar{K}_o 、 \bar{K}_w 、 \bar{K}_g 则分别表示油、水、气的相对渗透率。

例如
$$\bar{K}_o = \frac{K_o}{K} \times 100\% \quad (1-13)$$

相对渗透率使我们对各相流体在岩石中流动的难易程度有明显的比较。

例如在绝对渗透率为0.485达西的岩石中，有油、水两相流动时，若 $K_o=0.073$ 达西， $K_w=0.291$ 达西，则

$$\bar{K}_o = \frac{0.073}{0.485} \times 100\% = 15\% \quad (1-14)$$

$$\bar{K}_w = \frac{0.291}{0.485} \times 100\% = 60\% \quad (1-15)$$

$$\bar{K}_o + \bar{K}_w < 100\%$$

我们可以这样理解：在上述条件下，岩石本身0.485达西的渗透能力，对油提供15%，对水提供60%。由于岩石与油、水的物理化学作用及油与水之间的作用，使得15%与60%的总和小于100%。由此也表现出绝对渗透率K未考虑岩石、流体各相间的物理化学作用。

四、影响渗透率的主要因素

渗透率是油层岩石物性的重要参数，不同油层的渗透率差异很大，一般可由几毫达西到几千毫达西，甚至上万毫达西；而同一油层的不同区域，渗透率的差异也很大；即便是在一块岩样上其垂直于层理方向与平行于层理方向上的渗透率也不一样，引起差异的主要原因有：

(一) 储油层的沉积条件

由于沉积环境变化（海进、海退、逆风、背风等），常常使油层形成层理和不同的旋回，分选性也有差异，因此使岩石的渗透率不是各个方向都相同。例如对陆相地层研究表明：一般平行于水流方向上的渗透率，也就是水平渗透率大于垂直渗透率，甚至相差数百倍之多。相差最大者常见于含粘土夹层的岩石及泥岩中，未胶结及胶结疏松的砂岩，其渗透率常是均一的。

(二) 组成储油层岩石颗粒的大小及其分布

一般颗粒的粒度越大，分布愈均匀，其渗透率越大；反之则越小，这是影响渗透率的主要因素。

(三) 胶结物的含量及分布

胶结物含量多，形成基底胶结的岩石，其渗透性变差，尤其是泥质胶结，由于粘土是直径小于0.01毫米的粘土矿物所组成，所以孔隙半径小，束缚水多，渗透性更差。胶结物含量少，成接触胶结的岩石渗透性较好。

至于对有效渗透率和相对渗透率的影响，则取决于各相饱和度，将在下节讲到。

复习思考题

1. 渗透率是一个什么量？写出达西公式并说明式中各参数的含义。
2. 渗透率的实用单位是怎样规定的？
3. 什么叫绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率？它们之间有何区别？
4. 影响渗透率的因素有哪些？
5. 为什么有效渗透率之和小于绝对渗透率？

第三节 油层中流体饱和度的概念及测定原理

一、概念

在油层中可能油、水两相共存，也可能油、气、水三相共存。地下流体数量的多少由两个因素决定，一是可供流体储存的孔隙空间，二是它们各自占据孔隙空间的大小。某相流体所占岩石孔隙体积的百分数，称为这种流体在岩石中的饱和度，我们用S表示，定义为

$$\text{含油饱和度 } S_o = \frac{V_o}{V_p} \times 100\%$$

$$\text{含水饱和度 } S_w = \frac{V_w}{V_p} \times 100\%$$

$$\text{自由气饱和度 } S_g = \frac{V_g}{V_p} \times 100\%$$

V_o, V_w, V_g 分别代表油层条件下油、水、气相的体积。

若岩石孔隙只为油、水所饱和，则 $S_o + S_w = 1$ ；若岩石孔隙为油、气、水所饱和，则 $S_o + S_g + S_w = 1$ 。这仅仅是为了在研究中简化问题的理想情况，实际上三相饱和度之和小于1。

在储量计算中，不仅要知道油层孔隙体积，还要知道油、气、水在这些孔隙中所占体积的比例，也就是油、气、水各相的饱和度。其中含油饱和度的高低，意味着可供开采油量的多少。所以饱和度是估价油田的工业价值，计算储量的重要参数，同时各相饱和度的大小影响各相流体的流动状况，因而饱和度也是研究多相流动时必不可少的参数之一。它在地下多相流动中的重要作用，我们将在第四节里详细介绍。

二、测定原理

原始饱和度的测定，除用矿场地球物理测井方法间接确定外，通常都用油基泥浆钻井取心在实验室内测定。

室内测定最通用的方法是溶剂抽提法，即把岩样放入饱和测定仪（扎克斯仪器）中，利用比重小、沸点高于水、溶油力强的溶剂，譬如用甲苯加热蒸气洗涤原油。同时，岩心中的水因温度上升而蒸发，经冷凝管，聚集到水份捕集器中，蒸出的水量与岩石孔隙体积之比就是含水饱和度。根据岩石抽提前后重量差，减去水量，就得到含油重量，再除以油的重量，算出油的体积，按饱和度公式即可算出含油饱和度，见下式：

$$\begin{aligned} \text{含水饱和度 } S_w &= \frac{V_w}{V_p} \times 100\% = \frac{V_w}{\phi \cdot G_3} \times 100\% \\ &= \frac{V_w \cdot \gamma_t}{\phi \cdot G_3} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-16)$$

$$\begin{aligned} \text{含油饱和度 } S_o &= \frac{V_o}{V_p} \times 100\% = \frac{G_1 - G_2 - G_3}{\phi \cdot G_3} \times 100\% \\ &= \frac{(G_1 - G_2 - G_3) \gamma_t}{\phi \cdot G_3 \cdot \gamma_o} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-17)$$

式中 γ_o ——原油重度，g/ml；

γ_t ——岩石重度，g/ml；

V_p ——岩石孔隙体积，ml；

V_o, V_w ——分别是地下油、水的体积；

G_1 ——放入仪器前的岩样重量（包括干岩样重量和其中的油、水重量），g；

G_2 ——从岩样孔隙中蒸出的水量，g；

G_3 ——干岩样重量，g。

油田注水开发以后，地下含油饱和度发生变化，含水饱和度逐渐增加，含油饱和度逐步降低。为了认识开发过程中含油饱和度的变化，通过钻检查井取水淹层岩心，进行分析化

验。取得岩样中含油、水饱和度资料。为了和原始含油、水饱和度区别，把开发过程中现时所取得的含油、水饱和度称为目前含油、水饱和度，目前含油、水饱和度是油田开发调整中的一个重要参数。

复习思考题

1. 油层含油饱和度是什么含义？它的定义公式怎么表示？
2. 饱和度在油田开发中的意义是什么？
3. 某岩样放入仪器前重量为490克，从岩样孔隙中蒸出的水量为20克，经过溶剂抽提后的重量为440克，岩样孔隙度为25%，比重为1.1，原油比重为0.87，问该岩样的含水饱和度和含油饱和度各是多少？

第四节 孔、渗、饱在采油中的意义及相互关系

储油岩石的孔隙度、渗透率和含油饱和度，这三个参数和采油的关系都很密切。孔隙度意味着油层可能储油的多少，由于孔隙结构十分复杂，造成渗流阻力大，使油层中的油、气、不能全部开采出来。渗透率是衡量流体（油、气、水）在油层里流动的难易程度，渗透率高就是流体在油层中易于渗流，如果原油的有效渗透率高，则石油在压力差驱使下流向油井的数量就多，反之，数量就少。因此，它是反映油层生产能力大小的一个重要参数。含油饱和度是反映油层孔隙空间中储油量的多少。同时，油层内各相流体的饱和度又和各相的相对渗透率有着密切关系，它们主要影响着各相的渗流（我们将在后面介绍）。总之，孔隙度渗透率、含油饱和度是表示油层岩石渗流特性的三个极重要的参数，它们在油田开发中的意义十分重要。前面已经讲过孔隙度、渗透率的影响因素，下面介绍它们的相互关系。

一、渗透率与孔隙度的关系

在孔隙度的影响因素中，讲到岩石颗粒的均匀程度越好孔隙度越大，颗粒大小越不均匀则孔隙度越小；在渗透率的影响因素中，讲到岩石颗粒的粒度越大，分布越均匀，其渗透率越大，岩石颗粒均匀程度对孔隙度和渗透率的影响较为一致，孔隙度和渗透率有一定关系，但是岩石的孔隙度变化范围很小，而岩石的渗透率变化范围很大。据现在的研究成果表明，岩石渗透率与孔隙因素的关系为下式所示

$$K = \frac{\phi r^2}{8} \quad (1-18)$$

式中 K ——岩石渗透率；

ϕ ——岩石孔隙度；

r ——岩石的平均孔隙半径。

从公式中看出，孔隙度是影响岩石渗透率的次要因素，而决定岩石渗透率大小的主要因素是孔隙半径。另外，根据公式（1-18），可以用易于测得的参数——岩石孔隙度及渗透率去估算岩石的平均孔隙半径。当渗透率及 K 以厘米²为单位时

$$r = \sqrt{\frac{8K}{\phi}} \quad (1-19)$$

此式所算出的 r 显然是以厘米为单位的。如果渗透率 K 以达西为单位， r 以厘米为单位，则公

式(1-19)化为

$$r = \frac{z}{7 \times 10^8} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (1-20)$$

例如实测岩石孔隙度为25%，渗透率为500毫达西，代入公式(1-20)中，估算出岩石的平均孔隙半径为 4×10^{-4} 厘米(4微米)，储油岩石的平均孔隙半径一般在1至10微米之间。

二、渗透率与比面的关系

在多孔介质的特点中，已讲到储油砂岩具有巨大比面，比面越大岩石的渗流阻力越大，表现为流体的渗透率越小，其关系式为下

$$K = \frac{\phi^3}{C_v (1-\phi)^2 S_v} \quad (1-21)$$

式中 C_v ——表示孔隙复杂程度的系数；

S_v ——砂岩比面。

(1-21)式表示出：岩石的孔隙形状越复杂，比面越大，渗透率越低。

以上所介绍的公式(1-19)、(1-20)、(1-21)表示出岩石的渗透率与孔隙度的函数关系，这是利用毛管束假设岩石(模型)所导出。而真实的岩石，一般地说，其渗透率和孔隙度并不见得存在一定的函数关系。但是从许多研究工作中的统计规律来看，岩石的渗透率即使与其孔隙度没有一定的函数关系，也存在着渗透率随孔隙的增加而增加的趋势；渗透率随岩石颗粒的变细而迅速减小的趋势也是存在的。因此，我们仍然可借助于上述公式作定性的分析认识。

三、渗透率和饱和度的关系

在油层岩石被两相或更多相流体所饱和时才谈得上饱和度的变化，在这种情况下渗透率是有效渗透率。所以，这里讲的是有效渗透率或相对渗透率与饱和度的关系。它们之间的关系不是用公式，而是用曲线表示的。

由实验获得的表征相对渗透率与饱和度之间变化关系的曲线称为相对渗透率曲线。图1-5和图1-6分别是液气相对渗透率曲线和油水相对渗透率曲线。

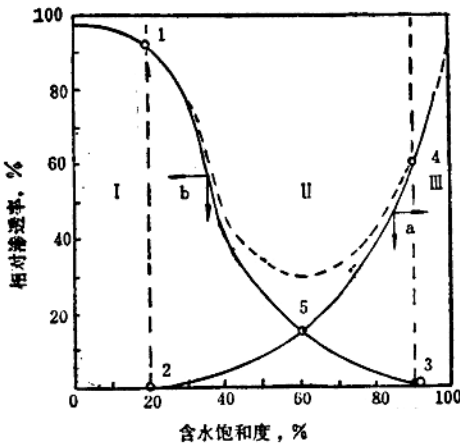


图1-5 液、气两相的相对渗透率

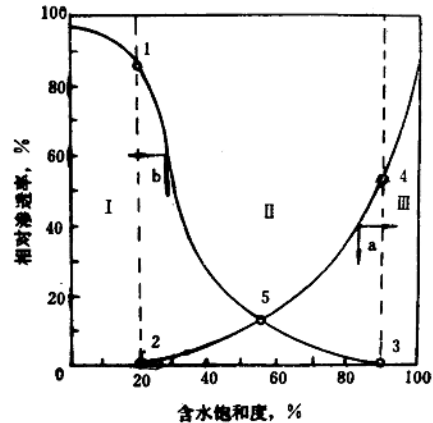


图1-6 油、水两相的相对渗透率

由曲线可见，岩石介质中第二相的存在，不仅降低了第一相的渗透率，而且两相渗透率之和还远远低于其绝对渗透率。

岩层对流体的相对渗透率与含水饱和度的关系，由实验方法测得。图1-5是砂层对水(曲线a)与气(曲线b)的相对渗透率与含水饱和度的关系曲线；图1-6是油(曲线b)与水(曲线a)的相对渗透率曲线。(在这个实验中、水对岩石的润湿极强*)。这里以油水两相的相对渗透率曲线为例，认识渗透率与饱和度的关系，将曲线分为三个区段：

在第Ⅰ区段内，2点表明，当岩石含水饱和度低于20%时，水不再流动($K_w=0$)。从1点往上的一段曲线表明，含水饱和度的变化对油的相对渗透率有较明显的影响，但是还不如点1至点5段上强烈。

在第Ⅱ区段，注意曲线交点5，对横坐标含水饱和度而言，在交点5以前，水的相对渗透率随含水饱和度缓慢增加。而油的相对渗透率随着含水饱和度的降低而急据增加，但到了点1之后，如上述增加变缓慢，在交点5以后，水的相对渗透率随含水饱和度的增加而急据增加，过了点4之后，越加剧增。

在第Ⅲ区段，点3之后，油的相对渗透率为0，停止流动，水的相对渗透率如上所述急剧增加。

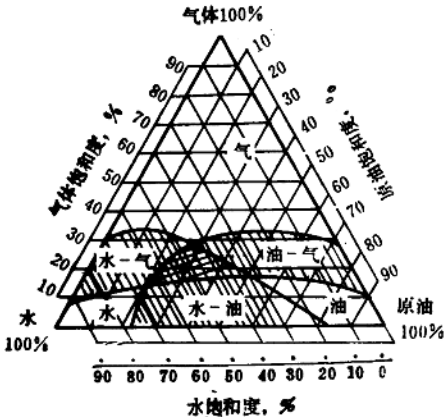


图1-7 单相、两相、三相流动与饱和度的关系

图中三角形各顶点相当于三相中任一相的饱和度为100%的情况，顶点的对边相当该相在岩层中的饱和度为零的情况。与三角形边平行的各个等分线代表各相在岩层中的饱和度的变化(从0到100%)。图上划分出单相，两相和三相流动的区域。单阴影线的区域表示两相流动；双阴影线区域表示三相流动；无阴影线区域表示单相流动。

从图中，我们可以得到以下认识：

1. 单相流动区域

- $S_g > 35\%$ 为气体单相流；
- $S_w < 10\%$, $S_o < 23\%$ 为水单相流；
- $S_o < 20\sim 30\%$, $S_w < 10\sim 18\%$ 为油单相流。

2. 一相不流动区域

- $S_w < 20\%$ 水相不流；

至此，我们看到，岩层中的流体要达到某一定饱和度才能开始流动，流体刚好开始流动的那个饱和度称为平衡饱和度。曲线中点2处的含水饱和度是水的平衡饱和度，点3处的含油饱和度是油的平衡饱和度。流体的有效渗透率随着它的饱和度的增加而增加，这一结论我们应当牢记。但是，这种增加并不是正比关系，而且曲线上表现出不同的变化速度。各段变化速度的差异将在第三章加以分析。

• 三相流动时的相对渗透率曲线

在岩层内存在油、气、水三相的情况也是比较普遍的。这方面的实验结果说明，当岩层内各相饱和度不同时，可以出现单相、两相，三相流动，见图1-7所示。