

高等学校教学用书

地下流体力学

石油院校教材编写组编



中国工业出版社

地下流体力学是石油和天然气田开发及开采的理论基础。全书共分为四篇。第一篇介绍了流体渗滤的基本规律；第二篇至第四篇阐述了流体在不同驱动方式和不同渗滤状态时渗滤的基本规律及各种问题。

本书可作为石油学院开发及采油专业的教学用书。

地下流体力学

石油院校教材编写小组编

*

石油工业部编辑室编辑(北京北郊六铺炕石油工业部)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张15·字数351,000

1962年3月北京第一版·1962年3月北京第一次印刷

印数0001—1,110·定价(10-5)1.80元

*

统一书号: K15165·668(石油-78)

前 言

地下流体力学是研究油、气、水以及它们的混合物在多孔介质中流动规律的科学。它是现代油田开发设计和采油技术的理论基础之一，是高等石油院校油田开发专业必修的专业基础理论课。

地下流体力学是一门比较年青，因而也是正在迅速发展着的科学。随着现代石油工业的发展，地下流体力学——渗滤理论也愈来愈显得重要。这是因为，要科学地解决油田开发和开采问题就必须掌握流体在地下流动的规律、掌握流体在流动过程中的动力和阻力，也就是流量和压力之间的相互制约的关系。

岩石和流体的物理、化学及物理化学特性对流体渗滤状况有着极大的影响。但由于本书是从流体运动的水动力学特性方面来阐述流体流动的规律，因而，在这里对这方面的课题不作专门的研究，而仅根据学习的需要涉及到一些。

近年来，在国外，特别是苏联，很多作者发表了他们自己的有关地下流体力学问题的著作。其中有的是就某一个专门问题进行深入探讨，有的是比较系统地总结了地下流体力学领域中已经获得的重要成果。本书是根据作为石油高等院校教材的要求，企图系统地、简明地和科学地阐述地下流体力学领域中的基本内容和某些最新成就。

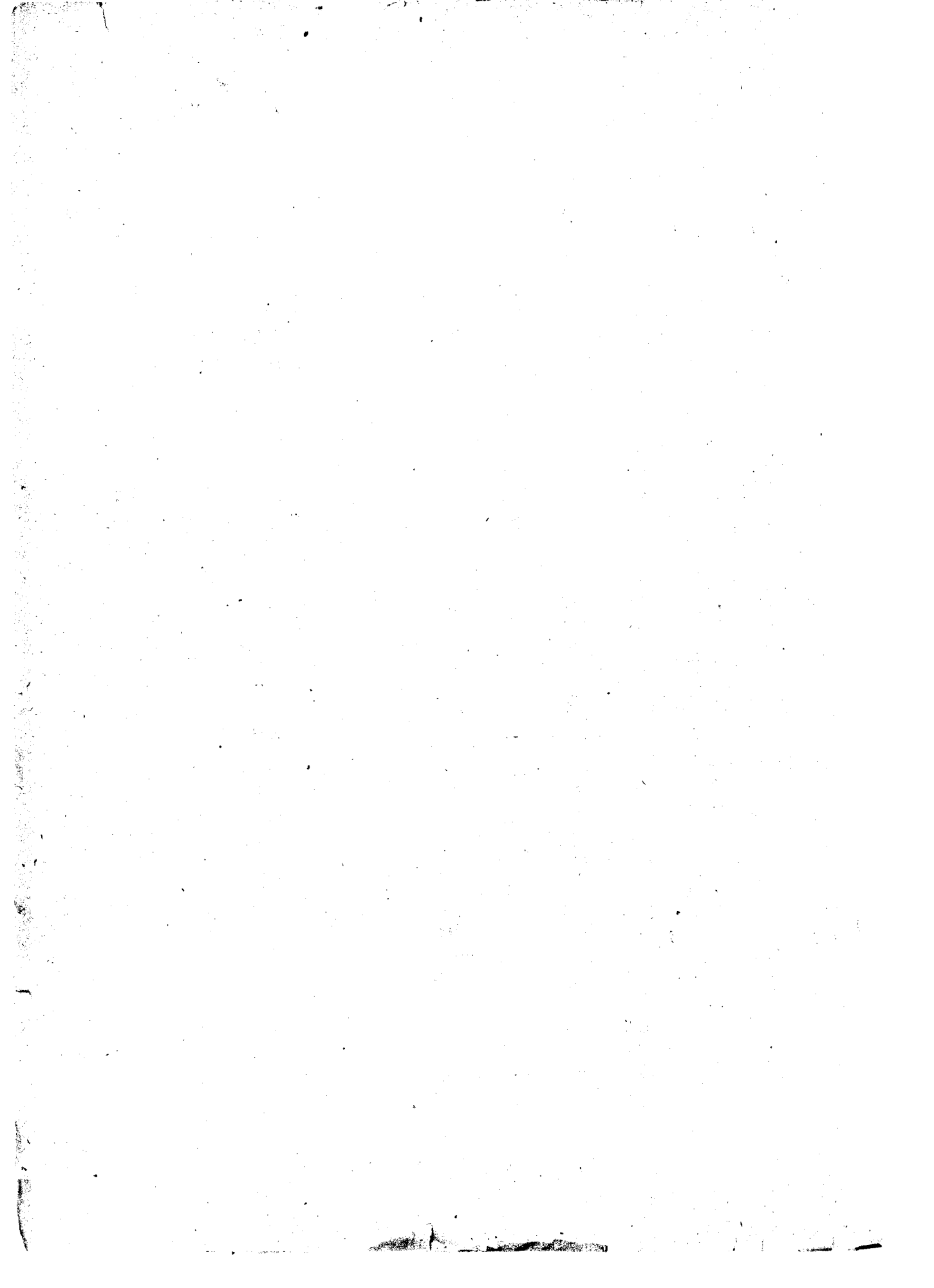
本书共分四篇。第一篇共三章，主要阐述流体渗滤的一些基本概念。第二篇叙述了刚性水压驱动方式下流体渗滤的规律。第三篇和第四篇分别叙述弹性驱动和溶解气驱动方式下流体渗滤规律。为了叙述方便，将含油边线推进的规律这一章放在第三篇的最后。本书的体系是按驱动类型编排的，这是企图使同学在学习时更容易建立概念和联系实际，同时也可以更好地和油田开发课衔接。

本书是由北京石油学院采油教研室、水力学教研室和油矿地质教研室部分教师及采油专业56级部分学生集体编写的。

参加编写的教师有袁恩熙、叶诗美、刘懋宁、樊莹、王谦身、研究生李广元及采56级部分学生。由叶诗美、刘懋宁主编，袁恩熙审查。

在编写第二章的过程中洪世鐸同志给了我们很大帮助，最后还审查和修改了这一章，在此表示感谢。

由于编者的业务水平和思想水平所限，又加上地下流体力学是一门正在蓬勃发展的科学，因此，本书很可能存在不少缺点和不当之处，希望读者提出宝贵的意见，以便及时修改。



目 录

前言

第一篇 流体渗滤的基本规律

第一章	油、气田的动力系统	5
第1节	油、气、水的分布状况	5
第2节	油层压力、饱和压力与折算压力	7
第3节	油藏能量与驱动方式	8
第二章	岩石结构、流体性质与渗滤规律的关系	9
第1节	岩石的粒度组成、孔隙性和渗透性	9
第2节	流体的粘度与密度	18
第3节	流体的渗滤特性	21
第三章	达西定律及其适用范围	22
第1节	达西实验及达西定律	22
第2节	达西定律的应用范围及非线性渗滤定律	26

第二篇 在刚性水压驱动方式下流体的渗滤规律

第四章	单相液体的单向与平面径向流	35
第1节	油藏形状的简化	35
第2节	不可压缩液体按线性渗滤定律的单向流	37
第3节	不可压缩液体按线性渗滤定律的平面径向流	39
第4节	不可压缩液体按非直线渗滤规律时产量与压力的关系	45
第5节	可压缩液体的渗滤规律	48
第6节	岩层不均匀性对渗滤规律的影响	56
第7节	不可压缩液体带自由液面的渗滤特性	63
第五章	油井完善性对流体渗滤规律的影响	69
第1节	三种不完善性对渗滤规律的影响	69
第2节	用实验方法研究向不完善井渗滤的问题	71
第六章	油井干扰与多井工作时的渗滤规律	82
第1节	关于生产实际中的油井干扰问题	82
第2节	压力迭加原理的基本原理及应用	83
第3节	用汇源反映法研究供给边缘和断层对渗滤规律的影响	89
第4节	在不同布井方式下确定油井产量和压力的精确解法	98
第5节	多排井同时工作时确定油井产量和压力关系的近似方法——等值渗滤阻力法	100
第七章	考虑油水粘度差及重率差时的渗滤规律	109
第1节	考虑油水粘度差别时的渗滤规律	109
第2节	油水重率差别对底水锥进的影响	116
第八章	天然气在气田中的渗滤规律	125

第1节	天然气的性质、状态方程和渗滤特征	125
第2节	天然气的稳定渗滤规律	129
第3节	二项式定律及其应用	133
第4节	天然气不稳定渗滤规律	135

第三篇 弹性驱动方式下流体的渗滤规律

第九章	弹性驱动方式下流体不稳定渗滤的理论基础	139
第1节	在弹性驱动方式下压力传播及产量变化的一般规律	139
第2节	应用数学解析方法研究弹性驱动方式下的不稳定渗滤问题	146
第3节	弹性驱动方式与水压驱动方式之间的关系 (弹性不稳定渗滤与刚性不稳定渗滤之关系)	150
第十章	弹性不稳定渗滤时油田压力和产量间的相互关系及变化规律	151
第1节	均质弹性液体在弹性多孔介质中不稳定渗滤的微分方程解	151
第2节	应用数学分析方法确定弹性不稳定渗滤微分方程式的解	155
第3节	在有限地层情况下的产量, 压力变化规律	163
第4节	弹性驱动方式下研究油井干扰的方法	165
第十一章	在弹性驱动方式下确定产量和压力的近似方法——稳定状态逐次替换法	168
第1节	在带状油田中液体单向渗滤时	168
第2节	在液体平面径向渗滤时	171
第十二章	在各种驱动方式下含油边缘的移动规律	173
第1节	含油边缘向井移动时的动态变化	173
第2节	弹性水驱方式下, 确定含油边缘移动的速度	175
第3节	在水压驱动方式下, 含油边缘的移动规律	181

第四篇 溶解气驱方式下流体的渗滤规律

第十三章	溶解气驱方式下流体渗滤的物理基础	193
第1节	溶解气驱方式的产生条件	193
第2节	溶解气驱方式下渗滤物理性质的变化	196
第3节	溶解气驱方式下流体的渗滤特征及其基本方程式的导出	204
第十四章	溶解气驱方式下, 流体稳定渗滤的规律	208
第1节	溶解气驱方式下, 流体稳定渗滤时产量和压力的关系	208
第2节	溶解气驱方式下, 从均质流体过渡为混气液流的稳定渗滤	215
第十五章	溶解气驱方式下, 流体不稳定渗滤的规律	220
第1节	混气液体不稳定渗滤所要解决的问题及解决的方法	220
第2节	用稳定状态逐次替换法解混气液体的不稳定渗滤问题	226
第3节	用近似积分法解混气液体的不稳定渗滤问题	229
第十六章	在水压-溶解气驱方式下水驱混气石油的渗滤规律	234
第1节	原始地层压力等于原油饱和压力时水驱混气石油的渗滤规律	234
第2节	原始地层压力高于原油饱和压力时水驱混气石油的渗滤规律	238
参考文献		240

第一篇 流体渗滤的基本规律

第一章 油、气田的动力系统

储油层中油、气、水构成了统一的水动力系统，这个系统是由含油区、含气区(当有气顶存在时)与含水区组成，整个油藏系统内的各点，都是相互有联系的。因此，研究油、气、水在油层中运动的规律时，首先应当了解在油藏中，油、气、水的分布状况，驱油的能量来源以及油藏开采过程中的一般动态。

第1节 油、气、水的分布状况

储油层中气、油及水的分布，与油层的岩石性质、流体的比重有关。在一般情况下，气最轻，占据圈闭构造顶部的孔隙。石油则聚集在稍低的翼部，而更重的水则占据翼的端部(图1-1)。

油、气藏中油和水的接触面称为油水分界面，若将油藏投影到平面上，如图1-1所示， $abcd$ 线称为含油外缘， $a'b'c'd'$ 称为含油内缘。为方便起见，常常取内外含油边缘之中线($a_0b_0c_0d_0$ 线)为计算含油边缘。以后各篇中的含油边缘即指此而言。在含油内缘内所钻穿的井，将获得无水石油，而在含油外缘之外只能得到水，在内外含油边缘间，油井若钻穿油层全部厚度时，将同时获得油与水。

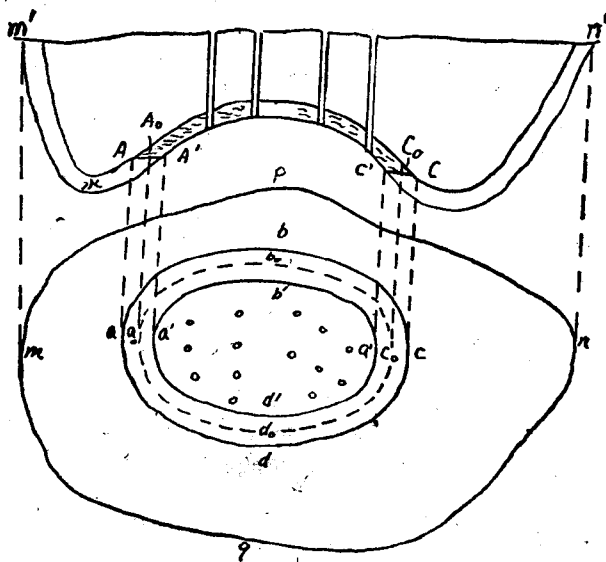


图 1-1

在油、气藏中的水将根据它和油、气接触情况以及在油层中所处的位置，可分为：边水如图1-1中所示，底水如图1-2中所示，油层平缓时，水即位在原油的下面。

在油藏开采过程中，含油边缘将不断向油藏内部移动。往往由于沿着油藏面积油层

岩性岩相发生变化，或由于某些井的开采制度不很恰当，则会使含油边缘在各个方向上成不平衡推进，从而形成所谓水舌(图1-3)。这样，将使部分油井过早水淹，增加了开采上的困难，同时也将影响最终采收率。如果油藏中存在底水，在开采过程中，底水将逐渐上升，在井底附近形成所谓的“水锥”现象^①。

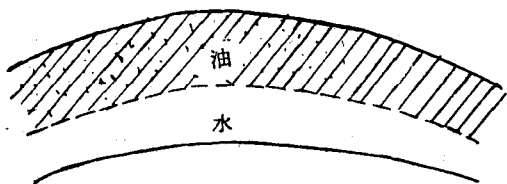


图 1-2

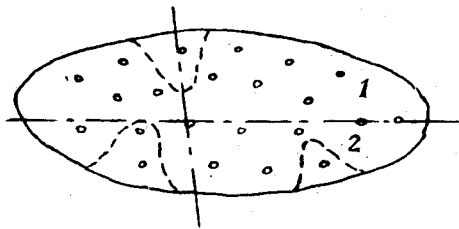


图 1-3

1—原始含油边缘；2—水舌。

分布在油藏翼端的含水层，由于不同的水文地质特性，与地表连通程度也不同。有的含水层在地面有露头存在，并且在露头与油、气藏之间连通性很好。因而地表水也能源源不断地补给含水层。如图1-1中的 $m'n'$ 地带被称为液源供给区，投影到平面上的 $mqnp$ 线，称为供给边缘。但是有时可能由于断层或岩性变化的遮挡，使露头与油藏之间的连通性较差，或地表水不能充分补充含水层时，在开采过程中油藏能量将不断消耗。另外也有的含水层与地表隔绝，地面没有露头存在。这时油藏边缘投影到平面上的线称为封闭边缘(图1-4)。

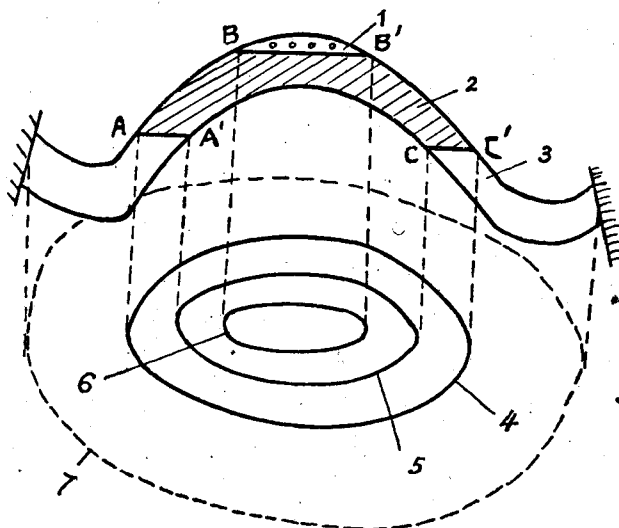


图 1-4

1—气顶区；2—含油区；3—含水区；4—含油外缘；5—含油内缘；6—含气边缘；7—封闭边缘。

① 詳見本书第七章第2节。

在实际情况下,油水分界面并不是非常明显的,而是存在着一个油水混合带,在开采过程中,混合带的变化情况是比较复杂的。

如果在油藏中存在气顶,油和气接触的表面称为油、气分界面,投影到平面上即称为含气边缘(图1-4)。

第2节 油层压力、饱和压力与折算压力

油田在开发之前,整个油藏处于平衡状态,这时油层中所包含的液体和气体所承受的压力叫做原始油层压力。

原始油层压力在一般情况下主要取决于充满储油层孔隙中的水柱重量以及岩石重量对流体所加的压力。油层压力实质上是一种位能,与油层所处的深度有着密切的关系,是随着深度的增加而增高的。

当一口井打开油藏时,能量便开始放出,在井的周围形成一个低压区,而在向井的方向上就有了压力梯度,从而促使液体流向井底。这时,在井底测得的压力称为井底压力(或流动压力)。如果油藏中存在着液源供给区时,在供给边缘上的压力即相当于油层压力,也称为供给压力。若有充足的外来水能够补偿开采过程中能量的损耗时,供给压力即保持不变。否则供给压力在采油过程中逐渐下降。

另外,在所有的油藏中至少总有少量的天然气因受压而溶解在油里,若原始油层压力较高,则全部天然气都处于溶解状态。这时,在油藏中存在着的是单相的石油。以后在开采时油层中压力逐渐降低;当压力降到某一数值时,溶解在油中的天然气开始自石油中分离出来,这个压力称为饱和压力。当油层压力低于饱和压力时,在油藏中将存在液相和气相。饱和压力的大小与油和气的性质有关,这些将在第十三章中详细阐述。

既然油层中任一点的压力与其埋藏深度有关,因此当油藏倾角较大时,油藏内各部分的压力是不同的;两翼上的压力最大,顶部压力较小,因此,为了确切了解地下能量分布情况须把油层压力折算到某一水平面上,通常取原始油水分界面作为这种平面。经过换算后的压力称为折算压力。确定折算压力的方法如下所述。

研究油层的一个单元 AB , CD 的垂直截面(见图1-5)。图上 AB 和 CD 分别为垂直截面和油层顶、底的交线, x 轴为垂直截面和油水接触面的交线, $ABCD$ 截面内各点标高均由 x 轴算起。

Z_M 为 M 点的标高,米; p_{SJ} 为 M 点的实测压力,大气压; γ 表示油层条件下液体的平均重率,吨/米³; M 点的水头 h_M 则为测压计的高度与标高之和。

$$h_M = \frac{p_{SJ}}{\gamma} + Z_M \quad (1-1)$$

则 M 点的折算压力为:

$$p_{zh} = p_{SJ} + \gamma Z_M = \gamma h_M \quad (1-2)$$

因此,计算任意一点的折算压力时,必须知道 p_{SJ} , γ , Z_M 等三个数值。

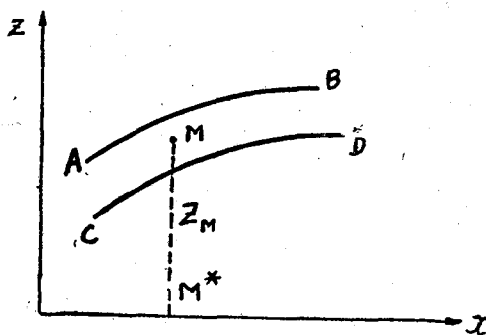


图 1-5

当油层未开发以前或任何液体都不流动处于静止状态时,所有井内的折算压力都相

等。相反，如果液体在流动，折算压力则沿着液体流动方向在减少。如果油层是水平的，同时所选的水平面又通过 M 点，则 M 点的折算压力等于真实压力。

由于采用了折算压力，消除了深度的影响，因此不论在实际工作中还是在理论研究中都比应用真实压力方便。

第3节 油藏能量与驱动方式

油、气所以能够流向井底是一系列力相互作用的结果。由于油层是由含有流体的多孔介质所组成，在微小的孔道中，存在着毛细管力。这种力和流体在流动时产生的粘滞摩擦力等都是流体向井流动过程中必需克服的阻力。因此，在开采过程中要消耗大量的能量。油藏能量主要来自：边水(或底水)的压头、气顶中压缩气的压头、原油中溶解气的能量、液体和岩石的弹性及原油本身的重力等。

在自然条件下，流体在多孔介质中运动时，常常是各种能量同时起作用。譬如，一般都存在液体和岩石的弹性能量的作用及原油的重力作用等。然而根据油藏的地质条件和人为的开采条件，可以确定在油藏中使流体运动的主要能量来源，从而确定油藏是属于那一种驱动方式。

根据油层在开采过程中主要驱油能量的形式和特征可将油藏分成几种不同的驱动方式。根据油层中天然的和人工的驱油能量，一般可分为下列几种：

水压驱动：包括刚性水压驱动，弹性水压驱动；

气压驱动：包括刚性气压驱动，弹性气压驱动；

溶解气驱动；

重力驱动。

一、水压驱动

在水压驱动的油藏中，油层压力从周围的含水层中传递到油藏边缘及底部油水(或气水)接触处。在这种压力作用下，水将流入含油区(或含气区)以全部替代被排出的油和气。水压驱动方式又可以分为两种情况：

1. 刚性水压驱动：在这种情况下，作用力为边水的重力。此时水和油层皆被看成为不可压缩体。

当有充足的外来水源，能以补偿由于采油而损耗的能量，或者是往油层中注水，且注水量等于从油层中采出的液量时，在开采过程中，油层压力保持着和原来一样或相近的数值。在这种情况下若保持井底压力为常数时，油井产液量亦等于常数。

2. 弹性水压驱动：由于液体和岩石都具有弹性，当油层压力由于采液而降低时，孔隙体积缩小(颗粒体积膨胀所致)，而含水区水的体积也相应的增加。这样，依靠油藏液体(主要是水)和岩石的弹性能量将石油驱到井底，即为弹性水压驱动方式。关于在弹性水压驱动下，油田开采的动态变化将在第九章中详述。

二、气压驱动

当石油是借助于气顶中气体的压头作用而向井中流动时，即为气压驱动。气压驱动又可以分为两种情况：

1. 刚性气压驱动：纯粹的刚性气压驱动只有在下述情况下才可能存在，即往气顶中注气且注入气量足以使气顶压力在开采过程中保持常数。或者是气顶储量和原油储量比

較要大得多时，在开采过程中，气頂压力基本不下降或下降很慢时，也可看成是刚性气压驱动。

2.弹性气压驱动：其特点是在开采过程中气頂压力不断下降。这时由于从油藏采油，气頂发生膨胀，其膨胀所增加的体积等于采出的原油体积。因此气頂中压力也相应下降。

这种驱动方式一般发生在向气頂中注气，且气頂儲量較小，不足以补偿采液所造成的能量损失时。

三、溶解气驱动

当油藏中不存在边水(底水)和气頂或边水不活跃时，在这种情况下，就可能出现純粹的溶解气驱动方式。也就是在油层內压力低于饱和压力时，溶解在石油中的天然气，即从石油中分离出来，由于气泡膨胀时的弹性作用，促使石油流向井底。

这时，在开采过程中，油层压力不断下降，油井产量也相应地下降。因此，溶解气驱动方式也称为消耗的开采方式。

四、重力驱动

重力驱动是当其它能量已經枯竭时，石油靠本身重力作用流向井底。根据油层的陡峭程度，又分为两种：

1.含油边缘移动的重力驱动，发生于渗透性好、傾角較大的地层中，开采时含油边缘逐渐向下移动。

2.含油边缘固定的重力驱动，常在傾角平緩的地层中遇到。

最后，应当強調指出，油层在大多数情况下都是同时存在有几种驱动方式的，只不过在不同时间，不同部位，其中有一种驱动起主导作用而已。油层中只存在一种驱动方式是很少見的。同时在油田开发过程中，由于自然的和人为的因素影响，油层的驱动方式不是一成不变的，而可以由一种驱动轉变为另一种驱动。

第二章 岩石結構、流体性质与渗滤規律的关系

第1节 岩石的粒度組成、孔隙性和渗透性

岩石顆粒的大小称为粒度。岩石粒度組成是指岩石中各种大小不同的顆粒含量。組成岩石的顆粒按大小可划分为一系列的等級，称为粒級。

对于油层來說，粒度組成基本上可用直徑为1—0.01毫米的粒級表示，根据粒度組成常把油层岩石分为三大类：

砂岩或砂层——主要由1—0.1毫米的顆粒組成，岩石中粒級的含量达50—80%；細砂岩——主要由0.1—0.01毫米的顆粒組成，粒級含量在50%以上；泥砂岩——主要由小于0.01毫米的顆粒組成，此粒級在岩石中占50—80%。

岩石的粒度組成，决定了岩石的許多地质物理性质，如孔隙度、渗透率等。岩石粒度越小孔隙度越大，岩石粒度大小越均一，越接近于球形則通常渗透性越好。同时岩石的粒度組成还表明了岩石的分散性，同体积的岩石，粒度越小分散愈强。

岩石的分散程度除了用粒度的組成表示外，还可以用与粒度組成有联系的比面来表示。

岩石的比面，是指单位体积的岩石内所有顆粒的总面积。岩石顆粒愈細，即粒度越小比面越大，例如粒度小于0.01毫米的泥砂岩的比面要比粒度为1—0.01毫米的砂岩大2倍多。

比面的因次在物理制单位中为厘米²/厘米³。

比面的大小对流体在岩石中的流动，岩石的吸附能力，束縛水含量等有很大影响。

按照前面所讲的砂岩、細砂岩和泥砂岩的顆粒大小，当顆粒都是圓球形时，它們的比面为：

砂岩	小于950厘米 ² /厘米 ³
細砂岩	在950—2300厘米 ² /厘米 ³
泥砂岩	大于2300厘米 ² /厘米 ³

● 因此，岩石也可按其比面大小来分成上述的三类，比起岩石的粒度組成，它的优点是可以說明岩石是属于这种还是那种类型的总的特征。但也不能由此而貶低确定岩石粒度組成的必要性。岩石的粒度組成和比面有着一定的关系：

$$S = \frac{6(1-m)}{100} \sum \frac{4g_i}{d_i} \quad (2-1)$$

式中 S ——岩石的比面，厘米²/厘米³；

$4g_i$ ——粒度組成中 i 組份的重量百分数；

d_i ——粒度組成中 i 組份的顆粒平均直徑，厘米。

式(2-1)亦可通过“有效直徑”表示如下：

$$S = \frac{6(1-m)}{d_s} \quad (2-2)$$

式中 d_s 为相当于岩石粒度組成的“有效直徑”。不难看出：

$$d_s = \frac{100}{\sum \frac{4g_i}{d_i}} \quad (2-3)$$

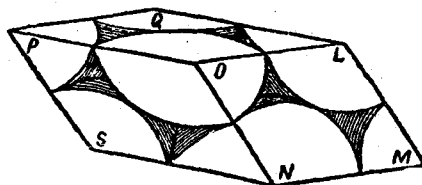


图 2-1 假想多孔介质模型的基本单元的菱形排列

从式(2-1)和式(2-2)可以看出，組成岩石的顆粒愈小，其比面愈大。

由大小不等，形状各异的顆粒，按不同的粒度組成所构成的岩石，其中未被顆粒所占据的地方形成了孔隙。岩石中孔隙体积的大小，通常以单位体积的岩石，其中孔隙体积所占的百分数，称之为孔隙度者来表示：

$$m = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \quad (2-4)$$

式中 m ——岩石的孔隙度；

V_1 ——岩石中的孔隙体积；

V_2 ——岩石的几何体积。

通常为了便于对孔隙度的研究，常用“假想多孔介质”模型。

所谓“假想多孔介质”模型，是指以等直徑的球形顆粒所构成的多孔介质，其基本单元可看作为如图2-1所示的八个等直徑的小球所組成。这种假想多孔介质模型的孔隙度，

取决于小球的相互位置。小球的相互排列可以介于两种情况之间，一种是最紧密的排列(图2-2)；一种是最松的排列(图2-3)。

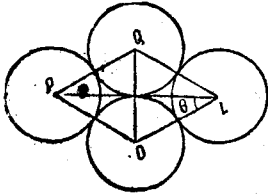


图 2-2 最紧密的排列

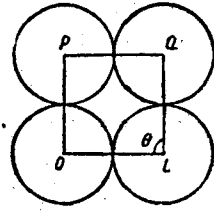


图 2-3 最松的排列

此时，菱形体各面之间形成之菱形角 θ 可由 60° 到 90° 。

斯利赫特研究了基本菱形体的几何性质得到了确定假想多孔介质孔隙度 m_{js} 的公式：

$$m_{js} = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos\theta)\sqrt{1 + 2\cos\theta}} \quad (2-5)$$

由公式可知由球形颗粒所组成的假想多孔介质的孔隙度，不决定于颗粒直径大小，而决定于各球体的排列相对位置，而球体排列的相对位置又决定于 θ 角。

将 θ 角变化的极限值 60° 及 90° 代入公式(2-5)中，则可得假想多孔介质孔隙度的变化极限值

$$\text{当 } \theta = 60^\circ \text{ 时, } m_{js} = 0.259$$

$$\text{当 } \theta = 90^\circ \text{ 时, } m_{js} = 0.476$$

因之，

$$0.259 \leq m_{js} \leq 0.476$$

斯利赫特又进一步研究了孔隙断面的大小，得出假想多孔介质模型的最大孔隙断面的公式如下：

$$n = 1 - \frac{\pi}{4\sin\theta} \quad (2-6)$$

式中的 n 通常称之为假想多孔介质的透明度。

所谓透明度就是，流体流动时所通过多孔介质的孔隙断面的面积与包括孔隙断面在内的多孔介质该横截面面积之比，亦即：

$$n = \frac{f}{F} \quad (2-7)$$

式中 f ——多孔介质横截面上孔隙的断面面积；

F ——多孔介质的横截面积。

从公式(2-6)中可以清楚地看到透明度的大小，亦不决定于球形颗粒直径，而只决定于颗粒之间的排列位置。而颗粒之间的排列位置又决定于 θ 角的大小。

将 θ 等于 60° 和 90° 之值代入公式(2-6)即得透明度的极限值。

$$\text{当 } \theta = 60^\circ \text{ 时, } n = 0.0931$$

$$\text{当 } \theta = 90^\circ \text{ 时, } n = 0.2146$$

因之：

$$0.0931 \leq n \leq 0.2146$$

透明度 n 的平均值在数量上等于孔隙度 m_{jD} 。对于假想多孔介质的上述公式(2-5)和(2-6),都不能用于实际岩石,因为构成这些岩石的颗粒按其本身的大小,形状和表面粗糙程度来说都不一样。

这种假想多孔介质及其所形成的孔隙在自然界中实际上亦是不存在的,因为组成岩石颗粒大小是不均匀的,形状也很不规则。孔隙有的是互相连通的,有的是互相隔绝的。所以说天然岩石中的孔隙大小及其孔隙连通情况是极其复杂的。通常为了便于对流体在岩石孔道中流动规律的研究,多将岩石中的孔道简化地视为相互平行的,不同大小的毛细管孔道(这种简化了的岩石,可看作为理想多孔介质)。

油层岩石的上述毛细管孔道的大小可分为三类:

- (1)超毛细管孔道——其大小大于0.5毫米;
- (2)毛细管孔道——其大小介于0.5—0.0002毫米之间;
- (3)微毛细管孔道——其大小小于0.0002毫米。

液体在超毛细管孔道中流动时很自由;在毛细管孔道中流动时,一般受毛细管压力所制约;在微毛细管中液体实际上是不能流动。

对于天然岩石的孔隙度,通常有三种概念,即绝对孔隙度,有效孔隙度和流动孔隙度。

绝对孔隙度是指岩石的孔隙总体积与岩石体积之比,通常多以百分数来表示:

$$m_{jD} = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \quad (2-8)$$

式中 m_{jD} ——岩石的绝对孔隙度;

V_1 ——岩石的孔隙总体积;

V_2 ——岩石的体积。

有效孔隙度是指除去岩石中的死孔隙和微毛细管孔隙以及被微毛细管孔隙所包围的孔隙以外的相互连通的孔隙体积与岩石体积之比:

$$m_{ys} = \frac{V'_1}{V_2} \times 100 \quad (2-9)$$

式中 m_{ys} ——岩石的有效孔隙度;

V'_1 ——岩石中上述有效的相互连通的孔隙体积。

流动孔隙度是指在一定压差下,为流体所流经的岩石孔隙的体积与岩石体积之比:

$$m_{ld} = \frac{V''_1}{V_2} \times 100 \quad (2-10)$$

式中 m_{ld} ——岩石的流动孔隙度;

V''_1 ——流体所流经的孔隙体积。

从流动孔隙度的概念上不难看出,它的大小是极不肯定的。它既决定于压力差的大小,又决定于流体的性质。正因为如此,它尚未为地下水力学计算上所应用。

岩石孔隙度的大小,受着许多因素的影响。孔隙度决定于岩石颗粒的形状和这些颗粒的排列方式。当颗粒圆球度很差多呈棱角状时,孔隙度就小;相反颗粒圆球度很好,则孔隙度大。颗粒成最紧密堆积时孔隙度就小。孔隙度决定于颗粒的分选程度。颗粒大小

很不均匀时由于小颗粒的充填作用，使孔隙度减小，相反颗粒大小很均匀则孔隙度大；另外，孔隙度大小还决定于岩石中胶结物的多少和充填的方式，当胶结物多时孔隙度就小。

岩石的孔隙度是油层岩石的重要物理性质之一。除了孔隙度以外，岩石的另一重要物理性质就是岩石的渗透率。

我们知道，在压力差的作用下，流体所能通过岩石的特性，叫做岩石的渗透性。在自然界绝对不渗透的岩石严格讲是不存在的。通常我们所说的不渗透岩石是指在油层中所存在的压力差下流体是不能通过的。岩石渗透性的好坏以渗透率来表示。

根据达西定律我们知道，通过岩石截面积的液体体积流量和所存在的压力差、和截面积的大小成正比；与岩石的长度以及液体的粘度成反比。亦即：

$$Q = k \frac{F(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad (2-11)$$

式中 Q ——液体的体积流量，厘米³/秒；

F ——岩石的截面积，厘米²；

p_1 ——液体通过岩石前的压力，大气压；

p_2 ——液体通过岩石后的压力，大气压；

μ ——液体的粘度，厘泊；

L ——岩石长度，厘米。

式中比例系数 k ，亦即所谓岩石的渗透率。它表示了在一定的压力差下，液体所能通过岩石的能力。亦即：

$$k = \frac{Q \mu L}{F(p_1 - p_2)} \quad (2-12)$$

应该指出，渗透率的大小只是岩石的性质，亦即它决定于岩石的孔隙结构和孔隙大小，而和所通过的液体的性质应该没有关系。上式(2-12)的写法，不能错误地理解为 k 和 μ 成正比。而是 Q 和 μ 成反比。

当液体的粘度 μ 为 1 厘泊；压力差 $(p_1 - p_2)$ 为 1 个大气压；岩石的截面 F 为 1 厘米²；岩石长度为 1 厘米时，此时所通过的液体的体积流量为 1 厘米³/秒时，其渗透率 k 的大小称之为 1 个达西。达西即为渗透率常用的单位。因为用达西来作油层岩石渗透率的单位还是太大，所以一般多以其千分之一称为千分达西者作为更通用的单位。亦即 1 达西等于 1000“千分达西”。

渗透率的物理制单位可表示如下，当 Q 以厘米³/秒； μ 以泊亦即达因·秒/厘米²； L 以厘米； F 以厘米²； $(p_1 - p_2)$ 以达因/厘米²来表示时，代入式(2-12)可得：

$$k = \frac{\text{厘米}^3 \times \text{达因} \times \text{秒} \times \text{厘米} \times \text{厘米}^2}{\text{秒} \times \text{厘米}^2 \times \text{厘米}^2 \times \text{达因}} = \text{厘米}^2$$

应该指出，当气体通过岩石时，式(2-11)和式(2-12)中的体积流量应该是通过岩石的平均流量 $\bar{Q}$ 。因为气体沿岩石长度由 p_1 流向 p_2 时其体积要膨胀，其体积流量通过各处截面积时都是变数。见图(2-4)所示。因此，式(2-12)可写成下式：

$$k = \frac{\bar{Q} \mu L}{F(p_1 - p_2)} \quad (2-13)$$

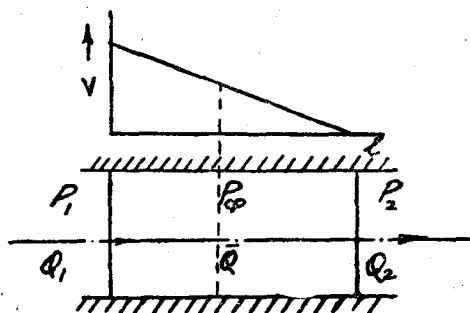


图 2-4 通过岩石的气体体积流量 V 随压力由 p_1 到 p_2 的变化示意图

根据波义尔-马略特定律，当等温膨胀时：

$$\bar{p} \cdot \bar{Q} = p_1 Q_1 = p_2 Q_2 = p_0 Q_0$$

$$\bar{Q} = \frac{p_0 Q_0}{\bar{p}} = \frac{2 p_0 Q_0}{p_1 + p_2}$$

式中 $\bar{p}$ ——平均压力， $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ ；

p_0 ——气压计的气压；

Q_0 、 Q_1 和 Q_2 ——气压 p_0 和 p_1 以及 p_2 下的气体体积流量。

亦应指出，渗透率的变化受着多种因素的影响。渗透率决定于孔隙的大小，沿着细小孔

隙液体及气体很难运动，液体必须克服毛细管力，在非常小的孔隙中根本不能运动；孔隙形状对渗透率有很大关系。在形状简单而规则的孔隙中渗透率就比较大，液体易于流动；岩石的孔隙连通性，节理及裂缝等对渗透率的大小也有很大影响，在岩石节理裂缝发育的地区都有较高之渗透率。另外，渗透率在不同的方向其大小也不相同，一般沿着油层垂直方向和水平方向的渗透率大小不一样，垂直方向的渗透率要小于水平方向的渗透率。

渗透率的大小除了决定于上述岩石的性质外，实际上也决定液体的物理化学性质，如液体在岩石的孔隙表面上的吸附性质。

岩石的渗透率亦有三种概念，即岩石的绝对渗透率，有效渗透率和相对渗透率。

绝对渗透率是指当岩石的孔隙中只有一相（气体或单一液体）时，岩石允许流体通过的能力叫做绝对渗透率。

有效渗透率是指当岩石中同时存在几相时，岩石对每种流体通过的能力叫做该相的有效渗透率。它除了代表岩石物理性质外，还表征液体和气体的物理性质及其在孔隙中之运动特性。

相对渗透率是指岩石的有效渗透率和绝对渗透率的比值，叫做岩石的相对渗透率。

严格讲，岩石的绝对渗透率是在岩石内只有一种对岩石结构性质及颗粒表面性质不发生影响的流体通过时，才表明岩石的这种渗透能力，即绝对渗透率。严格说应是只与岩石本身有关的一种属性。

在实际油层内，各种流体对岩石都有不同性质和程度的影响。因此，虽然只有一种流体通过，岩石的绝对渗透率也会不同。这类影响可归结为两类：机械的和物理化学的。

• 如果流体内含有机械杂质，则它渗滤时，这些机械杂质可能淤积在流过的孔道内，给渗滤造成困难，因而使岩石的渗透率减小。

在某些疏松的非胶结性岩石内，当渗滤流速较高时会发生另一种情况。即由于组成岩石的一些微小颗粒被带出，使渗滤的通过面积增大，流量增大，这时就会看到岩石的渗透率增大了。

流体对岩石的物理化学作用是多方面的，其中影响较大的是流体中所含表面活性物质在岩石颗粒表面复盖着这种吸附层后，也给流体的渗滤造成困难，而使得岩石的渗透

率降低。

当水在岩石内渗透时，还会和岩石的粘土颗粒发生水合作用，而使粘土颗粒膨胀，这也将减小孔道的有效断面积，引起渗透率降低。

当岩石内存在着和渗透流体不相同的流体或有几种不同的流体在岩石内通过时，岩石对它们的渗透率将和绝对渗透率不同，而称为岩石对每种流体的有效渗透率（或相渗透率）。

岩石对某种流体的有效渗透率是随这种流体在岩石孔隙内的饱和状况而变，显然岩石孔隙内其它流体的存在都会使岩石对这种流体的渗透能力降低。因此，有效渗透率总是小于绝对渗透率。

相对渗透率因为是有有效渗透率和绝对渗透率的比值，故它的变化范围可以从0到1。

实际油层中可以有三种流体的有效渗透率及相对渗透率。即油的有效渗透率 k_y ，水的有效渗透率 k_s ，气的有效渗透率 k_q 及油的相对渗透率 F_y ，水的相对渗透率 F_s ，气的相对渗透率 F_q 。

如所指出的，油层内某种流体的相对渗透率是它在孔隙内分布数量——饱和度的函数。在油层孔隙网内流体的分布情况，则既是饱和度的函数也是每种流体润湿性的函数。从润湿的观点说，任何含油岩石可以是油湿的或水湿的。油湿的岩石，其表面容易被油粘附。现在知道，真正油湿的岩石并不多，通常只有局部油湿的岩石。大多数油层的岩石是水湿的，所以总存在着束缚水。这种岩石在长期与油接触后，特别是当油中含有容易粘附的极性物质时，就可以局部的改变岩石的润湿性质。

最早的有关有效渗透率的研究是将几种流体饱和在多孔介质内，然后按它们的流动性来测定岩石对它们的有效渗透率。如图2-5所示。是在孔隙内油的饱和度 ρ_y 为不同值时，油气两种流体的相对渗透率曲线。

对粗胶结性砂岩，是在油的饱和度为63%时，即气体饱和度为37%时，两者具有相同的渗透率，在胶结性砂岩内，油的饱和度要达74%时，即气体饱和度为26%时，两者才具有相同的渗透率。这是由于具有较大润湿能力的油粘附在岩石表面后，使流动性减小，而且孔道的平均截面积愈小，即绝对渗透率愈低，这种粘附的量也愈大。

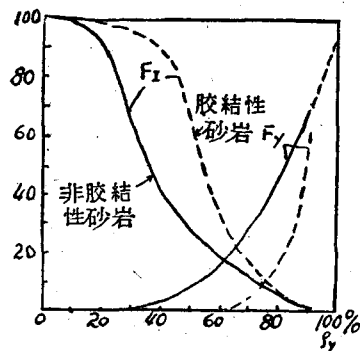


图2-5 F_y 、 F_q 和 ρ_y 的关系

当介质内饱和以油水混合物时，它们流动时的有效渗透率和饱和度的关系曲线如图2-6。

在许多油田的计算中，通常还要知道油气混合物流动时，它们的有效渗透率的比值，以便计算油气比或油水比。故常将图2-5及图2-6的曲线用 $F_q/F_y(\rho_y)$ 及 $F_s/F_y(\rho_y)$ 的关系表示。如图2-7是在不同 ρ_y 值时 F_q/F_y 的变化情况。由图2-6也可作出类似的曲线。以上是两相流动，即在油气混合物渗透时，认为地层内不存在束缚水，或油水混合物渗透时，认为地层内没有气体。

当考虑到油层内存在有三种流体时，这时岩石对各相有效渗透率也可将三种流体按不同比例饱和在岩石内，测量它们流动时的数量而得到。当通过的总流量中某一相占一