



TEACHING MATERIALS  
FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

# 油气 渗流力学基础

Principle of Petroleum Flowing in Porous Media

□ 刘慧卿 主编

中国石油大学出版社

# 油气渗流力学基础

◎ 主 编 刘慧卿

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气渗流力学基础/刘慧卿主编. —东营:中国

石油大学出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-5636-4111-6

I. ①油… II. ①刘… III. ①油气藏渗流力学 IV.

①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 176107 号

油气渗流力学基础

刘慧卿 著

书 名: 油气渗流力学基础

作 者: 刘慧卿

---

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532-86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532-86981532, 86983437)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 12 字数: 254 千字

版 次: 2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

# 前言

## Preface

从生产环节上讲,油气渗流是指石油天然气从油层到井底的流动过程;从学科上讲,油气渗流力学是研究流体在多孔介质中的运动形态和运动规律的科学。油气渗流力学课程是石油工程专业的技术基础课程,其基本规律和基本理论是“油藏工程”、“采油工程”等后续专业课程的基础。

本教材是编者参考众多相关教材和从事多年渗流力学教学实践后的系统总结。全书是以油气渗流的基本规律和基本理论为主线组织编写的,主要内容包括:油气渗流基本规律;单相及油气水多相渗流状态以及相应的渗流数学模型;稳定渗流数学模型求解;弹性不稳定渗流理论及其应用;水驱油理论与油气两相渗流理论。全书以加强基础理论、基本知识和基本技能为出发点,注重突出油气田开发物理问题的抽象与数学表征,力求从理论联系实际方面培养学生分析问题和解决问题的能力。另外,本教材的深度和广度也适宜于非石油工程专业的学生和技术人员学习及参考。

在本教材编写过程中,得到了中国石油大学(北京)石油工程学院渗流力学教学团队的大力支持和热情帮助,王庆老师协助对各章练习题进行了试做,并提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

书中如有错误和不当之处,敬请使用本教材的师生和读者批评指正。

编 者

2013年5月于北京

# 目 录

## Contents

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 绪 论 .....                   | 1   |
| 第一章 渗流基本概念和基本规律 .....       | 5   |
| 第一节 渗流过程中的力学分析 .....        | 5   |
| 第二节 渗流基本规律 .....            | 14  |
| 第三节 基本渗流方式 .....            | 21  |
| 第二章 油气渗流物理过程及数学模型 .....     | 30  |
| 第一节 典型油藏流体渗流物理过程及描述 .....   | 30  |
| 第二节 单相渗流数学模型 .....          | 35  |
| 第三节 油气水多相渗流数学模型 .....       | 43  |
| 第四节 渗流数学模型定解条件 .....        | 47  |
| 第三章 单相液体稳定渗流理论 .....        | 52  |
| 第一节 求解单相液体稳定渗流数学模型 .....    | 52  |
| 第二节 势叠加原理与流场 .....          | 66  |
| 第三节 多井干扰稳定渗流理论与应用 .....     | 75  |
| 第四节 单相稳定渗流产量模型 .....        | 84  |
| 第四章 单相液体不稳定渗流理论 .....       | 96  |
| 第一节 弹性不稳定渗流过程及拟稳态渗流模型 ..... | 96  |
| 第二节 弹性不稳定渗流理论 .....         | 103 |
| 第三节 不稳定试井原理与应用 .....        | 111 |

|             |                      |     |
|-------------|----------------------|-----|
| <b>第五章</b>  | <b>油水和油气两相渗流理论基础</b> | 124 |
| 第一节         | 非混相驱替界面特征            | 124 |
| 第二节         | 非活塞式水驱油理论与应用         | 129 |
| 第三节         | 活塞式水驱油理论与应用          | 149 |
| 第四节         | 油气两相渗流理论             | 153 |
| <b>第六章</b>  | <b>复杂油气藏渗流数学模型</b>   | 164 |
| 第一节         | 双重介质油藏渗流数学模型         | 164 |
| 第二节         | 凝析油气藏渗流数学模型          | 168 |
| 第三节         | 注热流体油藏渗流数学模型         | 171 |
| 第四节         | 化学驱油藏渗流数学模型          | 173 |
| 第五节         | 水平井开发油藏渗流数学模型        | 175 |
| <b>参考文献</b> |                      | 186 |

# 结 论

石油天然气是天然形成的、埋藏在地下的、不可再生的流体矿产资源,流体的基本特性之一就是其可流动性。所谓流动,是指流体在一定力的作用下所呈现的连续不断的变形。与固体相比,流体分子间作用力较小,分子排列松散,不能保持一定的形状,因此在一定空间内,流体只能抗压而不能抗拉和抗切,当它受到切力作用时便发生变形,这种连续不断的变形就是流动。石油天然气具有的可流动性决定了其开采方式不同于其他固体矿产资源。

## 一、石油工程流体流动

### 1. 管流

管流的流动空间通常为大尺度并具有较规则的空间度量特征(如管径)。管流普遍存在于自然界中,例如日常用水供给、工业流体输送等。流体流道可以是圆管、方管、同心管等,通常情况下流体流动速度较大。在石油工程中,钻井液在钻杆中的流动、油藏流体在井筒中的流动、石油天然气的集输等都属于管流。

### 2. 渗流

流体通过多孔介质的流动叫做渗流,因此渗流过程中除涉及多孔介质外,还涉及参与流动的流体。渗流流体一般为气、液、气液混合物或本构方程比较简单的聚合物溶液等。渗流现象普遍存在于自然界中,如冶金、化工、农业、动植物生命活动、油气资源开发等。

把以固相为连续骨架,并含有连通孔、缝或洞空间体系的介质称为“多孔介质”,例如沙土、土壤、中空纤维、海绵、孔隙性岩石等。通常情况下多孔介质中流体的流动速度较小。多孔介质中流体的流动空间为小尺度,具有不可数和不规则(变尺度)的结构特征。这种小尺度的流动空间可以是孔道,也可以是裂缝。由于多孔介质结构的复杂性,单个空间的度量特征很难具有普遍意义。

例如,有两根长度相同但管径不同的管子,其中大管径的管子中充填砂子以保持两根管子具有相同的孔隙体积,若两根管子注入水流的压头相同,则管子流出端的流速会

有较大的差异!

## 二、油气渗流的基本特征

由于石油天然气是埋藏在地下的流体矿产资源,因此油气渗流也称为地下渗流。油藏中的储集层是最典型的多孔介质,但与日常生活或工业过程中的功能性多孔介质不同,因为石油天然气储集层既是流体的储集场所(源),又为流体提供了流动空间(通道)。油气渗流属于典型的原位(in-situ)流动,其中的流体渗流更具复杂性和特殊性,具体表现为以下几个方面。

### 1. 油气储集层多孔介质

#### 1) 多孔介质的类型

##### (1) 单重介质。

只有一种空隙结构的多孔介质称为单重介质。这种介质的空隙可以是单纯由粒间孔构成的空间,也可以是由纯裂缝构成的空间,或是由纯溶洞构成的空间。岩石的空隙是指岩石中未被碎屑颗粒、胶结物或其他固体物质充填的空间,习惯上用“孔隙”代替“空隙”。单重介质的流体流动存在于孔道之中。例如,砂岩油藏岩石多属于这种孔隙介质,国内大部分油田的储集层岩石都属于这种情况。

##### (2) 多重介质。

由孔隙/裂缝或孔隙/裂缝/溶洞组成的多孔介质称为双重或三重介质,亦称多重介质。多重介质的流体流动存在于孔道与孔道之间、裂缝与裂缝之间、孔道与裂缝之间、孔道与溶洞之间、裂缝与溶洞之间等。一般来说,灰岩油气层是具有孔隙及裂缝的双重介质。比较典型的双重介质油藏有华北的雁翎油田和苏桥油田、胜利的五号桩油田、得克萨斯州的白垩系油藏、怀俄明州的 NPR-3 油田。中石化西北局的塔河油田则属于缝洞型的多重介质油藏。

#### 2) 多孔介质的储渗性质

##### (1) 储容性。

多孔介质储容性的优劣与孔隙空间的大小有关。由于流动空间的多样性和变尺度等复杂结构特征,因此难于通过单个空间的度量确定孔隙空间的大小,而通常用孔隙度进行表征。储层岩石的孔隙度是指岩石孔隙体积与其外表体积的比值。孔隙度是度量岩石储集能力大小的参数,孔隙度越大,单位体积岩石所容纳的流体越多,表明岩石的储集性能越好。实际岩石的孔隙结构非常复杂,储层岩石的孔隙多数是连通的,也有不连通的。一般情况下,实验测定的岩石孔隙均是连通的(称为岩石的有效孔隙)。

##### (2) 渗透性。

储层岩石中的多数孔隙是相互连通的,在一定压差作用下,流体可以在孔隙中流动,岩石的这种性质称为渗透性。渗透性表示多孔介质允许流体通过的能力,渗透性的大小通常用渗透率来表示。渗透率的大小只与岩石的自身性质有关,即取决于岩石的孔隙结

构和孔隙大小,而与所通过的流体性质无关。

### (3) 比面。

在多孔介质中,任何一个单元体都包含着连续的固相,由于多孔介质中又含有大量的孔隙空间,所以固相具有很大的表面积。岩石的比表面积(简称比面)是指单位体积岩石的所有颗粒的总表面积。多孔介质最本质的特性就是固体颗粒的比面很大,通常在  $20\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$  以上。有表面就有接触,因此多孔介质中流体渗流的摩擦阻力很大。前面例子中,尽管两根管子长度相同,孔隙体积相同,注入水流的压头相同,但两根管子内的比面差异很大,故流体流速必然有较大的差异。

## 2. 多相流体渗流

石油天然气埋藏在地下,对于常压油藏系统,压力系数为 1 左右,因此埋藏上千米深的油藏的原始油层压力大于 10 MPa,流动处于高压状态。由于石油天然气是混合物,组成也相当复杂,且在渗流过程中油层压力不断变化,故单相流动的原油可能由于溶解气的分离而成为油气两相流动,或油气两相流动由于气体溶解而成为油单相流动,对于具有典型碳氢化合物组成的油藏流体也可能存在凝析或挥发等相变。由于开发方式的不同,注水、注气、注化学剂水溶液等同样可以使油层多孔介质中呈现两相或多相流体渗流,若采用注蒸汽方式则渗流过程中还伴随能量变化。

## 3. 固体与流体相互作用

对于两相或多相流体渗流状态,流体界面效应在多孔介质中呈现毛管压力和相对渗透率特征;对于注入化学剂溶液的流体渗流,同时存在组分吸附效应。这些效应可以影响到流体的流动能力和流体的物性,进一步影响油气资源的开采效率。

# 三、本教材主要内容

石油天然气是埋藏在地下的流体矿场资源,因此要将其采至地面,需要在地下和地面之间建立一个通道,这个通道称为井。流体流动过程包括石油天然气从油层到井底的流动、从井底到井口的管流、井口油嘴的嘴流、从油嘴到油管的管流。

从生产上讲,油气渗流是指石油天然气从油层到井底的流动过程。从学科上讲,油气渗流是指石油天然气在多孔介质中的运动规律,表明流体在一定动力作用下的运动速度或流量大小,或者说在多孔介质中施加的动力与流体运动速度之间的关系,因此渗流力学是研究流体在多孔介质中的运动形态和规律的科学。

《油气渗流力学基础》的主要内容包括:① 渗流基本概念和基本规律,包括渗流过程中的力学特征、达西和非达西基本渗流规律以及不同渗流方式渗流规律的特征化;② 油气渗流物理过程及数学模型,描述了单相及油气和油气水渗流状态,通过推导状态方程和渗流连续性方程,介绍了单相及油气水多相渗流数学模型和不同渗流数学模型定解条件的建立方法;③ 单相液体稳定渗流理论,介绍了三种简单渗流方式下单相液体稳定渗流数学模型求解方法、多井干扰稳定渗流理论和边界效应的等效处理以及多井工作条件

下单相稳定渗流产量模型;④ 单相液体不稳定渗流理论,介绍了弹性不稳定渗流理论及其在不稳定试井中的应用;⑤ 油水和油气两相渗流理论基础,推导了非混相驱替界面特征模型,并建立了非活塞式水驱油理论及活塞式水驱油方式的简化条件,同时介绍了溶解气驱状态下的油气两相渗流理论;⑥ 复杂油气藏渗流数学模型,以典型双重介质油藏、凝析油气藏、注热流体油藏、化学驱油藏和水平井开发时复杂渗流方式的油藏为例,介绍了复杂多孔介质和流体的渗流数学模型。

## 第一节 渗流过程中的力学分析

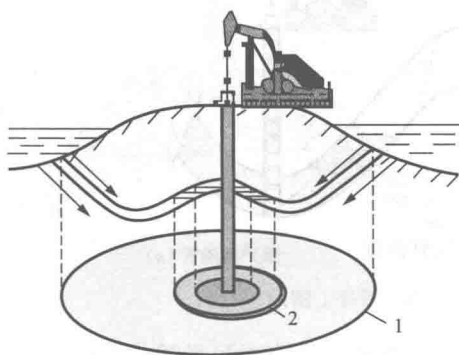
## 一、渗流过程中的动力来源

当油井投入生产后,石油就会从油层流到井底,并在井筒中上升到一定高度,甚至可以沿井筒上升到地面。原因是处于原始状态下的油藏,其内部具有能量,这些能量在开采时成为驱动油层流体流动的动力来源。油气渗流的动力来源可以由油藏内部产生,也可以通过外部施加。在天然条件下,油藏的驱油能量主要有以下 5 种。

## 1. 边底水压能

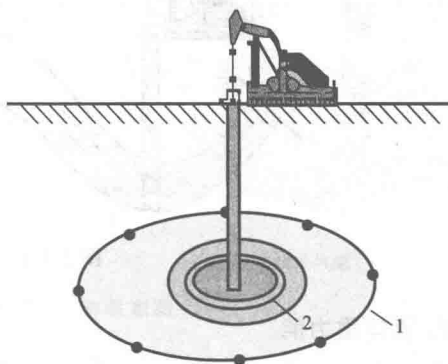
与油藏相连的边底水与油藏处于同一水动力系统,边底水所具有的能量(压能)取决于边底水体积的大小。边底水也可以通过储层延伸到地表水体,如图 1-1-1 所示。油藏在生产过程中,具有一定水压的边底水推动石油前移,把石油从油层驱替到油井中,边底水逐渐替代石油占据含油部分的孔隙空间。

边底水的压能也可以通过注入水实现,驱动方式演变为人工注水方式,例如边部注水方式或排状/切割注水方式,如图 1-1-2 所示。



1—供给边界;2—油水界面

图 1-1-1 边底水油藏



1—供给边界;2—油水界面

图 1-1-2 边部注水油藏

## 2. 油藏岩石和流体的弹性能量

当油藏形成时,岩层中所含的液体在运移过程中受到压缩,液体压缩性的大小反映出液体内部存在反抗压缩的弹性力,具有做功的能力;同样,埋藏在地下深处的岩层本身由于受到上覆巨厚岩层的压力也具有反抗压缩的弹性力。当油藏投入开发时,油层压力开始下降,这时处于压缩状态的液体体积发生膨胀,同时岩石体积也发生膨胀,使储油层的孔隙体积缩小,油层中的石油被排挤到油井中。

## 3. 石油中溶解气的析出膨胀能量

如果油藏封闭,无边底水又无外来能量补充,则在油田开采过程中,开始时消耗的是弹性能量;当油层压力低于饱和压力后,原来溶解在石油中的天然气从石油中分离出来,形成气泡,整个油层将是油气两相渗流,随着压力的下降,天然气体积发生膨胀,这时油流入井主要是依靠分离出的天然气的弹性膨胀能量,如图 1-1-3 所示。

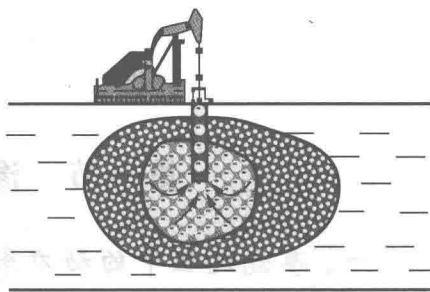


图 1-1-3 溶解气驱油藏

## 4. 气顶气膨胀压能

当油藏中存在较大的气顶时,开发时主要靠气顶中压缩气体的膨胀能把石油驱向井底,如图 1-1-4 所示。油藏中存在气顶,说明在该油层压力下原油所能溶解的天然气已达到饱和程度,不能再溶解更多的天然气了,所以此时油层压力等于饱和压力。在油井生产时,井底压力必然低于饱和压力,而近井地带的压力也必然低于饱和压力,所以溶解气驱的作用是不可避免的,而且只有在因采油而形成的压力降传到油气边界后,气顶才开始膨胀,压缩气的能量才能显示出来。由于气顶气的能量非常充分,驱油能量主要表现为气顶中压缩气体的膨胀能。

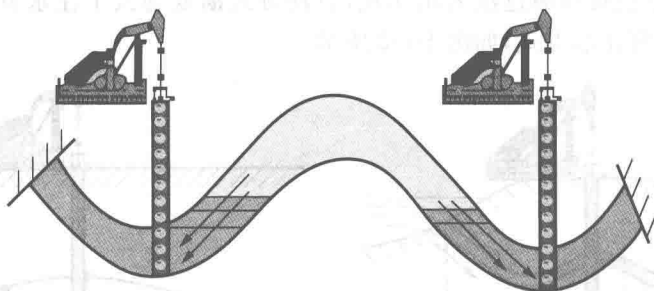


图 1-1-4 气顶气驱油藏

## 5. 流体重力能

当油藏的油层倾角较大或油层厚度较大时,油层中的原油可以依靠本身的重力流向井底。根据油层的自然条件,重力能可表示为两种形式:一种是压头重力能,石油将沿油

层倾斜方向向下移动,并在油层较低的部位聚集起来,如图 1-1-5 所示;第二种是自由液面重力能,油井周围附近的液面低于油层顶部,原油依靠重力流向井底,如图 1-1-6 所示。

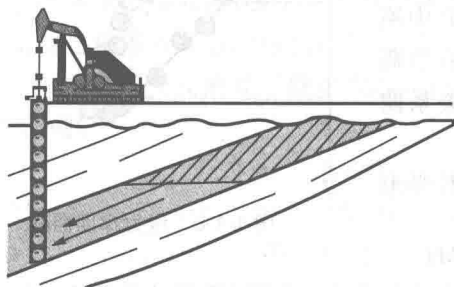


图 1-1-5 倾斜油层重力驱油藏

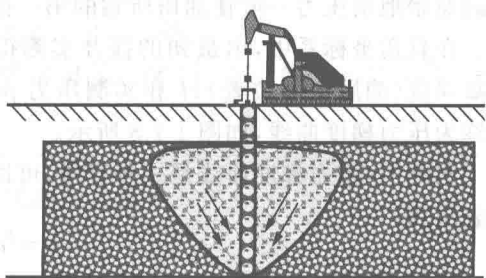


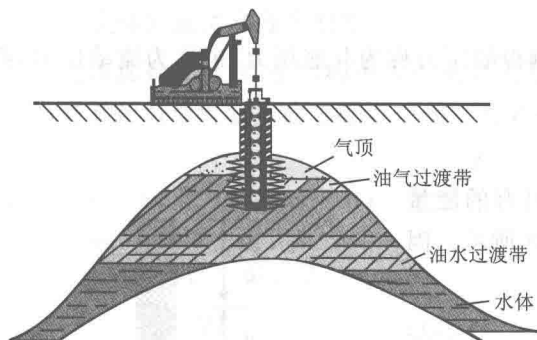
图 1-1-6 厚油层重力驱油藏

油藏驱油能量的来源不同,能量大小也不同,实际渗流过程中可能表现为多种能量共存,驱油能量也可能由一种形式转变为另一种形式;同一时间内,同一油藏的不同部位可以表现为不同的驱油能量。无论驱油能量的来源和大小如何,渗流过程中驱油能量均通过压力的形式表现出来。

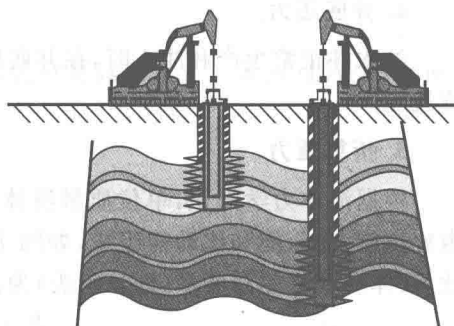
由于驱油能量不同,油层中既可以是单相流体渗流也可以是多相流体渗流。例如,以油藏岩石和流体的弹性能量为主,则油层中为油单相渗流;以原油中溶解气的析出膨胀能量为主,则油层中为油气两相渗流;而对于具有边底水的油藏,油水界面附近为油水两相渗流,远离油水界面处则表现为油单相渗流。

## 二、与渗流有关的压力

具有同一水动力学(压力)系统的油气聚集场所称为油(气)藏,如图 1-1-7 所示。



(a) 背斜油气藏



(b) 层状油气藏

图 1-1-7 油气藏中油气水分布示意图

油藏的驱油能量可能存在于天然条件下,也可以通过外部施加。外力的作用将引起地层内液体能量的变化,这种变化将通过压力的变化来反映。因此从本质上说,压力是一个用来表征油藏能量的物理量。

## 1. 原始地层压力

原始地层压力是指油藏开发前流体所受的压力,实测原始地层压力一般在油田所钻的第一批探井中测得。在直角坐标系中,由最初的探井实测得到的油藏埋藏深度(油层中部位置) $H$ 和实测压力 $p$ 的关系曲线称为压力梯度曲线,如图 1-1-8 所示。

实际上,压力梯度曲线是一条直线,可以用数学形式表示为:

$$p = a + bH \quad (1-1-1)$$

直线的斜率称为压力系数。根据压力梯度曲线斜率可以判断所属压力系统:对于常规油气藏, $b$ 取值为 0.7~1.2;当 $b < 0.7$ 时,称为异常低压油藏;当 $b > 1.2$ 时,称为异常高压油藏。

在油藏投入开发以后,油藏原始状态被破坏,此时所钻的井就不可能直接测其原始地层压力,只能根据该井的油层中部深度,在压力梯度曲线上推算其原始地层压力。

## 2. 目前地层压力

将一口油井停产,而周围的油井继续生产,停产井的压力逐渐升高,经过较长的时间后,压力值趋于稳定,此时测得的该井油层中部深度的实测压力值即为该井的目前地层压力,习惯上也称为该井的“静压”。

## 3. 供给压力

油藏中存在液源供给区时,供给边缘上的压力称为供给压力。在人工注水条件下,水井井底压力即为供给压力。

## 4. 井底压力

油水井正常生产和注入时,在井底所测得的压力称为井底压力,也称为流动压力,简称流压。

## 5. 折算压力

根据流体力学知识,单位质量液体所具有的能量由比位能、比压能和比动能组成,如图 1-1-9 所示。因此,液体所具有的总能量(即总水头)为:

$$H = z + z_p + z_v = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (1-1-2)$$

液体在油层中渗流时,由于其在孔隙中的流动速度很小,它的平方项更小,故比动能可以忽略不计,这样总水头可写为:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} \quad (1-1-3)$$

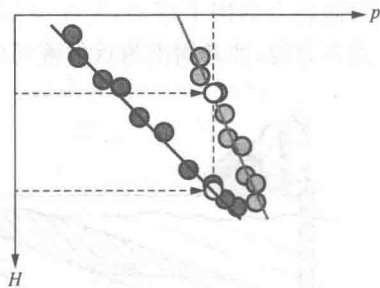


图 1-1-8 压力梯度曲线

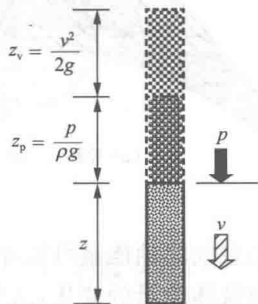


图 1-1-9 流体流动的各种能量与压头

将总水头用压力形式表示称为折算压力,即:

$$p_r = \rho g H = p + \rho g z \quad (1-1-4)$$

折算压力  $p_r$  表示油层中各点流体所具有的总能量。从折算压力形式可以看出,流体流动与流体所具有的总能量有关,不同能量之间可以转换。

油藏在未开发前处于静止状态,各点总能量相等。设  $M_1, M_2, M_3, \dots$  为油藏中不同的点,则:

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 = p_3 + \rho g z_3 = \dots \quad (1-1-5)$$

式中  $p_1, p_2, p_3, \dots$ —— $M_1, M_2, M_3, \dots$  点的实测压力值;

$z_1, z_2, z_3, \dots$ ——各点标高。

只有当各点标高相等时,即  $z_1 = z_2 = z_3 = \dots$ , 这些点的实测压力才相等。习惯上把原始油水界面选为计算折算压力的基准面。

**【例 1.1】** 某井油层中部海拔 -940 m, 油水界面海拔 -1 200 m, 地层原油密度  $0.85 \text{ g/cm}^3$ , 实测油层中部压力为  $9.9 \text{ MPa}$  (表压), 求折算到原始油水界面的折算压力。

解: 标高  $z = 1\,200 - 940 = 260 \text{ (m)}$ , 油的密度  $\rho = 0.85 \text{ g/cm}^3 = 850 \text{ kg/m}^3$ 。

原始油水界面的折算压力为:

$$\begin{aligned} p_r &= p + \rho g z = 9.9 \times 10^6 + 850 \times 9.8 \times 260 \\ &= 12.1 \times 10^6 \text{ (Pa)} = 12.1 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

### 三、渗流过程中的力学分析

油、气、水能在岩石孔隙中渗流是各种力共同作用的结果。这些力包括三种基本力——重力、粘滞力和毛管力,还包括由于流体流动派生的惯性力、岩石及流体的弹性力等。这些力究竟表现为动力还是阻力取决于力或其分量的方向与流动方向的异同。

#### 1. 流体的重力和重力势能

流体具有质量,在重力场中由于受到地球的吸引而具有重力。渗流过程中,流体的重力和其相对位置联系起来就表现为重力势能,用压力可表示为:

$$p_z = \rho g z \quad (1-1-6)$$

式中  $p_z$ ——重力势能的压力;

$\rho$ ——流体密度;

$z$ ——相对位置高差;

$g$ ——重力加速度。

重力有时是动力,有时是阻力,如图 1-1-10 所示。对于  $M$  点,液源压力的作用推动  $M$  点的流体质点流入井  $A$ , 流体重力势能产生的压力将作为动力推动液体流入井中,即  $M$  点流体质点所具有的重力相对于井  $A$  来说表现为动力;对于与  $M$  点具有相同重力压头的  $M'$  点,该流体质点相对于井  $B$  来说表现为阻力。

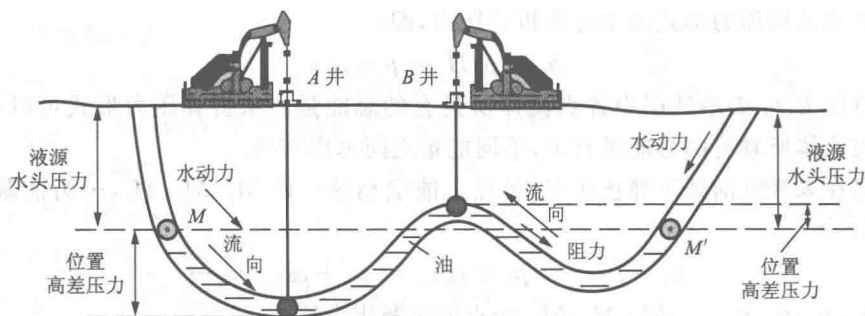


图 1-1-10 流体重力势能图

## 2. 流体的粘度及粘滞力

粘滞性是流体的一个重要和特殊的属性。当流体在一定空间内运动时,流体分子间的吸引力和流体与壁面间的附着力将抵抗流体的运动(有时称为分子间的摩擦力,或称为内摩擦力)。当然摩擦力的方向始终与流动方向相反,即沿垂直于流动方向产生切向阻力。流体的这种属性称为粘滞性,因此流体在运动时需克服摩擦力。

在流动的流体中,如果各层流体流速不同,则将有一对作用力和反作用力,使原来快的流层减速,而慢的流层加速。这一对等值而又相反的力阻碍着流层的相对运动。度量粘滞性大小的参数称为粘度,如图 1-1-11 所示,由牛顿内摩擦定律描述为:

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-1-7)$$

式中  $A$ ——两流层的接触面积;

$\frac{dv}{dy}$ ——沿流层法线方向的流速梯度;

$F$ ——内摩擦力(粘滞力);

$\mu$ ——粘滞系数(又称绝对粘度)。

符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿型流体,否则称为非牛顿型流体。在渗流过程中,粘滞力始终表现为阻力,且驱替动力的消耗主要用于渗流时克服流体粘滞阻力。

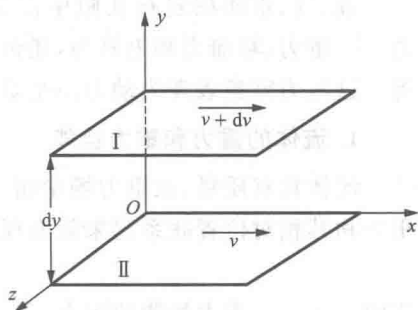


图 1-1-11 粘滞力示意图

## 3. 毛管力

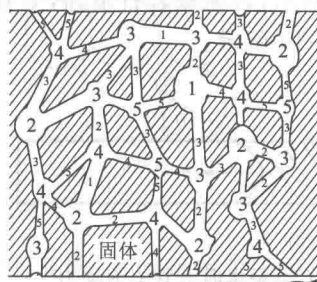
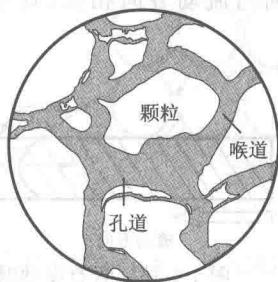
油气层是由无数个微小的毛细管(图 1-1-12a)连接组成的,这些毛细管纵横交错、四通八达。由图 1-1-12(b)可以看出,当毛细管半径相同时,液面上升高度相同,毛细管半径越小,液面上升高度越大。在渗流过程中,当存在两种或两种以上流体时,在两相界面上会产生压力跳跃,这个压力的跳跃就称为毛管压力(简称毛管力),用  $p_c$  表示。

毛管力的大小与流体性质和曲率之间的关系可用拉普拉斯方程来表示:

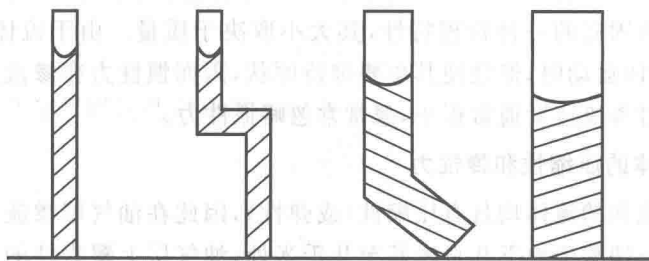
$$p_c = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1-1-8)$$

式中  $R_1, R_2$ ——分界曲面(图 1-1-13)曲率主半径;

$\sigma$ ——流体界面的张力。



(a) 真实毛细管



(b) 等价毛细管

图 1-1-12 毛细管中液面上升现象

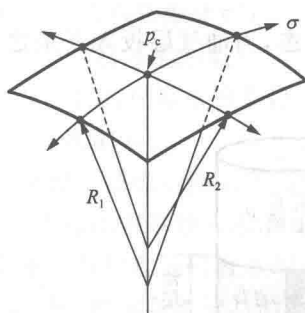


图 1-1-13 曲面示意图

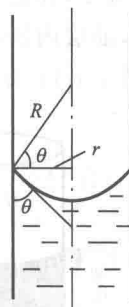


图 1-1-14 毛细管半径  $r$  与曲率半径  $R$  的关系

对于球面(图 1-1-14),  $R_1 = R_2$ , 则:

$$p_c = \frac{2\sigma}{R} \quad (1-1-9)$$

$$\cos \theta = \frac{r}{R} \quad (1-1-10)$$