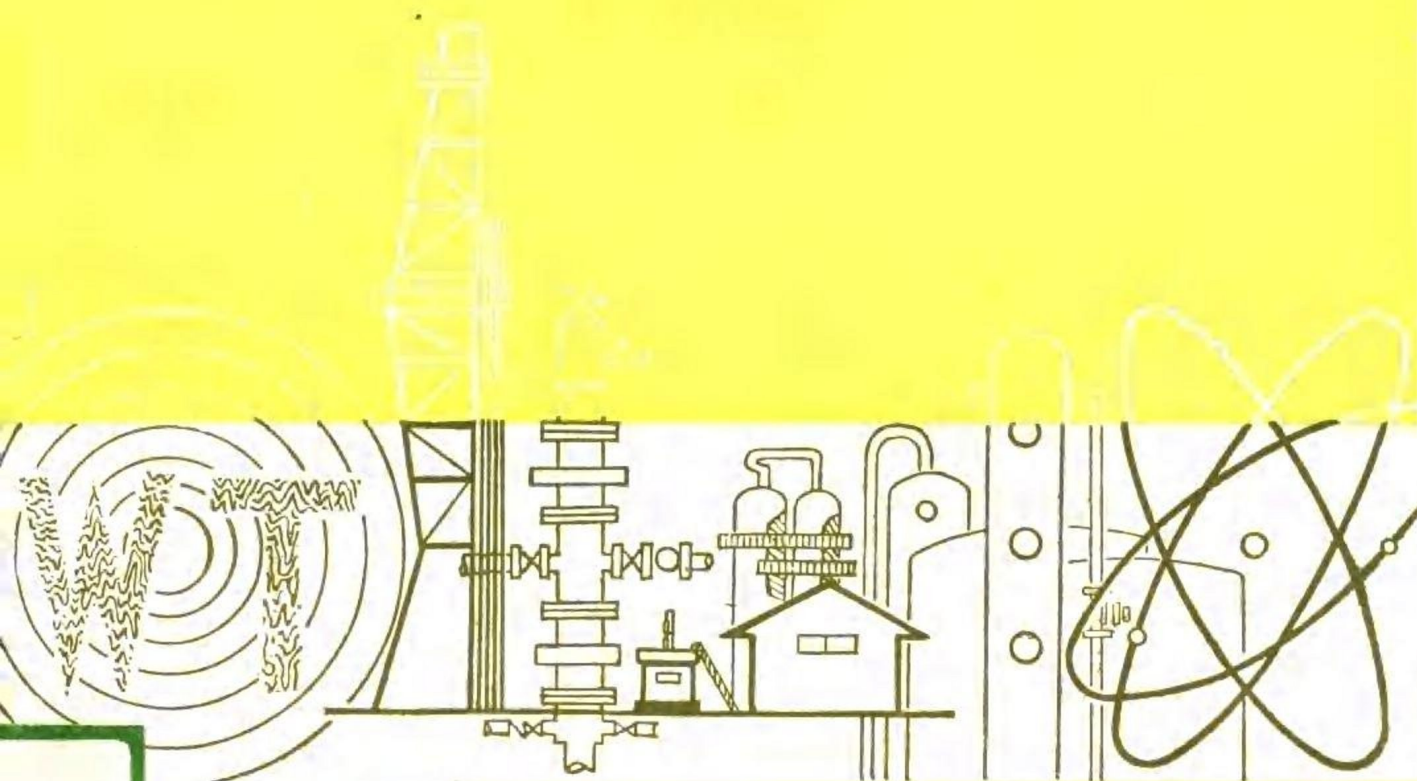




石油技工学校试用教材

试采地质

四川石油管理局技工学校 卓炽明 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书简明而系统地介绍了试油, 中途测试, 油、气井试井, 酸化, 压裂, 油田开发, 油水井管理和动态分析等基本知识, 并着重介绍了试采各阶段的资料搜集、整理、图表编制及分析应用等知识和技能, 深入浅出, 通俗易懂。

本书除作为石油技工学校钻井地质专业的统编教材外, 也可供职工培训, 职业高中和现场有关工程技术人员参考。

试 采 地 质

四川石油管理局技工学校 卓炯明 主编

*

石油工业出版社出版发行

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16开本 16印张 390千字 印1—10,000

1989年6月北京第1版 1989年6月北京第1次印刷

书号: 15037·2996 定价: **3.10元**

ISBN 7-5021-0145-4/TE·143

前 言

本书是根据石油部劳资司1984年审定的石油技工学校钻井地质专业“试采地质教学大纲”组织编写而成。

由于钻井地质专业没有开设流体力学、油层物理、油田开发、油气开采等专业课及专业基础课,因此本书扼要地、系统地介绍了试油、试井、酸化、压裂、油田开发、油水井管理及动态分析等有关基本知识。在书的开头还介绍了油气渗流的基本知识,并设有中途测试一章,介绍地层测试的一般知识和情况。这样,可以使学生对试采及开发有一个系统的了解,从而掌握在各阶段对资料的搜集、整理和分析应用。

本书共分十章,其中第一、三、六章由四川石油管理局技工学校卓炽明编写,第二、四章由胜利油田河口技校刘家谱编写,第七、八章由江苏油田技工学校刘玉有编写,第五、九、十章由玉门石油管理局技工学校刘琦编写,全书由卓炽明主编定稿。

在编写本书的过程中,曾得到西南石油学院、华北油田测井公司、四川石油管理局地质勘探开发研究院、钻采研究所、川南矿区、井下作业处、川中矿区等单位有关同志的大力支持和帮助;川中矿区地质勘探开发研究所绘图组为本书清绘全部插图;四川石油管理局技工学校部分教师为本书誉清书稿,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中错误一定不少,敬请读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

绪 论	(1)
第一章 油气渗流的基本知识	(2)
第一节 流体流动的一般知识	(2)
第二节 渗流及其基本规律	(5)
第三节 流体的平面径向渗流	(8)
第二章 油气层的压力和驱动	(18)
第一节 油气层的压力及温度	(18)
第二节 油气层的驱动力及驱动方式	(31)
第三章 试油	(38)
第一节 试油的目的与任务	(38)
第二节 试油层位的确定、试油方法及其选择	(38)
第三节 试油前的地质准备	(40)
第四节 试油程序	(44)
第五节 测试求产与油气产量的量测 和取样	(52)
第六节 试油地质总结	(60)
第四章 中途测试	(65)
第一节 概述	(65)
第二节 中途测试工具及方法	(67)
第三节 资料搜集、整理和应用	(77)
第五章 油井试井	(85)
第一节 试井	(85)
第二节 自喷油井的稳定试井(系统试井)	(88)
第三节 自喷油井的不稳定试井	(93)
第四节 抽油井的试井	(99)
第五节 低压油井的试井	(111)
第六章 气井试井	(117)
第一节 气井的稳定试井	(117)
第二节 气井的不稳定试井	(126)
第七章 酸化	(141)
第一节 酸化基本原理及酸化选井选层原则	(141)
第二节 酸液和添加剂	(142)
第三节 酸化工艺技术及施工要求	(152)
第四节 酸化资料的搜集整理与效果分析	(156)
第八章 压裂	(160)
第一节 水力压裂的原理及压裂选井选层原则	(160)

第二节 压裂液与支撑剂	(164)
第三节 压裂施工程序	(169)
第四节 压裂资料的搜集, 压裂井的管理与效果分析	(174)
第九章 油气田开发基本知识	(177)
第一节 合理开发油气田的地质认识及选择开发方案原则	(177)
第二节 油气田储量	(178)
第三节 油田开发层系的划分与组合	(186)
第四节 开发方式	(187)
第五节 合理井网的布置	(192)
第六节 开发的主要指标	(197)
第十章 油水井的管理与动态分析	(200)
第一节 自喷井的管理	(200)
第二节 抽油井的管理与泵效分析	(206)
第三节 采油、气井的基础资料整理	(208)
第四节 注水井的试注	(218)
第五节 注水指示曲线的分析与应用	(222)
第六节 注水井地质资料的录取和整理	(226)
第七节 动态分析	(228)
附 录	(243)
附录一 法定计量单位与现场常用单位对照换算表	(243)
附录二 本书常用符号分类对照表	(243)
主要参考文献	(250)

绪 论

石油和煤是我国工业的主要能源。“六五”计划规定能源总产量每年增长1.4%，工农业总产值平均每年增长4%，争取达到5%。1983年和1984年的能源增长速度都超过6%，而这两年的工业实际增长速度都超过10%，由此说明工业的增长同能源的增长有着密切的联系。

增加石油、天然气产量，除了开发、管理好现有油气田外，还要大力勘探和开发新的油气田。在勘探开发新油气田的过程中，始终存在着齐全、准确地搜集各项地质资料，正确评价油气藏和管理好油气田的工作，试采^①地质工作正是这项工作的一部分。

随着生产技术和生产形势的发展，今后各油气田的钻井队，不可避免地要接触试油和测试工作，因而钻井地质采集人员，还肩负着部分油气田开发所需资料的获取和搜集的任务。《试采地质》课程的目的和任务，就是使钻井地质专业的学生，了解试采工艺流程，掌握试采资料的搜集、整理与分析的基本知识和基本技能，了解油气田开发的基础知识，为今后完成试采地质任务和为油气田的现代化建设贡献力量打下基础。

《试采地质》不是一门独立的学科，它是油矿地质的一部分，是涉及石油地质、油层物理、油气层渗流力学、油气田开发和油气井开采等多种学科的综合课程。在这门课程中，将给同学们介绍油气渗流的基本知识、试油工艺流程、中途测试、压裂、酸化、油气井试井、油气田开发基本知识及油水井的管理与动态分析等内容。并尽量介绍国内各油气田现场使用的有关这些方面的新技术、新成果。

在《试采地质》课程中，对理论和设备，只作一般介绍，对繁难的公式一般不进行推导，重点是实用部分，包括资料的搜集，运用各种有关公式进行整理和计算，以及对这些资料的分析应用等。在学习中应牢固建立流体在油气层中渗流的概念，了解各种工艺措施的基本原理；对于各种公式，要了解其意义，掌握应用的方法。如公式中各参数的意义，选取方法，以及对计算结果的分析应用等等。

^①通常说的“试采”在现场有两种含意：一是指生产工作阶段，即油田的开发试验区或一个地区的部分井，在正式投入开发以前进行试验性生产，这个阶段的采油生产叫试采；另一种含意是指工作内容，即把试油、采油两种相近的工作统称试采，并包括贯穿在这两种工作中的测试、试井以及钻井过程中进行的中途测试等。如通过试采为油田开发积累经验却是前一种含意；试采地质工作即是后一种含意。

第一章 油气渗流的基本知识

通过《石油地质学》的学习，已经知道油气在地层中形成后，经过运移，到一定的地质构造中储集起来形成油气藏。当人们找到这种含油气构造并在构造上钻井，钻开油气层后，油气就在地层压力的作用下喷出或抽出地面，而且用各种办法，尽可能多的把地下油气采出来。这种找到油气藏，通过钻井，并尽可能多的把油气采出来的全过程，就是勘探和开发。前面已经谈到，试采地质工作就是贯穿在勘探和开发过程中总的地质研究工作的一部分。因此在学习《试采地质》时，必然要接触到油气在地层中如何运动的问题，为了便于今后的学习，这里简要地介绍一些流体力学的基本概念及渗流的基本知识。

第一节 流体流动的一般知识

一、流体可视为连续介质

液体和气体统称为流体。在日常生活和生产实践中到处可以碰到流体的流动。例如，自来水管内的水流，输油、气管线中油、气的流动，河渠、水渠中的水流等等。

研究流体平衡和运动的学科统称为流体力学。

从物理概念来看，流体是由大量的分子组成的集合体。分子之间具有一定间隙，流体在运动中，分子之间互相碰撞，同时它们又和容器壁发生碰撞。我们知道在标准状况下1摩尔气体中有 6.02×10^{23} 个分子在运动，这个事实一方面说明分子数量很大，如以个别分子为对象来研究，困难很大；另一方面也说明分子间的间隙非常小，可以忽略不计。所以流体力学假定流体是由无限多个微小质点所组成的中间没有空隙的连续介质。这样就可避免微观的研究分子运动，而是研究流体的宏观运动。实践证明，这种宏观的流体内部物质均匀分布，各个方向力学性质相同，即它是一种均质、连续、各向同性的介质，这样我们就可以方便地将数学计算方法运用到流体力学之中。

二、稳定流和不稳定流

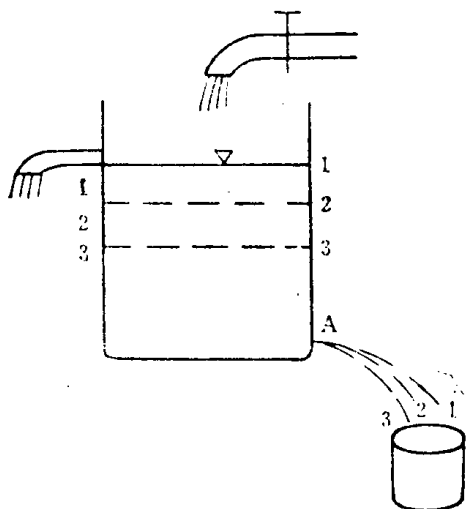


图1-1 稳定流和不稳定流示意图

流体的流动常可分为稳定流和不稳定流两大类。

流体流动时，其中每一质点在某一瞬时，它都占据着一定的空间点(X、Y、Z)，从而使该点上具有一定的速度、压力、密度及温度等标志流体状态的运动参数。如果每一空间点全部运动参数都不随时间而变，这样的流动就叫做稳定流；反之，每一空间点上全部或部分运动参数随时间而改变的流动，就称为不稳定流。如图1-1中，水箱上部有进水管，上部侧面有溢流管，下部侧面钻有小孔A，适当调节进水阀门，就可以保持水箱的水位稳定在水

平面1-1的位置，此时水箱中的水从小孔A流出所形成的液流A-1，其运动参数就不随时间的改变而变化，液流A-1的形态保持不变，这种液流就是稳定流。如果把进水管的阀门关闭，而小孔A继续流水，则水箱中的水位将随时间而改变，水从小孔A流出所形成的液流，其运动参数就要变化，液流形态也要改变。如液面降到2-2，液流对应为A-2，液面降到3-3，液流对应为A-3，这种液流就是不稳定流。

实际上遇到的流动，大都是不稳定流，稳定流是很少的，也是相对的、暂时的。但是研究稳定流比较容易，而且在许多情况下，可以近似地将不稳定流动看成是许许多多段稳定流动的组合。

三、流线、流束、总流及流量

在图1-2所示的水箱出流中，将一根有色的细线放在排水孔A中，在有水出流时，我们将看到细线受水冲动形成ABC曲线，而不可能形成ABC'曲线，因为ABC曲线的形成符合细线上水流各质点的运动方向，即曲线ABC上各质点的切线方向代表我们观察时刻水流各质点的运动方向。图1-3为水流在不同直径的管道中流动，采用与上例相同的方法，用几根细线置于水中，就会形成图中所示的曲线，曲线上每一质点的切线方向，也代表我们观察时刻各质点流动的方向。水力学中，将能代表某一时刻液流空间中一系列位置上许多质点运动方向的曲线叫流线，线上任何一点的速度与流线相切。显然，上面两例实验中，有色细线形成的曲线，就是我们观察时刻的液流流线。

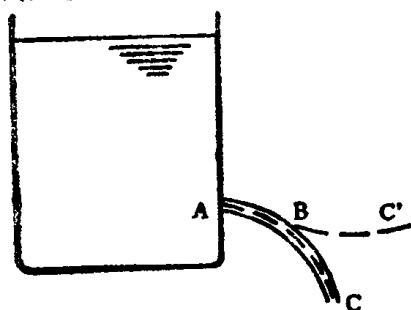


图1-2 流线观察示意图之一



图1-3 流线观察示意图之二

由上述定义可知，如图1-4所示，某时刻流线上任一点的切线方向，表示了液流质点在该时刻经该点时的流速方向。同时，液流每质点在某一时刻只能有一个固定的流速方向，通过这一点也只能有一条流线。这说明：任意两条流线不可能相交，任一条流线不能是折线，这是流线的两条基本性质。对于稳定流，运动参数不随时间变化，流线形状也不变。这样，我们就可以应用流线来研究液流的运动规律。

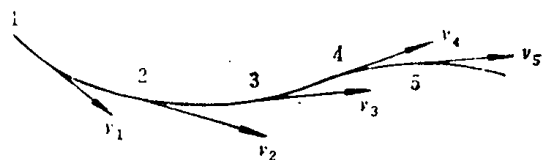


图1-4 流线



图1-5 流束

如图1-5所示，在液流中任取一微小面积 ΔA ，通过此面积边界上每一个点作流线，这一组流线就构成一个管状的曲面，我们叫它为流管。充满整个流管以及包括流管表面的这一小股液流叫做流束。许许多多流束的组合就构成液流的整体，叫做总流。

在流束或总流中，与每一根流线都垂直的横断面叫做过水断面，如图1-6中的横断面1-1、2-2、3-3。

单位时间内通过流束或总流任一过水断面的流体数量叫做流量。流量又可分为重量流量（质量流量）及体积流量等，在石油工业中常用的为体积流量，用 qv 表示，单位是 m^3/s 、 m^3/d 或 L/s 。

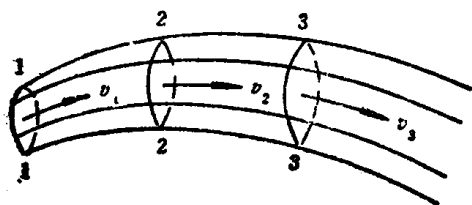


图1-6 过水断面

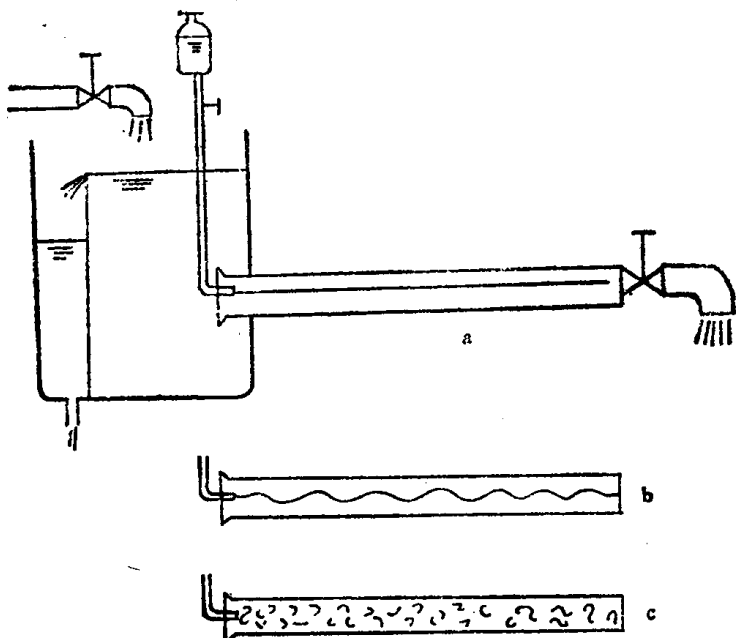


图1-7 雷诺试验示意图

四、层流、紊流、雷诺数

水力学工作者在研究液流沿程的水头损失^①时，发现当流速不同时，沿程的水头损失与流速的关系是变化的，并认为由于流速不同，存在着两种不同的流动状态，因而水头损失也就不同。1883年雷诺采用实验的方法对液流的两种流态作了极其仔细的观察和研究，得出了判断两种流态的方法。雷诺试验是在水流中注入一小股性质相同并经过染色的水束，当流速很小时，可以看到颜色水细流象一条直线一样从管中穿过，它和周围的清水互不掺混，如图1-7中的a所示，这时管内的水流质点是互不干扰，有条不紊地平行向前流动。把流速逐渐增大，开始时颜色水细流仍然是一条直线，随着流速进一步增大，颜色水细流则逐渐发生颤动，并呈现出波状的轮廓，不过颜色水细流仍不与周围的水流相互混杂，如图1-7b所示。当流速继续增大，颜色水细流由颤动变为剧烈抖动，并向四周扩散，随着速度增大，颜色水和周围的水完全掺混在一起，整个玻璃管中的水流都染上了颜色，如图1-7c所示。此后又反过来将流速减小，当流速减小到一定程度时，管中掺混的颜色水，就逐渐恢复为如图1-7b所示的情况。流速继续减小到一定程度时，管中的颜色水细流就恢复到图1-7a所示的情况。这种液体质点互不混杂，有条不紊地平行向前的流动叫做层流，如图1-7a所示；在液体流动中，其液体质点互相混杂，毫无秩序地流动叫做紊流，如图1-7c所示；介于层流与紊流之间的流态，为两种流动状态转化的过渡状态，叫临界状态。

液流由一种状态转化为另一种状态时的流速叫临界流速，实验表明：由层流转化为紊流的临界流速 W'_L 与由紊流转化为层流的临界流速 W''_L 是不相等的，且 $W'_L > W''_L$ ， W'_L 叫做上临界流速， W''_L 叫做下临界流速。通常把下临界流速 W_L 作为判别流态的标准，用 W_L 表示。

实验证明：同一液体在不同直径的管中流动，管径越大，临界流速越小；管径越小，临

①液流各质点之间有相互运动时，就会出现相互阻碍作用的粘滞力，克服这种粘滞阻力和克服液流与管壁的摩擦阻力都要消耗能量，断面之间的能量损失叫水头损失。液体在管道中流动叫管流，水力学中对管流的水头损失，一般按照它在管道中的分布情况分为两类，即沿程水头损失和局部水头损失。均匀分布在直管段中的水头损失叫沿程水头损失。

界流速越大。而在同一管中流动的不同粘度的液体，则是粘度越大临界流速越大，粘度越小临界流速也越小。此外，从这个实验开始就得知流速增大，有利于层流向紊流转化。雷诺经过大量实验研究，提出了包括上述三个因素（流速、管径、粘度）在内的无因次量 Re 来衡量液体由层流向紊流的转化。 Re 叫做雷诺数，从物理意义看，它是惯性力与粘滞力的比值。雷诺数的定义是

$$Re = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘滞力}} = \frac{Wd}{\nu} \quad (1-1)$$

式中 W ——流速， m/s ；

d ——圆管直径， m ；

ν ——流体运动粘度， m^2/s 。

无论液体的流速 W 、粘度 ν 及管径 d 怎样变化，只要三者组成的雷诺数 Re 值达到一个相同的定值 Re_L ，液体就由一种流态转化为另一种流态。 Re_L 叫做临界雷诺数。用临界雷诺数判断流动型态，当 $Re < Re_L$ 时为层流，若 $Re \geq Re_L$ 时为紊流。由实验得到圆管内流动时 Re_L 约等于2000~2300。

前面提到在研究液流沿程水头损失时发现，液流沿程损失与流速的关系是变化的，实验还证明存在层流和紊流这样两种流态。层流时，液流沿程水头损失 h_f 与流速的一次方成正比；紊流时，沿程水头损失与流速的平方成正比；临界状态时沿程水头损失与流速的1.75~2次方成正比。临界状态已属于紊流，这样，沿程水头损失与流速的关系是

层流时 $h_f \propto W$ ；

紊流时 $h_f \propto W^{1.75 \sim 2}$ 。

第二节 渗流及其基本规律

一、渗流

上一节主要讨论的是流体在管道中流动的一些概念。但我们知道石油和天然气是储集在地下岩石的孔隙和裂缝中，这些孔隙或裂缝既是油气的储集空间，又是开采中油气流向井底的流动通道。那么油气在这些孔隙介质中流动又是什么状态？遵循什么样的规律呢？下面我们就来讨论这方面的有关问题。

流体通过多孔介质（孔隙介质、裂缝介质和毛细管体系等）的流动叫做渗流。渗流同明渠或管道里的流动不同，具有以下特点：

岩石的孔隙通道形状极不规则，表面很粗糙，渗流通道截面积很小（孔隙介质约为 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 平方厘米，微裂缝宽约0.2微米）；孔隙介质的比面（单位岩石体积内所有颗粒的总面积）很大。在渗流过程中由于流体本身的粘滞性，使得渗流阻力很大，造成渗流速度很小。例如在油井日产量为100立方米，油层厚度为10米，孔隙度为20%的情况下，在距井轴100米的半径处，原油流速小于 10^{-6} 米每秒。由于渗流的这些特点，使得渗流具有自己的规律。

上面提到的新概念——渗流速度，是一个假想的速度，从上一节我们知道流体的体积流量是单位时间内通过总流任一过水断面的流体数量，对于管道内的流动则其流量 $qv = FW$ ， F 为管子内径的横断面。对于渗流来说，如果要准确描述流体通过的孔隙通道的几何形态，几乎是无法作到的。因此，设想流体通过的孔隙介质里面什么也没有，整个岩石断面都为流

体所通过时的平均速度称做渗流速度。即

$$V = \frac{q_v}{F} \quad (1-2)$$

式中 V ——渗流速度, m/s;

q_v ——流体体积流量, m³/s;

F ——流体通过的多孔介质横截面, m²。

引用渗流速度这一概念, 把渗流看作连续介质, 就可直接采用流体力学研究流体运动和教学分析方法等来研究渗流。事实上, 由于多孔介质的过水断面上只有部分能让流体流过, 而其余部分却是被岩石颗粒所占据, 因此渗流速度和真实速度的关系是

$$V = mW \quad (1-3)$$

式中 m ——孔隙度, %;

W ——真实速度, m/s。

二、基本渗流规律

一百多年前, 法国水利工程师达西为解决给水净化问题, 进行过大量的水透过砂层渗流的实验。实验证明: 通过砂层的渗流流量与水头损失 (即压力差) 成正比; 与渗流横断面积成正比; 与渗流通过砂层段长度成反比。写成表达式为

$$q_v = KF \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1-4)$$

或

$$V = K \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1-5)$$

式中 q_v ——单位时间内通过砂层的液体体积流量;

K ——渗滤系数, 与流体性质、砂层通过流体的能力等有关;

F ——渗流横断面积;

ΔH ——砂层两端的水头差;

ΔL ——渗流通过砂层段长度;

V ——渗流速度。

式 (1-4) 和式 (1-5) 叫达西公式或达西定律。达西实验是对水进行的, 后来经过多次实验证明: 当水头差 ΔH 不变时, 通过砂层的流量与液体的粘度成反比。当流经的砂层是水平的, 并从两端测定其压力, 则达西定律可写成

$$V = \frac{q_v}{F} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (1-6)$$

式中 k ——渗透率, 表示砂层渗透性大小的参数;

μ ——流体的粘度;

其余符号意义同前。

把同一液体渗流过同一砂层的实验数据整理到以渗

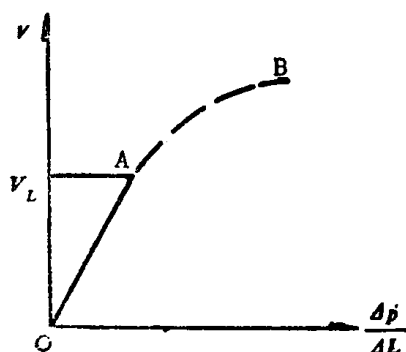


图1-8 达西实验曲线

流速度 V 为纵轴, 以压力梯度 $\frac{\Delta p}{\Delta L}$ 为横轴的图上, 得到如图1-8中的曲线。从图上可以看出, 当渗流速度比较小

时 ($V < V_L$, V_L 即临界渗流速度), 渗流速度 V 和压力梯度 $\frac{\Delta p}{\Delta L}$ 的关系曲线成一条直线。

式(1-6)就是后来常用的达西定律的数学表达式,又叫线性渗流定律,它表示渗流速度比较小的时候,渗流速度和压力梯度之间成一次方的关系——线性关系。一般认为服从线性定律的渗流类似于管流的层流流动(流体阻力损失和流速成正比)。这时渗流阻力是由流体本身具有的粘滞性所产生的,粘滞阻力起重要作用。

上面我们在讨论线性渗流定律时,还接触到一个今后常用的参数——渗透率。由式(1-6)得

$$k = \frac{q_v \mu \Delta L}{F \Delta p} \quad (1-7)$$

渗透率的单位,在上式中取 $q_v = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, $\mu = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\Delta L = 1 \text{ m}$, $F = 1 \text{ m}^2$, $\Delta p = 1 \text{ Pa}$,则此时的渗透率 $k = 1 \text{ m}^2$ 。

三、非线性渗流规律

在图1-8中我们可以看到,当渗流速度增大到一定程度之后,渗流速度和压力梯度之间不成线性关系,如图1-8中曲线AB,达西定律被破坏,这时的流动叫做非线性渗流。一般认为非线性渗流时流体质点成互相混杂的紊流状态,产生惯性摩擦阻力。表述非线性渗流的数学式有两种形式

1. 指数式

$$V = C \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)^n \quad (1-8)$$

式中 C ——渗流系数,与流体及岩石的性质有关;

n ——渗流指数,随渗流速度变化而改变。

实验证明: $1/2 \leq n \leq 1$ 。当 $n=1$ 时, $C = \frac{k}{\mu}$,式(1-8)就是式(1-6),这时的流动类似管流中的层流,只有粘滞阻力起作用;当 $1/2 < n < 1$ 时,称为渗流过渡区,随着渗流速度的增大,惯性阻力的作用逐渐明显起来。粘滞阻力所占比例逐渐减小,渗流速度与压力梯度成非线性关系,流态类似于管流中的临界状态;当 $n=1/2$ 时,称为渗流平方区,流态类似于管流中的紊流,这时渗流阻力以惯性阻力为主,在此之后惯性阻力的增加与压差成固定的比例关系。

2. 二项式

当流体在水平砂层中运动时,还可以另一种形式表示非线性渗流,即

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = -\frac{\mu}{k} V + \alpha \rho V^2 \quad (1-9)$$

式中 ρ ——流体密度;

α ——影响惯性阻力的孔隙结构几何特征参数,由实验确定;

其他符号意义同前。

式(1-9)为表征渗流过程有惯性阻力出现时的力学规律,也叫非线性运动方程的二项式。公式的物理意义在于它表明渗流通过 ΔL 距离的阻力由两部分组成:右边第一项是粘滞阻力,与渗流速度成正比(线性关系),类似层流;右边第二项是惯性阻力,它与渗流速度的平方成正比。当渗流速度小时,第二项与第一项相比,可以忽略,就成为达西定律。随着渗流速度的增加,逐渐转变为第二项惯性阻力起主要作用,类似紊流。

四、渗流状况的判别

从第一节中我们已知在管流中随着流速的变化,存在着层流和紊流,这两种流态转变时

的流速就是临界流速，并且可用雷诺数来判别这两种流态。在渗流中，也存在线性渗流和非线性渗流。在图 1-8 中我们可以看到，当渗流速度超过 V_L 时，渗流速度和压力梯度的关系曲线由直线 OA 转变为曲线 AB，即渗流由服从线性定律变为服从非线性定律，这渗流速度 V_L 就叫做临界渗流速度。为了判别线性渗流和非线性渗流，人们仿照流体力学的研究方法，进行了大量的研究实验，并提出过不少计算雷诺数的公式，目前被认为比较好的并用得较普遍的是苏联 $\Phi. H.$ 卡佳霍夫等得出的公式，即

$$Re = \frac{5.659 V \sqrt{k \rho}}{\mu m^{3/2}} \quad (1-10)$$

式中 Re ——雷诺数；

V ——渗流速度，m/s；

k ——渗透率， m^2 ；

ρ ——液体密度， kg/m^3 ；

μ ——液体粘度， $Pa \cdot s$ ；

m ——孔隙度，%。

实验证明：对于粒间孔隙介质（如一般砂岩），临界雷诺数 $Re_L = 0.2 \sim 0.3$ 。当渗流的雷诺数值大于 Re_L 时，渗流规律由线性向非线性转化。

对于裂缝介质，临界雷诺数的变化范围很大。例如：在纯裂缝地层中，临界雷诺数为几十到几百（ $Re_L = 30 \sim 500$ 左右）；而大的洞穴则接近管流，临界雷诺数达到几千（ $Re_L = 2000 \sim 3000$ ）。

生产实践证明：大多数情况下，油藏渗流服从线性渗流规律，仅在井壁附近由于有效过水断面减小。渗流速度增大，有破坏线性渗流规律的可能。对于气藏渗流来说，非线性渗流规律（指数式、二项式）已在气井试井中广泛应用。

第三节 流体的平面径向渗流

一、渗流基本方式

油气藏在未开发以前，处于均衡受压状态，此时油气层中的流体不会产生流动。当油气层被打开进行生产时，平衡状态遭到破坏，井底压力降低，地层和井底之间形成一定的压力差，在这个压力差的作用下，流体从油气层流入井底。

石油和天然气在储集层中的渗流，受到储集层空间范围的限制，使流线出现不同的形态。储集层的空间几何形状控制着油气流动的边界和范围。所以，油气层中的渗流方式可以按油气层或局部地区的几何形态来区分。实际油气藏形态和布井状况都是不规则和比较复杂的，为了便于运用数学手段进行分析研究，将实际油气藏形态经过简化，抽出具有共性的特征，归纳出典型的渗流方式，有实际意义的有以下几种：

1. 单向平行渗流

如图 1-9 所示，渗流断面处处相等，流线彼此平行，断面上各点的流速不仅互相平行而且相等，压力仅沿一个座标方向变化。在实践中，属于单向渗流的，如实验室中油、气通过柱状岩心的轴向平行流动；实际地层如三面为不透流的狭长地带，液流横断面变化不大，液源自一个方向向生产井排的流动（图 1-10），可视为单向流动。

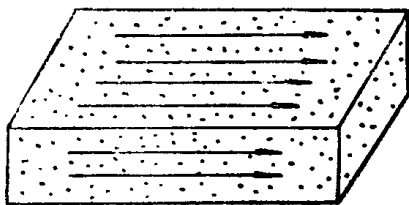


图1-9 单向平行渗流

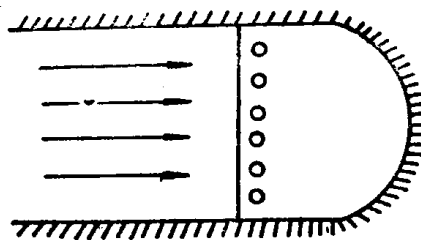


图1-10 单向流动

2. 平面径向渗流

如图1-11所示，流线平行于水平面，在平行于水平面的各平面内，流线从四周向中心汇聚。在实际中，油、气向完善井（油层被全部打开，且在油层部分是裸露的）的流动属平面径向流。在平面径向渗流时，渗流断面不是平面，而是与井轴同心的圆柱面，越接近井底圆柱面的半径越小，因此渗流断面越小，渗流速度越大，阻力也越大，液流通过单位距离的压力消耗也越大。

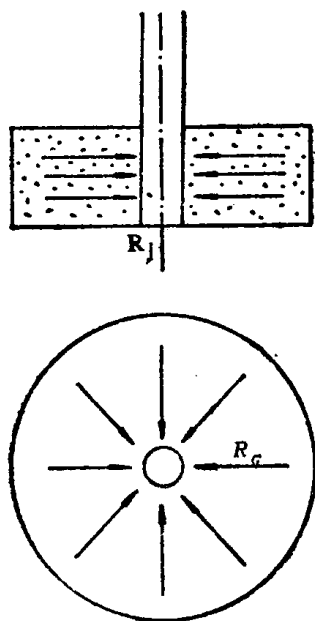


图1-11 平面径向流

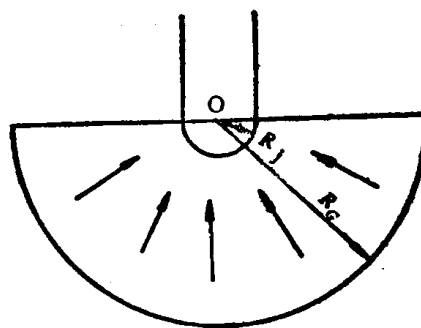


图1-12 球形径向流

3. 球形径向渗流

如图1-12所示，所有流线呈辐射状汇聚于一点。实际油气层中，当井只打开储集层顶部，或者虽然钻开一部分厚度，但它和储集层厚度相比很小，这时在井底的流动可视为球形径向渗流。

以上几种按储集层几何形态来区分的渗流方式中，对油、气井试井最有实际意义的是平面径向渗流。下面我们将主要讨论流体在服从不同渗流定律时的平面径向流。

二、服从线性渗流规律的平面径向稳定渗流

设井位于圆形、均质、水平、等厚产层的中心，为完善井。此时流体流入井即为平面径向流，如图1-13所示。

实际油气层若倾角不大，渗透性，孔隙性和厚度等变化不大时，产层可近似地认为满足均质、等厚、水平的条件。计算证明，即使油气层边界并非规则的圆形或井稍偏离圆形的中心，或所选用的供给边界半径 R_G 与实际供给半径有一定差距，按平面径向流考虑，计算结果误差不是很大。

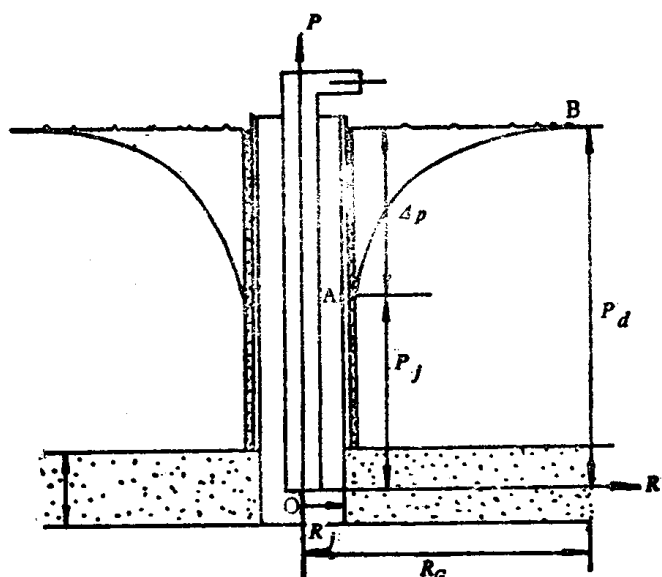


图1-13 平面径向渗流示意图

当井未生产时，地层压力到处都是 p_d ，井生产后稳定流动，此时供给边界 R_G 处压力仍为 p_d ，井底压力则为 p_j 。流体就在地层和井底间形成的固定压力差 Δp ($p_d - p_j$) 的作用下，不断从地层流至井底。这时的过水断面是许许多多与井轴同心的圆柱面，且越接近井轴，过水断面越小。如果流体是单相(纯油、纯水或纯气)，并服从线性渗流时，对井产量 q_v 与压力差 Δp 的关系以及地层内压力的分布情况，下面将分别进行讨论。

1. 流体为液体时

设井的供给边界有充足的液源，保持稳定的地层压力 p_d ；供给半径 R_G 、井半径 R_i 、地层厚度 h 、孔隙度 m 、渗透率 k 均为已知时，井的产量公式为

$$q_v = \frac{2\pi kh(p_d - p_j)}{B\mu \ln \frac{R_G}{R_i}} \quad (1-11)$$

式中 q_v ——井地面产量， m^3/s ；

K ——渗透率， m^2 ；

h ——产层厚度， m ；

B ——原油或水的体积系数；

μ ——原油或水的粘度， $Pa \cdot s$ ；

p_d ——地层压力， Pa ；

p_j ——井底流动压力， Pa ；

R_G ——产层供给边界半径， m ；

R_i ——井半径， m 。

地层内距井轴中心为 R 的任一点处的压力表达式为

$$p = p_j + \frac{p_d - p_j}{\ln \frac{R_G}{R_i}} \ln \frac{R}{R_i} \quad (1-12)$$

或

$$p = p_d - \frac{p_d - p_j}{\ln \frac{R_G}{R_i}} \ln \frac{R_G}{R} \quad (1-13)$$

式中 p ——地层内距井轴中心为 R 的任一点处的压力, Pa;

R ——地层任一点到井轴线的距离, m; 其余符号意义同前。

地层内距井轴中心为 R 的任一点处的渗流速度为

$$V = \frac{k}{\mu} \frac{p_a - p_i}{\ln \frac{R_G}{R_i}} \frac{1}{R} \quad (1-14)$$

式中 V ——渗流速度, m/s;

其余符号意义同前。

从式 (1-11) 可以看出, 产量 q_v 与压差 $(P_a - P_i)$ 和流动系数 $\frac{kh}{\mu}$ 成正比。

可把式 (1-11) 简写成

$$q_v = K \Delta p$$

式中

$$K = \frac{2\pi kh}{B\mu \ln \frac{R_G}{R_i}};$$

$$\Delta p = p_a - p_i$$

把产量 q_v 作横轴, 压差 Δp 作纵轴所得的关系曲线, 现场叫做指示曲线 (图 1-14)。当渗流为稳定流, 服从线性定律时, 关系曲线为一直线, 即产量随压力差的增加而成正比增加。系数 K 即直线 OA 的斜率, 叫做采油指数, 它反映井生产力的大小。

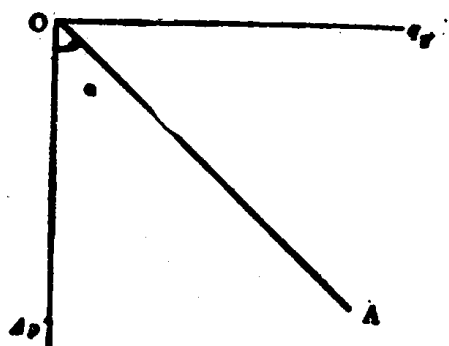


图 1-14 指示曲线

从式 (1-11) 看出, 如要提高井的产量可以有两个途径: 一是增加压差, 其方法是增加边界供给压力或降低井底压力。但是当井底压力低于饱和压力时, 地层将出现油、气两相渗流, 从而降低油相渗透率, 因此一般不采取降低井底压力的办法, 而采取注水提高地层压力的办法。另一途径是提高流动系数 $\frac{kh}{\mu}$ 值, 其方法是通过各种措施提高地层的渗透率 k 或降低原油粘度 μ 。

从式 (1-12) 可以看出, 在平面径向流时, 地层内任一点的压力 p 与这点到井轴线的距离 R 成对数关系, 如果以井的轴线代表压力作纵轴, 以半径 R 为横轴, 作压力 p 与距离 R 的关系曲线, 得到的地层压力分布曲线是一条对数曲线, 如图 1-13 所示的曲线 AB 。这是在一个方向上的图象, 从井的供给面积内来看, 压力分布则是 AB 曲线绕井轴旋转一周所构成的漏斗状的压降面, 矿场上习惯称它为“压降漏斗”。压力分布曲线 AB 是对数曲线, 越靠近井壁曲线越陡, 说明液流从地层供给边界流向井底, 愈靠近井壁压力耗损越大, 这是因为在平面径向流时, 愈靠近井底渗流断面越小, 渗流速度越大。因此, 压力大部分消耗在井底附近。从式 (1-14) 也可以看出, 地层内距井轴 R 处任一点的渗流速度与 R 成反比关系, R 越小渗流速度越大, 井壁处 R 最小, 因此渗流速度最大。压力梯度与渗流速度成正比, 所以越靠近井底压力梯度越大, 即通过单位距离的压力耗损越大。

产量公式 (1-11) 在油田上实际应用时, 式中各项参数可根据实际资料来确定。其中地层压力 p_a 用油井关井后测得的地层静止压力, 井底压力 p_i 为生产时实测的井底流动压力。供给半径 R_G 在实际井网系统中的确定方法是: 根据已知的井排距离确定油井的泄油面积 A ,

如图1-15所示,然后将面积 A 换算成等值的圆面积 $A=\pi R_G^2$,由此可求出供给半径 R_G

$$R_G = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

也可采取井距之半作为供给半径,由于 R_G 在对数符号之内,故对产量的影响是很小的。

在已知地层及流体参数时,用式(1-11)可确定油井产量。反之,若已知油井的产量

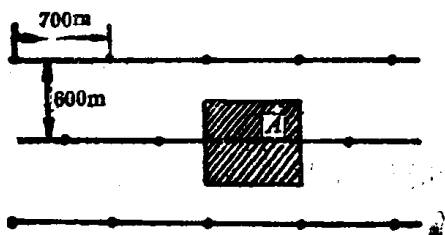


图1-15 多井生产时井的泄油面积

和压差时,则可用此式反求地层的参数。

上列公式是在完善井的条件下推导的,实际油井大部分都是不完善的,这些不完善井归纳起来可以分为三种类型:

- (1) 打开程度不完善 油层未全部打开,但打开部分是裸眼完成的(图1-16a)。
- (2) 打开性质不完善 油层全部被钻开,下套管射孔完成(图1-16b)。
- (3) 双重不完善 油层未全部钻开,钻开的部分又是下套管射孔完成(图1-16c)。

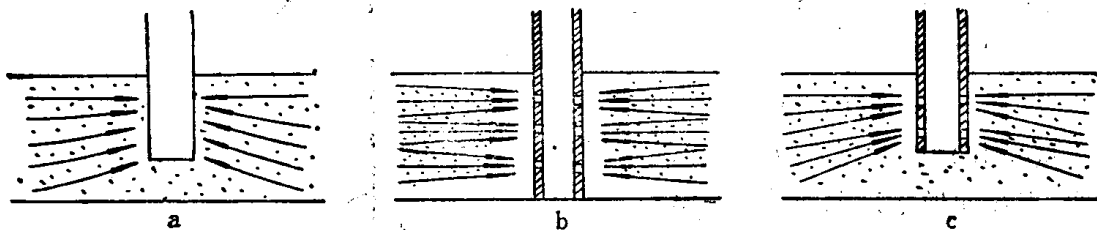


图1-16 不完善井示意图

不完善井在井底附近渗流面积较小,流线发生弯曲和密集,渗流阻力增加,产量比完善井要低,在运用式(1-11)时,需要进行修正,方法是把实际的不完善井化为一个井径较小的假想的完善井,这种假想的完善井的半径称为折算半径,它的产量和压差与实际的不完善井相等。这样,用折算半径进行计算时,产量公式为

$$q_v = \frac{2\pi kh(p_d - p_i)}{B\mu \ln \frac{R_G}{R_z}} \quad (1-15)$$

折算半径 R_z 目前主要通过不稳定试井资料来确定。

油井的不完善性也可以用增加一个附加阻力的方法来表示,其公式为

$$q_v = \frac{2\pi kh(p_d - p_i)}{B\mu \left(\ln \frac{R_G}{R_i} + C \right)} \quad (1-16)$$

附加阻力 c 可通过实验确定或在有关书中查用,但由于求出的 c 值与实际出入太大已不常用。

2. 流体为天然气时

研究流体为天然气,在平面径向稳定渗流,服从线性定律的渗流规律时,仍然假设气井位于圆形、均质、水平等厚地层的中心。由于气体比液体有更大的压缩性,随着压力变化,气体状态也要产生变化,考虑这些特点,仿照研究液体渗流的方法,得到气井产量公式为

$$Q_b = \frac{\pi kh}{\mu} \frac{T_b}{P_b Z_b T_d} \frac{P_d^2 - P_i^2}{\ln \frac{R_G}{R_i}} \quad (1-17)$$

简写为

$$Q_b = A (P_d^2 - P_i^2)$$