

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

现代油藏渗流力学原理(下册)

*The Modern Mechanics of
Fluids Flow in Oil Reservoir*

葛家理 刘月田 姚约东 编

石油工业出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

现代油藏渗流力学原理

**The Modern Mechanics of
Fluids Flow in Oil Reservoir**

(下册)

葛家理 刘月田 姚约东 编

石油工业出版社

内容提要

《现代油藏渗流力学原理》是1999年获北京科技著作奖的“油气层渗流力学”一书的第三版。目前在我国及世界上发现了很多特种油气田等待开发(低渗油田、高粘油田、裂缝溶洞油田以及凝析气田等等),这就需要研究特种油田流体的复杂渗流规律。所以本书就以下三个方向做了增新:(1)将现代新兴科学、横断科学与传统渗流力学相集成,以便渗流力学有一个创新发展;(2)全面发展了传统渗流力学的深度和广度(如:单纯介质向变异介质、牛顿液向非牛顿液、单组分向多组分渗流理论的发展);(3)渗流力学理论研究向油田开发实际应用方向发展(如化学驱提高采收率、水平井、分枝井渗流开发理论等)。而且以上新增内容都是作者们近年来科研成果经系统化、规律化后形成的。

本书是教育部2002年最新审订的有关专业(石油天然气、流体力学、地热、地下水工程及各种流体矿藏开发等)研究生教学用书,也可作为广大科技工作者进行科研工作参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

现代油藏渗流力学原理下册/葛家理主编.—3版.

北京:石油工业出版社,2003.2

研究生教学用书

ISBN 7-5021-4064-6

I. 现… II. 葛… III. 油气藏渗流力学

IV. TE312

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第106272号

现代油藏渗流力学原理(下册)

葛家理 主编

出版发行	石油工业出版社出版		
社 址	北京安定门外安华里二区一号楼	邮 编	100011
电 话	010-64202634	传 真	010-64210392
经 销	新华书店北京发行所发行		
排 版	石油工业出版社印刷厂排版		
印 刷	石油工业出版社印刷厂印刷		
开 本	787×1092 1/16	版 次	2003年2月北京第1版
印 数	1—3000	印 次	2003年2月北京第1次印刷
印 张	11.25	书 号	ISBN 7-5021-4064-6/TE·2905
字 数	184千字	定 价	28.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

《现代油藏渗流力学原理》是教育部下发（教研办）字〔2002〕2号文公布的我国研究生的教学用书，也是1999年获北京科技著作奖的“油气层渗流力学”的第三版。本书在1982年经石油工业出版社作为当时石油部属院校统编教材首次出版以来，经过近18年的使用考验，已经成为各大学高层次人才培养的教材，并为广大科研工作者引用。1999年本书被北京市评为科技进步著作奖，市场上已经销售一空，纷纷要求再版。

但是，针对十几年来渗流力学学科的发展和进步，本书原版只能满足各校本科生的要求，而对博、硕士生培养有创造力人才要求来说，就需加以补充增新内容，而且在科学上还应略有超前，以保证适应21世纪初期教学和科研要求，因此就不能简单再版，于是在2001年我们又将自己多年科研成果增新编入本书第二版，并将书名改为“现代油藏渗流力学原理”。本书已经教育部审订列为2002年我国研究生教学正式用书，现进行第三版再版发行。

本书的特点是：

1. 本书为适应现代科学的发展，增加了新的研究成果，为培养具有创造力人才和创新科研提供基础知识

目前在我国及世界上发现了很多特种油气田等待开发（低渗油田、高粘油田、裂缝溶洞油田以及凝析气田等等），这就需要研究特种油田流体的复杂渗流规律。所以本书就以三个方向做了增新补充：（1）将现代新兴科学、横断科学与传统渗流力学相集成，以便渗流力学有一个创新发展；（2）全面发展了传统渗流力学的深度和广度（如：单纯介质向变异介质、牛顿液向非牛顿液、单组分向多组分渗流理论的发展）；（3）渗流力学理论研究向油田开发实际应用方向发展（如化学驱提高采收率、水平井、分枝井渗流开发理论等）。而且这些都是作者们将近年来科研成果经系统化、规律化后编入本书。

2. 本书为力争与国际研究水平相当及预留教材使用空间，尽量保持教科书的使用价值

这些新增内容不但力争与国际研究水平相当，而且都是我国自己的科研成果，所以本身就是有创新性的专著，这样本书将有近5年的提前量，

以保持书籍出版有较长时间的使用价值。

3. 本书为满足不同层次研究生教学的需要,采取了分别对待的措施

本版教科书分上、下两册,完全保持经教育部审订的内容,分为两册是经教育部研究生办公室同意的,目的是上册为硕士生选用,下册则是为博士生选用,以降低学生用书费用(只在个别章的顺序上略有调整)。

为了完成这个目标,作者师生集体(教授、副教授、博士后、博士、硕士生)在“七五”期间,石油部重点科研项目“带溶洞裂隙油藏(即三重介质)渗流规律”研究的基础上,“八五”、“九五”期间,又将裂缝介质渗流研究扩展到稠油、低渗、水平井开发、渗流系统信息辨识、智能布井、分形渗流力学等多方面研究,并将新发展的渗流力学与复杂性科学研究相结合,探索复杂油藏智能开发渗流理论。因此,开展了“863”项目(编号:863-306-102-113)、国家自然科学基金项目(编号:78970046)及国家“八五”攻关项目(编号:85-203-04-04)的综合集成研究。通过研究形成了有关系列论文64篇,并获国家教委(自然科学类)一等奖两次(裂缝油气藏渗流理论及开发分析新方法研究、非线性渗流力学理论应用及推广)及石油部科技进步二等奖(带溶洞裂缝介质渗流规律研究)等。

本书增新部分就是在上述统一目标、统一思路指导下,将长期形成的研究成果、科学论文及研究生学位论文,经过精炼提高、综合集成而形成的。

除主编及署名编者之外,在第一版中作者尚有朗兆新、赵必荣、翟云芳三位教授,在第二版中尚有栾志安、吴玉树、冯文光、同登科、刘月田、宁正福、曲德斌、周萍、周德华、吴新根、姚约东等博士在攻读学位论文的工作合作成果,在本书第三版教材中尚有涂彬、郭小哲、葛凤龙、刘芳等在编写工作中的协作。特别要提出的是中国科学院渗流所黄延章教授也将科研成果发表在本书第十六章之中,及我国已故渗流力学专家陈钟祥的研究工作在第十一章之中。所以,本书也可以说是全国很多院校(石油大学、西南石油学院、大庆石油学院、中国科学院渗流所、北京石油勘探开发研究院)几代师生的集体研究成果。我们愿将此书献给院校研究生们及广大读者在教学、科研中使用并欢迎批评指正。

目 录

第 1 章 油气非达西渗流的数学模型	1
§ 1-1 石油非达西渗流模式的实验研究	1
§ 1-2 石油非达西渗流物理意义及力学分析	3
1-2-1 斜率为 -2 的直线段	3
1-2-2 斜率为 -5/3 的直线段	3
1-2-3 斜率为 -1 的直线段	4
1-2-4 亚高速非达西渗流	4
1-2-5 水平直线段	4
§ 1-3 石油非达西渗流的基本规律	4
1-3-1 稳定渗流的研究	4
1-3-2 不稳定渗流的研究	5
§ 1-4 气体在低速下的渗流规律	5
第 2 章 分形介质渗流理论	8
§ 2-1 分形几何与分形油气藏	8
2-1-1 裂缝网络的分形特征	8
2-1-2 油藏动态的分形特性	9
2-1-3 分形在渗滤中的应用	9
§ 2-2 分形油藏渗流力学基础	12
2-2-1 经典孔隙模型与分形孔隙模型	12
2-2-2 分形油藏中的物性参数和运动定律	13
§ 2-3 分形油藏弹性不稳定渗流与稳定渗流	19
2-3-1 无限大分形油藏线源井压力分布解	19
2-3-2 分形油藏有限半径井不稳定渗流问题的解析解	21
2-3-3 有界分形油藏不稳定渗流	25
2-3-4 分形油藏稳定渗流	27
第 3 章 各向异性介质渗流理论	29
§ 3-1 各向异性油藏开发地质基础	29
3-1-1 各向异性油藏的表征	29
3-1-2 各向异性渗透率张量的测定	31
§ 3-2 各向异性油藏渗流基础	33

3-2-1 各向异性油藏渗流基本特征·····	33
3-2-2 各向异性油藏渗流数学模型·····	35
3-2-3 各向异性与各向同性介质空间的转换·····	38
§3-3 各向异性渗流基本理论·····	39
3-3-1 椭圆形流场相似流动替换理论·····	39
3-3-2 无界各向异性地层渗流理论·····	44
3-3-3 各向异性地层裂缝井渗流理论·····	48
§3-4 各向异性油藏多相渗流理论·····	51
第4章 网络介质渗流理论 ·····	55
§4-1 网络的油藏行为·····	55
§4-2 变异网络性质及其数值反演·····	56
4-2-1 裂缝、叉分原理·····	56
4-2-2 裂缝网络的分维特征·····	58
4-2-3 裂缝网络广义维数·····	59
4-2-4 均质和非均质分形裂缝网络·····	60
4-2-5 裂缝网络数值生成技术·····	61
§4-3 复杂性裂缝网络渗流及其变形效应·····	62
4-3-1 裂缝网络连续系统渗流规律·····	62
4-3-2 变异裂缝网络及动态渗透率·····	64
4-3-3 复杂性网络变异介质渗流模型·····	65
第5章 多相多组分流体渗流理论 ·····	69
§5-1 多组分系统的相态·····	69
§5-2 多相多组分气液系统渗流微分方程·····	73
§5-3 多组分渗流问题的某些特例及求解方法·····	75
5-3-1 稳定状态的平衡渗流·····	75
5-3-2 封闭地层中多组分流体的平衡渗流(近似解)·····	77
5-3-3 封闭地层中多组分渗流(挥发油或凝析气)的数值解·····	79
第6章 流体的非等温渗流理论 ·····	81
§6-1 含油气地层的热力学性质·····	81
6-1-1 固体和液体的比热·····	81
6-1-2 热传导系数(Thermal Conductivity)·····	82
6-1-3 热扩散系数·····	83
§6-2 多孔介质中的传热方式·····	83
§6-3 多孔介质中连续液相传热传质的描述·····	85
6-3-1 液体的连续性方程·····	85
6-3-2 液体的运动方程·····	85

6-3-3 液体的能量方程	85
6-3-4 固体的能量方程	86
6-3-5 温度和热的传导公式	86
6-3-6 液体状态方程式	86
第7章 水平井开发渗流理论	88
§7-1 水平井单井基本渗流规律实验研究	88
7-1-1 模型原理及实验装置	88
7-1-2 水平井开发中几个基本渗流机理问题	89
7-1-3 结论	95
§7-2 水平井一直井联合布井多井渗流理论	96
7-2-1 五点法面积井网	96
7-2-2 七点法面积井网	102
§7-3 水平井一直井联合布井注水开发理论	108
7-3-1 水平井一直井五点法面积注水开发设计理论及方法	108
7-3-2 水平井一直井七点法面积注水开发设计理论及方法	109
7-3-3 水平井一直井线性分隔注水开发设计理论	109
7-3-4 水平井直井九点法面积注水开发设计理论	111
7-3-5 水平井段 l 的优化设计	111
7-3-6 油井(水平井)见水时间的估算	112
7-3-7 油井面积注水方式油井见水前后开发指标计算	112
第8章 信息渗流力学理论	115
§8-1 人工神经网络概述	115
8-1-1 兴起与萧条	115
8-1-2 复苏的准备	116
8-1-3 第二次高潮	116
§8-2 人工神经网络的学习分类与各类模型	116
8-2-1 人工神经网络的学习分类	117
8-2-2 人工神经网络的几种代表性模型	117
§8-3 神经元网络模型	118
§8-4 网络拓扑	119
§8-5 学习法则	120
§8-6 渗流信息人工神经网络理论和方法的改进	124
8-6-1 人工神经网络结构及其映射函数	124
8-6-2 改进的逆向传播学习算法	124
8-6-3 经函数扩展后的神经网络结构	125
第9章 可视渗流力学理论	130

§ 9-1 可视知识概论·····	130
9-1-1 可视知识的定义·····	130
9-1-2 可视知识的结构·····	131
§ 9-2 油藏两相渗流过程的可视化诊断理论·····	132
9-2-1 油藏开发数据场生成·····	133
9-2-2 属性场可视化·····	135
9-2-3 图像诊断信息识别·····	138
§ 9-3 应用实例·····	141
9-3-1 示踪剂井间测试·····	141
9-3-2 聚合物产出动态分析·····	142
第 10 章 智能渗流力学理论 ·····	146
§ 10-1 智能科学概论·····	146
10-1-1 专家系统·····	147
10-1-2 神经网络·····	147
10-1-3 专家神经网络——一个新的研究方向·····	148
§ 10-2 智能专家系统与神经网络的集成理论·····	149
10-2-1 智能专家系统与神经网络的集成理论生理学基础·····	149
10-2-2 智能专家系统与神经网络集成理论——人工神经网络 与专家系统的结合·····	149
§ 10-3 油藏开发渗流系统的智能布井理论及应用·····	152
10-3-1 智能布井的意义、特点·····	152
10-3-2 根据开发地震信息识别油气富集区及排队理论·····	152
10-3-3 渗流参数场的网格离散化及空间模型的建立·····	160
10-3-4 渗流特征的自动识别与提取·····	165
10-3-5 专家系统证据组合理论·····	168
参考文献 ·····	172

第 1 章 油气非达西渗流的数学模型

自 1856 年, 法国工程师 H. Darcy 提出达西定律以来, 研究地下油气渗流均以此理论作为研究基础; 但发展到现在, 随着特殊地质环境的油气田增多, 发现其中渗流规律和达西定律相差甚远, 而必须发展基本渗流理论来揭示油气田流体渗流的特殊运动形态和基本规律。

通过文献调研研究, 发现基本渗流规律存在以下主要问题: (1) 传统的高速非达西渗流的临界雷诺数在渗流关系曲线中不是一点, 而是存在过渡带; (2) 对于低速非达西渗流, 没有判断低速非达西准则, 往往仅以地层渗透率作为界限。其观点为低渗油藏遵循非达西渗流规律, 其启动压力梯度的测定仅来自于个别岩心, 缺乏科学的判断标准; (3) 低速渗流时, 有没有启动压力梯度还存在很多的争议; (4) 对于气田的开发, 流体在低速流动时产生滑脱效应, 恰恰与石油低速运动相反, 因此研究中必须考虑到地层及流体的物理性质。综上所述, 需要我们进一步探索石油渗流新的运动形态, 去解决基本渗流理论面临的问题。

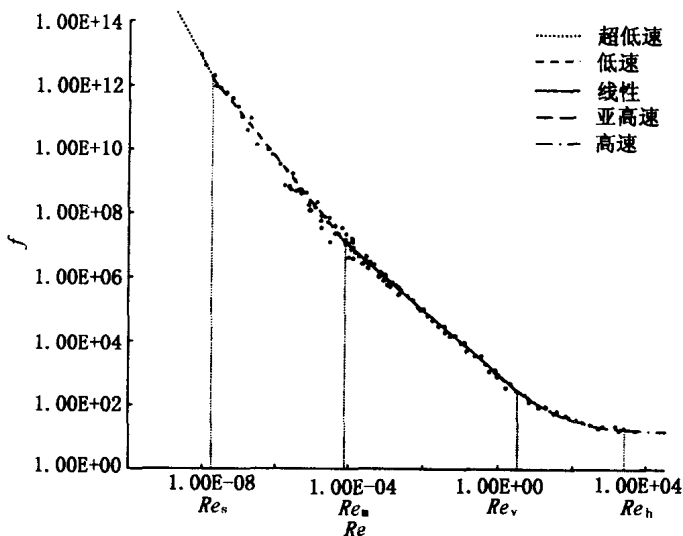
§ 1-1 石油非达西渗流模式的实验研究

研究流体在油层中的运动规律是渗流力学的基础, 同时也是我们指导油田开发的理论依据。

我们对大量岩心实验数据进行了研究和分析, 其实验结果绘成 $f-Re$ 关系曲线如图 1-1 所示: 其中纵轴是无量纲阻力系数 f , 横轴是无量纲判据系数 Re 。

$$\text{在这里} \quad Re = \frac{q\rho\delta}{\mu A\phi}, f = \delta \frac{\Delta p}{\rho\Delta l} \left(\frac{\phi A}{q}\right)^2 \quad 1-1$$

从图 1-1 可以看出, 实验曲线不是只有三段, 而是有五种渗流模式: 当 Re 值非常小时 (处于临界静止状态), 曲线的斜率为最大值 -2; 然后是一段斜率为 -5/3 的直线; 随着无量纲判据系数的进一步增大, 达到亚临界无量纲判据系数 Re_m , 变为斜率为 -1 的直线; 速度继续增大, 无量纲判据系数进一步增大为临界无量纲判据系数 Re_v 后,

图 1-1 $\lambda - Re$ 相关曲线图

曲线发生弯曲，延伸到超临界无量纲判据系数 Re_h 后呈一条水平线。

在这里，我们称斜率为 -2 时为启动区，外界动力不足以驱动液体使之流动，流体处于临界静止状态；然后是低速非达西流动；接着是达西流，其对应的无量纲判据系数上下限为 $Re_m = 8.5 \times 10^{-5}$ ， $Re_v = 4.8$ ；随着无量纲判据系数的增大，进入非达西层流区；继续增大无量纲判据系数，当达到 $Re_h = 3.5 \times 10^3$ 时，进入紊流区。

我们依次对曲线的五段进行分析得到石油渗流各种运动形态的统一模式为：

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = cv^n \quad 1-2$$

其中，渗流指数 n 介于 0 到 2 之间，与流态有关， $n = f(Re)$ ； c 是与渗流指数 n 有关的常数，取决于流体及岩石性质。具体表示为

$$\left\{ \begin{array}{ll} n = 0 & \text{超低速} \\ n = \frac{1}{3} & \text{低速} \\ n = 1 & \text{线性} \\ 1 < n < 2 & \text{亚高速} \\ n = 2 & \text{高速} \end{array} \right.$$

指数式描述了阻力流速变化的过程，对于整个渗流过程，由于阻力

的成分不同,而使流动指数发生变化,为了判断渗流的形态,引进无量纲判据系数。

§ 1-2 石油非达西渗流物理意义及力学分析

1-2-1 斜率为-2的直线段

边界层理论告诉我们:由于固体与液体的界面作用,在油层岩石孔隙的内表面存在一个原油的不动层,其中的原油属边界流体。在边界层内的原油存在组分的有序变化即结构粘度特征及屈服值等。原油在组成和性质方面,有别于体相原油(运动流体)。并且不动层的强度,除了原油本身的性质以外,还与孔隙介质有关。这样,流体流动需要的最小动力与多孔介质及流体性质有关。

1-2-2 斜率为-5/3的直线段

研究低速渗流规律时,其物理过程可描述为:在压力梯度较小时,因固体表面分子的表面作用力俘留的束缚水形成不动层,并且不动层的厚度随着压力梯度的增加而减小,即体相流体横截面积增大。这样随压力梯度的增大,原油流动孔隙度增大,使得多孔介质允许流体通过的能力(有效渗透率)增大。

由低速渗流时的驱动压力梯度和有效边界层厚度之间的关系可知(图1-2),不动层厚度可表示为:

$$h_s = h_0 e^{-c_1 \text{grad} p} \quad 1-3$$

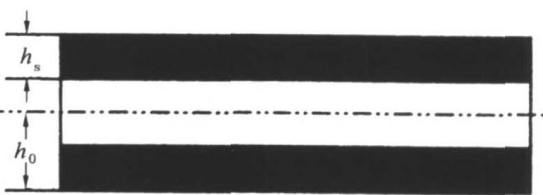


图 1-2

将指数式展开成麦克劳

林级数。当压力梯度较低时,近似取前两项得多孔介质允许流体通过的能力正比于压力梯度的平方。所以低速下的运动方程为

$$v = -\frac{K}{\mu} \text{grad} p = -\frac{K_0}{\mu} (c_1 \text{grad} p)^2 \text{grad} p = -c (\text{grad} p)^3 \quad 1-4$$

而当 $Re > Re_m$ 后,不动层为固化层,厚度不变,此时介质的渗透率表现为常数,运动规律进入线性流阶段。

1-2-3 斜率为-1的直线段

当达到一定无量纲判据系数后，不动层为固化层，进入线性达西流动阶段。即当渗流速度增大到亚临界速度以后 ($Re > Re_m$)，渗流速度与压力梯度成线性关系，阻力为粘滞阻力。

1-2-4 亚高速非达西渗流

随着流速的进一步增加，微观点上的惯性力迫使流线偏离。这样，惯性力的出现，使阻力增加了一项。渗流曲线产生弯曲。

1-2-5 水平直线段

当无量纲判据系数再增大，变为紊流，渗流阻力正比于质量及速度的平方。

§ 1-3 石油非达西渗流的基本规律

1-3-1 稳定渗流的研究

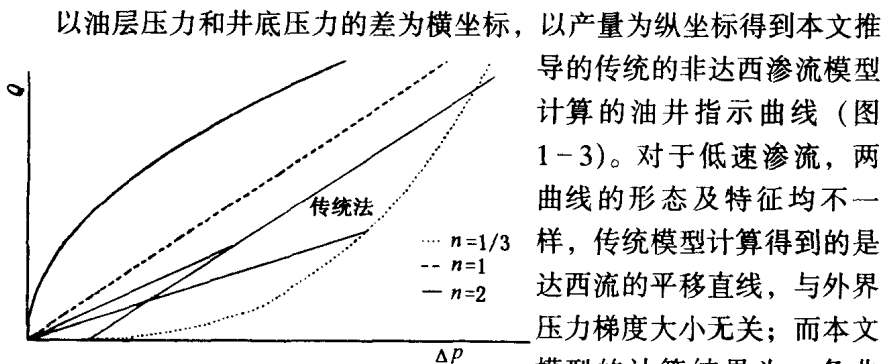


图 1-3 非达西渗流油井指示曲线

以油层压力和井底压力的差为横坐标，以产量为纵坐标得到本文推导的传统的非达西渗流模型计算的油井指示曲线（图 1-3）。对于低速渗流，两曲线的形态及特征均不一样，传统模型计算得到的是达西流的平移直线，与外界压力梯度大小无关；而本文模型的计算结果为一条曲线，采油指数随压差的增大呈二次方关系增长，比传统

模型增长的速度快。

因此，从渗流角度出发，低渗透油田宜采用合理放大压差，加密井网进行开发。

1-3-2 不稳定渗流的研究

由质量守恒并整理可得：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r c \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^n \right) = C_i \phi \frac{\partial p}{\partial t} \quad 1-5$$

此式就是非达西渗流质量守恒方程，当 $n=1$ 时，便是达西渗流质量守恒方程。

本文根据 Ikuko-Ramey 等人建议的线性化近似方法将方程 1-5 转化为线性方程，进行求解，获得拉氏空间的无量纲井底压力，然后通过数值反演，获得无穷大地层低速渗流的理论试井曲线（见图 1-4）。从图上可以看出：

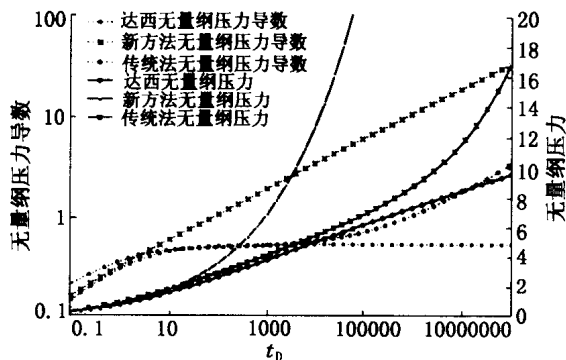


图 1-4 非达西不稳定渗流的比较

(1) 无量纲井底压力曲线。在单对数坐标上，达西流曲线为直线，而非达西流为上翘的曲线；与传统模型比较，本文模型获得的曲线上翘的时间早。说明：非达西渗流的地层阻力大，相同的时间井底压力下降低快；

(2) 对于压力导数曲线，取双对数坐标，达西流的后期表现为 0.5 的水平线，即典型的达西径向渗流特征。而非达西流，压力导数曲线在后期为倾斜线；与传统模型比较，本文模型获得的曲线水平线特征一开始就消失。说明本文模型更能客观反映非达西渗流特征。

§ 1-4 气体在低速下的渗流规律

前三节讨论了石油在油层中的非达西渗流，而对于天然气藏，当油井产量比较小时，气体在低速渗流时，其运动规律与石油低速渗流完全

相反, 表现为低速渗流时, 视渗透率增加, 即通常所谓的滑脱现象。带有滑脱现象的气体渗流运动方程为:

$$\bar{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad} p \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \quad 1-6$$

式中 $\bar{p}$ ——平均压力, 它等于两端压力的平均值 $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$;

b ——常数 (称克林凯贝尔常数), 对一定的气固系统为一固定值。

把 1-6 式与达西定律比较可见: 在渗透率 K 的位置上为函数 $K \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right)$ 所取代, 因而视渗透率 $K(\bar{p})$ 要比绝对渗透率高, 得到的结论与液体低速渗流完全相反。

经实验表明: 同一种气体在同一块岩心中, 在不同压力差下, 测得的渗透率是变化的 (如图 1-5 所示), 渗透率与平均压力的倒数成线性关系, 即:

$$K(\bar{p}) = K \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \quad 1-7$$

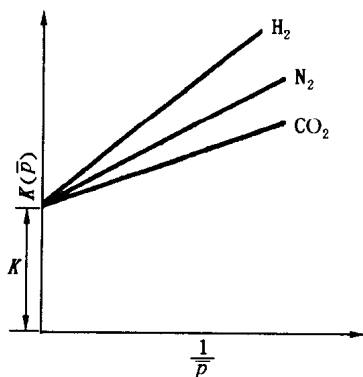


图 1-5 气测 $K - \frac{1}{\bar{p}}$ 关系曲线

由图可以看出, 视渗透率随 $\frac{1}{\bar{p}}$ 增加而增加, 且比岩石的绝对渗透率要大。产生这种现象的原因, 首先是达西定律本来是对液体做实验得出来的。液体渗流的特点是层流时靠近孔道壁薄膜是不动的, 在孔壁处速度为零。当孔道湿周越大时, 液固接触面上所产生的粘滞阻力也越大。而气体渗流则不同, 在孔道壁处没有被固体吸附的薄层和不动的气体, 所以孔道壁处速度不为零。因此形成“气体滑脱效应”。这好像在同一压差

下, 气体比液体渗透率增加一样。

其次, 由分子动力学可知: 气体分子总是在进行无规则的热运动, 气体通过孔隙介质时, 部分在进行扩散, 因为分子的平均自由路程与压力成反比, 对于一定孔隙介质, 其孔道尺寸是一定的, 当压力极低时气体的平均自由路程达到孔道尺寸, 这时气体分子在更大范围内扩散, 可以不受碰撞而自由飞动。因此, 更多的气体分子附加到通过多孔介质的气体总量中去, 好像相应增加了气体的渗透率。

把 1-6 式改写成下面形式：

$$\text{grad} p \left(1 + \frac{b}{p} \right) = - \frac{\mu}{K} \bar{v} \quad 1-8$$

由上式可以看出，此时驱动力增加了一项附加的滑脱动力，而渗流阻力仍是粘滞阻力。

为了研究影响滑脱效应的因素，曾对单根毛细管做过实验，得到下面关系：

$$K(\bar{p}) = K \left(1 + \frac{4C\lambda}{r} \right) \quad 1-9$$

式中 C ——比例系数；

λ ——平均压力下气体分子的平均自由程；

r ——毛管直径。

由此可见；毛管越小（即低渗透率岩石）滑脱效应越大；气体分子的平均自由程越大（即压力越低），滑脱效应也越大。

第2章 分形介质渗流理论

§2-1 分形几何与分形油气藏

在油藏储集层中有没有分形孔隙结构？油藏动态有没有分形渗流特征？应用分形几何的“现实性”如何？是目前学术界关心的问题。

2-1-1 裂缝网络的分形特征

自然裂缝油藏具有很多特征，像在标度，裂缝的密度和范围有显著的大的可变性，这些特征是由材料的初始脆性相关联的断裂过程所诱导的。而这些问题已被广泛地研究，同时表明断裂过程导致分形体的产生。裂缝网络的分形特征最初是在研究核废料处理中被探讨的。

(1) Barton 研究表明在 Nevada Yucca 山很多裂缝图形在标度范围内是自重复的，其宽度从 0.2m 到 15m，裂缝的几代都被检测，并用盒维数计算了 Yucca 山的裂缝网分形维数在 1.6~1.7 之间（图 2-1 及图 2-2）。

(2) Sahimi 等人研究了加利福尼亚东北地区的 Geysers 地热场。发现这个储层中的裂缝图形是分形，分形维数大约是 1.9。

(3) Chelidze 等人分析 Connecticut, Canan 附近 Stockbridge 白云岩大理石地层中的裂缝图形，并证明三维裂缝网是分形体，分形维数大约为 2.5。屈展从水力压裂裂缝的微观形态出发，利用分形几何对压裂裂缝断面进行定量描述，岩石中裂缝扩展在细观下不规则，具有自相似性是一种分形，给出了水力压裂裂缝的分形描述。张吉昌等人认为储层构造裂缝的复杂性可用分形来表述，岩石破裂的直观几何图形的复杂程度可用分维 D 值来定量描述。储层构造裂缝的分数维 D 值和岩心柱状图可精确地、定量地表征裂缝性油藏储层构造裂缝的三维分布。对于裂缝系统各种分形特征，不少人都进行了从裂缝系统的质量到裂缝大小的密度函数的探讨。

(4) 断层的几何复杂性，断层的长度和移位分布的定量化的分形途径已被众多作者探讨过，建议断层图形是分形系统，Okubo 和 Aki 分析