

[苏] И. А. 恰尔内著

地下水 - 气动力学

石油工业出版社

地下水-气动力学

〔苏〕И.А.怡尔内 著

陈钟祥 郎兆新 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了石油、天然气地下渗流力学的基本概念、基本原理、基本方法,以及到六十年代初的渗流力学研究的重大成果。

本书既可作石油、天然气渗流力学入门的教科书,也可作油气田开发工程技术人员的主要参考书。

ПОДЗЕМНАЯ
ГИДРОГАЗОДИНАМИКА
И. А. ЧАРНЫЙ
ГОСТОПТЕХИЗДАТ МОСКВА 1963

*

地下水-气动力学
(苏) И. А. 恰尔内著
陈钟祥 郎兆新 译

*

石油工业出版社出版
(北京安定门内外馆东街甲36号)
煤炭出版社印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 $17\frac{3}{8}$ 印张 380千字 印1—3,000
1982年10月北京第1版 1982年10月北京第1次印刷
书号: 15037·2291 定价: 1.80元

前 言

在迅速成长和发展中的地下气-油流体动力学（油、气、水渗流理论）这一学科方面，有着日益增多的杂志文章以及不断出现的国内的和翻译的专著等大量的文献。

还有许多石油、天然气科学研究所以及高等院校定期出版的论文集。

从Л.С.列宾宗院士——本世纪三十年代的油气渗流的流体动力学理论的奠基者——的经典著作开始，到目前已有了大量总结性的以及研究这门重要的应用科学的某些专门问题的论文。

石油学院和油气学院的基本教科书是B.H.谢尔卡切夫和B.B.拉普克的《地下水力学》（国家燃料技术出版社，1949），И.А.恰尔内的《地下水力学基础》（国家燃料技术出版社，1956），A.M.皮尔维尔江的《石油地下水力学》

（阿塞拜疆石油出版社，巴库，1956）以及较晚的Г.Б.佩哈切夫的《地下水力学》（国家燃料技术出版社，1965）。

对于开设石油地下水-气动力学的专门课程（其中有些章节要求有较高等工业院校更多的数学准备）的综合性大学的学生，这一课程的合适的教科书几乎完全没有，而学生们只得求助于自己的课堂笔记和论文原文。

因此，本书的出版是有益的。本书的基础是著者在1956～1959年间为国立莫斯科罗蒙诺索夫大学数学力学系以及莫斯科古勃金石油化学和天然气工业学院的大学生和研究生讲

课的讲义，著者从前的《地下流体力学》（国家技术理论出版社，1948）一书，上面已提到过的《地下水力学基础》以及于1960年在莫斯科石油化学和天然气工业学院出版的打印的简明教程《油、气、水渗流的流体动力学理论基础》。

本书预定作为系统讲述的教材，它和现有的教科书一起，应可为具有接近于综合性大学水平的足够的数学准备的读者用以研究地下石油水气动力学的基础和更复杂的现代问题。

同时，著者在准备本教材时，力图能考虑到具有不同的物理-数学准备的范围很广的读者，这不可避免地影响到本书的文体，因为要求在尽可能简明的形式下较详尽地阐述对一部分读者很熟悉而对另一部分读者又不够熟悉的问题。例如，对复变函数理论的方法在渗流理论方面的应用，基本的数学物理方程的概念等等，不得不加以较详细的阐明，因为高等数学中的这些章节在油、气高等院校中学得不够完全。

著者本人的某些研究成果，其中包括还未发表过的成果，著者认为可以写入本书之中而不加专门的引证。

此外，也引用了列入参考文献目录（在任何意义上不奢求完全）中的论文。

此外，写一点为油、气高等院校的学生所熟知的与向井的流动以及油、气田开发有关的地质和水文地质方面的基本知识，看来是必要的。

本书共分十章，既阐述了本课程中一般都要讲到的基本章节，也阐述了某些补充问题。

第一章阐述了渗流理论的基本概念以及在变截面流管模型中的一维流动模式。在这一章的第4节中，涉及了关于在渗流液流的横截面上液体质点的真实速度的分布问题。由于

利用标上记号的质点研究渗流液流的方法已得到广泛的应用，写入这一节是适宜的。大家知道，放入渗流液流中的放射性物质和其他指示剂，以较液流的真实平均速度为快的速度传播。在这里，除了其他原因外，液流截面上液体质点速度的非均匀分布无疑起着作用。这种速度的非均匀分布，是任何真实液体液流所具有的特征。在渗流液流的情况下，这一不均匀的程度由于以某种分布曲线表征的孔道的假想半径的大小不一而增大了。

第二章阐述渗流的微分方程。头二节包括一般的等温渗流方程的推导。在第3~8节中作出了建立非等温渗流的完整的方程组的努力，以叙述的形式简单地考察了热力作用油层的某些问题以及在最近З.Б.切卡柳克所指出的基于焦耳-汤姆逊效应的利用测热以研究油井和地层的十分有前途的可能性。

大家知道，在大多数渗流问题中，因为流动速度通常很小，惯性项是被忽略掉的。但是，到目前已出现了一批十分重要的和有趣的问题，在求解时必须考虑到速度项。这批问题中有气体在大裂缝中在大压差下的运动；在畅喷时气体通过射孔孔眼流入井内，此时流速可接近临界速度，等等。最后，在饱含液体或气体的多孔介质中振动的传播问题中，考虑惯性项具有原则的意义，因为这与正确确定各种形式的振动的传播速度有关。

现时在地球物理研究方法中应用的高精度的仪器使得能够记录压力和温度的极小的波动，因此研究多孔介质中波动的过程具有本质的意义。这样，考虑通常被认为只有纯粹的学院式意义的惯性项在很多情况下显得是必需的。因此，在第3~8节中给出了考虑惯性项时的完备方程组（连续性方程，

冲量方程和能量方程)的推导。在惯性项中,由于液流截面上质点速度分布的不均匀性,而在动量和能量的通量的表达式中引入了科里奥里斯系数型的校正系数。据我们所知,在渗流问题中,科里奥里斯校正至今还未提出过。此校正通常出现在管道和河床水力学的问题中。

为了简单和叙述得最易于理解,该方程组是对变截面流管中的一维流动写出的,虽然以向-张量的形式写出可能更为经济。以著者的看法,这样做的合理性在于这一情况,即主要的实际应用照例是与一维非定常运动(直线的,平面径向的和球径向的)有关。很遗憾,对绝大部分实用上感兴趣的问题,暂时还没有计算非一维非定常运动的有效方法。

第三、四、五章中包含有一般说已很成熟的计算在定常流动方式下均质液体向完善井和非完善井的流动的方法。

第六章写非承压渗流。初一看,在气-油问题中对非承压渗流的兴趣是有限的,因为带自由面的石油的重力运动例如露天采油很少碰得到。但实际上不是这样,自由面上各点的压头或位势对其垂向座标的线性关系这一条件可认为是非承压渗流的基本标志。而此条件在经常遇到的多孔介质中流动的一些情形,即当一种液体与另一不动的液体相接触而运动时碰到。在运动着的液体和不运动的液体的接触面上,压头或位势是垂向座标的线性函数。

在这一章中,写入了著者在当年建立的在研究一系列非承压和承压渗流时显得极为有用的某些积分关系。

第七章是关于远未得到应有的解决的渗流理论中的最复杂的问题之一——两种液体在多孔介质中的平衡和运动。与这一问题有关的有这样一些重要的实际问题,诸如含油边缘

和油水界面的运动，在流向非完善井时形成的水锥和气锥的稳定性，等等。这些问题中的大部分在现时都是用近似方法求解的，其中主要的列于本章之中。对某些问题指出了估计所求的未知量的上限和下限的方法，以及近似解与更精确的解的对比结果。

应著者之请，B.П. 达尼洛夫亲切地答应写了第4节中的主要部分，其中有他得到的在考虑到油和水的不同的粘度时含油边缘的收缩问题的解，B.П. 达尼洛夫把这一问题归结为求解某个特殊形式的积分-微分方程，并借快速电子计算机之助得到了解。B.П. 达尼洛夫得到的结果可被看作是这一十分复杂和很久以来就受到注意的问题的最先的精确计算。

第八章是关于均质弹性液体和气体的非定常渗流。这类问题中可归结为线性的弹性渗流方程的问题，目前已解决得相当好。与气体非定常渗流的П.С. 列宾宗非线性方程有关的问题，研究得较差。本章中简练的叙述了有关均质液体和气体的非定常渗流的基本知识，并描述了某些精确的和近似的计算方法。

第九章是关于几种液体的混合物的渗流。

这一章的基本内容是在贝克莱-列维里特理论的框架下编写的，但补充研究了在任意质量力场中的变截面流管中的一维流动模式，并在某些情况下考虑到了毛细管作用。

多孔介质中互溶液体运动的问题和对流扩散问题在本章中只是提了一下。这些过程的理论目前正在创立之中，在任何程度上都不能认为已是完成的理论。但是，使读者大体上了解相变条件下多组份液体渗流的基本方程的推导，无疑地是适当的。

这一推导列于第9节中，它是由Ю.П.若尔托夫和М.Д.拉津别尔格应著者之请盛情地答应写的。这类问题之所以有意义，是由于与十分有前途的并在现时正在发展着的通过以烟道气、泡沫等驱替以强化采油有关，更不用说关于建立物理上和热力学上有根据的凝析气田的开发理论的必要性了。

在最后一章即第十章中，考察了多孔介质中驱替的某些专门问题，这些问题据著者看来，不仅有理论意义，而且有巨大的实际意义，它们是多层地层中驱替过程的特点和无穷大含水层中气包的运动。后一问题在精确的提法下归结为某个非线性积分-微分方程组，指出了以所希望的任意精度对之求解的过程，并给出了在快速电子计算机上完成的草例。

就现阶段的石油地下水-气动力学而论，如同连续介质力学的其他部分一样，其特点是力求尽可能更正确和更精确地反映单相液体，特别是多相液体，在多孔介质中运动时所发生的各种现象的复杂的图景。基于达西定律并按照H.E.茹科夫斯基的观点可看作是理想液体在特殊的摩阻质量力场中运动的问题的均质液体的古典渗流理论，在我们的眼目中逐渐成为把实验方法和结果同包括概率方法在内的连续介质力学的解析方法有机地结合起来的物理-化学地下水-气动力学。

编写关于物理-化学地下水-气动力学的总结性的专著或手册是最近将来的事。

著者对自己提出的任务是极其有限和简单的任务。

有关地下水-气动力学问题的科学研究工作的当前规模，即使按下列的事实便可以想像得到：在1957年出版了A.E.薛德格著《液体通过多孔介质的流动的物理》一书，

该书已译成俄文出版（1960年），书中总结了2000篇以上的论文材料的。从那时以来，又出现了成百的新的研究。虽然有关渗流的大多数论文在苏联科学院科学情报研究所的文摘杂志《力学》和《应用力学述评》以及某些其他情报性集刊中有摘要的叙述，编纂总结地下石油、水-气动力学的现状的教科书仍是极端困难的任务，在做这一工作时，不可避免地会有失误和缺点，为此著者事先请求宽容。

地下水-气动力学对于石油和天然气开采的现代技术以及对于其他一系列别的工业领域的意义已充分地为人们所熟知。为了避免过份增加篇幅，本书中不叙述这一学科的任务、它的产生和发展的历史概况，何况这些论述在已有的有关地下水-气动力学的文献（其中包括教科书）中已足够完全地阐明了。

著者对 B.A. 叶夫多基莫娃副教授和莫斯科古勃金石油化学和天然气工业学院普通和地下水力学教研室前研究生、技术科学副博士 Г.П. 拉津别尔格、陈钟祥表示感谢，他们协助准备了编写本书所利用的材料。著者特别感谢研究生 A.M. 弗拉索夫、郎兆新和 B.M. 延托夫，他们在准备本书付印期间作了大力帮助。

著者也感谢评阅者 Г.Г. 图马舍夫教授及其领导的国立喀山列宁大学流体力学教研室的同事们和技术科学博士 Ю.П. 鲍里索夫，他们发表了意见和希望，这些已在最后校订本书时加以考虑。

1

目 录

前 言

第一章 渗流理论的基本概念 1

第 1 节 多孔介质, 渗流速度与液体质点真实物理速度的
关系, 达西定律、渗流系数和渗透率 1

第 2 节 一维流动 平面上和空间中不可压缩液体向汇和
源的流动 10

第 3 节 均质可压缩液体在变截面流管中的一维定常流
动 20

第 4 节 关于渗流液流横截面上的速度分布 23

参考文献 28

第二章 均质液体渗流理论的微分方程 29

第 1 节 不考虑质量力时等温渗流的微分方程 29

第 2 节 考虑了质量力时, 从理想液体的欧拉微分方程导
出多孔介质中液体等温运动的微分方程 (H·E·茹
科夫斯基的推导) 31

第 3 节 关于一般情形下非等温渗流方程组的意见 40

第 4 节 渗流液流的质量守恒定律 43

第 5 节 渗流液流的动量变化定律 44

第 6 节 渗流液流的能量守恒定律 54

第 7 节 特殊情形 70

第 8 节 非等温渗流中实际应用能量方程的举例 77

参考文献 83

第三章 关于向完善井流动的渗流理论的平面问题 84

第 1 节 复变函数理论与渗流理论的平面问题的联系 流
函数 复位势 84

第2节	向平面上的点汇和点源的流动 等产量的汇和源 向圆形地层中偏心井的流动	91
第3节	用保角变换导出向井流动的某些公式	99
第4节	共焦点椭圆之间的流动	111
第5节	向卵形地层上的井群的流动	113
第6节	在补给边缘上压力不等的圆形地层中向井群的 流动	118
参考文献		128
第四章	向完善井流动的实用计算方法	129
第1节	引言 无穷地层上几个点汇的位势	129
第2节	向具有直线补给边缘的地层中的完善井的流动 反映法	133
第3节	向具有遥远的补给边缘的地层中的完善井井群的 流动 合成流动的位势和渗流速度	137
第4节	向无穷井链和环形井排的流动	143
第5节	等效渗流阻力法	145
参考文献		153
第五章	在线性和非线性渗流定律下向非完善井的流动	154
第1节	井的不完善性的类型 向圆形地层一口中心裸眼 井的流动	154
第2节	非完善井间的干扰问题 非完善井的折算半径	163
第3节	在均质各向异性地层中非完善井引起的渗流阻力 的计算	170
第4节	双重非完善井的流动问题	184
第5节	稀孔眼射孔完成的井的情况	187
第6节	在线性和非线性渗流定律下均质不可压缩液体和 气体的产量-压差指示曲线 二项式渗流定律下井 的干扰	191
参考文献		203
第六章	多孔介质中的非承压流动	205

第1节	非承压流动的特点 非承压流动水力理论的诸前提	205
第2节	通过具有不渗透底面的矩形堤坝的非承压流动的水力理论	210
第3节	向完善井的非承压流动的水力理论	212
第4节	通过堤坝和向井流动的非承压运动的裘比公式的严格证明	213
第5节	把非承压运动归结为等产量的承压运动	219
第6节	在变厚度地层中作平面流动和轴对称流动时渗流流量和边界位势之间的积分关系式	225
第7节	非定常非承压渗流水力理论的微分方程式 与理想气体非定常渗流的相似	229
参考文献		233
第七章	多孔介质中两种液体界面的运动和平衡	234
第1节	引言	234
第2节	均质液流中标定的质点的运动方程	237
第3节	在设想流管不变时, 一种液体被另一种液体驱替的速度的计算	239
第4节	带动边界条件的渗流问题的某些说明 把边界运动问题归结为求解特殊类型的积分——微分方程	244
第5节	变截面流管中的水驱油	256
第6节	当孔隙度、渗透率和地层厚度恒定时, 地层中界面的直线和平面径向运动	259
第7节	油水界面运动的特征极限各向异性地层的模式界面运动的稳定性	263
第8节	底水水锥 底水或顶部气向井窜入和稳定的条件	268
第9节	油和底水向非完善井的共流	287
第10节	多孔介质中初始时已被扰动的两种液体的界面在	

重力作用下的平稳问题 流动的极限模式的计算	294
第11节 在极限各向异性地层 ($k_y = \infty$) 中一种液体对另一种液体的直线驱替和径向驱替的自模解	310
参考文献	339
第八章 均质弹性液体和气体的非定常渗流	342
第1节 弹性液体在弹性多孔介质中的运动方程 气相滞留物对地层系统折算弹性模量的影响	342
第2节 弹性液体在平面上流入直线排油坑道和点源的公式的推导	352
第3节 在变产量情况下向点汇和环状坑道的流动问题 ..	367
第4节 定常状态逐次替换法 向直线排油坑道的流动 ..	371
第5节 按定常状态逐次替换法计算弹性液体的径向流动	380
第6节 关于求解具有定边界条件和动边界条件的弹性渗流问题的积分关系式方法的一种应用形式	388
第7节 在弹性渗流方式时确定地层和油井参数的某些方法	409
第8节 关于气体非定常渗流的简述	421
参考文献	428
第九章 几种液体的混合物的渗流	430
第1节 前言 两相液体渗流的基本方程	430
第2节 贝克莱-列维里特理论	441
第3节 关于饱和度跃变的运动的一般见解	449
第4节 在不考虑质量力时变截面流管内的两相液体的一维渗流	452
第5节 带有任意质量力的二相液体的一维渗流	459
第6节 考虑毛细管压力时二相液体的渗流	471
第7节 三相混合物的渗流	476
第8节 多孔介质中混气液体的定常运动 关于计算非定	

常运动的实用方法的评论	488
第9节 考虑相态变化时多组分系统的运动的方程	500
参考文献	505
第十章 多孔介质中驱替的某些专门问题	508
第1节 在多孔介质中用一种液体以强烈的速度驱替另一 种液体时相渗透率对运动特性的影响	508
第2节 多孔介质沿垂线方向的非均质性对驱替过程的影 响	514
第3节 无穷含水地层中天然气体积的运动的计算	519
参考文献	540

第一章 渗流理论的基本概念

第1节 多孔介质，渗流速度与液体质点真实物理速度的关系，达西定律、渗流系数和渗透率

液体在多孔介质中的运动称为渗流。为了定量地描述这一过程，必须将多孔介质加以某些概括。

多孔介质指的是彼此十分紧密地连接着的诸固体颗粒的集合。这些固体颗粒之间的孔隙可能充满着液体或气体。

如果在含有液体或气体的多孔介质中有压力梯度形成，则液体将沿着从高压到低压的方向开始运动亦即开始渗流。

粘度是液体的基本性质，它影响液体的渗流。

在渗流时，液体与固体颗粒之间的接触面积非常大。

1立方米岩石中砂粒的总表面积可大至10000平方米左右。因此，液体就必须克服由粘度所引起的液体和固体颗粒之间的巨大的摩擦阻力。

除了粘度之外，表面活性性质也对渗流过程有影响。

Φ.А. 特列宾、М.М. 库萨科夫等人〔1,2,3〕的实验表明，一些物理化学现象对渗流过程也有影响。这些在油层物理的教程〔3,4,5〕中有较详细的叙述。

现在转向叙述多孔介质的特性。多孔介质通常是各种形状各种大小的颗粒的集合体。

在一些情况下，天然岩层堆积得十分紧密，以致其中的渗流极为微弱而无实际意义。

但是，在这种岩石中打的井有时可产出油、水和气来。这可能是由于裂缝性引起的。这样，除了渗流外，液体还可能在裂缝中运动。在裂缝中运动与在管道中运动相近似。这

时液体好像是在形状不规则的管道中运动着，我们将主要研究渗流问题。

多孔介质的特性用如下的物理模型表达是最为简单的。

图 I .1 所示的管段是气或油层的模型，这种模型被广泛地应用于实验室工作和试验工作中。设管道为多孔介质所填满并饱含液体，假定在管段的两个截面上加上不同的压力 p_1 和 p_2 ，且 p_1 较 p_2 为大。

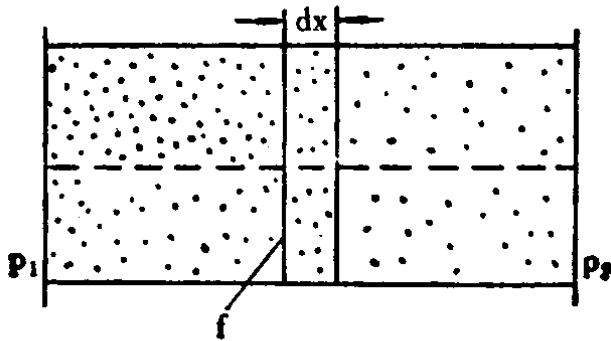


图 I .1 多孔介质-地层模型

在压差的作用下，液体就开始运动。

孔隙度 m 是多孔介质的最重要的特征，它表示孔隙体 积

$V_{\text{空}}$ 对地层整个体积 V 的比： $m = \frac{V_{\text{空}}}{V}$ 。

显然，孔隙度取决于颗粒的几何形状及其排列的形式。

在许多情况下，覆盖在岩石的固体颗粒上的薄层液体在通常的压力梯度下不能移动。此时，可动的液体占的体积较 $V_{\text{空}}$ 略小。此外，在实际的多孔介质中常存在死胡同式的孔隙，其中的液体由于形成了停滞区域而不能运动。因此，除了如上定义的几何孔隙度外，经常还采用动力孔隙度的概念。动力孔隙度指的是可动液体占有的体积对地层整个体积之比。下文中的孔隙度都是指的动力孔隙度。对实际地层