

□ 主编 俞仲文

深圳职业技术学院建校十周年学术文库

渗流理论及其在 煤层气开发中的应用

程瑞端 编著



广东科技出版社

深圳职业技术学院建校十周年学术文库

主编 俞仲文

渗流理论及其在 煤层气开发中的应用

程瑞端 编著

广东科技出版社

· 广 州 ·



图书在版编目 (CIP) 数据

渗流理论及其在煤层气开发中的应用/程瑞端编著.
广州: 广东科技出版社, 2003. 4

(深圳职业技术学院建校十周年学术文库)

ISBN 7-5359-3242-8

I. 渗… II. 程… III. 地下气化—渗流—研究
IV. TD841

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 005853 号

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)

E - mail: gdkjzbb@21cn. com

http: //www. gdstp. com. cn

经 销: 广东新华发行集团

排 版: 广东科电有限公司

印 刷: 广东惠阳印刷厂

(广东省惠州市南坛西路 17 号 邮码: 516001)

规 格: 850mm × 1 168mm 1/32 印张 5.75 字数 168 千

版 次: 2003 年 4 月第 1 版

2003 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

内容简介

本书以渗流理论为基础,在总结了关于煤层中煤层气赋存及采场煤层气涌出规律研究的基础上,介绍了煤吸附和渗流特性的实验室测定与研究,重点讨论了煤层气压力、温度和围压对它们的影响,并推导出考虑地温和地应力影响时的煤层气压力和煤层气含量计算公式,以此为依据,在矿井地应力、地温和煤层气参数测定的基础上,采用非线性有限元数值分析方法,进行了华蓥山矿务局绿水洞煤矿的地应力场分析和该矿深部煤层气压力和煤层气含量的预测。

本书所提出的研究方法,适用于一般煤层气矿井所取得的研究成果,对矿井深部开采的煤层气治理具有指导作用。

序

地下渗流是指流体在土壤、岩石和地表堆积物中的渗透、流动。它包括地下流体资源开发、地球物理渗流以及地下工程中的渗流等几个部分。地下流体资源包括石油、天然气、煤层气、地下水、地热、地下盐水及二氧化碳等等。流体渗流理论则广泛地应用于地下流体资源的开采、农田水利、土壤改良（特别是沿海和沿湖地区的土壤改良）、排灌工程、地下污水处理、核废料处理、水库蓄水对周边地区的影响和水库诱发地震、地面沉降及地铁工程等等。

工程渗流问题一般都较复杂，涉及多相渗流、非牛顿流体渗流、物理化学渗流和非等温渗流等。这些问题的解决，对国民经济的发展具有重要的作用，而反过来又进一步促进渗流力学的发展。煤层气在煤层中的渗流问题就是如此。

煤层气是煤矿地下开采过程中出现的。它的存在，对煤层气煤矿生产危害极大。为了防治矿井灾害的发生，必须运用渗流理论深入地研究煤层气在煤层中赋存、运移和涌出的规律。

流体渗流理论是在流体力学、岩石力学、土力学、工程地质学、工程水文学、多孔介质流体动力学、环境科学和物理化学等众多学科的基础上发展起来的边缘科学，并越来越广泛地应用于解决各种工程实际问题。

随着科学技术的发展、社会的进步,各种工程实践中遇到的渗流问题日益广泛和复杂;随着试验技术和实验方法的不断发展和改进,以及计算机在渗流数值分析中的普遍应用,渗流理论的实用范围越来越广,所能解决的问题越来越复杂。渗流理论在矿井开采中的指导作用也越来越大。

煤层中煤层气是煤矿地下开采煤层气灾害发生的源泉。它的存在严重影响矿井生产的正常进行,增加开采成本,阻碍生产设备效率的充分发挥。因此,预防和彻底治理矿井煤层气灾害,一直是煤矿生产、科研的重要任务。

掌握矿井煤层气赋存和涌出规律,是治理煤矿井下煤层气灾害的前提。但是,由于煤层气赋存与涌出受众多因素的影响和控制,所以至今距离彻底弄清煤层气赋存和涌出规律,以便根治矿井煤层气灾害这一任务还有一段较遥远的路程。特别是随着矿井开采向深部延伸,煤层气灾害发生频率和强度都有可能增加。因此,结合矿井生产实际,从理论上系统地研究煤层中煤层气涌出规律及其深部开采预测的研究,仍然是一项防治煤层气灾害的基础的科研任务。

本书在煤的吸附和渗流特性研究的基础上,采用现场实测和数值分析方法,重点研究了采场煤层气涌出规律,并针对华蓥山矿务局绿水洞矿的具体条件作了该矿深部开采时煤层气涌出规律的预测,为矿井延深开采后的煤层气灾害防治提出了治理方案。

本书共五章。第一章提出流体渗流的基本概念和基本方程;第二章提出气体渗流理论;其余几章分别讨论了煤层气吸附及渗流基本规律的实验研究、矿井煤层中煤层气赋存规律、采场煤层气的涌出规律和深部煤层中煤层气的预测及治理问题。其研究成果为治理矿井煤层气提供

了科学依据。最后是关于矿井煤层气赋存及涌出规律的讨论。矿井煤层中煤层气的涌出,其影响因素众多,是一个非常复杂的问题,又由于本书研究内容涉及面较广,加之时间和作者水平有限,不当之处难免。在研究中还有一些问题未涉及到,即使对某些问题已作了一定研究,也还有待进一步深入。在此,敬请各位专家、教授和同行予以指正。

本书的整个研究都是结合着四川省科委“八五”项目中“煤层气涌出规律”这一研究课题来进行的。本书在现场观测、实验室试验和理论计算分析工作中,得到了许多专家、学者的指导和现场工程技术人员的支持和协助,在此对他们表示衷心的感谢。特别是恩师鲜学福院士,从现场观测方法,实验室设备研制,试验方案确定,到论文的数易其稿耗费了他大量的心血。在此对他表示衷心的感谢和崇高的敬意。

目 录

第一章 地下流体渗流的基本概念和基本方程	1
第一节 地下流体渗流的基本概念	1
第二节 流体的性质	4
第三节 多孔介质的性质	10
第四节 渗流的作用力及速度	14
第五节 渗流基本定律	21
第六节 渗流基本方程	29
第七节 描述渗流问题的数学模型及其解法	38
第二章 气体的渗流理论	44
第一节 天然气的物理特性	44
第二节 气体渗流方程	48
第三节 煤层中煤层气渗流	53
第三章 矿井煤层气涌出规律及其防治	65
第一节 概论	66
第二节 煤层气吸附、解吸及渗流基本规律的实验研究 ...	68
第三节 煤层中煤层气赋存规律的研究	92
第四章 矿井回采工作面煤层气涌出规律的研究	109
第一节 引言	109
第二节 回采工作面煤层气涌出的现场测定	110
第三节 采场煤层气涌出规律及涌出量的计算	113
第四节 回采工作面前方煤体中煤层气流场的数值分析 ..	124
第五章 华蓥山矿务局绿水洞煤矿深部煤层气涌出规律的 预测及治理方案	151
第一节 引言	151
第二节 深部采场煤层气涌出量预测	152

第三节	深部回采工作面煤层气治理的一般原则和方法 ..	156
第四节	绿水洞矿深部开采煤层气治理方案的选择	159
第五节	矿井煤层气赋存及涌出规律的讨论	162
参考文献		164
后记		168

第一章 地下流体渗流的基本概念和基本方程

第一节 地下流体渗流的基本概念

一、渗流和渗流力学

渗流是流体在多孔介质中的流动，渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。渗流力学是流体力学的一个重要分支，是流体力学与多孔介质理论、表面物理化学以及生物学等交叉渗透而发展起来的一门边缘学科。

渗流现象普遍存在于自然界和人造材料中。如地下水、热水和盐水的渗流；石油、天然气和煤层气的渗流；动物体内的血液微循环和微细支气管的渗流；植物体内水分、气体和糖分的输送；陶瓷、砖石、砂模、填充床等人造多孔材料中气体的渗流等。

渗流力学在很多应用科学和工程技术领域有着广泛的应用。如土壤力学、地下水水文学、石油工程、采矿工程、地热工程、地铁工程、水利工程、给水工程、环境工程、化工和微机械等中均得到应用。此外，在国防工业中，如航空航天工业中的发汗冷却、核废料的处理以及诸如防毒面罩的研制等也都涉及渗流力学问题。本书着重论述有关地下水、气渗流的某些基本理论及其应用。

渗流的特点在于：首先，多孔介质单位体积孔隙的表面积比较大，表面作用明显。任何时候都必须考虑粘性作用。其次，在

地下渗流中往往压力较大，因而通常要考虑流体的压缩性。还有，孔道形状复杂、阻力大、毛管力作用较普遍，有时还要考虑分子力。再者，往往伴随有复杂的物理化学（如吸附和解吸等）过程。

渗流力学是一门既有较长历史又年轻活跃的科学。从 Darcy 定律的出现至今已超过一个半世纪。20 世纪石油工业、采矿工程的崛起极大地推动了渗流力学的发展。随着相关科学技术的进步，如高性能计算机的出现，核磁共振、CT 扫描成像技术以及其他先进试验方法用于渗流，又将渗流力学大大推进了一步。近年来，随着非线性力学的发展，已将分叉、混沌以及分形理论等用于渗流，其他诸如格气模型的建立等等，更使渗流力学的发展进入一个全新的阶段。

二、多孔介质

1. 多孔介质的一般描述

多孔介质是指含有大量空隙的固体。指固体材料中含有孔隙、裂隙和微裂缝等各种类型毛细管体系的介质。概括起来，可用以下几点来描述多孔介质：

1) 多孔介质（或多孔材料）是多相介质占据的空间，其中固相部分称为固体骨架，而未被固相占据的部分空间称为孔隙。孔隙内可以是气体或液体，也可以是多相流体。

2) 固相应遍布整个介质，孔隙亦应遍布整个介质，就是说在介质中取一适当大小的体元，该体元内必须有一定比例的固体颗粒和孔隙。

3) 孔隙空间应有一部分或大部分是相互连通的，且流体可在其中流动，这部分孔隙空间称为有效孔隙空间，而不连通的孔隙空间或虽然连通但属死端孔隙的这部分空间是无效孔隙空间。对于流体通过孔隙的流动而言，无效孔隙空间实际上可视为固体

骨架。

2. 多孔介质的统计描述

从实用的观点考虑，需要对多孔介质骨架的几何性质进行描述，由于介质骨架的复杂性，要想用曲面方程来描述构成骨架的固体颗粒几何形状是不可能的。目前主要有两种描述方法。一种方法是宏观的也就是平均的描述，用孔隙度、比面等特性参数来反映多孔介质骨架的性质，这将在后面进行论述；另一种方法是以骨架的某些统计性质为基础的。现简单介绍如下：

1) 粒径分布。对于像土壤这类非固结的多孔介质，特别是实验室中的人造非固结介质，可以用其粒径分布（即不同粒径所占百分数）来描述，除了圆球或正多面体，颗粒的大小不能用一个线尺寸惟一确定。在一般情况下，测量粒径和粒径分布的主要方法有筛分法和蛋率法，它们分别适用于较大颗粒和较小颗粒。筛分法是将固体颗粒放在具有一定尺寸的正方形网格的筛子上进行摇晃，所以颗粒的尺寸依赖于筛眼的尺寸。对于不规则形状的颗粒，这只能反映其大致尺寸。蛋率法是按照颗粒在流体中的沉降速度来分选颗粒的大小。粒径尺寸通常用标准筛目或 μm 表示，目（mesh）是每2.54 cm长度上具有编织丝的数量，目与粒径的换算关系为：

颗粒直径 (μm) = $16 \times 10^3 / \text{筛目数}$ (1-1)

其对比关系如表 1-1 所示。

表 1-1 美国标准筛目与孔径关系

标准筛目 (mesh)			4	8	16	32	48	65
筛孔直径 (μm)			4 760	2 380	1 190	490	295	210
100	150	200	270	325	400	500	800	1 250
147	104	74	53	43	37	25	15	10

2) 孔径分布。对于固结的多孔介质, 无法给出其粒径分布, 而只能用孔径分布来描述。孔隙直径 δ 定义为孔隙中能放置的最大圆球的直径。而孔径分布可用因子 α 来定义, 其中, α 是孔径在 δ 和 $\delta + d\delta$ 之间的孔隙所占总孔隙体积 V_p 的百分比, 于是有

$$\int_0^{\infty} \alpha(\delta) d\delta = 1 \quad (1-2)$$

本书中讨论的多孔介质重点是储集水、气的地(煤)层介质。地(煤)层按其多孔介质特性分类可分为单一介质和双重介质两大类; 单一介质又可分为单一孔隙介质和单纯裂缝介质。前者主要出现在砂岩、粉砂岩和白云岩中; 后者主要出现在碳酸盐岩中。双重介质是既有孔隙又有裂缝的介质, 也包括孔隙度和渗透率不同的双层油藏。在数学处理上, 双重介质又可分为双孔隙度介质和双渗透率介质。前者是对于孔隙的渗透率远小于裂缝的渗透率情形, 为简化起见, 将孔隙的渗透率近似看作零, 因而在渗流方程组中出现两个孔隙度, 而只出现一个渗透率。后者是对于孔隙的渗透率与裂缝的渗透率可以相比较的情形。

第二节 流体的性质

流体的主要特性是它的密度、重率、粘性、弹性、热膨胀性。

一、流体的密度和重率

流体与其他物体一样, 具有质量。单位体积流体具有的质量称为密度, 以 ρ 表示。一般来说, 流体密度是随压力 (p) 和温度 (T) 的变化而变化的, 即

$$\rho = \rho(p, T) \quad (1-3)$$

我们把单位体积流体的重量称为重率，以 γ 表示：

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

在工程中，有时用到比重（ G ）的概念，或称相对密度（ δ ）。液体比重的定义为：4℃时，液体的密度和纯水密度之比。

二、流体的粘度

流体不同于固体，只要施加切应力流体就会连续变形。我们通常把这种连续变形称为流动，而把流体阻止任何变形的性质叫粘滞性。

流体的粘滞性说明为：液体沿着一固体平面壁作平行直线运动，由于液体具有粘滞性的缘故，靠近壁面附近流速较小，远离壁面处流速较大，因而各个不同液层的流速大小就不相同。设距固体边界为 y 处的流速为 u ，在相邻的 $y + dy$ 处流速为 $u + du$ ，由于两相邻液层的流速不同（也就是存在着相对运动），在两液层之间将成对地产生切应力，也称为内摩擦阻力。1686 年，牛顿通过实验证明，相邻层接触面上所产生的内摩擦阻力的大小除了与液体本身的性质有关外，与两液层流速梯度和接触面积成正比。可用下式表示：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

单位面积上的内摩擦阻力，即切应力为：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

公式（1-5）、（1-6）即称为牛顿内摩擦定律。式中 μ 为动力粘滞系数，常用单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

μ 值与液体的种类有关，液体的性质对摩擦力的影响，通过 μ 来反映，粘性大的 μ 值大，粘性小的 μ 值小。

液体的粘滞性还可以用另一种形式表示：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

因为 ν 不包括力的量纲，故称 ν 为运动粘滞系数，常用单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。

在同一种液体中， μ 或 ν 均随温度和压力而异，但随压力变化甚微，对温度很敏感。对于运动粘滞系数。可以按下列经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.017\ 75}{1 + 0.033\ 7t + 0.000\ 221t^2} \quad (1-8)$$

式中： t ——水温（℃）。

为了工程上使用方便，表 1-2 列出不同温度时水的 ν 值。

表 1-2 不同温度的运动粘滞系数 ν 值

温度 (℃)	ν (cm^2/s)	温度 (℃)	ν (cm^2/s)	温度 (℃)	ν (cm^2/s)
0	0.017 92	16	0.011 18	35	0.007 25
2	0.016 74	18	0.010 62	40	0.006 59
4	0.015 68	20	0.010 09	45	0.006 03
6	0.014 73	22	0.009 89	50	0.005 56
8	0.013 87	24	0.009 19	55	0.005 15
10	0.013 08	26	0.008 77	60	0.004 78
12	0.012 39	28	0.008 39	80	0.003 57
14	0.011 76	30	0.008 03	100	0.002 84

应当指出，牛顿内摩擦定律只适用一般流体，对一些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，反之称为非牛顿流体，而在工程渗流力学中，一般研究的均

为牛顿流体。

最后强调说明, 粘滞性只对运动着的流体而言, 液体处于静止或平衡状态时, 粘滞性不起作用。

三、流体的压缩性

流体不能承受拉力, 但可以承受压力。流体受压后, 体积要缩小, 这种性质称为压缩性。流体的压缩性大小是以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 E 来表示。

体积压缩系数 β 是指液体体积相对缩小值与压强之比。若某一液体在承受压强为 p 的情况下, 体积为 V , 当压强增加 dp 后, 体积变化值为 dV , 其体积压缩系数为:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-9)$$

式中的负号表示压强增大, 体积缩小。

又因为液体压缩时其质量不变, 故有:

$$dm = \rho dV + V d\rho = 0$$

所以

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

因而, 体积压缩系数又可写作:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-10)$$

所谓体积弹性系数 E ($E = \text{应力}/\text{应变}$), 即为压缩系数的倒数:

$$E = 1/\beta$$

由式 (1-9)、(1-10) 看出, 当压强由 p_0 变到 p , 液体的体积由 V_0 变到 V 时, 则有:

$$\int_{V_0}^V \frac{dV}{V} = -\beta \int_{p_0}^p dp$$

积分后可得如下的状态方程:

$$V = V_0 e^{-\beta(p-p_0)} \quad (1-11)$$

同理可得:

$$\rho = \rho_0 e^{\beta(p-p_0)} \quad (1-12)$$

将上二式用泰勒级数展开,取前二项,并进一步简化为:

$$V = V_0 [1 - \beta(p - p_0)] \quad (1-13)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(p - p_0)] \quad (1-14)$$

以上两个方程为流体的状态方程,它能描述大多数流体的性状。流体种类不同,其 β 和 E 也不同,对同种流体来说,一般将 β 和 E 视为常数。

水的压缩性很小,在 20°C 时,水体积弹性系数 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,也就是说,每增加一个大气压,水体积相对压缩量值约为 $1/20\,000$,因此,在工程上视为水是不可压缩的。

8

四、流体的热膨胀性状态方程

在研究非等温渗流时,还要涉及流体的热膨胀系数或定压热膨胀系数 ϵ , 定义为:

$$\epsilon = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-15)$$

类似地,在温差 $\Delta T = T - T_0$ 不太大的条件下,仅由温度引起的密度变化可表示为:

$$\rho = \rho_0 [1 - \epsilon(T - T_0)] \quad (1-16)$$

其中 ρ_0 为参考温度 T_0 时的密度。若同时考虑压力和温度引起的密度变化,近似有:

$$\rho(p, T) = \rho_0(p_0, T_0) [1 + \beta(p - p_0) - \epsilon(T - T_0)] \quad (1-17)$$

气体是容易被压缩的流体。对于理想气体,在等温条件下,其密度与压力成正比,即: