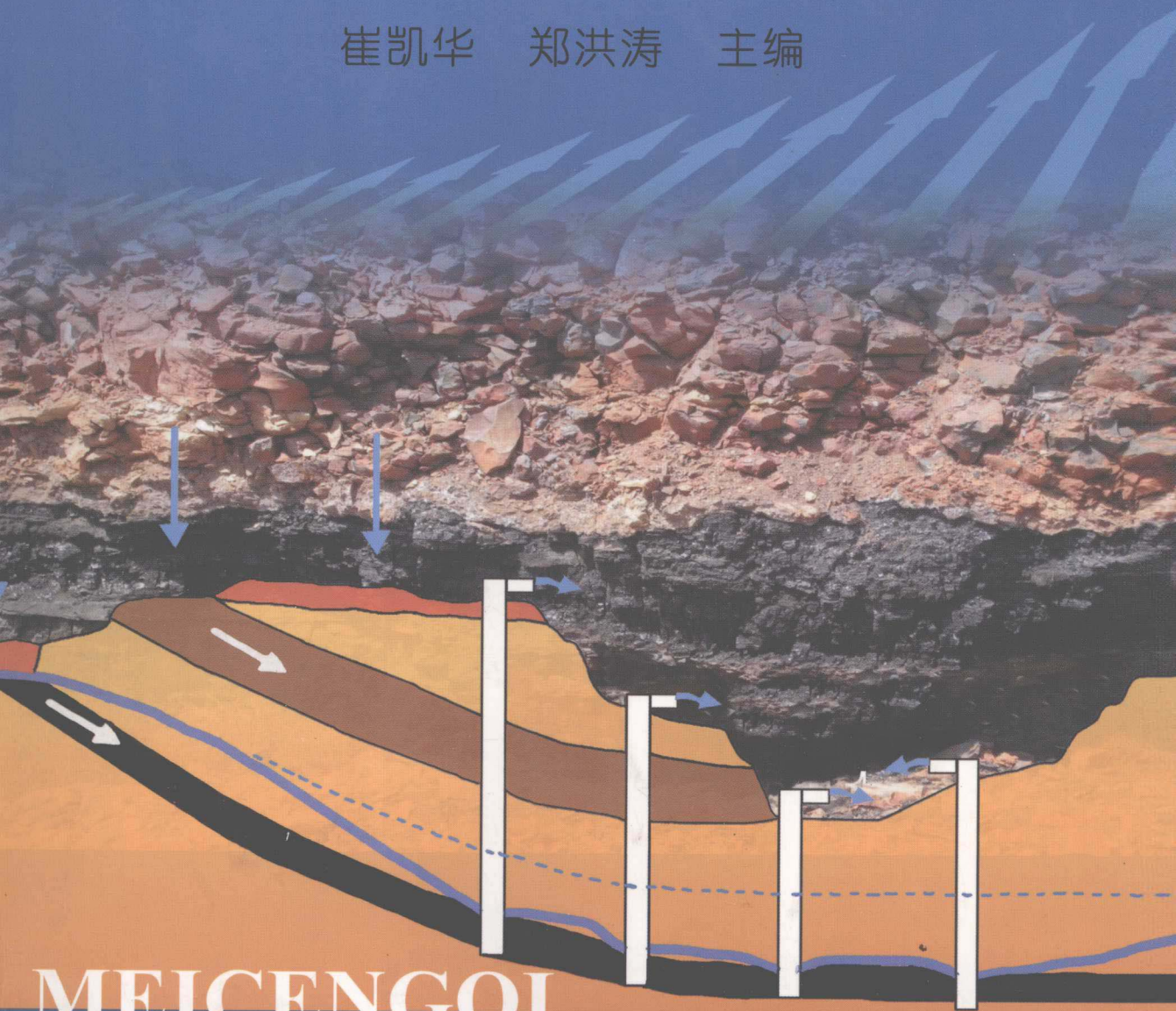


煤层气开采

崔凯华 郑洪涛 主编



MEICENGQI
KAICAI

石油工业出版社

煤层气开采

崔凯华 郑洪涛 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共九章,从煤层气的成因、储层、赋存、储层参数等方面系统介绍了煤层气的基本特征,同时对目前在煤层气勘探开发中常用的工艺技术进行了详细的介绍,包括钻井完井技术、煤层压裂技术、排水采气技术、集输工艺和计量仪表等方面内容;另外介绍了煤层气开采中的安全用电常识及安全生产基础知识。

本书适用于从事煤层气勘探、开发、利用领域的工程技术人员和岗位操作人员,也可用作工人培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层气开采/崔凯华,郑洪涛主编.

北京:石油工业出版社,2009.12

ISBN 978-7-5021-7534-4

I. 煤…

II. ①崔…②郑…

III. ①煤层—地下气化煤气—资源开发

IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 219812 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523574 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.75

字数:300 千字

定价:40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

我国煤层气资源十分丰富，据初步测算资源量为 $(3 \sim 3.5) \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，煤层气产量正逐年提高。我国煤层气的发展战略是地面钻井与井下抽放相结合，以地面钻井开发为主。煤层气的勘探、开发和利用，具有巨大的经济效益和社会效益。

煤层气的开发利用属于新的技术领域，为满足相关的工程技术人员和现场操作人员准确、完整、系统地掌握煤层气开采知识、技术的需要，编者参考相关资料及文献，结合相关的专业知识和现场实践，编写了本书。编写时力求理论联系实际，增加其实用性。

本书共九章。内容包括煤层气开采地质理论基础、煤层气钻井与试气、煤层气井排采工艺、煤层气储层开采强化措施、煤层气井排采管理、集输工艺、计量仪表、发电配电与用电及安全生产基础知识等。

本书由辽河石油职业技术学院编写，由崔凯华、郑洪涛任主编，黄娅萍、王国强、熊德华任副主编。第一章由郑洪涛编写，第二章、第四章、第五章由黄娅萍编写，第三章由秦旭文编写，第六章由苗崇良、盖新生编写，第七章由崔凯华编写，第八章由贯宇编写，第九章由李明云编写。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

第一章 煤层气开采地质理论基础	1
第一节 概述.....	1
第二节 地壳和地质构造	2
第三节 煤层气流固耦合渗流的基本概念及力学定律.....	4
第四节 煤层气的储层特征和储集、运移和产出机理	14
第二章 煤层气井钻井与试气	26
第一节 煤层气开发井网	27
第二节 钻井	29
第三节 完井及井身结构	33
第四节 煤层气井的试气	42
第三章 煤层气井排采工艺	47
第一节 煤层气井常用术语	47
第二节 煤层气井排水采气机理	49
第三节 煤层气井排水采气工艺技术	52
第四节 煤层气井排水采气工作制度	60
第四章 煤层气储层开采强化措施	66
第一节 煤层气井的水力压裂	66
第二节 煤层气井的裸眼洞穴完井技术	75
第三节 煤层气井开采的特殊强化工艺	76
第五章 煤层气井排采管理	79
第一节 煤层气生产的特点	79
第二节 生产优化与储层管理	81
第六章 集输工艺	91
第一节 采气流程	91
第二节 煤层气的矿场集输	92
第三节 煤层气的矿场集输工艺	93
第四节 集气站的投产	98
第五节 往复式活塞式压缩机.....	103
第七章 计量仪表	112
第一节 基本概念.....	112
第二节 常用仪表的分类、原理及校验.....	114
第三节 煤层气流量计算.....	119
第四节 阀门与管件.....	123
第五节 流量计.....	132

第八章 发电、配电与用电	138
第一节 电力系统基本概念.....	138
第二节 发电机简介.....	141
第三节 用电常识.....	150
第四节 电气安全操作基础.....	153
第九章 安全生产基础知识	163
第一节 安全生产管理制度.....	163
第二节 HSE 管理体系基本内容	165
第三节 防护与现场急救知识.....	171
参考文献	182

第一章 煤层气开采地质理论基础

第一节 概 述

煤层气是一种由煤层生成并主要以吸附状态储集于煤层中的非常规天然气，主要成分是甲烷（一般占95%~98%），因此被称为煤层甲烷，在煤矿中又俗称为瓦斯。煤层气是近20年来崛起的优质洁净新能源之一，正逐渐从研究走向开发利用阶段。我国煤层气资源极为丰富，据测算，其资源量约为 $43 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，与天然气的资源量大约相等。依据煤炭资源勘探成果和煤层含气量实测资料，含气量 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上、埋深小于2000m的煤层气资源总量为 $14.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中含气量大于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的富甲烷煤层气资源量为 $12.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，含气量 $4 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的含甲烷煤层气的资源量为 $1.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ；埋藏深度小于1500m的浅层的煤层气资源量为 $9.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，深度为1500~2000m的较深层煤层气资源量为 $5.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，且大多分布于西气东输管运沿线，开发利用前景巨大。

我国是煤炭工业大国，过去绝大部分煤层瓦斯随煤炭开采被排放到大气中。我国煤矿在开采过程中每年向大气排放甲烷总量大约为 $194 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，约占世界采煤排放总量的1/3，这样不仅浪费资源，而且恶化人类的生存环境。美国环保局1987年关于煤层甲烷的排放对环境影响的研究表明， CH_4 的温室效应是 CO_2 的20多倍，对臭氧层的破坏是 CO_2 的7倍，同时排放到大气中的还含有 NH_3 、 H_2S 和 SO_2 等。另外煤层甲烷是煤矿井下发生瓦斯爆炸和瓦斯突出的根源。据统计，1950~1990年我国发生煤与瓦斯突出事故1.5万余次，约占世界瓦斯突出事故的40%，历年因瓦斯事故死亡的人数为世界总死亡人数的30%~40%。仅1983至1994年间，我国就发生瓦斯事故675起，死亡4571人，直接经济损失150亿元，近年来，煤矿因瓦斯事故造成了更为严重的生命与财产损失。

随着我国经济的快速发展，能源短缺的问题进一步加剧，近年来，煤层气受到我国政府的高度重视。煤炭工业“十五”规划中确定要大力发展煤层产业，实行地面开发和井下抽放并举的煤层气开发方针，重点加快山西沁水，安徽两淮，辽宁铁法、抚顺矿区，贵州六盘水等地区煤层气的勘探评价及开发，2005年大中型煤矿瓦斯利用量达到当年抽放量的80%，建成2~3个煤层气地面开发及利用示范基地，煤层气量达到 $(30 \sim 40) \times 10^8 \text{ m}^3$ ，积极支持煤层气产业发展，使其成为煤炭工业新的经济增长点。因此，煤层气将成为我国继煤炭和石油天然气之后的战略性接替能源之一，它的开发和利用，既能解决我国天然气的不足，又能从根本上消除煤炭开采中造成的瓦斯爆炸、瓦斯突出等灾害，还可以减少大量瓦斯排放造成的环境污染，并改善我国的能源结构，加速我国以煤为主的能源系统逐渐向环境无害化的可持续发展模式的转化过程，树立遵守国际公约，保护国际环境的良好国际形象。

美国是首先在地面钻井开发煤层气技术方面获得重大突破并进入商业化开采的国家：1953年，圣胡安盆地第一口煤层气试验井开始投产；1978年美国能源部开始实施甲烷回收计划；1980年黑勇士盆地煤层气开发区建成投产；1996年煤层气产量极高的圣胡安盆地的110口煤层气井日产量达 $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上，2000年美国年煤层气产量占天然气总量的15%。

这些事实说明煤层气井的产量相当高，煤层气在能源中的地位正日益提高。

在 20 世纪 60 年代，我国华北石油管理局开始从事煤层气地质方面的研究，并在 70 年代对煤层气资源进行了初步评价。80 年代至 90 年代初期，煤炭、地矿、石油系统及地方政府有关单位先后独立，或与联合国及国外石油公司合作，开展了煤层气的开发试点工作。据不完全统计，已施工的约 200 口煤层气实验井中，部分钻井进行了煤层压裂、排水产气试验，在煤层气勘探开发理论与技术等方面取得了重要进展。但迄今为止，从全国总体试验情况看，除沁水煤田产气量达到商业产气要求外，绝大多数煤层气试井产量低，产量递减快，难以形成稳定的工业性气流。其主要原因如下：

(1) 我国煤层气储层受自身特性的限制（即煤层气藏的渗透率低、吸附强，开采浅层煤层的原始压力不高、解吸速度慢），使得煤层气解吸及其在煤层中的运移十分困难。

(2) 适合于我国复杂地质条件下煤层气储层特性的储层评价技术和方法以及钻井、完井、压裂和排采等核心技术不够完善。

(3) 适合我国煤层气储层特性的煤层气开采理论和提高低渗透煤层气产量措施不够完善，因为煤层气专家不完全熟悉天然气开采（常规天然气主要是游离气，而煤层气是以甲烷为主的吸附气），外国专家又不完全熟悉中国致密低渗透储层特征。目前，我国关于煤层气的绝大部分基础理论主要是从常规的天然气开采理论中借用的，不能完全适应煤层气的开采。

煤层气的开采实践证明，钻井技术、煤层气增产技术（压裂、注气和割缝等）和储层模拟技术是煤层气平均开发中的三大关键技术。在增产技术方面，目前采用压裂提高渗透率和注水驱气的方式来提高煤层气的产量，但往往是压裂后初始产气量有所增加，然后很快就衰减。因此，仅靠提高渗透率增加低渗透煤层的产量存在局限性，注水驱气也有一定的弊端，因为水分子直径大于储存大量瓦斯系统中的大部分微孔直径时，会难以进入基质的微孔内，限制了对煤层气的解吸和扩散效率的提高，在低渗透煤层中，这一局限性更为突出。因此，从煤层吸附、解吸性能入手，国外已把燃煤电厂和其他排放源产生的二氧化碳注入煤层，作为煤层气增产的一项重要措施，从经济效益、社会效益和环保效益方面全面论证注气开采煤层气是完全可行的，而且实施效果非常好。煤层气作为一种非常规天然气，其储层与常规石油天然气储层比较具有一些独有的特点：储层为煤、气、水三相共存；由微孔隙和天然裂隙组成的双重孔隙系统，微孔隙系统非常发育，吸附能力强；煤层气的运移包含吸附、解吸、扩散和渗透等复杂过程。因此，进一步加强低渗透储层条件下煤层气开采和注气增产研究具有重要意义。

第二节 地壳和地质构造

一、地壳与沉积岩

地壳是地球最近圈的一层固体壳，其厚度不一，大陆高山区最厚可达 60 ~ 70km，大洋中一般小于 10km，地壳平均厚度约 17km。地壳是由各种类型的岩石组成的，而岩石是由各种矿物组成的，矿物又是由化学元素组成的。组成岩石的矿物是地壳中化学元素在各种地质作用下形成的自然产物。

1. 岩石的分类

组成地壳的岩石，根据它们的成因，一般分为三大类：岩浆岩、沉积岩和变质岩。

(1) 岩浆岩：地球内部的岩浆在一定地质作用的影响下，侵入地壳或喷出地表，并冷却、凝固、结晶而成的岩石称为岩浆岩，按其成因可分为侵入岩和喷发岩两类。一般来说岩浆活动频繁的地区，不利于油气及煤层气的生成和保存。

(2) 沉积岩：早期形成的岩石，经过物理、化学的破坏的作用，在地质应力的作用下，在地表沉积下来而形成的岩石称为沉积岩。沉积岩有利于煤、油气的生成和保存。

(3) 变质岩：原岩受高温高压等条件的影响，改变了其成分、结构及构造，发生变质作用而形成的岩石称为变质岩。一般来说，变质作用对煤层气的生成是不利的。原岩可以是各种岩石。

2. 沉积相

在一定沉积环境中所形成的岩石组合称为沉积相。这里所指的沉积环境包括岩石组合的沉积和成岩过程中所处的自然地理条件、气候状况、生物发育情况、沉积介质的物理化学性质、地球化学条件及水体深浅等。岩石组合是指岩石的成分、颜色、结构、构造及各种岩石的组合关系和分布情况等。不同的沉积环境所形成的岩石组合不同，一定的岩石组合反映了对应的沉积环境。

沉积相控制着生煤、油岩和储油岩。在沉积环境中起决定作用的是自然地理条件，按自然地理条件的不同，一般将沉积相分为三类：陆相、海相、海陆过渡相。

(1) 在大陆上较低的地方接受沉积，所形成的沉积岩石组合称为陆相。陆相形成的岩石常以碎屑岩和粘土岩为主。陆相中，最重要的有湖相沉积、河流相沉积和湖泊三角洲相沉积。

(2) 在海洋中形成的沉积岩石组合称为海相。海相以碳酸盐岩和粘土岩为主，碎屑岩次之。海相粘土岩和碳酸盐岩中，常含有丰富的有机质，是重要的生油气层。海相石英砂岩和碳酸盐岩具有良好的储油气条件，是最重要的储油气岩层。

(3) 在海洋和陆地交互的地区，形成海陆过渡环境，接受海陆过渡相的沉积岩石组合，称之为海陆过渡相。它与海相和陆相毗邻，呈过渡关系。过渡相中有潟湖相、三角洲相、沙坝、沙嘴相。其中三角洲地区聚集有丰富的有机质，而且沉积速度快，埋藏迅速，因此三角洲相具备十分有利的生储油气条件。

二、地层和地质时代

1. 地层

具有一定时间和空间涵义的层状岩石的自然组合称为地层。地球在形成与发展的每一个阶段，其表面都有一套相应的地层形成，年龄新的地层在年龄老的地层之上。在对地壳的研究中人们按一定的原则将地层分成许多层段，并且给每一层段都取了一个名称。

划分地层的单位称为地层单位，地层单位从大到小分为界、系、统、阶以及群、组、段、带等。其中界是地层的一级单位，系是二级单位，统是三级单位，界、系、统是国际通用地层单位。阶是全国性和大区域的地层单位，群是最大的地方性地层单位，组则是地方性的基本地层单位，段是小于组的地方性地层单位。界、系、统、阶是根据生物的发展演化阶段来划分的，适用范围较大，通称为时间地层单位。而群、组、段等小

地层单位是根据地层岩性和地层接触关系来划分的适用范围比较小，通常又称为岩石地层单位。

2. 地质时代

地球自形成以来，经历了漫长的历史，一般将地球整个历史分为两大阶段，即天文时期和地质时期。地质时期就是地球形成地壳以后的发展历史。组成地壳的不同地层是在地质时期的不同发展阶段形成的。一般把地层形成的阶段称为地质时代，不同的地质时代形成不同的地层，地质时代反映地层的年龄。

划分不同地质时代的单位称为地质时代单位。地质时代单位由代、纪、世、期四个级别和一个自由使用时间单位“时”组成。地质时代和地层单位之间有着密切的联系，但并不是完全对应的。

三、地层构造

沉积岩是由沉积物经过成岩作用形成的，其原始产状一般是水平的。而现今在野外或地下发现的沉积岩的产状大多是倾斜的、弯曲的，有的甚至是断开的，某些岩层还出现倒置现象，所有这些都是地壳运动的结果。地壳运动是指由内力引起的地壳内部物质缓慢的机械运动，其基本类型有垂直运动和水平运动。地层在地壳运动中发生各种各样的变形，形成现今的地质构造，因此地壳运动也称为构造运动。

地质构造按其表现形式可分为褶皱构造和断裂构造。褶皱构造是指岩层在构造运动后，发生柔性变形，使岩层变成弯弯曲曲的形状，如背斜和向斜。断裂构造是指岩石在构造运动后，发生脆性变形，产生断裂与错动，使岩层失去连续性，如裂缝和断层。

第三节 煤层气流固耦合渗流的基本概念及力学定律

一、多孔介质

多孔介质是指含有大量空隙的固体，也就是固体材料中含有孔隙、微裂缝等各种类型毛细管体系的介质。渗流就是以多孔介质作为前提条件的，多孔介质主要有四个与渗流有关的性质。

1. 储容性

多孔介质是以固相介质为骨架，其中包含一部分孔隙空间，孔隙内可以是气体或液体，也可以是多相流体。能储集和容纳流体是多孔介质的一个重要特征，多孔介质储容的好坏和孔隙空间的大小有关，因此引入孔隙度的概念。单位体积多孔介质所有空隙的总体积定义为绝对孔隙度，用公式表示为

$$\phi_a = \frac{V_r}{V} \quad (1-1)$$

式中 V_r ——空隙体积， cm^3 ；

V ——多孔介质体积， cm^3 ；

ϕ_a ——绝对孔隙度，无量纲量。

实际上，在多孔介质孔隙中，即使连通的孔隙体积，有的也是无效的，不能让流体通过

的微毛细孔隙或被微毛细孔隙包围的孔隙对渗流来说是无效孔隙，因此引入有效孔隙度的概念。将多孔介质的有效孔隙体积和多孔介质体积之比定义为有效孔隙度，其公式为

$$\phi = \frac{V_0}{V} \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——有效孔隙体积， cm^3 ；
 ϕ ——有效孔隙度。

2. 渗透性

多孔介质的孔隙空间有一部分是相互连通的，流体能在这部分连通的孔隙中流动。多孔介质具有让流体通过的这种性质叫做渗透性。单相饱和流体通过多孔介质的渗透性用绝对渗透率 K 表示为

$$K = \frac{Q\mu\Delta L}{A\Delta p} \quad (1-3)$$

式中 Q ——体积流量， cm^3/s ；
 μ ——流体粘度， cP ($1\text{cP} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)；
 ΔL ——孔隙介质试样长度， cm ；
 A ——试样横截面积， cm^2 ；
 Δp ——试样两端压差， Pa ；
 K ——渗透率， D 。

因此，多孔介质渗透率单位 D （达西）的物理意义是：当流体粘度为 1cP 、在压差为 1atm 情况下，渗流过水断面为 1cm 、长度为 1cm 的试样，其流量为 $1\text{cm}^3/\text{s}$ ，此时渗透率为 1D 。许多情况下， D 单位太大，常用 mD ($1\text{D} = 1000\text{mD}$)。绝对渗透率的大小只决定多孔介质的孔隙结构和孔隙大小，与所通过的流体性质无关。

3. 比表面积（比面）

由于多孔介质含有大量的孔隙空间，所以固相含有大量的表面积。比表面积（简称比面）大是多孔介质的一个显著特征。所谓的多孔介质的比面 (M)，定义为单位体积多孔介质 (V_0) 中的所有的颗粒的总表面 (A_s)，即

$$M = A_s/V_0 \quad (1-4)$$

如半径均为 R 的圆球按立方体排列组成的多孔物质，其比面为 $M = 4\pi R^2 / (\frac{4}{3}\pi R^3) = 3/R$ ，因此细颗粒物质的比面要比粗颗粒的比面大，例如中粒砂岩的比面约为 $20000\text{m}^2/\text{m}^3$ 。对于煤体来说，其比面则更大：无烟煤的比面高达 $200\text{m}^2/\text{g}$ ；贫煤比面基本在 $90 \sim 190\text{m}^2/\text{g}$ 范围内变化；瘦煤比面为 $80 \sim 130\text{m}^2/\text{g}$ 。比面构成了煤层气的主要储集场所。

4. 孔隙结构

多孔介质的另一个基本特征是孔隙结构很复杂（具有不同的孔隙类型）。从渗流力学观点出发，归纳孔隙结构引入三种介质的概念，即单重介质、双重介质和三重介质。单重介质有粒间孔隙结构和纯裂缝结构；双重介质有裂缝孔隙结构和溶洞孔隙结构；三重混合结构，即几米以上的大洞穴或大裂缝和微裂缝、微孔隙共生。

对于单一颗粒孔隙的介质，研究者是把实际孔隙介质转变为“理想球状结构模型”来研究的，即用一种理想球状结构来模拟实际的孔隙结构。最早期的方法是认为岩石等多孔介质由等直径的圆球颗粒组成，流体将在颗粒微细孔隙中流动。渗透率、比面等渗流参数与颗

粒大小及接触方式有关。

对于粒间孔隙结构，研究者还提出了另一种发展了的地层结构模型，叫做“理想单重介质模型”，即认为岩石的孔隙空间可以等值的看成由一束等直径的微细毛管组成，起初认为是直毛管，其直径是始终不变的，平行放置组成立方体。

纯裂缝结构和粒间孔隙结构一样，是一种单纯孔隙结构。纯裂缝的地层模型是由垂直方向的裂缝网格组成，在假设中将地层分割为许多立方体。

双重孔隙介质的孔隙裂缝结构是指在裂缝结构中，粒间孔隙被分割或一个个团块，由粒间孔隙组成的团块是主要的储存孔隙流体空间，而渗透率很大的裂隙是主要的流体通道。也就是说，在这种结构中，粒间孔隙有很大的孔隙度，但渗透率很小。相反，裂缝孔隙有很小的孔隙度，而具有很大的渗透率：由于两种并存的孔隙体系渗透率和孔隙度等物理参数相关很悬殊，所以形成了两个水动力学系统（通常叫做两个平行的水动力学场），因此裂缝结构的基本特点是双重孔隙度、双重渗透率、两个平行的水动力学场以及两种孔隙中间有流体交换的窜流作用发生。

在实际的孔隙裂缝双重结构地层中，裂缝分布是杂乱无章的。研究人员将它典型化为垂直交叉的裂缝网，将地层分割为长方形的粒间孔隙团块，同时认为裂缝渗透率大于团块渗透率，而裂缝孔隙度小于团块孔隙度。

5. 连续介质场

多孔介质结构的复杂性表明，要用确切的方式来描述多孔介质内部固体表面的几何形状是办不到的。同样，试图用确切方法描述孔隙空间包含的流体与多孔介质联系起来所发生的各种微观物理现象也是很困难的。因此，在渗流力学研究中需要提出一种方法来解决上述困难，用连续介质理论来研究流体和多孔介质是渗流力学的一种最基本的方法。

二、流体的力学性质

根据现代科学的观点，物质可分为五种状态：固态、液态、气态、等离子态和凝聚态。液体和气体通称为流体。流体是一种具有流动性的变形体，与弹性固体的区别在于当外力作用时，变形的方式不同。当对流体施加剪切外力时，不论此外力如何小，它总会发生变形，并且将不断地继续变形下去。这种不断继续变形的运动称为流动。流体的性质主要涉及流体的密度、粘度及压缩性等几个方面，它是多孔介质渗流的基础。

1. 流体的重量及重力势能

流体和其他物质一样具有重量，流体的重量一般用重率来表示，重率定义为单位体积流体所具有的重量，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

式中 G ——流体的重量，N；

V ——流体的体积， m^3 ；

γ ——流体的重率， N/m^3 。

由于重量本身是一种力，在渗流过程中，流体的重量和它的位置联系起来，就表示为重力势能，这种重力势能用压力表示为

$$p_z = \gamma Z \quad (1-6)$$

式中 p_z ——重力势能压力, Pa;
 γ ——流体的重率, N/m³;
 Z ——位置的相对高差, m。

2. 流体的质量和惯性力

任何物质都有质量, 在物理学中把惯性大小的量度称为质量。流体的质量是表示惯性力大小的量度。流体的质量特征一般用密度来描述, 密度定义为单位体积流体所具有的质量, 用公式表示为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-7)$$

式中 M ——流体的质量, kg;
 V ——流体体积, m³;
 ρ ——流体密度, kg/m³。

当流体开始流动或流体速度改变大小和方向时会产生惯性力, 在渗流力学中主要表现为阻力。根据牛顿第二定律和量纲分析, 惯性力可用压力表示为

$$p_a = \alpha \rho v^2 \Delta L \quad (1-8)$$

式中 p_a ——惯性力, Pa;
 v ——渗流速度, m/s;
 ΔL ——流体通过长度, m;
 α ——与孔隙结构几何特性有关的系数。

3. 流体的粘性系数(粘度)和粘滞力

流体在静止时虽不能抵抗切应力, 但在运动时, 对相邻两层流体间的相对运动, 即相对滑动速度却是有抵抗力的, 这种抵抗力称为粘性应力。流体所具有的这种抵抗流体相对滑动, 或普遍说来抵抗变形的性质称为粘性。粘性大小依赖于流体的性质, 并显著地随着温度而变化。当流体的粘性较小, 运动的相对速度也不大时, 所产生的粘性应力比起其他类型的力(如惯性力), 可忽略不计, 近似地把流体看成是无粘性的, 这样的流体称为理想流体。因此, 可以将流体分为理想流体和粘性流体两大类。流体的粘性通常用动力粘性系数(也称粘度) μ 来表示, 其单位为 Pa·s 或 N·s/m², 也可用运动粘性系数(也称为运动粘度) $\nu = \mu/\rho$ 来表示, 其单位为 m²/s。对经常遇到的粘性流体若其切应力与剪切变形速率符合线性关系, 则这种流体称为牛顿流体, 即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 μ ——流体的粘性系数, 也称粘度, 它取决于流体的种类、温度和压强。

切应力与剪切变形速率不成线性关系的流体称为非牛顿流体。非牛顿流体又因切应力与剪切变形速率关系的特点分为膨胀性流体、拟塑性流体、具有屈服应力的理想宾厄姆流体和塑性流体等。在通常情况下, 油脂、油漆、牛奶、血液、泥浆等均为非牛顿流体。有些非牛顿流体, 其粘性具有时间效应, 即切应力不仅与变形速率有关, 而且与作用时间有关。当变形速率保持常量, 切应力随时间增大的非牛顿流体称为震凝性流体。当变形速率保持常量而切应力随时间减小, 这种非牛顿流体称为触变性流体。

4. 流体的可压缩性

流体在受到一定压力差或温度差的条件下, 其体积或密度可以改变的性质称为可压缩

性。流体的可压缩性通常用体积压缩系数 β_L 来表示。流体的体积压缩系数 β_L 就是当流体承受法向压力或法向张力变化时，其体积（和密度）变化的度量，对等温条件，压缩系数 β_L 为

$$\beta_L = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-10)$$

式中 β_L ——流体的体积压缩系数；

V ——流体体积；

ρ ——流体密度；

p ——流体压力。

β_L 也可用体积弹性模量 $E_v = 1/\beta_L$ 来表示。

对于仅依赖压力的 β_L ，由方程 (1-10) 分离变量得

$$\rho = \rho_0 \exp[\beta_L(p - p_0)] \quad (1-11a)$$

式中 ρ_0 和 p_0 ——分别为参考状态密度和压力。

按麦克劳林级数展开，取前两项得

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta_L(p - p_0)] \quad (1-11b)$$

状态方程 (1-11b) 描述绝大多数液体的状态都是很精确的。

对于等温条件下的理想气体，其状态方程为

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad (1-12)$$

式中 M ——气体相对分子质量；

R ——气体的普适常数，等于 $8314 \text{m}^2 (\text{s}^2 \cdot \text{K})$ ；

R/M ——特定气体的气体常数，如甲烷的气体常数为 $518.2 \text{m}^2 (\text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。

真实气体可引进压缩因子 Z 来修正理想气体状态方程，即

$$\rho = \frac{Mp}{RTZ} \quad (1-13)$$

真实流体都是可以压缩的，其压缩程度依赖于流体的性质和外界条件。液体在通常的压力或温度下，压缩性很小，可作为不可压缩流体处理。对于气体、温度和压力的变化均会显著影响其可压缩性；如果所受压力差较小，运动速度较小，并且没有很大的温度差时，实际上所产生的体积变化不大，可近似地将气体视为不可压缩的。

三、多孔介质的力学性质

1. 多孔介质的压缩性

在储层的某一深度上，多孔介质承受着内应力和外压力的作用。内应力是饱和介质流体所产生的静压力，外应力是由该深度以上储层所施加的作用力。孔隙介质的压缩系数变化有多种解释，主要有外应力保持恒定而改变内应力所引起的体积相对变化，以及内应力保持恒定而改变外应力所引起的体积相对变化两大类，而相对变化又分为整体体积的相对变化、固体骨架体积的相对变化以及孔隙体积的相对变化等。饱和多孔介质的整体体积压缩系数 c_b 、固体骨架的压缩系数 c_s 以及孔隙体积的压缩系数 c_p 可以定义为单位应力，单位孔隙压力变化所引起多孔介质整体体积和固体骨架以及孔隙体积的相对变化，即

$$c_b = - \frac{1}{V_b} \frac{dV_b}{d\sigma} \Big|_{p = \text{const}}$$

$$c_b = - \frac{1}{V_b} \frac{dV_b}{d\sigma} \Big|_{\sigma = \text{const}} \quad (1-14)$$

$$c_s = - \frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{d\sigma} \Big|_{p = \text{const}}$$

$$c_s = - \frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{d\sigma} \Big|_{\sigma = \text{const}} \quad (1-15)$$

$$c_p = - \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{d\sigma} \Big|_{p = \text{const}}$$

$$c_p = - \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{d\sigma} \Big|_{\sigma = \text{const}} \quad (1-16)$$

所以, 当 $\sigma = \text{const}$ 时, 有

$$c_b = (1 - \varphi)c_s + \varphi c_p \quad (1-17)$$

在一般情况下, $c_b = \varphi c_p$, 固体颗粒体积变形很小, 即多孔介质骨架的压缩系数等于孔隙率与孔隙压缩系数的乘积。

煤岩的压缩性对渗流过程有两方面的影响: 一方面是压力变化引起孔隙大小的变化, 表现为孔隙度为随压力而变化的状态函数; 另一方面则是孔隙大小变化引起渗透率的变化。

2. 有效应力原理

早在 1923 年, 太沙基在研究饱和土的固结, 水与土壤的相互作用的基础上, 提出了著名的太沙基有效应力原理。这一原理是土壤力学区别于固体力学的特征性原理, 在三维情况下可以写为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} \quad (1-18)$$

式中 σ'_{ij} ——有效应力张量;

σ_{ij} ——总应力张量;

p ——孔隙压力;

δ_{ij} ——Kroneker 符号。

这一原理解决了三个主要问题: 饱和土壤中两个受力体系的有效应力和孔隙压力的相互作用关系; 土体变形与两种应力的关系; 土体强度与两种应力的关系。

20 世纪 50 年代中期, 土压力三轴仪研制成功, 英国 Skempton 通过大量实验, 分析出孔隙压力不仅受法向压力的影响, 而且也受剪切应力的影响, 即同时受体积变形与形状变形制约, 可以用下式表示

$$\Delta u = A[\Delta\sigma_3 + B(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (1-19)$$

式中, A 、 B 为反映法向应力和剪应力作用下各自引起的孔隙压力的物理量; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三个方向上的应力。

1960 年, Skempton 又证明了太沙基有效应力原理对于工程上的用途是足够准确的。抛开太沙基有效应力原理适用介质的物理意义, 可清楚地看出这一原理仅适用于散体介质, 而对岩体这样的多孔介质, 太沙基有效应力原理则不再适用, 但有效应力概念还是适用的, 为此人们自然想到对太沙基原理的修正。Skempton 在研究有效应力对土木工程适用性时发现, 对于部分土体有效应力原理并不适用, 而提出它的修正形式为

$$\begin{cases} \sigma'_1 = \sigma_1 - Kp \\ \sigma'_2 = \sigma_2 - Kp \\ \sigma'_3 = \sigma_3 - Kp \end{cases} \quad (1-20)$$

式中 K 是取决于颗粒接触面积和它们的力学性质的常数。

Robinson (1959)、Handin (1963) 等在研究岩石的有效应力时逐渐形成了应用于岩石的有效应力公式

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (1-21)$$

式中 α ——等效孔隙压系数, $0 \leq \alpha \leq 1$, 取决于岩石的孔隙、裂缝发育程度。

3. 煤岩应力应变全程曲线

煤岩材料的全程应力应变曲线在岩石力学中占有极其重要的位置, 随着刚性伺服试验机和先进的测试记录仪器的发展, 国内外在进行了大量的试验研究后, 归纳出煤岩材料的应力应变曲线大致呈现四个阶段 (见图 1-1): ①OA 区段, 曲线稍向上凹曲, 说明随应力增加, 产生相同的应变, 需要更大的应力, 这是由于煤岩裂缝被压密的缘故。②AB 区段, 该段曲线接近直线, 属弹性变形阶段。③BC 区段, B 点为屈服应力点, 通常在峰值应力的 2/3 处, 该曲线的斜率随应力的增加逐渐减小到零, 属塑性强化阶段。自 B 点后, 卸载路径和重新加载路径不同, 反映煤岩塑性阶段应力应变关系的多值性。④CD 区段, 从 C 点开始, 曲线斜率为负, 为软化破坏阶段, 煤岩材料与一般材料不同, 应力达到强度极限后, 仍保持一定的承载能力。将最终保持的强度, 称为残余强度。

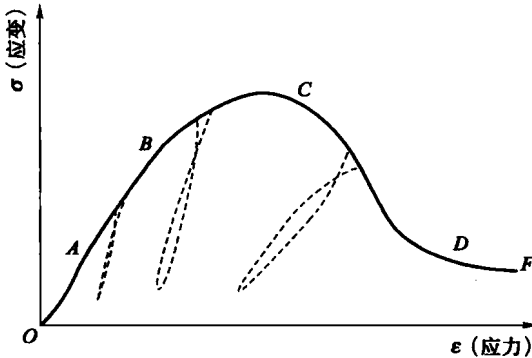


图 1-1 岩石应力—应变全程曲线

4. 煤岩变形破坏机制与强度准则

煤岩破坏类型可分为脆性破坏与塑性破坏, 脆性破坏指的是煤岩在载荷作用下没有发生显著变形而突然发生的破坏; 塑性破坏指的是煤岩在载荷作用下发生较大的塑性变形后才发生的破坏。从另一角度讲, 又可划分为拉伸破坏和剪切破坏两种类型。拉伸破坏指的是作用于煤岩上的拉应力超过了岩石的抗拉强度而产生的破坏, 其特征是破裂面出现张开破坏, 即发生了相对的法向位移。剪切破坏指的是剪应力超过煤岩抗剪强度而产生的破坏, 其特征是其破坏面之间产生了相对错动。一般情况下, 拉伸破坏属于脆性破坏, 剪切破坏属于塑性破坏。将上述破坏机制用应力状态及其他材料参数表示, 即所谓的强度准则。

由于莫尔—库仑强度准则应用起来不方便, 德鲁克—普拉格 (Drucker—Prager) 建议采用德鲁克—普拉格屈服准则。

四、多相渗流基本知识

多孔介质中存在两种或两种以上的流体, 有明显的分界面且同时流动称为多相渗流, 如石油在注水开采中, 地层压力降低到饱和压力以下时, 石油中溶解气就分离出来, 成为气油两相流。油层注水开发过程中形成油水两相渗流, 煤层气开发时形成气水两相流, 土壤学及水利学上的非饱和流动就是空隙分别被空气和水所占据简化为空气不流动的气水两相流, 因

此，多孔介质中两相或多相流体同时存在具有普通性。流体饱和度、界面张力和湿润性、毛细力和相对渗透率等概念是多相渗流的基础。

1. 流体饱和度

当多孔介质的孔隙空间被两种或多种以上的流体所占据时，每一种流体所占据孔隙的比例是非常重要的参数，介质中任意一点关于某一流体的饱和度定义为在该点周围的单元体内流体所占据多孔介质空隙体积的百分比，即 $S_\alpha = \text{单元体内流体 } \alpha \text{ 的体积} / \text{单元体内空隙的体积}$ ，且 $\sum_\alpha S_\alpha = 1$ 。当由两种流体充满孔隙空间，例如是瓦斯和水，则有 $S_w + S_g = 1$ （其中 S_w 和 S_g 分别表示水和瓦斯在煤层中的饱和度）。

2. 界面张力和湿润性

一种流体与另一种与其不溶混的液体、气体或固体接触时，在它们之间会存在一种自由界面能。这种界面能是由于各相内部的分子与接触面处的分子之间向内的引力差引起的，即由于分子力场的不平衡而使表面分子储存多余的自由能，具有自由能的表面可以收缩，自由界面能就可以用界面张力形式表现出来。要想将接触面上物质 i 和 k 分离，必须有外力做功，每分离单位面积所做的功称为界面张力 σ_{ik} ，其单位为 N/m 。液体物质与其自身蒸汽之间的界面张力称为表面张力，分别用 σ_i 和 σ_k 表示。

图 1-2 (a) 表示两种不溶混流体与第三种流体 G 彼此接触的关系。三者之间的平衡状态有以下关系

$$\sigma_{AG} = \sigma_{AB} \cos \theta_{AB} = \sigma_{GB} \cos \theta_{GB} \quad (1-22)$$

$\sigma_{AG} < \sigma_{AB} + \sigma_{GB}$ ，则上述平衡关系能够满足，这时液体 B 形成透镜形状。反之，若 $\sigma_{AG} > \sigma_{AB} + \sigma_{GB}$ ，则上述平衡状态不能形成，此时液体 B 将在 A 和 G 之间扩展开来。

图 1-2 (b) 表示两种不溶混流体与固体表面接触关系。这种情形的平衡状态要求界面切线方向 σ_{GL} 与固体表面之间的夹角 θ 规定为：从液体界面的切线量起通过较稠密的流体内部转向固体表面切线止， $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。若 $\theta < 90^\circ$ ，称这种流体湿润这种固体，对此固体而言，这种流体称为湿润性流体，二者具有亲和性。若 $\theta > 90^\circ$ ，这种流体在固体表面略显椭球状，则对此固体而言，该流体称为非湿润性流体，二者之间具有憎恶性。 $\theta = 90^\circ$ 时这种液体为中性状态。

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{GL}} \quad (1-23)$$

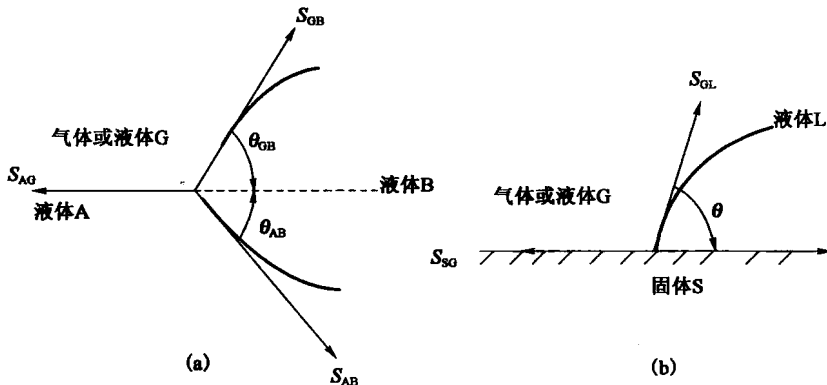


图 1-2 界面张力