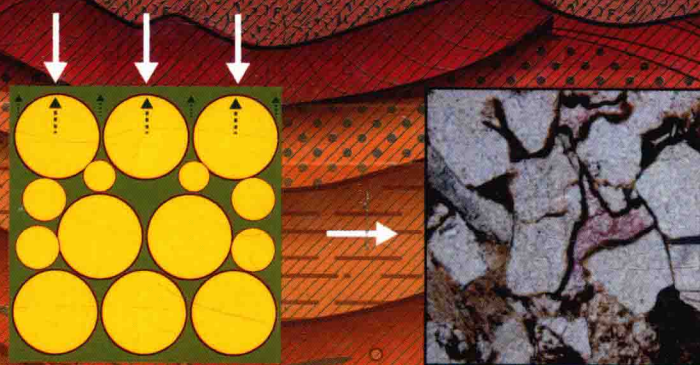


地层孔隙动力学

DICENG KONGXI DONGLIXUE

刘震 刘明洁 李潍莲 等著



石油工业出版社

地层孔隙动力学

刘震 刘明洁 李潍莲 金博 著
梁全胜 夏鲁 赵阳 刘静静

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在盆地成岩动力学与盆地流体动力学相结合的思路指导下,将近二十年以来笔者从事的相关研究成果总结提升,按照地质动力学原理,提出地层孔隙动力学概念,并建立一整套新的地层微观孔隙动力学研究体系。本书主要包括地层孔隙动力学概念和体系内涵;地层孔隙介质静力平衡方程;砂泥岩孔隙度演化动力学;地层温度与孔隙流体压力关系;泥岩孔隙度与有机质热演化程度关系;盆地地层温度—地层压力系统特征;地层速度与压力关系及地层压力地震预测模型;储层临界物性与储层动态评价;致密砂岩油气成藏动力学九方面的内容。

本书可供从事地质基础研究和油气资源勘探的科研人员参考,也可作为相关专业硕士生和博士生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

地层孔隙动力学/刘震等著. —北京:石油工业出版社, 2015. 8
ISBN 978-7-5183-0384-7

I. 地…

II. 刘…

III. 裂隙油气藏-石油天然气地质-动力学-研究

IV. P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 221037 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

编辑部: (010) 64523543

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 332 千字

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

序

含油气盆地地层微观尺度的地质动力学研究，一直是多年来广泛受到关注的重要地质学前沿领域。由于地层介质的复杂特征，以往传统的岩石力学、成岩动力学和地下流体动力学研究分支之间的联系比较松散，导致许多基础地质学问题（如孔隙介质静力平衡问题）和石油地质学问题（如地层孔隙度演化模式、地层温度与地层压力关系问题和烃类充注动力方程等问题）长期以来难以进行深入研究。

我和张万选老师在多次修编《石油地质学》教材的过程中，对盆地流体动力学和油气运移研究的高速进展印象十分深刻。特别是 Hubbert 等将流体势引入到油气运移领域后，带动了整个油气二次运移的飞速发展，促使我在 20 世纪 80 年代末期和陈荷立教授等人创立了中国石油学会石油地质委员会油气运移学组，加强和推动了国内在油气运移方面的研究。多年来，我和许多同行已经发现油气运移动力学的许多理论来源于地下水文地质学，但因盆地深部特殊的物理化学条件，不少基础模型的适用性受到质疑和挑战。当今石油地质学飞速发展，更需要在油气赋存的真实环境——孔隙介质条件下探讨油气生成、运移和聚集的动力、方向和渗流速率等关键参数。特别是非常规油气勘探开发热潮的来临，进一步要求石油地质工作者把宏观地质研究推广到微观环境，真正解决埋藏过程中地层岩石孔隙演化控制下的孔隙参数的演变规律与勘探开发应用技术的更新和完善问题。

刘震教授带领的团队在地质与地球物理相结合的研究领域很早就发现了岩石孔隙度的动力学问题，并投入了大量的基础性研究工作。作为导师，感觉到刘震教授具备了良好的数理功底和扎实的地质基础，得以在孔隙动力学领域发现并探讨一定的科学问题，更为重要的是弟子刘震从学生时代就注重培养科学的工作方法，形成了客观务实的学风，坚持不懈地钻研和探索基础地质问题，在微观地质动力学研究领域走出了一条新的道路。

盆地地层孔隙动力学作为一个全新的交叉学科，科学问题众多，涉及大量基础科学难题，同时也对石油地质学及其相关学科影响深远。我和万选在逾八旬之年能见证弟子获得新的研究成果深感欣慰，同时也坚信刘震会不负重望，一直探索下去。

张厚福

2014 年 3 月 29 日

前言

21 世纪的地球动力学研究正在向量化方向发展。开始于 20 世纪 70—80 年代的盆地模拟技术为地质过程定量研究选择了科学的理论基础和实用的计算模型并建立了商业化软件系统。经过三十多年的应用实践后发现,盆地动力学研究的许多基础概念和基础模型本身存在不少问题,需要进行进一步研究和探索。

另一方面,随着历史地质学的思想日益深入人心,地质过程研究的重要性愈来愈受到关注和肯定,人们把地质过程研究视为与地质作用研究相同的地位。研究人员不再片面地局限于仅仅分析具体地质作用,而不考虑地质过程对地质现象的影响。但由于地质过程的不可逆特性,恢复地质过程相当困难,特别是微观尺度下地质参数演化过程的恢复和估算成为当今地质学的重大科学难题。

笔者基于两大需求创立了“地层孔隙动力学”。其一,经典的岩石力学假定了地层为均匀连续介质,但这不符合地层非均质性、不连续性的实际特征,就不可能合理表达地层的应力应变基本规律;其二,成岩动力学主要研究成岩环境、成岩作用和孔隙空间变化规律,并不关注诸如孔隙流体压力、地层温度和镜质组反射率演化等其他与孔隙相关参数的变化规律,而地下流体动力学则只研究地层孔隙渗流特性,却不关注孔隙结构成因和演变规律。这两个本来密切相关的学科之间存在断层,地层孔隙动力学正好成为一个新的桥梁,将孔隙成因演化与孔隙流体动力演化结合为一体,推动地层微观动力学的发展。

笔者提出了地层孔隙动力学的概念。认为地层孔隙动力学是关于沉积盆地埋藏过程中碎屑岩孔隙介质力学特性和孔隙演化规律以及孔隙流体动力成因和渗流特性的基础性学科,是地下成岩动力学与孔隙流体动力学相交叉的新学科,是沉积盆地动力学的重要组成部分。

笔者在本书中汇集了八项重要的研究成果。包括:一、提出孔隙性介质条件的应力应变模型,建立孔隙介质静力平衡方程,认为有效应力不是颗粒真实的应力,颗粒应力才是骨架真正的受力,并指出当同类地层孔隙度相同时,地层有效应力并不一定相等;二、基于成岩作用建立了砂岩和泥岩孔隙度演化定量新模型,特别是提出了压实阶段地层孔隙度受埋深和埋藏时间的双重控制定量模型,并首次提出了基于化学成岩一级反应动力学方程的砂岩溶蚀增孔定量模型;三、发现地层条件下温度与压力的基本定量关系,提出盆地地层温度—地层压力系统新概念,建立高温环境水热增压指数模型;四、确定了构造挤压产生的附加地应力对孔隙流体压力的影响程度;五、建立了泥岩孔隙度与镜质组反射率的幂函数关系,形成了低勘探阶段生烃演化程度和有效生烃灶分布早期预测新方法;六、提出了基于地层速度预测地层压力的多种定量模型,并发展了基于颗粒应力的地层压力预测新模型;七、提出了储层临界物性概念,为储层动态评价体系构建奠定理论基础;八、实现了基于油气充注动力学的砂岩烃类充注数值模拟和双轴承压砂岩充注物理实验模拟,推动了油气成藏过程动态研究。

本书内容包括九个章节。第一章由刘震执笔；第二章由刘震和温宽如执笔；第三章由刘震、邵新军、金博、何小胡、潘高峰和胡小丹执笔；第四章由刘震、曾宪斌和梁全胜等执笔；第五章由刘震、孙强、赵阳和许晓明等执笔；第六章由刘震、朱文奇、孙强和黄艳辉编写；第七章由刘震和郭志峰等执笔；第八章由刘震、刘明洁、梁全胜、潘高峰、夏鲁和刘静等执笔；第九章由刘震、梁全胜、刘明洁、夏鲁和王伟等执笔。参考文献由刘明洁编写。全书由刘震和刘明洁统稿。

由于笔者水平有限，书中难免存在错误和纰漏。欢迎广大读者提出批评和帮助意见，争取再版时得到更正和完善。

目 录

第一章 地层孔隙动力学概念	(1)
第一节 研究背景及问题	(1)
第二节 定义及内涵	(2)
第三节 地层孔隙动力学形成历程简介	(3)
第二章 地层孔隙介质静力平衡方程	(5)
第一节 碎屑岩孔隙介质静力平衡	(5)
第二节 地层黏弹塑性体应力—应变关系	(9)
第三章 砂泥岩孔隙度演化动力学模型	(34)
第一节 压实阶段地层孔隙度与埋深和时间关系	(34)
第二节 埋藏过程对地层压实程度的影响	(50)
第三节 砂岩溶蚀作用定量模拟	(55)
第四节 砂岩孔隙度演化定量总模型	(66)
第五节 泥岩孔隙度演化过程分析	(72)
第四章 地层温度、地应力与孔隙流体压力关系	(79)
第一节 沉积盆地地层温度与地层压力关系	(79)
第二节 高温水热增压作用新模型	(84)
第三节 附加地应力与孔隙流体压力关系	(91)
第五章 泥岩孔隙度与有机质热演化程度关系	(104)
第一节 泥岩孔隙度与热成熟度的理论关系	(104)
第二节 实际资料中的相关性	(106)
第三节 无机成岩与有机成岩关系讨论	(109)
第四节 应用意义	(109)
第六章 盆地地温—地压系统特征——以中国含油气盆地为例	(111)
第一节 中国含油气盆地地温—地压系统基本特征	(111)
第二节 高温盆地地温—地压系统特征——以南海北部为例	(129)
第七章 地层速度与地层压力关系及地层压力地震预测模型	(134)
第一节 地层压力地震预测模型	(134)
第二节 基于静力平衡的地层压力预测新模型	(142)
第八章 储层临界物性与储层动态评价	(152)
第一节 储层含油物性下限与储层临界物性的差别	(153)
第二节 利用录井资料确定砂岩储层临界物性	(154)

第三节	利用试油资料确定砂岩储层临界物性	(158)
第四节	利用砂岩烃类充注实验测定砂岩储层临界物性	(160)
第五节	储层临界物性对储层评价意义的讨论	(162)
第九章	致密砂岩油气成藏动力学	(165)
第一节	砂岩石油充注临界动力学方程	(165)
第二节	砂岩石油充注物性—临界注入压力实验分析	(170)
第三节	鄂南延长组低孔、低渗透砂岩成藏过程动态分析	(179)
参考文献		(189)

第一章 地层孔隙动力学概念

在沉积盆地中，碎屑沉积物在地质营力作用下充填堆积呈层状的过程，是一个地质动力学过程。在沉积期后，层状碎屑颗粒在埋藏过程中，经历机械压实、胶结和溶蚀等多种成岩作用，形成多种新的自身矿物，原有的颗粒孔隙空间发生不断的变化，这种变化已由“成岩动力学”来概括。另一方面，在细粒的泥质孔隙中的有机质随埋深增大，其热演化成度不断升高，这种作用被称之为“化学反应动力学过程”。同时，地层孔隙中的流体压力也在不断发生变化，进而引起孔隙油气水的复杂运移和聚集。

显然，后几种发生在地层微观孔隙中的动力学过程决定或控制了沉积矿产的形成、分布和富集。实际上，碎屑沉积物埋藏期后发生在微观孔隙空间中的基本动力学特征，前人鲜有深入的研究，特别是以孔隙变化及其影响为核心的动力学问题，目前尚未有系统的研究和论述。

第一节 研究背景及问题

一、相关基础学科的局限

20 世纪 80 年代以来，地质科学进一步向定量化成因机制研究发展。人们认为地球上的所有地质现象应该都是地球动力作用的结果，各种地质构造应该都是可以用动力学成因来解释。地球动力学作为探索地球地质成因的综合性学科，主要是对地球上存在的各种构造运动作宏观的动力学分析，阐明地质现象发生、发展的成因机制和演化过程。受地球动力学影响，油气成藏动力学概念一经提出，就受到广泛关注。

显然，从经典的石油地质学到地球动力学，再到成藏动力学，延续了一条宏观研究路线，研究对象的尺度主要是盆地尺度和区带尺度、最小达到圈闭及矿藏尺度，极少考虑微观尺度下的地质变化特征。

直到 20 世纪 70—80 年代才受到地质学家重视的“成岩作用”的概念远远超出了沉积学的范畴，成为沉积岩石学、石油地质学、矿床学的各种测试技术相互渗透的一门边缘学科。成岩作用可区分为有机成岩作用、黏土矿物成岩作用和储层成岩作用三个领域，主要研究沉积物在沉积后到变质作用之前的各种物理、化学及生物化学作用，它针对微观尺度下矿物颗粒、孔隙空间和孔隙流体开展研究工作。21 世纪初，成岩动力学被提出，动力成岩作用受到广泛应用。

建立在经典的水文地质学基础之上的盆地流体动力学，主要研究地层条件下流体的运移动力、方向和流体变化。更确切地讲，地下水动力学或盆地流体动力学主要研究地下水或流体在岩石孔隙性介质或裂缝介质中的渗流规律，并不过多关注孔隙性介质中渗流的原因及孔隙介质的变化引起的地层温度、地层压力和相关参数的变化规律。

另一方面，地质力学用力学原理研究地壳构造和地壳运动规律，它涉及构造地质学、力

学(固体力学、流变学、断裂力学)、地球物理学、天文学等学科。作为专门研究岩石受力变形规律的岩石力学,虽然也考虑到了岩石同时具有弹性、塑性和黏性特征,但还是把经典的材料力学原理引用到岩石力学,把岩石作为均匀连续材料进行应力—应变规律分析,而没有考虑岩石的孔隙性特征引起的应力—应变特性的改变,使得岩石力学模型总是与实际岩石条件下的应力—应变规律之间存在偏差。

综上所述,可以得出以下结论:(1)盆地动力学或地球动力学过于宏观或综合;(2)岩石力学或固体力学将研究对象假设为均匀连续介质而不是孔隙性介质,有些脱离实际;(3)盆地流体动力学或地下水动力学只注重岩层孔隙中水或流体的渗流规律,并不考虑渗流的地质成因;(4)成岩动力学或动力成岩作用则注重孔隙成因及变化规律,但却不考虑孔隙流体动力及相关参数变化规律。显然,在孔隙性介质研究中缺少一门既研究孔隙变化规律又关注孔隙流体动力变化的综合性学科。

二、主要科学问题

如果将成岩动力学与盆地流体动力学结合,存在以下八个方面的问题:

- (1) 孔隙性地层的应力—应变规律缺乏基础性研究;
- (2) 孔隙性介质静力平衡尚无微分模型;
- (3) 孔隙演化过程对孔隙度的影响程度尚不清楚;
- (4) 压实过程中地质时间对孔隙度的影响程度认识肤浅;
- (5) 砂岩溶蚀动力学定量分析进展滞后;
- (6) 孔隙介质条件下流体压力、温度、热成熟度等参数的模型过于陈旧,不适应盆地动力学和成藏动力学的进一步发展;
- (7) 承压条件下孔隙微观渗流实验研究方面薄弱;
- (8) 孔隙介质中油气充注条件定量分析十分欠缺。

第二节 定义及内涵

一、地层孔隙动力学的定义

地层孔隙动力学是关于沉积盆地埋藏过程中碎屑岩孔隙介质力学特性和孔隙演化规律以及孔隙流体动力成因和渗流特性的基础性学科,是地下成岩动力学与孔隙流体动力学相交叉的新学科,是沉积盆地动力学的重要组成部分。

地层孔隙动力学应该是近 20 年以来地质动力学研究向地下微观尺度发展的代表性学科分支之一,也是沉积矿产形成分布机理研究定量化发展的必然结果。

二、地层孔隙动力学研究内容

地层孔隙动力学可以划分为两个部分。其一是基础理论部分,其二是应用研究部分。

1. 基础理论部分

基础理论部分主要研究以下六个方面的基础问题:

- (1) 地下地层孔隙性介质应力—应变关系及其孔隙静力平衡原理;
- (2) 埋藏成岩过程砂岩孔隙度演化机理与定量模型;

- (3) 泥岩压实特征及泥岩孔隙度演化定量模型;
- (4) 地下岩层孔隙流体温度与孔隙流体压力理论关系;
- (5) 构造作用附加地应力对孔隙流体压力的影响;
- (6) 泥岩压实程度与有机质镜质组反射率的关系。

2. 应用研究部分

地层孔隙动力学具有广阔的应用前景。目前,至少可以在以下六个领域得到实际应用:

(1) 沉积盆地地层温度—地层压力系统(以下简称地温—地压系统)划分及油气分布动力学解释;

- (2) 地层压力预测模型改进;
- (3) 储层临界物性及储层动态评价体系构建;
- (4) 地层流体压力演化过程模拟;
- (5) 砂岩体油气充注动力学数值模拟及物理实验模拟研究;
- (6) 致密砂岩油气藏形成动态过程分析。

地层孔隙动力学的研究体系结构可以通过图 1-1 表达清楚。

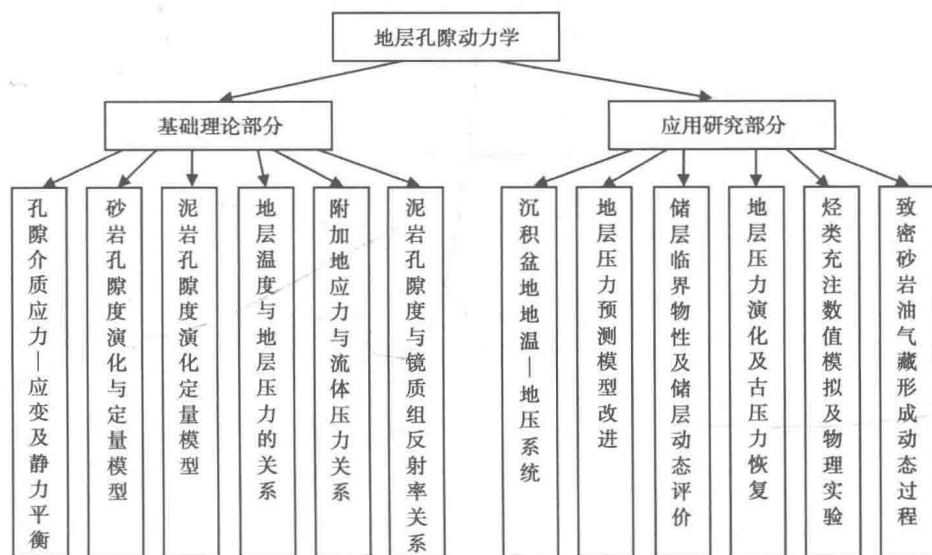


图 1-1 地层孔隙动力学体系结构示意图

第三节 地层孔隙动力学形成历程简介

现今编写出版《地层孔隙动力学》专著,并非一时的奇想。实际上早在 1995 年,笔者指导硕士研究生温宽如同学研究和编写硕士学位论文《孔隙力学基础研究》时就有此想法。当时只是发现已有的岩石力学模型都把岩石作为均匀介质,按照材料力学原理来处理,没有考虑到地下岩石实为由颗粒组成的孔隙性介质与孔隙流体两部分合成,绝不是均匀介质所能替代的。因此,当时将岩石作为颗粒和孔隙流体两部分进行应力—应变关系耦合,建立了线性弹性岩石静力平衡方程、线性黏弹性静力平衡方程和黏弹塑性岩石静力平衡方程,开启了孔隙动力学研究的先河。

1993 年，笔者开始研究地层压力与地层弹性波速之间的关系，于 1996 年提出“盆地地温—地压系统”概念，建立了孔隙介质条件下地层温度与地层压力的关系，并探索了推覆挤压条件下附加地应力产生的异常孔隙流体压力的幅度。

1997 年，笔者发现经典的特察模型在地下砂泥岩地层中应用时被误用，明确提出有效应力不同于引起地层变形的颗粒应力。同年发表了压实阶段地层孔隙度受埋深和时间控制的双元函数，并提出了泥岩压实程度与镜质组反射率之间存在幂函数关系。

2000 年以来，笔者开始关注超高温条件下水热增压作用，发现高温环境下水热增压幅度与地层温度呈指数增长而不是呈直线增长的特性，并根据静力平衡原理，利用颗粒应力完善了地层压力计算模型。

2008 年之后，笔者分别建立了砂岩和泥岩孔隙度演化模型。特别是提出了“基于成岩作用的分段效应合成砂岩孔隙度演化模型”，实现了复杂成岩作用和成岩过程中的孔隙度恢复。同时，笔者指导研究生开展了致密砂岩物性研究，提出了“储层临界物性”概念，建立了砂岩烃类充注的动力—阻力平衡方程，实现了砂岩石油充注临界条件实验测定，并倡导了致密砂岩成藏动态过程分析方法。

2012 年，笔者开始组织编写地层流体动力学专著。经过近 20 年的艰苦努力和持续探索，终于形成了一支基础较扎实、应用较广泛且特色较鲜明的应用性基础理论学科——地层孔隙动力学。

第二章 地层孔隙介质静力平衡方程

岩石力学将地下岩层假设为均匀且连续的介质来研究,这与砂泥岩地层孔隙性介质既不均匀也不连续的实际情况相距甚远。为了更接近孔隙性介质的应力—应变关系,本章采用颗粒与孔隙流体双相介质耦合原理,从孔隙静力平衡的角度,间接分析了砂泥岩地层在不同理想条件下的应力—应变理论关系,为地层条件下的孔隙力学奠定基础。

通过建立地层条件下的孔隙介质地质理论模型,分别采用线性弹性岩石静力平衡方程、线性黏弹性岩石静力平衡方程和黏弹塑性岩石静力平衡方程三种力学模型分析孔隙介质的应力和应变关系,提出了经典的特察模型的静力平衡问题,指出有效应力不是造成地层变形的实际应力,认为颗粒应力更能表达骨架的受力状态。

第一节 碎屑岩孔隙介质静力平衡

经典的孔隙性岩石的静力平衡规律最早是从土壤力学中引入的。自 Hubbert 等 (1959) 将 Terzaghi 等 (1948) 的土壤固结试验模型运用于地下岩层以来,人们都习惯于接受这样一种概念:即上覆地层的总负荷等于有效应力与孔隙流体压力之和。Magara (1968) 根据这一概念建立了著名的流体压力计算方法——等效深度法,目前世界上大部分人都在用等效深度法计算地层压力。Plumley (1980) 在分析沉积地层中流体压力和孔隙度与埋深关系以及它们的演化路径时,假定了有效应力与流体压力之和等于岩性静压力这一条件。刘震等 (1993) 在推导地震地层压力计算公式时,也选用了特察模型的数学公式。事实上,很少有人对特察模型在地层中的应用时所产生的问题提出质疑。

一、特察模型存在的问题

1. 对特察模型试验装置的讨论

Terzaghi 等 (1948) 在研究饱和水黏土的压实和固结理论时,用如图 2-1 所示的试验装置来模拟压实过程中黏土内部的受力情况。图中有一个盛有水的圆筒,筒中装有一些带孔的金属盘,它们彼此之间被金属弹簧所分隔。盘子模拟地下黏土质点,弹簧模拟黏土质点间的接触状况,筒内的水压可用筒子上装的流体压力计测量。

当在最上边的盘子上施加一负荷 s 时,如果水不从筒子里派出去,弹簧的高度将保持不变。在这个阶段 (图 2-1 阶段 A),所施加的负荷 s 全部为水的压力 p_f 所支撑,即

$$s = p_f \quad (2-1)$$

如果增大负荷 s ,筒子里受压会排掉一些水,盘子就要向下降,弹簧也要支撑负荷 s 的一部分 (图 2-1 阶段 B)。由弹簧支撑的压力一般用 σ 表示。水从筒子里排出得越多,弹簧便压缩得越紧;同时支撑总负荷的部分 σ 也越大。水从筒子里充分排出时,就会达到压实平衡 (图 2-1 阶段 C)。

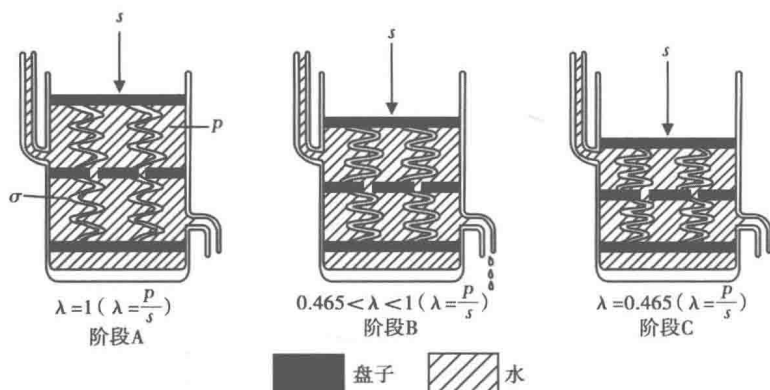


图 2-1 黏土压实作用示意图 (据 Terzaghi 等, 1948)

应该承认, 在图 2-1 所示的模型中, 上覆总负荷只能被两种力所分担, 一是水的压力, 另一个就是弹簧的支撑力。但是, 假如把实验装置中的两串弹簧减成一串, 就会发现, 要使顶盘下降同样的高度, 后者只需加一半的负荷。这是由于顶盘下降同样的高度时, 弹簧的压缩量相同, 在两串弹簧时和一串弹簧时每个弹簧的支撑力都是相等的, 故在两种条件下, 弹簧总的支撑力不同。

显然, 在压缩排水过程中, 必须考虑弹簧的个数即弹簧密度。在上覆负荷不变时, 弹簧的密度越大, 每个弹簧分担的支撑力就会越小, 弹簧也就越不容易被压缩。

2. 特察模型的数学公式及其讨论

对于地下的孔隙性岩石, Hubbert 等 (1959) 把它的受力情况比拟为图 2-1 中的实验模型: 岩石颗粒比作弹簧, 孔隙流体比作圆筒中的水, 施加的负荷总量为骨架和孔隙流体共同支撑。实际上, 早在 1923 年特察就已将有效应力概念用公式表示如下:

$$s = \sigma_e + p_f \quad (2-2)$$

式中 s ——总应力;

σ_e ——有效应力;

p_f ——孔隙流体压力。

由于该式是为土壤力学中未固结物质建立的, 在 Hubbert 等发现这个公式的重要性之前, 地质学家很少注意到它。但后来研究表明, 这个公式对于孔隙度小于 1% 的结晶岩也是透用的。

然而, 必须注意这样一个事实: 正像特察实验模型中支撑弹簧的数量决定压缩程度一样, 地下孔隙性岩石的孔隙度 (反映颗粒与孔隙空间的相对大小) 也决定了岩石的压实难易程度, 岩石越密, 单位体积中颗粒就越多, 孔隙流体就会越少, 这时就越难压实。按式 (2-2) 定义, 有效应力显然与孔隙度无关, 所以它不是真正的骨架支撑力。

另一方面, 作为众所周知的常识, 无论总应力 s 还是有效应力 σ_e , 或者孔隙流体压力 p_f , 它们都应是单位面积上所受的力, 实为受力的“密度”, 而不是总力的描述。

因此, 将有效应力定义为上覆负荷与孔隙流体压力之差只是为了使用方便, 而且可以用实验方法测量, 但它实属一个人为定义的抽象物理量, 难以用力的“密度”来衡量。

二、孔隙性岩石静力平衡方程的建立

在单位面积上，一个岩柱的总质量可作为总负荷应力 s ，固体矿物骨架和孔隙流体分担的两种力必然在这个单位面积上按孔隙度 ϕ 的大小具体分配，即孔隙流体压力 p_f 只作用到相当于孔隙度 ϕ 那样大的面积上，而颗粒应力 σ 则作用到面积为 $1-\phi$ 的部分上。图 2-2 表示孔隙性岩石微观受力分析过程。笔者认为，当压实达到平衡时，存在：

$$s = (1-\phi) \sigma + \phi p_f \tag{2-3}$$

该式称为孔隙性岩石静力平衡方程。该方程实际上是岩石模型在统计意义上等效后得出的经验公式。

颗粒应力 σ 是岩石骨架颗粒之间相互作用的真正应力。有效应力实际上比颗粒应力要小得多：

$$\sigma_e = (1-\phi) (\sigma - p_f) \tag{2-4}$$

而且，有效应力比较复杂，它并不是颗粒间的真正支撑力，故不便于用来进行微观的静力平衡分析。在颗粒接触点上可能会出现应力集中的现象，因此，上述颗粒应力可视为平均颗粒支撑应力。

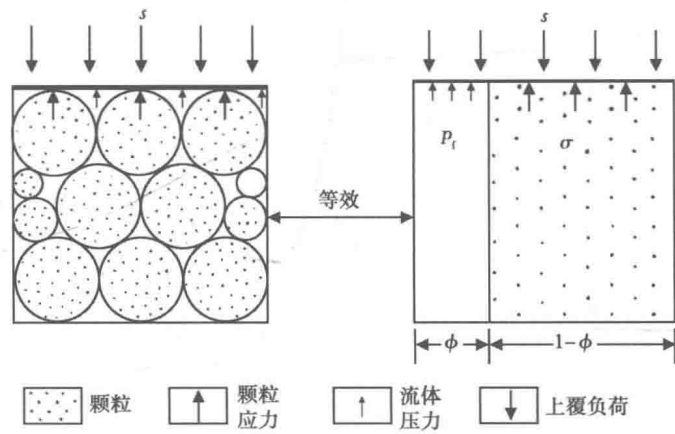


图 2-2 孔隙性岩石静力平衡等效模型

三、关于有效应力的讨论

长期以来，存在这样一个观点，即有效应力控制岩石压实程度（Magara, 1968；陈希哲, 1982）。当有效压力相等时，岩石的孔隙度也相等。在图 2-3 中，Magara (1968) 认为欠压实段中埋深为 Z 的 A 点处页岩孔隙度因与其正上方正常压实段投影点 B 处页岩孔隙度相等，所以 A 点的有效应力就与 B 点的有效应力相等，从而根据原特察模型的数学公式建立了等效深度法。

显然，后人在应用有效应力的概念时，已经与原特察模型相矛盾了。原特察模型中的有效应力与孔隙度（反映压实程度）根本无关。既然特察模型是一种人为定义，本身无可非议，那么上述矛盾必然出自应用自身。

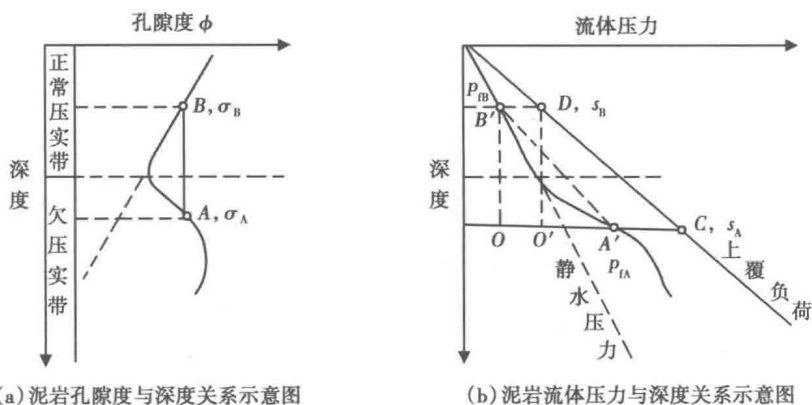


图 2-3 泥岩孔隙度和流体压力与深度关系示意图

1. 地下有效应力与孔隙度关系的讨论

在图 2-3 中, 若按特察模型可在 A 点和 B 点分别得到两个等式:

$$\begin{cases} \sigma_{eA} = s_A - p_{fA} \\ \sigma_{eB} = s_B - p_{fB} \end{cases} \quad (2-5)$$

如果按 Magara 的观点, 因 A 点与 B 点孔隙度相等, 就会造成有效应力相等, 即:

$$\sigma_{eA} = \sigma_{eB} \quad (2-6)$$

进而必有:

$$\frac{s_A - s_B}{p_{fA} - p_{fB}} = 1 \quad (2-7)$$

从图 2-3b 中可以看出, 式 (2-7) 的成立将要求 A'B' 始终要平行于 CD, 这与实际情况不符。异常压力段内的实际地层压力变化很大, 很难符合上述苛刻条件, 因此 A 点与 B 点的有效应力可能不一定完全相等。Magara 的假设可能存在一些问题, 如孔隙度相同时, 有效应力可能不一定相等。

2. 地下颗粒应力与孔隙度关系的讨论

由于颗粒应力是颗粒间传递的真实压力, 在图 2-3a 中的 A 点和 B 点, 由静力平衡方程可分别得到下式:

$$\begin{cases} s_A = \phi p_{fA} + (1 - \phi) \sigma_A \\ s_B = \phi p_{fB} + (1 - \phi) \sigma_B \end{cases} \quad (2-8)$$

整理后为:

$$\sigma_A - \sigma_B = \frac{(s_A - s_B) - \phi(p_{fA} - p_{fB})}{1 - \phi} \quad (2-9)$$

如果 A、B 两点的颗粒应力相等, 必有下列式成立:

$$\phi = \frac{s_A - s_B}{p_{fA} - p_{fB}} \quad (2-10)$$

但是, 从图 2-3b 中可以看出, 异常高压带内压力梯度纵向上有变化。

推论:

(1) 当 $A'B'$ 线与 DC 线相平行时, 由式 (2-10) 得 $\phi=1$, 这不符合孔隙性岩石的条件, 因此此式不成立。

(2) 当 A' 点更偏离 C 点时, 异常压力幅度较小, 由式 (2-10) 得 $\phi>1$, 这也是不可能的。

(3) 当 A' 点向 C 点靠近时, 异常压力幅度较大, 由式 (2-10) 得 $\phi<1$, 但却很难使 $\phi<0.5$ (即 50%), 这与实际地层不相符, 深部地层孔隙度一般小于 20%, 故式 (2-10) 难以成立。

综上所述, 式 (2-10) 不能成立, σ_A 与 σ_B 不相等, 也就是说, 从正常压实带到欠压实带, 等孔隙度的泥岩具有不同的岩石颗粒应力, 很明显, 颗粒应力在纵向上变化非常复杂。

小结

(1) 原特察模型不利于表达孔隙性岩石中微观的静力平衡, 重新引入颗粒应力后可以建立等效的静力平衡方程。

(2) 应用特察模型时须注意它的局限性, 即有效应力与孔隙度之间不是一一对应关系, 孔隙度相等, 并不意味着岩石有效应力一定相等。

(3) 颗粒应力是骨架中的真正应力。在纵向上, 颗粒应力变化很复杂, 从正常压实带到欠压实带, 孔隙度相同的泥岩具有不同的颗粒应力。

第二节 地层黏弹塑性体应力—应变关系

岩石地层除了具有一定的弹性性质外, 还具有显著的塑性特征和黏性变形特征。但是岩石力学将地下岩层假设为均匀且连续的介质, 采用经典材料力学的模型来研究孔隙性地层的应力—应变关系, 显然这是有问题的。实际上地层介质既不均匀也不连续, 地层在宏观上成层状介质, 而在微观上呈孔隙性介质, 经典的岩石力学模型不能合理地表达岩石地层的变形规律。本章从三种基本的岩石地层理论模型角度探讨了孔隙尺度的静力平衡关系。

一、碎屑岩地层地质概念模型

1. 地层地质模型的建立

地壳中的岩石含有不同程度、多种多样的孔隙及裂隙。形成这些孔隙及裂隙的原因很多, 有成岩过程中形成的原生孔隙, 也有内外动力作用下产生的次生孔隙。在成岩压实过程中, 往往形成两种类型的孔隙, 一种为连通孔隙, 在成岩压实作用下, 液体就从空隙中排出, 孔隙随之减小; 另一种为封闭性孔隙, 其中充满着沉积时保留下来的水分, 由于压实作用, 在黏土类岩石 (假设其隔水层透水性很差) 之间的孔隙水不能自由排出, 在上覆沉积物压实作用下, 在岩石颗粒与颗粒接触边缘, 势必形成应力集中现象, 造成颗粒接触点的变形, 此变形必然引起粒间孔隙的体积缩小。若孔隙内含有封闭静态液体, 由于液体不可压缩 (因为压缩系数极小), 势必抵抗孔隙的缩小态势。因此, 粒间液体将对颗粒产生一种压力, 这种压力 (称为孔隙液压) 与颗粒表面垂直 (图 2-4)。

假定有一面积为 δ_A 的平面, 在地下某一深度水平切割岩体, 并在该水平面上施加垂直于水平面的法向作用力 δ_F , 根据力的平衡规律, 则 δ_F 实际上由实体部分的分量和孔隙上的