

● 石油科学进展23

[荷兰] J.Hagoort

气藏工程原理

石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

070855



200422872

TE 37/007

石油科学进展 23

气藏工程原理

[荷兰] J.Hagoort 著

周 勇 蔡天成 柏 松 刘青年 李海金 译
朱恩灵 校



00692328



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书阐述的是气藏工程的有关理论及方法。书中讲述了天然气流体和储层的基本物理特性；物质平衡法在气藏动态分析中的应用；天然气在地层和井筒中的流动机理；以及有关气藏、湿气藏和凝析气藏的开采动态及分析方法等。这其中不仅有理论推导，而且每章节后都有例题说明，清晰地阐述了理论是如何应用于实际的。

本书很适合做为大专院校气藏工程学科的教科书，也可以供从事气田开发专业研究的技术人员参考。

DP-27/22

Developments in Petroleum Science 23
Fundamentals of Gas Reservoir Engineering

J. Hagoort

Elsevier Science Publishers B.V. 1988

石油科学进展 23

气藏工程原理

〔荷兰〕 J. Hagoort 著

周 勇 蔡天成 柏 松 刘青年 李海金 译

朱恩灵 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 14¹/₄印张 351千字 印1—1,200

1992年12月北京第1版 1992年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0793-2/TE·743

定价：8.00元

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 天然气	(1)
1.2 气藏工程	(1)
1.3 目的和组织	(2)
1.4 单位和符号	(2)
第二章 储层性质	(4)
2.1 引言	(4)
2.2 岩石类型	(4)
2.3 孔隙度	(5)
2.4 粘滞流动阻力	(5)
2.5 惯性流动阻力	(7)
2.6 岩石压缩系数	(9)
2.7 毛细压力	(12)
2.8 相对渗透率	(15)
第三章 气体性质	(18)
3.1 引言	(18)
3.2 组分	(18)
3.3 相态特性	(20)
3.4 真实气体定律	(21)
3.5 Z 系数	(23)
3.6 压缩系数	(27)
3.7 凝析油/气比.....	(28)
3.8 地层体积系数	(29)
3.9 粘度	(31)
第四章 相态特性	(34)
4.1 引言	(34)
4.2 K 值法	(34)
4.3 状态方程方法	(38)
4.4 实验室实验	(41)
4.5 多级分离	(43)
第五章 可采储量	(48)
5.1 引言	(48)
5.2 总体积	(49)
5.3 孔隙体积	(52)

5.4	烃类孔隙体积	(54)
5.5	天然气和凝析油的原始地质储量	(56)
5.6	可采储量	(58)
5.7	不确定性	(59)
第六章	物质平衡	(63)
6.1	引言	(63)
6.2	湿气储层	(63)
6.3	天然气—凝析油储层	(67)
6.4	非弹性驱	(71)
6.5	含水层水侵	(73)
第七章	单相气体流动	(79)
7.1	引言	(79)
7.2	稳定状态达西流动	(79)
7.3	稳定状态径向流动	(84)
7.4	非达西流动	(87)
7.5	非稳定流动	(89)
7.6	线性流动——恒定边界产量	(92)
7.7	线性流动——恒定边界压力	(96)
7.8	径向流动——恒定边界产量	(99)
7.9	非径向流动	(104)
第八章	气井试井	(108)
8.1	引言	(108)
8.2	回压方程	(108)
8.3	流量逐次更替试井 (稳定试井)	(111)
8.4	等时试井和修正等时试井	(114)
8.5	不稳定井的压力方程	(116)
8.6	压降试井	(118)
8.7	压力恢复试井	(121)
8.8	多产量不稳定试井	(122)
8.9	多产量不稳定试井解释举例	(124)
第九章	井筒内的流动机理	(132)
9.1	引言	(132)
9.2	单相流动方程	(132)
9.3	关井时的压力分布	(136)
9.4	与产量相关的压力损失	(139)
9.5	生产井中的压力分布	(143)
9.6	多相流动	(145)
9.7	最小排液速率	(148)
第十章	水的锥进	(152)

10.1	引言	(152)
10.2	Dupuit 临界产量	(152)
10.3	Schols 临界产量	(157)
10.4	水锥的突破	(159)
10.5	水/气比	(161)
第十一章	自然递减	(164)
11.1	引言	(164)
11.2	开发年代史	(164)
11.3	储层动态	(165)
11.4	井底流入动态	(168)
11.5	油管中的流动动态	(171)
11.6	井的供给能力	(175)
11.7	消耗模拟程序	(178)
第十二章	注气	(183)
12.1	引言	(183)
12.2	注气井动态	(183)
12.3	微观混合	(190)
12.4	粘滞指进	(193)
12.5	重力超复	(197)
12.6	分层性	(201)
12.7	井网	(205)
12.8	面积注气模型	(208)
附录A	单位和换算系数	(215)
附录B	物理数学常数	(218)
附录C	天然气组分的物理性质	(219)

第一章 引言

1.1 天然气

存在于地下岩层中的天然气，有的和原油伴生（伴生气），有的单独存在（非伴生气）。非伴生的天然气藏大约占60%。

天然气的主要成分是甲烷，其余为不同含量的较重的烃类气体（乙烷、丙烷、丁烷等等），还有非烃类气体，如二氧化碳、氮气、硫化氢、氦气和氩气。

天然气的主要用途是工业和民用燃料，但如今天然气产量中用作化工原料的份额正在增大。

天然气在世界上仅次于石油和煤为第三大能源。1985年，天然气大约占世界能源供给量的20% [1]，见图1.1。

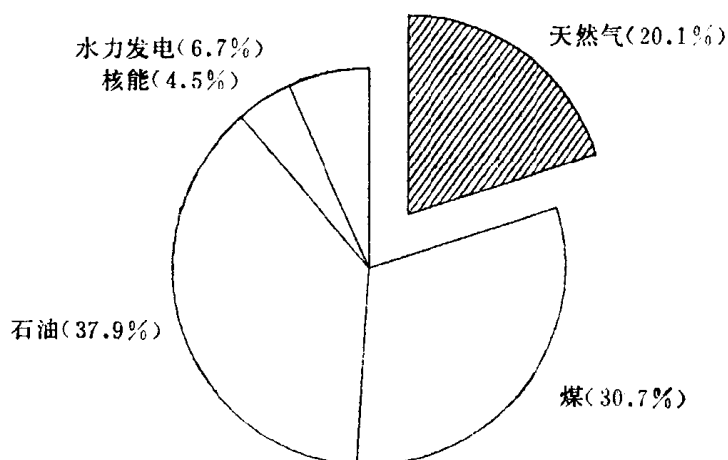


图1.1 世界能源供给（1985）

据估计，到1985年底，已证实的世界天然气储量约为 $9.8 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，相当于 $9 \times 10^{10} \text{t}$ 原油当量 [1]，按目前的开采速度，这些气藏将在60年内衰竭。与之相比，到1985年底，已证实的世界石油储量达 $9.6 \times 10^{10} \text{t}$ ，按目前的开采速度，将在35年衰竭。

预计在今后几十年中，天然气将在世界能源中占有显著地位。上涨的能源价格将刺激勘探活动，使目前尚无工业价值的气藏得到开发。同时，天然气输送和分配的基本设施将得到改进和扩建，以便向新的更大的市场提供天然气。

1.2 气藏工程

油藏工程是研究从地下含烃岩层中开采烃类的石油工程学科，含烃岩层一般称作储集层。气藏工程是油藏工程的一个分支，专门研究非伴生气藏。

油藏工程的主要目标是制定开发生产方案，以期在一定的经济、环境、技术制约条件下获得最高的采收率。这不是一次性活动，而需要在油藏的整个生产过程中不断调整更新。油藏工程的一些具体任务是：

- (1) 生产试井的设计和解释；
- (2) 估算油气层的范围及其含量；
- (3) 选择和设计适当的开采方法；
- (4) 预测开采速度和储量；
- (5) 评价老井和油藏动态。

完成上述任务需要同其它石油工程学科密切合作，特别是开发地质、岩石物理和采油工程。

气藏工程是一个成熟的工程学科，其理论基础扎实，并以大量的室内和现场研究为依据。存在有一个很大的知识体系，它能使油藏工程师以最高的科学及工程标准来完成其工作任务。

1.3 目的和组织

本书旨在紧凑而又系统地阐述气藏工程原理，使之既可做为大学生的读本又可做实际工作者的参考书和进修读物。

本书由11个独立章节和3个附录组成。每章独自成篇并包括若干完整的练习题演算，这些练习是本书的整体组成部分，不仅阐明理论，而且示范如何把理论应用于实际问题。

第2、3、4章论及同气藏工程有关的储层和天然气流体的基本物理性质。第2章讲述储层性质，第3章讨论天然气流体性质，天然气流体的相态在第4章论述。

第5章讲述地下烃类流体和气藏可采储量的体积估算。第6章介绍物质平衡法，这是根据物质守恒定律分析油藏动态的经典方法。

第7~10章讨论天然气在储层和井筒内流动的各种情况。第7章的主题是孔隙渗透性介质中的单相流动，第8章根据单相流动原理评论气井试井方法，井筒中的气流力学在第9章讨论。最后，第10章讨论水锥进问题及具有底水气藏中水伴生气体的采出问题。

第11、12章的主题是气藏开发。第11章讨论自然衰竭，这是干、湿气藏常用的开发方案，第12章讲述注气法开采凝析气藏。

附录A列出了气藏工程常用单位和换算系数。附录B收集了和气藏工程有关的特殊的物理及数学常数。最后，附录C给出了一些常见天然气成分的物理性质参数。

1.4 单位和符号

油藏工程所用的传统单位制是油田单位制，这是一套源于油田并有点奇特的单位，现已经或正在停止使用，而被国际单位制(SI)即公制所取代。实际上这两种单位制都在使用，因此不论油藏工程师好恶怎样，都应熟练运用这两种单位制。

从这个实际出发，正文中的数学方程和公式尽量采用一致的单位，既要避免特别的量纲常数把公式弄乱，又要便于两种单位制的使用。练习题中将分别使用两种单位制。

书中所用符号是石油工程师协会推荐的^[2]，每章最后都列有符号说明。

参 考 文 献

1. "BP Statistical Review of World Energy", The British Petroleum Company, June 1986.
2. "SPE Letter and Computer Symbols for Economics, Well Logging and Formation Evaluation, Natural Gas Engineering and Petroleum Reservoir Engineering", Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas (1986).

第二章 储层性质

2.1 引言

不言而喻，储层工程师应当充分了解和认识气藏工程的主要对象：储层的性质和特点。这主要属开发地质范畴，开发地质是石油地质学的一个分支，它从地质学角度来研究烃类储层。有多种优秀的教科书全面地阐述了这个课题^[1]。

本章将评述同气藏工程有直接关系的储层岩石性质，主要目的是向读者介绍后面各章所提到的岩石性质，因此重点放在概念及有关物理性质，很少或不涉及其测量方法。

文章从简要介绍构成储集岩层的岩石类型入手，然后讨论储集岩层存贮和传送流体的能力，这是两个主要特征。储集岩层传送流体的能力可用多孔岩石的流动阻力表示，流动阻力是由粘滞力和惯性力引起的。粘滞流动阻力最为重要，但在气藏中惯性流动阻力也起作用。

特别应注意的是储集岩层的力学状态，尤其是岩石的压缩系数。在计算由毗邻水层进入气藏的水侵量时，岩石压缩系数是一个重要参数。而且，岩石压缩系数对异常压力气藏的最初衰竭动态也有影响，在这种气藏中，岩石和气体的压缩系数可能为相同的数量级。

在气藏中，储集岩层中总有部分孔隙为水所占据，所以最后要讨论控制气藏中气水混合物的分布和流动的岩石性质：毛细管压力和相对渗透率。

2.2 岩石类型

实际上所有储集岩石都是沉积生成的，其成因或是较古老岩石遭受侵蚀而形成的机械碎屑沉积（沉积岩），或是化学或有机沉淀（沉淀岩石）。沉积岩可大致分为砂岩、碳酸盐岩和页岩。其中页岩最丰富，约占世界沉积岩的50%，砂岩和碳酸盐岩大约各占25%和20%。

砂岩是由砂粒组成的碎屑岩，其主要矿物成分是石英，此外还含有不同数量的粘土矿物、长石、方解石和其它岩石碎屑。

碳酸盐岩以方解石和白云石为主，并有常见的次生矿物粘土和石英。碳酸盐岩可能同时为碎屑岩和沉淀岩石。如果主要矿物是方解石，碳酸盐岩就叫作石灰岩。白云岩是以白云石为主要成分的碳酸盐岩。白云岩通常大部分是由石灰岩形成的次生岩，方解石中的钙部分被镁所取代，这个过程叫作白云岩化。

页岩是由压实的层状粘土和其它细粒矿物组成的，一般为致密的不渗透岩石，不算储集岩。然而，页岩和烃类储层有非常重要的联系：其一，页岩往往成为砂岩或碳酸盐岩储层的封闭盖岩；其二，页岩薄夹层多存在于烃类储层之中，对储层的流动特性有着极大的影响。

2.3 孔隙度

孔隙度可以定量地表明储集岩层存贮流体的能力，其定义是孔隙空间与岩石总体积之比（即百分率）。如果用 V_b 表示一块岩石的总体积， V_p 表示孔隙体积，孔隙度则为

$$\phi = V_p / V_b \quad (2.1)$$

这样定义的孔隙度通常称为总孔隙度。总孔隙度和有效孔隙度不同，有效孔隙度是指连通孔隙空间所占的相对的体积与总体积的比值。油藏工程关心的是有效孔隙度，所以当用到孔隙度这个术语时指的就是有效孔隙度。

用大小相同的圆球充填体测得的理论上的最小孔隙度为26%，孔隙度和球的大小无关^[2]。由于桥堵作用，均匀颗粒自然充填体的孔隙度较高。颗粒分选差的充填体孔隙度较低，原因是较小颗粒占据了大颗粒形成的孔隙。所以，粒状岩层的孔隙度与岩石的颗粒大小无关而取决于颗粒的分选程度：分选越差，孔隙度越低。

随着地质时期的推移，由于胶结和压实作用，碎屑沉积岩的孔隙度一直在下降。胶结指胶结物质把颗粒结合在一起的过程；压实是指因上覆沉积物的作用，岩石应力增加而使体积减小。页岩特别易受压实影响，由于这一原因，即使埋藏很浅，其孔隙度也是很小的，有的甚至不存在孔隙。

砂岩孔隙一般为粒间孔隙，也就是说由构成岩石的颗粒大小和形状来控制。碳酸盐岩孔隙一般是次生的，由岩石的淋滤、白云岩化、重结晶和断裂作用而形成。碳酸盐岩储层孔隙度通常比砂岩储层低。

多数具有工业价值的烃类储层孔隙度为10~25%，属于此范围的孔隙度为较好的，低于10%或高于25%则分别归为差的和优秀的。评价储层总存储能力不能照搬这种划分方法，一个孔隙度差的储层仅凭其体积庞大，就可算得有工业价值的上好储层。

2.4 粘滞流动阻力

我们来讨论一下图2.1所示的简单流动情况。按恒定速率使流体流过装在圆筒中的岩样，流体通过岩样时流体的压力下降，这取决于注入速率和流体及岩石的性质。

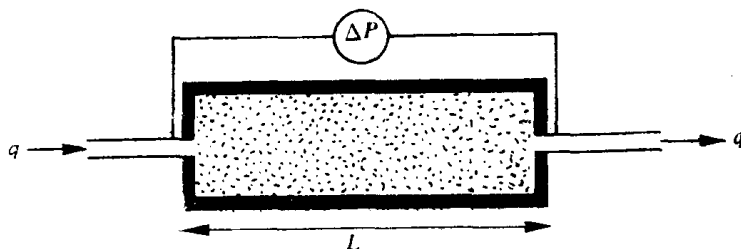


图2.1 向岩样中注入流体的流动情况

为使问题简化，设流体的密度和粘度恒定，再假定流体的流速低到使惯性力达到可以忽略不计的程度，这种流动状态称为蠕流，它仅受粘滞力的控制。在这些条件下，单位长度的压力降同粘度和单位截面注入速率的乘积成线性比例关系，可写成下述公式

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \mu q_i / A = \alpha \mu u \quad (2.2)$$

式中 ΔP ——岩样流入和流出端之间的压力降；

L ——岩样长度；

α ——比例常数；

μ ——粘度；

q_i ——体积注入速率；

A ——岩样的横截面积；

u ——体积速度 ($= q_i / A$)。

比例常数叫作粘滞流动阻力系数。这一系数是岩石的一种性质，取决于连通孔隙网络的形态和大小。

线性关系式 (2.2) 称为达西定律，对于粘度和密度不变的流体的水平流动则为^[3]

$$u = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.3)$$

式中 K 是个常数，等于粘滞流动阻力系数的倒数，称为岩石的渗透率。对于蠕流，渗透率是岩石传送流体能力的度量。若是气流，密度和粘度不恒定，达西定律就写成微分形式

$$u = \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dL} \quad (2.4)$$

达西定律适用于牛顿流体，即可用牛顿粘度定律描述内摩擦的液体和气体^[4]。对于气体，这意味着压力要足够高，也就是说气体分子的平均自由路程比岩石孔隙的平均直径小得多，这是气藏常见的情况。

渗透率的量纲是长度的二次方，单位是达西，符号 D ，定义为粘度 1cP 的流体在压力梯度等于 1atm/cm ，流量 $1\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时所具有的渗透率。由公式 (2.3) 可得 $1D$ 相当于 $0.986923 \times 10^{-12} \text{m}^2$ ，石油工程常用的渗透率单位是毫达西 ($= 0.001D$)，符号 mD 。

渗透率是岩石孔隙结构的复杂函数，要通过实验来确定。岩石孔隙的平均直径是个决定因素，可以把流体通过孔隙介质想象为流经一束毛细管。哈根-泊肃叶 (Hagen-Poiseuille) 定律给出了密度和粘度恒定的蠕流体积速度与压力梯度的关系式^[4]

$$u = \frac{r^2}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.5)$$

式中 r ——毛细管的内半径。

比较公式 (2.5) 和达西定律公式 (2.3)，单根毛细管的渗透率可写作

$$K = r^2 / 8 \quad (2.6)$$

可见，单根毛细管的渗透率与其内半径的平方成正比，由此推知多孔岩石的渗透率和孔隙平均直径的平方成正比。

颗粒材料充填体的渗透率可较好地近似表达为下列半经验公式^[4]

$$K = \frac{d_p^2 \phi^3}{150(1-\phi)^2} \quad (2.7)$$

式中 d_p ——颗粒平均直径；

ϕ ——孔隙度。

关系式(2.7)叫作布莱克-科泽尼(Blake-Kozeny)公式,广泛用于化学工程充填基流动阻力的计算。公式表明渗透率和孔隙直径的平方成正比,同时也说明渗透率对孔隙度有很强的依赖关系。

多数生产储层的渗透率为100~1000mD,这个范围的渗透率往往为较好的,低于100mD或高于1000mD的渗透率则分别列为差的和优秀的。仍要强调,渗透率差并不意味着生产能力差,一口井的生产能力要由渗透层厚度和渗透率的乘积决定,因此渗透率差的厚储层仍可能具有好的生产能力。

练习2.1 具有溶解通道岩心的渗透率

低渗透石灰岩岩心柱轴向上有一道溶解通道,按下列条件估算岩心柱的轴向渗透率:

基岩渗透率: 1mD

岩心柱直径: 2.5cm

岩心柱长度: 5cm

溶解通道直径: 0.1mm

解:

按照达西定律,无溶解通道岩心柱和溶解通道的流量分别为:

$$q_1 = \Pi r_1^2 \frac{K_1}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \text{ 和 } q_2 = \Pi r_2^2 \frac{K_2}{\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

式中下角标1、2分别代表岩心柱和溶解通道。

两式相加得

$$q_1 + q_2 = \Pi r_1^2 \frac{1}{\mu} \left(K_1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} K_2 \right) \frac{\Delta P}{L}$$

因此综合渗透率为

$$K = K_1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} K_2$$

溶解通道的渗透率为

$$K_2 = \frac{0.00005^2}{8} / 9.87 \times 10^{-16} = 0.3165 \times 10^6 \text{ mD}$$

于是综合渗透率得

$$K = 1 + \left(\frac{0.01}{2.5} \right)^2 \times 0.3165 \times 10^6 = 1 + 5.06 = 6.1 \text{ mD}$$

可见岩心柱的渗透率完全由溶解通道来决定。

2.5 惯性流动阻力

多孔岩石中的液体的流动一般为蠕流状态,可用达西定律加以描述。而气体的粘度很低,但其流速可能很高,所以不能再忽略惯性力,而背离了达西线性定律。惯性力是气流在孔隙系统中周期性发生宽窄变化,使得流体质点的对流减速及加速而引起的。为了描述超出

蠕流状态的流体的运动, 使用一个二次流项使达西公式扩展如下^[5]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} u + \rho \beta u^2 \quad (2.8)$$

式中 ρ ——流体的密度;

β ——惯性流动阻力系数。

公式(2.8)为非达西流体的弗契海米尔(Forchheimer)定律。惯性流体阻力系数 β 一般称作紊流系数, 正如吉尔兹玛(Geertsma)指出的^[6], 这是让人感到误解的一项, 因为在储集岩中的流速通常不发生紊流。

系数 β 的量纲为长度的倒数, 而且同渗透率和孔隙度一样也属多孔岩石的性质, 它反映了孔喉与孔体积的大小对比关系。疏松多孔介质的惯性流动阻力系数可按额尔根(Ergun)提出的下列半经验关系式估算^[4]

$$\beta = \frac{1.75(1-\phi)}{d_p \phi^3} \quad (2.9)$$

用布莱克-科泽尼(Blake-Kozeny)关系式(2.7)消去公式(2.9)中的颗粒平均直径, 就可用孔隙度和渗透率表示 β , 如下式

$$\beta = 0.143 \frac{1}{\phi \sqrt{(\phi K)}} \quad (2.10)$$

公式(2.10)表明, 惯性阻力系数随渗透率和孔隙度的减小而增大。

已发表的几个有关胶结岩石的经验关系式都具有以下形式^[6,7,8]

$$\beta = a \phi^n K^m \quad (2.11)$$

式中常数 a 、 n 、 m 由具体的岩石类型特性决定, 特克(Tek)等人提出的关系式便是这种相关关系的一例^[7]

$$\beta = 5.5 \times 10^9 K^{-1.25} \phi^{-0.75} \quad (2.12)$$

式中 β 的单位为英尺的倒数, K 的单位为mD, ϕ 是小数。

当已发表的关系式用于未知岩石时, 结果可能相去甚远, 因此不能代替实测。如果估计以非达西流为主, 那么 β 系数和孔隙度、渗透率都要由岩样测得。

练习2.2 非达西流

估算具有下列性质的储集岩石的惯性流动阻力系数

渗透率: 10和1000mD

孔隙度: 0.15

解:

首先计算渗透率为1000mD的 β 系数。疏松岩石的相关式为

$$\beta = \frac{0.143}{0.15 \sqrt{(0.15 \times 1000 \times 9.87 \times 10^{-16})}} = 2.48 \times 10^6 \text{m}^{-1}$$

用特克相关式则

$$\beta = 5.5 \times 10^9 \times (1000)^{-1.25} \times (0.15)^{-0.75} / 0.3048 = 1.33 \times 10^7 \text{m}^{-1}$$

对于渗透率为10mD的 β 系数, 用疏松岩石相关式得

$$\beta = \sqrt{100} \times 2.48 \times 10^6 = 2.48 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

而用特克相关式则

$$\beta = (0.01)^{-1.25} \times 1.33 \times 10^7 = 4.21 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

2.6 岩石压缩系数

地下的储集层将承受通常称为上覆岩层的重量所造成的压缩应力，上覆岩层的载荷由基岩和岩石孔隙中的流体共同承受。在储层衰竭过程中，地层压力即孔隙流体压力下降。由于上覆岩层载荷不变，基岩所承受的上覆岩层载荷的比例将逐渐增大。结果，作用于储集岩基岩上的压缩力增高，致使岩石被压实。

同岩石压实有关的众所周知的现象就是衰竭储层上面地表面的下沉。在气藏工程中，岩石的压实，即岩石的压缩系数，对计算毗邻水层的水侵有影响。岩石和水的压缩系数决定着水层在压力下降时能有多少水排出。岩石压缩系数还会影响异常压力气藏的初始衰竭动态，在这种气藏中，岩石的压缩系数可能和地下气体的压缩系数为同一数量级。

岩石的力学状态相当复杂，幸好大多储集岩与弹性材料十分相近^[9,10,11]。但疏松岩石却迥然不同，它在应力变化时发生不可恢复的非弹性变形，因此这里所论仅限于弹性岩石。

弹性理论表明，作用于固体材料的应力可以分解为偏应力和流体静应力。偏应力使材料变形，流体静应力使材料体积变化，体积变化同流体静水应力变化成正比。对于固体材料，流体静应力 $\bar{\sigma}$ 是3个主要的正应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的算术平均值

$$\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (2.13)$$

多孔岩石孔隙中的流体压力也对岩石基质产生流体静应力，因此，岩石体积的变化是外加应力和孔隙内流体压力所形成的流体静应力的函数。对于孔隙体积 V_p 一般有

$$V_p = V_p(\bar{\sigma}, P) \quad (2.14)$$

关于孔隙体积的变化可写成

$$dV_p = \left(\frac{\partial V_p}{\partial \bar{\sigma}} \right)_P d\bar{\sigma} + \left(\frac{\partial V_p}{\partial P} \right)_{\bar{\sigma}} dP \quad (2.15)$$

公式(2.15)中的偏导数可用两项弹性常数表示：即孔隙压缩系数 C_p 和基岩材料压缩系数 C_s 。孔隙压缩系数定义为^[11]

$$C_p = -\frac{1}{V_p} \left(\frac{\partial V_p}{\partial \bar{\sigma}} \right)_P \quad (2.16)$$

基岩材料压缩系数定义为

$$C_s = -\frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{dP} \quad (2.17)$$

式中 V_s ——基岩体积。

根据孔隙压缩系数定义，公式(2.15)的第一个偏导数为

$$\left(\frac{\partial V_p}{\partial \bar{\sigma}} \right)_P = -C_p V_p \quad (2.18)$$

式(2.15)中的第二个偏导数和 C_p 、 C_s 都有关，这在后面可以看到。设一种岩样的特殊情况，即平均流体静应力与孔隙压力相等

$$d\bar{\sigma} = dP \quad (2.19)$$

在这种情况下, 孔隙度维持不变, 孔隙体积和基岩体积的变化相等, 所以

$$dV_p = -C_s V_p dP \quad (2.20)$$

把 (2.19) 和 (2.20) 式代入 (2.15) 式, 并应用 (2.18) 式, 得到第二个偏导数为

$$\left(\frac{\partial V_p}{\partial P} \right)_{\bar{\sigma}} = -C_s V_p + C_p V_p \quad (2.21)$$

把 (2.21) 和 (2.18) 式代入通式 (2.15) 得

$$dV_p = -C_s V_p dP - C_p V_p d(\bar{\sigma} - P) = -C_s V_p dP - C_p V_p d\sigma_{ef} \quad (2.22)$$

式中 $\sigma_{ef} = (\bar{\sigma} - P)$, 称为有效应力。

公式 (2.22) 表明, 孔隙体积的相对变化是弹性常数 C_s 、 C_p , 流体压力变化以及有效应力变化的函数。

基岩压缩系数可认为不变, 大小由岩石材料决定。纯石英的压缩系数为

$$2.71 \times 10^{-6} \text{bar}^{-1} (1.87 \times 10^{-7} \text{psi}^{-1})$$

方解石的压缩系数为

$$1.39 \times 10^{-6} \text{bar}^{-1} (0.96 \times 10^{-7} \text{psi}^{-1})$$

孔隙压缩系数大小取决于有效应力的大小, V.D. 奈普 (Van der Knaap) 提出了下列颗粒储集岩的经验公式^[11]

$$C_p = C(\bar{\sigma} - P)^{-0.7} \quad (\bar{\sigma}, P \text{ 单位 MPa}, C_p \text{ 单位 MPa}^{-1}) \quad (2.23)$$

式中 C 的范围为 $3 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-3}$ 。

关于裂缝石灰岩, V.D. 奈普发现^[11]

$$C_p = \frac{7 \times 10^{-4}}{\phi} (\bar{\sigma} - P)^{-0.58} \quad (\bar{\sigma}, P \text{ 单位 MPa}, C_p \text{ 单位 MPa}^{-1}) \quad (2.24)$$

上述关系式可用而不可靠, 实测的孔隙压缩系数变化很大, 而且公式 (2.23)、(2.24) 的预测值与之相比有显著偏差^[12]。

油藏工程计算时所关心的是由储层流体压力变化引起的体积变化, 流体压力变化还使流体静应力 $\bar{\sigma}$ 发生改变。为了评价这些变化, 需要描述储层应力状态的力学模型, 模型应体现孔隙压力的影响, 并有适当的边界条件。

有一个适用于较薄水平储层的简单却常用的模型, 假设 (1) 恒定的垂直应力等于上覆岩层压力 (2) 各水平应力相等 (3) 水平方向应变为零。第 (3) 个假设是指储层仅发生垂直方向的变形。根据多孔介质弹性理论, 可推导出下列有关流体静应力变化的关系式^[10, 11]

$$d\bar{\sigma} = \frac{2}{3} \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} (1 - C_s/C_b) dP = \frac{2}{3} A_{ps} dP \quad (2.25)$$

式中 ν —— 岩块泊松比;

C_b —— 岩块压缩系数

$$A_{ps} = \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} (1 - C_s/C_b)$$

由 (2.25) 式可见, 地层压力下降, 总流体静应力随之降低。

则有效应力的变化为

$$d\sigma_{ef} = d\bar{\sigma} - dP = \left(1 - \frac{2}{3}A_{p*}\right)dP \quad (2.26)$$

把(2.26)式代入(2.22)式,就可得到因油藏压力变化引起的孔隙体积的变化,这个变化用小数表示的

$$dV_p = -C_s V_p d_p + C_p V_p \left(1 - \frac{2}{3}A_{p*}\right)dP \quad (2.27)$$

储层孔隙体积的有效压缩系数 C_R 则为

$$C_R = -\frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{dP} = -C_s + C_p \left(1 - \frac{2}{3}A_{p*}\right) \quad (2.28)$$

在油藏工程计算时用的是有效储层压缩系数而不是孔隙压缩系数。基岩压缩系数通常比孔隙压缩系数小得多,所以(2.28)式右边的第一项可以忽略不计,于是有

$$C_R = C_p \left(1 - \frac{2}{3}A_{p*}\right) \quad (2.29)$$

储集岩的多孔介质弹性常数 A_{p*} 值为0.6左右,有效储层压缩系数约为孔隙压缩系数的60%。

练习2.3 有效储层压缩系数

用V.D.奈普关系式(2.22),按下列条件计算初始压力和废弃压力状况下的砂岩有效储层压缩系数。

初始压力: 5000psi

废弃压力: 1000psi

上覆岩层应力: 10000psi

初始水平应力: 7500psi

泊松比: 0.25

基岩压缩系数: $1.87 \times 10^{-7} \text{psi}^{-1}$

C_s/C_b : 0.1

解:

初始油藏压力条件下的有效应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{ef} &= \frac{1}{3}(10000 + 7500 + 7500) - 5000 = 3333 \text{psi} = 229.8 \text{bar} \\ &= 22.98 \text{MPa} \end{aligned}$$

用(2.22)式求孔隙压缩系数的下边界

$$\begin{aligned} C_p &= 3.0 \times 10^{-3} \times (22.98)^{-0.7} = 3.343 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1} \\ &= 3.343 \times 10^{-5} \text{bar}^{-1} = 2.3 \times 10^{-6} \text{psi}^{-1} \end{aligned}$$

上边界

$$\begin{aligned} C_p &= 4.5 \times 10^{-3} \times (22.982)^{-0.7} = 5.014 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1} \\ &= 5.014 \times 10^{-5} \text{bar}^{-1} = 3.5 \times 10^{-6} \text{psi}^{-1} \end{aligned}$$

该条件下的多孔介质弹性常数 A_{p*} 为

$$A_{p*} = \frac{1 - 2 \times 0.25}{1 - 0.25} (1 - 0.1) = 0.6$$