

普通岩心 分析技术

李琪 编译 张绍槐 校

 石油工业出版社

0.9

- 075723



普通岩心分析技术

李琪 编译 张绍槐 校



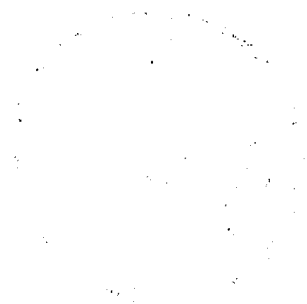
石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书从岩心钻取、岩心制备到岩心分析及其解释和应用, 对普通岩心分析技术做了全面介绍。其主要内容有: 油藏岩石的基本物性、油藏所含流体的组分及其流动特性、正确的取样和岩样保存方法、实验室测试方法和测试设备、岩心数据的实际解释、选定的特殊要求的岩石性质以及所测数据的应用。

本书可供石油工程技术人员和从事科研的工作人员参考, 也可供石油院校大学本科生及研究生参考。



普通岩心分析技术

李 琪 编译 张绍槐 校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 8¹/₄ 印张 202 千字 印 1-2 000

1993 年 9 月北京第 1 版 1993 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0885-8 / TE · 827

定价: 6.90 元

编译者的话

岩心分析技术在油气勘探、油井完井和修井、油田开发和油气藏评价中有着广泛的用途，为了在油气田的开发过程中达到最合理的开采，岩心的观察和分析可以说是目前最基本的手段。

本书主要是根据国外有关公司的培训教材编译而成的。这些教材内容丰富，但结构比较松散，主要是图、表，文字较少，读者很难读懂。因此，我在参考国内有关资料的基础上，对上述教材进行了补充，将图和表的内容用串文形式引入正文，并对一些内容不连贯或内容不全的地方进行了充实，从而使全书系统完整、通俗易懂。

本书从岩心钻取、岩心制备到岩心分析及其解释和应用，对普通岩心分析技术做了全面介绍。它对石油工程技术人员及从事科研的工作人员来说，将是一本非常有用的书籍。

在编译此书的过程中，林竹和张洁二位同志给予了很大的帮助，在此表示感谢！

由于本人水平有限，书中难免有误，敬请读者批评指正。

1992年9月20日

目 录

第一章 总论

第一节 岩心分析	(1)
第二节 岩心分析的目的	(1)
第三节 取心的要求和技术	(2)
第四节 普通岩心分析的类型	(3)

第二章 岩石的基本特性

第一节 岩石结构	(4)
第二节 岩石化学组成	(6)
第三节 孔隙度	(7)
第四节 孔隙度和其它结构特性的关系	(8)
第五节 渗透率	(9)
第六节 流体饱和度	(17)
一、表面动力学	(17)
二、毛细管压力理论	(18)
三、油藏岩石中的流体分布 (流体饱和度)	(19)
四、用毛细管压力确定原始油藏的流体分布	(21)
五、取心流体和岩心钻取对流体饱和度的影响	(24)

第三章 岩心取样及其保存

第一节 在井场的岩心处理	(30)
第二节 岩心取样	(31)
第三节 岩心保存	(32)
一、通常使用的岩心保存技术	(32)
二、特殊目的的岩心保存技术	(33)

第四章 基本岩性的测定

第一节 岩样的准备	(34)
第二节 孔隙度的测定	(35)
第三节 孔隙度测定方法的比较	(37)
第四节 在有围压的条件下孔隙度的测定	(39)
第五节 孔隙度对比	(40)
一、全岩心与标准岩样孔隙度的对比	(40)
二、钻屑与标准岩样孔隙度的对比	(40)
三、井壁岩样与标准岩样孔隙度的对比	(41)
第六节 渗透率测定	(41)
第七节 在围压条件下的渗透率测定	(44)
第八节 渗透率对比	(45)

一、全岩心与标准岩心渗透率的对比	(45)
二、井壁岩样与标准岩心渗透率数据的对比	(45)
第九节 流体饱和度的测定	(45)
一、气体饱和度的测定	(45)
二、干馏法测定含油饱和度	(45)
三、干馏法测定含水量	(47)
四、饱和度的其它测定方法	(47)
第十节 井壁岩样和标准岩心饱和度的对比	(48)
第十一节 其它的测定和观测方法	(49)
第五章 岩心基本分析数据的解释	
第一节 解释的手段(依据)	(54)
第二节 标准岩心分析数据解释实例	(55)
第三节 井壁岩心分析数据解释实例	(63)
第四节 全岩心分析数据解释实例	(65)
第六章 岩石的特殊性质	
第一节 自然伽马放射性	(68)
第二节 电特性	(71)
一、导体模型及计算	(71)
二、影响孔隙介质电阻率的因素	(72)
三、孔隙介质的导电性能	(73)
四、地层电阻率因数	(73)
五、导电固体	(73)
六、上覆压力对电阻率的影响	(75)
七、电阻率指数	(76)
八、计算的含水饱和度对饱和度指数“ n ”的灵敏度	(77)
九、计算的含水饱和度对饱和度指数“ n ”和胶结指数“ m ”的灵敏度	(77)
第三节 岩石的声学特性	(78)
第四节 密度特性	(82)
第七章 岩心分析数据的应用	
第一节 概述	(84)
第二节 岩心数据的均值技术	(87)
一、均值孔隙度	(87)
二、均值渗透率	(87)
三、水和油的均值饱和度	(87)
四、岩心分析数据均值处理实例(油基岩心)	(88)
五、岩心分析平均渗透率与压力恢复渗透率的对比	(89)
第三节 生产量和注入量的预测	(90)
第四节 储量预测	(92)
第五节 可采储量(采收率)预测	(93)
第六节 与含水饱和度相关的分析技术	(94)

一、含水饱和度与渗透率的关系	(94)
二、含水饱和度与孔隙度的关系	(94)
三、含水饱和度与渗透率和油水接触面以上水柱高度的关系	(95)
第七节 普通岩心分析和特殊岩心分析数据的结合	(95)
一、油、气、水接触关系及分相流动	(95)
二、普通岩心分析和特殊岩心分析数据的相对关系	(98)
三、油的重度和粘度对原始含水饱和度和含水量的影响	(98)
第八节 岩心分析、特殊岩心分析和感应测井 (I—ES) 数据的结合	(102)
一、中新世砂岩岩样毛细管压力曲线	(102)
二、中新世砂岩岩样计算的电阻率	(102)
三、岩心分析用于识别假水平面 (假油水界面)	(102)
四、渗透率和孔隙度对计算电阻率的影响	(104)
第九节 渗透率与电阻率的关系	(105)
第十节 最小生产电阻率 (R_{mp}) 的讨论和计算	(106)
第十一节 最小生产电阻率 (R_{mp}) 和生产电阻率 (R_p) 计算图	(113)
第十二节 一种岩心分析和电阻率的评价方法—岩心测井记录	(114)
一、Norphlet 砂岩岩心测井记录	(115)
二、Smackover 地层岩心测井记录	(115)
第十三节 岩心数据在数值模拟中的应用	(117)
第十四节 岩心分析的应用	(121)
参考文献	(123)

第一章 总 论

第一节 岩 心 分 析

通过对地层获取岩石样品而得的岩心数据，在勘探工程、完井、油井大修作业以及在油井和油藏评价中都起着十分重要的作用。由岩心分析所得到的岩心数据为证实地层是否含油、地层流体的储藏量（孔隙度）和预期的地层流体的流动能力及分布（渗透率）提供了可靠的依据。从岩心分析所得残余液含量数据能用来解释油、气、水可能的产量。

对岩心分析数据的研究，连同从岩心样品得到的辅助实验资料，可以深入了解油藏特性和油井处理时的异常反应，为储量预测和油藏模拟，为加强测井解释打下坚实的基础，并可指导二次采油及三次采油开发过程。

来自于油气产区附近现场实验室的基本岩石性能数据，已经由被称为“特殊岩心分析”的实验而得到了扩展。这个扩展实验是在中心实验室中使用专门的仪器完成的。基本的岩心分析数据通常能在几个小时内完成。而特殊岩心分析实验通常需要六到八周或者更长的时间才能完成。这种在时间上的不利因素在大多数情况下是能够克服的，这就首先要认识到它的存在，然后设法在取心过程中尽早获得所需的数据。

第二节 岩心分析的目的

岩心分析的目的应在钻井设计中尽早确定。应考虑到管理、钻井、地质和工程上的要求，而这些要求有时也是相互冲突的。岩心分析的目的不同，则取心方法的选择、取心的流体、岩心的现场处理、岩心的保存技术、使用的基本岩心分析技术、以及相应的特殊岩心分析实验的步骤等都有所不同。岩心分析的目的包括：

- ①确定孔隙度、渗透率、残余液、岩性以及预测油、气或水的产量。
- ②确定孔隙度、渗透率和岩性的区域性变化，以满足为储量预测和油藏模拟而进行的油藏描述的需要。
- ③确定残余水饱和度。
- ④为进行特殊岩心分析实验，需在润湿性不变和（或）饱和度不变的状态下钻取岩心。
- ⑤研究定向渗透率。
- ⑥用于校准和（或）改善井下测井解释的资料。

岩心测定是为了达到若干目的，并且，岩心测定要依其急迫程度以及岩心是生产井的还是探井的而区别对待。

探井（初探井）的情况：岩心分析可用来判明构造、确定储集层的物理特性并预测生产能力。

确定最佳完井方案。岩心测定结果可用于：

- ①测试层段的选择。
- ②中途测试的解释。

③当存在若干层位时，确定完井程序的最有利的组合。

④判断完井的效果。

油气田开发和储量计算。用岩心分析可能发挥作用的方面有：

①确定油气田范围。

②确定各种流体间的接触情况及其横向变化。

③确定构造关系和地层对比。

④确定纯净产层。

⑤计算储量和预测初产量。

第三节 取心的要求和技術

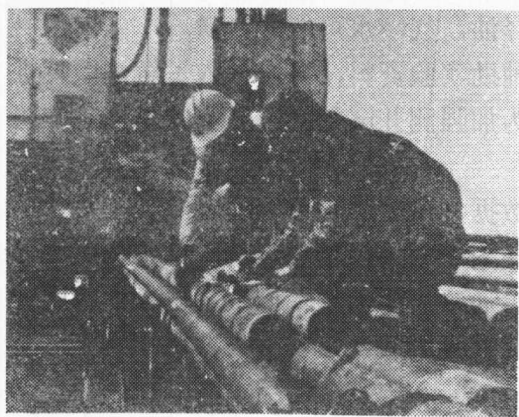


图 1-1 井场取岩样

为从取心作业中获取尽量多的资料，需要做以下 5 项工作：

①在钻井程序中早期取心。

②在油井的全剖面都取心。

③在一井或多井中用原油或油基流体取心。

④在一井或多井中取心以确定岩石的润湿性。

⑤仔细分析取得的岩样以得到基本的和特殊的岩心数据。

图 1-1 所示是在井场取岩样，图 1-2 所示是在实验室取岩心样品，图 1-3 所示是对所取岩样做定向研究。

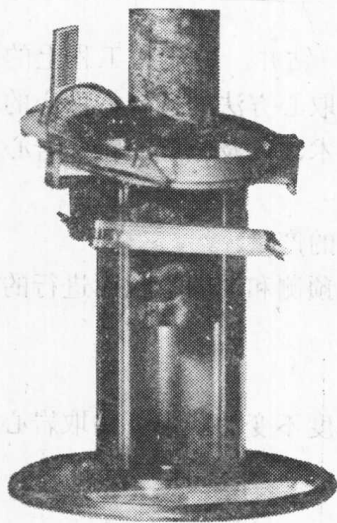


图 1-2 实验室取岩心样品

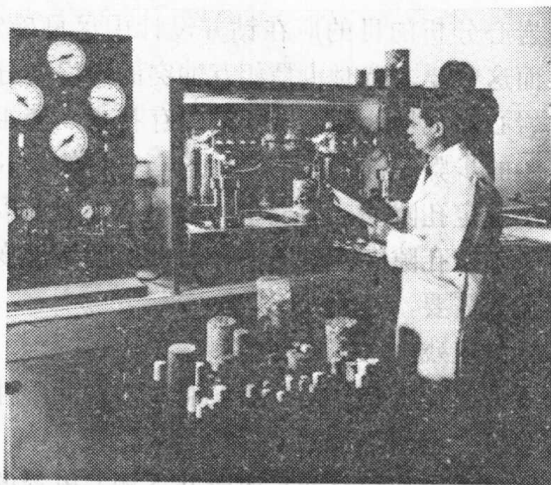


图 1-3 对岩样做定向研究

现有许多不同种类的取心技术。取出岩心的尺寸变化也较大（见表 1-1）：从大约直径 6in^①、长 30ft^② 的金刚石钻头取的岩心，到用冲击原理的井壁取心法取得直径 1in、长 1in

① 1in = 0.0254m；

② 1ft = 0.3048m。

的井壁岩样。图 1-4 所示是各种岩心类型。每一种取心装置都有一定的优点和缺点。取心装置的选择应当由装置的适应性、取心地层的特性、以及岩心分析的目的来确定。

表 1-1 不同取心工具的取心特征

取心装置类型	近似的岩心直径	岩心长度
常规的金刚石钻头取心	1 3/4~6in	30ft 的倍数最大为 90ft
冲击法井壁取心	1 in	1 in
连续的三角形井壁取心	每侧 1 1/2 in	3~5ft 的倍数
橡胶套或塑料套取心	3 in	20 ft
密闭压力筒取心	2 5/8 in ^①	10 ft
缆式工具取心	2 in	①

① 此技术还没有广泛应用。

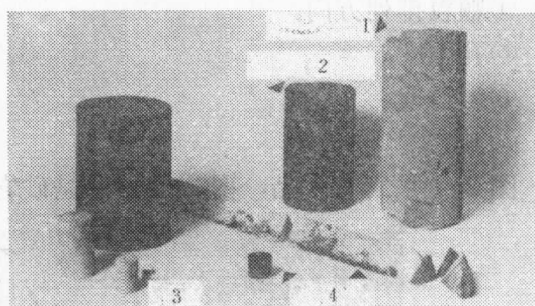
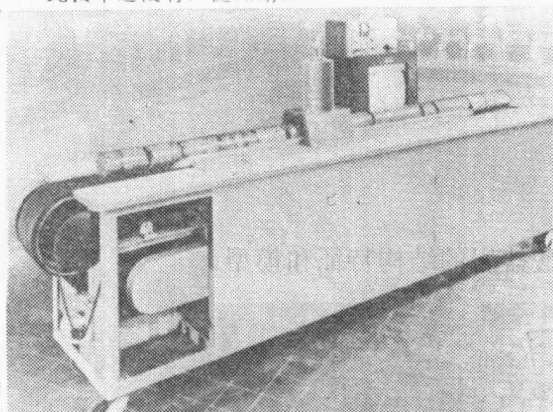


图 1-4 岩心类型

1—全岩心；2—全直径岩心；3—为实验用的柱塞状岩样；4—井壁取心法得到的岩心

第四节 普通岩心分析的类型

一、全岩心分析

全岩心分析是指对测试层段所取的全直径（即足径和直径均匀的岩心）和全长度的岩心进行分析。图 1-5 所示是全直径的岩心。全直径岩心分析可以不用取心层段的全部长度。这类分析应用在不均质地层，特别是碳酸盐岩地层。

二、标准岩心分析

标准的或“柱塞状”的岩心分析是在每个要分析的层段中选一部分（岩样）来代表整个层段进行录井、取样和岩心分析。通常在每英尺长的岩心中选 3~4in。这类分析用于像油砂和砂岩这种相当均质的地层。

三、井壁岩心分析

井壁岩心分析是对用冲击法在井壁上所取得的岩样进行分析。所用的设备和技术特别适用于小尺寸的岩样。分析步骤与标准岩心分析法相似。

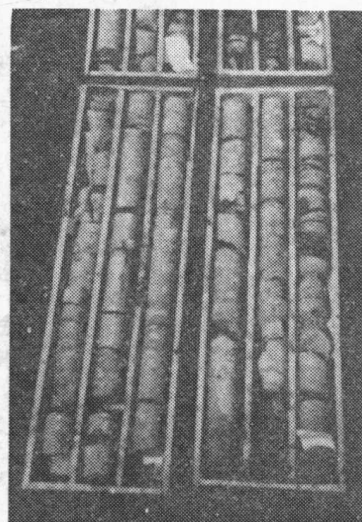


图 1-5 全直径的岩心

第二章 岩石的基本特性

第一节 岩石结构

岩石的结构被定义为关于颗粒与颗粒之间关系的总体特征。这些特征通过对岩心薄片、手工标本、或者小的岩样进行分析来研究。下面列出了一些比较重要的结构特征：

- ①化学组成。
- ②颗粒形状和圆度。
- ③颗粒大小和分选性。
- ④颗粒排列方向。
- ⑤孔隙度。
- ⑥渗透率。
- ⑦其它。

图 2-1 是岩石样品，图 2-2 所示是砂岩和碳酸盐岩的结构特征和模型。

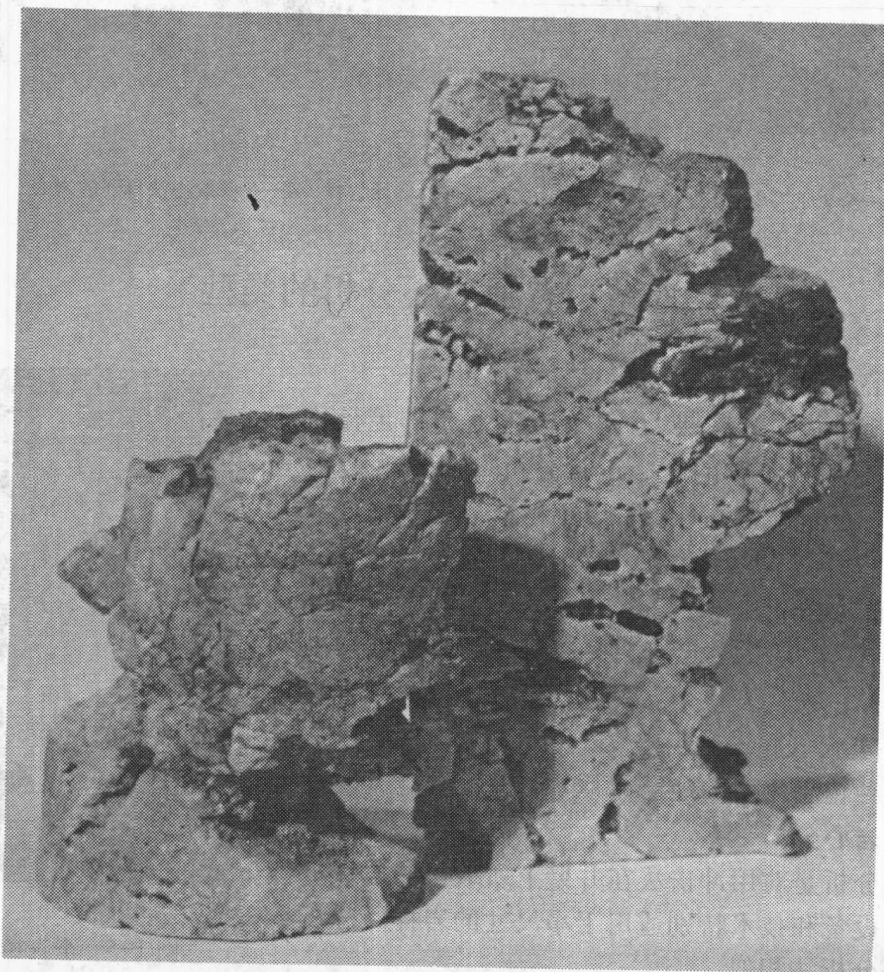


图 2-1 岩石样品

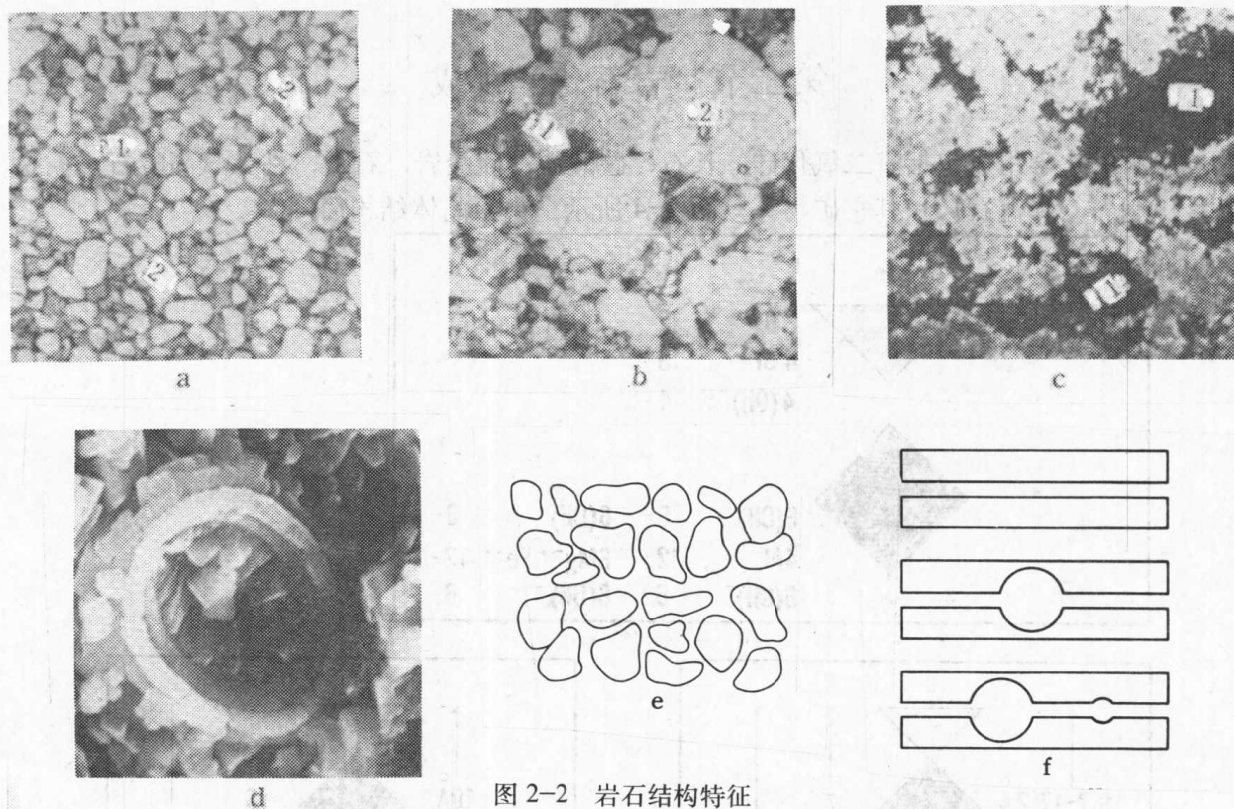


图 2-2 岩石结构特征

a—分选度好；b—分选度差；c—礁灰岩；d—丹麦石灰岩；e—砂岩特征模型；

f—具有裂缝及晶洞的碳酸盐岩特征模型；1—孔隙；2—颗粒

岩石结构特征因温度变化而变化，图 2-3 所示是石膏在温度变化下所呈现出的脱水规律。

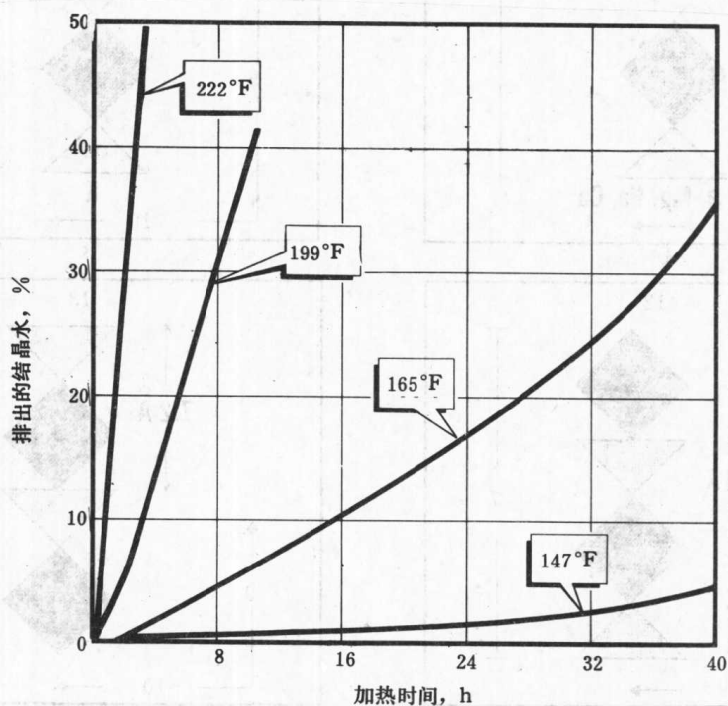


图 2-3 温度及加热时间变化对石膏脱水规律的影响

第二节 岩石化学组成

岩石的化学组成包括有二氧化硅、长石、碳酸盐、硫酸岩、石膏、粘土（高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石）和其它矿物等。图 2-4 所示是粘土晶体结构简图。

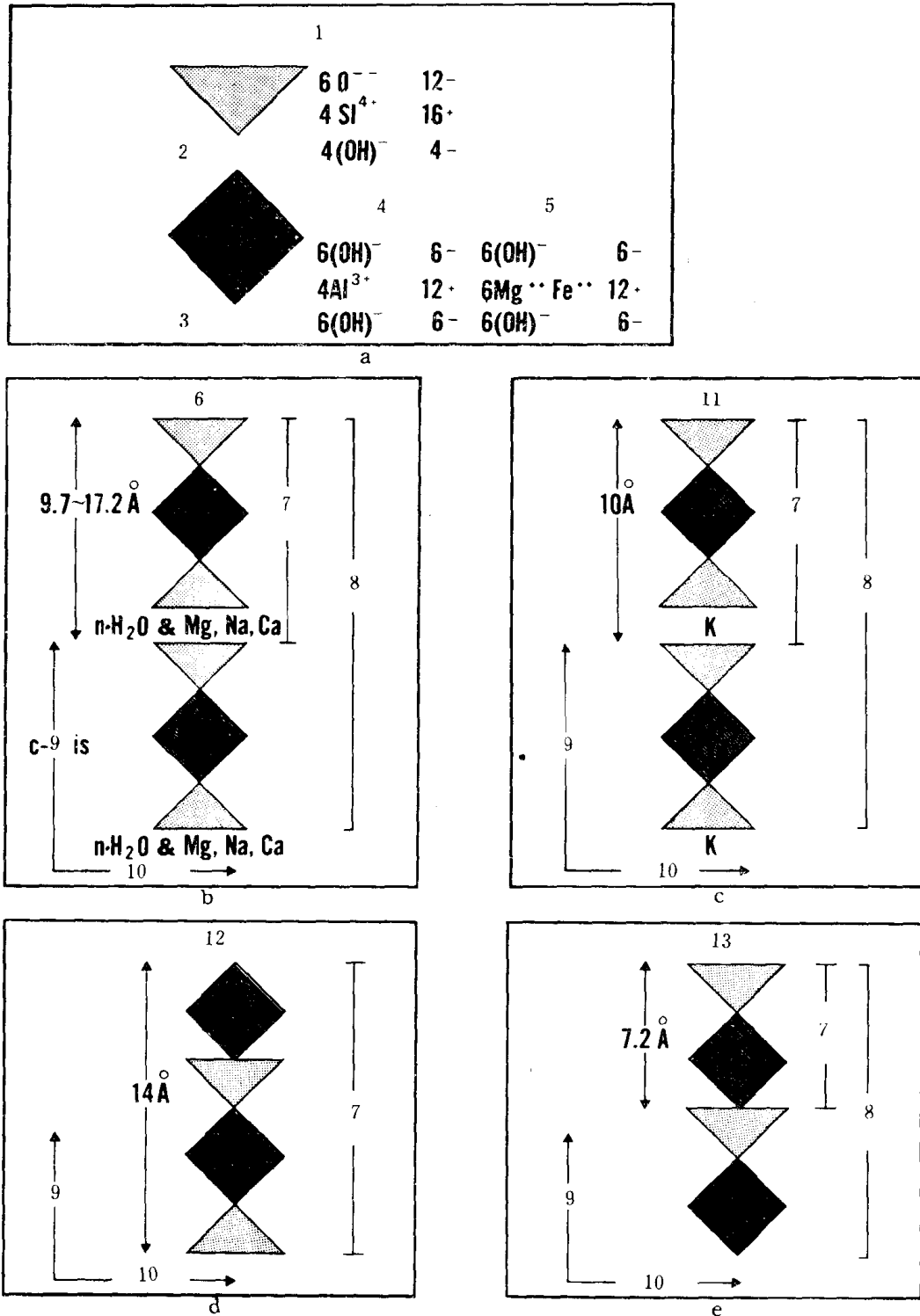


图 2-4 粘土晶体结构简图

1—粘土构造单元；2—硅氧四面体片；3—铝氧八面体片；4—水铝石；5—水镁石；6—蒙脱石；
7—单元层；8—结构单位层；9—c轴；10—b轴；11—伊利石；12—绿泥石；13—高岭石

第三节 孔隙度

一、孔隙度定义

孔隙度是岩石中的孔隙体积和岩石总体积的比值。在油气藏中，岩石的孔隙是适于聚积并储存油、气和水的地方。设有一块任意形状的岩石样品：

V_t ——岩样的总体积（或表观体积）；

V_p ——固体颗粒间的空间容积（或孔隙体积）；

V_s ——颗粒的实际体积。

该岩样的孔隙度等于 V_p 与 V_t 的比值：

$$\begin{aligned}\text{孔隙度} &= \frac{\text{孔隙体积}}{\text{岩石总体积}} \\ &= \frac{\text{岩石总体积} - \text{颗粒体积}}{\text{岩石总体积}} \\ &= \frac{\text{孔隙体积}}{\text{孔隙体积} + \text{颗粒体积}}\end{aligned}$$

孔隙度通常用字母 Φ 来代表，常以百分数或小数来表示：

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{V_p}{V_t} \times 100 \\ &= \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100\end{aligned}$$

图 2-5 所示是孔隙体积、颗粒体积与岩石总体积的关系。

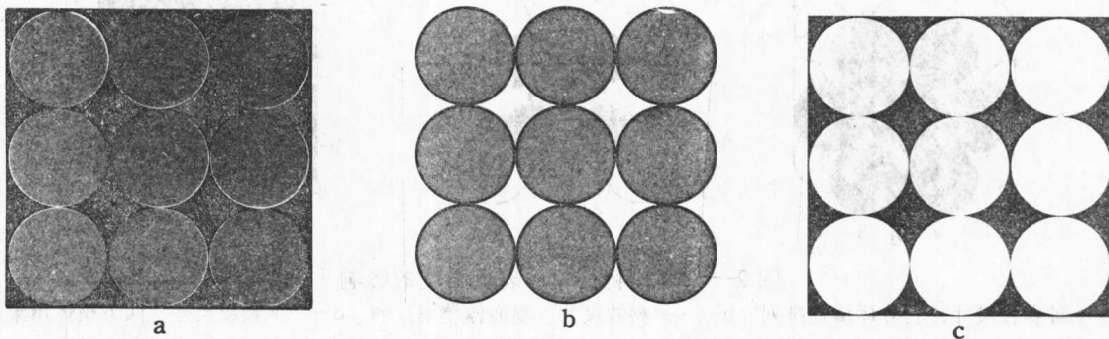


图 2-5 岩石体积分布图

a—岩石总体积；b—颗粒体积；c—孔隙体积

二、总孔隙度

总孔隙度被定义为岩石所有的孔隙体积和岩石总体积的比值，而不管这些孔隙是否相互连通。

三、有效孔隙度

有效孔隙度是指岩石相互连通的孔隙体积与岩石总体积的比值。孔隙有的是互不连通的，从而残留孔隙度就等于这些互不连通的孔隙的孔隙度。

四、水合水

现场油藏岩石矿物中的水合水或结晶水被定义为岩石颗粒体积的一部分。它不属于孔隙体积部分。

第四节 孔隙度和其它结构特性的关系

砂层和砂岩的孔隙度主要随颗粒大小、分布、颗粒形状、堆积排列方式、胶结方式和（或）粘土含量的变化而变化。如图 2-6 所示，球形颗粒构成的立方体排列， $\Phi = 47.6\%$ （最大值）。球形颗粒构成的菱面体排列， $\Phi \approx 26\%$ 。不同的两种粒径球形颗粒构成的立方体排列， $\Phi = 12.5\%$ 。产油砂层和砂岩的孔隙度一般在 10% 到 40% 之间，其数值取决于胶结类型及固结情况。石灰岩和白云岩， $\Phi = 5\% \sim 25\%$ ，粘土 $\Phi = 20\% \sim 45\%$ ，其数值取决于成因及埋深。一般认为：

- ① $\Phi < 5\%$ 时，孔隙度很差。
- ② $5\% < \Phi < 10\%$ 时，孔隙度低。
- ③ $10\% < \Phi < 20\%$ 时，孔隙度良好。
- ④ $\Phi > 20\%$ 时，孔隙度很好。

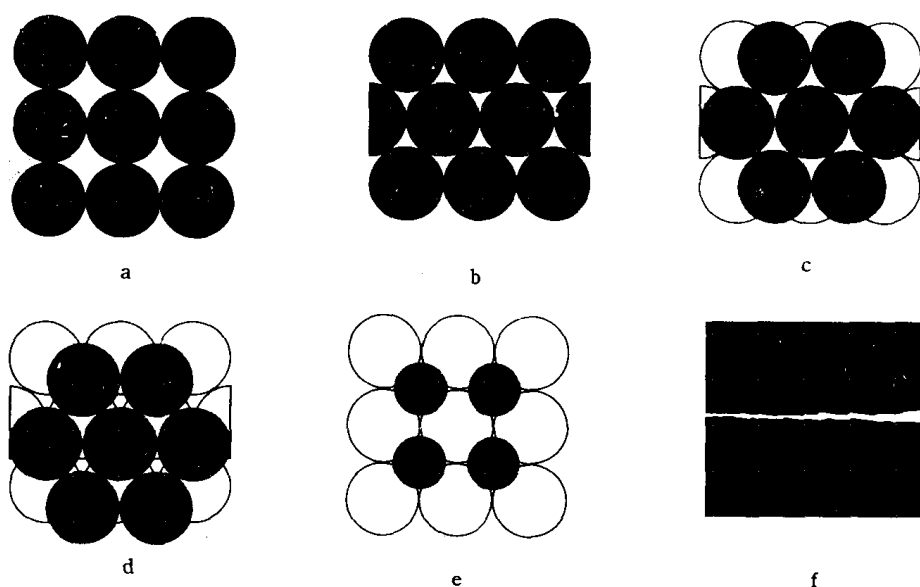


图 2-6 结构特征对砂岩孔隙度的影响

a——一种颗粒尺寸，立方体填集排列；b——一种颗粒尺寸，菱面体填集排列；c——一种颗粒尺寸，四方楔体填集排列；d——一种颗粒尺寸，四方斜菱体填集排列；e——两种颗粒尺寸，立方体填集排列；f——每英寸有一裂缝

碳酸盐岩（或石灰岩）孔隙度数值的变化范围要比砂层和砂岩的大得多。在某些礁灰岩地层中，孔隙度数值会很高，有时可能超过 50%，但也有一些例外，碳酸盐岩中所遇到的孔洞或裂缝对孔隙度的影响很小。它虽使孔隙度增加很小，但另一方面，它却大为提高了渗透性。碳酸盐岩的孔隙度一般比砂层和砂岩的低，晶间孔隙度与上述砂岩孔隙度相当，但是比砂岩要小得多（孔径相对小得多），这通常和岩石的白云石化程度有关。

第五节 渗透率

一、定义和理论

渗透率是用来衡量孔隙性介质允许流体穿过能力的，国际通用的计算单位是 Darcy (达西 (D))。它是以 1856 年一个研究水穿过滤层的法国科学家的名字而命名的。

达西在研究水的渗流时，用实验方法证明：单位时间内通过岩心液体的流量 (q) 与岩心两端的压差 (Δp) 及岩心的横截面积 (A) 成正比，与岩心长度 (L) 及液体粘度 (μ) 成反比。这就是达西定律，即：

$$q = \frac{K \cdot \Delta p \cdot A}{\mu \cdot L}$$

式中 q ——液体流过岩心的流量， cm^3/s ；

A ——岩心的横截面积， cm^2 ；

Δp ——岩心两端的压差， atm ；

L ——岩心长度， cm ；

K ——岩心渗透率，D；

μ ——液体的粘度， cP 。

由上式可以求出：

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta p}$$

从上式可以看出，在 1 atm/cm 的压力梯度下，粘度为 1 cP 的流体，以 $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ 的速度穿过横截面积为 1 cm^2 的物体的渗透率定义为 1 D 。在常用单位制中， 1 D 的渗透率是在压力差为 1 psi ①的情况下。粘度为 1 cP 的油，穿过 1 ft 厚的地层流向井筒获得大约 1 bbl/d ②的产量。

在岩心分析中，渗透率的单位也常用毫达西 (mD)。 1 mD 是 1 D 的千分之一。地层的渗透率可以从一个小数到大于 10000 mD 之间变化。

达西定律用来确定渗透率，在下列条件存在时它是一个常数：

①层流。

②地层和流体之间没有反应。

③孔隙空间被单相流体 100% 的饱和。

为保证流体层流流动，在测定时需要控制压差不能太大，否则会因压差过大、流速过高，流态由层流转变为紊流。此时，渗流规律就不能仅由代表粘滞力一项的达西方程来表示，而需增加惯性力一项并采用二项式来表示。图 2-7 所示是紊流流动对测量的渗透率的影响。

① $1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kPa}$ ；

② $1 \text{ bbl/d} = 159 \text{ L/d}$ 。

1. 渗透率和孔隙度的关系

地质环境和地层沉积因素既影响着孔隙度，同时也影响着渗透率，且在它们两者之间又有一定的关系。这一关系随着地层和岩石类型的变化而变化，并且反映着孔隙几何形状的不同。通常渗透率是伴随着孔隙度的增加而增大的。图 2-8 所示是不同类型的岩石渗透率和孔隙度关系的变化趋势。

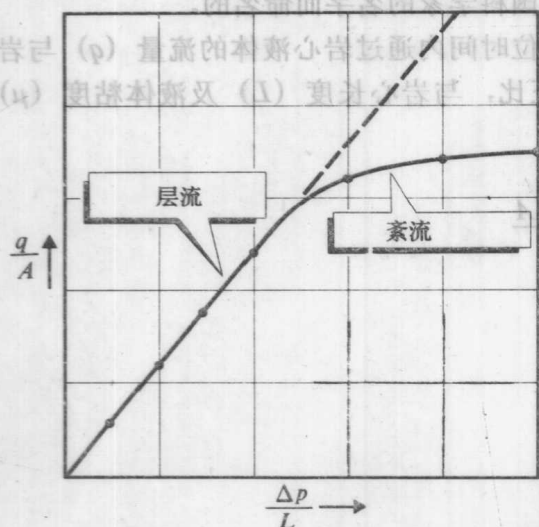


图 2-7 紊流流动对测量的渗透率的影响

如果孔隙度增大而渗透率不变，这说明孔隙数目增加而尺寸变小。从图中可以看出，砂岩的沉积历史包括压实和胶结，导致了渗透率—孔隙度变化趋势的左移。石灰岩的白云岩化趋向于使渗透率—孔隙度变化趋势向右移。

2. 渗透率和岩石结构的关系

渗透率是岩石孔隙通道大小、形状和分布的函数。这些关系曾在 1889 年由 Slichter 和在 1927 年由 Kozeny 对纯砂岩的情况进行过研究，而且还涉及到颗粒大小和堆积排列方式。图 2-9 所示是颗粒尺寸、孔隙尺寸及裂缝尺寸对渗透率的影响。

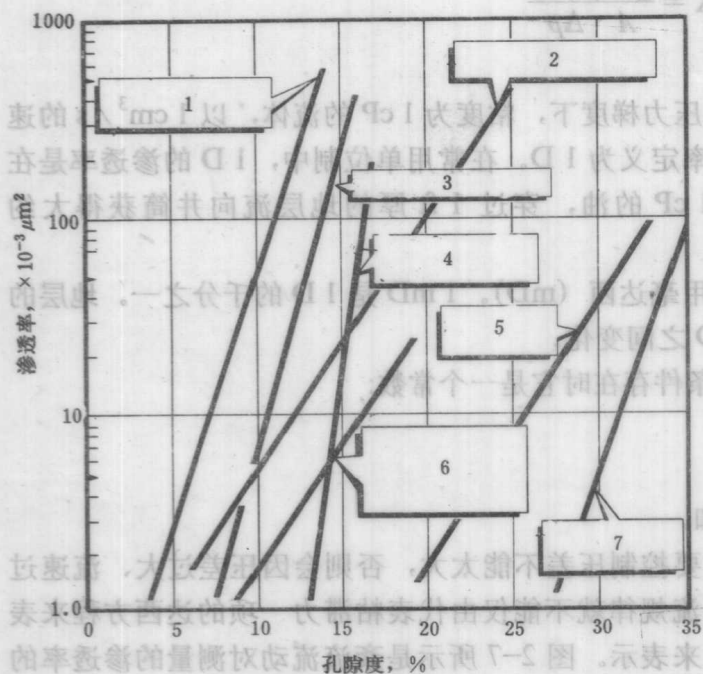
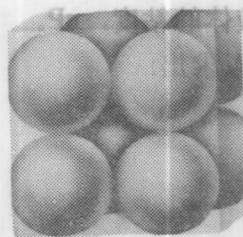
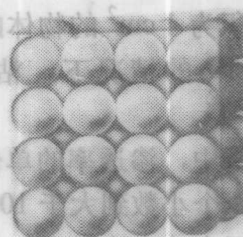


图 2-8 各类岩石渗透率和孔隙度关系的变化趋势

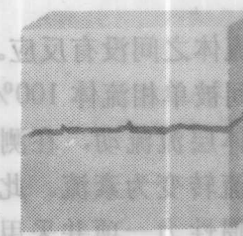
1—礁灰岩；2—糖粒状白云岩；3—鲕状灰岩；4—井内注水泥的硬砂岩；5—白垩灰岩；6—晶间灰岩和白云岩；7—松散粉砂岩



a



b



c

图 2-9 颗粒尺寸、孔隙尺寸和裂缝尺寸对渗透率的影响

a—粗粒岩石；b—细粒岩石；c—裂缝性岩石（非渗透性基岩）