

孔隙介质声学

[法] T. 布尔贝 O. 库索 B. 甄斯纳 著



(北京)
30.8

石油工业出版社

登录号	087312
分类号	P618.130.8
种次号	015

孔隙介质声学

[法] T.布尔贝 O.库索 B.甄斯纳 著

许云译



5217/10



200795229



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书内容主要是从理论和实验观测两方面阐述储集层地震特性与储集层开发特性(孔隙率、渗透率等)及其状态(矿物成分、饱和度、孔隙压力等)之间的相互关系,有助于读者深入理解地震波在储集层岩石内的传播特性,并进而认识地震观测信息在储集层评价、裂隙检测,以及确定孔隙率与渗透率之空间分布等方面的作用。本书可供地球物理工作者及有关院校师生参考。

孔 隙 介 质 声 学

[法]T.布尔贝 O.库索B.甄斯纳 著

许 云 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 14¹/₂印张 360千字 印1—1000

1994年12月北京第1版 1994年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-1062-3/TE·987

定价: 19.00元

目 录

符号说明	(1)
英文版前言	(2)
引 言	(3)
第一章 多孔隙介质	(5)
1.1 孔隙率	(5)
1.2 孔隙空间：微观几何分析	(7)
1.3 孔隙空间：毛细作用方法	(15)
1.4 多孔隙介质内的流体流动	(22)
1.5 多孔隙介质的尺度问题	(27)
1.6 天然多孔隙介质例子：Fontainebleau砂岩	(29)
第二章 饱和多孔隙介质内的波动传播	(32)
2.1 弹性动力学评述	(32)
2.2 饱和多孔隙介质内的波动传播——Biot 理论	(42)
2.3 结论	(64)
附录 2.1 非各向同性弹性介质内的波动传播	(65)
第三章 粘弹性介质内的波动传播与振动效应（一维情形）	(68)
3.1 物质的延迟性态	(68)
3.2 线性粘弹性态	(70)
3.3 一维线性粘弹性介质动力学，第一种品质因素概念	(71)
3.4 重要的粘弹性模型	(80)
3.5 粘弹性介质内的振动	(88)
3.6 关于品质因素的结论与最终评述	(96)
3.7 结论	(97)
附录 3.1 Kramers-Kronig关系	(98)
第四章 观测速度与衰减的实验技术	(102)
4.1 利用波动传播的观测	(102)
4.2 利用振荡系统的观测（驻波）	(111)
4.3 利用应力与应变曲线的方法	(117)
4.4 结论	(118)
第五章 多孔隙介质内的波动传播结论与机理	(120)
5.1 实验结论与机理	(120)
5.2 有关现场观测的结果与机理	(157)
第六章 波与分界面	(167)
6.1 饱和多孔隙介质内的波动传播不连续性的影响	(167)
6.2 粘弹性介质内的反射与透射	(193)
6.3 一般结论	(205)

第七章 石油地球物理中的若干应用	(207)
7.1 低频地震勘探	(208)
7.2 全波形声波测井	(214)
参考书与参考文献	(216)

符号说明

下标(字母或数字)在逗号之后,表示对该下标有关之坐标的偏导数,如:

$$u_{x,y} = \frac{\partial u_x}{\partial y}, \quad u_{x,yy} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \dots\dots$$

$$u_{1,2} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \dots\dots$$

时间导数用一个圆点(一阶导数)或两个圆点(二阶导数)表示:

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

向量以黑字体代表。

符号div, grad, curl与 ∇^2 表示散度,梯度,旋度与拉普拉斯算符,在直角坐标系内即是

$$\text{div} \phi = \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial \phi_z}{\partial z}$$

$$\text{grad} \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)$$

$$\text{curl} \phi = \left(\frac{\partial \phi_z}{\partial y} - \frac{\partial \phi_y}{\partial z}, \frac{\partial \phi_x}{\partial z} - \frac{\partial \phi_z}{\partial x}, \frac{\partial \phi_y}{\partial x} - \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}$$

复量的实部与虚部按下述方式表示:

$$\text{实部} = (\quad)_{\text{R}} \text{或} \text{R.} (\quad)$$

$$\text{虚部} = (\quad)_{\text{I}} \text{或} \text{I.} (\quad)$$

书中,除少数例外(如渗透率)之外,所采用系统均属国际单位制。

英文版前言

长久以来就已经认识到：由地表所观测到的地震波特征，不但可以提供有关地层内各种岩石类型之间分界面的分布与产状的信息，而且也能提供有关矿物学以及岩石存在状态的信息。事实上，我们关于大地内部组成的许多知识一直是源于诸如速度及振幅等地震波特征的。

勘探地球物理中著名的反射地震方法虽然业已广泛采用，但过去多半是应用于圈定浅部地壳内岩石分界面、用于评价可能赋存油气的构造。对比之下，迄今还较少采用地震波来确定对油气开采有直接意义的岩石性质（例如孔隙率、渗透率）或进行烃类直接检测。即使是在测井中，迄今作为常规项目已经开发的也仅限于根据速度来估计孔隙率，而估计渗透率或饱和度都得根据其他的非地震方法。

由于石油的价值不断增大、发现新油田的复杂性日渐增多，而且日益认识到储集层的不均匀性远比以往所设想的情形更为突出，在过去一二十年期间地震方法的应用已发生了重要转变。需要建立并了解储集层岩石的地震特性与储集层开发特性（孔隙率、渗透率）及其状态（矿物成分、饱和度、孔隙压力等）之间的关系，这就是这种转变所涉及的中心问题之一。地层圈闭评价、裂隙检测、以及确定孔隙率和渗透率的空间分布，均属作用明显的一些应用。

尽管日益需要对开发有更好的了解，而烃类开发评估却几乎从未采用地震方法。大多数储集层中导致总产量估计、开采率和开采方法具有众多不确定因素的复杂性如何体现出来，是储集层评价和生产领域中始终出现的一个主要问题。有典型意义的是储集层复杂性与孔隙率、渗透率、泥质含量、孔隙密度等显著的空间不均匀性有关。根据试井数据、测井或岩心不可能以任何详细程度对空间变化进行推断，只能根据远距地球物理观测，尤其是地震方法观测，才有希望获得这类信息。

储集层不均匀性质的直接影响后果就是其开采过程的复杂性，这涉及到诸如具有不连续页岩盖层的储集层内之气顶迁移、超压带、以及在渗透率有广泛空间变化的储集层内进行热采时对温度分布或蒸汽前缘的追踪等各种问题。

无可置疑，地震方法未来在协助解决生产与开发问题时会起重要作用，不过，我们首先需要较深入地理解地震波在储集层岩石方面可以告诉我们什么以及如何提取所期望的信息。这本书就是向所需要的这种方向上迈出的重要一步。

斯坦福大学地球物理系教授
斯坦福岩石物理研究项目主任

A. Nur
1986年7月

引言

经典的弹性动力学定律以及将其推广到粘弹性状态时，一般均假定介质为均匀连续，应用于多孔隙介质时则需要有一彻底改变。多孔隙介质按其真正本质应属于多相混合物，它之所以属于混合物是因为固体部分(即岩石骨架)往往由化学特征或结晶特征各不相同的颗粒所形成，而属于多相则是因为这种固体部分总是与占据颗粒之间空隙的气相或液相结合在一起。

多孔隙介质的这种微观非均匀性导致一种对流体含量或固体结构轻微变化较敏感的复杂宏观物理性态，多孔隙介质声学将力学定律的严格性与多孔隙介质的自然无序综合起来，试图去描述其状态特征。任务是艰巨的，但是面临事关重要的应用，就是能导出局部结果也行，那就不得不面对此困难。事实上，声学分析是适用于多孔隙岩石遥测和材料无损探伤最有把握的手段之一。

地球物理是理想的应用领域，至少在经济效益方面是如此。在声学这个学科分支中，居优势地位的经典地震学最早试图提供地下界面的几何映象，所利用的是声波在地质岩层分界面处因不连续性而形成的反射或折射。这种办法已取得了突出成就。由于电子学和计算设备在信号记录与信号处理方面的惊人发展，现在已足以正常地获得地下界面高质量的几何映象。起源于信噪比有重大改善的这种效果，基本上是靠观测各种可按弹性动力学加以解释的瞬态时间而达到的，而多孔隙介质声学本身则从未成为这种研究所固有的一部分。

然而，除了这些纯几何方法极为成功之外，描述声波传播经过的介质类型、甚至描述其流体含量等的特征，这些需要已日渐显露端倪。借助地震方法对地下岩层进行岩性和岩石物理的研究，是勘探者长久以来的梦想，若是没有良好的多孔隙介质声学知识，那是难以在今天实现的。

应用地球物理的第二个主要领域是在油井中进行声学记录，即地震测井和井中地震。在这类情形下，显然需要熟悉控制着机械波与多孔隙介质相互作用的各种规律。

关于这点，再没有比有关这个题目的实验工作正与日俱增能更好地证明了。

虽然石油地球物理因其经济上的重要性而显得似乎独占了各种潜在应用领域，可是人们不应该过低估计多孔材料无损探伤领域(混凝土、多孔塑料等)，这是能得到最直接应用的一个方面，因为在接近实验室条件下进行观测，自然是很容易实现的。由于涉及到多相混合物特性，多孔隙介质声学便成了若干学科的注意中心，本书三位著者的专业分别为物理学、力学和地质学，就在相当程度上反映了这一点。

第一章专为多孔隙介质本身形象化描述，在该章末尾以Fontainebleau砂岩为实例讨论天然的多孔隙介质。

流体完全饱和多孔隙介质相应于最简单的多相情形。第二章内容是这类介质内波动传播的理论探讨，对这种介质类型需将固体基质内的运动和饱和流体内的运动加以区分。该章末尾给出对这种理论的实验检验证明。

要区分流体运动与固体运动，必须将整体现象置于优先地位(在样品的尺度上)，而不是强调局部现象(在孔隙与颗粒的尺度上)。从整体上辨别局部现象的一种途径是考虑某种

均匀介质，它等效于按力学性态所观测到的多孔隙介质。根据这种观点，第三章试图建立粘弹性介质内的波动传播理论，因为这种类型的介质可以相当准确地模拟多孔隙介质的行为。随着所采用的主要粘弹性模型，引入了品质因子的概念。

由于概念性地引入了速度、衰减和阻尼，有必要将它们定义得更具体。第四章探讨一些极为重要的定义及其相互关系，该章描述了为测定多孔隙介质内的速度与衰减而设计的主要试验。

第五章介绍有关多孔隙介质各种实验室试验的文献中给出的结果，详尽地考察了速度和衰减对不同物理参数（压力、温度、频率）的依赖关系及其似乎是最合理的理论解释，给出若干用于野外观测的经验公式，这些公式有助于识别声波传播经过的各类岩层。

至此，前面各章中还没有一章内容是讨论按声阻抗所定义的分界面问题（弹性或滞弹性性质）。第六章总结了第二与第三章中的理论，然后将其应用于分界面问题，详细考察了渗透率对体波与面波的影响及衰减差异作用。

最后，在第七章中从工程观点讨论了实际应用，考虑了石油地球物理中的若干应用，讨论重点放在目前在野外观测和多孔隙介质声学性质解释中所遇到的一些困难。

第一章 多孔隙介质

多孔隙物体是固体单元（颗粒、基质等）的集合体，各单元之间的空隙形成孔隙空间本身。多孔隙物体内部的这些空隙使多孔隙物质在很多物理性态方面不同于稠密固体（如矿物颗粒），这种多孔隙物质是复杂的集合系统，其中即使存在非常少量的流体也会增加其总体复杂性。

空隙体积对样品总体积之比值称为孔隙率。这种岩石物理参数值通常是易于定义和测定的，然而，当人们试图对孔隙空间进行几何描述时，过程就变得极为复杂了。尽管少数具体场合容易适应于定量描述（如存在于相同直径球体堆集内的孔隙空间），大多数实际孔隙空间却过于复杂，以致难于用严格几何方式加以论述，只有近似描述才行得通。有的人主要是想突出所研究介质如何不同于大多数日常所观察的空间。例如，重要之点在于将所研究介质内的孔隙本身（即存贮流体并容许其流动的空隙体积）与颗粒边界或微裂隙加以明确区分，后者主要是表示固体单元之间不连续性的表面，它们对力学性质有极端重要的作用。

严格的几何描述纵使有点失败，利用某种物理现象、即孔隙空间内的毛细平衡现象取得进展却是可能的。分析这些平衡现象有助于以一系列简化办法来处理孔隙空间，这些简化办法为更系统的定量化创建了用武之地。反过来说，这些毛细平衡本身就是研究多孔隙物体时的一项重要因素。事实上，如果多孔隙介质内有二三种流体共存（如石油储集层内存在水、油与气，又如大地最上部地层内存在水与空气），这些毛细作用对物理性态就具有决定性影响。

大多数多孔隙物体其主要特征之一就是容许流体流动。我们将评述一下绝对渗透率（多孔隙介质为一种流体所完全饱和）和相对渗透率（多孔隙介质含有两种以上非混溶流体）的概念。

我们还将指出孔隙空间如何引出尺度问题。多孔隙介质不存在绝对表观尺度，即形成骨架之固体颗粒的视尺度。但是，为有一个更好的理解，往往有必要用相对于所研究物理过程的某种尺度概念来代替这种绝对尺度，对于各种不同过程，这种相对尺度或许很不相同。

1.1 孔隙率

1.1.1 孔隙率的测定

根据定义，孔隙率是孔隙体积（ V_p ）对所考虑物体总体积（ V_t ）之比。固体体积（ V_s ）为

$$V_s = V_t - V_p$$

因此，要计算孔隙率只需在三个参量中量度其中两个即可。最通常的测定方法总结于表1.1，一般采用方法（1）与（4）、（1）与（5），有时采用方法（1）与（7）或（3）与（7）。

Monicard (1965) 与 Dullien (1979) 提供了有关这些测定方法的细节。

事实上，这些方法并不等价。虽然确定总体积不会引起什么理论问题（假若样品的尺度与孔隙尺度相比是非常之大），确定紧密相连的其他两个参量就不能这么说了；（3）、（4）与（5）各项测定技术只考虑与外部连通的孔隙，而方法（6）是局部地、方法（7）则是整

表 1.1 测定孔隙率的主要方法

测定体积	正文引用号	测定方法
总体积 V_t	(1)	水银内的浮力：非润湿流体的水银没有压力时浸入不了常见的多孔介质。这种方法可非常准确地测定总体积
	(2)	直接测定不同长度的样品：这种方法仅适合测验具有非常规则形状的标准
孔隙体积 V_v	(3)	使润湿流体在真空条件下达到完全饱和；由于重与饱和重量之差直接计算出孔隙体积
固体体积 V_s	(4)	理想气体的压缩系数：容器内开始时是空的，然后置入样品。作出注入于容器内的气体体积与压力关系图，利用两种情形下的差异计算出固体体积。固体压缩系数忽略不计
	(5)	润湿流体完全饱和多孔物体之浮力：根据干重与浸没重量之差直接计算固体体积
	(6)	测量固体密度：在多孔物质碾碎成细粒之后测定
	(7)	计算固体密度：根据矿物组分的定量分析计算

体地考虑所有空隙。

1.1.2 连通孔隙率与非连通孔隙率的定义

视所使用的方法而定，人们可以测定连通孔隙率，即与外部连通之空隙体积，或者测定总孔隙率，即与外部连通或不连通之空隙体积。两者之差代表非连通孔隙率。

在大多数天然的多孔隙介质内是难以发现非连通孔隙率的。非连通孔隙率最明确无误的例证是晶体内的流体包裹体，这种非连通孔隙率在沉积岩内往往被忽略不计。孔隙率非常低的结晶岩内，流体包裹体可能占总孔隙率的大部分。在具有孔洞结构的熔岩内，非连通孔隙率所占百分数往往低于被认为是正常的水平。孔洞由非常细微的通道或裂隙相互连通，但是，即使在浮石的情形下，很大一部分孔隙率显然是与外部连通的，只不过经由的通道太狭窄，以致当样品浸没于水中时使空气封闭在孔洞内了。这种连通性很差的孔隙率称为圈闭孔隙率 (trapped porosity)，将在1.3.2节内讨论。

要概括人工材料的情形，更为困难。烧结产生的多孔物体（玻璃、铝、钢等）有时显示出非连通孔隙率可占极大部分（例如，在烧结镍内可高达总体积的9%）。

总之，许多类型的多孔介质内，非连通孔隙率虽数量微小，但不可忽略不计。首要的是，人们应该避免因有效孔隙率或封闭孔隙率 (dead-end porosity) 等诸如此类多少带有主观性的术语可能引起的矛盾。

1.1.3 特种情形：非胶结介质、粘土孔隙率

测定前述各量时均假定：在进行任何测定之前，所研究介质的非连通孔隙率均已失去所含流体而属于空的，而且这种脱除流体的过程（一般采用加热法）不破坏介质结构。这种假设对于胶结介质经常是成立的，不过也存在显著的例外。

非胶结介质（土壤、软泥、近代沉积等）的结构性质的形成仅因存在有水，这意味着（如果完全保留原有的孔隙率概念）孔隙空间的测定，首先是孔隙空间的观测技术，将因我们采用为胶结介质而建立的方法而会发生不同的问题。

当退化至极端，可以将粘土质介质和页岩质介质归属于一种中间状态情形。它们含水有三种主要形式，可采用热重分析 (thermogravimetric analysis) 的方法研究这些不同类型的水，这种分析方法是以加热法测量样品的失重 (关于这方面问题可参见 Grim, 1953)。这三种形式的水如下所列：

(1) 所含水位位于各质点或粘土颗粒簇之间，这种水占有通常意义下的孔隙空间。采用低温 (低于 70°C) 干燥法可使水脱除。

(2) 所含水位位于结晶叶理之间 (伊利石、蒙脱石) 或存在于某种晶体内部的管穴内 (如海泡石)。排除这种水需要一定的能量，而且必要时尚需加热至温度接近 100°C 。首要的是，视有关矿物类型而定，这种脱水作用会显示出一定程度的不可逆性。

(3) 晶体的地层水 (formation water)，这种水仅在高于 200°C 温度被破坏时才能释放出，因此完全没有与之相应的孔隙空间概念。

另一方面，如果考虑类型 (1) 和 (2)，测定粘土质介质的孔隙率显然在某些情形下可能与脱水温度有关。一般来说，粘土在高于 70°C 时是不脱水的，加热高于这个温度时就涉及到叶间水 (interfoliate water)，这时要出现结构不可逆改变的危险。这个例子说明了对粘土物体进行岩石物理分析时一般会引起的问题，样品的状态以及由此而形成的样品性质可能与它所经历的脱水作用历史有紧密联系。

1.2 孔隙空间: 微观几何分析

1.2.1 孔隙空间的目测方法

暂且撇开不谈定量的宏观定义，我们如果希望观察孔隙空间，那我们就必须有具有孔隙尺度的研究工具。对于胶结介质，以随后就可固化的某种流体全部填满孔隙空间，那就足以进行研究了。使用的流体往往由合成树脂 (包括环氧树脂) 作成，在真空条件下将该树脂注入，然后在时间或加热的影响下使之聚合。按照这种方式，可以借助于光学显微镜的常规方法用切片 (图板1)、磨光片等来分析孔隙空间。为用扫描电子显微镜 (SEM) 观察，也可以用盐酸和氢氟酸破坏矿物相，只留下树脂，以便人工模拟孔隙网络 (图板2)。这种复制技术优于其他方法之贡献在于允许以极高的放大倍数进行观察，而且能提供一种生动的三维景象。SEM非常广的景深适于获得立体照片 (两次摄像之间使制备品在显微镜下倾斜 (图板6))，这使得它有可能量度非常细薄裂隙的厚度，甚至有可能采用摄像测量方法观察孔隙几何形态。在Pittmann与Duschatko (1970)、Caye等 (1970) 及Delfiner (1971) 等人的论文中详尽地讨论了这些不同的技术。

1.2.2 孔隙几何形态的简单例子

按微观尺度所观察到的孔隙空间显示出异常的多样性 (插图1)，因而开始论及如何分析其几何形态时，明智的作法是参考比较简单的具体情形。我们将考察两种类型：

(1) 球形堆积内的粒间孔隙空间；

(2) 理想的孔洞介质。

1.2.2.1 等同球形堆积内的粒间空间

在许多著作中 (例如，G.Cargill, 1984) 一直在讨论这种孔隙几何形态，因为它充分有助于准备试验模型，从而有助于计算机模拟，这也是最接近于天然介质 (砂岩) 和人工介质 (烧结物) 中常见孔隙空间的理论情形。

实际上,等粒球形稠密随机堆积非常复杂,因此习惯上仅用它描述规则堆积(现实中并不存在体积大于几个颗粒的情形)。表1.2总结了最经常描述的三种堆积之主要特征。

这些规则堆积给我们提供了孔隙空间几何复杂性的初步景色,对于每种规则堆积,可以计算出两种类型球体的直径:

(1)内接于孔隙空间最宽区域内的最大球形(对于立方堆积,这种球形半径为0.732,长度单位为颗粒半径);

(2)可通过最狭窄孔隙通道(进出通道)的最大球形,即可自由“流通”经过所考虑整个孔隙空间的最大球形(对于立方堆积,其半径为0.414)。

对于立方堆积情形,这两种半径之比为0.56。在这种情形下,试图将孔隙空间分成两种明确区别的区域:一是孔隙(即相应于最大内接球形的似球形增宽),二是通至这些孔隙的“进出通道”,就象对孔隙空间二维剖面经常所作那样区分开来,那显然是不现实的。

对于更稠密的堆积,这种比值约为0.3,这表明对“通道”和“孔隙”加以区分要比通常相信的更为困难。从问题的体积方面来考虑,可以得出类似的结论。表1.2指出,最大内接球形代表的空间仅占一小部分,小于所述规则堆积之总孔隙空间的45%。当孔隙率因天然沉积物之压实或人工物质之高度烧结而显著降低时,在似球形这种扩展意义上,孔隙概念(与“通道”相比,孔隙相当大了)只对粒间空隙才有真正意义。

这一点指出了严格几何分析的限制。实际上,倾向于将粒间介质考虑为主要是通过一系列方程而把孔隙率同其他岩石物理参量联系起来的。关于Fontainebleau砂岩^①的分析(见1.6节)就给出了一个这种过程步骤的例子。

1.2.2.2 理想多孔介质

理想多孔介质定义为其孔隙空间是由球形形成的介质(前述粒间空隙的补或逆),虽然这种情形在自然环境中是很稀罕的,却往往是关于孔隙介质所考虑的第一种几何形态。不过,在多孔熔岩和鲕膜状灰岩中存在有这种类型的孔隙空间,在多孔人工介质(混凝土、玻璃、塑料)中更能经常发现。这种孔隙空间除了它非常简单之外,只要各球形均不相互接触,它还显示出整体缺乏孔隙间连通的特征。与渗透理论有关的实验和计算表明,孔隙相成为连续相,30%的极小孔隙率是必要的(在球形具有相等半径的简单情形下)(见Larson等,1980),当研究这种类型介质的电性或水力学特征时,这个30%门限值是非常重要的。例如,在孔隙率小于20%至30%的介质中,流体循环(渗透率)保持为零(在自然情形下非常低),一旦达到和超过该门限值就显著增高。

1.2.3 实际孔隙空间

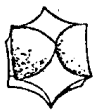
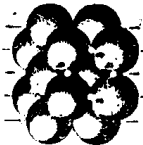
我们已经指出过,诸如粒间空隙这样的假想简单孔隙空间可以证明是非常复杂的。由实际介质提出这种问题是完全能够想象到的(见插图1与插图2)。除通常所见孔隙空间的这种固有之复杂性之外,另一个问题就是不同于我们的观测与分析的手段属于二维性质,而孔隙空间却是三维的。即使在稀有场合下能够获得局部的(铸型)或整体的(连续剖面)三维数据,所有方法也都缺乏对孔隙的描述,更为重要的是缺乏对孔隙的定量化表示。

为解决微观描述中的这种主要困难,已经发展了若干种方法,它们源于各色各样的理论。我们将提供两个对照例子,第一个适用于碳酸盐岩分类,主要由于碳酸盐的化学活动性(Chemical mobility),其孔隙空间很可能显示出异常的变化,第二个例子相应于以数学形态学原理为基础的一种办法。

^①一种方解石胶结的石英砂岩。——译者

表 1.2 某些球形堆集的特征

某些球形堆集的特征

堆集类型	固相结晶构造	孔隙构造 ^①	孔隙率 %	每个球形 接触点数	空隙类型	极大内 接球形 ^② 的半径	通过最窄 孔隙通速 之极大球 形半径	极大内接 球形内所 含孔隙百 分比(%)
简单立方体		 立方空隙	47.6	6		0.732	0.414 曲线方形 孔隙通道	3
简单六角形		 简单斜方 形空隙	39.6	8	2三方空隙	0.528	0.414与 0.155曲线 三角形孔 隙通道	45
稠密六角形 或四面体	 图 1.2.3	 四面体空隙	25.9	12	2四面体 + 1八面体	0.225 0.414	0.155	27
坚硬球形稠密 随机堆集 ^②			约36	平均为 9左右	至少五种类型 Bernal 典型孔穴	最常見 半径为 0.29		

长度单位为球半径

①根据 Guillet (1982); ②据 Cargill (1984)

1.2.3.1 Choquette与Pray分类

这种方法(部分由插图1说明)为石油地质学家所广泛使用。它实质上就在于将孔隙空间定义为易于描述之固体骨架的补充物,其形状为沉积学家所熟悉。与这种固体骨架相比,将孔隙空间规定为处于颗粒之间或晶粒之间(粒间空隙和晶间空隙)、颗粒之内(粒内空隙)、或者由某种颗粒的全溶解所形成(溶膜孔隙率^①)。

利用孔隙率与沉积时间原始岩石构造之间的从属关系,可将描述进一步加以细分。由此区分出两种主要类型:与初始构造有直接关系的选择性组构孔隙率(fabric selective porosity),以及叠合于这种由断裂形成或由风化形成之构造上面的非选择性组构孔隙率(断裂孔隙率或通道孔隙率)。

在其他优点当中,这种类型的分类法的优点是清楚阐明了孔隙率的发展与岩石历史的关系。不过它的主要缺点是把孔隙空间尺度维数的定量化表示减少到了最少程度,所以,对岩石物理应用这种分类往往限于含混的概括概念。诸如:粒间孔隙率比粒内或溶膜孔隙率有较好的连通性之类的含混描述。

尚有受岩相学启发的分类法可具有重大价值,它突出强调同一介质内孔隙几何形态常常是多种多样的这一极其重要的事实。在一给定介质中,发现孔隙空间分布在特性大不相同因而物理性态大不相同的两种或更多种几何形态类型中间,这也是不少见的。为认识某种岩石物理性态,因而经常有必要忽略总的测定孔隙率而仅考虑研究中起作用的一小部分这种孔隙率。

1.2.3.2 数学形态学应用于多孔介质描述

数学形态学(mathematical morphology)是一门对形态进行数学分析和概率分析的学科。为将这种理论应用于孔隙空间描述,利用的是经过专用计算机(映像分析器或结构分析器)处理得出的数字离散映像(插图3)。我们将仅限于对这种由Matheron(1967)的理论工作发展而来并由Serra(1982)详尽无遗阐述过的技术作一非常简要的回顾。

遍及一非常小面积所观察到的某种多孔介质的形状只不过是更一般性过程中的一个特殊顶点,因此人们能够尽力借助于概率理论把这种过程用公式来表示。在均匀介质内部,这种过程总是相同的,不论选取什么点作为观测的原点,无限制地重复产生,总是等于它自己本身,它可以用一个平稳变量来代表。

为描述这种介质,因而可以利用参照图形如点、线段、圆等等、提出诸如线段 h 的两个端点或整个圆 R 是否属于多孔介质之类的问题来加以分析。解答用概率来表示,而有关平移不变性的假设则使我们能够应用平稳随机变量的具体定律。

协方差函数是这种概率处理方法的一个例子:如 A 为具有孔隙率 ϕ 之某种介质的孔隙集合(其中, A 的补集 AC 为固体),在线段 h 置于平行于由单位向量 u 指向的已知方向时,沿方

插图 1

天然孔隙空间的种类

碳酸盐岩的例子

Choquette与Pray分类

由透射光照明的薄片相片(岩石薄片厚 $30\mu\text{m}$)

作薄片之前,岩石均以染色树脂浸透,因此孔隙空间在相片中呈红色。注意,利用这种摄影系统仅能识别宏观孔隙率。

^①溶膜孔隙率(moldic porosity)是沉积物或岩石中的个别组分溶解而形成的孔隙。——译者

选择性组构孔隙率

相片1——粒间孔隙率。鲕状灰岩

相片2——溶膜孔隙率。大孔隙系由微体化石完全溶解所形成。

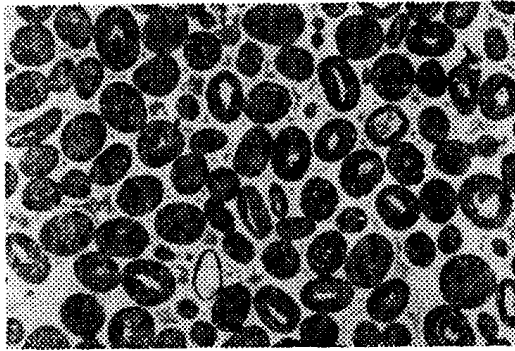
相片3——粒间孔隙率。货币虫灰岩

非选择性组构孔隙率

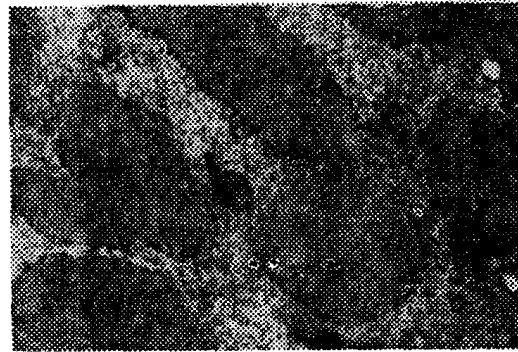
相片4——完全白云岩化鲕状灰岩中孔洞孔隙率之残余。

相片5——通道孔隙率。微裂隙因溶解而加宽。

相片6——缝合线构造孔隙率。缝合线构造是一种与压致溶解过程有关的特定类型微裂隙



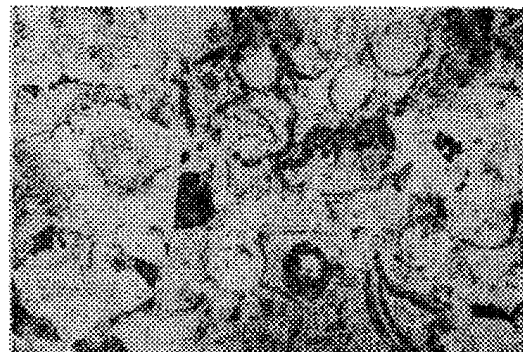
1 |—————| 1mm



2 |—————| 1mm



3 |—————| 1mm



4 |—————| 1mm



5 |—————| 1mm



6 |—————| 1mm

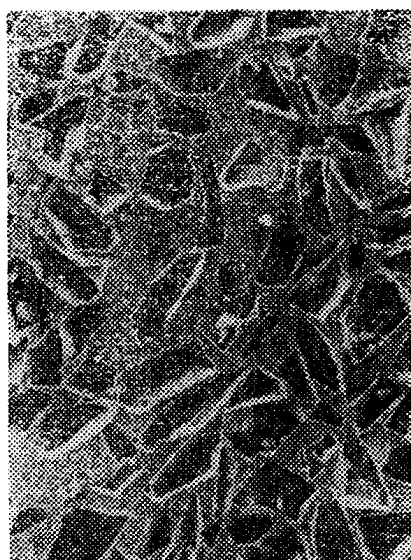
插图 2

孔隙铸型

(环氧树脂复制品)

扫描电子显微镜摄影

注入环氧树脂之后，整个矿物相（固体）被酸破坏。在摄影时，仅有代表孔隙空间的树脂出现

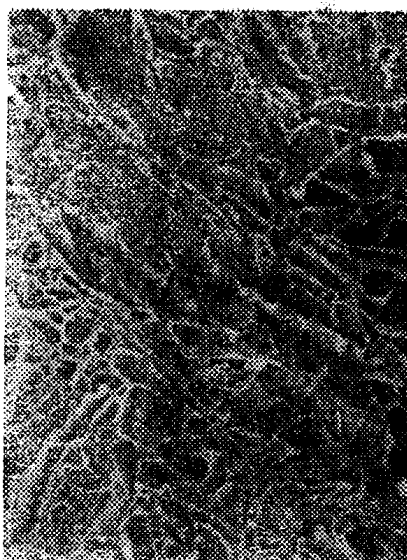


500 μm

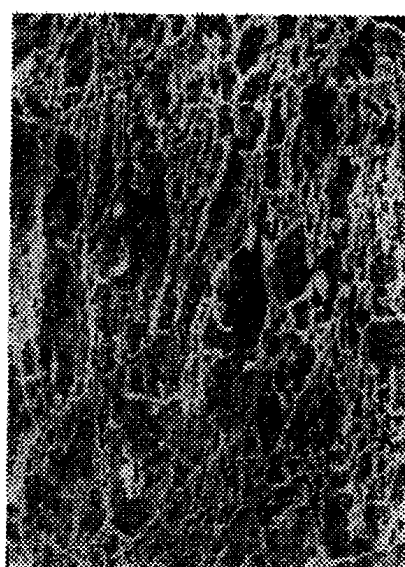


研磨耐火玻璃
(与插图4相片3比较)

孔洞白云岩



500 μm



货币虫灰岩
(与插图1相片3比较)

蚀变长石