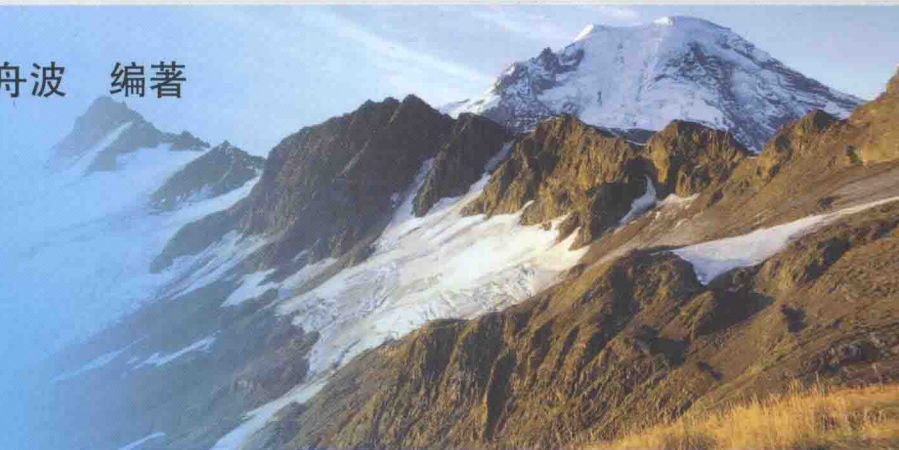


普通高等教育
勘查技术类教材

储层岩石物理学

CHUCENG YANSHI WULIXUE

● 范晓敏 李舟波 编著



地质出版社

普通高等教育勘查技术类教材

储层岩石物理学

范晓敏 李舟波 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

储层岩石物理学是一门综合性很强的学科。本书第一、二章介绍了岩石储集性和孔隙流体性质,为后续章节的展开奠定基础;第三章讨论储层岩石的力学性质,包括弹性、强度及弹性波速度等;第四章研究岩石的电学性质,涉及导电性、介电性和激发极化等;第五章是岩石的核物理性质,涵盖天然放射性、伽马射线和中子射线与储层岩石的相互作用,并介绍了岩石的核磁性质;第六章总结了各种物理性质及岩石储集性之间的关系,为各种地球物理资料解释和地质应用提供依据。

本书主要是针对应用地球物理方向本科生编写的,对相关专业研究生和从事地球物理工作的技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

储层岩石物理学 / 范晓敏, 李舟波编著. —北京: 地质出版社, 2011. 8

ISBN 978—7—116—07304—3

I. ①储… II. ①范…②李… III. ①储集层—岩石物理学 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第158579号

责任编辑: 王春庆

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路31号, 100083

咨询电话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm^{1/16}

印 张: 8

字 数: 190千字

版 次: 2011年8月北京第1版

印 次: 2011年8月北京第1次印刷

印 数: 1—1000册

定 价: 12.80元

书 号: ISBN 978—7—116—07304—3

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前言

岩石物理学是研究岩石的各种物理性质、揭示这些物理性质之间关系的一门学科。各种地面地球物理观测资料的解释、测井资料的地层评价和地质应用，以及矿山和环境地球物理等都需要岩石物理性质及其相互关系的知识。随着从地球物理数据中提取更多信息的要求越来越高，近年来，岩石物理研究不断得到加强。

储层岩石物理学的研究对象是具有储集能力的岩石，这些岩石具有孔隙，其中可储集和产出原油、天然气和水等。作为岩石物理学的一个分支，储集岩石学除了一般的岩石物理测量技术和研究方法外，更侧重岩石的孔隙给各种物理性质带来的影响，研究各种物理性质与储集性质之间的关系。为了研究处于地下的岩石物理性质，常常与高温高压联系在一起。

对岩石物理性质的研究很早就开始了，最初主要集中在岩石的力学性质上，后扩展到岩石的磁学和电学等性质。1946年，Bridgeman因对高压下岩石性质的出色研究，获得了诺贝尔物理学奖，标志着岩石物理学发展成为一门成熟的学科。从20世纪40年代初Archie公式发表以来，伴随着石油工业高速发展，地球物理测井技术和储层岩石物理研究取得了长足进步。

储层岩石物理学是多学科交叉的边缘学科。因为储层岩石物理学的研究对象是储集岩，岩石学、储集层岩石学等构成了该学科的地质学基础；研究物理性质，并利用物理原理设计实验技术，决定了该学科属于物理学的范畴；另外，实验技术需要机械、电子、计算机，以及高温高压等诸多技术作为保障。所以，储层岩石物理学是一门综合性很强的学科。

本书第一、二章介绍了岩石储集性和孔隙流体性质，为后续章节的展开奠定基础；第三章讨论储层岩石的力学性质，包括弹性、强度及弹性波速度等；第四章研究岩石的电学性质，涉及导电性、介电性和激发极化性等；第五章是岩石的核物理性质，涵盖天然放射性、伽马射线和中子射线与储层岩石的相互作用，并介绍了岩石的核磁性质；第六章总结了各种物理性质及岩石储集性之间的关系，为各种地球物理资料解释和地质应用提供依据。

本书主要是为应用地球物理方向本科生编写的，对相关专业的研究生和从事地球物理工作的技术人员也具有一定的参考价值。本书选材是根据36学时的课程要求进行的，虽然努力使其全面系统，但因篇幅限制，许多内容无法包括进来，或不能做详尽的探讨。另外，由于编者水平所限，书中缺点、错误在所难免，希望读者向我们提出宝贵意见，以便再版时改正。

范晓敏 李舟波

目 录

前 言

第一章 储层及其特征	(1)
第一节 储层的岩石学特征	(1)
一、储层及其分类	(1)
二、储层岩石的骨架特征	(3)
第二节 储层的孔隙类型与孔隙度	(6)
一、储层岩石的孔隙类型	(6)
二、孔隙度	(7)
第三节 储层岩石的渗透率	(10)
一、渗透率的定义	(10)
二、气体的渗流——滑动效应	(11)
三、裂缝岩石的渗透率	(14)
四、孔隙度和颗粒几何特征对岩石渗透率的影响	(14)
五、岩石渗透率的实验室测定	(16)
第二章 储层流体的物理性质和含油气水饱和度	(17)
第一节 油气储层中烃类的组成和相态	(17)
一、油气储层中烃类的化学组成与分类	(17)
二、油气相态转换及表示方法	(17)
第二节 天然气的物理性质	(19)
一、天然气的密度	(19)
二、天然气的体积系数和压缩系数	(19)
三、天然气的黏度	(20)
四、天然气水合物	(23)
第三节 原油的物理性质	(23)
一、原油的密度与溶解气油比	(24)
二、地层原油的黏度	(24)
第四节 地层水的物理性质	(25)
一、地层水的分类	(25)
二、天然气在地层水中的溶解度	(25)
三、地层水的黏度	(26)
四、地层水的导电性	(27)
第五节 地层含油气水饱和度	(29)
一、饱和度的定义及相关概念	(29)

二、岩心流体饱和度的实验室测定	(30)
第六节 岩石的水理性质	(31)
一、岩石的膨胀性及崩解性	(31)
二、岩石的软化性	(32)
三、水导致储层通道堵塞的几种机制	(32)
第三章 储集岩石的强度和弹性力学特性	(33)
第一节 岩石的变形	(33)
一、应力和应变	(33)
二、岩石的本构关系	(36)
三、岩石三轴测量	(39)
第二节 岩石的强度及破裂性质	(40)
一、岩石的破坏	(40)
二、岩石的强度及破裂准则	(40)
第三节 岩石的弹性	(46)
一、岩石的弹性常数	(46)
二、岩石的弹性模型	(48)
第四节 岩石中弹性波速度和衰减	(56)
一、岩石中的波及其速度测量	(56)
二、岩石中的弹性波速度	(57)
三、岩石中波的衰减	(60)
第四章 岩石的电学性质	(64)
第一节 岩石的导电性质	(64)
一、电阻率	(64)
二、岩石成分对电阻率的影响	(64)
三、岩石孔隙对电阻率的影响	(67)
四、电阻率的频率特性	(70)
五、温度和压力对岩石电阻率的影响	(73)
六、岩石导电性的各向异性	(74)
七、泥质砂岩导电模型	(76)
第二节 岩石的介电性质	(82)
一、电极化的微观机制	(82)
二、复介电常数	(83)
三、介电弛豫	(85)
四、谐振吸收和色散	(86)
第三节 岩石的自然极化性质	(87)
一、电子导体的自然极化	(88)
二、离子导体的自然极化	(88)
第四节 岩石激发极化性质	(90)
第五节 岩石的压电效应和电致伸缩	(92)

一、压电效应	(92)
二、电致伸缩	(92)
第六节 电学参数的实验室测定	(93)
一、电阻率的测量	(93)
二、岩石介电常数测量	(95)
三、岩石复电阻率测量	(96)
第五章 岩石的原子及原子核物理性质	(98)
第一节 岩石的自然放射性	(98)
一、岩石中放射性同位素的分布	(98)
二、铀、钍和钾的地球化学特征	(98)
三、自然 γ 能谱	(99)
第二节 岩石对 γ 射线的散射与吸收特性	(101)
一、反应截面	(101)
二、电子密度指数	(102)
三、光电吸收截面指数	(103)
第三节 岩石的中子特性	(104)
一、中子与物质的相互作用	(104)
二、反应截面	(105)
三、中子与物质的相互作用的宏观参数	(107)
第四节 岩石的核磁特性	(109)
一、自由含氢流体的核磁性质	(109)
二、孔隙性岩石的核磁性质	(110)
第六章 不同岩石物理性质的相互关系	(112)
第一节 物理参数之间的相关性	(112)
一、声波传播速度与岩石密度的关系	(112)
二、声波传播速度与岩石热导率之间的关系	(114)
三、岩石自然放射性与密度和速度的关系	(115)
四、声波速度与电阻率的关系	(116)
五、动、静态弹性参数之间的关系	(116)
第二节 多参数与岩性和孔隙度之间的关系	(117)
参考文献	(119)

第一章 储层及其特征

第一节 储层的岩石学特征

一、储层及其分类

在天然状态下能够储存油气的地层称为油气储集层，因此，它必须具备三个条件：一是具有储存油气的孔隙空间，如孔隙、裂隙和孔洞等；二是沟通孔隙空间的通道，使油气能够流动；三是封闭条件，以便在自然条件下油气不能逸散。储集层通常按岩性分类，有时也按照孔隙类型或其他特征来划分。按岩性可以大致分为以下三类。

1. 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层包括砾岩、砂岩、粉砂岩等。目前，世界上大约有 40% 的油气储量属于这一类储集层。这类储集层在我国的中、新生代含油气层系中有广泛分布。

碎屑岩由矿物碎屑、岩石碎屑和胶结物结合而成。碎屑又可分为颗粒和充填在颗粒间的基质两部分。最常见的矿物颗粒为石英、长石和云母。岩石碎屑由母岩的类型决定。基质由颗粒的磨蚀产物（粒径一般不大于粉砂级）和粘土矿物等组成。最常见的胶结物是氧化硅、碳酸盐和各种氧化物。按照类似十进制和 2 的几何级数制标准的碎屑岩粒度分级，见表 1-1。其中粉砂和粘土构成通常所说的泥质（在不同的粒度分级方法中，数值大小有些差别）。根据各粒级颗粒的含量确定岩石名称时，某一粒级的质量百分数超过一半时，定为主名；质量百分数在 10%~25% 之间时，称为“含”；在 25%~50% 之间时，称为“质”，且“含”列于“质”之前。碎屑岩的成分对储集性质有一定影响，所以碎屑岩定名时，有时把主要碎屑成分加上，例如长石砂岩和石英砂岩等。

碎屑岩的胶结成分、数量及胶结形式，对岩石储集性都有很大影响。胶结物含量多时，也参加岩石定名。例如，砂岩中钙质胶结物含量达 25%~50% 时，称为钙质砂岩。

碎屑岩储集层的矿物成分，首先和碎屑的化学成熟度和结构成熟度有关，其次和胶结物的性质有关。化学成熟度愈高，岩石中稳定的矿物——石英含量愈高；化学成熟度愈低，含不稳定的长石、云母以及岩石碎屑愈多，杂砂岩和长石砂岩属于这种情况。因此，化学成熟度可以由石英与长石的含量比，或者近似地由钾含量和放射性来表示。

结构成熟度由基质百分数和分选程度决定。在一定程度上碎屑和粘土的含量是结构成熟度的标志，粘土含量愈低，结构成熟度愈高。

化学成熟度和结构成熟度的高低不一定一致，例如有些砾岩表现出很高的结构成熟度，但却有很低的化学成熟度；有些细砂岩可能是高化学成熟度，却是低结构成熟度。从油田开发或从测井解释的观点，了解这两种成熟度都是重要的。显然，成熟度低的储层，将增加测井资料解释的难度。

表 1-1 常用的碎屑颗粒粒度分级

十进制		2 的几何级数制		
颗粒直径/mm	粒级划分			颗粒直径/mm
>1000	巨砾	砾	巨砾	>256
1000~100	粗砾		中砾	256~64
100~10	中砾		砾石	64~4
10~1	细砾		卵石	4~2
1~0.5	粗砂	砂	极粗砂	2~1
0.5~0.25	中砂		粗砂	1~0.5
0.25~0.1	细砂		中砂	0.5~0.25
			细砂	0.25~0.125
			极细砂	0.125~0.0625
0.1~0.05	粗粉砂	粉砂	粗粉砂	0.0625~0.0312
			中粉砂	0.0312~0.0156
0.05~0.01	细粉砂		细粉砂	0.0156~0.0078
			极细粉砂	0.0078~0.0039
<0.01		粘土		<0.0039

砂岩中的孔隙以粒间孔隙为主，岩石中孔隙空间所占的比例取决于颗粒分选程度和粘土含量，即与结构成熟度有关。

2. 碳酸盐岩储集层

就全世界而言，碳酸盐岩类型储层占很大比重，大约有 50% 的储量和 60% 的产量来自这一类储层。常见的碳酸盐岩按矿物成分可分为石灰岩类和白云岩类，中间也存在一些过渡类型。碳酸盐岩的成因类型很多，因此储集层的孔隙类型也比较复杂，但基本上可以分为两类：一类是原生孔隙，如生物灰岩中生物遗骸之间的孔隙，鲕状灰岩中鲕粒之间的孔隙等；另一类是次生孔隙，它是在成岩后由于溶解作用、白云岩化作用、重结晶作用、风化作用以及构造运动形成的各种孔隙、溶洞和裂缝等。由于碳酸盐岩孔隙类型比较多，特征比较复杂，所以在测井资料解释时遇到的问题也多一些。

3. 其他岩石类型储集层

除了上述两种岩石以外的岩石所形成的储集层，如岩浆岩、变质岩等属于这一类。这类岩石的骨架孔隙度一般都很小，一些火山岩储层即使孔隙很大，其连通性也很差，但是当裂缝发育时，也可形成良好的储层。这类储层的矿物成分一般相当复杂，有时还要加上风化产物。这类储层虽然在世界各油气田中所占的比例不大，但在一些油田却给出很高的产量，在研究中也是不容忽视的。近年我国陆续发现一批大型火山岩储层的气田。

由于孔隙和裂隙对地层物理性质的影响不同，往往需要采用不同的评价方法，所以地层评价中常把储集层按孔隙类型划分，如孔隙性储集层和裂缝性储集层，以及孔隙-裂隙性储集层等。

对于孔隙性储集层，按照岩性是否稳定和含泥质情况不同，又可划分为不同的储集层测井解释模型，例如，岩性稳定的不含泥质储层、岩性变化的不含泥质的储层、岩性稳定

含泥质储层和岩性变化含泥质储层等等。

随着经济的快速增长，对油气资源的需求越来越大，人们开始对所谓的非常规油气藏越来越关注。所谓非常规油气藏一般是指天然气水合物、煤层气、油页岩、油砂等，这类油气藏的油气赋存状态、评价方法、开发技术等都和常规油气藏有很大差别。

二、储层岩石的骨架特征

对于砂岩储层，其骨架是由性质不同、形状各异、大小不等的砂粒胶结而成。颗粒的大小、形状、排列方式、胶结物的成分、数量、性质以及胶结方式必将影响到储层的性质。其中岩石的粒度和比面是反映岩石骨架构成的最主要指标，也是划分和评价储层的重要参数。

1. 砂岩的粒度组成

粒度组成是指构成砂岩的各种大小不同颗粒的含量，通常以百分数来表示，即不同粒径颗粒在全部岩石颗粒中所占的百分数。粒度组成分布规律大多为正态或近似正态分布。目前通常用粒度组成分布曲线（图 1-1）和粒度组成累积分布曲线（图 1-2）来表示粒度分布。粒度组成分布曲线表示各种粒径的颗粒所占的百分数，可用它来确定任一粒径在岩石中的含量。曲线尖峰越高，说明该岩石以某一粒径颗粒为主，即岩石粒度组成越均匀；曲线尖峰越靠右，说明岩石颗粒越粗。通常把图 1-2 上对应累计质量为 50% 时的粒径称为粒度中值。粒度组成累积分布曲线也能较直观地表示出岩石粒度组成的均匀程度，上升段直线越陡，则说明岩石越均匀。该曲线最大的用处是可以根据曲线上的一些特征点来求得粒度参数，进而定量描述岩石粒度组成的均匀性。

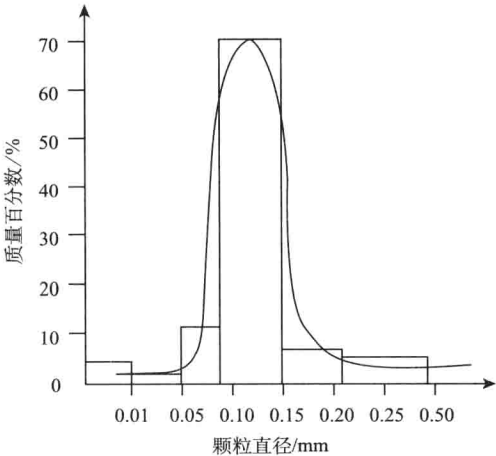


图 1-1 粒度组成分布曲线

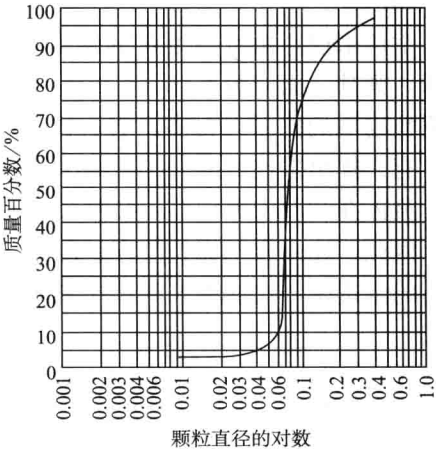


图 1-2 粒度组成累积分布曲线

颗粒直径除了用 mm 为单位来表示（见表 1-1），还有一种 ϕ 表示法。 ϕ 值与以 mm 为单位表示的粒径之间的关系是

$$\phi = -\log_2 d \quad (1-1)$$

式中 d 为以 mm 为单位的颗粒直径。

表征岩石组成均匀程度的系数或参数有不均匀系数 a 、分选系数 F 等。

不均匀系数 a ，是指累积分布曲线上两个质量百分数所代表的颗粒直径的比值。常用累积质量 60% 的颗粒直径与累积质量 10% 的颗粒直径之比，即

$$a = d_{60}/d_{10} \quad (1-2)$$

显然，不均匀系数越接近 1，表示粒度的组成越均匀，一般储层岩石不均匀系数在 1~20 之间。

分选系数由下式给出：

$$F = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (1-3)$$

式中： d_{25} 为累积分布曲线上对应累计质量为 25% 的颗粒直径； d_{75} 为累积分布曲线上对应累计质量为 75% 的颗粒直径。

按规定： F 等于 1~2.5 为分选好； F 等于 2.5~4.5 为分选中等； F 大于 4.5 为分选差。

2. 岩石比面

除了用粒度组成表示岩石骨架分散性之外，还可以用岩石的比面来描述储层岩石骨架的分散程度。所谓比面是指单位体积岩石内岩石颗粒的总表面积或单位体积岩石内总孔隙的内表面积，单位为 cm^2/cm^3 。当颗粒间是点接触时，即为所有颗粒的总表面积。比面的数学表达式为

$$S = \frac{A}{V} \quad (1-4)$$

式中： A 为岩石颗粒的总表面积或岩石孔隙的总内表面积， cm^2 ； V 为岩石外表体积， cm^3 。

举例来说，由半径为 R 的圆球按立方体排列所组成的多孔介质，若立方体每一边有 n 个球，则其比面应为 $S = n^3 \times 4\pi R^2 / (n \times 2R)^3 = \pi / (2R)$ 。因此，细颗粒物质的比面显然要比粗颗粒物质的比面大得多，岩石比面越大，说明其骨架的分散程度越高，颗粒越细。因此，有人提出按比面的大小将储层岩石进行分类。

流体在岩石中流动时，必将受到岩石骨架表面的影响，如产生的表面现象和流动阻力等。因此，比面影响岩石的许多性质。已知比面与岩石颗粒半径有关，因此，比面将影响岩石的渗透率，比面越大渗透率越低。针对弱胶结的砂岩，kozeny (1927) 给出如下关系式：

$$S = 2.013 \times 10^5 \left(\frac{\varphi}{FK} \right)^{0.5} = 2.013 \times 10^5 \left(\frac{\varphi^2}{T^2 K} \right)^{0.5} \quad (1-5)$$

式中： S 为比面， cm^{-1} ； φ 为孔隙度，以小数表示； K 为渗透率，毫达西 (mD^①)； F 为地层因素，等于该岩石电阻率与孔隙水电阻率的比值； T 为孔隙弯曲度，等于 $(F\varphi)^{0.5}$ 。

在实际应用中，有时将比面定义中的分母（岩石外表体积 V ）用不同的体积来代替。例如，采用颗粒骨架体积 V_s 和孔隙体积 V_D 为基准的比面定义，分别用 S_s 和 S_D 表示。

因为 $\varphi = V_D/V$ ， $V_D = \varphi V$ 和 $V_s = (1 - \varphi)V$ ，三种不同体积定义的比面有下列关系：

$$S = \varphi S_D = (1 - \varphi) S_s \quad (1-6)$$

① 1mD ≈ 0.987 × 10⁻¹⁵ m²。

此外,在有关比面的定义中,也有采用“单位质量”定义的比面 S_m ,它和比面 S_s 之间的关系显然为 $S_m = S_s / \rho_m$,式中 ρ_m 为固体骨架的密度。

一般情况下,如不加说明,岩石比面是指以岩石外表体积为基准的比面 S 。

3. 胶结物及胶结类型

储层岩石的胶结物是除碎屑颗粒以外的化学沉淀物质,一般是结晶的与非结晶的自生矿物,在砂岩中含量小于 50%,它对岩石颗粒起胶结作用,使之变成坚硬的岩石。

砂岩中的胶结物质总是使储层储集性变差,随着胶结物成分变化与胶结类型的不同对储层的影响也不同,粒间孔隙的一部分被胶结物充填,使孔隙度变小。

碎屑岩胶结的致密程度与胶结物成分有关。胶结物的成分可分为泥质、钙质(灰质)、硫酸盐、硅质和铁质,但最常见的是泥质、灰质及硫酸盐。

胶结物在岩石中的分布状况以及它们与碎屑颗粒的接触关系称为胶结类型。它通常取决于胶结物的成分和含量的多少、生成条件以及沉积后的一系列变化等因素。胶结方式可分为基底胶结、孔隙胶结及接触胶结(刘宝珺,1980)。

(1) 基底胶结 胶结物含量比较高。碎屑颗粒孤立地分布于胶结物之中,彼此不接触或少数颗粒接触。由于胶结物与碎屑颗粒同时沉积,故也称原生胶结,胶结强度高。孔隙类型为胶结物内的微孔,其储集性很差。

(2) 孔隙胶结 胶结物充填于颗粒之间的孔隙中、颗粒呈支架状接触。胶结物多是次生的,分布不均匀,多充填于大的孔隙中,胶结强度次于基底胶结。

(3) 接触胶结 胶结物含量很少,一般小于 5%,仅分布于颗粒互相接触的地方,呈点状或线状接触,胶结物多为原生或碎屑风化物质,常见的为泥质。此种胶结的储集特性最好,岩石孔隙度通常大于 25%,渗透率从几十个毫方微米到几个平方微米。

储层的胶结类型往往不是单一出现,而是呈混合式的。

4. 粘土矿物的产状及分布

储层中粘土矿物的产状及分布特点与沉积物的来源、沉积环境、水动力条件有密切关系。产状不同,对流体流动的影响也不相同。根据扫描电镜观察,并按对渗流影响由小到大的次序,可将粘土矿物产状分为以下几种类型(图 1-3)。

(1) 斑点式 一般多为高岭石和少量的针状云母、蒙脱石等。像“补丁”一样不连续地附在孔隙壁或充填在孔隙之间,使孔道变窄(图 1-3a)。

(2) 薄膜式 这种粘土矿物主要为伊利石、绿泥石、蒙脱石等。颗粒较小,排列规则,围绕颗粒或孔隙边缘呈环带薄膜生长,使通道变窄,对流体流动有一定影响

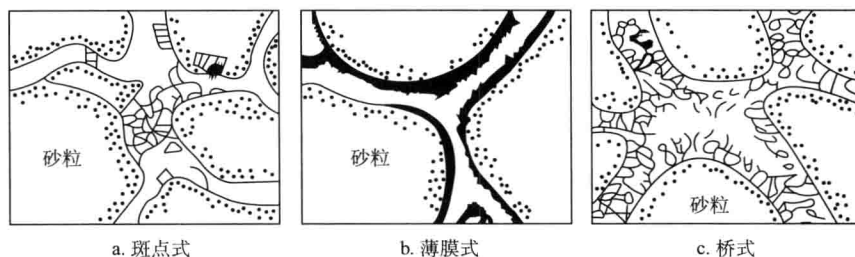


图 1-3 砂岩中粘土矿物的产状

(图 1-3b)。

(3) 桥式 这种粘土矿物多为绿泥石、伊利石。呈纤维状、针状在颗粒之间延伸，有时两边的粘土矿物还联结起来，像“桥”一样横跨孔隙空间。孔隙空间内又形成很多微孔隙，使流体在孔隙内迂回流动，因而影响流体渗流（图 1-3c）。

第二节 储层的孔隙类型与孔隙度

一、储层岩石的孔隙类型

岩石的孔隙类型直接影响岩石的储集性和渗流特性，因此研究岩石的孔隙类型，可为研究岩石的孔隙度和渗透率奠定基础。

研究岩石孔隙类型，实质是研究岩石的孔隙构成，它包括研究岩石孔隙的大小、形状、孔间连通情况、孔壁粗糙程度等全部孔隙特征和它的构成方式。

孔隙类型大体可以分为粒间孔隙、裂缝孔隙和溶洞孔隙。一些储层往往含有多重孔隙形态，如裂缝-溶洞孔隙、裂缝-粒间孔隙和裂缝-溶洞-粒间孔隙等。

图 1-4 是几种孔隙类型的示意图。

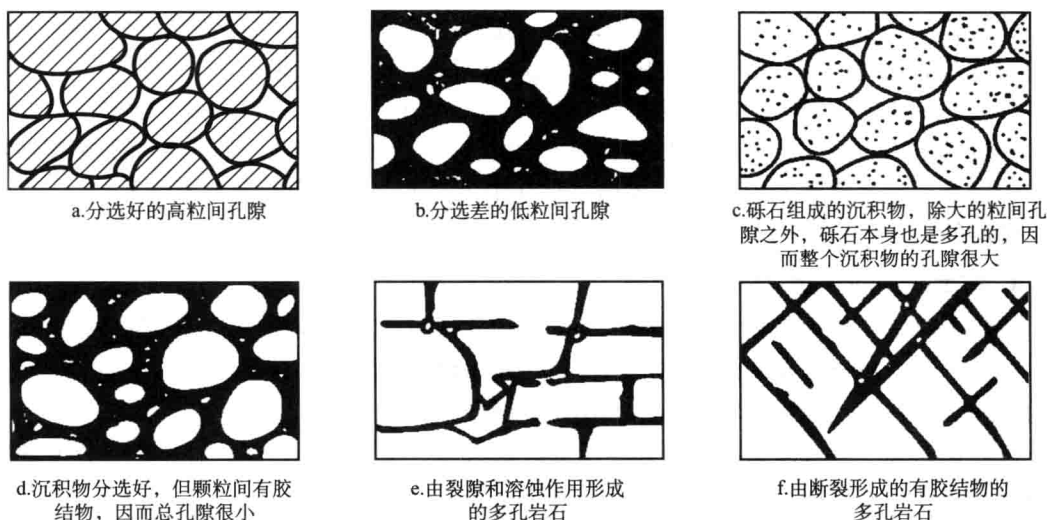


图 1-4 岩石孔隙的几种类型示意图

按岩石中的孔隙大小，一般可分为三类。

1. 超毛管孔隙

是指孔径大于 0.5 mm ($500\text{ }\mu\text{m}$) 或裂缝宽度大于 0.25 mm ($250\text{ }\mu\text{m}$) 孔隙。在此类孔隙中，流体在重力作用下可自由流动。岩石中的大裂缝、溶洞及未胶结或胶结不紧密的砂层孔隙多属此类。

2. 毛细管孔隙

毛管孔径介于 $0.5\sim 0.0002\text{ mm}$ (即 $500\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$) 之间，裂缝宽度介于 $0.25\sim$

0.0001 mm (即 250~0.1 μm) 之间者。在此类孔隙中, 液体和孔隙壁间处于分子引力的作用之下。由于毛细管的作用, 液体不能自由流动, 要使液体沿毛细管孔隙移动, 需要有足够的外力去克服毛细管力。

3. 微毛细管孔隙

孔径小于 0.0002 mm (即孔道半径小于 0.1 μm), 裂缝宽度小于 0.0001 mm (即 0.1 μm) 者。在此类孔隙中, 分子间的引力很大, 要使液体在孔隙中移动需要非常高的压力梯度, 这在油层条件下一般无法达到。因此, 实际上液体是不能沿微毛细管移动的, 泥岩和细粉砂岩中的孔隙一般属于此类型。这就是人们常将孔道半径大于或小于 0.1 μm 作为流体能否在其中流动的一个分界线的原因。

二、孔隙度

1. 孔隙度的定义

岩石孔隙体积大小用孔隙度定量描述。孔隙体积与岩石总体积之比定义为**孔隙度**, 通常以百分数 (%) 表示, 如假定 V 表示一块岩石的总体积, V_s 表示这块岩石中固体部分的体积, V_p 表示这块岩石中孔隙的体积, 则孔隙度为

$$\varphi = \frac{V_p}{V} \times 100\% = \frac{V - V_s}{V} \times 100\% \quad (1-7)$$

在不同类型的孔隙中, 流体的可流动情况有很大差别。因此, 从油田开发的角度考虑, 只有那种既能储集油气, 又可让其渗流通过的连通孔隙才具有实际意义。为此, 根据孔隙的连通状况可分为连通孔隙 (开放孔隙) 和不连通孔隙 (封闭孔隙)。参与渗流的连通孔隙为有效孔隙, 不参与渗流的则为无效孔隙。因此, 在实际应用中, 引入了总孔隙度 (绝对孔隙度)、有效孔隙度 (连通孔隙度) 及流动孔隙度等概念。

岩石的**总孔隙度**或**绝对孔隙度** φ_t 是指岩石的总孔隙体积 V_{pt} 与岩石外表体积 V 之比, 即

$$\varphi_t = \frac{V_{pt}}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

岩石的**有效孔隙度** φ_e 是指岩石中有效孔隙的体积 V_{pe} 与岩石外表体积 V 之比。有效孔隙体积是指在一定压差下被油气饱和并参与渗流的连通孔隙体积, 即

$$\varphi_e = \frac{V_{pe}}{V} \times 100\% \quad (1-9)$$

有些孔隙虽然彼此连通但由于孔隙的喉道半径极小, 在通常的开采压差下仍难以使流体流过, 又如在亲水岩石孔壁表面常存在着水膜, 相应地缩小了油流动的孔隙通道。因此, 在连通孔隙度基础上, 进一步引出流动孔隙度的概念。

岩石的**流动孔隙度** φ_f 是指在岩石流体能够在其中流动的孔隙体积 V_{pf} 与岩石外表体积 V 之比, 即

$$\varphi_f = \frac{V_{pf}}{V} \times 100\% \quad (1-10)$$

流动孔隙度与有效孔隙度的区别在于, 它随地层中的压力梯度和液体的物理-化学性质等不同而变化。因此, 岩石的流动孔隙度在数值上是不确定的。由上述分析不难理解,

三种孔隙度之间的关系是： $\varphi_t > \varphi_e > \varphi_f$ 。对于储集性很好的岩石，三者差别很小；当岩石的储集性很差时，三者的差别是比较明显的。

当储层岩石具有双重孔隙系统时，如裂缝-粒间孔隙系统，总孔隙度 φ_t 为粒间孔隙度 φ_1 和裂缝孔隙度 φ_2 之和，即

$$\varphi_t = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (1-11)$$

粒间孔隙度和裂缝孔隙度都是相对于岩石总体积而言。实际上，钻井取心很难获得带有裂缝的完整岩心。实验室测定的岩心大都是裂缝储层的基质部分，因而引入**基质孔隙度** φ_m 概念。基质孔隙度只是对基质总体积而言。即

$$\varphi_m = \frac{V_{pm}}{V_m} \times 100 \% \quad (1-12)$$

式中： V_{pm} 是基质孔隙体积； V_m 是基质总体积。由于基质总体积小于岩石总体积，显然 $\varphi_m > \varphi_1$ ，并且 $\varphi_m = \varphi_1 / (1 - \varphi_2)$ 。于是，式 (1-11) 可以写成

$$\varphi_t = (1 - \varphi_2) \varphi_m + \varphi_2 \quad (1-13)$$

2. 影响孔隙度的因素

一般碎屑岩是由母岩经破碎、搬运、胶结和压实而成。因此，碎屑颗粒的粗细、排列方式、分选程度和胶结物的类型与数量，以及成岩后的压实作用等，就成为影响这类岩石孔隙度的主要因素。

岩石颗粒尺寸的大小对岩石总孔隙度的影响不大，但是对有效孔隙度和流动孔隙度的影响显著。

岩石颗粒形态和排列方式对孔隙度的影响很大，接近球形的颗粒比其他形状颗粒所形成的孔隙度大。排列方式不同孔隙度差别也很大，以球形为例的两种排列如图 1-5 所示。图 1-5a 是按正方体排列，所组成多孔介质的孔隙度达 47.6%，每一球形颗粒与其他颗粒的接触点有 6 个；图 1-5b 是按斜方体排列，其孔隙度为 25.9%，每一球形颗粒与其他颗粒的接触点有 12 个。

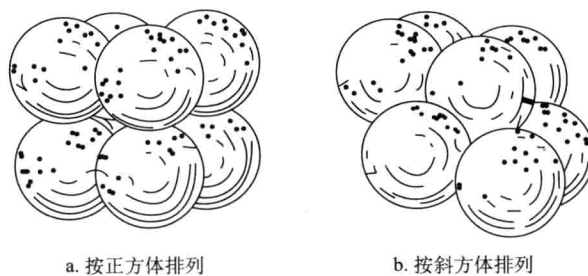


图 1-5 理想圆球形颗粒孔隙介质模型

颗粒的分选程度差时，小颗粒碎屑充填到大颗粒的孔隙中，将降低孔隙度。

随着上覆岩层的加厚和埋藏深度加大，地层静压力和温度的增加，岩石颗粒排列更加紧密，使孔隙度迅速下降，当颗粒紧密排列达最大限度时，上覆地层压力的进一步增加，就会促使颗粒在接触点上的局部溶解，接触点变成接触面，甚至呈凸凹不平的紧密接触。溶解的矿物（如石英）则在孔隙空间形成新的结晶，进一步导致孔隙度的降低，甚至成为

不渗透层。

孔隙度随埋藏深度与上覆地层压力的增大而减小。可以表示成

$$\varphi(Z) = \varphi_0 - A \ln Z \quad (1-14)$$

或

$$\varphi(Z) = \varphi_0 \exp(-BZ) \quad (1-15)$$

式中: Z 为埋藏深度或上覆地层压力; φ_0 为初始孔隙度, 即埋藏深度或上覆地层压力为零时的孔隙度; A 和 B 为岩石的可压缩性系数。

碳酸盐岩的孔隙度随深度的增加而减小也十分明显。由于碳酸盐岩与生物作用关系密切, 成岩后对环境异常敏感 (如在地下水作用下易溶解, 适当温度压力下发生重结晶作用等), 并且碳酸盐岩较碎屑岩脆, 因而更易受构造应力影响, 形成许多裂隙, 增大岩石孔隙度。在相同的应力条件下, 一般白云岩裂缝发育, 石灰岩次之, 而泥灰岩最差。

3. 岩石孔隙度的实验室测定方法

岩石孔隙度的测定方法可归纳为两类, 一种是在实验室测岩心, 另一种是在钻孔中利用地球物理测井方法原位测定岩石孔隙度。这里介绍前一种, 关于不同测井结果与孔隙度的关系, 将在以后相应的章节中介绍。

从岩石孔隙度的定义可以看出, 如果已知岩样的体积和它的孔隙体积, 或者已知岩样的体积和它的颗粒体积, 就可以求得岩石的孔隙度。因此, 只需在实验室测得岩样总体积 V 和孔隙体积 V_p (或颗粒体积 V_s) 两个值, 即可求出孔隙度值。

根据岩样的具体情况不同, 采用不同的方法测定岩石的总体积。

1) 把岩样放入不会渗入岩样孔隙中的液体中来测定岩样的体积。水银可作为这种液体。这个方法的实质就是测量岩样放入水银前和沉入水银后水银体积的变化量。

2) 用某种液体饱和岩样, 通常用煤油作为这种液体, 然后测量岩样放入煤油前后煤油体积的变化量。也可以根据阿基米德原理, 分别测量饱和煤油的岩心在空气中和在煤油中的质量, w_1 和 w_2 , 按下式算出岩样体积:

$$V = \frac{w_1 - w_2}{\rho_0} \quad (1-16)$$

式中: ρ_0 为煤油的密度, g/cm^3 。

上述两种方法适于胶结较好不易破碎的岩样。

3) 对于较疏松易碎的岩石, 可采用封蜡法。其操作过程是, 首先将外表不规则但光滑的岩样称其质量为 w_1 , 再浸入熔化的石蜡中让其表面覆盖一层蜡衣, 再称其质量为 w_2 , 最后将已封蜡的岩样置于水中称得 w_3 , 按下式计算出岩样总体积:

$$V = \frac{w_2 - w_3}{\rho_w} - \frac{w_2 - w_1}{\rho_p} \quad (1-17)$$

式中: ρ_w 和 ρ_p 分别为水和石蜡的密度, g/cm^3 。

4) 对于具有简单几何形状, 如立方体或圆柱体的岩样, 则可以直接测量岩样的几何尺寸, 并计算出岩样的体积。

关于岩石孔隙体积 V_p , 下面是两种常用的测定方法。

(1) 液体饱和法

这种方法是比较岩样饱和液体前后的质量。首先将岩样抽提、洗净、烘干, 在空气中

称量为 w_1 ；然后在真空下使岩样饱和液体（煤油或水），在空气中称出饱和液体后的岩样质量为 w_2 ，若液体密度为 ρ_0 ，则岩石孔隙体积 V_p 为

$$V_p = (w_2 - w_1) / \rho_0 \quad (1-18)$$

(2) 气体膨胀法

这种方法是利用专门仪器气体孔隙度仪进行的。其工作原理是将已知体积（标准室）的气体 V_k 在一定的压力 p_k 下，向未知室作等温膨胀，再测定膨胀后的体系最终压力 p ，该压力的大小取决于未知体积 V 的大小，故由最终平衡压力按波义耳定律可得

$$V_k \cdot p_k = p \cdot (V + V_k)$$

则

$$V = \frac{V_k(p_k - p)}{p} \quad (1-19)$$

目前我国广泛采用此仪器通过测定岩样的孔隙体积，求得孔隙度，所用气体为氮气或氦气。因氦气分子量低，对岩石具有较高的渗透能力，有利于进入岩石孔隙中，故对于较为致密的灰岩和孔隙较小的岩样多采用氦气测定岩石孔隙体积。

在上述测定方法中，由于不同的方法采用不同的工作介质，同一块岩样所测得的 V_p 值可能不相同，要根据介质充满岩心孔隙的程度，确定所测孔隙度值代表何种孔隙度。

第三节 储层岩石的渗透率

在储层研究中，人们首先关注的是储层岩石的孔隙性和渗透性。孔隙性直接影响到单位体积岩石中流体储集数量的多少，而岩石的渗透性则关系到产出能力。从前面的讨论已经知道，岩石孔隙结构是非常错综复杂的，采用微观的研究方法来计算出流过各个单一孔道的流体数量是难以实现的，但可以通过对整块岩石进行某种实验，来测量宏观的、平均的流通能力。因此，对岩石渗透性的研究，主要是建立在实验基础之上。

一、渗透率的定义

用于表示孔隙介质中流体在其孔隙中流动难易程度的量称为该介质的**渗透率**。孔隙介质中单相稳定流的流量，原则上可以由达西公式（H. Darcy, 1856）描述：

$$Q = K \frac{A}{\mu L} \Delta P \quad (1-20)$$

式中： Q 是通过介质的流体流量， m^3/s ； μ 为流体的黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； A 为垂直于流体运动方向的介质横截面， m^2 ； L 为流体穿过介质的厚度， m ； ΔP 为流体两端的压力差， Pa ； K 为渗透率，它具有面积量纲， m^2 ，但是显得过大，通常以 μm^2 作为单位，过去采用达西（D）或毫达西（mD）作为单位。因渗透率具有面积的量纲，可以将其理解为介质中孔隙通道面积的大小。多孔介质孔道面积越大，渗流越容易，渗透率越高。

当岩心全部孔隙为单相液体所充满并在岩心中流动，岩石与液体不发生化学和物理化学作用的条件下，对同一岩心，比例系数值 K 的大小是与液体性质无关的常数。对不同孔隙结构的岩心， K 值不同。因此，在上述条件下，由式（1-22）定义的渗透率 K 是仅仅取决于岩石孔隙结构的参数，我们把这一系数称为岩石的**绝对渗透率**。