

国外地质模型与油藏管理丛书

岩石物理特性手册



PHYSICAL PROPERTIES
OF ROCKS
A WORKBOOK

[德] J.H. 舍恩 (J.H.Schön) 著

魏新善 曹青 程国建 任军峰 译

石油工业出版社

国外地质模型与油藏管理丛书

岩石物理特性手册

[德]J.H.舍恩(J.H.Schön) 著
魏新善 曹青 程国建 任军峰 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书提供了可用于复杂的地球科学不确定性建模中遇到的各种岩石参数,以及岩石各类物理特性之间的相互关联。通过阐述不同类型的岩石物理参数,明确不确定性建模中常用的数值参数,并对各类参数之间的相关性进行综合分析。本书所介绍的各种类型岩石数值模拟参数已通过多种测试进行的验证,可在复杂不确定性地球数值建模中借鉴使用。

本书可供从事石油地质、地球物理等专业的科研人员及石油院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩石物理特性手册/[德]J.H.舍恩著;魏新善等译.
—北京:石油工业出版社,2016.9
(国外地质模型与油藏管理丛书)
书名原文:Physical Properties of Rocks:A Workbook
ISBN 978-7-5183-1399-0

I. 岩…
II. ①J… ②魏…
III. 岩石物理性质-手册
IV. P584-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 192053 号

Physical Properties of Rocks: A Workbook
J.H.Schön
ISBN:978-0-444-53796-6
Copyright © 2011 by Elsevier. All rights reserved.
Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and Petroleum Industry Press.
Copyright © 2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.
All rights reserved.
Published in China by Petroleum Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.
本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd.授予石油工业出版社有限公司在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。
本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。
北京市版权局著作权合同登记号:01-2013-9042

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)64523541 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

2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:21.5
字数:520千字

定价:129.00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

《国外地质模型与油藏管理丛书》

编 委 会

主 任：屈 展

副主任：方 明 肖忠祥 陈军斌 程国建

主 审：屈 展 方 明

编 委：陈军斌 程国建 肖忠祥 章卫兵

王俊奇 韩继勇 张 益 林加恩

魏新善 曹 青 闫 健 张国强

双立娜 李小和 刘 焯 李 中

原 书 序

岩石物理特性起始于阿尔奇传统经典公式,在地学、石油工程及相关领域的应用程序中起到关键的作用。它帮助我们了解控制参数及其相关性:

(1)在勘探技术方面起到戏剧性作用的参数;

(2)表征储层特征(含油气性、含水性、矿物、地热资源)以及地层和构造。

岩石物理学是一门复杂的多学科融合的科学,类似地震勘探、核磁共振测试和测量光谱等高尖端技术,具体实例在相关技术手册中可查。

因此,对于这本较为复杂、专业且详细讲解岩石物理教科书,我试图从我本人的观点来综合解释各种基本原理。我与同事在大学中多年的教学经验帮助我完成并完善本书。

当我还是个学生时,我有一本关于《理论物理学》的教材(由乔治爵士撰写),他提到“这本书不是直接将读者带至科学顶峰且不用费力的电梯,它应是一本登山指南,作为登山的大本营,最终将带领读者登上科学顶峰”。我想强调“大本营”是指那些为进一步获取更好发现所提供的基础准备和训练。

回顾我的职业生涯,我很荣幸地能从事与岩石相关的科研工作。在本书中,我将尽力把研究岩石过程中的喜乐与大家分享。

“通过一粒砂子去发现世界,
通过一朵野花去发现天堂,
用你的手抓住无限,
瞬间即是永恒……”

William Blake (1757—1829)

译者前言

随着高新技术的发展及管理理念的更新,进入 21 世纪的油气工业面临诸多挑战,如从定性地质构造观察到定量建模描述、从微观结构分析到油藏三维可视化展布、从历史拟合到油藏自动监测、从分散管理到集成式优化管理、从单一数据源到多异构数据体的大规模集成应用等。这些转型的根本目标还是油气生产率的提升以及对安全环保等因素的考量,为了应对这些挑战,西安石油大学组织专家、学者翻译了 8 本相关外文原版专著,形成《国外地质模型与油藏管理丛书》,本套丛书各分册为《集成油藏资产管理——原理与最佳实践》《油藏流线模拟——理论与实践》《实用地质统计学——SGeMS 用户手册》《地球科学中的不确定性建模》《石油地质统计学》《岩石物理特性手册》《油藏模拟——历史拟合及预测》《油藏监测》。本丛书得到西安石油大学出版基金,陕西省工业攻关计划项目“致密油藏压裂水平井关键技术研究”(2013K11-22),国家重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程(2016ZX05050)”,陕西省工业科技攻关项目“鄂尔多斯盆地致密砂岩储层微观尺度智能化表征”(2015GY104),国家自然科学基金“鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气藏成藏物性界限研究”(41402121),西部低渗—特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心和陕西省油气田特种增产技术重点实验室联合资助。

本册原文专著是丛书《Handbook of Petroleum Exploration and Production》的第八册,丛书主编 John Cubitt,本丛书前 7 个分册为:

分册 1:《Operational Aspects of Oil and Gas Well Testing》

分册 2:《Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists》

分册 3:《Well Test Analysis》

分册 4:《A Generalized Approach to Primary Hydrocarbon Recovery of Petroleum Exploration and Production》

分册 5:《Deep-Water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs》

分册 6:《Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers》

分册 7:《The Sea of Lost Opportunity》

本分册由魏新善、曹青两位博士组织翻译,其中,第 1 章至第 3 章由魏新善翻译,第 4 章、第 8 章由程国建博士翻译,第 5 章至第 7 章由曹青翻译,其余由任军峰翻译,魏新善和程国建对全书进行了统稿及校对。由于译者专业知识及外文水平所限,难免在原文理解、语义阐释、文字表达方面不够准确,甚至出错,希望读者朋友多提宝贵意见和建议。联系方式:西安石油大学数字油田研究所, dofi@xsyu.edu.cn。

译 者

致 谢

首先,对我的朋友、同事和学生的帮助表示深深的感谢,感谢他们分享想法来帮助我完成本书。

同时,感谢编辑 Erika Guerra,她花费大量的时间来编辑本书的文本、数字、引用及相关细节。我特别感谢 Erika Guerra,她不仅是一个技术编者,还指导了我很多的写作基础。

在我职业生涯的过程中,我非常荣幸能与一些具有相同热情的人一起共事。这样的人有很多,在此我谨向其中几位表示感谢:我的同事及好友 Daniel Georgi 和 Allen Gilchrist 先生,有幸能与他们一起在核磁共振和核能部分教学并开展科学研究。我们长期以来的合作给了我最大的动机来撰写本书。Frank Börner 曾是我的学生,现在是我的同事及好友,他在岩石电性方面给了我很多宝贵的见解。

在多所大学(德国的 BergakademieFreiberg 学院、莱奥本的 Montanuniversität 学院、澳洲 Graz 技术大学和科罗拉多矿业学院)的教学工作形成了一支高效的科研团队,并对本书提供重要支持。部分组员帮我测试了一些主要实验数据,这也是我们学科中少见的特性参数。我非常感谢 Nina Gegenhuber 提供的岩石弹性及热性能测试结果。

通过全新的宝贵的经验,研究成果的分享及实际问题的解决处理,我不仅能在大学中教授相关知识,也能为工业生产提供相关培训。特别感谢休斯敦 Baker Atlas 公司和莱奥本 HOT-Engineering 公司在其实际应用中采用本书的基础参数并给予验证。

感谢部分公司和机构授权我使用相关的资料,特别是 Baker Atlas 公司和 Baker Hughes 公司, Schlumberger 公司, AGU, AAPG, EAGE, SEG, SPE 和 SPWLA。

感谢 Elsevier 公司 Linda Versteeg, Derek Coleman 和 Mohana Natarajan 等的合作。

写一本书需要一个能够带来激励、使注意力集中并不断地刷新作者耐心的创作环境,我的太太 Monika 完美地完成了这个工作并给予我很多支持。同样感谢我的儿子,他每天旺盛的精力和自律工作的态度,鼓励我充分利用好点滴时间。

目 录

第 1 章 岩石分类及基本特性	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 岩浆岩	(1)
1.3 变质岩	(3)
1.4 沉积岩	(3)
1.5 常见岩石物理特性	(9)
第 2 章 孔隙特征	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 孔隙度	(12)
2.3 内部比表面积	(20)
2.4 孔隙空间中的流体—饱和度与总体积流体	(21)
2.5 渗透率	(22)
2.6 润湿性	(41)
2.7 流体分布——储层中的毛细管压力	(42)
2.8 实例:砂岩——第 1 部分	(51)
第 3 章 核磁共振—岩石物理性质	(55)
3.1 概述	(55)
3.2 物理原理	(56)
3.3 核磁共振测量原理	(56)
3.4 孔隙内流体的核磁共振弛豫机理与流体表面效应	(59)
3.5 应用	(65)
第 4 章 岩石密度	(71)
4.1 定义与单位	(71)
4.2 岩石组分的密度	(71)
4.3 岩石密度	(75)
第 5 章 岩石的放射性	(78)
5.1 基础知识	(78)

5.2	天然放射性	(78)
5.3	伽马射线与岩石的相互作用	(92)
5.4	中子与地层的相互作用	(95)
5.5	核测量在矿物分析中的应用	(101)
5.6	实例:砂岩——第 2 部分	(105)
第 6 章	弹性特征	(108)
6.1	基本原理	(108)
6.2	岩石组分的弹性特征	(112)
6.3	岩石弹性波速度	(116)
6.4	岩浆岩与变质岩的弹性波速度	(117)
6.5	沉积岩的弹性波速度	(119)
6.6	各向异性	(131)
6.7	基本原理	(136)
6.8	地震参数反映的储层特征	(164)
6.9	弹性波衰减	(169)
6.10	弹性特征的例子:砂岩(含气)	(175)
第 7 章	地质力学特征	(178)
7.1	概述	(178)
7.2	分类参数	(179)
7.3	基本地质力学特性和过程	(181)
7.4	静态弹性模量和动态弹性模量之间的关系	(188)
7.5	地震波速度与强度间的关系	(192)
第 8 章	电性特征	(198)
8.1	基础知识	(198)
8.2	岩石组成的电性特征	(199)
8.3	岩石电阻率	(203)
8.4	纯净岩石——理论和模型	(209)
8.5	泥质岩,泥质砂岩	(215)
8.6	层状泥质砂岩及层状砂岩——宏观非均质性	(220)
8.7	岩石的介电性能	(224)
8.8	复电阻率——频谱激发极化	(234)
8.9	实例:砂岩——第 3 部分	(242)

第 9 章 热力学性能	(244)
9.1 概述	(244)
9.2 矿物和孔隙物质的热力学性能	(245)
9.3 岩石的热力学性能	(248)
9.4 理论与模型	(261)
第 10 章 磁特性	(271)
10.1 基本原理与单位	(271)
10.2 岩石成分的磁特性	(273)
10.3 岩石的磁特性	(277)
第 11 章 岩石物理特性之间的关系	(285)
11.1 概述	(285)
11.2 基于层状模型的关系——利用测井解释进行孔隙度与矿物成分估算	(286)
11.3 热传导性和弹性波速率之间的关系	(292)
附录 A	(301)
附录 B	(305)
参考文献	(306)

第 1 章 岩石分类及基本特性

1.1 概述

岩石是由一种或多种天然矿物形成的集合体。其内通常发育孔隙或裂缝,因此含有一定量的流体。

根据岩石地质成因及其形成演化过程的差异,可分为 3 个大类:岩浆岩类(岩浆岩)、变质岩类(变质岩)、沉积岩类(沉积岩)。

地球上岩石的形成演化过程如图 1.1 所示,通常地壳深处的岩浆结晶先形成岩浆岩,随后岩浆岩在地表受风化剥蚀作用和化学作用发生分解,经运移形成不同组分和结构的沉积岩;在围岩温度和压力发生较大改变的情况下,任何类型的岩石都可以转变成为变质岩,同时岩石会发生熔融和重结晶作用。

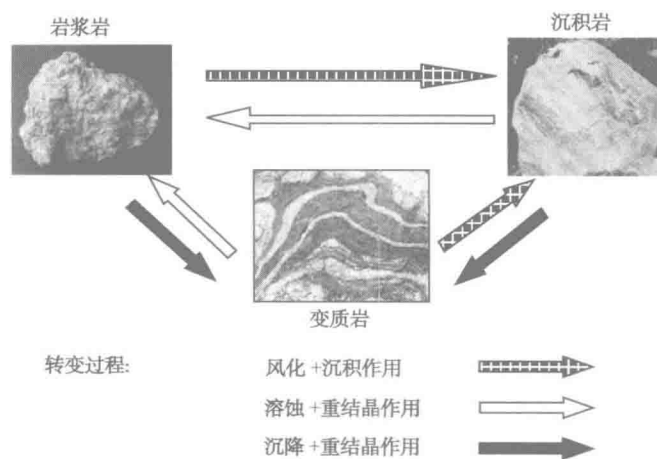


图 1.1 岩石的形成演化示意图

由于沉积岩对储层勘探(油气、水等)非常重要,而且在地表分布广泛,因此,对其论述较为详细。更详细的岩石分类及其在地球上的丰度可以参考《A Handbook of Physical Constants》(AGU Reference Shelf 3)(Best, 1995)。

1.2 岩浆岩

岩浆岩类由熔融的岩浆结晶形成。根据其在地壳中的来源及状态分为 3 种类型:

- (1) 侵入岩在地壳深部发生结晶,可以形成大型的岩体;
- (2) 火山岩在地表浅部形成,通常形成毯状的岩层;

(3)岩脉的纵向延展较为明显,而在某一水平方向上横向延展,通常可分割不同的地质单元。

岩浆岩根据其化学或者矿物组成可划分为酸性岩、中性岩、基性岩和超基性岩等几大类。矿物学分类包括以下几种类型(图 1.2):

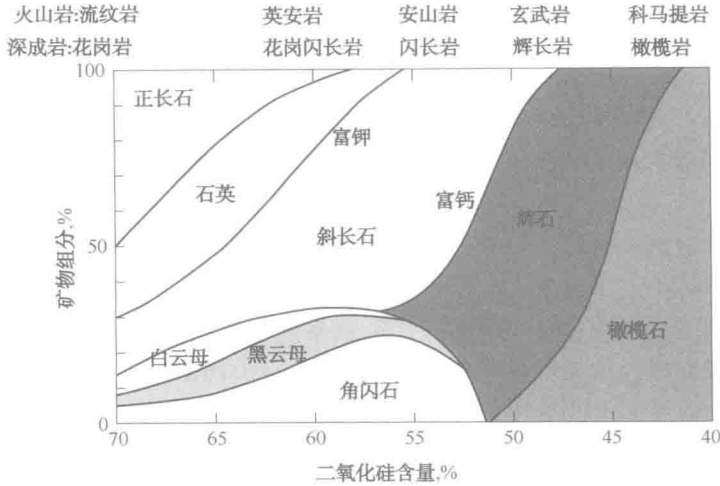


图 1.2 普通岩浆岩的矿物学分类

改自 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mineralogy_igneous_rocks_EN.svg

- (1) 富长英质或硅质的岩石,例如花岗岩和流纹岩;
- (2) 中性岩,例如花岗闪长岩、闪长岩、英安岩、安山岩;
- (3) 镁铁质岩,例如玄武岩和辉长岩;
- (4) 超镁铁质岩,例如橄榄岩和科马提岩。

矿物组成决定了岩石的物理特性(当岩石类型从长英质向镁铁质转变,随着岩石密度的增大,其地震波速度也会随之增大),表 1.1 给出了岩浆岩类的平均矿物组成。

表 1.1 上地壳及主要侵入岩矿物组成对比表 单位:%(体积分数)

矿物	地壳	花岗岩	花岗闪长岩	石英闪长岩	闪长岩	辉长岩
斜长石	41	30	46	53	63	56
碱性长石	21	35	15	6	3	
石英	21	27	21	22	2	
角闪石	6	1	13	12	12	1
黑云母	6	5	3	3	5	1
斜方辉石	2				3	16
斜辉石	2				8	16
橄榄石	0.6					5
磁铁矿 钛铁矿	2	2	2	2	3	4
磷灰石	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.6

注:引自(Wedepohl,1969),同见(Huckenholz,1982)和(Schön,1996)。

1.3 变质岩

“变质岩是变质作用的结果。变质作用造成岩浆岩和沉积岩在地壳体系中随压力和温度变化过程中的相态转变”(Huckenholz, 1982)。在转变过程中,原有的矿物集合体(岩浆成因或沉积成因)受一定地质时期的热力学条件影响而转变为新的矿物集合体。

通过不同类型的变质作用(区域变质、接触变质、动力变质等),各种不同成因的岩石形成变质岩系列,典型的变质岩有千枚岩、片岩、片麻岩、矽卡岩、大理岩、流纹岩、石英岩、蛇纹岩和角闪岩。

受变质作用的影响,变质岩多具有相互平行的层状结构并导致其物理特性显示明显的各向异性,如矿物轴线、断裂和裂纹。

1.4 沉积岩

1.4.1 概述

沉积岩对于油气勘探是非常重要的,因为大多数的商业油气藏都赋存在沉积岩之中,而沉积岩的储集性能通常以孔隙度和渗透率来进行表征。从农业到建筑物的基底,从地下水资源到整个自然界均能发现沉积岩,其在地表的覆盖面积超过 50%,因此沉积岩对人类生活具有重要的意义。

沉积岩类是通过一系列的物理作用、化学作用和生物作用而形成的。

岩浆岩、沉积岩和变质岩的母岩通过风化剥蚀作用分解为:

- (1) 稳定的矿物颗粒(如硅酸盐矿物、岩屑);
- (2) 次生矿物(如黏土);
- (3) 水溶性离子(钙离子、钠离子、钾离子、硅离子等)。

风化剥蚀的矿物通过水、冰或风等载体搬运后沉积:

- (1) 矿物颗粒附着在沉积物表面;
- (2) 无机状态或有机状态下,溶解物质的富集并发生沉淀;
- (3) 腐烂的植物和动物的残留物也可以进入沉积环境。

岩石固结作用发生在沉积物质压实之后,原生孔隙中的地层水溶解并形成新的成岩胶结矿物(自生矿物)(Best, 1995)。

通常沉积岩分为两种常见类型:(1)碎屑岩(硅质碎屑岩);(2)碳酸盐岩及蒸发岩。

硅质碎屑岩由各种硅酸盐颗粒组成;碳酸盐岩主要由白云石和方解石两种矿物组成。碎屑岩通常经过一定距离的搬运后沉积形成,而碳酸盐岩则是原地形成的(主要在海洋环境)。碎屑岩的化学组分相对较为稳定,并形成了不同类型的粒间孔隙。而碳酸盐岩化学组分较为不稳定,其孔隙由各种因素形成,因而孔隙结构非常复杂。

除了矿物组成不同,对于岩石的地质特征通常使用“岩性”概念来描述,尤其针对沉积岩。美国地质学会地质词典将岩性定义为“岩石的物理特征”,其特征主要受矿物组成(矿物学)

和骨架结构影响(Jorden 和 Campbell, 1984)。

1.4.2 碎屑岩

1.4.2.1 分类

碎屑岩的形成过程如下:岩石组分受到风化剥蚀,组分发生变化并运移;矿物组分的沉淀和沉积;压实和成岩过程。

碎屑岩的典型代表有砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩和黏土岩^①。

碎屑岩(砂岩、粉砂岩和黏土岩)按照其碎屑组分的颗粒大小进行分类(图 1.3)。

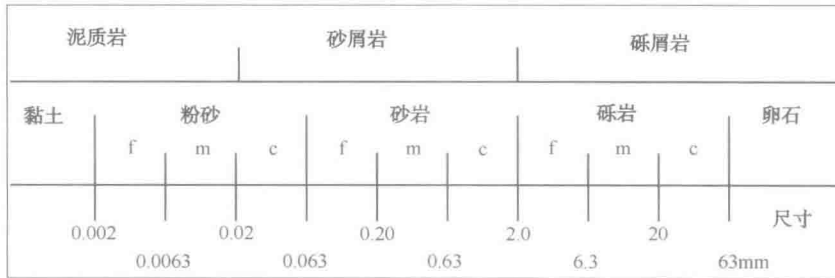


图 1.3 根据颗粒大小分类的碎屑沉积岩

f—细粒;m—中粒;c—粗粒。术语砂级、粉砂级和泥级表示在其对应颗粒大小范围内重量超过 50%的成分

碎屑沉积岩的命名原则如下:

- (1) 砂岩,由石英和长石组成,其中大于 50%的颗粒粒径为砂粒级(大于 0.063mm);
- (2) 粉砂岩,其石英含量通常小于砂岩,其中大于 50%的颗粒粒径为粉砂级(大于 0.0063mm)(Jorden 和 Campbell, 1984);
- (3) 黏土岩,由黏土矿物组成,其中大于 50%的颗粒粒径为黏土级。

“页岩”通常是由黏土级颗粒(主要是黏土矿物)和粉砂级颗粒(石英、长石、方解石)组成的混合物,混有极少量的砂粒级颗粒,诸如石英、长石和方解石等(Jorden 和 Campbell, 1984)。Serra(2007)写道:“根据 Yaalon(1962)针对 10000 个页岩样品的检测报告结果可知,统计数据均值显示页岩中 59%组分为黏土矿物,并以伊利石为主;20%组分为石英和燧石,8%组分为长石,7%组分为碳酸盐岩,3%组分为铁氧化物,1%组分为有机质,2%组分为其他混合物质……泥岩与页岩是具有相同颗粒大小和成分的一类岩石,但是泥岩通常不具有层状结构和易碎裂的特性……”例如,Borysenko 等(2009)对于 Pierre 页岩鉴定后显示其具有如下的矿物成分:石英约占 29%,高岭石和绿泥石约占 8%,伊利石、白云母和蒙皂石类约占 26%,云母约占 24%,正长石、白云石和钠长石类约占 13%。

页岩的物理特性通常受黏土矿物组成的控制[例如,伽马辐射、电性、阳离子交换能力(CEC)、中子响应、渗透率],因此对页岩和黏土类的区别,便于更好地理解沉积岩的物理特性:

- (1) 黏土通常描述的是一组矿物(含水的铝硅酸盐,详见 1.4.2.3 节);

^①注意除了这组主要的碎屑岩,也存在一些其他类型,如碎裂岩(冰碛)或火山碎屑岩(凝灰岩)。

- (2) 黏土一定程度上限定了颗粒大小(小于 0.002mm);
- (3) 页岩通常描述的是一种岩石类型,如上述定义(“黏土岩”指的也是一种岩石类型)。碎屑岩的物理特性主要受以下因素控制:

- (1) 结构特征(颗粒特征、大小、形状、空间定向);
- (2) 矿物组成,主要受黏土矿物的影响。

1.4.2.2 结构特性—颗粒大小参数

结构特征包括碎屑岩中颗粒粒径、形状和分布状态。

颗粒粒径是碎屑岩分类和定义的参数之一,通常情况下岩石颗粒都是非球状的不规则形状,所以此类“颗粒直径”大小决定于其测定技术:

- (1) 筛析法,横断面最短轴大小的估算方法(对应使用的网眼大小)或是按照 Stokes 定律的球体等效测量法(沉降分析法);
- (2) 图像或激光扫描技术对于具有代表性的颗粒尺寸进行数值描述。

颗粒大小 d 的单位通常是 mm 或 μm 。也使用 φ 尺度:

$$\varphi = -\log_2 d \quad (1.1)$$

式中, d 的单位是 mm。

如图 1.4 所示的岩石颗粒大小分布状态,其通常由累积分布曲线(颗粒大小分布曲线)表示。

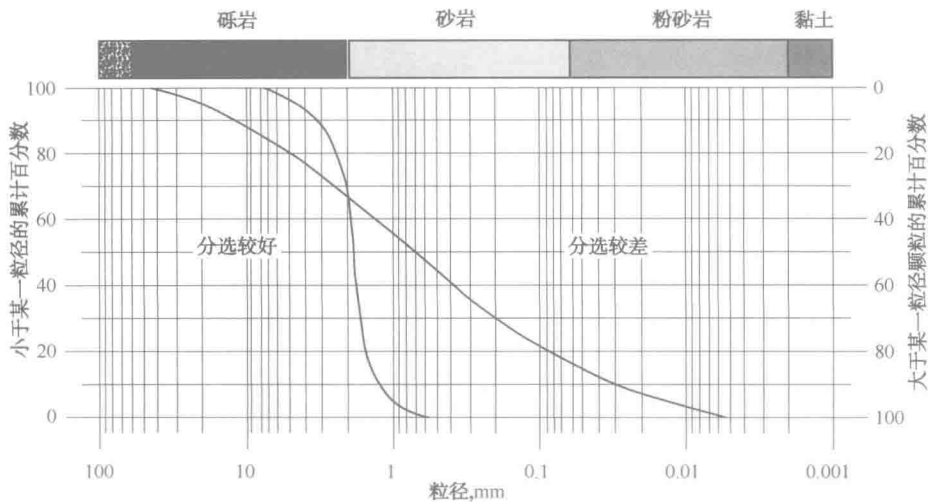


图 1.4 不同类型碎屑岩粒径大小分布图

使用定义的百分数从颗粒大小分布中可以得到各类统计数据或参数,称为累计相对密度百分数:

(1) 粒径中值,确定曲线中 d_{50} 处的粒径大小(颗粒大小的单位是 mm,在第 50 个百分位)。

(2) 颗粒分类描述了分布区间范围大小,它是一个单独颗粒大小 $S_0 = (d_{25}/d_{75})^{0.5}$,其中 d_{25} 是第 25 个百分位的颗粒大小(单位: mm),其中 d_{75} 是第 75 个百分位的颗粒大小(单位: mm)。

(3) 偏度, 确定粒度分布的对称性 $S_k = d_{25}d_{75}/d_{50}^2$ 。

颗粒形状(球度)描述的是特定颗粒如何近似为一个球体形状。颗粒圆度(含有棱角)是测定边和角的锐利程度。图表的比较用于所有特性。

颗粒充填是颗粒总量密度的测定。在物理特性的概念中, 单个颗粒的空间排列可以定义为内部构造——它控制岩石的各向异性。

1.4.2.3 一些黏土的基本特性

在测井解释过程中, 页岩和黏土可以变换着使用; 两者的不同已经在之前的 1.4.2.1 节中讨论过了。页岩是一种细粒的岩石, 其内包含少量的黏土矿物和粉砂。

黏土矿物是具有片状结构的铝硅酸盐。主要分为两类结构形态:

- (1) 四面体单元, 硅原子为中心四周为氧原子;
- (2) 八面体单元, 氧原子和羟基围绕着中心的铝原子^①。

黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙皂石、绿泥石)是这两种结构单元以不同的样式叠加组合形成的组合体(图 1.5)。每个图形均代表为一个晶体。


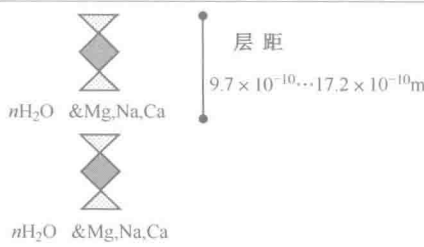
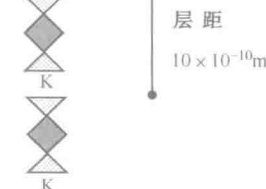


黏土矿物组成 片状硅四面体 铝氧八面体层 (三水铝石, 水镁石)	
蒙皂石 $(Ca, Na)_7(Al, Mg, Fe)_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$ 密度=2.33g/cm ³	
伊利石 $K_{1-1.5}Al_4(Si_{7.0-6.5}Al_{1-1.5}O_{20}(OH)_4$ 密度=2.76g/cm ³	
绿泥石 $(Mg, Al, Fe)_{12}(Si, Al)_8O_{20}(OH)_{16}$ $(Mg, Al, Fe)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$ 密度=2.77g/cm ³	
高岭石 $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ 密度=2.69g/cm ³	

图 1.5 黏土矿物及其特性(据 Jorden 和 Campbell, 1984)

①一些情况中也可能是镁或铁。