

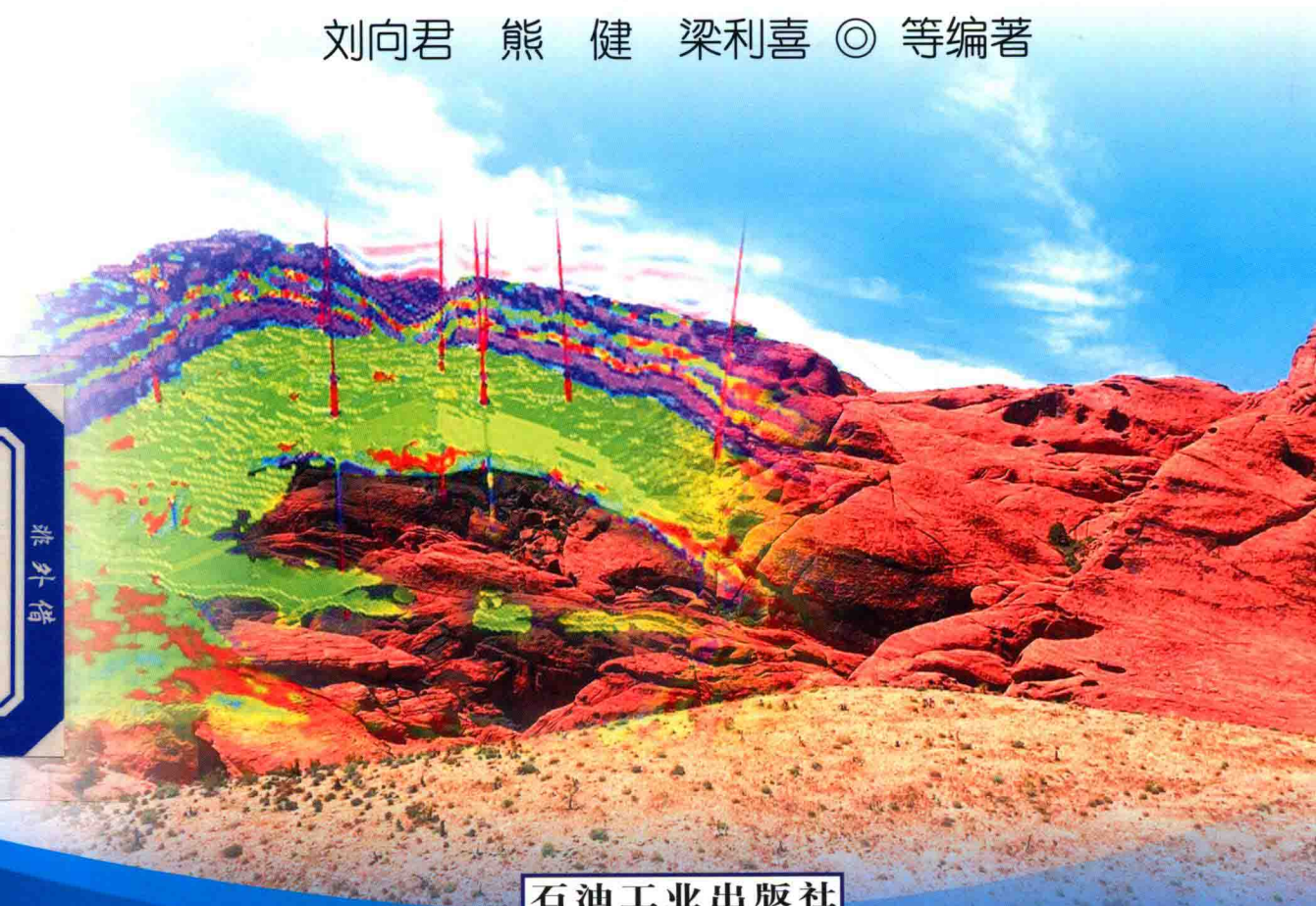


高等院校石油天然气类规划教材

# 岩石物理学基础

(富媒体)

刘向君 熊 健 梁利喜 © 等编著



非外借

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

# 岩石物理学基础

(富媒体)

刘向君 熊 健 梁利喜 等编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书结合勘查技术与工程专业的特点,较为全面系统地介绍了岩石物理的基本概念、产生机制及影响因素、室内实验测试原理和方法,以及岩石物理研究成果的基本应用。在传统出版的基础上,本书以二维码为纽带,加入了丰富的富媒体资源,为读者提供形象、便利的学习环境。

本书是面向勘查技术与工程本科专业学生的教学用书,也可供石油工程、地质工程及相关领域的学生和研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

岩石物理学基础:富媒体/刘向君等编著. —北京:石油工业出版社, 2018. 11

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5183-3015-7

I. ①岩… II. ①刘… III. ①岩石物理学—高等学校—教材  
IV. ①P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 247086 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523693

图书营销中心:(010)64523633 (010)64523731

经 销:全国新华书店

排 版:北京密东文创科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:326 千字

---

定价:32.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

岩石物理学以岩石为研究对象,以物理学为研究手段,研究岩石的各种“场”物理特性、产生机制及其与岩石的客观物性之间的相互关系,具体地,深度挖掘岩石的声学、电学、磁学、重力等“场”物理性质的形成机制、表征参量及其与岩石的矿物组成、结构、构造、饱和流体、力学等客观物性和赋存环境之间的相互关系,进而为利用各种“场”物理性质实现对岩石客观物性、能源矿产资源的分布、地球内部和外部地质作用的预测提供理论和方法支撑,为新的地球物理探测仪器技术的研发指明方向。因此,岩石物理研究在应用地球物理领域具有重要的地位和作用,是能源矿产勘探开发、地震预测、工程地质勘查等领域的基础。岩石物理学的研究对象及研究内容决定了其实验性、基础性、综合性和多学科交叉性都很强。

岩石物理学的研究包含了物理学、声学、电学、力学、地质学、岩石学、地球物理学、地球化学、地热学、工程学和实验测试技术等众多学科,同时又涉及能源矿产勘探开发、地震预测、工程地质勘查等多个应用领域。这种多学科、多技术的综合性、交叉性和复杂性,导致其一直以来研究相对滞后,尤其除岩石声波速度特性、导电特性之外的其他领域的研究则相对更加薄弱。随着我国能源矿产勘探开发利用快速转向深部复杂地层和大洋等特殊环境,以及天然气水合物、页岩气等非常规资源和地热等可再生能源的利用,加之国民经济快速发展对地下空间资源开发利用、对地震等地质灾害准确预测等的迫切需要,地球物理勘探技术的快速发展与突破的重要性已被广大科技工作者越来越广泛和深入地认识到,技术的创新与进步亟待岩石物理研究的突破。由于岩石物理研究和应用领域长期的分割性,现有的相关书籍,或者以地震岩石物理,或者以岩石的导电特性,或者以岩石力学,或者以油气层岩石物理为对象展开,目前国内外还未见到全面系统介绍岩石物理学相关研究内容及发展的书籍。而作为勘查技术与工程专业的本科生,其面向的对象为地下地质体,既包括岩石,也涵盖岩石中的各种流体,系统全面学习、理解并架构岩石物理学的相关基础知识,对其今后主动利用岩石所具有的已知的不同“场”物理属性或挖掘利用岩石的新的特殊“场”物理属性,认识和分析地下岩石及其流体的性质是至关重要的。因此,编写一本内容涵盖全面,既有系统性、基础性,又有启发性、引导性和拓展性的岩石物理基础教材十分必要。本书正是基于这样的考虑编写完成的。

本书是面向勘查技术与工程本科专业学生的教学用书,结合勘查技术与工程专业的特点,全书共分为六章,较为全面系统地介绍了岩石物理的基本概念、产生

机制及影响因素、室内实验测试原理和方法,以及岩石物理研究成果的基本应用。岩石物理学涉及多学科,综合性和交叉性都很强,因此,本书力求简明扼要,针对本科人才培养的特点,突出基础性、启发性、引导性、拓展性,力求使学生既对基础岩石物理有比较清晰的认识,又对岩石物理学研究的前缘领域有所了解。

随着我国油气等能源矿产资源开发转向深部复杂地层,以及页岩气、天然气水合物、地热等非常规资源和地热等新能源,资源勘探开发的难度越来越大,安全风险越来越高。因此,作为以油气为特色的石油高校的教学和科研工作者,我们在编写本书的过程中,既体现了岩石物理学研究在应用地球物理领域的基础性特点,也充分凸显了油气工业中岩石物理研究的特色,力求在为勘查技术与工程学生编写一本高质量教学用书的同时,也为石油工程、地质工程及相关领域的学生 and 研究人员提供一本较为系统全面的学习、研究参考用书。

本书主要由刘向君教授及研究团队编写完成。全书由刘向君教授组稿、统稿、定稿。青年教师熊健副研究员完成全书格式编排,并对全书的图、表及参考文献进行了统一规范整理,收集整理完成所有媒体资源。熊健副研究员、刘向君教授共同完成第一、二章;熊健副研究员、梁利喜副教授共同完成第三章;刘向君教授、刘红岐教授、熊健副研究员、青年教师张泽宇博士共同完成第四章、第六章;青年教师段茜、熊健副研究员、刘向君教授共同完成第五章。同济大学刘堂晏教授、西南石油大学谈德辉教授、孙良田教授对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵建议。

感谢国家自然科学基金石化联合基金重点课题“页岩气低成本高效钻完井技术基础研究”(U1262209)在该书完成过程中提供的支持与资助。

在此向所有为本书付出辛勤劳动的各界人士致以衷心的感谢,没有他们的辛勤劳动就不会有本书的出版。

本书的视频资源采编于网络开放资源,在此对原作者表示感谢,同时也向本书所有引用资料的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加上岩石物理学的复杂性,本书难免存在错误和不足之处,在此恳请广大读者批评指正。

刘向君

2018年7月

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第一章 绪论                | 1   |
| 第一节 岩石物理学的研究对象及内容     | 1   |
| 第二节 岩石物理学的研究方法        | 2   |
| 习题                    | 3   |
| 第二章 岩石的基础物性           | 4   |
| 第一节 岩石的骨架特征           | 4   |
| 第二节 岩石的孔隙与孔隙度         | 20  |
| 第三节 岩石中的流体及流体饱和度      | 28  |
| 第四节 岩石的密度             | 41  |
| 第五节 岩石的压缩性            | 46  |
| 第六节 岩石的渗透率            | 49  |
| 第七节 岩石的毛细管压力曲线        | 61  |
| 习题                    | 66  |
| 第三章 岩石力学基础            | 68  |
| 第一节 岩石的受压力学特性         | 68  |
| 第二节 岩石的抗拉强度特性         | 79  |
| 第三节 岩石的抗剪强度特性         | 81  |
| 第四节 岩石的其他重要力学特性       | 84  |
| 第五节 地应力及其室内测试方法       | 92  |
| 第六节 岩石的强度准则           | 96  |
| 习题                    | 99  |
| 第四章 岩石电学基础            | 102 |
| 第一节 岩石导电的基本概念         | 102 |
| 第二节 地层水电阻率            | 103 |
| 第三节 纯砂岩的导电特征——阿尔奇岩电关系 | 107 |
| 第四节 黏土矿物的导电性          | 109 |
| 第五节 含黏土矿物岩石的典型导电模型    | 114 |
| 第六节 岩石的电化学作用          | 118 |
| 第七节 岩石的介电特征           | 120 |
| 第八节 岩石电学参数的实验室测定      | 128 |
| 习题                    | 132 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第五章 岩石声学基础          | 133 |
| 第一节 岩石声波的相关基础知识     | 133 |
| 第二节 岩石波速和衰减的实验室测试方法 | 146 |
| 第三节 岩石声学特性的应用       | 149 |
| 第四节 岩石波速模型          | 154 |
| 习题                  | 160 |
| 第六章 岩石的其他物理性质       | 161 |
| 第一节 岩石的放射性          | 161 |
| 第二节 岩石的磁性           | 169 |
| 第三节 岩石的热物理性质        | 179 |
| 第四节 岩石的核磁共振特性       | 182 |
| 习题                  | 188 |
| 参考文献                | 189 |

# 富媒体资源目录

| 序号 | 名称      | 页码  | 序号 | 名称      | 页码  |
|----|---------|-----|----|---------|-----|
| 1  | 彩图 1-1  | 3   | 25 | 彩图 4-12 | 114 |
| 2  | 彩图 2-1  | 5   | 26 | 彩图 4-32 | 128 |
| 3  | 彩图 2-2  | 7   | 27 | 彩图 4-35 | 129 |
| 4  | 彩图 2-8  | 13  | 28 | 视频 7    | 133 |
| 5  | 视频 1    | 17  | 29 | 视频 8    | 135 |
| 6  | 彩图 2-22 | 20  | 30 | 视频 9    | 137 |
| 7  | 彩图 2-24 | 22  | 31 | 视频 10   | 137 |
| 8  | 彩图 2-27 | 24  | 32 | 视频 11   | 137 |
| 9  | 视频 2    | 24  | 33 | 视频 12   | 137 |
| 10 | 视频 3    | 39  | 34 | 彩图 5-17 | 146 |
| 11 | 彩图 2-45 | 43  | 35 | 彩图 6-7  | 164 |
| 12 | 视频 4    | 61  | 36 | 视频 13   | 165 |
| 13 | 彩图 2-69 | 63  | 37 | 彩图 6-9  | 168 |
| 14 | 视频 5    | 71  | 38 | 彩图 6-18 | 180 |
| 15 | 彩图 3-13 | 76  | 39 | 视频 14   | 181 |
| 16 | 彩图 3-24 | 80  | 40 | 视频 15   | 181 |
| 17 | 彩图 3-25 | 80  | 41 | 视频 16   | 183 |
| 18 | 视频 6    | 80  | 42 | 彩图 6-21 | 184 |
| 19 | 彩图 3-29 | 82  | 43 | 彩图 6-24 | 186 |
| 20 | 彩图 3-31 | 82  | 44 | 彩图 6-25 | 186 |
| 21 | 彩图 3-37 | 85  | 45 | 彩图 6-26 | 188 |
| 22 | 彩图 3-44 | 91  | 46 | 彩图 6-27 | 188 |
| 23 | 彩图 3-46 | 92  | 47 | 彩图 6-28 | 188 |
| 24 | 彩图 4-3  | 104 |    |         |     |

本教材的富媒体资源由刘向君及其研究团队提供,若教学需要,可向责任编辑索取,邮箱为 826630050@qq.com。

# 第一章

## 绪论

岩石是由一种或几种造岩矿物按一定方式结合而成的天然集合体,是构成地壳的主要物质,是地球内部和外部地质作用的产物。研究岩石的各种物理性质,有助于人类更好地了解和认识地球内部的圈层结构、动力学性质,为能源矿产、地质灾害的成因机制与分布预测提供指导。

### 第一节 岩石物理学的研究对象及内容

岩石物理学以岩石为研究对象,以物理学为研究手段,研究岩石的各种“场”物理属性、产生机制、相互关系及应用。岩石作为一种特殊的材料,具有很多物理性质,如密度、弹性、导电性、导磁性、导热性、放射性等。这些物理性质可以形成可观测的各种地球物理场,包括天然存在的地球物理场和人工激发的地球物理场。其中地球的重力场、地磁场、地电场、地温场、核物理场是天然存在的地球物理场;由人工爆炸诱发在地下传播的弹性波场、向地下供电在地层中产生的局部电场、向地下发射电磁波激发出的电磁场等,都属于人工激发的地球物理场。岩石物理学主要研究能形成地球物理场的各种岩石物理性质及其成因机制,并通过这些场物理性质获得对地层的组分、孔隙性、渗透性、结构、构造等各种客观物理属性,以及地球内部结构、动力学特性等的认识、评价,进而实现相关预测,同时也为新的地球物理探测仪器技术的研发指明方向。针对不同研究领域,岩石物理学的内容不同。在油气资源的勘探开发领域,岩石物理学主要研究岩石的声波速度、电阻率、密度、放射性、核磁共振等物理特性及表征参量与岩石的矿物组成、结构、孔隙度、渗透率、流体饱和度、力学强度等性质、表征参数和赋存环境之间的关系,为油气地球物理探测技术的建立奠定基础,并为油气资源的勘探评价、安全开发开采提供技术支撑。

关于岩石物理学研究的实际问题,陈颙等(2001)将前人的研究总结归纳成三个方面:

(1)正问题:已知矿物、岩石本身的性质和变化,研究其物理性质在岩体中可能有的变化。这是一个由微观到宏观的推演过程,通常称为正演。

(2)反问题:已知地质、岩体的物理性质,如何反过来推演岩石和矿物的性质。这是一个由宏观到微观、由整体到局部的反演过程。

(3)应用问题:进一步,如何人为地改变矿物、岩石的特性,从而影响到岩体和地质特性的改变。这在岩石物理学中具有重要的潜在应用价值。

岩石物理学主要从实验和理论上研究岩石的物理性质和这些性质间的相互关系,其研究的基础是各种测试技术,包括空间观测、地面观测、井下观测和实验室观测等四个方面。实验上主要利用各种物理测试手段,测试岩石的各种物理量,从而获取岩石性质与物理参数间的关

系;理论上针对岩石特性提出岩石各物理性质间的理论模型,用于解释实验观测到的现象和结果。岩石物理学的研究对象及研究内容决定了其实验性、基础性、综合性和交叉性都很强的必然性。目前,除了实验和理论岩石物理学外,岩石物理学与数学、计算机科学的结合产生了一门新的边缘学科,即计算岩石物理学或数值岩石物理学。计算岩石物理学是采用应用数学、计算科学及信息科学的方法解决岩石物理学中大量无法由解析方式解决的各种理论和实际问题。计算岩石物理学的发展正方兴未艾,已经成为现代岩石物理学理论和应用各个方面必不可少的科学手段和有力支柱。

## 第二节 岩石物理学的研究方法

岩石物理学主要采用物理学研究方法,其研究方法有观察、实验、归纳和总结。实验是岩石物理学最基本的研究方法。实验室具体的研究方法为:首先采集各种有地质意义的岩石(包括井下岩石样品和露头岩石样品),按照测试规范制取有代表性的岩石样品,然后在实验室中分别研究其各种物理性质及各种因素对其物理性质的影响,并对大量的实验结果进行分析和归纳,找出岩石物理性质的变化规律,继而根据实验结果统计归纳得到经验关系式(理论模型);在建立合理而简化的数学物理模型基础上,将由实验得到的经验关系外推到实际问题中去,因为若没有合适的模型,而只是简单地把实验室小尺度实验得到的结果外推到大尺度的自然界,常常会出现错误的认识。简而言之,岩石物理学的实验研究方法主要步骤可概括为采样—制样—测试—分析—归纳和总结。

岩石物理学的研究涉及地质学、地球物理学、地球化学、环境科学、工程学等学科,也涉及一些基础学科,如声学、电学、力学、热学和电磁学等。岩石物理学是一门高度交叉的综合性学科,这就决定了在岩石物理学中,对于岩石不同物理性质,必然要用到上述相应学科中对应的物理方法和手段。主要物理性质和测量方法如表 1-1 所示,其中表的左边列出了研究地球内部组成、结构和运动依赖的物理方法,表的右边列出了相应的岩石物理性质。

表 1-1 研究地球的各种物理方法和相应的岩石物理特性

| 物 理 方 法 | 岩石物理性质   | 物 理 方 法 | 岩石物理性质        |
|---------|----------|---------|---------------|
| 重力法     | 密度       | 声学方法    | 波速、波衰减和各向异性   |
| 磁法      | 磁化率、磁导率  | 热学方法    | 热导率、比热容、热扩散系数 |
| 电法      | 电阻率、介电常数 | 核法      | 放射性、核磁共振      |

此外,岩石物理学的研究中还需要注意一些问题。我们知道地下的岩石都处于高温高压条件下(原位条件),不同原位地层条件下岩石的物理性质间存在差异。因此,在研究岩石的物理性质时,必须要考虑岩石所处的原位地层条件,否则,获取的岩石物理性质不具有代表性。其次,岩石物理研究中存在着不同的尺度。岩石的物理性质可能与进行测量的尺度有关,即岩石的物理性质随着研究的尺度不同而不同。如用岩石尺度看矿物,矿物性质是均匀的,而用矿物尺度看矿物,矿物是非均匀的。岩石物理学研究的尺度包括四种:矿物尺度、岩石尺度、岩体尺度和地质尺度。岩石的不同研究尺度可见图 1-1,从图中可看出,选择不同位置取样,获取的岩样岩石物理性质将可能不同,即不同的研究尺度将对研究结果产生影响。陈颢等(2001)在岩石物理学的研究中提出了上限尺度和下限尺度的范畴,在上、下限尺度之内研究的岩石整

体上具有稳定的物理性质。因此,在研究岩石的物理学性质、应用岩石物理学性质解决实际问题时,需要确定合适的研究尺度,对复杂结构、构造岩石尤其要特别注意尺度效应。

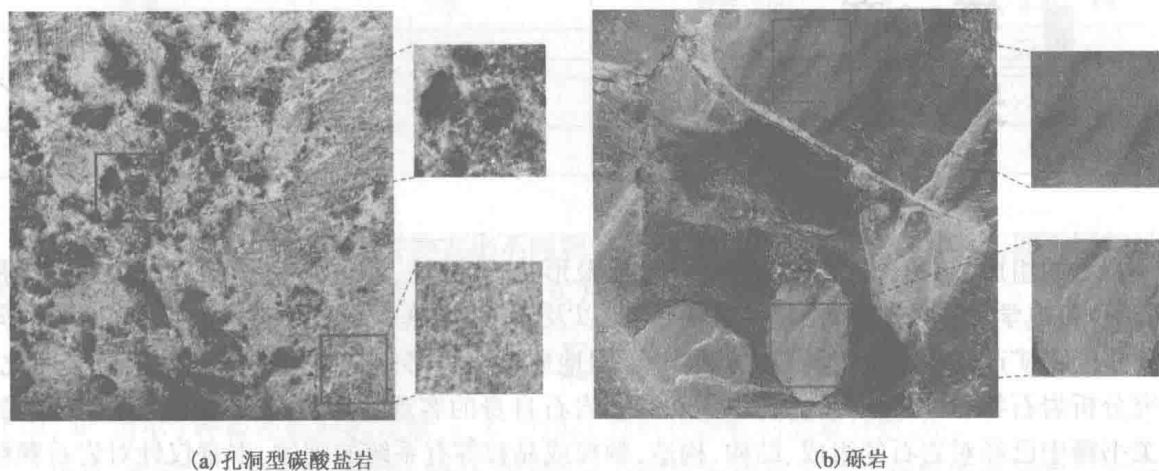


图 1-1 不同类型岩石的不同研究尺度



## 习 题

- (1) 岩石物理学研究什么? 怎么研究? 试举例阐述。
- (2) 试举例阐述岩石物理学研究的科学及应用价值。

## 第二章

# 岩石的基础物性

岩石的组成、结构、构造、颗粒或晶粒大小及形状、孔隙性、渗透性、所含流体等客观物性是岩石声学、电学、磁学、放射性、核磁共振特性,以及储热、传热等岩石物理性质产生的基础,同时又是能源矿产勘探开发、地质灾害预测、工程地质勘查等必须研究获得的基础信息。因此,研究分析岩石物理性质,必须首先认识和了解岩石自身的客观物性及表征参量。在地质学的相关书籍中已经对岩石的组成、结构、构造、颗粒或晶粒等有系统的阐述,本章仅针对岩石颗粒大小、孔隙性、渗透性、流体性质、孔隙结构等客观物性及其表征参量进行较为系统的阐述,同时也对各种参量的测试方法进行了简要介绍。

### 第一节 岩石的骨架特征

岩石的骨架是由性质不同、形状各异、大小不等的颗粒经胶结作用而成。颗粒的大小、形状和排列方式,胶结物的成分、数量、性质以及胶结方式,都将影响到岩石骨架的性质,并进而影响到岩石的各种物理性质。描述岩石骨架特征的参数主要有粒度、比面、密度、压缩性和润湿性等,本节主要讨论岩石的粒度组成、比面和润湿性。

#### 一、岩石的粒度组成

##### 1. 粒度组成的概念及测量方法

岩石粒度是指岩石颗粒的大小,通常用其直径(单位可用目数或毫米)表示。根据粒径划分碎屑岩的方法有很多,表 2-1 是 SY/T 5434—2009《碎屑岩粒度分析方法》中的粒级分类表。

表 2-1 粒级分类表

| 粒 度 分 类 |     | 分 级 界 限             |                |
|---------|-----|---------------------|----------------|
| 大类      | 小类  | 粒径, $\mu\text{m}$   | $\phi$ 值       |
| 砾       | 中砾  | 64000 ~ $\geq 4000$ | -6 ~ $\leq -2$ |
|         | 细砾  | < 4000 ~ 2000       | > -2 ~ -1      |
| 砂       | 巨砂  | < 2000 ~ 1000       | > -1 ~ 0       |
|         | 粗砂  | < 1000 ~ 500        | > 0 ~ 1        |
|         | 中砂  | < 500 ~ 250         | > 1 ~ 2        |
|         | 细砂  | < 250 ~ 125         | > 2 ~ 3        |
|         | 极细砂 | < 125 ~ 62.50       | > 3 ~ 4        |

续表

| 粒度分类 |     | 分级界限                |             |
|------|-----|---------------------|-------------|
| 大类   | 小类  | 粒径, $\mu\text{m}$   | $\phi$ 值    |
| 粉砂   | 粗粉砂 | $<62.50 \sim 31.25$ | $>4 \sim 5$ |
|      | 细粉砂 | $<31.25 \sim 3.90$  | $>5 \sim 8$ |
| 泥    | —   | $<3.90$             | $>8$        |

注:  $\phi = -\log_2 d$ 。其中  $d$  为粒径。

粒度组成是指构成岩石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比例,其计算公式为

$$G_i = W_i / \sum W_i \times 100\% \tag{2-1}$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  种粒径颗粒的质量,  $\text{g}$ ;  $G_i$  为第  $i$  种粒径颗粒的质量分数, %。

可见,测定岩石粒度组成的关键是如何测定不同粒级颗粒占全部颗粒的百分数。岩石粒度组成测定方法很多,例如对松散的沉积物和能松解成单个颗粒的岩石,可用直接测量法、筛析法、沉降法(水析法)等;对粗大砾石或砾岩,可以采用直接测量法;对固结的岩石,常用薄片粒度分析或图像分析法等。筛析法主要用于砂岩分析,沉降法主要用于粉砂岩和泥质粉砂岩。本节主要对筛选法、沉降法和激光粒度分析仪法进行简要介绍。

1) 筛析法

筛析法是用成套的筛子对经松解的岩石颗粒进行筛析,按不同粒级将它们分开,主要用于测定砂岩粒度。筛子的筛孔尺寸有两种表示方法:一种是每英寸长度上的孔数,称为目;另一种则是以毫米直接来表示筛孔孔眼的大小。此外,成套筛子的孔眼大小有一定的规定,例如相邻的两级筛孔孔眼大小的级差为  $\sqrt[4]{2}$  或  $\sqrt{2}$ 。在实验室进行筛析时,一般都采用细金属丝编成的标准筛进行。把所选用的筛子自上而下按筛孔大小从大到小排列好(图 2-1),将岩石颗粒放入最上面筛子中,开动振筛机振动 15min。取下筛子,把每个筛子中颗粒倒出,逐份称量,算出质量分数和累计质量分数。筛析法测定岩石样品的粒度范围大于 0.063mm,所需样品量大于 10g,平均测量时间为 1~2h。表 2-2 为利用筛析法测定的某岩样粒度组成。



图 2-1 筛析法实验中使用的部分筛子

表 2-2 某岩样粒度组成测试结果

| 粒径(筛孔直径) |       | 筛内颗粒质量<br>g | 平均粒径<br>mm | 质量分数<br>% | 累计质量分数<br>% |
|----------|-------|-------------|------------|-----------|-------------|
| 目        | mm    |             |            |           |             |
| 15       | 1.332 | 0.443       | 1.332      | 0.493     | 100.000     |
| 20       | 0.900 | 0.268       | 1.074      | 0.298     | 99.507      |
| 40       | 0.450 | 5.761       | 0.6        | 6.413     | 99.209      |
| 60       | 0.280 | 36.104      | 0.345      | 40.190    | 92.796      |
| 80       | 0.180 | 29.891      | 0.219      | 33.274    | 52.606      |
| 100      | 0.154 | 5.497       | 0.166      | 6.119     | 19.332      |
| 120      | 0.125 | 3.857       | 0.138      | 4.293     | 13.213      |
| 140      | 0.105 | 0.920       | 0.114      | 1.024     | 8.920       |
| 160      | 0.098 | 2.416       | 0.101      | 2.689     | 7.896       |
| 180      | 0.090 | 1.386       | 0.094      | 1.543     | 5.206       |
| 200      | 0.074 | 3.291       | 0.081      | 3.663     | 3.663       |

## 2) 沉降法

通过筛析法最小筛孔后的颗粒常为极细颗粒,需要再细分其粒级含量时,可采用沉降法。沉降法的依据是不同大小的颗粒在液体中具有不同的沉降速度,主要用于测定粉砂岩和泥质粉砂岩粒度。沉降法的基础是斯托克斯定律:球形颗粒在黏滞液体中受重力作用自由沉降时,沉降速度是与颗粒直径有关的常数,即

$$d = \sqrt{\frac{18\gamma v}{g(\rho_s - \rho_L)}} \quad (2-2)$$

式中,  $d$  为颗粒直径, cm;  $v$  为粒径为  $d$  的颗粒在液体中下沉速度, cm/s;  $\rho_s$  为颗粒密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_L$  为液体密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\gamma$  为液体的运动黏度, cm<sup>2</sup>/s;  $g$  为重力加速度, 9.81 cm/s<sup>2</sup>。

根据式(2-2)可知,选定悬浮液(如水溶液)后,液体的密度和运动黏度就为已知数,在颗粒密度已测得的情况下,再测出颗粒在液体中的下降速度,则由式(2-2)可计算出颗粒直径,最后统计出不同粒径的颗粒在总颗粒中所占的百分比。还需要注意的是,沉降法中粒度定义是:如果一个颗粒与球形颗粒具有相同的沉降速度,即认为该颗粒的粒度等于球形颗粒的直径。

在式(2-2)的推导过程中,斯托克斯曾假设:(1)颗粒坚硬,并具有光滑的球形表面;(2)在黏性和不可压缩液体中,颗粒的运动相当缓慢,且距离容器壁及底为无穷远;(3)颗粒沉降应以恒速进行;(4)在运动着的颗粒与分散介质之间的界面上,不发生滑动等。因此,该公式存在一定的局限性。此外,颗粒浓度对颗粒在分散液中下沉速度影响较大,为保证颗粒在沉降时呈单粒分散下沉,在测定时要求岩石样品颗粒在悬浮液中的质量浓度不得超过1%。沉降法测定岩石样品的粒度范围小于0.063mm,所需样品量大于30g,平均测量时间范围为1~2d。在实际应用中,一般将筛析法和沉降法两种方法相结合。

## 3) 激光粒度分析法

岩石粒度分析除了沉降法和筛析法等传统方法外,激光粒度分析法逐渐成为一种应用范围比较广的室内测定新方法。激光粒度分析仪如图2-2所示。激光具有很好的单色性和

极强的方向性,因此一束平行的激光在没有阻碍的无限空间中将会照射到无限远的地方,并且在传播过程中很少有发散现象。然而当光束遇到颗粒阻挡时,一部分光将发生散射现象,散射光的传播方向将与主光束的传播方向形成一个夹角,夹角大小与颗粒大小有关:颗粒越大,产生的散射光夹角就越小;颗粒越小,产生的散射光夹角就越大。这就是著名的米氏散射理论。激光粒度分析仪的测试原理主要基于光与颗粒间的作用,即根据颗粒能使激光产生散射来测试岩石粒度分布。激光发出的单色光,经过光路变换成平面波的平行光;平行光经过试样槽,遇到散布其中的颗粒发生衍射和散射,从而在后方产生光强的相应分布,被信息接收器接收并转化为信号,进而经过复杂的程序处理而得出颗粒粒径分布。激光粒度分析仪测定岩石样品的粒度范围为  $0.02 \sim 2000\mu\text{m}$ ,所需样品量小于  $5\text{g}$ ,平均测量时间范围为  $3 \sim 5\text{min}$ 。

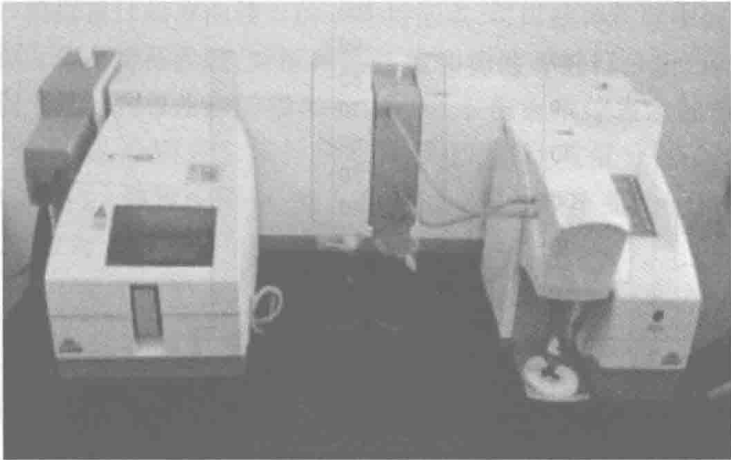


图 2-2 激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000 型)

2. 粒度组成的表示方法及粒度参数计算

粒度组成的表示方法有数字列表法和作图法两大类。其中作图法较常用,主要包括直方图、频率曲线图、累计频率曲线图(累计曲线图)、概率累计曲线图等。这些图件直观表示了各种粒径颗粒在岩石中所占的质量分数,不同图件主要反映的地质环境及应用不同。

1) 直方图

以颗粒直径(以  $\phi$  值或毫米为单位)为横坐标,纵坐标为频数(质量分数),将所测得的各种粒级频数画成矩形柱,即为直方图或柱状图。直方图中长方形的“宽”代表粒度区间,“高”代表每种粒度的频数,表示各粒度区间的质量分数。通常把直方图中突出于周围方块之上的高方块中的高点称为“峰”,如果只有一个峰则称为“单峰”,而有两个或两个以上的峰则称为“双峰”或“多峰”。图 2-3 为以  $\phi$  值为横坐标得到的不同储层岩石的粒度直方图。从图 2-3 中可看出,图 2-3(a)样品的粒度分布范围广,具有多峰,且峰所在粒级的质量分数并不高,说明该样品分选性极差;图 2-3(b)样品的粒度分布为单峰,且粒度分布较宽,说明该样品分选性较差;图 2-3(c)和图 2-3(d)样品的粒度范围较窄,两者都具有较明显的单峰且后者更突出,说明两者样品的粒度分选性好且后者的分选性更好,同时后者样品的粒径更小。 $\phi$  值与 mm 表示的颗粒直径间的转换关系为

$$\phi = -\log_2 d \tag{2-3}$$

2) 频率曲线图

将直方图上各矩形顶边中点连成一光滑曲线则为频率曲线图。常见的粒度组成频率分布

曲线形态如图 2-4 所示。粒度组成频率曲线的形态可用对称性或偏度表示[图 2-4(a)和图 2-4(b)],峰的展开度可用峰度(也称为尖度)表示[图 2-4(c)](其定义见粒度累计曲线)。同时,粒度组成频率曲线中的高点也称为“峰”,主峰所对应粒径值称为“众数”。如果只有一个则称为“单峰”,而有两个或多个则成为“双峰”或“多峰”,如图 2-4(d)所示。单峰曲线横向展开度窄,峰值高,表示分选好,说明该岩石以某一粒径颗粒为主,岩石粒度组成越均匀[图 2-4(d)中样品 1];反之,表示分选差。双峰频率曲线代表混合物沉积,分选中差或差[图 2-4(d)中样品 2],若两峰相距较近且峰值高,则表示分选较好;若两峰相距远且峰值低,则表示分选差。多峰频率曲线一般表示分选差[图 2-4(d)中样品 3],为多种来源沉积物混合,常为冰川沉积或洪积物。

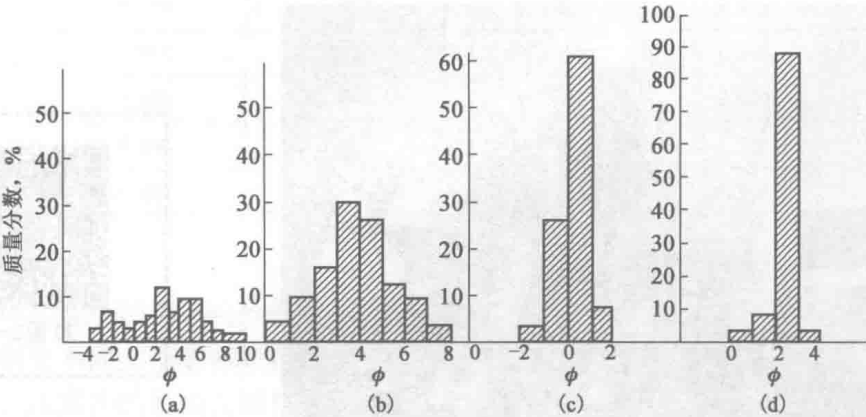


图 2-3 不同储层岩石样品的粒度组成直方图

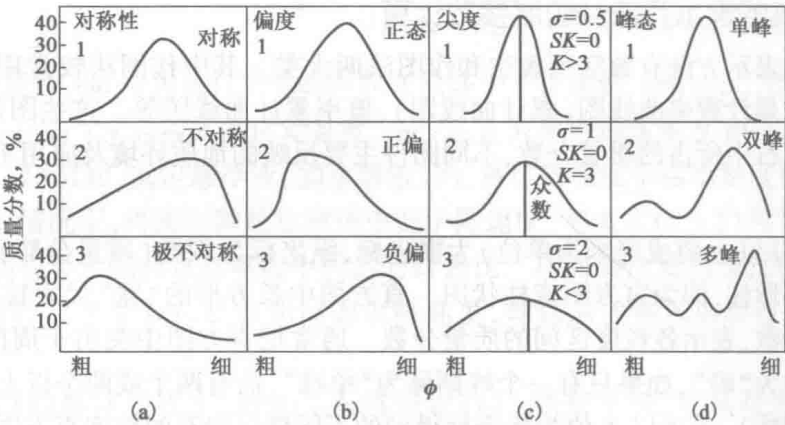


图 2-4 常见的粒度组成频率分布曲线形态

### 3) 累计频率曲线

累计频率曲线以累计质量分数为纵坐标,以粒级为横坐标。需要注意的是,激光粒度分析仪法获取的岩石粒度组成累计频率曲线是以累计体积分数为纵坐标。从粗粒一端开始,以每一粒级的百分含量为基点,向细粒一 endpoint 出累计质量分数,将各点用光滑曲线连接而成。累计频率曲线总是呈“S”形,如图 2-5(c)所示。图 2-5(a)和图 2-5(b)分别为累计频率曲线对应的直方图和频率曲线图。不同沉积环境形成的碎屑沉积物的累计频率曲线形态不同。分选好的岩石,粒度分布范围窄,累计频率曲线陡;反之,累计频率曲线较平缓。

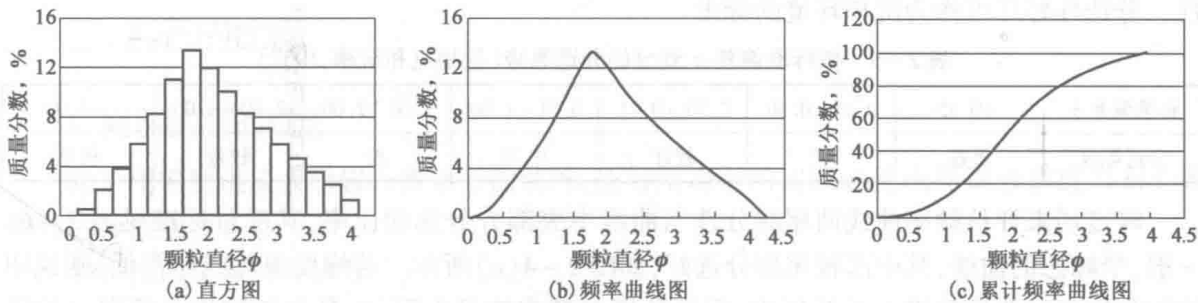


图 2-5 某地层岩石粒度组成的直方图、频率曲线图和累计频率曲线图

根据累计频率曲线上的一些特征点,可以获得粒度中值、不均匀系数、分选系数、标准偏差等粒度分布特征参数,对沉积的环境和物性等进行分析、评价。各参数定义见表 2-3。 $P$ 、 $\phi$  分别为累计频率曲线的横坐标以 mm、 $\phi$  值为单位表示的粒径,下标表示对应的累计质量分数,如  $P_i$ 、 $\phi_i$  分别表示累计频率曲线上,累计质量分数  $i$  所对应的以 mm、 $\phi$  值表示的粒径(表 2-3)。粒度中值  $M_d$  指在粒度组成累计频率曲线上累计质量分数 50% 所对应的颗粒直径,单位为 mm。

表 2-3 粒度分布量化表征参数

| 名称   | 福克和沃德(常用)                                                                                                                                  | 名称   | 特拉斯克                                               | 意 义         |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------|-------------|
| 粒度中值 | $M_d = \phi_{50}$                                                                                                                          | 粒度中值 | $M_d = P_{50}$                                     | 粒度分布集中趋势    |
| 平均粒径 | $M = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$                                                                                          | 平均粒径 | $M = \frac{P_{25} + P_{75}}{2}$                    |             |
| 标准偏差 | $\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$                                                                | 分选系数 | $G_c = \sqrt{P_{75}/P_{25}}$                       | 分选程度        |
| 偏度   | $SK = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$ | 对称系数 | $S = \frac{P_{25} \cdot P_{75}}{M_d^2}$            | 粒度分布对称程度    |
| 峰度   | $K = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$                                                                               | 峰度系数 | $K_c = \frac{P_{75} - P_{25}}{2(P_{90} - P_{10})}$ | 表示粒度曲线的尖锐程度 |

福克和沃德提出采用偏度来反映颗粒频率分布的不对称程度,其提出的划分标准见表 2-4。从表 2-4 中可看出,正偏表示沉积物以粗粒为主,负偏表示沉积物以细粒为主,而对称曲线的偏度为 0,如图 2-4(b) 所示。从图 2-4(b) 中可看出,样品 1 的颗粒频率分布对称性好,样品 2 的颗粒以粗粒为主,而样品 3 的颗粒以细粒为主。

表 2-4 偏度等级划分依据(据福克和沃德,1957)

|       |               |               |              |             |             |
|-------|---------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
| 偏度 SK | -1.00 ~ -0.30 | -0.30 ~ -0.10 | -0.10 ~ 0.10 | 0.10 ~ 0.30 | 0.30 ~ 1.00 |
| 偏度等级  | 极负偏           | 负偏            | 近对称          | 正偏          | 极正偏         |

福克和沃德提出用正态分布标准偏差  $\sigma$  大小来划分颗粒分选性的等级。根据标准偏差  $\sigma$  来划分岩石的分选等级见表 2-5。从表 2-4 中可看出,标准偏差  $\sigma$  越小,岩石分选性越好,如图 2-4(c) 所示。从图 2-4(c) 中可看出,样品 1 的分选性要好于样品 2 和样品 3 的分选