



石油高等教育“十三五”规划教材

岩石物理学原理 与应用

Principles & Applications of Petrophysics

■ 唐 军 章成广 编著



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



石油高等教育“十三五”规划教材

岩石物理学原理与应用

唐 军 章成广 编著



 中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

岩石物理学原理与应用/唐军,章成广编著. —东营:中国石油大学出版社,2018.12
ISBN 978-7-5636-6326-2

I. ①岩… II. ①唐… ②章… III. ①岩石物理学
IV. ①P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 271681 号

书 名: 岩石物理学原理与应用
作 者: 唐 军 章成广

责任编辑: 王金丽(电话 0532—86983567)
封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社
(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 青岛友一广告传媒有限公司

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 11.5

字 数: 274 千

版 印 次: 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-6326-2

定 价: 29.00 元

前言

岩石物理学是研究高温高压状态下岩石各种物理性质关系以及应用的一门学科,涉及的内容多,与地质学、地球化学、力学、环境科学、工程学等众多学科都有关联,具有高度交叉性和边缘性。随着人们越来越关注地球内部变化对地表气候、环境以及人类活动的影响,岩石物理学研究的领域也正在不断扩大。

岩石物理学是长江大学地球物理与石油资源学院勘查技术与工程、地球物理学两个专业的二、三年级本科生开设的专业基础课程。这两个专业的毕业生主要在地球物理勘探领域的相关企事业单位就业,不论是石油公司还是浅层地球物理勘探公司,都越来越关注岩石力学及地层稳定性方面的实际应用。特别是近年来随着页岩气、致密油气等非常规油气藏勘探开发的发展,储层评价不仅包含对油气储集性能的认识,还需要对储层岩石力学及储层改造效果进行预测。虽然在教学中编者将自己科研中涉及的相关知识进行了讲授,但总觉得零零碎碎,不够具体和系统,更没有一本切合本校学生专业发展的岩石物理学教材。为了改变固有的教学方法,2016年编者申请并获批了一项湖北省教学改革项目,其中涉及新教材的编写,于是从2016年5月起,编者一边教学,一边开始进行岩石物理学教材的撰写,遇到问题随时向我的导师章成广教授请教。章教授一直给地球探测与信息技术专业的研究生讲授岩石物理学,具有丰富的教学经验。2018年3月初稿完成后,首先在地球物理学专业以及勘查技术与工程专业进行了试用,对其中的问题进行了一次比较大的修改和补充。2018年8月正式向出版社提交了初稿。

岩石物理学是一门专业基础课,要求其不仅对后续专业核心课学习起到铺垫的作用,更需紧跟当前行业发展,让学生牢固掌握岩石物理特别是岩石力学的一般规律和研究方法。本书立足地震勘探、测井、工程物探等行业发展需求,着重阐述岩石声波传播、弹性以及岩石破裂在该领域的一般方法与应用。本书在编写过程中注重了以下几点:

(1) 注重基本概念与实际工程应用的结合,突出学以致用。例如第2章岩石,不仅介绍了三大类岩石的地质学描述方法与物理学特性,更介绍了利用测井技术如何实现岩石岩性的评价。这样使读者能够尽快理解岩石基本概念在地质工程中的一般应用方法和流程,同时进一步加深对基本岩石概念的理解。

(2) 注重问题导向,让读者带着问题学习,激发学习兴趣,提高学习效率。本书的每一章在开始部分,都对本章的内容、相互逻辑关系进行了一般性介绍,同时也对本章主要知识点、需解决的问题进行了明确说明。让读者在开始学习前,就能够把握方向,促进其主动学习,进而提高学习效率。



(3) 注重学科的最新发展动向,将行业内一些成熟的新内容编入了本书,使读者能够尽快掌握岩石物理学原理在油气勘探与生产中的最新应用,方便对后续课程的学习。

本书得到了石油高等教育教材出版基金的资助,在编写过程中得到了长江大学岩石物理与测井评价研究团队汪忠浩、周继宏、李维彦、李先鹏、郑恭明、蔡明等老师以及谢兴兵、赵彬、陈义群、高刚、李谋杰等好友的帮助。感谢地球物理与石油资源学院地球物理学专业2015级的同学们,他们是这本教材的第一批使用者,不仅忍受了打印版教材的简陋,还给本书的修订提出了许多切实可行的建议。特别感谢黄河水利科学研究院的李长征师兄,他完成了第7章第4节岩土锚固部分的编写,也对本书提出了许多有益的修改意见。

另外,书中引用了许多中外文献资料,对这些文献的作者表示由衷的敬意和衷心的感谢。

最后要感谢我的家人,爱妻辛苦劳作的身影和女儿的甜蜜微笑是我工作的力量之源。由于编者能力有限,加之时间仓促,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

2018年11月于丹麦奥尔堡

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 岩石物理学的定义	1
1.2 研究方法及分类	3
1.3 岩石物理学的发展	7
第 2 章 岩 石	8
2.1 地球上的矿物和岩石	8
2.1.1 矿 物	8
2.1.2 岩 石	11
2.2 岩石的分类及特点	11
2.2.1 三大类岩石	12
2.2.2 岩石的特点	16
2.2.3 岩石的研究尺度	17
2.3 测井技术评价岩性	18
2.3.1 判别岩石类型	19
2.3.2 计算地层矿物含量	20
2.3.3 判别颗粒粒度	22
习 题	24
第 3 章 岩石的变形	25
3.1 应 力	25
3.1.1 基本概念	25
3.1.2 主应力与莫尔圆	28
3.1.3 地应力	31
3.1.4 测井资料在地应力中的应用	32
3.2 应 变	35
3.2.1 位移与应变	35
3.2.2 岩石的应变	36



3.3	岩石的本构关系	40
3.3.1	基本概念	40
3.3.2	岩石典型本构关系	40
3.4	岩石的蠕变	42
3.5	岩石应力应变测量实验	43
3.5.1	样品制备	44
3.5.2	三轴压缩实验	44
	习 题	45
第4章	岩石中波的传播和衰减	46
4.1	岩石中的波	46
4.1.1	纵波与横波	47
4.1.2	波的反射与折射	49
4.1.3	声波检测技术	50
4.2	波速的影响因素	53
4.2.1	波速与密度和矿物成分的关系	53
4.2.2	波速与孔隙流体及饱和度关系	56
4.2.3	波速与温度、压力的关系	57
4.3	岩石中波的衰减	59
4.3.1	表征声衰减的特征参数	59
4.3.2	衰减与频率的关系	61
4.3.3	衰减与矿物成分及孔隙度的关系	61
4.3.4	衰减与温度、压力的关系	64
	习 题	65
第5章	岩石的弹性	66
5.1	二相体的弹性	66
5.1.1	岩石模型及孔隙类型	66
5.1.2	弹性参数	68
5.1.3	岩石及矿物的弹性参数	72
5.2	弹性参数的影响因素	73
5.2.1	孔隙形态对弹性参数的影响	73
5.2.2	孔隙流体对弹性参数的影响	78
5.2.3	环境(压力、温度)对弹性参数的影响	81
5.3	岩石弹性在油气勘探中的应用	82
5.3.1	岩性识别	82
5.3.2	地层的孔隙类型判别	83
5.3.3	地层流体类型评价	86
	习 题	90

第 6 章 岩石的断裂	91
6.1 差应力下的岩石特性	91
6.1.1 岩石的膨胀	91
6.1.2 岩石破裂微构造	93
6.1.3 声发射及其他性质	95
6.2 脆性断裂	97
6.2.1 破裂类型和破裂准则	97
6.2.2 库仑破裂准则	98
6.2.3 莫尔破裂准则	101
6.2.4 应力状态指数	102
6.3 岩石断裂力学	103
6.3.1 断裂力学	103
6.3.2 裂纹分析模型	109
6.4 流体对断裂的影响	112
6.4.1 孔隙压力	112
6.4.2 水压致裂	113
6.4.3 压裂的检测及井壁稳定问题	115
习 题	120
第 7 章 岩石的强度	122
7.1 完整的岩石强度	122
7.1.1 岩石强度实验	122
7.1.2 强度与围压的关系	124
7.1.3 强度与温度的关系	126
7.1.4 强度与岩石样品的关系	128
7.2 含裂隙、节理和断层的岩体强度	129
7.2.1 拜尔利(Byerlee)摩擦滑动条件	131
7.2.2 拜尔利定律和库仑破裂准则的比较	134
7.2.3 断层与应力状态的关系	135
7.3 地壳应力状态的极限范围	137
7.3.1 地壳的应力状态	138
7.3.2 实地应力测量	139
7.3.3 推断地壳应力状态的极限范围	142
7.4 岩土锚固	146
7.4.1 岩土锚固的基本原理	146
7.4.2 岩土锚固工程及锚杆分类	147
7.4.3 岩土锚固工程检测	150
习 题	153

第 8 章 岩石的输运特性..... 154

 8.1 达西定律 154

 8.1.1 达西定律..... 154

 8.1.2 岩石的渗透率..... 155

 8.1.3 达西定律的适用条件..... 156

 8.2 渗透率测量实验及影响因素 157

 8.2.1 渗透率实验测量..... 157

 8.2.2 渗透率影响因素..... 158

 8.3 现场渗透率确定 160

 8.3.1 依据孔隙度-渗透率关系求取 160

 8.3.2 利用阵列声波计算渗透率..... 161

 8.3.3 利用核磁共振测井计算渗透率..... 163

 习 题..... 172

参考文献..... 173

第 1 章

绪 论

人类居住的地球由外向内可以分成地壳、地幔和地核。最新的人造卫星资料显示地球呈椭球体,南极凹进约 30 m,北极凸出约 10 m,平均半径约为 6 371 km。构成地球的基本材料是岩石,它是天然矿物的混合物。地壳中岩石的种类很多,但组成岩石的主要矿物仅有几十种。目前,人类能够直接观测到地壳表面的深度不超过 20 km,那么如何去研究更深地层的岩石特性,或者浅层岩石又是如何影响人类生活的? 岩石物理学给出了答案,因为岩石物理学就是用物理学的方法研究岩石特征的一门学科。

本章通过介绍岩石物理学研究的主要内容、与其他相关学科的关系等,阐述岩石物理学学习的重要性;同时通过介绍岩石物理学研究的一般方法以及分类,让读者能够大致了解本学科的发展方向以及与生产生活的关系。

1.1 岩石物理学的定义

岩石物理学(rock physics)是研究高温高压状态下岩石物理性质的相互关系及应用的学科(陈颢等,2009)。地球上 99% 的岩石都处于 600 °C 和 1 GPa 以上的高温高压状态,岩石物理学就是研究在这种特殊状态下,岩石表现出的各种不同物理性质的学科,具体包括岩石的力学、声学、热学、电磁学、光学等特征,其中,岩石力学以及由受力作用引发的岩石物理变化是岩石物理学研究及应用的重要领域。

地球的热源有两个:一个是太阳热,一个是地内热。根据地球内部温度分布状况可以将地表以下的地层划分为外热层、常温层和内热层。外热层(包括地表)的温度主要是来自太阳的辐射热能;常温层是一个厚度不大的层带,温度与当年的年平均温度相同,不受季节性变化的影响。地球内部温度很高,这可由温泉、火山喷发和钻井中热水及井底温度得到证明。如图 1-1-1 所示,从地表到地核,地球内部温度逐渐升高。其中,地核温度最高,一般在 5 000 °C 以上,最高地温可达 6 000 °C(2013 年 5 月,法国原子能委员会艾格尼丝-德瓦勒所在研究组通过测定铁的“溶解曲线”得到);地幔的温度在 1 000~3 000 °C 范围内;地壳温度不等,但一般认为每深入 100 m 地层温度升高 1 °C,当深度超过 3 km 以

上时,每深入 100 m 地层温度将升高 2.5~3.5 °C,而到地下 11 km 处,温度可达到 200 °C。

岩石物理学研究范畴内,地球内部压力主要是指静压力,它由物质重量所引起,用地下某深度单位面积上的压力进行量化表示,单位同压强单位一致。图 1-1-2 为地球内部压力随深度变化分布示意图。从图中可见,随深度增加,压力呈非线性关系增加。在地表以下 10 km 处,压力就可以达到 $3 \times 1.013 25 \times 10^8 \text{ Pa} = 3 000 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 1.013 251 \times 10^5 \text{ Pa}$)。地核内部压力可达到 $3.5 \times 1.013 25 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。此外,在实际地层压力的研究过程中,人们更加关注的是地应力。而对于油气勘探而言,孔隙压力更为重要,这些内容将在后续章节详细介绍,此处不再赘述。综上所述,绝大多数岩石所处的环境就是高温高压环境,这一点对于岩石物理学的研究很重要。

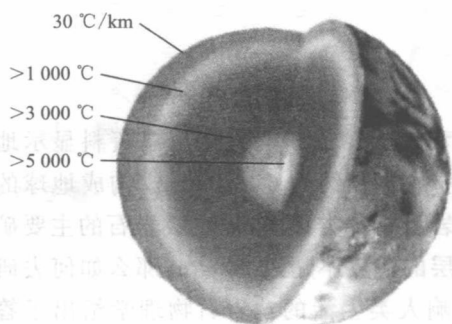


图 1-1-1 地球温度分布示意图

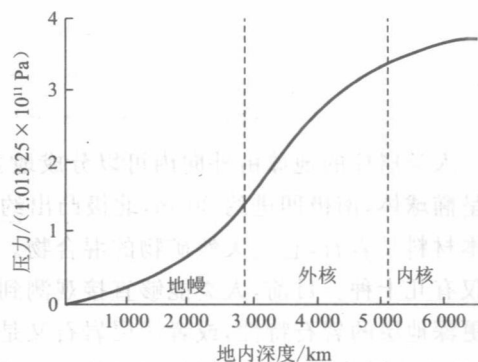


图 1-1-2 地球内部压力随深度变化分布示意图

岩石的很多物理特性将随着温度、压力的变化而变化。图 1-1-3 是塔里木盆地库车河露头砂岩岩石样品的电阻率-压力实验关系。将该岩石样品加工成圆柱体,直径 2.5 cm,高 5~8 cm,圆周方向的围压为 20 MPa 且保持恒定,然后轴压依次从 20 MPa 加载到 70 MPa,分别测量整数倍压力时的电阻率,得到如图 1-1-3 所示的关系。该实验关系表明,随着轴压的增大,电阻率逐渐变大。产生这种变化的原因是当压力变大时,能够导电的连通孔隙发生了变化,若朝着复杂的方向变化,则可以使岩石电阻率增大。所以,组成岩石成分的多样性是造成这种变化的直接原因,如果像其他材料(例如玻璃)一样,是由同

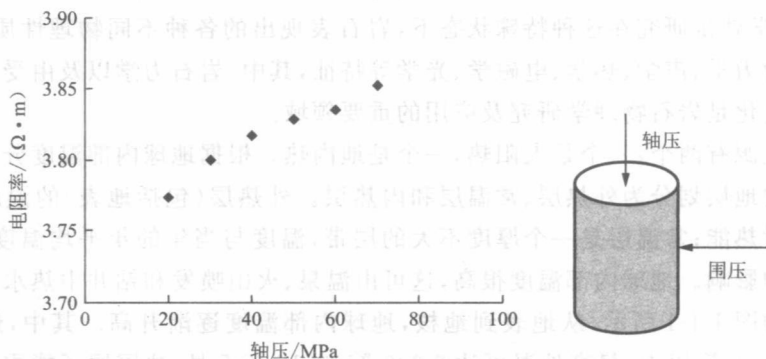


图 1-1-3 砂岩岩石样品电阻率-压力实验关系

一种化合物组成,则产生这种变化的可能性会很小。在岩石物理研究过程中,特别是实验结果,一定要明确岩石所处的环境,因为不同的温度、压力,得到的实验结果可能存在差异。

岩石物理学研究的内容主要涉及两个大的方面:一是研究在地球内部特殊环境下岩石的行为及物理性质;二是研究那些与地球内部构造运动、能源和资源勘查开发、地质灾害成因和减灾、环境保护和检测等密切相关的问题。第一类研究内容主要以地球、大陆为研究对象,且以理论研究为主,实验手段为辅,注重机理性的研究;第二类研究与人类生活、改造自然环境联系更为密切。其中,深部地层的能源问题是近几年的一个热点研究领域。对油气勘探、资源、环境等问题而言,岩石物理学的主要研究内容为岩石物理性质之间的相互关系,具体地说,就是研究孔隙度、渗透率等地层特征参数是如何同地震波、电阻率、温度等参数相关联的(Sheriff,2004)。特别是在油气勘探过程中,岩石物理是连接地质结构、地球物理与石油工程之间的纽带(图 1-1-4)。

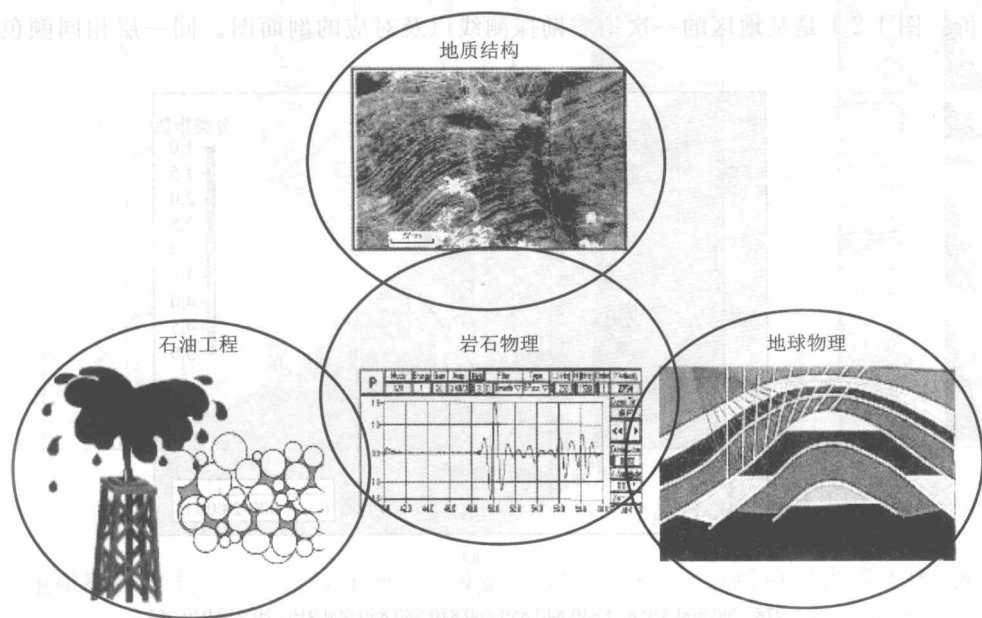


图 1-1-4 岩石物理在油气勘探领域中作用

另外,岩石物理学与地质学、地球物理学、地球化学、力学、流体力学、材料力学、地热学、环境科学、工程学等众多学科密切相关,是一个高度的交叉、边缘学科,基础性、应用性都很强。一般情况下,人们把岩石物理学归属于地学学科。

1.2 研究方法及分类

按照自然科学研究的基本手段,岩石物理学研究方法一般分为理论研究和实验研究两大类。但是伴随着计算机的迅猛发展,计算岩石物理已经成为独立的一个分支,它可以

在计算机硬件和软件所提供的工作环境下,采用应用数学、计算科学以及信息科学的方法解决岩石物理学中无法由解析方式解决的各种理论和实际问题。传统意义上的实验岩石物理特指以室内实验为主要技术手段,模拟高温高压环境,开展岩石各种物理特性参数的测量,分析其各种物理性质之间的关系等内容。

关于岩石物理学的分类,目前还没有人专门系统归纳过。若按照岩石物理应用的领域可以分为深部地层岩石物理、油气资源勘探、有色金属等地下矿藏勘探以及地面岩石物理研究及应用等几大类;若按照岩石物理研究所采取的探测技术可以分为地震勘探技术、地球物理测井技术以及电磁勘探技术;若按照所采用的物理原理,岩石物理学可分为力学、声学、放射性以及其他等几个内容(例如重力、磁法、电法等)。本书主要阐述由岩石物理学性质引发的岩石物理学问题。

油气资源勘探是岩石物理学研究与应用的一个很重要的领域。油气资源勘探中的岩石物理研究手段主要包括地震勘探(geophysics)和测井技术(well logging)。前者主要通过声波反射信号对地下地层进行探测;后者通过井中探测的各种物理特征信号对地层进行评价。图 1-2-1 是某地区的一次地震勘探测线以及对应的剖面图。同一层相同颜色的

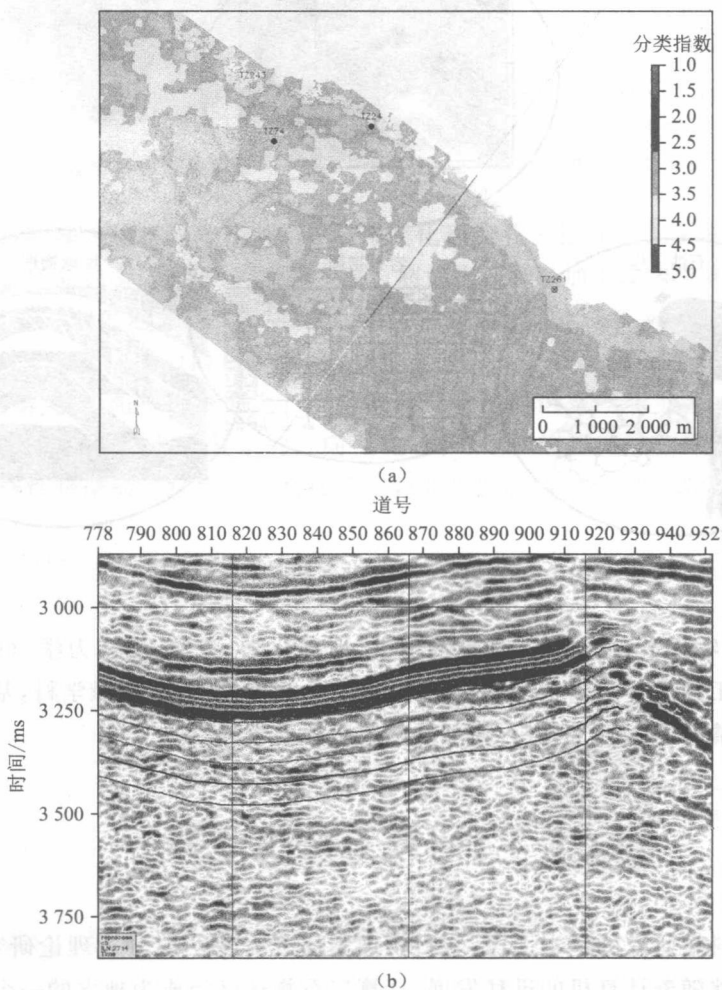


图 1-2-1 地震勘探测线(a)及对应的剖面图(b)

条纹代表相同声波反射时间的地层,这样利用条纹可直观地表示地下各地层的排列方式,从而帮助人们认识地下地质构造特征。图 1-2-2 是某井的测井解释成果图,它直观地表示随井轴深度变化的各种物理特征信号,通过对这些声、电、核信号的处理与解释,大体可以了解沿钻井深度方向的各种岩石特征(主要是孔隙度、渗透率、饱和度),为后续的油气勘探与开发提供第一手信息。

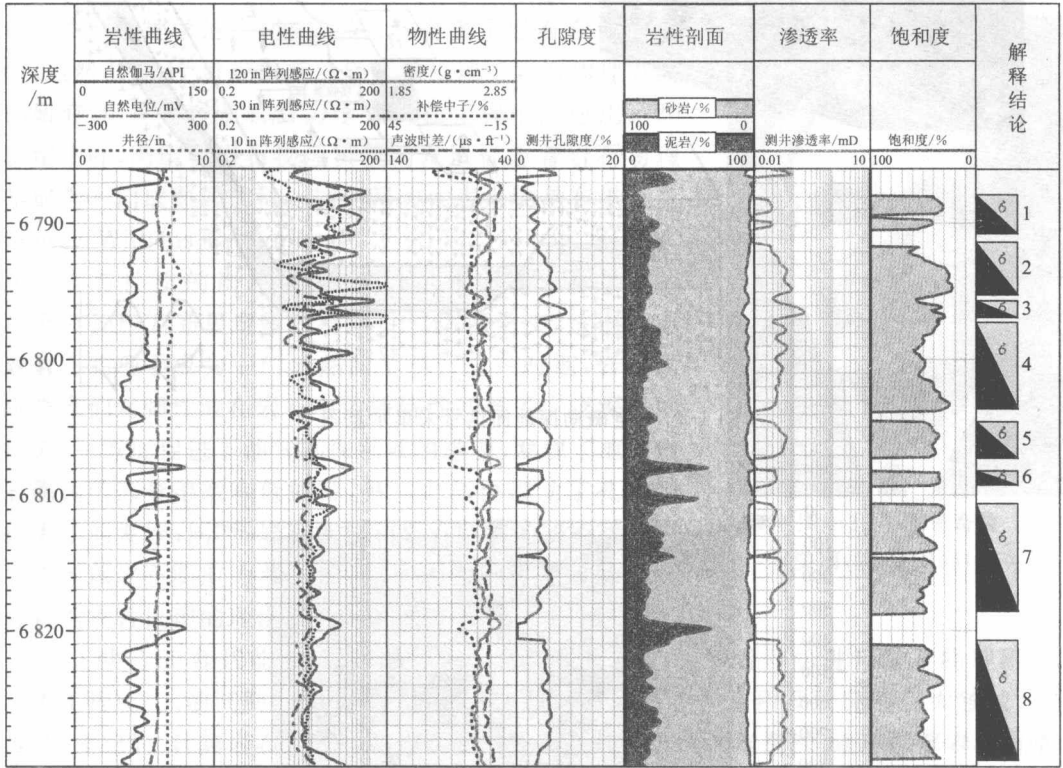


图 1-2-2 测井解释成果图

(1 in \approx 0.025 4 m; 1 mD $=1.0 \times 10^{-3} \mu m^2$)

电磁勘探技术主要是通过探测地壳中各种岩石或矿石(包括地下水等流体)的电磁学、电化学等物理响应,实现对地下地层的认识。图 1-2-3 和图 1-2-4 分别为电磁勘探地面信号采集示意图和电磁勘探反演成果图。

在开展岩石物理学研究时,特别要注意的一个问题就是研究尺度问题。研究尺度是指分析岩石物理性质时研究对象的尺度。特征尺度是指研究对象的大小(矿物颗粒的大小、岩石样品的大小、地层厚度……),岩石的各种性质与特征尺度有关。当研究尺度远大于特征尺度时,可以近似地把岩石看成均匀的,而且是体积平均意义上的物理性质的均匀。在具体研究过程中,研究尺度与特征尺度要匹配。图 1-2-5 是岩石研究的不同尺度示意图。根据该图,在矿物尺度下关注的孔隙(白色部分)与骨架(黑色部分)是不同的,但是在岩石尺度、地层尺度下,矿物尺度下孔隙与骨架颗粒的组合可以看作是均匀的,即可以忽略这种差异。所以,同样的研究对象,研究尺度变化了,所关注的特征也将发生变化。

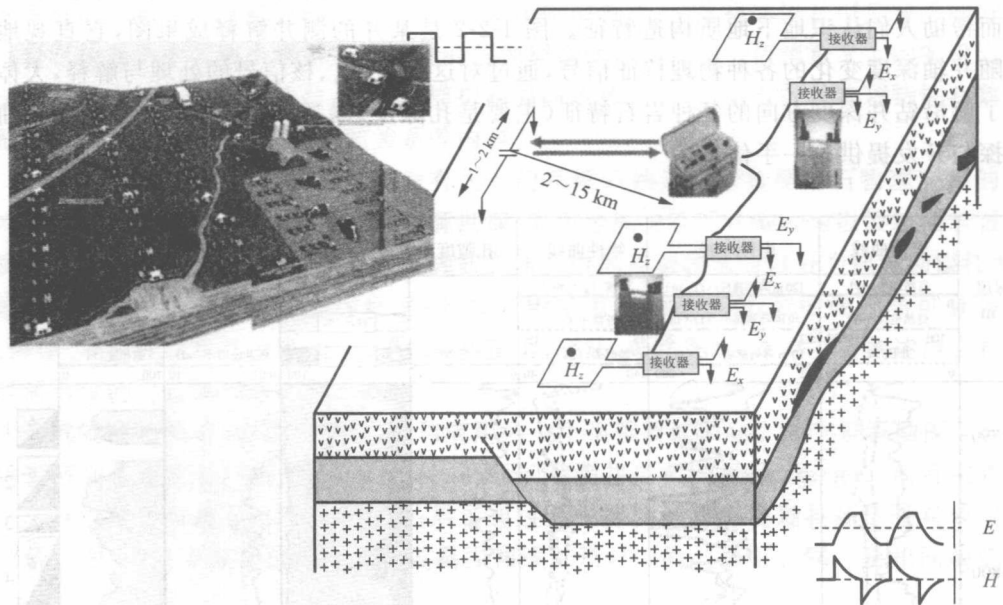


图 1-2-3 电磁勘探地面信号采集示意图

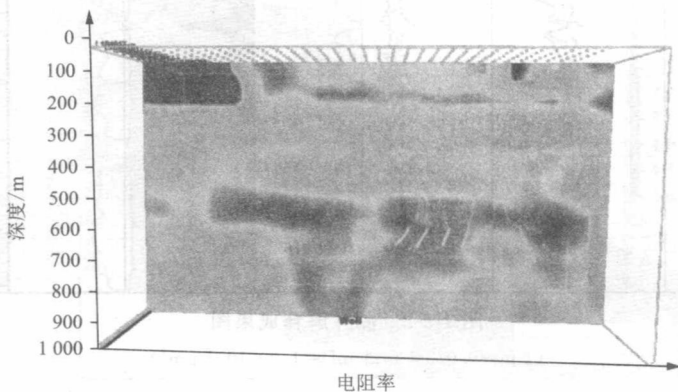


图 1-2-4 电磁勘探反演成果图

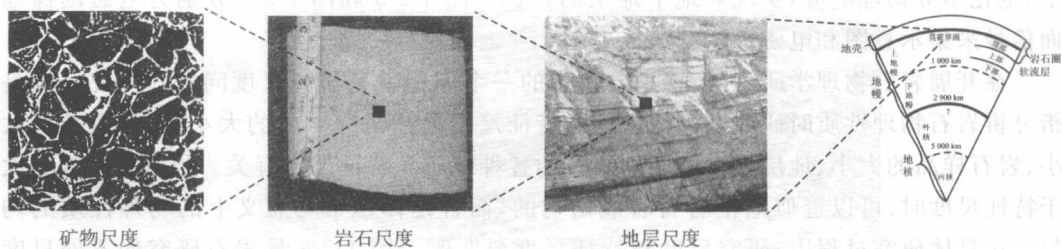


图 1-2-5 岩石研究的不同尺度示意图

特征尺度发生变化,研究的方法也会产生变化。例如,在地震勘探过程中,地震波的频率在 50 Hz 左右,声波波长在几十米范围内,而地层深度几千米,声波波长相对于地层深度而言很小,所以在研究声传播过程中,可以利用射线声学理论进行处理。但在声波测



井中,由于超声波的频率在几十千赫兹,声波波长也处在几十厘米的范围之内,这与井眼尺寸大致相当,此时就不能忽略相对声传播的影响,需要利用声波波动理论进行分析。

1.3 岩石物理学的发展

岩石物理学是一门交叉的、融合多个已有专业的学科,虽然早在17世纪末就已经开始出现了岩石物理方面的研究,但主要涉及岩石力学性质在工程中的应用。20世纪中叶,高压下岩石物理实验的发展标志着岩石物理学成为一门成熟的学科。这期间的代表人物是布里奇曼(Percy Williams Bridgman,图1-3-1)。1946年,因对高压下岩石性质的出色研究(高压实验装置:压力达到10 000 MPa),布里奇曼获得诺贝尔物理学奖,这也标志着岩石物理学成为一门成熟的学科。这一时期,岩石物理学家们对弹性波在岩石中传播特性开展了广泛深入的研究,一方面促进了油气勘探领域的进展,发现了地球岩石圈内的部分熔融和低速带,另一方面也推动了孔隙弹性力学的发展;同时,岩石断裂和岩石摩擦的研究提供了关于地球岩石圈应力状态的认识,成为解释地震和滑坡等自然灾害机理的理论基础。

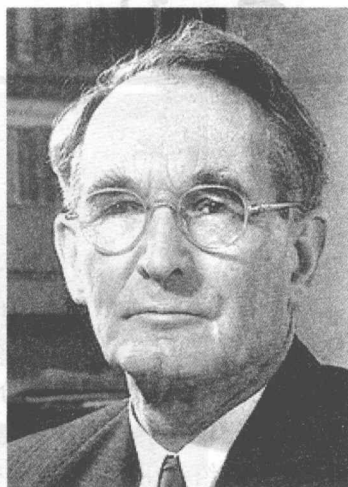


图1-3-1 布里奇曼
(美国,1882—1961年)

20世纪80年代前后,以陈颢等人代表的一批中国学者开始进行岩石物理研究。土木工程施工、油气勘探以及天然地震预测是进行岩石物理应用及研究的三大领域。进入21世纪后,计算岩石物理和物理实验的发展更是促进了油气勘探、地球深部岩石力学、地质减灾等学科的进步。

第 2 章 岩 石

岩石是人类生产和生活的重要材料和工具。距今二三百萬年前,人类出现的第一个文明——石器时代就是以人类能够打制石器为判别依据的。岩石物理学的研究对象就是岩石,它是构成地球固体成分的最基本材料,是地球上内部和外部地质作用的产物,其成因、分类比较复杂。本章首先介绍矿物及岩石的一般定义,然后对其类型以及特点进行阐述,最后介绍利用测井资料识别、评价岩性的方法、流程及效果。总之,本章主要是对岩石进行一般性的介绍,为后续研究岩石结构、构造特征与各种物理特征响应的关系打基础。

2.1 地球上的矿物和岩石

按照圈层结构,地球大致可以划分成大气圈、生物圈、水圈以及岩石圈(图 2-1-1),岩石圈又可以细分为地壳、地幔、地核三层。一般认为,地球是由不同物质和不同状态的圈层所组成的球体,平均半径 6 371.11 km,赤道圆周长 40 075.24 km,质量 5.976×10^{24} kg。在地球的总质量中,岩石圈(或称为固体圈)的质量占 99%。地球岩石圈的物质成分包括绝大多数的化学元素,且大多以化合物的形式存在,极少的部分呈游离的单质态。这些元素的天然产出(主要以化合物的形式)即为矿物。

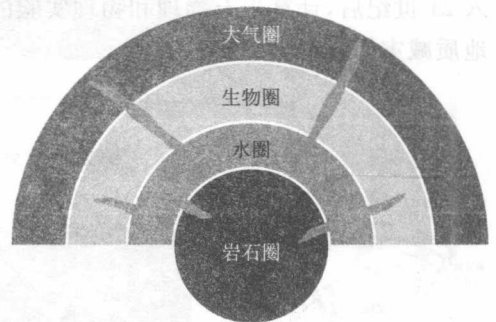


图 2-1-1 地层的圈层结构

2.1.1 矿 物

矿物是地球上天然产出的、具有一定化学成分和特定原子排列的均匀固体。那么,由人工产出的、具有相同性质的产物称为人工矿物,不是矿物。另外,矿物具有确定的或在