

高等学校教材

地电学教程

DIDIANXUE JIAOCHENG

肖宏跃 雷 宛 编著



地质出版社

高等学校教材

地 电 学 教 程

肖宏跃 雷 宛 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是为高等院校地球物理学、勘查技术与工程专业学生学习“地电学”课程需要而编写的教材,亦可作为研究生教材及专业工程技术人员参考书。

全书分四篇共18章,系统阐述了岩石电磁学性质、地球内部天然电场的性质、成因和分布规律,同时还介绍了常用地电观测的理论基础、方法及其在地质调查、地球内部构造研究及地震监测中的应用。

图书在版编目(CIP)数据

地电学教程 / 肖宏跃等编著. —北京:地质出版社,
2008.8

ISBN 978-7-116-05817-0

I. 地… II. 肖… III. 地电学-教材 IV. P319

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第122671号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:18.75

字 数:450千字

印 数:1—1500册

版 次:2008年8月北京第1版·第1次印刷

定 价:35.00元

书 号:ISBN 978-7-116-05817-0

(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

地电学和电法勘探分别属于地球物理学和应用地球物理学。前者应用地电观测的数据资料,研究地球内部电性及电场分布等具有全球性质的大尺度物理现象和一般原理;后者则主要是应用这些原理寻找有用矿产或解决诸如构造、工程、水文或环境等小尺度的地质问题。它们都有着共同的原理、方法和技术。本教材兼顾了地球物理学、勘查技术与工程及其他相关、相近专业学生学习“地电学”和“电法勘探”课程的需要而编写的,除作为本科生专业教材外,亦可作为研究生教材及专业工程技术人员的参考书。

近年来,随着物理学、数学、电子学、计算机科学的进步,新方法、新技术、新仪器正在蓬勃兴起和迅速推广,人们对地球内部结构及深部隐伏矿床的认识和探测,也越来越深入,并取得了良好的效果,所使用的一些方法已超出了传统电法勘探的应用范畴。因此编写一本具有一定深度、适合各相关专业学生和工程技术人员学习地电学知识的教材,无论对于拓宽视野、提高专业水平还是增强专业技术素质,都是非常必要的。

本教材是在近5年来校内使用教材的基础上编写的,介绍了地电学中广泛使用的地球物理方法,包括岩石电学性质、大地电场、自然电场及大地电磁场等内容,主要描述固体地球内部天然电场的性质、成因和分布规律,以及岩石电磁学性质等基础知识。同时还介绍了一些常用的地电观测方法,尤其是电阻率剖面法、电阻率测深法、高密度电阻率法、大地电磁测深等电法勘探的理论基础、方法技术及其在地质调查、地球内部构造研究及地震监测等方面的应用实例。由于受篇幅及学时数限制,还有些内容无法列出,如有需要可参考有关文献。

全书分四篇共18章,其中第一篇、第二篇、第三篇及第四篇的前五章等由肖宏跃副教授编写,其余部分由雷宛教授编写,硕士研究生王宇玺、蒲举参加了本书的校正工作。成都理工大学地球探测与信息技术系主任李才明教授担任本书的主审。教材中引用了同行、前辈及其他同仁公开发表的文献和资料,在此谨向他们致以诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏、不当之处难免,恳请广大读者批评指正。

作 者
(xiaohy@cdut.edu.cn)
2008年7月

绪 言

地电学是以地球为研究对象的一门应用电学。它通过研究大气、海洋和固体地球表面和内部的电场分布来揭示地球内部岩石的电学性质、温度变化,以及地壳和上地幔的物质结构。

早在 19 世纪人们就观测到固体地球表面有电流流动,后来又发现大气和海洋中也有电流流动。但是这些观测是零星的,附属于地磁学、电法勘探、大气物理学、空间物理学和海洋物理学。随着科学的发展,有必要像地磁学、重力学和地震学那样,把上述分散的内容集中成为地电学,并加以系统的研究。1940 年查普曼 (S. Chapman) 和巴特尔斯 (J. Bartels) 在他们的著作《地磁学》中,把地电学部分集中成为一章,并命名为“地电流”,其中主要包括大地电场、自然电场、电法勘探和海洋中的电流等内容。1951 年克拉耶夫 (А. П. Краев) 把上述内容编成《地电原理》一书,其中主要包括大气电性、大气电场、海水电性、岩石电性、大地电场、自然电场、有源直流电场和直流电法勘探等内容。克拉耶夫去世后,他的学生和同事于 1965 年又再版了《地电原理》。在新版《地电原理》中,除增加了交变电磁场的内容外,还对原版的部分内容作了若干修改和补充。

19 世纪中期,地电工作的主要目的是解释地球变化磁场的成因。20 世纪初,随着工业的发展,许多国家对矿产资源的需求日趋迫切,所以电法勘探获得了迅速的发展。这时,地电学的重点转向电法勘探。

电法勘探是以岩、矿石电学性质的差异为基础,通过观测和研究与这些差异有关的电场或电磁场在空间和时间上的分布特点和变化规律,来查明地下地质构造和寻找有用矿产的一类勘查地球物理方法。随着国家经济建设的发展,对矿产资源的需求量越来越大,而地表矿产基本枯竭,勘探越来越向深部进行,对于寻找深部的隐伏矿产来说,物探尤其是电法勘探具有不可替代的作用,已取得并还将取得良好的地质效果。

在各类勘查地球物理方法中,电法勘探的变种或分支方法是最多的。这是因为,就其物理基础而言,可以利用岩石在导电性、导磁性、电化学反应性,介电性及激发极化特性等方面的差异。就场的性质而言,可以利用人工场,也可以利用天然场;可以利用直流电,也可利用不同频率的交流电。此外,供电装置和接收装置也可以采用各种不同的方式。因而形成了多种分支

方法。通常可以将电法勘探的众多分支方法归为两大类，即传导类电法和感应类电法。传导类电法以各种直流电法为主，在我国获得较广泛应用的有电阻率法、充电法、自然电场法和激发极化法等。在电阻率法中又分为电阻率剖面法和电阻率测深法，而在这两种方法中又包括许多变种方法。在感应类电法中，则可分为电磁剖面法和电磁测深法，并且在每种方法中也包括许多变种方法。对于不同的地质条件、不同的勘探目的，可以合理地选择不同的方法，以求达到预期的目的。同时，电法勘探还可在空间、陆地、海洋、地下等各种区间进行，因此按工作场地的不同又可分为航空电法、地面电法、海洋电法和地下电法等，它们在方法技术上各有不同的特点。

地电学和电法勘探分别属于地球物理学和应用地球物理学。它们的主要区别在于：前者应用地电观测的数据资料，研究地球内部电性及电场分布等具有全球性质的大尺度物理现象和一般原理；而后者则主要是应用这些原理寻找有用矿产或解决诸如构造、工程、水文或环境等小尺度的地质问题。

但是，由于地电学和电法勘探有着共同的理论基础——电学，和共同的研究对象——地球，因而它们又是紧密联系、相辅相成的。电法勘探的建立和发展源于对地电原理和地电现象的研究，而电法勘探的成果又反过来充实新的地电原理或为揭示地电现象的本质提供重要依据。因此，上述地电学和电法勘探的分工亦不是绝对的，在学科发展进程中，二者研究范围的交叉和模糊是正常的，也是必然的。事实上，电法勘探已是地电学中必不可少的研究内容。

20 世纪 50 年代，吉洪诺夫和卡尼尔（A. Н. Тихонов, L. Caniard）奠定了大地电磁测深的理论基础，该方法很快在石油勘探中得到广泛应用。近年来，不仅大地电磁测深法，而且以电磁感应为基础的其他电磁测深法，如频率测深法，瞬变测深法等，都取得了显著的进展。不同频率的电磁波穿透深度不同，而且不受高阻层屏蔽的影响，能获得不同深度的地电信息，尤其是能研究地壳及上地幔的地电结构以及它们与地壳构造活动性、地壳及上地幔动力过程和地球内部热状态的关系，还可以利用电磁测深法监视地壳内电阻率随时间的变化来预报地震。过去的历史已经证明，并且今后还将继续证明，电磁测深资料和岩石、矿物的实验室研究相结合，将有助于揭示地球内部的奥秘。

半个世纪以来，地电学方法在普查和勘探各种金属和非金属矿产，勘查石油、天然气、煤炭，以及在解决各种水文地质、工程地质问题方面，都取得了举世瞩目的成就，并且已成为研究地球深部构造的一种必不可少的基本手段；同时，在灾害预测、环境监控、城市建设及考古等方面也发挥着积极的作用。有理由相信，在新的世纪里，随着工程数学、物理学、电子学及计算机科学的迅猛发展，我国的地电学研究和电法勘探工作，将会更加蓬勃地发展，水平将进一步提高，也将为我国成为世界强国做出更大的贡献。

目 录

前 言

绪 言

第一篇 电阻率法

第一章 岩石和矿石的导电性	(1)
第一节 岩石、矿石导电性的一般特点	(1)
一、矿物的电阻率	(1)
二、岩石、矿石的电阻率	(2)
第二节 影响岩石、矿石电阻率的因素	(2)
一、岩石、矿石电阻率与成分和结构的关系	(3)
二、岩石、矿石电阻率与所含水分的关系	(5)
三、岩石、矿石电阻率与温度的关系	(6)
四、岩石、矿石电阻率与压力的关系	(7)
第二章 电阻率法基本理论	(10)
第一节 稳定电流场	(10)
一、稳定电流场的基本定律	(10)
二、地中稳定电流场的边界条件	(11)
第二节 均匀介质中的点电流源电场	(12)
一、一个点电流源的地中电流场	(12)
二、地表两个异性点电流源的地中电流场	(14)
三、地下电流随深度的分布规律	(15)
四、偶极电流源的地中电流场	(16)
五、均匀大地电阻率的测定	(19)
第三节 非均匀介质中电荷的分布	(20)
第四节 视电阻率的基本概念及常用电阻率法	(22)
一、视电阻率	(22)
二、视电阻率的微分表达式	(22)
三、常用的电阻率法	(24)

第五节 正演问题的数值模拟方法	(25)
一、有限元法原理	(25)
二、有限差分法原理	(29)
三、面积分法原理	(31)
第三章 电阻率剖面法	(33)
第一节 电阻率剖面法概述	(33)
一、剖面法的常用装置类型及特点	(33)
二、几种常用剖面法 ρ_s 表达式的联系	(36)
第二节 中间梯度法的视电阻率异常	(37)
一、球体上中间梯度法的 ρ_s 异常	(37)
二、脉状体上中间梯度法的 ρ_s 异常	(44)
第三节 联合剖面法与对称四极剖面法的视电阻率异常	(47)
一、垂直接触面上联合剖面法与对称四极剖面法的 ρ_s 异常	(47)
二、球体上联合剖面法与对称四极剖面法的 ρ_s 异常	(53)
三、板状体上联合剖面法与对称四极剖面法的 ρ_s 异常	(58)
第四节 偶极剖面法的视电阻率异常	(62)
一、球体上偶极剖面法的 ρ_s 异常	(62)
二、板状体上偶极剖面法的 ρ_s 异常	(63)
第五节 复杂条件下的电阻率剖面曲线	(66)
一、起伏地形引起的视电阻率异常及克服地形影响的方法	(66)
二、地表电性不均匀体对视电阻率曲线的影响及其克服方法	(68)
第六节 电阻率剖面法的应用	(69)
一、电阻率法在地震监测中的应用	(69)
二、电阻率法在地质填图中的应用	(70)
三、在水文地质工作中的应用	(71)
第四章 电阻率测深法	(73)
第一节 多层水平地层地面点电流源的电场及 ρ_s 表达式	(73)
一、多层水平地层地面点电流源的电场	(73)
二、电阻率转换函数	(76)
第二节 水平地层上电测深曲线分析	(77)
一、水平地层上电测深曲线类型	(77)
二、对称四极电测深二层及三层量板	(78)
三、水平地层的纵向电导与横向电阻	(81)
四、水平地层上电测深曲线的基本性质	(82)
五、电测深曲线的等值现象	(84)

第三节 水平层电测深曲线的定量解释	(86)
一、用数字滤波法求电阻率转换函数	(86)
二、用最优化法求层参数	(88)
三、用数字滤波求 ρ_s 及 ρ_b 的直接拟合	(89)
第四节 非水平层上的电测深曲线	(90)
一、斜触层上的电测深曲线	(90)
二、球体上的电测深曲线	(91)
三、板状体上的电测深曲线	(92)
第五节 电阻率测深法的实际应用	(93)
一、测网及电极距的选择	(93)
二、电测深成果的一些定性解释图件	(94)
三、电测深法在金属矿上的应用	(97)
第五章 高密度电阻率法	(99)
第一节 高密度电阻率法概述	(99)
一、高密度电阻率法的工作原理	(99)
二、高密度电阻率法常用装置	(100)
三、三电位电极系测量装置	(102)
四、视参数及其计算	(103)
第二节 资料处理及模型实验	(104)
一、数据处理	(104)
二、水槽模型实验	(105)
三、数值模拟计算	(109)
第三节 高密度电阻率法应用实例	(110)
一、确定岩土分界面	(110)
二、滑坡勘查	(111)
三、岩溶探测	(112)
四、某含金石英脉	(113)
五、钼矿某采空区与残留矿体	(113)
六、高密度电阻率法的延时性勘探	(114)
七、美国某海底电阻率勘探	(115)

第二篇 大地电场、自然电场法及充电法

第一章 大地电场	(116)
第一节 大地电场概述	(116)
一、大地电场的测量	(116)

二、大地电场的特点	(117)
三、大地电场的场源	(118)
第二节 地电日变化	(119)
一、地电日变化的形态	(119)
二、地电日变化随时间的变化	(119)
三、地电日变化的地面分布	(120)
第三节 大地电场的干扰变化	(120)
一、地电微变化	(120)
二、地电湾扰	(123)
三、地电暴	(124)
第二章 自然电场	(125)
第一节 自然电场的类型	(125)
一、氧化还原电场	(125)
二、过滤电场	(127)
三、扩散电场	(130)
第二节 规则几何形体的自然电场	(132)
一、具有垂直接触面的两种半无限介质接触面的自然电场	(132)
二、均匀极化球体的自然电场	(133)
第三节 自然电场法的装备及观测方法	(137)
一、自然电场法的设备	(137)
二、自然电场的观测方法	(137)
三、自然电场法的应用	(138)
第三章 充电法	(141)
第一节 充电法的基本理论	(141)
一、球形导体的充电电场	(141)
二、导电椭球体的充电电场	(142)
三、不等位导体的充电电场	(144)
第二节 充电法的应用	(145)
一、充电法的应用范围及应用条件	(145)
二、应用实例	(145)

第三篇 激发极化法

第一章 岩石和矿石的激发极化性质	(148)
第一节 岩石和矿石的激发极化机理	(148)
一、电子导体的激发极化机理	(148)

二、离子导体的激发极化机理·····	(149)
第二节 稳定电流场中岩石和矿石的激发极化特性·····	(151)
一、面极化特性·····	(151)
二、体极化特性·····	(154)
第三节 交变电流场中岩石和矿石的激发极化性质·····	(156)
一、交变电流场中岩石和矿石的激发极化现象·····	(156)
二、幅频特性和相频特性的关系·····	(159)
三、频率特性和时间特性的关系·····	(160)
四、描写频率域激电效应的参数·····	(160)
五、频率特性和时间特性的定量描述·····	(162)
第二章 激发极化场的计算和模拟方法·····	(166)
第一节 面极化电场的计算和模拟方法·····	(166)
一、面极化电场的边界条件·····	(166)
二、面极化电场的计算·····	(167)
三、面极化电场的模拟准则·····	(169)
第二节 体极化电场的计算和模拟方法·····	(170)
一、等效电阻率·····	(170)
二、体极化电场的边界条件·····	(170)
三、体极化电场的计算·····	(171)
四、体极化电场的模拟方法·····	(175)
第三章 时间域激发极化法·····	(177)
第一节 中间梯度装置的激电异常·····	(177)
一、球形极化体的中梯激电异常·····	(177)
二、椭球状极化体上的中梯激电异常·····	(179)
第二节 联合剖面装置的激电异常·····	(181)
一、球形极化体的联剖激电异常·····	(181)
二、板状极化体的联剖激电异常·····	(182)
第三节 对称四极测深装置的激电异常·····	(183)
一、球形极化体上的激电测深曲线·····	(183)
二、低阻板状极化体上的激电测深曲线·····	(184)
三、高阻板状极化体上的激电测深曲线·····	(184)
四、激电测深的 η_s 等值线断面图·····	(185)
五、极化体埋深的近似估算·····	(186)
第四节 时间域激电法的应用·····	(186)
一、找矿实例·····	(187)

二、找水方法及实例	(188)
三、油气田勘查实例	(189)
第四章 频率域激发极化法	(191)
第一节 视电阻率异常	(191)
第二节 视复电阻率频谱异常	(193)
一、不同测点的视相位频谱	(193)
二、不同相对电阻率的视相位频谱	(194)
三、不同埋深时的视相位频谱	(195)
第三节 频率域激电法的应用	(196)

第四篇 交变电磁场

第一章 岩石和矿石的介电极化性质	(199)
第一节 介电极化的机理	(199)
第二节 岩石、矿石的相对介电常数	(202)
第三节 影响岩石、矿石（相对）介电常数的因素	(203)
一、岩石、矿石（相对）介电常数与频率的关系	(203)
二、岩石、矿石（相对）介电常数与湿度的关系	(204)
三、岩石、矿石（相对）介电常数与其成分的关系	(205)
四、岩石（相对）介电常数与压力的关系	(205)
五、岩石（相对）介电常数与温度的关系	(206)
第四节 岩石、矿石在电磁场中的电学性质	(207)
第二章 交变电磁场在导电介质中的传播	(210)
第一节 波动方程	(210)
一、麦克斯韦方程组	(210)
二、电磁场波动方程	(211)
第二节 边界条件	(212)
第三节 波阻抗	(213)
第四节 地中交变电磁场的分布	(213)
一、人工源谐变电磁场	(213)
二、瞬变电磁场	(216)
第三章 均匀各向同性大地的正常电磁场及视电阻率公式	(219)
第一节 均匀大地表面上谐变偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(219)
一、均匀大地表面上水平电偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(220)
二、均匀大地表面上垂直磁偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(224)

第二节 均匀大地表面阶跃偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(225)
一、典型函数的傅立叶反变换	(225)
二、水平电偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(226)
三、垂直磁偶极子场源的电磁场及视电阻率公式	(228)
第四章 电磁剖面法	(233)
第五章 电磁测深法	(236)
第一节 大地电磁测深法	(236)
一、水平层状介质的正演理论	(236)
二、水平层状理论曲线及特点	(240)
三、大地电磁测深资料解释	(245)
第二节 频率测深法	(250)
一、水平层状大地的正演理论及计算方法	(251)
二、视电阻率曲线特征	(254)
三、频率测深装置最佳状态参数选择	(260)
四、频率测深曲线解释	(263)
第三节 瞬变测深法	(265)
一、水平层状大地的正演理论及计算方法	(265)
二、良导板状体的瞬变电磁场	(267)
三、视电阻率曲线特征	(270)
四、瞬变电磁测深曲线解释	(273)
五、电磁测深方法的应用	(275)
第六章 可控源音频大地电磁测深	(279)
第一节 CSAMT 的基本理论	(279)
一、均匀半空间介质中接地水平电偶极子的电磁场	(279)
二、层状介质的水平电偶极源的频域电磁响应	(281)
第二节 野外工作方法与技术	(282)
一、CSAMT 的观测方式	(282)
二、仪器与野外工作布置	(283)
三、提高观测质量的措施	(283)
第三节 CSAMT 的资料处理和解释	(283)
一、资料的再处理	(283)
二、资料处理与解释	(286)
主要参考文献	(288)

第一篇 电阻率法

电阻率法是以地壳中岩石和矿石的导电性差异为物质基础，通过观测与研究人工建立的地中电流场（稳定场或交变场）的分布规律达到找矿目的和解决其他地质问题的一组电法勘探分支方法。实践证明，电阻率法无论是在普查金属、非金属矿产和研究地质构造还是在水文、工程地质调查以及勘查能源等方面，均取得了良好的地质效果，发挥着重要作用。

第一章 岩石和矿石的导电性

第一节 岩石、矿石导电性的一般特点

在电法勘探中，用来表征岩石、矿石导电性好坏的参数为电阻率（ ρ ）或电导率（ $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ）。如图 1-1-1 所示，当对一横截面积为 S 的长方形岩石、矿石标本，通过 A 和 B 两极对其供电（电流^①为 I ），并在相距为 l 的环形电极 M 和 N 处测出其间之电位差（ ΔU ）时，可按式计算其电阻率：

$$\rho = R \frac{S}{l} = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{S}{l} (\Omega \cdot \text{m}) \quad (1-1-1)$$

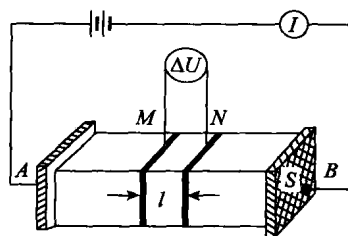


图 1-1-1 测量岩石、矿石标本电阻率的装置简图

大家知道，物质电阻率乃为电流通过由该物质组成的体积为 1m^3 的立方体时，所表现出的电阻值。其单位为欧姆·米，或记作 $\Omega \cdot \text{m}$ 。物质电阻率值越低，其导电性越好；反之，若物质电阻率值越高，则其导电性越差。

一、矿物的电阻率

岩石和矿石都是由矿物组成的，因此在未讨论岩、矿石电阻率之前，先来介绍一些常见矿物的电阻率。

按导电机理的不同，固体矿物可分为三种类型：金属导体、半导体和固体电解质。

金属导体 各种天然金属均属于金属导体。较重要的天然金属有自然金和自然铜，其电阻率值均很低：自然金的电阻率约为 $2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ；自然铜则约为 $1.2 \times 10^{-8} \sim 30 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。此外，石墨这种具有某些特殊性质的电子导体也具有很低的电阻率值（低达 $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ）。

半导体 大多数金属矿物均属于半导体。其电阻率值都高于金属导体，并有一定的变

① “电流”是标准计量单位，俗称“电流强度”。

化范围 ($10^{-6} \sim 10^6 \Omega \cdot m$)，见表 1-1-1。

表 1-1-1 常见半导体矿物的电阻率值

矿物名称	电阻率值/ ($\Omega \cdot m$)	矿物名称	电阻率值/ ($\Omega \cdot m$)
斑铜矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	赤铁矿	$10^{-3} \sim 10^6$
磁铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	锡石	$10^{-3} \sim 10^6$
磁黄铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	辉锑矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	软锰矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铁矿	$10^{-3} \sim 10^0$	菱铁矿	$10^0 \sim 10^3$
方铅矿	$10^{-3} \sim 10^0$	铬铁矿	$10^0 \sim 10^6$
辉铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	闪锌矿	$10^3 \sim 10^6$
辉钼矿	$10^{-3} \sim 10^0$	钛铁矿	$10^3 \sim 10^6$

由表 1-1-1 可见，大多数常见的金属硫化矿物（如黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等）和某些氧化矿物（如磁铁矿），其电阻率值均较低（小于 $1 \Omega \cdot m$ ），具有良好的导电性。另一些金属硫化物和氧化矿物，如辉锑矿、闪锌矿、锡石、软锰矿、铬铁矿和赤铁矿等，其电阻率值均较高（约为 $1 \sim 10^6 \Omega \cdot m$ ）。

固体电解质 绝大多数造岩矿物，如辉石、长石、石英、云母、方解石等，均属于固体电解质。其电阻率值都很高（大于 $10^6 \Omega \cdot m$ ），在干燥情况下可视为绝缘体。

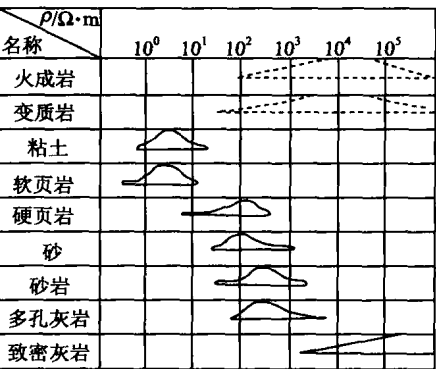


图 1-1-2 几种物质电阻率值的分布范围曲线

二、岩石、矿石的电阻率

由上可知，矿物电阻率值是在一定范围内变化的，即同种矿物可有不同的电阻率值，不同矿物也可有相同的电阻率值。因此，岩石和矿石的电阻率通常也非为某一特定值。如对几种常见岩石而言，如图 1-1-2 所示，其电阻率值便是在一定范围内变化的。由图可见：火成岩与变质岩的电阻率值较高，通常在 $10^2 \sim 10^5 \Omega \cdot m$ 范围内变化；沉积岩电阻率值一般较低，如粘土电阻率约为 $10^0 \sim 10^1 \Omega \cdot m$ ；砂岩电阻率约为 $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot m$ ；而灰岩电阻率则高些。

火成岩、沉积岩、变质岩电阻率的变化固然与其矿物成分有关，但在很大程度上取决于它们的孔隙度或裂隙度以及其中所含水分的多少。

对矿石电阻率而言，也有类似情况。其电阻率值除与组成矿石的矿物成分、含量有关外，更主要的是由矿物颗粒的结构构造所决定的。我们将在下面对此进行讨论。

第二节 影响岩石、矿石电阻率的因素

影响岩石、矿石电阻率的因素很多，本节主要讨论成分、结构、所含水分以及温度对它们的作用。

一、岩石、矿石电阻率与成分和结构的关系

多数岩石和矿石可视为是由均匀相连的胶结物与不同形状的矿物颗粒组成。岩、矿石的电阻率决定于这些胶结物和颗粒的电阻率、形状及相对含量。设胶结物电阻率为 ρ_1 ，颗粒电阻率为 ρ_2 。当岩石或矿石仅由这两种矿物组成时，其电阻率 ρ 与 ρ_1 和 ρ_2 及颗粒的体积百分含量 V 有关，对不同形状的颗粒而言，其关系是不同的。

根据等效电阻率的近似理论（石应骏等，1990），不同结构的岩、矿石电阻率有以下表达形式：

(1) 球形颗粒

$$\rho = \rho_1 \frac{(\rho_1 + 2\rho_2) - (\rho_1 - \rho_2)V}{(\rho_1 + 2\rho_2) + 2(\rho_1 - \rho_2)V} \quad (1-1-2)$$

(2) 针状颗粒（形状近于拉长的旋转椭球体）

$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= \rho_1 \frac{\rho_1 + \rho_2 - (\rho_1 - \rho_2)V}{\rho_1 + \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)V} \\ \rho_t &= \rho_1 \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + (1 - V)\rho_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

这里 ρ_n 和 ρ_t 为垂直颗粒长轴和沿着颗粒长轴方向的电阻率，两者有关系

$$\rho_n - \rho_t = \rho_1 \frac{V(1 - V)(1 - \mu_{12})^2}{[1 + V + \mu_{12}(1 - V)] \cdot [V + \mu_{12}(1 - V)]} \geq 0$$

式中： $\mu_{12} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ，由于 $V \leq 1$ 及 $(1 - \mu_{12})^2 \geq 0$ ，故总有关系 $\rho_n \geq \rho_t$ ，即无论 ρ_1 和 ρ_2 及其体积含量 V 等的大小如何，垂直颗粒长轴方向的岩、矿石电阻率总是大于沿着颗粒长轴方向的电阻率。

(3) 圆片状颗粒（形状近于压偏的旋转椭球体）

$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= \rho_1(1 - V) + \rho_2 V \\ \rho_t &= \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + \rho_2(1 - V)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

同样，由于有关系：

$$\rho_n - \rho_t = \rho_1 \frac{V(1 - V)(1 - \mu_{12})^2}{V + \mu_{12}(1 - V)} \geq 0$$

因此，无论 ρ_1 和 ρ_2 及颗粒体积含量 V 等大小如何，总有关系 $\rho_n \geq \rho_t$ ，即通常总是垂直压扁颗粒面的电阻率大于沿着颗粒压扁面方向的电阻率。

图1-1-3中给出了根据以上3种颗粒情况电阻率公式算得的 ρ/ρ_1 与 V 的理论曲线。图中上半部为高阻颗粒情况（ $\rho_2/\rho_1 = 10^7$ ），下半部为低阻颗粒情况（ $\rho_2/\rho_1 = 10^{-7}$ ）。由图中两条曲线1可见，无论颗粒是高阻还是低阻，当其体积含量不太大（ $V < 60\%$ ）时，整体岩、矿石的电阻率（ ρ ）受 ρ_2 之影响甚小，其值接近胶结物电阻率（ ρ_1 ）；仅当颗粒体积含量相当大（ $V \geq 60\%$ ）时， ρ_2 才对 ρ 有明显作用。这是由于颗粒体积含量不大时，各颗粒是相互分离的，而胶结物是彼此连通的，故矿物颗粒对整体岩石、矿石电阻率的影响不大，此时胶结物起主要导电作用。但当颗粒体积含量相当大以致彼此连通时， ρ_2 则对

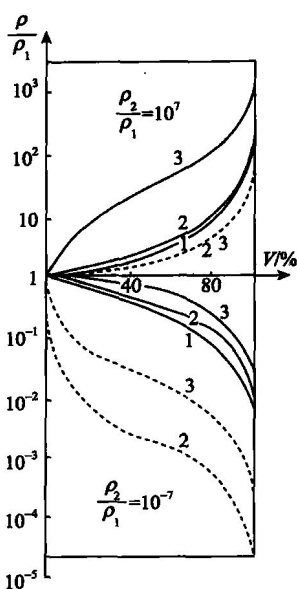


图 1-1-3 岩石、矿石电阻率与矿物颗粒体积分含量的关系
1—球状颗粒 ($a=b=c$); 2—针状颗粒 ($a=b=1/40c$); 3—片状颗粒 ($a=b=40c$)

整体岩石、矿石的电阻率有明显影响。因此,当物质组分一定时,岩石、矿石电阻率值主要决定于它们的连通情况,连通者起的作用大,孤立者起的作用小。如浸染状金属矿石,胶结物多为彼此连通的造岩矿物,故常表现为高阻。但对含水砂(砾)岩而言,连通的胶结物是水,故常表现为低阻(岩石孔隙水的电阻率通常小于 $100\Omega \cdot m$)。

由图 1-1-3 中的曲线 2 和 3 可以看出,无论 $\rho_2 > \rho_1$ 还是 $\rho_2 < \rho_1$, 总有 $\rho_n > \rho_t$, 表明了针状或片状结构的岩石、矿石电阻率具有方向性(非各向同性)。此外,由图 1-1-3 还可看出,对良导电的针状或片状颗粒的岩石、矿石而言,其 ρ_n 与含同样体积的球状颗粒之岩石、矿石电阻率相差不多,而 ρ_t 却明显较球状颗粒者低;对于含高阻片状颗粒的岩石、矿石,其 ρ_t 与含同样体积的针状或球状颗粒的岩石、矿石电阻率相差不多,而 ρ_n 却明显地比针状或球状颗粒者大。

综上所述,只有当良导电矿物彼此连接较好时,它们才对整体岩石、矿石电阻率有较大影响;反之,若良导电矿物被高阻胶结物隔开,则其对整体岩石、矿石电阻率的影响很小。因此,一般说颗粒的含量多少不起关键作用,而主要决定于其结构。如图 1-1-4 所示,当良导电矿物呈浸染状分布时(图 1-1-4 (a)),由于连通的高阻矿物将其隔开,即使良导电矿物的含量并不低,但整个矿石的电阻率却比较高;如良导电矿物呈网脉状或片状分布时(图 1-1-4 (b), (c)),因其连通较好,虽含量不多,但整个矿石的电阻率却可变得很低。

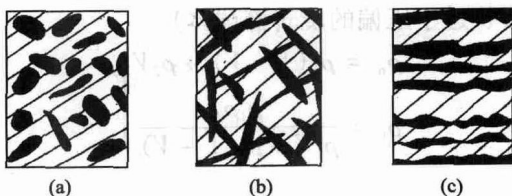


图 1-1-4 矿石不同结构的示意
(图中黑色部分代表良导电矿物)

在自然界中,大多数沉积岩和一部分变质岩常成层状构造。这种层状岩石的电阻率也具有非各向同性的性质。对于两种薄层交替成层的情况,若其电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 , 两种薄层的总厚度分别为 h_1 和 h_2 (图 1-1-5), 则按电阻并联和串联的关系,不难算出沿层理方向和垂直层理方向的电阻率 ρ_t 和 ρ_n 有如下形式:

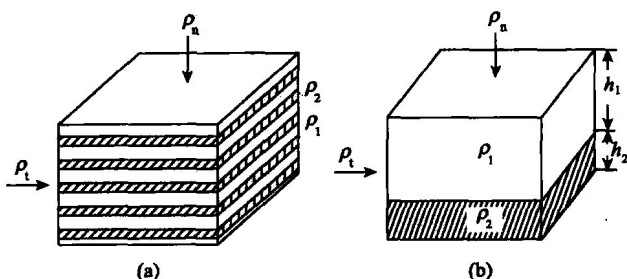


图 1-1-5 层状岩石模型
(a) 实际构造; (b) 等效模型