

高等学校教学用书

水文及工程地球物理勘探

张守恩 葛宝堂 编



中国矿业大学出版社

高等学校教学用书

水文及工程地球物理勘探

张守恩 葛宝堂 编

中国矿业大学出版社

875199

内 容 提 要

本书是根据煤炭高等院校水文地质及工程地质专业《水文及工程地球物理勘探》课程教学大纲编写的。全书共三篇十三章。

第一篇为电法勘探,包括:直流电测深法、电剖面法、充电法、自然电场法、激发极化法,并适当增加了适应矿区水文及工程勘探的高密度电阻率剖面法,以及无线电波透视法、甚低频电磁法、地质雷达等交变电磁场法等内容。第二篇为浅层地震勘探,包括:浅层折射波法、浅层反射波法和弹性波探测技术,加强了浅层、高分辨率以及有关工程地质应用方面的内容。第三篇为地球物理测井,包括:适应水文地质及工程地质应用的声波测井等内容。

本书是为高校水文地质及工程地质专业设置的普通地球物理勘探课程编写的教材,亦可供矿产资源勘查专业学生及从事水文地质及工程地质物理勘探的工程技术人员参考。

高等学校教学用书

水文及工程地球物理勘探

张守恩 葛宝堂 编

责任编辑:宋德淑

中国矿业大学出版社 出版发行

北京地质印刷厂印刷

开本 787×1092mm¹/16 印张 13 75 字数 333 千字

1997年12月第1版 1997年12月第1次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-81040-766-X/P·38

定价:27.00元

前 言

《水文及工程地球物理勘探》的编写,是以煤炭高等学校水文地质及工程地质专业普通地球物理勘探课程教学大纲为依据,在广泛征求教学单位的意见以及赴地矿系统(中国地质大学)调研的基础上拟定出编写细则。

编写过程中,参考有关的主要教材、著作和文献资料,结合专业特点和近期在水文及工程地球物理勘探方面的新进展,适当做了充实。

本书的内容,是以电法勘探、地震勘探及声波探测、地球物理测井为重点,说明这几种主要物探方法的理论基础、应用条件以及资料解释方法。同时,为了扩大学生的知识面,在编写过程中适当增加了工程物探等方面的内容。

本教材适用于70学时的教学。各校可根据专业需要,选择、取舍教材内容。

本书由张守恩主编。参加编写的人员有:焦作工学院张守恩(绪论、第五、六、七、八、九、十、十二、十三章);中国矿业大学葛宝堂(第一、二、三、四、十一章)。

中国矿业大学李志鹏教授、刘天放教授对本教材的编写提纲及其内容提出了宝贵的改进和补充意见,还为本教材的编写提供了参考资料和近期的研究成果,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中不可避免存在谬误和不当之处,敬请读者批评指正。

编者

1997年10月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 电法勘探

第一章 电阻率法勘探的理论基础	(3)
第一节 电阻率法的地质基础	(3)
第二节 地下稳定电流场	(10)
第三节 视电阻率的基本概念	(17)
第二章 垂向电测深法	(21)
第一节 对称四极电测深法的基本原理	(21)
第二节 电测深野外工作方法和技术	(33)
第三节 电测深资料的定性解释	(36)
第四节 电测深曲线的定量解释	(43)
第三章 电阻率剖面法	(54)
第一节 电剖面法概述	(54)
第二节 联合剖面法	(56)
第三节 对称剖面法	(64)
第四节 中间梯度法	(67)
第四章 水文地质及工程地质调查中的其他直流电探方法	(70)
第一节 充电法	(70)
第二节 自然电场法	(75)
第三节 直流激发极化法	(80)
第四节 高密度电阻率剖面法	(87)
第五章 交变电磁场法	(93)
第一节 甚低频电磁法(VLF)	(93)
第二节 无线电波透视法	(97)
第三节 地质雷达	(101)

第二篇 浅层地震勘探

第六章 地震勘探概述	(104)
第一节 弹性波的基本知识	(104)
第二节 地震波的传播	(111)
第三节 地震波在岩石中的传播速度及其影响因素	(122)
第七章 地震波的时距曲线	(125)
第一节 直达波的时距曲线	(125)
第二节 反射波的时距曲线	(125)
第三节 折射波的时距曲线	(129)

第四节	特殊波的时距曲线	(133)
第八章	浅层折射波法	(137)
第一节	折射波法的野外工作方法	(137)
第二节	折射波法地震资料解释	(142)
第九章	浅层反射波法	(149)
第一节	浅层反射波法的野外工作方法	(149)
第二节	反射波法的资料解释	(158)
第十章	弹性波探测技术	(171)
第一节	声波探测技术	(171)
第二节	桩基动态无损检测技术	(176)
第三节	瑞利面波法	(183)

第三篇 地球物理测井

第十一章	电测井	(186)
第一节	视电阻率测井	(186)
第二节	自然电位测井	(195)
第十二章	放射性测井	(201)
第一节	放射性测井基本知识	(201)
第二节	自然伽玛测井	(204)
第三节	伽玛-伽玛测井	(205)
第十三章	声波测井及其他	(207)
第一节	声速测井	(207)
第二节	超声成像测井	(209)
第三节	井温、井斜、井径的测量	(211)
参考文献	(214)

绪 论

“水文及工程地球物理勘探”是水文地质及工程地质地球物理勘探的简称。而地球物理勘探亦称应用地球物理,是地球物理学在地质学中应用的一门边缘学科。地球物理是研究地球内外,包含地核、地幔、地壳以及水圈、大气圈及其空间的物理场和物理现象,如地磁、重力、地震、放射性、地电、地球热学、气象等。应用地球物理则是利用地球物理的方法,来勘探地球的地壳表层附近岩石的构造、岩性或寻找有用的矿产资源(包括水资源)。它是根据地壳中的岩层或地质异常体在物理性质上的差异,使用专门的装备和仪器观测由于这种差异而引起的物理场的微弱变化,结合有关的地质资料,推断地下地质异常体的分布规律,勘探地层构造形态或寻找有益矿产。

根据所研究的地球物理场的不同,地球物理勘探方法可分为以下几个大类:

(1)以岩石电性(导电性、介电性、导磁性、激电性)差异为基础,研究天然或人工电场、电磁场的电法勘探。

(2)以岩石的磁性差异为基础,研究地壳局部磁场变化的磁法勘探。

(3)以研究岩石介质密度差异而引起地球重力场变化为基础的重力勘探。

(4)以岩土介质的弹性差异(密度、速度、杨氏模量、泊松比、切变模量等)为基础,研究观测人工激发的弹性波场的地震勘探。

(5)以岩土介质的辐射场和放射性为基础的红外探测、放射性勘探等。

(6)将上属物探方法用到钻孔中,可划分钻井地质剖面、解释岩性,并分层定深、定厚以及解决钻孔中技术问题(井斜、井温、井径)等的地球物理测井。

物探技术根据在野外观测施工的场地和形式不同,又可以分为地面物探、海洋(或水上)物探、航空物探、矿井(或坑道)物探等。

按照不同行业的工作目的和应用范围,物探技术又可以分为:煤田物探、石油物探、金属及非金属物探、水文地质及工程地质物探等。

各种物探方法的演变与发展都与世界当代科技水平,尤其是数学、物理、电子技术、通讯技术、计算机技术的发展有关。70年代以来,数字通讯技术、航天技术、计算机数字技术的飞速发展,使物探技术,尤其是地震勘探技术出现了革命性的飞跃发展。先进的地震勘探数据采集系统及数据处理系统代替了落后的模拟仪器设备,使地震勘探的分辨率、精度以及抗干扰能力大为提高,利用地震勘探可以成功地解决复杂断块地质构造等问题。当前,地震勘探已经进入岩性勘探和直接找矿、找油气藏的领域。

电法勘探随着科学技术的发展,也从本世纪初简单的电法勘探发展到当前的两大分支,即天然场(无源)和人工场(有源)的直流电法勘探和天然场(无源)和人工场(有源)的交流电磁勘探。这些多种多样的派生方法在综合解决金属、非金属勘探、水文地质及工程地质问题等方面显示了极大的灵活性。在具有良好的物理前提下,只要因地制宜地选用正确的物探方法,采取必要措施,排除和压制各种干扰,保证原始信息和观测数据的质量,结合地质资料进行综合解释,一般可取得较好的效果。

我国的物理勘探工作是在新中国成立初期作为地质勘探中的一种重要手段,从勘探煤田、石油、金属、非金属等有益矿产资源开始发展起来的。水文地质及工程地质物探是在前者已发展到一个较高的技术水平,并积累了比较丰富经验的基础上在近二三十年发展起来的新技术。同时,又由于物理勘探具有成本低、效率高以及方法具有透视性等优点,所以它在解决水文地质、工程地质问题方面得到了广泛和成功的应用,逐渐成为不可缺少的勘探手段。一般来说,水文和工程物理勘探可解决以下水文地质问题:

(1) 勘查供水水源地含水层的埋深、层厚、产状以及赋存范围。

(2) 区分咸水、淡水含水层;探测含水层之间或地表水与地下水之间的补给关系;求取地下含水层的流速、流向和钻孔抽水漏斗的影响半径等水文地质参数。

(3) 探测古河床含水层的分布规律;探测岩溶、裂隙富水带的赋存形态。

(4) 探测基岩埋深和新地层、疏散层的厚度。

(5) 勘探工作区的构造形态,断层、褶皱等地质构造的产状,追踪地质构造的延伸和展布方向,为划分水文地质单元、研究水文地质问题提供基础地质资料。

在工程地质方面,运用物探方法一般可以解决以下问题:

(1) 测定覆盖层、风化带的厚度。

(2) 探测断层、裂隙破碎带及地下溶洞等地质体的空间分布。

(3) 岩石动弹参数(杨氏模量、剪切模量、泊松比)的测定及岩体的工程地质分类和稳定性评价。

(4) 建筑物基础工程的勘察及评价。

(5) 滑坡、陷落柱、洞穴等的探测以及水坝、路基等病害地基的勘查。

(6) 桩基质量及承载力的检测和评价。

(7) 地下管线分布及漏失等情况检测。

(8) 环境污染及有关灾害地质的监测。

必须指出,物探方法本身是一种间接勘探方法,存在着多解性,因此物探技术能否取得良好的效果,除具备良好的物理前提,根据不同的勘探目的、不同的地质条件,合理选择物探方法技术之外,还必须十分重视物探资料与地质勘探资料相结合的综合解释。

第一篇 电 法 勘 探

电法勘探是以岩、矿石之间的电磁学性质和电化学性质的差异为物质基础的主要物探方法之一。由于地质勘查和找矿对象自然条件的多样性,故电法勘探的方法也较多,通常将其分为两大类:即传导类电法和感应类电法。前者以各种直流电法为主,其中电阻率法、充电法、自然电场法及激发极化法等在水文、工程地质勘查中获得了广泛的应用;后者包括了各种交流电法,其中甚低频电磁法在水文地质调查中获得了探讨性的应用,无线电电磁波透视法和地质雷达探测技术在煤矿井下探测小断层和陷落柱等方面获得了研究性的应用。随着煤炭生产和开采的需要,对井下电法勘探的要求越来越高,这就需要进一步研究适合井下特点的电法探测技术和资料解释技术。

第一章 电阻率法勘探的理论基础

目前,电阻率法是电法勘探在水文地质勘查中的主导方法。它在水文地质中主要用于:研究含水储水构造及其空间形态分布;划分咸、淡水界线;确定某些水文地质参数;在煤矿开采过程中,研究巷道或回采工作面煤层顶、底板隔水层的厚度;裂隙发育程度及其含水层的富水性等。在工程地质中,电阻率法主要用于:研究建筑工程基础的地质情况,如覆盖层厚度、基岩埋深和起伏形态变化;探测断裂构造、岩溶及其发育情况;研究滑坡问题等。在煤矿地质中,电阻率法主要用于研究陷落柱、探测小断层等地质构造。

电阻率法是以地壳中不同岩、矿石的电阻率差异为物质基础,通过观测、研究人工建立的稳定电流场在地下岩、矿石中的分布和变化规律以达到找矿、研究地质构造和寻找地下水的一种电法勘探的分支方法。

用电阻率法解决地质问题,必须了解和掌握岩、矿石在天然状态的电阻率和稳定电流场在地下分布规律。本章先讨论岩、矿石的导电性,然后介绍稳定电流场的基本性质和在地下分布规律,最后引入电阻率法勘探中的视电阻率和勘探深度两个重要概念。

第一节 电阻率法的地质基础

一、岩石电阻率的概念

自然界中不同的岩、矿石其导电性能往往不同,既有易于导电的,也有不易于导电的。表征物质导电性能的物理参数为电阻率,用符号 ρ 表示。在数值上它相当于电流垂直通过边长1m的立方体均匀物质时该物质所具有的电阻值,如图1-1所示。电阻率的单位是欧姆米,记作 $\Omega \cdot m$ 。有时也用电导率 σ 表示物质的导电性,其单位为西门子每米,记作S/m。电阻率与电导率互为倒数,即 $\rho=1/\sigma$ 。

电阻率与电阻的概念不同,它仅是表征物质本身对电流传导的阻碍能力,而与物体的几何形状、大小以及电流在物质中的分布情况等无关。

岩、矿石的电阻率是表示其阻碍电流传导能力的物理参数。显然,岩、矿石的电阻率越

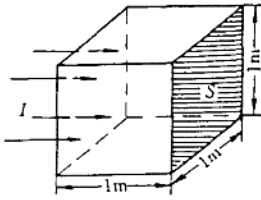


图 1-1 岩石电阻率的概念

低,其电导率就越大,导电性也就越好;反之,电阻率越高,其导电性就越差。

对于粗细均匀的细长导体,其电阻 R 与线长 l 成正比,与该导体的电阻率 ρ 成正比,与其横截面的面积 S 成反比。即

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

而物理学中的欧姆定律为

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (1-2)$$

式中 ΔU —— 线长 l 之间的电位差;

I —— 导线中的电流强度。

根据式(1-1)和式(1-2)便得细长导体的电阻率为

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (1-3)$$

测定岩芯电阻率的装置形式如图 1-2 所示。供电电极为两个金属帽,测量电极是两个金属环。在供电回路用毫安表测量电流强度 I ,在测量回路用具有高输入阻抗的电压表测量电位差 ΔU 。然后分别量度岩芯的截面积 S 和两个测量电极(金属环)之间的岩芯长度 l 后,代入式(1-3)计算,便可求得岩芯的电阻率。

岩石的电阻率数据是电阻率法资料解释的物性依据。通常要在大量的岩芯标本或露头上进行观测统计,才能获得不同种类岩石电阻率的变化范围及数据。

二、水及常见岩石、矿物的电阻率

1. 金属元素及常见矿物的电阻率

表 1-1 列出了金属元素及常见矿物电阻率的变化范围。从表中可以看出:金属元素的导电性极好,电阻率仅为 $10^{-8} \sim 10^{-7} \Omega \cdot m$;大多数金属硫化物和石墨属良导电性矿物;多数氧化物为中等导电性矿物;大多数重要的造岩矿物为劣导电性矿物。例如,石英、长石等的电阻率值在 $10^6 \Omega \cdot m$ 以上。

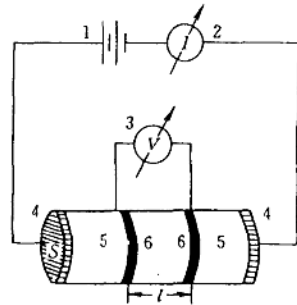


图 1-2 岩芯标本电阻率的测定

1—干电池;2—电流表;3—电压表;
4—金属帽;5—岩芯;6—金属环

表 1-1 金属元素及常见矿物的电阻率

单位: $\Omega \cdot m$

良 导 电 性				中 等 导 电 性 矿 物		劣 导 电 性 矿 物
金 属 元 素		矿 物				
10^{-8}	10^{-7}	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 1$	$1 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^5$	$> 10^6$
金	铁	石 墨	方 铅 矿	黑 钨 矿	褐 铁 矿	石 英
银	锡	斑 铜 矿	辉 铅 矿	赤 铁 矿	赤 铁 矿	长 石
铜	铅	铜 蓝	黄 铁 矿	软 锰 矿	蛇 纹 石	云 母
镍	锑	磁 黄 铁 矿	辉 铜 矿	菱 铁 矿	闪 锌 矿	角 闪 石
铝	汞	磁 铁 矿	黄 铜 矿	铅 铁 矿		方 解 石

2. 岩浆岩、变质岩和沉积岩的电阻率

地壳是由各种岩石组成的,而岩石又是由各种矿物组成的。由于影响岩石电阻率变化的因素很多,因而各种岩石电阻率的变化范围很大。所以在多数地区,不同岩石之间存在明显的电阻率差别。正是这种差别的存在,才为电阻率法勘探提供了良好的物理前提。

表 1-2 列出了常见岩石的电阻率变化范围。其中,岩浆岩的电阻率最高,变质岩次之,沉积岩最低。但沉积岩中的化学岩,如石灰岩、岩盐和石膏等的电阻率相当高;而某些变质岩,如石墨片岩等的电阻率却很低。

表 1-2 常见岩石电阻率

单位: $\Omega \cdot m$

岩类	岩石名称	电阻率	岩石名称	电阻率
沉积岩	粘土	$10^{-1} \sim 10$	砂岩	$10 \sim 10^3$
	干粘土	$10 \sim 10^2$	砾岩	$10 \sim 10^4$
	砂	$10^0 \sim 10^3$	泥灰岩	$10^0 \sim 10^2$
	泥岩	$10 \sim 10^2$	石灰岩	$10^2 \sim 10^4$
	页岩	$10 \sim 10^2$	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$
	粉砂岩	$10 \sim 10^2$	食盐	$10^4 \sim 10^6$
岩浆岩	花岗岩	$10^2 \sim 10^5$	辉绿岩	$10^2 \sim 10^5$
	正长岩	$10^2 \sim 10^5$	玄武岩	$10^2 \sim 10^5$
	闪长岩	$10^2 \sim 10^5$	辉长岩	$10^2 \sim 10^5$
变质岩	泥质板岩	$10 \sim 10^3$	大理岩	$10^2 \sim 10^5$
	片麻岩	$10^2 \sim 10^4$	石英岩	$10^3 \sim 10^5$

3. 水的电阻率

表 1-3 列出了自然状态下水的电阻率变化范围。水的电阻率与其矿化度和温度有密切的关系(表 1-4)。

表 1-3 自然状态下各种水的电阻率

单位: $\Omega \cdot m$

水的类型	电阻率	水的类型	电阻率
雨水	$> 10^3$	海水	$n \times 10^{-1} \sim n \times 10^0$
河水	$n \times 10^{-1} \sim n \times 10^2$	矿井水	$1 \sim 10$
潜水	$< 10^2$	深成盐渍水	$10^{-1} \sim 1$

地下水的矿化度变化范围很大,淡水中的矿化度为 $0.1g/L$,咸水的矿化度可高达 $10g/L$ 。因为地下水的电阻率随矿化度增高而明显减小,所以在岩性条件变化不大的前提下,可以在地面或钻孔中应用电阻率的差异来划分咸、淡水层位。

温度的变化主要引起水溶液中盐离子活动性的变化。由于水溶液中的盐离子移动速度随温度升高而加快,因此水溶液的电阻率随温度升高而减小。用电阻率法圈定地热异常区正是利用了这一特性。

在冰冻条件下,地下岩石中的水溶液全处于冻结状态,离子无法迁移,而使冰的电阻率剧增至 $10^5 \Omega \cdot m$ 左右,此时岩石呈现极高的电阻率,从而给电法勘探工作增加了困难。

表 1-4 地下水中常见盐类溶液的电阻率

矿化度 g/L	水 溶 液 电 阻 率, $\Omega \cdot m$			
	NaCl	CaCl	KCl	MgCl
纯 水	25×10^4	25×10^4	25×10^4	25×10^4
0.010	511	483	578	438
0.100	55.2	50.3	58.7	45.6
1.000	5.83	5.56	6.14	5.06
10.000	0.657	0.660	0.678	0.614
100.000	0.0809	0.0930	0.0776	0.0936

三、影响岩石电阻率的因素

通常,任何一种岩石的电阻率值都有一个变化范围。这一客观事实表明,在研究某一工作地区的岩石电性时,不仅需要掌握各种岩石电阻率的具体数值和相互间的差异,而且还要了解各种岩石电阻率的稳定程度及其变化规律。用电阻率法研究测区的地质构造或解决水文、工程地质问题的基本物理前提就是测区内各岩层必须具有不同的且相对稳定的电阻率值。

在自然条件下,影响岩石电阻率的因素很多,但主要的因素是岩石的矿物成分、结构、构造、岩石的孔隙、裂隙发育情况和含水性。

1. 岩石电阻率与矿物成分的关系

由于矿物的电阻率随着组成矿物的成分及内部结构的不同而在相当大的范围内变化,故岩石的电阻率也存在着一一定的变化范围。

重要的造岩矿物,如石英、云母和长石等硅酸岩类矿物,其电阻率高达 $10^5 \Omega \cdot m$ 以上,而沉积岩、岩浆岩和变质岩大多是由这些高电阻率的造岩矿物所组成的,所以在干燥状态下,它们有很高的电阻率值,只有少数含有相当数量的良导电性矿物的岩石才会有很低的电阻率值。所以,岩石的电阻率值变化一般与矿物成分的关系不大,而主要取决于岩石孔隙中地下水的含量、岩石孔隙、裂隙的发育程度以及水的矿化度。

2. 岩石的电阻率与孔隙水的含量及矿化度的关系

岩石的孔隙是地下水运移的通道和储存场所。地下水中常溶有各种盐类,从表 1-4 中可以看出,水溶液的电阻率主要取决于水的矿化度,而溶盐成分的影响并不大。

呈良导性的水溶液存在于彼此连通的岩石孔隙中,这就使岩石的导电性能大大增强。岩石的含水性与岩石的孔隙度及水文地质条件有关。一般岩石孔隙中的含水量越大、水的矿化度越高,岩石的电阻率也就越低。

坚硬致密的岩石,如岩浆岩、化学沉积岩和某些变质岩,在完整时其孔隙率很小,故电阻率一般都很高。但如果由于构造运动、风化或溶蚀作用,使这些坚硬致密的岩石产生裂隙或破碎并在其中充填有矿化水时,其电阻率就会显著降低。

表 1-5 列出了各种不同孔隙、饱含不同矿化度地下水的松散冲积沉积物电阻率的实测值。结果表明,当岩石位于地下潜水面以下时,岩石电阻率值主要取决于岩石的孔隙率和地下水的矿化度。

表 1-5 不同孔隙率岩石饱和不同矿化度地下水的电阻率实测结果

$\rho, \Omega \cdot m$ 矿化度, g/L	孔隙率, %			
	15~20 (砂砾石)	25~35 (粗中砂)	35~40 (细粉砂)	40~50 (粘土、砂粘土)
1	150~75	75~30	40~35	25~20
2	90~45	45~18	24~15	15~12
3	60~30	30~12	16~10	10~8
5	30~15	15~6	8~5	5~4
10	18~9	9~3.6	4.8~3	3~3.2

阿尔奇通过对大量的多孔性岩石电阻率的测定和统计得出了计算多孔性岩石电阻率的经验公式,其数学表达式为

$$\rho = a q^{-m} S^{-n} \rho_0 \quad (1-4)$$

式中 ρ ——岩石的电阻率;

ρ_0 ——孔隙水的电阻率;

q ——孔隙率;

S ——含水饱和度;

n ——饱和度指数;

m ——孔隙率指数,通常在 1.5~3.0 之间变化;

a ——比例系数,也称统计系数,一般在 0.5~1.5 之间变化。

例如,设 $S=1, a=1.2, m=2$ 。当取 $q=0.01, 0.1, 0.2, 0.3$ 时,则 $\rho/\rho_0=1.2 \times 10^4, 120, 30, 13.3$ 。

由此可知,当岩石孔隙饱和地下水时,孔隙率对岩石电阻率有显著影响。

新生界冲积沉积物的电阻率与孔隙率、胶结程度及富水性的关系更为密切。松散干燥砂砾石的电阻率高达几百至几千欧姆米,而当其饱和地下水时,电阻率则大大降低,相差可达数十乃至数百倍。在同样饱和地下水的情况下,粗颗粒的砂砾石电阻率就要比细颗粒的细砂、粉砂高。因此在第四系沉积层中,潜水面以下的高阻层位多反映粗颗粒含水层的存在;而低阻层位则往往是粘土隔水层的反映。根据这一电性特征,可以用地面电阻率法和电阻率测井曲线划分含水层与隔水层,并判断其富水性。

在煤矿生产过程中,由于采煤等原因造成的矿山压力变化,常常使煤层顶、底板隔水层产生裂隙,遭受破坏,进而导致突水淹井事故。近年来,国内、外用电阻率法在矿井下研究煤层顶、底板裂隙发育情况和导水高度、防治矿井水害已取得一定成效。随着煤炭开采的需要,电法勘探方法将会在煤矿防治水工程中发挥更大的作用。

3. 岩石电阻率与温度的关系

电子导体的电阻率随温度的升高而增高。但靠水溶液中盐离子导电的含水岩石则相反,其电阻率值随温度的升高而降低。这是因为存在于岩石孔隙中的水溶液随温度的升高溶解度增大、粘滞性减小,从而引起离子的迁移率增大,使岩石的导电性增强、电阻率降低。

据有关资料介绍,在 0℃ 以上的正温度区,电阻率值随温度的升高而缓慢减小。温度每升高 1℃,岩石的电阻率比原来降低百分之几。当温度从 17℃ 升高到 150℃ 时,岩石的电阻

率可降低到原来的 1/5;当升高到 280℃时,岩石的电阻率则可降低到原来的 1/9。所以在地下热水勘探中,用电阻率法圈定地热异常区比寻找同样水文地质条件下的常温水更为有利。需要指出,在正常情况下,地壳的温度随深度加大而缓慢递增,其地温梯度约 30m/℃左右。因此在使用电阻率法研究地壳的一般地质问题时,可不考虑温度的影响。但在 0℃以下的负温度区,含水岩土冻结后,由于离子无法迁移,从而失去导电能力,电阻率可增加到 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。由于地表冻土的电阻率极高,这就给直流电法的野外施工造成极大困难。

4. 岩石电阻率与层理的关系

页岩、泥质页岩、煤层及泥灰岩等沉积岩大多都有层理构造,它们是由许多薄层互相紧密交替组成。由于各薄层的矿物成分、孔隙率和湿度不同,故其电阻率值也不相同。当测量具有层理构造的岩石电阻率值时,若平行层理方向,则电阻率不同的各个薄层相当于构成一组电阻的并联电路,其所测电阻率值较小;若垂直于层理方向,则各薄层相当于构成一组电阻的串联电路,所测电阻率值较大。这种电阻率值与电流方向有关的性质称为岩石电阻率的微观各向异性。

除岩石本身可能具有的微观各向异性之外,由数个岩性不同的比较薄(相对埋深而言)的均匀各向同性岩层所组成的岩层组在电法勘探中所表现出的各向异性更具有实际意义,如由薄的砂岩、页岩、煤层和灰岩交互构成的煤系地层(图 1-3a),以及由薄层粘土、砂砾石等构成的含水层组。我们称这种岩层组的各向异性为宏观各向异性。为了研究层状介质各向异性的导电特征,在电阻率法勘探中引入了纵向电导和横向电阻的概念。

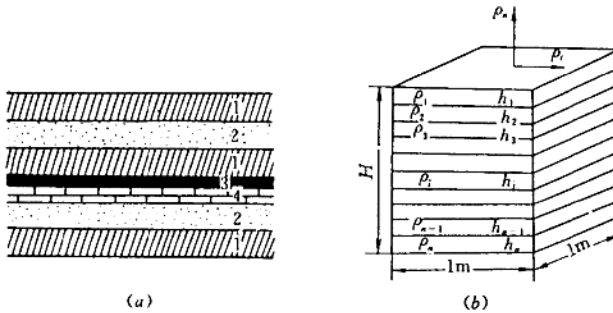


图 1-3 层状介质模型

a—煤系地层层状结构;b—层状介质的横、纵向电阻率;

1—泥岩;2—砂岩;3—煤层;4—灰岩

假定某岩石(或岩层)是由不同电阻率和不同厚度的薄层所组成,各薄层的电阻率分别为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, 厚度分别为 h_1, h_2, \dots, h_n , 总厚度为 H 。从该岩石(或岩层)中取一平行于层理,其高为 H , 底面积为 1m^2 的直角六面岩柱体(图 1-3b)。

根据并联电路的理论可知,当电流方向平行于该六面体底面时,所测得的岩石的总电导(电阻的倒数)应等于各薄层电导之和。这个值称为岩石(或岩层)的纵向电导,用符号 S 表示。即

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n h_i / \rho_i \quad (1-5)$$

于是得出岩石(或岩层)的纵向电阻率 ρ_l 为

$$\rho_l = \frac{H}{S} = \sum_{i=1}^n h_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (1-6)$$

根据串联电路理论,当电流方向垂直于该六面体的底面时,所测得的岩石电阻等于各薄层岩石电阻之和。此值称为岩石(或岩层)的横向电阻,用符号 T 表示。即

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \rho_i \quad (1-7)$$

于是便得出岩石(或岩层)的横向电阻率 ρ_n 为

$$\rho_n = \frac{T}{H} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \rho_i / \sum_{i=1}^n h_i \quad (1-8)$$

显然,纵向电阻率 ρ_l 小于横向电阻率 ρ_n 。岩石的这种各向异性程度大小通常用各向异性系数 λ 表示。即

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l} \quad (1-9)$$

在自然条件下,各种岩石的 λ 值均大于 1。 λ 值愈大,则 ρ_n 与 ρ_l 的差异就愈显著。各向异性岩石的电阻率值常用平均电阻率 ρ_m 表示,即 $\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_n}$ 。

表 1-6 中列出了几种常见岩石的各向异性系数 λ 值。由表可知,某些岩石(如石墨化炭质页岩、泥质页岩等)在垂直和平行层理两个方向的电阻率相差可达 4~7 倍以上。这在电法资料解释推断中,应引起充分重视。此外,实际工作中不必区分微观与宏观两种各向异性,而只需考虑总的各向异性的影响。

表 1-6 常见层理岩石各向异性系数

岩石名称	λ	岩石名称	λ
层状粘土	1.02~1.05	泥岩	1.41~2.25
层状砂岩	1.10~1.60	无烟煤	2.00~2.55
板岩	1.10~1.59	石墨化炭质泥岩	2.00~2.80

综上所述,可以得出如下规律:

(1) 岩石的电阻率一般与其矿物成分的关系不大,而主要取决于岩石孔隙水的含量、矿化度以及良导性矿物的成分、含量和结构。

(2) 一般情况下,岩浆岩的电阻率高于沉积岩,变质岩的电阻率则介于二者之间。但也有例外,如化学沉积岩也具有很高的电阻率值,而石墨化片岩则具有很低的电阻率值。

(3) 致密干燥岩石的电阻率值,远远高于松散或破碎且含水岩石的电阻率。

(4) 对第四系松散沉积层而言,岩层的颗粒越粗、透水性越好,其电阻率也越高。但地下水矿化度的变化对岩层电阻率的影响很大。

由于制约岩石电阻率的因素很多,而且这些因素在自然界中又是变化的,所以各种岩石也就不可能具有确定的电阻率值。在某些特殊条件下及个别工作地区,也有可能出现与一般规律相反的情况。这就是说,要保证电法勘探工作的顺利进行并获得正确的推断解释成果,就必须注意收集和测定工作地区中各种岩石的电阻率值,并且要熟悉工作地区的水文地质情况。

第二节 地下稳定电流场

在电阻率法中,为了揭露地下地质体的电阻率差异,必须建立人工电流场,并观测、研究地下电场由于电阻率不均匀体存在所反映的变化规律,以便达到探测地下构造、解决各种地质问题的目的。用直流电源向地下供电是最简单且常用的人工电场,它是一种稳定电流场。

描述稳定电流场的物理量有电场强度 E 、电流密度 j 和电位 U 。

一、稳定电流场的基本性质和边界条件

根据电磁场理论,空间任意一点,如果其内部没有面电荷和体电荷存在,则稳定电流场的性质可用下述关系来描述。

1. 电流密度与电场强度的关系

电场中任意一点的电流密度 j 与该点的电场强度 E 和电阻率 ρ 的关系为

$$j = \frac{E}{\rho} \quad (1-10)$$

式(1-10)称为欧姆定律的微分形式。它适用于任何不均匀导体的电流场。

2. 稳定电流场的连续性质

在稳定电流场中,虽有电荷的运动,但这只是空间点上一些电荷元被另一些电荷元所代替,而该点的电荷密度仍保持不变。即

$$\operatorname{div} j = 0 \quad (1-11)$$

式(1-11)表明电流密度的散度等于零,也就是说,通过任意闭合面的电流密度的通量等于零。稳定电流场的连续性质说明,在空间中除电源之外的任何点上,电流密度的空间变化率等于零,即电流密度既不能增加,也不能减小。所以稳定电流场是无源场。

3. 稳定电流场的势场性质

稳定电流场和静电场类似,是一个位场。这是因为在稳定电流场中,电荷元在空间的分布不随时间发生变化。如果电荷元分布发生任何一点变化,那么电场强度也就不可避免地要发生相应的变化,于是电流也就不稳定了。势场的电场强度 E 和电位 U 的关系为

$$E = -\operatorname{grad} U \quad (1-12a)$$

式(1-12a)说明空间某点的电场强度等于电位的负梯度。电位梯度为负值表示电位的降落方向是电场强度的正方向。

在极坐标中,式(1-12a)可表示为

$$E = -\frac{dU}{dr} \cdot \frac{r}{r} \quad (1-12b)$$

式中, $\frac{r}{r}$ 表示单位矢量,数值为 1,代表向量沿 r 的方向。

在直角坐标系中,式(1-12a)表示为

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (1-12c)$$

上述稳定电流场的三个基本关系式分别从不同的研究角度反映了稳定电流场的基本性质。通过对式(1-10)、式(1-11)和式(1-12)微分运算,可以综合成一个总的方程式

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} U) = \nabla^2 U = 0 \quad (1-13)$$

式中, ∇^2 称为拉普拉斯算子。

式(1-13)称为拉普拉斯方程式,简称拉氏方程式。它反映了稳定电流场的内在规律,说明稳定电流场中除电流源以外的空间任何一点的电位只是空间坐标的函数。在电法勘探的理论研究中,常用的三种坐标系中的拉普拉斯方程表达式如下:

$$\text{直角坐标系} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-14)$$

$$\text{柱坐标系} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-15)$$

$$\text{球坐标系} \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} \right) = 0 \quad (1-16)$$

4. 边界条件

满足拉氏方程式(1-13)的场函数 U , 一般有无穷多个解, 但对所研究的具体问题, 它的解应该是唯一的。使场函数获得唯一解所须限定的条件称为定解条件, 其中包括初始条件和边界条件。因为稳定电流场的电位与时间无关, 所以只有边界条件, 其中某些条件是极限条件。

(1) 极限条件。在距场源无限远处, $r \rightarrow \infty$ 时, $U \rightarrow 0$; 在接近场源的点上, $r \rightarrow 0$ 时, $U = \frac{I \rho_1}{2\pi r}$ 。

(2) 地面上(除场源点以外)电流密度法线分量为零, 即

$$j_n = \frac{1}{\rho_1} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} = 0$$

(3) 在电流穿过介质分界面上电位连续, 即 $U_1 = U_2$; 电流密度的法线分量连续, 即 $j_{1n} = j_{2n}$; 电流密度的切线分量不连续, 即 $j_{1t} \neq j_{2t}$; 电场强度的法线分量不连续, 即 $E_{1n} \neq E_{2n}$; 电场强度的切线分量连续, 即 $E_{1t} = E_{2t}$ 。

二、均匀介质中点电源的电流场

在对地下建立人工电流场的过程中, 地下电流场在电阻率不均匀地质体的影响下发生变化(又叫畸变), 然而这一变化是在正常电流场的背景上出现的, 因此有必要首先研究正常电流场的一些规律, 然后讨论地下电阻率不均匀的影响。

所谓正常电流场, 是指在地下为均匀各向同性的导电介质情况下, 在水平地表面或钻孔中通以稳定电流时所产生的电流场。

1. 一个点电源在均匀全空间中的电场

无论是电阻率法勘探还是视电阻率测井, 均是通过供电电极向地下供入电流。由于电极本身的尺寸与电极到观测点的距离相比, 小到可以看作是一个“点”, 因此称其为“点电源”。尽管研究一个点电源在均匀各向同性介质中的电场分布最为简单, 但仍有其实用意义。如电测井, 就是把单个电极放在钻孔中(图 1-4)。图中, A 电极置于地下深处, 另一个电极 B 置于地表距 A 极足够远的地方接地, 常称 B 极为无穷远极, 这意味着对观测点而言, B 电极的影响可以忽略, 这就是所谓一个点电源的含意。

设 ρ 为均匀介质的电阻率值, r 为 A 极到任一观测点 M 的距离。由于均匀介质中的点源场具有球对称性, 因此选择坐标原点在 A 极处的球坐标系将使 M 点的电位 U 只与 r 有关, 而与球坐标的另外两个变量 θ 、 φ 无关, 这便使拉氏方程式(1-16)简化为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0 \quad (1-17)$$