

高等學校試用教材

煤田地球物理測井

黃智輝 陳曜岑 編著



武漢地質學院出版社

P618.115
21-1-1

3-3 六

煤田地球物理测井

黄智辉 陈曜岑 编著

武汉地质学院出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了煤田测井常用方法（包括电测井、放射性测井、声波测井等）的基本原理、资料解释及应用。重点讲述利用测井资料对煤层进行分层、定厚，还介绍了利用测井资料分析沉积环境的方法及其应用。对于某些煤田测井新方法和新技术，如地层倾角测井、测井资料的数字处理等，书中也作了较详细的介绍。

本书可作为煤田地质专业及相近专业的教科书，也可作为从事煤田地质、煤田测井工作的工程技术人员和科研人员的参考书。

煤田地球物理测井

黄智辉 陈曜岑 编著

武汉地质学院出版社出版

武汉地质学院印刷厂印刷·湖北省新华书店发行

开本 787×1092 1/16·印张11.5·字数253 千字

1986 年 8 月 第一版 1986 年 8 月 第一次印刷

印数：1—2500 册

书号：13414·010 定价：2.00 元



序 言

地球物理测井（简称测井），是应用地球物理方法研究钻孔地质剖面从而解决某些地下地质问题的一门技术学科，可分为油田测井、煤田测井、金属矿测井、非金属矿测井以及水文地质、工程地质测井等。也可根据所利用的物理参数的不同，分为电测井、放射性测井、声波测井以及磁测井等等。

煤田测井已有五十多年的历史。国内外煤田测井的发展，七十年代以前和七十年代以后，无论在数量上或质量上，也无无论在应用的深度上或广度上都有着明显的不同。七十年代以前的煤田测井，基本上仅是检验钻探取芯的一种手段，其主要任务是在钻孔剖面上划分煤层，确定煤层的深度和厚度。七十年代以来，作为重要能源资源的煤炭，重新受到世界各国的高度重视，加之电子计算机和数字技术的迅速发展和普及，因而煤田测井得到了前所未有的发展。在测量技术方面，现代煤田测井正在实现测井仪器的刻度化、组合化、轻便化，并采用了电子计算机和数字技术进行测井数据的收录和处理；在测井资料的应用方面，现代煤田测井则远远超出了仅在单个钻孔中对煤层进行分层、定厚的狭小范围，从煤田的预测、普查到勘探直至开采，都有着广泛而有效的应用，归纳起来有以下八个方面：

1. 分析和鉴别沉积环境，从而为煤田的预测和普查提供资料。
2. 在钻孔剖面上详细划分煤层，确定煤层的深度、厚度和结构，最高分层精度可达到3厘米。
3. 进行全孔岩性分析，确定岩石骨架的矿物成分和含量、泥质含量及孔隙度。
4. 进行煤质分析，确定煤的含碳量、灰分、水分等质量指标。
5. 确定煤的级别，预测洗煤产率。
6. 确定岩石的强度特性，计算出岩石的各种动态弹性模量，从而为矿井建设和开采设计提供依据。
7. 进行地层对比，研究地下地质构造并进行勘探区的评价。
8. 计算声阻抗及合成地震记录。

可以预见，随着测井方法的不断提高和完善、测井仪器设备的不断改进和更新，煤田测井在整个煤田地质勘探中必将占有越来越重要的地位。

鉴于煤田测井在煤田地质勘探中的重要地位和作用，煤田地质专业的学生及煤田地质工程技术人员，深感需要一本能反映现代煤田测井水平的教材。本书就是为此目的编写的。

根据煤田地质专业测井课的教学大纲，考虑到国内外煤田测井的现状和发展，经过五年试用和两度修改最后编成此书。

本书由黄智辉主编，陈曜岑参加了第九章的编写。全书由蔡柏林同志审订，李思田同志对本书作了审阅并提出了许多宝贵的意见。在此，特向他们表示衷心感谢。

由于我们水平有限，加之修改时间十分仓促，书中不妥之处，敬希读者指正。

编 者

一九八六年三月 于武汉

目 录

序 言

第一章 视电阻率测井	(1)
§1-1 岩石和煤的电阻率及其影响因素.....	(1)
一、岩石和煤的电阻率.....	(1)
二、岩石电阻率的影响因素.....	(3)
三、煤的电阻率的影响因素.....	(5)
§1-2 电阻率的测定和视电阻率.....	(6)
一、均匀介质电阻率的测定.....	(6)
二、视电阻率.....	(7)
§1-3 视电阻率电极系.....	(8)
一、梯度电极系.....	(8)
二、电位电极系.....	(9)
三、直接供电电极系和互换供电电极系.....	(10)
四、电极系的记录点和文字表示.....	(10)
五、视电阻率电极系的探测范围.....	(11)
§1-4 视电阻率测井曲线的解释.....	(11)
一、解释的理论依据.....	(11)
二、单一厚层理想梯度电极系的视电阻率测井曲线.....	(12)
三、单一厚层理想电位电极系的视电阻率测井曲线.....	(14)
四、单一薄层理想梯度电极系和理想电位电极系的视电阻率测井曲线.....	(16)
§1-5 视电阻率曲线的影响因素.....	(17)
一、井液的影响.....	(17)
二、相邻岩层的影响.....	(19)
三、 MN 极距的影响.....	(20)
四、岩层倾斜的影响.....	(22)
§1-6 视电阻率测井曲线的应用.....	(22)
第二章 侧向测井	(26)
§2-1 三电极侧向测井的基本原理.....	(26)
§2-2 三电极侧向测井电极系的参数.....	(29)
一、电极系长度 L	(29)
二、主电极长度 l_0	(30)
三、电极系直径 d_s 和绝缘层厚度 m	(30)
§2-3 三电极侧向测井曲线的解释和应用.....	(31)
一、三电极侧向测井 ρ_s 曲线.....	(31)
二、求岩层电阻率.....	(33)
§2-4 七电极侧向测井和六电极侧向测井.....	(37)

一、七电极侧向测井·····	(37)
二、六电极侧向测井·····	(39)
第三章 接地电阻测井·····	(40)
§3-1 电流测井·····	(40)
§3-2 滑动接触电流测井·····	(41)
§3-3 微聚焦电流测井·····	(43)
§3-4 接地电阻差值测井·····	(44)
第四章 自然电位测井·····	(47)
§4-1 自然电位的成因·····	(47)
一、扩散作用·····	(47)
二、吸附作用·····	(49)
三、氧化-还原作用·····	(50)
§4-2 自然电位曲线及其影响因素·····	(50)
一、静自然电位和自然电位曲线·····	(51)
二、岩层厚度的影响·····	(51)
三、岩性的影响·····	(52)
四、电阻率的影响·····	(53)
五、岩层倾斜及邻层的影响·····	(54)
§4-3 自然电位曲线的应用·····	(54)
一、划分煤层·····	(55)
二、区分岩性·····	(55)
三、求地层水电阻率·····	(56)
四、估计泥质含量·····	(57)
第五章 其他电测井·····	(59)
§5-1 电极电位测井·····	(59)
§5-2 激发极化测井·····	(61)
一、极化率和视极化率·····	(61)
二、视极化率测井曲线的解释及其应用·····	(63)
§5-3 感应测井·····	(64)
一、感应测井的基本原理·····	(64)
二、感应测井视电导率曲线的解释及其应用·····	(67)
第六章 放射性测井·····	(69)
§6-1 核物理的基础知识·····	(69)
一、原子结构·····	(69)
二、放射性·····	(69)
三、 γ 射线与物质的相互作用·····	(70)
四、 γ 射线的吸收·····	(71)
五、中子·····	(72)
六、 γ 射线强度的测定·····	(73)
§6-2 自然伽马测井·····	(74)
一、自然伽马测井的基本原理·····	(74)

二、自然伽马测井仪的刻度	(75)
三、岩石和煤的放射性	(76)
四、自然伽马测井曲线及其影响因素	(77)
五、自然伽马测井曲线的应用	(80)
§6-3 伽马-伽马测井	(82)
一、伽马-伽马测井的基本原理	(83)
二、伽马-伽马测井技术条件的分析	(84)
三、地层密度测井	(86)
四、伽马-伽马曲线及地层密度曲线的解释和应用	(87)
§6-4 中子测井	(89)
一、中子-伽马测井	(90)
二、中子-中子测井	(91)
第七章 声波测井	(93)
§7-1 岩石的声学特性	(93)
一、岩石弹性的基本知识	(93)
二、声波在岩石中的传播	(95)
三、纵波和横波	(96)
§7-2 声波速度测井的基本原理	(96)
一、声波在介质分界面上的传播	(97)
二、声波速度测井的基本原理	(98)
§7-3 声波速度测井曲线及其影响因素	(100)
一、声波速度测井曲线的形状	(100)
二、声波速度测井曲线的影响因素	(101)
§7-4 声波速度测井曲线的应用	(102)
一、划分地层和煤层	(102)
二、确定地层的孔隙度	(103)
第八章 井斜、井径及地层倾角测井	(104)
§8-1 井斜测量	(104)
§8-2 井径测量	(105)
一、井径仪的测量原理	(105)
二、井径曲线的应用	(106)
§8-3 地层倾角测井	(108)
一、地层倾角测井的基本原理	(109)
二、地层倾角测井资料的计算及主要成果图件	(110)
三、地层倾角测井资料的应用	(114)
第九章 测井资料在分析煤田沉积环境中的应用	(117)
§9-1 概述	(117)
§9-2 有关沉积环境的基本知识	(118)
一、沉积环境、沉积相和沉积模式	(118)
二、沉积环境的分类	(119)
三、沉积环境的主要成因标志	(119)

§9-3 利用测井资料分析沉积环境的地质-地球物理基础	(122)
一、电阻率与粒度、分选性、泥质含量的关系	(122)
二、自然电位与泥质含量、粒度、分选性的关系	(124)
三、自然放射性 with 泥质含量、粒度、分选性的关系	(125)
§9-4 利用测井曲线形态分析沉积环境	(127)
一、测井曲线形态的沉积环境基本类型	(127)
二、测井曲线形态分析的基本内容	(128)
三、几种沉积环境的测井曲线特征	(130)
四、应用实例-利用测井曲线研究阜新煤盆地艾友矿区沙海组的沉积环境	(137)
§9-5 地层倾角测井资料在分析沉积环境中的应用	(142)
一、判断砂岩的沉积层理	(142)
二、几种沉积的矢量图典型显示	(143)
三、研究砂体的延伸方向和古水流方向	(144)
§9-6 测井相解释技术	(147)
一、测井相的概念	(147)
二、确定测井相的方法	(147)
三、测井相的应用	(150)
第十章 煤田测井资料的综合解释	(151)
§10-1 在钻孔剖面上划分煤层	(151)
§10-2 确定煤层的厚度和结构	(152)
§10-3 确定岩性和地层对比	(153)
§10-4 利用数理统计方法进行煤质分析和岩性分析	(155)
一、利用数理统计方法进行煤质分析	(155)
二、利用数理统计方法进行岩性分析	(160)
第十一章 煤田测井资料的数字处理	(162)
§11-1 概述	(162)
§11-2 岩石和煤的体积模型及基本解释公式	(163)
一、纯砂岩的体积模型及解释公式	(164)
二、泥质砂岩的体积模型及解释公式	(167)
三、煤的体积模型及解释公式	(168)
§11-3 单矿物岩石岩性分析、煤质分析及岩石强度分析	(169)
一、岩性分析	(169)
二、煤质分析	(171)
三、岩石强度分析	(172)
§11-4 煤田测井资料数字处理程序简介	(174)
参考文献	(175)

第一章 视电阻率测井

视电阻率测井是地球物理测井中兴起最早、最基本的一种测井方法。视电阻率测井是基于测量被钻孔穿过的岩层的电阻率，来解决某些钻孔地质问题的。

从学习和掌握电测井的方法技术来说，熟悉了视电阻率测井的基本理论和解释方法，也就为学习和掌握其他电测井方法打下了良好的基础。所以，本章将以较大的篇幅，较系统地讲述有关岩石电阻率的概念、视电阻率测井的原理以及视电阻率测井曲线的解释方法。

§1-1 岩石和煤的电阻率及其影响因素

在钻孔剖面上，岩层与岩层之间、岩层与煤层之间在电阻率方面是否存在着较明显的差异，是视电阻率测井能否取得良好地质效果的物性前提。因此，了解各种岩石和煤的电阻率及其影响因素，对于正确解释和应用视电阻率测井资料将具有重要意义。

一、岩石和煤的电阻率

物体电阻的大小与物体材料有关，也与物体的几何形状有关。由均匀材料制成的具有一定截面积的导体，其电阻 R 与长度 L 成正比，与截面积 S 成反比，即

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

式中 ρ 为比例系数，称为物质的电阻率。

电阻率 ρ 仅与导体材料有关，它是表征物质导电能力好坏的一个物理量。物质的电阻率越大，其导电性越差；电阻率越小，其导电性越好。

(1-1) 式称为电阻公式，它表示出物体的电阻与它的电阻率和几何形状之间的关系。显然，当 $L=1$ ， $S=1$ 时，便得到 $R=\rho$ 。这说明，虽然电阻和电阻率是两个不同的概念，但是它们之间又是彼此相联系的。电阻率在数值上等于长度为 1 单位、截面积也为 1 单位的均质物体的电阻值。

各种不同的岩石和煤具有不同的导电性，即具有不同的电阻率。在地球物理测井中，长度的单位是米，截面积的单位是平方米。因此，岩石的电阻率在数值上等于边长各为 1 米的立方均匀岩块两对面间的电阻值（参见图 1-1）。岩石电阻率的单位是“欧姆米”（ $\Omega \cdot m$ ）。

表 1-1 列出了常见矿物和岩石的电阻率。由表 1-1 可以看出，大多数金属硫化物、无烟煤及石墨的电阻率都很低，而造岩矿物（如石英、长石、

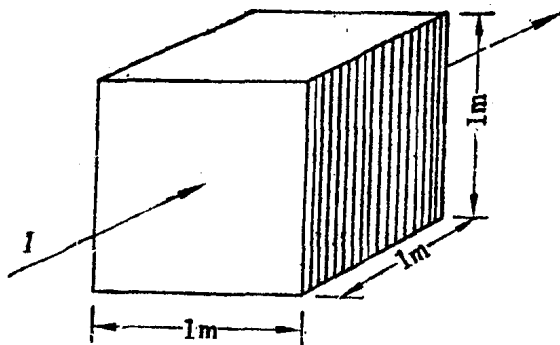


图 1-1 定义岩石的电阻率时，电流方向与形体截面的关系

云母、方解石等)的电阻率则相当高。在各类岩石中,一般沉积岩的电阻率比火成岩和变质岩的电阻率要低。在煤田上,烟煤的电阻率常高于其围岩的电阻率,而无烟煤的电阻率则常比其围岩的电阻率要低很多。

表1-1 常见岩石和矿物的电阻率

名称	电阻率($\Omega \cdot m$)	名称	电阻率($\Omega \cdot m$)
石墨	$10^{-6}—10^{-3}$	粘土	$10^0—2 \times 10^2$
无烟煤		泥岩	$3 \times 10^{-1}—2 \times 10^2$
黄铜矿		页岩	$10^1—2 \times 10^2$
黄铁矿	$10^{-3}—10^0$	泥质页岩	$5 \times 10^0—10^3$
辉铜矿		疏松砂岩	$2 \times 10^0—5 \times 10^1$
褐煤	$10^0—10^3$	致密砂岩	$2 \times 10^1—10^3$
烟煤		砾岩	$2 \times 10^1—2 \times 10^3$
褐铁矿	$10^2—10^4$	泥灰岩	$5 \times 10^0—5 \times 10^2$
石膏		白云岩	$5 \times 10^1—6 \times 10^3$
长石		石灰岩	$6 \times 10^2—6 \times 10^3$
石英			
云母	$>10^6$	花岗岩	$6 \times 10^2—10^6$
方解石		辉绿岩	
		片麻岩	

不同种类的岩石和矿物在电阻率方面的明显差别,与它们的导电性质不同有关。岩石和矿物的导电性,按照传导电流方式的不同,大致可以分为以下四种类型:

(1) 自由电子导电

自由电子导电简称电子导电。例如石墨、无烟煤及大多数金属硫化物,它们主要依靠所含的数量很大的自由电子来传导电流。这种传导电流的方式称为电子导电。由于石墨、无烟煤等含有大量的自由电子,故它们的导电性相当好,电阻率则非常低,一般小于 $10^{-2} \Omega \cdot m$,是良导体。

(2) 水溶液的离子导电

水溶液的离子导电简称离子导电。在岩石的孔隙中通常都充满水溶液——地层水。在外电场的作用下,水溶液中的正离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等)和负离子(如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)发生定向运动而传导电流,这便是离子导电。

在一般的沉积岩中,由于岩石颗粒均由电阻率极高的造岩矿物组成,所以沉积岩的电阻率主要取决于孔隙水溶液的离子导电。一切能影响孔隙水溶液导电性的因素都会影响沉积岩的电阻率。例如,岩石的孔隙度、孔隙的结构、孔隙水溶液的性质、浓度以及地层温度等,都对沉积岩的电阻率有不同程度的影响。

(3) 矿物晶体的离子导电

绝大多数造岩矿物,如石英、长石、云母、方解石等,都属于固体电解质^[15],它们的导电是矿物晶体的离子导电。这种导电性是极其微弱的,所以绝大多数造岩矿物的电阻率都相当高(大于 $10^6 \Omega \cdot m$)。致密坚硬的火成岩、白云岩、石灰岩等,它们几乎不含地层水,而其矿物晶体的离子导电又十分微弱,故它们的电阻率均很高,属劣导体。

(4) 泥质颗粒的离子导电

泥质一般是指粒度小于 $10 \mu m$ 的颗粒,它们是细粉砂、粘土与水的混合物。泥质颗粒的导电方式与水溶液的离子导电方式有所不同。泥质颗粒的导电过程是一种正离子的交换过程。泥质颗粒具有选择吸附负离子的特性。负离子在泥粒表面形成不能自由移动的紧密吸附层。在此紧密吸附层之外,是可以移动的正离子层。在外电场的作用下,正离子在泥粒表面依次交换它们的位置,从而形成电流。这种以泥粒表面的正离子来传导电流的方式,叫做泥质颗粒的离子导电,也称为泥质颗粒的附加导电。

在粘土或泥岩中,泥质颗粒的离子导电占有绝对优势,又因为粘土颗粒或泥粒表面的电荷量基本相同,所以粘土或泥岩的导电性能比较稳定,它们的电阻率低且变化范围小。在砂岩中,随着岩石颗粒的变细,附加导电所起的作用将越来越大,特别是细砂岩和粉砂岩,附

加导电对岩石的电阻率将起重要的作用。

二、岩石电阻率的影响因素

1. 岩石电阻率与组成矿物的关系

岩石由矿物组成,岩石的电阻率自然与组成岩石的矿物的电阻率、矿物的含量及矿物的分布有关。

当岩石中含有良导电矿物时,岩石的电阻率会因良导电矿物的影响而有所变化。如果岩石中的良导电矿物颗粒是彼此隔离地分布着,颗粒之间的电连通不好,并且良导电矿物的体积含量又不大,那么岩石的电阻率便基本上与良导电矿物的存在与否无关。只是在良导电矿物的体积含量较大时(大于30%),岩石电阻率才会随良导电矿物体积含量的增大而逐渐降低。但是,如果良导电矿物彼此之间的电连通较好,即使它们的体积含量并不大,岩石的电阻率也会随良导电矿物含量的增加而急剧减小。在煤田上,当石墨或黄铁矿等良导电矿物呈片状或细脉状分布于煤层的围岩中时,就常常可以观察到这种情况。

2. 岩石电阻率与所含地层水之间的关系

沉积岩主要依靠孔隙水溶液来传导电流,因此地层水导电能力的高低将直接影响沉积岩石的电阻率。

实验研究结果得出,影响地层水导电性的主要因素是地层水中所含盐类离子的数量(即含盐浓度)和温度。

溶解于地层水中的常见盐类有 NaCl 、 KCl 、 Na_2SO_4 、 MgSO_4 及 CaCO_3 等。在一般情况下,地层水中所含盐类的70—95%都是氯化钠,故可将地层水近似地看作是氯化钠溶液。

对于煤田上常见的浓度不大或中等浓度的地层水来说,地层水的含盐浓度增大,离子数目随之增多,溶液导电性则变好。这就是说,在一般情况下,地层水的电阻率与地层水的含盐浓度之间成反比关系。

地层水的电阻率还与温度有关。与电子导体不同,地层水是离子导体,它的电阻率将随温度的增高而降低。这是因为,一方面随温度的增高,盐类的溶解度将增大,从而使地层水中的离子数目增多;另一方面温度的增高还会使溶液的粘度减小,从而使离子迁移率增大的缘故。

在其他条件相同的情况下,岩石电阻率与地层水电阻率成正比。由此可见,岩石电阻率与地层水的含盐浓度和温度之间亦具有上述关系,即岩石电阻率随地层水浓度的增大和温度的升高而降低。

3. 岩石电阻率与孔隙度和孔隙结构之间的关系

由于地层水只充填在岩石的孔裂空间之中,因而岩石的电阻率不仅与地层水电阻率的大小有关,而且还与岩石的孔隙度和孔隙的结构有关。岩石孔隙度的大小,决定着岩石所含地层水的多少,因而决定着岩石所含离子数目的多少;岩石孔隙的结构(包括孔道截面积的大小、孔隙孔道的弯曲程度以及孔道的连通程度等)则影响到离子的运动速度和参加运动的离子的数量。

假设饱和含水岩石的电阻率为 ρ_r ,地层水的电阻率为 ρ_f 。对于给定岩样,用电阻率不同的地层水使之饱和并进行电阻率测定。试验结果表明,虽然相应于不同 ρ_f 可以得到不同的 ρ_r ,但是它们的比值 ρ_r/ρ_f 却保持不变,即有

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_f} = \text{常数} \quad (1-2)$$

式中 F 称为地层因素，它的数值与岩性、孔隙度及孔隙结构有关。

对不同岩性、不同孔隙度和孔隙结构的岩石进行研究得出，地层因素与岩石孔隙度 ϕ 之间有如下的经验关系：

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_f} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1-3)$$

式中 ρ_t 为饱和含水地层的电阻率； ρ_f 为地层水的电阻率； a 为比例系数，它与岩性有关； m 称为胶结系数或结构指数，它与孔隙的结构及岩石的胶结程度有关。表 1-2 中列出了六种岩石的 a 值和 m 值。

表 1-2 不同岩石的 a 值和 m 值

	疏松砂岩	弱胶结砂岩	中等胶结砂岩	贝壳状疏松碳酸盐岩	中等致密粗晶质碳酸盐岩	致密细晶质碳酸盐岩
a	1	0.7	0.5	0.55	0.6	0.8
m	1.3	1.9	2.2	1.85	2.15	2.3

由(1-3)式可以看出，地层因素与孔隙度之间是一种幂函数关系。在双对数坐标系中，以纵坐标表示地层因素 F ，以横坐标表示孔隙度 ϕ ，则 F 与 ϕ 之间将有近似的直线关系。在实际中，可以用一元拟线性回归分析法来获得工作地区的 $F-\phi$ 关系曲线及相应的经验公式。据此，可以由地层的 F 值确定孔隙度 ϕ 。

4. 岩石电阻率与岩性之间的关系

现对砂—泥质岩石和碳酸盐岩石的电阻率特征分别讨论如下：

(1) 砂—泥质岩石

砂—泥质岩石包括碎屑岩类和粘土岩类。

碎屑岩有四种基本的组成部分，即碎屑颗粒（岩石骨架）、胶结物、泥质及充满地层水的孔隙。和碳酸盐岩石比较起来，碎屑岩岩石的孔隙度较大，孔隙结构较简单、规则，因而这类岩石的结构指数和地层因素均较小。碎屑岩岩石的电阻率随其粒度的减小、分选性变好、泥质含量的增高、胶结程度的变差和地层水含盐量的增大而降低。

砂岩的电阻率一般在几 $\Omega \cdot m$ 至几千 $\Omega \cdot m$ 之间变动。分选差、颗粒粗、胶结程度高的致密砂岩，其电阻率高；反之，分选好、颗粒细、胶结程度低的疏松砂岩，则往往具有低的电阻率。就胶结物的成分而言，钙质、硅质或铁质胶结砂岩的电阻率，比泥质、粘土质胶结砂岩要高。砂岩的地层因素一般在 15—40 之间，大多数为 25。

砾岩由于颗粒粗、分选性差，故常具有比砂岩较高的电阻率。

在粘土岩类（粘土、泥岩、页岩等）岩石中，泥质颗粒的离子导电（即附加导电）占有绝对优势，且泥粒表面的电荷量又基本相同，所以粘土、泥岩、页岩等的导电性比较稳定，其电阻率一般仅在 $1-n \times 10 \Omega \cdot m$ 之间。

通常，页岩比粘土或泥岩更致密，故其电阻率比粘土或泥质要高一些。当砂岩或砾岩中含有泥质时，由于增添了泥质的附加导电性，会使砂岩或砾岩的电阻率降低。

一般说来，砂—泥质岩石的电阻率由大到小的顺序是：砾岩—粗砂岩—中砂岩—细砂岩及粉砂岩—页岩—泥岩或粘土。

(2) 碳酸盐岩石

碳酸盐岩石主要是以纯化学方式从真溶液中沉淀而成。这类岩石的颗粒极细，粒间几乎没有孔隙。碳酸盐岩石的孔隙一般均为外因形成的裂隙或溶洞，其形状极为复杂。因此，碳酸盐岩石的电阻率较高，一般可达 $5 \times 10^3 - 6 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 。

而在裂隙发育带或在破碎带上，其电阻率将会明显降低。此外，如果碳酸盐岩石中含有泥质，它的电阻率也会有所下降。

5. 岩石电阻率与其构造之间的关系

层理是沉积岩具有的重要的沉积构造之一。成层岩石的电阻率往往具有方向性的特征，即沿不同方向供电时，岩石的电阻率会出现明显的差别。这种现象称为“各向异性”。岩石电阻率的各向异性的大小，用各向异性系数 λ 来表示：

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$$

(1-4)

式中 ρ_n 代表垂直于岩层层理方向上的电阻率，称为横向电阻率； ρ_t 代表平行于岩层层理方向上的电阻率，称为纵向电阻率（参看图1-2）。

由于横向电阻率 ρ_n 总大于纵向电阻率 ρ_t ，故岩石的各向异性系数 λ 总大于1（当 $\lambda=1$ ，即 $\rho_n=\rho_t$ 时，则为各向同性介质）。岩石的 λ 越大，它的各向异性越显著。表1-3里列出了几种常见沉积岩及煤层的各向异性系数 λ 。

由表1-3可以看出，石墨及炭质页岩组成的互层岩层和无烟煤层的各向异性最明显，烟煤层或粘土质页岩层则次之，其他岩层更次之。显然，岩层与夹层在电阻率方面的差别越大，互层越频繁，岩石的各向异性越显著。

表1-3 几种常见沉积岩及煤的各向异性系数 λ

名 称	λ
具有砂岩夹层的粘土层	1.05—1.15
成层砂岩层	1.10—1.59
泥质板岩层	1.10—1.59
粘土质页岩层	1.41—2.25
烟煤层	1.73—2.55
无烟煤层	2.00—2.55
石墨及炭质页岩层	2.00—2.75

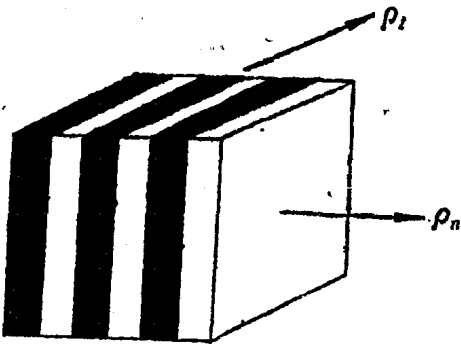


图1-2 岩石电阻率的各向异性

三、煤的电阻率的影响因素

煤的电阻率与其煤化程度、煤岩成分、矿物杂质含量以及水分等因素有关（图1-3）。

煤化程度很低的褐煤，常含有较高的水分和溶于水的腐植酸离子，故其电阻率较低，一般仅为 $n \times 10 - n \times 10^2 \Omega \cdot m$ 。随着煤化程度的加深，褐煤中的水分和腐植酸离子的含量将显著减少，因而褐煤的离子导电性减弱，而电阻率则明显增高。某些煤化程度接近于烟煤的褐煤，它的电阻率可达到 $n \times 10^3 \Omega \cdot m$ 。

烟煤常具有较高的电阻率，其变化范围为 $n \times 10^2 - n \times 10^3 \Omega \cdot m$ 。随着变质程度的加深，烟煤的电阻率将从 $4 \times 10^3 - 5 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 逐渐降低到 $n \times 10^2 \Omega \cdot m$ 。

从烟煤向无烟煤过渡类型的煤，其电阻率急剧下降，变化十分剧烈。

无烟煤常常具有良好的电子导电性，因而其电阻率很低，一般均在 $1 \Omega \cdot m$ 以下。

煤的灰分（ A^s ）是煤质的重要指标，它是煤样完全燃烧后剩下的残渣的重量 G^s 与干燥

煤样的重量 G 的百分比,即

$$A^g = \frac{G^g}{G} \times 100\% \quad (1-5)$$

煤经完全燃烧后,原来存在于煤中的矿物杂质被氧化而成残渣。可见,煤的灰分并不存在于原生煤中。灰分不是煤的矿物杂质的含量,但矿物杂质却是灰分的主要物质来源。煤中常见的矿物杂质有:粘土矿物、黄铁矿、石英以及方解石等,其中居主要地位的是粘土矿物。

在通常情况下,煤中矿物杂质的电阻率比褐煤或烟煤的有机质的电阻率要低,而高于无烟煤有机质的电阻率。因此,褐煤或烟煤的电阻率随其矿物杂质含量(或灰分)的增高而降低,而无烟煤的电阻率则随其矿物杂质含量(或灰分)的增高而增大。

煤的湿度可以粗分为内部湿度和外部湿度两种。内部湿度的大小主要取决于煤的变质程度。内部湿度是决定煤的电阻率按上述煤化程度而变化的主要因素之一。煤的外部湿度与煤田的水文地质条件密切相关。在氧化带中,可以观察到最大的外部湿度。氧化带的深度可达200m。煤的外部湿度随深度的增加而减小,渐居次要地位;与此相反,煤的内部湿度却渐居主要地位。外部湿度会使煤的电阻率降低,因此,在氧化带中,煤的电阻率往往比深部煤的电阻率要低,位于地下水面以上的煤层则属例外。在那里,煤层通常是干的,它的电阻率可高达 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ 。

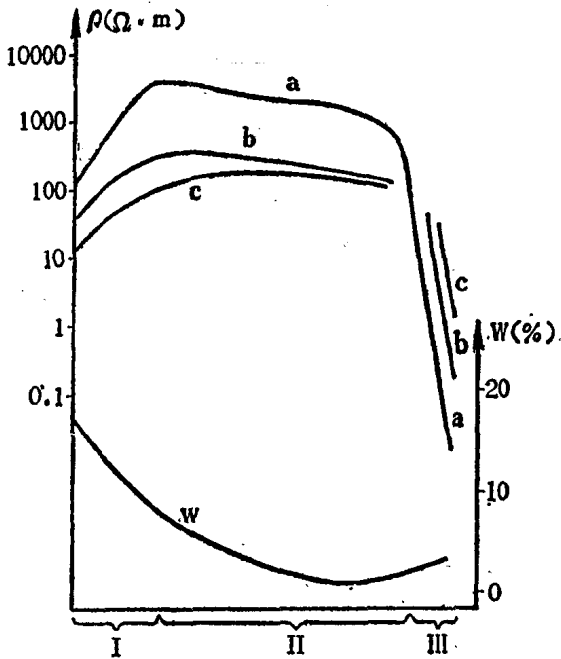


图1-3 煤的电阻率和湿度与其煤化程度之间的关系^[21]

a—低灰分煤 b—灰分煤 c—炭质页岩 W—湿度 I—褐煤 II—烟煤 III—无烟煤

§1-2 电阻率的测定和视电阻率

一、均匀介质电阻率的测定

电阻率是表征物质导电能力好坏的一个物理量,物质电阻率的大小只有在物质中有电流流过时才能表现出来。在电流强度一定的情况下,对于几何形状相同的不同材料制成的导体,若两端产生的电位差越高,则其电阻率越大。根据这个道理,在电测井中,通过装置在电缆末端的 A 极和置于地表的 B 极,将强度一定的电流 I 送到井下,在井下产生一个稳定的直流电场。借助装置在电缆末端的另外两个测量电极 M 和 N ,来测量该电场在 MN 两点间产生的电位差(参看图1-4)。由于电极 MN 之间的电位差 ΔV 正比于 AB 电路中的电流强度 I 和介质的电阻率 ρ ,因而根据 ΔV 及 I 值的测量结果就可以计算出介质的电阻率 ρ 。

假设地下充满电阻率为 ρ 的均匀岩石(岩石向下无限延伸,且不考虑钻孔的影响)。在此介质中放入排列在一直线(井轴)上的测量电极 MN 和供电电极 A ,这三个电极组成一

个电极系（图1-4）。AB电路中的电流强度为 I 。由于电极的尺寸相对于电极之间的距离来说，是很小的，故可将电极视为点电极；又由于电极系至地表的距离远远超过电极系的探测半径（关于电极系的探测半径我们将在下面讲到），则地表和B极对电极系周围电场分布的影响可以忽略不计。这样，可以认为电极系是置于电阻率为 ρ 的均匀无限大介质中。

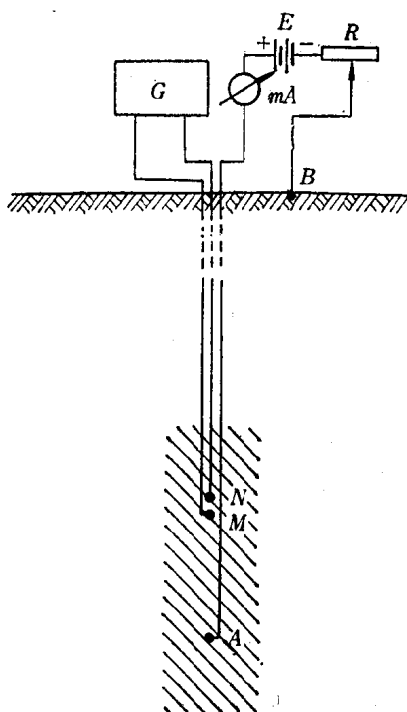


图1-4 均匀介质电阻率的测定

G—电位差计 mA—毫安计 R—可变电阻器 E—
电池组 A和B—供电电极 M和N—测量电极

根据均匀无限大介质中点源电场的理论，可以写出点源A在MN电极之间产生的电位差为：

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \\ = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{MN}{AM \cdot AN}$$

由此可得岩石的电阻率为：

$$\rho = 4\pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \frac{\Delta V}{I}$$

或
$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1-6)$$

式中 K 称为电极系系数，它是一个仅与电极系上各电极之间的距离有关的常数：

$$K = 4\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

对比图1-4和公式(1-6)不难看出，在公式(1-6)中，比值 $\Delta V/I$ 是球心在A点，中心半径为 $(AM + AN)/2$ ，厚度为MN的球壳层的径向电阻。电极系系数 K 则是该球壳层的表面积与其厚度之比。由此可以认为，(1-6)式乃是电阻公式(1-1)在均匀无限大介质情况下的具体应用。根据(1-6)式，只要测得电位差 ΔV 和电流强度 I ，并算出电极系数 K ，然后将它们代入(1-6)式，便可以很容易地求得介质的电阻率 ρ 。

二、视电阻率

以上所讨论的是假设地下介质为均匀无限大的情况。然而，实际上地下介质并不是均匀无限大的一钻孔剖面上各种岩层的厚度不同，电阻率也不同，井液的电阻率与岩层的电阻率相差更大，等等。因此，不能直接利用上述方法和公式(1-6)来确定地下某种岩石的电阻率。但是，不管怎样，我们总是可以使用一定的电极系（它的系数为 K ），并在井中测得一定的电位差 ΔV 和电流强度 I 值，将这些值代入公式(1-6)后亦可算出一个“电阻率”值来。当然，所算出的这个“电阻率”不是电极系周围某种岩石或井液的真电阻率，为与岩石或井液的真电阻率区别起见，我们称它为视电阻率，并以符号 ρ_s 表示之，即

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1-7)$$

式中 K 仍为电极系系数，其计算公式同(1-6)式；视电阻率 ρ_s 的单位也是欧姆米($\Omega \cdot m$)。

进行视电阻率测井时，并不是直接测得岩石的电阻率，而是测得视电阻率。视电阻率与

电极系周围介质的电阻率（如岩层电阻率，围岩电阻率，井液电阻率，等等）以及这些介质的分布（如岩层厚度，岩层倾角，井径，等等）因素有关。除此之外，视电阻率还与所用电极系的类型和尺寸有关。只是在均匀无限大介质中，视电阻率才等于介质的真电阻率。

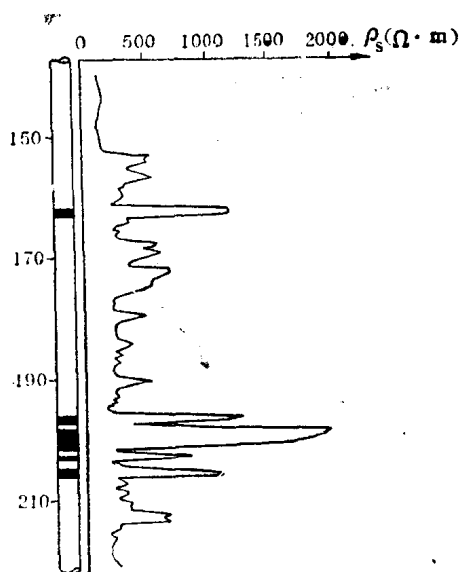


图1-5 视电阻率测井曲线

将电极系放在钻孔中不同位置上时，由于电极系周围的岩石不同，电阻率不同，将测得不同的视电阻率值。这样，沿着井轴连续移动电极系，通过电测井仪器的自动连续记录，就能够测得一条沿井轴连续变化的视电阻率测井曲线（如图1-5）。

视电阻率沿井轴的变化，主要是由于电极系周围岩层的改变而引起的。因此，只要预先掌握了由岩层改变而引起视电阻率变化的规律，在实际中，就可以运用这些规律来解释实测的视电阻率曲线，从而根据视电阻率测井曲线来划分钻孔地质剖面，确定岩层及煤层的位置和厚度等等。

§1-3 视电阻率电极系

视电阻率的大小不仅与电极系周围介质的电阻率及其分布有关，而且还与电极系的类型和尺寸有关。因此，有必要进一步研究测量视电阻率的电极系。

测量视电阻率用的电极系，按其测量电场的特性的不同，可分为梯度电极系和电位电极系；而按其供电电路结构的不同，又可分为直接供电电极系和互换供电电极系。

视电阻率电极系通常由三个电极构成，第四个电极在地表。在电极系中，连接在同一电路中的两个电极（如测量电极 MN 或供电电极 AB ）称为成对电极，其余与地面电极接在同一电路中的那个电极，则称为不成对电极。

一、梯度电极系

就电极系上各电极排列的形式来说，不成对电极至成对电极的距离大大地超过成对电极之间的距离的电极系，称为梯度电极系。

当整个电极系沿井轴排列时，成对电极在上部的梯度电极系，称为顶部梯度电极系；反之，成对电极在下部的梯度电极系，则称为底部梯度电极系（参见图1-6）。

成对电极之间的距离为无限小的梯度电极系，称为理想梯度电极系。现将理想梯度电极系的视电阻率公式推导如下：

将（1-7）式改写成如下形式：

$$\rho_s = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \frac{\Delta V}{I} = 4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN} \frac{\frac{\Delta V}{\overline{MN}}}{I}$$

式中， $\Delta V / \overline{MN}$ 是电位在 MN 方向上的梯度，当 $\overline{MN} \rightarrow 0$ 时，它在数值上等于 MN 中点（ O ）

点)的电场强度 E ,即

$$\frac{\Delta V}{\overline{MN}} = E$$

又因 $\overline{MN} \rightarrow 0$,故可认为 $\overline{AM} = \overline{AN} = \overline{AO} = L$.最后便得到理想条件下($\overline{MN} \rightarrow 0$)梯度电极系的视电阻率公式为:

$$\rho_s = 4\pi L^2 \frac{E}{I} \quad (1-8)$$

式中, $L = \overline{AO}$ 称为梯度电极系的电极距,它表示出梯度电极系的长短。

由公式(1-8)可见,如果在测量过程中保持电流强度 I 不变,则用梯度电极系测得的视电阻率将与成对电极中点(O 点)的电位梯度(或电场强度)成正比。正是由于这一特点,才称此种电极系为梯度电极系。

实际中用来测量视电阻率的梯度电极系不是理想梯度电极系,因为不可能制成理想梯度电极系,也不可能用理想梯度电极系来进行测量。前者是因为,不能作出无限靠近的成对电极;后者则是因为,当 MN 电极互相靠近时,它们之间的电位差会迅速减小,以至不能保证准确地测定出它们之间的电位差。在视电阻率测井的理论研究中,经常采用理想梯度电极系,而在实际工作中,却是采用非理想的(或三电极的)梯度电极系。

在相同条件下,若用实际三极梯度电极系测得的 ρ_s ,与用理想梯度电极系得到的 ρ_s 之间的相对误差不大于5%,就可以把实际三极梯度电极系看成是理想梯度电极系。根据这个原则,通常要求实际三极梯度电极系的比值 $\overline{MN}/L = 0.2 \sim 0.3$ 。(2)

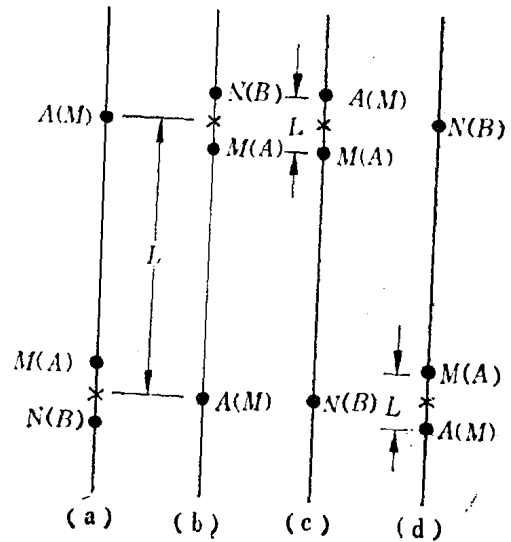


图1-6 视电阻率电极系

a—底部梯度电极系 b—顶部梯度电极系 c—正装电位电极系 d—倒装电位电极系 L—电极距;
•—记录点

二、电位电极系

就电极系上各电极排列的形式来说,成对电极之间的距离大大超过中间电极至不成对电极的距离的电极系,称为电位电极系。

电位电极系中,成对电极在上部者,称为倒装电位电极系,而成对电极在下部者,则称为正装电位电极系(参看图1-6)。

成对电极之间的距离为无限大的电位电极系,称为理想电位电极系。现将理想电位电极系的视电阻率公式推导如下:

将(1-7)式改写成如下形式:

$$\rho_s = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \frac{\Delta V}{I} = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \frac{V_M - V_N}{I}$$

由于在理想条件下 $\overline{MN} \rightarrow \infty$,故 $\overline{AN} \rightarrow \infty$, $\overline{MN} \rightarrow \infty$,而 $V_N \rightarrow 0$,则上式变成