

高等学校规划教材

煤田地球物理勘探

黄作华 郑海清 编

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

煤田地球物理勘探

黄作华 郑海清 编

煤炭工业出版社

1984年11月

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书介绍用于煤田勘探的地球物理测井方法和地面物探方法。书中,阐述了各种方法的地质基础、物理实质、工作原理和野外工作方法,重点在资料的整理、解释与应用,并反映了各方法领域中的新技术与新成就。

本书是煤炭高等院校煤田地质专业的主修,也可作为其它部委高校地质专业或物探专业的教材,供现场的地质与物探技术人员参考。

高 等 学 校 规 划 教 材 煤 田 地 球 物 理 勘 探

黄作华 郑海清 编
责任编辑:宋德淑

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门内和平里北街41号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092mm^{1/16} 印张 19^{1/2}

字数 464千字 印数 1—1,225

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

ISBN 7-5020-0682-6/TD·627

书号 3451

定价 5.05元

前 言

地球物理勘探是20世纪才形成并得到迅速发展的一门应用技术学科，它是随着工业发展对各种矿产资源需求量的增大，进而要求探明隐伏矿体或深部矿产而发展起来的勘探技术科学。

地质工作者已经从传统的锤子加罗盘、肉眼观察和分析化验逐渐走向运用高科技的现代化勘探技术，物探就是属于这类先进的技术手段。它运用地质理论作指导，借助于精密的仪器设备进行野外观测，再用计算机处理、推断、分析、解释与绘图，具有成本低、效率高、透视性强的特点，从而大大加快了勘探的速度，提高了勘探质量。因此，地质人员应熟悉物探工作，要了解各种方法的原理与野外工作技术，特别要熟悉资料的解释应用，以便在设计时和提交地质报告时能正确运用物探成果。

根据教学计划，高等院校的煤田地质勘查专业要开设煤田地球物理勘探这门必修课，以便让学生系统学习用于煤田的物探方法，要求学生掌握各种方法的物理实质、应用条件和资料的解释与应用。因此，本教材在编写上力求内容充实、重点突出、深入浅出，还要反映出物探的最新成就与发展趋势。

煤田物探应包括地面物探、地球物理测井（钻孔物探）和矿井物探三部分。由于许多院校已将《矿井物探》作为一门课另行开设，所以本教材只包括前面两部分，并以测井、电法和地震为重点。

本书适用于80学时，具体分配为：测井30学时、电法18学时、地震28学时、重力和磁法4学时。书中注有“*”的章、节内容，各校可根据具体情况选择或取舍。

本书由西安矿业学院黄作华（绪论，第一、二、三、四、五、六、七章）、郑海清（第六、七、八、九、十章）、林建民（第五章第六节、第八章第三节中标题五、第十章第一节）编写。黄作华为本书主编。

在编写过程中，得到了一些现场技术人员及各兄弟院校物探教师的大力支持与帮助，提供了许多原始资料；崔若飞、张守恩、张鸿升、王鹤龄、汤孝铭、王锡仁等审阅了初稿，提出了许多宝贵意见；此外，焦富怡、许青两位同志在抄写和整理图件上做了许多工作，付出了劳动。对上述同志谨表衷心的感谢。

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 地球物理测井

第一章 电法测井	6
第一节 视电阻率测井	6
第二节 侧向测井	24
第三节 电化学活动性测井	31
第二章 放射性测井	38
第一节 放射性测井的基础知识	38
第二节 自然伽玛测井	46
第三节 伽玛-伽玛测井	57
第四节 中子测井*	68
第三章 其它测井	76
第一节 声波测井	76
第二节 钻孔技术情况测井	88
第三节 地层倾角测井*	91
第四章 测井资料综合解释	98
第一节 测井曲线的综合定性解释	98
第二节 测井曲线的综合对比	108
第三节 利用测井资料研究沉积环境*	115
第五章 测井资料数字处理*	128
第一节 数字测井技术概述	128
第二节 预处理、分层与交会图	130
第三节 岩性识别	137
第四节 煤质分析	144
第五节 测井曲线的自动对比	148
第六节 煤田测井资料的地质解释系统	152

第二篇 地面地球物理勘探

第六章 重力勘探	155
第一节 重力场及重力异常的测量	155
第二节 重力资料的解释及应用	160
第七章 磁法勘探	168
第一节 地磁场及磁异常的测量	168
第二节 磁异常资料的解释与应用	175
第八章 电法勘探	182

第一节	电阻率法的基础知识	183
第二节	电剖面法	191
第三节	电测深法	203
第四节	频率测深*	226
第九章	地震勘探的原理与工作方法	235
第一节	地震勘探的物理学与地质学基础	235
第二节	几何地震学	246
第三节	地震勘探的野外工作方法	253
第十章	地震资料数字处理与解释应用	265
第一节	地震资料的数字处理	265
第二节	地震资料的解释	276
第三节	地震勘探的应用	298
参考文献	305

绪 论

一、地球物理勘探在地学中的地位

地学是研究地球的科学，包括地质学、地理学、地球物理学和地球化学。

地球物理学是应用物理学的方法来研究地球的科学，它由物理学和地质学相结合所形成。广义的地球物理学所研究的对象是从最深部的地核到大气圈的边界，包括大气层、地球表面和地球内部所发生的自然现象，因此可分为大气圈物理学、水圈物理学和固体地球物理学三部分；狭义的地球物理学只是指研究“固体地球”所用的物理学，它也涉及到许多研究领域，如大地测量与重力测量、地震学、地磁学、地电学、地热学、大地构造物理学、地球年代学、宇宙地质学和应用地球物理学。

应用地球物理也称为地球物理勘探，简称物探。它是应用地球物理学的原理与方法对天然存在或人工建立的地球物理场进行观测，从研究地壳浅层的物性与结构出发，来寻找和勘探有用矿产与解决某些地质问题的一门技术科学。

地球物理勘探的出现、发展与应用，以及在地质学中应用地球化学、构造结晶学、同位素地质学等的出现，是地质科学发展中的一个革命，它意味着地质学从经验科学向理科学转化的发展，从定性向定量的发展，以及从理论向实际的应用。

二、地球物理勘探的实质

传统的地质手段，如在野外测剖面、填图、进行山地工程和钻探等是一种直接观测的找矿勘探方法，可以看到被研究的对象与地质现象，所得结论常常是明确单一的，不存在多解性。但是，这种直接观测往往是不连续，需要通过内插和外延来推断那些没有观察到的地段，因而有可能造成较大的误差，甚至导致错误的结论，而且效率低、成本高，工作繁琐。

地球物理勘探是根据观测物理场的畸变来发现矿体和研究地质问题的，它不用肉眼而是借助于各种仪器与设备来进行野外作业和室内数据处理，因而是一种间接的找矿勘探方法。其优点是可以通过加密测网和连续观测来提高解释与外推的可靠性，具有效率高、成本低和有透视性的优点。但是，随着仪器设备与工作场地的不同，也存在着局限性和条件性的缺点，更重要的是物理场异常的解释往往具有多解性，需要用多种方法联合应用或依靠钻探来验证，才能排除这种多解性。

物探工作所依赖的物理场有天然的和人工的两类。

天然场指天然存在于岩石中而与我们是否进行测量无关的一些物理场，例如大地重力场、地磁场、大地电磁场、地下热场、放射性辐射场等；人工场是进行测量时人为地在岩石中暂时造成的物理场，如恒定的和交变的电磁场、由爆炸或撞击产生的弹性振动场或震波到达的时间场、由放置在岩层中的热源或放射源所造成的热场或放射性辐射场等。

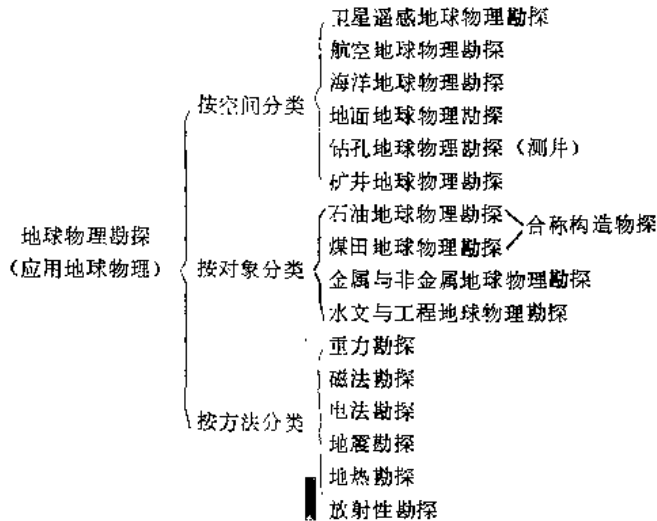
物探方法之所以能用来研究各种地质问题是因为各种不同的岩石或地质体具有不同的物理性质，这种性质的差异能影响被寻找的地质体周围物理场的分布。例如，岩石密度的大小差异引起重力场分布的异常，岩石磁性大小的差异引起地磁场的畸变，岩石电阻率大

小的变化引起电场的畸变等。根据物探仪器所反映的不同物性测量结果，经过分析处理，即可判断地质体岩性的差别，从而解决一定的地质问题，达到找矿勘探的目的，这就是物探方法的实质。

三、物探工作的分类

按观测的空间、研究的对象和依据的方法原理，对物探工作作出三种分类（表0-1）。

表 0-1 地球物理勘探的分类



按方法原理分类时，各种物探法所依赖的物理场及能够影响这些物理场改变的岩石物性参数见表0-2。其中，在钻孔中探测的地球物理测井法是利用天然和人工的多种物理场。这里钻孔中的天然场是指自然电位测井所依赖的自然电场、磁测井所依赖的地磁场与磁性矿体的磁场、自然伽玛测井利用的天然放射性辐射场，以及热测井利用的地热场；人工场则是指声波测井和地震测井利用的人工弹性振动场、密度测井和中子测井利用人工放射性辐射场等。

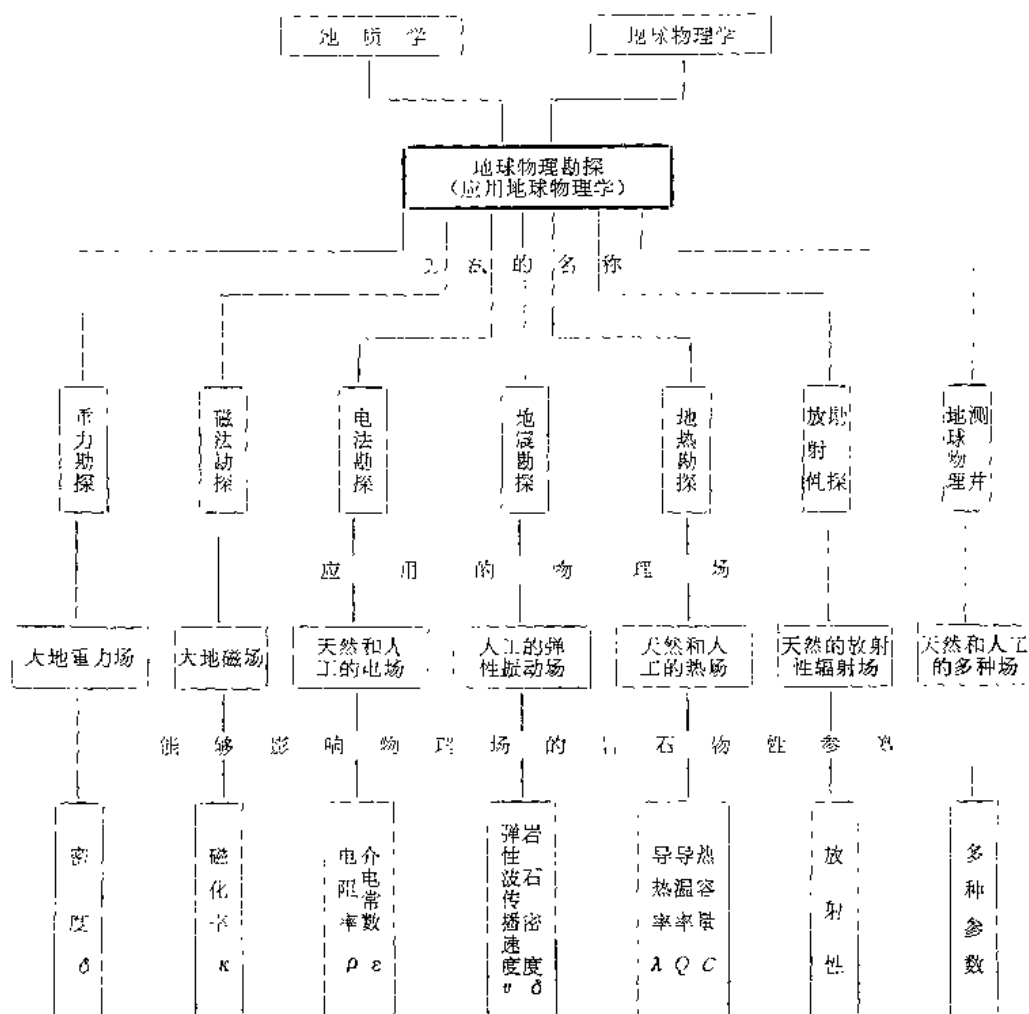
在煤田勘探中所应用的地球物理方法统称为煤田物探。按其观测的空间，可分为在地面（包括水面）进行的煤田地面物探，以及在钻孔中进行的煤田测井和在煤矿坑道中作业的矿井物探。每一类又按物理原理可进一步分为若干方法，其内容见表0-3。

四、物探在煤田勘探中所起的作用

随着地质勘探工作的发展和深入，煤田勘探逐渐从露头区转到隐蔽区、从浅部转入深部，勘探的比例尺也以大中比例尺的详、精查为主，作业地点不仅在地面，也要在水面和地下进行，这就必然对勘探方法和勘探技术提出了更高的要求。于是，从找煤、普查、详查、精查，不论那一勘探阶段，也不论在地面和地下（钻孔与矿井中），有了物探与地质的紧密结合，勘探工作就可以加快速度和提高质量。

物探的技术手段是多种多样的，但每一种方法都有自己的应用条件和解决问题的局限性。因此，在哪一勘探阶段，用哪些物探方法进行组合，是随应用条件与地质任务而定的，它们最终所要解决的地质问题不外乎两方面：一方面是了解含煤地层或物性标志层的分布范围、埋藏深度和地质构造情况，解决这些问题的依据是煤系或煤层与围岩之间、基岩与上覆沉积层之间存在着物性差异，以及煤系中所存在的物性标志层，使用各种地

表 0-2 各种物探方法所依赖的物理场与影响物理场的岩石物性参数



面物探方法来配合解决这些问题；另一方面是研究煤系的岩性特征与含煤情况，其根据是岩、煤层之间存在着物性差异，使用的方法包括电剖面法、各种测井法和矿井物探方法。

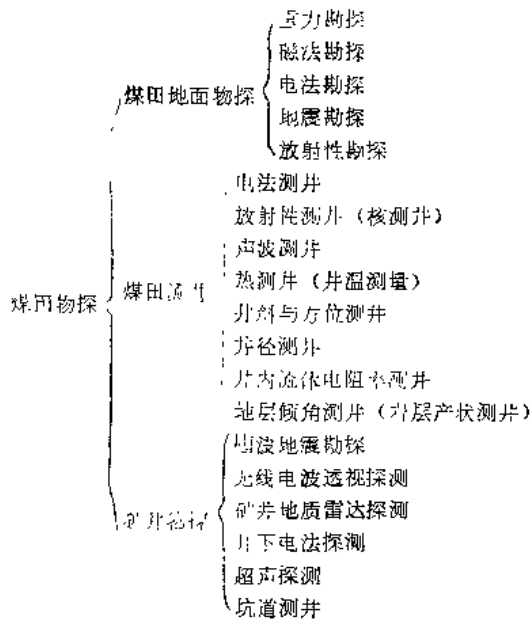
下面简述各种主要物探方法在煤田勘探中所起的作用。

重力勘探是研究由于岩层之间或岩石与矿体之间密度差异引起重力场的局部变化（即重力异常），来寻找和勘探矿床以及研究地质构造的一种物探方法。在煤田中，主要用于在普查找煤阶段进行构造区分和研究基岩的起伏，确定煤系的分布、煤田的边界和含煤沉积的厚度。

磁法勘探是研究由于岩石或矿床的磁性差异引起地磁强度的变化（称为磁异常），来寻找和勘探矿床以及研究地质构造的物探方法。它常与重力勘探配合，解决区域地质方面的问题，了解结晶基底的起伏和圈定煤系的范围，还可发现煤系中的岩浆岩体并圈定其边界，确定破碎带及断层的位置与走向，以及圈定煤层燃烧带的范围。

电法勘探是根据岩石或矿体电阻率的不同，利用天然或人工建立的电场来研究地质构造和寻找矿产的物探方法。它的方法很多，在煤田中主要用电测深法和电剖面法两种。电

表 0-3 煤田物探方法的分类



测深法可以研究岩层或基岩顶面的起伏和断层的分布，了解含煤构造，确定古河床洪积层的位置、含水层的埋深与厚度，以及探明岩溶的分布等；电剖面法可用来研究倾角不大的地层，了解其构造起伏和横向的变化，进行覆盖层下的地质填图，了解基岩的起伏，追踪煤层和断层，圈定被掩盖的古河床、裂隙带、溶洞带和煤层采空区的位置与范围。

地震勘探是利用人工激发(爆炸或撞击)产生的弹性波在地层中的传播情况来研究岩石的弹性和地质构造的一种物探方法。根据弹性波在地层内传播到不同弹性分界面而返回地面的形式，可以分为反射波法和折射波法两大类。地震勘探广泛应用于煤田构造的普查与勘探中，精度较高，可用来圈定煤盆地的边界或煤系的分布范围，确定向斜、背斜以及断层破碎带，确定煤系基底的起伏和根据岩性的变化编制基岩地质图。在解决工程地质问题时，它可用来测定基岩顶部的深度和基岩的物理性质。

地球物理测井是利用钻孔剖面中各岩层不同物性来划分地质剖面，确定煤层的层位厚度和结构，进行地层对比，以解决构造和沉积方面的问题。它的种类繁多，用于煤田的主要是电法测井和放射性测井。测井的广泛应用可以使钻探少取芯或不取芯，从而提高了钻探的效率和降低了勘探的成本。

矿井物探工作是由于综合机械化采煤技术的推广，为了提高采掘效率，及时弄清工作面前方的地质构造，预测顶板冒落，防止瓦斯突出与地下水淹井等采煤过程中的不安全因素而使用的物探方法。目前主要有矿井电法、反射地震法、槽波地震法、无线电波透视法、地质雷达和坑道测井等。这些方法的试验和应用，大大提高了矿井地质工作的精度，并在煤矿高效、安全生产方面起着重大的作用。

五、物探工作的回顾与展望

地球物理勘探作为一门独立的学科出现还是近半个多世纪的事情；但是，作为个别的方法试验，则可追溯到17世纪瑞典人用罗盘来找磁铁矿，19世纪英国人在铜矿上观测自然电场和上世纪末匈牙利人用扭秤所作的重力测量。

到了20世纪,随着工业的发展,需要越来越多的矿物原料,出露地表易于发现的矿产越来越少,需要查明那些被浮土掩盖、埋藏在较深处的矿产资源,即那些在地表没有矿化现象的盲矿体,这就促使物探技术迅速发展,那些原来只用来研究地球性质的纯地球物理学(如重力测量、磁力测量、地震测量等)便逐渐用来服务于找矿。

1912年法国科学家康德拉·斯仑贝谢奠定了在地面进行电法勘探的基础,1927年他又在钻孔中测得第一条视电阻率测井曲线,1919年,德同学者L. 储普开始用折射波地震法勘探地下矿体的位置。到了本世纪30~40年代,以重力、磁法、电法、地震、放射性和测井为主体的地球物理勘探学科就逐渐形成了。

60年代以后,由于电子技术和计算机科学的迅速发展,物探工作产生了革命性的飞跃,突出表现在仪器精度的提高和轻便化与数字化,又表现在利用计算机进行控制和数字处理所带来的自动化与丰富的解释内容。

我国的物探工作在解放前只有少数几位学者作过一些研究和试验,未形成生产力量。解放后,在50年代初期即开始建立重磁队、电法队、地震队和测井队,从事石油、煤田、金属与非金属等各种矿产的普查、找矿与勘探工作。

30多年来,我国的煤田物探工作从无到有,从小到大,发展迅速,造就和锻炼出了一大批技术队伍,满足了生产发展对煤田勘探的需要。近十年来,由于各种学科的互相渗透和石油、地矿、煤炭行业之间的横向联系,可以说无论在物探方法的理论研究、仪器设备的设计与制造,以及资料的解释处理方面,都已逐渐接近国际水平,在某些方面还有着自己的特点与贡献。

第一篇 地球物理测井

地球物理测井又称钻井(钻孔)地球物理勘探或矿场地球物理,简称“测井”。它是应用地球物理方法来研究钻孔的地质剖面,解决地下地质问题和了解钻孔技术情况的一门勘探技术科学。

合理地运用地球物理测井方法来研究钻孔,可以使钻探少取岩芯或不取芯,即实现无岩芯钻探。这不仅提高了勘探速度,还可获得比岩芯分析更为丰富的地质资料——各种测井曲线与数据。

利用测井资料,可以详细划分钻孔的地质剖面,确定煤层的层位、厚度、结构和煤质,了解沉积关系与构造情况。

由于广泛利用了包括岩层的电、磁、核、声、热等各种物性特征,现已开发的测井方法多达50余种,现将它们简要地归类于下:

以岩石的导电性能,即以电阻率或电导率为基础的方法有:视电阻率测井、接地电阻测井、侧向测井和感应测井。

以岩石电化学活动性为基础的方法有:自然电位测井、电极电位测井和激发极化测井。

以物质的原子物理和核物理性质为基础的方法有:自然伽玛测井、密度测井、中子测井和各种能谱测井或地球化学测井。

以岩石弹性为基础的方法有:声波速度测井、声波幅度测井、超声成像测井和地震测井。

以检查井内技术情况为目的的方法有:井径测井、井内流体电阻率测井、井温测井、井斜及方位测井。

其它一些测井法有磁测井、热测井、气测井、核磁测井、电视测井、重力测井和地层倾角测井等。

本篇只介绍用于煤田的各种测井方法,包括电法测井、放射性测井和声波测井中的一些主要方法及其解释工作。

第一章 电法测井

电法测井是以研究钻孔剖面岩石的电学性质(导电性和电学活动性)为基础的一系列测井方法。它由于发展最早,理论和实践经验都比较丰富,尽管测量结果受到的影响因素较多,但至今仍然是最基本的测井方法之一,广泛应用于石油、煤田、金属与非金属、水文与工程地质的勘查中。

第一节 视电阻率测井

视电阻率测井又称普通电阻率测井。它通过测量岩层的视电阻率来研究地层的性质,是煤田测井中进行全孔解释、判断岩性和进行地层对比时的重要参数,也是电测井中最基

本和最重要的测井方法。

一、岩石及煤的电阻率

不同的矿物和岩石、不同类型的煤以及岩石和煤之间存在着导电性能的差异。也就是说，它们具有不同的电阻率，这就是视电阻率测井的物理基础。

由均质物质组成的物体，其电阻 R 是与物体的长度 l 成正比，与截面积 s 成反比的，比例系数 ρ 是该物体的电阻率，即

$$R = \rho \frac{l}{s} \tag{1-1}$$

或者说，单位体积物体的电阻就是该物体的电阻率，单位是欧米 ($\Omega \cdot m$)。

表1-1列出了常见矿物和岩石的电阻率。从表中可以看出：石墨、无烟煤及某些金属硫化物的电阻率都很低；主要造岩矿物，如石英、长石、云母、方解石等的电阻率则非常高，几乎是不导电的；大多数火成岩的电阻率都很高；沉积岩的电阻率则相对比较低。

表 1-1 常见矿物和岩石的电阻率

矿 物	电阻率, $\Omega \cdot m$	岩 石	电阻率, $\Omega \cdot m$
石 墨	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	粘 土	$10^0 \sim 2 \times 10^2$
无烟煤	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	页 岩	$10^1 \sim 10^2$
黄铁矿	$10^{-3} \sim 10^0$	砂 岩	$10^1 \sim 5 \times 10^3$
黄铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	泥质板岩	$10^1 \sim 10^2$
褐 煤	$10^0 \sim 10^3$	砾 岩	$2 \times 10^1 \sim 2 \times 10^2$
烟 煤	$10^2 \sim 10^4$	白云岩	$5 \times 10^1 \sim 6 \times 10^2$
褐铁矿	$10^2 \sim 10^4$	石灰岩	$6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
石 膏	$>10^6$	花岗岩	$6 \times 10^2 \sim 10^3$
长 石	$>10^6$	辉绿岩	$6 \times 10^2 \sim 10^3$
石 英	$>10^6$	片麻岩	$6 \times 10^2 \sim 10^6$
云 母	$>10^6$	玄武岩	$6 \times 10^2 \sim 10^3$
方解石	$>10^6$		

各种矿物与岩石在电阻率方面的差异，是由于它们的导电性质不同造成的。按照导电机理的不同，有三种形式的导电：电子导电、离子导电和晶体的离子导电。

电子导电是自由电子在电场作用下所作的定向运动。金属、石墨和无烟煤的导电性即属于此种形式的导电。

离子导电是指在电场作用下，溶液中正、负离子分别向相反方向的运动，如酸、碱、盐水溶液的导电。

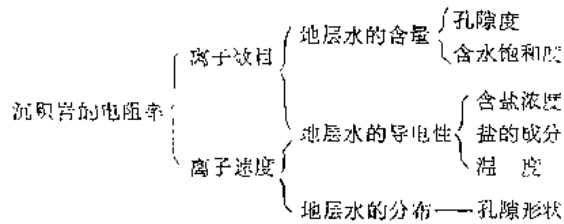
晶体的离子导电是指在强电场作用下，晶体中的离子位移而产生的微弱导电性，如半导体的导电。

当具有电子导电性的矿物（如黄铁矿、硫铁矿、黄铜矿、石墨、高炭化煤）在岩石中的含量较多，其分布又呈连通状，形成了良好的电流通道时，则电子导电性就是主要的。这类岩石的电阻率非常低，属于良导体。

绝大多数的造岩矿物（如石英、长石、云母、方解石等）是以晶体离子导电性为主，这种导电性是非常微弱的，只有在强电场下才有明显表现，电测井中遇到的都是弱电场，因此大多数造岩矿物的导电性可忽略不计，即电阻率可视为无穷大。

沉积岩是由骨架（基质）和孔隙流体（地层水、油或气）两部分组成的。骨架即造岩矿物，其电阻率可视为无穷大；孔隙流体如果是石油和天然气，也是不导电的，只有孔隙中的地层水能导电。因此，沉积岩的电阻率取决于地层水的离子导电性，这与离子的数目和运动速度有关，其影响因素如表1-2所示。即沉积岩的电阻率取决于地层水的导电性、含量与分布特点——赋存空间的大小（孔隙度）与形状（岩石结构）。因此，致密胶结的砂岩和碳酸盐岩，由于孔隙度小、不含水，电阻率可高达数千欧米，而疏松砂岩和裂隙发育的石灰岩，电阻率即较低。

表 1-2 影响沉积岩电阻率的因素



粘土类岩石（如粘土、泥岩、页岩）的导电性不属于离子导电，而是一种阳离子交换过程，称为附加导电。泥质颗粒具有选择性吸附负离子的特性，被吸附的负离子在颗粒的表面形成不能自由移动的紧密吸附层，外面则是可以移动的正离子层，在电场的作用下，正离子在泥粒表面依次交换它们的位置，形成了传导电流。由于泥粒表面的负电荷量基本相同，所以粘土类岩石的电阻率较稳定，变化很小，一般为几个欧米。

煤的电阻率与其煤化程度、煤岩成分、矿物杂质含量和水分含量等因素有关(图1-1)。褐煤和烟煤基本上是离子导电，无烟煤则是电子导电，半无烟煤和过渡型的贫煤(T₂)处于二者之间，既有离子导电，又有电子导电。

矿物杂质是灰分的主要物质来源，其主要成分是粘土矿物，还有黄铁矿、石英、方解石等，它们的电阻率比褐煤或烟煤的有机质的电阻率要低，但高于无烟煤有机质的电阻率。因此，褐煤或烟煤的电阻率随着矿物杂质含量（或灰分）的增高而降低，而高变质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。

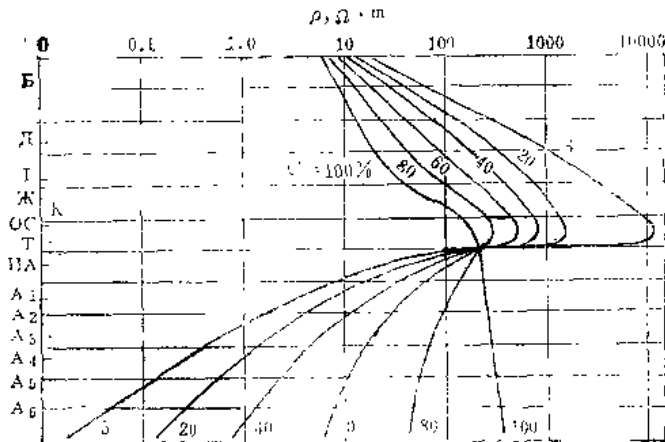


图 1-1 煤与炭质泥岩的电阻率与煤化程度的关系

B—褐煤；II—长焰煤；Γ—气煤；Ж—肥煤；K—焦煤；OC—砂煤；T—贫煤；IIA—半无烟煤，
A₁~A₆—无烟煤；C—铝硅酸盐矿物杂质含量

低变质的褐煤因含有较多的水分和溶于水的丰富的腐植酸根离子而电阻率较低，一般在几十到几百欧米，随着变质程度的加深，水分和腐植酸根离子变少，电阻率逐渐上升；低、中变质程度的烟煤具有最大的电阻率，可达几千欧米；从烟煤到无烟煤的变化中，电阻率急剧下降，最低可达千分之一欧米，这是因为煤中芳香环缩合，分子呈规则平行排列，其结构趋向石墨，造成了电子导电能力增强的缘故。

对于同一种牌号的褐煤或烟煤，如果煤岩成分不同，电阻率也有差别。这是因为各煤岩成分的孔隙、裂隙发育程度不同，其由大到小的次序是：丝炭、镜煤、亮煤、暗煤。因此，光亮型煤的电阻率最小，半亮型、半暗型煤的电阻率较大，暗淡型煤的电阻率最大。

由此可见，根据电阻率的大小，不仅可以区分不同的岩石，也可区分不同煤种的煤。

二、视电阻率测井的原理

电阻率是表征物质导电能力大小的一个物理量，它只是在有电流通过时才能表现出来。因此，进行电阻率测井时，需将由几个电极组成的电极系通过电缆放入井内，并供以一定强度的电流，使其在电极系附近的空间形成人工电场，这个电场的分布显然与周围地层的电阻率有关。当电极系沿井身移动时，通过测量电场的变化来判断岩层的电阻率，这就是电阻率测井的实质。

1. 稳定电流的电场

电阻率测井在井内建立的电场是由稳定电流形成的，其特点是导体中每一点的电荷的移动状况不随时间而变。这和静电场中电荷在介质中的分布不随时间而变的情况一样。因此，可以用电场强度 E 、电位 U 和电流密度 j 这三个基本物理量来描述稳定电流场。

在电阻率为 ρ 的均匀无限介质中，点电源 A 发出强度为 I 的电流，电流线将以辐射状直线射向四方（图1-2）。在距电源 A 为 r 的任意点 M 处的电流密度应为

$$j = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (1-2)$$

式中 $4\pi r^2$ 一半径为 r 的球面的面积。

将式 (1-2) 代入微分形式的欧姆定律 $E = \rho j$ 中，可得到 M 点的电场强度

$$E = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{r^2} \quad (1-3)$$

在稳定电流场中，电场强度是电位的负梯度，即

$$E = -\text{grad}U = -\frac{dU}{dr} \quad (1-4)$$

对式 (1-4) 进行积分，可求得 M 点的电位

$$U = -\frac{\rho I}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{4\pi r} + C$$

由于 $r \rightarrow \infty$ 时 $U \rightarrow 0$ ，积分常数 $C = 0$ ，故

$$U = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{r} \quad (1-5)$$

式 (1-2)、式 (1-3) 和式 (1-5) 就是描述稳定电流所形成的电场的基本公式。

2. 均匀介质电阻率的测定

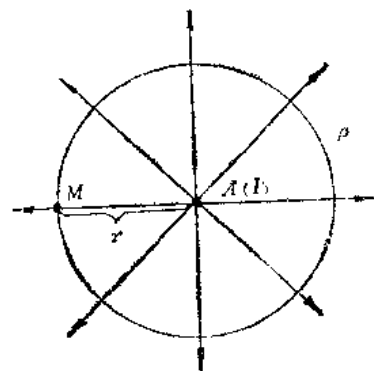


图 1-2 均匀无限介质中点电源的电场

为了测得均匀介质的电阻率，可以采用图1-3所示的测量线路。

通过三根电缆在欲测电阻率的介质中安置三个电极 A 、 M 、 N ，构成一个电极系。其中，在图1-3a所示的线路中， M 、 N 电极比较靠近并接到测量仪器， A 电极接到电源与远离电极系而安置在介质表面的 B 电极形成回路。当 AB 线路中通以电流 I 时，根据式(1-5)和电位叠加原理， M 电极的电位应等于

$$U_M = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AM} + \frac{\rho(-I)}{4\pi} \frac{1}{BM} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \approx \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AM}$$

式中 ρ ——介质的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

AM 、 BM ——测量电极 M 到供电电极 A （正极）和 B （负极）的距离， m 。

同理， N 电极的电位为

$$U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AN} + \frac{\rho(-I)}{4\pi} \frac{1}{BN} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \approx \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AN}$$

由于 $BM \gg AM$ ， $BN \gg AN$ ，即 B 电极产生的电场在 M 、 N 处的影响可忽略不计，故有以上的近似。

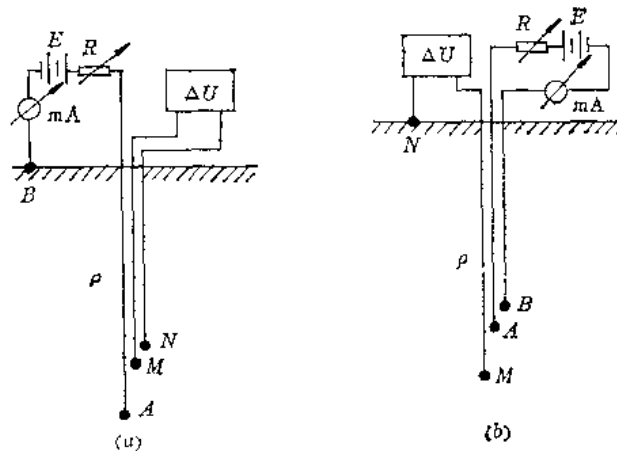


图 1-3 均匀介质电阻率的测定

a—单极供电电极系；b—双极供电电极系

A 、 B —供电电极； M 、 N —测量电极； ΔU —测量仪器； E —电源； R —调节电阻； mA —毫安表； ρ —介质的电阻率

测量仪器所测得的 M 、 N 电极的电位差为

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{\overline{MN}}{AM \times AN}$$

于是，介质的电阻率为

$$\rho = 4\pi \frac{\overline{AM} \times \overline{AN}}{\overline{MN}} \times \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-6)$$

式中 K ——电极系数， $K = 4\pi \frac{\overline{AM} \times \overline{AN}}{\overline{MN}}$ ，它只与电极之间的距离有关。

如果改用图1-3b的双极供电线路，根据同样的演算可得

$$\rho = 4\pi \frac{\overline{AM} \times \overline{BM}}{AB} \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1-7)$$

式中 K ——电极系数, $K4\pi = \frac{\overline{AM} \times \overline{BM}}{AB}$ 。

当电极系中三个电极的相对位置不变时, 式(1-6)与式(1-7)中的 K 值相等。由此可知, 在不改变电极间距离的情况下, 把 A 、 B 和 M 、 N 互换, 测量结果不变。

3. 视电阻率及其测量

将图1-3的装置用于测井, 此时电极系周围将不是均匀介质, 而是电极系置于充满井液(通常是泥浆)的钻孔中(图1-4), 钻孔周围是厚度不同、岩性不同(因而电阻率也不同)的各种岩层, 在渗透性的地层(如砂层、有裂隙的灰岩)处, 还存在着泥浆侵入带, 并在井壁形成泥皮(泥饼)。

在这种非均匀介质中进行测量, 由式(1-6)或式(1-7)所解出来的电阻率值就不是某一介质的电阻率, 也不是这些介质电阻率的平均值, 而是在电场作用范围内, 各种介质的电阻率综合影响的结果, 称为视电阻率, 用 ρ_s 表示。即

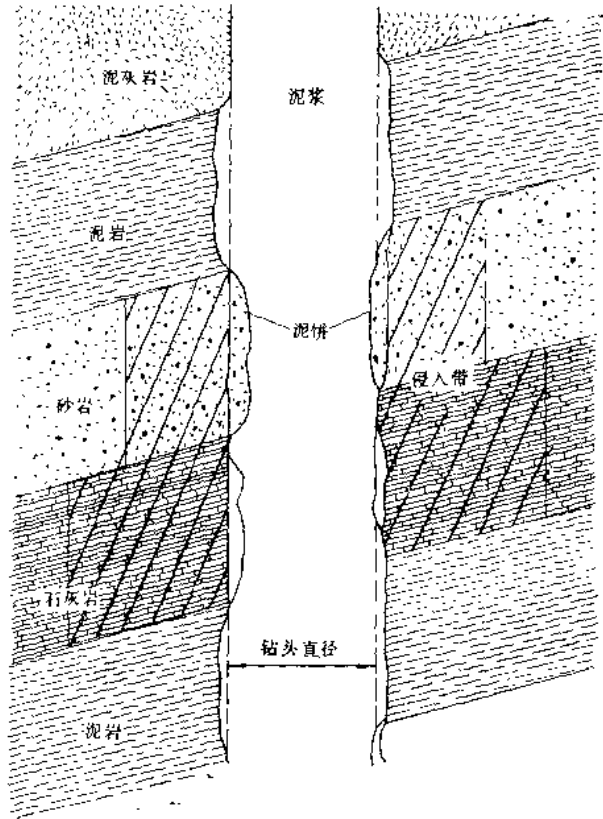


图 1-4 钻孔周围的环境

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1-8)$$

视电阻率值与电极系所对着的岩层的真电阻率 ρ_i 有关, 同时还受到一系列因素的影响, 即

$$\rho_s = f(\rho_m, d, \rho_i, D, h, L, \rho_w, \rho_i) \quad (1-9)$$

式中 ρ_m 、 d ——泥浆电阻率及井径;

ρ_i 、 D ——泥浆侵入带的电阻率及侵入带的直径;

h ——地层厚度;

L ——电极距;

ρ_w ——围岩电阻率。

利用图1-5所示的现场布置, 把电极系沿井身移动, 在保持供电电流 I 不变时, 连续记录 ΔU_{MN} 的变化, 就可得到一条反映地层视电阻率变化的曲线, 称为视电阻率曲线(图1-6), 它的横向比例尺(单位横向长度代表欧米)为