

矿井直流电法勘探

岳建华 刘树才 著

KUANGJING ZHILIU DIANFA KANTAN

KUANGJING ZHILIU DIANFA KANTAN

中国矿业大学出版社

P631.3
Y-419

矿井直流电法勘探

岳建华 刘树才 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是煤炭科学基金资助项目的研究成果,对矿井直流电法勘探的原理、基本理论和方法技术做了较为全面的论述。书中系统阐述了矿井直流电法勘探的工作原理、主要工作方法和常用装置形式,论述了矿井直流电法勘探的特殊理论与技术问题;在系统研究层状介质全空间电流场分布理论及其数字滤波法计算技术的基础上,通过合理选择基本解,简化了边界归化过程,全面论述了典型地电模型矿井直流电法 3D 边界单元法数值模拟技术;研究了巷道影响下全空间电流场的分布变化规律,分析总结了常用矿井直流电法理论曲线的变化特征;以理论成果为指导,重点阐述了矿井直流电法勘探技术及其在煤矿生产中的应用。

全书共分七章,结构紧凑,内容丰富,论述严谨,观点新颖,可作为应用地球物理专业研究生教材,也可供应用地球物理、矿井地质工作者参考。

责任编辑 宋党育

图书在版编目(CIP)数据

矿井直流电法勘探/岳建华等著.—徐州:中国矿业大学出版社,1999.8
ISBN 7-81040-996-4

I.矿… II.岳… III.矿井-直流电法勘探-研究
IV.P 631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63409 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

徐州新华印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 9.25 字数 228 千字

1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月第 1 次印刷

印数 1~1000 册 定价 28.80 元



前 言

矿井直流电法勘探作为矿井地球物理勘探的重要组成部分,是电法勘探在地下采矿、隧道工程领域所取得的重要进展,在地质构造勘探和采(掘)后灾害性动力地质现象预测预报方面具有良好的应用前景。

矿井直流电法勘探与地面电法勘探的物理环境明显不同。在极其有限的地下施工空间内,如何克服地电干扰和铁轨、金属支架等接地良导体或残留煤、巷道松动裂隙等电性不均匀体对观测结果的影响,从而高精度、高效率地完成地质勘探任务,是矿井直流电法勘探技术的关键。另一方面,矿井直流电法的供电电源布置在导电介质内部,因巷(隧)道或采空区影响而复杂化了的全空间场效应是矿井电法勘探固有的特殊理论问题,同时三维空间中不同方位地质异常体的电性响应在观测结果中相互叠加,增加了矿井电法资料处理和解释的难度。与研究 and 应用水平较高的地面电法勘探相比,矿井直流电法勘探的研究程度较低,特别是在基础理论方面明显落后于仪器和技术开发。加强基础理论研究将为进一步探索适合地下巷(隧)道、采场施工条件的矿井直流电法勘探方法技术,优化和完善矿井直流电法勘探资料的处理和解释方法,发展和开拓矿井直流电法勘探的应用领域奠定基础。

自 80 年代末以来,中国矿业大学先后承担了与矿井直流电法勘探有关的煤炭科学基金、煤炭部计划项目和煤炭企业委托课题 20 多项,先后有 3 项获教育部和煤炭部科技进步二、三等奖,1 项获江苏省教委科技进步一等奖。本书第一作者在导师李志聃教授指导下参加了绝大多数课题的研究工作,并于 1997 年申请并承担了题为“巷道影响和全空间电流场理论研究”的煤炭科学基金课题。在充分利用前人已有成果的基础上,通过综合、分析、计算、试验和提高,开发编写了 1D 全空间电流场线性滤波法和考虑巷道空间影响的 3D 边界元法、有限元法、有限差分法正演计算程序,完成了项目的研究任务。本专著即是该项目主要研究成果的总结。

书中第一章论述了矿井直流电法勘探的基本原理与特殊性。第二章在统一框架下系统总结了无巷道影响层状介质模型全空间电位分布理论,导出了层状介质模型中点源所在层和其他各层电位、电场强度、电流密度的全空间核函数表达式,建立了以数字滤波法为核心的层状介质中全空间电流场场分量正演计算的数学模型。第三章则以边界单元法为例系统介绍了矿井直流电法 3D 边值问题的数值解法,详细阐述了含巷道层状介质模型、多巷道模型、含巷道层状介质模

型中发育单个和多个同层或跨层地电异常体等复杂矿井地电问题的边界归化过程,推导了与之对应的井下电流场总场电位边界积分方程,进而又导出了关于双异极性点源场电位和单点电源场电流密度、电场强度的边界积分方程。第四章通过引入巷道影响系数(巷道影响下总场电位或电位差与无巷道影响全空间正常场电位或电位差的比值),研究了巷道影响与装置形式、装置大小间的关系,阐述了不同装置形式巷道影响系数间的关系,并以高密度电阻率法为例探讨了通过数据处理消除巷道影响的可行性,根据数值模拟结果提出了巷道影响系数公式。第五章和第六章首先从理论上全面、系统地分析了无巷道影响层状介质模型全空间电测深、层测深曲线类型、首尾支渐近线特征和中间段变化规律,然后重点研究了巷道对顶底板电测深曲线和层测深曲线的影响特征。第七章以上述理论成果为指导,重点阐述了矿井直流电法勘探技术及其在煤矿生产中的应用。

本书由岳建华主编并撰写了绪论及第一至第六章,刘树才撰写了第七章,研究生王志勇、刘志新绘制了部分图件并参加了全书的校对工作。

作者在研究过程中得到李志聃教授、刘天放教授、李金铭教授、曹璎璐教授、韩宝平教授、许孝庭高级工程师、鲍杰高级工程师的具体指导和帮助,并得到刘焕杰教授、缪协兴教授、曾勇教授、张爱敏教授、崔若飞教授的关心、鼓励和指教。葛宝堂副教授、于景村博士和中国矿业大学资源与环境科学学院信息物探系的其他师生也参加了井下试验工作并付出了辛勤劳动,同时还得到淮北矿务局、峰峰矿务局孙庄煤矿、徐州矿务局权台煤矿、江苏天能集团公司及所属各矿、中国矿业大学资源与环境科学学院中心实验室和地学信息处理中心等单位的的大力协助和支持。在此,作者向以上单位和个人一并致以诚挚的谢意!

作 者

1999年6月

目 录

前 言

绪 论	1
一、矿井地球物理勘探在煤炭开采中的应用	1
二、矿井直流电法勘探的研究历史与现状	1
三、矿井直流电法勘探存在的问题	4
第一章 矿井直流电法勘探原理	5
第一节 煤系地层的主要电性特征	5
一、岩石的电阻率	5
二、煤的电阻率	8
第二节 矿井直流电法勘探的工作原理	8
一、巷道周围稳恒电流场的基本性质	8
二、巷道周围稳恒电流场的边界条件	9
三、三维空间内的稳恒电流场	9
四、全空间视电阻率与矿井直流电法勘探的物理实质	10
五、矿井直流电法勘探的主要装置形式	11
第三节 常用的矿井直流电法勘探方法	11
第四节 矿井直流电法勘探的特殊性	13
第二章 层状介质模型全空间电位分布理论	16
第一节 引 言	16
第二节 1D 全空间地电问题的数学模型	18
第三节 待定系数 $A_j(\lambda)$ 和 $B_j(\lambda)$ 的递推公式	19
第四节 场分量计算的数字滤波技术	23
第三章 井下电流场的边界积分方程	27
第一节 边界元法的数学理论及应用	27
一、内、外边值问题	27
二、Green 公式	28
三、基本解与直接边界归化	29
四、边界元法在电法勘探中的应用	30
第二节 含巷道层状介质模型的全空间地电问题	31
一、含巷道层状介质模型全空间电场的边值问题	31

二、受巷道影响井下电流场边值问题解的惟一性	32
第三节 含巷道层状介质模型全空间电场的边界积分方程	33
第四节 含单一 3D 地电体的边界积分方程	41
一、3D 地电体位于某一电性层时的边界积分方程	42
二、3D 地电体跨过电性层分界面时的边界积分方程	45
第五节 含组合 3D 地电体的边界积分方程	49
一、单一巷道、同一电性层含多个地电体的情形	49
二、同一电性层含多个巷道的情形	51
第六节 双异极性点电源场的边界积分方程	51
第七节 井下电流场电流密度、电场强度的边界积分方程	52
第八节 小 结	53
 第四章 巷道影响与井下电流场	55
第一节 含巷道均匀围岩介质中的全空间点源场	55
一、巷道影响下全空间点源场电位函数的平面、断面特征	56
二、巷道影响与供电点电源位置间的关系	56
三、巷道影响与巷道几何尺寸间的关系	62
第二节 含巷道均匀围岩介质中的双异极性点源场	66
一、均匀围岩介质中对称四极装置测量电位差的巷道影响特征	66
二、均匀围岩介质中高密度电阻率法测量电位差的巷道影响特征	67
第三节 含巷道均匀围岩介质中的偶极子场	68
一、均匀围岩介质中的轴向偶极子场	69
二、均匀围岩介质中的赤道偶极子场	69
第四节 巷道影响的物理模型实验结果	71
第五节 视电阻率计算公式与巷道影响校正	74
 第五章 巷道顶底板电测深曲线的理论研究	77
第一节 引 言	77
第二节 全空间电测深曲线的性质	77
一、层状介质全空间电测深理论视电阻率公式	77
二、三层水平地层中的全空间电测深曲线	78
三、四层水平地层中的全空间电测深曲线	80
四、多层水平地层中的全空间电测深曲线	83
第三节 三层水平地层中巷道影响下的顶底板电测深曲线	83
一、测点位于巷道底板中轴线上时的三层电测深曲线	83
二、测点位于巷道底板与侧帮交线上时的三层电测深曲线	87
第四节 四层水平地层中的巷道底板电测深曲线	92
一、巷道影响与所在层电阻率的关系	92
二、巷道影响与 ρ_3 电性层层参数的关系	93

三、巷道影响与 ρ_4 电性层层参数的关系	93
第五节 小 结	95
第六章 井下直流层测深曲线的理论研究	96
第一节 引 言	96
第二节 无巷道影响的层测深理论曲线	96
一、水平地层无巷道影响层测深曲线类型	96
二、水平地层无巷道影响层测深曲线特征分析	97
第三节 巷道影响下的三层层测深曲线	99
一、巷道影响与巷道所在层电阻率间的关系	99
二、巷道影响与巷道底板电阻率间的关系	99
第四节 巷道影响下的四层层测深曲线	102
一、巷道影响与巷道所在层电阻率的关系	102
二、巷道影响与直接底板电阻率的关系	102
三、巷道影响与直接底板厚度的关系	102
四、巷道影响与 ρ_4 的关系	103
第五节 小 结	105
第七章 矿井电法井下施工方法与技术	106
第一节 矿井电剖面法	106
一、对称四极剖面法	106
二、偶极剖面法	108
三、微分剖面法	112
第二节 巷道电测深法	113
一、巷道电测深法概述	113
二、巷道电测深法资料解释	113
第三节 矿井高密度电阻率法	114
一、矿井高密度电阻率法概述	115
二、矿井高密度电阻率法的数据采集	116
三、矿井高密度电阻率法的资料整理	118
四、矿井高密度电阻率法资料的图示方法	120
五、矿井高密度电阻率法资料的解释	122
第四节 层测深方法	123
一、巷道周围的赤道偶极子场	123
二、井下施工方法与技术	124
三、层测深资料的解释方法	125
四、应用实例	125
第五节 直流电透视法	126
一、方法概述	127

二、资料解释方法·····	128
第六节 某煤矿 94103 工作面矿井电法勘探实例·····	128
一、94103 工作面矿井电法施工技术方案 ·····	128
二、实测高分辨三极电测深曲线定性分析与解释·····	129
三、开采验证情况·····	131
第七节 矿井直流电法勘探的若干问题·····	131
一、井下施工技术方案设计·····	131
二、井下施工中的若干问题·····	132
三、资料解释问题·····	132
四、矿井直流电法勘探的发展趋势·····	133
参考文献·····	135

绪 论

电法勘探是以岩矿石的电学性质差异为基础,通过观测分析电场分布变化规律来解决地质问题的一种地球物理勘探方法。按照场源类型,电法勘探分为直流电法勘探和交流电法勘探两大类。80 年代以来,随着经济建设和科学技术的迅猛发展,电法勘探作为一种重要的勘探手段,无论在方法理论还是在施工技术方面,都有了长足进步。矿井直流电法勘探是电法勘探在地下采矿、隧道工程等领域中的新进展。

一、矿井地球物理勘探在煤炭开采中的应用

煤炭开采是一项复杂的系统工程,地质勘探是煤炭开采的基础工作。煤炭生产实现采掘机械化、自动化,迫切需要在开采前查明所采煤层的变化,如断层、褶曲、煤层变薄区、陷落柱等。与此同时,岩、煤采掘引起的岩体应力再分配,会诱发岩爆、瓦斯突出、巷道底鼓与突水、顶板冒落、巷道片帮等灾害性地质现象。为了及时采取措施消除或减弱这些地质灾害,需要通过测定岩体应力状态及其物理性质的时空变化,来预测这些动力地质现象是否会发生以及会在何处发生。上述地质问题普遍具有空间规模小、时空变化大等特点,仅靠一种或几种传统地质手段已无法达到预期勘探目的。以先进的地质理论为指导,采用现代化的勘探技术手段,采取井上、井下相结合的立体勘查模式,从“宏观”到“微观”,从区域、矿区到采区、工作面不断细化探查工作,是妥善解决煤矿地质问题的必由之路(王桂梁,1993;李竞生,1997)。

矿井地球物理勘探,特指在地下巷道、采场中进行的以物性差异为基础,通过观测地下地球物理场分布变化规律来解决地质问题的一类勘查技术。自 50 年代苏联将直流电法应用于煤矿井下和 70 年代末联邦德国、英国提取与利用槽波的埃里震相探测工作面内地质构造以来,经过多年努力,矿井地球物理勘探现已发展成为包括矿井地震勘探、直流电法勘探、探地雷达法、无线电波透视法、微重力测量、磁法勘探、放射性测量和红外测温法等多种分支方法的学科体系(表 1)。作为应用地球物理学的一个新学科生长点,矿井地球物理勘探在实践中取得了显著的社会和经济效益。

矿井直流电法勘探是矿井地球物理勘探的重要分支。它以岩石导电性差异为基础,通过测量和分析巷道或采场附近稳定电流场的分布变化规律来研究矿井地质问题。由于断裂构造、岩石孔隙度、含水量和矿化度、外界压力、温度等对岩石导电性影响很大,因此矿井直流电法勘探在采区构造探测和矿井突水、瓦斯突出、冲击矿压等地质灾害的预测预报中具有良好的应用前景(刘天放,1993;储绍良,1996)。以矿井突水预测为例,我国在实践中形成了“以矿井直流电法勘探为主,辅以矿井高分辨地震勘探、无线电波透视法、井下微重力测量、放射性测量和红外测温等技术”的综合物探技术体系,在调查矿井水补给源、导水通道和隔水层稳定性及其厚度大小等方面已取得较好的应用效果。

二、矿井直流电法勘探的研究历史与现状

1. 井下专用仪器设备

80 年代末,乌克兰矿山地质力学与测量科学研究所研制生产出第五代矿用防爆型电法

仪。90 年代初,煤科总院西安地勘分院与邯郸矿务局合作,研制出 DZ II 型矿用防爆数字电法仪。1997 年煤炭工业部“煤田地质勘探设备标准化专业委员会”委托煤科总院西安分院制定了矿用防爆数字电法仪生产的行业标准。近期,煤科总院西安分院又推出了专门用于井下直流电透视的新一代防爆数字电法仪,对推动我国矿井电法勘探的发展产生了积极影响。

表 1 主要矿井物探技术及其应用

方 法 分 类		井下施工方法	主 要 地 质 应 用
矿 井 直 流 电 法 勘 探	巷道顶底板电测深法	1 固定和活动 M/N 法斯伦贝尔电测深法; 2 温纳电测深法; 3 偏置温纳电测深法; 4 三极电测深法; 5 断面测深技术	划分底板含水层、隔水层,确定含水层和隔水层的厚度及埋深;调查底板灰岩岩溶水;圈定底板断层、裂隙发育带等垂直导水通道
	矿井电剖面法	1 多极距偶极剖面法; 2 多极距三极剖面法; 3 单极距偶极法; 4 复合对称四极剖面法; 5 微分剖面法	圈定底板断层、裂隙发育带的位置,对其含水性作出评价;探测煤层小构造;确定岩层倾斜或直立接触面的位置
	层测深法	1 单侧层测深法; 2 双侧层测深法	煤层小构造探测及其含水性评价;煤层层参数反演
	高密度电阻率法	1 温纳对称四极(α 装置); 2 温纳偶极装置(β 装置); 3 温纳微分装置(γ 装置); 4 温纳三极装置(A 装置) ⑤温纳三极装置(B 装置)	探测底板突水构造,评价岩层含水性;划分底板含水层和隔水层;调查灰岩岩溶发育情况
	直流电透视法	1 定点二极电透视法; 2 定点三极电透视法; 3 定点偶极电透视法; 4 同步二极电透视法; 5 同步三极电透视法; 6 同步偶极电透视法	探测工作面内小构造;探测工作面顶底板内小构造;评价构造含水性
矿 井 高 分 辨 地 震 勘 探	巷道地震勘探	1 等 T0 法; 2 反射法; 3 折射法	确定底板岩层埋深;评价隔水层稳定性;底板小构造探测
	槽波地震勘探	1 反射法; 2 透射法	探测工作面内断层、陷落柱、冲刷带、小褶曲等
	瑞雷波勘探	1 稳态法; 2 瞬态法	划分岩层和探测顶底板小断层及岩溶;巷道独头超前探测小构造;探测工作面内小构造
	声波探测	1 直达波法; 2 反射波法; 3 折射波法; 4 多孔透射法; 5 单孔折射波法	测定岩石力学参数;评估岩体质量、硐室和井巷围岩稳定性,对岩体进行工程地质分类;探测井巷、硐室围岩松动圈范围和冻结壁的冻结状态及扩展情况等
	声发射与微震技术	1 一般监测法; 2 定位监测法	研究岩石破坏过程;预测瓦斯、煤层突出和顶板稳定性;预测冲击矿压等
探地雷达法		1 剖面法; 2 宽角法	探测巷道顶底板及工作面前方小断层、老窑、空巷;探测煤层残厚、灰岩岩溶、底板隔水层厚度和巷道松动圈等
无线电波透视法		1 定点发射法; 2 正同步法; 3 斜同步法; 4 多方位测量法	探测煤层内陷落柱、冲刷带、小断层、小褶曲等
井下微重力测量		1 布格重力异常测量; 2 重力垂直梯度测量;	探测底板构造、确定底板岩层密度分界面起伏形态和地质异常体的空间方位,预测岩爆
放射性测量		1 α 卡、 α 杯法; 2 γ 能谱测量	探测小构造;确定构造含水性 and 突水异常点
红外测温		1 定点测量法; 2 剖面测量法	探测老空区,区分水源类型

2. 方法技术及其应用

早在五六十年代,苏联学者即将直流电法应用于煤矿井下勘探,经过多年探索,积累了关于矿井直流电法勘探工作的丰富经验,采用矿井电法成功解决了与煤矿安全、生产有关的多种地质问题,包括煤层小构造探测、矿井水文地质条件调查,煤层界面起伏和煤层尖灭、冲刷带探测,顶板稳定性评价,以及矿压监测、岩煤突出预报、巷道变形监测等。80年代初苏联制定了高阻煤层和低阻煤层的矿井直流电法勘探工作规范,并具体规定了矿井对称四极和三极电测深法、矿井电剖面法和巷道间直流电透视法,以及点源梯度法的施工方法与技术(Матющечкин, 1986; Чирка, 1986; Дзис, 1988; Колч, 1989; Под редакцией, 1994; Грачев, 1995)。1990年以来,俄罗斯莫斯科大学地球物理研究室为探测低阻无烟煤层中的小构造,开展了井下矢量电阻率法的研究工作,为判定地电异常体的空间位置探索了三条有效途径,并在非接触式电法测量技术、总场测深技术(TES)、电各向异性特征研究等方面做了大量工作(Модлин, 1994a, 1994b, 1994c, 1995, 1996; Bolshakov, 1995, 1997a, 1997b; Pervago, 1995)。

匈牙利重工业技术大学 J. Csokás 等重点研究了用于探测高阻煤层内小构造的直流层测深技术,在探测煤层含水构造、圈定煤层变薄区等方面取得了成功经验(Csokás, 1974, 1986; Breitzkt, 1987; Gyulai, 1990)。日本曾应用巷道与地面间的电阻率成像技术研究断裂构造和金属矿床的赋存状态(Sasaki, 1993)。

1958年,煤炭部地勘司在京西矿区万佛堂平硐首次进行了井下电法试验,之后北京、淮北等矿务局相继开展井下试验工作(中国煤田地质总局, 1986)。70年代矿井电法的应用与研究一度中断。直到80年代后期,由于矿井突水问题日趋严重,煤科总院西安分院、唐山分院,淮北矿务局、峰峰矿务局、河北煤研所、邯郸矿务局、中国矿业大学等才逐步恢复了矿井电法的研究工作。其间,邯郸矿务局申请获得了矿井电测深技术方面的国家专利;煤科总院重庆分院左德坤翻译发表了许多反映国外矿井电法新进展的文章;中国矿业大学在淮北、徐州两矿区,煤科总院西安分院在焦作、肥城等矿区,河北煤研所、唐山煤科分院在河北省多个生产矿区进行了大量井下技术试验工作(刘天放, 1993; 储绍良, 1996)。1990~1995年间,以矿井突水探测为重点,国内各单位在我国东部矿区进行了大量井下技术试验工作,积累了开展矿井电法工作的实践经验。此外,河北煤研所、邯郸矿务局等单位还进行了矿井电法掘进头超前探测试验,地矿部岩溶地质研究所在我国南方煤矿进行了矿井水综合物探探测工作(李学军, 1992; 程久龙, 1992; 侯克昌, 1993; 岳建华, 1994a, 1994b, 1994c, 1994d; 中国地质信息研究院, 1995a, 1995b)。铁道部勘察院钟世航教授等在淮北矿务局进行了井下微分测深法探测残留煤厚的试验工作(钟世航, 1996)。煤科总院西安分院与中国地质大学(北京)合作研究了井下水平钻孔电法测煤厚技术。这一阶段,采前单巷道矿井电法工作渐趋规范,一些具有矿井特色的方法与技术(如岩体电阻率法、层测深法、直流电透视法、超前探测技术等)开始应用于井下实践。岳建华(1996)系统阐述了这一时期矿井电法在煤层底板突水探测中的应用与发展状况。

1995年以后,煤科总院西安分院矿井电法研究室开始研究巷道间直流电透视技术,旨在探测工作面上、下方隐伏突水构造(韩德品, 1997; 曾方禄, 1997); 山东科技大学于师建等将矿井电法应用于突水构造优势面理论研究中(1996); 本书作者承担了原煤炭工业部“井下采场三维电阻率成像系统研究”课题,开始进行井下采场分布式电法观测系统的研究工

作,并与中国煤田地质总局物探研究院合作完成了“高产高效矿井综合物探信息系统”的研究工作。

3.基础理论和正、反演算法

1993 年以前,人们通常以忽略巷道影响的全空间电流场理论或地下半空间电流场理论为基础,建立矿井电法的正演计算模型和反演解释方法。例如,J. Csokás 等在忽略巷道影响的前提下给出了 3~5 层介质模型巷道顶底板电测深、层测深理论曲线的计算方法,并与德国 Ruhr 大学地球物理所合作研究了矿井电测深类曲线与 VSP 资料的联合反演解释方法(Dobroka,1991)。作者曾给出任意多层介质巷道顶底电测深曲线和煤层层测深曲线的线性滤波正演算法(岳建华,1992,1997a)。

1993 年,中国矿业大学通过物理模型实验研究了巷道对矿井电法的影响特征,提出了均匀介质中巷道影响的校正公式(岳建华,1993)。但是,由于受实验条件的限制,当时对中、大极距巷道影响规律的认识与实际存在一定偏差,致使在此基础上形成的定量解释方法无法反演计算出合理的介质电阻率值(岳建华,1995;刘树才,1996)。

1995 年起,煤科总院西安地勘分院和中国矿业大学开始进行矿井电法数值模拟技术的研究工作。煤科总院西安地勘分院重点研究了水平钻孔电透视曲线的边界元正演计算方法,中国矿业大学则先后研究了考虑巷道影响的矿井电法 3D 有限差分法、有限元法和边界元法数值模拟技术(赵海峰,1995;岳建华,1998a,1998b)。

三、矿井直流电法勘探存在的问题

纵观矿井电法勘探的发展现状可以看出,国外用于低阻煤层小构造探测的巷道间直流电透视技术、巷道侧帮电测深和电剖面技术较为成熟,国内用于巷道顶底板构造和水文地质条件探查的矿井电法技术则发展较快,在专用仪器设备方面也取得重要进展。但是,矿井直流电法基础理论研究明显滞后于方法技术研究。在矿井电法勘探资料的解释过程中普遍不考虑巷道影响和全空间效应问题,与实际情况差别较大,阻碍了矿井电法资料定性、定量解释方法的发展,同时也限制了掘进头超前探测和工作面顶底板构造勘查等矿井电法勘探技术的发展。

第一章 矿井直流电法勘探原理

第一节 煤系地层的主要电性特征

岩层与岩层之间,岩层与煤层之间的电阻率差异是在煤矿井下巷道中开展直流电法勘探的物性前提。了解岩石和煤的电阻率及其影响因素,对于合理布置矿井电法勘探工作、正确解释实测电阻率法资料具有重要意义。

一、岩石的电阻率

由均匀材料制成的具有一定横截面积的导体,其电阻 R 与长度 L 成正比,与横截面积 S 成反比,即

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

式中, ρ 为比例系数,称为物体的电阻率。电阻率仅与导体材料的性质有关,它是衡量物质导电能力的物理量。不同岩石的电阻率变化范围很大,常温下可从 $10^{-8} \Omega \cdot m$ 变化到 $10^{15} \Omega \cdot m$,与岩石的导电方式不同有关。岩石的导电方式大致可分为以下四种:

(1) 石墨、无烟煤及大多数金属硫化物主要依靠所含的数量众多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,电阻率非常低,一般小于 $10^{-2} \Omega \cdot m$,是良导体。

(2) 岩石孔隙中通常都充满水溶液,在外加电场的作用下,水溶液中的正离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等)和负离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)发生定向运动而传导电流,这种导电方式称为孔隙水溶液的离子导电。沉积岩的固体骨架一般由导电性极差的造岩矿物组成,所以沉积岩的电阻率主要取决于孔隙水溶液的离子导电,一切影响孔隙水溶液导电性的因素都会影响沉积岩的电阻率,如岩石的孔隙度、孔隙的结构、孔隙水溶液的性质和浓度以及地层温度等,都对沉积岩的电阻率产生不同程度的影响。

(3) 绝大多数造岩矿物,如石英、长石、云母、方解石等,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,它们几乎不含水,而其矿物晶体的离子导电又十分微弱,故它们的电阻率很高,属于劣导体。

(4) 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。泥质颗粒对负离子具有选择吸附作用,从而在泥质颗粒表面形成不能自由移动的紧密吸附层,在此紧密吸附层以外是可以自由移动的正离子层。在外电场作用下正离子依次交换它们的位置,形成电流。这种以泥质颗粒表面的正离子来传导电流的方式与水溶液的离子导电方式不同,称为泥质颗粒的离子导电,也称为泥质颗粒的附加导电。粘土或泥岩中泥质颗粒的离子导电占绝对优势,由于粘土颗粒或泥质颗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影响很大。

(一)岩石导电性与矿物质成分的关系

岩石电阻率与组成岩石的矿物的电阻率、矿物的含量和矿物的分布有关。当岩石中含有良导电矿物时,矿物导电性能否对岩石电阻率的大小产生影响取决于良导矿物的分布状态和含量。如果岩石中的良导矿物颗粒彼此隔离地分布着,且良导矿物的体积含量不大,那么岩石的电阻率基本上与所含良导矿物无关,只有当良导矿物的体积含量较大时(大于30%),岩石电阻率才会随良导矿物体积含量的增大而逐渐降低。但是,如果良导矿物的电连通性较好,即使它们的体积含量并不大,岩石的电阻率也会随良导矿物含量的增加而急剧减小。

(二)岩石电阻率与其含水性的关系

沉积岩主要依靠孔隙水溶液来传导电流,因此岩层中水的导电性质将直接影响沉积岩的电阻率。在其他条件相同的情况下,岩层电阻率与岩层中水的电阻率成正比。影响水的导电性的主要因素是水中离子的浓度和水的温度。煤田中常见的岩层水一般含低或中等浓度的离子,岩层中水的含盐浓度增大,离子数量随之增多,溶液导电性将变好。同时岩层中水的导电性还与温度有关,它的电阻率将随温度的升高而降低。这是因为,一方面水中盐类的溶解度随温度的升高而增大,致使溶液中离子数量增多;另一方面,温度的升高还会降低溶液粘度,加快离子的迁移速度。

(三)岩石电阻率与其孔隙度和孔隙结构的关系

由于地下水只充填在岩石的孔隙空间之中,因而岩石电阻率不仅与岩石中水的电阻率有关,而且还与岩石的孔隙度和孔隙结构有关。岩石孔隙度的大小决定着岩石中水的含量,从而决定着岩石中离子的数量;岩石孔隙的结构(包括孔隙通道的截面积大小、弯曲程度以及连通程度等)则影响着离子的运动速度和参加运动的离子数量。

(四)岩石电阻率与岩性的关系

煤系地层主要由砂、泥质岩和碳酸盐岩组成,它们的电性特征分别讨论如下。

(1) 砂、泥质岩 砂、泥质岩包括碎屑岩类和粘土岩类。碎屑岩由碎屑颗粒、胶结物、泥质及含水孔隙组成,与碳酸盐岩相比,碎屑岩的孔隙度较大,孔隙结构较简单、规则。一般碎屑岩的电阻率随其粒度的减小、分选性变好、泥质含量增高、胶结程度变差和孔隙中水含盐量的增大而降低。砂岩电阻率在数十至数千欧姆米之间变化。分选性差、颗粒粗、胶结程度高的致密砂岩电阻率高;反之,分选性好、颗粒细、胶结程度低的疏松砂岩电阻率相对较低。胶结物不同,砂岩电阻率也不同,钙质、硅质或铁质胶结的砂岩电阻率一般比泥质、粘土质胶结的砂岩电阻率高。砾岩由于颗粒粗、分选性差,故常具有比砂岩还高的电阻率。粘土、页岩、泥岩等粘土类岩石以泥质颗粒的离子导电方式为主,因为泥质颗粒表面的电荷量基本相同,所以粘土、泥岩、页岩等的导电性比较稳定,它们的电阻率一般在 $1 \sim 10 \times 10^4 \Omega \cdot m$ 之间变化。其中,页岩比粘土和泥岩更致密,故其电阻率稍高。当砂岩或砾岩含有泥质时,由于增添了泥质的附加导电性,其电阻率也会降低。砂、泥质岩石电阻率由小到大的顺序是:泥岩或粘土→页岩→细砂岩或粉砂岩→中砂岩→粗砂岩→砾岩。

(2) 碳酸盐岩 碳酸盐岩主要是以纯化学方式沉淀生成的。这类岩石的颗粒极细,粒间几乎没有孔隙,故其电阻率通常很高,可达 $5 \times 10^3 \sim 10^4 \Omega \cdot m$ 。然而,当碳酸盐岩在外因作用下形成的裂隙或溶洞充水时,其电阻率将会明显降低。此外,如果碳酸盐岩中含有泥质时,它的电阻率也会有所下降。

(五)岩石电阻率与层理的关系

层理构造是大多数沉积岩和变质岩的典型特征,如砂岩、泥岩、片岩、板岩以及煤层等,它们均由很多薄层相互交替组成。这种岩石的电阻率具有明显的方向性,即沿层理方向和垂直层理方向岩石的导电性不同,称为岩石电阻率的各向异性。岩石电阻率的各向异性可用各向异性系数 λ 来表示,定义为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}} \quad (1-2)$$

式中, ρ_n 代表垂直层理方向上的平均电阻率,称为横向电阻率; ρ_l 代表沿层理方向的平均电阻率,称为纵向电阻率(图 1-1)。由于岩层横向电阻率始终大于纵向电阻率,所以岩石的各向异性系数总大于 1。特别地,当 $\lambda=1$ 时,则为各向同性介质。组成煤系的常见岩层中,石墨、碳质页岩和无烟煤互层时各向异性最明显,烟煤或粘土质页岩次之,其他岩层更次之。一般地,岩层与夹层的导电性差异越大,互层越频繁,岩石的各向异性越明显。

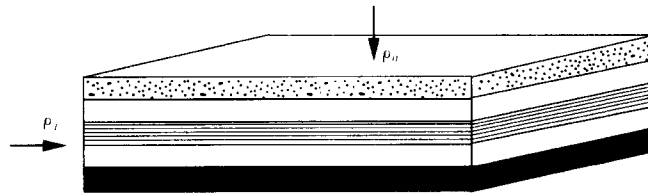


图 1-1 层状结构岩石模型

(六)岩石电阻率与温度的关系

岩石电阻率随温度的变化遵循导电理论的有关定理。电介质中离子的能动性随温度升高而增大,其运动能量积累到一定值时,很容易脱离晶格,因此导电性增强。半导体的温度升高时,导电区电子浓度增大,导电性也相应增大。如前所述,在低温条件下,含水岩石中水溶液的导电性随温度的升高而增大,这是由于温度升高导致水溶液浓度增大和粘滞度降低,水溶液中离子数量增多、活动性增强的缘故;当温度继续升高时,因水分蒸发,岩石电阻率略有增加,只有温度继续升高时,电阻率才开始减小。例如,对油页岩进行加温实验时,温度升高到 50~100 °C 时,试样的电阻率减小;温度继续升高至 200 °C 时,试样电阻率增大;温度继续升高超过 200 °C 时,试样电阻率急剧下降;当温度超过 600 °C 后,试样电阻率又呈回升趋势。烟煤(褐煤、肥煤、气煤)电阻率与温度间的关系与上述情形类似。

(七)岩石电阻率与压力的关系

岩石原生结构破坏是压力作用下岩石性质变化的主要原因。根据压力特征,这种破坏可能是岩石的压实,孔隙收缩,颗粒接触面积的增大,形成裂隙组,或是个别区域之间粘结性减小等等。

静水压力对岩石的压实作用最大,在静水压力作用下,岩石内出现残余变形,从而使孔隙度降低。此时压力对岩石电阻率的影响与岩石内液体和气体的含量有关,往往随压力的增大,干燥或者稍许含水岩石的电阻率减小,这是由于孔隙度降低、颗粒间接触良好的原因。除此之外,岩石中孤立的含水孔隙在压力作用下闭合并形成连续的导电通路,也会使其电阻

减小。对于大多数岩石,当单轴压力由 10 MPa 增大到 60 MPa 时,可观测到岩石电阻率的剧烈变化。但是,某些粘土在压力作用下,由于孔隙中的水分被挤出,含水孔隙通道的截面缩小,从而使其电阻率增大。对于非常潮湿的煤,压力增大时,电阻率也增大。

相反,在应力弱化作用下,岩石颗粒之间内部粘结性降低,致使岩石强度变小,岩石可碎性增强。当岩石内部裂隙发育但裂隙不充水时,岩石电阻率会增大,若裂隙充水,岩石电阻率会显著减小。

二、煤的电阻率

煤的电阻率与煤化程度、煤岩组分、矿物杂质含量以及水分等因素有关。

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,一般仅为数十至数百欧姆米。随着煤化程度的加深,褐煤中水分和溶于水的腐植酸离子含量将显著减少,因而褐煤的离子导电性减弱,其电阻率明显增高。烟煤常具有较高的电阻率,但随煤变质程度的加深,电阻率减小,过渡至无烟煤,电阻率急剧下降。烟煤电阻率的变化范围为数十至数千欧姆米,无烟煤常常具有良好的电子导电性,因而其电阻率很低,一般在 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下。

煤中矿物杂质的电阻率通常低于褐煤或烟煤中有机质的电阻率,而高于无烟煤中有机质的电阻率。因此,褐煤或烟煤的电阻率随矿物杂质含量的增高而降低,而无烟煤的电阻率则随矿物杂质含量的增高而增大。但当无烟煤层中含有大量黄铁矿时,由于黄铁矿的电阻率很低,也会使无烟煤的电阻率降低。

煤的湿度分为内部湿度和外部湿度。煤的内部湿度是煤的电阻率随其变质程度变化的主要因素之一。煤的外部湿度取决于煤田的水文地质条件,外部湿度会使煤的电阻率降低。在煤的氧化带中,外部湿度一般较大,所以氧化带的电阻率往往比深部煤的电阻率低。

各种煤岩组分中,丝炭的电阻率比镜煤低。

综上所述,电阻率是表征岩石和煤性质的重要物理参数,岩石和煤的电阻率不同程度地依赖于它们的成分、结构、所含水分等因素,随着影响因素的改变而在较大范围内变化。因此,在一定的地质、物性条件下,可以通过测定岩石或煤的电阻率来解决煤矿生产中遇到的许多地质问题。

第二节 矿井直流电法勘探的工作原理

直流电法勘探是测定岩石电阻率的传统方法。它通过一对接地电极把电流供入大地,而通过另一对接地电极观测用于计算岩石电阻率所必需的电位或电位差信息。对于矿井直流电法勘探而言,供电、测量电极通常布置在巷道顶底板或巷道侧帮上,从不同角度去观测巷道周围稳恒电流场的分布、变化规律,藉以了解巷道顶底板或所在岩层内的地质情况是矿井直流电法勘探的主要任务。

一、巷道周围稳恒电流场的基本性质

在巷道周围导电介质内的任意一点上,电流场具有以下特征:

(1) 电流密度与电场强度的正比性

电流密度矢量 j 与电场强度矢量 E 在数量上成正比,比例因子是该点岩石的电导率 σ , 即