



岳建华 薛国强. 2016. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾. 地球物理学进展 31(4): 1716-1724 doi: 10.6038/pg20160441.

YUE Jian-hua, XUE Guo-qiang, et al. 2016. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(4): 1716-1724 doi: 10.6038/pg20160441.

中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾

Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years

岳建华¹, 薛国强²

YUE Jian-hua¹, XUE Guo-qiang²

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 徐州 221116

2. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Chinese University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

摘 要 1980 年以来, 中国煤炭电法勘探经历了三十六年的发展过程. 根据煤炭地质勘探任务和电法勘探技术特点, 中国煤炭电法勘探的发展历程可分为三个阶段, 即: 1980 年-1989 年, 以地面直流电法为主的勘探阶段; 1990 年-1999 年, 以煤矿井下直流电法为主的勘探阶段; 2000 年-2015 年, 以地面和井下瞬变电磁法为主的勘探阶段. 文中分析了不同阶段主要方法技术的研究背景与成果, 结合当前煤炭电法勘探的应用与技术现状, 根据煤矿安全生产需求, 指出了我国煤炭电法勘探在基础理论、数据采集、资料处理与解释以及仪器装备方面的发展趋势.

关键词 煤田电法勘探; 发展简史; 技术现状; 发展趋势

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg20160441

Abstract From 1980 to 2015, coal electrical and electromagnetic prospecting in China has experienced a rapid growth of 36 years. According to the geological needs and coal electric and electromagnetic technical characteristics, the development of Chinese coal electrical and electromagnetic prospecting can be divided into three stages. 1980-1989, it was the stage of surface Direct Current Resistivity method; 1990-1999, it was the stage of underground Direct Current Resistivity method; 2000-2015, it was the stage of surface and underground mine Transient Electromagnetic Method. The research background and achievements of the main methods in different stages have been analyzed in this paper. Finally in consideration of the up-to-date arts of coal electrical and electromagnetic methods' applications and technical development, as well as the future needs of mine safety production, the development direction of basic theory, data acquisition, data processing and interpretation, and the instrument design of coal electric and electromagnetic prospecting in China have been discussed.

Keywords coal electrical and electromagnetic prospecting; develop history; up-to-date arts of technology; trendy in development

0 引 言

1954 年 8 月中国第一支煤炭电法测量队成立, 采用的方法技术主要从前苏联引进, 以直流电法为主. 随后又逐渐引进、发展了电化学方法, 如激发极化法. 60 年代, 我国科研人员开始研究以绝对测量为特点的电磁感应类方法, 70 年代则以相对测量为主(赵育台, 2003). 到 20 世纪 80 年代初, 煤炭电法勘探已经广泛应用于山区地质填图、隐伏地区普查找煤、勘探阶段探测断层和隐伏煤层露头, 电测深、电剖面、频率域电磁测深与激发极化法、视电阻率与自然电位法测井是该时期煤炭电法勘探的主要技术方法.

关于我国煤炭地球物理勘探方法的发展历程, 国内已有多位学者从不同的角度进行了综合分析和研究. 中国煤炭地质总局方正(1994)、孙文涛和方正(1997)对我国煤炭物探从起步到 90 年代的发展历史作了回顾, 重点论述了煤炭测井技术、煤炭电磁法以及煤炭地震勘探的技术现状与特点. 刘盛东和张平松(2002)对矿井巷道超前探测技术的方法原理与应用情况进行了总结. 中国煤炭地质总局赵育台(2003)回顾了新中国煤炭电法勘探从无到有的发展历程, 展望了电法勘探技术的发展趋势, 探讨了煤炭电法勘探的市场需求与服务领域. 中国煤炭科工集团西安研究院韩德品等(2009)通过回顾矿井物探的发展历程, 分析总结了国内外

收稿日期 2016-06-11; 修回日期 2016-08-16.

投稿网址 http://www.progeophysics.cn

基金项目 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAK06B01)资助.

作者简介 岳建华, 男, 1964 年生, 山东济宁人, 中国矿业大学教授、博导, 从事煤田地球物理勘探与煤矿防治水方面的研究.

(E-mail: yuejh@cumt.edu.cn)

矿井物探技术的分类与特点、研究现状与应用成果。中国煤炭科工集团西安研究院程建远和石显新(2013)基于新时期煤炭物探与矿井物探技术的突出进展,提出了以“嵌入式”地球物理服务为标志的煤矿安全生产地质保障模式,给出了加快我国煤田物探技术发展的对策与建议。刘盛东等(2014)则系统总结了近10年来矿井地震法、矿井电磁法的研究与应用现状、存在的问题,指明了未来发展方向。

随着我国煤炭资源开采不断向深部发展,在多场、多相耦合作用下瓦斯、水、地温、冲击地压等煤矿地质灾害问题将更加突出,急需开发深部岩层复杂构造和诱发工程灾害源点的精细探测理论与技术(谢和平等,2006)。同时,煤炭开发重点向西部转移后,西部生态脆弱区的环境压力需要创新采煤技术,以减少开采影响和生态负效应,从而达到保水开采的目的。电法勘探是保水开采地质条件分区的主力地球物理勘探方法。因此,新时期煤炭电法勘探的应用领域将更加广泛,面对日益复杂的应用条件和地质任务多样化特点,其基本理论研究、方法技术优化以及仪器装备研发也将不断进步。本文拟在前人研究的基础上,简要回顾我国煤炭电法勘探进入数字化时代后近30多年的发展历史,在分析总结各方法研究进展与成果的基础上,根据煤矿生产未来技术需求,阐述煤炭电法勘探今后的应用领域与研究方向。

1 中国煤炭电法勘探36年发展过程

进入20世纪80年代以后,中国煤炭电法勘探在技术上进入数字化时代,在应用上从普查找煤转向为煤炭开发提供水资源勘查、地质保障等服务。

1.1 以矿区地面直流电法为主的勘探阶段(1980-1989年)

在煤炭开发阶段,煤炭电法勘探的主要任务为矿区水文水资源勘探。含煤地层适宜的勘探深度、中等良导电的物性条件,为直流电法勘探提供了良好的应用条件。在河南义马矿区、登封矿区、禹县含煤区、新郑含煤区、内蒙古陈旗、东胜、准噶尔、贵州六枝矿区北段、盘县矿区、江西乐平矿区涌山和丰城矿区石滩、湖南嘉禾县袁家矿区北段、陕西合阳东王地区、新疆乌鲁木齐河东铁厂沟-碱沟等地,通过寻找岩溶裂隙水,既为生产矿区或规划开发矿区找到了一大批水源,也为矿区防治水提供了重要的基础资料。

郭君书等(1981)利用地面直流电法进行煤矿导水裂隙带的探测;孙学诗(1984)从煤矿电磁干扰、观测方法、探测成果三个方面介绍了直流电剖面及电测深法在煤矿开发地质中的应用。1984年,中国矿业大学与江苏煤田物测队联合开发的直流电法工作站在煤炭系统推广应用,安徽煤田物测队提交的任楼地区水源电法勘探报告,全部采用该微机软件进行电测深定量解释,提高了分层能力和解释精度,地质效果明显。随后受中国煤炭地质总局委托,中国矿业大学开始2D有限元电法正演算法研究。

1985年,中国煤炭地质总局引进10套法国SYSCAL R2数字电法仪,改善了现场装备条件。新仪器装备与新资料处理方法的运用,提高了直流电法勘探的数据采集质量与资料解释精度。河南省煤田地质勘探公司利用纵轴直流电法在煤田进行水源勘探(乔夫,1986);江苏省煤田物测队在取得的丰富煤炭电测深资料的基础上,建立了煤炭电法资料数据

库,实现了对电测深各类数据进行存储、查询检索、解释处理和自动成图的全过程(赵家麟,1988);程久龙(1989)研究了形变-电阻率法探测煤层顶板裂隙高度的试验研究方法和结果。

1.2 以煤矿井下直流电法为主的勘探阶段(1990-1999年)

在1984-1985年间接连发生开滦范各庄矿、淮北杨庄矿等22起底板突水淹井事故,以煤矿防治水为主要任务的矿井物探工作提上议事日程。1987年,煤炭部总工程师陈明和到中国矿业大学调研,要求启动煤矿防治水矿井物探工作。1988年底,中国矿业大学矿井物探研究室与淮北矿务局地测处联合开展综合矿井物探试验工作,先后有100多人参与了该项工作。在无成功案例、无专用设备、无参考资料、无理论指导的困难条件下,历时2年建立了“以矿井直流电法勘探为主,矿井地震勘探、放射性测量、微重力测量和红外测温为辅”的煤层底板水矿井物探技术体系,开发了巷道顶、底板电测深、巷道电剖面法、矿井高密度电阻率法、直流电透视法、矿井地震勘探等施工方法与技术。

随后,中国矿业大学启动矿井电法勘探基础理论研究工作。1989年,对巷道影响和全空间效应进行了物理模型实验研究(岳建华和李志鹏,1993,1999)。1990-1994年,提出了层状介质全空间电流场正演计算的线性滤波法(岳建华和李志鹏,1994)、顶、底板电测深曲线自动反演算法(岳建华等,1995)等。1996-1997年,开发了巷道影响下全空间电流场边界单元法数值模拟算法,1998年,实现了考虑巷道影响的全空间电测深、层测深边界单元法数值模拟(岳建华等,1998),建立了巷道影响下的全空间电流场理论(岳建华等,1997;岳建华和刘树才,2000)。2000-2003年,给出了巷道影响下全空间电流场有限差分法和有限元法数值模拟算法(王大庆等,2003)。

煤炭科学研究总院西安分院在直流电透视的基础上开发了音频电透视技术(曾方禄等,1997;王永胜等,1999),用于探测工作面底板含水构造。对于巷道掘进头超前探,中国矿业大学开发的超前探孔中二极剖面法(于景邨等,1998)和西安煤科院、河北煤研所等开发的点源梯度法取得良好探测效果。矿井直流电法勘探试验从两淮转向徐州、峰峰矿区,应用推广至山东、河北、河南、陕西等大水矿区,煤层底板突水事故频发的现象得到有效遏制。

在矿井直流电法从诞生到迅速发展的同时,煤炭科学研究总院重庆和西安分院、淮北矿务局、开滦矿务局、大同矿务局、蒲白矿务局、霍州矿务局等其他研究与生产单位(曾方禄等,1995,1997;徐宏武,1995;宋振江等,1996;郭继如,1996;刘少忱和张兴堂,1997;杨志刚,1997;高宇平,1998;李武俊等,1998;王琦,2001)相继开展了无线电波透视技术的研究,使其基础理论不断完善,新仪器、新装备以及资料处理与解释方法不断进步,特别是电磁波层析成像技术的运用取得显著地质效果,成为各个矿区探明回采工作面内陷落柱、断层及煤层变薄带的主要物探手段之一。

1.3 以地面和井下瞬变电磁法为主的勘探阶段(2000-2015年)

在我国,地面瞬变电磁法的研究于20世纪70年代初期就已开始(薛国强等,2007)。起初,主要应用于金属矿产勘探。1996年,中国煤田地质总局组织“九五”物探科技调研

后,决定引进瞬变电磁法.1997年初,中国矿业大学和中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院各引进一台 SIRO-TEM 3F 瞬变电磁仪,但当时国内尚无单位知道如何使用该仪器解决煤矿突水问题.1998年,水文地质条件相对简单的兖州矿区综采放顶煤工作面受顶板红层砂岩水的困扰,严重影响生产效率;权台煤矿3煤25综采放顶煤工作面回采掉水,疑似顶板砂岩水受灰岩水补给,需要探明越层补给通道.当时最先想到的是采用巷道顶板电测深法圈定砂岩富水区.但是,由于综采放顶煤工作面的巷道断面大,在巷道顶板布设电极十分困难,多次尝试未果后,被迫开展矿井瞬变电磁法井下技术试验工作.

2001年,中国矿业大学于景邨《矿井瞬变电磁法理论及应用技术研究》博士论文完成.2002年镇江岩土工程勘察院陈金方等(2002)、2004年皖北煤电集团段中稳等(2004)分别发文介绍了任楼矿应用矿井 TEM 探测底板陷落柱和检测注浆效果.2003年,中国矿业大学刘树才、岳建华在第六届中国国际地球电磁学学术研讨会上介绍了矿井瞬变电磁法探测巷道顶、底板含水构造的方法技术;中国科学院白登海等在此次会议上结合峰峰牛儿庄应用实例介绍了地下全空间瞬变电磁法及其在煤矿水害预测中的应用.焦作煤业郭纯等(2006)利用地下全空间瞬变电磁技术进行煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测.矿大刘志新等(2006)应用矿井瞬变电磁法探测工作面内封闭不良钻孔.2007年,刘志新、岳建华等提出巷道掘进头超前探测的扇形观测技术,于景邨(2007)总结了矿井瞬变电磁法勘探的主要进展.2008年后,中国矿业大学、西安煤科院、安徽理工大学等多家高校科研机构和企业发表了许多关于矿井瞬变电磁法探测老空积水文章(赵文署等 2012;江球 2012;许福美等 2013).

在矿井瞬变电磁法基础理论研究方面,岳建华等在2003年中国地球物理学会年会上分析了多匝小回线装置视电阻率偏小的原因.2005、2006、2007年相继获得博士点基金和国家自然科学基金资助,培养了刘志新、杨海燕、姜志海、胡博、周仕新等一批青年学者,实现了矿井瞬变电磁法的2D、3D有限元法、有限差分法、边界元法数值模拟(周仕新和岳建华,2005;岳建华等,2007,2012;岳建华和杨海燕,2008;胡博和岳建华,2009;杨海燕和岳建华,2009).研究进展主要体现在:(1)总结了多匝小回线装置收、发特征及其对观测结果的影响;(2)认识和掌握了典型地电体的异常响应特征,为定性解释奠定了基础;(3)认识和掌握了天线方向特性,确立了异常体空间定位的理论基础;(4)初步掌握了时深转换的规律,为定量解释提供了理论依据(闫述和石显新 2004;杨海燕和岳建华 2015).

2000年以来,老窑水与采空区积水对我国煤矿安全生产的威胁日益加重,采空区探测成为煤炭电法勘探的主要任务.中西部地区多为沙土或黄土层覆盖,地表沟壑纵横,直流电测深存在电极接地不良、地形影响大等问题,致使劳动强度大、施工效率低.然而,地面瞬变电磁法具有易穿透高阻层、对低阻含水采空区反应灵敏,施工方便、效率高等优势,且勘探深度适于煤矿采空区探测,因而迅速成为各大矿区探测采空积水区的首选方法(杨建军等 2008;封绍武等 2010;刘焱等 2011;吴俊林和靳文月 2012;原文涛 2012;陈卫营

和薛国强 2013).

2002至2012的煤炭黄金十年,强投入、大回报的市场形势刺激了煤炭电法勘探的快速发展.非煤系统地质勘探队伍和科研机构与高校对煤炭电法勘探的关注度增强,国土资源系统、中科院系统和985、211高校等十多家重点地勘生产和科研单位相继投入力量从事与煤相关的地面和井下电法勘探研究工作,吉林大学、中国地质大学(武汉)在矿用电法勘探设备研发方面取得重要进展.在国家“十二五”科技支撑计划支持下,中国矿业大学、山东大学、中国地质大学等联合开展了煤矿突水重大灾害实时监测预警系统的研发工作,形成了以网络分布式电阻率法、瞬变电磁法为主体的动态监测技术体系.

2 中国煤炭电法勘探技术研究分析

煤炭电法勘探的技术发展一方面离不开煤矿安全生产的实际需求,另一方面则由含煤地层呈层分布的电性特征所决定.同时,矿井上、下施工环境恶劣、可施工空间有限、矿区地电干扰强、采动岩体电性动态变化特征显著、多期开采致使电性-地质条件复杂化等特点,也促使煤炭电法勘探在长期发展过程中形成了自身特有的方法和技术体系.中国是世界上煤炭生产和消费的第一大国,在煤炭电法勘探方面研究和生产实践丰富,从业人员规模世界第一,客观形成了我国在煤炭电法勘探领域占据世界领先地位的发展优势.

煤炭电法勘探的最大目标勘探深度一般不大于1200 m,多介于600~800 m之间;水平层状介质适用于测深类电(磁)法方法,视电阻率是煤炭电法勘探资料解释的主要依据.从原理上讲,直流电阻率法和频率域、时间域电磁法都可用于含煤地层断面电性特征的研究,但直流电阻率法一般用于最大目标深度小于300~400 m的勘探任务,而电磁类方法则主要用于中偏深部的勘探任务.

2.1 直流电法勘探

在相当长的历史时期,直流电法勘探一直是煤炭电法勘探的主力方法,其基础理论研究最早、最为成熟,以施伦贝尔装置电测深为主的直流电法勘探在煤矿防治水中依然发挥着不可或缺的作用.在多年的生产实践中,煤炭系统多采用供电与测量电极距之比为10:1的对称四极、活动MN施伦贝尔装置,垂向探测深度大、抗干扰能力较强.为了突出横向电性变化、克服施工空间的限制,中国矿业大学自20世纪90年代以来一直采用活动MN施伦贝尔三极测深装置,并于1994年起将之应用于探测浅层采空区和岩溶发育区,以及在井下对巷道周围、掘进头前方以及工作面内的地质异常体进行探测取得良好应用效果(岳建华,1999;武杰等,2003).20世纪末引进的高密度电阻率法、刘盛东等研发的神经网络电法以及成都理工大学从澳大利亚引进的超高密度电阻率法,大大提高了直流电法勘探数据采集速度.直流电法勘探的应用领域也不断得到拓展,除地面、井下以外,井-地、孔间电阻率成像技术以及3D电阻率成像技术的应用(杨文强,1997;罗延钟等,2003;许新刚等,2004;吴云超等,2005;岳建华和刘志新,2005;雷旭友等,2009;杨镜明等,2014),使直流电法的探测精度得到很大提高,也预示着其在未来地下水监测中具有广阔的应用空间.在数据处理方面,中国科学技

术大学、中国矿业大学、中国地质大学等单位相继开展了直流电法的二维、三维反演研究(吴小平和汪彤彤,2003;刘树才等,2004;徐海浪和吴小平,2006;张东良等,2011)。ANSYS、COMSOL MULTIPHYSICS 等新的正、反演软件也相继在直流电法数据处理中得到应用(汤井田等,2006;王小龙等,2011)。

存在不足:劳动强度大、施工效率低,限制了其大范围应用;矿井直流电法进行顶板探测时电极布设困难;对于深层采空区探测,其分辨率相对较低且劳动强度成倍增大,有逐渐被电磁类方法代替的趋势;高密度电阻率法探测深度较浅,且固定极距的设定会人为造成假异常;矿井直流电法超前探无法准确划定异常区,其反演方法有待进一步研究;井-地、孔间电阻率成像技术以及3D电阻率成像等新技术基础理论的研究需要加强。

2.2 瞬变电磁法勘探

瞬变电磁法轻便、高效、对低阻异常反应灵敏、指向性好,已成为应用最广泛的煤炭电法勘探方法。地面瞬变电磁法多采用大定源回线装置,对深层含水采空区具有良好的探测效果。受巷道空间的限制,矿井瞬变电磁法采用多匝重叠小回线装置,可用于巷道周围任意方向地质异常体的探测。与直流电法类似,瞬变电磁法的施工空间也在不断拓展,地面-巷道、地面-孔中、孔间、孔中瞬变电磁法等新的探测技术已进入试验研究阶段。多通道瞬变电磁法、短偏移距电性源瞬变电磁法等(薛国强等,2013,2014,2015)新方法的研究也取得重要进展。2000年以来,关于瞬变电磁法基础理论研究的文章层出不穷,研究方向主要集中在正、反演问题(王华军和罗延钟,2003;罗润林和张小路,2005;石显新等,2009;辛会翠等,2014)以及视电阻率计算方法研究两方面(严良俊等,2004;熊彬,2005;陆桂福等,2005;李建平等,2007,2012;王华军,2008;杨海燕等,2010;郭嵩巍和王绪本,2010;戚志鹏等,2011),同时对于瞬变电磁的探测深度(韩自豪等,2008;闫述等,2009)、关断效应(白登海和Meju,2001;杨海燕和岳建华,2008)、弱信号提取技术(程德福等,2002;王国富等,2011)以及地形影响校正等问题(邱卫忠,2012;范涛,2012)也有一定探讨。

存在不足:虽然当下瞬变电磁法的研究很热,但其基础理论依然薄弱,给资料解释带来很大困难,在异常划分和地质体空间定位方面不够准确;瞬变电磁法纵向分辨能力不够,无法有效对多层采空区进行分层;探测深度计算、地形影响校正、干扰的压制与有效信号提取方法还有待研究;矿井瞬变电磁法的正、反演方法研究滞后,巷道影响与全空间效应问题没有得到有效解决,空间指向性好没有理论依据;多匝重叠小回线装置视电阻率计算仍然存在问题;在仪器研发方面,近几年国内有很多厂家都开始了瞬变电磁仪的研制,然而与国外仪器相比,国产仪器在生产工艺与性能稳定性等方面仍有很大差距。

2.3 其他方法

我国从1976年开始研究无线电波透视技术,现在依然是各大矿区探测工作面内地质异常体与煤层变薄带的常用方法。电磁频率测深比瞬变电磁法在煤田中的应用还要早,1970年开始我国开始电磁频率测深的研究,中煤科工集团

西安研究院、陕西、江西、安徽、江苏、湖南等省的煤田物测队对电磁频率测深的基础研究与在煤田勘探中的推广应用做出了重要贡献。面对新时期煤田电法勘探的任务,电磁频率测深将与瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、EH4电磁法一起在煤田深部采场构造与采空区探测中发挥重要作用。探地雷达是高频电磁波探测方法,分辨率高但探测深度浅,目前在煤炭电法勘探中应用不多,未来可用于探测浅层采空区、封闭不良钻孔及对底板注浆效果进行评价。

3 创新再生期发展趋势分析

3.1 未来需求

煤炭电法勘探未来的需求决定了其发展方向。今后很长一段时间,煤矿防治水仍然是煤炭电法勘探的主要应用领域。当前,煤炭电法勘探主要用来寻找含水水源与导水通道,然而采掘活动会对原本稳定的岩层产生破坏,形成新的裂隙,地下水沿裂隙不断运动,致使传统的探测手段无法准确预测突水区域。因此,对煤炭电法勘探施工技术和工作方法进行改进,建立地下水实时动态监测系统,是减少煤矿突水事故的有效方法。同时,对矿井涌水量进行预测评价与治理,研究电法勘探定量解释方法,也是未来重要的研究方向。

除水害防治以外,煤炭电法勘探还可应用于:与防火有关的西部煤田自然发火区探测、采空区自然发火点定位;与工程有关的露天煤矿老窑采空区探测、剥离层结构探测、软岩巷道围岩结构探测;与环境有关的生态脆弱区环境承载力评价与监测、矿区生态环境(土壤和地下水系统)修复与评价;与水、瓦斯以及顶、底板破坏有关的实时动态监测等。

3.2 方法理论

岩石的电性差异是电法勘探的物性基础,然而长久以来人们更关注方法本身,忽略了对含煤地层典型地电特征的研究。对中西部地区新生代煤层、新生代煤层顶底板岩层的电性参数进行测试与分析,研究矿区水文地质与工程地质参数与电性参数间的关系以及含煤地层多场耦合特征(最佳响应)与规律,对于煤炭电法勘探方法的合理选择与提高资料解释精度具有重要意义。

在煤炭电法勘探基础理论方面,未来研究重点包括:地面电磁法的地形影响与校正、浅部与深部目标体的干扰效应与分离技术、激励源与电磁响应之间的关系;矿井瞬变电磁法全空间效应与巷道影响、异常体的空间定位以及视电阻率计算方法等;煤岩破裂电磁辐射机理;电各向异性特征及其应用;各类时间域、频率域方法的适用性;综合电(磁)法勘探以及井上下、地面-巷道、孔中、孔间等新的电(磁)勘探技术。

3.3 数据采集

数据采集直接关系到勘探结果的有效性,而不同的数据采集系统会导致不同的探测效果。未来煤炭电法勘探的数据采集系统应该向多通道、多分量、多方位、分布式的方向发展。因此,积极开展地面2D/3D电阻率成像系统、地面多通道电磁法勘探系统、矿井多分量瞬变电磁法、矿井矢量电阻率法、地面-巷道、井-地电阻率法与瞬变电磁法的研究,可大大提高煤炭电法勘探的探测精度,也是建立矿山全方位实时动态监测系统的技术基础。

3.4 资料处理与解释

正、反演是煤炭电法资料处理与解释的基础,正、反演问题也是学者们历来研究的热点与难点. 2D、3D 数值计算与反演问题,依然是将来电法勘探的研究重点. 压制干扰与突出异常是数据处理时应遵循的原则,将二代小波变换、滤波处理、求梯度或曲面磨光以及瞬变电磁信号的拟地震波场处理等技术应用到煤田电法勘探的数据处理中,是压制干扰、突出异常行之有效的办法.

3.5 仪器装备

煤炭电法勘探的仪器装备要向国产化、自动化、智能化、轻便化方向发展. 对于矿用电法勘探设备,首先要保证其防爆与本质安全,其次要研发信号发射与接收装置分离的探测设备、高精度且可自动定位的传感器以及数据传输与通讯系统,从而为感知矿山物联网提供装备基础.

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Bai D H, Meju M. 2001. The effect of two types of turn-off current on TEM responses and the correction techniques [J]. *Seismology and Geology* (in Chinese), 23(2): 245-251.
- Chen J F, Yu J C, Li Q, et al. 2002. The effect of using borehole TEM to detect water flowing subsided column and grouting [J]. *Jiangsu Coal* (in Chinese), (4): 7-8.
- Chen W Y, Xue G Q. 2013. Application on coal-mine voids detection with multi-device TEM technology [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 28(5): 2709-2717, doi: 10.6038/pg20130554.
- Cheng D F, Lin J, Yu S B, et al. 2002. Study on TEM weak signal detection techniques [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)* (in Chinese), 20(2): 1-5.
- Cheng J L. 1989. Interpretation of electric calculation method for the detection of the roof crack of coal seam by deformation resistivity method [J]. *Chinese Coal Geology* (in Chinese), 1(2): 68-71.
- Cheng J Y, Shi X X. 2013. Current status and development of coal geophysical technology in China [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 28(4): 2024-2032, doi: 10.6038/pg20130446.
- Duan Z W, Li Q, Tong H S. 2004. The role of TEM method in detecting water flowing subsided column in Renlou Mine [J]. *Jiangsu Coal* (in Chinese), (2): 13-14.
- Fan T. 2012. TEM topographic correction in coal field electrical exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 36(2): 246-249.
- Fang Z. 1994. Technology of geophysical exploration of coal in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 37(S1): 396-407.
- Feng S W, Liu W Z, Yang X D. 2010. The effectiveness of applying the transient electromagnetic method in high interference area to the exploration of mined-out areas [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 34(2): 195-197.
- Gao Y P. 1998. The characteristic of the underground radio penetration in the Datong Jurassic coalfield [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 26(3): 66-69.
- Guo C, Liu B Y, Bai D H. 2006. Prediction of water disasters ahead of tunneling in coal mine using continuous detection by UWTEM [J]. *Seismology and Geology* (in Chinese), 28(3): 456-462.
- Guo J R. 1996. A computer programming for the data processing and interpretation of radio wave penetration [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 24(3): 50-54.
- Guo J S, Sun Z P, Li Y M, et al. 1981. Primary test of using surface electrical method to detect water flowing fractured zone [J]. *Mine Surveying* (in Chinese), (1): 51-53.
- Guo S Q, Wang X B. 2010. Study on numerical calculation methods of transient electromagnetic all-time apparent resistivity [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 32(5): 500-507.
- Han D P, Zhao P, Li D. 2009. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(5): 1839-1849, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.05.039.
- Han Z H, Wei W B, Zhang W B. 2008. Study on the exploration depth of transient electromagnetic method in northern China coalfield [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(1): 237-241.
- Hu B, Yue J H. 2009. Calculation of mining TEM fields of arbitrary direction [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 31(1): 20-23.
- Jiang Q. 2012. Application of mine transient electromagnetic method to detect watery abnormal zone in seam roof strata [J]. *Coal Engineering* (in Chinese), (12): 41-44.
- Jiang Z H. 2008. Study on the mechanism and technology of advanced detection with transient electromagnetic method for roadway drivage face (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: Chinese Mining University.
- Lei X Y, Li Z W, Zhe J P. 2009. Applications and research of the high resolution resistivity method in exploitation of caves, mined regions and Karst region [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(1): 340-347.
- Li J P, Li T L, Zhao X F, et al. 2007. Study on the TEM all-time apparent resistivity of arbitrary shape loop source over the layered medium [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(6): 1777-1780, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.015.
- Li J P, Li T L, Zhang Y D. 2012. TEM forward and inversion of arbitrary shape loop source in layered media [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 36(2): 256-259.
- Li J W, Xing Z K, Li S J, et al. 1998. The application of underground radiowave penetration instrument in Huozhou Mining Bureau [J]. *Coal Geology of China* (in Chinese), 10(1): 66-68.
- Liu S C, Zhang X T. 1997. The application of the underground electromagnetic wave perradiator in Pubai mining area [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 25(5): 45-47.
- Liu S C, Yue J H, Li Z D. 1996. Studies on changing law of theoretical electrical sounding curves in coal mine [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 25(3): 101-105.
- Liu S C, Liu Z X, Jiang Z H, et al. 2004. Some problems in 3D forward simulation of mine direct current method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 28(2): 170-172, 176.
- Liu S D, Zhang P S. 2002. Overview of advanced detection technology of mine tunnel [J]. *Journal of Huainan Institute of Technology* (in Chinese), 22(S): 53-55.
- Liu S D, Liu J, Yue J H. 2014. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology [J]. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 39(1): 19-25.
- Liu Y, Liu S C, Yan S, et al. 2011. Research on detecting property of water-bearing in coal gob using large fixed TEM [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 8(1): 10-15.
- Liu Z X, Yu J C, Guo D. 2006. The application of the mining transient electromagnetic method to the exploration of hydrological borehole [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 30(1): 59-61, 70.
- Liu Z X, Yue J H, Liu Y G. 2007. Application of sector detection technology in advanced detection [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 36(6): 822-825, 868.
- Lu G F, Zhang Q, Huang L J. 2005. A rapid inversion technique for loop source transient electromagnetic method [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 27(4): 289-291.
- Luo R L, Zhang X L. 2005. A new forward method of TEM response to layered earth [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 27(1): 25-28.

- Luo Y Z, Wan L, Dong H B, et al. 2003. 2.5-D inversion for resistivity imaging[J]. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 39(5): 107-113.
- Qi Z P, Li X, Zhu H W, et al. 2011. Definition of apparent resistivity for non-center vertical component of large-loop TEM configuration [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 26(4): 1350-1358, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.04.028.
- Qiao F. 1986. The application effect of using vertical electrical sounding method in water exploration in coalfield [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), (1): 50-54.
- Qiu W Z. 2012. Topographic effects and correction methods of loop source TEM in mountainous exploration [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 40(5): 78-81.
- Shi X X, Yan S, Fu J M, et al. 2009. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(7): 1931-1936, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.029.
- Song Z J, Zhao H, Cheng H L. 1996. The factors influenced on the penetration technique in coal mines [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 25(5): 48-51.
- Sun W T, Fang Z. 1997. Review and prospect of coal geophysical technology in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 40(5): 362-368.
- Sun X S. 1984. Application for electrical methods in prospecting for coal [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 8(2): 116-120.
- Tang J T, Xiao X, Du H K, et al. 2006. The application of ANSYS in direct current method forward modeling [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(3): 987-992, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.03.043.
- Wang D Q, Xu X G, Yue J H. 2003. Simulation research on drift influence of point-source current field in the medium of uniform wallrock [J]. *Coal Geology of China* (in Chinese), 15(2): 55-58.
- Wang G F, Zhang H R, Zhang F Q, et al. 2011. Scale transformation for detecting transient electromagnetic weak signal of stochastic resonance [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(7): 1928-1934, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.027.
- Wang H J, Luo Y Z. 2003. Algorithm of a 2.5 dimensional finite element method for transient electromagnetic with a central loop [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46(6): 855-862, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2003.06.020.
- Wang H J. 2008. Time domain transient electromagnetism all time apparent resistivity translation algorithm [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(6): 1936-1942, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2008.06.037.
- Wang Q. 2001. The special processing of tomography to field data of tunnels perspective [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 29(4): 55-57.
- Wang X L, Feng H, Tian H G, et al. 2011. Direct current forward modeling based on COMSOL MULTIPHYSICS [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 39(5): 76-80.
- Wang Y S, Zeng F L, Zhang F P, et al. 1999. The application of voice frequency electric perspective technique in Renlou coal mine [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 27(4): 59-61.
- Wu J, Liu S C, Liu Z X, et al. 2003. Sounding technology of three-fracture used into detection water-bearing structure in mine [J]. *Coal Geology of China* (in Chinese), 15(3): 46-48.
- Wu J L, Jin Y W. 2012. The application of transient electromagnetic method to the exploration of coal mine goaf [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 36(5): 168-170.
- Wu X P, Wang T T. 2003. A 3-D finite-element resistivity forward modeling using conjugate gradient algorithm [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46(3): 428-432, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2003.03.023.
- Wu Y C, Wang C L, Chen C. 2005. An analysis of the inversion results of 2D resistivity imaging survey under the condition of unequal polar distances [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 29(1): 19-21.
- Xie H P, Peng S P, He M C. 2006. Basic Theory and Engineering Practice of Deep Mining (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Xin H C, Tang J T, Xu Z M. 2014. Finite-difference modeling of 2.5-D transient electromagnetic [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(5): 2278-2286, doi: 10.6038/pg20140543.
- Xiong B. 2005. Inverse spline interpolation for the calculation of all-time resistivity for the large-loop transient electromagnetic method [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 35(4): 515-519.
- Xu F M, Wu Z J, Wu C F, et al. 2013. Application of mine transient electromagnetic method in detection of water accumulation in Goaf [J]. *Safety in Coal Mines* (in Chinese), 44(4): 146-149.
- Xu H L, Wu X P. 2006. 2-D resistivity inversion using the neural network method [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(2): 584-589, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2006.02.035.
- Xu H W. 1995. Prediction of coal and gas outburst by perspective method [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 23(2): 61-63.
- Xu X G, Yue J H, Wu J. 2004. The application of 3D direct current survey to the prospecting of subsurface air-raid shelters [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 28(2): 187-188.
- Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2007. The progress of TEM in theory and application [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.04.026.
- Xue G Q, Chen W Y, Zhou N N, et al. 2013. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(1): 255-261, doi: 10.6038/cjg20130126.
- Xue G Q, Yan S, Chen W Y. 2014. Research prospect to grounded-wire TEM with short-offset [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(1): 177-181, doi: 10.6038/pg20140124.
- Xue G Q, Yan S, Di Q Y, et al. 2015. Technical analysis of multi-transient electromagnetic method [J]. *Journal of Earth Science and Environment* (in Chinese), 37(1): 94-100.
- Yan L J, Xu S Z, Chen X B, et al. 2004. Forward modeling method of 2D transient electromagnetic field induced by line source [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 32(5): 58-61.
- Yan S, Shi X X. 2004. Thin bed and wires modeling in transient electromagnetic fields FDTD computation of tunnel whole-space [J]. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 32(5): 87-89.
- Yan S, Shi X X, Chen M S. 2009. The probing depth of transient electromagnetic field method [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(6): 1583-1591, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.020.
- Yang H Y, Yue J H. 2008. Research on response calculation and correction technique of turn-off current in the transient electromagnetic method [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(6): 1947-1952.
- Yang H Y, Yue J H. 2009. Application of absorbing boundary condition in whole-space computation of transient electromagnetic response [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 38(2): 263-268.
- Yang H Y, Deng J Z, Zhang H, et al. 2010. Research on full-space apparent resistivity interpretation technique in mine transient electromagnetic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(3): 651-656, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.03.020.
- Yang H Y, Yue J H. 2015. Study on the Theory and Techniques of in-Mine Transient Electromagnetic Methods (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Yang H Z, Hu X W, Zhang P S. 2013. Numerical simulation of advanced detection by direct current electrical method in tunnel [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 10(2): 200-204.
- Yang J J, Shen Y, Liu H F. 2008. The application of radon measurement and transient electromagnetic methods in detection of coal mine goaf [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 32(6): 661-664.
- Yang J M, Wei Z Z, Gao X W. 2014. The application of the methods of

- high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(1): 362-369, doi: 10.6038/pg20140151.
- Yang W Q. 1997. The forward modeling method of high density resistivity curves for a 3-D body [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 19(3): 270-273, 278.
- Yang Z G. 1997. The relationship between the field intensity attenuation of radiowave penetration and the dip angle of coal seam [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 25(5): 52-54.
- Yu J C, Li Z D, Han D P. 1998. Two examples of in-mine electrical profiling applied in prevention of coal mine water [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 26(5): 67-68.
- Yu J C. 2007. In-mine Transient Electromagnetic Methods (in Chinese) [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- Yuan W T. 2012. The application of transient electromagnetic method to the detection of goaf and collapse columns [J]. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 36(S): 164-167.
- Yue J H, Li Z D. 1993. Study and model experiments of tunnel influence on electrical curves in coal mines [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 21(2): 56-59.
- Yue J H, Li Z D. 1994. DC layer sounding in coal seams [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 19(4): 422-429.
- Yue J H, Liu S C, Li Z D. 1995. Automatic iterative inverse method of drift roof & floor sounding curves [J]. Journal of China University of Mining & Technology (in Chinese), 24(3): 62-67.
- Yue J H, Li Z D, Liu S L. 1997. Numerical simulation and data interpretation method of theoretical curves in coal seam sounding [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 25(1): 52-56.
- Yue J H. 1998. Boundary integral solution of DC electric field in layered surrounding rocks of roadway [J]. Journal of China University of Mining & Technology (in Chinese), 27(2): 128-131.
- Yue J H, Li Z D, Liu S L. 1998. Modeling of floor sounding in roadway in a layered medium by boundary element method [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 23(4): 347-351.
- Yue J H. 1999. Application of high resolution three-electrode section sounding technique in quarry exploration [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 27(1): 69-71.
- Yue J H, Li Z D. 1999. Roadway influence on electrical prospecting in underground mine [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 24(1): 7-10.
- Yue J H, Liu S C. 2000. In mine Direct Current Prospecting (in Chinese) [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- Yue J H, Liu Z X. 2005. Three dimension resistivity tomography of mine-ground [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 20(2): 407-411, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2005.02.027.
- Yue J H, Yang H Y, Hu B. 2007. 3D finite difference time domain numerical simulation for TEM in-mine [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 22(6): 1904-1909, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.036.
- Yue J H, Yang H Y. 2008. Research on response of transient electromagnetic field in underground mine with boundary condition of laneway [J]. Journal of China University of Mining & Technology (in Chinese), 37(2): 152-156.
- Yue J H, Yang H Y, Deng J Z. 2012. Whole-space effect on underground transient electromagnetic field in layered media [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 27(4): 1385-1392, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.04.012.
- Zeng F L, Zhang T M, Duan J F. 1995. The application of radio wave perspective technique in Daliu coal mine [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 23(4): 60-61.
- Zeng F L, Wang Y S, Zhang X H, et al. 1997. Mine voice frequency electric perspective technique and its application [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 25(6): 54-57.
- Zhang D L, Sun J G, Sun Z Q. 2011. Finite-difference DC electrical field modeling on 2D and 2.5D undulate topography [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54(1): 234-244, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.025.
- Zhao J L. 1988. Introduction of coal electrical database [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), (2): 56-61.
- Zhao W S, Wang J Q, Mu Y. 2012. Application on transient electric magnetic method in roof goaf detection of coal mine [J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology (in Chinese), (7): 30-33, 37.
- Zhao Y T. 2003. Development and practice of coalfield electric prospecting technology in China [J]. Coal Geology of China (in Chinese), 15(6): 59-64.
- Zhou S X, Yue J H. 2005. Time-domain 3-D finite difference modeling of the transient electromagnetic field in underground mine [J]. Progress in Exploration Geophysics (in Chinese), 28(6): 408-412.

附中文参考文献

- 白登海, Meju M. 2001. 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略 [J]. 地震地质, 23(2): 245-251.
- 陈金方, 于景村, 李全, 等. 2002. 矿井 TEM 探测导水陷落柱及检测注浆效果 [J]. 江苏煤炭, (4): 7-8.
- 陈卫营, 薛国强. 2013. 瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用 [J]. 地球物理学进展, 28(5): 2709-2717, doi: 10.6038/pg20130554.
- 程德福, 林君, 于生宝, 等. 2002. 瞬变电磁法弱信号检测技术研究 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 20(2): 1-5.
- 程久龙. 1989. 形变——电阻率法探测煤层顶板裂高的电算模拟解释 [J]. 中国煤田地质, 1(2): 68-71.
- 程建远, 石显新. 2013. 中国煤炭物探技术的现状与发展 [J]. 地球物理学进展, 28(4): 2024-2032, doi: 10.6038/pg20130446.
- 段中稳, 李全, 董宏树. 2004. 瞬变电磁法在预测任楼矿导水陷落柱中的作用 [J]. 江苏煤炭, (2): 13-14.
- 范涛. 2012. 煤田电法勘探中的 TEM 地形校正方法 [J]. 物探与化探, 36(2): 246-249.
- 方正. 1994. 中国煤田勘探地球物理技术 [J]. 地球物理学报, 37(S1): 396-407.
- 封绍武, 刘文增, 杨晓东. 2010. 强干扰区瞬变电磁法勘查采空区效果 [J]. 物探与化探, 34(2): 195-197.
- 高宇平. 1998. 大同侏罗纪煤田无线电波坑道透视特征 [J]. 煤田地质与勘探, 26(3): 66-69.
- 郭纯, 刘白宙, 白登海. 2006. 地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测 [J]. 地震地质, 28(3): 456-462.
- 郭继如. 1996. 无线电波坑道数据处理系统的设计 [J]. 煤田地质与勘探, 24(3): 50-54.
- 郭君书, 孙振鹏, 李裕民, 等. 1981. 导水裂隙带地面电法探测初试 [J]. 矿山测量, (1): 51-53.
- 郭嵩巍, 王绪本. 2010. 瞬变电磁全区视电阻率数值计算方法研究 [J]. 物探化探计算技术, 32(5): 500-507.
- 韩德品, 赵锴, 李丹. 2009. 矿井物探技术应用现状与发展展望 [J]. 地球物理学进展, 24(5): 1839-1849, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.05.039.
- 韩自豪, 魏文博, 张文波. 2008. 华北煤田瞬变电磁勘探深度研究 [J]. 地球物理学进展, 23(1): 237-241.
- 胡博, 岳建华. 2009. 计算任意方向矿井瞬变电磁场 [J]. 物探化探计算技术, 31(1): 20-23.
- 江球. 2012. 矿井瞬变电磁法在煤层顶板富水异常区探测中的应用 [J]. 煤炭工程, (12): 41-44.
- 姜志海. 2008. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机理与技术研究 [博士论文]. 北京: 中国矿业大学.

- 雷旭友,李正文,折京平. 2009. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 24(1): 340-347.
- 李建平,李桐林,赵雪峰,等. 2007. 层状介质任意形状回线源瞬变电磁全区视电阻率的研究[J]. 地球物理学进展, 22(6): 1777-1780, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.015.
- 李建平,李桐林,张亚东. 2012. 层状介质任意形状回线源瞬变电磁场正反演[J]. 物探与化探, 36(2): 256-259.
- 李武俊,邢兆楷,李慎举,等. 1998. 坑道无线电波透视仪在霍州矿务局的应用[J]. 中国煤田地质, 10(1): 66-68.
- 刘少忱,张兴堂. 1997. 蒲白矿区无线电波坑透仪的应用[J]. 煤田地质与勘探, 25(5): 45-47.
- 刘树才,岳建华,李志聪. 1996. 矿井电测深理论曲线变化规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 25(3): 101-105.
- 刘树才,刘志新,姜志海,等. 2004. 矿井直流电法三维正演计算的若干问题[J]. 物探与化探, 28(2): 170-172, 176.
- 刘盛东,张平松. 2002. 矿井巷道超前探测技术综述[J]. 淮南工业学院学报, 22(5): 53-55.
- 刘盛东,刘静,岳建华. 2014. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. 煤炭学报, 39(1): 19-25.
- 刘焱,刘树才,闫赛,等. 2011. 大定源瞬变电磁法在探测煤矿采空区富水性中的研究[J]. 工程地球物理学报, 8(1): 10-15.
- 刘志新,于景村,郭栋. 2006. 矿井瞬变电磁法在水文钻孔探测中的应用[J]. 物探与化探, 30(1): 59-61, 70.
- 刘志新,岳建华,刘仰光. 2007. 扇形探测技术在超前探测中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 36(6): 822-825, 868.
- 陆桂福,张强,黄力军. 2005. 回线源瞬变电磁测深快速反演方法[J]. 物探化探计算技术, 27(4): 289-291.
- 罗润林,张小路. 2005. 一种层状大地瞬变电磁响应正演计算的改进方法[J]. 物探化探计算技术, 27(1): 25-28.
- 罗延钟,万乐,董浩斌,等. 2003. 高密度电阻率法的2.5维反演[J]. 地质与勘探, 39(5): 107-113.
- 戚志鹏,李貅,朱宏伟,等. 2011. 大定源装置下瞬变电磁法视电阻率定义[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1350-1358, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.04.028.
- 乔夫. 1986. 纵轴直流电测深法在煤田水源勘探中的应用效果[J]. 煤田地质与勘探, (1): 50-54.
- 邱卫忠. 2012. 回线源TEM山地勘探中的地形影响和校正方法[J]. 煤田地质与勘探, 40(5): 78-81.
- 石显新,闫述,傅君眉,等. 2009. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进[J]. 地球物理学报, 52(7): 1931-1936, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.029.
- 宋振江,赵华,程洪良. 1996. 坑道无线电透视的影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 25(5): 48-51.
- 孙文涛,方正. 1997. 我国煤田物探技术的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 40(5): 362-368.
- 孙学诗. 1984. 电法勘探在煤矿中的应用[J]. 物探与化探, 8(2): 116-120.
- 汤井田,肖晓,杜华坤,等. 2006. ANSYS在直流电法正演中的应用[J]. 地球物理学进展, 21(3): 987-992, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.03.043.
- 王大庆,许新刚,岳建华. 2003. 均匀围岩介质中点源电流场的巷道影响模拟研究[J]. 中国煤田地质, 15(2): 55-58.
- 王国富,张海如,张法全,等. 2011. 基于尺度变换随机共振的瞬变电磁弱信号检测[J]. 地球物理学报, 54(7): 1928-1934, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.027.
- 王华军,罗延钟. 2003. 中心回线瞬变电磁法2.5维有限单元算法[J]. 地球物理学报, 46(6): 855-862, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2003.06.020.
- 王华军. 2008. 时间域瞬变电磁法全区视电阻率的平移算法[J]. 地球物理学报, 51(6): 1936-1942, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.06.037.
- 王琦. 2001. 实测坑透资料的层析成像特殊处理效果[J]. 煤田地质与勘探, 29(4): 55-57.
- 王小龙,冯宏,田华光,等. 2011. 基于COMSOL MULTIPHYSICS的直流电法正演模拟[J]. 煤田地质与勘探, 39(5): 76-80.
- 王永胜,曾方禄,张福平,等. 1999. 矿井音频电透视在任楼煤矿的应用[J]. 煤田地质与勘探, 27(4): 59-61.
- 武杰,刘树才,刘志新,等. 2003. 应用三极断面测深技术探测井下含水构造[J]. 中国煤田地质, 15(3): 46-48.
- 吴俊林,新月文. 2012. 瞬变电磁法在采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 36(5): 168-170.
- 吴小平,汪彤彤. 2003. 利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演[J]. 地球物理学报, 46(3): 428-432, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2003.03.023.
- 吴云超,王传雷,陈超. 2005. 不等电极距情况下高密度电阻率法的反演结果分析[J]. 物探与化探, 29(1): 19-21.
- 谢和平,彭苏萍,何满潮. 2006. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社.
- 辛会翠,汤井田,徐志敏. 2014. 瞬变电磁法2.5维有限差分正演模拟[J]. 地球物理学进展, 29(5): 2278-2286, doi: 10.6038/pg20140543.
- 熊彬. 2005. 大回线瞬变电磁法全区视电阻率的逆样条插值计算[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 35(4): 515-519.
- 许福美,吴志杰,吴超凡,等. 2013. 矿井瞬变电磁法在老空区积水探测中的应用[J]. 煤矿安全, 44(4): 146-149.
- 徐海浪,吴小平. 2006. 电阻率二维神经网络反演[J]. 地球物理学报, 49(2): 584-589, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.02.035.
- 徐宏武. 1995. 透视法预测煤与瓦斯突出的尝试[J]. 煤田地质与勘探, 23(2): 61-63.
- 许新刚,岳建华,武杰. 2004. 三维直流电法勘探在地下人防工程勘察中的应用[J]. 物探与化探, 28(2): 187-188.
- 薛国强,李貅,底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.04.026.
- 薛国强,陈卫营,周楠楠,等. 2013. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术[J]. 地球物理学报, 56(1): 255-261, doi: 10.6038/cjg20130126.
- 薛国强,闫述,陈卫营. 2014. 接地源短偏移瞬变电磁法研究展望[J]. 地球物理学进展, 29(1): 177-181, doi: 10.6038/pg20140124.
- 薛国强,闫述,底青云,等. 2015. 多道瞬变电磁法(MTEM)技术分析[J]. 地球科学与环境学报, 37(1): 94-100.
- 严良俊,徐世浙,陈小斌,等. 2004. 线源二维瞬变电磁场的正演计算新方法[J]. 煤田地质与勘探, 32(5): 58-61.
- 闫述,石显新. 2004. 井下全空间瞬变电磁法FDTD计算中薄层和细导线的模拟[J]. 煤田地质与勘探, 32(5): 87-89.
- 闫述,石显新,陈明生. 2009. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. 地球物理学报, 52(6): 1583-1591, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.020.

- 杨海燕, 岳建华. 2008. 瞬变电磁法中中断电流的响应计算与校正方法研究[J]. 地球物理学进展, 23(6): 1947-1952.
- 杨海燕, 岳建华. 2009. 吸收边界条件在全空间瞬变电磁计算中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 38(2): 263-268.
- 杨海燕, 邓居智, 张华, 等. 2010. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报, 53(3): 651-656, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 03. 020.
- 杨海燕, 岳建华. 2015. 矿井瞬变电磁法理论与技术研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨华忠, 胡雄武, 张平松. 2013. 井巷直流电法三维超前探测数值模拟[J]. 工程地球物理学报, 10(2): 200-204.
- 杨建军, 申燕, 刘鸿福. 2008. 测氦法和瞬变电磁法在探测煤矿采空区的应用[J]. 物探与化探, 32(6): 661-664.
- 杨镜明, 魏周政, 高晓伟. 2014. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 29(1): 362-369, doi: 10.6038/pg20140151.
- 杨文强. 1997. 三维任意形体高密度电阻率法数值模拟方法[J]. 物探化探计算技术, 19(3): 270-273, 278.
- 杨志刚. 1997. 坑透场强衰减与煤层倾角的关系[J]. 煤田地质与勘探, 25(5): 52-54.
- 于景村, 李志聃, 韩德品. 1998. 矿井电剖面法在煤矿防治水中的应用二例[J]. 煤田地质与勘探, 26(5): 67-68.
- 于景邨. 2007. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 原文涛. 2012. 瞬变电磁法在采空区及陷落柱探测中的应用[J]. 物探与化探, 36(S): 164-167.
- 岳建华, 李志聃. 1993. 巷道空间对矿井电测曲线影响的模型实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 21(2): 56-59.
- 岳建华, 李志聃. 1994. 煤矿井下直流层测深方法与原理[J]. 煤炭学报, 19(4): 422-429.
- 岳建华, 刘树才, 李志聃. 1995. 巷道顶、底板电测深曲线的自动反演解释[J]. 中国矿业大学学报, 24(3): 62-67.
- 岳建华, 李志聃, 刘世蕃. 1997. 巷道层测深理论曲线数值模拟及资料解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 25(1): 52-56.
- 岳建华. 1998. 巷道层状围岩介质中稳恒电流场的边界积分分解[J]. 中国矿业大学学报, 27(2): 128-131.
- 岳建华, 李志聃, 刘世蕃. 1998. 层状介质中巷道底板电测深边界元法正演[J]. 煤炭学报, 23(4): 347-351.
- 岳建华. 1999. 高分辨率三极断面测深技术在采石场勘查中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 27(1): 69-71.
- 岳建华, 李志聃. 1999. 矿井直流电法勘探中的巷道影响[J]. 煤炭学报, 24(1): 7-10.
- 岳建华, 刘树才. 2000. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 岳建华, 刘志新. 2005. 井一地三维电阻率成像技术[J]. 地球物理学进展, 20(2): 407-411, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2005. 02. 027.
- 岳建华, 杨海燕, 胡搏. 2007. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学进展, 22(6): 1904-1909, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2007. 06. 036.
- 岳建华, 杨海燕. 2008. 巷道边界条件下矿井瞬变电磁响应研究[J]. 中国矿业大学学报, 37(2): 152-156.
- 岳建华, 杨海燕, 邓居智. 2012. 层状介质中地下瞬变电磁场全空间效应[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1385-1392, doi: 10.6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 04. 012.
- 曾方禄, 张天敏, 段俊峰. 1995. 无线电波透视技术在大柳塔矿的应用[J]. 煤田地质与勘探, 23(4): 60-61.
- 曾方禄, 王永胜, 张小鹤, 等. 1997. 矿井音频电透视及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 25(6): 54-57.
- 张东良, 孙建国, 孙章庆. 2011. 2维和2.5维起伏地表直流电法有限差分数值模拟[J]. 地球物理学报, 54(1): 234-244, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 01. 025.
- 赵家麟. 1988. 煤田电法资料数据库简介[J]. 煤田地质与勘探, (2): 56-61.
- 赵文曙, 王俊奇, 牟义. 2012. 矿井瞬变电磁法在探测顶板老空区中的应用[J]. 山西焦煤科技, (7): 30-33, 37.
- 赵育台. 2003. 中国煤炭电法勘探技术的发展与实践[J]. 中国煤田地质, 15(6): 59-64.
- 周仕新, 岳建华. 2005. 矿井中瞬变电磁场三维时域有限差分模拟[J]. 勘探地球物理进展, 28(6): 408-412.