

陕西地球物理文集 (六)



地下工程中的地球物理 探测技术研究

主编 冯宏

陕西省地球物理学会
陕西省地球物理学会井巷及隧道专业委员会

编

西安地图出版社

陕西地球物理文集(六)

地下工程中的地球物理 探测技术研究

冯 宏 主编

陕 西 省 地 球 物 理 学 会
陕西省地球物理学会井巷及隧道专业委员会

编

西安地图出版社

图书在版编目(CIP)数据

陕西地球物理文集. 6, 地下工程中的地球物理探测
研究技术/冯宏主编. —西安: 西安地图出版社,
2005. 12

ISBN 7-80670-892-8

I. 陕... II. 冯... III. ①地球物理学—文集②地
下物探—文集 IV. ①P3-53②P631.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 152511 号

陕西地球物理文集(六)

地下工程中的地球物理探测技术研究

冯 宏 主编

西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路 334 号 邮政编码 710054)

新华书店经销 西安地质矿产研究所印刷厂印刷

787 毫米×1092 毫米 1/16 开本 10.5 印张 250 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—500

ISBN 7-80670-892-8/K·314

定价: 40.00 元

《陕西地球物理文集（六）》编委会

主 编：冯 宏

副主编：潘作枢 李毓茂 李 貅

编 委：黄作华 石亚丁 冷胜友

陕西省地球物理学会第五届理事会名单

理 事 长：李庆春

副理事长：（以姓氏笔画为序）

冯 宏 刘凤亮 孙 鹏 李 貅

吴汉宁 庞巨丰 杨建军 金宜声

孟昭秦

秘 书 长：李 貅（兼）

副秘书长：黄作华

理 事：（以姓氏笔画为序）

王中锋 王敬农 邓小卫 冯 宏 仵 杰

朱兴朝 吕禄仕 刘凤亮 刘代志 刘运平

刘其声 孙 渊 孙 鹏 陈大生 陈 敏

李庆春 李 貅 李兴坤 李学政 李 耕

李伯顺 吴汉宁 庞巨丰 杨建军 金宜声

孟昭秦 张云明 郑世平 赵 锋 郭文波

郭春喜 高静怀 夏哲仁 黄 沙 黄作华

谢振乾 谢家树 樊 钧

名誉理事长：潘作枢 李毓茂

名 誉 理 事：林 峰 赵圣亮 谢明魁 薛常水

前 言

21 世纪是地下工程与技术发展的新时代,其重要标志之一将从盲目作业阶段向可视化作业阶段跨越。其可视化的技术基础源于地球物理的理论方法,依赖于地球物理技术的进步。通过近二十年的研究、开发和工程实践,井筒、隧道、巷道、涵洞等地下设施建设过程中的作业效率 and 设计一致性已经依赖于地球物理探测技术来保证;防止透水、瓦斯突出、冲击地压、矿震、冒顶、断裂等灾害发生,保障地下设施运行的安全,也已经依赖于地球物理探测和监测技术。快速作业和现场数据处理、解释、成图,使得不透明的地质体成为可视的空间,增加人类认识自然世界的能力,地球物理必将在推动人类地下空间工程的技术进步和经济发展方面发挥重要作用。

陕西省地球物理学会井巷及隧道物探专业委员会成立于 1996 年。在陕西省地球物理学会的指导下,联合陕西地区的相关院校、科研单位,以及煤炭、铁路、水利、有色等行业的生产单位,开展地下地球物理探测技术、理论和方法的研究,以及新技术推广和普及,积极推动地球物理技术服务于矿井、隧道等地下工程设施,解决其安全与高效作业的关键问题。为促进学术交流,决定于 2005 年 12 月召开学术交流年会。

本次年会收到学术论文 32 篇,约 25 万字,汇集成《地下工程中的地球物理探测技术研究》一书,作为《陕西地球物理文集》系列中的第六辑出版。本论文集内容涉及煤矿井下水文地质条件探测方法、煤矿井下地球物理探测设备、矿产资源探测技术等方面,从几个技术方面反映地下工程及矿产勘探地球物理技术、方法和探测设备的研究进展。

本文集的整理编印得到陕西省地球物理学会的直接支持和帮助,

在潘作枢教授、李毓茂教授、李貅教授、李庆春教授、黄作华教授、石亚丁高级工程师、冷胜友高级工程师等的积极努力下，完成了设计、校对和编印。在此向他们表示感谢，向积极参与和支持井巷及隧道专业委员会活动的各界人士表示感谢。同时欢迎广大地下工程建设、设计、运行管理的人员参加和支持陕西省地球物理学会及其井巷及隧道专业委员会的活动，共同促进地下工程地球物理技术的进步和推广。

由于时间仓促，能力有限，如有错误欢迎指正。

陕西省地球物理学会井巷及隧道专业委员会

主任委员：冯 宏

2005 年 11 月 22 日

目 录

瓦斯灾害地质条件预测与地球物理探测技术·····	冯 宏 (1)
回线源瞬变电磁在灾害地质调查中的应用·····	郭文波 宋建平 曹 捷 李正宇 (9)
地—井激电方位测量在某铅锌矿上的应用效果·····	张云明 郭文波 赵忠科 岳 昆 (14)
物探找隐伏矿的几个技术问题·····	石显新 (17)
太原东山煤矿 51520 工作面陷落柱综合探查·····	石亚丁 丁 湘 高小伟 (23)
层状介质点源场理论在井中电测中应用研究·····	郭文波 宋建平 曹 捷 李正宇 (27)
感应测井趋肤效应校正的研究·····	许思勇 庞巨丰 曾自强 (33)
DLL 和人机交互在地震面波软件开发中的应用 ·····	李建国 丁梁波 李庆春 (40)
激发极化法在矽卡岩型铜金矿上的应用效果·····	吕学成 郭文波 王善勋 王 凯 (45)
浅谈孔间透视技术理论及其应用·····	解海军 王一林 (49)
折射地震资料处理软件研制及应用·····	梁志强 刘国华 (52)
单极—偶极激电测深在陕西山阳某银铅多金属矿探矿坑道的试验效果 ·····	周云海 王备战 郑 炜 (57)
瞬变电磁法地质探测中输电线路对信号形成干扰的机理及对策·····	王继矿 (60)
单极—偶极测深在内蒙古某金矿找矿中的应用·····	王备战 周云海 郑 炜 (65)
井下超前探测的球壳电位与异常·····	闫 述 石显新 陈明生 (68)
探地雷达探测地下采空区的研究·····	石显新 (70)
瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用 ·····	王善勋 郭文波 吕学成 郑 炜 刘 军 王备战 (75)
井下电法在北皂煤矿 H2101 工作面顶板防治水中的应用 ·····	石亚丁 冷胜友 (80)
坑道激电在陕西略阳某多金属矿上的找矿效果·····	吕学成 王 凯 王善勋 张云明 (85)
庞庄煤矿瞬变电磁探测富水区分布规律与成因探讨·····	王秀臣 (88)
三极测深结合控矿构造对激电异常定性解释的探索·····	王备战 周云海 郑 炜 (93)
多道瑞利波探测仪及其数据处理方法·····	王继矿 贾欣池 丛皖平 (96)
井下高分辨地电阻率法在探测巷道小窑采空区中的应用 ···	卢海隆 安拴连 石显新 (100)
应用坑透法探测采煤工作面内的含水构造 ·····	刘世勋 (104)
采区水文地质条件探查的地球物理探测技术 ·····	冯 宏 (107)
隧道超前地质预报中瞬变电磁法应用实例 ·····	李 貅 李 超 沈梅芳 武军杰 (119)
井巷掘进超前地震探测资料处理方法及系统研制与开发 ·····	沈鸿雁 冯 宏 李庆春 丁梁波 张 鹏 (127)
测井资料在裂缝性储集层解释中的应用···	黄 兄 谭成仟 杨涛涛 周国文 陈德元 (135)
快速自电测量找地下水 ·····	谢明魁 吴中州 赵 峰 (140)
三高测量在工程隐患勘察中的快速应用 ·····	赵 峰 吴中州 谢明魁 (146)
小波多分辨分析压制地震面波方法研究 ·····	丁梁波 邵广周 李庆春 (151)
瞬变电磁在寻找岩溶裂隙的方法研究 ·····	张晓峰 冯 兵 (155)

瓦斯灾害地质条件预测与地球物理探测技术

冯 宏

(煤炭科学研究总院西安分院 西安 710054)

摘 要 瓦斯灾害发生突然、动力巨大、伤亡力强、波及范围广,是目前我国煤矿井生产面临的重大灾害之首。瓦斯不均匀的贮存于煤层中,聚积在煤系地层的裂隙和应力封闭圈中,突出于采动破坏的岩壁段,瓦斯灾害形成的过程都隐蔽在不可见的地质体中,因此预防煤矿瓦斯灾害是一个典型的地学问题。通过测量岩体物性差异以推测瓦斯动力赋存的地质条件,通过测定裂隙带的三维空间形态和应力分布以预测瓦斯聚积的地质条件,确定采矿作业的安全岩体隔离厚度以保持自然安全隔离的地质条件,等等。非接触的地球物理探测技术为防治煤矿瓦斯灾害发生发挥着关键作用。本文结合地质应力和构造的超前预测的地球物理技术,对瓦斯地质预测先行的防治瓦斯灾害方法新框架建立问题进行探讨。

关键词 瓦斯灾害 地质条件 地球物理 预测预报

1 引言

我国煤矿瓦斯事故居高不下,严重影响煤炭行业安全生产作业的正常进行和产业安全技术水平在社会层面的形象。由于我国 49% 矿井属于高瓦斯矿井,行业制定了抽放与监测结合为主体的瓦斯防治技术体系和安全规程,为防止瓦斯灾害发生起到了关键作用。但是,我国许多开采煤层透气性差、厚度不均、煤体较软,且煤层赋存的地质构造复杂多变,使得传统瓦斯均匀抽放措施的难以达到预期效率;瓦斯突出事故发生突然,点状瓦斯监测系统的灾害预警效果差。另外,伴随回采和煤巷掘进,工作面应力分布连续变化,导致残余瓦斯动态聚积,动态形成新的灾害源。这些瓦斯地质的静态地质条件和动态变化都是在不能直接可见的地质体中,并对目前高强度、大深度开采带来严重威胁。

在预防瓦斯事故方面,长期采用瓦斯抽放先行、瓦斯浓度监测为主的防治技术框架。这种技术框架存在的关键问题是:

(1) 抽放前的瓦斯地质条件预测工作不足,均匀布孔的抽放效果不均匀,成本过高且留下隐患。

(2) 掘进中对工作面前方瓦斯不均匀聚积无认识手段,用钻孔做了点线抽放就认为开采煤层整体瓦斯威胁解除,导致掘进效率低下或事故频发。

(3) 过分依赖瓦斯浓度监测这种被动防范措施,在设计确定的通风能力对短时间瓦斯大量涌出稀释能力不足时,瓦斯监测的报警行为滞后,有效快速反应的时间条件不足。

(4) 未考虑伴随回采过程的应力分布连续变化导致瓦斯动态聚积的现象,忽视采动引起的动态瓦斯事故隐患。

防治瓦斯灾害发生的根本是如何准确预测瓦斯聚积,并有效利用煤岩壁这个自然安全蔽陷条件超前释放瓦斯应力。但是在当前条件下,尚没有一种技术手段可以直接探测岩体中的

瓦斯、查明它的空间分布情况。通过长期的研究和实践,人们已经总结出了许多间接预测瓦斯赋存地质条件的技术。如在采掘作业的每一个工作环节之前,认识瓦斯聚集的地质条件,圈定危险目标地质体,采取目标抽放等措施,在揭穿安全厚度前消除瓦斯威胁,等等。可见,间接预测瓦斯聚积的技术关键在于地质应力和构造的超前预测,其防治方法关键在把瓦斯地质预测技术与瓦斯灾害防治方法有机地结合起来,形成以瓦斯地质预测先行的防治技术框架。本文结合地质应力和构造的超前预测的地球物理技术,对建立防治瓦斯灾害方法新框架问题进行探讨。

2 瓦斯灾害孕藏的地质条件认识概述

瓦斯事故主要分为瓦斯突出、瓦斯爆炸、瓦斯中毒等三类。通常瓦斯贮存于煤层及顶底岩层中,当采掘作业破坏了其封闭的完整性,就会从煤巷侧壁最薄弱的一处快速涌出。涌出的动力取决于局部煤层压力、瓦斯封闭体大小和导气能力等地质因素^[1]。涌出动力大时,会诱发矿压释放,联带煤壁矿体一同大量突出,称作煤与瓦斯突出事故。它摧毁巷道,并形成巷道冲击波、引发瓦斯或煤尘爆炸,阻断采区通风回路,摧毁供电系统,灾害快速影响到与作业工作面相连的采区甚至全矿井;涌出量少时不会有明显的动力现象,但是会造成作业巷道的瓦斯聚集,导致采矿作业人员瓦斯中毒,或者遇点火条件而爆炸,甚至引发煤尘爆炸,形成巨大灾难。因此防止瓦斯事故的关键在于预防瓦斯瞬间大量涌出和大动力突出的发生,即预测瓦斯的大量聚积地质条件^[6]。

通过长期的瓦斯地质研究认识到,瓦斯是在煤层及上下围岩中以不均匀分布的形式赋存的,并随着煤层地应力变化和裂隙拓展而运移^{[4][5]}。导致瓦斯聚积的地质机理主要有以下几种形式。一是在煤层及其顶底围岩的裂隙带中瓦斯贮存较为集中,形成富聚区;二是在中软煤层中,伴随巷道围压的作用,往往形成采动、掘动引起的瓦斯动态后移,遇一定封闭性地质构造或高应力带阻挡而聚集^{[2][3]};三是在岩石巷道进入煤层巷道时,岩石对煤层瓦斯具有自然封闭性,不像在煤层巷道中随着掘进周边瓦斯会逐渐释放。由于采掘作业破坏了这种富集区的自然封闭体的完整性,就会造成瓦斯涌出或动力突出^[8]。

有效抑制煤矿瓦斯类事故发生的频度,保障煤矿安全生产,瓦斯地质条件预测是关键^[7]。近十年来地球物理工作者针对瓦斯赋存地质条件的物性差异特征,研究开发了预测瓦斯聚集的矿井地球物理探测技术^{[9][10][11]}。如用瑞利波探测技术预测岩巷与煤巷连接的石门厚度、预测煤巷掘进前方的裂隙带和断层位置,用槽波探测技术和无线电透视探测技术预测回采工作面内的瓦斯聚集应力区,用声发射和电磁发射监测技术预测瓦斯运移等等。这些地球物理探测技术以其无损、高效、低成本的技术优势在防止瓦斯事故中发挥了一定作用。下面对主要技术的应用情况和研发动态作一简单介绍。

3 针对掘进头前方瓦斯聚集地质构造探测的瑞利波探测技术

瑞利波探测技术是日本在公路工程地质条件探查应用中成熟起来的。1987年我国从日本引进后,经过稳态作业方式向瞬态作业方式转化的技术改进,于1992年移植到煤矿井下,用于解决煤矿井下石门厚度探测和掘进头前方裂隙和断裂带探测等瓦斯地质条件探测问题。它

属于弹性波类的面波勘探方法,利用瑞利型面波的椭圆极化特性和不均匀地层中扩散的速度与频率畸变特性,测量煤体一定范围内的弹性变化,解释破碎带、断层等弹性不连续地质体的空间位置,以便在掘进作业未突破安全隔离厚度前提前采取瓦斯抽放措施,解除瓦斯聚集压力,防止瓦斯聚集区大规模动力突出发生^[12]。我国研制的MRD-Ⅱ型矿用瞬态瑞利波探测仪器及防止煤与瓦斯突出的探测技术是国家“七五”科技攻关成果,1992年通过国家鉴定。该技术的探测范围达到掘进头前方30~50 m(探测距离的能力主要取决于煤层中横波传播速度和衰减率),地质异常体的预测准确度达到85%以上,距离预测的精度达到深度的5%。即超前预测30 m,距离误差小于1.5 m。由于该技术使用简便,操作自动化程度高,探测精度稳定,先后推广应用到我国三十多个矿区的超级瓦斯矿井。

在十多年的应用实践中发现,由于煤层侧翼地层不连续体的干扰和震源煤壁的不完整性,严重影响了其数据分析处理的准确性、重复性和探测精度。通过进一步地研究和实验,2004年开发了MRD-Ⅲ型矿井瑞利波探测仪。仪器采用了24位的A/D转换技术,实现了宽频带(0.01 Hz~4 kHz)、大动态(120 db)、低系统噪音(最小信号0.1 μ V)等高精度数据采集技术指标。采用大屏幕彩色液晶显示,104国际标准的模块化仪器体系结构等新技术,实现了2—9道、单分量或多分量同时数据采样,仪器配备了技术指标自测试和故障自检测等功能。在方法技术上实现了现场三分量瑞利波数据处理,有效分离来自探测目标侧翼的干扰信号;通过瑞雷波叠加技术的突破,提高了探测的稳定性、解释的可靠性和预测精度,超前探测距离提高到50 m左右,探测精度和现场解释分析能力明显提高。

4 针对掘进工作面前方地应力作用下的瓦斯动态运移监测的声发射技术

在工作面回采和掘进作业过程中,随着地应力场的二次平衡,巷道周边煤层中的瓦斯贮存条件发生变化,使其向应力相对较小的空间运移,并促使煤体裂隙的扩展,产生不规则的振动和电磁脉冲信号^{[15][16]}。其中电磁脉冲信号的频率不稳定、衰减迅速、传播范围较小,相对而言振动信号穿透煤层能力较强,传播范围较大,所以通过监测瓦斯运移伴随的煤岩裂隙扩展的振动信号,分析其信号的强度、频率、发生频度、变化规律等特征,评价瓦斯聚集过程,预测煤与瓦斯突出的可能性。其中许多统计预测方法借鉴于天然地震的预测预报方法。

采动过程中顶底板岩石的应力释放也产生振电发射。如何通过对振电发射信号的分析鉴别瓦斯运移?这是技术的关键。通过对采动引起岩体裂隙扩展的统计规律研究发现,瓦斯运移不但在采掘工作面围岩的一次应力平衡中辅助裂隙扩展,在采动停止的间隙,瓦斯从新发育的裂隙中逐渐析出、聚集,随着聚积压力增大,会进一步促使裂隙扩展,产生开采作业间歇期振电发射信号。也就是说在采动停止的间隙期间,瓦斯聚集导致的振电发射在总振电发射量中占有相当比重。另外,从发射源的空间位置方面看,瓦斯从新发育裂隙中析出时,靠近巷道壁一侧的裂隙把瓦斯导入巷道,被通风系统排除;在矿压作用下,远离巷道壁一侧的裂隙在采掘间歇期的扩展则多属于瓦斯活动的结果;通常顶底板围岩的应力活动集中在顶板和底板岩层中。通过对采掘间歇期振电发射的频度、能量和震源位置的统计检测,结合周边地质构造分布的综合分析,在发现某一相对封闭区域的振电能量和频度相对集中时,及时预警和采取措施,在岩体安全隔离厚度条件下进行瓦斯抽放。

自 20 世纪 80 年代开始,由中国科学院声学研究所、煤炭科学研究总院西安分院、煤炭科学研究总院重庆分院、科学研究总院抚顺分院、中国矿业大学等单位先后对该方法进行了理论技术研究、试验室试验和工业性试验,取得了一定成果。1998 年我国开发的这一系统在平顶山矿区高突矿井十矿跟踪掘进 2600 多米,保障了其高突采区的两个巷道的掘进安全。同期在相邻采区的巷道掘进中发生重大瓦斯事故。该研究在 1999 年获国家煤炭工业科技进步奖。俄罗斯也在我国平顶山等矿区进行了试验工作。在振电发射信号检测方面的主要技术难度在于监测点多,数据量大,通常采用 8 个数据采集道,40 ms 采样率,16 位以上的 A/D 转换器。限于井上下数据传输能力瓶颈,目前采用增强井下采掘工作面现场实时分析能力的方法。通过智能化分析,井下监测分站自动量化评价单次振电发射信号的位置和能量,判断信号的有效性。把有效信号的分析结果发往地面处理系统,经过统计分析一段采掘间歇时间内振电发射的集中区域,和统计分析振电发射源集中区域中心的移动过程,结合人机辅助判别,预警大规模动力事件发生。方法研究的难度在于振源的空间位置计算模型、有效信号判定模型和大动力灾害的程度预警模型制定。

此前研究主要存在的问题是缺少声发射源的定位计算、能量定量分析,和瓦斯应力聚集分析及动力危险程度报警能力,在信号识别方面存在难以消除采动和炮声等井下作业环境中不可避免的干扰等问题。针对在煤矿井下掘进作业中急需解决预测瓦斯聚积区域分布探测,指导定向定位抽放,以及对声发射信号的快速分析、及时预报的实际需要,近期研究采用阵列检波方式研究声发射点、面、体震源的定位、定量分析方法,并采用光纤系统把监测站的分析数据结果实时、快速地传输到地面处理站,地面计算机做实时高速信号处理,自动分析信号变化规律和震源三维空间位置分布、性质及运动形态,预测声发射源变化趋势和突出可能性,对紧急信号及时反应,实现快速应急预报。

5 回采工作面中瓦斯聚积区分布探测的槽波 CT 技术

由于前期巷道掘进和相邻采煤工作面回采,回采工作面中裂隙已经有一定程度的发育。由于回采工作面四周巷道围压作用形成自然封闭的聚瓦斯地质条件。由于回采工作面中原始瓦斯赋存分布、原位应力分布、裂隙发育和透气性等不均匀特性,导致回采工作面中逐渐析出瓦斯呈不均匀分布。并且在回采作业过程中逐步压缩聚集范围,构成强瓦斯应力聚集区^{[18][19]}。形成采动作用下瓦斯强力突出隐患,或者瓦斯从煤壁短时间大量涌出形成瓦斯爆炸的隐患。

为保障采煤作业安全,需要在采前探测清楚这些瓦斯聚集区段,并做定位预抽放处理,缓解瓦斯应力聚集的强度。煤层中弹性波传递的速度和衰减率对储瓦斯裂隙和周边应力封闭边界反应敏感,采用弹性波对工作面煤层做透视技术探测,形成工作面速度分布 CT 剖面图和衰减率分布 CT 剖面,综合地质和地应力因素分析和判断工作面内瓦斯聚积分布和动力凝聚状况。

在煤层的一侧激发弹性波,在另一侧会接收到多种纵波、横波成分,相当复杂。通过德国、英国、美国、苏联和我国等各国科学家的努力,发现通常直达纵波和横波的能量主要是从煤层顶底板传播的,由于煤层相对与顶底板速度减低、衰减率较大。但是存在一种横波成分始终沿煤层传播,取名为槽波(Seamwave 或 Channelwave),取义于水槽中传递的导波。这种波传播的速度较低,能量较集中,频率稳定,容易从复杂的时间域波列和频域波谱中分离。

同时发现它的频率对煤层厚度变化敏感,波速和衰减率对煤层应力分布反映明显,吸收对构造敏感。借用这些物性特点研究开发了工作面瓦斯地质条件的槽波探测技术。

1986年引进德国的SEAMEX-85槽波地震仪在阜新、唐山、大同、焦作等矿务区进行了6个工作面的实际探测,取得了实际成果。对100~160 m跨度工作面,可以把瓦斯聚积区圈闭在边界误差约5 m的范围内。1990年我国研制成功了DYSD-I型矿井多道遥测数字地震仪,也进行了大量探测工作。该技术的研究和开发曾多次获得煤炭科技进步奖,是煤炭工业行业重点推广项目。1997年该技术的成套设备还出口到印度。

在应用实践中我们发现,煤层顶底板相变起伏和顶板表面冲刷等地质变化因素对波速和能量也有影响,在对工作面探测的槽波速度CT剖面做瓦斯地质解释时存在这些地质因素带来的多解问题。针对这一问题,近几年对接受的多种弹性波进行分类研究,认识到主要能量在顶底板中传播的纵波、横波也对煤层顶底板相变起伏和顶板表面冲刷等地质变化因素有反映。因此采用多波种分离,分别处理,获得对工作面透射探测的纵波、槽波和横波的三种CT资料。通过相互间CT剖面比对分析来减少解释中的不确定地质因素影响。再结合巷道揭露的已知地质变化进行联合对比地质解释,消除地质变化带来的多因素影响,实现对工作面瓦斯聚积区的有效探测。另外新的研究还在努力简化仪器系统,降低施工难度、成本和作业时间,努力使该技术更适应矿井作业要求。

6 工作面中瓦斯聚积区分布探测的无线电CT技术

工作面中瓦斯聚积区域不但对弹性波有良好反应,电磁波场也有一定反应。通常电磁波在煤层中传播相对顶底地层具有相对低的波阻抗,及在同一煤层中的两条巷道间传递的电磁波,其主要能量在煤层中传播。煤层对电磁波传播的损耗也较大,要穿过100到250 m的煤层,又要尽可能高的频率,使得具有较强的辐射特性,尽可能少扩散特性,以便用射线理论做CT分析^{[13][14]}。经过三十多年研究,主要采用10 MHz到10 kHz范围的电磁波频段。地应力下封闭的瓦斯应力集中的地质体相对周边地层具有突出的低阻差异。通过高频电磁波对工作面做透射探测,获得描述工作面地质体中低阻场分布的CT剖面 and 相位差分布的CT剖面,结合周边地质构造分析,可以预测出瓦斯在回采工作面中的聚积区分布范围和强度状态。

矿井无线电波CT技术经过苏联、英国、美国、澳大利亚和我国等各国地球物理学家的长期研究,已成为普遍采用的回采工作面内煤层非连续地质构造探测技术,对瓦斯聚集地质条件的探测研究还较少。我国在这方面做了大量工作。最近在实际应用研究中发现,由于陷落柱等地质异常体和煤层含水性的不均匀分布等因素影响,该技术在瓦斯地质条件解释中也存在多解性问题,特别是在含水煤层中无法使用。在进一步深入研究中,把重点放在高、低频电磁波的联合探测和分析上。高频电磁波场对高阻地质体有较强的穿透能力,低频电磁波场对低阻地质体有较强的穿透能力。在煤层与围岩层叠覆形成的层状介质中,由于电性的差异,不同频段的电磁波在工作面透视传播过程中,对路径具有选择性。采用100~0 kHz范围内不同频点电磁波分别对工作面做透视探测,对各频点探测数据分别做CT处理,结合巷道揭露的地质信息做联合瓦斯地质解释,从而解决一种物理量探测的多解性问题。用这一探测方法在开滦矿务局钱家营煤矿进行了工业性实验,取得了初步成果。

7 瓦斯抽放中辅助定向钻进的测斜测向技术

目前消除瓦斯聚集诱发动火隐患的主要方法是瓦斯抽放。瓦斯抽放的工程形式主要可以分为隔层抽放、同层抽放、采空区抽放、采动区抽放和地面抽放等类型。抽放的工艺方法主要有等间距布孔的网度抽放和定向定位的目标区抽放。无论那种抽放工艺和方法,保证瓦斯抽放钻孔的轨迹在设计线路上,保证瓦斯抽放钻孔打到瓦斯聚集的目标区块,这是保障按预期目标实现瓦斯抽放的先决条件。因此在瓦斯抽放孔的钻进作业中测斜导向、自然伽玛等测井技术是非常重要的。

地磁场和重力场是地下空间定向的主要参考系。通过测量钻头作业方向在地磁平面的方位、与重力方向的夹角,可以计算钻进的空间方向。通过解决区域地磁校正、重力校正、环境干扰校正等处理,结合钻孔深度参数,获取稳定的钻头轨迹资料。另外通过自然伽玛检测,判别钻进是否在煤层中,距煤层顶底板的距离。煤矿井下的瓦斯抽放孔的测斜与地面钻孔的测斜不同,其主要技术难度不仅仅在于高精度的实现空间全方位测量钻孔轨迹,还需要解决易堵塞软煤层中钻孔和仰角钻孔测量的实际问题。

我国先后开发了无缆测斜系统、综合钻进参数测量系统。其采用航天导航测斜测向的磁通门和加速度计等传感元件,测量钻进方向与地磁方向和重力方向的三维夹角,结合深度测量描述钻进的三维轨迹,测量精度达到0.1度。并借助钻机动力,解决了对易堵塞软煤层钻孔和仰角钻孔做轨迹测量。目前已在煤炭生产一线单位应用多年,1992年获得煤炭科技进步奖。

在实际应用中发现,现在的无缆测斜技术虽然解决了仰角孔及易阻塞软煤层中钻孔的测斜、测向、测轨迹等问题,但是在使用过程中存在着要多次重复启拔钻杆的操作工艺繁琐问题,对提高钻进效率影响较大,因此进一步的研究主要是实现随钻测斜。随钻导向测斜要求实时提供孔向、孔斜、轨迹、钻具力矩及工具面向角等关键钻进参数,同时需要采用声波、电磁波等物理量实现实时数据传输。技术难点在于要求在每节2 m左右长度、直径为50 mm的中空钻杆中,安装测量装置,并在结构上能够承受对岩石、煤层、破碎地层钻进的机械冲击和水平钻进的强大转动扭矩。

8 新技术方法的研发动向

(1) 防治瓦斯灾害技术框架的重构

借助地球物理探测技术的进步,研究瓦斯灾害的地质条件预测的新方法框架,是瓦斯事故防治的技术方法的研究主流之一。首先,在采区布置前借用地面三维地震勘探资料对采区构造和煤层厚度分析的地质成果,进一步进行区域地质应力分析,结合煤系地层垂向瓦斯聚集模型的分析,确定静态瓦斯应力区;在瓦斯抽放阶段,通过对初速度、涌出量等瓦斯抽放过程参数的统计分析,结合地质构造分析结果推断瓦斯分段聚集条件,指导煤巷掘进作业的安全工艺设计;在工作面掘进过程中,对重要地段进行有重点的边探、边抽、边掘;在回采前,综合瓦斯抽放和巷道掘进过程中瓦斯地质条件的分析结果,探查工作面瓦斯聚集区,设计沿煤层补充抽放工艺,并结合回采推进过程中工作面应力演进过程模拟,预测瓦斯动态聚

集条件,设计回采过程中安全监测和采动抽放工艺。总之,通过地面、井下探测和地质分析,在抽放、采掘作业前预测瓦斯灾害地质条件,在地质体安全厚度庇护条件下及时采取安全措施,降低瓦斯应力聚集水平,消除瓦斯动力灾害和瓦斯超常涌出可能,以保证采煤作业安全。

通过研究建立瓦斯地质先行的防止瓦斯灾害的安全技术框架,技术关口前移,取代目前采用的抽放先行的技术框架;不仅仅针对瓦斯静态聚集的预测问题,而且解决瓦斯动态聚集的预测问题,推进采区瓦斯灾害防治的技术和工作方法的进步。

(2) 提高瓦斯聚积地质条件探测能力的新技术

在探测技术方面,为了提高预测与瓦斯聚集有关地质构造的距离范围、精度和方向性,我国也正在积极研发巷道超前预测的瞬变电磁场探测方法和 VSP 探测方法。瑞典的 Hamburg 公司以 VSP 技术为基础已经成功地开发了 TSP 技术用于隧道超前地质预报。解决好层状介质水平方向的弹性波偏移问题,该技术方法同样可用于煤系地层的超前地质预报^{[20][21][22]}。

美国的 Stolar Horizon 公司正在联合俄罗斯、加拿大和澳大利亚,积极开发矿井无人值守开采的关键技术。如实时预测地质构造和煤质变化,地质安全条件的综合预测预报,借助岩体的通讯技术等等。其目的是通过岩体通讯控制全自动采矿设备。可见,在现有采矿技术基础上,要实现无人值守开采作业地球物理技术是核心。计划在 2010 年逐步减少井下采掘作业人员,迅速向煤矿井下无人值守的作业方式过渡。毫无疑问,减少作业人是减少事故伤亡的有效办法。

地球物理探测技术用于瓦斯地质条件探查,是一个近几年发展速度较快的地球物理探测技术研究的分支之一。地球物理探测技术具有非接触、无损、超前、快速、简便、高效、低成本等其他技术无法比拟的突出技术优势,采用各种物理量或物理场开发解决瓦斯地质问题的新技术是具有广阔的技术发展空间。应注重和积极采用地球物理探测技术解决瓦斯类安全问题方面的技术创新和技术实用化研究,努力实现对掘进头突出危险地质体的超前 30 m 探查,对 300 m 以下跨度回采工作面的瓦斯聚集区分布准确探测和定向定位抽放等。通过促进超前、快速的防止瓦斯突出和爆炸技术开发,抑制煤矿瓦斯类事故发生的比例,保障煤矿安全生产和煤炭行业的集约化发展。

另外,值得注意的是防止瓦斯事故发生的物探技术还未进入煤矿安全生产作业规范和规程,其主要原因有:一是技术推广的程度不足使得纳入规范有困难,未纳入规程又造成生产单位应用的积极性不足;二是技术的成熟度不足,还难以满足生产一线在简便、快速、准确、高精度、低成本等方面的实际生产需要。因此,针对采用地球物理探测技术解决瓦斯地质条件探查的问题,进一步认识聚瓦斯地质条件的物性差异,研究快速、大范围、高精度的预测方法,这些仍然是地球物理工作者的使命。要让物探技术在防止煤矿瓦斯事故方面发挥应有的作用,还需要地球物理工作者与煤矿企业的共同努力,以及国家的大力支持。

参考文献

- 1 吴财芳,曾勇.瓦斯地质的主要研究内容及其发展方向分析[J].采矿技术,2003,3(2):98~100
- 2 康继武.褶皱构造控制煤层瓦斯的基本类型[J].煤田地质与勘探,1994,22(1):30~32
- 3 张建民.地质因素和煤体结构对煤与瓦斯突出的影响[J].煤矿安全,2004,35(5):43~45
- 4 张广洋等.煤层瓦斯运移的数学模型[J].重庆大学学报,1994,17(4):53~57
- 5 赵阳升等.煤层瓦斯流动的固-气数学模型及数值解法的研究[J].固体力学学报,1994,15(1):49

- 6 王宝兴等. 煤矿瓦斯强烈爆炸的试验研究 [J]. 消防科学与技术, 2004, 23 (6): 53 ~57
- 7 郑宏军等. 瓦斯涌出规律及综合防治措施 [J]. 河北煤炭, 2004, 5: 14 ~15
- 8 张许良等. 煤与瓦斯突出敏感地质指标研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31 (2): 7~10
- 9 吕绍林, 何继善, 李舟波. 瓦斯突出地球物理场的响应特征 [J]. 长春科技大学学报, 2000, 30 (1): 71 ~75
- 10 刘保县, 鲜学福, 徐龙君, 等. 地球物理场对煤吸附瓦斯特性的影响 [J]. 重庆大学学报, 2000, 23 (5): 78~81
- 11 杨志刚. 矿井物探研究应注意的几个问题 [J]. 煤炭科学技术, 1997, 25 (5): 48.
- 12 许江, 鲜学福. 煤层中瓦斯压力的理论计算方法 [J]. 重庆大学学报, 2000, 23 (增刊): 15~17
- 13 刘新荣, 鲜学福. 煤层瓦斯与煤层厚度及其变化关系的测试 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (8): 69~74
- 14 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地电场对煤中瓦斯渗流特性的影响 [J]. 重庆大学学报, 2000, 23 (增刊): 22~24
- 15 刘保县, 鲜学福, 王宏图, 等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验 [J]. 重庆大学学报, 2000, 23 (增刊): 41~43
- 16 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 受地应力、地温和地电效应影响的煤层瓦斯渗流方程 [J]. 重庆大学学报, 2000, 23 (增刊): 47~49
- 17 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 用电磁辐射法非接触预测煤与瓦斯突出 [J]. 煤矿安全, 2000, 2: 41 ~44
- 18 许新刚, 刘志新, 王大庆. 矿井电阻率成像技术的现状与展望 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19 (1): 52~55
- 19 刘咸卫, 曹运兴, 刘瑞, 等. 正断层两盘的瓦斯突出分布特征及其地质成因浅析 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (6): 571~575
- 20 庞贵智, 李福林. 矿井地质条件变化与采矿活动对瓦斯涌出的影响 [J]. 煤炭技术, 2003, 22 (3): 53 ~55
- 21 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 肖宽怀. 隧道地质超前预报研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (3): 460 ~464
- 22 王齐仁. 地下地质灾害地球物理探测研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19 (3): 497~502
- 23 何继善, 柳建新. 隧道超前探测方法技术与应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2004, 1 (4): 293~298

回线源瞬变电磁在灾害地质调查中的应用

郭文波^{①②} 宋建平^① 曹捷^② 李正宇^③

(^①西安交通大学电信学院 西安 710049;

^②西北有色地质勘查局物化探总队 西安 710068;

^③长安大学 西安 710054)

摘 要 工程与灾害地质调查往往要求解决精细构造探测问题。回线源瞬变电磁体积分效应小,等值作用范围较直流测深和频率测深窄,故横向和纵向分辨率高。应用瞬变电磁探测构造破碎带、煤田采空区取得了较好的效果。

关键词 回线源 瞬变电磁 分辨率 灾害地质

1 引言

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method 简称 TEM)属于时间域电磁勘探方法,是利用不接地回线或接地线源向地下发送一定波形的电磁脉冲,在一次脉冲电磁场关断的间歇期间,利用回线(探头)或接地电极观测地下目的体感应产生的二次涡流场随时间的衰减特性,对其进行分析解释,从而达到解决地质问题的目的^[1]。由于方法本身的特点及显著的应用效果,被广泛应用于资源勘探和工程勘察中,尤其是回线源瞬变电磁法,以其分辨率高、工效高(成本相对低)、对施工环境要求宽松等特点显示了强大的生命力,越来越受到广大地球物理工作者和工程地质专家的关注^{[2][3]}。

2 瞬变电磁探测

2.1 瞬变电磁测深的特点

与传统的直流电法相比,瞬变电磁具有以下特点^{[1][4]}:

(1) 装置轻便,工作效率高,尤其是大定源回线装置,可以用多台仪器在不同测线同时观测。效率高低与勘探成本成反比,故 TEM 是一种比较经济的物探方法。

(2) 勘探深度大。TEM 的勘探深度主要取决于两类因素,其一是测区的地电特征,如介质电阻率大小及其在纵向、水平方向的变化及目的物的形态规模及其与埋深的相对大小;其二是装置大小及仪器性能(包括仪器灵敏度、精度、抗干扰能力等)。在高阻地区,避免了传统直流电法接地困难、高阻屏蔽等影响,用较小的回线可达到较大的探测深度。

(3) TEM 具有较高的分辨能力。图 1 为水平三层介质 Q 型、H 型断面等值作用范围示意图。从图示直流电测深、频域电磁测深、近区场瞬变电磁测深的等值作用作用可以看出,近区瞬变电磁测深的等值作用范围最窄,直流电测深的等值作用范围最宽,频域电磁测深的等值作

用范围介于两者之间。可见，瞬变电磁的分辨能力是最高的。另外从图中还可看出，随着 μ 的减小和 ν 的增大，等值作用范围均变窄，尤其是瞬变电磁测深，说明该方法对高导层的分辨能力是最强的，因而特别适合于在高阻围岩地区寻找低阻目的体（如充水溶洞、断层破碎带、良导金属矿体等）。

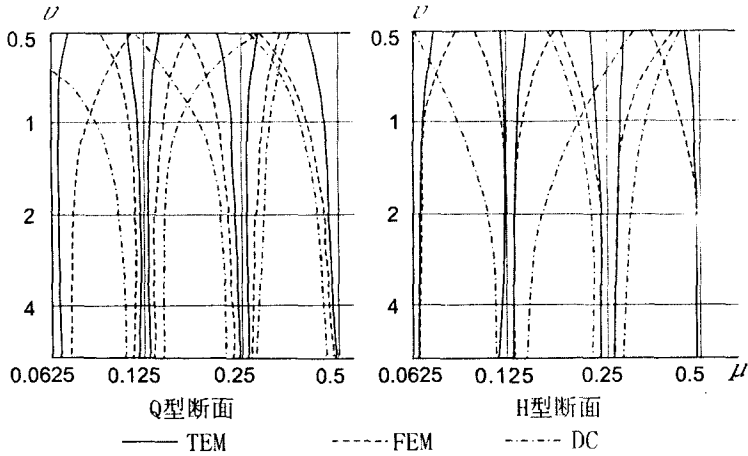


图1 三层断面 ρ_r 曲线等值作用范围示意图

(4) 体积效应小。使用同点装置，观测的信息主要为测点正下方的地质信息，受旁侧影响小，而且这种装置与探测地质对象可达到最佳耦合，异常幅值强、形态简单。

(5) 地形影响小。在高阻围岩地区，几乎不存在地形起伏引起的假异常，低阻围岩起伏地形引起的异常亦较容易识别。

(6) 高、低阻层的屏蔽作用小。这是因为 TEM 使用的是脉冲瞬变电磁场，可以穿透高阻层，对于直流电法无法探测到的高阻薄层下的目的体，TEM 能获得很好的异常反映。

2.2 瞬变电磁测深数据处理

(1) 对照原始野外记录，对观测数据逐点检查、编录。

(2) 资料的预处理。

①关断时间校正：理论发射波形为阶跃波，实际工作中由于发射框与大地之间存在耦合效应，致使发射电流关断时，不为阶跃波，而为一个有一定后沿时间的关断波形，故必须进行关断延时校正。

②曲线的圆滑：由于各类干扰的影响，观测晚期有效信号较弱，信噪比降低，往往使实测 V/I 曲线尾枝出现波动，为此必须对实测曲线进行圆滑。在满足探测深度的前提下，对曲线尾枝剧烈跳跃时窗数据进行剪辑，并对保留的有效时窗观测数据的波动进行趋势圆滑处理。

(3) 绘制成果图：对预处理后的观测数据进行计算得到 ρ_r ，绘制 ρ_r 拟断面图。

(4) 定量反演：采用一维瞬变电磁反演程序，实现地层电性剖面的反演。