文章编号: 1000-1964(2005) 04-0414-04

瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用

刘树才, 刘志新, 姜志海
(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 煤矿开采中最重要的地质任务是探测采区内小构造的分布及其含(导)水性, 采区三维地震勘探主要用于探测地质构造, 而电法勘探则用于含水构造的探测. 本文结合实例介绍了应用瞬变电磁法并结合三维地震进行煤矿采区水文勘探的基本原理、野外施工技术及资料处理解释方法. 实际应用表明, 瞬变电磁法与地震勘探的综合水文勘探降低了物探资料多解性问题, 大大提高了勘探精度, 可为煤矿防治水工作提供可靠的水文地质资料.

关键词: 瞬变电磁法; 三维地震勘探; 水文物探; 电法勘探; 防治水
中图分类号: P 631.3 文献标识码: A

Application of TEM in Hydrogeological Prospecting of Mining District

LIU Shu-cai, LIU Zhi-xin, JANG Zhi-hai
(School of Resource and Earth Science,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Exploration of small structures and their transmissivity is very important in coal mining geology. the 3D seismic method is mainly applied in detecting geological structures while the electrical method is mainly applied in detecting structures which are filled with water. In this paper according to some examples, the principle, the field procedure, the method of data processing and interpretation are introduced. The TEM combining with 3D seismic method is applied in hydrogeological prospecting of mining district. The result indicates that the combination of TEM and seismic method can solve, to some extent, the problem of multi-solution, improve the detecting precision, and provide reliable hydro-geophysical information for the prevention and control of water disaster in coal mines.

Key words: transient electromagnetic method; 3D seismic exploration; hydro-geophysical prospecting; electric method prospecting; prevention and control of water

在煤炭开采前查明整个采区的复杂地质构造及其水文地质情况(查清含水、涌水通道及富水区), 以便及时采取防治措施, 已成为大水矿区关注的重要问题.

近十年来, 我国各煤矿普遍应用高分辨率三维地震勘探进行采区小构造勘探, 在条件有利情况下可查明断距 5 m 的小断层, 但还无法对其含(导)水性进行定性或定量评价. 瞬变电磁法具有勘探深度大、抗干扰能力强、分辨力高、施工效率高等优点, 被广泛应用于矿产勘查及水文、工程勘察等领域. 近几年, 为充分发挥两者优势, 提高经济效益降低勘探成本, 在三维地震勘探施工的同时进行瞬变电磁的水文物探工作, 这样即提高了工作效率, 又避免了对地面农作物的二次破坏. 同时, 在资料处

收稿日期: 2004-10-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(40074030)
作者简介: 刘树才(1963-), 男, 山东省潍坊市人, 副教授, 工学硕士, 从事矿井地球物理及工程与环境地球物理理论与技术等方面的研究.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理解释的过程中, 瞬变电磁法与三维地震勘探资料相互结合又可提高资料解释的精度. 瞬变电磁法在野外工作技术设计、参数选择及资料处理解释等方面与通常的其它电磁勘探法相比具有新的特点.

1　TEM 基本工作原理

瞬变电磁法(简称 TEM) 通过在不接地回线中或接地电极间供以方波电流, 向地下间歇性地发送一次电磁场, 在一次电磁场的发射间歇, 用接受线圈观测由地下良导地质体感应产生的二次涡旋电磁场, 通过研究二次涡旋电磁场的时空分布特征, 来解决诸如寻找地下矿产、探测地质构造、划分地下富水区等地质问题.

煤田水文物探中常用的磁源瞬变电磁测深法原理可以用 "烟圈效应 "来解释. 由于电磁场在空气中传播的速度比在导电介质中传播的速度大得多, 当一次电流断开时, 一次磁场的剧烈变化首先传播到发射回线周围地表各点, 因此, 最初激发的感应电流局限于地表, 随着时间的推移, 地表的感应电流便逐渐向下、向外扩散, 其强度逐渐减弱, 分布趋于均匀. 研究结果表明, 任一时刻地下涡旋电流在地表产生的磁场可以等效为一个水平环状线电流的磁场. 在发射电流刚关断时, 该环状线电流紧挨发射回线, 与发射回线具有相同的形状. 随着时间推移, 该电流环向下、向外扩散, 并逐渐变形为圆电流环. 等效电流环就象从发射回线中 "吹 "出来的一系列 "烟圈 ", 因此, 人们将地下涡旋电流向下、向外扩散的过程形象地称为 "烟圈效应 ". 从 "烟圈效应 " 的观点看, 早期瞬变电磁场是由近地表的感应电流产生的, 反映浅部电性分布; 利用晚期瞬变电磁场随时间的变化规律, 可以探测大地电性的垂向变化[1-4].

瞬变电磁勘探对地下良导电介质具有较强的响应能力, 适用于进行煤层顶底板含(隔) 水层划分、煤层陷落柱探测、断层及裂隙发育带导(含) 水性评价等工作. 其具体特点为: 1) TEM 是在停止发射一次场的间歇期间观测纯二次场, 又称纯异常法, 可以突出地电体的异常响应; 2) 当 TEM 利用不接地回线通过电磁感应将电流送入地下时, 可以避免在电阻率法中常见的由电极接触条件变化而产生的不良影响; 3) TEM 法测深是通过改变时间延迟而不是改变装置进行的 "参数 "测深, 施工速度较快、效率高; 4) TEM 有穿透高阻覆盖的能力, 受地形起伏影响小, 与直流电法相比体积效应小, 对低阻体反映灵敏[5].

2　TEM 施工方法技术

2.1　装置形式

瞬变电磁法的测量装置由发射回线和接收回线两部分组成, 常用的地面测量装置有三种: 1) 同点回线装置, 根据发射线圈与接收线圈的相互位置不同, 又可分为重叠回线(图 1a) 和中心回线(图 1b) 两种装置形式装置; 2) 分离回线装置, 也称偶极装置, 发射回线和接收回线保持一定的距离, 两回线的尺寸可以相同, 也可以不同; 3) 框—回线装置又称大回线定源装置, 发射回线采用边长数百米的矩形回线, 在回线内外布置测线, 用小型线圈或探头沿测线观测[1].

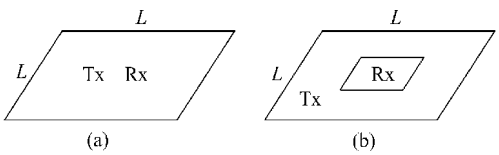

图 1　TEM 工作装置示意图

Fig. 1　Sketch map of TEM surveying system

中心回线装置用轻便的小型多匝接收回线置于发射回线中心观测, 该装置与探测对象间可达到最佳耦合, 得到的地电异常幅度大, 形态简单, 受旁侧影响小, 横向分辨率高, 是瞬变电磁法中最常采用的装置, 但发射回线边长较大时, 野外施工比较困难. 工作装置的选择应根据勘探目的、施工条件和装置特点综合考虑决定. 如果探测深度在几百米以内, 要求较高的分辨率, 同点回线装置是首选.

增大发射回线和接收回线边长, 将会增强信号强度, 并延长有效信号的持续时间, 从而有利于加大探测深度. 但二者的增大使野外工作难度增加, 同时增大了勘探体积效应, 降低了横向分辨率. 因此, 在保证预定勘探深度的前提下, 应尽量选择小的回线边长.

目前, 煤矿采区水文勘探中常用的瞬变电磁法装置主要是重叠回线装置、中心回线装置及大回线定源装置 3 种.

2.2　测网布置

理论上, 网度取决于拟采用装置形式对勘探分辨率的要求, 在同时进行三维地震勘探的测区, 还应兼顾三维地震勘探的 CDP 网格大小来确定测线的线距、点距及回线的边长. 对重叠回线和中心回线装置形式, 一般要求回线的四个边落在地震测线上, 以方便在野外确定测点和边框位置, 节省额外的测量工作. 为提高工作效率, 可采用滚动式测量技术. 如图 2 所示, 在测量 8—2 测点(其回线四边

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为 A1, B, C, D) 同时铺设下一测点对应回线的前边框 A_2, A_3, A_4, …, 如 8– 3 测点对应 A_2, 8– 4 测点对应 A5 依此类推. 在测量下一点时只需向前拖动回线的两侧边框 B, D.

针对不同的测区地形及地震测线布置, 此施工方法可灵活应用, 如对 B, D 边也可采用滚动方式布置.

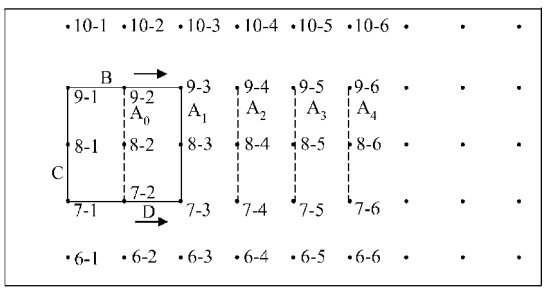

图 2 滚动式测量方法示意图

Fig. 2 Sketch map of rolling surveying method

3 TEM 法资料解释及应用实例分析

3.1 TEM 资料解释方法

瞬变电磁法资料解释以测区物性差异为前提, 并结合地质及其他物探成果. 资料的定性分析和解释是资料解释中最重要和最基本的部分, 定量解释在定性解释的基础上进行. 采区瞬变电磁测深资料的解释步骤为: 1) 调查测区的已有地质物探资料, 确定测区地层、目的层的地球物理特性. 2) 首先根据实测电位衰减时间响应曲线换算成视电阻率的时间曲线, 由于采区水文勘探要求目的层较深, 一般可采用晚期场定义的视电阻率公式计算, 若考虑浅部目标, 则应采用全区视电阻率公式计算. 3) 对视电阻率进行反演解释(时深转换), 将 $\rho_T(t)$ 曲线反演转换成 $\rho_T(h)$ 曲线. 4) 制作各种图件, 如视电阻率断面图、视电阻率平面图等; 并与地震勘探结果进行层位对比, 根据电性断面与地震剖面的相关性, 确定目标层在视电阻率断面图中的位置. 5) 为了尽可能消除地层起伏对视电阻率值的影响, 根据地震勘探成果和 TEM 断面图绘制沿煤层或目标层的不等深度横向切片平面图. 6) 根据断面图和平面图划分不同层位的视电阻率异常区. 7) 结合其它水文地质资料, 对各异常区进行富水性分析评价, 得出地质结论.

3.2 测区地球物理特征及观测参数设定

山东某煤矿四采区的面积范围是, 其主要地层自上而下分别为: 第四系冲积层、下二叠统山西组; 上石炭统太原组灰岩; 中石炭统本溪组、基底奥陶系灰岩. 主要地层电性地质特征可概括如下: 1) 第四系冲积层: 一般厚 140 m, 厚度变化有向井田中东部变厚之趋势. 含水层与隔水层相互交错, 岩性变化较复杂, 电阻率变化较大, 平均为 12 Ω· m; 2) 下二叠统山西组, 本组可分为上下两段, 上段由 2 煤顶界面至山西组顶界, 为碎屑岩段, 不含煤, 下段为重要含煤段, 含主采煤层 3 煤, 平均厚度为 7.94 m; 3) 上石炭统太原组, 上段为灰岩—碎屑段, 含厚度较大且稳定分布的三灰和不稳定分布的二灰, 除三灰具有稳定且较高的电阻率外, 其余各层电阻率基本稳定且变化较小, 为 12～15 Ω· m, 其下段为主要的含煤层段, 含稳定可采的 16上 层煤、17 层煤和局部可采的 18上 层煤, 煤层电阻率在 120～250 Ω· m 之间, 其余各层砂、泥岩电阻率变化范围在 13～30 Ω· m 之间. 主要可采煤层 16上 煤的埋深小于 500 m, 走向大致为南北方向, 煤层倾角较小.

该测区内地质勘探的主要任务为: 利用三维地震勘探方法查明 16上 煤底板 30～50 m 范围内的地质构造异常, 并利用 TEM 法对其含水性进行分析和评价. 根据已知地质资料和地质任务, 结合三维地震勘探观测系统为线距 40 m 的情况, TEM 测线方向确定为东西方向并与地震测线重合, 线距为 80 m, 点距为 40m. TEM 法在测量的过程中采用中心回线装置形式, 线框边长设为 160 m × 160 m. 采用澳大利亚产 SIROTEM —Ⅲ型瞬变电法仪器, 电流 7 A, 叠加次数 512 次.

3.3 TEM 与三维地震资料的联合解释

图 3 为测区 33 线对应的反演视电阻率断面图, 从图中可以看出电性分层较为明显(图中虚线为地震解释的第四系底界面), 第四系基底埋深由西向东逐渐增加, 平均厚度为 140 m. 煤层所对应电性层的深度东西两边相差较大, 西部埋深为 240 m 左右, 东部煤层埋深约为 450 m, 但其埋深由西向东连续变化. 从图上可知, 主要电性分界面的特征明显、规律性强, 利用瞬变电磁测深资料反演解释的第四系底界和煤层底板深度与三维地震勘探基本一致, 二者得到了相互印证. 煤层底板附近有



图 3 33 测线反演电阻率断面图

Fig. 3 Isolines of inversion resistivity of line 33

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三个局部异常反映,并且其视电阻率呈低阻反映. 从地震资料解释上可知,该三个局部异常为构造断层,从 TEM 反演视电阻率断层图上可知该断层部分含水,但其连通性较差,三个异常体之间没有水力联系.

将相同深度的视电阻率值标在对应的测点上来构制平面图,主要用于反映某一深度岩层横向电性变化特征. 但当测区内煤层附近地层呈非水平状态时,等值线平面图就不能很好地反映煤层底板附近地层电性的连续变化. 因此,结合地震勘探资料解释的煤层底板等高线,将测区内煤层底板深度所对应的反演视电阻率值标在对应的测点上,并绘制成平面图,即为综合勘探成果平面图(图 4),该图反映了煤层底板对应深度的构造异常及其视电阻率值的相对大小,突出反映了二维或三维地电异常体的响应特征. 显然, TEM 与三维地震勘探相结合,可减少物探资料的多解性,提高水文物探的精度和应用效果.



图 4　33 测线附近水文物探综合成果平面图

Fig. 4　Plane diagram of composite result of Hydro-geophysical prospecting near line 33

该勘探成果为该煤矿四采区合理布置巷道和编制采区防治水预案提供了科学依据,为以后煤炭资源的安全回采提供了可靠的地质资料.

4　结　论

在合适的勘探深度下,利用瞬变电磁法对良导体反映能力较强的特点,应用瞬变电磁法对断层的富水性、局部岩溶发育带等水文地质异常进行探测和评价,结合地震勘探成果,进行联合解释,可提高解释成果的精度和可靠度,具有明显的经济效益和社会效益. 目前,该项工作还有以下几个方面需进一步深入研究: 1) 矿区人文设施干扰的压制方法与技术; 2) TEM 与地震资料的定量化联合反演解释软件.

参考文献:

[1] 赵全福. 中国煤矿防治水技术经验汇编[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.

[2] 王永红, 沈　文. 中国煤矿水害预防及治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.

[3] 蒋邦远. 瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[4] 李　貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.

[5] 静恩杰, 李志聃. 瞬变电磁法野外工作方法[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(3): 88-91.
Jing E J, Li Z D. The field sounding method of transient electromagnetic method[J]. Chinese Coal Geology, 1995, 7(3): 88-91.

[6] 闫　述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 275-284.
Yan S, Chen M S, Fu J M. Direct time-domain numerical analysis of transient electromagnetic fields[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 275-284.

[7] 马培智. 查找垂直导水通道的水文地质试验方法[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 27(2): 39-42.
Ma P Z. Hydrogeological test method used to find the vertical conductor[J]. Coal Geology and Exploration, 1996, 27(2): 39-42.

[8] 李　貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35-38.
Li X, Guo W B, Li Y M. Application TEM to exploration of water gushing channel way in coal field[J]. Journal of XI'AN Engineering University, 2000, 22(3): 35-38.

[9] 邢相荣, 卜昌森. 综合物探探测煤矿水文地质条件[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(5): 4-7.
Xing X R, Pu C S. Mine Hydrogeologic conditions prospected by comprehensive geophysical exploration[J]. Coal Geology and Exploration, 1997, 25(5): 4-7.

[10] 白登海, Maxwell A Meju, 卢　健, 等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697-704.
Bai D H, Maxwell A M, Lu J, et al. Numerical calculation of all-time Apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 697-704.

(责任编辑　李成俊)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net