瞬变电磁法在矿井水文地质勘探中的应用

孙银行[1]，朱　鲁[2]，盖利亚[1]
(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心，河北 保定　071051；
2. 山东科技大学地质科学与工程学院，山东 青岛　266510)

摘要：在煤田开采过程中，矿井水害一直威胁着煤矿的开发和安全。要减少和杜绝水害关键在于找到水源，瞬变电磁法是目前寻找水源的最好方法之一。本文阐述了瞬变电磁法的发展概况、原理方法、特点及应用领域。最后通过应用实例，介绍瞬变电磁法在矿井水文地质勘探中的应用效果。

关键词：瞬变电磁法；视电阻率；水文地质
中图分类号：P631.3^{+}25　　**文献标识码**：A

Application of transient electromagnetic method to the exploration of hydrogeology in coal mine

Sun Yinhang[1], Zhu Lu[2], Gai Liya[1]
(1. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding* 071051, *China*;
2. *Shandong University of Science and Technology, College of Geological Science & Engineering, Qingdao* 266510, *China*)

Abstract: The damage from the water in mine affects the exploitation of coal mine and the safety. The key way to reduce the damage from the water and put an end to the damage is to find the source of the water. Transient electromagnetic method is currently one of the best means to find the water. The general development, the principle, the characteristics and the application scopes of transient electromagnetic method are introduced. Through the practice example the application effect of transient electromagnetic method in hydrogeological exploitation is introduced.

Key words: transient electromagnetic method; apparent resistivity; hydrogeology

0　引言

煤田开采过程中坑道涌水严重威胁着矿山财产和人身安全，煤田水文地质调查是煤田地质勘探工作中的一项重要任务[1]。据不完全统计，中国统配煤矿的100多个矿务局、600余个生产矿井中，受到水害威胁的有225处。自1955年到1990年底，发生各类矿井突水灾害821次，造成淹井227次，直接经济损失达37亿元，少生产煤炭1.2亿吨，煤矿水害造成人身伤亡1380人[2]。由此可见，矿井水害是煤矿的致命灾害，严重威胁着煤矿的安全生产，给国家和人民造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此，查明矿区复杂的地质构造尤其是水文地质条件，以便及时采取防治措施，防患于未然，保证安全采煤已成为大水矿区亟待解决的首要问题。

目前，应用于水文地质工作的物探方法较多，主要有电测深、可控源音频大地电磁法、EH-4、瞬变电磁法等。电测深等传统电法受地形影响及体积勘探效应的限制较大；可控源音频大地电磁法资料处理复杂，EH-4等其它电磁法干扰影响较大。瞬变电磁法（TEM）避开了上述缺点，具有不接地，施工方便、测地工作简单、工作效率高及地质效果好等一系列优点，是近年来国内外发展较快、地质效果较好的一种电探方法。该方法在煤田水害调查、地下水调查等方面的研究，国内外已取得了令人瞩目的成果[3,4]，并在矿井水文地质勘探中也将发挥更大的作用。

1　方法研究概述

1.1　发展概况

瞬变电磁法（Transient Electromagnetic Methods）或称时间域电磁法（Time Domain Electromagnetic

收稿日期：2008-07-29；**修订日期**：2008-11-07
作者简介：孙银行（1982-），男（汉族），安徽宿州人，硕士.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Methods)，简称为 TEM 或 EDEM[5]。上世纪 50 年代，苏联基本建立了瞬变电磁法解释理论和野外施工技术方法，50～60 年代成功的完成瞬变电磁法的一维正反演。80 年代以来，欧美各国继续在瞬变电磁法的二、三维正演模拟技术方面做了大量的计算和研究工作，但二、三维问题的正、反演仍然不十分成熟。近年来，瞬变电磁法仪器也由早期生产的单一方法使用的电磁仪器趋向于集成化、各种多功能电测系统，如加拿大凤凰公司和美国 Zonge 公司的产品已经广泛的占领了国际和我国市场。

国内瞬变电磁法研究自上世纪 80 年代初开始，原长春地质学院、地质矿产部物化探研究所、中南大学等单位在方法理论、仪器及野外试验方面做了一定的工作。目前已建立了比较完整的一维正、反演及方法技术理论，并自行研制了一些仪器，如物化探研究所研制的 WDG-2 瞬变电磁系统及中南工业大学研制的 SD-2 瞬变电磁仪。近年来，吉林大学成功的研制了 ATEM-Ⅲ瞬变电磁仪，并于 2003 年成功研制了该瞬变电磁仪的软件，在矿产普查、大型矿山潜力资源探查、地下水勘察、城市工程勘察和地下活断层调查、矿井透水预测等领域开展了示范性应用研究和探索。

1.2 基本原理

瞬变电磁法是一种利用电磁感应原理预测地下矿产的地球物理方法。是一种时间域的电磁测深法，它利用接地电极或不接地回线建立起地下的一次脉冲磁场，在一次磁场间歇期间接收感应的二次电场和磁场。

瞬变电磁场的物理过程可用电路理论解释，其发射、矿体和接收分别由三个线圈模拟（见图 1），其中 M_{01} 表示线圈 I_0 与线圈 I_1 之间的互感，R 和 L 表示模拟矿体线圈的阻抗和感抗。假设发射线圈中有电流强度为 I_0（t）的方波电流 u 输入，根据电磁感应定律，则矿体线圈内产生的感应电流为：

$$I_1(t) = \frac{M_{01} I_0}{L} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0 \qquad (1)$$

其中 $\tau = L/R$ 为矿体线圈的时间常数。由式（1）看出，矿体线圈内的感应电流随时间按指数规律衰减。在 $t = 0$ 时刻，即为衰减初期，矿体内感应电流强度为：

$$I_1(0) = \frac{M_{01} I_0}{L} \qquad (2)$$

显而易见，此时的感应电流仅与一次磁场穿过矿体线圈的磁通量（M_{01} I_0）以及矿体的形状和尺寸（L）有关，而与矿体的电阻率（I/R）无关。矿

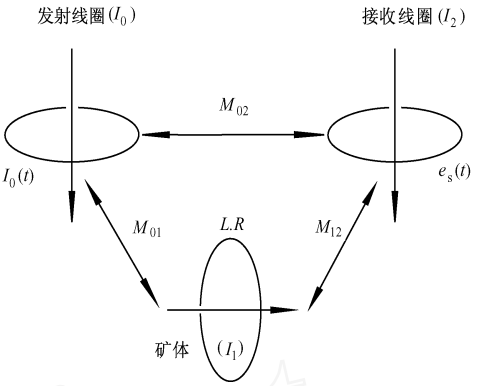

图 1 用电路理论表示的瞬变电磁法测量系统

体内的感应电流将在接收线圈中产生二次磁场，线圈输出电动势与二次磁场随时间的变化成正比关系，其表达式为：

$$e_s(t) = M_{12} \frac{\partial I_1(t)}{\partial t} = I_0 \frac{M_{01} M_{12}}{L} \left[\delta(t) - \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \right] \quad t \geq 0 \qquad (3)$$

式中：δ（t）为单位脉冲函数。

分析式（3）可知，对于导电性差的矿体，其时间常数 τ 值较小，二次场初始值较大，但衰减速度较快；反之，导电性良好矿体，时间常数 τ 值较大，尽管二次场初始值小，但衰减速度慢。瞬变电磁场的这一物理特性构成了利用瞬变电磁法寻找地下矿体的基本原理。

与频率测深一样，瞬变场的激发方式也有接地式和感应式两种方式，工作装置基本上与频率测深法相同，不同的是向地下输入的不是谐变电流而是阶跃电流而已。但本方法不仅可以在远区测量，还可以在近区测量。近区测量可以避开旁侧影响，提高对地层的分辨能力，因此是一种有效的工作方法[6]。

1.3 方法特点

瞬变电磁法的最大特点在于它将一次磁场与二次磁场分离，观测纯二次场，这是瞬变电磁法有别于频率域电磁法的根本之处。这种方法有如下几个优点：

(1) 自动消除了 FEM 中的主要噪声源——装置耦合噪声，提高了探测精度。

(2) 装置形式灵活多样，可随不同工程任务的要求和施工场地的条件来选择合适的装置。

(3) 对于受到导电围岩及导电覆盖层等地质噪声干扰的“矿异常”的区分能力优于 FEM。在高阻围岩条件下，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也比较容易识别。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4) 在 TEM 测量中，对于线框铺设的点位、方位及形状等的要求相对于 FEM 可以放宽，测地工作简单，工效高。

(5) 由于采用不接地回线，不存在接地电阻问题，在基岩出露区、冻土带、沙漠、水泥路面、河湖海水面上均可进行测量。

(6) 信息丰富，便于资料的解释。在剖面测量中，由于采集不同时间段的数据，通过数据处理可以得到同一点的测深资料，从而在剖面测量中完成了相应区域的测深测量。

(7) 可通过选择不同的时间窗口进行观测，有效地压制地质噪声，可获得不同勘探深度。

(8) TEM 的应用领域相对更加广泛。瞬变电磁法可以解决的地质问题有：能源、矿产勘查、水文、工程、环境地质调查、考古探测等。

2 应用实例

2.1 测区概况

勘测矿井属于华北型石炭二叠纪煤田，区内地势平坦。井田揭露的地层自上而下依次为第四系、第三系、二叠系、石炭系、奥陶系。第四系主要为浅黄、褐黄色松散的粘土夹砂层。第三系以粘土为主，上部夹砂层数层，下部夹钙质粘土等。二叠系为本井田含煤地层之一，主要由泥岩、砂岩及煤层组成。石炭系主要由砂岩、泥岩、灰岩及煤层组成。奥陶系以石灰岩、泥灰岩、白云质灰岩为主。根据地震勘探资料，井田发现断层 40 条，其中正断层 37 条，逆断层 3 条，落差 ≥20m 的 14 条，20m 以下的 26 条。

井田含煤地层为太原组和山西组，平均总厚度 260.85m。其中山西组含煤 1～4 层，均为不稳定煤层，4 煤局部可采。太原组总厚度 163.23m，共含煤 9 层，平均总厚度 8.15m，含煤系数 5 %，其中可采煤层 4 层（7、10、11、13 煤层），平均总厚度 6.49m，可采含煤系数 4 %。井田内揭露的隔水层很多，主要的隔水层组有两个，即上第三系隔水层组和下伏隔水层组。

井田含煤地层中隔水层较厚，含水层较薄，而且石灰岩含水层中的岩溶裂隙发育极不均匀，向煤田深部有减弱的趋势，加上井田内构造相对简单，因而通过钻孔直接揭露段富水点的概率极低。钻孔穿过断层带时也未发现有冲洗液漏失或明显消耗。这说明井田内断层带本身的含水性较弱，导水性也较差。然而，井田所在的煤田范围内奥灰具有明显的垂直分带现象，在煤田浅部，岩溶裂隙发育，富水性较强；随着奥灰埋藏深度增大，富水性变弱；但同时奥灰富水性也具有明显的不均一性，深部也存在一定的富水区和较强径流带。整个煤田范围内奥灰富水性均较强，又有较大的静水压力，严重威胁着下组煤（11、13 煤）的开采。由于在建井初期，井底车场计划放在 - 410m 左右水平，查明井底车场及首采区含水层、含水构造的富水性及富水区域是本文研究的重点。

本区新生界地层由浅至深视电阻率逐渐降低，其下部视电阻率较低，石炭、二叠系地层电阻率中等，视电阻率呈逐渐增高的趋势，奥陶系地层以厚层灰岩为主，其电性为高阻反映。纵向上地层的电性反映呈 HA 型。第三、四系视电阻率 10～40Ω·m，二叠系 20～60Ω·m，石炭系 30～110Ω·m，奥陶系一般大于 70Ω·m。

区内含煤地层电阻率差异相对较小，煤田水文地质勘探主要依据是，含水使地层电阻率降低，通过寻找相对低阻异常确定含煤地层富水分布情况。

2.2 应用研究

本次瞬变电磁勘探工作采用加拿大生产的 PROTEM 67D 瞬变电磁勘探系统。瞬变电磁勘探有多种工作装置[7]，结合仪器特点及本次勘探任务要求，采用大定源回线工作装置。该方法是将地面大回线作为发射回线，在回线一定范围内布设接收回线进行观测。它具有勘探深度大、施工效率高、施工受建筑物影响小、划分异常详细等特点。工作中通过试验选取了合适的工作参数：发射框 880m × 880m，频率 2.5Hz，增益 25～26，电流 18.0A，积分时间不小于 60s。具体的测网布置为：井底车场及首采面采用 40 ×20m 网度，布置测线 21 条，线距 40m，点距 20m；井底车场南部采用 80 ×20m 网度，布置测线 2 条，线距 80m，点距 20m；其他区域采用 80 ×40m 网度，布置测线 12 条，线距 80m，点距 40m。测区工作布置图和工作量分别见图 2 和表 1。

完成工作量统计　　表 1

	测线	坐标点	质量检查点	试验点	总工作量
实际完成工作量	25 条	1747 个	130 个（7.3 %）	20 个	1897 个

瞬变电磁法观测数据是各测点各个时窗（测道）的瞬变感应电压，需换算成视电阻率、视深度等参数。视电阻率计算公式为：

$$\rho_t = \frac{u_0}{4\pi t}\left(\frac{2\,u_0\,mq}{5\,tV(t)}\right)^{2/3} \qquad (4)$$

其中，t 为时窗时间，m 为发射磁矩，q 为接收线圈的有效面积，$V(t)$ 是感应电压。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

视纵向电导 S_τ 和视深度 h_τ 的计算表达式为：

$$S_\tau = \frac{16\pi^{1/3}}{(3Aq)^{1/3}\,u_0^{4/3}} \cdot \frac{(V(t)/I)^{5/3}}{(d(V(t)/I)/dt)^{4/3}} \quad (5)$$

$$h_\tau = \left(\frac{3Aq}{16\pi(V(t)/I)\,S_\tau}\right)^{1/4} - \frac{t}{u_0 S_\tau} \quad (6)$$

其中，$V(t)/I$ 是归一化感应电压，A 为发射回线面积，$d(V(t)/I)/dt$ 是归一化感应电压对时间的导数。

数据处理首先采用美国 INTERPEX 公司的 TEMIX XL V4.0 软件进行处理。依次进行原始数据整理，数据格式转换，绘制初始多测道断面图，剔除畸变数据，滤波、绘制多测道断面图，反演、绘制视电阻率断面图、等深视电阻率切片图和电阻率一次和二次变化率图。然后结合已知地质资料，在视电阻率断面图和电阻率一次、二次变化率图的基础上制作富水性图。在富水区的划分上，采取以下步骤进行划分：

(1) 对在断面图上有异常反应的区域在平面位置上进行圈定和组合，初步确定异常区的范围；

(2) 断面图与一次变化率和二次变化率水平切片图对比分析，进一步确定异常区的分布形态，并与地质成果作对应分析，分析富水异常区的分布规律；

(3) 通过对全区地质资料及绘制的各种图件和参数进行综合分析，绘制各层位的富水区分布图。

低阻是一个相对的概念，在富水区的划分上也应遵循相对的原则。因此，在富水区的划分上要考虑其相邻点的反映情况。本文主要以深度为 - 400m、- 410m、- 420m 的富水区分布图为例研究井底车场的布置和水平大巷的富水情况（如图 3、4、5）。从上向下依次为 - 400m、- 410m、- 420m 的富水区分布图。

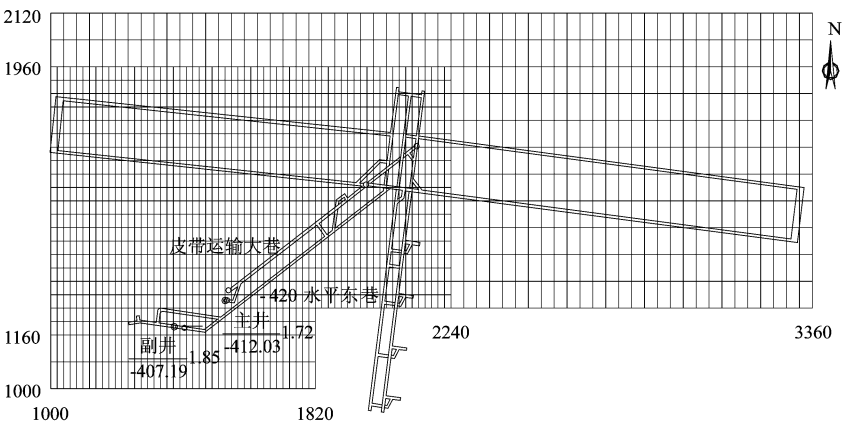

图 2　测区工作布置

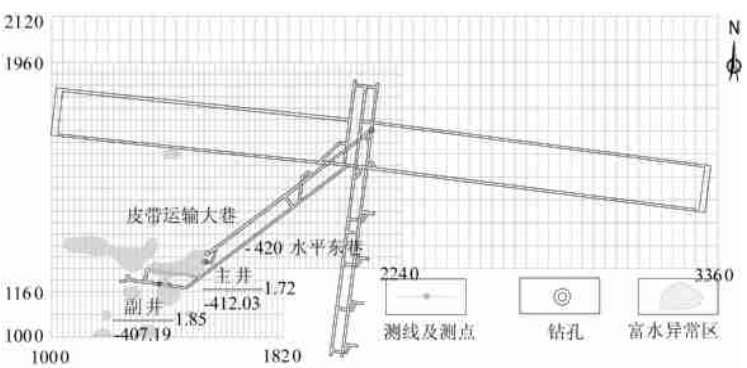

图 3　矿井瞬变电磁勘探 - 400m 富水区分布

从 - 400m～ - 420m 的富水区分布图可以看出，研究区的南部和北部都为不富水区，研究区的东部富水性较弱，只在西部和西南部有富水性较强的区域，而且主要集中在主、副井周围的区域。研究区地层整体上浅部地层的富水性大于深部地层的富水性，井底车场附近富水性区域在 - 400m 和 - 410m 水平分布范围比较大，在 - 420m 逐渐变小。主井基本上都在富水区范围内，周围富水性更好。副井的周围的富水性从 - 400m 向 - 420m 有逐渐减弱的趋势，相比主井来说富水性较差，但在富水区边

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

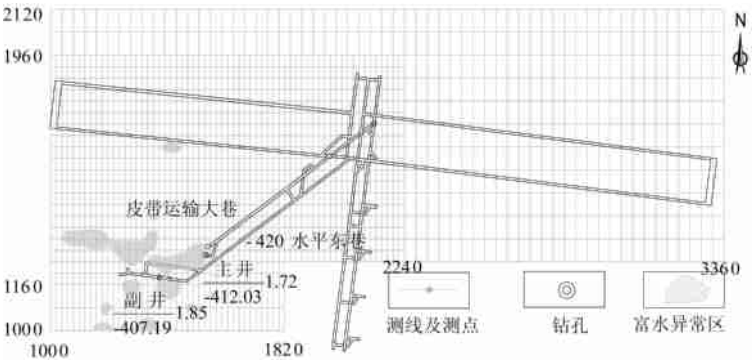

图 4　矿井瞬变电磁勘探 - 410m 富水区分布

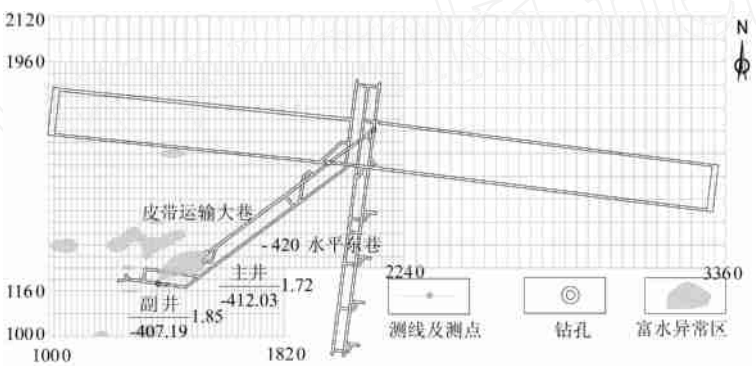

图 5　矿井瞬变电磁勘探 - 420m 富水区分布

缘，要重视。从总体上看从 - 400m 向 - 420m 富水性有减弱的趋势，对井底车场的布置和水平大巷的开拓有利。

3　结论

瞬变电磁法探测深度相对较大，施工方便、工作效率高及地质效果好，能够适应目前矿井水文地质勘探工作要求。上述结果表明，区内电阻率分布与实际地层具有较好的对应关系，说明其能够反映出地下电性分布情况。所以根据瞬变电磁法资料和相关地质资料能够推断出对应深度富水情况，满足矿井水文地质工作需要，指导矿井的建设和开采，保证矿井的安全生产。

但是我们也应看到，瞬变电磁法在矿井水文地质勘探中的应用还处于一个初期阶段。要实现瞬变电磁法在这个领域的成熟应用，还需要很长的一段过程。这就需要我们对瞬变电磁法的理论和资料处理进行更深入的研究和探索，从而更好的为矿井水文地质勘探工作服务。

参　考　文　献

[1] 黄力军，陆桂福，刘瑞德. 电性源瞬变电磁法在煤田水文地质调查中的应用 [J]. 工程地球物理学报，2004，1 (2)：174～177.

[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] 马瑞花，龚惠民. TEM 法在寻找煤矿突水巷道中的应用 [J]. 中国煤田地质，2003，15 (3)：49～50.

[4] 兰险，王卫江. 电磁法在新疆干旱区找水中的应用及效果 [J]. 新疆地质，2004，22 (3)：271～274.

[5] 张保祥，刘春华，李勇. 应用瞬变电磁法探测堤坝隐患 [J]. 海河水利，1997，(5)：27～29.

[6] 雷苑. 工程与环境物探教程 [M]. 北京：地质出版社，2006，249～288.

[7] 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.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net