

梁帅, 曾新福. 瞬变电磁法在煤矿采空区及富水性探测中的应用[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 102–106. [LIANG Shuai, ZENG Xinfu. Application of Transient Electromagnetic Method in Detection of Goaf and Water-rich in Coal Mine [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 102–106]

瞬变电磁法在煤矿采空区及富水性探测中的应用

梁 帅, 曾新福

(江西省地震局, 南昌 330039)

摘要: 瞬变电磁法作为地球物理勘查的重要手段之一, 利用对电阻的异常灵敏反应, 将采集到的数据分析处理、绘制出视电阻率测深剖面、视电阻率解释顺层切片, 可直观地对煤系地层的采空区展布、含水层及其富水性、断层的富、导水性进行评价, 可有效避免矿井开采过程中带来的地质危害及资源浪费。

关键词: 瞬变电磁法; 视电阻率; 采空区

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0102-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.14

Application of Transient Electromagnetic Method in Detection of Goaf and Water-rich in Coal Mine

LIANG Shuai, ZENG Xinfu

(Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330039, China)

Abstract: As one of the important methods of geophysical exploration, transient electromagnetic method uses the abnormally sensitive response to resistance, analyzes and processes the collected data, draws the apparent resistivity sounding profile, and interprets the apparent resistivity slices. It can intuitively evaluate the distribution of the goaf, aquifers and its water richness, and the fault richness and water conductivity of coal-measure strata, which can effectively avoid geological hazards and resource waste in the process of mining.

Keywords: Transient electromagnetic method; Apparent resistivity; Goaf;

0 引言

和布克赛尔蒙古自治县沙吉海煤矿生产规模小、回采率低, 资源浪费严重, 县矿管局在加强管理的同时, 着重考虑煤炭资源的合理开发, 由

于对矿区十三号井田地下资源开采现状、地质灾害发育等情况不是十分明了, 急需用瞬变电磁法这种物探手段, 圈定老窑区开采情况及其赋水性, 为矿井的安全开采提供保证。

PERTEM57 瞬变电磁仪最大勘探深度 500 m, 具有三分量同时观测、关断时间短信息量大、分

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 开放基金河源—邵武断裂带(寻乌—瑞金段)第四纪活动特征研究项目(SDGD202020); 江西省地震局科技管理和学科组工作经费(20210206)联合资助。

作者简介: 梁帅(1984-), 男, 工程师, 主要从事工程地震学相关工作。

E-mail: 48416937@qq.com

辨率和信噪比高、观测装置灵活等特点,在以往地质异常体探测中取得了良好成果。通过观测完整的二次场信息后,对二次场数据进行归一化处理和极性校正,剔除畸变数据后,将二次场电位值换算成对应的视电阻率值,再运用时深转换模块计算出视电阻率对应的深度值。同时结合深度校正系数,反演、绘制视电阻率断面图和平面切片图,最后根据已有地质资料对异常作出推断和解释。

1 瞬变电磁法勘探原理

瞬变电磁法也称时间域电磁法(Time domain electromagnetic methods),简称TEM,它是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法,即电磁感应定律^[1]。

多数仪器使用回线场源阶跃脉冲激发的瞬变电磁场进行测量,在导电率为 σ 、导磁率为 μ_0 的均匀各向同性大地表面敷设面积为 S 的矩形发射回线,在回线中供以 $I(t)=\begin{cases} I & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases}$ 的阶跃脉冲电流。在电流断开前,发射电流在回线周围的大地和空间中建立起一个稳定的磁场。

在 $t=0$ 时刻,将电流突然断开,由该电流产生的磁场也立即消失。一次场的这一剧烈变化通过空气和地下导电介质传至回线周围的大地中,并在大地中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间的磁场不会立即消失^[2]。由于介质的欧姆损耗,这一感应电流将迅速衰减,由它产生的磁场也随之迅速衰减,这种迅速衰减的磁场又在其周围的地下介质中感应出新的强度更弱的涡流。这一过程继续下去,直至大地的欧姆损耗将磁场能量消耗完毕为止。这便是大地中的瞬变电磁过程,伴随这一过程存在的电磁场便是大地的瞬变电磁场。

在发射电流刚关断时,该环状线电流接近发射回线,与发射回线具有相同的形状。随着时间的推移,该电流环向下、向外扩散,形成“烟圈效应”。“烟圈”的半径 r 、深度 d 的表达式分别为:

$$r=\sqrt{8c_2 \cdot t/(\sigma\mu_0) + a^2} \quad (1)$$

$$d=4\sqrt{t/\pi\sigma\mu_0} \quad (2)$$

式中 a 为发射线圈半径, $c_2=\frac{8}{\pi}-2=0.546479$, π_0 为空气中的导磁率, σ 为地层的电导率。

当发射线圈半径相对于“烟圈”半径很小时,

可得 $\tan\theta=\frac{d}{r}\approx 1.07$, $\theta=47^\circ$,故“烟圈”将 47° 倾斜锥面扩散,其向下传播速度为:

$$v=\frac{\partial d}{\partial t}=\frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (3)$$

衰减过程早期的电磁场相当于频率域中的高频成分,衰减快,趋肤深度小;而晚期成分则相当于频率域中的低频成分,衰减慢,趋肤深度大,通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律,可得到不同深度的地电特征。同时,依据瞬变电磁法对低阻反应灵敏特征,可查明含水地质如岩溶洞穴与通道、煤矿采空区、深部不规则水体等。

2 矿区地质概况

2.1 矿区构造

矿区内西山窑组与头屯河组含煤地层为库伦铁布克背斜南翼组成部分,背斜轴在平面上呈波状弯曲,由西往东走向为NEE-NE,是与陶和向斜的同期构造,产状北部稍缓,深部略陡,造成煤层倾角较陡。井田东北角存在二条互相交汇的北东走向的正断层构造,断层落差小,并向北东延伸出井田外,除对东北角煤层有些破坏外,对井田煤层总体影响不大。

2.2 矿区地层

出露地层由老至新分别是古生界的泥盆系、石炭系、中生界的侏罗系、新生界的古近系、新近系及第四系。

泥盆系仅有中统呼吉尔斯特组(D_2h)零星出露,该组分为上亚组(D_2h^b)、下亚组(D_2h^a)。

石炭系地层分布较少,仅有少量石炭系下统和布克河组(C_1h^b)及黑山头组(C_1h)出露。

侏罗系中、下统地层发育,为内陆河流、湖泊相碎屑沉积,自下而上分别由八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、西山窑组(J_2x)、头屯河组(J_2t)组成。中侏罗统西山窑组(J_2x)是主要的含煤地层,分布在矿区北部,为河流相、覆水沼泽相、泥炭沼泽相及湖滨为主的含煤碎沉积,以砂岩、粉砂岩及煤层为主,夹砂砾岩及泥岩,与下伏三工河组(J_1s)为整合接触,产大量的植物化石。头屯河组出露在矿区南部,其上被第三系乌伦古河组(E_{2-3w})超覆不整合,厚度差别较大,主要岩性为灰

绿色、灰黄色砾岩、中粗砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩及泥岩互层，夹劣质煤层，平行不整合于下伏西山窑组(J_{2x})之上。

古近系乌伦古河组(E_{2-3w})与新近系(N_{1t})零星分布，主要为浅黄色的砾岩、石英砂岩、泥岩组成、钙质胶结，底部呈半胶结状态，表面被戈壁砾石覆盖，均与下伏地层整合接触。

第四系更新统洪冲积层(Q_{pl2-3})分布于中部平缓地带，零星覆盖在西山窑组地层之上，由洪冲积砾石、砂、亚砂土、粘土等组成。

2.3 井田水文地质

依据钻孔水文地质编录、物理测井等资料，将井田含(隔)水层进行划分。新近系塔西河组(N_{1t})与古近系乌伦古河组(E_{2-3w})含水层位以砂岩、砾岩为主，结构松散，储水能力差，由于缺乏水源补给，为弱富水含水层。中侏罗统头屯河组(J_{2t})与西山窑组(J_{2x})透水层位以砂岩、粉砂岩、砾岩为主，透水性好，为孔隙裂隙弱富水含水层，为煤层开采的直接充水含水层。西北部的火烧区透水性极好，为透水不含水层。侏罗系下统八道湾组与三工河组为粉砂质泥岩、细砂岩夹煤层、碳质泥岩等，泥质含量高，结构较完整、裂隙不发育，透水性差，视为相对隔水层。矿区无常年性地表水，且降水量小于蒸发量，是造成井田地下水贫乏的重要因素。东北部F7和F8断裂破碎带因在上述因素的制约下，储存水及导水条件也受到限制。

3 电性特征

数据采集使用GEONICS公司的PROTEM57-MK II发射机、发射线采用8 cm²RV电缆，电阻2.31 Ω/km，PROTEM接收机，3D-1接收探头，并根据采空区埋藏深度及主采煤层最大埋藏深度，选择发射线圈(Tx)的大小400×400 m；为有效压制干扰，选取发射电流13-15A；从试验点的不同发射频率的视电阻率断面图来看，选择8.33 Hz发射频率的视电阻率等值线断面图符合地层赋存特征，地电规律明显，深度适合；增益用G×4可保证早期道数据不溢出、尽量放大晚期数据；采集时间采用30 S可以保证数据的采集质量。

岩石的含水性是影响其电阻率的主要因素，不同岩层的电阻率随着富水多少而呈现高低变化。矿区地层产状局部较陡，所含矿物种类和数量较

小，对于同一层序的岩石电阻率是相对均匀的；净采空区及含水采空区的交互出现使其产生了明显的横向不均匀性，故横向电阻率的高低突变反映了采空区的富水情况。覆盖层、煤系地层及下伏岩层沉积序列相对稳定，纵向上地层视电阻率也具有一定的规律性；纵向上当有富水的断层、裂隙和采空区存在时，视电阻率呈现良导电体的特征，具有高低阻递变规律；煤层燃烧后形成的火烧区透水能力强，形成区别于周边岩性的高阻体。在定性分析电性资料时要把握地层的导、含水性，充分结合多种电性参数、区域电性特征和水文地质情况来具体分析。

4 数据处理与解释

4.1 数据处理

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，才能对资料进行下一步解释^[3]。处理步骤：

(1)强干扰剔除：强干扰是一相对概念，在同一采样时刻干扰信号的强度远大于有效信号的强度，其特征为瞬变响应某一时间道或几道衰减曲线的跳变^[4]。剔除强干扰信号常用指数谱函数拟合的数学方法：

$$\varepsilon_T(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \frac{1}{t} + \alpha_2 \frac{1}{t^2} + \alpha_3 \frac{1}{t^2} \dots + \alpha_n \frac{1}{t^n} \quad (4)$$

依据瞬变衰减曲线的变化规律，在双对数直角坐标下求解由式(4)所得的方程组，根据受干扰较小的早、中期时间段信号确定系数 α_i ，早、中期采样信号偏离拟合函数20%的跳变点剔除后，函数值用拟合值替代，晚期信号偏离拟合值20%+3 μ V的跳变点剔除后，函数值用拟合函数的晚期渐近线所对应时间函数值替代。

(2)数据滤波处理的主要作用是消除晚期干扰噪声影响，以提高晚期信号的信噪比。较为实用的数学方法有四种，即三点滤波、卡尔曼滤波、四点滤波(Fraser滤波)、函数拟合法。

(3)时深转换：瞬变电磁仪器野外观测到的是二次场电位随时间的变化，需要将这些数据转换成电阻率随深度的变化，本次资料处理主要采用美国INTERPEX公司的TEMIXXL v4进行层状反演解释。

(4)绘制各种参数图件：首先从全区采集的数据中选出每条测线的数据，绘制各测线视电阻率断面图；然后，依据地质勘探、钻探、三维地震

勘探等已知地质成果,提取目的层的埋深,据此深度地层电阻率,绘制顺层切片图。

在视深转换时视电阻率计算公式为:

$$\rho_t=\frac{u_0}{4\pi t}\left(\frac{2u_0mq}{5tV(t)}\right)^{2/3}$$
 (5)

式中 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。视纵向电导 S_τ 和视深度 h_τ 的计算表达式为:

$$S_\tau=\frac{16\pi^{1/3}}{(3Aq)^{1/3}u_0^{4/3}}\frac{(V(t)/I)^{5/3}}{(d(V(t)/I)/dt)^{4/3}}$$
 (6)

$$h_\tau=\left(\frac{3Aq}{16\pi(V(t)/I)S_\tau}\right)^{1/4}-\frac{t}{u_0S_\tau}$$
 (7)

式中 $V(t)/I$ 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。

4.2 资料解释

4.2.1 视电阻率断面解释

103测线位于井田西南部,图1中视电阻率剖面图中横坐标为测点号,纵坐标为高程;图例红色~蓝色的过渡表示视电阻率值由高~低的变化。5条黑色实线分别为可采煤层B11、B10、B8、B7和B5底板等高线。断面中测点100~260、460~600、880~1140及1340~1420范围内出现4个视电阻率异常区。

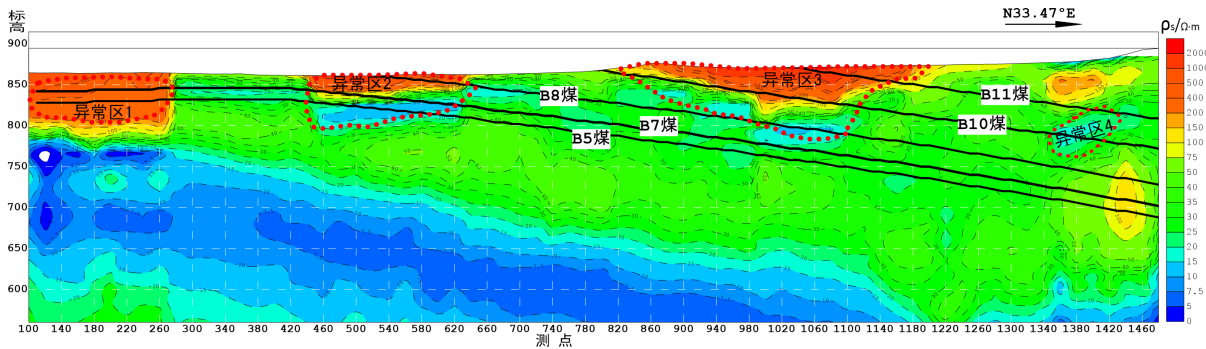


图1 C103线视电阻率断面图
Fig.1 Apparent resistivity section of line C103

综合地质资料分析可知:①地层由上到下视电阻率值呈现由高至低的变化,上部煤系地层岩性主要为泥岩砂岩互层,其视电阻率基本在10~80Ωm范围;下部低阻层为西山窑组底部含水层。②沿测线方向沉积地层的电性正常情况下是均一的或变化不大,当水平方向有地层破碎和采空区出现时,电阻率值将出现急剧变化。③1号异常区为高阻反应,煤层埋藏较浅,推测为净空采空区所致。④2号异常区上部呈现高阻异常而下部出现低阻现象,是由于煤层开采的过程中破坏了地层间的应力平衡,产生大量的扰动裂隙,上部地层的孔隙水顺裂

隙流入下部地层形成一定的低阻异常。但侏罗系下统八道湾组与三工河组有稳定的隔水层的存在,使其下部和北部的基岩裂隙水不能直接补给井田;因此采空区内水量很小,对矿井危害不大。⑤3号异常区位于B10煤层露头附近,煤层埋藏深度较浅,呈现上部高阻下部低阻现象,本区B10煤层在浅部存在火烧现象,因此判断该高阻异常区为B10煤层火烧所致,且裂隙水下移聚集形成低阻区。⑥4号异常区为低阻异常、而上部地层有相对应高阻反应,原因为B11煤层采空区塌陷填、上部冒裂带孔隙水顺裂隙流入下部B10采空区形成。

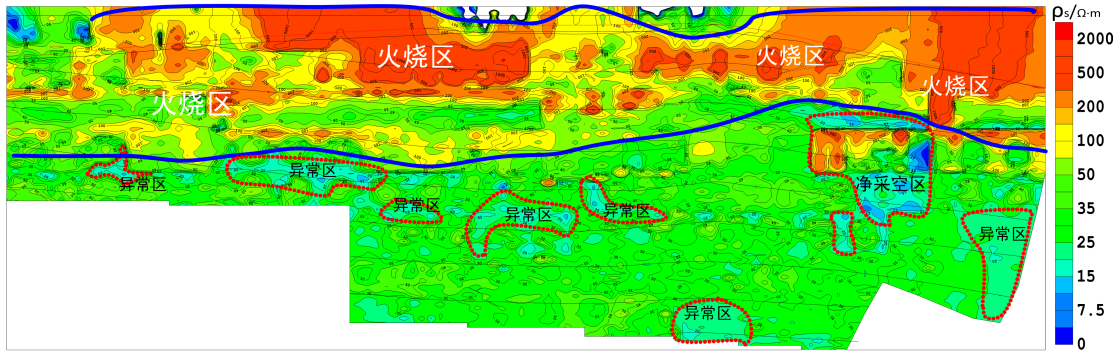


图2 B10煤层底板顺层视电阻率切片图
Fig.2 B10-Apparent resistivity slice of coal seam floor

4.2.2 顺层视电阻率切片解释

通过图2显示,①测区北部B10煤层埋藏较浅位置呈现大面积橙色高阻异常区(蓝色线圈定范围),推测为煤层火烧区。②红色虚线圈定异常区为煤层开采引起的异常,其中东北部高阻异常为净空采空区,其余低阻异常为采空区内含少量裂隙水引起;整体来说B10煤层富水性较差。

5 地质成果

本次瞬变电磁测深采用大定源回线装置施工,勘探的基本网格为 $40\times 20\text{ m}$,共完成测线73条。在已有水文与地质资料基础上,配合本次物探解释成果,得到各煤层异常区空间展布情况。其中B7煤层共计有12处异常区,高阻异常推测为净空采空区;低阻异常为采空区塌陷内部填充物造成;B7煤层视电阻率值相对于西山窑组底部含水层电阻率值较高,因此判定B7煤层低阻异常区富水性均较差。B10煤层异常区23处,高阻火烧区下部含水层影响引起的低阻异常区富水性较差;高阻净空采空区下部低阻异常为上部地层孔隙水受重力影响顺扰动裂隙渗入下部地层形成;本区地下水较为匮乏、补给条件差,因此低阻异常区富水性较差。B8煤层位于B7和B10煤中间,解释异常区14处,大部分为净采空区,部分火烧区底部富水性良好,全区大部分可采。B5煤层位于B7煤下部约14 m左右,异常区9处,火烧区底部无富水低阻区;由采空区引起的异常判定为无富水填充的净采空区;因此该煤层全区可采。追加圈定了B5煤下部30 m层位异常区,目的是为了查明B5主采煤层底板岩层的稳定性,揭示该岩性整体比较稳定,可以对下部地层的含水层起到一定的隔离作用。断层F7、F8附近有4处零星分布的异常区,该断层落差小于15 m,破碎程度较小,断层附近无稳定的含水层;因此断层F7和F8对采区影响较小。

6 结论

(1)大定源瞬变电磁法受发射电流关断时间的影响,地表浅层的地质信息会被屏蔽掉,在以后的研究中需要加以改进和完善^[5]。

(2)大定源瞬变电磁法勘探,受地形起伏、浅层低阻覆盖层的影响^[6]。搞清楚地下电磁场的分布规律,明白地形起伏、地下不均匀体对电磁场的影响特征,可以提高反演精度,更好的预测地下目标。

(3)瞬变电磁勘探的分析解释是以电性特征变化为依据,不可避免存在电性变化与地质成果的多解性;建议应合理布设钻孔、增加多种物探手段,有利于对煤层分布和异常区情况进行综合定性解释。

参考文献

- [1] 何先富,刘金涛,王柱.瞬变电磁法在内蒙古门克庆井田富水性探测中的应用研究[J].工程地球物理学报,2011,08(6):723-729.
- [2] 赵广茂,周学明.大定源瞬变电磁法在铁路采空区勘察中的应用[J].铁道勘察,2013(6):18-20.
- [3] 何开录.瞬变电磁法在采空区勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(3):351-354.
- [4] 何希位,廖阿托,刘帅.大定源回线瞬变电磁法在托云盆地油页岩勘探中的应用[J].西部探矿工程,2019,031(12):118-121.
- [5] 顾光跃,王东伟.大定源瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J].中国煤炭,2014(10):35-38.
- [6] 刘焱,刘树才,闫赛,等.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,2011,08(1):10-15.