

瞬变电磁法在煤矿采空区的地质勘察中的实践应用

毛东辉 李伟强*

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i2.2142

[摘要] 地下采空区的勘察与治理在矿山隐蔽致灾普查与生态修复方面尤为重要,因传统钻孔勘探等手段效率低、成本高、周期长,瞬变电磁法对比有着高效率、低成本、短平快的优势。瞬变电磁法因其对低阻体敏感、探测深度大等优势被广泛应用于矿产和采空区的勘察中,本文以新疆某煤矿采空区为例,系统研究瞬变电磁法在复杂地质条件下的应用效果。通过布设多测线,利用大电流发射技术进行数据采集,结合Occam反演算法与钻孔约束机制建立地层-电阻分层约束模型,构建多阈值电阻率解释框架。创新性引入多剖面交叉验证与三维电阻率建模技术,实现采空区空间形态的动态解析,识别充水采空区。

[关键词] 采空区; 瞬变电磁; 低阻异常; 钻孔验证

中图分类号: O441.5 文献标识码: A

Practical Application of Transient Electromagnetic Method in Geological Investigation of Coal Mine Goaf

Donghui Mao Weiqiang Li*

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd

[Abstract] Underground goaf investigation and management is particularly important in mine hidden disaster survey and ecological restoration, because the traditional drilling and exploration methods are inefficient, costly, and long-term, and the transient electromagnetic method has the advantages of high efficiency, low cost, short and fast. In this paper, the application effect of transient electromagnetic method in complex geological conditions is systematically studied by taking the goaf area of a coal mine in Xinjiang as an example. By laying multiple survey lines, using high-current emission technology for data acquisition, combining the Occam inversion algorithm and the borehole constraint mechanism, the strata-resistance stratification constraint model is established, and the multi-threshold resistivity interpretation framework is constructed. The innovative introduction of multi-profile cross-verification and 3D resistivity modeling technology realizes the dynamic analysis of the spatial morphology of the goaf and identifies the water-filled goaf.

[Key words] goaf; transient electromagnetic; low-resistance anomaly; borehole verification

引言

地下采空区的勘察与治理在矿山隐蔽致灾普查与生态修复方面尤为重要,因传统钻孔勘探等手段效率低、成本高、周期长,成果展示不够连续,瞬变电磁法对比有着高效率、低成本、短平快、能系统地反映地下空间结构的优势。瞬变电磁法通过探测地下介质的电性变化,通过技术人员建立与项目相适应的电阻率模型数据,反演视电阻率断面图,识别采空区异常电阻,从而判定其位置、规模及充水状态,但其在复杂地质条件下的多解性和精度仍需积累实践经验,深入研究总结。本文以新疆某采煤陷区为研究对象,通过多剖面联合反演与钻孔验证,探讨TEM技术在采空区探测中的适用性与优化路径。

1 项目概况

项目区位于新疆某煤矿采空区,属低山丘陵地貌,海拔888~1073m,地表覆盖第四系冲洪积层(厚度6~31m)及人工回填物。地层岩性主要有侏罗系中统西山窑组(J_{2x}),泥岩、砂岩及煤层互层。本项目区煤层电阻率200~400Ω·m,泥砂岩电阻率20~300Ω·m,为TEM探测提供了电性差异基础。矿区因长期开采导致地下道洞纵横与地表塌陷,威胁基础安全。

本项目通过瞬变电磁法来探查地下250m以内采空区分布的位置、规模、及充水状态;结合已知钻孔岩芯揭露和钻孔的综合物理测井数据来多角度分析采空区,从而优化后期钻孔布设,构建系统的地下空间结构。

2 方法原理

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method,简称TEM)

利用不接地回线或电极向地下发送脉冲式一次电磁场,用线圈或接地电极观测由该脉冲电磁场感应的地下涡流产生的二次电磁场的空间和时间分布,来解决有关地质问题的时间域电磁法^[1]。

瞬变电磁法基于“烟圈效应”,通过发射线圈向地下发送脉冲磁场,观测二次涡流场的衰减特征。早期信号反映浅部电性结构,晚期信号揭示深部异常。

探测深度由公式: $h = \sqrt{\frac{2t\rho}{\mu_0}}$ 决定,其中 t 为衰减时间, ρ 为介质电阻率。

3 仪器、参数配置及数据采集

采用重庆瑞陆FCTEM60-1型瞬变电磁仪,配备大功率发射机(24V锂电池供电)及110型一体化线圈,发射电流峰值达60A,在探测深度和精度上都有着巨大优势,显著提升信噪比与探测深度。布设多条剖面,网状分布工区,测点间距5~10m,探测深度250m,覆盖采空区潜在分布区^[2]。

4 数据处理与反演

先数据预处理:通过剔除地表金属干扰、高压线等的假异常,采用多频段滤波技术^[3]来去噪;后依据对现场地质分层约束(钻孔岩芯揭露和综合测井)建立适合本项目的地层-电阻率模型。资料处理采用阿尔法瞬变电磁反演超算系统进行半自动化分段处理,人机交互解释。

通过调查得知工区地下水富集,水位3~40m,采矿形成的导水裂隙带为地下水的赋存和迳流提供了空间和通道,地下水水位以下的采空区推测多为饱水状态,在反演图中为低阻封闭异常,提出本项目的关键参数:推测充水采空区视电阻率:20~210 $\Omega \cdot m$;推测完整泥砂岩视电阻率:300~800 $\Omega \cdot m$ 。

5 典型剖面解析

5.1 zk33号孔试验剖面1

zk33揭露:0~22m为均匀碎石土,22m~36m为泥岩和砂岩破碎层,36~102m主要为相对完整泥岩、砂岩互层;102~114m出现掉钻、无岩芯,推测为采空、冒落;114~235m为较完整砂岩或煤层。

瞬变电磁反演剖面:视电阻率横向变化不大,整体由浅到深呈增大趋势,范围值在38~406 $\Omega \cdot m$,0~30m为浅层盲区低阻反应,30~100m主要为相对高阻表现,100m以下为高阻反应。zk33位于剖面桩号0+90处,剖面埋深100~115m段存在封闭型低阻异常,相对视电阻率162~179 $\Omega \cdot m$,与钻孔102~114m出现掉钻、无岩芯相互印证,推测为充水的采空、冒落区域。(详见图6-1)。

5.2 zk42号孔验证剖面2

瞬变电磁反演剖面2:视电阻率横向变化不大,整体由浅到深呈增大趋势,范围值在19~568 $\Omega \cdot m$ 。桩号0+035~0+055段,埋深80~90m处,存在半封闭型低阻异常一,相对视电阻率147~159 $\Omega \cdot m$;桩号0+060~0+075段,埋深80~90m处,存在半封闭型低阻异常二,相对视电阻率158~165 $\Omega \cdot m$;桩号0+070~0+095

段,埋深115~135m处,存在封闭型低阻异常三,相对视电阻率158~169 $\Omega \cdot m$;桩号0+135~0+165段,埋深70~105m处,存在封闭型低阻异常四,相对视电阻率19~60 $\Omega \cdot m$;桩号0+220~0+235段,埋深150~170m处,存在封闭型低阻异常五,相对视电阻率194~208 $\Omega \cdot m$;桩号0+235~0+265段,埋深75~105m处,存在半封闭型低阻异常六,相对视电阻率118~137 $\Omega \cdot m$;其他低阻推测为岩性变化或地表干扰详见图6-2)。

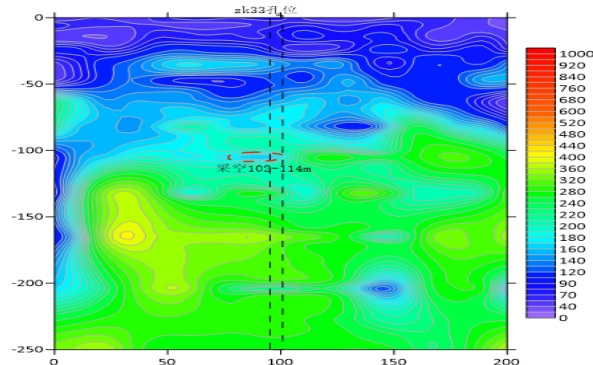


图6-1 zk33试验剖面1瞬变电磁反演效果图

Zk42号孔,深242.8m,岩芯揭露24.8~36.8m、70.6~78.4m、123.2~170.8m为采空区;该孔距剖面2的0+090桩号最近,直线距离8m;桩号0+070~0+095段,埋深120~140m处,存在封闭型低阻异常三,相对视电阻率158~169 $\Omega \cdot m$,与钻孔123.2~170.8m采空区位置相印证,并推测70.6~78.4m段采空区与封闭型低阻异常一、二相关。

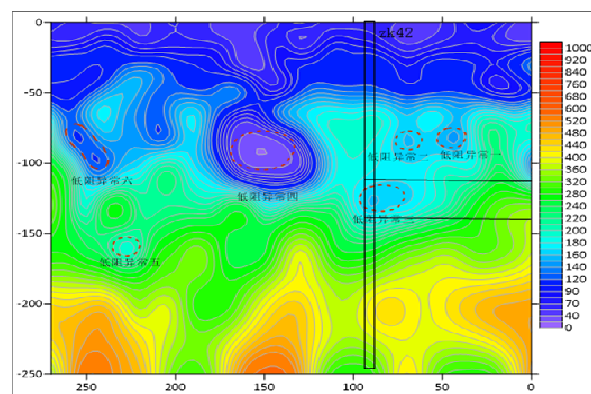


图6-2 zk42验证剖面2瞬变电磁反演效果图

5.3 zk45号孔验证剖面3

瞬变电磁反演剖面3:视电阻率横向变化不大,整体由浅到深呈增大趋势,范围值在54~847 $\Omega \cdot m$ 。桩号0+295~0+310段,埋深25~45m处,存在封闭型低阻异常一,相对视电阻率96~103 $\Omega \cdot m$;桩号0+315~0+360段,埋深120~170m处,存在半封闭型低阻异常二,相对视电阻率126~165 $\Omega \cdot m$;桩号0+330~0+375段,埋深40~90m处,存在封闭型低阻异常三,相对视电阻率144~180 $\Omega \cdot m$;其他低阻推测为岩性变化或地表干扰。(详见图6-3)。

Zk45孔深121.9m,揭露17.6~106.4m为不连续采空区,厚度

为88.6m；距离剖面3的0+340桩号最近，直线距离2m；桩号0+330~0+375段，埋深40~90m处，存在封闭型低阻异常三，相对视电阻率144~180 Ω·m；与钻孔17.6~106.4mm采空相对应。另有桩号0+315~0+360段，埋深120~170m处，存在半封闭型低阻异常二，相对视电阻率126~165 Ω·m；推测因钻孔深度未达到而未能揭露。

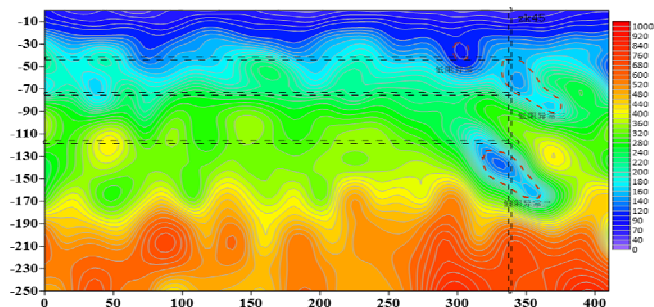


图6-3 zk45验证剖面3瞬变电磁反演效果图

6 验证结果统计

统计所有瞬变电磁剖面测试后具有验证作用的钻孔，对比分析见下表：

| 孔号 | 钻孔资料 | 描述 | 对比效果 |
|------|------|--|------|
| Zk33 | 钻孔资料 | zk33 埋深 102~114m 段出现掉钻、无岩芯，推测为充水的采空、冒落区域。 | 良好 |
| | 瞬变电磁 | 剖面桩号 0+80~0+100 段，埋深对应深度 100~115m 段存在封闭型低阻异常，相对视电阻率 162~179 Ω·m | |
| Zk40 | 钻孔资料 | 孔深 190.5m, 12.8~150.1m 主要为泥岩，夹了两段采空冒落，为 21~30m 和 166.5~174.1m，厚度为 7.5m 和 7.6m | 一致 |
| | 瞬变电磁 | 距离钻孔约 12m 的剖面的 0+260 桩号处，在剖面桩号 0+235~0+265 段，对应深度 150~180m 存在半封闭型低阻异常 | |
| Zk42 | 钻孔资料 | 孔深 242.8m 24.8~36.8m, 54~60m, 70.6~78.4m, 123.2~170.8m, 184.8~221.2m 为采空区，厚度为 6~47.6m | 良好 |
| | 瞬变电磁 | 距离钻孔约 8m 的剖面 0+090 桩号处存在封闭型低阻异常三，在剖面桩号 0+070~0+095 段，埋深 120~140m 处，与钻孔 123.2~170.8m 采空相对应。 | |
| Zk45 | 钻孔资料 | 孔深 121.9m 17.6~106.4m 为采空区或冒落，厚度为 88.6m | 良好 |
| | 瞬变电磁 | 距离钻孔约 2m 的剖面 0+340 桩号处存在封闭型低阻异常一，在剖面桩号 0+330~0+375 段，埋深 40~90m 处，与钻孔采空相对应。另桩号 0+315~0+360 段，埋深 120~170m 处，存在半封闭型低阻异常二，相对视电阻率 126~165 Ω·m；推测因钻孔深度未达到未能揭露。 | |

7 结论

地下采空区勘察与治理在矿山隐蔽致灾普查与生态修复方面尤为重要，因传统地钻孔勘探等手段效率低、成本高、周期长，瞬变电磁法对比有着高效率、低成本、短平快的优势。本文瞬变电磁法在煤矿采空区探测中表现优异，排除浅地表盲区影响，反演模型与钻孔验证的一致性达80%，证实瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的高效性与可靠性，创新性引入多剖面交叉验证与三维电阻率建模技术，实现采空区空间形态的动态解析。研究首次揭示了瞬变电磁信号在多层破碎介质中的衰减特征与烟圈扩散规律差异，提出了基于水文地质条件的低阻异常分类准则，有效区分充水采空区。本文不仅填补了瞬变电磁法在复杂煤矿环境中的工程化应用空白，也为多源地球物理数据融合与智能解释提供了实践范式。

【参考文献】

- [1]樊晓丹.基于瞬变电磁法的煤矿采空区地质勘察研究[J].能源与环境,2019,41(05):92-94+101.
- [2]王霞,谢孔金,韩刚,等.综合物探技术在煤矿采空区勘察中的应用[J].华北地震科学,2020,38(02):21-27.
- [3]谢孔金,谢一鸣,钟欣,等.瞬变电磁法在煤矿采空区勘察中的应用[J].地下水,2024,46(01):148-150.

作者简介：

毛东辉(1989--),男,汉族,河南省孟州市人,本科,工程师,研究方向：工程地质勘察、工程物探。

*通讯作者：

李伟强(1985--),男,汉族,河南省南乐县人,高级工程师,研究方向：水利水电工程地质勘察工作。