

文章编号: 1007-2993(2022)05-0385-04

高密度电法在煤矿采空区地质勘探中的应用

孙 飞

(山东省煤田地质局第五勘探队, 山东济南 250100)

【摘要】 为了评价高密度电法在煤矿矿区地质探测应用的适宜性和局限性, 以山东省东营市某煤矿矿山为研究背景, 选用高密度电阻率仪开展采空区地质勘探工作, 选取了 6 组地层剖面进行反演分析, 同时辅以钻探工作加以验证。分析结果表明: 非采空区地层剖面的电阻率随深度增加逐渐增大, 测试中电阻率从地表处的 $5 \Omega \cdot m$ 沿深度升高至 25 m 深度位置的 $200 \Omega \cdot m$, 且具有明显的分层特点; 3 组采空区剖面的电阻率分布极不均匀, 在剖面内部存在电阻率异常小的空洞区域; 高密度电法可以用于圈定采空区的大致分布和范围, 且高效便捷, 在采空区勘探实际应用中具有较好的适宜性。

【关键词】 高密度电法; 煤矿矿山; 采空区; 反演分析

【中图分类号】 P 631

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.05.008

Application of High-density Electrical Method in Geological Exploration of Goaf in Coal Mine

Sun Fei

(The Fifth Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Jinan 250100, Shandong, China)

【Abstract】 In order to evaluate the suitability and limitation of the application of high-density electrical method in geological exploration of coal mining areas, high-density resistivity meter was used in goaf geological exploration in a coal mine of Dongying, Shandong Province. Inverse analysis was conducted based on 6 stratigraphic sections, and verified by drilling work. The analysis results show that the resistivity of the non-goaf section increases gradually with the increase of depth, and has obvious stratification characteristics. The resistivity increases from $5 \Omega \cdot m$ at the surface to $200 \Omega \cdot m$ at 25 m depth. The resistivity distributions of the 3 goaf sections are extremely uneven, and there are cavity areas with abnormally low resistivity in the sections. The high-density electrical method can be used to delineate the general distribution and scope of goaf. Therefore, high-density electrical method is an efficient and convenient method with good suitability in the application of goaf exploration.

【Key words】 high-density electrical method; coal mines; goaf; inverse analysis

0 引言

矿山的采空区是指煤矿开挖后形成的地下空间。煤矿采空区因周围应力场的变化极易导致失稳破坏, 进而造成上部工程作业的极大安全隐患。例如: 2015 年 12 月 25 日, 山东省临沂市平邑县境内一处矿区发生采空区坍塌, 导致井下作业的 29 名人员被困; 2016 年 3 月 23 日, 山西同煤集团的同生安平煤业公司 5# 层 8117 综采工作面发生一起采空区重大坍塌事故, 酿成 19 人死亡的惨剧; 2017 年 3 月 28 日凌晨, 乌鲁木齐市水磨沟区煤矿采空区发生塌陷事故, 共造成 4 人死亡、3 人受伤。我国的一些矿产资源由于开采后未进行有效的采空区处理, 造成了大量的采

空区隐伏于矿区的现象, 从而酿成了多起矿难^[1-5]。当前, 很多矿场为了提升开采效率, 开采方式由井工开采改为露天开采, 而潜伏于露天采区地下的采空区则严重影响了安全生产, 对采空区进行探测已成为采矿技术发展的重点方向之一^[6-7]。

高密度电法以探测区域矿石、岩土以及地下水等介质导电性能的差异为基础, 采用高密度电阻测试仪器, 对近地面电场的分布范围和变化规律进行观测, 进而获取场地的地质特性, 并对相应区域的地质问题提供物理性勘探的方法^[8]。高密度电法能够对地下不同种类矿体进行探测, 也可以对地下水和深部地质构造进行研究分析。该法通过布设电极进行电学数

基金项目: 山东省省级地质勘查优选项目(鲁国土资字 2016-328)

作者简介: 孙 飞, 男, 1990 年生, 汉族, 山东淄博人, 大学本科, 工程师, 主要从事工程勘察研究。E-mail: qianzaizang@163.com

据采集,通过分析电阻参数而突出异常的地质信息,具有可视化、数据真实、测试速度快、精度高、测试深度灵活等优点。另外,该法对地下水特别敏感,致密完整的矿体、岩体电阻率较大;破碎的矿体、岩体含裂隙水,可探测的电阻率大幅下降^[9]。近年来,由于计算机技术的发展,高密度电法的探测深度和面积明显增加,抵抗环境的强干扰能力也明显提高,在矿山工程水文地质勘探和矿产资源勘查中的应用越来越广泛^[10-11]。

本文以山东省东营市一处煤矿矿山为例,对筛选的重点区域位置开展高密度电法的勘查工作,讨论了高密度电法在煤矿地质结构中的应用效果,获取矿山地层的电阻率分布范围,以研究矿体的厚度、岩性、埋藏深度和裂隙水地段。

1 高密度电法的介绍

利用高密度电法仪进行地层电阻率勘察的工作原理是以矿体、岩土的电导性差异为基础,分析在稳定的电流场作用下地质体中电流传导分布的规律。如图1所示,高密度电法的基本理论依据与电阻率测试相同,通过地表上两个不同电极A、B向地质体传输电流*I*,然后测试电极M和N之间的电位差 ΔU ,进而获得M和N之间的电阻率值 ρ 。根据反演该剖面处的电阻率分布谱研究矿山工程地质的特征,再结合相关地质资料解决地层划分和异常地质现象的难题。

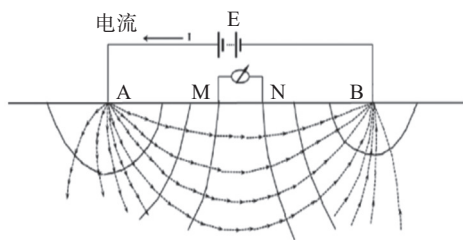


图1 高密度电法测试示意图

本试验采用重庆地质仪器厂生产的DUK-2B高密度电法仪(见图2),其电压测量分辨率为 $1\mu\text{V}$,电流测量分辨率为 1mA ,该仪器可以在温度为 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ 、湿度小于93%的环境条件中进行勘探工作,采集测量系统的数据分辨能力较高,且可以自动保存和输出。该仪器可以应用于矿区地层工程地质条件初探、井下煤层顶板和底板富水性探查、掘进工作面水文地质条件超前探查、地面水文地质条件探查等,用于回采工作面底板水害预警系统及交互式掘进巷道超前富水性监测预警系统。此仪器采用锁相放大技术、低功耗分布式电极转换装置和即时数据处理及成果显示等,与其它探测方法相比,高密度

电法具有极高的抗干扰性能及测量精度、探测深度大、信息丰富、工作效率高等优点。



图2 高密度电法测试装置

在地表平整和物理性质均匀的地层中,电极MN之间电位差由式(1)计算。

$$\Delta U = U_A - U_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1)$$

地质体电阻率表达式见式(2)。

$$\rho = \frac{k\Delta U}{I} \quad (2)$$

在进行现场测量时,需要将全部电极棒(一般为几十至几百根)置于被观测的剖面测点上,在同一剖面上布置电极时可组合出多种装置,如三级装置、温纳装置、斯伦贝谢装置和偶极—偶极装置等。

2 工程实例

2.1 工程地质条件

进行测试的煤矿矿山位于山东省东营市北部,所处区域的构造属于东南向断拗II级构造单元,地层的凸起呈东南向展布,东北部的基岩埋藏深度较大,西南部的基岩埋藏较浅,约为 $150\sim 250\text{m}$,中部基岩埋深最浅,平均小于 100m 。在工程地质方面,该矿区在构造格架上均属红石河地台,矿区的地壳稳定性较高,矿区出露白垩系页岩、砂岩,岩层的走向为北东 20° ,边坡倾角接近 $1:1.5$ 。由地层的岩性组合与地下水埋藏条件分析可知,矿区的主要含水岩组为第四系孔隙煤岩组,而基岩为相对隔水层,基本不含地下水。

根据前期地质调研得知,该煤矿矿山经过多年的地下开挖转型为露天采矿,由于前期的开采过程未见详细记载,在露天开采中已有部分区域的采空区发生塌陷的现象,证实在该矿山采场的下方存在隐藏的采空区,给后续的煤矿开采工作造成了极大安全隐患。因此,对煤矿矿区内采空区开展地质体探测十分必要。

2.2 高密度电法探测结果

电阻率是土的固有物性参数之一,主要取决于土的物质组成、孔隙水、孔隙结构等,亦受外界环境因素影响。一般地,在不考虑浸水条件下,地质体的裂隙越密集,其电阻率越大。在地下采空区形成前,岩层未经开挖工程的扰动,电阻率的变化不明显;而在地下采空区形成过程中,由于爆破扰动导致地质体内部出现大量的孔隙和裂隙,从而使电阻率值显著提高^[12]。根据这个特点,由矿山整体电阻率值的分布情况可以初步确定地下采空区的位置。然后在所确定的采空区位置区域布设电极网,测得该位置的地层剖面电阻率。

目前,地质体电阻率原位测试方法主要包括电极法和电阻率探头法(RCPT),两者都是通过四个电极对土的电阻率进行测量。电极法测试方法简单、设备便宜、易操作。通过调整电极的间距,既可用于小尺寸土体的电阻率测量,也可用于大范围的地电阻率测量,在地球物理学领域、工程地质勘察中都有广泛地应用。本试验场地的测试长度为60 m,电极的间距为1 m,一共布设60根电极棒,试验区域内地表较为平整。

经过对矿区地层进行剖面的高密度电阻率数据采集和处理,并将得到的电阻率数据进行格式转换后,利用数据分析软件进行地质剖面的数据整合,得到反演分析所需要格式的数据。本研究应用SURFER数据处理软件对原始数据进行网格化处理,采用局部最优线性无偏估计法对电阻率测量数据进行网格化处理,所得网格大小约为 $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ 。首先对电阻率数据进行畸变点剔除,然后根据瑞典RES2DINV自动迭代的反演程序采用有限元法进行正向分析,最后结合已知地质、水文及前期勘探资料,用光滑约束的最小二乘法进行反演分析,在反演过程中约束了矿区地层的电阻率范围,迭代次数为3~5次,得到的 $\text{RMS}<15$,计算误差小于5%,即可得到反映地层介质的可视化电阻率反演剖面图。图3所示的是G1—G3电阻率剖面图(非采空区);图4所示的是G4—G6电阻率剖面图(采空区);图5为纵向G1—G6测线范围内的高密度电法反演剖面图。

从图3可看出,非采空区场地的3组剖面都具有相似规律,从上至下约20 m的范围内,电阻率从 $5\ \Omega\cdot\text{m}$ 升高至 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,随着深度增加电阻率有明显的分层现象,这也说明随着深度的增加,地应力水平的提高使得矿山岩体的致密程度提高。此外,在3组非采空区的地质剖面中没有发现大型块石或者空

谷,这与钻孔结果以及勘察报告是相符的,说明该探测点下方并无隐藏采空区。图4所示的3个剖面位于采空区的区间上,这组剖面的电阻率沿深度分层现象不明显,电阻率的分布呈明显的非均质性。测试到采空区1大致位于地表以下约12~15 m左右,水平位置约为14~17 m处;采空区2大致位于地表以下约18~25 m左右,水平位置约为24~30 m处,测得区域内地质体的电阻率值明显低于周围剖面地质体的电阻率,符合煤矿采空区地层电阻率分布特点。

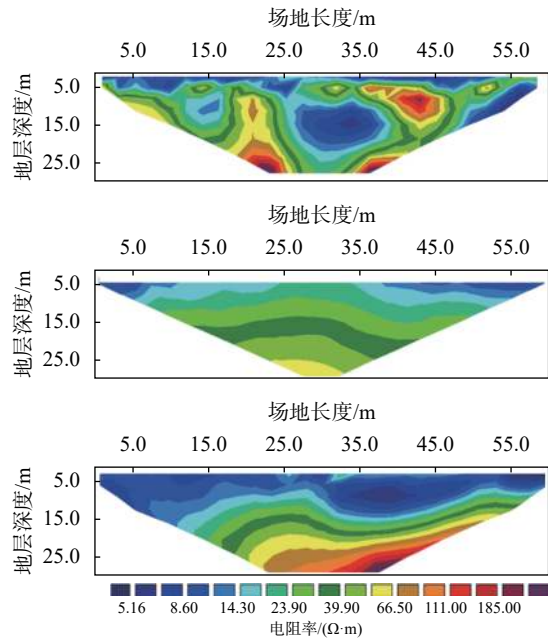


图3 非采空区电阻率反演断面(G1—G3)

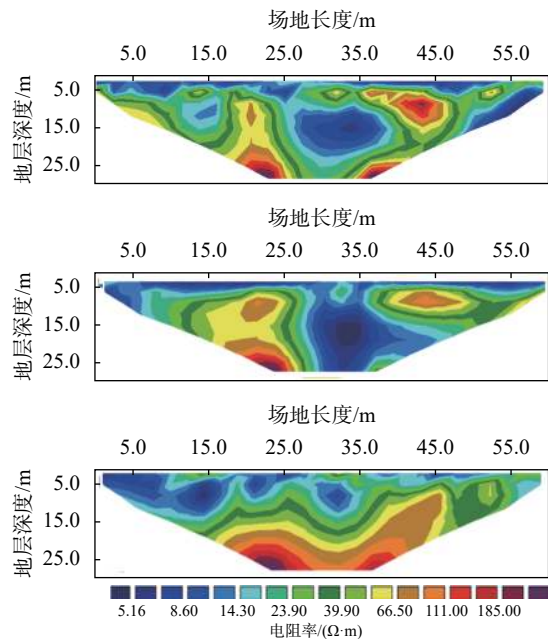


图4 采空区电阻率反演断面(G4—G6)

2.3 采空区地质体推断图

高密度电法可以很好地反映出该煤矿地层,采

空区地质体的不均匀性导致其电阻率的不均匀,而非采空区的岩层较为均匀,相应的电阻率较为均匀。通过对高密度电阻率剖面的反演分析,结合前期钻探结果得到该区域地质体的推断图(见图5)。从图中可以看出在水平位置0~20 m范围内的浅层分布有第四系全新统粉质黏土(Q₄^{pd});水平位置0~42 m范围内的地层为下白垩统梁山组(K₁l)和青龙组(K₁q)煤岩;水平位置42~60 m范围内的地层分布有上三叠统(T₃)灰岩。在水平位置20~36 m、地下深度4~9 m和水平位置46~55 m、地下深度2~5 m范围内,地质体的电阻率分布极不均匀。因此,结合已知水文地质资料及电阻率反演结果总结的采空区电阻响应特征,综合推断解释这2处电阻率异常区域为老窑采空区导致,采空范围如图5中虚线框位置,结果表明该矿山勘探区域内存在两处潜伏采空区。结合钻掘勘探的结果,在钻进深度为15~25 m位置处发现了冒水的情况,说明该位置主采煤层已经采空积水,这与电阻率反演结果推断几乎一致。高密度电法虽然精度有限,但可以用于圈定采空区的大致分布范围,且高效便捷,在采空区勘探实际应用中具有较好的适宜性。根据高密度电法的物探结果,采矿单位应及时对矿区内的这两处采空区进行注浆加固处理。综上所述,本文提出了基于高密度电法探测煤矿采空区的方法,该法可以基本探明煤矿矿区内的采空区位置。本研究为煤矿采空区地质勘探和处理提供了有效的数据支持,有助于发现煤矿开采过程中可能存在的安全隐患问题。

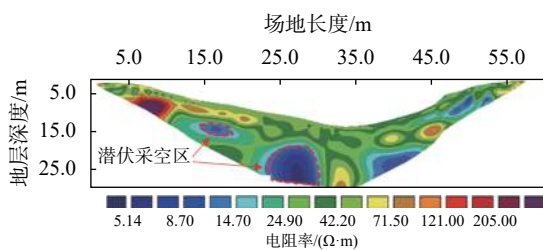


图5 基于高密度电法的采空区地质体推断图

3 结论

选取典型煤矿矿山地层进行高密度电法测试,由数据反演获得了地层剖面的电阻率分布图,并得到以下结论:

(1)由高密度电法探测得到的3组非采空区电阻率剖面存在相似分布规律,电阻率随深度增加逐渐增大,且呈明显分层特点,其电阻率从5 Ω·m升高至

200 Ω·m。

(2)3组采空区剖面的电阻率分布极不均匀,且在剖面内部存在电阻率异常小的空洞区域,表明该区域存在潜伏采空区。

(3)由高密度电法对采空区分布情况进行了基本推断,获得的潜伏采空区具体位置与钻掘勘探的结果几乎一致,为煤矿矿山采空区地质勘探和处理提供了数据支持。

参 考 文 献

- [1] 王尧,孙焕钊.基于事故树定量分析的采空区上方建筑物稳定性评价[J].煤矿安全,2018,49(11):204-206,210.
- [2] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [3] 孙常青,申斌,孙振岳,等.西安云轨地裂缝专项勘察及影响范围分析[J].岩土工程技术,2021,35(2):122-127.
- [4] 刘永生,刘仁义,马瑞光.综合物探方法在地面塌陷场地勘查中的应用[J].岩土工程技术,2018,32(3):155-158.
- [5] 李长洪,卜磊,魏晓明,等.深部开采安全机理及灾害防控现状与态势分析[J].工程科学学报,2017,39(8):1129-1140.
- [6] 蒙超,韩德品,王鹏,等.瞬变电磁法探测浅层采空区的方法与应用[J].煤矿机械,2017,38(1):120-122.
- [7] 赵奎,马志敏,罗涛,等.基于周围电阻率的分布规律计算采空区参数[J].矿业研究与开发,2016,36(2):66-70.
- [8] 张峰,高召宁,孟祥瑞,等.高分辨电法在承压水上开采相似模拟中的应用[J].煤矿安全,2014,45(4):145-148.
- [9] LEECH C, LOCKINGTON D, DUX P. Unsaturated diffusivity functions for concrete derived from NMR images[J]. Materials & Structures, 2003, 36(6): 413-418.
- [10] 邵雁.核磁共振技术应用于煤矿中查找老窑及岩溶水害的探讨[J].矿业安全与环保,2008,(1):64-66.
- [11] 唐鹤鸣.大型缓倾煤矿采空区稳定性评价研究[J].岩土工程技术,2019,33(4):202-207,217.
- [12] 安然,孔令伟,柏巍,等.单轴荷载下残积土的电阻率损伤模型及干湿循环效应[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S1):3159-3167.

收稿日期:2021-06-01