

等值反磁通瞬变电磁法在个旧市某矿井巷道找矿中的应用

杨通田¹, 王鹤¹, 李祖强², 芦磊³

¹中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

²湖南五维地质科技有限公司, 湖南 长沙

³云南锡业股份有限公司大屯锡矿, 云南 个旧

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月29日

摘要

矿井地球物理方法超前探测要求准确探测巷道下未知面地质异常体, 探测空间小, 干扰大, 技术要求高。为了研究等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)对个旧市大屯锡矿某矿区超前探测的效果, 在矿区巷道的底面针对矿山中各类型矿体、断裂构造等布置了两条测线进行实验。通过两条测线的结果和已知的地质资料和后续钻孔资料对比可知, 在OCTEM的反演电阻率剖面中, 呈现低阻凹陷, 且趋势较连续的区域, 可推断为断裂、构造破碎带等; 出现相对低阻且等值线闭合或呈低阻的小凹陷, 该处可圈定为低阻异常区域, 结合已知地质资料和钻孔验证结果确定此处低阻异常区为电气石较富集区域。可见, OCTEM对个旧市某矿区井下探测效果较好, 能够确定断层、破碎带、含金属矿区的基本位置, 为后续在该矿区寻找花岗岩次级凹兜提供了新勘探方法, 可以在该矿区或类似矿山开展超前探测工作。

关键词

等值反磁通瞬变电磁法, 地球物理超前探测, 井下巷道探测

Application of Opposing Coils Transient Electromagnetics in Mine Roadway Prospecting in Gejiu City

Tongtian Yang¹, He Wang¹, Zuqiang Li², Lei Lu³

¹School of Earth Science and Information Physics, Central South University, Changsha Hunan

²Hunan Wuwei Geological Technology Co., Ltd., Changsha Hunan

³Datun Tin Mine, Yunnan Tin Industry Co., Ltd., Gejiu Yunnan

Received: Mar. 28th, 2023; accepted: May 22nd, 2023; published: May 29th, 2023

Abstract

The advance detection of mine geophysical methods requires accurate detection of unknown geological anomalies beneath the roadway, with small detection space, large interference, and high technical requirements. In order to study the effect of Opposing coils transient electro magnetic (OCTEM) on advanced exploration of a certain mining area in Datun Tin Mine, Gejiu City, two survey lines were arranged at the bottom of the mining roadway for experiments on various types of ore bodies and fault structures in the mine. By comparing the results of the two survey lines with known geological data and subsequent borehole data, it can be seen that in the inversion resistivity profile of OCTEM, areas with low resistance depressions and relatively continuous trends can be inferred as faults, structural fracture zones, etc.; a small depression with relatively low resistivity and closed contour lines or low resistivity can be delineated as a low resistivity anomaly area. Combining known geological data and borehole verification results, it is determined that the low resistivity anomaly area here is a relatively rich area of tourmaline. It can be seen that OCTEM has a good effect in underground exploration of a mining area in Gejiu City, which can determine the basic location of faults, fracture zones, and metal bearing mining areas, providing a new exploration method for the subsequent search for granite secondary pockets in the mining area, and can carry out advanced exploration work in the mining area or similar mines.

Keywords

Opposing Coils Transient Electro Magnetics (OCTEM), Geophysical Advanced Exploration, Underground Roadway Detection

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

云南省红河州个旧市以盛产大锡而闻名于世，是全国有色金属工业基地之一，素有“锡都”之称，随着矿区地质找矿工作的开展，个旧市大屯锡矿矿区浅部氧化矿床已经逐渐被开采殆尽，开采向深部进行，深部勘查成为目前找矿工作的主要方向。大屯锡矿矿区已有工程对岩、矿体的揭露情况，发现该矿区有较复杂的褶皱和断裂构造发育，且存有含矿的花岗岩次级凹兜，这些部位都是锡铜多金属矿床成矿和赋存的良好场所，对其进行勘探研究，为发现盲矿体、增加资源储量，延长矿山寿命、为下一步探矿工程提供最优靶区十分关键[1] [2]。而光使用坑下钻探的方法进行探矿，其成本较高，且常出现漏探的情况，运用地球物理方法进行超前探测尤为重要。

综观以前的物探工作，勘查工作大多都在地面进行，但在井下进行工作时，地质勘查范围和钻探施工空间局限在有限的巷道内，数据采集工作需要在地温、高湿度、高噪音、高粉尘的艰苦环境中完成，且存在电缆、水管、铁道、锚网、支护钢架、风机及开采施工等大量的电磁及震动源干扰(图 1)，而地面物探方法对于大于 1000 米深度的分辨率大大降低，地面常规物探方法已不能指导井下钻探工作，井下地球物理探测成为了较有效的手段[3] [4] [5]。目前井下地球物理方法超前探测的研究主要有地震波方法、直流电阻率法、地质雷达法以及瞬变电磁法。但经过大量实践，一些应用技术问题表现突出。地震类探测技术应用的方法主要有反射波法和瑞雷波法，反射波法受三维空间岩体内不同方向的反射波影响着数

据处理和解释，瑞雷波对含水体的响灵敏度不够且现场探测施工程序繁琐。直流电法类探测要求与岩体有良好接触，受在数据采集时受现场地电干扰大，且电场随布极距离的增大而快速衰减。探地雷达探测距离偏小，工作效率低，且受金属干扰[6] [7] [8] [9] [10]。以上问题导致这些方法在实际应用中存在数据采集质量低以及难以满足快速掘进生产需求的问题，而近几年发展起来的矿井瞬变电磁技术具有施工方便快捷、体积效应小、探测距离大、探测方向性好，对含水低阻体敏感等优点，经过专家学者的大量研究实践，矿井瞬变电磁法目前已成为井下超前探测的重要方法之一。



Figure 1. Some geophysical interferences existing in the tunnel

图 1. 坑道中存在的部分物探干扰物

瞬变电磁法又称为时间域电磁法，简称 TEM 或 TDEM，是建立在电磁感应原理基础上的一种探测方法。20 世纪 30 年代末，前苏联科学家首先提出瞬变电磁法的概念，试图用于油气田勘查开发上；20 世纪 50 年代初，西方科学家 J.R.Wait 最早提出利用瞬变电磁法寻找导电矿体的思路，我国此时期开始引进前苏联的直流电测深方法技术；在 20 世纪 80 年代，朴化荣、牛之琏、方文藻等国内老一辈科研学者，做了较多研究及实践工作，我国的瞬变电磁法理论研究得到了空前的发展，开发了国内瞬变电磁设备；21 世纪初，于景邨、薛国强等将基于半空间的瞬变电磁理论，发展成为适合井下矿井中使用的全空间探测理论，取得了良好效果[11] [12]。但传统瞬变电磁法由于接收线圈与发射线圈之间的互感作用，使得在关断过程中以及关断后的一段时间内，接收线圈中会产生因一次场变化而产生的感应电动势，导致早期无法观测到有效信号而造成浅层盲区，这种勘探盲区可以高达数十米甚至上百米[13]，而盲区深度范围通常为工程勘察中的重点区域，容易影响勘探效果。针对传统瞬变电磁法工程勘探中存在的“盲区”影响，艳鞠、席振铎和 Pellerin 等国内外学者在浅层 TEM 仪器研制上取得了重要进展。其中，席振铎等(2014)提出的基于等值反磁通原理的瞬变电磁法(OCTEM)采用反向对偶磁源中心回线装置，能有效消除

收发线圈互感影响,可大大减小浅层探测盲区,提高了浅层探测分辨率;该技术采用了微线圈收发一体装置,克服了隧道有限施工场地的制约,可以开展高密度测量,地下物理信息量成倍增加;近场源测量方式使用有用信号提高了3~4个数量级,有效克服坑道电磁干扰,提高了电磁信息的可靠性。目前 OCTEM 已广泛应用于地质灾害调查、铁路勘察、公路病害探测等复杂工程中[14]-[19]。

基于 OCTEM 的优势,本文结合个旧市大屯锡矿矿区的地质情况,将 OCTEM 应用于该矿区巷道的底面,针对矿山中各类型矿体、断裂构造等进行勘探,将得到的电阻率断面图与提供已知的地质资料和后续钻孔资料进行综合对比分析,验证了 OCTEM 在矿井超前探测的可行性和有效性,为该矿区后续寻找凹兜状花岗岩体、研究次级凹兜矿体电磁响应规律提供了一种新的方法思路,为井下坑道超前勘探工作提供了一种新的物探方法。

2. 方法原理及采集设备

2.1. 等值反磁通瞬变电磁法

等值反磁通瞬变电磁法(Opposing coils Transient Electromagnetics, 简称 OCTEM)的收发装置,示意见图 2,即以等值反向磁通规律为理论依据,采用上下两层物理结构相同、平行共轴的线圈作为发射线圈,发射时通以等值反向的电流,向地下发送一次脉冲磁场。接收线圈位于双线圈源的中间平面位置(即等值反磁通平面),用于接收导电大地介质感应出的垂向二次磁场。从理论上讲,两发射线圈的材料性质和几何结构等参数完全相同,当发射电流关断时,上、下两线圈中的电流/时间同步且大小相等方向相反,根据矢量叠加原理,两线圈在中间对称平面上产生的磁通相互抵消,接收线圈放在这个平面内,一次场磁通量恒为零,但是其他空间位置仍然保有一次场,接收线圈所接收的信号是地下介质产生的纯二次场的响应[20]。

从 OCTEM 装置双线圈源的一次场磁力线径切向空间分布图(图 3)上看,因为两个反向线圈磁源产生的磁通等值且反向,在双线圈磁源的横向中间相互抵消,此处的磁力线是水平的,为一次场零磁通面,此平面不受一次场关断影响,接收线圈在此接收地下介质产生的纯二次场的响应,根据接收到的二次磁场随时间的衰减规律获得地下介质的地电信息,减少浅层勘探盲区。

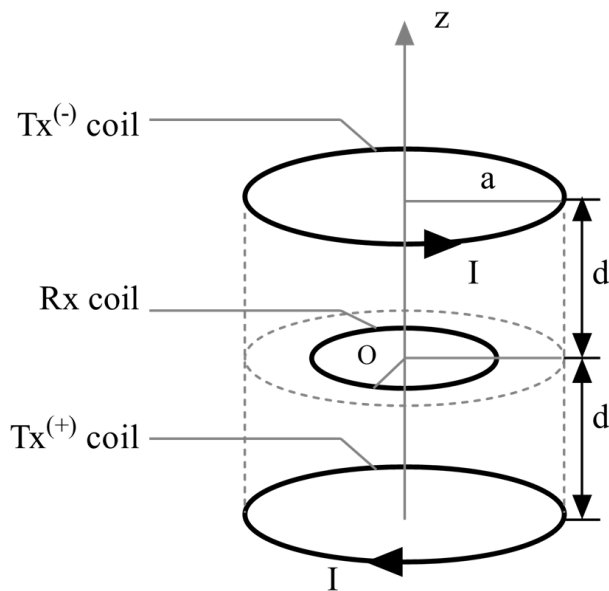


Figure 2. Schematic diagram of equivalent anti magnetic flux transient electromagnetic equipment

图 2. 等值反磁通瞬变电磁装备示意图

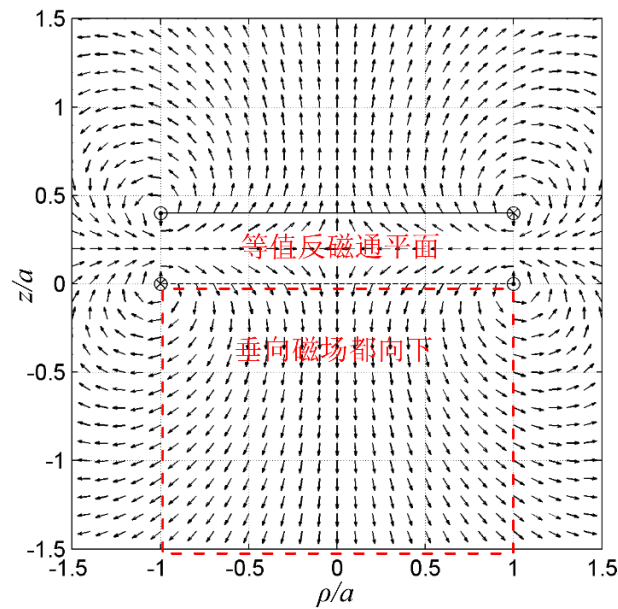


Figure 3. Primary magnetic field synthesized by equivalent antimagnetic flux double coil source

图 3. 等值反磁通双线圈源合成的一次磁场

2.2. ADTEM-18 型瞬变电磁系统

本次物探工作主要采用仪器是湖南五维地质科技有限责任公司和中南大学联合研发出来的 ADTEM-18 型高精度瞬变电磁系统(图 4, 图中从左到右依次为: 传输电缆、仪器主机、天线, 下方为: 支撑杆)。ADTEM-18 型等值反磁通瞬变电磁仪是一套针对井下物探空间狭小、环境复杂开发的收发天线一体化小型瞬变电磁设备, 仪器主机通过 Wi-Fi 与操作 PC 连接来实现数据采集显示控制。ADTEM-18 型系统基于等值反磁通原理, 消除了收发线圈存在感应耦合的技术难题, 实现了浅层地质体纯二次场直接测量。整体系统与五维地科研发用于在地面进行勘探工作的 HPTEM-18 型类似, 但在各参数上具有一定区别, ADTEM-18 型发射天线体积 $19\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 17.5\text{ cm}$, 重 2.9 kg , 配备伸缩式非金属支撑杆, 可按工作需求改变长度。ADTEM-18 设备体积小, 携带方便, 在井下对坑道掌子面、坑道侧壁、坑道顶面进行测量十分轻便、高效, 同时设备测量数据重复误差精度均可达 1% , 具有抗干扰能力强、系统分辨率高、系统采样率高、采集速度快等优势。



Figure 4. ADTEM-18 high precision transient electromagnetic system

图 4. ADTEM-18 型高精度瞬变电磁系统

3. 地质概况及地球物理特征

3.1. 研究区地质特征

研究区位居环太平洋成矿带与地中海-喜马拉雅成矿带的交汇处，其大地构造位置处于印度板块、欧亚板块、太平洋板块碰撞相接的部位。区域地质构造位置为扬子准地台、华南褶皱系及唐古拉-昌都-兰坪-思茅褶皱系，三大地质构造单元汇聚地带之华南褶皱系右江地槽褶皱带西南角(图 5)。研究区地壳构造发展演化先后经历了地槽、地台以及地台活化多个大地构造演化阶段，区内区域性构造亦十分发育，并伴随着不同的大地构造演化阶段均显示出多期活动的特点，而不同方向的深大断裂相互交织、叠加，形成了本区复杂的构造格局，也使得整个成矿区处于多条深大断裂的交汇部位。这些断裂包括有通过矿集区的南北向小江断裂；北西向的红河断裂、哀牢山断裂、屏建石断裂；北东向的师宗-弥勒断裂、南盘江断裂等[21]。



Figure 5. Schematic diagram of geotectonic units in Gejiu mining area

图 5. 个旧矿区大地构造单元示意图

研究区地层主要为中三叠统马拉格段(T2g2)、卡房段(T2g1)碳酸盐类地层，岩性主要为白云岩、灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩等，其中 T2g51 层和 T2g61 层是大箐东最主要的含矿层。区内地壳活动强烈，经历了长期的构造运动，呈明显多期次性，地质构造极为复杂，褶皱、断裂纵横交错，节理、裂隙较为发育。研究区主要矿化类型为氧化型与矽卡岩硫化物型，氧化矿矿体受控于滑脱带和断裂，沿不同层位延伸，其形态复杂，包括层状、不规则串珠状、不规则带状、透镜状、脉状；矽卡岩硫化物型分布在花

岗岩与大理岩或白云岩的接触带，呈脉状及块状，围岩为矽卡岩[22]。

花岗岩是矿区的主要岩浆岩，地表未见出露，隐伏于地下几百至千余米，在矿区分布广泛，是本区锡多金属矿床成矿金属元素的物质重要来源之一，同时也为成矿热液活动提供了动力和热源。矿体形态主要取决于花岗岩岩体的产出形态，所以解译出高阻花岗岩的分层界线对该区域找矿有着重大的意义。花岗岩突起高度超过矿区 1360 中段形成近似北东向花岗岩脊状突起，在花岗岩大型突起之上，由于多组断裂构造的影响，岩体沿断裂破碎带、层间破碎带、构造扎根等部位多会形成岩舌、岩枝状伸出的突起，局部会形成多层次凹陷，这些部位都是锡铜多金属矿床成矿和赋存的良好场所，本次寻找的矿体多分布在这些部位。

由于坑下物探数据采集已在较深地下坑道中，已属于地下深层围岩，测量出的电阻率普遍偏高，所以围岩破碎、节理发育以及富水区电阻率在几百欧姆·米左右，表现为低阻特征；浅层氧化矿岩体电阻率在几百欧姆·米至两千欧姆·米左右，表现为中低阻特征；处于接触区域的含硫化矿矽卡岩在几百至几千欧姆·米，表现为中阻特征；地下较完整的花岗岩电阻率在几千至几万欧姆·米，表现为高阻特征。各类异常特征的瞬变电磁法反演电阻率值见表 1。

Table 1. Statistical table of physical parameters in the work area
表 1. 工区物性参数统计表

地层岩性	反演电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$
围岩破碎、节理发育、富水区、	≤ 300
含氧化矿岩体	300~2000
含硫化矿矽卡岩	500~2500
较完整花岗岩	≥ 2500

3.2. 工作布置及质量评估

本次井下巷道中的数据采集均采用定点测量的方式，在矿区共选取 2 条巷道，布置了 2 条测线，沿选定巷道底面布置测线，按 2 米为间距布置测点，逐个测点进行测量，具体工作布置见表 2。对每个测点进行测量形成一个剖面，对剖面数据进行处理及反演，最终成图并解释。根据反演目标深度，以及坑道中数据受干扰情况选择仪器参数：中心采样频率 25 Hz，发射电流为 10.5 A，叠加次数为 500 次，关断时间为 0.07 ms。

考虑异常和现场施工情况的制约，检查点均匀分布于每条测线，检查点占工作总量的 5% 以上。OCTEM 按以下公式计算误差，各受检查点小于噪声电平测道的不可靠观测值以及突变值不参与到统计中。计算公式如下：

$$M = \sqrt{\frac{1}{2nm} \sum_{i,j=1}^{n,m} \left(\frac{v_j(t_i) - \bar{v}_j(t_i)}{\bar{v}_j(t_i)} \right)^2}$$

其中 m 为检查点数。检测点与原测点的均方相对误差在 5% 以内满足规范标准。

Table 2. Line work arrangement
表 2. 测线工作布置

序号	测线名称	点距(m)	完成线位(m)	实测点(个)	备注
1	DT40	2	0~96	49	巷道底面测量
2	DT50	4	4~172	43	巷道底面测量

3.3. 数据处理

采用五维地科公司研发的 HPTEMDataProcess 软件、Golden Software 公司研发的 Surfer 绘图软件、Autodesk 公司的 CAD 绘图软件对 OCTEM 资料进行处理及绘图，处理流程如图 6 所示。具体过程如下：

- 1) 首先用 HPTEMDataProcess 软件对野外数据进行剔飞值、去噪等数据编辑(处理数据时使用了加权指数模型的非线性拟合算法对数据进行拟合去噪，以数据处理的手段很大程度的降低了巷道中电磁干扰的影响)；
- 2) 用 Surfer 软件进行地形校正、平滑滤波等数据预处理；
- 3) 通过参数分析、曲线类型分析、视电阻率分析等进行定性分析；
- 4) 通过正演分析、模型拟合反演、拟二维反演等方法进行定量分析；
- 5) 参考已知地质资料，通过定性分析与定量分析进行综合解译。

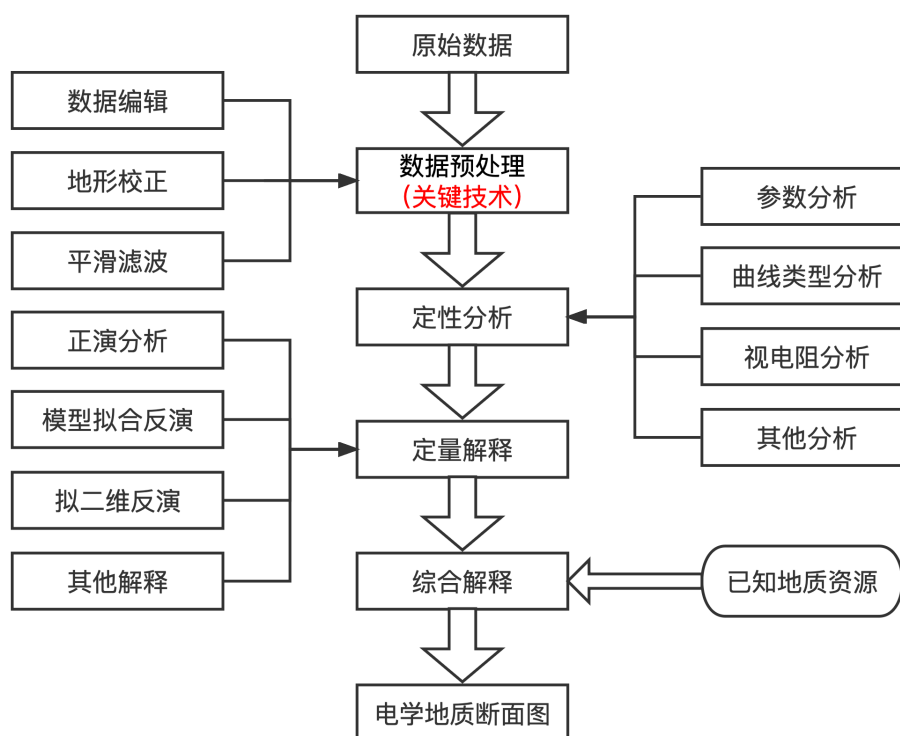


Figure 6. Data processing flow chart
图 6. 资料处理流程图

4. 结果推断与分析

以下是在研究区井下巷道中高精度瞬变电磁测量试验的成果与提供的已知地质资料的对比、推断及分析。

DT40 测线在已开挖巷道中巷道底面布置，图 7 为 DT40 测线的 HPTEMDataProcess 软件成的原始电阻率反演剖面图，图 8 为经过数据处理后的剖面图。从图 8 中横向上可以看出，浅部深度为 1~8 m 有一低阻异常带，与地质剖面上浅部矿带位置对应；中部深度为 15~25 m、50~60 m 有低阻异常带，与已知地质剖面上硫化矿带的形态、大小和位置对应；深部深度为 80~100 m 整体呈现为高阻异常，且较好的反映出了花岗岩分界面。

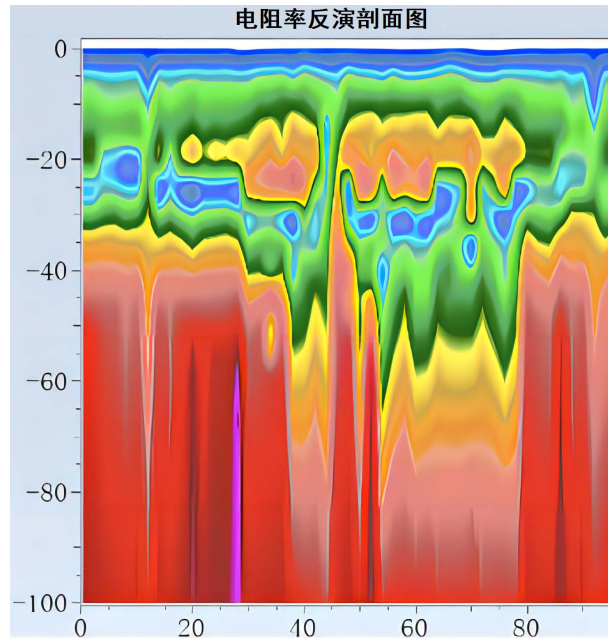


Figure 7. DT40 line TEM original resistivity inversion profile
图 7. DT40 测线瞬变电磁法原始电阻率反演剖面图

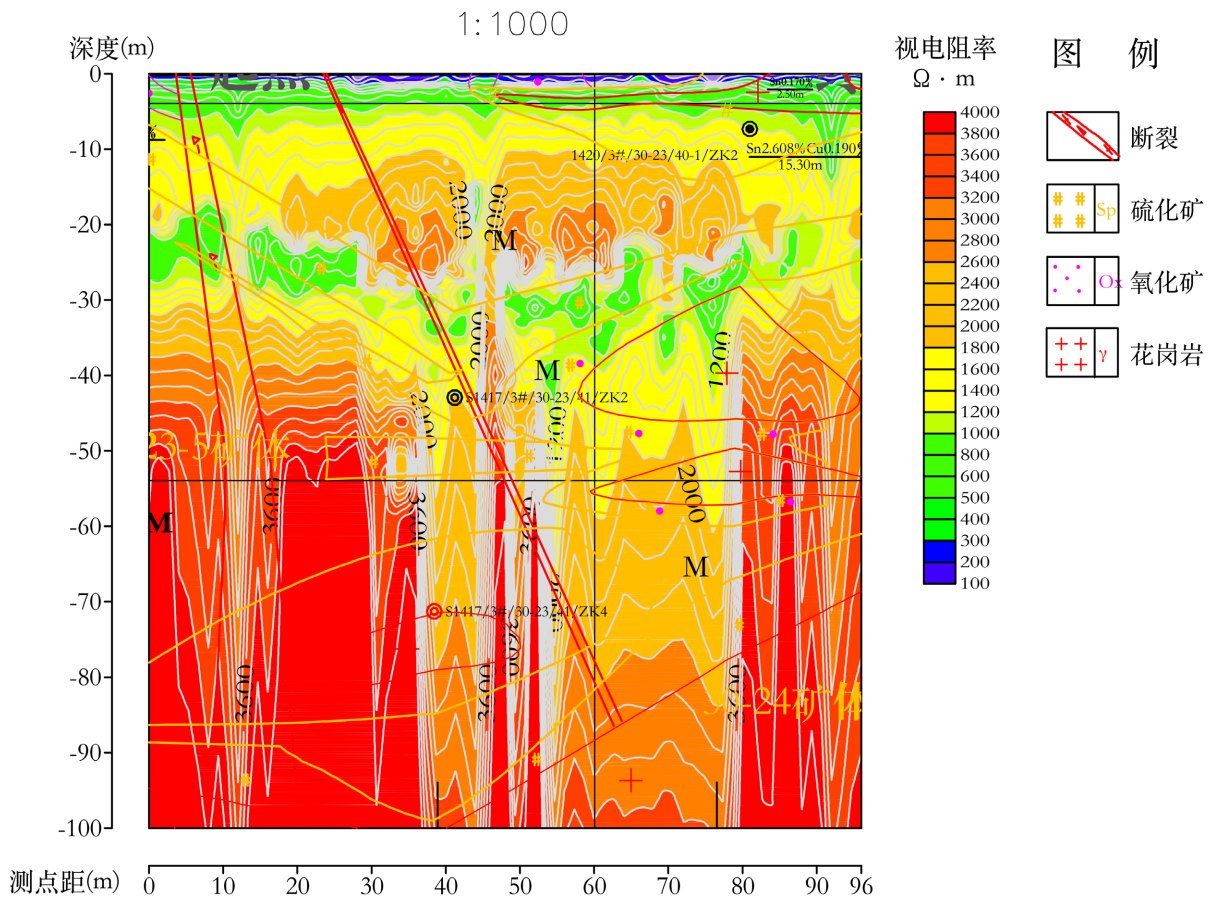


Figure 8. Profile of DT40 line transient electromagnetic method
图 8. DT40 测线瞬变电磁法剖面图

从图中纵向上可以看出，测线 5~15 m，深度 40 m 以下处存在有较连续的低阻凹陷，与剖面上的一条断裂破碎带对应；测线 35~45 m 深度 50 m 以下整体呈现低阻凹陷，反应了该位置的构造与硫化矿带；测线 50~80 m，深度 30 m 左右整体有较连续的低阻，与该段的硫化矿区对应。测线 60~80 m 段，深度 45~60 m 整体呈现为低阻异常，与该处硫化矿区对应。

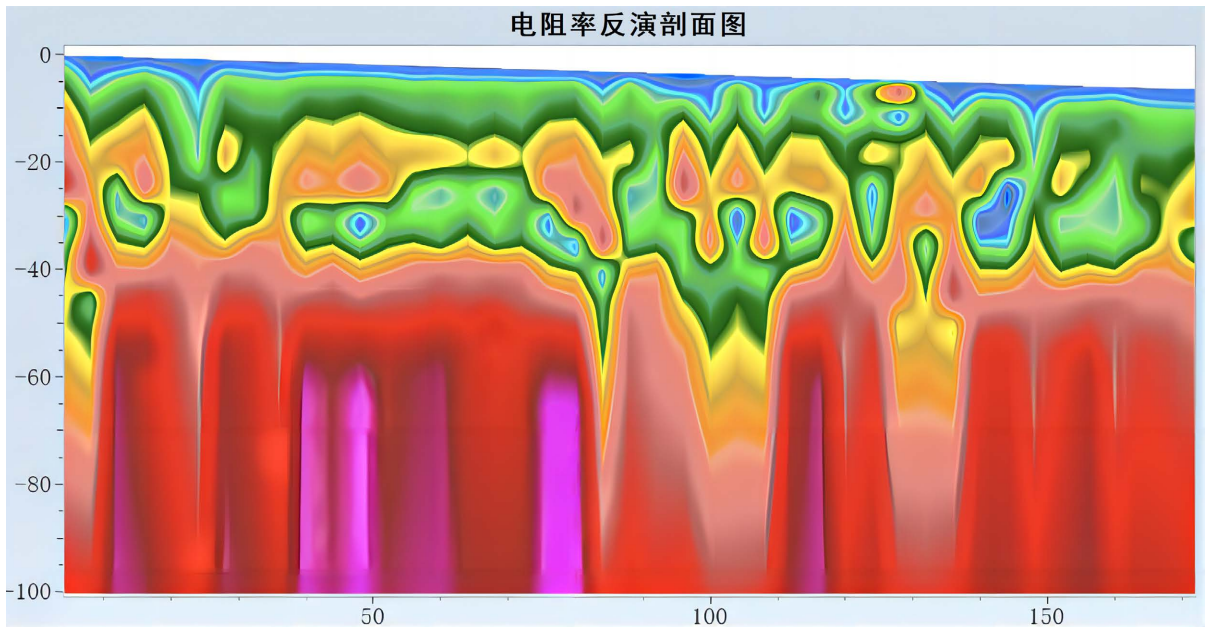


Figure 9. DT50 line TEM original resistivity inversion profile
图 9. DT50 测线瞬变电磁法原始电阻率反演剖面图

松树脚矿区坑下DT50线高精度瞬变电磁剖面图

1:1000

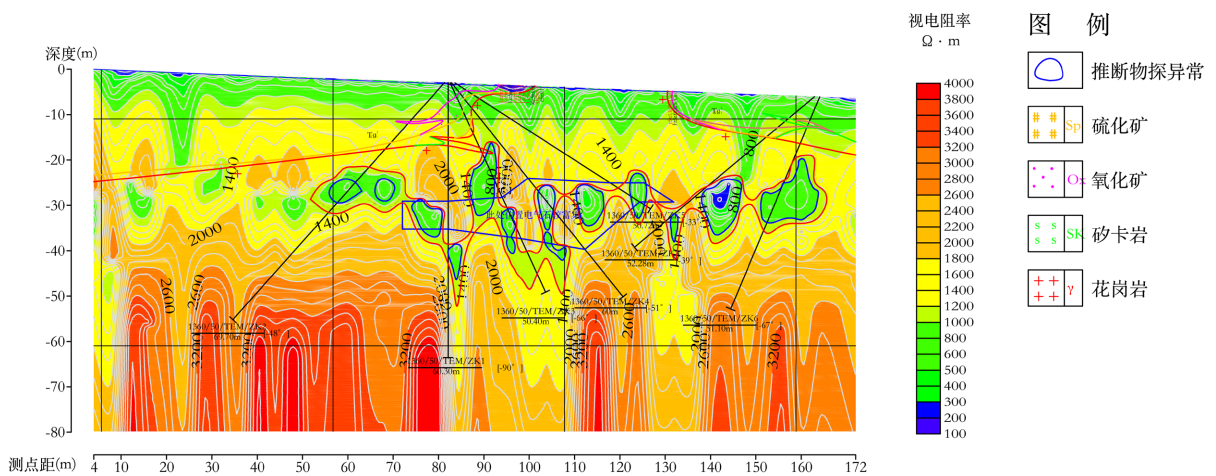


Figure 10. Profile of DT50 line transient electromagnetic method
图 10. DT50 测线瞬变电磁法剖面图

DT50 测线在已开挖巷道中巷道底面布置，图 9 为 DT50 测线的 HPTEMDataProcess 软件成的原始电阻率反演剖面图，图 10 为经过数据处理后的剖面图。从图 10 中上可以看出，中部深度在 25~40 m，测线 50~160 存在大范围的低阻异常区(红色圈定)，推断低阻区域有存矿可能。后期在测线 55~165 m 段按

我们在剖面图中圈定的低阻异常在巷道中设计两处钻孔施工位置共 6 个钻孔进行验证, 在测线 70~130 m 段深度 20~35 m 范围确定此处低阻异常区为电气石较富集区域。可见, OCTEM 对含金属矿区的反映较好, 为该矿区后续寻找凹兜状花岗岩体、研究次级凹兜矿体电磁响应规律提供了一种关键性的方法思路。

5. 结语

矿井下工作空间小, 干扰大, 技术要求高, OCTEM 设备接收发射固定一体, 设备轻便, 井下施工便捷, 作业效率高, 消除了一次场影响, 大大减小了浅层探测盲区。从本次勘探结果来看, OCTEM 在井下测量有着较好的效果, 对断层、破碎带、含金属矿区有着较敏感的反应, 呈现为低阻异常, 能准确判断它们的分布位置和范围; OCTEM 剖面图中等值线呈现低阻凹陷, 且趋势较连续的区域, 可推断为断裂、构造破碎带等; 出现相对低阻且等值线闭合或呈低阻的小凹陷, 该处可圈定为低阻异常区域, 可结合已知地质资料推断该低阻异常为含金属矿区或含水构造等。

本文验证了等 OCTEM 在矿井超前探测中的可行性和有效性, 为该矿区后续寻找凹兜状花岗岩体、研究次级凹兜矿体电磁响应规律提供了一种新的方法思路, 为在矿山深部发现盲矿体、增加资源储量, 延长矿山寿命提供了重要的勘探途径, 在类似矿井坑道的超前探测工作中也可以使用 OCTEM 方法进行勘探。

参考文献

- [1] Liu, Z.Q., Liu, L., Huang, M., Fei, H.C., Zhou, J., Zhang, Y.X. and Hao, Z.G. (2018) Supply-Demand Situation and Exploration of Mineral Resources in China during 2016-2017. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **92**, 1245-1246. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13602>
- [2] 何继善. 有色金属危急矿山的地球物理对策[J]. 中南矿冶学院学报, 1993(4): 435-442.
- [3] 陈挺, 余舟, 庞有炜, 严迪, 郑福龙, 韩磊, 冉中禹, 刘鹏. 等值反磁通瞬变电磁法在成都市地下空间资源地质调查中的应用[J]. 四川地质学报, 2021, 41(2): 299-305.
- [4] 肖刚, 连违章, 马得祥. 等值反磁通瞬变电磁法在多金属矿探测中的应用[J]. 甘肃科技, 2021, 37(15): 34-35, 40.
- [5] 高远. 等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1404-1408.
- [6] 孙燕, 刘建明, 曾庆栋, 张作伦, 张松, 汪在聪, 褚少雄, 叶杰, 于昌明. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010(6): 2096-2101.
- [7] 徐爱, 刘长会, 张强. 矿井综合物探技术在巷道前方导水构造探测中的应用[J]. 煤炭科技, 2016(2): 37-38. <https://doi.org/10.19896/j.cnki.mtkj.2016.02.018>
- [8] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 金胜, 梁连仲, 牛建军, 王绪本, 林品荣, 姚长利, 高文利, 顾建松, 韩立国, 蔡耀泽, 张金昌, 刘宝林, 赵金花. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629-3664.
- [9] 柳建新, 赵然, 郭振威. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 151-160.
- [10] 牛之璉. 瞬变电磁测深法对导电层的探测能力[J]. 地质与勘探, 1992(7): 37-40.
- [11] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.
- [12] 龙霞, 席振铎, 周胜, 侯海涛, 王亮, 薛军平. 等值反磁通原理瞬变电磁法探测薄层能力[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 753-759.
- [13] 赖耀发, 席振铎, 张峰, 石彦良, 李红星, 向胤合. 等值反磁通瞬变电磁电阻率谱系法探测铝土矿[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 3264-3272.
- [14] 刘杰, 段炜, 王俊, 刘成, 戴国强. 等值反磁通瞬变电磁法在公路隧道塌陷区的探测应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1470-1475.
- [15] 周超, 赵思为. 等值反磁通瞬变电磁法在煤窑采空区中的应用[C]//中国石油学会(CPS), 国际勘探地球物理学家学会(SEG). CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社, 2018: 1420-1423.

- [16] 辛静. 等值反磁通瞬变电磁法在浅部采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 718-722.
- [17] 谢嘉, 刘洋, 李兴强, 鲁玉龙, 李干龙. 等值反磁通瞬变电磁法在岩溶塌陷区探测应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 212-218, 226.
- [18] 李青, 周胜, 肖晓, 任政勇, 汤井田, 唐韬. 基于等值反磁通瞬变电磁法的公路路基病害探测研究[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 90-96.
- [19] 李华, 王亮, 韩浩东, 杨剑, 王桥, 王东辉, 席振铎, 龙霞, 张伟, 廖国忠. 红层地区城市地下空间膏盐富集层探测新方法——以成都市国际生物城为例[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1793-1803.
- [20] 席振铎, 龙霞, 周胜, 黄龙, 宋刚, 侯海涛, 王亮. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3428-3435.
- [21] 芦磊, 邓铁林, 栗敬书, 倪春中. 个旧锡矿高松矿田芦塘坝矿段探采对比分析[J]. 现代矿业, 2016(3): 152-155, 158.
- [22] 刘春学. 个旧锡矿区高松矿田综合信息成矿预测[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.