

CSAMT 法在西北深部探矿中的应用研究^①

柳建新^{1,2}, 郭荣文¹, 韩世礼¹, 刘春明¹

(1. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南继善矿业有限公司, 长沙 410012)

摘要:可控源音频大地电磁法(英文简称CSAMT)是20世纪80年代中期兴起的一种测量卡尼亚电阻率和相位的电磁测深技术。由于它探测深度大、横向分辨率高、抗干扰性能强,因此在深部找矿的勘探中有着重要指导意义。笔者使用美国ZONGE公司生产的GDP-16大地电磁测量系统,利用的工作频率为1~4096Hz,对西北某矿区的外围和深部进行了实际勘探。证明该方法在矿区深部及外围找矿(主要是铁矿)具有有效性。

关键词:可控源音频大地电磁法;深部找矿;一维反演;二维反演;静态改正

中图分类号:P631.2;P631.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2008)03-0261-04

0 前言

目前,我国大多数矿山是20世纪60~70年代开发的,经过几十年的开采,不少大、中型矿山面临资源枯竭、生产停止、职工失业等窘境,因此,急需在矿山深部和外围发现接替资源,以解决矿山危机。而我国现阶段还处在浅部探矿和采矿阶段,现有的金属矿山探采深度多在300~500m,与发达国家的部分大型矿山采矿深度已达到了2000~3000m相比,还有很大潜力,因此,必须加强矿山深部和外围的找矿工作,寻找矿山的接替资源,延长矿山寿命。

CSAMTW是一种利用接地水平电偶源为信号源的频率域电磁测深法,CSAMT采用了大功率的人工场源,具有信号稳定、信噪比高、穿透能力强、探测深度大等特点,因此在深部找矿中具有重要地位。为了在西北某矿区寻找接替资源,摸索一种有效的测深方式,笔者利用美国Zonge公司生产的GDP-16观测系统在该地区进行了期望勘探深度为1.5km的测深,并取得了良好的效果。

1 深部探矿的基本原理

CSAMT法是一种利用能控制的人工场源的电磁法,它以麦克斯韦方程组为理论基础。其中,最普通的场源是水平电偶极子,即是把可以控制频率的发电(送)机发出的交变电流,接在两个接地电极上,通过长导线将交流电供入大地。不妨假设大地是一均匀的导电介质,

那么磁场在其间传播应满足麦克斯韦方程组:

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div} \mathbf{D} = q \quad (3)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

其中: $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

上式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量, $\mathbf{D}$ 为电感应强度矢量, ϵ 为介电常数, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量, $\mathbf{B}$ 磁感应强度矢量, μ 为介质的导磁率, $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量, σ 为介质的导电率。

本次做CSAMT法探测时,电源提供的是谐变电流,由此场源产生的电磁场也应该是谐变的,因此可将(1)、(2)、(3)、(4)式做适当的变换,导出它在均匀的大地导电介质中的传播方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (6)$$

其中: $k^2 = \epsilon \mu \omega^2 + i \sigma \mu \omega$ 为波数的平方。

地球体内物质的电导率 σ 一般大于 10^{-4} , 而其介电常数 ϵ 一般为 10^{-12} f/m , 所以在CSAMT法常应用的频率内, 表现为传导性, 这也就是准静态条件。在满足准静态及波场为平面波的条件, 假设用偶极距为 L_{AB} 的水平偶极子向均匀大地供以 $I = I_0 e^{-i\omega t}$ 的谐变电流, 在直角坐标系下求解可得到电磁场各分量的表达式:

$$E_x = \frac{IL_{AB}}{2\pi\sigma r^3} (3\cos^2\theta - 2) \quad (7)$$

① 收稿日期:2007-12-06 作者简介:柳建新(1962-),男,中南大学教授,博士生导师,主要从事勘探地球物理的研究,现任中南大学信息物理工程学院院长。

$$E_y = \frac{3IL_{AB}}{4\pi\sigma r^3} \sin 2\theta \quad (8)$$

$$E_x = (j-1) \frac{IL_{AB}}{2\pi\sigma r^2} \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \cos\theta \quad (9)$$

$$H_z = -(j+1) \frac{3IL_{AB}}{4\pi\sigma r^3} \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \cos\theta \sin\theta \quad (10)$$

$$H_y = (j+1) \frac{IL_{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} (3\cos^2\theta - 2) \quad (11)$$

$$H_x = j \frac{3IL_{AB}}{2\pi\mu\omega r^3} \sin\theta \quad (12)$$

式中, IL_{AB} 为供电偶极长度, r 为场源到接收点之间的距离, θ 为场矢量同 z 轴的夹角。

为了便于操作,我们在野外一般测取电场的 x 分量,磁场的 y 分量,这样就可以得到均匀大地的视电阻率:

$$\sigma = \frac{\mu\omega |H_y|^2}{|E_x|^2} \quad (13)$$

所以我们可以得到它的视电阻率为:

$$\rho = \frac{|E_x|^2}{\mu\omega |H_y|^2} \quad (14)$$

又根据电磁波的趋肤效应理论,导出了趋肤深度公式:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (15)$$

从(15)式可见,当地表电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比。即高频时,探测深度浅;低频时,探测深度深。CSAMT 就是利用这一原理,通过人工改变发射频率来达到改变探测深度的目的。依据(15)可知,当地表电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与发射的频率成反比。当频率高时,探测深度浅;低时,探测深度深。我们就是通过改变发射频率来改变探测深度,从而达到获得深部信息的目的。

2 工作方法

2.1 野外装置布置方法选择

根据矿区实际及工作要求我们设计了供电偶极子长度 1.7km,收发距 $R = 6.0 \sim 6.2$ km,电流为 10A,中心距偏移约 7° ,测点点距为 20m,测量偶极子长度为 40m,每站测量 5 个测点。场源离接收站距离为 6.0~6.2km,大于 3 倍期望的勘探深度 4.5km,达到了测量远场的要求。

这样布置可以把发射电磁波在测区的传播看成是平面波传播。保证了数据是在远场条件下获得。

综合本区以往物性资料,为尽量保证划分的局部岩层分界线的准确性,测试数据需要保证一定的密度。笔者使用美国 ZONGE 公司生产的 GDP-16 大地电磁系统,工作中采用标量谐波 CSAMT 测量方式,按矿区实测平均电阻率值计算,最终选择工作频率为 1~4096Hz,这样的频段达到的最大勘探深度已经远大于工作要求的 1500m。

2.2 质量评定

为了保证本次工作的数据质量,在工作开始前笔者

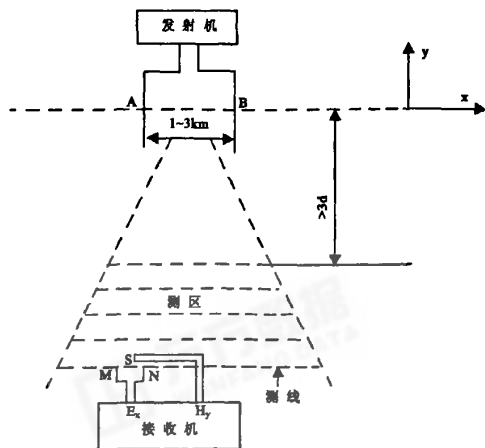


图1 CSAMT 工作布置图

Fig. 1 Sketch map showing the disposal of CSAMT

对测区进行了干扰水平测试和电流大小测试,经测试本区工业干扰平均水平约为 $0.50\mu V$,供电电流为 10A 时,测深信号约为 $30 \sim 300\mu V$,说明采用该水平的供电电流在大多数情况下能保证 60~600 倍的信噪比。

野外实际测量证明本区干扰信号小,信号稳定可靠。在数据采集时采取增加叠加次数、压制长周期干扰信号和实时监控数据标准离差等办法确保数据质量,一般数据叠加次数为 32~16384 次,数据离差 $SEM < 15\%$ 。经检查点计算表明,视电阻率相对均方误差为 2.67%,说明其质量符合物探工作规范规定的 10% 精度要求,数据采集质量可靠。

3 CSAMT 法资料处理及结果解释

3.1 数据预处理及静态改正

由于工作地区干扰信号小,数据质量好,因此,本次资料预处理工作的任务主要是识别个别单点干扰,其次是通过自行开发的可视化专用软件进行静态效应改正,消除浅部不均匀地质体的影响。以其中一线中的 8、9 号点为例,从可视化静态改正图(图2),可以看到 8、9 两点视电阻率相差几十倍,但曲线形态一致,说明这两个点的地下构造一致,进行静态改正后两条测线将完全一样。

3.2 数据反演与解释

反演的目的是将经过预处理后的数据通过建模,利用相关软件进行处理,在满足给定的精度条件下输出断面电阻率,供后续作图解释。

对本次各剖面数据处理分别采用美国 Zonge 公司提供的一维和光滑二维反演软件、中国地质大学开发的二维反演软件和笔者自行研发的约束二维反演软件进行试验性反演。

3.2.1 同一剖面一维反演和二维反演及其解释

在同一剖面的一维(图3)和光滑二维(图4)反演的卡尼亚电阻率断面图上可以看出,该剖面整体呈高阻反

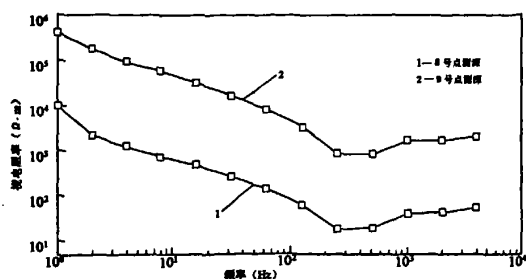


图2 静态改正示例图

Fig. 2 Static correction illustration

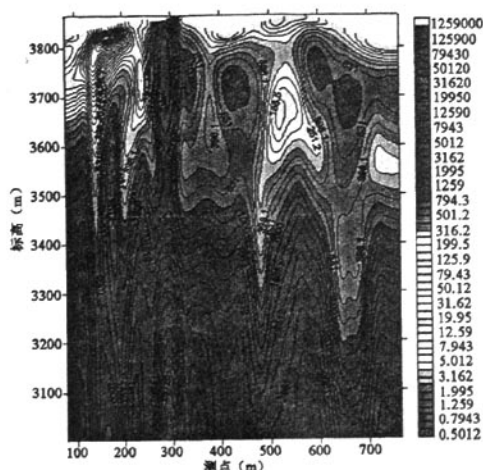


图3 某剖面的一维反演结果

Fig. 3 One-dimensional inversion of some profile

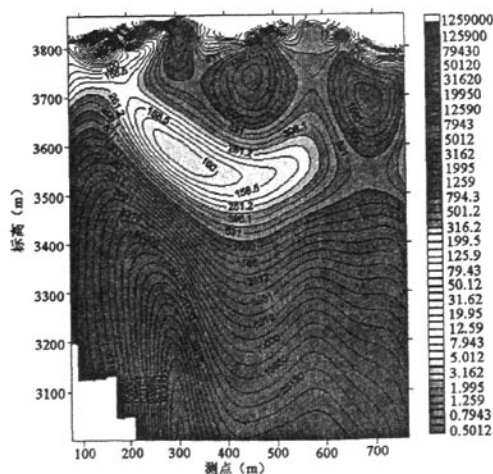


图4 某剖面的二维反演结果

Fig. 4 Bi-dimensional inversion of some profile

映,只是在局部有些低电阻率带,该低阻带视电阻率很小,是所测几条线中电阻率最低的,表明该处存在一直

达地面的构造带(矿化带)。从光滑二维反演断面图上可以看出,该剖面电阻率横向延续性好,深部不存在低阻体,上述低阻异常向下延伸至约3400m标高后尖灭。

综合来看,一维或二维反演断面图所反映的物性差异整体上是一致的,只是一维反演图的高阻异常和低阻异常不如光滑二维反演的连贯,光滑连贯二维反演异常能清晰的反映出深部地层界线和异常特征。从二维反演图(4)中可以辨明在标高3400m处有一舌状低阻构造带一直延伸到地表,低阻带的存在则说明沿剖面有构造存在(如断层存在或低阻覆盖增加)。

通过对矿区的地质条件和物性条件进行综合分析,在剖面划分出一个EW方向倾斜的低阻带,该低阻带从100号点的地表倾斜延伸到600号点。标高为3400m,在300~500号点之间,标高3600m处出现强烈的低阻矿化体异常,电阻率在100~200Ω·m之间,与围岩电阻率相比降低幅度为一个数量级,矿化体最大延深可达到400m,电阻率由高到低的突变可以认为是大理岩与岩体的过渡层,根据电阻率异常的形态,可以大致确定实际接触带的形状走向及部位。

3.2.2 综合各剖面的解释

把几个剖面图联合起来分析,做成不同剖面的切片图,可以大体上确定深部矿体的产状、走向和埋深等特征。对本工作区的六条线进行的CSAMT法测量,其中三条测线的二维反演图(5图)所反映出来的地质构造可以得出在标高3400m以上存在一个SN走向的低阻带,刚好与测线成准90°,并且低阻异常带从7线到8线有逐渐加深的趋势,其中7线和0线的低阻异常带被高阻带分隔,综合分析这高阻体可能是若干岩脉,而且低阻体都延伸到地表,该低阻带应该是构造带的反映。

通过以上综合分析,可以确定隐伏矿体的走向、倾向和侧伏向,同时,也可以大致确定低阻体构造带的形态、产状和埋深特征。在剖面上电阻率纵向延续性好,深部基本不存在局部低阻体,同时低阻体也有很好的纵向延续性。在100~200号点间,地表有一SN方向半圆状的有待于封闭的低阻体,可能由浅部风化层引起的,笔者把下一步工作重点放在了深部异常。

4 钻孔验证

由于该地区的环境比较恶劣,交通不便。根据测量成果并结合地质资料只对一些条件较好的区域进行了钻孔验证和浅井工程,结果在标高3600m处钻到了岩石破碎带,破碎带深度与解释深度只有10~20m的误差,其几处的验证结果也与解释结果接近。矿化体更详细的信息有待进一步的地质工作。

总的来说,CSAMT法在该区进行深部地球物理勘探是比较成功的,也说明在该地区应用CSAMT法探测低阻体是有效的。

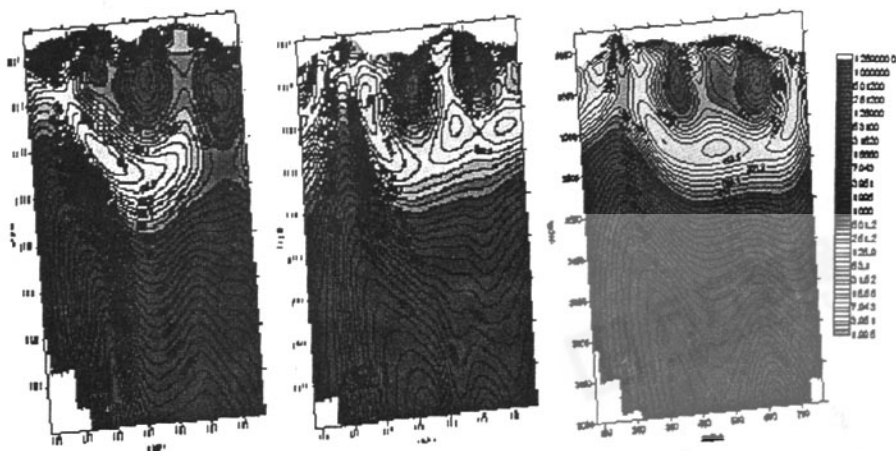


图5 剖面的二维反演对比图

Fig. 5 Comparing diagram for bi-dimensional inversion of some profile

5 总结

对西北某矿区采用CSAMT法探测和划分岩体隆起及构造接触带是较为有效的,特别是对比一维反演成果图和二维反演成果图能很好地划分高阻体和异常接触带。经后期验证与地下构造较吻合,对寻找深部矿化体有很好的指导作用。因此,CSAMT法可作为寻找危急矿山接替资源或深部矿的一种有效手段。

参考文献:

- [1] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业大学出版社,1998.
- [2] 翟裕生,邓军,王建平,等.深部找矿研究问题[J].矿床地质,2004,23(2):142-149.
- [3] 吴翥苹,石昆法,李荫槐,等.可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J].地球物理学报,1996,39(5):712-717.
- [4] 石昆法,张庚利,李英贤,等.CSAMT法在山东蓬莱地区层间滑动角砾型金矿成矿预测中的应用[J].地质与勘探,2001,37(1):86-90.
- [5] 左仁广.解决资源危机矿山的策略与方法[J].中国矿业,2005,14(7):44-47.
- [6] 杨生,施婉华,王庆乙,等.CSAMT的非远场改正和二维解释问题[J].地质与勘探,1993,29(9):42-48.
- [7] 席振铎,鲍光淑.试论HACSAMT法[J].物探与化探,1996,20(5):397-400.
- [8] 王赞,杨德义,石昆法.CSAMT法基本理论及在工程中的应用[J].煤炭学报,2002,27(4):383-387.

Application of controllable source acoustic-frequency magnetotelluric method (CSAMT) to prospecting in deep part of Northwest China

LIU Jian-xin^{1,2}, GUO Rong-Wen¹, HAN Shi-li¹, LIU Chun-ming¹

(1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Geosun Mining Industry Co., Ltd, Changsha, 410012, China)

Abstract: CSAMT is a magnetotelluric sounding technology on Cagniard resistivity and phase, which is arisen in middle 1980s of last century. Because of its deeper sounding, high horizontal resolution and strong anti-interfering ability, it has become an important guidance for deep part prospecting. An actual exploration in the periphery and deep part of some ore area in Norwest China has been operated by using GDP-16 magnetotelluric sounding system with its working frequency in the range of 1~4096Hz, which is made by ZONGE company of USA. The exploration has proved that CSAMT is an effective method for prospecting in deep part and periphery of ore area (mainly the Fe deposits).

Key Words: controllable source audio-frequency magnetotelluric method, prospectin in deep part, one-dimensional inversion, bi-dimensional inversion, static correction