

CSAMT 在陕西凤太地区 寻找隐伏金属矿上的应用

杨彦峰¹, 杨 生², 周振义³

(1. 河南有色地质矿产局 第一地质大队, 河南 安阳 455000;

2. 有色金属矿产地质调查中心 北京中色物探有限公司, 北京 100073;

3 华东有色地质勘查局 八| 四队, 江苏 镇江 212005)

摘 要: 文章介绍了可控源音频大地电磁法(CSAMT)在陕西凤(县)太(白)地区寻找隐伏金属矿上的应用效果。首先在已知地质剖面上进行了方法的有效性研究,确定合理的数据处理解释方法,认识矿体与 CSAMT 异常的对应规律,进而根据区域地质背景、成矿条件,在确定了勘探区后,开展了 CSAMT 的探测研究。通过对 CSAMT 资料的数据处理,定性、定量解释和地质推断,圈定出有望的隐伏矿体异常及位置。

关键词: 可控源音频大地电磁; 卡尼亚电阻率; 近场区; 远场区; 静态改正; 博斯蒂克反演; 陕西省
中图分类号: P618.4; P631.325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2002)02-0131-05

1 引言

陕西凤太地区是我国西部重要的铅锌多金属矿产区,扩大矿区规模,充分利用资源优势,发展当地经济,在西部开发工作中具有重要意义。可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种频率域的电磁勘探方法,它具有勘探深度大,分辨率能力强,观测效率高特点,是研究深部地质构造和寻找隐伏矿的有效手段。2000 年在凤太地区开展了 CSAMT 工作,首先在已知剖面进行了特殊地质地球物理环境的试验工作,尔后在成矿有望地段布置了 13 条勘探剖面,查明了勘探剖面的地质构造分布的断面特征,对异常体进行了空间定位。

2 地质及地球物理特征

2.1 地层

本区出露地层为中泥盆统古道岭组(D_{2g})和上

泥盆统星红铺组(D_{3x}),上覆盖第四系坡积物。

中泥盆统古道岭组(D_{2g}),主要岩性为中薄- 中厚层含碳生物灰岩、结晶灰岩、白云灰岩互层,间夹钙质、铁白云质千枚岩。上界面存在大型 Pb, Zn(Cu) 矿体,为主要含矿层位。划分古道岭组与星红铺组的分层界面,寻找界面矿体是本项目最重要的任务之一。

上泥盆统星红铺组(D_{3x})分两段,下岩性段:以薄层灰岩、碳质千枚岩、方解石绢云母千枚岩为主,该层直接覆盖在古道岭组灰岩上,为矿体上盘近矿围岩,一般比较稳定,围绕古道岭组灰岩,对称地分布在背斜两翼,但厚度变化大,从几米到百余米不等。有时因碳质含量高变成黑色碳质千枚岩。千枚岩普遍含有碳质,是本层的重要特征。上岩性段:以砂质千枚岩、绿泥千枚岩、铁白云质千枚岩、钙质绿泥石绢云母千枚岩及千枚岩为主。该层分布在矿区背斜两翼,基本对称,沿走向和倾向厚度均有较大变化。厚度从几米到几百米不等。

2.2 矿区构造

矿区构造主要为褶皱构造及断裂构造。

背斜褶皱的幅度和高度之比为 0.86- 1.3,两翼

收稿日期: 2002-01-15; 修订日期: 2002-04-15

作者简介: 杨彦峰(1966-),男,河南新密人,工程师,1990年毕业于中南工业大学地质系物探专业,主要从事地球物理勘探、特别是大地电磁法的应用与研究。

夹角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，属较紧密背斜，背斜构造决定了矿体的生成、形态及空间分布。

本区断裂构造分为纵向断裂及横向断裂。纵向断裂又称走向断裂，大体与地层走向一致。横向断裂较发育，规律性明显，大体上平行排列，垂直背斜轴和地层。

2.3 矿(化)体特征:

矿(化)体分为两种类型，一为界面矿体，为矿区的主要类型，矿体呈似层状产于古道岭组与星红铺组的分层界面上，且形成于背斜的轴部或两翼的界面接触带上。背斜及分层界面是界面矿体形成的两大条件。二为层间矿，为矿区的次要类型，多为小型矿体，层间矿主要受层位控制，主要含矿层位为古道岭组及星红铺组的下岩性段，矿体产于古道岭组和星红铺组的接触带两侧百米范围内的灰岩或千枚岩中，实际上，背斜褶皱亦是形成层间矿体的重要条件。

矿石以闪锌矿、方铅矿为主，伴有黄铁矿、少量黄铜矿等，近矿围岩碳化较强，并有黄铁矿浸染。

2.4 地球物理特征

为了能有效地开展 CSAMT 勘探工作，设计野外工作前，系统收集了本区矿体及围岩的电性资料(表1)。本区岩石电性主要分两大类，且差异明显，一为高阻的灰岩，二为中低阻千枚岩。矿体为低电阻体，含碳千枚岩及含碳灰岩可使电阻率明显降低，由于近矿围岩碳化较强，因此含碳围岩有可能成为寻找矿(化)低阻体的间接标志。从表1可看出，(1)古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩之间具有明显电性差异，可达数倍及一个级次以上，这是开展 CSAMT 法，利用电性划分层位并勾画构造形态的前提。(2)矿体与上下围岩之间具有明显的电性差异，当矿体具有一定厚度且埋深不甚大时可形成明显可区分的

表1 主要岩矿标本电阻率统计表

Table 1 Statistics of electric resistivity of specimen of major rocks in the mine area

岩性名称	电 阻 率 ($\Omega \cdot m$)			
	点数	最大值	最小值	平均值
绢云母千枚岩夹薄层灰岩	> 50	720	208	451
铁白云质千枚岩夹薄层灰岩	30	460	318	390
铁白云质千枚岩	14	536	215	431
含绿泥石铁白云质千枚岩	> 50	910	153	507
绢云母千枚岩	39	1322	318	647
含碳生物灰岩	> 50	7854	508	1922
硅化灰岩	3	16707	13938	15323
铅锌矿体	11	212	13	90

低阻异常；(3)近矿围岩明显碳化，扩大了矿化低阻

体的范围，强化了低阻异常，使得 CSAMT 法有可能更容易发现含矿异常。

3 CSAMT 法工作原理及数据处理方法

3.1 工作原理

CSAMT 法即可控源音频大地电磁法，采用人工场源，A、B 两供电电极距离为 $1 \sim 2$ km，测量工作布置在供电偶极中垂线 $\pm 45^\circ$ 的扇形面积内，测线与供电 AB 极连线平行。这时的场源可以认为是平面波，通过变换供电频率以达到测深的目的。一般供电功率 $15 \sim 30$ kW，供电频率采用 2^n 或 Hz ($n = -2, -1, 0, 1, \dots, 12$) 供电。

CSAMT 是在远场区测量相互正交的电场强度 E 和磁场强度 H 的水平分量，得出的是卡尼亚电阻率^[1]：

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

它的相位提供了另一个重要参数，称为相位差或阻抗相位：

$$\varphi = \varphi_E - \varphi_H$$

电阻率和相位共同提供了一个解释大地响应的完整数据表。根据理论推导，CSAMT 的勘探深度 D 与频率 f 、电阻率 ρ 之间的关系为： $D = 356 \sqrt{\rho/f}$ 。从这个关系式可以看出，随着供电频率从高到低，勘探深度从浅到深，从而达到测深的目的。当然，勘探深度与地下岩石的电阻率有关。测量的电极距控制了横向分辨率，通常为最小探测目标的二分之一。

3.2 数据处理方法

由于实测数据有干扰噪音，少数测点的个别频点明显出现非正常跳跃，对此采用三次样条方法进行圆滑编辑，综合参考该频点电场幅值、磁场幅值，标准离差及有关野外记录，力求内插尽量可靠。在低频，观测数据会受到场源的影响，对此要进行校正^[2]。由于地表局部电性的不均匀会使观测结果受静态影响使曲线在对数轴内平移，改正所采用的方法是，依据剖面相似原则进行校正，对曲线特征相同而视电阻率有突变的测点作平移校正。Bostick 反演是 CSAMT 的一个重要的反演手段，依据下列公式计算出不同深度的电阻率值：

$$\rho = \rho_a \frac{1 - \frac{d \log \rho_a}{d \log \omega}}{1 + \frac{d \log \rho_a}{d \log \omega}}, h = 356 \frac{\rho}{f}, \omega = 2\pi f$$

其中: ρ_a 为实测电阻率, ω 为角频率, ρ 为深度 h 上的真电阻率, f 为频率。

一维反演采用广义逆最小二乘法方法进行^[3], 通过假定不同深度的真电阻率进行反复拟合, 更改假定值, 直到理论数据和实测数据之离差达到最小。

4 CSAMT 法的应用效果

该地区采用 CSAMT 标量装置, 仪器采用加拿大凤凰公司的 V5 系统, 供电极距为 2.1 km, 供电电极为不锈钢电极组, 供电回路电阻小于 35 Ω , 采用单套频率供电, 频率从 4 096 ~ 0.25 Hz; 供电电流稳定, 高频电流为 2 A, 低频供电电流为 12 A, 接受偶极信号电压大于 0.5 mV; 收发距 9.4 ~ 12.8 km, 偶极距为 25 m。采用实时监控观测误差, 中频段(1 ~ 256 Hz) 实时误差 5%, 其余频段实时误差 10%, 单频点叠加次数在 10 次以上。随着供电频率由高到低, 可以获得逐个频

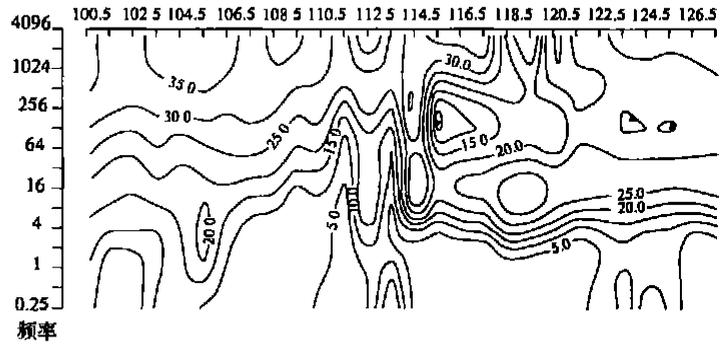
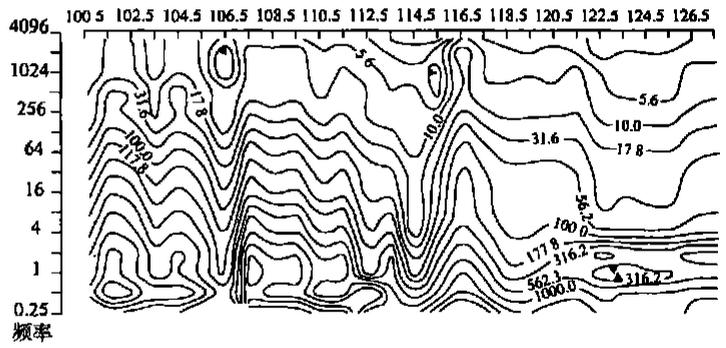


图 1 已知剖面上的试验结果

Fig. 1 Testing results along the known profile

点的卡尼亚电阻率, 得到测点的电阻率曲线。

图 1 是在已知剖面上的试验结果。1 024 Hz 频点以上总体表征为 10 Ω_m 以下的低阻, 反映地表浮

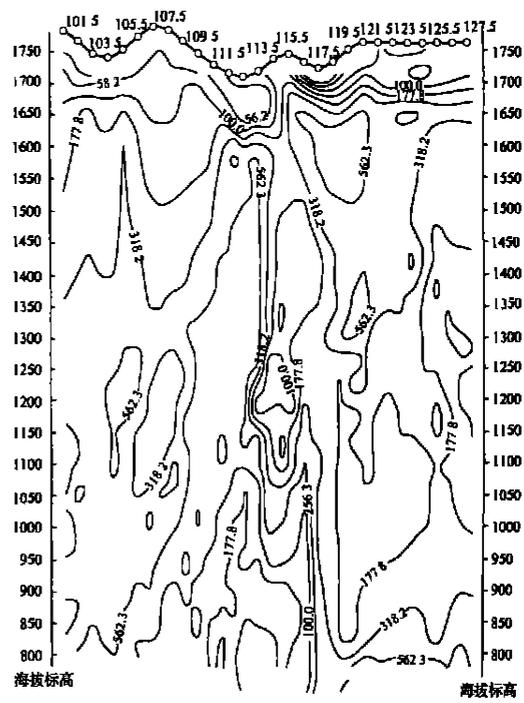
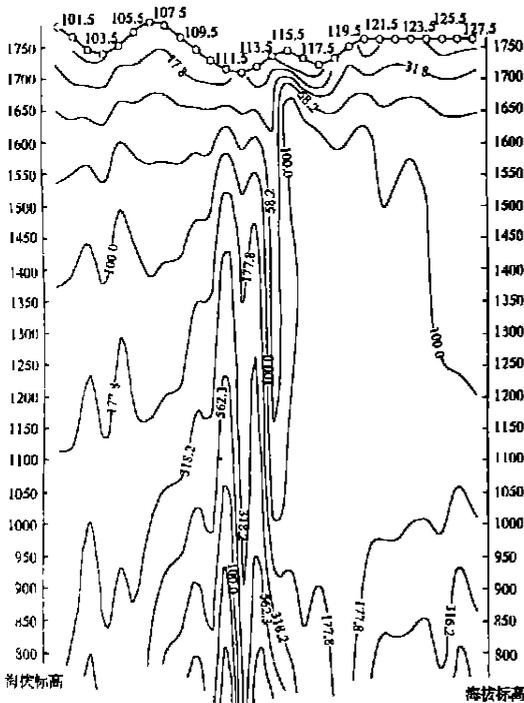


图 2 博氏蒂克反演和一维反演的结果

Fig. 2 Results of Bostick and one dimension inversions

土及风化层, 1 024 Hz 频点以下反映地下不同岩性的电性特征。112~116 点之间 32 Hz 以下出现强烈的低阻凹陷, 降低幅度数十倍, 对比地质图和地质剖面图, 该异常对应于已被控制的已知矿体; 106.5 点下方也对应一个低阻跃变, 可能为断层引起, 不排除隐伏矿体的存在。

图 2 是博氏蒂克反演和一维反演的结果。对应 112~116 之间的低阻底部有高阻隆起, 其顶翼有明显的低阻异常或低阻封闭异常, 可定为有望异常, 判断其顶部标高在 1 300 m 左右, 这与已知矿体标高相近。若用 1 000 Ωm 等值线作为高阻体轮廓的表征线, 则在其顶部出现低阻凹陷, 对应地表异常体出露部位。

结果表明, 电性分层明显, 高阻体的构造轮廓清晰, 低阻异常清楚, 异常体空间定位较准确。在高阻背斜的两翼及顶部均出现低阻异常或封闭的低阻异常带, 其空间定位与矿体出现位置和形态非常一致。而且低阻体常使异常形态沿其赋存空间扩展。若用 1 000 Ωm 等值线作为高阻体轮廓的表征线, 可圈定出古道岭组与星红铺组大致分层界线并勾画出背斜构造形态, 判断地下隐伏背斜的存在。

图 3 是秦家梁地区 4 Hz 和 32 Hz 视电阻率平面等值线图, 该地区包括 Y5, Y2 及 Y6 线: 该区地下构造复杂, 视电阻率-频率拟断面图反映, 在频率 64 Hz 以下, 地下呈现多个起伏的高阻结构, 经博氏蒂克反演和一维模拟反演, 清楚地表明地下存在大致 3 个背斜构造, 其一在 100~110 号点之间, 其二在 110~125 号之间, 其三在 130~140 号点之间, 其背斜轴地表位置连线标于图 3 上。并发现多个低电阻陷落异常, 自南向北编号依次为秦 1-秦 6。它们均处于成矿的有利部位。该区地质背景地表全为星红铺组千枚岩所覆盖, 未见古道岭灰岩, 从地质上分析, 地下可能存在 3 个隐伏背斜, 应存在着古道岭灰岩隆起背斜, 在其顶翼有存在界面矿的可能, 且总体处于 TEM 大异常之中或边部, 分离了 TEM 异常源, 表明 TEM 大异常可能是多个低阻体总体表现的结果。根据确认有望低阻异常的原则(背斜顶翼、古道岭组与星红铺的接触带、TEM 异常)我们认为秦 2、秦 3、

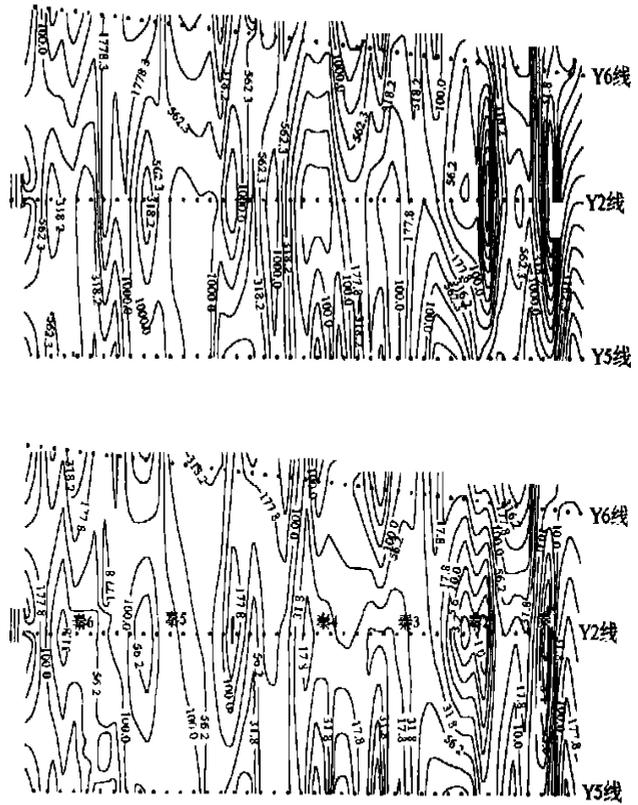


图 3 秦家梁地区频率为 4 Hz 和 32 Hz 时视电阻率平面等值线图

Fig. 1 Plane contour of 4 Hz and 32 Hz apparent electric resistivity of Qinjialing area

秦 4、秦 5 异常较好, 多数可能为界面 Pb、Zn 矿(化)体引起。

5 结论

CSAMT 法工作实践表明, CSAMT 法在进行地电分层的基础上, 勾画高阻隆起, 确定构造形态, 特别是背斜构造形态是有效的, 同时也证明了该法可以发现低阻异常, 验证了 TEM 异常, 特别对低阻异常体的空间定位有较大的优势。结合地质规律和其他物化探资料, 特别是 TEM 资料, 便于对低阻异常的性质作出判断。同时运用博氏和一维连续剖面模拟反演, 得出的成果更加合理, 高阻体和异常的划分更为直观。

CSAMT 法是电阻率-频率测深, 它具有探测深度大、快捷、能及时提供视电阻率-频率拟断面图等优点, 但也有静态效应、近场效应、场源附加效应, 以及所测电阻率参数单一等因素增加解释难度的不足。即使这样, 由于成本低、效率高、探深大、提供资

料及时,解释手段逐渐完善、先进,有多种减少或去干扰的手段,再配合其他物化探地质资料,在地质找矿、地下构造填图、工程探测、石油勘探等方面不失为先进的物探方法之一。

社,1990.

- [2] 杨生,施婉华,王庆石. 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.
- [3] 朱添宝,施婉华,杨生. 解析雅可比矩阵的一维 CSAMT 反演 [J]. 地质与勘探, 1992, 28(3), 39-45.

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

THE APPLICATION OF CSAMT METHOD IN LOOKING FOR HIDDEN METAL ORE IN FENGTAI AREA IN SHAANXI PROVINCE

YANG Yan-feng¹, YANG Sheng², ZHOU Zhen-yi³

- (1. *The seventh team Henan nonferrous geological bureau, Anyang 455000, China;*
 2. *Beijing Zhongse Geophysical Limited Company, Beijing 100073, China;*
 3. *Huadong nonferrous geological exploration 814 team, Zhenjiang 212005, China*)

Abstract: CSAMT is the Controlled Source Audiomagnetotelluric method, This article expound the application of CSAMT method in looking for hidden metal ore. At first, we investigate availability of this method on the known geological profile. Then the method of the data processing and interpretation was confirmed, and the relation between anomaly and ore was recognized, and CSAMT research was furtherly carried out after determining the targets. And the prospect of blind ore body anomalies are pointed out based on the CSAMT data procession, qualitative and quantitative interpretation of the data

Key words: the Controlled Source Audiomagnetotelluric method; Cagniard resistivity; near-field; far-field; static correction; Bostic-inversion; Shaanxi province