

## EH4 电导率成像系统在矿产勘查中的应用

王志强<sup>1</sup>, 朱向泰<sup>2</sup>, 李 瑞<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 信息工程学院, 成都 610059;

2. 中国冶金地质总局 地球物理勘查院, 河北 保定 071051)

**摘 要:** EH4 电磁成像系统是一套双源型电磁法数据自动采集和处理的物探系统, 它是 CSAMT 和 MT 的结合体, 应用该系统对松辽盆地北部沉积盆地中与砂岩型铀矿相关的砂体的空间展布规律和断裂展布特征进行了研究, 证明了 EH4 在矿产勘查应用中是一种行之有效的手段。

**关键词:** EH4 电磁成像系统; 矿产勘查; 应用

**中图分类号:** P631.3; P619.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)04-0306-05

## 0 引言

EH4 电磁成像系统(简称 EH4)已成功运用于国内地矿、煤炭、水利水电行业的找矿、找水等工作中。这种新型物探方法, 实现了天然信号源与人工信号源的采集和处理, 具有探测深度大(可达 1 500 m)、设备轻、速度快、费用低、精度较高等特点, 在地质勘探工程中能起到很好的效果。EH4 属于部分可控源与天然源相结合的一种大地电磁测深系统。深部构造通过天然背景场源成像(MT), 其信息源为 10~100 kHz。浅部构造则通过一种新型的便携式低功率发射器发射 1~100 kHz 人工电磁信号, 补偿天然讯号的不足, 从而获得高分辨率的成像。EH4 包括发射装置和接收装置两部分(图 1)。接收装置包括不锈钢电极、接地电缆、前置转换器(AFE)、磁探头、主机、传输电缆、12 V 蓄电池。发射装置包括发射天线、发射机、控制器、12 V 蓄电池。由于电池供电系统的小巧和便于携带, 可以应用在地形比较复杂或环境比较恶劣的地区。

## 1 方法原理

高频电磁法(AMT)是一种大地电磁测深法, 它

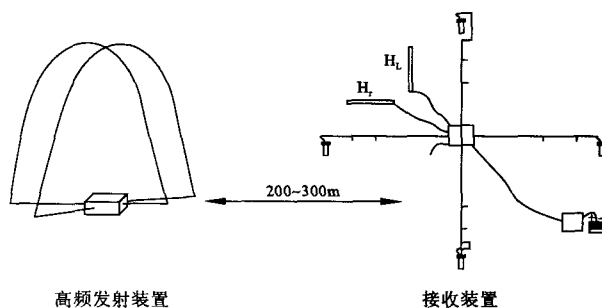


图 1 EH4 电磁成像系统设备示意图

Fig. 1 Sketch of EH4 electromagnetic image system

利用的是大地电磁场的声频部分(10~100 kHz)。因此, 其探测深度在几米至 3 km 左右, 主要用于金属矿、地热田、埋藏不深的油气田、水文、工程、环境等领域的地球物理勘探。

大地电磁波在介质中的传播遵从麦克斯韦方程, 如果假设大多数地下岩土为无磁性物质, 并且宏观上均匀导电, 不存在电荷积累, 并忽略位移电流, 那么 Maxwell 方程就可简化为公式(1)和(2)(亥姆霍兹方程):

$$\nabla^2 H + K^2 H = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 E + K^2 E = 0 \quad (2)$$

其中,  $K = \sqrt{-i\epsilon\mu\sigma}$  称作复波数或传播系数。这时可将  $K$  写成  $K = \alpha + i\beta$ 。α 称为相位系数, β 称为吸收系数。表面阻抗  $Z$  定义为地表电场和磁场水平分

量的比值,只与介质电阻率及电磁波的频率有关,在均匀介质中:

$$Z=\sqrt{\omega\epsilon\mu(-i)} \quad (3)$$

(4)式可用于确定大地的电阻率:

$$\rho=\frac{1}{5f}\left|\frac{E}{H}\right|^2 \quad (4)$$

式中,量的单位为: $\rho/\Omega\cdot\text{m}$ ;  $E/\text{mv/km}$ ;  $H/\text{nT}$ 。

对于水平分层大地,此表达式不再适用,但用它计算得到的电阻率将随频率改变而变化,因为大地的穿透深度或趋肤深度与频率有关,此时由(4)式计算得到的电阻率称视电阻率。

正是由于电磁波存在趋肤效应,高频电磁波穿透深度小,低频电磁波穿透深度大,因此通过改变发射频率来改变探测深度,达到测深的目的。

电磁波趋肤深度如下式:

$$\delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}\approx 500\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5)$$

式中,量的单位  $\delta/\text{m}$ 。

又根据电磁波的趋肤效应理论,在准静态条件下导出趋肤深度公式为:

$$\delta\approx 503\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (6)$$

式中, $\delta$  为趋肤深度; $\rho$  为电阻率; $f$  为频率。

虽然趋肤深度在某种意义上说与电磁波在介质中穿透的深度有关,但它并不代表电磁勘探中实际的有效深度。勘探深度  $H$  是一个模糊的概念,根据经验我们将地磁波衰减到 50% 时的深度称为勘探深度,可以得到勘探深度的经验公式为:

$$H\approx 0.6932\delta\approx 356\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (7)$$

该式表明,随着电阻率的减小或频率的增大,探测深度变浅;反之,随着电阻率的增大或频率的减小,探测深度加深。因此,当大地电阻率一定时,通过对不同频率电磁场强度的测量就可以得到该频率对应深度的地电参数,从而达到测深的目的。

## 2 EH4 系统野外工作方法与技术

St rataGem 电磁系统野外工作有两种方式:一种是单点测深,另一种是连续剖面测深,选用何种方式由研究任务确定。该系统通常采用天然场源,只有在天然场信号很弱或根本没有信号的频点上,才使用人工场源,用以改进数据质量,提高数据信

噪比。此系统可以在 0.1~100 kHz 的宽频范围内采集数据。为确保数据质量与工作实效,上述频带又分成 4 个频组:

1 频组:0.1~1 kHz;2 频组:10~1 kHz;3 频组:300~3 kHz;4 频组:1.5~99 kHz。

观测中使用哪几个频率组,可视情况灵活掌握。在野外能实时获得  $H_y, E_x, H_x, E_y$  振幅,以及  $5H_y, 5E_x, 5H_x, 5E_y$  相位,并进行一维反演和二维反演而获得电阻率成像结果。在室内数据处理后,可获得二维正、反演结果等。在开展工作的前一天,一定要做平行试验,检测仪器是否工作正常,要求 2 个磁棒相隔 2~3 m,平行放在地面,两个电偶极子也要平行。观测电场、磁场通道的时间序列信号。

### 2.1 电极的布置技术

工作共用 4 个电极,每 2 个电极组成 1 个电偶极子,为了便于对比监视电场信号,其长度都为 25 m。与测线方向一致的电偶极子叫做 X-Dipole;与测线方向垂直的电偶极子叫做 Y-Dipole。

### 2.2 磁棒布置技术

磁棒与前置放大器距离应  $>5\text{ m}$ ,为了消除人为干扰,2 个磁棒要埋在地下,其深度至少为 5 cm,并使其相互垂直,且水平。所有的工作人员要离开磁棒,相距至少 10 m,尽量选择远离房屋、电缆、大树的地方布置磁棒。

### 2.3 前置放大器(AFE)布置技术

电、磁道前置放大器放在测量点上,即 2 个电偶极子的中心,为了保护电、磁道前置放大器,应首先将其接地,并远离磁棒,与其相距至少 10 m。

### 2.4 主机布置技术

主机要放置在远离 AFE 至少 20 m 的一个平台上,而且操作员最好能看到 AFE 和磁棒的位置。

## 3 资料数据处理方法

首先对野外采集的原始时间序列进行挑选,剔除有明显干扰的时间序列段,经过 FFT 变换得到互功率谱再计算阻抗,然后根据数据的相干度、偏离度、极化图以及视电阻率和阻抗相位的连续性来删除质量较差的频点。之后结合已知地质资料,通过旋转计算来确定数据的极化(TE, TM)模式,并绘制 2 个模式的视电阻率、阻抗相位的拟断面图和 Bostic 变换电阻率断面图作定性分析。初步判断出剖面电

阻率的大致分布,对于有明显静态位移的测点作静态改正。

在定性分析的基础上,我们使用 RM2D 正则化二维反演软件。该软件与常规二维反演软件相比,在反演精度、拟合程度上都较高。由于地球物理反演问题的非唯一性和数据中噪音的存在,必须根据已知地质资料、定性分析的认识和模型响应与实测数据的拟合情况来判定模型的有效性。如果反演失败或反演结果不理想,则分析原因所在并修改模型重新进行反演。资料处理流程见图 2。

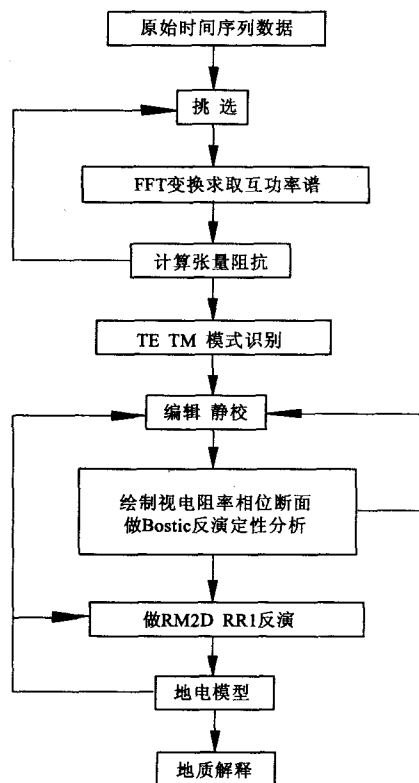


图 2 EH4 资料处理流程图

Fig. 2 Flow sheet of data procession of EH4

## 4 工程应用实例

### 4.1 工程地质概况

松辽盆地北部是一个大型的中、新生代陆相沉积盆地。据盆地南部地震地质剖面图显示,西斜坡沉积地层中缺失侏罗系,古生界及前古生界浅变质岩基底之上直接沉积白垩系,由老至新依次为登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、

明水组,白垩系中砂岩分布较广。盖层、隔水层比较理想,是寻找可地浸砂岩型铀矿的有利地区,因此白垩系砂岩层是此次勘探的目的层。2 条高频大地电磁勘探线位于吉林省与内蒙古自治区交界地区,工区交通发达,地势平缓,为大陆性气候,冬季严寒,春季风沙多、干旱少雨,区内居民以汉族为主。2 线靠近居民区,人文干扰严重。应用高频大地电磁法勘探的地质任务是:①查清与砂岩型铀矿密切相关的砂体的空间展规律;②查明区内断裂展布及特征。

### 4.2 探测结果与解释

根据反演结果,结合地质条件和岩石的物性参数,可以推断出各类不良地质现象的空间分布特征。

#### 4.2.1 1 号测线

该测线位于吉林西斜坡的西部,与区域 NNE 向构造近似平行,故由浅至深,地层没有明显的倾斜迹象(图 3)。

(1)自上向下分高一低一高 3 层电性结构,在深度上自地表至 50 m 为一套视电阻率  $>50 \Omega \cdot m$  的高阻层,推测为第四系砂砾层或干燥土层;下伏地层为颗粒变细或含有较多水分的中粗砂岩,剖面位置在 3 000~9 000 m 和 14 000~19 000 m 处变厚( $>50m$ );中间部位及两端沉积较薄。

(2)深度 100~350 m 间,为一大套较稳定的低阻区,视电阻率值  $<15 \Omega \cdot m$ ,地层为白垩系泥砂岩互层。由于视电阻率差异较小,分辨能力可能在此次施工方法的能力之外;此次未能划分出详细构造,在 3 000~5 000 m 和 12 000~1 500 m 之间、17 000~19 000 m 之间有变薄的趋势,岩石颗粒比周围粗,可能存在相变,为河流相沉积砂岩相对集中的地方,对成矿有利,有待进一步探讨。

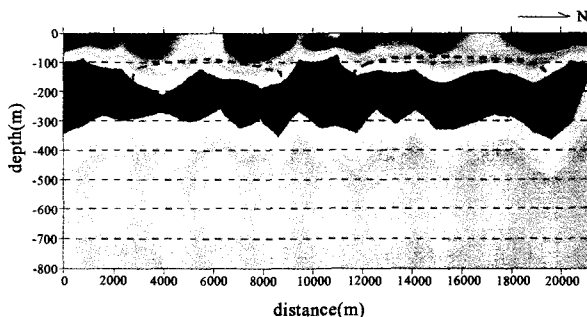


图 3 双辽地区 EH4 勘探 1 线反演结果

Fig. 3 Inversion result of EH4 line 1 in Shuangliao area  
虚线圈定部位推测为砂体沉积较为集中的地区;  
图中断裂特征不明显,未推断出断裂构造。

(3)350 m 以下为另一套高阻体,视电阻率值  $> 15 \Omega \cdot m$ 。岩性以细砂、中砂为主,泥岩较少,推断为较早时期的白垩系。

#### 4.2.2 2 号测线

该剖面底部高阻体特征明显揭示出该区处于吉林西斜坡上,地层向 NW 倾斜;断面显示自地表向下依次为高一低—高一低—高的电性分布特征(图 4)。

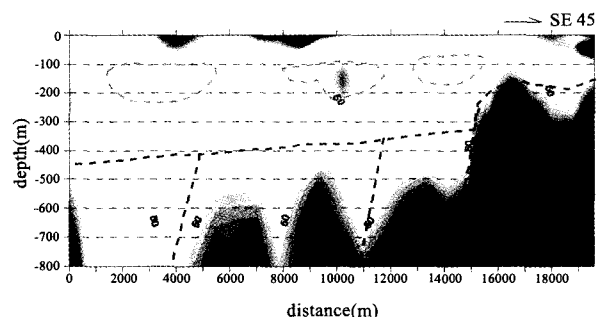


图 4 公主岭地区 EH4 勘探 2 线反演结果

Fig. 4 Inversion result of EH4 line 2 in Gongzhuling area

(1)浅层 50 m 以上为一套高阻层,视电阻率值  $> 50 \Omega \cdot m$ 。推测为一套近地表的第四系砂砾层或干燥土层,该层在剖面位置的 0~3 000 m 和 10 000~17 000 m 段变薄,视电阻率值变低。

(2)深度 50~100m 间存在相对低阻层,视电阻率值  $15 \sim 30 \Omega \cdot m$ ,推测为白垩系(盖层),以泥岩、粉砂或粘土为主。

(3)100 m 以下,为含有高阻体的低阻层,位置为 1 500~5 000 m,8 000~11 000 m、13 000~15 000 m,高阻层视电阻率值在  $20 \sim 40 \Omega \cdot m$  间,高阻体(虚线圈闭的部分)推测可能为河流相沉积的砂体,岩性以中细砂为主,是此次勘探的目的层(矿体的储层),该层周围依然为低阻区,岩性以泥岩为主。厚度 100 m 左右,3 个推测砂体有向西北方向逐渐加深变厚的趋势,故沉积物来自南东一侧。

含高阻砂体的地层下伏另一套低阻层,该层在西北方向变厚,岩性以细砂、粉砂或泥岩为主,为砂

岩体的隔水层。厚度  $> 200 m$ ,向东南方向变薄,趋向尖灭。

(4)西北端 500 m 以下,东南端 150 m 以下视电阻率值呈现绝对高阻、向 NW 倾斜状,视电阻率值  $> 70 \Omega \cdot m$ ,推测为基底碎屑岩的电性反映。

(5)在 1 500 m,11 000 m,14 500 m 处,两侧地层厚度及视电阻率值出现明显差异,推测存在断裂,该断裂与砂岩体的沉积存在一定关系,可能起到控矿作用。

## 5 结论及建议

(1)通过 EH4 勘探,对地下电性层分布特征有了清楚的反映。1 号测线的地下结构单一,地层平缓,岩性变化相对稳定,基本接近盆地内的沉积特性,在 100~300 余 m 的深度范围内,高阻砂岩层电性特征显示不明显,可能对找矿不利。

(2)2 号测线对基底反映清楚,推测了 3 条断裂,发现的 3 个高阻异常电性差异明显,且盖层、储层、隔水层条件较完备,深度适宜,应给予重视,可以向两侧追踪调查。

(3)野外未能搜集到该区的钻探等资料,解释工作只依靠电性特征分析,没有其他地质成果标定,因此该区的地质解释具有很大的局限性。

## 参考文献:

- [1] 昌彦君,王华军,罗延钟. EH-4 系统观测资料的非远区场校正研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2002,(2): 78-81.
- [2] 陈富文,李华芹,陈毓川,等. 东天山土屋—延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义[J]. 地质学报,2005,(2): 256-261.
- [3] 郭建强,武毅,邵汝君,等. StratagemTM EH-4 电导率成像系统简介及应用[J]. 物探与化探,1998,22(6): 458-464.

## APPLICATION OF EH4 ELECTROMAGNETIC IMAGE SYSTEM TO MINERAL RESOURCE EXPLORATION

WANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, ZHU Xiang-tai<sup>2</sup>, LI Rui<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Geophysical Exploration Institute of Metallurgical Bureau of Geology  
and Mineral Resources Exploration, Baoding 071051, Hebei, China)

**Abstract:** EH4 electromagnetic image system is a set of dual-power electromagnetic auto-collecting and processing geophysical exploration system. It is a combination of CSAMT and MT. The paper describes principles, characteristics, procedures and data analysis of EH4. Using the system to line out the distribution rule of the sand body closely related to the sandstone-type uranium ore deposit and verify the arrangement and character of the faults in the area indicates that EH4 is a effective method in exploration for mineral resources.

**Key Words:** EH4 electromagnetic imaging system; mineral resource exploration; application

(上接第 305 页)

#### 参考文献:

- [1] 赵鹏大,王金贵,饶明辉,等. 中国地质异常[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1995,20(2):117-127.
- [2] 杨世喻,王瑞雪. 矿床遥感地质问题[M]. 昆明:云南大学出版社,2003.
- [3] 杨金中,方洪宾,张玉君,等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. 国土资源遥感,2003,(3):50-52.
- [4] 马建文,朱章森,杨武年,等. 遥感数字图像处理在高山积雪覆盖地区增强成矿岩石的纹理信息[J]. 成都理工学院学报,1998,25(增刊):17-21.
- [5] 张玉君,增朝铭,陈薇. ETM+(TM)蚀变遥感异常方法研究与应用——方法选择与技术流程[J]. 国土资源遥感,2003,(2):44-50.
- [6] 姜小光,王长耀. 成像光谱数据的光谱信息特点及最佳波段选择——以北京顺义区为例[J]. 干旱区地理,2000,23(3):214-220.
- [7] 朱嘉伟,张天义,盛吉虎. 金矿遥感异常信息自动提取方法研究及其应用[J]. 国土资源遥感,1996,(4):45-50.
- [8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [9] 李长江. 浙江省国土资源遥感调查与综合研究[M]. 北京:地质出版社,2004.
- [10] 周成虎,骆剑承,刘庆生,等. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京:科学出版社,2001.

## APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNOLOGY TO ORE PROSPECT IN EAST TIBET

GUO Na<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-ping<sup>2</sup>, TANG Ju-xing<sup>3</sup>, ZHANG Ting-bin<sup>3</sup>, LING Juan<sup>3</sup>

(1. College of Information Management of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Earth Science and Resources Management of University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. College of Earth Science of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The complicated tectonics and topography of the east Tibet make geological survey on the spot very difficult and remote sensing images are used to interpret anomaly areas there. RGB combination of thermal infrared band and ratio analysis of TM image is introduced to study on the hydrothermal alteration ore deposits in east Tibet. The results show feasibility of the infrared band for interpretation of hydrothermal alteration anomalies in east Tibet.

**Key Words:** thermal infrared band; ratio analysis; hydrothermal deposit; alteration; Tibet