

文章编号:0258-7106 (2007) 01-0120-08

大地电磁测深法在铜镍矿勘查中的应用^{*}

——以与超镁铁质岩有关的新疆图拉尔根铜镍矿为例

梁光河¹, 徐兴旺¹, 肖骑彬¹, 蔡新平¹, 秦克章¹, 张宝林¹, 三金柱^{1, 2},
惠卫东², 彭晓明²

(1 中国科学院矿产资源重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 新疆有色地
勘局 704 大队, 新疆 哈密 839000)

摘 要 文章介绍了大地电磁勘探的基本原理, 结合在新疆哈密地区图拉尔根铜镍矿区的实际应用, 从野外数据
采集到资料处理和地质解释对该方法的实际效果进行了剖析, 所获异常得到钻探证实为厚大矿体。文章还对该
方法的适用条件进行了分析, 并给出了在荒漠戈壁地区进行大地电磁勘探的一些可以借鉴的经验。

关键词 地球物理; 大地电磁测深; 铜镍矿; 电阻率; 勘查; 数据处理和反演; 图拉尔根; 新疆

中图分类号: P631. 3⁺25; P618. 41

文献标识码: A

Application of magnetotelluric method to Cu-Ni ore exploration: A case study of Tulargen Cu-Ni deposit in Xinjiang

LIANG GuangHe¹, XU XingWang¹, XIAO QiBin¹, CAI XinPing¹, QIN KeZhang¹, ZHANG BaoLin¹,
SAN JinZhu², HUI WeiDong² and PENG XiaoMing²

(1 Key Lab. of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China; 2 No. 704 Geological
Party, Xinjiang GeoExploration Bureau for Nonferrous Metals, Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract

Characterized by easy application, no need for artificial sources and large detection depth, the magnetotelluric method has played an important role in deep crust structure detection, petroleum basin survey and deep-water resource exploration. This paper deals with the fundamental principle of magnetotelluric sounding, and describes its practical application in the Tulargen Cu-Ni deposit. A detailed analysis of this method from field data acquisition to data processing and geological interpretation is also given in this paper. The resistivity anomalies were proved by drilling to be manifestations of large and thick Cu-Ni ore bodies. Finally, a discussion is made on the applicability of this method and some experience is given which may be helpful to the utilization of this technique in the desert and gobi area of northwestern China.

In field work, the authors used the newest GMS-06 magnetotelluric sounding instruments made by GEOMETRICS Company of Germany. Six instruments recorded data simultaneously, which included two 5-channel instruments and four 2-channel instruments with GPS synchronization. In order to confirm the performance and

^{*} 本文得到中国科学院知识创新工程重要方向 (KZCX3-SW-137)、国家“十五”科技攻关新疆 305 项目 (2003BA612A-06-7) 及国家“十一
五”科技支撑计划重大项目二级课题 (2006BAB01A02) 的联合资助

第一作者简介 梁光河, 男, 1965 年生, 博士后, 副研究员, 从事金属矿地球物理勘探新技术新方法研究。E-mail: liangguanghe @sohu.com

收稿日期 2006-07-31; 改回日期 2006-12-13。李 岩编辑。

stability of these instruments, the authors carried on a contrast experiment on site. The results show that their stability is good, and the original data have high confidence level.

Comparative research work was also conducted for one-dimensional and the two-dimensional inversion softwares of the data obtained by the authors in data processing. Data processing was finally performed by using the software optimized from many softwares.

Key words: geophysics, magnetotelluric sounding, Cu-Ni deposit, resistivity, exploration, data processing and inversion, Tulargen, eastern Xinjiang

传统的大地电磁测深方法(以下尚称 MT 法)在地壳岩石圈研究、地震预测、深部石油勘探、地热田调查中发挥了重要作用(赵国泽等,1998;詹艳等,1999),但由于受仪器工作频率的限制,该方法迄今为止还很少用于中浅层的固体金属矿床和地下水勘探。近年来,在理论基础日趋完善的情况下,大地电磁测深的仪器设备也得到了很大的改善。目前,大地电磁测深野外数据采集仪器基本上都具备了轻便、灵敏度高、同步化、频带宽的特点。以本研究使用的由 Metronix 公司最新研制的大地电磁野外数据采集系统 ADU06 为例,其最高测深频率接近 10 000 Hz,在电阻率为 10^{-1} m 的地球介质中,其勘测最低有效深度 $< 10 \text{ m}$ (肖骑彬,2004)。

随着采矿业的发展,勘探深度在 500 ~ 1 500 m 的需求越来越大,传统的勘探手段,如 IP 及 TEM 在这一深度区域内的穿透能力和精确度迅速下降,新型的 MT 仪器已具备了对中浅层反映敏感的工作频率范围(100 ~ 10 000 Hz),加之对地下导电体的灵敏度,将能够在新形势下的固体金属矿产勘探中发挥作用。

在金属矿大地电磁测深勘查方面,Zhang 等(1998)和 Stevens 等(1998)分别以具体的实例介绍了大地电磁测深在已知金属矿区的应用效果。肖骑彬(2004)对国外已经成熟的大地电磁测深软件进行了系统研究,并应用理论模型分别对这些软件进行了考核,最后对这些软件进行了系统集成并在多个金属矿勘查中对其进行了实际应用。

1 大地电磁测深法的基本原理

大地电磁测深的理论基础是 Maxwell 方程,它采用地球天然交变电磁场作为场源来探测地下的电阻率结构。地球的自然电磁场的高频部分(频率为 10 000 ~ 1 Hz)来源于全球性雷电,其低频部分(1 ~ 0.0001 Hz)来源于太阳所喷射的带电粒子流、地球

磁场、电离层相互作用所产生的交变电磁场。当交变电磁场以波的形式在地下传播时,由于电磁场的趋肤深度与其频率及地质体的电导率有关(式 1),所以在地表用专门的大地电磁测深仪进行观测,就可以确定不同深度介质的电阻率分布信息(Vozoff, 1972)。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中 δ 为电阻率, ω 为圆频率, σ 为导电率, μ 为导磁率。

标准的 MT 方法需要在每个测点观测 3 个磁场分量 H_x 、 H_y 、 H_z 及 2 个电场分量 E_x 、 E_y ,在资料获取后,通过求取不同方位的阻抗张量 Z_{ij} (i, j 分别为 x, y 的不同组合),进而求取相应的视电阻率 ρ_a (式 2)。

$$\rho_a = 0.2 T |Z_{ij}|^2 \quad (2)$$

式中 T 为视周期。

以本研究所使用的由德国 Metronix 公司生产的 GMS-06 系统为例,它包括数据采集系统 Adur-06、3 个高精度磁力计 MFS-06、4 个电极系 EFP-06、在线观测及数据处理软件 Mapros 和可离线操作软件 GMS187。该系统具有轻便、频带宽、性能稳定、操作简便并具现场回收及处理功能的特点,此外对浅部噪声的抑制效果明显。

不同岩性地质体的电阻率具有较大差异,这正是电阻率法勘查的基础。表 1 给出的是一些常见岩石的电阻率及其变化范围。不同地质体间的相对电性差异的大小,是该法应用效果的主要影响因素。对于金属矿床而言,矿体与蚀变围岩间,蚀变围岩与未蚀变岩石间,一般均存在较大的电性差异。矿体中有金属硫化物的富集会使其电阻率明显降低。控矿脆性断裂、韧性剪切带、蚀变破碎带的出现,均可导致矿体与周围岩层(体)间明显的电性差异。

通过长期使用电阻率法对隐伏金属矿所进行的勘查实践,笔者对金属矿床内不同的围岩、脉岩和矿

表 1 常见岩石电阻率
Table 1 Resistivity of major rocks

物质		/ $\Omega \cdot m$
火成岩和变质岩	花岗岩	$5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$
	玄武岩	$10^3 \sim 10^6$
	板岩	$6 \times 10^2 \sim 4 \times 10^7$
	大理岩	$10^2 \sim 2.5 \times 10^8$
	石英岩	$10^2 \sim 2 \times 10^8$
沉积岩	砂岩	8 ~ 4000
	页岩	20 ~ 2000
	石灰岩	50 ~ 400
土壤和水	粘土	1 ~ 100
	冲积层	10 ~ 800
	地下水	10 ~ 100
	海水	0.2

石的电性参数有了初步了解。可以总结如下:

(1) 金属矿石与蚀变围岩及远矿岩石间的电性参数的差别是明显的,含金属硫化物或碳质高的矿石,电阻率低,硅化矿石或贫硫化物石英脉矿石电阻率较高;

(2) 侵入岩体一般电阻率高,而沉积岩、火山岩、构造蚀变岩的电阻率变化较大。岩(矿)石的电性参数测量是在实验室中特定的条件下对一定体积的岩(矿)石进行测量,与野外对自然地质体进行的地球物理探测有很大的不同,但参考室内测试的岩(矿)石与围岩的电性参数在不同数量级间的差异,对在地球物理探测结果中判别和圈定目标物(矿化异常)有参考价值。

2 大地电磁测深在图拉尔根铜镍矿区的应用

2.1 地质背景

图拉尔根铜镍矿床位于哈密市东约 210 km 处,该矿床是由新疆有色地勘局 704 队于 2001 年在检查化探异常和化探剖面测量过程中发现的,为全岩矿化的超镁铁质岩浆硫化物型铜镍矿床(三金柱等, 2003)。含矿岩体呈 NEE 向展布,长约 700 m,宽 50 ~ 60 m;5 线 2 个钻孔的探查结果显示该岩体西段具往南倾的特征。进一步查明该含矿岩体深部的延伸、形态与分布是研究与评价该含矿岩体/矿床成矿规律和成矿远景及开展隐伏矿床定位预测的关键。针对图拉尔根矿区所需解决的地质问题和地质条

件,笔者采用大地电磁测深(MT)的方法来探查图拉尔根矿区含矿岩体的深部异常电性体的分布特征。

图拉尔根铜镍矿床由 1、2 号 2 个矿体组成,其中 1 号矿体为隐伏矿体。矿床受控于区域性韧性剪切带之次级挤压破碎带,总体呈 NE-SW 向脉状延伸,地表矿(化)体总长 740 m(图 1)。地表 Ni 平均品位:0.24 % ~ 0.42 %,最高 1.53 %;Cu 品位可达 0.5 % 以上。矿体就位于一套镁铁质-超镁铁质杂岩体内,赋矿岩石为角闪橄榄岩,矿床属与镁铁质-超镁铁质岩浆有关的岩浆熔离贯入型 Cu、Ni、Co 矿床,岩控、构造控矿特征明显。

早期已施工的 2 个钻孔探矿结果显示,1 号矿体和超基性岩体往下有变厚的趋势,并显示良好的找矿前景。

矿体位于一套镁铁质-超镁铁质杂岩体内,岩石类型有角闪橄榄岩、斜辉橄榄岩、角闪辉长岩等,多具中-细粒结构,块状或碎裂块状构造。铜镍矿体主要分布在岩体南缘、辉长岩相与角闪橄榄岩相接触带之角闪橄榄岩相一侧(孙赫等,2006)。矿石中蛇纹石化、透闪石化、滑石化、绿帘石化发育。以全岩矿化为特征,具有大型规模以上远景。矿体呈沿 NE-SW 向延伸的较为稳定的长条状,地表长 740 余米,矿体宽 5 ~ 10 m,最宽处达 12.1 m。Cu 元素表现出局部次生淋滤富集现象。近地表部位矿石极为破碎,呈碎裂块状、碎粒状、“羊粪蛋状”。次生孔雀石化、褐铁矿化、黄钾铁矾矿化发育,常形成绿色、褐黄色铁帽。矿床氧化带深度在 6 ~ 8 m 之间。原生矿石多呈深黑色、黑绿色,致密坚硬,多具粒状结构、固熔体分离结构,以浸染状构造、珠滴状构造为主。金属矿物以磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、黄铁矿等为主。从 2 个钻孔深部验证情况来看,矿体呈板条状、脉状产出,沿倾向具波状起伏、膨大狭缩特征。钻孔揭露矿体视厚度 31.04 m,平均品位 Cu 0.27 %,Ni 0.40 %,Co 0.024 %;矿体底板埋深 142.9 m,赋矿岩石为角闪橄榄岩,矿体与围岩呈渐变过渡关系。矿体分布主要受杂岩体岩相带及岩相接触带间脆-韧性构造破碎带的控制,局部矿体产于杂岩体向深部变缓的部位,杂岩体在此处的剖面形态呈岩盆状,厚大板状矿体主要赋存在岩盆上部,其产状基本与角闪橄榄岩相带一致(秦克章等,2006)。矿体具深部熔离贯入成矿的特征,沿倾斜方向具有形成浅、富、厚、大铜-镍矿体的可能。在根据磁组构参数 P 值勾出的强弱相间的韧性变形带格局中,该

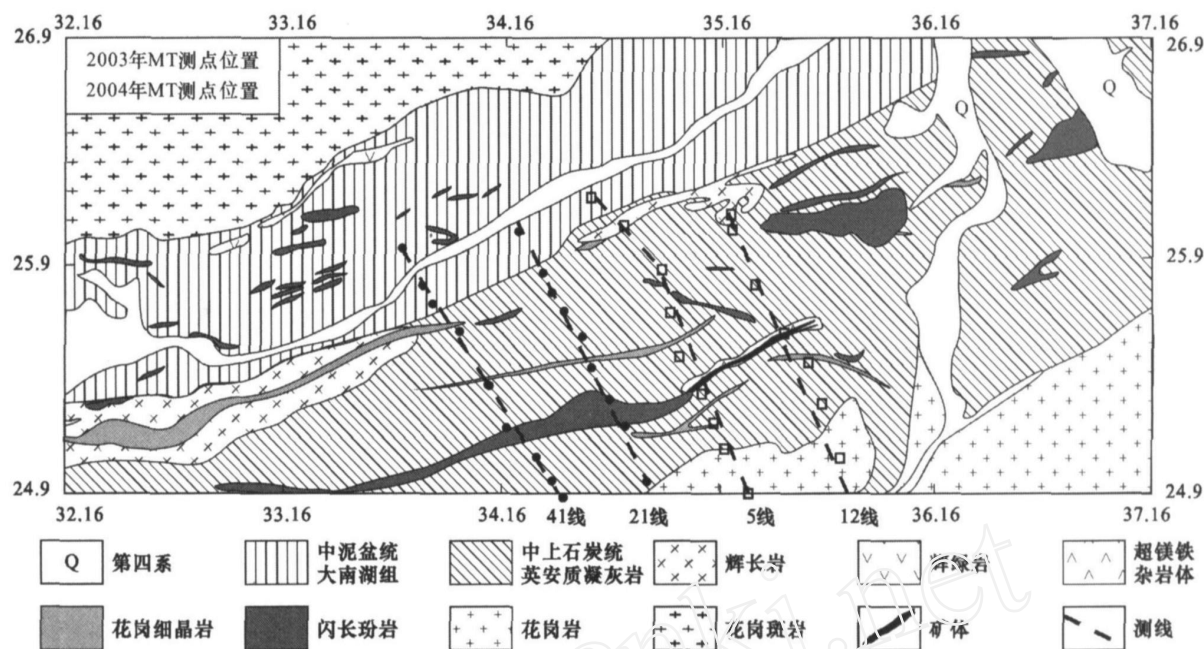


图 1 新疆哈密市图拉尔根铜镍矿地物综合图(底图据孙赫等,2006)

Fig. 1 Integrated chart of the Tulargen Ni-Cu deposit in Hami, Xijiang (after Sun et al., 2006)

挤压破碎带位于中部弱韧性变形带之内,两侧则为强韧性变形带。

2.2 矿区电性特征

由新疆哈密市图拉尔根铜镍矿 1:10 000 地物综合图(图 1)可以看出,南侧围岩表现出明显的高阻特征,视电阻率大于 500 $\Omega \cdot m$,而其北侧围岩则表现出相对的低阻特征,视电阻率一般为 250 ~ 500 $\Omega \cdot m$ 。杂岩体表现出高极化、高磁化率的特征,而其电阻率则表现为中低阻的特点,视电阻率一般为 100 ~ 500 $\Omega \cdot m$;视电阻率值与南侧已知围岩(电阻率 > 500 $\Omega \cdot m$)有明显的差异,而与北侧围岩则差异不明显。

2.3 野外采集

在野外获取高质量的资料是大地电磁勘探的关键所在,它直接影响到资料处理解释的难易程度和勘探效果。因此,在施工中采取必要的措施,以求得到尽可能好的原始资料是十分重要的。由于工区所在的位置很偏僻,基本上没有人工干扰,保证了在这个区域测量所得原始资料的精确度。

为了验证该仪器的有效性和一致性,首先对该仪器进行了现场测试,结果证明在该区域大地电磁测深测量的数据质量很好,误差很小。同一仪器、同一点、不同时间低频部分视电阻率均方相对误差为:xy 方向 1.769%,yx 方向 4.860%;相位均方相对误差为:xy 方向 2.074%;yx 方向 4.018%(图 2)。不

同仪器、同一点、同一时间视电阻率均方相对误差为:xy 方向 1.060%,yx 方向 0.562%;相位均方相对误差为:xy 方向 0.607%;yx 方向 1.671%(图 2)。这说明该仪器的重复性及记录的原始数据的准确性都是很高的。

在本次测量中,笔者采取了白天选点、布线、传输数据,晚上仪器记录的方式,记录时间为 12 h,测量中电道布置方位为正南北(Ex)及正东西(Ey),电极距为 60 m(30 + 30)。在该地区,由于地表十分干旱,接地电阻很大,为了减小接地电阻,对埋置的电极采取了浇盐水的处理措施。在测量中特别注意南北向和东西向的接地电阻保持在一个数量级。野外采用常规的 4 个采样频段:HF、LFI、LFII、FREE,为了保证主要目的层深度的勘探效果,对 LFI 频段进行了重复记录。通过 Adu06 的 GPS 卫星同步系统,6 台仪器同时开始记录,表 2 为具体记录作业的例子。

2.4 资料的处理与分析技术

为了获得高质量的资料,充分利用 GMS-06 仪器野外记录的原始时间序列,本研究对每个测点的数据在室内进行了处理。仪器自带的 Mapros 软件具有界面直观、操作灵活、处理方法多样、速度快等优点;利用该软件完成了资料的预处理,并实现了实测视电阻率、相位的输出。

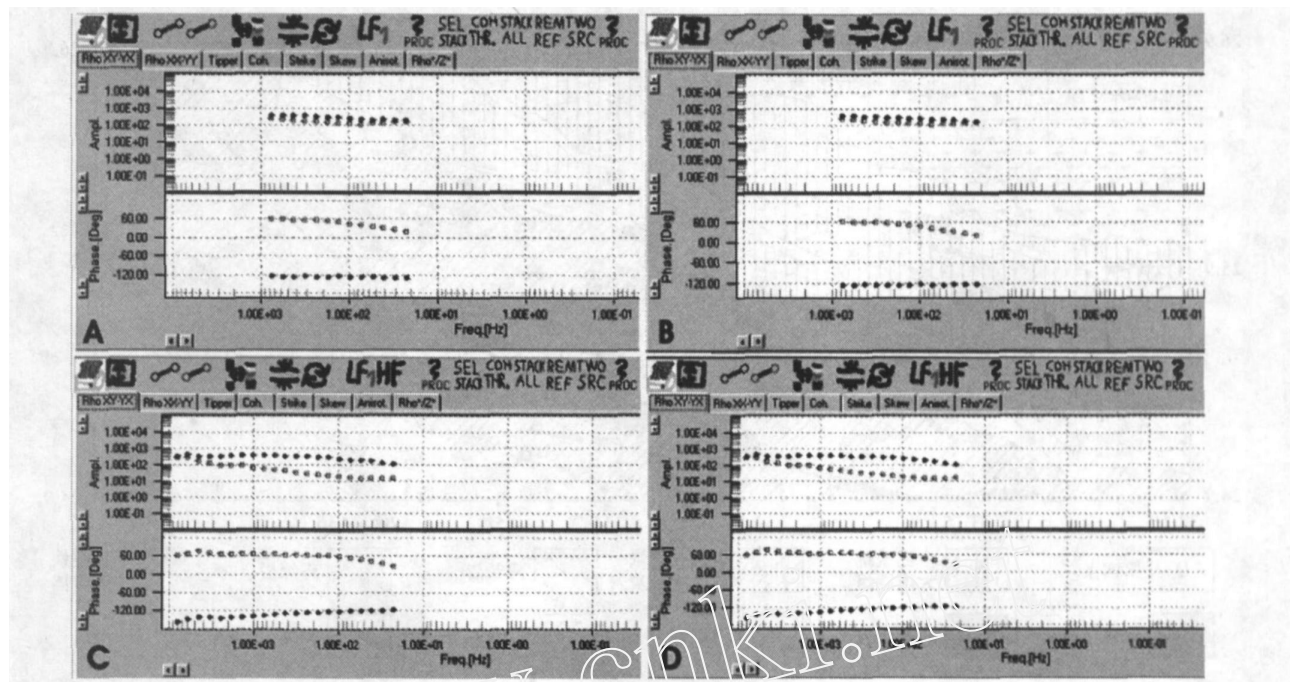


图 2 MT 测量误差对比

Fig. 2 Comparison of errors for MT survey

表 2 图拉尔根大地电磁测深野外记录表
(2006 年 8 月 19 日)

Table 2 Field records for MT survey in Tulargen

运行号	频段	起始时间	终止时间
1	HF	20 00 00	20 00 07
1	LFI	20 02 00	20 10 00
1	LFII	20 12 00	次日(8 月 20 日)6 00 00
2	LFI	06 02 00	06 10 00
1	FREE	06 12 00	06 30 00

大地电磁资料综合分析解释的主要目的是为了充分挖掘大地电磁观测资料所提供的各种信息,从不同角度对地下电性结构进行约束,从而提供较为可信的地质解释结果。

这种综合分析解释大体表现为 2 个方面:一是定性解释,即对观测的原始资料(包括视电阻率、相位和主轴方向等)及由原始资料构制的各种图件(包括电阻率与周期、电阻率与深度等值线剖面、相位等值线剖面、各向异性等值线剖面及总纵向电导曲线等),结合测区或测线的地质资料进行综合分析,判断电性分区(或分段)、分层特点,构造的复杂程度(二维或三维),电性边界的位置等等。二是定量解释,即依据定性分析结果,通过反演计算,获得电性结构的定量解释结果。

一维反演采用了 2 种不同的方法:原 Metronix

公司为 GMS-05 开发的 Inter 一维解释程序和俄罗斯的 Alexei A. Bobachev 编写的基于图形界面的一维反演软件(转引自肖骑彬,2004)。将 2 种方法得到的模型参数进行对比,充分综合两者的相似点,并考虑到模型的合理性,获取了单点的层状模型,并分别绘制出各点的电阻率-深度剖面。

在一维反演得出的层状电性分层的基础上,进行二维反演,这里笔者引用了目前在国际上流行的 REBOCC 反演程序,它具有快速、稳定、灵活等特点,同时可以进行静校正及原始模型(网格)的限定。可以进行点数不定(如果计算机内存允许)的 TE、TM 及 TP(倾子)联合反演,同时也可单独进行 TE 或 TM 模式下的视电阻率或相位的反演。本次工作采取了 TE、TM 联合模式下的视电阻率、相位数据兼顾的方式,得到了内容比较丰富的视电阻率-深度剖面。

图 3 是矿区西部 2004 年大地电磁测深 21 线(A)和 41 线(B)的二维反演结果,从中可以看出:

(1) 21 线深部发育有一个规模较大的低阻异常体。该异常体呈不规则的楔形,由向南缓倾的似层状异常体和向南陡倾的短柱状异常体构成。其中层状异常体厚约 200 m,其在 S6—S8 测点下部地段有往上抬头的特征;层状异常体主体埋深介于 550~750

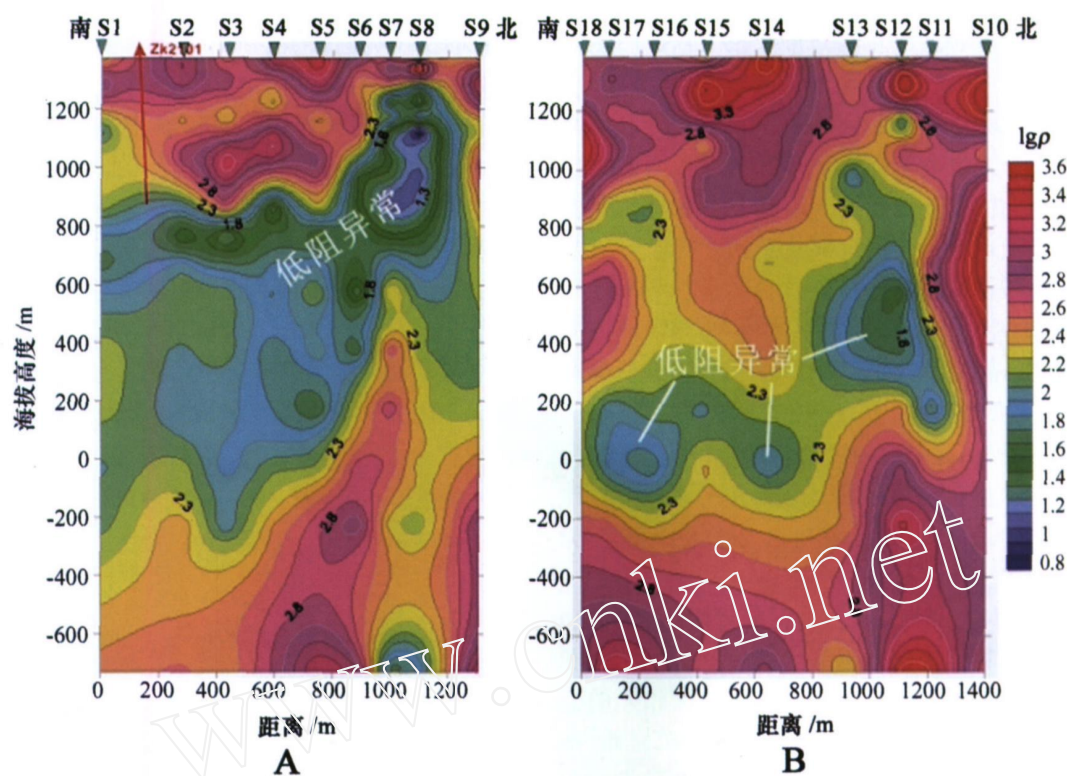


图 3 图拉尔根 21 线 (A) 和 41 线 (B) 大地电磁测深 (MT) 测量结果
Fig. 3 Results of MT survey for line 21(A) and line 41(B) in Tulargen

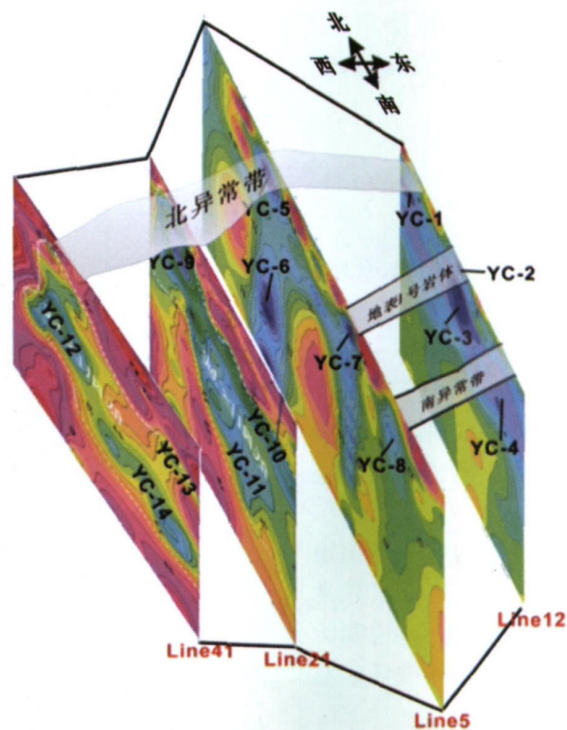


图 4 图拉尔根大地电磁测深 (MT) 栅状图
Fig. 4 Fence map of MT survey in Tulargen

m 之间,北部抬头段埋深较浅,约为 100 m。异常强度最强的异常中心近直立状分布于 S7 与 S8 测点下部的抬头段。柱状异常体宽达 400 m,其深部于 -300 m 高程处尖灭。在 MT 测量前施工的 zk2101 孔终孔于刚进入层状异常体的 520 m 处,见矿情况不太好,仅于终孔前见到约 25 m 的含矿岩体。此楔形异常体的发现对于矿区深部找矿具有重要意义。

(2) 41 线深部发育的低阻异常体呈 3 个不规则的椭圆状,其中 S12 和 S13 测点深部的异常埋深介于 200~900 m, S14 测点和 S16 与 S17 测点下部的异常体较深,介于 900~1 110 m 之间。

由此可见,该区域的 2 个大的异常体的顶部分别位于 21 线(A)的 8 号点和 41 线(B)的 12 号点,建议下一步结合其他勘探成果在这 2 个位置进行验证。

南、北岩体之间在 400 m 的深部可能相连。图 4 给出了图拉尔根大地电磁测深(MT)栅状图,从该图中可看出,矿区有 3 个明显的相连或断续相连的低阻异常体,中部低阻异常带对应于已知含矿岩体(地表号岩体),且规模变大。同时发现了北异常带中的多个低阻异常区 YC-1、YC-5、YC-6、YC-9、YC-12 和南异常带中的低阻异常区 YC-4 和 YC-8,这些新的低阻异常体部分已经证实为新的矿化岩体。从图 4 还可以看出,南、北低阻异常体在深部可能相连。这些数据为该区进一步勘探提供了重要的地球物理资料。

3 结 论

(1) 本研究对大地电磁测深方法的基本原理、野外施工方法、资料处理方法和实际应用进行了系统的总结。

(2) 首次将大地电磁测深方法应用于东天山荒漠戈壁景观下的图拉尔根地区,野外资料采集过程中,在对电极的接地电阻处理方面积累了一定的经验。

(3) 将该方法应用于与超镁铁质岩有关的铜镍矿的勘探,取得了令人满意的效果。利用低阻异常特征可以在本地区指导针对深部的勘探,这说明大地电磁测深方法可以有效地应用于与超镁铁质岩有关的铜镍矿的勘探中。

(4) 大地电磁测深的分辨率还不够高,特别是对 100~1 000 m 的深度区域。对隐伏矿的勘查最

好还要结合其他物探方法进行综合勘探。

(5) 在资料解释方面,二维反演软件还可能存在很多假象,在可能的情况下,需发展和应用三维反演软件,这样才能够给出更精确的结果。

(6) 在反演方法的对比研究上还做得不够,需要结合更多的已知地质体特征,对采集结果进行多种反演方法研究,这样才能进一步认清不同反演方法的优势所在及不同条件下反演参数的选择标准。

致 谢 在野外施工中得到了新疆有色地质勘查局 704 大队的大力配合,在此表示真诚的感谢!

References

- Qin K Z, Xu Y W, Liang G H, Fang T H, Ding K S, San J Z, Zhang L C, Hui W D, Peng X M, Wu H, Cheng S L, Mo X H, Xu Y X, Sun H, Miao Y, Cai X P, Kang F, Zhang B L and Xiao Q H. 2006. Advance in research on metallogenetic regularity, target selection and location prognosis for large-scale Cu, Ni and Au deposits at eastern Tianshan[J]. Mineral Deposits, 25 (Supp): 301~304 (in Chinese).
- San J Z, Tian B, Lei J W, Kang F, Qin K Z and Xu X W. 2003. The discovery of magmatic Cu-Ni deposit of Tulargen with whole-rock mineralization at eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 22(3): 270 (in Chinese with English abstract).
- Stevens K M and McNeice G. 1998. On the detection of Ni-Cu ore hosting structures in the Sudbury igneous complex using the magnetotelluric method[A]. In: SEG Expanded Abstracts[C]. 751~755.
- Sun H, Qin K Z, Li J X, Xu X W, San J Z, Ding K S and Hui W D. 2006. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, east Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting[J]. Geol. in China, 33(3): 157~168 (in Chinese with English abstract).
- Vozoff K. 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins[J]. Geophysics, 37(1): 98~141.
- Xiao Q B. 2004. Study on visibility and application of MT processing softwares [Research report of post-doctoral fellow][D]. Tutor: Cai X P. Chinese Academy of Sciences. 160p (in Chinese).
- Xiao Q B, Cai X P, Xu X W, Liang G H, Zang B L, Wang J, Qin K Z, Peng X M, Hui W D, San J Z, Kang F and Zhang W. 2005. Application of shallow seismic technology and magnetotellurics to location prognosis of concealed metallic deposits: Case study of Tulargen Cu-Ni mining area, Hami, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 24(6): 676~683 (in Chinese with English abstract).
- Zhang P and Alan K. 1998. Using magnetotelluric for mineral exploration[A]. In: SEG Expanded Abstracts[C]. 776~779.
- Zhan Y, Zhao G Z and Tang J. 1999. Electrical structure of deep crust in Manasi earthquake region, Xijiang[J]. Earthquake & Geol., 21(2): 159~166 (in Chinese with English abstract).

Zhao G Z, Liu G D and Zhan Y. 1998. The study on upper mantle structure of Zhangbei-Shangyi earthquake region and its adjacent area [J]. *Earthquake & Geol.*, 20(2): 155 ~ 162 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

秦克章, 徐兴旺, 梁光河, 方同辉, 丁奎首, 三金柱, 张连昌, 惠卫东, 彭晓明, 吴 华, 程松林, 许英霞, 孙 赫, 缪 宇, 莫新华, 蔡新平, 康 峰, 张宝林, 肖庆华. 2006. 东天山东段大型铜、镍、金矿床成矿规律研究、靶区优选与隐伏矿定位预测的重要进展[J]. *矿床地质*, 25(增刊): 301 ~ 304.

三金柱, 田 斌, 雷军文, 康 峰, 秦克章, 徐兴旺. 2003. 新疆东天山新发现图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍矿床[J]. *矿床地质*, 22

(3): 270.

孙 赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首, 惠卫东, 许英霞. 2006. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J]. *中国地质*, 33(3): 157 ~ 168.

肖骑斌. 2004. 大地电磁测深处理软件可视化与应用研究(博士后出站报告)[D]. 导师: 蔡新平. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所. 160 页.

肖骑彬, 蔡新平, 徐兴旺, 梁光河, 张宝林, 王 杰, 秦克章, 彭晓明, 惠卫东, 三金柱, 康 峰, 张 文. 2005. 浅层地震与 MT 联合技术在隐伏金属矿定位预测中的应用[J]. *矿床地质*, 24(6): 676 ~ 683.

詹 艳, 赵国泽, 汤 吉. 1999. 新疆玛纳斯大震区地壳深部的电性结构[J]. *地震地质*, 21(2): 159 ~ 166.

赵国泽, 刘国栋, 詹 艳. 1998. 张北-尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构[J]. *地震地质*, 20(2): 155 ~ 162.

www.cnki.net