

文章编号 10258-7106 (2006) 01-0036-07

EH-4 电导率成像系统的特点及其在金属矿勘探中的应用*

孟贵祥¹, 兰 险²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 新疆地质矿产局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要 EH-4 电导率成像系统是一种混场源频率域电磁观测系统, 具有轻便、高效、勘探深度大、分辨率高的特点。通过在块状硫化物铜矿、斑岩铜矿已知矿区的试验研究, 证实 EH-4 系统在这两种矿床类型的隐伏-半隐伏金属矿勘探中有较好的找矿效果。

关键词 地球物理; EH-4 电导率成像系统; 金属矿勘探; 应用效果

中图分类号: P631.3⁺25

文献标识码: A

Characteristics of EH-4 electrical conductivity imaging system and its application to ore exploration

MENG GuiXiang¹ and LAN Xian²

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Xinjiang Bureau of Geology & Mineral Resources Exploration and Development, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract

EH-4 electrical conductivity image system is an electromagnetic observation system of hybrid field source in frequency domain which has most advantage character include portable, high-efficiency, high-resolution and deep survey. This system have good application effect in the concealed metallic mine exploration confirmed by test research in known VHMS and porphyry copper mine.

Key words: geophysics, EH-4 electrical conductivity imaging system, ore exploration, application effect

1 EH-4 系统简介

StratagemTM EH-4 电导率成像系统(简称 EH-4 系统)是美国 EMI 和 Geometrics 公司联合生产、以地壳上部(0~2 km)为主要探测和研究目标的频率域电磁测深仪。

EH-4 系统属于部分可控源的大地电磁测深仪。其观测的基本参数为正交的 2 个电场分量(E_x, E_y)和 2 个磁场分量(H_x, H_y)。利用上述观测的参数

可求得 2 个不同方向上的视电阻率,进而计算张量阻抗,获取地层的电阻率值。

EH-4 系统与其他电磁法勘探仪器相比,其突出的特点是:①巧妙地利用了天然场和人工场相结合的方式,采用部分可控源人工场补充天然场缺失或不足部分的方式来进行测量,减少了低频发射的笨重设备;②采用 2 个正交半圆形天线(水平磁偶极子),发射高频电磁波(750 Hz~66 kHz),构思新颖,收发距短,便于野外工作;③该系统既可作单点测深,又可做连续剖面观测,点距、频点密集,能较充分

* 本文得到地质调查项目(编号 2001300105)的资助

第一作者简介 孟贵祥,男,1968 年生,高级工程师,在读博士研究生,主要从事金属矿产资源勘查和研究工作。

收稿日期 2005-06-06;改回日期 2005-09-29。

地反映地下的地质信息；④ 可在现场实时提供电磁场功率谱、振幅谱、视电阻率、相位、相关度、一维反演等信息，以便检查质量，确保野外资料可靠；⑤ 现场可给出连续剖面(至少 3 个相邻测点)的似二维反演结果。

EH-4 系统主要由发射、接收、资料处理 3 部分组成。该系统的工作流程如图 1 所示，野外工作布置见图 2(郭建强等，1998；于爱军等，2002)。

接收部分主要由主机、前置放大器(AFE)、磁传感器、带有缓冲器的电极及其附属设备组成。发射部分主要由发射天线、发射机及 12V 直流电源组成。发射天线采用构思新颖的 2 个正交的半圆形天线，是该系统的独特处之一。发射机本身的发射频率为 500 Hz~100 kHz，与发射天线的阻抗相匹配。采用不同的发射天线，其发射频率不同，采用标准配置天线，其发射频率为 1 Hz~64 kHz；采用低频配置天线，其发射频率为 500 Hz~32 kHz。发射机定位的收发距(r)应是最低工作频率时“趋肤深度”的 3 倍，即

$$r=3\times\delta=3\times503\left(\rho/f\right)^{1/2}$$

式中， r 是收发距； δ 是趋肤深度； ρ 是平均大地电阻率； f 是最低工作频率。

该系统的数据采集方式是时域采集，然后进行傅立叶变换，转换为频率域信号，即首先在时间域将 4 道(2 个电道，2 个磁道)的电磁信号收集起来，进行傅立叶变换，转换为电磁信号的实分量、虚分量功率谱，通过频谱来计算视电阻率、相位差、相关系数等。资料处理分为实时处理和后续处理。实时处理，是根据每个测点给出的视电阻率、相位、相关度及振幅曲线，进行数据质量的实时分析。当发现观测曲线的数据质量太差时，可采取措施，实时重复测量。在完成整条测线的连续观测后，可在现场采用 EMAP 法给出似二维反演解释结果的灰度图。后续处理是野外工作结束后在室内完成的一项工作，一般包括 2 个内容：① 在主机上对野外数据进行相关系数、滤波系数的调整，或对时序资料(Y 或 V 文件)进行逐个挑选或剔除等重新处理，尽量降低影响因素，突出有用异常；② 在上述工作的基础上，将最终二维反演

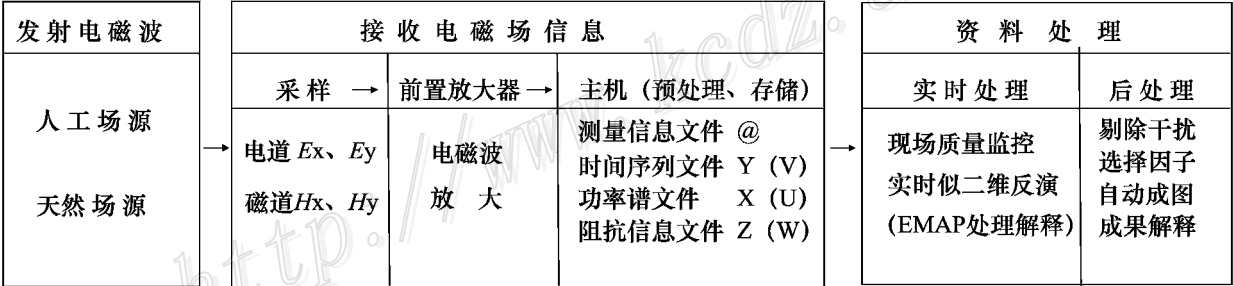


图 1 EH-4 系统工作流程

Fig.1 Working flow chart of Stratagem™ EH-4 system

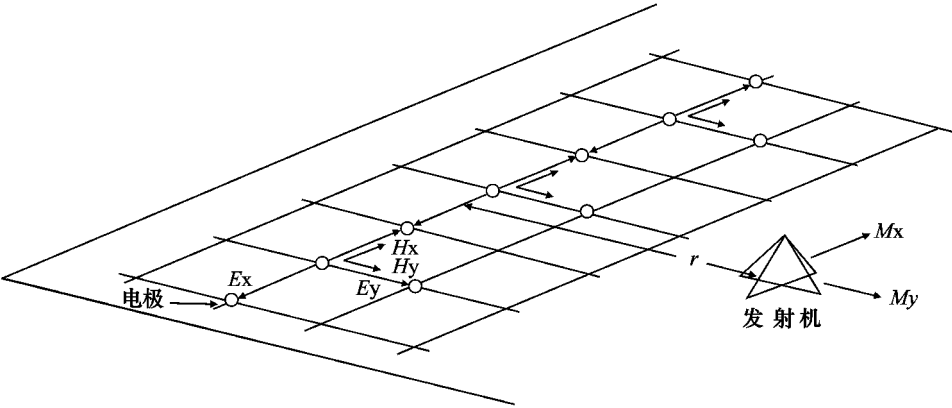


图 2 EH-4 系统野外工作布置示意图

Fig.2 Sketch map showing collocation of Stratagem™ EH-4 system in field

处理后的结果文件输出、成图,结合其他的地质、地球物理和地球化学信息进一步做定性及定量解释。

2 EH-4 系统的原理与技术特点

电磁测深法作为综合地质、地球物理勘探研究的手段之一,在中国已有 30 多年的发展历史,这一方法的基本原理是,根据电磁感应理论来研究天然或人工(可控)场源在大地中激励的电磁场的分布,并由观测到的电磁场值来研究地电断面所代表的地质信息。常用的电磁测深方法有:天然场源磁大地电磁测深法(MT),可控源(人工场源)音频大地电磁测深法(CSAMT),天然场源音频大地电磁测深法(AMT),甚低频电磁法(VLF),人工场源瞬变电磁测深法(TEM)。前 4 种属频率域电磁测深法,后者属时间域电磁测深法。随着测量技术的进步,在一个点上测量 0.005 Hz 到 200 Hz 范围的卡尼亚电阻率,使电磁测深法的勘探深度可以达到几百千米,使之成为石油勘探和研究大地构造的一种十分有效的勘查手段。随着社会经济发展的需求,该方法在理论、数据处理、资料解释、工作方法和仪器设备等方面都取得了显著的进展,理论研究已基本成熟,在世界范围内已得到广泛的认可和普遍使用(伍岳等,1998)。

EH-4 电导率成像系统(标准装置)的观测频段为 12.6 Hz~66 kHz,主要利用天然的大地电磁场源,但在部分频段内同时利用(联合接收)天然的大地场源和人工控制场源。因此,雷电活动是最主要的高频场源。一般认为,频率高于 1 Hz(周期小于 1s)的大地电磁来源于地壳大气圈内与雷电活动有关的天电扰动,或可以说几乎全是由雷电活动引起的。很远距离的雷电活动提供了一个近乎均匀的信号源,利用高频的雷电活动信号,可以探测地壳浅层构造以及岩脉和矿化带等,同时亦可用于寻找浅层的地下水和地热异常区。

从 EH-4 系统所测的频率范围(12.6 Hz~66 kHz)来看,在其功率谱上会形成 10^0 Hz 及 10^3 Hz 2 处信噪比明显较低的“噪声洞”,尤其是 10^3 Hz 附近的“噪声洞”更为明显,从而很难在该频段附近取得可靠的信息。对以地壳浅部为主要探测和研究目标的 EH-4 系统而言,该频段是十分重要的测频段,因此,需要提高该频段的信号质量,应采用人工可控场源以弥补天然信号的不足。

EH-4 系统在完成整条测线的连续观测后,可采

用 EMAP 法给出似二维反演解释结果的灰度图。采用 EMAP 法处理的二维资料可以较好地消除静态效应的影响(昌彦君等,2002)。根据测量相互正交的电场和磁场来计算电阻率,是将阻抗的频率特征变换为习惯的视电阻率形式:

$$\rho_s = 0.2 T |Z|^2 = 0.2 T |E_x| |H_y|$$

式中: ρ_s —视电阻率; T —周期; $|Z|$ —电磁波阻抗的模; $|E_x|$ 、 $|H_y|$ 分别为互相垂直的正交电场及磁场水平分量的模。

该系统具有以下突出特点:

① 巧妙地采用了天然场与人工场相结合的方式,使用部分可控源补充局部频段信号较弱的天然场,完成整个工作频段的测量;② 发射装置轻便,便于野外多次移动;③ 多次叠加采集数据,提供丰富的地质信息;④ 实时数据处理和显示,资料解释简捷,图像直观,并确保现场观测的质量;⑤ 现场直观给出连续剖面的似二维反演结果;⑥ 勘探深度较大,分辨率高;⑦ 除用以进行地质找矿外,还可用于地下水调查、工程地质勘查、基岩地质填图、地质构造填图及环境调查等诸多领域。

3 EH-4 系统用于中-深部地球物理勘探的探测能力

在实践中,人们所关心的主要是该系统的几个重要参数(探测深度、分辨率),以及仪器在实际应用中的几个重要指标和限制条件(抗干扰能力、地形影响、接地条件等),这些与该系统的应用范围以及所要解决的有关地质问题的准确性密切相关。

3.1 探测深度(D)

EH-4 系统的探测深度亦即其所反映的电磁波在地下介质中的穿透深度。通常使用的是趋肤深度 $[\delta = 503 \times (\rho/f)^{1/2}]$,它与电阻率和频率有关。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,但并不代表实际的有效探测深度,而只可能是该系统的最大探测深度。事实上,探测深度是一个比较模糊的概念,它大体上是指某种测深方法的体积平均探测深度。在实际工作中,较好的经验公式是 $D = \delta/2 = 356 \times (\rho/f)^{1/2}$,这一公式在已知孔旁的地下咸淡水划分中的应用有更好的实用效果。目前,在 EH-4 系统的工作频率都已确定的条件下,各频点的探测深度只与地下介质的平均电阻率有关,最大探测深度就是最低频点所反映的深

度。很显然,在高阻地区,探测深度大,而在低阻地区,探测深度则小。

最浅与最大勘探深度 讨论该问题对确定在实际工作中是否选用该系统进行探测是有用的。这里所说的最浅勘探深度是指该系统的起始探测深度,最大勘探深度是指通常所理解的最大探测深度。对EH-4系统而言,其勘探深度范围的计算依据有2点:①该系统的最大工作频点与最小工作频点;②工作区内的地下平均电阻率及近地表的平均电阻率。应用趋肤深度公式进行计算,即 $\delta \approx 503 \times (\rho/f)^{1/2}$ 。如工作区的大地平均电阻率为 $10 \Omega \cdot m$,取最高工作频率为 $66\,000 \text{ Hz}$,最低工作频率为 12.6 Hz ,则其探测深度的范围约为 $6.2 \sim 448 \text{ m}$;当大地平均电阻率为 $50 \Omega \cdot m$ 时,探测深度范围为 $13.84 \sim 1\,002 \text{ m}$ 。当然,使用经验公式进行计算虽然保守一些,但也是较为稳妥的做法。

3.2 分辨率

在目前后处理中取样频点固定(共计58个点)的情况下,该系统的分辨率与野外作业所采集到的信号强度有关(是否缺少频点);另外,垂向分辨率与地下介质的平均电阻率密切相关,即垂向分辨率在低阻地区高于高阻地区,其水平方向分辨率与电极距的大小有关,但也受静态效应影响的限制。

3.2.1 水平(横向)分辨率

该分辨率主要与电场偶极子的尺寸有关,根据一般的规律,沿测线(TE方式)的横向分辨率粗略等于偶极子的尺寸大小,虽然更小的目标也是可以探测的,但要分辨其位置仍然取决于电场偶极子的大小,也就是说,分辨小尺寸的目标体应使用小的电偶极子。电偶极子尺寸,也即电极距的大小,在电极距大小试验中已作过叙述,电极距尽可能大些,主要考虑到地表电性不均匀体的影响。以上论述的是地表浅部的水平(横向)分辨率问题。深部的横向分辨率是信号波长(频率)和排列尺寸的函数。在低频时,由于长波信号勘查范围的扩大,分辨能力会降低。在电偶极子尺寸确定的情况下,横向分辨率取决于波长 $\lambda = 2\pi\delta \approx 3\,160 \times (\rho/f)^{1/2}$,而波长 λ 则与大地的平均电阻率(ρ)及频率(f)有关。在 ρ 确定的情况下,则与 f 有关,例如 $\rho = 100 \Omega \cdot m$, $f = 100 \text{ Hz}$ 时,其横向分辨率为 $3\,160 \text{ m}$,当 $\rho = 1 \Omega \cdot m$, $f = 100 \text{ Hz}$ 时,横向分辨率为 316 m ,由此可见,该系统对良导体的分辨率会显著提高。

3.2.2 垂向分辨率

对于水平分辨率,通过加密工作点距得到改善,以提高对物体的水平分辨能力,而对于垂向分辨能力,则无法进行人为改善。一般来说,对地下地质构造的垂向分辨能力,取决于地质体的横向尺寸、厚度、埋深以及与围岩的电阻率关系。良导层相对高阻层(相对)要容易分辨,一个粗略的经验是:如果层的厚度(ΔH)与埋深(h)之比大于层与围岩的电阻率之比的平方根的0.2倍,即 $\Delta H/h \geq 0.2 \times (\rho_{\text{层}}/\rho_{\text{围}})^{1/2}$,那么,该层就可以被分辨出来。对一般电阻层而言,其厚度与埋深之比为0.2时,只有当与围岩的电阻率之比在10倍以上时,才可分辨出来。象基底这样埋深的厚层,比中间层更好分辨。二维与三维的物体相比较,相同埋深的层状体往往更难分辨。

在实践中,EH-4系统的观测频点有58个,每个频点的趋肤深度都不同。由趋肤深度公式 $\delta = 503 \times (\rho/f)^{1/2}$ 来看,趋肤深度与电阻率和频率是有关的,在电性一定的情况下,是通过改变工作频率来达到测深的目的,随着频率的降低,探测深度会逐渐加大。相邻频点间的探测深度的差值,可近似地看作为相应深度上的垂向分辨率。由此可见,该系统在低阻地区的垂向分辨率会明显高于高阻地区的垂向分辨率,良导层的垂向分辨率会高于高阻层的垂向分辨率。

4 EH-4系统在金属矿勘探中的应用效果

4.1 在块状硫化物矿——阿舍勒铜锌矿床的应用效果

阿舍勒铜锌矿床是新疆地质矿产局第4地质队于20世纪80年代末在哈巴河县发现并成功勘查的一个大型块状硫化物矿床(叶庆同等,1997)。矿体产于中泥盆统阿舍勒组中酸性火山岩中。矿床由4个矿体组成,主矿体为1号矿体,其形态在横剖面上呈鱼钩形(图3)。矿体由下部往上,其矿石类型分带为:黄铁矿矿石→含铜黄铁矿矿石→铜锌黄铁矿矿石→多金属矿石→多金属重晶石矿石。

EH-4剖面沿1号主矿体1勘探线布置,长 0.7 km ,跨越了地下隐伏矿体(见图3)。围岩表现为高阻特性。剖面中部(即矿体上部,深度约为 $170 \sim 300 \text{ m}$)的低阻异常,为破碎细碧岩的反映;在ZK105孔下方,发现了宽约 200 m 的相对低阻体(由上向下电阻率值由 50 增大到 $1\,400 \Omega \cdot m$),向下延深逾 $1\,000$

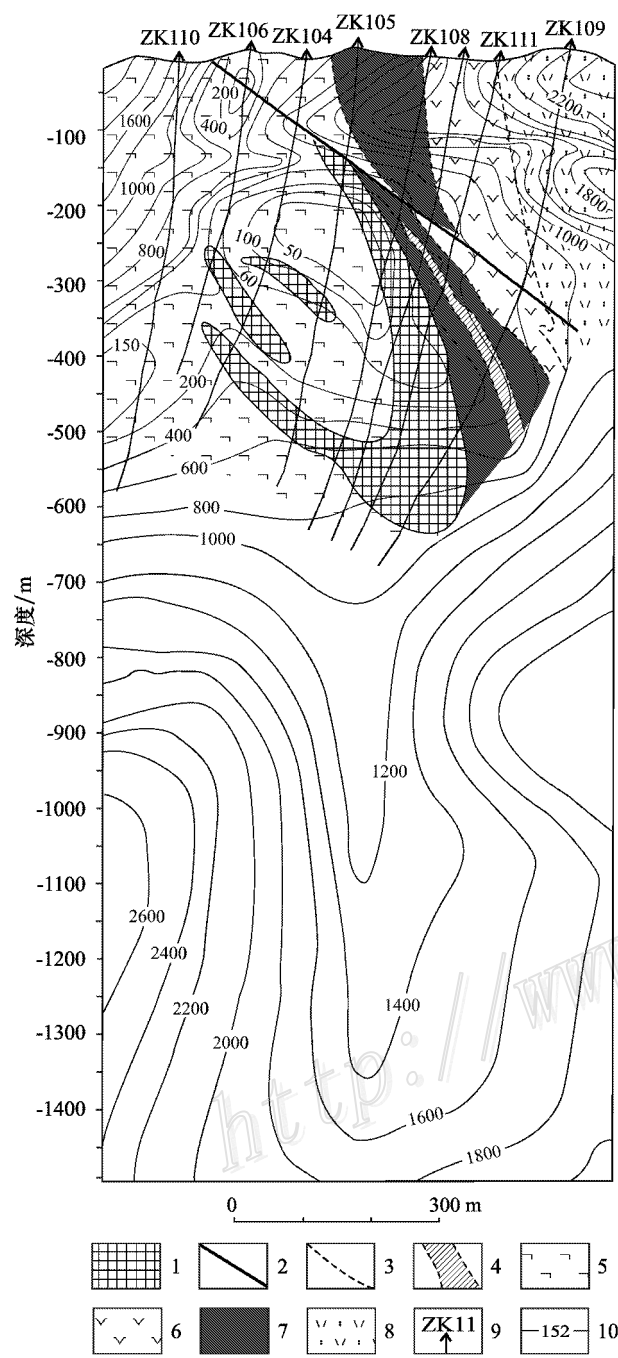


图3 阿舍勒铜锌矿床1勘探线EH-4电磁测深电阻率断面图

1—铜矿体 2—断层 3—地质界线 4—石英脉 5—细碧岩 6—角斑岩 7—重晶石 8—凝灰岩 9—钻孔及编号 10—电阻率曲线

Fig.3 Resistivity cross section of EH-4 electromagnetic system sounding along No. 1 exploration line in Ashele copper deposit

1—Copper body; 2—Fault; 3—Geological boundary; 4—Quartz vein; 5—Spilitite; 6—Keratophyre; 7—Barite; 8—Tuff; 9—Drill hole and serial number; 10—Resistivity curve

m,清楚地反映了隐伏块状铜矿体及其可能向下延伸的部位。对原始数据进行分析后发现,在原始数据采集时,在2 800~3 000点之间,有部分重要频点(其反映的深度约350~500 m)未采集到有效的电磁场数据,因而,经EMAP处理后对主矿体下部的反映不理想。

4.2 在延东斑岩型铜矿区的应用效果

延东铜矿是新疆地质矿产局第1地质队于上世纪90年初在哈密发现的一个大型斑岩型铜矿床(陈富文等,2005 芮宗瑶等,2002)。区内中酸性侵入岩体发育,其中,闪长玢岩、斜长花岗斑岩等浅成侵入体与矿化有关,这些与成矿有关的岩体侵入到晚古生代火山岩、沉积岩中。矿区出露有下泥盆统、石炭系、中侏罗统及第四系。下石炭统企鹅山群是主要的赋矿地层,总体南倾,倾角25~65°。矿体主要赋存于斜长花岗斑岩中。钻探控制矿(化)体长3 200 m。矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿为主。主矿体为巨厚板状,单个钻孔见矿厚度为2~183 m,平均约60 m,矿体延深逾800 m,铜品位为0.12%~2.17%。

ZK001 钻孔位于0 勘探线EH-4 测量剖面的2100 点处,钻孔内地表几十米至800 m 深度段有矿体分布,矿体呈似板状,向南陡倾(庄道泽,2003)。采用TM(图4a)和TE(图4b)2 种方式联合分析解释。这2 种方式在测深断面上的Bostick 反演视电阻率值,在横向上呈现南大北小的总体特征,南部高阻区反映出玄武岩电性特征,北部低阻区反映出侏罗系地层,与地质工作的认识基本一致。TM 方式视电阻率等值线呈现近似直立状的特征,横向大致范围位于2150~2300 点之间,纵向延深从近地表至地下900 m 深度左右;TE 方式视电阻率等值线在该区间的反映较TM 方式更好。TM 方式在地下500~600 m 区间段的分辨较差。这2 种方式的Bostick 反演电阻率特征等值线区间划分的结果与已知含矿岩体的空间赋存位置基本吻合(图4)。

5 结 论

EH-4 系统在阿舍勒铜锌矿床和延东铜矿区的成功实践,表明其在金属矿勘查中具有较高的分辨率和较大的探测深度。笔者通过多年工作,得出以下结论:

(1)EH-4电磁成像系统比较轻便,对地形环境

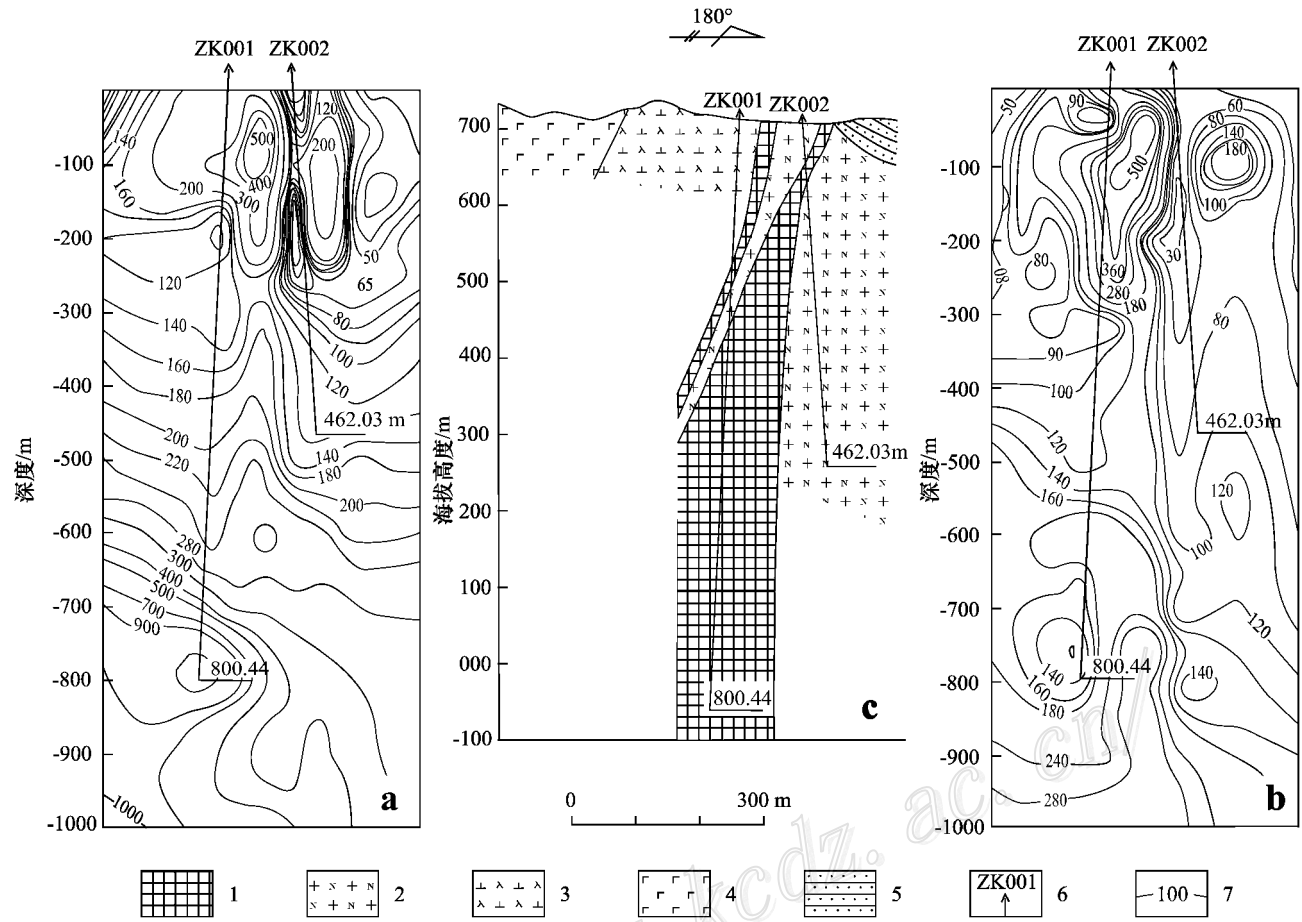


图 4 延东铜矿区 0 勘探线 EH-4 电磁测深电阻率断面图

a. TM 方式； b. TE 方式； c. 地质剖面

1—铜矿体 2—斜长花岗斑岩；3—闪长玢岩；4—玄武岩；5—砂砾岩；6—钻孔及编号；7—电阻率曲线

Fig. 4 Resistivity cross section of EH-4 electromagnetic system sounding along No. 0 exploration line in Yandong copper deposit

a. TM array； b. TE array； c. Geological profile

1—Copper body；2—Plagiogranite porphyry；3—Diorite-porphyrity；4—Basalt；5—Glutenite；6—Drill hole and serial number；7—Resistivity curve

要求低,测量速度快,其效率远高于普通直流电测深法。

(2) 该系统受干扰小,特别是在沙漠、戈壁及草原地区,其探测深度和分辨率均可达到最佳。

(3) 该系统在定量解释方面,还必须与地震勘探等其他地球物理勘探方法相结合,以提高其解释精度。

致 谢 衷心感谢吕庆田研究员、庄道泽博士、严加永博士、张宏远博士等的热情帮助,由衷感谢刘光海研究员的指导和对本文的仔细审阅。

References

Chang Y J, Wang H J and Luo Y Z. 2002. Study of the non-far-zone field correction for the sounding data of the EH-4 system[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 32(2): 78~81 (in Chinese with English abstract).

Chen F W, Li H Q, Chen Y C, Wang D H, Wang J L, Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu—Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mount[J]. Acta Geologica Sinica, 79 (2) 256~261 (in Chinese with English abstract).

Guo J Q, Wu Y, Shao R J and Cao F X. 1998. A brief description of Stratagem™ EH-4 electrical conductivity image-forming system and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 22

(6):457~464 (in Chinese with English abstract).

Rui Z Y, Wang L S, Wang Y T and Liu Y L. 2002. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 21(1):16~22 (in Chinese with English abstract).

Wu Y, Liu H B and Dong X K. 1998. Application of EH-4 conductivity image system to sandstone type uranium deposits [J]. Uranium Geology, 14(1):32~37 (in Chinese with English abstract).

Ye Q T, Fu X J and Zhang X H. 1997. Geological characteristics and genesis of the Ashele copper-zinc massive sulfide deposit, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 16(2):97~106 (in Chinese with English abstract).

Yu A J, Huang H, Xu D L, Ma M Y, Chen R L and Zhao X F. 2002. Application effect of EH-4 electromagnetic system in gold deposit finding: Taking example of Shandong and Yangshan deposit in Gansu[J]. Gold Geology, 8(1):51~55 (in Chinese with English abstract).

Zhuang D Z. 2003. The Geochemical characteristic and anomaly verification methods of Tuwu and Yandong copper deposits in the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Geology and Prospecting, 39(5):13~17 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

昌彦君, 王华军, 罗延钟. 2002. 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), 32(2):78~81.

陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 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, 79(2):256~261.

郭建强, 武毅, 邵汝君, 曹福祥. 1998. Stratagem™ EH-4 电导率成像系统简介及应用[J]. 物探与化探, 22(6):457~464.

芮宗瑞, 王龙生, 王义天, 刘玉琳. 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论[J]. 矿床地质, 21(1):16~22.

伍岳, 刘汉彬, 董秀康. 1998. EH-4 电导率成像系统在砂岩铀矿上的应用研究[J]. 铀矿地质, 14(1):32~37.

叶庆同, 傅旭杰, 张晓华. 1997. 阿舍勒铜锌块状硫化物矿床地质特征和成因[J]. 矿床地质, 16(2):97~106.

于爱军, 黄辉, 徐德利, 马孟远, 陈瑞林, 赵新峰. 2002. EH-4 电磁系统用于金矿找矿的效果——以山东山后和甘肃阳山矿区为例[J]. 黄金地质, 8(1):51~55.

庄道泽. 2003. 新疆东天山地区土屋、延东铜矿地球化学特征与异常查证方法[J]. 地质与勘探, 39(5):13~17.

<http://www.kcdz.ac.cn/>