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(Ex ,Ey) 和 2 个磁场分量(Hx ,Hy)。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 $r = 3 \times \delta = 3 \times 503 (\rho f)^{1/2}$

式中 ,*r* 是收发距 ;*∂* 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

发射电磁波		接	收电磁场信		0	资料处	理
人工场源 天然场源		采 样 → 电道 <i>Ex、Ey</i> 磁道 <i>Hx、Hy</i>	前置放大器 → 电磁波 放 大	主机 (预处理、存储) 测量信息文件 @ 时间序列文件 Y (V) 功率谱文件 X (U) 阳抗信息文件 Z (W)		实 时 处 理 现场质量监控 实时似二维反演 (EMAP处理解释)	后 处 理 剔除干扰 选择因子 自动成图 成果解释
1	n í	FUP"					

图 1 EH-4 系统工作流程

Fig. 1 Working flow chart of StratagemTM 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 StratagemTM 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 10⁰ Hz 及 10³ Hz 2 处信噪比明显较低的"噪声洞",尤其是 10³ 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:

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

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工 作方式,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: $D = \delta I(2)^{1/2} = 356 \times (\rho/f)^{1/2}$,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 Hz,最低工作频率为 12.6 Hz, 则其探测深度的范围约为 6.2~448 m;当大地平均 电阻率为 50 $\Omega \cdot m$ 时,探测深度范围为 13.84~1002 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 $\lambda = 2\pi \delta \approx 3160 \times (\rho f)^{1/2}$,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 Hz时,其横向分辨率为 3 160 m,当 $\rho = 1 \Omega \cdot m$, f = 100Hz时,横向分辨率为316m,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 $\Delta H/h \ge 0.2 \times (\rho_{\rm g}/\rho_{\rm m})^{1/2}$,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 $\delta = 503$ ×(ρ / f)^{/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

- 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 170~300 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 Ω·m),向下延深逾 1 000



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



要求低,测量速度快,其效率远高于普通直流电测深 法。

References

(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。

- 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 StratagemTM EH-4 electrical conductivity image-forming system and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 22

(6): $457 \sim 464$ (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 $(1):16 \sim 22$ (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): $32 \sim 37$ (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 \sim 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 anomoly verifica-tion methods of Tuwu and Yandong copper deposits in the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Geology and Prospecting, 39 $(5): 13 \sim 17$ (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[]] 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. StratagemTM EH-4 电导率 成像系统简介及应用[J].物探与化探,22(6):457~464.
- 芮宗瑶,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[」]. 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[]]. 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[]]. 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