

西藏白容铜矿 EH-4 数据综合解译与深部找矿预测*

王正海¹, 王娟¹, 姚卓森², 方臣¹

(1. 中山大学地球科学系, 广东广州 510275;

2. 中国科学院地质地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 西藏白容铜矿为近期发现的一斑岩型铜矿床, 查明矿区北部深部二长花岗斑岩埋深、形态及矿(化)体分布情况是进一步勘探的关键。在白容铜矿北部选择有利成矿地段进行 EH-4 连续电导率剖面测量, 根据白容矿区岩(矿)石电性差异, 通过二维定性、定量反演结合矿床地质模型, 对拟二维等值线剖面进行综合地质解译。结果表明: 二维视电阻率-深度剖面图能清晰地反映地下不同地质体的精细电阻率结构, 整个剖面可划分为 5 种截然不同的电性体。其中, IV 高阻体为隐伏二长花岗斑岩, III 层中等电阻体为石英二长斑岩体; V 层低阻体共有三处, 为火山热液及斑岩有关的 Cu、Mo 矿化(体)。

关键词: EH-4 成像系统; 深部预测; 综合解译; 白容铜矿

中图分类号: P631 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2013)04-0125-05

EH-4 Data Comprehensive Interpretation and Deep Prospecting of Bairong Copper Deposit in Tibet

WANG Zhenghai¹, WANG Juan¹, YAO Zhuoshen², FAN Chen¹

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The Bairong copper deposit of Tibet is a porphyry-type deposit discovered recently. The key for the further exploration is to identify burial depth, morphology and mineral body distribution of monzogranite porphyry in the northern part of the deep mine. An EH4 continuous conductivity profile was measured at the favorable metallogenic district in the northern part of Bairong copper deposit. The electrical difference in the mining-induced rock (ore) was used to interpret the comprehensive geology of quasi-two-dimensional contour section through two-dimensional qualitative and quantitative inversion combined with the geological model of the deposit. The results showed that the two-dimensional apparent resistivity - depth sectional drawing can clearly reflect the underground different geologic body of elaborate resistivity structure. The whole section can be divided into five kinds of different electrical body, among which layer IV of high resistance is speculated for concealed monzogranite porphyry body; Layer III of medium resistance is speculated for quartz monzonitic porphyry; Layer V of low resistance body consists of three parts, suggesting volcanic hydrothermal and porphyry Cu, Mo mineralization (body).

Key words: EH-4 electromagnetic image system; mineral exploration; data processing and interpretation; Bairong copper deposition

* 收稿日期: 2012-12-28

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20090171120018); 云南铜业集团公司西藏尼木铜矿找矿评价项目基金资助项目

作者简介: 王正海(1971年生), 男; E-mail: wzhenh@mail.sysu.edu.cn

随着地表易找、易采、易利用矿产地的大多被发现和开发,找矿难度日益加大。矿产勘查的前沿问题就是要寻找隐伏矿和难识别矿勘查的新技术、新理论、新方法。EH-4 大地电磁成像系统具有探测深度大、精度较高、分辨率好、快速、轻便的优点,在金属矿勘查中取得了较好的找矿效果。

西藏白容铜矿位于西藏尼木县西北部麻江乡,为一斑岩型铜矿床,前期的地质勘探工作在白容矿区南部及西部发现了两处规模较大铜矿体和若干小型矿化点。铜矿化主要与 E_{2xm} 期的二长花岗斑岩有关。在矿区北部主要出露的是 E_{2xm} 花岗闪长斑岩及 $(K_2 - E_1)$ d 典中组凝灰岩,目前未发现铜矿(化)体。此次探索利用 EH-4 系统进行深部找矿研究,目的是希望查明白容矿区北部深部二长花岗斑岩埋深、形态及矿(化)体分布情况,为下一步的铜矿勘查工作提供方向和依据。

1 矿区地质概况

西藏白容铜矿区大地构造位置位于冈底斯火山-岩浆弧东段,近东西向的帕古-热堆脆韧性剪切带与羊八井-当雄走滑断裂的交会部位,属冈底斯-喜马拉雅地区的谢通门-墨竹工卡铜、铁、铅、锌、金成矿带^[1]。

矿区地层简单,白容北部和西部出露下古近系古新统典中组 (E_1d) 爆发-喷溢相灰色、灰绿色及紫红色玄武岩、黑云母安山岩、安山斑岩和英安质凝灰岩夹火山集块岩。白容矿区的主要断裂构造以东向西麻达-冲江断裂为主体,其次为与之相接的南北向断层,以及其派生的北西向和部分北东向断裂。勘查区岩浆岩体为复式岩体,陆缘弧中酸性岩浆岩、火山碎屑岩广泛分布,主要出露二长花岗斑岩、含巨斑角闪黑云二长花岗岩、花岗闪长斑岩、凝灰岩,次为安山玢岩、英安斑岩,及少量石英正长斑岩和闪长玢岩。与成矿有关的浅层侵入岩主要为安岗超单元之续迈单元 (E_{2xm}) 的黑云角闪二长花岗岩^[2]。

白容铜矿为复式岩体成矿,分异演化充分,有利于含矿热液的集中与富集成矿,而且岩浆热液活动持续时间较长,斑岩体规模较大,蚀变与矿化明显。白容矿区主要的容矿岩石为角闪黑云二长花岗岩和花岗闪长斑岩,次为闪长玢岩,局部见正长斑岩、安山玢岩脉体、透镜体。与铜矿化有关的围岩蚀变发育,地表出露的主要蚀变有硅化、泥化、黄铁绢英岩化和青磐岩化,在钻孔深部见到钾化蚀变,蚀变具有一定的分带现象,由下到上,由岩体

中心向外延,大体可以划分为钾硅化带、黄铁绢英岩化带、泥化带及青磐岩化带^[3]。

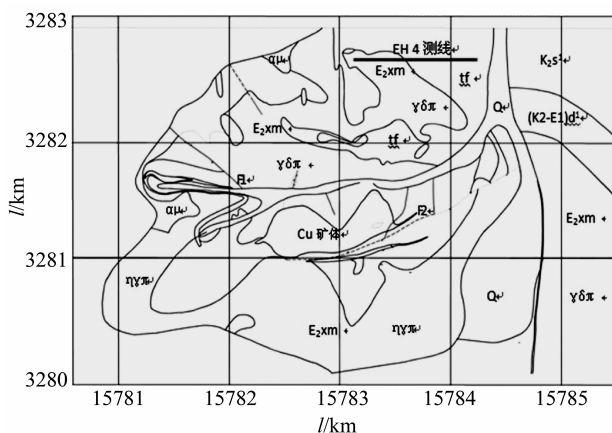


图 1 西藏白容铜矿地质图

Fig. 1 Geological map of the Bairong copper mine in Tibet

2 EH-4 成像系统基本原理

美国 EM I 和 Geometrics 公司联合开发生产的 EH-4 大地电磁成像系统通过发射和接收地面电磁波来探测所在地质体的电阻率或电导率。连续的测深点阵组成地下二维电阻率剖面,甚至三维立体电阻率成像。该系统属于人工电磁场源与天然电磁场源相结合的一种大地电磁测深系统^[4]。其观测的基本参数为:正交的电场分量 (E_x, E_y) 和磁场分量 (E_x, E_y)。

假设大地为水平介质,天然电磁场为平面波垂直入射大地,则在地面可观测到相互正交的电磁场分量 E 和 H , 将其比值定义为大地电磁波阻抗,用 Z 表示。便可通过下式计算出卡尼亚视电阻率(张量) ρ

$$Z = \sqrt{\omega\mu\rho\rho} = \frac{1}{5f} |EH|^2$$

式中, Z 为大地电磁波阻抗, μ 为磁导率, ρ 为电阻率。

将电磁波在地下传播时,振幅值衰减到地面幅值 $1/e$ 的深度定义为趋肤深度 δ (m), 则

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho T 10^7}{8\pi^2}} = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{10\rho T} \approx 503\sqrt{\rho T} = 503\sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

趋肤深度 δ 与频率的平方根成反比,与大地的电阻率的平方根成正比。由该式可知,当电磁波频率高时,勘探深度小,随着频率的降低,勘探深度也随着增大。

对于 EH-4 成像系统来说,当在 10 ~ 100 kHz 这个频带上从高频到低频测量采集每个频点上的电

场和磁场分量时，其实就相当于从地表逐步向下确定地电介质的结构情况。这就是高频大地电磁测深法的基本原理。

3 野外数据采集

此次 EH-4 测线布置在白容矿区的最北端（图 1），东西走向，共设计了 42 个测点，间距 25 m，测线总长度 1 050 m。测区地形开阔、平坦，高差较大，尤其是测线的西段，有些相邻测点间高差高达 20 m 以上，测线距离南侧河流距离有 700 m 左右。区域内无高压输电线、电站、村庄、工厂等强干扰设备，距离公路也较远，属于较为理想的 EH-4 测量环境。为了获得较好的原始数据，此次采用 EMAP 测量方式，即电极距和点距相等，前后点电极首尾相连。

EH-4 工作的 X 偶极方向为测线方向， Y 偶极方向为垂直于测点方向。由于测区内均未地表岩石出露，磁棒布置时平放在地面上，风较大时，容易造成信号干扰。EH-4 测线的数据采集过程中，由于积雪刚刚融化，地表极为湿润，整体上时间域信号强度较好，电阻率误差较小， X 、 Y 方向相关度高。整个区域内，地电结构比较稳定，电阻值随着深度的增加而增加，横向上浅部电阻率值比较均匀，深部电阻率沿测线逐步增加。在 035 测点之后，无论是 TE 还是 TM 模式，电阻值普遍偏高，应该与岩浆的侵入活动有关。相位图与电阻率的变化吻合程度很高，说明基本真实反映了地下电性结构的特征。测量过程中，对测线上典型的岩石标本进行采样，随后对其进行了磨片、精确定名以及地球物理参数的测定。

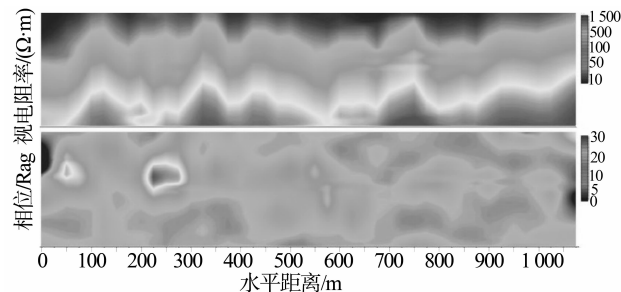


图2 白容矿区 EH4 测线 TE 极化模式
视电阻率和相位剖面图

Fig. 2 EH-4 TE polarization pattern apparent resistivity and phase profile

测线上可看到明显的矿化蚀变现象，绿泥石化非常常见，分别在 BR003、BR007、BR010 标本点

处发现绿泥石化，属于中、低温热液蚀变。其中 BR007 处规模较大，广泛发育绿泥石化、绿帘石化等。

4 EH-4 数据处理与综合解译

在野外测量采集连续点的时间序列数据，现场进行 FFT 变换，获得电场和磁场实虚分量和相位数据，并现场进行一维 Bostick 反演；在室内利用 EH-4 数据处理系统对数据进行剔除发生畸变信号及删除个别跳跃较大的频点，之后利用二维成像软件进行快速自动二维电磁成像并选取适当的圆滑系数以得到较理想的二维成图结果，最后再利用 Surfer 等成图软件对所得到的数据进行网格化，并采用各向异性的方法进行半径搜索，从而提高分辨率，使得到的图像能更精确地体现实际的地层情况^[5-7]。

4.1 白容矿区岩（矿）石物性特征

不同类型、不同成因的矿床均是由矿化蚀变带和围岩（地层、侵入岩脉等）组成，二者之间具有明显的电阻率差异，是进行 EH-4 地球物理勘探、矿床预测的理论依据。为此，实验室测定了测线岩石标本以及区域内典型岩石电阻率、极化率和密度（表 1）。

表 1 白容矿区岩石物性参数

Table 1 Physical parameters of rocks at Bairong mine

岩石	极化率	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)
石英砂岩	34.400	2.81	4 175.77
黑云斜长斑状花岗岩	4.707	2.55	38 537.70
石英二长玢岩	8.627	2.60	5 125.33
晶屑凝灰岩	0.389	2.77	390 600.00

主要成矿斑岩体的黑云斜长斑状花岗岩，虽然有轻微的绿泥石化和绢云母化，但是其电阻率值超过作为成矿围岩的玢岩和砂岩的电阻率值 3~6 倍。地表主要出露的凝灰岩，电阻率值高达 390 600 $\Omega\cdot\text{m}$ ，由于测区内凝灰岩的裂隙、节理发育（如测点 BR002），EH-4 剖面布测时，测区内冰雪刚刚消融，推测实际地质环境中凝灰岩的电阻率值偏低。从极化率来看，整体表现为矿化岩石极化率是非矿化岩石的 2~6 倍。而在密度方面，整个测区各类岩石的密度大致相等，差异不大。

距离测线南 1 km 左右的 Cu-I 矿体的实际物性参数研究表明区内岩石具有如下电性特征：

1) 极化率：黄铁矿 > 黄铜矿 > 黄铜矿化、黄

铁矿化 > 褐铁矿 (化) > 氧化铜矿;

2) 原生矿极化率为 1.0% ~ 2.7%, 而氧化矿 → 0; 氧化矿石几乎无极化效应, 不引起激电异常;

3) 浸染状矿石极化率大于细脉状矿石;

4) 从露头测定结果看, 矿化、含矿岩体的极化率可达围岩的 2 ~ 3 倍, 而铜矿体的极化率则高达围岩的 5 倍, 电性差异十分明显;

5) 从电阻率、极化率与岩矿石的性质看, 氧化矿与围岩 (凝灰岩等), $\rho < 1\ 500\ \Omega \cdot \text{m}$, $\eta \leq 0.2\%$, 呈低阻低极化特性; 黄铜矿、黄铜矿化, ρ 在 2 000 ~ 3 000 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间, η 在 0.8% ~ 1.7% 之间, 呈低阻高极化特征; 黄铁矿、褐铁矿化、硅化岩类, $\rho > 3\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$, η 介于 0.6% ~ 2.9% 之间, 呈高阻高极化特征。

白容矿区岩矿石物性差异明显, 因此, 利用 EH-4 大地电磁测深来定位岩体和矿体是合理、可行的。

4.2 二维定性分析与地下电性结构特征

利用 EH-4 数据处理过程中得到了张量阻抗, 采用 Swift 的判别参数, 就可以通过二维偏离度来评价地下电性结构近似二维的程度^[8]:

$$S = \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}}$$

其中, 对于一维和二维理想构造来说, $S = 0$, 而三维介质中 $S > 0$ 。一般而言, S 越小, 介质构造越接近二维特征, 当 $S \leq 0.2 \sim 0.5$ 时, 地下介质就可以近似地看做是二维介质。

从测线剖面的二维偏离度等值线图 (图 3) 和三维图 (图 4) 显示出剖面电性结构特征:

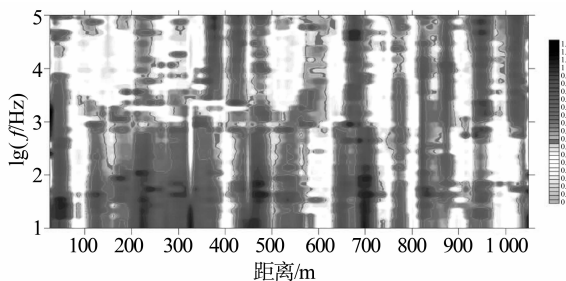


图 3 白容矿区 EH-4 测深剖面二维偏离度等值线图

Fig. 3 EH-4 two dimensional deviation contour map

1) 整个区域内对应高频信息段的地下浅部构造, 电性特征较为复杂。在 005 - 007 号测点, 020 - 023 号测点, 013、032、036、040 号测点出体现明显的二维特性。但其余测点处, 三维性较强;

2) 低频段数据部分测点的 $S > 1$, 显示出明显

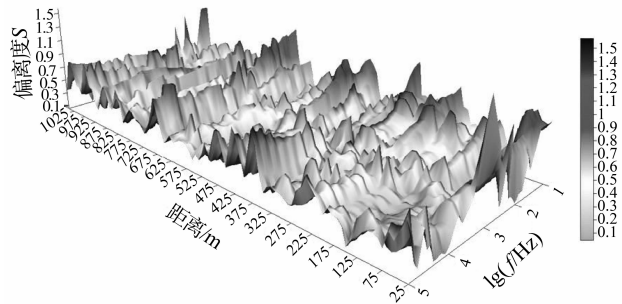


图 4 白容矿区 EH-4 测深剖面二维偏离度三维图

Fig. 4 Three-dimensional map of EH-4 two dimensional deviation

的三维特征, 如测点 028、013、008 - 010 等, 说明区域在深部可能存在复杂的构造地质体, 相对二维构造来说偏离程度较大。

总体而言, 整个区域内的二维偏离度绝大多数处于 0.2 ~ 0.5 的范围之内, 可以看做二维构造来看待, 进行二维反演解释。但是, 在低频部分出现了较多的高二维偏离度的情况, 说明区域内较深部位的地质结构复杂多变, 初步推测与相应的岩脉分布有关。

4.3 拟二维视电阻率等值线图综合解译

EH-4 大地电磁测深仪器测量所得的拟二维视电阻率等值线图能够较为快速、简单地反映地下不同地质体的电阻率分布, 能够直观地提供矿化异常形态、规模、延伸等重要信息。

通过对 EH-4 大地电磁测深仪器测量拟二维等值线图的分析, 反映了地下存在 5 种截然不同的电性体 (图 5a) I - V: I 层低电阻体 ($< 50\ \Omega \cdot \text{m}$, 平行地面分布在剖面顶部, 厚约 20 m; II 层低电阻体 ($50 \sim 100\ \Omega \cdot \text{m}$) 出现在剖面的东段中浅部高程 4 000 m 以上地区以及地表浅层; III 层中等阻值体 ($200 \sim 600\ \Omega \cdot \text{m}$), 为等值线的主要部分, 分布在测线的中下部; IV 高电阻体 ($700 \sim 1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$), 位于测线右下角。V 物性层 ($100 \sim 200\ \Omega \cdot \text{m}$) 为分布在 III 层中等阻值体中间及接触带的低阻体。根据拟二维等值线图中所显示的电阻率大小, 结合区域内岩石物性参数的测定以及相邻矿体的岩石电阻率研究, 综合斑岩铜矿的蚀变和矿化特征和研究区地质资料和地质剖面综合研究, 对拟二维等值线图进行综合解译, 绘制综合解译图 (图 5b)。

1) 推测 IV 高阻体可能是隐伏二长花岗斑岩, III 层中等电阻体为石英二长斑岩体。II 层低电阻体为 ($K_2 - E_1$) d 典中组凝灰岩; I 层低电阻体为坡积物和冰碛层。石英二长斑岩体、凝灰岩地表均有

出露, 已证实; 隐伏二长花岗斑岩体是否存在, 需要进一步验证。

2) V层低阻体共有三处, 在Ⅲ层中等电阻值体石英二长斑岩体顶部, 两处低电阻率异常呈漏斗状, 具有向上发散、向下收敛的特点, 推测为与火山热液有关的 Cu、Mo 矿(体)化; 在Ⅲ层中等阻值体石英二长斑岩体中部, 中-低电阻率异常呈等轴状, 具有面积型分布的特点, 推测为斑岩型 Cu、Mo 矿(体)化, 需进一步钻探验证。(3) 参照测线上所采集的标本, 在 BR003 (测线 300 m 处)、BR007 (测线 900 m 处), BR010 (测线 1 050 m 处) 处野外均看到了大量的绿泥石化、绿帘石化, 而通过薄片的镜下观察, 也都发现有大量的绢云母化蚀变, 这与我们所圈定的矿化异常体位置正好吻合, 而且绿泥石化最强烈的 BR007 处正好与所圈定的最大矿化异常对应, 故可以合理推测地下存在着未出露的钾硅酸盐化带, 以及铜钼矿化。

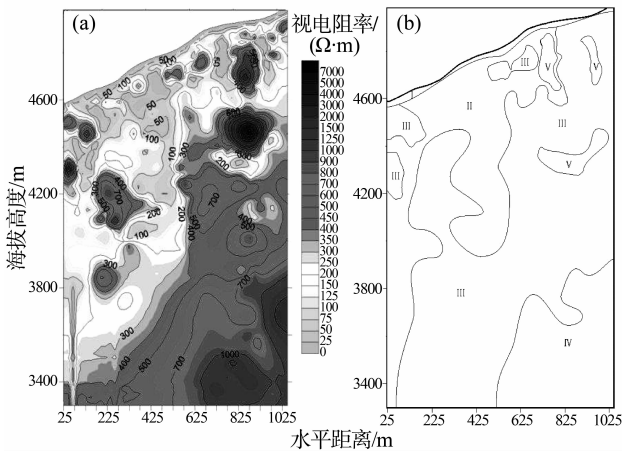


图5 EH-4 电阻率剖面 (a) 及综合地质解译 (b)
(频滑因子 0.1)

Fig.5 Resistivity section of EH-4 and comprehensive geological interpretation (slip frequency factor 0.1)

5 结论

1) 经 EH 4 在西藏白容铜矿的勘探, 初步查明了矿区北部深部二长花岗斑岩埋深、形态及矿(化)体分布情况, 为下一步的铜矿勘查工作提供方向和依据。

2) EH4 技术具有勘探深度大、岩体、矿化蚀变带等反映直观的特点, 能够有效探测深部隐伏的地质体的形态、产状, 确定其位置、规模。

3) EH4 技术具有连续测深的特点, 成图方便且直观, 对于地形较复杂的地区, 较其他物探方法具有明显的优越性, 因此可以在危机矿山外围及深部进行广泛的应用。

参考文献:

- [1] 李金祥, 秦克章, 李光明, 等. 冈底斯中段尼木斑岩铜矿田的 K-Ar、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄: 对岩浆-热液系统演化和成矿构造背景的制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 953-966.
- [2] 徐德章. 西藏尼木县厅官、白容铜矿区矿床地质的几个问题[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(增刊): 15-19.
- [3] 胡光龙. 西藏尼木斑岩铜多金属矿区后续地质勘查思考[J]. 云南地质, 2011, 30(4): 394-397.
- [4] 陈庆凯, 席振铎. EH4 电磁成像系统的数据处理过程研究[J]. 有色矿冶, 2005, 21(5): 7-9.
- [5] 申萍, 沈远超, 刘铁兵. 隐伏矿体定位预测的地球物理-地质找矿模型: 以地质与 EH4 双源大地电磁测深技术结合为例[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 284-292.
- [6] 区小毅, 单娜琳. EH 4 连续电导率成像系统在花岗岩型铀矿调查中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2011(3): 329-333.
- [7] 肖朝阳, 黄强太, 张绍阶, 等. EH4 电磁成像系统在金矿勘探中的应用—以黄金洞金矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 242-248.
- [8] 沈远超, 申萍, 刘铁兵, 等. EH4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 559-567.