

文章编号: 1672—7940(2006) 03—0214—07

应用时域激电偶极—偶极测深法勘查铜—金矿

雒志锋¹, 朱向泰¹, 王大勇¹, 许景霞¹, 徐锦山²

(1 中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院, 河北 保定 071051;

2 华北地质勘查局 519 大队, 河北 保定 071051)

摘要: 多数金矿床和金属硫化物的矿化作用有关, 用激发极化法来圈定多金属硫化物的矿化带或富集带间接找金矿具有良好的地球物理前提。青海省祁连山区某地铜矿是一个伴有金、钼等矿产的中型铜矿, 应用激电偶极—偶极测深法进行深部矿产的勘探。本文首先应用“等效电阻率法”推导了极化球体在偶极—偶极装置中极化率数学公式, 图示说明了偶极—偶极测深原理和电极排列方式, 各种模型在拟电断面上极化率异常特征。简述了勘探区地质特征和岩(矿)石电性特征, 方法技术和数据处理, 同时给出了 GDP—32 II 地球物理接收机充电率参数的公式。激电测深结果表明含炭质页岩、蛇纹岩和金—铜矿均具有明显的高极化响应特征, 需要结合地质分辨干扰体, 深部未圈闭的激电异常经钻探验证见多金属硫化物和铜—金矿脉, 偶极激电测深在本区取得了较好地质效果。

关键词: 铜—金矿; 偶极—偶极; 测深; 激发极化; 异常; 效果

中图分类号: P631

文献标识码: A

收稿日期: 2006—03—16

APPLYING DIPOLE—DIPOLE ARRAY OF TIME DOMAIN INDUCED POLARIZATION METHOD IN EXPLORATING SOUNDING CUPROAURIDE

LUO Zhifeng¹, ZHU Xiangtai¹, WANG Dayong¹, XU Jingxia¹, XU Jinshan²

(1 Geophysical Exploration Bureau of CEEB, Baoding Hebei 071051, China;

2 519 Team of North China Geological Exploration Bureau, Baoding Hebei 071051, China)

Abstract: Most of gold mines are related to metal-sulfide mineralized action. Time domain induced polarization method (TDIP) can locate multiple metal-sulfide band or metal-sulfide enriched band, which has a good prospect for geophysical field to indirectly find gold mines. As for dipole-dipole array, “equivalent resistivity method” is used to obtain the polarizability mathematics formula. This paper simply states the geologic entity, the electricity character of rock (ore) or surveying area, TDIP technical method and data processing. At the same time we also give the chargeability mathematics formula for GDP-32 geophysical instrumentation. Induced polarization method sounding shows obviously IP anomaly to carbonaceous shale, serpentite and cuproauride, so it is necessary to link geological resolving disturbing mass. Drilling finds the multiple metal-sulfide and cuproauride vein for the deeply unenclosed IP anomaly. It shows a very good geological effect by applying electric method prospecting in the surveying area.

Key words: cuproauride; dipole-dipole; sounding; induced polarization; anomaly; effects

作者简介: 雒志锋(1963—), 男, 1986年毕业于中南工业大学, 获学士学位, 高级工程师, 主要从事应用电磁法勘查固体金属矿的勘探

工作。E-mail: lzhf@sohu.com; luozhifeng@sohu.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 引言

金在化学性质上有强烈的“亲硫和亲铁性”，多数金矿床和金属硫化物的矿化作用有关，与铁、铜、铅锌等硫化物密切共生，这些金属硫化物在金矿石中的含量可达百分之几到几十，使得金矿石与围岩的极化率有明显差异，用激发极化法来圈定金属硫化物的矿化带或富集带，间接找金矿具有良好的地球物理前提^[1,5]。

青海省祁连山某地铜矿是一个伴有金、钼等矿产的中型铜矿。国内不同地勘单位在矿区及其外围已作过面积性土壤次生晕、部分原生晕评价和时域激电中梯扫面、对称四极测深等多种物化探方法，获得了一批异常。部分异常地段已有探洞和采矿洞，地表和 30m 深度范围内铜—金矿分布特征已经基本搞清。为在该区进一步打开找铜—金矿的局面，2004 年 8 月中国冶勘地球物理勘查院受加拿大华尔金资源有限公司(Val gold Resources Ltd Company)委托，使用美国 Zonge 公司研制的大功率 GGT-6KW 发射机和多功能及多道 GDP-32II 接收机开展了时域激电法偶极—偶极测深寻找铜—金矿工作。具体任务是在已知的三条铜金矿和外围布设 17 条测线，每条测线 600m，通过已知矿上电性参数(视充电率 M_s 、视电阻率 ρ_s) 响应特征，在矿化地层中划分铜金矿化富集带，尤其是金的品位和储量情况；区分并剔除与矿化无关的干扰异常，通过激电异常特征预测深部是否还有铜金矿存在，要求探测深度达到 100m，为确定探矿工程提供依据。

该区地形复杂起伏较大，矿区位于山谷之间，矿化蚀变带大多位于山坡上，国内熟悉的常规激电对称四极测深很难开展工作，以往激电测深只是在异常上做几个测深点作一点定性推测解释工作。激电偶极—偶极测深中的供电偶极 AB 和测量偶极 MN 是分开的，和其他测深装置比较具有异常幅度大、受电磁干扰较小的优点^[2,3]，在金属矿电法勘探中，该装置被西方国家经常使用。而且，美国 Zonge 公司在进行偶极—偶极装置测深时，研制的 GGT 系列发射机有一个专用附属发射箱 ETSBE-9/40，使得偶极—偶极测深的工作效率大为提高。本次激电偶极—偶极装置，间隔系数 $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。数据处理应用 GEOTOMB 公司研制的反演软件系统，绘制视电

阻率、视充电率二维反演断面图和三维切片图。深部未圈闭的激电异常经钻探验证于 210 余米处见多条金—铜矿脉，激电测深取得了较好效果。

2 偶极测深原理

2.1 体极化球体的视极化率

偶极—偶极装置中，对于半径为 r_0 球体(图 1)，视电阻率 ρ 在主剖面上 OO' 中点的数学式^[2]为：

$$\rho = \rho_1 \left\{ 1 + \frac{an(n+1)(n+2)}{2\mu_2 + 1} \cdot \frac{\mu_2 - 1}{r_0^3} \cdot \left[\left(\frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_N^2} \right) - \left(\frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} \right) \right] \right\}$$

式中， $d_A、d_B$ 为球心到供电偶极 $A、B$ 的距离， $r_M、r_N$ 为球心到接收偶极 $M、N$ 的距离， $\theta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为由球心分别向供电偶极 $A、B$ 和接收偶极 $M、N$ 所作连线夹角， r_0 为球体半径， a 为电极距， ρ_1 为球体外介质的电阻率， ρ_2 为球体的电阻率， n 表示电极的间隔系数， μ_2 为 ρ_2 与 ρ 的比值， $\mu_2 = \rho_2 / \rho$ 。根据“等效电阻率法”，视极化率 η 应为：

$$\eta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

因此，偶极测深装置中球体视极化率 η 数学表达式

$$\eta = 1 - \left\{ 1 + \frac{an(n+1)(n+2)}{2\mu_2 + 1} \times \frac{\rho_2 - \rho}{2\rho_2 + \rho} \times r_0^3 \left[\left(\frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_N^2} \right) - \left(\frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} \right) \right] \right\} \div \left\{ 1 + \frac{an(n+1)(n+2)}{2\mu_2 + 1} \times \frac{\rho_2(1 - \eta_1) - \rho(1 - \eta_2)}{2\rho_2(1 - \eta_1) + \rho(1 - \eta_2)} \times r_0^3 \left[\left(\frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_N^2} \right) - \left(\frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} \right) \right] \right\}$$

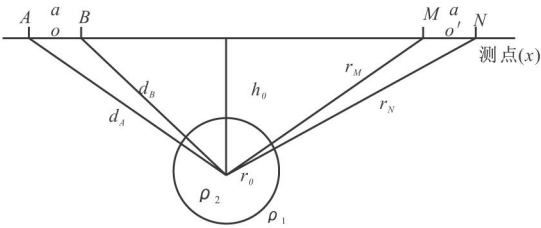


图 1 球体上偶极—偶极装置电阻率计算简图
Fig. 1 The calculated scheme of sphere resistivity for dipole - dipole array

异常特征^[2~4)]: 拟断面图上球体的极化率 η (频率域中视频率 f_s 或视相位 φ_s) 等值线呈对称“背斜”形, 轴部约位于球心; 低阻直立板状体 η 等值线对称位于极化体中心, 近于“三角形”; 低阻水平板状体 η 等值线对称位于极化体两侧下方, 呈“八”字形分布; 低阻倾斜板状体的极化率 η 拟断面图具有不对称形状, 主要异常的等值线呈倾斜状, 其倾斜方向与极化体的倾斜方向相反, 异常极大点位于极化体下盘。

2.2 测深原理

偶极—偶极装置测深示意图如图 2。

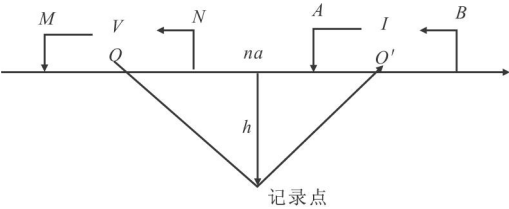


图 2 偶极—偶极测深装置和原理图

Fig. 2 Device for dipole-dipole array and sounding principle

根据图 2 可知测深深度 (h) 随着电极距 na 的加大, 探测深度 (h) 也加大。当间隔系数最大取 $n = 7$, $AB = MN = 25\text{m}$ 时, 理论上最大探测深度 (h) 为 100m 。

3 地质概况及电性特征

3.1 地质概况

矿区出露地层有中寒武统、二叠系、三叠系和第四系地层, 中寒武统 (ϵ_2) 为矿区主要地层, 岩性为砂质泥质板岩、石英绢云母片岩、绢云母绿泥石片岩、大理岩、钙质片岩; 二叠系分布于矿区北侧, 岩性为紫红色、灰绿色、灰白色中粗粒砂岩夹

炭质页岩及薄层煤层, 与寒武系呈断层接触; 三叠系岩性为紫红色长石石英砂岩夹薄层炭质页岩; 第四系 (Q) 为残积、坡积、冲积层, 厚 $0 \sim 20\text{m}$ 。加里东期的深成、中深成超基性、基性、中酸性岩顺层贯入于寒武系碎屑岩中, 蚀变闪长岩呈“透镜状”夹持在南北两条超基性岩带之间, 形成十分有利的成矿构造环境, 铜-金矿一般产于蚀变闪长岩体内或超基性岩接触带附近。

三个已知的金-铜矿体 (M_1 、 M_2 和 M_3) 形态为不规则脉状、脉状, 地表揭露倾斜延伸垂深 $10 \sim 20\text{m}$, 平面延长范围 $113 \sim 274\text{m}$, 走向在东北 $75^\circ \sim 110^\circ$, 金矿体倾向北东 (NE), 倾角 $45^\circ \sim 60^\circ$, 平均厚度 $0.8 \sim 2.71\text{m}$, 品位 $6.82 \sim 7.26\text{g/t}$, 最高 82.7g/t 。

主要蚀变有黄铁矿化、绿泥石化、硅化、碳酸盐化、绢云母化等, 局部见孔雀石化。金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、毒砂、斑铜矿、黝铜矿、磁铁矿、褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、白铅矿、菱锌矿及自然金; 脉石矿物有石英、白云石、绢云母、长石及泥质、钙质等。

3.2 电性特征

测区岩 (矿) 石标本实测后得出的视极化率和视电阻率统计数值见表 1。

由表 1 可知: ①铜-金矿体呈“低阻、高极化”特征, 视极化率 η 平均为 2.96% , 电阻率 ρ 为 $36.5\Omega \cdot \text{m}$; ②黑灰色炭质层的视极化率 η 平均为 3.11% , 电阻率 ρ 为 $35.7\Omega \cdot \text{m}$; ③蛇纹岩 η 平均 2.36% , ρ 为 $178.3\Omega \cdot \text{m}$, 它们均为“低阻、高极化”特征; ④矿体的 η 、 ρ 和黑灰色炭质地层及蛇纹岩的 η 、 ρ 相差无几。石英闪长岩、大理岩等围岩岩石电性特征为“高阻、低极化”, 矿体视极化率是它们 ρ 的 2 倍, 结合电阻率 ρ 参数较容易

表 1 测区岩矿石视电阻率和视极化率统计表

Table 1 The resistivity and polarizability statistics of rock and ore in the surveying area

岩 性	块数	视极化率 $\eta/\%$		视电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{m}$		备 注
		变化范围	平均	变化范围	平均	
破碎带	6	0.89~ 1.31	1.01	59.2~ 145.8	82.1	板岩、砂岩碎屑、石英脉等
金-铜矿体	5	2.74~ 3.27	2.96	11.18~ 83.3	36.5	多金属硫化物
石英闪长岩	6	0.99~ 1.27	1.1	187.2~ 803.3	427.5	
蛇纹岩	6	1.94~ 2.41	2.36	79.57~ 312.6	178.3	
黑灰色碳质层	6	2.44~ 3.91	3.11	17.1~ 44.7	35.7	
大理岩	4	0.48~ 0.92	0.76	212.96~ 593.6	384.6	

区分。值得注意的是“黑灰色碳质层”和“蛇纹岩”为本区激电异常干扰源。

4 方法技术

4.1 方法技术

采用时间域激发极化法,观测电参数视充电率(M_s)和视电阻率(ρ);使用美国 Zonge 公司大功率 6 千瓦 GGT—6 发射机和最新型多功能、多道 GDP—32 II 地球物理接收机;测区网度选择 100m×25m,即线距 100m,点距 25m,测线大致垂直该区地层走向布设,方位为正北或北北东(NNE)0°~5°;供电周期为 8s($f=0.125\text{Hz}$),占空比 50%;供电极距 $AB=25\text{m}$,接收极距 $MN=25\text{m}$,间隔系数 $n=1,2,3,4,5,6,7$ 。

GDP—32 II 地球物理接收机激电参数视充电率(M_s)的测得是在供电 2 秒后断开,并记录瞬时一次电位 V_p ,在一次电流中断后 2 秒时间内有 13 个二次场衰减窗口,于第 4~7 个窗口、时间间隔 451.38ms~1097.32ms 内对二次场衰减电压 $\Delta V_2(t)$ 的瞬变曲线进行面积分 M_s ,然后反向供电 2s 后断开再积分,最后求取 M_s 积分的平均值作为观测的充电率。视充电率 M_s 在断电时间间隔内的公式^[3]

$$M_s = \frac{\int_{t_y}^{t_y+t_i} \Delta V_2(t) \cdot dt}{V_p}$$

式中 $t_y=451.38\text{ms}$, $t_y+t_i=1097.32\text{ms}$,视充电率 M_s 单位为 ms。

按照 H·O·赛格爾的观点^①,0.45s 的延迟时间可使大部分的电磁瞬态、转换瞬态和线间耦合效应消失,451.38~1097.32ms 间隔内测得的充电率 M_s 应是岩矿石激电效应^①。

4.2 数据处理

首先进行预处理,再采用马来西亚 GEOTOMB 公司研制的 res2dinv、res3dinv 反演软件系统,对预处理以后激电数据进行二维、三维反演,最终给出视充电率(M_s)和视电阻率(ρ)二维反演断面图和三维切片图。

预处理是对野外采集的原始数据进行分析,

借助 GDP—32 II 接收机特有的判别数据质量优劣的指标——标准离差 SEM 和 Zonge 公司研制的特有软件,剔除电磁干扰大或其他原因造成的不合格数据,使得每个物理点观测的激电和电阻率数据的标准离差 $SEM \leq 0$ 。 $n(n=1,2,3,4,5,6,7,8,9)$,然后对每个物理点经多次观测的激电和电阻率数据,采取几何或算数平均的方法作为该点待处理的数据并形成数据文件。

GEOTOMB 公司研制的 res2dinv、res3dinv 反演软件是在绘制电参数 ρ 、 M_s 拟电断面基础上,采用有限元方法构制二维、三维地电模型进行正演;根据最小二乘原理对模型数据迭代拟合,直至迭代

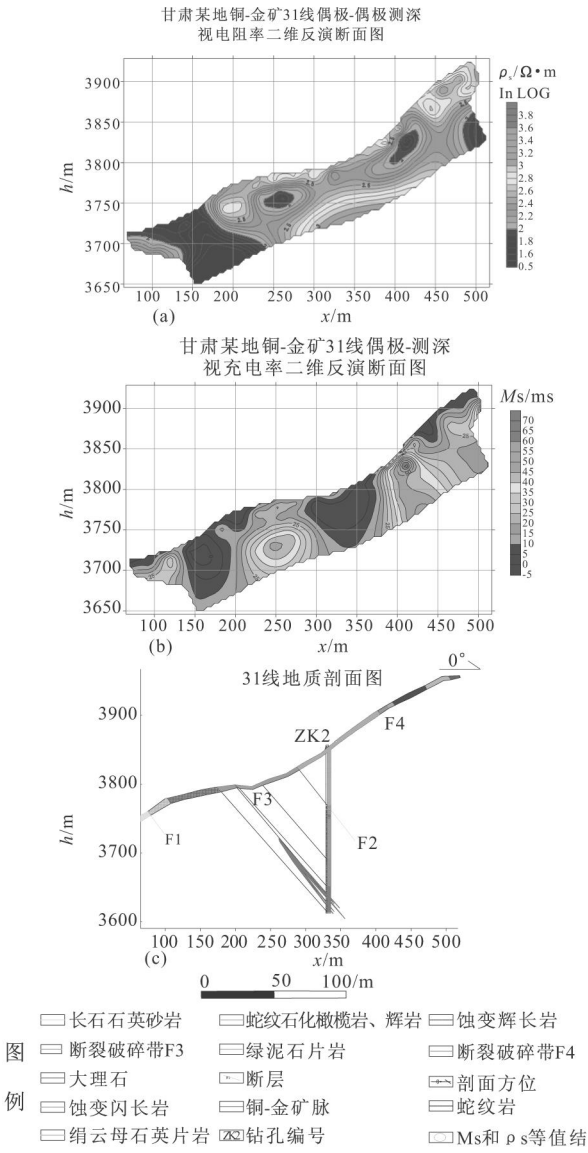


图3 地质、地球物理方法综合解释断面图

Fig.3 The comprehensive interpretation section map for geological and geophysical method

① H·O·赛格爾. 激发极化法. 地质科学院物探所, 情报所合编. 1972年10月.
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

相对误差达到最小。该软件可以输出 ρ_s 、 M_s 拟电断面图、二维正演和反演的数学模型,最后,以每条剖面二维反演的 ρ_s 、 M_s 模型输出相应的断面图,结合相邻几条剖面二维反演的 ρ_s 、 M_s 断面图再进行 ρ_s 、 M_s 三维反演,输出 ρ_s 、 M_s 切片图。

5 资料解释

5.1 地质解释

以 31 测线穿过的 M_1 金—铜矿体为例,见地质、物探综合解释断面图(图 3)。

M_1 铜—金矿体是以不规则脉状产出,地表出露标高在 3768~3800m,地表走向长 274m,呈“上大下小的楔形”。矿体平均厚度 2.71m,走向北北东(NEE) 75° 至南东(SE) 110° ,倾向北,倾角 $45^\circ \sim 60^\circ$,平均品位 7.26g/t,最高品位 82.7g/t,矿体沿着走向产状变化较大,呈舒缓波状起伏特

征。

由测线 31 激电充电率 M_s 和电阻率 ρ_s 二维反演断面图可知,较为明显的激电有两个,分别位于 250~300 测点和 400~450 测点之间,测线最北端也有一个没有圈闭的小异常。

5.1.1 断层

根据图 2 电阻率二维反演断面图,视电阻率 ρ 断面等值线均清晰反映了地质剖面上所对应的断层 F_2 、 F_3 和 F_4 ,如剖面 400 测点视电阻率 ρ 等值线变陡和畸变的特征揭示着有断层(F_4)存在。 F_1 断层因为剖面较短的缘故视电阻率 ρ 等值线在二维反演断面图中反映的不是很清楚。

5.1.2 干扰异常

剖面上 400~450 测点出露的蛇纹岩和断裂带(F_4),该处由上至下“低阻极高化”异常最为明显,且异常范围大,视充电率最高达 65ms,浅部视电阻率 ρ_s 为 400~630 $\Omega \cdot m$ 左右,再往深标高

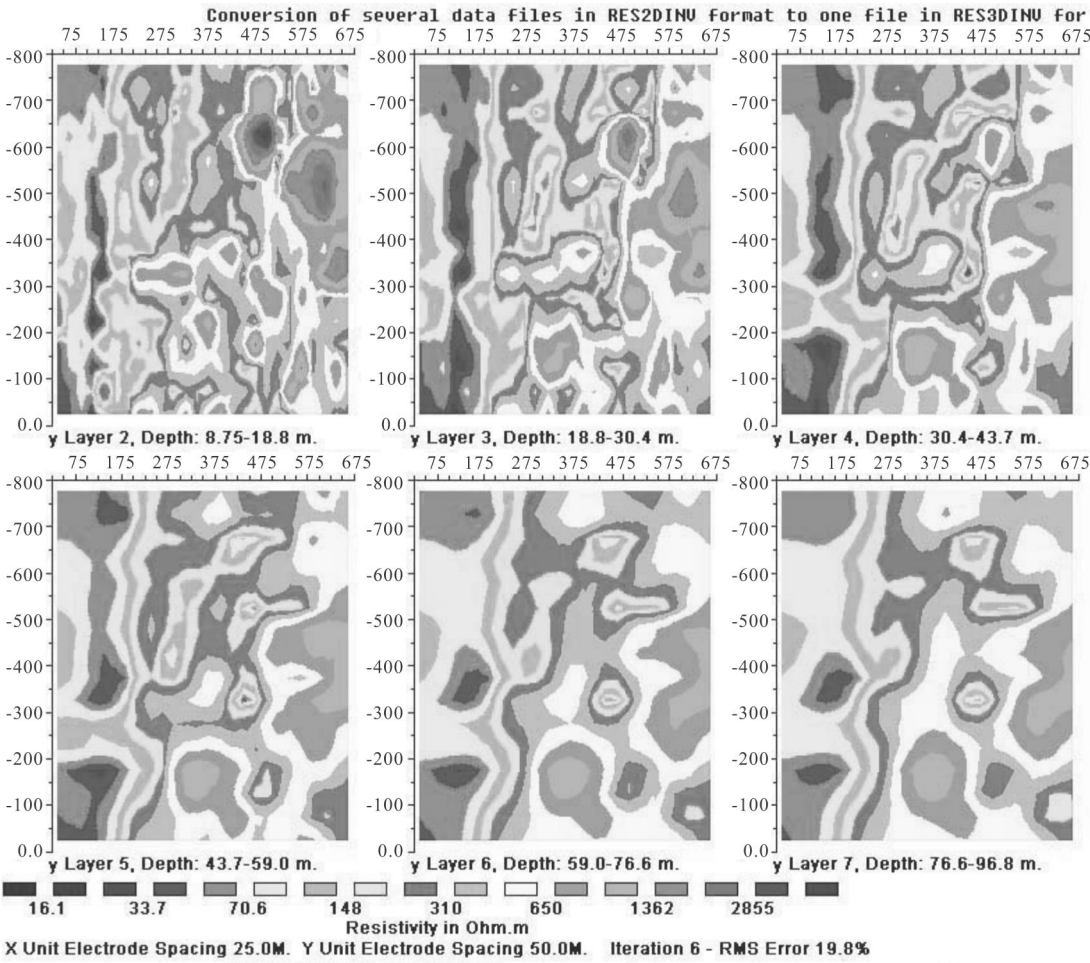


图 4 视电阻率三维反演切片图

Fig. 4 The slice map of resistivity three-dimensional interpretation

4825~ 3800m 视电阻率 ρ_s 为 $100\Omega\cdot m$, 引起“低阻”确切原因不能断定, 推测可能是断裂带(F_4)含水所致。

破碎带中的板岩、砂岩碎屑岩石特性呈低极化, 该激电异常无疑是由蛇纹岩引起, 其两侧绿泥石片岩和绢云母石英片岩的视充电率仅为 5ms, 蛇纹岩视充电率在 35~ 40ms, 蛇纹岩的 M_s 是相邻绢云母石英片岩 M_s 的近 8 倍; 在测线南部约 100 测点含蛇纹石化(断层 F_1 所致)的橄榄石和辉石组成的超基性岩(宽约 20 余米)视充电率 M_s 仅 5ms。蛇纹岩能够引起激电异常的机理至今还没有搞清^①。

测线最北端出露的是绢云母石英片岩和大理岩, 规模较小的激电异常位于片岩和大理岩两者之间浅部位置, 视充电率在 35ms 左右, 视电阻率 ρ 在 $630\Omega\cdot m$, 探硐揭露该处有几米厚的“黑灰色碳质层”, 无疑, 该激电异常反映的是碳质层。

5.1.3 矿化蚀变带

剖面上 250~ 300 测点出露的是蚀变闪长岩、断裂破碎带(F_3), F_3 夹在南北两条蚀变闪长岩之间, 铜—金矿脉位于南边蚀变闪长岩和北边 F_3 接触部位, 和断面上标高约 3760~ 3775m 激电反映的“中阻中极化”特征相对应, 视充电率在 25~ 30ms, 视电阻率 ρ 为 $400\sim 630\Omega\cdot m$; 标高 3750~ 3775m 范围内“中阻高极化”明显, 视充电率 M_s 在 35~ 50ms, 视电阻率 ρ 为 $40\sim 100\Omega\cdot m$, 沿垂向深部电阻率有增高趋势, ρ 为 $200\Omega\cdot m$ 以上, 这和金矿脉含石英(硅化)有关。

40ms 的 M_s 等值线呈“近似椭圆或圆形”, 35ms 的 M_s 等值线向下没有封闭, 预示着沿垂向的深部还有矿体存在的可能; 此外, M_s 等值线还有“上宽、下窄”的特点, 这和矿体呈“上大下小的楔形”特征相吻合。其他测线铜—金矿(M_1 、 M_2 和 M_3) 体上的充电率(M_s) 和电阻率(ρ) 二维反演

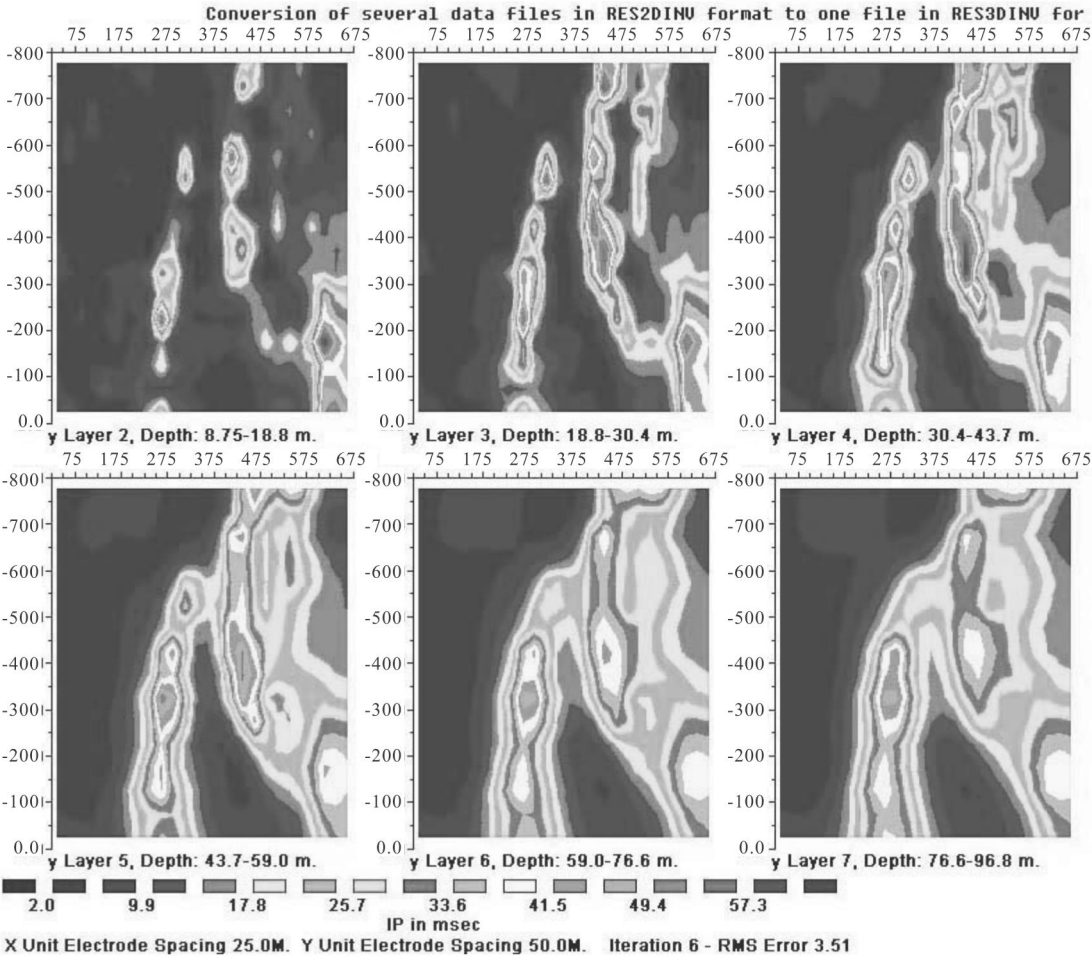


图 5 视充电率三维反演切片图

Fig. 5 The slice map of resistivity three-dimensional interpretation

断面图不再列图和描述。

5.2 测区内 M_1 、 M_2 和 M_3 铜-金矿体的反映特征

图4和图5是在二维反演基础上联合几条测线形成的数据文件,再进行三维反演 ρ_s 、 M_s 后所作的切片图。

如图4,测点275、425和625下面分别对应 M_1 、 M_2 和 M_3 金-铜矿体。 M_s 为50ms等值线呈“间断再现”特征(如 M_1 、 M_2 铜-金矿体),和地质资料中“含金的蚀变闪长岩呈透镜状”所描述的矿体特征吻合。

激电异常在某一深度层内更为清晰,如第三深度层(y layer3)18.8~30.4m,和第四深度层(y layer4)30.4~43.7m,视充电率在50~55ms,再往深如第七深度层(y layer7)76.9~96.8m, M_s 值降低到30ms左右,间接说明金属硫化物含量减少。这些也和矿体在浅部揭露“倾斜延伸垂深10~20m”,因而推测矿体具有“沿垂向呈尖灭再现”特征,也预示着前面视充电率断面图中没有封闭的 M_s 等值线,沿着垂向向下还有铜-金矿体存在的可能性。

在测线北端距金矿脉约145m处布设钻孔ZK2并于213m处见矿,矿体沿垂向呈多层特征,5层矿金的品位在12.9~19.6g/t,最高45.4g/t,见图3。

6 结 语

根据偶极-偶极装置获得的数据对充电率和

电阻率进行二维反演,在横向、纵向上能够对矿体进行有效地圈定,所应用软件反演的结果和当地地质特征吻合。铜-金矿产于蚀变闪长岩体内,矿体上的激电异常有明显“低、中阻和高极化”, M_s 在55~60ms范围, ρ_s 为80~500 $\Omega \cdot m$ (和矿体含有硅化-石英有关),依据激电异常特征在断裂破碎带中划分金属硫化物富集是可能的,从而达到间接找铜-金矿的目的。片岩里的“黑灰色碳质层”和“蛇纹岩”为本区干扰源,也呈“高极化”特征,应该结合激电异常产出的地层部位(均产在沉积变质岩地层中)和视电阻率 ρ 特征加以辨别。

最后,本文作者对许丽云小姐帮助绘制成图所做的工作表示感谢。

参考文献:

- [1] 李金铭,罗延钟.电法勘探新进展[M].北京:地质出版社,1996.145-146.
- [2] 傅良魁.电法勘探教程[M].北京:地质出版社,1982年.68-69,206-207,222-224.
- [3] 中南矿冶学院.金属矿电法勘探教程[M].北京:冶金工业出版社,1980.230-240,269-271.
- [4] 罗延钟,史保连,朴化荣.勘查地球物理勘查地球化学文集(第20集 电法专辑)[C].北京:地质出版社,1996.23-31.
- [5] 雒志锋,朱向泰,刘亚军,等.应用可控源音频电磁和时域激电单极-偶极测深法勘查金矿[J].工程地球物理学报,2006,3(2):111-113.