技术·方法

# 中条山铜矿某工区激发极化法三极测深及 其三维反演效果

## **雒志锋,贺容华** (中国冶金地质总局地球物理勘查院,保定 071051)

[摘 要]文章简单描述了时域激电法原理、技术和测区地质概况及岩(矿)石电性特征。单极-偶 极装置测深电阻率和充电率二维反演模型能够有效地圈定电性体在纵向和横向的分布特点,依据二维 测深数据进行三维反演可获得电阻率和充电率异常曲线图,推测了不同深度范围内断裂和主要岩性分 界,极化体空间分布位置和走向,钻探验证见铜矿化于划分的激电异常带,激电二维测深及其数据三维 反演取得了较好的地质效果。

[关键词]时域激电 单极 - 偶极装置 三极测深 三维反演 中条山铜矿 [中图分类号] P628 [文献标识码] A [文章编号] 0495 - 5331 (2008) 03 - 0070 - 05

随着找矿难度的加大,各种物探方法在寻找隐 伏金属矿床方面发挥着不同作用,电法在金属矿产 的地球物理勘查工作中一直占有重要地位,勘查与 金属硫化物有关的有色及贵金属矿床,对位于 200 ~400m深的矿(化)体进行二维和三维空间定位, 并对它的规模、产状和埋深等进行准确的推断,激发 极化测深是解决这些地质问题有效的方法、技术。

美国地球物理学家 Holcombe<sup>[1]</sup>及 Oppliger<sup>[2]</sup>分 别用有限单元法和边界积分法研究三维电阻率法的 数值模拟问题,国内以往文献<sup>[3-5]</sup>也有研究三维或 复杂地形条件下电源场分布特征问题。

2006年 3月~5月,中国冶金地质总局地球物 理勘查院和冶金第三地质勘查局合作,在山西省绛 县中条山地区开展时域激电三极测深,地质任务是 利用视充电率(*M*,)和视电阻率(,)参数在二维和 三维空间的分布特征,圈定及划分和铜矿密切相关 的金属硫化物在不同深度范围段内的产出特点。经 过钻探验证划分的激电异常见浸染状黄铜矿等多金 属硫化物,时域激电三极装置测深法及其数据三维 反演勘查铜矿取得了较好地质效果。

仪器使用美国 Zonge公司大功率 30千瓦 GGT - 30发射机和多功能及多道最新型 GDP - 32 型地 球物理数字接收机,数据处理采用 GEOTOMB公司 研制的 res2dinv和 res3dinv反演软件。

1 地质概况及电性特征

测区处于我国重要铜矿成矿区——中条山成矿 区,大地构造位于中朝准地台的山西断隆<sup>[6]</sup>、中条 山"S形构造北端的南河背斜的西翼,地层呈单斜 产出。

矿区内出露地层有上太古界绛县群及下元古界 中条群片岩、大理岩,中元古界长城系砂岩、安山岩, 寒武系灰岩。其地层走向基本呈 NE - SW 向,倾向 NW,倾角多在 40 ~ 60 之间。

绛县群宋家山组 (A tā sī): 变中基性 - 中酸性火 山岩,主要为绢云绿泥石片岩、绢英片岩夹石英岩、 大理岩。绛县群铜矿峪组 (A tā tk): 绢英片岩,分布 在黑崖底南部,岩层走向 NNE,向 NW 陡倾斜,黑崖 底南矿点有强烈黄铜矿、斑铜矿、孔雀石、镜铁矿矿 化。下元古界担山石群周家沟组 (Ptiz): 变质含铁 砾岩,中部夹石英岩,普查区东北部小面积出露,厚 度 670m。下元古界余家山组 (Ptizi): 灰色、白色、 紫红色中厚层大理岩,白云石大理岩,产状 NE,倾向 NW,倾角为 20 ° 60 °,厚度 370m。下元古界篦子沟 组 (Ptibz): 出露普查区芦义沟矿段,为黑色片岩、石 榴石绢云母片岩,片理发育且富含碳质并夹有规模 不等的薄层不纯大理岩,为该区重要含矿层位,厚度 500m。下元古界龙峪组 (Ptib): 普查区大面积分

<sup>[</sup>收稿日期]2006-11-27; [修订日期]2007-08-20。

<sup>[</sup>第一作者简介] 雒志锋 (1963年—),男,1986年毕业于中南工业大学,获学士学位,高级工程师,现主要从事应用电法、磁法勘查固体金属矿的勘探工作。

布,为玢岩、绢英片岩和绢云片岩,厚度 0~700m。 长城系云梦山组地层(*Chy*<sup>1</sup>):长石石英砂岩,石英 砂岩,为黄褐、暗紫、浅灰色安山岩,不整合于长城系 地层之上,见侵入于安山岩的含铜石英脉。寒武系 下统馒头组(<sub>1+2</sub>m):杂色页岩夹薄层灰岩,局部 有砾岩出露,主要分别在工区西北部。

该区岩浆岩主要有上太古界绛县期变辉绿岩, 古元古代中条期闪长岩( $\frac{1}{2}$ <sup>2b</sup>)、辉长岩( $\frac{1}{2}$ <sup>2c</sup>)、辉 绿岩( $\mu_2^{1c}$ ),中元古代晋宁期辉绿玢岩( $\mu_2^{2}$ )等,岩 体一般呈岩床、岩脉或小型岩株产出,岩体规模不 大,长 500m,宽几十米至 150m;还有中生代燕山期 石英二长斑岩( $\frac{2}{3}$ )等。

工区断裂构造主要为 NE - SW 向的断层,和区 域构造线方向一致,多位于区域构造运动形成的次 级断裂。芦义沟同斜倒转背斜位于矿区西南部,轴 向 45 °倾向北西(NW),长约 200m,矿区 、 号矿 带受构造破碎带控制,产于下元古界中条群篦子沟 组黑色碳质片岩与石英绿泥片岩接触带上,属"胡

- 篦型 的层控变质矿床,地表以褐铁矿为主,矿带 长 800~1000m;金属硫化物主要有黄铜矿、斑铜矿、 孔雀石、镜铁矿矿和黄铁矿等,变质岩系含矿中的黄 铜矿化等金属矿化多以星点状和浸染状出现;黑色 片岩本身是石墨体和铜矿容矿岩石或近矿围岩,黑 色片岩中的碳质含量与铜矿化成正相关。

芦义沟测区 2004年施工 3个钻孔有两个见矿, ZK4401见矿两层,真厚度分别为 1.41m和 2.11m, 铜品位分别 0.43%和 0.35%; ZK4601见矿 5层,真 厚度分别为 2.12m、4.24m、4.95m、1.41m、1.41m, 相应品位分别为 0.995%、0.63%、0.44%、0.33%、 0.69%。

电性特征:含黄铜矿化绢英岩 ,= 17.7%,绢 英岩 ,= 32.5%,绿泥片岩 ,= 3.2%,变质花岗闪 长岩 ,= 3.1%,变质岩系含矿中的黄铜矿化、黄铁 矿化等金属矿化具有较高的视极化率,平均值高达 ,= 38.5%,铜矿石电参数呈低阻高极化特征。

2 方法技术简介

## 2.1 方法原理

时间域激发极化法中当代最先进激电仪用以表示一级激电强度参数是视充电率<sup>[7]</sup>,它是测量断电后二次电位 $[V_2(t)]$ 对时间(t)的积分,即在断电后将 $V_2(t)$ 从时间 $t_1$ 积分到时间 $t_2 + t_3$ ,在 $V_2(t)$ 、 *t*平面上得到一块面积 $\int_{t_1}^{t_1} V_2(t) dt$ ,与供电时测得 的一次电位差  $(V_p)$  之比称为视充电率  $(M_s)$ 

$$M_s = \frac{\frac{v}{v} V_2(t) dt}{V_p}$$

<sup>t</sup><sup>f</sup>称为采样时间, M<sub>s</sub>的单位是毫伏 ·秒 /伏 (mV · s/V)或毫秒 (m s)。

充电率参数的特点是能够压制偶然信号的干扰,对具有对称性的电磁干扰信号也有较强的压制能力; GDP - 32 接收机还具有 50赫兹陷波器的功能,采集数据时能够有效压制外来电磁信号的干扰,以标准平均误差 (SEM)参数监测数据质量的优劣。供电周期选择 8秒 (f = 0.125 赫兹)、占空比 50%, $M_s$ 求得是在 13个断电二次电位窗口中,取第 4~7个窗口  $V_2(t)$ 的平均值与一次电位  $V_p$  归一化。

2.2 技术

》 澳大利亚地球物理学家 R M SWhite, S Collins 等对该方法装置特征有详细论述<sup>[8]</sup>,见插图 1:其中

为接收电极位置(Receiver Electrode Location), 1 为发射电极位置(Transmitter Electrode Location),远 极(Far Electrode)垂直勘探线(Survey Line),地形平 坦时车载发射机可拖着供电线平行接收线移动 (Transmitter Moves abne Line Parallel to Receiver Line)以提高工作效率,图中电位电极采用 75m的 极距。



图 1 三极测深发射、接收示意图

我们选择单极 - 偶极测深装置时,网度 200m × 50m,接收极距 MN = 50m,供电点距 25m。为加大数 据采集密度,测线内每对电位电极之间供电两次,即 移动的电流电极距为 25m,间隔系数 n = ±0.25, ±1.25, ±2.25, ....., ±16.25, ±17.25,理想情况 下最大勘探深度 418.75m;以及 n = ±0.75, ±1.75, ±2.75, ....., 16.75 ±, ±17.75,最大勘探 深度 431.25m。

#### 2.3 数据处理

GEO TOMB 公司研制的反演软件采用有限元方法,首先根据实测的数据绘制拟断面图,再自动构制二维地电模型进行正演,依据最小二乘原理对模

型数据迭代拟合,直至迭代误差达到最小。

二维反演程序 res2dinv在运行时,加入了每个 电流电极和电位电极的高程,能够自动削弱(非消除)起伏地形的影响,可输出带地形起伏的二维 *M*,、,反演断面图。

三维反演软件 res3dinv是在二维反演的基础 上,联合测区所有测线二维反演的数据进行三维反 演,可以输出垂向 17个不同深度范围内电参数 *M*<sub>s</sub>、 ,切片图,深度范围为:0~-6.25m,-6.25~ -13.4m,-13.4~-21.7m,.....,-297.4~ -348.2m,-348.2~-406.7m。

## 3 地质效果

3.1 二维反演断面图特征,以 200测线为例,见插图 2。

 1) 工区地形起伏较大,整条测线浅部视电阻率 最低,反映的是地表第四系(Q)黄土覆盖层,,在 10~15.2 ·m范围;在点 1000~1200、标高 1000~ 950m,下伏地层为长城系马家河组辉石安山岩、安 山岩,在 200~300 ·m,为相对低阻特征;点 1300 ~1400之间,,在 4800~5000 ·m以上,推测为 太古界绛县群铜矿峪组。

标高由浅至深(标高 950m),在 1400~1600 ·m范围,呈相对中阻电性特征,地表出露的是下元 古界中条群龙峪组玢岩、绢英片岩和绢云片岩;在点 1450~1700,标高约 950~850m视电阻率最高。

2) 由浅至深部,激电异常在不同标高段分布明 显且清晰。

点号 1500 ~ 1700、标高 950 ~ 800m 电阻率 ,为 4800 ~ 5000 · m, M, 最大 32m s, 20 ~ 30m s等值线 呈"上宽下尖的倒三角形", 34m M,等值线呈"横向 拉长、纵向压扁的似椭球形",异常相对强度(异常 极大值与背景值之比,以 表示)

 $= M_{s} / M_{s0} = 10$ 

在点 1000~1500、标高 950~700m 以下,分布着一 个范围广泛、没有封闭的"中阻高极化'异常,,在 1400~1600 ·m,*M*,最大 42m s,异常相对强度(

20)更大,根据测线端外地层出露情况,推测该激 电异常为太古界绛县群铜矿峪组地层引起。

激电异常范围广和变质岩系中的黑色片岩分布 面积大且与含有碳质有关,黑色片岩本身是石墨体 且也是铜矿的容矿岩石或近矿围岩,激电异常显示 中阻特征与硅化或含石英有关。

3.2 三极测深及数据三维反演效果

插图 3、4分别为联合二维电阻率数据进行三维





图 2 山西绛县中条山里册峪 — 黑崖底段 200测线视电 阻率 (上)和视充电率 (下)二维反演断面图。

充电率单位为 ms,电阻率单位为 ·m,数值取对数;比例尺 11万;测 线方位角为南东 154 。

数据处理所得的 a (垂向深度 0~-6.25m、标高 1000~1050m)、b (垂向深度 -214.7~-253.2m、标 高 950~800m)和 c (垂向深度 -348.2~-406.7m、 标高 750~600m)3个不同深度段内、切片图以及推 测的地层、构造与激电异常分布图。

3.2.1 浅部异常特征

浅部 0~-6.25m 深度范围内低阻分布很清 晰,与呈相对中阻电性特征的界线明显,测区北部低 阻带走向 (北东 NE)和测线垂直;中阻和高阻电性 特征的分布界线不是很明显, ,范围在 1400~ 1600 ·m、呈相对中阻电性特征在测区大部分地段 都有显示;测区中南部的测线 800~1600、测点 1600 ~1700的电阻率高达 4800~5000 ·m,呈明显高 阻异常特征, ,曲线呈带状,走向 (北东 NE),基本 垂直测线方向;在测区西端也零星出现高阻异常,或 许与测线布置不全有关。

整个测区内该深度段几乎没有激电异常,仅在 东南测线 1400~1600、测点 1900处视充电率最高 值 18毫秒,这和地表大部为第四系 (Q)黄土覆盖层 有关 (图 3a和 4a)。

## 3.2.2 深部异常划分及地质推测

1) 在 - 214.7 ~ - 253.2m 和 - 348.2 ~
 - 406.7m两个深度段内的视电阻率和视充电率分
 带特征尤为明显,由测区北西(NW)到南东(SE)视

电阻率可划分为低阻、中阻和高阻 3个异常区,各个 异常区之间的视电阻率曲线分界清晰,说明与主要 岩性,构造边界有关,并预示存在断裂,由北西到南 东依次推测的断裂编号为 *F*<sub>1</sub>、*F*<sub>2</sub>,两条断裂走向都 为北东 (NE) (图 3b, c)。



图 3 山西绛县中条山里册峪—黑崖底段测区联合所有测 线二维数据进行三维处理的不同深度段 (a, b, c)电阻率切 片图及推测地层、构造图

电阻率单位为 ·m;比例尺 1 1万。

2) 和二维反演的结果相对应,  $F_1$  断层以北为 低阻特征, ,在 200~300 ·m,推测为长城系马家 河组辉石安山岩、安山岩;  $F_2$  断层以南为高阻特征, ,在 4800~5000 ·m以上,推测该区为太古界绛 县群铜矿峪组地层引起,在深部 - 348.2 ~ - 406.7m,视电阻率 ,为 5000 ·m的等值线范围 更大,由 - 214.7 ~ - 253.2m之间的"扁豆状 演变 为"条带状";夹在  $F_1$ 和  $F_2$ 断层之间的视电阻率呈 中阻特征, ,在 1400~1600 ·m,推测为下元古界 中条群龙峪组玢岩、绢英片岩和绢云片岩所致 (图 3b, c)。



图 4 山西绛县中条山里册峪—黑崖底段测区联合所有测 线二维数据进行三维处理的不同深度段 (a, b, c)充电率切 片图和划分的激电异常分布图。充电率单位为毫秒,比例 尺 1 1万。

 激电异常分布范围清晰可辨,划分了两个高极化异常(编号 1, 2)。因为在测线 1800以东没有再布置更多的测线,这两个异常没有完全圈闭,极值 M<sub>smax</sub>均在 22毫秒左右,三维反演的视充电率极值 M<sub>smax</sub>比二维反演的M<sub>smax</sub>相对小,异常相对强度 2 (图 4b, c)。

编号 1激电异常为带状,为"中阻、高极化"特征,位于推测的铜矿峪组地层 (A<sub>Fi</sub> k)与龙峪组地层 (P<sub>fi</sub> h)断裂接触带(F<sub>2</sub>)上,走向北东(NE);测线 600~1000之间异常较为规整,22毫秒的等值线长 约 400m,宽约 100m,在 1200测线 M<sub>s</sub>等值线变窄, 再往东测线 1400~1800视充电率 M<sub>s</sub>等值线又变宽 且异常走向偏南。

编号 2激电异常位于测区东部测线 1400 ~ 1800、测点 1700 ~ 2000之间,为"高阻、高极化 特征,处于推测的太古界绛县群铜矿峪组地层 (A<sub>rs</sub> *k*) 之中,异常相对强度也较小(2),因激电 *M*<sub>s</sub>等值 线没有封闭,最终的走向、长度以及产状特征不好确 定。

在所有激电数据进行二维反演以及进行三维数 据处理以后,甲方根据成图结果于 200测线 1600测 点布置钻探对编号 1异常进行了验证,结果见星点 状和浸染状黄铜矿等多金属硫化物(钻孔揭露的具 体地质情况还没有传过来)。

## 4 结语

美国 Zonge公司研制的 GDP—32 地球物理仪 性能稳定、采集的数据质量高;时域激电三极测深装 置勘探深度大,对电性不均匀体的横向、纵向分辨能 力和探测能力较高;软件 res2dinv, res3dinv解译数 据的结果与该区地质特征吻合,根据二维测深数据 进行三维数据处理能够由浅至深划分出 17个不同 深度范围内电性体在空间上的展布特点,依据视充 电率 (*M*<sub>s</sub>)和视电阻率 (<sub>s</sub>)异常可以清晰地识别主 要岩性 构造边界、激电异常的走向、宽度及其在平 面上的分布特征,为间接找矿快速地提供了直观、准 确的依据,所应用的硬、软件和技术水准均代表了当 今国内最先进水平。

## [参考文献]

- Holcombe GL, Jiracek GR. Three dimensional terrain correction in resistivity surveys[J]. Geophysics, 1984, 49 (4): 436 - 452.
- [2] Opp liger G L. Tree dimensional terrain corrections for mise ala
  masse and magnetometric resistivity surveys [J]. Geophysics, 1984, 49: 1718 - 1729.
- [3] 徐世浙.三维地形均匀各向异性岩石点源电场的边界单元解
  法[J].山东海洋学院学报,1985,15(2):-56.
- [4] 熊 彬, 阮百尧, 罗延钟.复杂地形条件下直流电阻率异常三维数值模拟研究 [J].地质与勘探, 2003, 39 (4): 60 64.
- [5] 阮百尧, 熊 彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深的有限 元数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2002, 45 (1): 131 - 138.
- [6] 任纪舜,姜春发,张正坤,等.中国大地构造及其演化 [M].北京:科学出版社,1980,29-33.
- [7] 中南矿冶学院物探教研室编. 金属矿电法勘探 [M]. 北京:冶 金工业出版社, 1980, 325 - 327.
- [8] R M S White, S Collins, M H Loke, Resistivity and IP arrays, op tim ised for data collection and inversion 2006 [J], Exploration Geophysics (2003) 34, 229 - 232.

# EFFECTS OF THREE POLE SOUND ING AND THREE - D M ENSIDN INVERSION OF INDUCED POLARIZATION METHOD IN A WORKING AREA OF ZHONGTIAO SHAN COPPER DEPOSIT

### LUO Zhi - feng, HE Rong - hua

#### (Geophysical Exploration Bureau, China Bureau of Metallurgy and Geology, Baoding 071051)

Abstract: This paper simply describes principle and technology of time domain induced polarization method (TD IP), and also geology background and electrical character of rocks (ores) in the surveying area Resistivity and model of chargeable two - dimensional inversion for the pole - dipole array sounding can effectively trap longitudinal and lateral distribution of electric body. Based on t data of two - dimensional sounding, resistivity and abnormal profile of charging ratio can be obtained Faults and main lithological boundary at different level are conjectured, and distributing position in space and trending of polarity - body are ascertained. It is proved that coppermineralization is located at induced polarization area. Two - dimension sounding of induced polarization and three - dimensional inversion of data have a better geological effect

Key words: time domain induced polarization, pole - dipole array, three pole sounding, copper deposit, geological effect