

刘国安. 地震作用下横断层地质金属成矿带电法找矿成果研究[J]. 华南地震, 2019, 39(2): 130–135. [LIU Guoan. Prospecting Results of Transverse Fault Geological Metallogenic Belt with Electric Method under Earthquake Action[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 130–135]

地震作用下横断层地质金属成矿带电法找矿成果研究

刘国安

(河南省航空物探遥感中心, 郑州 450053)

摘要: 深部矿产资源勘探是未来勘探的必然趋势。地震作用下的横断层地质构造对金属矿、能源矿等矿产资源的分布具有重要影响, 拥有较大的找矿潜力。对于地震作用下横断层地质等条件复杂的场合, 采用高密度电阻率法、激发极化法和可控源音频大地电磁法等单一电法勘探可能存在找矿效果不佳的问题, 有必要研究更为有效的找矿技术方法。首先阐述了激发极化法、CSAMT法等电法勘探的基本内容和各自优缺点; 然后, 在分析地震作用下横断层地质特征的基础上, 研究并提出了基于激发极化法和CSAMT的综合找矿法。基于激发极化法和CSAMT的综合找矿法能有效反映地下地电差异, 在大深度范围有效反应地电断面电阻、极化率参数, 互相校正验证; 结合已有地质物探资料, 推断地下异常, 提高横断层的金属矿产勘探效率和效果。将本文的研究成果应用于某横断层地质区域的金属矿勘探实践, 取得了良好的勘探效果。实践表明本文所提方法有效、可行。

关键词: 地震作用; 横断层地质; 金属成矿带; 电法找矿

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)02-0130-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.02.019

Prospecting Results of Transverse Fault Geological Metallogenic Belt with Electric Method under Earthquake Action

LIU Guoan

(Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: Deep mineral resources exploration is the inevitable trend of future exploration. The transverse fault geological structure under earthquake has an important influence on the distribution of mineral resources as metal deposits and energy deposits, and is of great prospecting potential. For fields of complex geological conditions, such as transverse fault under seismic action, single electrical prospecting methods like high density resistivity method, induced polarization method and controllable source audio-frequency magnetotelluric method may have poor prospecting effect, so it is necessary to study more effective prospecting techniques. At first, the basic contents, advantages and disadvantages of induced polarization method and CSAMT method are expounded

收稿日期: 2018-05-30

作者简介: 刘国安(1963-), 男, 高级工程师, 研究方向: 地球物理探矿。

E-mail: 13582163732@139.com.

respectively. Then, based on the analysis of the geological characteristics of transverse fault under seismic action, a comprehensive prospecting method based on induced polarization method and CSAMT method is proposed. The comprehensive prospecting method based on induced polarization method and CSAMT can effectively reflect the difference of underground geoelectricity, the resistivity and polarizability parameters of the geoelectric section in a wide range of depths, and mutually correct and verify them. Combined with the existing geological and geophysical data, the underground anomalies can be inferred to improve the efficiency and effectiveness of the exploration of metal minerals in transverse faults. The results of this study have been applied to the exploration practice of metal deposits in a transverse fault geological area, and good exploration results have been achieved. Practice shows that the method proposed in this paper is effective and feasible.

Keywords: Seismic action; Transverse fault geology; Metal metallogenic belt; Electric prospecting

0 引言

随着浅地表的易找矿绝大多数已被发现或开发利用,地下深部矿产资源勘探是未来勘探的必然方向^[1]。地震作用下的横断层地质构造对金属矿、能源矿等矿产资源的分布具有重要影响,往往具有控矿、导矿和容矿等特征,拥有较大的找矿潜力。电法勘探是一种地球物理方法,主要包括高密度电阻率法、激发极化法和可控源音频大地电磁法(简称CSAMT法),用于探测异常形态性质。采用单一电法可能存在找矿效果不佳的问题,如单一的激发极化法的抗干扰能力差、误差范围较大、可信度不高,而CSAMT法也存在反演多解性、假极值、静态效应、近场效应和场源效应等问题^[2]。对于地震作用下横断层地质等条件复杂的场合,寻找金属成矿带需要更为有效的技术方法。

本文首先阐述了激发极化法、CSAMT法等电法勘探的基本内容和各自优缺点。然后,在分析地震作用下横断层地质特征的基础上,采用基于激发极化法和CSAMT的综合找矿法以能有效反映地下地电差异,在大深度范围有效反应地电断面电阻、极化率参数,互相校正验证;结合已有地质物探资料,推断地下异常,提高横断层的金属矿产勘探效率和效果。最后将本文研究成果应用于某横断层地质区域的金属矿勘探工作,实践表明本文所提方法有效、可行,取得了良好的勘探效果。

1 金属矿带电法探测概述

金属矿床的勘探方法优有磁法勘探和电法勘探。磁法勘探是基于不同岩矿石具有不同磁性特点的原理识别地下地质矿物。电法勘探是最常用的勘探方法,是基于地下岩石和金属矿石呈现的

不同电性差异的原理来识别地下岩层特征和矿物特征。从岩石、金属矿石的导电性、导磁性和介电性等电磁学特性,以及电化学特性入手,通过不同测量方法反应金属矿石的导电性、激发极化特性等电学性质。电法勘探涉及电阻率、导磁率和极化率等物理参数。

1.1 激发极化法的主要内容及特点

激发极化法,即激电法,是一种基于岩石或金属矿石的激发极化特性来寻找金属矿的电法勘探方法^[3]。激发极化法可细分为直流激发极化法(时间域法)和交流激发极化法(频率域法)。对于致密块状的电导体,激发极化法呈面极化,而对于浸染状电导体,呈体极化。

激电法具体技术方法是:建立地下人工直流电场或交流电场,依次加大电源点与测量点电极之间的距离,测量得到系列不同深度下的矿层电阻率数据,并加以分析其变化规律,进而探明有矿产资源及类型。激发极化法在铜矿床、铁矿床、铅锌矿、铜镍铬矿和金矿等不同金属成矿带都取得了一定的效果。激电法在探测一些构造和岩土性质复杂的地质区域深部目标时,电磁信号较弱,往往受测量噪声严重干扰。单纯的电法勘探方法抗干扰能力差,且误差范围较大、可信度不高,探测深部或复杂地质条件的金属矿产资源的效果不佳。地震作用下横断层地质条件复杂,寻找金属成矿带需要有效的技术方法。

1.2 CSAMT法的主要内容及特点

CSAMT法依据电磁场的趋肤效应,通过分析不同频率与电磁信号之间的关系特征,计算和反演不同地下深度的电阻率分布差信息^[4]。CSAMT法本质上是采用频率可控人工源,通过测量两个互

相垂直的电磁场切向分量来计算卡尼亚电阻率的探测法。可控人工源分磁性场源和电性场源两种人工场源,目前主要采用电性源。CSAMT 反演方法包括博斯蒂克反演法(Bostic 法)、非线性共轭梯度反演法(NLCG 法)和 Occam 反演。其中,BOSTICK 法通过视电阻率及其曲线计算地电结构的探测深度、地层深度,将电阻率-供电频率变化曲线转换为电阻率-深度曲线。模型成像分析,TM 反演模式拟合效果较好,适合于断层地质条件。为了进一步提高数据解释与推断的准确程度,在实践中推荐采用 BOSTICK 法一维反演形成拟二维电剖面,然后基于 NLCG 反演方法对初始模型进行 TM 模式的二维反演。可控源音频大地电磁法工作效率高,勘探深度范围大,垂向和水平分辨率高,高阻地质带的穿透能力强,抗干扰能力强,且便于立体观测。

可控源音频大地电磁法仍存在反演多解性、假极值、静态效应、近场效应、场源效应等问题^[9]。上述效应造成数据畸变,而无法进行准确地数据解释推断。CSAMT 的静态效应,是由近地表横向不均匀的电性特征导致,地表异常将引起严重的数据畸变,出现虚假异常。静态效应本质上是电荷效应,是由地下介质存在异常体引起。CSAMT 的静态效应问题,主要采用曲线平移法、空间滤波法和 EMAP 滤波等方法来校正,以准确推断解释。CSAMT 的近场效应,采用人工发射时中低频电磁场可能会进入过渡区或近区,无法满足卡尼亚电阻率所要求的平面波条件,造成采用远区卡尼亚电阻率计算公式得到的视电阻率与真实大地电阻率差异较大。CSAMT 的近场效应问题,一般通过过渡三角形法来解决。场源效应,有平面波效应、阴影效应和场源附加效应。除通过实验方法和条件校正处理上述问题外,仍需要采用其他方法进行互相校验,减少反演多解性、假极值等问题,并提供极化率和电阻率等参数,有效提高横断层地质金属成矿带找矿效率和准确度。

2 基于激发极化法与 CSAMT 法的金属成矿带综合探矿方法研究

在激电中梯法扫面的基础上,采用可控源音频大地电磁法进行详细勘探。控源音频大地电磁法与激电法的综合电法探测,能够在大深度范围有效反应地点断面电阻、极化率参数,互相校正验证,提高金属矿探测准确度和效率。

2.1 地震作用下横断层地质特征分析

地震作用下横断层具有布格重力异常、深部磁导异常和大地电磁异常等地球物理特征^[9]。断层具有金属矿层(岩层)不连续、重复或缺失、断层面擦痕和阶步现象,以及褶曲突然变化等标志。横断层走向一般与褶曲轴向或区域构造线成正交。

金属矿床的形成、走向及分布常受断层构造的影响^[6-7]。横断层构造往往具有控矿、导矿和容矿等特征,具有较大的找矿潜力。横向断层的地质构造对金属矿、能源矿等矿产资源的分布具有重要的控制作用。岩浆、含矿溶液容易侵入断层或填充空洞空间,而造就重要的金属成矿带。断层能够深部矿物质运移到地表提供通道,起到导矿作用,或为矿体赋存、矿质富集提供有利的空间。主裂带内及其羽状断层、断层产状突然变化的地方、横断层层间破碎带及韧性剪切带、横向断层与主构造带交切部位和多个断层交汇部位等容矿空间,是成矿的良好场所,容易富集成矿,具有很大的矿藏潜力。横向断层切割主构造带具有分段特征。不同分段的破裂程度和构造样式有差异。横断层金属成矿带找矿时,可以将分段断块作为基本单元来开展工作。

2.2 激发极化法原理模型及技术方法

激发极化效应是充放电过程中,由于电化学反应而引起附加电场随时间缓慢变化。

(1)激发极化法中的电位差随时间变化,其二次电位差在供电时刻 t 的计算公式如下:

$$\Delta U_2(t) = \Delta U(t) - \Delta U(0) \quad (1)$$

式中: $\Delta U_2(t)$ 为二次电位差; $\Delta U(t)$ 为供电时刻 t 的总电场电位差; $\Delta U(0)$ 为供电瞬时的总电场电位差。

(2)基于有限单元法构建理论地电断面模型,并求解得到正演电阻率数值。视电阻率定义为:

$$\begin{cases} p_j = \frac{G}{I} \Delta \Phi \\ \Phi(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \Psi(x, k, z) \cos(ky) dk \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_j 为激发极化法的视电阻率; G 为电极排列系数; $\Phi(x, y, z)$ 为位函数; $\Psi(x, k, z)$ Fourier 变换函数; $\Delta \Phi$ 为两测量电极之间的电位差; I 为供电电流; k 为三角单元节点号。

(3)阻尼最小二乘法成像原理。采用四边形网格进行视电阻率数据的二维地电断面反演计算。采用如下线性方程组求解最小乘解:

$$\left| \frac{W_d A}{W_m} \right| \Delta m = \left| \frac{W_d \Delta d}{W_m (m_b - m)} \right| \quad (3)$$

式中: W_d 为数据拟方差矩阵; W_m 为模型加权矩阵; Δm 为; Δd 为计算所得视电阻率与仿真视电阻的对数差矢量; m_b 为基本模型参数矢量。

将上述求解模型修改量加入原预测模型得到新模型, 重复上述步骤直到实测数值与仿真数值的平均均方误差满足要求, 则视电阻率反演停止。平均均方误差表示为:

$$MSE' = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (4)$$

岩石与矿石之间的视电阻率、激发极化率是不同的。当探测区域干扰较大时, 需要综合考虑电阻率特征和激发极化率。

激电法有时间域激电法(直流激电法)、变频法、奇次谐波法和双频激电法。直流激电法有联合剖面、中间梯度法和电测深等方法。交流激电法主要采用中间梯度和偶极法在野外工作中, 需要结合地形地质条件、地理物理条件和成本控制等情况选择合理激电法。干扰小、地形好、交通便利的情况, 可选用时间域激电法(直流激电法)或双频激电法。干扰严重、地质条件复杂的情况, 推荐选用双频法。实际探矿中应根据干扰水平、地形地质条件和可能的异常形态等因素选取合理的测量方式。

2.3 CSAMT 法原理模型及技术方法

CSAMT 法的横断层地质深部探矿原理是以麦克斯韦方程组为理论基础。CSAMT 法电场计算公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{Id_{ab}\rho}{2\pi R^3} (3\cos^2\theta - 2) \\ E_y = \frac{3Id_{ab}\rho}{4\pi R^3} \sin^2\theta \\ E_z = (i-1) \frac{Id_{ab}\rho}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\omega}} \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_x 、 E_y 和 E_z 三坐标轴电场强度; I 为供电电流; d_{ab} 为电源偶极长度; ρ 为电阻率; 为收发距; θ 为 R 与 x 轴夹角; μ_0 为自由空间磁导率。

CSAMT 法磁场计算公式如下:

$$\begin{cases} H_x = -(i+1) \frac{Id_{ab}}{4\pi R^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\omega}} \cos\theta \sin\theta \\ H_y = (i+1) \frac{Id_{ab}}{4\pi R^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\omega}} 3(\cos^2\theta - 2) \\ H_z = \frac{3I^2 d_{ab}\rho}{2\pi\mu_0\omega R^4} \sin\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_x 、 H_y 和 H_z 三坐标轴磁场强度。

CSAMT 法采用电场振幅水平分量和磁场振幅计算卡尼亚电阻率。卡尼亚电阻率比值法的计算公式克服了采用单分量视电阻率时存在的抗干扰能力差、受发射偶极与接收偶极之间的电性不均匀体的影响较大等问题。卡尼亚电阻率(视电阻率)和实际勘探深度计算公式如下:

$$\begin{cases} \rho_w = \frac{1}{5f} \left[\frac{E_x}{H_y} \right]^2 \\ D = 365 \sqrt{\frac{\rho_w}{f}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ_w 为卡尼亚电阻率; D 为实际探测深度; f 为频率。通过调节工作频率获得不同深度的地电信息, 基于视电阻率数据特征分析推断地质特征和金属矿分布形态。电阻率和相位联合反演计算反演电阻率参数, 并进行地质推断解释。

CSAMT 勘探法分为数据采集、数据处理和解释推断等重要环节。数据采集主要是时间域上反应地下电性分布的信息, 其数值是时间域功率谱数据; 数据处理环节, 是对上述原始数据变换为频率域上的“频率—视电阻率”关系, 再将所得频率域数据换算(反演)为“深度—电阻率”对应关系, 能够直观反映探测区域的异常特征。数据处理中的反演方法包括 Bostic 反演、Occam 反演和 NLCC 反演。

CSAMT 法野外工作技术方法, 主要是确定观测方式、勘探深度、频率范围和覆盖范围。合理进行最佳测线的布置, 与断层走向垂直; 设置相关基础参数、发射偶极和接收偶极的长度; 初步测算勘探深度(一般为 2~3 km), 以便合理选择收发距, 提高数据采集效率; 发射端与接收端的测线尽量平行敷设, 偏差建议在 15 度以内, 保证有较强的观测信号; 进行噪声源分析, 采集数据时采用相应避免或降低噪声干扰的措施, 提高数据质量; TM 模式反演模式拟合效果较好, 适合于断层地质条件, 推荐采用该模式进行横断层地质金属成矿带寻矿。

3 某横断层地质金属成矿带探矿案例

某区域内发育近北东向区域断裂构造, 为构造热液型成矿的主要控矿、含矿构造, 具有横断层地质条件。将本文所提出的基于激发极化法和 CSAMT 法的综合探矿法应用于该区域的金属矿床勘探。

3.1 综合探矿法的主要步骤

采用本文所提出的基于激发极化法和 CSAMT 法的综合探矿法进行勘探,主要步骤如下:

(1)采用 1:10 000 激发极化法的中间梯度测量法扫面。整理实测资料,绘制探测区域的视极化率和视电阻率平剖图,并进行数据网格化后获取其平面等值图,进行宏观异常分析。

(2)采用电测深成像,进行圈定异常带特征分析。激电测深等物探方法圈定金属矿体的空间分布位置与形态。通过测定的视电阻率及其剖面曲线并结合地质对比,以提高解释推断结论的准确性。

(3)采用可控源音频大地电磁法进行详细勘探。基于 CSAMT 法模型,采用相关软件对两条剖面数据进行 TM 模式的非线性共轭梯度二维反演。

综合电法探测能够在大深度范围有效反应地点断面电阻、极化率参数,互相校正验证,提高金属矿探测准确度和效率。

3.2 综合探测法结果及分析

综合探测法结果及分析包括激发极化法探测、电测深成像异常推断和 CSAMT 测深成像分析三部分内容。

(1)激发极化法探测。通过 1:10 000 激发极化法中间梯度测量法扫面,发现某断层区域存在控矿构造。对金属探矿区域进行电性实验,基于所获系列数据得到激发极化率和视电阻率特征曲线,见图 1 和图 2 所示(横坐标为矿点)。

结合物性参数特征,金属矿大概率存在的特征标志为高极化率和中低电阻率。电法测量结果表明,矿体与视极化率异常吻合较好。在该探测区域,横断层层间破碎带及韧性剪切带、横向断层与主构造带交切部位和多个断层交汇部位等多处呈现高极化率、低电阻特征,围岩呈现低极化率、高电阻特征。金属矿和与成矿相关的岩石具有低电阻率高极化率特征,断层围岩具有高电阻率低极化率特征。经宏观异常分析可知,断裂带附近极化率异常成矿可能性较大。结合可控源音频大地电磁法反演推断出,金属矿体受断裂控制。对于圈定的某局部区块,极化率在 1.4%~1.6% 的范围内,极化率较高;视电阻率在 400~600 $\Omega\cdot\text{m}$ 的范围内,相对于围岩,该局部区块呈现低电阻高极化的异常特征。

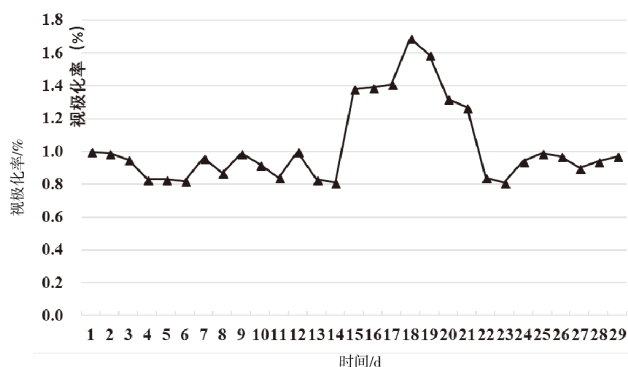


图 1 视极化率特征曲线

Fig.1 Apparent polarizability characteristic curve

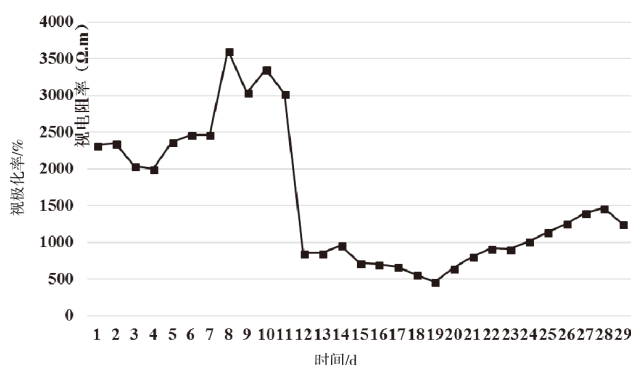


图 2 视电阻率特征曲线

Fig.2 Apparent resistivity characteristic curve

(2)电测深成像异常推断。激电测深反演成像结果反应视电阻率和视极化率异常特征。激电测深断面图显示矿体具有高极化高电阻率特征。在某局部区块,进行电测深成像异常推断,以详细掌握该区域深部地电断面信息。经对原始测量数值进行反演并网格化后,得到断面视极化率和视电阻率二维平面等值线。勘测区域西南部是有利的成矿区域,其矿体受横断层控制。

(3)CSAMT 测深成像分析。基于 CSAMT 模型,采用相关软件对两条剖面数据进行 TM 模式的非线性共轭梯度二维反演。勘测区域激电异常主要分布在西南区块,拟断面反演结果显示,该区域高极化、低电阻率。横断层层间存在矿液通道,与地质资料信息相吻合,有很大可能存在金属矿。CSAMT 测深剖面反演结果能够很好地辨识岩体和断层带等异常体的电性差异。

4 结语

地震作用下横断层地质构造往往具有控矿、导矿和容矿等特点,拥有较大的找矿潜力。本文

针对采用单一电法来勘探横断层地质金属矿时可能存在找矿效果不佳的问题,本文研究并提出了更为有效的基于激发极化法和CSAMT法的综合电法技术。本文在分析地震作用下横断层地质特征的基础上,结合激发极化法和CSAMT法特点,提出基于激发极化法和CSAMT的综合找矿法,有效反映地下地电差异,并互相校正验证;结合已有地质物探资料,推断地下异常,提高横断层的金属矿产勘探效率和效果。某横断层地质区域的金属矿产勘探实践表明,本文所提方法有效、可行,能够取得良好的勘探效果。通过融合激电反演和CSAMT成像综合分析结果,能够提高对该区域横断层金属矿空特征和走向进行解释推断的有效性和可信度。

参考文献:

- [1] 蔡俊,吕修祥. 横向断层及其控油气作用[J]. 地质科技情报,2016(1):107-113.
- [2] 刘华国,李峰,贾启超. 基于钻探的马袅-铺前断裂西段活动性探讨[J]. 华南地震,2018,38(1):47-53.
- [3] 林方丽,王光杰. 综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究-以皖南乌溪多金属矿区为例 [J].地球物理学报,2016,59(11):4323-4337.
- [4] 任强伟. 寻找铜铁矿中磁法结合电法的应用探讨[J]. 世界有色金属,2017,32(21):256+259.
- [5] 王伟锋,卿艳彬,朱传华. 龙门山断裂带横断层地质特征及其控震作用[J]. 地震研究,2015,38(2):242-249.
- [6] 齐钊宇,张志湖. 南宝山铜铅锌多金属矿床成矿元素分带特征及地质意义[J]. 矿产勘查,2017,8(3):358-365.
- [7] 周云满,张长青,和中华,等. 滇西北衙金多金属矿床成矿作用特征标志[J]. 地质找矿论丛,2018(1):1-14.
- [8] 何鹏,张跃龙. 综合找矿方法在内蒙古昌图锡力锰银铅锌矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2018,62(03):501-511.