

电性源瞬变电磁法在内蒙古多金属矿中的勘查实验

曾友强, 敬荣中, 王建超

中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林
Email: qingqingqianer@126.com

收稿日期: 2021年2月18日; 录用日期: 2021年3月17日; 发布日期: 2021年3月30日

摘要

电性源瞬变电磁法, 具有施工方便, 探测深度较大, 及探测精度相对较高的特点, 是目前物探新技术新方法中的研究热点。该方法具有很多优点, 在煤炭地质方面已经取得了很大的成就, 但在多金属矿床隐伏矿体方面应用的较少。本文基于电性源短偏移距正演程序及全域视电阻率定义, 对内蒙某多金属矿进行电性源短偏移距瞬变电磁试验, 并采用全域视电阻率定义进行资料处理。试验结果表明, 电性源瞬变电磁法, 接收位置位于近场, 信噪比高。同时根据电性源电磁场有效趋肤深度公式, 对时间进行时-深转换, 得到不同埋深的视电阻率剖面图, 处理结果显示, 视电阻率高低阻电性分布, 跟重力异常曲线吻合; 再结合可控源音频大地电磁反演视电阻率剖面, 不仅高低阻位置吻合良好, 而且在电性源瞬变电磁的视电阻率剖面上能分辨小构造, 岩性分界面明显, 说明基于电性源短偏移距瞬变电磁法全域视电阻率定义的资料解释, 在金属矿区隐伏矿体勘查的应用是可行的。

关键词

瞬变电磁, 短偏移距正演, 全域视电阻率定义, 隐伏矿体, 内蒙古

Experiment of Electrical Source Transient Electromagnetic Method in Inner Mongolia Polymetallic Mineral Exploration

Youqiang Zeng, Rongzhong Jing, Jianchao Wang

China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co. Ltd., Guilin Guangxi
Email: qingqingqianer@126.com

Received: Feb. 18th, 2021; accepted: Mar. 17th, 2021; published: Mar. 30th, 2021

Abstract

With the characteristics of convenient construction, large detection depth, and relatively high detection accuracy, the electrical source transient electromagnetic method is currently a research hotspot in new technologies and methods of geophysical prospecting. Because it has many advantages, so it has made great achievements in coal geology, but it is rarely used in the concealed ore bodies of polymetallic deposits. In this paper, based on the short-offset forward modeling program of the electric source and the definition of the global apparent resistivity, the short-offset transient electromagnetic test of a polymetallic mine in Inner Mongolia was carried out. The experimental results show that the receiving position of the tem is in the near field and the signal-to-noise ratio is high. At the same time, according to the effective skin depth formula of the electromagnetic field of the electric source, time-depth conversion is carried out to obtain sections of apparent resistivity of different buried depths. The treatment results show that the distribution of apparent resistivity of high and low resistivity is consistent with the curve of gravity anomaly. Combining of controlled source audio-frequency magnetotelluric inversion of apparent resistivity section, not only position of high and low resistance coincide well, and the electrical source transient electromagnetic can distinguish on the apparent resistivity section of small structure, lithologic interface, that is based on the electrical source short offset transient electromagnetic method the whole domain of the definition of apparent resistivity data interpretation, application in metal mine prospecting concealed ore body is feasible.

Keywords

TEM, Forward of Short Offset, Definition of Global Apparent Resistivity, Concealed Orebody, Inner Mongolia

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

瞬变电磁对低阻地质体的勘察尤为灵敏[1] [2] [3], 是资源、能源和地热探查的重要手段之一, 诸多研究表明我国深部资源潜力巨大, “攻深探盲”是构建国家资源安全体系的有效途径。应用最先进的科学技术手段, 提取深部地质信息, 已成为我国当前地球物理科学研究的发展方向[4]。电磁法是矿产资源探查的主要手段之一, 通过观测电磁场的时空分布, 实现地下目标体的有效探测。而瞬变电磁法(TEM)属于时间域人工源电磁方法, 它是以大地中岩(矿)石的电、磁性差异为物理前提, 依据麦克斯韦电磁感应原理, 观测、研究电磁场空间和时间分布规律, 从而解决相关地质问题的一种勘察方法[5] [6]。

我国现阶段地面、航空及海洋电磁探测技术迅速发展, 特别是电性源瞬变电磁法[7] [8] [9]。近年来, 为了实现地下 1.5 km 深度目标体的精细探测, 发展了电性源短偏移瞬变电磁法, 利用关断的双极性电流激发电磁场, 在小于 2 倍探测深度的偏移距范围内观测纯二次场, 由于收发距离较小, 所接收的信号强度较大。已有学者表明[8], 该方法可以实现地下 1.5 km 深度范围内目标体的精细探测。电性源瞬变电磁法, 接收位置位于近区, 信噪比高, 工作装置测量仪器多, 可以利用当前主流的电磁法仪器, 如 V8、GDP32 等, 为该方法的推广提供了有利条件[10] [11] [12]。近几年, 电性源瞬变电磁得到了快速的发展, 目前在正演模拟、视电阻率计算、施工技术等方面形成了较为成熟的方法体系, 并在煤田、水文、地质等领域

得到了广泛而成功的应用[13] [14] [15] [16] [17]。2004年,黄力军等,实现了电性源瞬变电磁法在煤田水文地质调查中的应用;2012年,周楠楠等,对电性源瞬变电磁响应误差进行了计算;2013年,薛国强等,对电性源瞬变电磁短偏移探测方法进行了定义描述[18];2013年,李功强等,用电性源瞬变电磁法在煤矿深部采区岩层富水性进行了试验;2015年,陈卫营等,对电性源瞬变电磁对薄层的探测能力进行了研究。2015年,崔江伟等,对电性源瞬变电磁B场全程视电阻率进行了计算;2016年,海四洋,电性源瞬变电磁短偏移距页岩气探测前景进行了探析;2017年,武军杰等,对电性源地—井瞬变电磁异常场响应特征进行了初步分析;薛俊杰,2017年,对电性源短偏移瞬变电磁探测深度进行了分析与应用;2020年,薛国强等,对电性源短偏移距瞬变电磁研究进展进行了系统总结;2020年高天新等,研究了任意形状水平电性源瞬变电磁全区视电阻率;2020年,常江浩等,对电性源短偏移距瞬变电磁场扩散规律进行了三维数值模拟。

综上所述,由于三维反演的复杂性,目前还未见有成熟的三维反演软件[19],电性源瞬变电磁法在矿产资源勘查中的应用较少。本文采用电性源瞬变电磁全域视电阻率定义方法,原理相对简单,处理方便,且接收位置不分近区,远区;时间上不分早期、晚期。因此,在电性源瞬变电磁法三维反演技术还没成熟阶段,探究电性源瞬变电磁法,采用定义全域视电阻率的方式进行资料处理[20] [21],研究该方法在多金属矿产勘查方面的有效性,是本文的研究重点。

本文的试验区受矿区施工影响,电磁干扰严重,为了满足抗干扰的要求,需采用主动源方式;通过综合比较,可控源音频电磁法,发射源位于远区,接收信号弱;因此,笔者选择电性源瞬变电磁法测量,并运用电性源全域视电阻率进行定性解释,同时经过重力数据,可控源音频大地电磁反演剖面辅助验证,探测结果基本吻合,验证了电性源瞬变电磁法全域视电阻率定义在多金属矿山的应用是可行的。

2. 瞬变电磁法原理

2.1. 瞬变电磁正演响应计算

基于电磁场满足的亥姆霍兹方程,给定地表满足的边界条件,由于电磁矢量位和磁场之间的旋度关系,经过推导,得到均匀半空间电偶源,在任意一点的频率域磁场的垂直分量表达式,如公式(1)所示公式,(1)、(2)、(3)皆引用(李貅,2002):

$$H_z(\omega) = \frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + \mu_1} e^{-\lambda z} J_1(\lambda r) \frac{1}{r^2} d\lambda \quad (1)$$

其中(I)表示电流强度, (dl)是电偶极子长度, λ 是电磁波波长, $\mu_1 = \sqrt{\lambda^2 + \kappa_1^2}$, σ_i 表示电导率,若忽略位移电流, $\kappa_i^2 = i\omega\mu\sigma_i$ 表示介质的波数, ω 表示为角频率。

在(Z)方向磁场强度用 H_z 表示;发射偶极长度用(AB)表示, (I)为发射电流; (r)为收发距离; (θ)为电偶极子(AB)同收发距(r)的夹角。

理想层状介质,频率域磁场表示为公式(2);

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im} \left[\frac{I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + \mu_1/R_1} J_1(\lambda r) d\lambda \right] \frac{\cos(\omega t)}{\omega} dt \quad (2)$$

其中 ω 表示为角频率; t 表示时间, r 表示收发距长度;

当采用阶跃波作为发射波形时,频率域磁场经过数值的变换,可以得出时间域磁场表达式,公式(3);

$$H_z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{H_z(\omega)}{-i\omega} e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

2.2. 全域视电阻率定义

从前述公式(1), (2)和(3)可以看出, 电阻率同电磁波传播之间存在一种很复杂的函数关系[22] [23] [24], 引用(智庆全, 2016), 简化后可以表达为公式(4);

$$dB = \varphi(x, y, t, \rho, \gamma_0, I_0) \quad (4)$$

公式(4)中, 测点的坐标位置为 (x, y) , 采样时间点为 (t) , 介质的真电阻率 (ρ) , 阶跃电流的大小为 (I_0) , γ_0 表示发射源到测点的偏移距, $\varphi(\cdot)$ 表示电磁响应与电性源装置参数(线源长度、发射电流大小、观测点位置坐标、模型装置参数等)的函数关系式。

因为公式(4)难以用解析方法, 所以暂时求不出电阻率与场之间的显式反函数, 但通过实验室大量的数值模拟计算验证, 电磁波响应与模型参数电阻率之间的函数关系具有单调性, 于是拟采用迭代方法, 求取其反函数值, 从而替代反函数表达式的求取。

首先, 构建稳定迭代格式, 给定电阻率初值, 在电阻率初值 (ρ_0) 的邻域内, 进行泰勒展开, 即

$$\begin{aligned} \varphi(\rho, \text{const}) &= \varphi(\rho_0, \text{const}) + \varphi'(\rho_0, \text{const})(\rho - \rho_0) + \frac{\varphi''(\rho_0, \text{const})}{2!}(\rho - \rho_0)^2 \\ &+ \dots + \frac{\varphi^{(n)}(\rho_0, \text{const})}{n!}(\rho - \rho_0)^n + R_n(\rho) \end{aligned} \quad (5)$$

这样我们会得到一个新的电阻率值 ρ , 记为 ρ_1 :

$$\rho_1 = \frac{\varphi(\rho, \text{const}) - \varphi(\rho_0, \text{const})}{\varphi'(\rho_0, \text{const})} + \rho_0 \quad (6)$$

令 $\rho_0 = \rho_1$ 作为新的初值, 在它的极小邻域内展开, 并采取保留线性项的做法, 我们又会得到新的 ρ_1 , 这样反复迭代下去, 当迭代误差小于给定误差 ε 范围内, 迭代终止:

$$\left| \frac{dB - \varphi(\rho_1, \text{const})}{dB} \right| < \varepsilon \quad (7)$$

其中 (dB) 表示接收点位置和接收时刻的磁场强度, $\varphi(\rho_1, \text{const})$ 表示电阻率为 (ρ_1) 的地电模型在某位置点某时刻的场值, 设置迭代终止的条件, 就可以计算出电性源瞬变电磁全域视电阻率, 公式(5) (6) (7)引用(张莹莹, 2015)。

3. 地球物理特征

内蒙某区内多金属矿是属于与次火山岩有关的中温裂隙型充填热液矿床, 因此, 其控矿构造为一配套的旋转构造体系, 于是在成矿过程中这种旋转产生了控矿作用, 燕山期构造应力产生的一系列配套构造裂隙, 为岩脉、矿脉的就位准备了良好的空间, 使地层岩脉、矿脉的形成, 存在有一定的时间差, 矿床类型罕见。该多金属矿床矿脉分布的基本特点是, 矿脉主要顺着构造裂隙贯入式的填充, 脉体同层间裂隙呈现小角度交角, 部分顺着层间之间的裂隙贯入, 矿脉充填的构造性质以张性为主, 兼具扭性。张性脉是该多金属矿重要的工业矿脉; 缓倾扭性脉也是区内重要的工业矿脉, 矿脉延长、厚度不如张性脉, 但延伸较稳定, 陡倾扭性脉一般规模小, 剖面上扭性缓脉限制了张性陡脉, 呈陡脉追踪的阶梯状。1982~1994年, 华北有色地质勘查局综合大队及物探队在目前该多金属矿矿山的周边部和近外围开展了地物化找矿勘查及评价工作。该多金属矿地质特征表明, 矿区深部及外围仍有可能存在另一种类型矿床、含矿第二空间, 目前矿山开采的矿体集中分布于距地表500 m范围内, 深部及外围找矿空间较大。就方法技术而言, 矿山地球物理特征均表明, 矿(化)石与围岩存在明显的密度和电阻率差异, 具备使用重力、

电磁法能对其深部资源进行探测和预测的良好地球物理前提。矿区内主要岩性有粉砂质板岩、流纹质凝灰岩、大理岩及花岗闪长岩。采用 SCIP 标本测试仪对本区标本进行物性参数测量,对测区已施工钻孔采集了 92 块岩心标本进行电性测试,结合标本物性测量结果,得到矿区物性参数统计结果见表 1。

Table 1. Statistical table of electrical parameters of mineral specimens

表 1. 矿区矿标本物性电参数统计表

标本数量(块)	岩性	电阻率平均值($\Omega\cdot\text{m}$)	极化率平均值(%)	电阻率范围($\Omega\cdot\text{m}$)	极化率范围(%)
15	粉砂质板岩	1772	2.1	608~5453	0.8~3.5
15	流纹质凝灰岩	3856	1.1	1079~6815	0.65~1.6
15	大理岩	7055	0.6	914~16225	0.38~1.02
15	花岗闪长岩	7831	1.2	1630~28672	0.28~0.88
15	铅锌矿矿石	302	8.2	32~1286	6.7~12.88
17	锡矿石	3407	2.0	1904~5266	1.2~3.4

本次工作现场采集标本电性测试,对每一块岩石标本进行电阻率测量,然后对同一种岩性标本分别取平均值,得到粉砂质板岩电阻率平均值为 $1772 \Omega\cdot\text{m}$,呈低阻高极化特征;流纹质凝灰岩电阻率平均值为 $3856 \Omega\cdot\text{m}$,呈中阻中极化特征;大理岩电阻率平均值 $7055 \Omega\cdot\text{m}$,花岗闪长岩电阻率平均值 $7831 \Omega\cdot\text{m}$,均呈现高阻低极化特征;铅锌矿矿石电阻率平均值为 $302 \Omega\cdot\text{m}$ 呈低阻高极化特征;锡矿石电阻率平均值为 $3407 \Omega\cdot\text{m}$ 呈中阻中极化特征。由表 1 可看出,矿区各类岩石电性差异明显,电阻率由高到低排列顺序为:花岗闪长岩 > 大理岩 > 流纹质凝灰岩 > 锡矿石 > 粉砂质板岩 > 铅锌矿石,各类岩石物性差异明显,具备电磁法的地球物理前提。

4. 电性源瞬变电磁试验

电性源短偏移距瞬变电磁法,采用收发距接近目标探测深度或小于目标探测深度的方式,接收位置可以分布线源 AB 两侧一定位置范围内,引用(薛国强, 2020)。本试验工作的仪器为 GDP-32^{II} 多功能电磁仪,由美国 Zonge 公司研制生产,该仪器基频为 0.000121 Hz 到 8024 Hz 范围内,可以按二进制间隔,任意选择 26 个频率道。瞬变电磁在时间域内采集信号,本次测量采用基频 16 Hz,选用 GGT-30 大功率(30 kW)发射机,最大输出功率为 30 kW;最大输出电流为 30 A;最高输出电压为 1000 V;关断时间小于 125 μs ;稳流精度为 0.1%。本试验发射电流为 12 A,发射源长度为 1000 m,接收探头采用 TEM/3 磁探头,设置 K66 线和 K49 线两条平行测线。K66 测线偏移距为 300 m, K49 测线偏移距为 640 m,测量点距为 20 m,装置示意图如图 1 所示,技术路线流程图如图 2 所示。

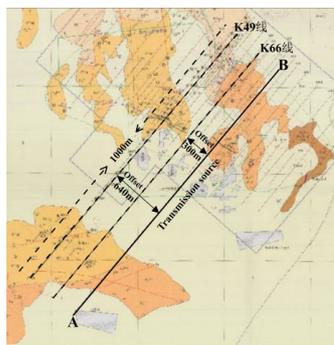


Figure 1. Schematic diagram of electrical source TEM

图 1. 电性源瞬变电磁装置示意图

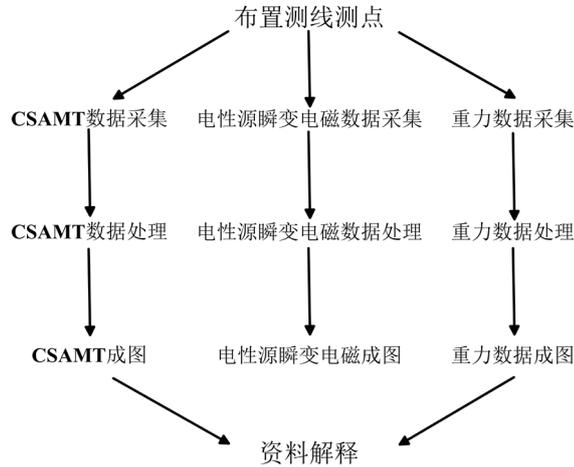


Figure 2. Chart of flow
图 2. 流程图

4.1. 探测结果及电性分布

本试验目的是对矿区外围及深部进行探测，探测是否存在第二成矿空间。本试验共布置两平行测线，测线长度为 2000 m，测线位置 1500 m~2000 m 位于矿区范围内，试验区地形平坦，地面海拔高度为 800 m。本试验数据处理采用全域视电阻率定义程序进行处理，深度计算，采用电磁波趋肤公式，进行时 - 深转换，引用文献《接地导线源电磁场全域有效趋肤深度》，得当全域视电阻率剖面图。根据岩石物性参数测定，铅锌矿矿石电阻率平均值为 302 $\Omega\cdot\text{m}$ 呈低阻高极化特征。根据地质结构，成矿条件，该矿床为裂隙充填型。其中图 3 为 K49 线，测线偏移发射源 640 m。根据图 3 所示电性分布特征所示，基岩分界面位于海拔高度 0 m 范围内，在水平位置 1400 m 和 1900 m 位置，高阻异常向上隆起，推测该处基岩分界面向上延伸，在水平位置 1100 m 存在一条低阻异常，推测该处存在断层或破碎带。如图 4 所示，K66 线整体岩性分布表现为左侧岩性变化不大，无明显异常，地层平整性较好，但在水平位置 1500 m~1800 m，海拔高度 0 m 位置，存在低阻异常圈闭，推测在已知矿区深部存在隐伏矿体。

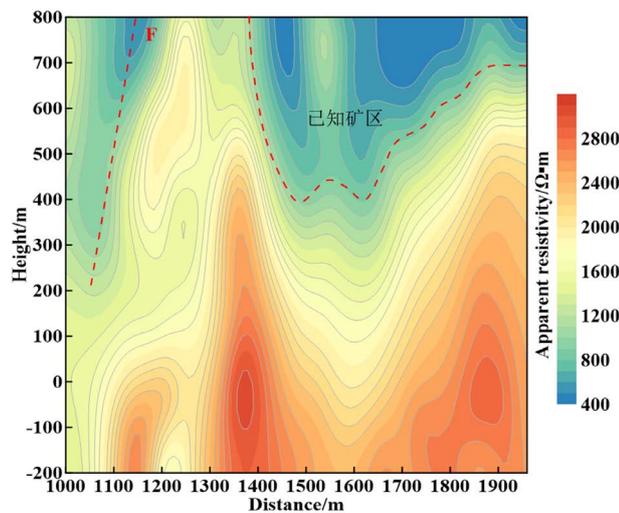


Figure 3. Cross-sectional view of the global apparent resistivity of line K49
图 3. K49 线全域视电阻率断面图

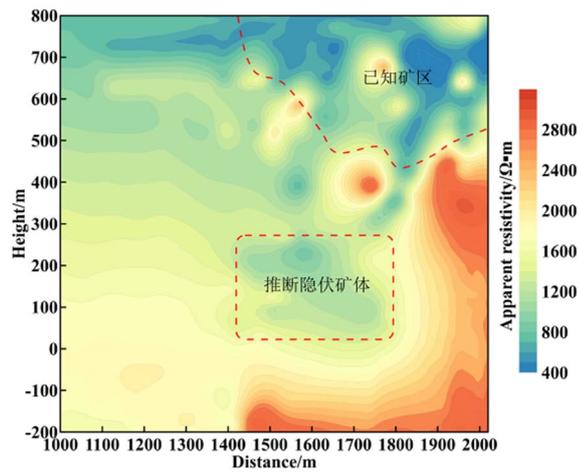


Figure 4. Cross-sectional view of the global apparent resistivity of line K66

图 4. K66 线全域视电阻率断面图

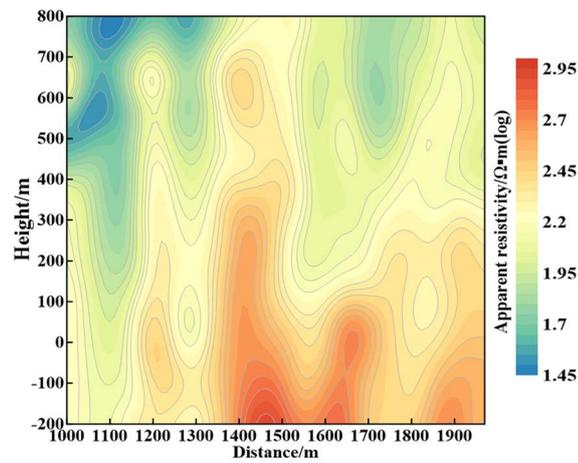


Figure 5. CSAMT inversion of apparent resistivity profile on line K49

图 5. K49 线 CSAMT 反演视电阻率剖面

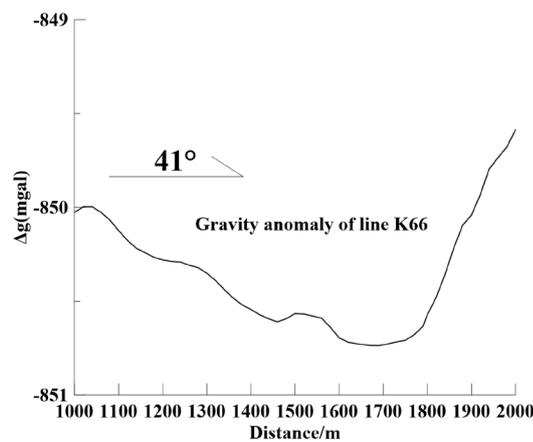


Figure 6. Gravity Bouguer anomaly curve of line K66

图 6. K66 线重力异常曲线

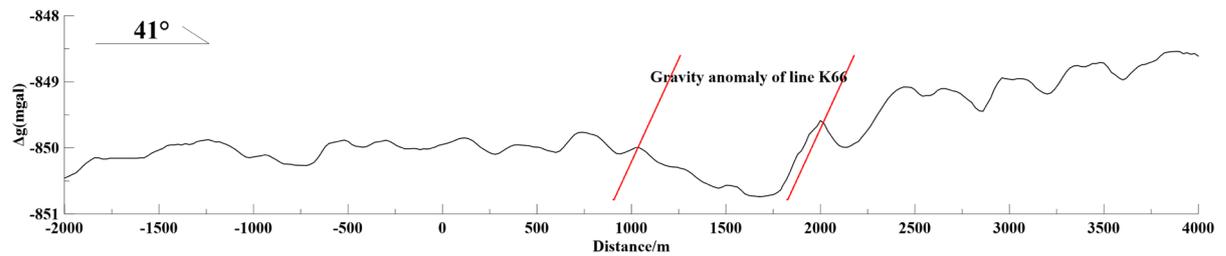


Figure 7. Gravity Bouguer anomaly curve of K66 line

图 7. K66 线重力布格异常曲线

4.2. 多方法验证

为了验证电性源瞬变电磁法的有效性,对 K49 线和 K66 线分别进行了可控源音频大地电磁测量和重力测量。可控源音频大地电磁法采用 GDP-32 接收机和 GGT-30 发射机,发射源位置距离接收位置为 10 km。可控源音频大地电磁法 K49 线测线跟瞬变电磁 K49 线重合,测量点距为 20 m,采用标量测量,并对原始文件进行格式转换,数据曲线圆滑,静态校正,最后采用 GDP-32^{II} 自带软件 scs2d 进行反演,然后 surfer 成图,处理结果如图 5 所示。根据图 5 所示,在水平位置 1100 m 处,同样存在低阻异常断裂带,同电性源瞬变电磁探测结果吻合良好,推断在该处存在裂隙充填型矿床。由于测线 K66 和 K49 线测线平行,相距 340 m,因此两测线岩性基本一致,且 1500 m~2000 m 都位于矿区,矿区浅部成低阻体,深度高阻体向上延伸,在可控源音频大地电磁上,岩性分界并不明显,全域视电阻率断面图电性分布更清晰。

K66 线重力测量总长度为 6 km,从总体曲线可以看到在 1700 m 位置出现重力异常负极值,如图 7 所示。为了便于对比图 4 所示的 K66 线全域视电阻率断面图,截取 1000 m~2000 m 进行单独成图。在图 6 所示 1500 m 位置,曲线向上凸起,形成突变,在图 4 位置对于高阻异常体向上凸起;在 1500 m 位置,重力异常曲线存在负极值,在图 4 全域视电阻率剖面上,显示低阻异常圈闭;在重力异常 1800 m~2000 m 位置,重力布格异常曲线上升,在图 4 全域视电阻率剖面上对应为高阻体向上延伸,因此,整体异常曲线更重力异常曲线吻合良好,说明全域视电阻率资料解释是可行,能很好的对地下岩性分布进行揭露,下一步结合钻孔进一步验证。

5. 结语

电性源短偏移距瞬变电磁法,数据采集区域位于近区,信号强度大,相比于可控源音频地电磁,数据质量更好。目前,在科研院校、实验室,该方法的三维正演数值模拟、视电阻率数据处理等基本完善。但是三维反演技术还未有成熟的技术,因此采用全域视电阻率定义的方式进行资料解释。此次试验采用现有勘探仪器 GDP-32 探测仪,根据装置参数多次调试,电性源瞬变电磁发射采用 50% 占空比,发射基频采用 16 Hz,发射电流为 10 A 以上,探测效果最好,数据质量最好,信噪比最高。通过在内蒙金属矿区的电性源瞬变电磁试验,该方法分辨率高,能区分深部细微构造,电性分特征明显,施工方便,成本低,说明该新方法技术在生产实践中的探索是有效的,但该方法在金属矿产勘查中的应用还需更多研究。

基金项目

中色桂林院创新基金《多辐射场源瞬变电磁可行性研究》项目(114550119004)、《电性源瞬变电磁可行性研究》(114550118012)。

参考文献

- [1] 方文藻,李子国,李貅. 瞬变电磁法探测原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993:311.

- [2] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 18.
- [3] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002: 16.
- [4] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128-2138.
- [5] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 268-284.
- [6] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319-326.
- [7] 何继善, 薛国强. 短偏移距电磁探测技术概述[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 1-8.
- [8] 薛国强, 陈卫营, 武欣, 等. 电性源短偏移距瞬变电磁研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2020(2): 1-12.
- [9] 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 等. 接地源瞬变电磁短偏移距深部探测技术[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 255-262.
- [10] 陈卫营, 薛国强, 崔江伟, 等. SOTEM 响应特性分析与最佳观测区域研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 739-748.
- [11] 薛俊杰, 陈卫营, 王贺元. 电性源短偏移距瞬变电磁探测深度分析与应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 381-384.
- [12] 薛国强, 闫述, 周楠楠. 偶极子假设引起的大回线源瞬变电磁响应偏差分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2389-2396.
- [13] 李吉松, 朴化荣. 电偶源瞬变测深一维正演及视电阻率响应研究[J]. 物探化探计算技术, 1993, 15(2): 191-200.
- [14] 白登海, Maxwell, A.-M., 卢健, 等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697-704.
- [15] 陈卫营, 李海, 薛国强, 等. SOTEM 数据一维 OCCAM 反演及其应用于三维模型的效果[J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3667-3676.
- [16] 卢云飞. 电性源短偏移距瞬变电磁数据一维反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 18-39.
- [17] 陈康. 电性源短偏移距瞬变电磁多源多分量探测方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [18] 陈卫营, 薛国强, 崔江伟. 电性源瞬变电磁发射源形变对观测结果影响分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 126-132.
- [19] 武军杰, 李貅, 智庆全, 等. 电性源地 - 井瞬变电磁异常场响应特征初步分析[J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 129-135.
- [20] 武军杰, 李貅, 智庆全, 等. 电性源地井瞬变电磁全域视电阻率定义[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1595-1605.
- [21] 陈卫营, 薛国强. 接地导线源电磁场全域有效趋肤深度[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2314-2320.
- [22] 智庆全. MTEM 波场变换与偏移成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [23] 张莹莹, 李貅, 姚伟华, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2745-2758.
- [24] 陈卫营, 薛国强. 接地导线源电磁场全域有效趋肤深度[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2314-2320.