

doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2010.03.016

磁激电方法技术试验研究

李建华 林品荣 郭 鹏

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所 廊坊 065000)

摘 要 激电法是矿产勘查的主要方法技术,其中应用最多的是电激电法,但电激电法在接地条件困难区(倒石堆、沙漠、戈壁、永久冻土)难以发挥效果,为了发展不接地的磁激电技术,在对磁激电法的基本原理、方法技术、数据处理等方面进行研究的基础上,开展了磁激电法与电激电法的对比试验,并对试验结果进行了分析。

关键词 磁激电法 电激电法 试验对比 激电异常

中图分类号: P318.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2010)03-0492-08

0 引言

磁激电法(MIP)属于测磁场的激发极化法,是在一般电法中将测量地面上2接收电极(M/N)间的总场电位与二次场电位差($\Delta U/\Delta U_2$)改成逐点观测一次磁场与二次电流磁场(H/H_2)的一类找矿方法(Seigel,1974;傅良魁,1984)。正是由于MIP与电激电法(EIP)存在着测磁场与测电场的区别,使该法与一般电激电法相比,具有探测深度大,分辨率高,能克服良导覆盖层的影响,较少受高、低阻中间屏蔽层的影响,以及测量不需接地等优点,有可能发展成为一种深部找矿技术,并可能在一些电激电法工作困难的地区,如低阻覆盖区、戈壁、沙漠地带、基岩出露地区得到应用。由于磁激电勘探中,二次极化电流产生的磁异常相当微弱,对仪器精度要求很高,国内外关于该法的研究主要停留在20世纪70-80年代,近年来一些专家及学者也对磁激电法进行了正演与反演理论研究(Chen,2003;邓靖武,2005),但对于方法技术的试验应用研究并不多。

为了试验磁激电方法技术获取地下极化体激电异常的能力,我们在内蒙古某矿区开展了磁激电法与电激电法的剖面性对比试验工作,结果表明,MIP与EIP 2种方法在同一测区获取的异常具有较好的一致性,这为磁激电法的进一步研究提供了依据。

1 方法原理

磁激电法是通过人工供电流(直流或交流)于地下,观测介质中一次电流(供电电流)与二次电流(当介质被极化时,原本呈电中性的粒子的正负电荷被拉开,在拉开的过程中正负电荷产生位移电流)产生的磁场,而获得地下激发极化信息的一种方法。

在供电电流的作用下,若地下存在着导电性不均匀的岩、矿石时,流经岩、矿石的电流的正

(收稿日期) 2010-01-21 收稿 2010-08-27 改回。

(基金项目) 中国地质调查局科技项目(1212010818092)资助。

常分布状态遭到破坏,使电流密度分布不一致,在导电性较好的岩、矿石内使电流集中,相应的磁场强度增高;反之,磁场强度减弱,在地表就可观测到明显的磁电阻率异常,即通过观测介质中一次电流的磁场而研究地下导电率的变化。当地下存在着可极化物体时,则会使其极化,产生二次电流,在地表测量其感应的二次磁场,就可发现极化矿体的存在,即测量介质中二次电流所形成的磁场。前者用于发现由岩、矿石导电率的差异而引起的异常;后者用于发现由岩、矿石电化学特性的差异引起的异常(卢宝恒等,1979)。

2 方法技术

2.1 磁激电法野外测量技术

野外试验中,磁激电法通常将供电电缆铺成“U”形,因此常将这种装置称为半方框供电装置和梯度排列测量(Howland-Rose *et al.*, 1980b),其布署见图1,半方框范围为 L (长) $\times L/2$ (宽)。供电电极距 L ($L=AB$) 的选择,视探测对象和工作任务而定。供电电极 A 、 B 沿推测矿体或构造走向布置,测线垂直于 AB 连线,在框内布置数条,线长的选择应以供电电缆的干扰最小为原则,同时供电线应尽可能与测线保持在同一平面内,以减小供电电缆中电流产生的磁场的影响。测量工作沿测线进行,磁传感器布设方向与测线一致,且水平置于地面。发射电极 A 、 B 接地;接收装置无需接地,属于点测。

2.2 磁激电法的数据处理方法

在半方框形供电装置中,地面上测区内任意点处的磁场,是由线电流(供电线中的 I) 和体电流(由供电电极进入地下的呈空间分布的电流) 2 部分组成。为了计算和表示组合磁场的大小,我们取 AB 中点为坐标原点,地面上 X 轴和 Y 轴的方向如图1所示, Z 轴方向垂直地面向下(Howland-Rose *et al.*, 1980a)。

由电流磁场理论可知,在横向均匀的介质条件下,当地表水平时,由供电电极 A 、 B 进入地中的电流在 P 点产生的磁场只有水平分量,而由供电线中的电流在测线上 P 点产生的磁场只有垂直分量。如令 $AB=2l$,采用图1所示的坐标系,可

列出 A 、 B 供电时,在地表沿 X 轴方向的 P 点处入地电流和线电流共同产生的正常磁场的分布公式(傅良魁,1984):

$$H_a = 100I \left[\frac{y+l}{x^2 + (y+l)^2} - \frac{y-l}{x^2 + (y-l)^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中: H_a 为地面沿 X 轴方向任意点处的磁场强度(nT); I 为供电电流强度(A); l ($l=L/2$) 为半电极距(m); x 、 y 为 XY 平面坐标系中任意点的坐标。

令式(1)中 $x=0$, $y=0$, 则可得到中心点 O 处的磁场 $H_a(0,0)$:

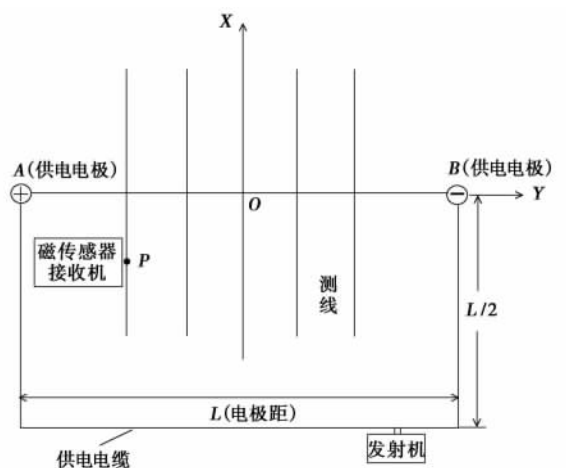


图1 MIP 供电装置与梯度排列测量

Fig. 1 The power supplied device and gradient configuration in MIP.

$$H_a(0, \rho) = \frac{200I}{l} \quad (2)$$

在工作中常以 $H_a(0, \rho)$ 值的大小为标准来衡量异常值的大小。

根据式 (1) 可绘出地面 X 方向的正常磁场分布图 (图2)。图中各等值线上所标的数值就是该测点处 H_a 相对于 $H_a(0, \rho)$ 的百分数。

测得任意点实际的观测磁场强度 H_p 后, 计算 H_p 与 H_a 的差相对于 $H_a(0, \rho)$ 的比值, 即可得到磁电阻率 MMR , 以百分数表示。

$$MMR = \frac{H_p - H_a}{H_a(0, \rho)} \times 100\% \quad (3)$$

当使用高频 f_1 供电时, 极化作用较弱, 沿 X 方向的磁场剖面曲线主要反映矿体的导电作用; 用低频 f_2 测量时, 由于极化作用的增加, 并且二次极化电流产生的磁场与导电性矿体一次异常电流的磁场方向相反, 起抵消作用, 所以低频总磁场强度振幅 H_{f2} 剖面曲线的极值会比高频总磁场强度振幅 H_{f1} 的小些, 但二者在矿体上均有最大值。所以即使使用低频率工作, 磁异常仍以导电性作用为主 (傅良魁, 1984)。测得 H_{f1} , H_{f2} , 计算磁分散率 PFE 为

$$PFE = \frac{H_{f1} - H_{f2}}{H_{f1}} \times 100\% \quad (4)$$

对时间序列信号 $h(n)$ 进行傅里叶变换, 得到 $H(e^{j\varphi})$, 进而计算出相位。具体计算公式为

$$H(e^{j\varphi}) = \sum_{n=1}^{\infty} h(n) e^{-j\varphi n} = \text{Re}[H(e^{j\varphi})] + j\text{Im}[H(e^{j\varphi})] \quad (5)$$

$$\text{phase} = \arctg \frac{\text{Im}[H(e^{j\varphi})]}{\text{Re}[H(e^{j\varphi})]} \quad (6)$$

式 (6) 中, $\text{Re}[H(e^{j\varphi})]$ 、 $\text{Im}[H(e^{j\varphi})]$ 分别表示 $H(e^{j\varphi})$ 的实部与虚部。

2.3 电激电法数据处理方法

本文主要介绍时域电激电法的基本解释参数 (李金铭, 2007)。

将时间域总场电位的充电过程 $\Delta U(T)$ 对供电电流 I 作归一化, 计算出与电流大小无关的视电阻率:

$$\rho_a(T) = K \frac{\Delta U(T)}{I} \quad (7)$$

式 (7) 中 K 为装置系数。

时域激电法中, 岩矿石的极化率 (η_s) 是充电时间 (T) 与放电取样时间 (t) 的函数:

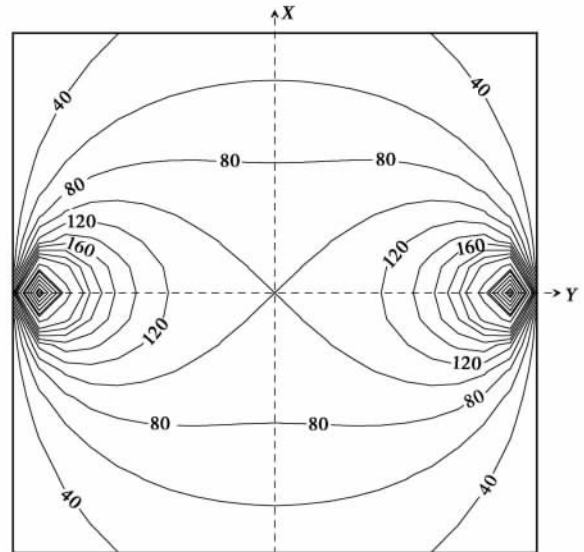


图2 AB 供电时沿 X 轴方向的正常磁场分布图

Fig. 2 Normal magnetic field distribution map of the X -axis.

$$\eta_s = \frac{\Delta U_2(t)}{\Delta U(T)} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中 $\Delta U(T)$ 为供电时间 T 的总场电位, $\Delta U_2(t)$ 为断电后 t 的二次场电位差。极化率是用百分数表示的无量纲数。

2.4 若干问题的讨论

2.4.1 磁激电异常规律研究

磁激电法变革了传统接地测电场的电激电观测方式,改为不接地的磁场测量模式,其电流磁场的空间分布与接地类电法的电场空间分布不尽相同(傅良魁,1979),有必要通过理论推导与正演计算,研究一次电流磁场和二次极化电流磁场的空间分布,以便深入了解磁激电异常的规律。

2.4.2 地形影响问题

地形影响是物探工作中经常遇到且颇为棘手的问题。地形对 MIP 测量结果的影响主要有 2 方面:一是纯地形也会产生式(5)所定义的 MMR 异常,二是由于地形起伏造成的电缆电流的磁场。

山脊聚集电流,磁场较水平地形正常场大,出现正的 MMR 异常;而山谷的情况刚好相反,出现负的 MMR 异常。可见,即使地下没有异常体,由于地形的影响也能产生 MMR 假异常(杨建文等,1991)。在地表水平的条件下,当观测磁场的水平分量时,可以不计电缆电流磁场的影响;而在起伏地形的条件下,由于供电电缆是随着地形的起伏而起伏的,因此,无论观测磁场的哪个分量,电缆电流磁场的影响总会叠加到观测结果中去,歪曲甚至掩盖矿体的异常。为压制其影响,可将起伏地形下的供电电缆简化成起伏变化不大的若干小段,由毕奥-沙伐尔定律计算叠加,从而在数据处理中扣除因地形起伏供电电缆所产生的磁场影响。在梯度排列装置中,可求得空间任意一点 $P(x, y, z)$ 处沿 X 轴方向的电缆电流磁场为(杨建文等,1991)

$$H_x(x, y, z) = \frac{100Iz}{z^2 + (x-l)^2} \left[\frac{l-y}{\sqrt{z^2 + (l-x)^2 + (l-y)^2}} + \frac{l+y}{\sqrt{z^2 + (l-x)^2 + (l+y)^2}} \right] \quad (9)$$

2.4.3 天然电磁场的干扰

自然界存在有较强的天然电磁场信号,大地电磁中的信号在磁激电中已成为干扰磁场,使得磁激电法测量变得困难。在 MIP 中,二次场信号弱小,一般只有几十 pT。而随机的天然磁场信号在 10 ~ 1/10 Hz 段,也基本上能达到数十个 pT,且频率越低,信号越强。因此,需要通过大量的野外试验,探索压制天然磁场干扰的方法技术,以提高磁激电测量的观测精度。

2.4.4 盖层问题

在常规电法工作中,盖层影响是一个不可忽视的问题,有时甚至使电法工作无法开展(王飞等,1994)。地表良导层对一般电法的影响主要表现在 2 个方面:一是由于低阻覆盖层的存在使供电装置近似于“短路”状态,因而使得供电电流“浮于表面”而无法深入地下对预测地质体形成足够的激发源来形成较大的异常电流;二是已经减少了的异常电流通过低阻覆盖层在地表产生的电场将再一次在低阻覆盖层中得以衰减。由于磁场通过低阻介质时不受其衰减作用的影响,因而第 2 个方面不构成对 MIP 方法的影响。磁激电法较一般电激电法具有克服低阻覆盖层影响的能力,这对在低阻覆盖区用磁激电法进行实际找矿是有利的。此外,高阻覆盖层对矿体磁激电异常影响的趋势是不同的,其影响是使矿体的磁激电异常增大,有利于发现矿体。

2.4.5 磁激电法相对于电激电法的弱势

磁激电法不能获得岩矿或大地的导电性参数(ρ_a) ,而且在一般条件下 ,也不能获得有关大地和矿体的极化率参数(η_s) 的具体数值。通常只能在相对异常的背景上 ,沿水平方向反映地质目标的存在。另外 ,对于相同极化条件的异常地质体而言 ,磁激电场的相对异常及绝对异常都是相当小的。必须使用较一般电法更精确的仪器和配备足够灵敏的接收装置 ,才能够较顺利、可靠地测得磁激电异常场(傅良魁,1984)。

3 对比试验

磁激电法野外试验中 ,供电电缆铺设成半方框形 ,供电极距 $AB = 1\ 200\text{m}$,线距 200m ,点距 20m ,工作频率为 2.5Hz 、 1.25Hz 、 0.625Hz ,供电电流为 9.5A 。仪器采用阵列电磁接收系统与大功率发射机(林品荣,2006) ,发射机的供电电源为 50kW 发电机 ,接收磁传感器为低频感应探头。电激电法采用中间梯度装置 ,供电极距 $AB = 3\ 000\text{m}$, $MN = 40\text{m}$,供电周期为 16s ,延时为 100ms ,采样宽度为 40ms ,供电电流 20A ,观测段限在 $\%AB$ 范围内。

通过对试验数据的处理 ,获取了同剖面观测的磁激电法的磁电阻率、磁频散率与视相位剖面曲线 ,以及电激电的视电阻率、视极化率数据。图 3 为 2 种方法 5 种数据的同剖面对比图 ,图 4 为某测线不同供电频率下所获得的磁电阻率剖面曲线对比。由图 3 可以看出 ,磁激电的磁电阻率曲线与电激电的视电阻率曲线 ,磁激电的磁频散率、视相位曲线与电激电的视极化率曲线均具有良好的可比性。图 4 显示 ,用 2.5Hz 的频率测量时 ,磁电阻率最大相对异常达 49% ;用 1.25Hz 频率测量时 ,最大相对异常达 50% ;用 0.625Hz 频率测量时 ,最大相对异常达 51% 。可见 3 种不同的频率供电时 ,所获得的 MMR 异常值接近 ,并且获得最大异常值所对应的测点一致。所以对于获取磁电阻率参数而言 ,只用一种频率即可。

4 结论

通过对比试验研究 ,表明磁激电法可以获取与常规电激电法一致的激电信息 ,并总结得出如下几点结论:

(1) 磁激电法和电激电法的物理、化学基础基本相同 ,都是利用岩、矿石之间的电化学反应和导电性作用的差异作为解决地质问题的前提 ,它们的地质目标是一致的。

(2) MIP 与 EIP 的基本原理是一致的 ,只是存在着测磁场与测电场的区别。

(3) 由于磁场可以穿越空间介质 ,因此电流源和测点之间的高阻层或低阻层都不会对异常电流的磁场产生屏蔽。同时在 MIP 法勘探中 ,随着深度的增加 ,磁场强度的衰减相对比电场慢 ,这给磁激电勘探发现更深层的异常体提供了可能。

(4) 由于 MIP 测量装置不需要接地 ,因此 MIP 法在接地困难地区(倒石堆、沙漠、戈壁、永久冻土)的应用具有优势。

(5) MIP 法勘探中 ,由于观测的磁场信号弱 ,干扰因素多 ,这就要求在实际工作中 ,除使用高灵敏度的磁传感器、接收机外 ,还应注意环境电磁干扰以及天然变化磁场的影响。

(6) 与 EIP 法相比 ,MIP 法是一种相对较新的方法 ,其理论、方法以及应用都还不成熟 ,有待进一步的深入研究。

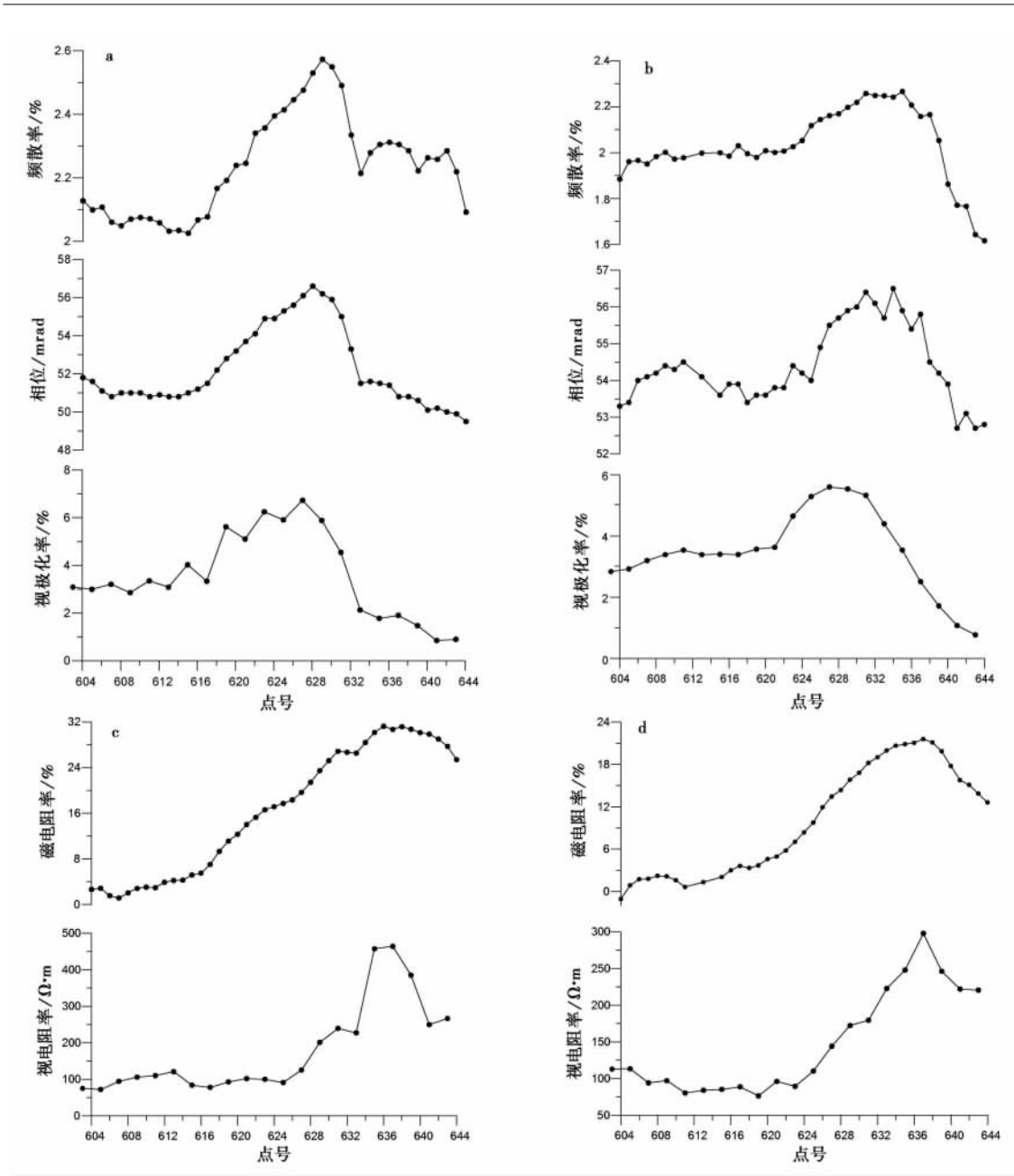


图3 MIP与EIP试验结果对比

Fig. 3 The comparison profiles of MIP and EIP.

a 124 线 MIP 磁频散率、相位与 EIP 视极化率对比; b 126 线 MIP 磁频散率、相位与 EIP 视极化率对比;
c 124 线 MIP 磁电阻率与 EIP 视电阻率对比; d 126 线 MIP 磁电阻率与 EIP 视电阻率对比

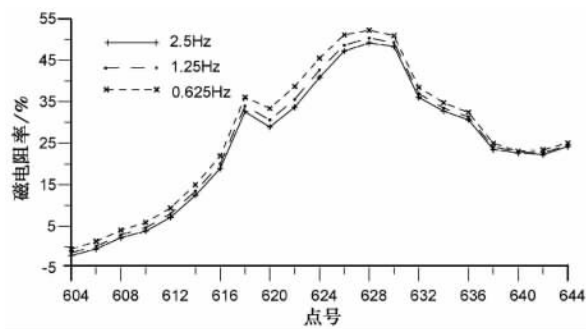


图4 不同频率供电所获得的磁电阻率对比曲线

Fig. 4 The comparison profiles of MMR at different frequencies.

参 考 文 献

- 邓靖武. 2005. 磁电法正演理论研究 [D]: [学位论文]. 北京: 中国地质大学.
- DENG Jing-wu. 2005. Theory of Forward Modeling and Inversion in MIP [D]. Doctoral Dissertation. China University of Geosciences, Beijing(in Chinese) .
- 傅良魁. 1984. 磁电勘探法原理 [M]. 北京: 地质出版社.
- FU Liang-kui. 1984. Magneto-electric Prospecting Theory [M]. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese) .
- 傅良魁. 1979. 磁激发极化法探矿理论的几个问题 [J]. 地球物理学报, 22(2): 156—168.
- FU Liang-kui. 1979. The several issues of magnetic induced polarization prospecting method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 22(2): 156—168(in Chinese) .
- 励宝恒, 王式铭. 1979. 磁激发极化法 [J]. 物探与化探, 4(4): 32—38.
- LI Bao-heng, WANG Shi-ming. 1979. Magnetic induced polarization method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 4(4): 32—38(in Chinese) .
- 李金铭. 2007. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- LI Jin-ming. 2007. Electric Field and Electrical Exploration [M]. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese) .
- 林品荣. 2006. 电磁法综合探测系统研究 [J]. 地质学报, 80(10): 1539—1548.
- LIN Pin-rong. 2006. General electromagnetic detection system studies [J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1539—1548(in Chinese) .
- 王飞, 杨贤进. 1994. 大地磁电阻率法: 一种新的地球物理方法 [J]. 铀矿地质, 10(5): 302—307.
- WANG Fei, YANG Xian-jin. 1994. Telluric magnetometric resistivity method: A new geophysical exploration method [J]. Uranium Geology, 10(5): 302—307(in Chinese) .
- 杨建文, 任怀宗, 雷林源. 1991. 起伏地形条件下磁电阻率法的资料处理方法 [J]. 中南矿冶学院学报(自然科学版), 22(1): 1—8.
- YANG Jian-wen, REN Huai-zhong, LEI Lin-yuan. 1991. Data processing methods of magnetometric resistivity under the condition of undulating topography [J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 22(1): 1—8(in Chinese) .
- Chen J. 2003. 3-D inversion of magnetic induced polarization data [A]. In: Macnae J *et al*(eds) . Proceedings of the 3D EM-3 Symposium. Adelaide. 1—12.

- Howland-Rose A W , Linford G , Pitcher D H *et al.* 1980a. Some recent magnetic induced polarization developments-Part 1: Theory [J]. *Geophysics* 45: 37—54.
- Howland-Rose A W , Linford G , Pitcher D H *et al.* 1980b. Some recent magnetic induced polarization developments-Part 2: Survey results [J]. *Geophysics* 45: 55—75.
- Seigel H O. 1974. The magnetic induced polarization method [J]. *Geophysics* 39: 321—339.

A TRIAL STUDY OF MAGNETIC INDUCED POLARIZATION

LI Jian-hua LIN Pin-rong GUO Peng

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Langfang 065000 ,China*)

Abstract

Magnetic Induced Polarization(MIP) is one kind of electrical conductivity methods ,which measures magnetic field point by point rather than measuring the electric field difference between two electrodes in Electric Induced Polarization(EIP) . Compared to EIP ,MIP surveys have certain merits ,such as: bigger detection depth ,higher resolution ,capable to provide useful information through highly conductive overburden and high-resistance or low-resistance cover ,no need for grounding and etc. It will be a deep exploration technology and applied to areas such as low-resistance overburden ,Gobi desert , bedrocks which have been a major impediment to EIP surveys.

In order to test the ability of obtaining IP anomaly in MIP surveys ,we carried out a trial comparative study between MIP and EIP(Time-domain IP method and multi-frequency phase IP method included) in a mining area in China. Test results show that there is a good consistency in the IP anomaly about the two detection methods measured in the same survey lines and it will provide a basis for the further studies of MIP.

In the paper the basic principles ,techniques ,and data processing of this method(MIP) are discussed ,and the results between Magnetic Induced Polarization and Electric Induced Polarization are analyzed.

Key words Magnetic Induced Polarization(MIP) ,Electric Induced Polarization(EIP) , experimental contrast ,anomaly of induced polarization

(作者简介) 李建华 ,女 ,1980 年生 ,2008 年毕业于桂林工学院 ,获硕士学位 ,助理工程师 ,主要从事电磁方法技术研究 ,电话: 13473609621 ,E-mail: lijianhua@igge. cn.