

金属矿物探新方法与新技术

齐文秀, 刘 涛

(北京矿产地质研究院, 北京 100012)

[摘 要] 简要概述金属矿物探新方法、新技术。主要包括: (1) 地面高精度重力勘查技术; (2) 地面高精度磁测技术; (3) 瞬变电磁法勘查技术; (4) 可控源音频大地电磁法; (5) 三频激电法; (6) 井中声波透视; (7) 地下电磁波法等。

[关键词] 金属矿物探 新方法 新技术

[中图分类号] P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2005)06-0062-05

0 引言

20 世纪 80 年代, 随着改革开放的不断深入, 我国地质找矿进入了一个新的发展阶段, 金属矿物探迎来了新的发展机遇; 同时也面临新的挑战。为了适应社会主义地质矿产市场的需要, 必须大力发展物探新方法、新技术。

1 地面高精度重力勘查技术^[9]

重力勘查技术的发展已有几十年的历史, 是物探的一种传统方法; 在 20 世纪 80 年代以前, 称为第一代重力勘查, 重力仪的观测精度为中、低精度(毫伽级)。在 20 世纪 80 年代开始, 进入第二代重力勘查。重力观测仪器的高科技含量增加, 采用了 GPS 三维定位技术, 解决了中高山区、戈壁等地区的定位问题。可直接测出重力差值, 具有自动读数、自动记录、自动改正等自动化功能。观测精度和分辨率大大提高, 由毫伽级(mGal)提高到了微伽级(μGal)。与传统的重力勘查技术相比较, 是一种全新的技术。

常用的有代表性的地面高精度重力仪有: 美国的 LCR-G 型(大地测量型)自动重力仪, 分辨率为 10μGal; LCR-D 型(勘探型)重力仪, 分辨率为 5μGal。加拿大的 CG-3 型自动重力仪, 分辨率为 5μGal; CG-3M 型自动重力仪, 分辨率为 1μGal。加拿大 CG-3 型和美国 LCR 型高精度重力仪, 处于世界领先水平。

目前, 在重力数据处理和异常定量解释方面, 由

传统的方法发展了变密度地形改正, 小波变换分解重力场, 弱异常增强与提取和图像处理等新方法、新技术。国内外已有成熟的二维、三维正、反演方法和计算机程序。例如, 中国地质大学(北京)研究的 2.5D 剖面位场可视化正演拟合软件; 中国地质科学院物探化探研究所研制的 2.5D 组合模型模拟 3D 反演以及美国的 GRAV-MODELER 2D 重力反演软件等。^[9,2,10.]

2 地面高精度磁法勘查技术^[3,17]

磁法是物探方法中应用最早、理论最成熟、效率最高、成本最低的方法之一, 也是目前在矿产勘查中应用最多的一种方法, 是一项基础性的地球物理勘查工作。从 20 世纪 80 年代以后, 磁力勘查进入了高精度磁法勘查技术的新阶段。

从建国以后, 我国的金属矿磁法勘查工作, 大致经历了起步、发展、提高 3 个发展阶段。各个阶段, 在理论、方法技术和地质找矿方面都取得了重要的进展和显著的成绩。20 世纪 50 年代初期为起步阶段; 引进国外的仪器, 属于中、低精度的磁力仪, 如悬丝式磁力仪, 刃口式磁力仪。20 世纪 50 年代末-70 年代末为发展阶段; 我国自行开发研制了悬丝式磁力仪, 饱和式磁力仪, 单分量磁测井仪, 三分量磁测井仪等中低精度的仪器。在磁测解释方法技术方面, 总结了我国斜磁化条件下磁异常解释的理论和半定量、定量解释方法; 注意低缓磁异常, 复杂磁异常和剩余磁异常的研究; 但是, 多以手工计算为主。

[收稿日期] 2005-07-05; **[修订日期]** 2005-08-20; **[责任编辑]** 曲丽莉。

[第一作者简介] 齐文秀(1936 年-), 男, 1963 年毕业于原北京地质学院, 教授级高工, 主要从事物探工作。

20世纪80年代以后为提高阶段:引进了美国 Geometrics 公司的 G-856、加拿大 Scintrex 公司的 MP-4 高精度质子磁力仪;仪器灵敏度为 0.1nT。中国地质调查局航空物探遥感中心研制并生产了 HC-95 型地面氦光泵磁力仪,分辨率为 0.05nT。

在磁测解释理论与方法技术方面,研究了一系列的新方法和新技术。例如:“磁性界面与磁性层磁场的正演方法和磁性界面的反演技术”、“关于用有限元法作磁法勘探正演计算的理论问题”和“解复杂条件下磁法正演问题的有限元-边界元法”、“三维磁异常自动解释法”、“磁异常曲面延拓方法”、“拟神经网络三维反演方法”、采用三层 BP 网络和变步长反馈技术实现快速反演;开发了“多种滤波及人机联作正反演和图像处理系统”以及“划分不同深度的区域磁场与局部磁异常的插值切割法”等。实现了金属矿地面磁法勘查方法技术的三个转化;^[17,6,3]

1) 由中、低精度向高精度转化(磁测精度由中、低精度的 10~15nT 提高到 0.5~5nT;分辨率由 1~2nT 提高到 0.1nT),有效信息量提高了近 10 倍;使得弱异常的可信度大大提高,使解决地质问题的能力明显增强。

由中、低精度仪器的人工记录变成高精度磁力仪器的自动记录,测点的观测时间由原来的几分钟提高到 1~2 秒钟,工作效率大大提高。

2) 由二维正、反演向三维正、反演转化;中国地质调查局发展研究中心开发研制的 2.5D 剖面重、磁可视化联合模拟反演软件;中国地质科学院物探化探研究所开发研制的 2.5D 组合模型模拟 3D 反演软件;美国研制的 GM-SYS 剖面重、磁反演系统,使定量计算结果的质量大大提高。

3) 由手工计算向计算机自动解释转化,不但提高了工作效率;而且,使过去手工无法实现的计算得以完成。

3 地面瞬变电磁法勘查技术

时间域电磁法(Time domain electromagnetic methods),又称瞬变电磁法(Transient electromagnetic methods)简称 TEM。

3.1 方法原理^[5,15]

所谓时间域电磁法,就是研究电磁场响应随时间的变化。它是利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲电磁场,如果地下有良导电矿体存在,在一次电磁场的激励下,地下导体内部受感应产生

涡旋电流(简称涡流)。矿体内的涡流在一次脉冲电磁场的间歇期间在空间产生交变磁场,叫做二次场或异常场。涡流产生的二次磁场不会随一次场消失而立即消失,即有一个瞬变过程,利用接收机观测二次磁场,研究其与时间的关系,从而确定地下导体的电性分布结构及空间形态。

3.2 瞬变电磁法的特点

1) 在低阻覆盖情况下与其他电法相比,勘查深度大;

2) 观测二次场(纯异常),可进行近场观测,旁侧影响小;

3) 在高阻围岩地区不会产生地形起伏形成的假异常,在低阻围岩地区,采用全时间衰减域观测,容易区分地形异常;

4) 通过不同时间窗口的观测,可抑制地质噪声干扰;

5) 具有测深能力。

由于,瞬变电磁法具有上述优点,20世纪90年代以来,得到了广泛的应用,并取得了较好的地质效果。

3.3 常用的装置

目前,在实际生产工作中,常用的装置有:定源大回线装置、重叠回线装置和中心回线装置。国外多采用定源大回线装置,如美国 EMP、加拿大 EM-37、67、澳大利亚 SIROTEM-II SM 等仪器主要适用于定源大回线装置。这种装置使用发送回线边长一般为几百米的矩形框或方形框。加拿大 Geonics 公司的大功率 EM-67 系统(发送功率为 4500W),最大发送电流为 25A,同步方式为高精度石英晶体同步和电缆方式同步,观测 dB/dt 3 个分量。定源回线装置,对于同一个发送回线框各个观测点反映的异常源是不变的,观测的重直分量和水平分量异常的形态简单、直观、便于解释;而重叠回线装置则不同,不同观测点的发送回线框的位置是移动的,出现“双峰”异常,致使观测异常比较复杂。

3.4 瞬变电磁法异常的解释软件

异常的解释是体现方法有效性和能否取得地质效果的重要技术环节。目前,有关瞬变电磁法异常的解释,特别是二、三维反演方法的应用,仍是一个薄弱的环节。据有关资料介绍,国内中国地质科学院物探化探研究所开发研制了磁性源 TEM 应用软件、TEM 2D 偏移成像软件;长春科技大学开发研制了电性源 TEM 应用软件;中国地质大学(武汉)研制开发了 TEM 任意波形一维反演程序;中石化勘探

开发院研制开发了 TEM 一维连续介质反演程序和 TEM 2D 拟波场变换偏移成像软件以及美国的瞬变电磁法 TEMIX 软件和加拿大的 EMIGMA/V7.5 软件系统等。

3.5 瞬变电磁法的仪器

1) 连续脉冲瞬变电磁仪代表性的仪器有:加拿大 Geonics 公司的 EM-67,37,42,47,57;加拿大 Crone 公司 PEM 系统;澳大利亚的 SIROTEM 系统。国产的连续脉冲瞬变电磁仪有:中国地质科学院物探化探研究所研制的 WDC 系列;中南大学研制的 SD 系列等。

2) 单脉冲瞬变电磁仪主要有:西安物探研究所研制的 EMRS-2 型和北京矿产地质研究院研制的 TEMS-3S 型。

3) 加拿大 Phoenix 公司 V-6 系统(FasTEM、MulTEM)和美国 Zonge 公司 GDP-32(NanoTEM、ZeroTEM),也开发了 TEM 的功能。

4 可控源音频大地电磁法^[4]

4.1 方法原理

可控源音频大地电磁法(Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics),简称 CSAMT 法。CSAMT 法是一种人工场源频率域电磁测深方法,属于主动源频率域电磁法。所谓频率域就是研究电磁场响应随频率的变化。其工作方法是向地下发送不同频率的电磁波,供电电流可达 30A,在测线上每个测点观测电场分量 E_x ,磁场分量 H_y ;根据公式: $\rho_s = 1/5f * |E_x|^2 / |H_y|^2 (\Omega \cdot m)$,计算出视电阻率。当从高到低改变频率,每个频率计算出一个视电阻率,由于随着频率的降低所反应的深度增大,这样不断改变频率就可以测出不同深度的电阻率值,得到视电阻率测深曲线。

4.2 方法的主要特点

1) 探测深度大,可用下面公式: $H = 356 \sqrt{\rho_s / f}$ 估计探测深度,由公式可以看出,探测深度(H)与视电阻率(ρ_s)的平方根成正比,与频率(f)的平方根成反比,所以在频率一定的情况下,探测深度的大小取决于电阻率的大小。在目前所用的频率范围(0.125-4096Hz)及 30kW 发送功率,其探测深度的范围为几十米至两千米左右;

2) 与直流电测深相比,它的分辨率高;

3) 由于 CSAMT 法采用人工场源激励,与天然场源相比产生了一系列的影响因素;如,场源附加效应、近区效应、静态效应等;强化了异常的复杂性,增

加了异常解释的难度。

4.3 CSAMT 法的应用

根据得到的视电阻率测深曲线(地-电断面),可确定高阻基底面的起伏,沉积岩系分层,识别断层及圈定局部构造等;在地电条件有利的情况下,也可以直接寻找良导矿体。

4.4 代表性的仪器

美国 Zonge 公司的 GDP-16、32 和加拿大 Phoenix 公司的 V-5、6、8 等。

5 大地电磁法(MT)^[16,2,1]

5.1 方法原理

大地电磁法(Magnetotellurics)是以天然电磁场为场源的频率域电磁勘查方法,属于被动源电磁法。

大地电磁场可近似地看成是重直入射地面的电磁波。当电磁波在地下传播时,由于电磁感应作用,不同频率(频率范围为 $10^2 \text{Hz} \sim 10^{-4} \text{Hz}$)的电磁场具有不同的穿透深度,通过研究大地对天然电磁场的频率响应,可以获得不同深度电阻率的分布,根据电性分布的特点,来解决地质问题。

5.2 方法的特点与应用

该方法①具有较大的勘测深度,②不受高阻层屏蔽,③对低阻层有较高的分辨能力,④工作效率不高(一个测点要连续观测 5~6h)。

5.3 代表性的仪器

美国 EMI 公司的大地电磁仪 MT-1 型;系统有 10 个通道,工作频率 $<0.0001 \text{Hz}$,分辨率 0.1%(振幅),0.2(相位);美国 Zonge 公司的 GDP 系列以及加拿大 Phoenix 公司的 V 系列等都具有 MT 的测量功能。国内中国地质科学院物探化探研究所研制的电磁阵列剖面法(EMAP)的 14 道 MT 仪。

5.4 大地电磁法的应用^[16]

主要用于研究深部地质构造,普查油(气)田和地热资源调查等。据统计用于石油天然气普查的工作量占 90% 以上,少数用于深部构造研究和地热田的勘探。

6 音频大地电磁法^[1]

音频大地电磁法(Audio-frequency Magnetotellurics),简称 AMT。是利用天然音频大地电磁场作为场源(频率范围为 $5 \text{Hz} \sim 10^4 \text{Hz}$),属于被动源电磁法。观测电场和磁场分量,主要解决地质构造等问题。

该方法具有设备轻便的优点,其最大的弱点是

天然音频电磁场的信号太弱,它只有在干扰小的情况下才能取得好结果。

加拿大 Phoenix 公司的 V5、6、V52000 系列,美国 Zonge 公司的 GDP 系列,都具有 AMT 的测量功能。

7 EH-4 电导率成像方法

EH-4 电导率成像系统是由美国 Geometrics 公司和 EMI 公司联合生产的。该系统属于部分可控源(主动源)与天然场源(被动源)相结合(称为:混合源)的一种频率域电磁测深系统。其核心是被动源电磁法;主动源部分探测深度很浅。观测参数为电场分量(E_x 、 E_y)和磁场分量(H_x 、 H_y),通过计算得到视电阻率值。由于主要是被动源,易受外界干扰。从初步使用情况来看,在寻找金属矿方面还需进一步的研究。

8 频谱激电法(SIP)

频谱激电法(Spectral induced polarization)是一种新的激电方法。在超低频段作多频视复电阻率测量,通过研究复电阻率的谱特性,解决地质问题。

频谱激电法能提供更丰富的信息,但由于设备昂贵,生产效率低,成本高,尚未得到广泛的应用。

主要仪器有,美国 Zonge 公司 GDP-16/32;加拿大 Phoenix 公司 V-5、6、8,IPS-3 型频谱激电仪等;

9 三频激电法区分异常源性质

激电异常性质的区分是电法找矿中一项十分重要的工作,也是一项难度极大的研究课题。中南大学张友山教授经过多年的努力,研制成功区分激电异常性质的三频激电精密相干检测仪,并进行了野外示范研究工作,在激电异常性质区分方面取得了可喜的进展。三频激电精密相干检测系统,由发送机和接收机组成。工作时,发送机向地下发送三频复合波信号。接收机接收地下的复合波信号,通过精密相干检测的方法,将复合波信号中的3个主频的虚实分量检测出来。由低到高3个主频的虚实分量分别是 $\text{Re}V_L$ 、 $\text{Im}V_L$ 、 $\text{Re}V_M$ 、 $\text{Im}V_M$ 、 $\text{Re}V_H$ 和 $\text{Im}V_H$,由此可以计算出百分频率效应 PFE 和相对相位差 $\Delta\varphi_{M-L}$ 和 $\Delta\varphi_{H-M}$ 。一般采用的复合波信号的3个主频为 0.25Hz、1 Hz 和 4 Hz,这几个频率属于超低频范围,处在这3个频率范围内的异常源的激电效应强,易于观测。 $\Delta\varphi_{M-L}$ 反映这段频率范围的低频段

的相位变化特征, $\Delta\varphi_{H-M}$ 反映这段频率范围的高频段的相位变化特征,而 $\Delta\varphi_{M-L}$ 和 $\Delta\varphi_{H-M}$ 的变化规律反映了与异常源的相对应的 cole-cole 模型中的特征频率位置(与时间常数 τ 有关)和频率相关系数 c 的变化规律。通过这两个差分相位的变化特征可推断异常源的性质。即异常源的性质与 $\Delta\varphi_{M-L}$ 和 $\Delta\varphi_{H-M}$ 两个差分相位变化特征相对应。中南大学张友山教授初步建立的区分模型为^①:

1) 当 $\Delta\varphi_{M-L}$ 幅值与 $\Delta\varphi_{H-M}$ 幅值相当且同步起伏时为炭质岩层的异常特征;

2) 当 $\Delta\varphi_{M-L} > 0$ 且 $\Delta\varphi_{H-M} < 0$ 时为炭质岩层中赋存有硫化矿的异常特征;

3) 当 $\Delta\varphi_{M-L} > \Delta\varphi_{H-M} > 0$ 时为浸染型硫化矿的异常特征;

4) 当 $\Delta\varphi_{H-M} < 0$ 与 $\Delta\varphi_{H-M} < \Delta\varphi_{M-L}$ 时为块状硫化矿的异常特征;

5) 当 $\Delta\varphi_{H-M} > 0$ 与 $\Delta\varphi_{M-L} < 0$ 含水地层的异常特征;

6) 当 $\Delta\varphi_{H-M} < 0$ 与 $\Delta\varphi_{M-L} < 0$ 且 $\Delta\varphi_{H-M} \approx \Delta\varphi_{M-L}$ 与 $\Delta\varphi_{H-M} > \Delta\varphi_{M-L}$ 时为含水溶洞或富水层的异常特征。

根据上述区分模型,对获得的相对相位异常进行分析判断,做出区分异常性质的结论。

10 井中声波透视法^[7]

井中声波透视是在一个钻孔中激发弹性波,在另一个钻孔中接收,采用层析成像(CT)原理,对接收信号的波特征参数进行成像处理,圈定目标体的空间位置和形态,是一种寻找孔间盲矿和构造裂隙带的新方法、新技术。

主要仪器有,中国地质科学院物探化探研究所研制的 DST-1、2、3A、3 型井中声波仪。该仪器设备包括:地面电火花声源系统,数据采集系统和处理系统,井下发射探头和声波接收器以及电缆和绞车。其主要特点是:①探测距离较大,地-井工作方式,实测深度已达 640m,井-井工作方式水平透距为 200m 左右;②分辨率高;野外实测的声波主频达到 250~4156Hz,可以分辨 0.68m 的薄层;③井下探管直径小(发射为 35mm,接收为 38mm);可应用于金属矿区小口径钻孔中工作;④具备地-井方式和井-井方式测量功能;⑤可以在套管中工作,这是井中声波透视与其他井中物探所不同的。

① 张友山. 实时、快速、直观区分激电效应研究报告, 2003.

应用条件是,对跨孔工作方式,双孔之间的水平距离最大为 200 ~ 300m。对地 - 井方式,钻孔中必须有泥浆或水,不能是干孔。

11 地下电磁波法^[8]

地下电磁波法是利用无线电波(工作频率在 0.5 ~ 32MHz)在钻孔或坑道中发射和接收,根据不同位置上接收的场强大小,来确定地下不同介质分布的一种地下物探方法,称为无线电波透视法(亦称为阴影法或井中无线电波法)。自 20 世纪 80 年代以来,在我国不断进行研究和开发,形成了一套新的技术体系。

根据发射和接收装置与探测目标体的位置关系又分为反射法和透射法。反射法(发射和接收装置均在地质体的同一侧,单孔电磁波法,就属于反射法);根据探测地质体反射的电磁波信号来确定地质体的位置和形态;透射法(发射和接收装置在地质体的两侧,双孔电磁波法和坑道透视法,就属于透射法)。根据电磁波穿透探测目标体后,能量发生的变化来确定目标体的空间位置和形态;如果对取得的数据进行层析成像(CT)解释,能更准确的圈定目标体的位置和形态。

在金属矿勘查中,地下电磁波法以双孔法最为常用。双孔法观测方式分为 3 种:①同步观测(在双孔中同步移动发射和接收天线进行观测);②定发射观测(固定发射,移动接收);③定接收观测(固定接收,移动发射)。可用于寻找井间盲矿体,判断两孔之间所见矿体是否相连,确定矿体产状等。

主要仪器有,中国地质科学院物探化探研究所研制的 JW-4 型井中电磁波仪。仪器的主要技术指标:发送功率 10W,接收机测量范围为 0.2 μ V ~ 30mv;钻孔仪外径为 ϕ 40mm;钻孔仪长度 1600mm。

12 结语

本文只是在参考大量文献资料的基础上,非常

简要地概述了传统的地面重磁方法的技术进步以及目前常用的物探新方法新技术,很不全面。

[参考文献]

- [1] 何继善. 电法勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 308 ~ 313.
- [2] 孙文珂, 王继伦, 齐文秀, 等. 我国金属与非金属矿产探的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 351 ~ 360.
- [3] 管志宁. 我国磁法勘探的研究与进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 299 ~ 306.
- [4] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [5] 牛之旌. 时间域电磁法原理[J]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.
- [6] 秦葆瑚. 高精度磁测方法指南[J]. 湖南地质, 1991, 增刊第 5 号: 1 ~ 7.
- [7] 雷振英. 井中声波透视测量和解释系统及其探测金属矿的应用效果[J]. 物探与化探, 1991, 5: 340 ~ 351.
- [8] 吴以仁, 周凤桐. 钻孔电磁波法[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [9] 王懋基, 蔡鑫, 涂承林. 中国重力勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 292 ~ 294.
- [10] 朱自强, 齐文秀, 黄国祥, 等. 分数维在湘南重力地改及密度校正中的应用[J]. 有色金属矿产与勘查, 1995, 4(2): 114 ~ 118.
- [11] 年宗元. 我国勘查地球物理的若干进展[J]. 物探与化探, 1992, 17(6): 401 ~ 412.
- [12] 年宗元. 我国勘查地球物理的若干进展[J]. 物探与化探, 1993, 18(6): 401 ~ 412.
- [13] 年宗元. 我国勘查地球物理的若干进展[J]. 物探与化探, 1994, 19(6): 401 ~ 412.
- [14] 年宗元. 我国勘查地球物理的若干进展[J]. 物探与化探, 1995, 20(6): 401 ~ 412.
- [15] GEONICS LIMITED, PROTEM 67D OPERATING MANUAL for 20/30 Gate Model - April 2002 Geonics Limited
- [16] 王家映. 我国大地电磁测深研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 211.
- [17] 刘光鼎. 20 世纪中国学术大典应用地球物理学[M]. 福州: 福建教育出版社, 2003.

NEW METHODS AND TECHNIQUES OF GEOPHYSICAL EXPLORATION IN METALLIC DEPOSITS

QI Wen - Xiu, LIU Tao

(Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012)

Abstract: New methods and techniques of geophysical exploration in metallic deposits are briefly introduced, including, (1) ground high - precision gravity prospecting, (2) ground high - precision magnetic prospecting, (3) transient electromagnetic methods, (4) controlled source audio - frequency magnetotellurics, (5) borehole acoustic tomography, (6) underground electromagnetic wave method, and (7) three frequency induced polarization method.

Key words: geophysical exploration, metallic deposits, new method, new techniques