矿产资源调查的物探方法和仪器设备

刘 国 栋
(北京欧华联科技有限责任公司,北京 100096)

摘 要:论述了矿产资源调查中的物探方法,应用条件,仪器设备及应用实例。其中包括磁法,重力,瞬变电磁法,频率域电磁法,直流电法和地震法等。

关键词:矿产资源调查;磁法;瞬变电磁法;频率域电磁法;地震法
中图分类号: P631 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000 - 8918(2007)S0 - 0035 - 06

笔者所指的矿产资源主要为有色金属矿和贵金属矿,如铜、铅 、锌、锡、钨、镍、铬、金、金刚石矿等。这类矿产资源具有不同的成因,控制条件和物理性质,形成了特征不同的地球物理场,因此对它们进行物探调查的方法也各异。例如有些矿产受构造和断裂控制或者呈层状产生,此时应主要采用地震方法和电磁法;有些矿产资源与岩浆岩或矽卡岩带有密切关系,此时应首先采用快速、廉价的磁法;有些矿产资源伴有高磁性,高密度或高波速,此时应采用对应的物探手段等。

由于不同物探方法的探测精度差异很大,以及物探数据的多解性,因此在矿产资源探测的不同阶段要采用不同的物探手段,并与地质资源密切结合,进行综合物探解释,以期获得更可观的结果。笔者就矿产资源调查中的一些物探方法和仪器设备做一些探讨。

1 磁法

磁法是最经典的物探方法。很多有色金属矿与岩浆岩充填的断裂带,矽卡岩带以及与岩浆活动伴随的热液活动带有关。由于岩浆岩一般都含有磁性物质,因此通过地面磁测可以快速的圈定与岩浆活动有关的有色金属矿远景区。此外某些金属矿伴生有磁铁矿,某些金属矿产在基性和超基性岩之中,某些金属矿与弱磁性的蚀变带有关,此时可利用磁法直接寻找这类矿产资源。

矿产资源调查中一般都观测全磁场 T。有多种观测全磁场 T的磁力仪,例如,质子磁力仪 (核旋),Overhauser磁力仪,光泵磁力仪 (钾光泵,铯光泵,氦光泵)和相应的磁场梯度仪。

标准质子磁力仪的分辨率高达 0.01 nT,精度为 1 nT; Overhauser磁力仪和光泵磁力仪的分辨率均是 ≥0.01 nT,精度高达 0.1 nT。在矿产资源调查中一般都应用质子磁力仪。近 3年来国内矿产资源调查部门共进口了 300多台 GSM-19T标准质子磁力仪,该仪器小型、轻便、全数字化、稳定,获得用户好评。磁场梯度仪主要用于确定磁异常边界和浅层探测,也可作为磁力仪使用。

2 重力

重力法主要用于寻找高密度的矿产资源以及与高密度基岩和超基性岩伴生的矿产资源。CG-5型重力仪和 BURRIS重力仪是当今观测精度最高的重力仪,其读数分辨率达 1×10^{-5} m/s^2,重复观测精度 $<5\times10^{-5}$ m/s^2 和 10×10^{-5} m/s^2。如果在山区使用如此高精度的重力仪进行观测,地改精度很难达到要求。地改不足或过剩,将出现与地形高差成镜像的假异常。

3 电磁法

电磁法是矿产资源调查和勘探中最常用的物探方法。电磁法可分三大类,即时间域电磁法,频率域电磁法和直流电法[1]。时间域电磁法有 2种,一种是通过观测由地面回线发射的一次场在地下介质中感应出的、随时间变化的二次场来探测地下电性结构,通常称为瞬变电磁法 (TEM);另一种是通过观测由地面偶极源发射的电流脉冲在地下介质中产生的、随时间变化的二次场来探测地下电性结构,称为长偏移距瞬变电磁法 (LOTEM)。

3.1 瞬变电磁法 (TEM)

瞬变电磁法分辨率高,探测深度适中 (与测区

收稿日期: 2007 - 09 - 29

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地下平均电阻率值有关)。它在圈定断裂,破碎带,蚀变带,岩浆岩接触带,地下电性分层等方面能提供较可靠的信息,对陡立的地质构造分辨程度高,可直接寻找高导矿体。

国内有多个单位研发或生产瞬变电磁仪,国外厂家生产的瞬变电磁仪有 PROTEM, PEM, terraTEM 以及 V8和 GDP-32系统中含有的瞬变电磁功能。

PROTEM瞬变电磁仪由加拿大 Geonics公司研发和生产。该公司自 1978年开始生产 EM37瞬变电磁仪,至今已更新换代 4次。目前生产的瞬变电磁仪有 PROTEM47, PROTEM47HP, PROTEM57-MK2, PROTEM67和加强型 PROTEM67,它们的主要区别是勘探深度不同,最大勘探深度可以达 1 500～2 000 m。此外,还有井中瞬变电磁仪。

在过去 4年中,国内已有 31家用户购买了 PROTEM瞬变电磁仪。PROTEM瞬变电磁仪的主要特点是:分辨率高,抗干扰能力强,工作效率高,三分量、30个观测道同时观测,工作温度 -40～60 ℃,防水,防潮,接收—发射相互分离,适应各种野外观测装置,工作稳定,重复准确率 100%。

下面例举几个 PROTEM瞬变电磁仪的应用实例。

图 1～图 3为 PROTEM57-MK2探测云南锡矿带实例。图 4是 EM37(PROTEM67前身)在澳大利亚探测金矿实例。图 5是 PROTEM对黑龙江乌拉嘎金矿深部找矿的勘探结果。图 5右上角 I号异常是低阻体,它与正在开采的金矿体一致,推测是由于岩石破碎程度较高,含金矿存于破碎带,蚀变,导致低

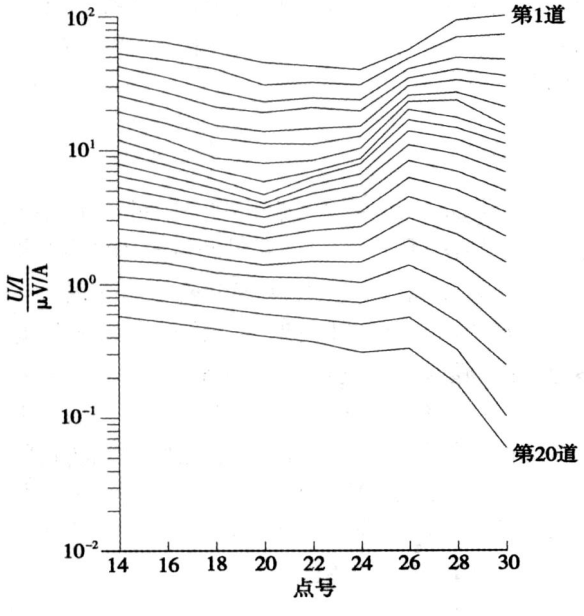


图 1 瞬变电磁场响应曲线

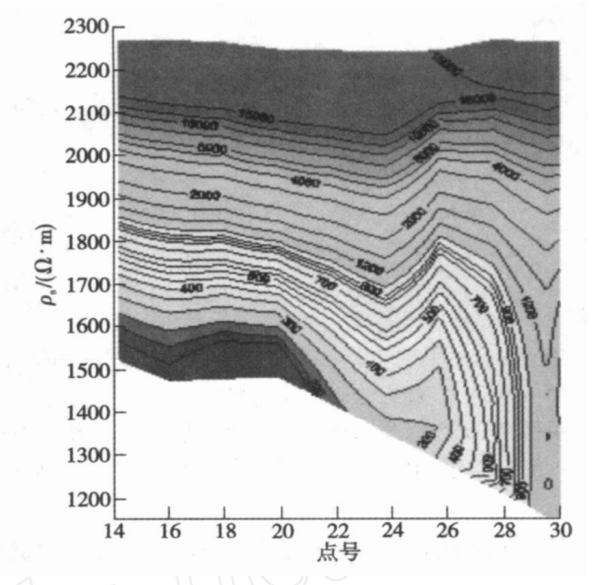
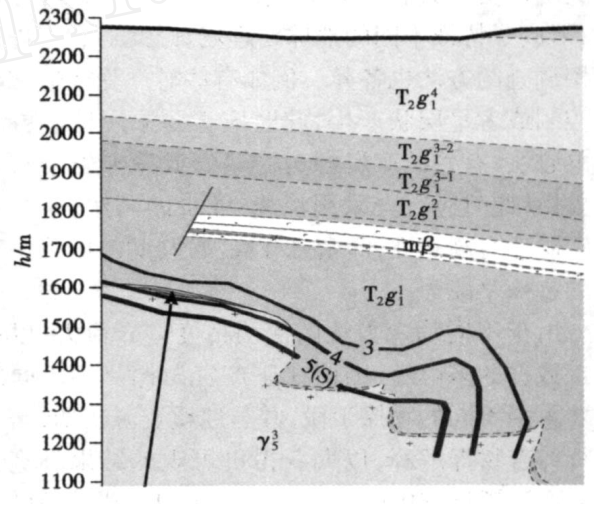


图 2 反演的视电阻率断面



图中的粗线为推断的锡矿带,已被钻探证实;根据云南省有色地质调查院资料,2006

图 3 地质解释断面

阻。据此推测剖面左侧的 II号低阻体以及深部的 III号低阻带,应是金矿区远景区[2]。

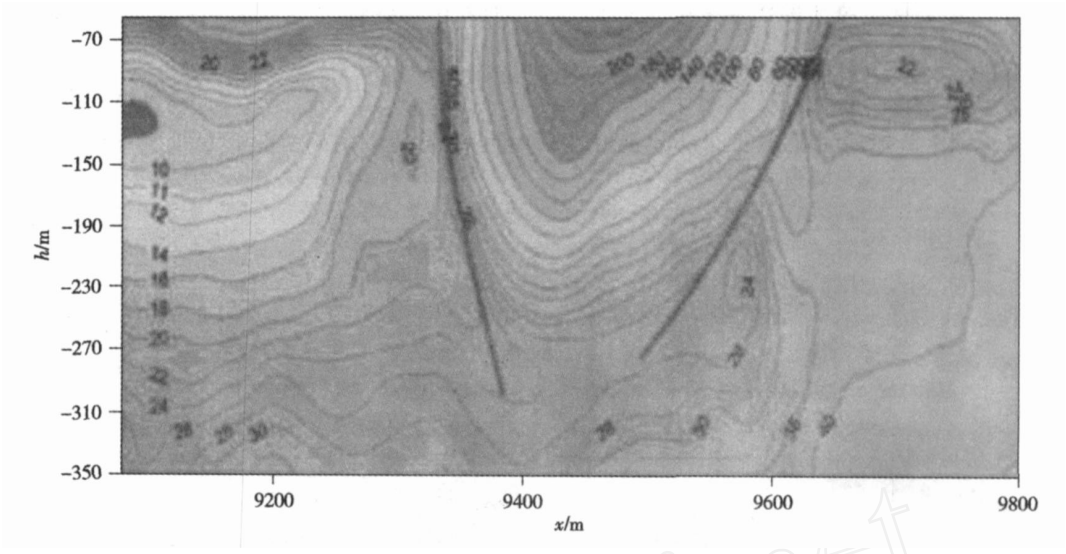
3.2 长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)

长偏移距瞬变电磁法是通过接地偶子向地下注入 100～200 A的脉冲电流,偶极长度 2 km,接地电阻要低至几欧姆,发电机功率高达几百千瓦,可见发射装置十分庞大。该方法即可观测对高导层敏感的、随时间变化的二次磁场分量,也可观测对高阻层敏感的、随时间变化的二次电场分量[3]。长偏移距瞬变电磁法的勘探深度可达 3～4 km,与测区地下平均电阻率值有关。很少见该方法在有色矿产资源调查中的应用。

3.3 频率域电磁法

频率域电磁法是通过在地面观测随时间变化的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



金矿赋存于受断裂控制的高阻流纹斑岩之中

图 4　用 EM37瞬变电磁仪测量曲线剖面

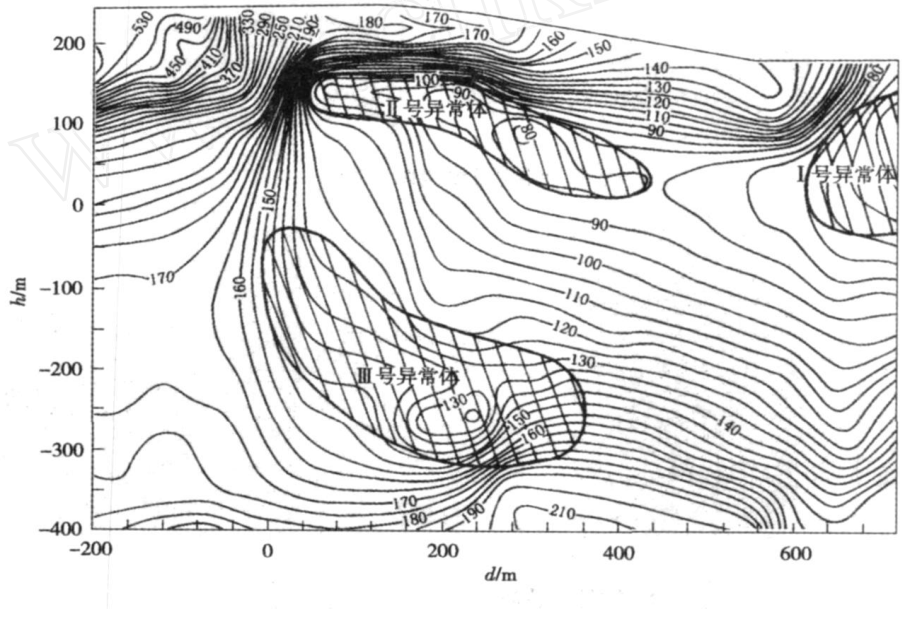


图 5　乌拉嘎金矿 127线 TEM 测量结果解释剖面

电磁场分量来探测地下的电性结构,其场源是太阳活动产生的电磁波或人工发射的电磁场。标准的频率域电磁法叫大地电磁法 (MT),它有很多变种,以适应不同的观测环境,例如远参道法用以解决局部电磁噪声干扰,电磁阵列法 (EMAP)用以解决静效应,电-电磁剖面法 (CEMAP)用以提高生产效率,可控源法 (CSAMT)用以提高信噪比。上述方法可以联合应用,以解决频率域电磁法中的各种问题。

频率域电磁法的主要优点是:勘探深度可从地表至几公里,乃至百公里,取决于仪器所能记录的频率范围;对高导层 (体)十分敏感,有利于寻找高导矿体;横向分辨率高,有利于圈定构造和岩体边界;仪器设备轻便;二维反演成熟,也可进行三维反演[4]。在矿产资源调查中的应用范围与瞬变电磁法类似。

目前世界上生产的大地电磁仪有 GMS-06, V5-2000, ACF-4M, V8和 GDP-32中含有的大地电磁功能。最近德国 Metronix公司在 30年研发和生产大地电磁仪的基础上,研制成功一种全新概念的 GMS-07综合电磁法仪。该仪器的特点是:频带范围 250 Hz~直流,为全频段电磁测量仪;有 10个数据采集道,因此一台仪器可同时完成 4个测点的观测任务,工作效率提高 4倍,也可作 EMAP处理;具有 CSAMT功能,可以人工源和天然源联合观测;一台小型主机进行数据采集控制和实时处理;可远程操控,随时下载或传递数据。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下面给出 2个大地电磁法探测金属矿的实例。

3.3.1 GMS-06大地电磁仪勘查铜镍矿实例

新疆图拉而根铜镍矿是全岩矿化超镁铁质岩浆硫化物型铜镍矿,为查明含岩矿体向深部的延伸情况在矿区进行了 2次大地电磁剖面勘探。图 6是 2004年勘探的 2条 MT剖面的解释结果。图 6a中部连续的低阻异常和图 6b中部 2个规模较小的低阻异常,是铜镍矿在深部的展布情况,并得到钻探证实[5]。

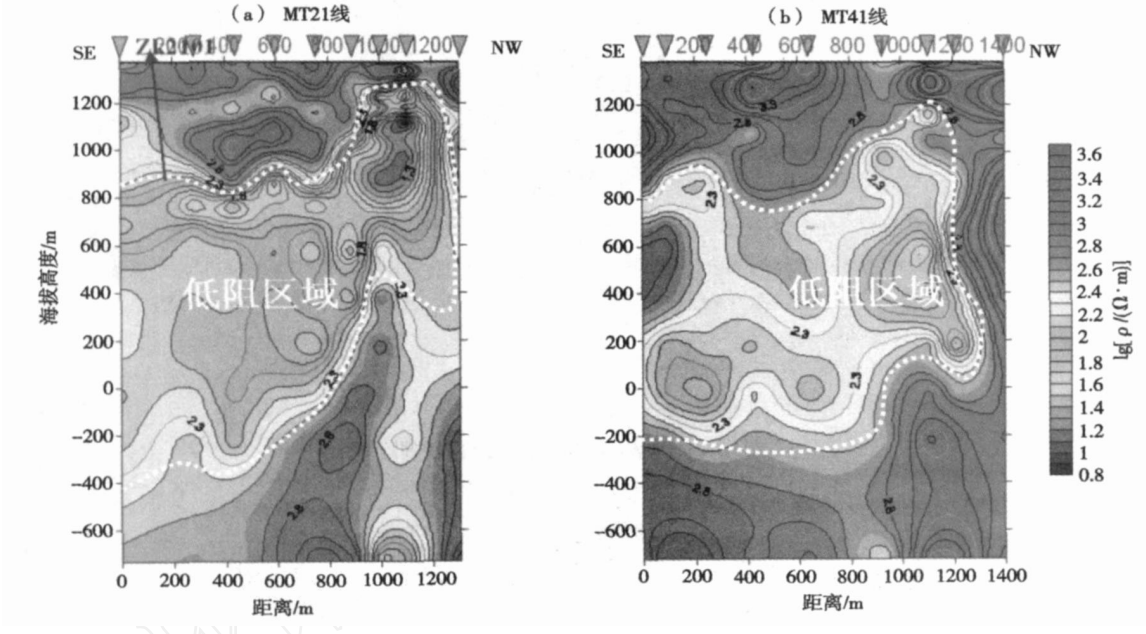


图 6 图拉而根电阻率断面

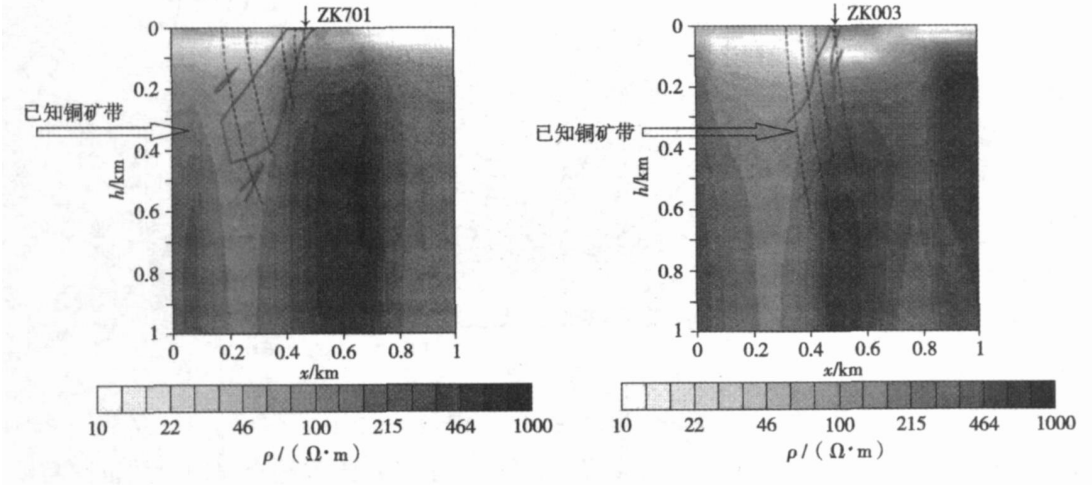
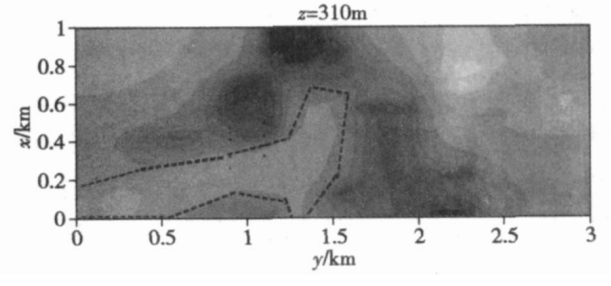


图 7 土屋铜矿体 MT电阻率断面 (铜矿体赋存在高低阻接触带中)

3.3.2 大地电磁法预测铜矿成矿带实例

为了预测土屋铜矿在深部的成矿地带,在该矿进行了详细的 MT勘探。从已知区勘探结果可见(图 7),铜矿分布在高阻体和低阻围岩的接触带中。为了预测深部成矿带,对全区所有 MT测点的观测结果作出不同深度的平切图,并对 310 m深处远景成矿做出预测(图 8)[6]。



有利成矿带由虚线圈出

图 8 土屋铜矿体 310 m深处有利成矿带预测

3.4 高密度电法

高密度电法由于采用多电极、小极距,多次叠加纵向密集分层,自选多种装置结构和有效的二(三)维反演等一系列技术,使其分辨率在电法勘探中最高,但勘探深度为最大供电距的 1/5,即不超过 200

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

m。高密度电法既可以获得细微的地下电性结构,也可以观测 IP值,所以在浅层金属矿勘探中能发挥很大作用。

目前比较著名的高密度电法仪有 RESECSⅡ和 AGI。

3.5 激发极化法

激发极化法是探测有色矿产资源的经典方法,它对于寻找浸染状矿和斑岩型矿有较好效果,因为这类矿物颗粒分散在岩体之中,互不相连,形不成低阻异常,但却可以产生较大的激电异常。然而较广分布的黄铁矿,石黑化和碳化岩体(层),往往产生更强烈的激电异常,很难与矿体异常区分,此外人文电磁噪声也会造成强烈干扰。

激发极化法的探测深度取决于测区平均电阻率值和人文噪声水平,在 *AB* 极距 1 000 m、接地电阻低至几欧姆情况下,其探测深度可达 200～300 m。为了提高信噪比往往采用大功率发射。V ip和 IPR-12是专用激电仪,V8和 GDP-32系统含有激电功能,最大发射功率为 30 kW。

4 地震法

在油气勘探,煤田勘探和工程勘探中地震法是最有效的物探方法,但笔者所论的矿产资源调查中地震法应用的比较少,主要原因是很多矿产资源多与岩浆活动有关,控矿构造倾角大,地震法很难取得有效数据。然而,有些矿产资源,例如与深海岩浆热液活动有关的铅锌矿,沉积型矿等往往为层状结构,此时利用地震法勘探可获得很好效果。此外,有些矿产资源伴生在高速体或低速体中,此时采用井中地震层析成像技术,往往能到达直接找矿的目的,下面给出 2个实例。

(1)爱尔兰的 Navan铅锌矿赋存于深 650 m的灰岩之中,为探测深至 1 000 m的控矿构造和矿产发育情况,采用 Summit地震仪进行了详细的反射法地震勘探。地震反射剖面如图 9所示,结合钻井资料解释后的地质断面如图 10所示。可见矿体在深部呈层状展布并被次级断裂切割。

(2)西班牙 Reocin锌矿是欧洲的第二大金属矿

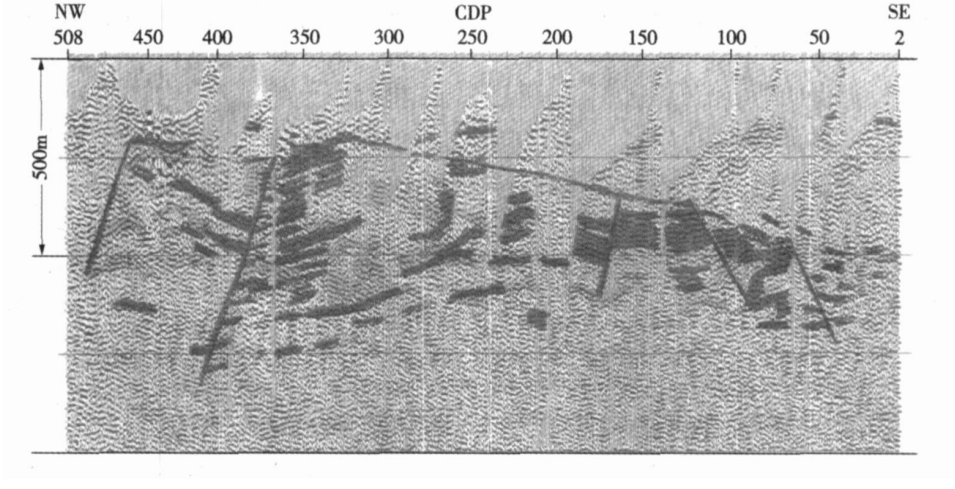


图 9　爱尔兰 Navan铅锌矿地震反射剖面 (V. Schaepe, 2007)

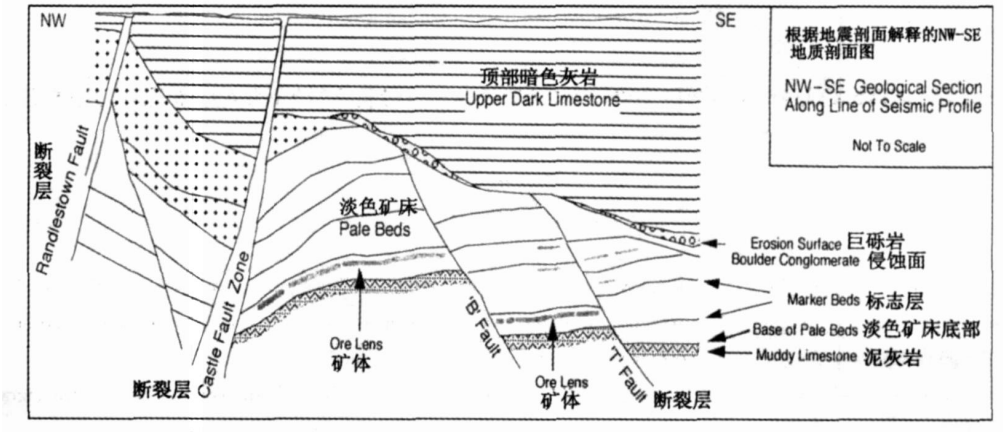


图 10　爱尔兰 Navan铅锌矿地震解释剖面 (V. Schaepe, 2007)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

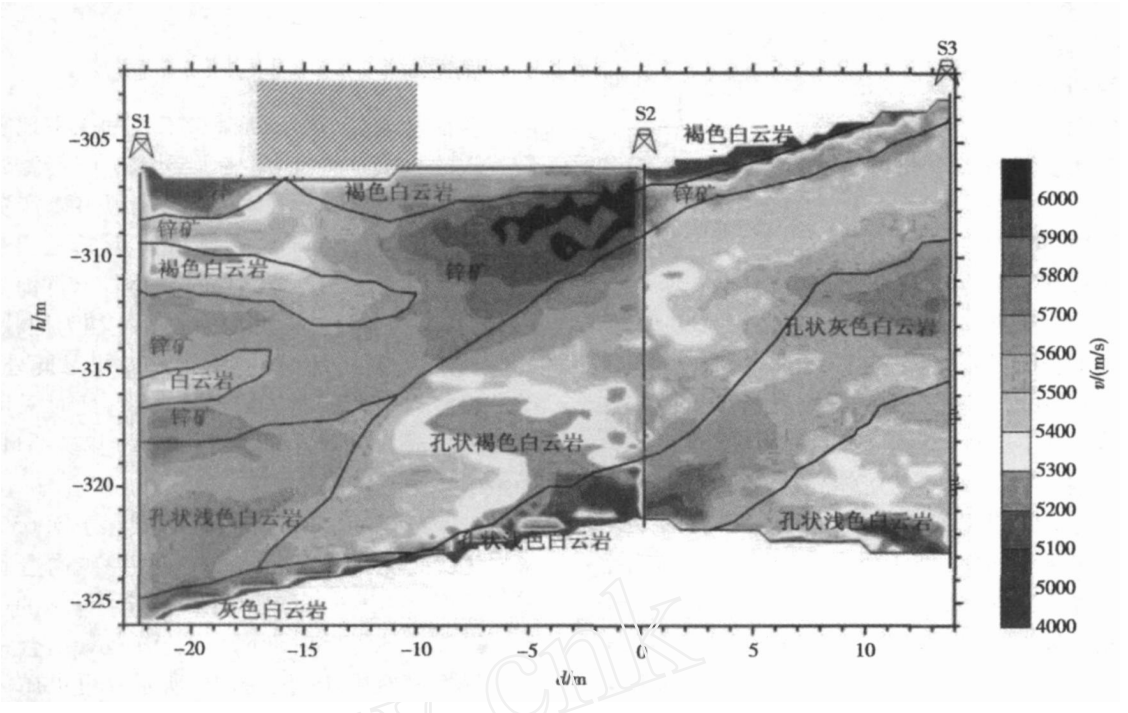


图 11 西班牙 Reocin锌矿地震层析成像断面 (V. Schaepe, 2007)

基地,年产量 200万 t。该矿赋存于厚层白云岩之中,主矿体被断层切割。为了获取现有采矿巷道下 22 m深以上的矿产信息,利用 Summit地震仪井中地震层析成像技术取得了成功结果 (图 11)。从图可见,赋存锌矿体的白云岩波速值高达 5 900 m/s,因此根据波速层析成像获得的速度图像就可以圈定未知矿体的位置。

Summit地震仪是德国 DMT公司的著名产品,在中国已有 40家用户。2006年研制成功的 Summit Ⅱ plus地震仪是最新一代产品,其采样率高达 20 μs,即 50 kHz,分辨率高达 24位,系统动态范围 160 dB,瞬时动态范围 120 dB,双道采样站具有强的数据处理功能,重 1.2 kg,道间距可变,笔记本电脑做主机,道数可无限扩展。非常轻便,稳定,特别适合山区和地形复杂地区开采二维和三维地震勘探工作。在过去一年中国内已有 10家用户购买了 Summit地震仪的新产品,即 Summit Ⅱ plus。

参考文献:

[1] 刘国栋. 电磁法及电法仪器的新进展和应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(增刊): 46.
[2] 张宝林,蔡新平,梁光河,等. 综合地球物理方法对金矿深部找矿靶区的验证 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(增刊): 346.
[3] 刘国栋,张木生,邓前辉,等. 唐山大震区的深部瞬变电磁法勘探 [A]. 电磁方法研究与勘探 [C]. 北京: 地震出版社, 1993.
[4] 胡祖志,胡祥云. 大地电磁三维反演方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2005(1).
[5] 梁光河,徐学旺,肖骑彬,等. 大地电磁测深法在铜镍矿勘查中的应用 [J]. 矿床地质, 2007, 26(1): 120.
[6] 谭捍东,李聪婿,王彩琪. 大地电磁三维反演在土层铜矿探测中的应用研究 ——三维反演解释 [J]. 地质与勘探, 2003: 21.

GEOPHYSICAL METHODS AND INSTRUMENTS FOR MINERAL RESOURCE SURVEY

LIU Guo-dong
(BOST, Beijing 100096, China)

Abstract: This paper deals with geophysical exploration methods used in mineral resource survey, their application conditions, instrument equipment and application examples. The techniques adopted include magnetic method, gravity, transient electromagnetic method, frequency domain electromagnetic method, direct current method and seismic method.

Key words: mineral resource survey; magnetic method; transient electromagnetic method; frequency domain electromagnetic method; seismic method

下转 52页

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$-4\pi\delta_{di}$,式中,δ_{di}是面电荷。

磁法梯度测量,即在 2个不同高度观测磁场的差值;在岩性测深中,实际上是测量 2个不同频率(或不同深度)电场的差值。

在磁法勘探中,可以作向上或向下延拓处理。如果向下延拓时,当延拓到矿体的深度时,曲线值会突变,由此可以得到矿体的深度。在岩性测深中,测量的 2个不同频率的电场差值,实际上就是向下延拓,延拓到某个极化体的深度时,曲线也会突变。

表 1列出了岩性测深的理论基础与磁力勘探的理论基础,以便强调它们之间的可比性。

表 1 岩性测深与磁力勘探对比

	磁力勘探	岩性测深
理论基础	磁偶极子场	电偶极子场
上半空间 下半空间	拉普拉斯方程 $\Delta U_c=0$, 泊松方程 $\Delta U_c=-4\pi\delta_i$	拉普拉斯方程 $\Delta \cup_d=0$; 泊松方程 $U_d=-4\pi\delta_i$
测量方式	可以不同高度进行梯度测量	用不同频点进行微分测量
测量方法	利用剖面曲线值向下延拓,求得磁性体深度	用不同频点向下测量,求得极化体深度

3 结语

磁力勘探是地球物理勘查方法大家族中应用最早、研究最多的一种物探方法。通过对磁力勘探与岩性测深理论基础的对比,能看到这 2种物探方法在理论基础方面有太多的可比性,由此可以探讨岩性测深微分方程的建立及正演计算的方法,从而为岩性测深理论基础的研究提出一条思路。

参考文献:

[1] 杨庆锦. 大地电场岩性测深原理及方法技术的探讨[J]. 地球物理学进展, 1999(3): 79.
[2] 杨庆锦. YW-Ⅱ型大地电场岩性测深仪的理论基础及物性基础的探讨[J]. 地质与勘探, 2003, 39: 103.
[3] 杨庆锦. 关于岩性测深与 MT测深理论基础的问题[A]. 中国地球物理学会年刊[C]. 西安:长安大学出版社, 2004.
[4] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社, 2004.

A COMPARISON OF THE THEORETICAL BASIS BETWEEN MAGNETIC EXPLORATION AND LITHOLOGIC SOUNDING

YANG Ling[1], YANG Qing-jin[2]

(1. *National Earthquake Response Support Service, Beijing* 100049, *China*; 2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang* 065000, *China*)

Abstract: This paper sums up the theoretical and physical basis of the lithologic sounding, and points out that the electrical dipole field is the basic theory of the lithologic sounding. Based on an analogy of the electrical dipole field with the electrical dipole field as well as a comparison between the lithologic sounding and the magnetic exploration, this paper puts forward the theoretical basis for lithologic sounding research and the train of thought for forward calculation.

Key words: lithologic sounding; magnetic exploration; electrical dipole field; electrical dipole field

作者简介:杨凌(1973-),男,工程师。毕业于长春科技大学应用地球物理系,主要从事地震灾害电磁场的观测和预报研究。

上接 40页

作者简介: 刘国栋(1934-),男,1965年中国科学院研究生毕业,师从著名的地质学家张文佑教授和著名的地球物理学家顾功叙教授。先后在中国科学院地球物理研究所、地质研究所学习和工作,1985～1995任中国地震局地质研究所任副所长。发表著作 3本,论文 105篇,获国家科技进步二等奖和国家自然科学三等奖各一次、部级科技进步一等奖和二等奖 6次,被授予李四光奖和对国家有突出贡献专家称号。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net